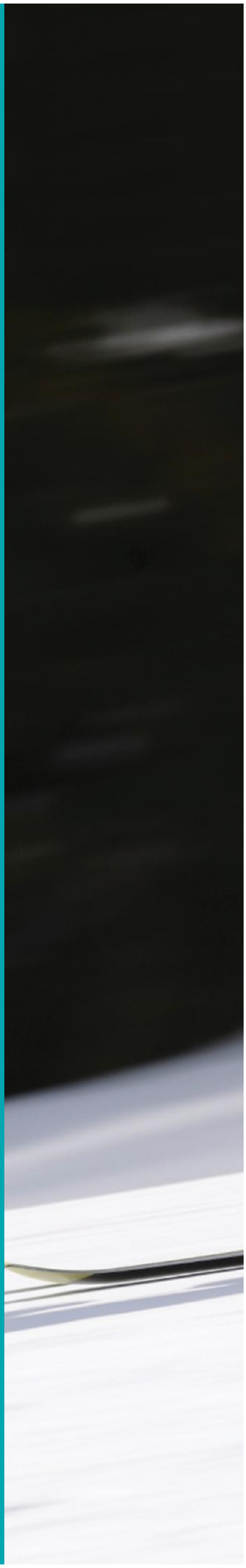
Chapitre 05

Les forces et la deuxième loi de Newton



Buts du chapitre

Ce chapitre a pour objet l'étude de la dynamique. Après l'étude de ce chapitre, vous serez en mesure :

- de comprendre les notions d'inertie, de masse et de force ;
- d'apprendre à tracer un diagramme des forces ;
- de résoudre des problèmes de statique à l'aide de la première loi de Newton ;
- de résoudre des problèmes de dynamique à l'aide de la deuxième loi de Newton.

Préalables

Dans ce chapitre, vous allez utiliser les vecteurs et la cinématique. Revoyez :

- les vecteurs à deux dimensions, étudiés à la section 2.1 ;
- l'algèbre vectorielle, présentée à la section 2.3 ;
- le mouvement uniformément accéléré, étudié à la section 3.7.

Un skieur prend une position pour minimiser la force de traînée.

En utilisant les notions de la cinématique que nous avons étudiées dans les chapitres précédents, nous pouvons décrire le mouvement des objets, par exemple dans le cas d'un skieur descendant une pente. Il suffit de tracer le diagramme de mouvement de l'objet et de relier mathématiquement ou graphiquement les vecteurs position, vitesse et accélération avec le temps. La cinématique nous permet donc de décrire comment les objets bougent, mais elle ne nous précise pas les causes de ce mouvement. L'étude des causes du mouvement d'un objet se nomme la *dynamique*.

Lorsque la vitesse d'un objet change, en module ou en orientation, on sait que cette variation de vitesse (ou accélération) doit avoir une cause. En effet, l'expérience de tous les jours montre qu'une variation de vitesse est nécessairement attribuable à une interaction entre l'objet et son environnement. Le skieur est attiré vers le bas de la pente par la force gravitationnelle. La surface de la pente et la résistance de l'air influencent aussi son mouvement.

FIGURE 5.1
Isaac Newton : physicien et mathématicien anglais (1642-1727)

C'est Isaac Newton (*voir la figure 5.1*) qui a formulé les fondements de la dynamique en 1687 dans son ouvrage intitulé *Principia**. La mécanique newtonienne repose sur trois principes qu'on appelle les « lois de Newton », la notion principale étant la force. Dans ce chapitre, nous verrons comment les forces exercées sur un objet influencent son mouvement. Nous continuons à étudier le mouvement de translation, ce qui implique que nous remplaçons les objets par des particules, sans forme précise. Les situations où des objets interagissent, c'est-à-dire qu'ils exercent des forces l'un sur l'autre, seront examinées dans le chapitre 6.

La dynamique newtonienne ne s'applique pas à toutes les situations. Lorsque les objets en interaction ont des vitesses qui se rapprochent de la vitesse de la lumière, on doit remplacer la dynamique newtonienne par la théorie de la relativité d'Einstein, qui s'applique à toutes les vitesses. Si les corps qui interagissent sont à l'échelle de la structure atomique (par exemple des électrons à l'intérieur d'un atome), on a recours à la mécanique quantique. Ces deux théories seront étudiées dans le tome 3.

5.1 La force

Pour changer le mouvement d'un objet, il faut le pousser ou le tirer. Il faut pousser un clou avec un marteau pour qu'il s'enfonce dans un morceau de bois. Une locomotive tire sur les wagons pour les faire avancer. La poussée et la traction sont deux exemples de *force*. On définit la force de la façon suivante :

Force

Une force est une action d'un agent sur un objet.

Cette définition est très importante. Examinons en détail chacun de ses éléments. Comme exemple, prenons un joueur de soccer qui frappe un ballon dans les airs ; ce mouvement est appelé « la bicyclette » (*voir la figure 5.2*).

* On peut trouver une version française de *Principia* dans l'ouvrage de Stephen HAWKING, *Sur les épaules des géants*, Paris, Dunod, 2003, 934 p.

La force est une action, c'est-à-dire une poussée ou une traction. Par exemple, une force peut être la poussée exercée par votre pied sur un ballon afin de le projeter au loin ou bien la traction exercée par une locomotive sur un wagon.

Une force agit sur un objet. Une poussée ou une traction agit toujours sur un objet, comme la poussée qui agit sur le ballon ou encore la traction qui agit sur les wagons. On dit que la force est exercée sur un objet. Il peut y avoir plusieurs forces qui sont exercées simultanément sur le même objet.

Une force est produite par un agent. L'agent est celui qui cause la force et qui est responsable de cette force. Cet agent est toujours un autre objet que celui sur lequel la force agit. Par exemple, la force agissant sur le ballon (l'objet) est produite par le pied (un autre objet) qui est donc l'agent. Chaque force qui s'exerce sur un objet possède toujours un agent. Vous devez toujours être en mesure d'identifier l'agent qui produit la force sur un objet.

FIGURE 5.2
Lorsqu'on frappe un ballon, le pied exerce une force sur le ballon.

La trajectoire du ballon de la figure 5.2 dépend de l'intensité du coup de pied, mais aussi de l'orientation donnée par le pied. La force du pied sur le ballon a un module et une orientation. La force possède les caractéristiques d'une quantité vectorielle. Pour confirmer cette affirmation, il faut vérifier que la force obéit à l'algèbre vectorielle. Prenons par exemple une caisse sur une surface glacée. On tire la caisse comme à la figure 5.3a, en exerçant deux forces $\vec{\mathbf{F}}_1$ et $\vec{\mathbf{F}}_2$ (*voir la figure 5.3b*). Le mouvement de la caisse sera le même si on remplace les deux forces par la *force résultante*, dénotée $\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = \vec{\mathbf{F}}_1 + \vec{\mathbf{F}}_2$, comme le montre la figure 5.3c. La force est bien une quantité vectorielle : lorsqu'un objet est soumis à plusieurs forces $\vec{\mathbf{F}}_1$, $\vec{\mathbf{F}}_2$, ..., le résultat est le même que s'il est soumis à la force résultante $\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}}$, qu'on obtient en calculant la somme vectorielle :

Force résultante

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = \sum_{i=1}^{N} \vec{\mathbf{F}}_i = \vec{\mathbf{F}}_1 + \vec{\mathbf{F}}_2 + \cdots + \vec{\mathbf{F}}_N \,. \tag{5.1}$$

Une seule force, la force résultante, caractérisée par son module et son orientation, a **exactement le même effet** sur l'objet que l'ensemble des forces individuelles. Cette caractéristique de pouvoir remplacer toutes les forces appliquées sur un objet par une seule porte le nom de *principe de superposition des forces*. La force résultante sur la boîte de la figure 5.3a est représentée à la figure 5.3c. Comme tous les autres vecteurs, une force ou une force résultante possède une ou des composantes qui dépendent du système de coordonnées choisi.

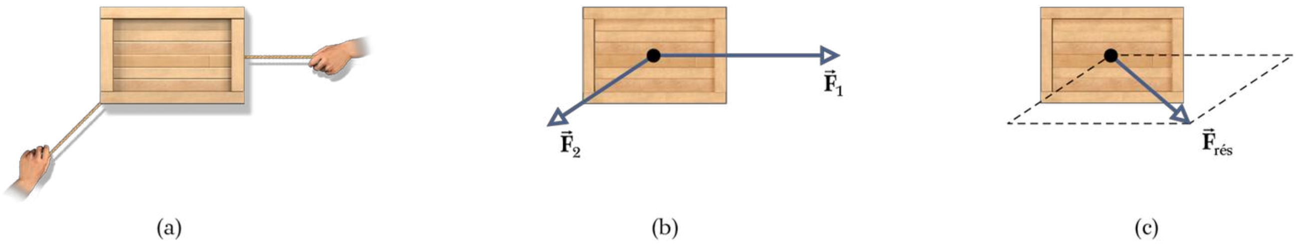
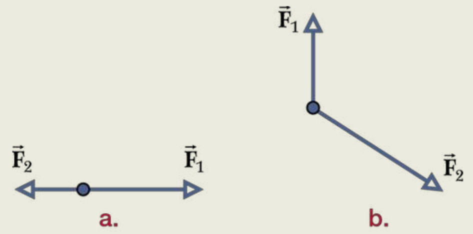


FIGURE 5.3
(a) Deux forces exercées sur une boîte. (b) La représentation des forces. (c) La représentation de la force résultante.

Il reste maintenant à utiliser un étalon pour obtenir l'unité de la force. On sait qu'une force peut mettre en mouvement un objet initialement au repos ; la force provoque l'accélération de l'objet. Le système international (SI) se base sur ce fait pour définir l'unité de force *newton,* dont l'abréviation est N. Sur une surface sans frottement, on prend un objet dont la masse est de 1 kg, c'est-à-dire une copie parfaite de l'étalon illustré dans la figure 1.21 (*voir la page 19*). On exerce sur lui une force de telle sorte qu'on arrive à lui imprimer, par tâtonnements, une accélération mesurée de 1 m/s^2. Cette force a alors un module de 1 N. Les nombreuses expériences indiquent que si on multiplie la force par un certain facteur, l'accélération est multipliée par exactement le même facteur.

TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 5.1

Les figures ci-dessous montrent deux situations où deux forces sont appliquées sur un objet. Tracez la force résultante dans chacun des cas.



5.2 Un répertoire de forces

Cette section est une introduction à quelques types de forces qui sont souvent considérées dans le domaine de la mécanique. Il convient de bien connaître les caractéristiques de ces forces dans la résolution de problèmes de dynamique. Ces forces se divisent en deux catégories. Les *forces de contact* sont les forces où l'agent doit avoir un contact avec l'objet pour que la force s'exerce. Lorsqu'on pousse une porte, on doit avoir un contact avec la porte.

Pour certaines forces, le contact entre l'agent et l'objet n'est pas nécessaire pour que la force s'exerce. Ce sont des *forces à distance*. En mécanique, la force gravitationnelle est la force à distance que l'on va rencontrer très souvent. Un autre exemple simple est la force magnétique exercée par un aimant sur un objet aimanté : un aimant peut pousser ou tirer un autre aimant sans y toucher.

La force gravitationnelle

La force gravitationnelle $\vec{\mathbf{F}}_g$, aussi appelée «force de gravité», est la force à distance qui tire vers le sol un objet qui tombe (*voir la figure 5.4a*). La force gravitationnelle agit également sur les objets au repos (*voir la figure 5.4b*) ou sur les objets en mouvement qui reposent sur le sol (*voir la figure 5.4c*).

Dans les premiers chapitres de ce manuel, on ne traite pas de la nature de cette force et, en général, on examine des situations où les objets sont près de la surface de la Terre (ou d'une autre planète). La forme générale de cette force sera étudiée à la section 7.2.

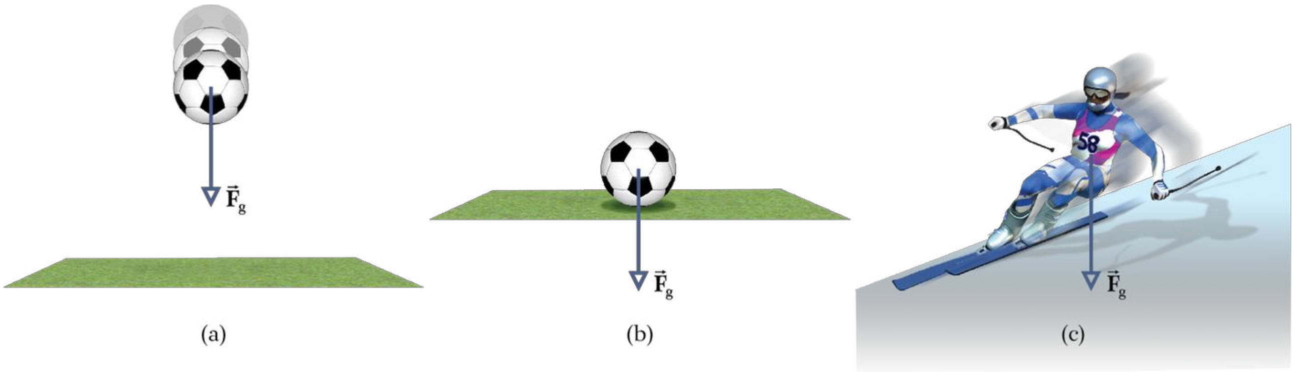


FIGURE 5.4
(a) Un objet en chute libre. (b) Un objet au repos sur le sol. (c) Un objet glisse le long d'un plan incliné. Dans les trois cas, la force gravitationnelle $\vec{\mathbf{F}}_g$ attire les objets vers le centre de la Terre.

On définit la *force gravitationnelle* $\vec{\mathbf{F}}_g$ qui s'exerce sur un objet comme l'attraction vers le centre de la Terre ou d'un autre objet. Ainsi, lorsqu'il est question de la force gravitationnelle qui s'exerce sur un objet, il s'agit d'une force qui le tire **toujours vers le centre de la Terre** – c'est-à-dire directement vers le bas, comme l'illustrent les trois situations de la figure 5.4. L'agent de la force gravitationnelle est la sphère terrestre au complet; c'est toute la Terre qui attire l'objet, pas seulement le sol. Cette force est appliquée sur toutes les parties de l'objet ou, de façon équivalente, elle est appliquée au centre géométrique de l'objet lorsqu'un objet a une masse volumique uniforme.

Le module de la force gravitationnelle est proportionnel à la masse de l'objet (qui sera définie à la section 5.5) et à l'accélération gravitationnelle g. La force gravitationnelle est

$$\vec{\mathbf{F}}_g = mg\ \overrightarrow{\text{vers le bas}}\ . \tag{5.2}$$

Force gravitationnelle

Nous allons reparler en détail de la force gravitationnelle exercée par la Terre sur les objets à la section 5.7. Nous allons aussi étudier la forme générale de la force gravitationnelle au chapitre 7.

La force élastique

Les ressorts exercent des forces sur les objets placés à leurs extrémités lorsqu'ils sont étirés ou comprimés. La force qu'exerce un ressort est une force de contact qu'on appelle *force élastique*. Un ressort étiré tire sur l'objet (*voir la figure 5.5b à la page suivante*), alors qu'un ressort comprimé pousse sur l'objet (*voir la figure 5.5c à la page suivante*).

On trouve expérimentalement que le module de la force est proportionnel à la déformation du ressort ΔL, c'est-à-dire à la variation de sa longueur par rapport à sa longueur naturelle:

$$F_{\text{él}} = k\,\Delta L\ . \tag{5.3}$$

Force élastique (loi de Hooke)

La direction de la force élastique est toujours parallèle au ressort, et son sens dépend du type de déformation: un ressort comprimé pousse l'objet et un ressort étiré tire l'objet. Pour cette raison, la force élastique est une *force de rappel*. La constante k est appelée la *constante de rappel* ou *constante d'élasticité* du ressort. Dans le SI,

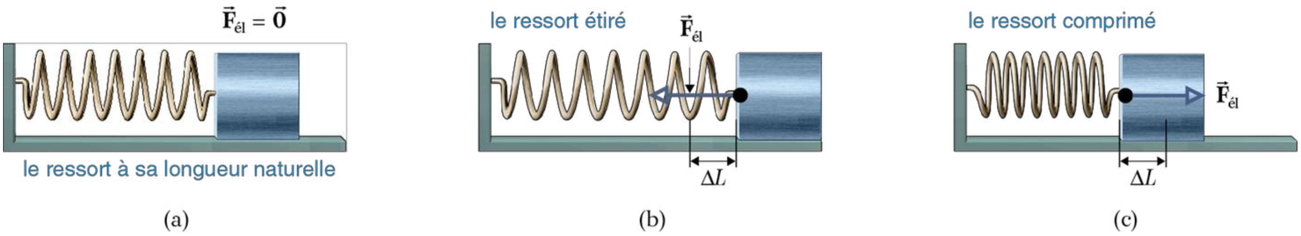


FIGURE 5.5
(a) Le ressort est à sa longueur naturelle. Il n'exerce pas de force. (b) Le ressort est étiré ; il tire l'objet vers la gauche. (c) Le ressort est comprimé ; il pousse l'objet vers la droite.

elle est mesurée en newtons par mètre (N/m). Un ressort très rigide (comme celui d'une suspension d'automobile) a une constante de rappel très élevée, alors qu'un ressort peu rigide (comme un Slinky) a une constante de rappel très faible.

L'équation 5.3 est appelée la *loi de Hooke*, car elle a été découverte par le physicien anglais Robert Hooke (1635-1703). Elle est valide tant que la déformation ΔL demeure faible ; lorsqu'un ressort est étiré au-delà d'une certaine limite (la limite élastique), il se déforme de façon permanente et l'équation 5.3 n'est plus valable.

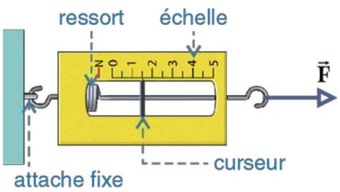


FIGURE 5.6
Un dynamomètre muni d'un ressort

Les ressorts sont utilisés dans la fabrication des instruments de mesure de force, qu'on appelle *dynamomètres*. Il s'agit de placer un curseur au bout du ressort et une règle graduée sur le boîtier, comme le montre la figure 5.6. On fixe une extrémité de l'appareil et on applique une force à l'autre extrémité. L'étirement du ressort est proportionnel au module de la force appliquée. Pour étalonner l'instrument, on utilise une force de module connu. L'appareil peut ensuite servir à mesurer des forces dont le module est inconnu.

Nous allons étudier plus en détail la force exercée par les ressorts et la loi de Hooke à la section 8.6.

La force normale

Lorsque vous vous reposez sur votre lit, les ressorts du matelas se compriment et ils exercent sur vous une force vers le haut. Si vous vous couchez sur le plancher de bois, celui-ci va aussi se comprimer : le bois est plus rigide qu'un matelas, mais ses molécules vont se rapprocher très légèrement et pousser sur vous vers le haut. Si vous mettez à la place un piano (*voir la figure 5.7*), la compression va augmenter et le plancher va exercer une force normale plus grande (à moins qu'il ne cède).

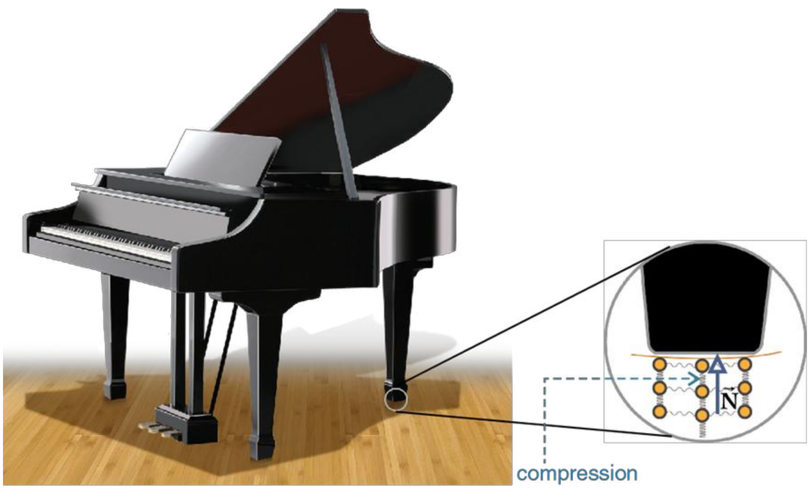


FIGURE 5.7
Lorsqu'un piano se trouve sur un plancher, il comprime les atomes du plancher. Cette compression produit une force vers le haut, qu'on appelle la « force normale $\vec{N}$ ».

