

3 LES LOIS DE NEWTON

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. Combien de temps faut-il pour que cette fusée parcoure 1 km en partant du repos ?



© Time & Life Pictures/Getty Image
www.dailymail.co.uk/news/article-1106231/Murphys-Law-rules-Sixty-years-mishap-WAS-Mr-Murphy.html

Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.

3.1 LES FORCES

Dans les deux chapitres précédents, nous avons simplement décrit le mouvement des objets sans nous soucier de ce qui causait ce mouvement. En d'autres termes, nous avons fait de la *cinématique*. Nous allons maintenant voir comment on peut mettre un objet en mouvement ou le garder en équilibre.

Il semble assez évident 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 charriot d'épicerie pour le mettre en mouvement.



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

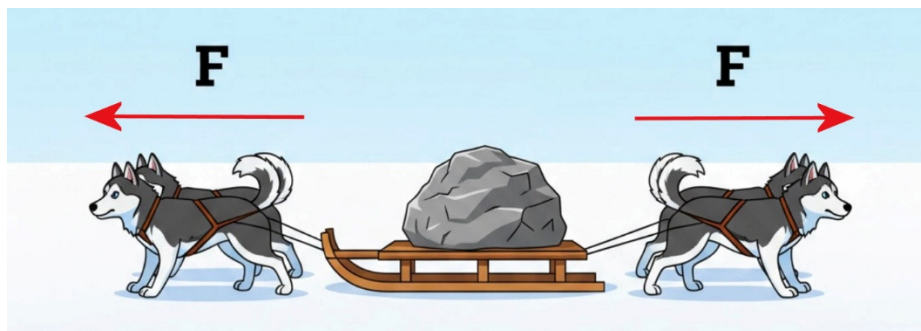
- La force gravitationnelle
- La force musculaire
- La force de friction
- La force électrique
- La force magnétique

Toutes ces forces peuvent mettre des objets en mouvement.

Intuitivement, on pourrait donc dire que *la force est une action (poussée ou traction) exercée pour changer l'état d'un objet.*

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

On peut assez rapidement déterminer ce qui arrive quand il y a plusieurs forces qui s'exercent sur un objet. Dans ce cas, il faudra trouver la force résultante de ces forces. 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.



Les chiens de traîneau tirent avec une force F de chaque côté du traîneau. On se doute bien que la force résultante n'est pas $2F$ et que les forces vont plutôt s'annuler. Cela montre bien que la direction de la force est importante et, donc, que les forces sont des vecteurs.

Donc, si on veut obtenir la force nette agissant sur un objet, il faut faire la somme vectorielle des forces agissant sur l'objet.

Force nette ou force résultante

$$\vec{F}_{\text{nette}} = \sum \vec{F}$$

Il faut maintenant découvrir quel est l'effet de cette force nette agissant sur un objet. Autrement dit, il faut trouver les lois de la dynamique. On étudie l'effet des forces depuis près de 2500 ans, mais les véritables lois de la dynamique ont été trouvées il y a un peu moins de 350 ans. Pourquoi a-t-il fallu près de 2000 ans avant qu'on trouve ces lois ?

3.2 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.

(Pour une version plus détaillée de cette section, cliquez ici <https://physique.merici.ca/mecanique/avantNewtonv2.pdf>)

On associe la force à la vitesse

Les premières théories connues concernant la dynamique datent de l'époque de la Grèce antique. Dans ces théories, la force est associée à la vitesse de l'objet, ce qui signifie que si on veut qu'un objet se déplace, on doit appliquer une force sur l'objet. Plus la force exercée est grande, plus la vitesse de l'objet est grande. On a donc rapidement associé la force à la vitesse d'un objet. Quand on associe la force nette à la vitesse, les éléments suivants sont à la base de la théorie.

L'effet d'une force si on associe la force à la vitesse (théories erronées acceptées durant près de 2000 ans)

$$v = 0 \text{ si } F = 0$$

$$v = \text{constante si } F = \text{constante}$$

Si F augmente, alors v augmente

On a souvent utilisé une force proportionnelle à la vitesse $F \propto v$, mais certains ont aussi utilisé une force proportionnelle au carré de la vitesse $F \propto v^2$.

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 a constitué la base de toutes les théories du mouvement durant plus de 2000 ans. D'ailleurs, il est assez facile de trouver des gens qui font encore 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 se déplacer deux fois plus rapidement. Il y a là une association claire entre la vitesse et la force. Faites le test autour de vous pour voir la réponse.

Cependant, l'association entre la force et la vitesse mène rapidement à de sérieux problèmes. De tous ces problèmes, le mouvement des objets lancés était le plus important.

Le problème des objets lancés

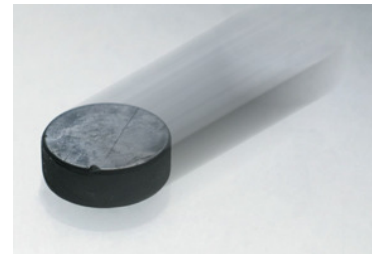
Pour illustrer cette difficulté avec les objets lancés, imaginons qu'on pousse une rondelle de hockey avec un bâton et que la rondelle glisse ensuite sur la glace sur une certaine distance.

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

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.

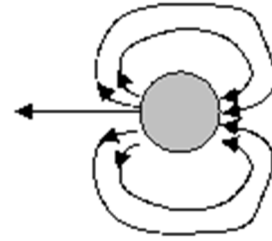


inst.eecs.berkeley.edu/~cs61c/sp10/assignments/ice/

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.

Une force faite par l'air ?

Aristote, qui a fait une des premières théories du mouvement associant la force et la vitesse, pense que cette force est exercée par l'air. Il y a eu plusieurs mécanismes proposés, mais l'air doit ultimement être responsable de la poussée. Dans une version simple, la rondelle pousse sur l'air quand elle avance. L'air 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 !



www.mathpages.com/home/kmath641/kmath641.htm

Une force imprégnée ?

D'autres pensent que la force vient de l'objet lui-même. C'est la théorie de la force imprégnée (qui prit plusieurs noms selon les époques et les endroits, le plus connu étant l'*impétus*).

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 et c'est cette force qui lui permet de se déplacer. 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 cesse 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 force ne vient plus de l'extérieur de l'objet, comme c'était le cas avec les tourbillons d'air. Elle vient maintenant de l'objet en mouvement lui-même.

Une théorie qui ne surmonta jamais ses difficultés

L'association entre la force et la vitesse fait en sorte que la physique ne progresse pas jusqu'au 17^e siècle.

La théorie des tourbillons d'air piétine. Les tourbillons semblent trop complexes pour qu'on puisse prédire quoi que ce soit et on ne détecte pas ces mouvements d'air autour des objets en mouvement.

Quant à la théorie de la force imprégnée, elle semble se contredire elle-même. D'une part, la théorie dit que la force est proportionnelle à la vitesse ($F \propto v$). D'autre part, la théorie dit qu'une force appliquée sur un objet ajoute de la force imprégnée dans l'objet. Cela voudrait dire que la force imprégnée augmente et donc que la vitesse augmente. Ainsi, la force appliquée serait proportionnelle au changement de vitesse ($F_{\text{appliquée}} \propto \Delta v$). Ainsi, on a une théorie avec deux types de force : une force associée à la vitesse et une force appliquée associée au changement de vitesse. Le problème, c'est qu'on fait rarement la distinction entre ces 2 types de force et il y a beaucoup de confusion !

Avec cette théorie, on n'a jamais réussi à faire une formule qui permet de calculer la vitesse d'un objet à partir des forces qui s'appliquent sur un objet. Par exemple, on sait que la friction (qu'on appelle souvent résistance) doit faire diminuer la vitesse de l'objet, mais on ne sait pas trop si on doit diviser la force par la résistance ou si on doit soustraire la résistance de la force.

Quand on a décidé d'associer la force à l'accélération, toutes ces difficultés sont disparues.

3.3 LA PREMIÈRE LOI DE NEWTON

Quand on associe la force nette à l'accélération, on a les relations suivantes.

L'effet d'une force si on associe la force nette à l'accélération

$$a = 0 \text{ si } F = 0$$

$$a = \text{constante si } F = \text{constante}$$

Si F augmente, alors a augmente

Cette association est précisée par les 2 premières lois de Newton. Commençons par la 1^{re} loi de Newton.

La loi

Quand on associe la force à l'accélération, une force nulle donne une accélération nulle. Cela signifie que la vitesse est constante quand il n'y a pas de force.

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 pas 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 cette loi.

Quelques observations qui illustrent la loi

Selon la 1^{re} loi de Newton, on devrait voir que la vitesse reste la même quand on réussit à éliminer les forces qui agissent sur l'objet. La station spatiale est évidemment un excellent endroit pour faire ce genre de démonstration parce que les objets peuvent se déplacer sans devoir glisser sur une autre surface et sans tomber vers le plancher de la station. Il ne reste alors qu'une petite force de friction de l'air qui s'oppose au mouvement. On s'approche d'une situation où les forces sont nulles. On peut alors observer le mouvement d'un objet

sur lequel il n'y a presque pas de force. Ce mouvement correspond à ce que prévoit la 1^{re} loi de Newton.

<https://www.youtube.com/watch?v=gtw6UcHYqHg>

<https://www.youtube.com/watch?v=pRnslxr3eKc>

On peut aussi voir 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 parebrise. Regardez bien la personne continuer avec sa vitesse initiale pendant la collision dans ce vidéo (première moitié du vidéo).

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

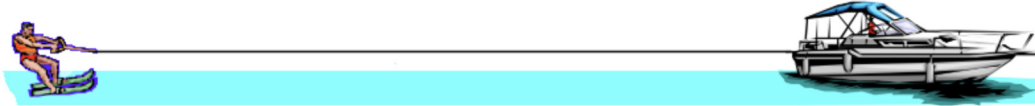
Une loi contrintuitive

Bien que la 1^{re} loi de Newton soit simple, il faut vraiment insister sur le fait qu'elle va à l'encontre du gros bon sens de ce qu'on observe dans la vie de tous les jours. En l'absence de force pour les propulser, les objets autour de nous n'ont pas tendance à continuer leur mouvement à vitesse constante. Ils ont plutôt tendance à arrêter leur mouvement au bout d'un certain temps, ce qui laisse penser que les objets ont plutôt tendance à s'arrêter qu'à continuer leur mouvement à vitesse constante. Si vous relâchez l'accélérateur de votre voiture alors que vous roulez sur une route horizontale, la voiture ne continue pas à vitesse constante, elle ralentit. Si vous frappez une boule de billard, elle finit par s'arrêter après quelques rebonds (si elle n'est pas tombée dans une des poches). Évidemment, tous ces ralentissements sont dus aux forces de friction et si on parvenait à éliminer complètement ces forces, on aurait la possibilité d'observer si la vitesse des objets reste constante. Comme c'est très difficile d'éliminer ces forces de friction dans la vie quotidienne, on n'a jamais l'occasion d'observer des phénomènes qui nous donneraient une intuition en accord avec la 1^{re} loi de Newton.