Force normale

➔ Chaque fois qu'on place un objet sur une surface, celle-ci se comprime et exerce sur l'objet une force perpendiculaire à la surface. Cette force est appelée la **force normale**; on désigne cette force par $\vec{\mathbf{N}}$.

Le qualificatif «normal», qui tire son origine des mathématiques, indique que cette force est **toujours perpendiculaire à la surface.** La compression des molécules de la surface est habituellement très faible et difficile à mesurer. Pour cette raison, le module de la force normale est habituellement calculé à l'aide des autres forces exercées sur l'objet.

La figure 5.8 illustre trois situations: dans le premier cas, la table exerce sur la lampe une force $\vec{\mathbf{N}}$ orientée vers le haut. Dans le deuxième cas, la surface est inclinée. Cette surface exerce sur la caisse une force normale perpendiculaire à la surface, donc une force oblique. Dans la figure 5.8c, une personne pousse sur un mur. La personne subit deux forces normales: une force normale exercée par le plancher (celui-ci est comprimé par la personne) et par le mur (il est comprimé parce que la personne pousse dessus).

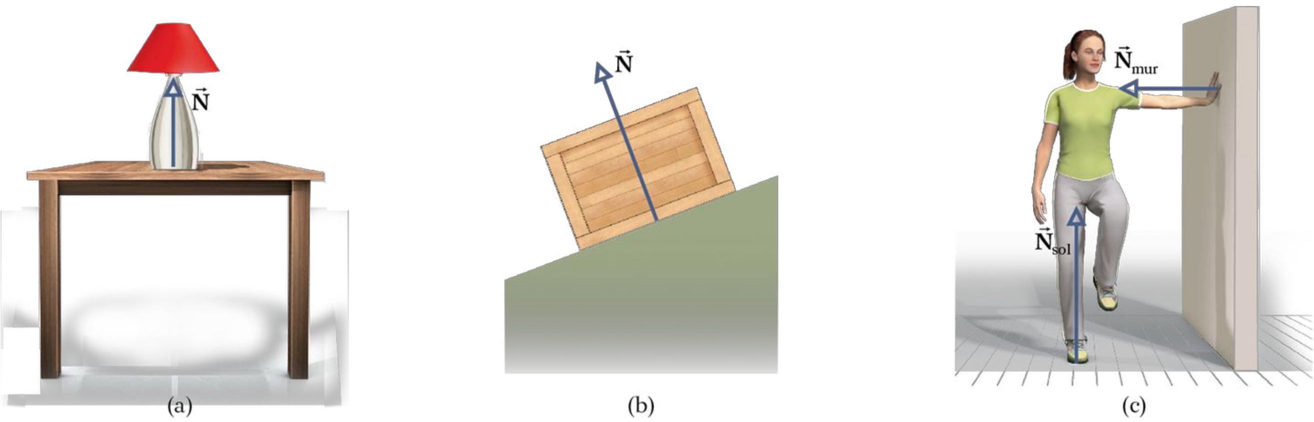


FIGURE 5.8
Un objet est soumis à une force normale $\vec{\mathbf{N}}$ perpendiculaire à la surface, qu'il soit: (a) placé sur le dessus d'une table, (b) appuyé sur une surface inclinée ou (c) appuyé contre un mur.

Le frottement

Au hockey, les joueurs s'échangent facilement la rondelle en la faisant glisser sur la glace. Lorsqu'on pratique ce sport dans un gymnase, la rondelle ne glisse plus suffisamment. Quelle est la différence entre la glace et le plancher d'un gymnase? Dans les deux cas, la rondelle est ralentie dans son mouvement par une force qu'on appelle la *force de frottement cinétique*, $\vec{\mathbf{f}}_c$, illustrée à la figure 5.9 à la page suivante. La rondelle glisse plus facilement sur la patinoire que sur le plancher, car la force de frottement exercée par la patinoire est plus faible que la force exercée par le plancher sur la rondelle.

Lorsque la force de frottement est très faible, comme dans le cas de la rondelle sur la patinoire, on peut négliger cette force; on dit alors que la surface est «sans frottement». Dans les laboratoires de physique, on utilise parfois des tables à coussin d'air; l'objet ne glisse pas sur la table, mais il flotte sur un coussin d'air. On peut aussi diminuer le frottement en faisant rouler l'objet plutôt qu'en le faisant glisser: pour jouer au hockey dans un gymnase, on remplace la rondelle par une balle.

Force de frottement cinétique

La **force de frottement cinétique** $\vec{\mathbf{f}}_c$ est une force de contact exercée par la surface sur un objet qui glisse. Cette force est toujours parallèle à la surface, et son sens est **opposé au sens de la vitesse de l'objet par rapport à la surface.**

La surface peut aussi exercer une force de frottement lorsque l'objet est immobile par rapport à la surface. Par exemple, plaçons la rondelle sur une table légèrement inclinée. La rondelle reste immobile, car la surface exerce une force de frottement statique $\vec{\mathbf{f}}_s$, comme le montre la figure 5.10. Si on incline suffisamment la table, la rondelle se met à glisser, ce qui montre que la force de frottement statique a une limite.

Force de frottement statique

Une surface exerce sur un objet une **force de frottement statique** $\vec{\mathbf{f}}_s$, parallèle à la surface, pour le garder **immobile par rapport à la surface.** Cette force est une force de contact.

Le frottement est étudié plus en détail à la section 5.8. Pour l'instant, il suffit de comprendre qualitativement cette force.

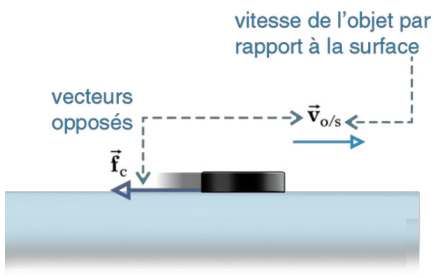


FIGURE 5.9
La force de frottement cinétique sur la rondelle est opposée à la vitesse de la rondelle par rapport à la surface.

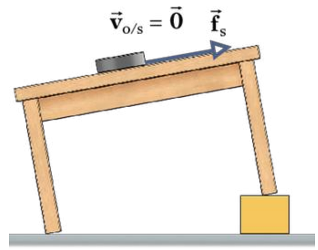


FIGURE 5.10
La force de frottement statique $\vec{\mathbf{f}}_s$ est exercée par la table sur la rondelle, pour garder la rondelle immobile par rapport à la table.

La force de tension et la force de compression

Une corde peut être utilisée pour tirer un objet. Les objets flexibles comme les câbles, les fils et les cordes tendus exercent une force de contact, qu'on appelle *force de tension* $\vec{\mathbf{T}}$, sur les objets attachés à leur extrémité. La figure 5.11 illustre une corde tirant un traîneau. La *tension* T dans la corde représente le module de la force $\vec{\mathbf{T}}$.

Pour comprendre comment est produite la force de tension, il faut regarder la corde à très petite échelle (*voir la figure 5.12*). Cette corde est composée de molécules liées ensemble. Lorsqu'on tire sur la corde, les molécules s'éloignent les unes des autres. Les liaisons moléculaires se comportent comme de petits ressorts étirés. Dans son ensemble, la corde s'étire très légèrement et, comme un ressort, elle exerce une force de traction. C'est cette force qu'on appelle la «force de tension».

Une corde exerce une **force de tension $\vec{T}$** sur les objets attachés à une extrémité. Cette force est une force de contact qui est toujours parallèle à la corde, et il s'agit d'une force de traction. Le module de cette force est appelé la «tension T» dans la corde.

Force de tension

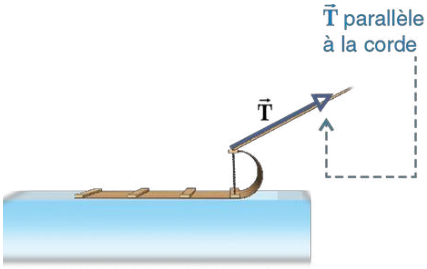


FIGURE 5.11
La corde exerce une force de tension $\vec{T}$ sur le traîneau.

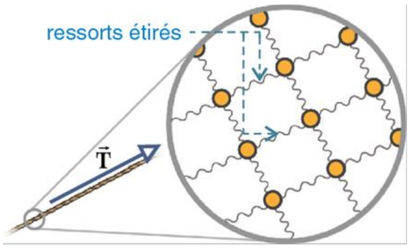


FIGURE 5.12
Les molécules de la corde se comportent comme des ressorts étirés, ce qui produit la force de tension, qui est parallèle à la corde.

On peut aussi exercer une force à l'aide d'un objet rigide comme une tige. La figure 5.13a illustre un chariot muni d'une tige tirée vers la droite. En tirant sur la tige, celle-ci s'étire très légèrement (les liaisons moléculaires se comportent comme des ressorts étirés). La tige exerce une force de tension $\vec{T}$ sur le chariot, équivalente à la force d'une corde.

Lorsqu'on pousse sur la tige, comme à la figure 5.13b, la tige se comprime, c'est-à-dire que les molécules se rapprochent très légèrement et se comportent comme des ressorts comprimés. La force de la tige sur le chariot est alors une *force de compression* $\vec{C}$.

Un objet rigide comprimé exerce une **force de compression $\vec{C}$.** Cette force est une force de contact qui est une poussée. Le module de cette force est appelé la «compression C» de l'objet.

Force de compression

FIGURE 5.13
(a) La tige étirée exerce une force de tension sur le chariot. (b) La tige comprimée exerce une force de compression sur le chariot.

La traînée

Lorsqu'une balle se déplace dans l'air (*voir la figure 5.14*) ou un autre fluide comme l'eau, elle subit une force de résistance. Cette force est appelée la *traînée* $\vec{\mathbf{f}}_T$. C'est une force de contact exercée par les molécules du fluide sur l'objet en mouvement. La traînée est toujours opposée à la vitesse de l'objet par rapport au fluide. Habituellement, cette force est considérée comme négligeable. Elle sera étudiée à la section 5.9.