C'est pour cette raison qu'on a longtemps pensé que l'« état naturel » des objets est d'être au repos et qu'il fallait une force pour qu'un objet se déplace à vitesse constante. C'est aussi pour cette raison que plusieurs étudiants vont facilement retomber dans cette physique prénewtonnienne qui associe la force à la vitesse en se fiant à leur intuition. Même si on vous a présenté la 1^{re} loi de Newton au secondaire et qu'on vous la présente encore

une fois dans ce cours, plusieurs étudiants répondent de façon erronée à des questions conceptuelles de 1^{re} loi de Newton. Prenons un exemple pour illustrer.

Daphnée fait du ski nautique. Si elle se déplace à vitesse constante, dans quelle direction est la force nette sur Daphnée ?



- a) *Vers le bas.*
- b) *Vers le haut.*
- c) *Vers la droite.*
- d) *Vers la gauche.*
- e) *Il n'y a pas de direction puisque la force nette est nulle.*

Ici, la bonne réponse est e. Puisque la vitesse de Daphnée est constante, la force nette doit être nulle selon la 1^{re} loi de Newton. Pourtant, presque la moitié des étudiants répondent *vers la droite* à cette question. Ils se disent que, puisque Daphnée se déplace vers la droite, la force doit être vers la droite. Clairement, ces étudiants, malgré tous efforts de tous leurs professeurs de physique pour leur faire comprendre la 1^{re} loi de Newton, se fient à leur intuition qui, très souvent, est une physique prénewtonnienne qui associe la force à la vitesse et non pas à l'accélération.

La découverte de la loi

Newton n'a pas découvert la 1^{re} loi de Newton. Quand Newton publie ses lois, la loi de l'inertie est presque unanimement acceptée depuis près de 40 ans. Newton le sait et il ne prétend pas avoir découvert cette loi.

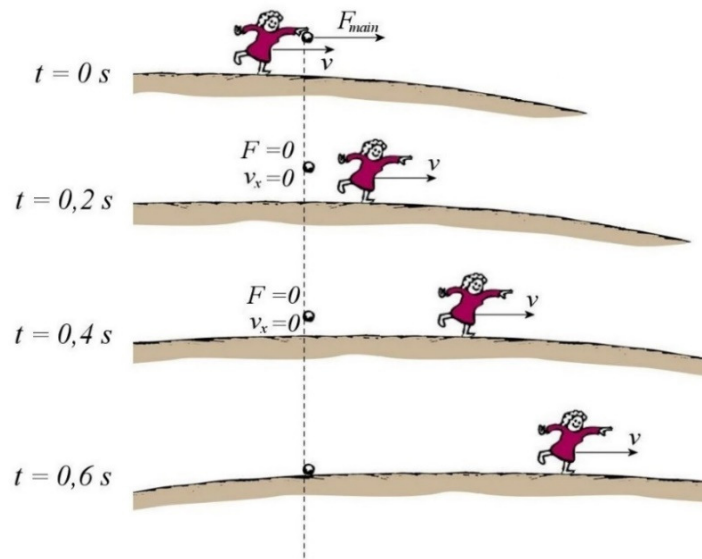
Une vitesse de grandeur constante

Il faut attendre le début du 17^e siècle avant de voir apparaître les premiers arguments en faveur de la 1^{re} loi de Newton. Dans les théories de Isaac Beeckman (formulées vers 1613, jamais publiées, mais qui ont exercé une influence importante sur René Descartes) et de Galilée (publiées pour la 1^{re} fois en 1632), on affirme que les objets continuent à vitesse constante à moins que quelque chose ne vienne modifier leur mouvement. Dans ces théories, le mouvement se fait à vitesse constante sans qu'on invoque une force imprégnée responsable de ce mouvement. Dans ces versions, seule la grandeur de la vitesse reste constante en l'absence de force. L'objet pourrait donc faire, par exemple, un mouvement circulaire uniforme en l'absence de force.

Pourquoi au début du 17^e siècle ?

Pourquoi cette idée fait-elle son apparition au début du 17^e siècle ? C'est qu'à ce moment, on doit expliquer comment la Terre pourrait tourner autour du Soleil sans qu'il y ait d'effets sur Terre. Si la Terre tourne autour du Soleil, alors la loi de l'inertie doit être vraie. Voyons pourquoi.

En 1543, Nicolas Copernic avait proposé un modèle dans lequel la Terre tourne autour du Soleil (alors qu'on croyait jusque-là que c'était le Soleil qui tournait autour de la Terre). Il y avait cependant une objection majeure à ce modèle : selon la physique qui associe la force à la vitesse, ce mouvement de la Terre aurait des effets importants. Pour comprendre le problème, imaginons que quelqu'un laisse tomber une pierre au sol pendant que la Terre se déplace. Que devait-il se passer selon la physique qui associe la force à la vitesse ? Tant que la pierre est dans la main de la personne, on pourrait dire que la main de la personne fait une force sur la pierre qui permet à celle-ci de se déplacer à la même vitesse que la Terre. Toutefois, quand la personne lâche la pierre, il ne peut plus y avoir de force horizontale sur la pierre. Ainsi, la pierre ne peut plus avancer. La pierre devrait donc s'arrêter pendant que la Terre continue son mouvement. On aura alors la situation montrée à droite, si on suppose que la durée de la chute de la pierre est de 0,6 seconde.

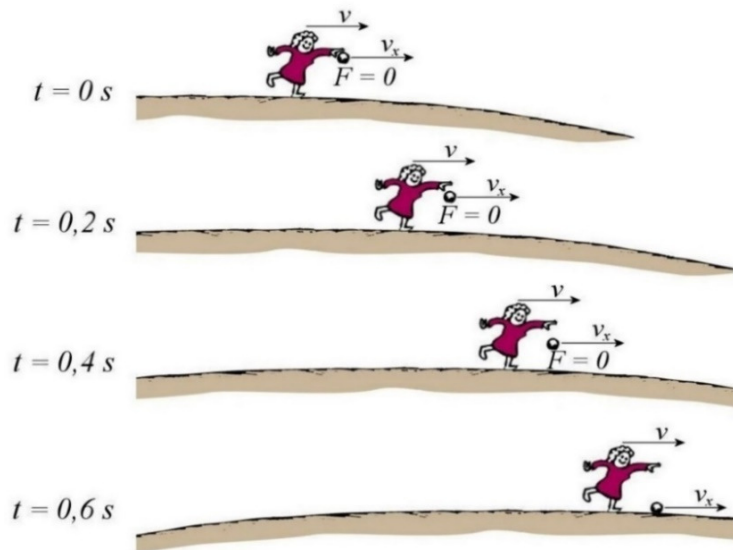


slid.es/tofergregg/gravity-and-fluid-dynamics/fullscreen/#/22

La personne sur Terre verrait donc la pierre tomber derrière elle (si elle regarde dans la direction du mouvement de la Terre). Si la Terre se déplaçait à seulement 10 m/s et qu'il faut 0,6 seconde pour que la pierre tombe, cela voudrait dire que la Terre aurait avancé de 6 m pendant que la pierre est restée à la même position en x . La pierre serait donc tombée 6 m derrière la personne. En fait, la distance serait bien plus grande. Puisque la Terre se déplace à près de 30 km/s autour du Soleil, la pierre tomberait environ 18 km derrière la personne. De toute évidence, les objets ne tombent pas comme ça quand on les laisse tomber. En raisonnant ainsi, on peut déduire toute une série d'effets qu'on devrait observer si la Terre se déplaçait ou si elle tournait sur elle-même. Notons particulièrement ce vent qu'il devrait y avoir continuellement à la surface de la Terre. L'air entourant la Terre ne pourrait pas se déplacer avec la Terre et on aurait alors une Terre en déplacement dans de l'air au repos. Cela donnerait l'impression qu'il y a un vent continu dans le sens contraire du déplacement de la Terre. Comme on n'observe pas ces effets, la plupart des savants de l'époque en concluent qu'il est impossible que la Terre se déplace ou qu'elle tourne sur

elle-même. C'est un problème important pour ceux qui, comme Galilée, pensent que la Terre tourne vraiment autour du Soleil. Il fallait éliminer cette objection.

Toutefois, on élimine le problème si on suppose que l'objet garde sa vitesse quand il n'y a pas de force. Reprenons l'exemple de la pierre. Quand on lâche la pierre, il n'y a pas de force horizontale sur la pierre, ce qui signifie que la vitesse horizontale de la pierre doit rester la même. Ainsi, la vitesse en x de la pierre reste toujours identique à celle de la Terre et elle avance au même rythme que la Terre. Cela l'amène à toucher le sol devant la personne, directement sous la main de la personne. C'est exactement la même chose que ce qu'on observerait si la Terre ne se déplaçait pas.

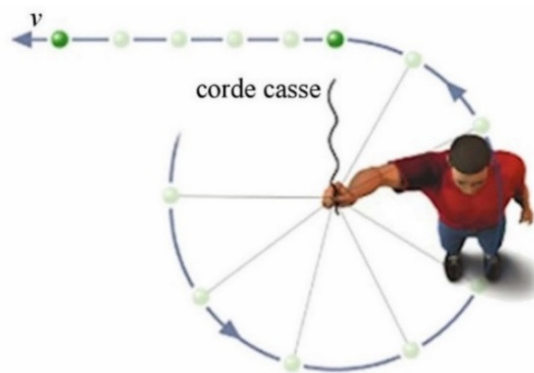


En utilisant des arguments similaires, on peut montrer qu'on ne verrait aucune différence entre ce qui se passe à la surface d'une Terre immobile et à la surface d'une Terre en mouvement à vitesse constante. Le mouvement de la Terre serait imperceptible (c'est le principe de relativité qu'on verra un peu plus loin).

Un mouvement en ligne droite

Avec Beeckman et Galilée, on n'a pas encore tout à fait la loi de l'inertie. Dans ces théories, les objets continuent avec une vitesse dont la grandeur est constante en l'absence de force, mais la direction de la vitesse peut changer. Ainsi, un objet pourrait très bien faire un mouvement circulaire à vitesse constante en l'absence de force appliquée dans ces théories.

Plusieurs disciples de Galilée ont rapidement précisé la pensée de leur maître. Cavalieri (1632), Torricelli (1644) et Baliani (1646) précisent que le mouvement à vitesse constante doit se faire en ligne droite en l'absence de force. Pour justifier cette idée, ils reprennent souvent l'exemple de la fronde dans lequel une personne fait tourner une pierre attachée au bout d'une corde. Si la corde casse ou si la personne lâche la corde, la pierre ne continue pas son mouvement



astronomy.nmsu.edu/tharriso/ast105/Ast105week04.html

circulaire, elle fait un mouvement en ligne droite. Elle continue en ligne droite dans la direction qu'elle avait quand la force a cessé (en plus de tomber bien sûr). (Benedetti avait déjà utilisé cet exemple en 1585 pour justifier un mouvement en ligne droite en l'absence de force, mais il ne pensait pas que la vitesse devait être constante.) Toutefois, tout comme Galilée, ils ne parviennent pas à imaginer qu'un objet ne puisse pas être soumis à la gravitation et n'arrivent donc pas à une formulation générale de la loi de l'inertie qui fait référence à des objets sur lesquels la force nette est nulle.

La loi de l'inertie

Certains ont affirmé que la grandeur de la vitesse était constante en l'absence de force et que d'autres ont affirmé que la direction du mouvement devait être constante en l'absence de force. Pour arriver à la loi de l'inertie, il fallait combiner ces deux affirmations.

Gassendi semble être le premier à le faire en 1641, mais il y a tellement de contradictions entre ses idées qu'il est difficile de dire s'il y croit vraiment.

On considère donc que c'est René Descartes qui, dans un ouvrage publié en 1644 et qui aura beaucoup d'influence, énonce correctement la loi de l'inertie pour la première fois. Fortement influencé par la théorie de Beeckman, Descartes arrive à une formulation de la loi qui est pratiquement identique à notre 1^{re} loi de Newton d'aujourd'hui en insistant sur le fait que la grandeur et la direction de la vitesse doivent rester constantes.

Que chaque chose, pour autant qu'il est en elle, persévère toujours dans le même état ; et ainsi ce qui a commencé une fois de se mouvoir, s'efforcera toujours de se mouvoir. Que tout mouvement est par lui-même droit ; (...).

Peut-on démontrer la 1^{re} loi de Newton ?

Comment Galilée et Descartes ont-ils pu convaincre les autres savants que la loi de l'inertie est valide ? Ont-ils invoqué des expériences cruciales qui montraient hors de tout doute que cette loi était valide ? Non.

En fait, il est très difficile de prouver expérimentalement que la 1^{re} loi de Newton est vraie. Pour y arriver, il faudrait examiner ce qui se passe dans des conditions où il n'y a pas de forces externes, ce qui n'est pas vraiment possible. Dès 1643, Roberval argumentait que la loi n'était pas prouvée parce qu'elle est une extrapolation de ce qu'on pense qui se passerait s'il n'y avait pas de forces. Par exemple, on dit que la vitesse serait constante s'il n'y avait pas de friction, mais on n'a jamais pu vérifier cela parce qu'on n'est jamais parvenu à éliminer complètement la friction. Même dans la station spatiale, il y a des forces externes puisqu'il y a encore de la friction de l'air et de la gravitation faite par la Terre (qui est presque aussi grande qu'à la surface de la Terre comme on le verra au chapitre 6). Alors, si on n'a jamais pu vérifier cette loi et si elle est une simple extrapolation de ce qu'on pense qui se passerait dans certaines conditions impossibles à réaliser, comment sait-on que la loi est vraie ?

La 1^{re} loi de Newton est en fait l'axiome de départ de la mécanique moderne. On n'a pas à la prouver parce qu'elle représente ce qu'on suppose qui est vrai. Elle définit ce qu'on considère comme étant le mouvement de référence qui n'a pas à être expliqué par des forces. On a simplement décidé qu'on n'avait pas besoin d'expliquer comment se fait le mouvement en ligne droite à vitesse constante. C'est uniquement quand un objet ne suit pas ce mouvement de référence qu'on dit qu'une force agit sur l'objet. Le choix du mouvement naturel de référence comme étant le mouvement à vitesse constante semble alors tout à fait arbitraire. C'est vrai, mais on a le droit de le faire parce que c'est nous qui avons inventé le concept de force et on peut bien le définir comme on le veut !

Ainsi, la transformation de la physique dans la première moitié du 17^e siècle est en fait un changement du mouvement qu'on considère comme le mouvement naturel. Auparavant, on considérait que le repos était le mouvement de référence qui ne nécessite pas d'explication. Ainsi, dès que l'objet n'était pas au repos, on devait expliquer le mouvement par une force agissant sur l'objet. Avec la 1^{re} loi de Newton, on considère maintenant que c'est le mouvement à vitesse constante qui est le mouvement de référence qui ne nécessite pas d'explication. Il n'est plus nécessaire de chercher la force qui fait avancer l'objet à vitesse constante, mais on doit maintenant chercher les forces quand la vitesse de l'objet n'est pas constante. En changeant ainsi le mouvement de référence, on a en fait changé la définition de ce qu'est une force.

Ce changement a permis de faire de grands progrès. Pour bien illustrer ce point, voici ce qui se passe selon la 1^{re} loi de Newton quand on pousse une rondelle. 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. Sans accélération, elle continue sa glissade à vitesse constante (s'il n'y a pas de friction). Selon la 1^{re} loi de Newton, il est donc tout à fait normal que la rondelle continue son mouvement. Avec la 1^{re} loi de Newton, il n'est plus nécessaire d'invoquer un mouvement d'air ou une force imprégnée pour que la rondelle puisse se déplacer. Alors qu'on débattait depuis longtemps pour trouver l'origine de la force qui devait faire avancer les objets lancés dans les anciennes théories, cette force disparaît complètement quand on associe la force à l'accélération.

Assez rapidement, on s'est rendu compte que le fait d'associer la force à l'accélération permet d'obtenir une physique plus simple et plus cohérente qui permet de trouver des formules de forces et de faire des prédictions. Par exemple, quand on prend le repos comme référence, on ne pouvait pas prévoir comment devait se faire la chute d'un objet parce qu'on ne parvenait pas à faire une formule simple de la force de gravitation. Un objet qui tombe pourrait avoir n'importe quelle vitesse à une hauteur de 5 m (puisque sa vitesse pourrait prendre n'importe quelle valeur à cet endroit selon la hauteur à laquelle il a été relâché). Comment pouvait-on alors obtenir une formule simple de la force de gravitation agissant sur l'objet quand il est à une hauteur de 5 m quand on associe la force à la vitesse si la vitesse peut prendre à peu près n'importe quelle valeur à cet endroit ? Quand on prend associe la force à l'accélération, on peut obtenir une formule de la force de gravitation sur un objet. Comme l'accélération est constante, la force est simplement une force constante.

C'est une formule beaucoup plus simple et on peut utiliser cette formule pour prévoir comment va tomber un objet. En associant la force à l'accélération, on peut trouver les formules de plusieurs forces (comme les forces électriques, les forces faites par les ressorts, les forces faites par la pression de l'air et bien d'autres) et on peut comprendre l'origine de ces forces. En somme, tout devient beaucoup plus simple en prenant le mouvement à vitesse constante comme mouvement naturel des objets.

L'association entre la force et l'accélération a donc été un changement majeur dans l'histoire de la physique. Elle donne une physique complètement différente par rapport à la physique qui associe la force à la vitesse et cette nouvelle physique n'était pas prise dans des difficultés insurmontables.

Cette simplification de la physique est d'ailleurs à l'origine de l'acceptation rapide de la 1^{re} loi de Newton au milieu du 17^e siècle. La loi ne s'est pas imposée parce qu'on a donné des exemples de mouvements qui ne pouvaient pas s'expliquer sans la loi de l'inertie. Tous ces mouvements auraient très bien pu s'expliquer avec une force imprégnée qui ne se dissipe pas avec le temps. Cependant, cette loi simplifiait tellement la solution de plusieurs problèmes en physique que pratiquement tout le monde a rapidement accepté la loi.

Après la publication des traités de Galilée (1632 et 1638) et de Descartes (1644), la loi est si bien acceptée que Huygens (1656) et Newton (1687) n'ont même plus à justifier ce choix quand ils la reprennent comme point de départ de leurs théories du mouvement quelques années plus tard. Ils n'ont qu'à dire que tous s'entendent sur cette loi maintenant considérée comme évidente.

Le principe de relativité et la 1^{re} loi de Newton

On peut donner une justification assez simple à la 1^{re} loi de Newton. La loi doit être vraie selon le principe de relativité.

Le principe de relativité spécifie qu'il n'y a pas de nouveaux effets qui apparaissent quand on se déplace à vitesse constante. Tout se passe comme si on était arrêté.

Par exemple, on sait comment verser un café quand on est au repos (dans notre maison par exemple). Si vous devenez un jour agent de bord et que vous devez verser un café dans un avion en mouvement à vitesse constante, ne changez pas vos habitudes : versez le café exactement de la même façon dans l'avion en mouvement qu'à la maison. Inutile de verser le café un peu en avant de la tasse en se disant que le café partira un peu vers l'arrière de l'avion à cause du mouvement. Le mouvement de l'avion ne change rien. On peut jouer au billard dans un avion se déplaçant à vitesse constante en jouant exactement de la même façon que dans une salle de billard. Il n'y a aucune « compensation » à faire à cause du mouvement de l'avion.

Dans ce vidéo, on laisse tomber une balle d'un camion en mouvement. Ils ont mis une planche pour donner une référence pour le mouvement de la balle. On peut voir que la balle

tombe en restant au milieu de la planche, exactement ce qui se serait produit si on avait lâché la balle alors que le camion est arrêté.