FIGURE 5.14
Une balle dans les airs subit la force de traînée $\vec{\mathbf{f}}_T$.

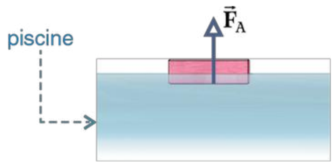


FIGURE 5.15
Un objet dans l'eau subit la poussée d'Archimède $\vec{\mathbf{F}}_A$.

La poussée d'Archimède

Certains objets flottent sur l'eau. Les objets dans un fluide subissent une force vers le haut qu'on appelle la *poussée d'Archimède* (*voir la figure 5.15*). Cette force est une force de contact exercée par les molécules du fluide, dont la pression augmente avec la profondeur. Lorsqu'un objet est dans un fluide, la poussée d'Archimède est

Poussée d'Archimède

$$\vec{\mathbf{F}}_A = \rho_f V_{im}\, g \ \ \overrightarrow{\text{vers le haut}}\,, \qquad (5.4)$$

où ρ_f est la masse volumique du fluide exprimée en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3), et V_{im} est le volume de l'objet immergé exprimé en mètres cubes (m^3). Si tout l'objet est dans le fluide, V_{im} représente le volume complet de l'objet. Cependant, lorsque l'objet flotte, V_{im} représente le volume du fluide déplacé par l'objet.

Les interactions fondamentales

Les forces vues jusqu'à maintenant sont des forces macroscopiques : elles s'exercent sur des objets à une échelle humaine. Nous avons expliqué les forces de contact comme étant le résultat de forces entre les atomes et les molécules. Les forces de contact ne sont pas des forces fondamentales, mais plutôt le résultat des interactions au niveau atomique.

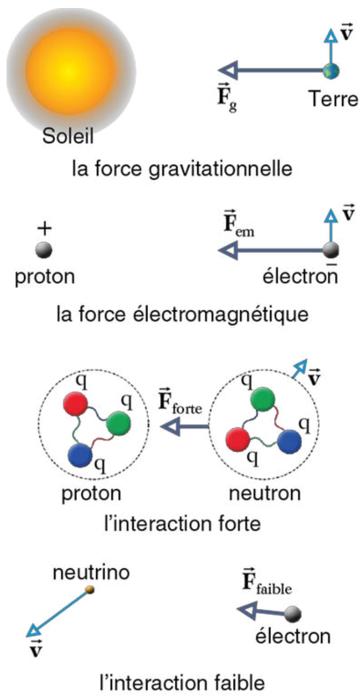


FIGURE 5.16
Les forces fondamentales

En étudiant les constituants de la matière, les physiciens ont trouvé qu'il y a quatre forces (ou interactions) fondamentales entre ces constituants (*voir la figure 5.16*). La première force est la *force gravitationnelle*. Cette force peut être exercée sur tous les objets et même sur la lumière (la lumière provenant d'une étoile est déviée lorsqu'elle passe tout près du Soleil). Le Soleil exerce sur la Terre une force gravitationnelle, ce qui maintient la Terre dans le système solaire.

La deuxième force fondamentale est la *force électromagnétique*. Cette force s'exerce entre les particules ayant une propriété appelée la «charge électrique» (qui peut être positive ou négative). L'interaction entre des aimants, ou celle entre les cheveux après les avoir frottés à un ballon de fête, sont deux exemples de la force électromagnétique. Les atomes sont constitués d'un noyau positif et d'électrons négatifs. La force électromagnétique entre le noyau et les électrons assure la cohésion des atomes. La force entre les molécules est aussi la force électromagnétique; les forces de contact sont donc en fait de nature électromagnétique. Les interactions électromagnétiques sont le sujet principal du tome 2 de ce manuel.

Les deux autres forces fondamentales ne s'observent qu'à très petite échelle, celle du noyau atomique. Ce noyau est constitué de protons et de neutrons. Ceux-ci sont aussi constitués de particules appelées «quarks». L'*interaction forte* est la force entre les quarks, qui les lie ensemble, et de façon résiduelle lie les protons et les neutrons ensemble dans le noyau. L'électron ne subit pas l'interaction forte.

La dernière force fondamentale est appelée l'*interaction faible*. Elle est exercée sur les quarks, sur les électrons et aussi sur des particules appelées «neutrinos». Même si cette interaction est plus faible, elle est importante au niveau du noyau. Elle produit par exemple la désintégration du neutron libre. Certains physiciens ont aussi formulé l'hypothèse que cette interaction serait la clé pour expliquer que l'Univers est composé de matière plutôt que d'un mélange de matière et d'antimatière. Nous reparlerons de l'interaction forte et de l'interaction faible lors de l'étude de la physique moderne dans le tome 3.

Plusieurs chercheurs travaillent à comprendre ces interactions en essayant de trouver une symétrie pouvant les relier. Cette quête date du 19^{e} siècle, lorsque James Clerk Maxwell a montré que la force électrique et la force magnétique étaient en fait deux aspects de la même force fondamentale. Dans les années 1960, les physiciens Sheldon Glashow, Steven Weinberg et Abdus Salam ont montré que la force électromagnétique et l'interaction faible étaient en fait deux facettes d'une interaction plus fondamentale qu'on appelle l'«interaction électrofaible». Les recherches se poursuivent pour unir l'interaction électrofaible avec l'interaction forte et avec la force gravitationnelle. Cependant, pour l'instant, on demeure encore au stade des hypothèses.

5.3 Le diagramme des forces

La première étape pour obtenir le mouvement d'un objet à partir de la dynamique consiste à connaître les forces appliquées sur cet objet. Comme les forces sont des vecteurs, il est très important de les représenter correctement avant d'essayer d'écrire les équations.

Un *système* est composé d'un objet ou d'un regroupement d'objets qu'on veut étudier. Tous les objets à l'extérieur du système se retrouvent dans son *environnement*. Le mouvement d'un objet ou d'un système est déterminé par l'ensemble des forces que son environnement exerce sur lui. La première étape, avant de se lancer dans les calculs pour déterminer le mouvement d'un système, est donc d'identifier **toutes les forces** agissant sur celui-ci. On a recours à ce qu'on appelle un *diagramme des forces* qui représente le système qui est étudié comme une particule avec toutes les forces agissant sur lui.

TECHNIQUE 5.1 La construction d'un diagramme des forces

1. **Tracer un schéma de la situation.** Dessinez (sans faire une œuvre d'art) le système et tous les objets de son environnement qui le touchent, comme une corde ou une surface.

2. **Tracer une courbe fermée autour du système** pour bien identifier l'objet ou le système.

3. **Localiser sur cette courbe les points de contact où un objet de l'environnement touche le système.** Ces points de contact sont les endroits où l'environnement exerce des forces de contact sur le système.

4. **Tracer le vecteur accélération $\vec{\mathbf{a}}$.** Si l'orientation de $\vec{\mathbf{a}}$ est inconnue, posez-en une, et si l'accélération est nulle, inscrivez $\vec{\mathbf{a}} = \vec{\mathbf{0}}$.

5. **Représenter le système (l'objet) dans un deuxième schéma.** Encore une fois, ce schéma n'a pas à être une œuvre d'art. À la limite, un simple rectangle suffit.

6. **Identifier toutes les forces agissant sur le système et tracer les vecteurs correspondants.** Les vecteurs des forces de contact sont tracés au point de contact correspondant. Il y a au moins une force de contact à chaque point de contact. Dans ce premier tome, la seule force à distance à laquelle les objets sont soumis est la force gravitationnelle. Tracez le vecteur $\vec{\mathbf{F}}_g$ au centre de l'objet. Identifiez chaque vecteur par son symbole. S'il y a lieu, utilisez des indices pour distinguer des forces de même type.

7. **Tracer un système de coordonnées cartésiennes.**

EXEMPLE 5.1 Dans un ascenseur

Une personne est dans un ascenseur qui se déplace vers le haut. Tracez le diagramme des forces de la personne lorsque le module de la vitesse de l'ascenseur diminue.

SOLUTION

Illustrer la situation

Dans la deuxième partie du diagramme, nous représentons la personne sous la forme d'un rectangle (*voir la figure 5.17*). La vitesse est orientée vers le haut. Comme le module de la vitesse diminue, l'accélération est opposée à la vitesse, donc elle est orientée vers le bas.

Les points de contact de l'objet avec l'environnement sont les pieds. Les forces de contact sont les forces normales $\vec{\mathbf{N}}_d$ et $\vec{\mathbf{N}}_g$, et la force gravitationnelle (une force à distance) est également présente.

REMARQUE

On pourrait remplacer les deux forces normales par une force normale résultante $\vec{\mathbf{N}} = \vec{\mathbf{N}}_g + \vec{\mathbf{N}}_d$.

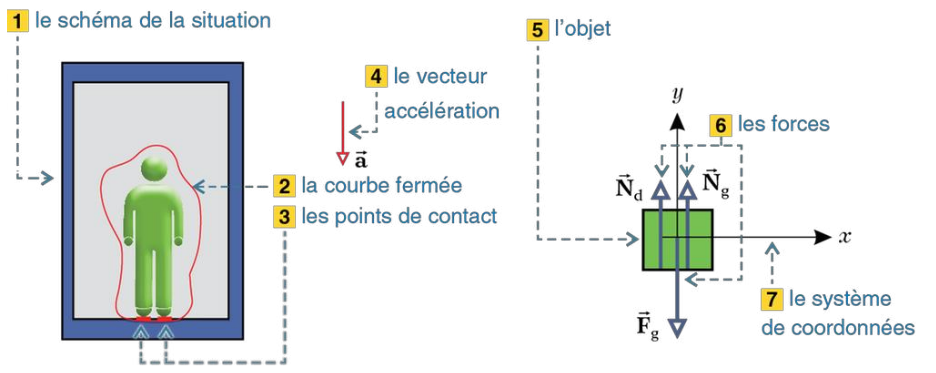
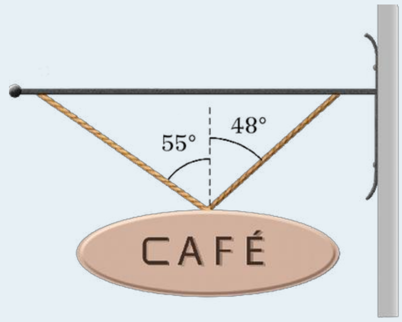


FIGURE 5.17
Le diagramme des forces de la personne dans l'ascenseur

EXEMPLE 5.2 Une enseigne suspendue

Une enseigne de restaurant est suspendue à l'aide de deux cordes (*voir l'illustration ci-contre*). Tracez le diagramme des forces pour l'enseigne.