<https://www.youtube.com/watch?v=ky-ITbNfeY>

Tout cela veut aussi dire que si on vous enferme dans un avion en mouvement à vitesse constante sans fenêtres, il vous sera impossible de dire si l'avion est en mouvement ou non. S'il n'y a aucun nouvel effet qui apparaît quand l'avion est en mouvement, tout se passera exactement de la même façon que l'avion soit en mouvement ou non. Aucune expérience ne pourrait vous indiquer que vous êtes en mouvement.

https://www.youtube.com/watch?v=uJ8l4kh_jto

Cela voudrait aussi dire que si on fermait les yeux dans une automobile en mouvement (si on n'est pas en train de conduire évidemment), on ne pourrait pas dire si la voiture est en mouvement ou non. Vous vous dites sûrement que n'importe quel moron pourrait dire si la voiture est en mouvement ou arrêtée. Il doit y avoir une erreur. En fait, non. On sait que la voiture se déplace parce que les bosses sur la route secouent un peu la voiture. Toutefois, on dit que le mouvement est indétectable si la vitesse est constante. Si on veut que ce soit le cas, il ne faut pas qu'il y ait la moindre bosse sur la route parce que ces bosses font accélérer la voiture dans tous les sens. Imaginons donc que la route est fraîchement asphaltée et qu'il n'y a aucune bosse. Soudainement, il devient plus difficile de dire si la voiture se déplace ou non. On entend toujours l'air qui frappe la voiture, mais ce pourrait être du vent qui arrive sur la voiture arrêtée... Ce serait plus convaincant si on était dans un vaisseau spatial. Alors, il n'y aurait pas de son de l'air ni de sons de la route et ce serait totalement impossible de dire si le vaisseau est arrêté ou non sans regarder à l'extérieur du vaisseau.

Ce qui devrait vraiment vous convaincre que rien ne change quand on se déplace à vitesse constante est le fait que nous nous déplaçons autour du Soleil à 29,8 km/s et que ça ne paraît pas du tout. Encore mieux, le Soleil tourne autour du centre de la Galaxie à une vitesse de 240 km/s, et ça ne paraît pas non plus. Tout se passe comme si la Terre était arrêtée.

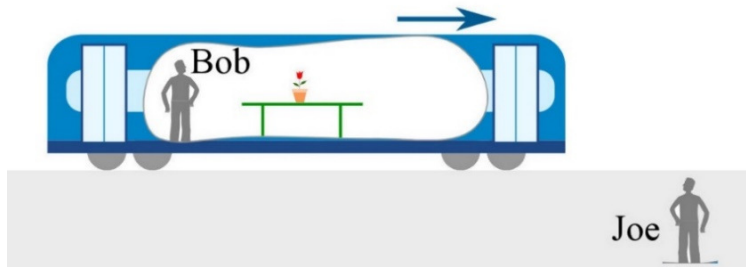
S'il n'y a pas de nouveaux effets, c'est que les lois de la physique sont les mêmes pour tous les observateurs, peu importe leur vitesse. Il n'y a pas de nouvelles forces qui entrent en jeu, ce qui veut dire que les lois sont exactement les mêmes. Cela nous amène donc au principe de relativité de Galilée (mais en fait formulé par Euler).

Le principe de relativité

Les lois de la physique sont les mêmes pour tous les observateurs se déplaçant à vitesse constante.

La première loi de Newton doit être vraie selon le principe de relativité. Pour comprendre pourquoi, examinons ce qui se passe dans un train qui va à vitesse constante selon un observateur qui est dans le train et un autre observateur qui est sur le bord de la voie ferrée. Selon le principe de relativité, la physique est la même pour les deux observateurs, ce qui signifie ici que les forces doivent être les mêmes pour les deux observateurs.

Imaginons qu'il y a un pot de fleurs posé sur une table dans un train. Pour une personne dans le train (on va l'appeler Bob), le pot est au repos et il n'y a pas de force sur le pot. C'est ce que dit la 1^{re} loi de Newton, mais c'est aussi ce que disaient les théories qui associaient la force à la vitesse.



Prenons maintenant le point de vue d'un observateur au sol (on va l'appeler Joe) qui regarde le train passer.

www.mathsisfun.com/physics/relativity.html

S'il n'y a pas de force sur le pot de fleurs selon Bob, alors il n'y a pas de force selon Joe (puisque les lois de la physique doivent être les mêmes). Joe voit donc le pot de fleurs qui se déplace à vitesse constante alors qu'il n'y a pas de force sur le pot de fleurs. En prenant le point de vue de Joe, on arrive donc à la conclusion que la vitesse peut être constante en l'absence de force. C'est ce que dit la 1^{re} loi de Newton, mais c'est contraire à ce que disaient les théories qui associent la force à la vitesse. On arrive donc à la 1^{re} loi de Newton si le principe de relativité est vrai. Pierre Gassendi a donné pratiquement les mêmes arguments (c'était un bateau plutôt qu'un train) en 1642 pour justifier que la vitesse pouvait être constante en l'absence de force.

Erreur de 1^{re} loi de Newton

Il y a vraiment encore beaucoup de gens qui commettent des erreurs de 1^{re} loi de Newton et pensent qu'une force doit être présente quand un objet se déplace à vitesse constante.

Parfois, les gens vont dire qu'un objet en mouvement continue son mouvement en ligne droite parce que la force d'inertie agit sur l'objet. C'est vrai que l'inertie fait en sorte que l'objet continue son mouvement, mais il n'y a pas de force d'inertie. L'objet garde la même vitesse sans qu'aucune force n'agisse sur lui.



Erreur fréquente : penser qu'il existe une force d'inertie

On retrouve souvent des erreurs de 1^{re} loi de Newton 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 ; imaginez 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 une grosse erreur de première loi de Newton dans cette scène de *Gravity*

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

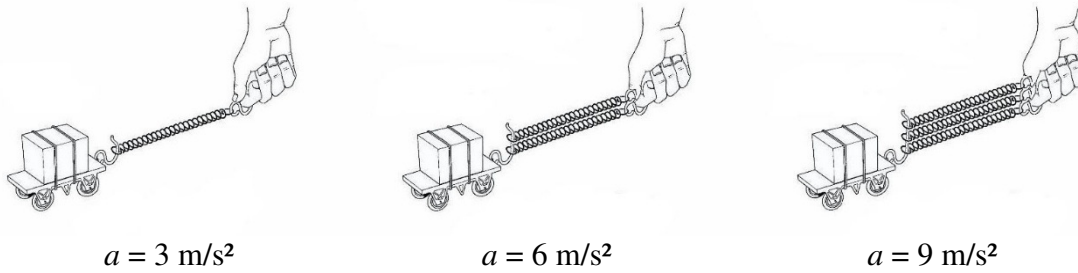
Tout va bien pour les 39 premières secondes de cet extrait. À la fin de ces 39 secondes, George Clooney tient le bout d'une corde et il a une vitesse constante (qui est la même que celle de Sandra Bullock). C'est alors que les choses se gâtent et qu'il y a de gros problèmes de première loi de Newton. 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 qu'il se déplace 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, la physique dans cette scène est complètement erronée.)

3.4 LA DEUXIÈME LOI DE NEWTON

Le lien entre la force et l'accélération

Avec la première loi, on a choisi que le mouvement à vitesse constante est le mouvement de référence qu'on n'a pas besoin d'expliquer avec une force. Cela signifie que si l'objet n'a pas une vitesse constante, alors une force nette doit agir sur l'objet. La 2^e loi de Newton vient préciser le lien entre la force nette et l'accélération.

Pour trouver le lien entre la force nette et l'accélération, on peut commencer avec l'expérience suivante.



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

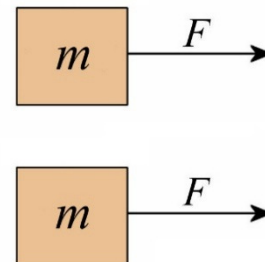
On tire le charriot en s'assurant que l'allongement de tous les ressorts est le même. On s'assure ainsi que la force exercée par chaque ressort est la même puisque la force exercée par un ressort dépend de son allongement. On constate qu'une force 2 fois plus grande (quand il y a 2 ressorts) génère une accélération 2 fois plus grande. On constate qu'une force 3 fois plus grande (quand il y a 3 ressorts) génère une accélération 3 fois plus grande. On en conclut que l'accélération est proportionnelle à la force nette.

$$a \propto F_{\text{nette}}$$

On aurait donc une relation linéaire entre l'accélération et la force.

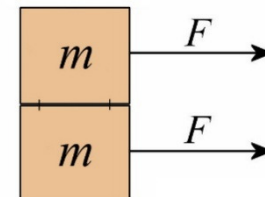
Toutefois, l'accélération ne dépend pas uniquement de la force qui agit sur l'objet, elle dépend aussi de la masse de l'objet.

Imaginons 2 objets identiques initialement au repos soumis à la même force. Puisque les forces et les masses sont identiques, on doit avoir la même accélération.



Puisqu'ils avaient la même vitesse initiale et qu'ils ont la même accélération, les deux objets auront toujours la même vitesse et le même déplacement. Les deux blocs vont rester toujours l'un à côté de l'autre pendant leur déplacement.

Imaginons maintenant qu'on attache ces deux blocs ensemble. Les deux blocs avaient la même accélération et restaient donc toujours l'un à côté de l'autre. En les fixant l'un et l'autre, on n'a absolument rien changé. Ils restent l'un à côté de l'autre en gardant la même accélération.



Mais en les fixant ensemble, c'est comme si on avait un objet de masse $2m$ soumis à une force de $2F$. Cela signifie qu'en doublant la masse et en doublant aussi le force, on garde la même accélération. Cela indique clairement que l'accélération doit dépendre du rapport F/m .

Attention, de façon très rigoureuse, cela ne signifie pas qu'on doit avoir $a = F/m$. Cela signifie que l'accélération doit être une fonction de F/m . Toutefois, comme on a déjà trouvé expérimentalement qu'il y a une relation linéaire entre l'accélération et la force, l'accélération doit être une fonction linéaire de F/m . On devrait donc avoir la simple relation suivante.

$$a \propto \frac{F_{\text{nette}}}{m}$$

Ce vidéo nous montre l'effet de la masse sur l'accélération si la force est constante.

<https://www.youtube.com/watch?v=sPZ2bjW53c8>

(De façon correcte, on ne voit pas l'accélération dans ce vidéo, on observe seulement la vitesse finale de l'objet. Comme la vitesse finale est plus petite si l'accélération est plus petite et que la distance sur laquelle l'objet accélère est toujours la même, on peut conclure que l'accélération est plus petite quand la masse est plus grande.)

On arrive donc à l'équation suivante

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

Cela signifie qu'on a

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

où k est une constante de proportionnalité. Il ne reste qu'à choisir la valeur de k . On a fait le choix le plus simple, c'est-à-dire $k = 1$.

On arrive alors à la 2^e loi de Newton.

Deuxième loi de Newton

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

En composantes :

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

Cette loi est en fait la définition de la force. Notez qu'il y a quelques aspects arbitraires dans cette définition. On a choisi d'associer la force à l'accélération, comme le spécifie la 1^{re} loi de Newton, et on a choisi $k = 1$ comme constante de proportionnalité.

La mesure de la force : le newton

Puisque la force est le résultat d'une multiplication de la masse et de l'accélération, l'unité de la force est donc le $kg \ m/s^2$. On a donné le nom de newton (N) à cette unité.

Le newton

$$1N = 1 \frac{kgm}{s^2}$$

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

La découverte de la loi

On a vu que dans la théorie de la force imprégnée, une force appliquée sur un objet ajoute ou enlève de la force imprégnée dans l'objet. Il y avait une certaine confusion parce qu'il y a en fait 2 types de force dans cette théorie. Il y a la force imprégnée qui est proportionnelle à la vitesse ($F_{imprégnée} \propto v$) et il y a la force appliquée qui fait changer la force imprégnée, donc qui fait changer la vitesse ($F_{appliquée} \propto \Delta v$).

Quand on accepte la 1^{re} loi de Newton, il n'est plus nécessaire d'invoquer une force imprégnée qui permet de maintenir une vitesse constante. Cette force inutile va donc très lentement disparaître de la physique entre 1600 et 1700.

Par contre, la force appliquée va rester. La force appliquée fait changer la vitesse et si la vitesse change, il y a une accélération. Ainsi, on avait, dès le 14^e siècle, un lien entre la force appliquée et l'accélération, mais personne ne mentionne explicitement ce lien. Jules César Scaliger (1557) et Giovanni Battista Benedetti (1585) sont les premiers à dire que la force appliquée est liée à l'accélération, mais ils ne spécifient pas comment change la vitesse quand une force s'applique.

Après 1600, quelques savants vont même arriver à des résultats intéressants en comprenant que le changement de vitesse devrait être proportionnel à la force appliquée et au temps d'application de la force. Cela veut dire qu'ils utilisent la relation suivante.

$$F\Delta t \propto \Delta v$$

Cette équation est équivalente à $F \propto a$ parce que si on divise par Δt , on a

$$F \propto \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Comme $\Delta v/\Delta t$ est l'accélération, on arrive à

$$F \propto a$$

C'est en utilisant cette association entre la force et l'accélération que Beeckman et Descartes arrivent, dès 1618, à la conclusion que la chute libre doit se faire avec une accélération constante, et ce, avant même que Galilée ne publie cette information. (Ils arrivent même à la conclusion qu'il aurait une vitesse limite de chute s'il y a de la friction

de l'air qui augmente avec la vitesse.) Toutefois, Beeckman et Descartes ne publient pas ces résultats.

Christiaan Huygens est le premier qui utilise correctement le lien entre la force et l'accélération pour étudier autre chose qu'une simple chute libre des objets. En 1659, il trouve la formule de la force exercée par une corde sur un objet qui fait un mouvement circulaire (il trouve donc la formule de la force centripète) en examinant les déplacements dus à l'accélération constante (avec $y \propto t^2$) que génère cette force. (En fait, Huygens avait même 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 qu'il n'ait pas terminé ses travaux parce que c'est assez difficile de prononcer le nom de Huygens correctement <https://www.youtube.com/watch?v=yH-qQu2ndc8>.)

C'est finalement Isaac Newton qui développe l'association entre la force et l'accélération le premier. En 1684, Edmund Halley demande à Newton quel devrait être la forme des orbites des planètes si la force de gravitation faite par le Soleil diminuait avec le carré de la distance. En précisant que le lien entre F et a doit être $F = ma$, Newton parvient assez rapidement à calculer la forme des orbites (il arrive aux lois des orbites découvertes par Kepler près de 75 ans plus tôt) et à appliquer la méthode de calcul à quelques autres phénomènes. Newton publie ses résultats en 1687.

Comme Newton obtient une multitude de résultats en accord avec les observations, plusieurs comprennent qu'on est finalement tombé sur quelque chose d'utile.

Ne cherchez pas $F = ma$ dans le livre de Newton. Sa 2^e loi est écrite en mots et non pas sous forme d'équation. Même en mots, l'énoncé de la loi

Les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice ; et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée.

est incomplet (le temps d'application de la force et la masse devraient jouer un rôle) et un peu flou (on ne sait pas trop ce qu'il veut dire par *changement dans le mouvement*). Il faut examiner tous les autres définitions et corollaires en plus de suivre en détail les calculs de Newton pour vraiment comprendre que ce qu'il fait est équivalent à $F = ma$. Vous pouvez cliquer sur ce lien pour voir comment Newton utilise sa loi.

<https://physique.merici.ca/mecanique/FmaNewton.pdf>

Newton utilise des méthodes géométriques pour résoudre les problèmes. C'est une méthode qui était assez courante à l'époque, mais elle n'est pas toujours facile à suivre ou à appliquer. À l'époque, plusieurs savants admettaient ne rien comprendre aux calculs de Newton. Euler, probablement le plus grand mathématicien de tous les temps, admet qu'il a de la difficulté à résoudre des problèmes de mécanique en appliquant les méthodes de Newton. Pour un lecteur moderne qui n'est pas habitué à ces méthodes géométriques, la lecture du livre de Newton est un véritable calvaire.

Avant de voir la 2^e loi de Newton apparaitre sous la forme qu'on connaît, il faut qu'on abandonne l'approche géométrique de Newton et qu'on commence à utiliser une approche plus algébrique. Jakob Hermann est le premier à commencer une reformulation la physique de Newton en utilisant le calcul différentiel de Leibniz. Il devient alors le premier, en 1716, à obtenir une équation équivalente à $F = ma$ quand il écrit que ce que Newton fait est équivalent à $(F/m) dt = dv$. Toutefois, cette équation apparait uniquement au beau milieu d'une preuve et on ne peut pas dire que Hermann met bien en évidence ce résultat.

C'est finalement Euler qui va simplifier les idées de Newton et obtenir $F = ma$. Incapable d'appliquer les méthodes de Newton, Euler développe une version de la théorie de Newton basée sur le calcul différentiel (il y a plusieurs versions faites entre 1736 et 1775) pour arriver essentiellement à ce qu'on utilise aujourd'hui. C'est à partir de ce moment que les lois de Newton deviennent beaucoup plus faciles à utiliser et qu'elles deviennent la méthode pour résoudre les problèmes de mécanique. Ultimement, c'est donc Euler qui a clairement formulé $F = ma$ et ce qu'on utilise de nos jours est en réalité la mécanique d'Euler.

C'est aussi Euler qui a fixé la valeur de la constante de proportionnalité à $k = 1$ dans $F = kma$ (mais après être passé par $F = ma/n$ (1736), $F = 2ma$ (1750) et $F = ma/2 g$ (1765) avant d'arriver à $F = ma$ en 1775.)

Application de la deuxième loi de Newton

Il est important de bien suivre une méthode pour résoudre des problèmes de dynamique à l'aide de la deuxième loi de Newton. Cette méthode est

- 1) Trouver toutes les forces agissant sur le ou les objets qu'on étudie.

Dans ce chapitre, les forces seront données. À partir du chapitre suivant, on devra trouver ces forces.

- 2) Séparer ces forces en composantes x et y et faire la somme des composantes.

Cela implique qu'on doit choisir des axes. (Nous verrons au chapitre suivant comment choisir les axes selon la situation. Pour l'instant, prenez un axe des x vers la droite et un axe des y vers le haut.)

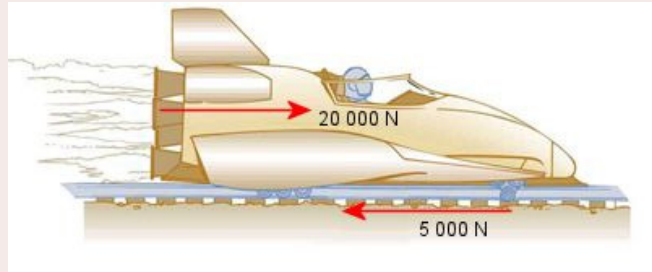
- 3) Faire les équations de la deuxième loi de Newton.

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

- 4) Résoudre ces équations pour trouver les inconnues.

Exemple 3.4.1

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. Combien de temps faut-il pour que cette fusée parcoure 1 km en partant du repos ?



cnx.org/content/m42073/latest/?collection=col11406/latest

On pourra trouver le temps à partir des équations de la cinématique quand on aura l'accélération. Cette accélération se trouve à partir de la 2^e loi de Newton.

Les forces agissant sur l'objet

On donne ici (sur la figure) les deux forces. (Il y en a plus que ça, mais on s'intéresse uniquement à celles données ici.)

Somme des forces

Avec un axe horizontal pointant vers la droite, la force nette en x est

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

2^e loi de Newton

La deuxième loi de Newton nous donne

$$\begin{aligned}\sum F_x &= ma_x \\ 15000N &= 500kg \cdot a_x\end{aligned}$$

Solution de l'équation

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

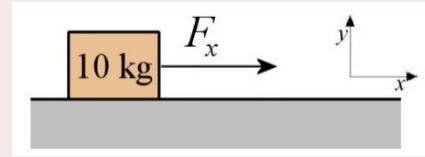
Comme on a maintenant l'accélération, on peut trouver la solution. En partant d'une vitesse nulle, le temps pour parcourir 1000 m avec une telle accélération est

$$\begin{aligned}x &= x_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2 \\ 1000m &= 0m + 0m + \frac{1}{2} \cdot \left(30 \frac{m}{s^2}\right) \cdot t^2 \\ t &= 8,165s\end{aligned}$$

Exemple 3.4.2

Une boîte de 10 kg subit une force variable donnée par

$$F_x = 6 \frac{N}{s} \cdot t + 2N$$



et il n'y a pas d'autres forces dans la direction de l'axe des x . La vitesse initiale de la boîte est de 1 m/s vers la gauche.

- a) Quelle est l'accélération de la boîte à $t = 1$ s ?

Les forces agissant sur l'objet

La seule force en x est $F_x = 6 \frac{N}{s} \cdot t + 2N$.

Somme des forces

Avec un axe horizontal pointant vers la droite, la force nette en x est

$$\sum F_x = 6 \frac{N}{s} \cdot t + 2N$$

2^e loi de Newton

La deuxième loi de Newton nous donne

$$\begin{aligned} \sum F_x &= ma_x \\ 6 \frac{N}{s} \cdot t + 2N &= 10kg \cdot a_x \end{aligned}$$

Solution de l'équation

À $t = 1$ s, on a

$$\begin{aligned} 6 \frac{N}{s} \cdot 1s + 2N &= 10kg \cdot a_x \\ 8N &= 10kg \cdot a_x \\ a_x &= 0,8 \frac{m}{s^2} \end{aligned}$$

- b) Quelle est la vitesse à $t = 10$ s ?