SOLUTION

Illustrer la situation

Nous ajoutons les indices 1 et 2 aux forces de tension pour les distinguer (*voir la figure 5.18*).

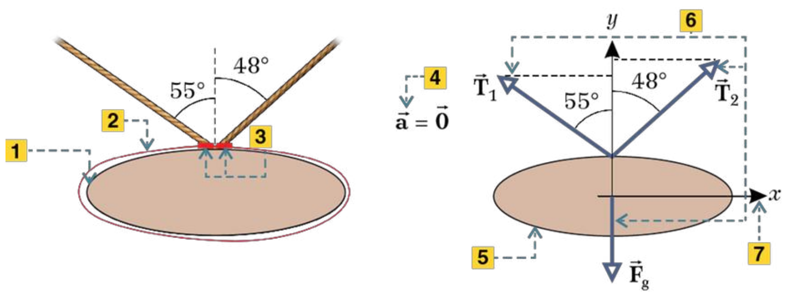


FIGURE 5.18
Le diagramme des forces de l'enseigne

EXEMPLE 5.3 Vive l'hiver...

Dans un centre de glissade sur tube, un enfant, assis sur un tube, est tiré à vitesse constante par un remonte-pente sur une surface inclinée avec frottement. Construisez le diagramme des forces pour le système composé de l'enfant assis et du tube.

SOLUTION

Illustrer la situation

Ici, le système est l'enfant avec le tube. Nous dessinons la courbe fermée autour de l'enfant et du tube. Le diagramme des forces est présenté à la figure 5.19 (*voir la page suivante*).

REMARQUE

Observez bien l'orientation des forces dans le diagramme des forces de la figure 5.19. La force gravitationnelle $\vec{F}_g$ n'est pas parallèle à l'axe des y puisqu'elle doit être orientée vers le centre de la Terre. De plus, la force normale $\vec{N}$ est perpendiculaire à la surface sur laquelle s'appuie le tube, et la force de frottement cinétique $\vec{f}_c$ est parallèle à la surface.

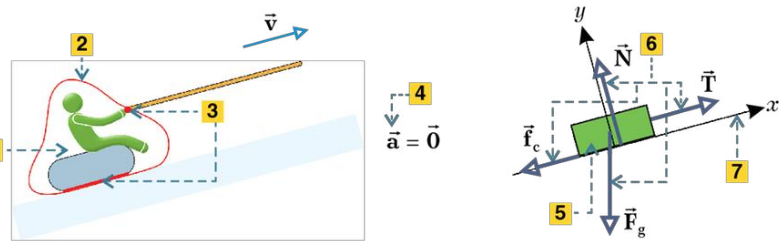


FIGURE 5.19
Le diagramme des forces du système enfant-tube

Lorsqu'on analyse un système, il est important de distinguer les forces exercées par l'environnement sur le système des forces exercées par un élément du système sur un autre élément. Dans le dernier exemple, le diagramme des forces ne comprend aucune force exercée par le tube sur l'enfant. Toute force qui s'exerce sur un objet du système provenant d'un élément de son environnement est appelée *force extérieure.* Si les objets du système sont reliés de façon rigide, on peut considérer le système comme une particule, et la force résultante $\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}}$ qui agit sur lui correspond à la somme vectorielle de toutes les forces extérieures. La force résultante d'un système ne comprend pas les *forces internes,* c'est-à-dire les forces qui s'exercent entre deux objets à l'intérieur d'un même système.

5.4 La première loi de Newton

Prenons par exemple une rondelle de hockey sur un plancher de bois horizontal. La rondelle est immobile au départ. Si on ne fait rien, elle restera immobile. Supposons maintenant qu'on la pousse en exerçant une force de courte durée. Elle se mettra en mouvement; elle va ensuite ralentir graduellement pour s'arrêter. Il faut une force pour mettre en mouvement un objet.

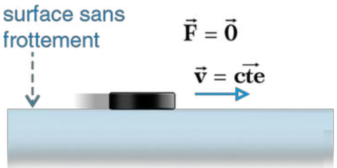


FIGURE 5.20
La rondelle a une vitesse constante lorsque la force résultante est nulle.

Si on recommence l'expérience avec la même rondelle, mais sur une patinoire, elle ralentira beaucoup moins rapidement. Dans les deux cas, la force de frottement cinétique exercée par la surface sur la rondelle arrête celle-ci. Si on suppose une surface dont le frottement est négligeable (*voir la figure 5.20*), alors une fois lancée, la rondelle ne subira aucune force résultante et elle ne ralentira pas. Elle se déplacera en ligne droite avec une vitesse constante. Aucune force n'est nécessaire. On peut maintenant énoncer la *première loi de Newton,* aussi appelée le *principe de l'inertie* :

Première loi de Newton (principe de l'inertie)

Tout objet demeure dans son état de repos ou son état de mouvement rectiligne uniforme, à moins de subir une force résultante non nulle.

Pour qu'un objet accélère, il faut lui appliquer une force résultante. Si la force résultante sur l'objet est nulle ($\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = \vec{\mathbf{0}}$), l'accélération est nulle. Dans ce cas, si l'objet est immobile, il restera immobile, et s'il se déplace selon un mouvement rectiligne uniforme, il conservera son mouvement rectiligne uniforme. La première loi de Newton s'énonce schématiquement comme suit :

Si $\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = \vec{\mathbf{0}}$, alors

- $\vec{\mathbf{v}} = \vec{\mathbf{0}}$, l'objet reste immobile (équilibre statique),
- $\vec{\mathbf{v}} = \overrightarrow{\text{constante}}$, l'objet se déplace à vitesse constante, donc en ligne droite (équilibre dynamique).

Différentes forces peuvent agir simultanément sur un objet, mais si leur somme vectorielle est nulle, l'objet reste immobile ou se déplace à vitesse constante. Dans de tels cas, les forces agissant sur l'objet s'équilibrent. On dit que l'objet est *à l'équilibre*. De façon courante, on dit aussi que ces forces s'annulent mutuellement. Toutefois, le terme «annuler» est trompeur; il ne signifie pas que les forces cessent d'exister. Les forces agissent toujours sur l'objet; c'est leur somme vectorielle qui s'annule.

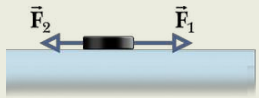
Défi animé 5.1
Qu'arrive-t-il au mouvement d'un objet qui accélère si vous ajoutez une force de manière à ce que la force résultante sur l'objet soit nulle ?

TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 5.2

La figure ci-dessous représente une rondelle glissant sur un plancher. Trois forces horizontales sont appliquées; les forces $\vec{\mathbf{F}}_1$ et $\vec{\mathbf{F}}_2$ sont illustrées. La force $\vec{\mathbf{F}}_1$ a un module de 10 N, et la force $\vec{\mathbf{F}}_2$, un module de 6 N. Quelle est la force $\vec{\mathbf{F}}_3$ si :

a. la rondelle est immobile ?

b. la rondelle se déplace vers la gauche à vitesse constante ?



Les référentiels inertiels

Revenons à l'exemple de la rondelle qui glisse sur une surface sans frottement à vitesse constante $\vec{\mathbf{v}}_\text{r}$. Qu'observe-t-on si on patine en ligne droite à vitesse constante $\vec{\mathbf{v}}_\text{p}$, à côté de la rondelle, comme dans la figure 5.21 ? Est-ce que la rondelle a une accélération ? On établit que la rondelle a une vitesse constante $\vec{\mathbf{v}}_{\text{r/p}} = \vec{\mathbf{v}}_\text{r} - \vec{\mathbf{v}}_\text{p}$ (selon l'équation 4.50 de la page 117); l'accélération de la rondelle est nulle dans les deux référentiels. La première loi de Newton est valide lorsqu'on utilise un référentiel inertiel.

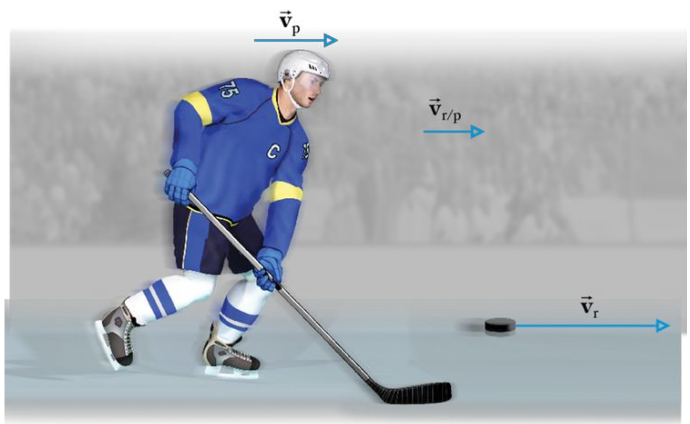


FIGURE 5.21
La première loi de Newton s'applique aussi pour un patineur qui se déplace à une vitesse $\vec{\mathbf{v}}_\text{p}$ constante.

Supposons maintenant que vous conduisez une automobile et que vous roulez à vitesse constante (donc en ligne droite). Une bille se trouve sur le tableau de bord. La bille est immobile parce que la force résultante exercée sur elle est nulle. Tout à coup, vous appliquez les freins. La bille entre alors en collision avec le pare-brise. Vous observez que la bille accélère vers l'avant, même si aucune force ne l'a poussée. Dans un référentiel accéléré (un référentiel non inertiel), la première loi de Newton ne s'applique pas. Pour pouvoir analyser le mouvement de la bille avec la première loi de Newton, un observateur doit se trouver à l'extérieur de la voiture. Pour lui, $\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = \vec{\mathbf{0}}$ sur la bille, et celle-ci se déplace à vitesse constante. Cependant, il y a une force appliquée sur la voiture, qui la ralentit. C'est pour cette raison qu'une collision se produit entre la bille et le pare-brise.