La formule de l'accélération est

$$\begin{aligned} 6 \frac{N}{s} \cdot t + 2N &= 10kg \cdot a_x \\ a_x &= 0,6 \frac{m}{s^3} \cdot t + 0,2 \frac{m}{s^2} \end{aligned}$$

Comme $a_x = dv_x/dt$, on a

$$\frac{dv_x}{dt} = 0,6 \frac{m}{s^3} \cdot t + 0,2 \frac{m}{s^2}$$

Il faut donc intégrer pour trouver la formule de la vitesse.

$$\begin{aligned} v_x &= \int \left(0,6 \frac{m}{s^3} \cdot t + 0,2 \frac{m}{s^2} \right) dt \\ &= 0,3 \frac{m}{s^3} \cdot t^2 + 0,2 \frac{m}{s^2} \cdot t + \text{constante} \end{aligned}$$

On peut trouver la constante parce qu'on sait que la vitesse à $t = 0$ s est -1 m/s.

$$\begin{aligned} -1 \frac{m}{s} &= 0,3 \frac{m}{s^3} \cdot (0s)^2 + 0,2 \frac{m}{s^2} \cdot 0s + \text{constante} \\ -1 \frac{m}{s} &= \text{constante} \end{aligned}$$

La formule de la vitesse est donc

$$v_x = 0,3 \frac{m}{s^3} \cdot t^2 + 0,2 \frac{m}{s^2} \cdot t - 1 \frac{m}{s}$$

À $t = 10$ s, la vitesse est

$$\begin{aligned} v_x &= 0,3 \frac{m}{s^3} \cdot (10s)^2 + 0,2 \frac{m}{s^2} \cdot 10s - 1 \frac{m}{s} \\ &= 31 \frac{m}{s} \end{aligned}$$

c) Quel est le déplacement de l'objet entre $t = 0$ s et $t = 10$ s ?

La formule de la vitesse est

$$v_x = 0,3 \frac{m}{s^3} \cdot t^2 + 0,2 \frac{m}{s^2} \cdot t - 1 \frac{m}{s}$$

Comme $v_x = dx/dt$, on a

$$\frac{dx}{dt} = 0,3 \frac{m}{s^3} \cdot t^2 + 0,2 \frac{m}{s^2} \cdot t - 1 \frac{m}{s}$$

Il faut donc intégrer pour trouver la formule de la position.

$$\begin{aligned} x &= \int \left(0,3 \frac{m}{s^3} \cdot t^2 + 0,2 \frac{m}{s^2} \cdot t - 1 \frac{m}{s} \right) dt \\ &= 0,1 \frac{m}{s^3} \cdot t^3 + 0,1 \frac{m}{s^2} \cdot t^2 - 1 \frac{m}{s} \cdot t + \text{constante} \end{aligned}$$

On peut trouver la constante si on suppose que la position à $t = 0$ s est 0 m.

$$\begin{aligned} 0m &= 0,1 \frac{m}{s^3} \cdot (0s)^3 + 0,1 \frac{m}{s^2} \cdot (0s)^2 - 1 \frac{m}{s} \cdot 0s + \text{constante} \\ 0m &= \text{constante} \end{aligned}$$

La formule de la position est donc

$$x = 0,1 \frac{m}{s^3} \cdot t^3 + 0,1 \frac{m}{s^2} \cdot t^2 - 1 \frac{m}{s} \cdot t$$

À $t = 10$ s, la position est

$$x = 0,1 \frac{m}{s^3} \cdot (10s)^3 + 0,1 \frac{m}{s^2} \cdot (10s)^2 - 1 \frac{m}{s} \cdot 10s$$

$$= 100m$$

Le déplacement est donc

$$\Delta x = x - x_0$$

$$= 100m - 0m$$

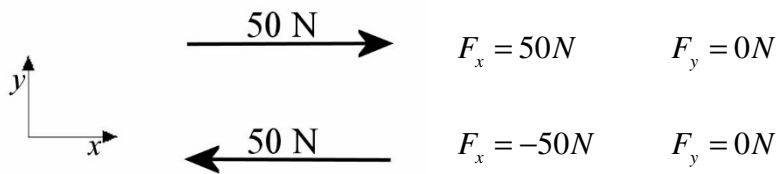
$$= 100m$$

Décomposition des forces

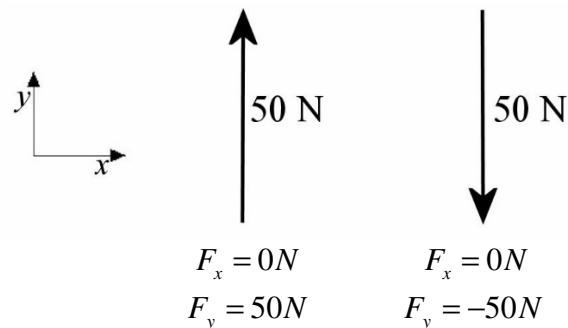
La principale difficulté quand on applique la 2^e loi de Newton consiste à décomposer les forces en composantes x et y . Voici un bref rappel de la façon de décomposer un vecteur.

Quand les forces sont directement dans la direction d'un axe (vers l'axe ou directement opposées à l'axe), les composantes se trouvent facilement. La composante est positive si la force est dans le sens de l'axe et elle est négative si la force est dans le sens opposé à l'axe.

Forces dans la direction de l'axe des x

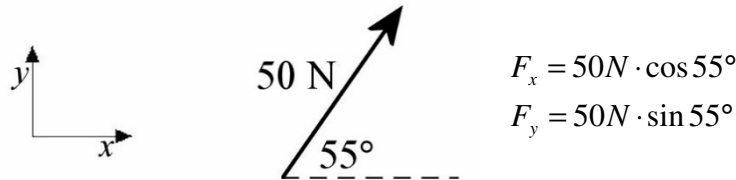


Forces dans la direction de l'axe des y



Si la force n'est pas la direction d'un axe, on utilise les formules de décomposition vues au chapitre 2.

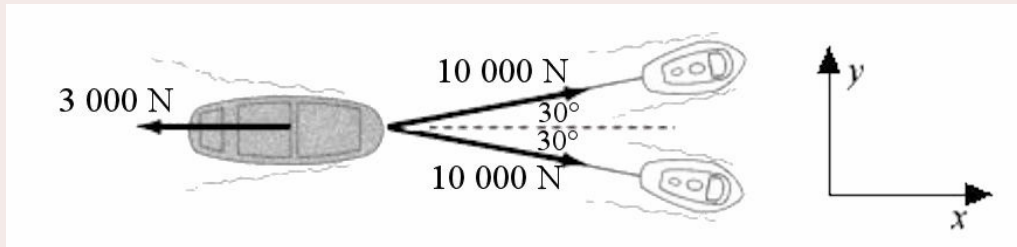
Forces dans n'importe quelle direction



Pour séparer en composantes en utilisant ces formules, rappelez-vous qu'il faut trouver l'angle que fait la force avec **l'axe des x positifs** et qu'il faut **trouver le signe de l'angle**. Le sens positif pour l'angle est toujours dans la direction de rotation qui va de l'axe des x positif vers l'axe des y positifs.

Exemple 3.4.3

On tire sur une barge de 100 tonnes avec les forces indiquées sur la figure (le 3000 N est la friction de l'eau). Quelle est l'accélération de la barge ?



curricula2.mit.edu/pivot/book/ph0503.html?acode=0x0200

Comme on connaît les forces agissant sur l'objet, on peut trouver l'accélération à l'aide de la 2^e loi de Newton.

Les forces agissant sur l'objet

On donne ici (sur la figure) les trois forces. (Il y en a plus que ça, mais on s'intéresse uniquement à celles données ici.)

Somme des forces

On va utiliser les axes montrés sur la figure pour séparer chacune des forces.

F_1 (remorqueur du haut)

$$F_{1x} = 10\,000N \cdot \cos 30^\circ = 8660N$$

$$F_{1y} = 10\,000N \cdot \sin 30^\circ = 5000N$$

F_2 (remorqueur du bas)

$$F_{2x} = 10\,000\text{N} \cdot \cos(-30^\circ) = 8660\text{N}$$

$$F_{2y} = 10\,000\text{N} \cdot \sin(-30^\circ) = -5000\text{N}$$

F_3 (friction)

$$F_{3x} = -3000\text{N}$$

$$F_{3y} = 0\text{N}$$

Les composantes de la force totale sont donc

$$\sum F_x = 8660\text{N} + 8660\text{N} + (-3000\text{N}) = 14320\text{N}$$

$$\sum F_y = 5000\text{N} + (-5000\text{N}) + 0\text{N} = 0\text{N}$$

2^e loi de Newton

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

$$\sum F_x = ma_x \quad \rightarrow \quad 14\,320\text{N} = 100\,000\text{kg} \cdot a_x$$

$$\sum F_y = ma_y \quad \rightarrow \quad 0\text{N} = 100\,000\text{kg} \cdot a_y$$

Solution des équations

Les composantes de l'accélération sont donc

$$a_x = \frac{14320\text{N}}{100\,000\text{kg}} = 0,1432 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

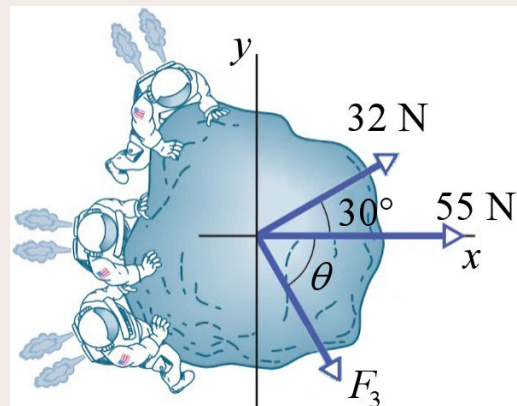
$$a_y = \frac{0\text{N}}{100\,000\text{kg}} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Exemple 3.4.4

Trois astronautes exercent des forces sur un petit astéroïde de 2 tonnes. Quelle est la force inconnue (grandeur et direction) sur la figure si l'astéroïde a l'accélération suivante ?

$$\vec{a} = (0,05\vec{i} - 0,01\vec{j}) \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/f1-0-f2-5-go-three-astronauts-propelled-jet-backpacks-push-guide-03-120-kg-asteroid-toward-q57871544



Comme on sait l'accélération, on peut trouver la force à l'aide de la 2^e loi de Newton.

Les forces agissant sur l'objet

On donne ici (sur la figure) les trois forces.

Somme des forces

On va utiliser les axes montrés sur la figure pour séparer chacune des forces.

F_1 (astronaute du bas)

$$F_{1x} = 32N \cdot \cos 30^\circ = 27,71N$$

$$F_{1y} = 32N \cdot \sin 30^\circ = 16N$$

F_2 (astronaute du milieu)

$$F_{2x} = 55N$$

$$F_{2y} = 0N$$

F_3 (astronaute du haut)

$$F_{3x} = F_{3x}$$

$$F_{3y} = F_{3y}$$

Quand on ne connaît pas la grandeur de la force ni sa direction, il vaut mieux écrire les composantes F_x et F_y plutôt que $F\cos\theta$ et $F\sin\theta$. Cela donne un système d'équations beaucoup plus facile à résoudre.

Les composantes de la force résultante sont donc

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 27,71N + 55N + F_{3x} & \sum F_y &= 16N + 0N + F_{3y} \\ &= 82,71N + F_{3x} & &= 16N + F_{3y} \end{aligned}$$

2^e loi de Newton

On nous dit que les composantes de l'accélération sont

$$a_x = 0,05 \frac{m}{s^2} \quad a_y = -0,01 \frac{m}{s^2}$$

La 2^e loi de Newton nous donne donc

$$\begin{aligned} \sum F_x = ma_x &\quad \rightarrow \quad 82,71N + F_{3x} = 2000kg \cdot 0,05 \frac{m}{s^2} \\ \sum F_y = ma_y &\quad \rightarrow \quad 16N + F_{3y} = 2000kg \cdot \left(-0,01 \frac{m}{s^2}\right) \end{aligned}$$

Solution des équations

L'équation des forces en x nous donne

$$82,71N + F_{3x} = 2000kg \cdot 0,05 \frac{m}{s^2}$$

$$82,71N + F_{3x} = 100N$$

$$F_{3x} = 17,29N$$

L'équation des forces en y nous donne

$$16N + F_{3y} = 2000kg \cdot (-0,01 \frac{m}{s^2})$$

$$16N + F_{3y} = -20N$$

$$F_{3y} = -36N$$

On peut ensuite trouver la grandeur de la force à partir des composantes.

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ &= \sqrt{(17,29N)^2 + (-36N)^2} \\ &= 39,94N \end{aligned}$$

On peut finalement trouver la direction de la force à partir des composantes.

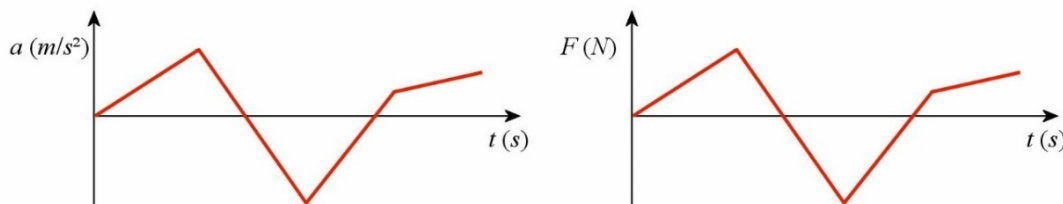
$$\begin{aligned} \theta &= \arctan \frac{F_y}{F_x} \\ &= \arctan \frac{-36N}{17,29N} \\ &= -64,35^\circ \end{aligned}$$

Le troisième astronaute applique donc une force de 39,94 N à $-64,35^\circ$.

Les graphiques du mouvement

Le graphique de la force nette est identique à celui de l'accélération

Puisque la force nette est directement proportionnelle à l'accélération selon $F_{nette} = ma$, le graphique de la force nette sur un objet en fonction du temps est identique à celui de l'accélération, à l'exception de la graduation de l'axe vertical. Par exemple, voici les graphiques de la force nette et de l'accélération pour un objet de 5 kg.

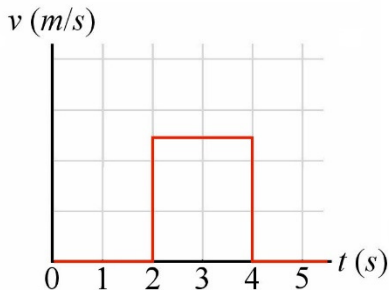
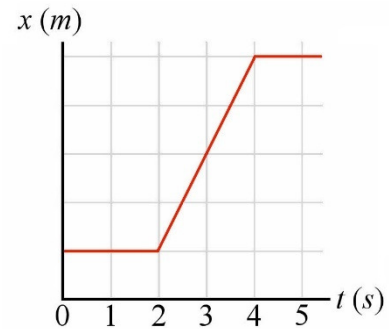


Les deux graphiques sont identiques, à l'exception de la graduation sur l'axe vertical.

Des graphiques impossibles

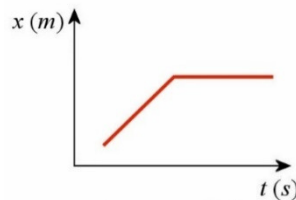
Voici un graphique de la position en fonction du temps (à droite).

Bien que ce graphique semble tout à fait légitime, il représente un mouvement impossible. Pour comprendre pourquoi, traçons le graphique de la vitesse de cet objet.

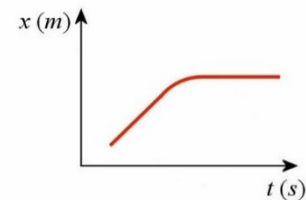


On commence avec une vitesse nulle (pente nulle) entre $t = 0$ s et $t = 1$ s. On a ensuite une vitesse constante positive entre $t = 1$ s à $t = 4$ s, puis on revient à une vitesse nulle (pente nulle) de $t = 4$ s à $t = 5$ s.

Trouvons maintenant l'accélération de cet objet, qui est la pente du graphique de la position. On remarque que l'accélération est toujours nulle, sauf à $t = 1$ s et $t = 4$ s, où elle est infinie. Or, une accélération infinie signifie que la force sur l'objet était infinie, ce qui est impossible. Ce mouvement est donc impossible. La source du problème est le changement brutal de pente dans le graphique de la position. Pour que le mouvement soit physiquement possible, il faut que la pente change de façon graduelle.



Impossible



Possible

En ayant un graphique de la position dont la pente n'a pas de saut brusque, on obtient un graphique continu pour la vitesse et une accélération qui n'est jamais infinie. Remarquez qu'il peut y avoir des sauts brusques de la pente dans les graphiques de la vitesse et de l'accélération.

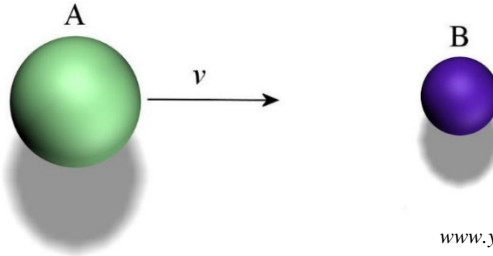
3.5 LA TROISIÈME LOI DE NEWTON

La loi

Les forces sont toujours générées par l'interaction entre 2 objets. Ce peut être, par exemple, une force de contact générée lors d'une collision entre deux objets, une force d'attraction gravitationnelle entre deux planètes ou une force de répulsion électrique entre 2 objets ayant des charges électriques identiques. Pour toutes les interactions, les 2 objets subissent une force.

Les forces viennent toujours de l'interaction entre 2 objets. Chaque objet qui interagit subit une force.

Illustrons cela avec une collision. Imaginons qu'une balle A se dirige vers une balle B immobile.



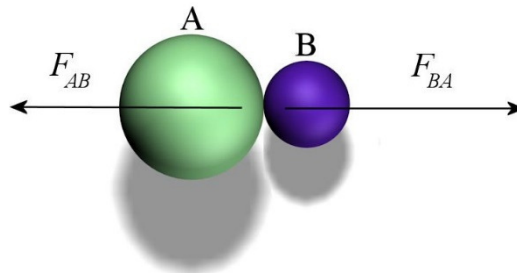
www.youtube.com/watch?v=yRj_7CO38GA

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 subi une force vers la droite.

Si la balle A a perdu 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. (La force faite sur l'objet A par l'objet B est notée F_{AB} . La force faite sur l'objet B par l'objet A est notée F_{BA} .)



On remarque que les deux forces sont dans des directions opposées. La force sur la balle B est vers la droite et la force sur la balle A est vers la gauche. Les forces sont toujours dans des directions opposées, peu importe le type de force.

Les forces viennent toujours de l'interaction entre 2 objets. Chaque objet qui interagit subit une force et les deux forces sont toujours dans des directions opposées.

Mais attendez, ça va encore plus loin. La force qui agit sur l'objet A a toujours la même grandeur que la force qui agit sur l'objet B. Si les forces n'avaient pas la même grandeur, alors 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 (cette justification, qu'on prouvera seulement au chapitre 11, est essentiellement la même que celle donnée par Newton). On arrive donc à la conclusion suivante.

Troisième loi de Newton

Les forces viennent toujours de l'interaction entre 2 objets. Chaque objet qui interagit subit une force et les deux forces sont toujours de même grandeur et dans des directions opposées.

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$

On dit alors que ces deux forces sont associées par la troisième loi de Newton.

Ces deux forces ont les caractéristiques suivantes.

- 1) **Les deux forces sont du même type.** Si la force sur l'objet A est une force de gravitation, alors la force sur l'objet B doit aussi être une force 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 jamais sur le même objet.** 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.



Erreur fréquente : oublier ces 2 caractéristiques

Cet oubli (ou l'ignorance de ces règles) amène parfois à formuler 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. C'est ce que n'a pas compris l'auteur de ce vidéo.

<https://www.youtube.com/watch?v=X2cis7-SpmY>

La 3^e loi signifie 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. Il n'y a aucune exception à ce principe.

La 3^e loi de Newton 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. Cette formulation est à éviter puisqu'elle laisse penser que les deux forces ne sont pas simultanées, que la réaction se produit un peu après l'action. Les deux forces associées par la troisième loi de Newton agissent toujours simultanément et sont parfaitement symétriques. Il n'y a pas de force qui prime sur l'autre force.

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 pour obtenir :

La Lune exerce une force de gravité sur la Terre.

Ce sont les deux forces associées par la troisième loi de Newton. En procédant ainsi, on s'assure qu'on a le même type de force et que les deux forces associées n'agissent pas sur le même objet.