La première loi de Newton permet de vérifier si un référentiel est inertiel :

> Un référentiel inertiel est un référentiel pour lequel la première loi de Newton peut être utilisée. C'est un référentiel qui n'est pas accéléré.

En général, on utilise le sol comme référentiel. S'agit-il d'un référentiel inertiel ? Non, car la Terre tourne sur elle-même, de même qu'elle tourne autour du Soleil. Le sol a une accélération centripète. C'est l'une des raisons pour lesquelles le module de l'accélération en chute libre g change en fonction de la latitude : l'accélération centripète est plus grande à l'équateur. Pour obtenir un référentiel inertiel, il faut se baser sur les étoiles lointaines. Par contre, pour la plupart des calculs, l'effet de la rotation de la Terre peut être négligé. Nous étudierons plus en détail les référentiels non inertiels à la section 7.5.

La première loi de Newton est utile pour résoudre des problèmes concernant des objets à l'équilibre. Vous devez procéder systématiquement lorsque vous voulez résoudre ces problèmes. Voici donc la stratégie à appliquer.

STRATÉGIE 5.1 Les problèmes d'équilibre

Illustrer la situation
Vous devez tracer le diagramme des forces en vous référant aux sept étapes présentées dans la technique 5.1 de la page 139. Pour simplifier la décomposition des forces, choisissez l'orientation du système de coordonnées afin qu'une ou plusieurs forces soient parallèles aux axes.

Décortiquer le problème
À l'aide d'un tableau, faites ressortir les quantités connues et celles qui sont recherchées. Décomposez aussi les vecteurs selon leurs composantes cartésiennes à l'aide du diagramme des forces.

Identifier la clé
Utilisez la première loi de Newton,

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = \vec{\mathbf{0}} \,. \tag{5.5}$$

Cette équation étant vectorielle, elle est équivalente, dans les situations à deux dimensions, aux équations scalaires suivantes :

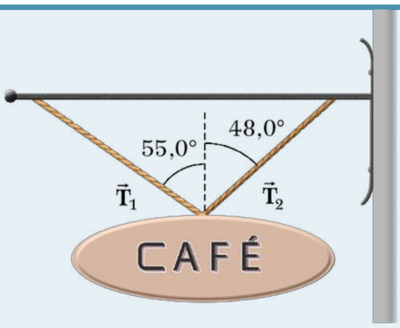
$$F_{\text{rés},x} = \sum F_x = 0$$
$$F_{\text{rés},y} = \sum F_y = 0 \,.$$

Résoudre le problème
Résolvez votre système d'équations afin de trouver les quantités inconnues recherchées.

Valider la réponse
Vérifiez le signe, les unités et l'ordre de grandeur des réponses numériques que vous avez obtenues.

EXEMPLE 5.4 Une enseigne suspendue par des cordes

Une enseigne de restaurant de 2,40 kg est suspendue à l'aide de deux cordes, comme illustré ci-contre. Calculez la tension dans chaque corde.



SOLUTION

Illustrer la situation
Nous commençons par dessiner le diagramme des forces qui apparaît à la figure 5.22. Il y a trois forces: les forces de tension $\vec{T}_1$ et $\vec{T}_2$ (des forces de contact), et la force gravitationnelle $\vec{F}_g$ (une force à distance). Remarquez que l'angle entre les deux forces de tension est 55,0° + 48,0° = 103,0°. Nous pouvons choisir l'orientation du système de coordonnées. Pour simplifier la résolution des équations, nous choisissons d'orienter l'axe des y afin qu'il soit parallèle à $\vec{T}_1$. Avec ce choix, $\vec{F}_g$ est oblique et forme un angle de 55° avec la partie négative de l'axe des y.

Décortiquer le problème

Connues		Inconnues	
$m = 2{,}40$ kg	$g = 9{,}81$ m/s^2	T_1	T_2

La masse de l'enseigne permet de calculer le module de la force gravitationnelle à l'aide de l'équation 5.2 de la page 133:

$$F_g = mg. \tag{i}$$

Nous ne connaissons pas le module des forces $\vec{T}_1$ et $\vec{T}_2$, mais nous connaissons leur orientation. Ainsi, nous pouvons décomposer les forces selon leurs composantes cartésiennes en utilisant la trigonométrie.

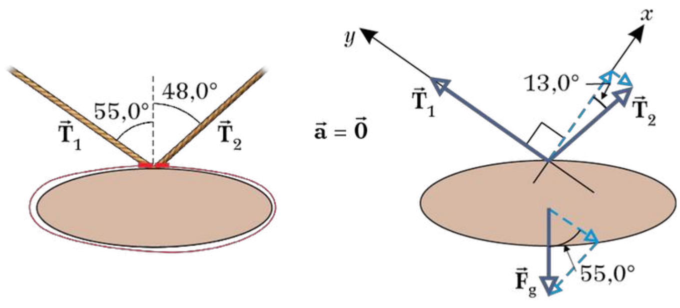


FIGURE 5.22
Le diagramme des forces de l'enseigne suspendue

Force	Composante x	Composante y
$\vec{\mathbf{T}}_1$	$0{,}00\ \mathrm{N}$	T_1
$\vec{\mathbf{T}}_2$	$T_2\cos(13{,}0°)$	$-T_2\sin(13{,}0°)$
$\vec{\mathbf{F}}_\mathrm{g}$	$-mg\sin(55{,}0°)$	$-mg\cos(55{,}0°)$

Identifier la clé

La **clé** est la première loi de Newton, car l'enseigne est à l'équilibre. L'équation 5.5, appliquée au présent problème, s'écrit

$$\vec{\mathbf{F}}_\text{rés} = \vec{\mathbf{T}}_1 + \vec{\mathbf{T}}_2 + \vec{\mathbf{F}}_\mathrm{g} = \vec{\mathbf{0}}\ . \qquad \text{(ii)}$$

Nous réécrivons cette équation selon les composantes cartésiennes :

$$F_{\text{rés},x} = \sum F_x = T_{1x} + T_{2x} + F_{\mathrm{g}x} = 0 \qquad \text{(iii)}$$

$$F_{\text{rés},y} = \sum F_y = T_{1y} + T_{2y} + F_{\mathrm{g}y} = 0\ . \qquad \text{(iv)}$$

MISE EN GARDE

Les deux équations précédentes représentent la somme des composantes x et y. On ne doit pas mettre de signe négatif, sinon il ne s'agirait plus d'une somme. Les signes sont déterminés quand on développe les composantes en fonction du module et de l'orientation du vecteur.

Résoudre le problème

Nous remplaçons les valeurs du tableau des composantes dans les équations (iii) et (iv) :

$$\sum F_x = 0 + T_2\cos(13{,}0°) - mg\sin(55{,}0°) = 0 \qquad \text{(v)}$$

$$\sum F_y = T_1 - T_2\sin(13{,}0°) - mg\cos(55{,}0°) = 0\ . \qquad \text{(vi)}$$

C'est un système d'équations. Le choix judicieux de l'orientation du système de coordonnées fait en sorte que l'équation (v) n'a qu'une seule inconnue. Nous isolons T_2 :

$$T_2 = \frac{mg\sin(55{,}0°)}{\cos(13{,}0°)}$$

$$= \frac{(2{,}40\ \mathrm{kg})(9{,}81\ \mathrm{m/s^2})\sin(55{,}0°)}{\cos(13{,}0°)}$$

$$T_2 = 19{,}79\ \mathrm{N} = 19{,}8\ \mathrm{N}\ . \qquad \text{(réponse)}$$

Nous insérons ensuite ce résultat dans l'équation (vi) pour obtenir T_1 :

$$T_1 = T_2\sin(13{,}0°) + mg\cos(55{,}0°)$$

$$= (19{,}79\ \mathrm{N})\sin(13{,}0°)$$

$$+ (2{,}40\ \mathrm{kg})(9{,}81\ \mathrm{m/s^2})\cos(55{,}0°)$$

$$T_1 = 18{,}0\ \mathrm{N}\ . \qquad \text{(réponse)}$$

Valider la réponse

Nous répondons à la question, car la tension représente le module d'une force. Les réponses sont positives parce que les modules sont toujours positifs. L'ordre de grandeur des tensions est le même que celui du module de la force gravitationnelle. Nous aurions pu utiliser un système de coordonnées similaire à celui de l'exemple 5.2.

EXEMPLE 5.5 Gare aux icebergs !

Un iceberg est un morceau de glace flottant sur l'océan. La masse volumique de la glace est égale à 917 kg/m^3, alors que la masse volumique de l'eau de mer est de 1 024 kg/m^3. Calculez le pourcentage du volume de l'iceberg qui se trouve au-dessus de l'eau.

SOLUTION

Illustrer la situation

Le diagramme des forces est illustré à la figure 5.23.

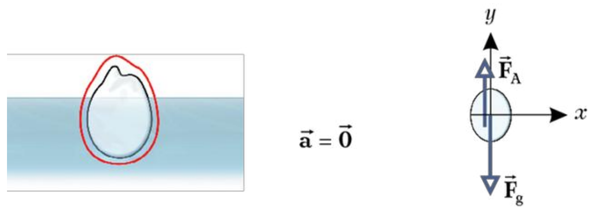


FIGURE 5.23
Le diagramme des forces de l'iceberg

Décortiquer le problème

Connues	Inconnue
$\rho_\mathrm{i} = 917\ \mathrm{kg/m^3}$	V_h/V
$\rho_\mathrm{e} = 1024\ \mathrm{kg/m^3}$	

Nous voulons calculer la fraction du volume de l'iceberg hors de l'eau, V_h/V, exprimée en pourcentage.

Identifier les clés
La première **clé** est que le volume total de l'iceberg est égal à la somme de la partie hors de l'eau et de la partie immergée :

$$V = V_{\mathrm{h}} + V_{\mathrm{im}} \; . \qquad \text{(i)}$$

La deuxième **clé** est la première loi de Newton parce que l'iceberg est à l'équilibre :

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = \vec{\mathbf{F}}_{\mathrm{A}} + \vec{\mathbf{F}}_{\mathrm{g}} = \vec{\mathbf{0}} \; . \qquad \text{(ii)}$$

Les forces n'ont que des composantes verticales :

$$\sum F_y = F_{\mathrm{A}} - F_{\mathrm{g}} = 0 \; . \qquad \text{(iii)}$$

Résoudre le problème
Le module de la poussée d'Archimède est donné par l'équation 5.4 de la page 138, et le module de la force gravitationnelle est donné par l'équation 5.2 de la page 133. La masse de l'iceberg est calculée à l'aide de la masse volumique de la glace et du volume de l'iceberg ($m = \rho_{\mathrm{i}} V$).

Nous obtenons

$$\rho_{\mathrm{e}} V_{\mathrm{im}} g - \rho_{\mathrm{i}} V g = 0$$
$$\Rightarrow \rho_{\mathrm{e}} V_{\mathrm{im}} = \rho_{\mathrm{i}} V$$
$$\Rightarrow \frac{V_{\mathrm{im}}}{V} = \frac{\rho_{\mathrm{i}}}{\rho_{\mathrm{e}}} = \frac{917\ \mathrm{kg/m^3}}{1024\ \mathrm{kg/m^3}} = 0{,}896 \; ,$$

ce qui représente la fraction du volume immergé dans l'eau. En divisant les deux membres de l'équation (i) par le volume V, nous obtenons

$$\frac{V_{\mathrm{h}}}{V} + \frac{V_{\mathrm{im}}}{V} = 1 \qquad (5.6)$$
$$\Rightarrow \frac{V_{\mathrm{h}}}{V} = 1 - \frac{V_{\mathrm{im}}}{V} = 1 - 0{,}896 \qquad (5.7)$$
$$\frac{V_{\mathrm{h}}}{V} = 0{,}104 = 10{,}4\,\% \; . \qquad \text{(réponse)}$$

Valider la réponse
Nous répondons bien à la question en donnant un pourcentage.

5.5 La masse

Supposons qu'on prend deux objets différents, tels qu'une balle de baseball et une boule de quilles, et qu'on applique la même force à chacun. Pour ce faire, on peut utiliser un ressort que l'on comprime de la même distance avant de le placer contre chacun des objets. La balle de baseball aura une accélération beaucoup plus grande que celle de la boule de quilles (*voir la figure 5.24*). Ces deux accélérations diffèrent parce que la masse de la balle est différente de celle de la boule. Mais qu'est-ce que la masse, plus exactement ?

L'expérience précédente démontre que, pour une même force appliquée, l'objet possédant la plus grande masse (la boule) aura la plus petite accélération, c'est-à-dire le plus faible taux de variation de sa vitesse. Cette propriété que possède un objet à résister aux variations de sa vitesse se nomme l'*inertie*. Les objets veulent conserver leur vitesse. Pour changer la vitesse d'un objet, il faut exercer une ou des forces sur l'objet. Plus la masse de l'objet est grande, plus grande est son inertie, car plus il résiste aux variations de sa vitesse.

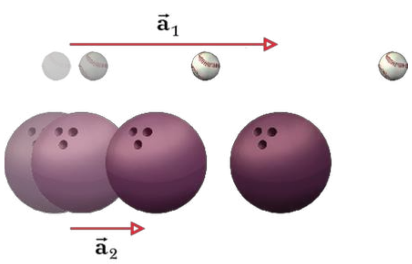


FIGURE 5.24
On applique la même force à une balle de baseball et à une boule de quilles.

Masse

La masse d'un objet est la mesure de son inertie, c'est-à-dire la mesure de la résistance d'un objet à toute variation de sa vitesse.

Cette définition* plus précise de la masse indique qu'il s'agit d'une propriété intrinsèque d'un objet, c'est-à-dire d'une caractéristique qui apparaît automatiquement avec l'existence de l'objet. La masse est une quantité scalaire, puisqu'elle ne possède pas d'orientation. Comme nous l'avons vu à la section 1.7 de la page 17, l'unité de la masse dans le SI est le kilogramme (kg).

5.6 La deuxième loi de Newton

Selon la première loi de Newton, un objet se déplace à vitesse constante (incluant une vitesse nulle) si aucune force résultante n'est appliquée sur celui-ci. Qu'arrive-t-il si une force est exercée sur l'objet ? Sa vitesse va changer (en module ou en orientation), c'est-à-dire que l'objet va accélérer. De plus, le résultat de l'expérience de la section précédente indique que l'accélération de l'objet sera grande si sa masse (son inertie) est petite. Ces deux résultats mènent à la deuxième loi de Newton, qu'on appelle aussi parfois le « principe fondamental de la dynamique » :

La force résultante exercée sur un objet est égale au produit de sa masse et de son accélération.

Pour un objet dont la masse est m et l'accélération est $\vec{\mathbf{a}}$, la force résultante $\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}}$ est

Deuxième loi de Newton (principe fondamental de la dynamique)

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = m\vec{\mathbf{a}} \, . \tag{5.8}$$

L'accélération est **causée** par la force résultante exercée par son environnement. Les forces sur un objet sont la cause du changement de son mouvement, ce que nous avons vu de façon intuitive au début de ce chapitre.

Il est important de remarquer que $\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}}$ représente la force résultante exercée **sur l'objet** par son environnement, ce qui n'inclut pas les forces que peut exercer l'objet sur son environnement. De plus, si nous analysons le mouvement d'un système, la force résultante est la somme des **forces extérieures** au système. Les forces exercées par un membre du système sur un autre membre ne contribuent pas à la force résultante.

* Cette définition, valable en mécanique newtonienne, est différente en mécanique relativiste.

La deuxième loi de Newton est une équation vectorielle. Pour l'utiliser, nous allons décomposer les vecteurs selon leurs composantes et remplacer l'équation 5.8 par trois équations scalaires :

$$\begin{aligned} F_{\text{rés},x} &= \sum F_x = ma_x \\ F_{\text{rés},y} &= \sum F_y = ma_y \\ F_{\text{rés},z} &= \sum F_z = ma_z \ . \end{aligned} \tag{5.9}$$

Chaque composante est indépendante des autres : pour connaître la composante x de l'accélération, il suffit de connaître les composantes x des forces.

La deuxième loi de Newton justifie la définition de l'unité de la force dans le SI. Lorsqu'on applique une force résultante de 1 N sur un objet de 1 kg, son accélération a un module de 1 m/s^2 :

$$1\ \text{N} = (1\ \text{kg}) \times (1\ \text{m/s}^2) = 1\ \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 \ . \tag{5.10}$$

La résolution des problèmes de dynamique requiert plusieurs étapes. Pour vous guider, nous vous présentons la stratégie suivante.

STRATÉGIE 5.2 Les problèmes de dynamique

Illustrer la situation

Vous devez tracer les diagrammes des forces en vous référant aux sept étapes décrites dans la technique 5.1 de la page 139. Pour simplifier la décomposition des forces, choisissez l'orientation du système de coordonnées afin que l'accélération soit parallèle à l'un des axes.

Décortiquer le problème

À l'aide d'un tableau, faites ressortir les quantités connues et celles qui sont recherchées. Décomposez aussi les vecteurs selon leurs composantes cartésiennes à l'aide du diagramme des forces.

Identifier la clé

Utilisez la deuxième loi de Newton,

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = m\vec{\mathbf{a}} \ . \tag{5.8}$$

Cette équation étant vectorielle, elle est équivalente aux équations scalaires suivantes :

$$\begin{aligned} F_{\text{rés},x} &= \sum F_x = ma_x \\ F_{\text{rés},y} &= \sum F_y = ma_y \\ F_{\text{rés},z} &= \sum F_z = ma_z \ . \end{aligned} \tag{5.9}$$

Résoudre le problème

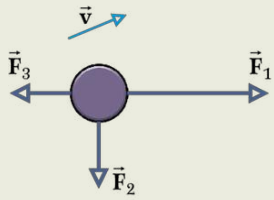
Résolvez votre système d'équations afin de trouver les quantités inconnues recherchées.

Valider la réponse

Vérifiez le signe, les unités et l'ordre de grandeur des réponses numériques.

TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 5.3

Une rondelle se déplace à une vitesse $\vec{\mathbf{v}}$ sur une table horizontale sans frottement. Trois forces horizontales sont exercées sur la rondelle, comme le montre la vue en plongée, avec les vecteurs tracés à l'échelle, illustrée ci-dessous. Quelle est l'orientation de l'accélération de la rondelle ?



Défi animé 5.2
Pouvez-vous établir un lien entre la force résultante qui agit sur un objet et la variation de sa vitesse ?

La deuxième loi de Newton est très importante, car elle permet de déterminer le mouvement d'un objet à l'aide des forces exercées sur celui-ci. On doit utiliser un référentiel inertiel pour appliquer cette loi. Puisque cette loi est souvent utilisée, quelques problèmes de dynamique, résolus à l'aide des cinq étapes de la stratégie, sont présentés à la fin de cette section.

EXEMPLE 5.6 Déplacer un fauteuil

Une femme pousse un fauteuil de 30,0 kg avec une force de 195 N, orientée à 15,0° sous l'horizontale (*voir la figure ci-contre*). La force de frottement cinétique entre le fauteuil et le sol est de de 170 N.

a. Quelle est l'accélération du fauteuil ?

b. Quel est le module de la force normale ?

SOLUTION

Illustrer la situation

Le diagramme des forces du fauteuil est présenté à la figure 5.25. Il y a trois forces de contact : la force de poussée $\vec{\mathbf{F}}_p$, exercée par la femme, la force de frottement cinétique $\vec{\mathbf{f}}_c$ et la force normale, exercées par le plancher. Il y a aussi la force gravitationnelle $\vec{\mathbf{F}}_g$. Le plancher contraint l'accélération à être horizontale. Par hypothèse, nous traçons l'accélération vers la droite.