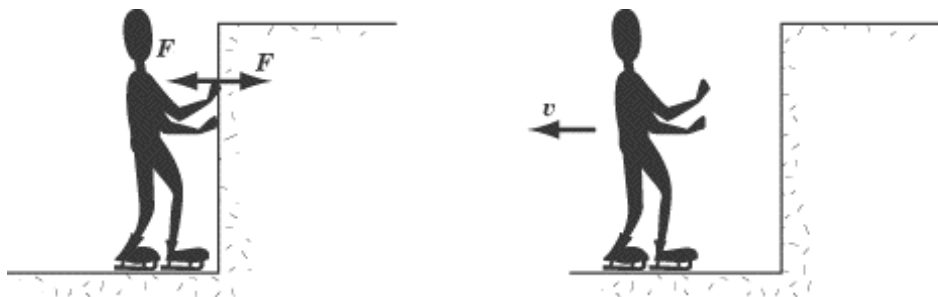
Quelques démonstrations de la loi

Commençons par une collision. Observez premièrement ce qui se passe dans ce vidéo.

<https://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

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

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

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

<https://www.youtube.com/watch?v=pyVTNyzQ1bI>

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

Quand Daryl pousse sur la chaise de Raphaël, les deux chaises accélèrent. La chaise de Raphaël 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 Raphaël a exercé une force vers la gauche sur Daryl quand Daryl a exercé une force vers la droite sur la chaise de Raphaël. 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.

<https://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 charriots de différentes masses. Encore une fois, quand un charriot A exerce une force sur le charriot B lors de la collision, alors le charriot B exerce une force sur le charriot A dans la direction opposée. Les deux charriots subissent donc une force. Ce qui rend ce vidéo intéressant, c'est la présence d'un anneau, en face des charriots, qui se déforme sous l'effet des forces. Plus la force sur le charriot est grande, plus l'anneau se déforme. On remarque alors que lors des collisions, la déformation des anneaux des deux charriots est identique, ce qui montre que la force sur chacun des charriots est identique comme le prévoit la troisième loi de Newton.

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

Les premiers astronautes ont eu beaucoup de difficulté à travailler dans l'espace à cause de la troisième loi de Newton. Par exemple, chaque fois qu'un 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.

<https://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 massive.

<https://www.youtube.com/watch?v=NCelD0qr8Do>

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.

Erreurs de 3^e loi de Newton

On voit parfois dans des dessins animés que les personnages tentent de faire avancer un voilier plus vite en soufflant dans les voiles. On a aussi cette démonstration sur youtube.

<https://www.youtube.com/watch?v=PY-4K4e5s6w>

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.

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

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.

<https://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.

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

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

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

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).

Force nette ou force résultante

$$\vec{F}_{\text{nette}} = \sum \vec{F}$$

Deuxième loi de Newton

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

En composantes : $\sum F_x = ma_x$ $\sum F_y = ma_y$ $\sum F_z = ma_z$

Troisième loi de Newton

Les forces viennent toujours de l'interaction entre 2 objets. Chaque objet qui interagit subit une force et les deux forces sont toujours de même grandeur et dans des directions opposées.

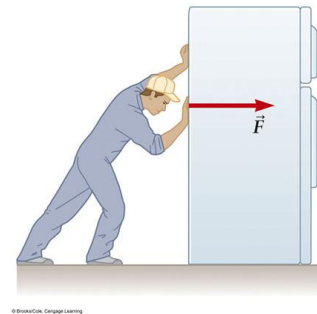
$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$

EXERCICES

3.4 La deuxième loi de Newton

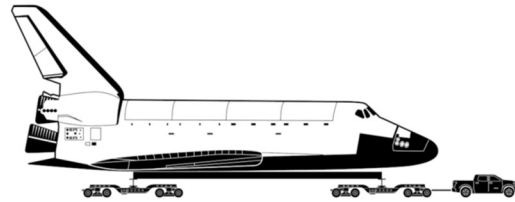
1. Rajiv pousse sur un réfrigérateur de 80 kg avec une force de 120 N. En supposant qu'il n'y a pas de force de friction entre le réfrigérateur et le plancher, quelle est l'accélération du réfrigérateur ?

www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/person-shown-pushing-refrigerator-sits-level-floor-assume-floor-slippery-horizontal-force--q1442657



2. Une voiture de 1200 kg s'arrête sur une distance de 80 m quand elle va à une vitesse de 100 km/h. Quelle est la grandeur de la force s'exerçant sur la voiture pendant le freinage ?

3. Le moteur d'un Toyota Tundra de 1800 kg fait une force maximale suffisante pour passer de 0 à 28,8 km/h en 1 seconde quand il ne tire pas une remorque. Combien de temps faudra-t-il pour que ce camion atteigne la vitesse de 10 km/h s'il tire maintenant une remorque de 133 000 kg si le moteur fait toujours la même force maximale ? (Évidemment, on néglige la friction entre la route et la remorque et la friction de l'air sur la remorque.)



news.pickuptrucks.com/2012/09/new-tundra-to-max-tow-space-shuttle-endeavour-to-final-resting-place.html

Vous pensez qu'un Toyota Tundra ne peut pas tirer la navette ?

<https://www.youtube.com/watch?v=26CtnvXKY3w>

4. 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 la longueur minimale de piste requise par cet avion s'il doit atteindre une vitesse de 80 m/s pour décoller ?
5. Une voiture de 1000 kg subit une force variable donnée par

$$F_x = 120 \frac{N}{s} \cdot t + 500 N$$

et il n'y a pas d'autres forces dans la direction de l'axe des x . À $t = 0$ s, la vitesse de la voiture est de 5 m/s dans la direction des x positifs et sa position initiale est $x = 0$ m.

- Quelle est la vitesse de la voiture à $t = 30$ s ?
- Quel est le déplacement de la voiture entre $t = 0$ s et $t = 30$ s ?
- Quelle est la vitesse de la voiture à $x = 400$ m ?

(Pour cette question, vous devriez tomber sur équation assez difficile à résoudre pour trouver t quand l'objet est à $x = 400$ m. Pour résoudre facilement cette équation, je vous suggère d'aller sur le site de Wolfram alpha <https://www.wolframalpha.com/>

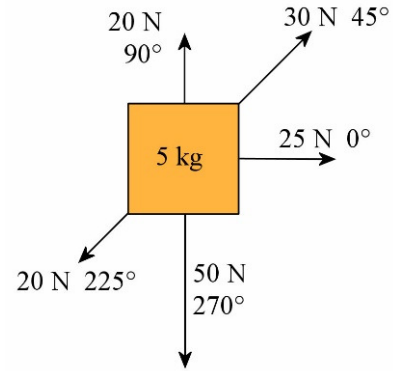
et d'utiliser la commande *solve*. Par exemple, si vous voulez résoudre l'équation $2x^2 + 0,5x + 5 = 20$, écrivez

$$\text{solve } 2*x^2+0.5*x+5=20$$

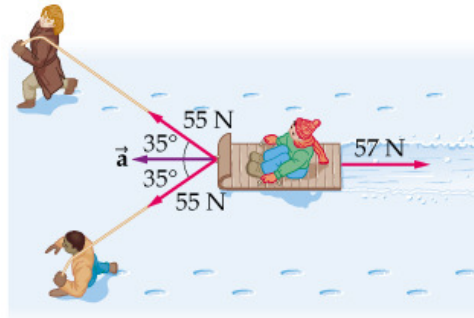
Utilisez des points, pas des virgules pour les chiffres. Vous allez alors obtenir le résultat montré à droite.

Cliquez sur *approximate forms* si vous voulez que Wolfram calcule la valeur des solutions.)

6. Cet objet de 5 kg est soumis aux forces montrées sur la figure. Quelle est son accélération (grandeur et direction) ?

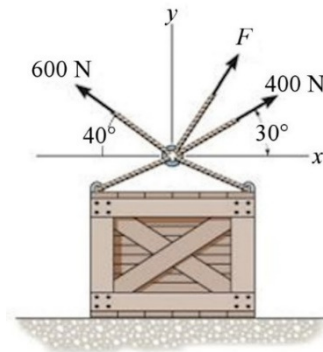


7. La petite Anita sur son traîneau de 2 kg se fait tirer par ses parents, Alfred et Gertrude. Au départ, Anita est arrêtée. Pendant les 2 premières secondes du mouvement, le traîneau a parcouru une distance de 6 m avec une accélération constante. Quelle est la masse d'Anita ?



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/22-kg-child-ride-teenagers-pull-32-kg-sled-ropes-indicated-figure-figure-1--teenagers-pull-q2939212

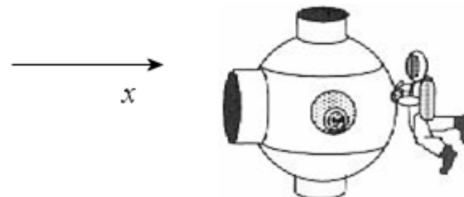
8. La force nette exercée par ces cordes attachées à la boîte est de 850 N directement vers le haut. Quelles sont la grandeur et la direction de la force inconnue F ?



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/result-force-vertically-upward-850n-i-f1-319n-i-having-trouble-finding-theta-best-way-angl-q1954937

3.5 La troisième loi de Newton

9. Un astronaute de 100 kg pousse son vaisseau spatial de 2500 kg avec une force de 200 N pendant 0,5 seconde. Initialement, le vaisseau et l'astronaute sont au repos.



www.ahsd.org/science/stroyan/hphys/CH4/ch4wq/p2ch4wq3.htm

- a) Quelle est la vitesse du vaisseau après la poussée ?
 b) Quelle est la vitesse de l'astronaute après la poussée ?

Défis

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

10. Un objet de 2 kg à $x = 0$ a initialement une vitesse de 10 m/s vers les x positifs. Toutefois, une force égale à

$$F = -8 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot x$$

agit sur cet objet. Quelle distance aura parcourue cet objet quand sa vitesse sera nulle ?

11. La vitesse d'un objet de 2 kg est donnée par

$$v = 2 \frac{1}{\text{sm}} \cdot x^2$$

Quelle est la formule de la force qui agit sur l'objet en fonction de sa position ?

RÉPONSES

3.4 La deuxième loi de Newton

1. 1,5 m/s²
2. 5787 N
3. 26 s
4. 768,9 m
5. a) 74 m/s b) 915 m c) 41,93 m/s
6. 7,885 m/s² à -35,56°
7. 9,04 kg
8. 287,5 N à 66,8°

3.5 La troisième loi de Newton

9. a) -0,04 m/s b) 1 m/s

Défis

10. 5 m
11. $F = 16 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{m}^2} \cdot x^3$