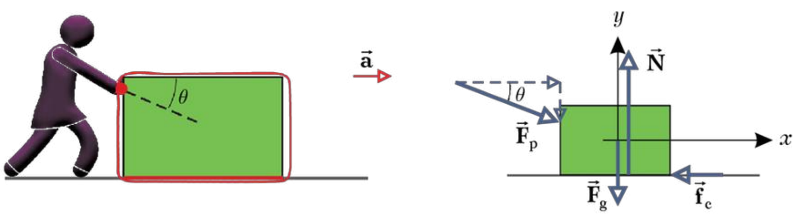


FIGURE 5.25
Le diagramme des forces du fauteuil

Décortiquer le problème

Connues		Inconnues
$F_p = 195$ N	$f_c = 170$ N	$\vec{a}$
$\theta = 15{,}0°$	$m = 30{,}0$ kg	N

Nous pouvons calculer le module de la force gravitationnelle à partir de la masse : $F_g = mg$. Ensuite, nous décomposons les vecteurs selon leurs composantes :

Vecteur	Composante x	Composante y
$\vec{F}_p$	$F_p \cos\theta$	$-F_p \sin\theta$
$\vec{f}_c$	$-f_c$	0
$\vec{N}$	0	N
$\vec{F}_g$	0	$-mg$
$\vec{a}$	a_x	0

Identifier la clé

Selon la deuxième loi de Newton,

$$\vec{F}_{rés} = \vec{F}_p + \vec{f}_c + \vec{N} + \vec{F}_g = m\vec{a}\ ,$$

ce qui donne les équations

$$\sum F_x = F_p \cos\theta - f_c = ma_x \qquad \text{(i)}$$

$$\sum F_y = -F_p \sin\theta + N - mg = 0\ . \qquad \text{(ii)}$$

SOLUTION a.

Résoudre le problème

Nous trouvons l'accélération en isolant a_x dans l'équation (i) :

$$a_x = \frac{F_p \cos\theta - f_c}{m} = \frac{195\ \text{N}\cos(15{,}0°) - 170\ \text{N}}{30{,}0\ \text{kg}}$$
$$= 0{,}612\ \text{m/s}^2\ .$$

L'accélération est donc

$$\vec{a} = 0{,}612\ \text{m/s}^2\ \vec{\imath} = 0{,}612\ \text{m/s}^2\ \overrightarrow{\text{vers la droite}}\ .$$

(réponse)

SOLUTION b.

Résoudre le problème

Pour trouver le module de la force normale, nous isolons N dans l'équation (ii) :

$$N = mg + F_p \sin\theta$$
$$= (30{,}0\ \text{kg} \times 9{,}81\ \text{m/s}^2) + (195\ \text{N})\sin(15{,}0°)$$
$$N = 345\ \text{N}\ .$$

(réponse)

REMARQUE

Le module de la force normale est différent du module de la force gravitationnelle : $N \neq mg$.

Valider la réponse

Nous répondons bien aux questions : $\vec{a}$ est un vecteur et N est un scalaire positif, car on demande le module. L'ordre de grandeur des réponses est correct.

EXEMPLE 5.7 Un enfant glisse le long d'une pente

Un enfant de 20,0 kg est assis sur une luge de 1,00 kg. Il glisse le long d'une pente inclinée à 15,0°. La force de frottement cinétique entre la luge et la pente a un module de 45,0 N.

a. Quel est le module de l'accélération de l'enfant sur la luge ?

b. Si l'enfant est initialement au repos, quel est le module de sa vitesse après qu'il a glissé sur une distance de 20,0 m ?

SOLUTION

Illustrer la situation

Le système comprend l'enfant et la luge. Le diagramme des forces est présenté à la figure 5.26 à la page suivante. Remarquez que le système de coordonnées est orienté pour que l'axe des x soit parallèle à l'accélération. Avec ce choix, $\vec{N}$ est parallèle à l'axe des y, $\vec{f}_c$ est parallèle à l'axe des x et $\vec{F}_g$ forme un angle θ (le même angle que celui du plan incliné par rapport à l'horizontale) par rapport à la partie négative de l'axe des y.

Décortiquer le problème

La masse du système est

$$m = 20{,}0\ \text{kg} + 1{,}00\ \text{kg} = 21{,}0\ \text{kg}\ .$$

Connues		Inconnues
$m = 21{,}0$ kg	$\theta = 15{,}0°$	a
$f_c = 45{,}0$ N	$v_{0x} = 0{,}00$ m/s	v
$x_0 = 0{,}0$ m	$x = 20{,}0$ m	

Nous décomposons les vecteurs selon leurs composantes :

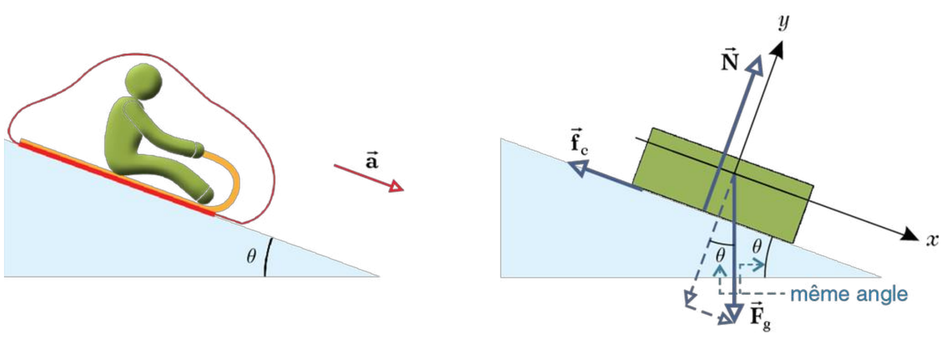


FIGURE 5.26
Le diagramme des forces de l'enfant sur la luge

Vecteur	Composante x	Composante y
$\vec{f}_c$	$-f_c$	0
$\vec{N}$	0	N
$\vec{F}_g$	$mg \sin\theta$	$-mg\cos\theta$
$\vec{a}$	a_x	0

SOLUTION a.

Identifier la clé

Selon la deuxième loi de Newton,

$$\vec{F}_{\text{rés}} = \vec{N} + \vec{f}_c + \vec{F}_g = m\vec{a} ,$$

qui s'écrit, selon les composantes cartésiennes,

$$\sum F_x = -f_c + mg\sin\theta = ma_x \qquad \text{(i)}$$

$$\sum F_y = N - mg\cos\theta = 0 . \qquad \text{(ii)}$$

Résoudre le problème

Pour trouver le module de l'accélération, nous isolons a_x dans l'équation (i) [l'équation (ii) n'est pas utile dans ce problème]:

$$a_x = \frac{-f_c + mg\sin\theta}{m}$$

$$a_x = \frac{-45{,}0\ \text{N} + (21{,}0\ \text{kg} \times 9{,}81\ \text{m/s}^2)\sin(15{,}0°)}{21{,}0\ \text{kg}}$$

$$a_x = 0{,}396\ \text{m/s}^2 .$$

Le module de l'accélération est

$$a = |a_x| = 0{,}40\ \text{m/s}^2 . \qquad \text{(réponse)}$$

SOLUTION b.

Identifier la clé

La **clé** est la suivante: pour obtenir le module de la vitesse finale, il faut utiliser les équations de la cinématique présentées dans la stratégie 3.1 à la page 70. À l'aide de l'équation 3.16, nous obtenons

$$v_x = \pm\sqrt{v_{0x}^2 + 2a_x(x - x_0)} . \qquad \text{(iii)}$$

Résoudre le problème

Puisque nous cherchons le module de la vitesse, nous prenons la valeur absolue de l'équation (iii). En insérant les valeurs, nous obtenons

$$v = \sqrt{(0{,}00\ \text{m/s})^2 + 2(0{,}396\ \text{m/s}^2)(20{,}0\ \text{m} - 0{,}0\ \text{m})}$$
$$= 4{,}0\ \text{m/s} . \qquad \text{(réponse)}$$

Valider la réponse

Une vitesse dont le module est de 4,0 m/s est raisonnable pour un petit enfant qui glisse. Ses parents n'auront pas à s'inquiéter. En **a.**, la réponse n'a que deux chiffres significatifs à cause de la soustraction qui fait perdre un chiffre.

5.7 La force gravitationnelle et le poids

La chute libre

À la section 3.8, nous avons analysé le mouvement de chute libre d'un objet, et nous avons trouvé que lorsque la résistance de l'air est négligeable, tous les objets ont une accélération $\vec{a} = \vec{g}$ vers le centre de la Terre. Nous voulons vérifier que la deuxième loi de Newton est conforme à ce résultat.

La figure 5.27 illustre le diagramme des forces d'une balle en chute libre. Seule la force gravitationnelle est exercée sur l'objet. Selon la deuxième loi de Newton (l'équation 5.9),

$$\sum F_y = -mg = ma_y \Rightarrow a_y = -g \ , \qquad (5.11)$$

dans laquelle on a utilisé l'équation 5.2 de la page 133 pour obtenir la force gravitationnelle. L'équation 5.11 correspond bien à l'accélération de la chute libre. Cela montre que l'équation 5.2 donne bien la force gravitationnelle exercée par la Terre sur un objet de masse m.

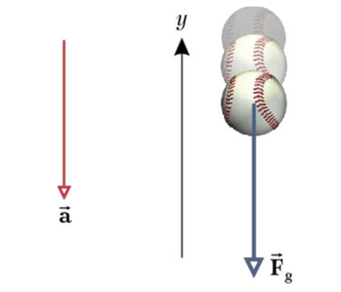


FIGURE 5.27
Le diagramme des forces d'une balle en chute libre

Le plan incliné

On peut aussi vérifier le résultat de la section 3.9, lorsque nous avons analysé le mouvement d'un objet qui glisse sans frottement le long d'un plan incliné. Nous avions trouvé que le module de l'accélération est $a = g \sin\theta$ et que celle-ci est orientée vers le bas du plan incliné.

La figure 5.28 illustre une boîte qui glisse sur une surface sans frottement. Il y a deux forces : la force normale $\vec{\mathbf{N}}$ exercée par le plan et la force gravitationnelle $\vec{\mathbf{F}}_g$ orientée vers le centre de la Terre. L'accélération doit être parallèle au plan. On oriente le système de coordonnées pour que l'axe des x soit parallèle au plan. Selon la deuxième loi de Newton,

$$\sum F_x = mg \sin\theta = ma_x$$

$$\sum F_y = N - mg\cos\theta = 0 \ .$$

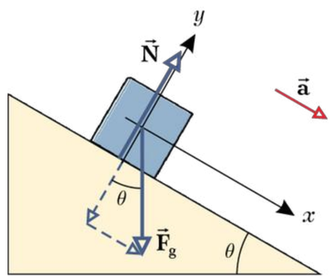


FIGURE 5.28
Le diagramme des forces d'une caisse qui glisse le long d'un plan incliné.

On obtient alors

$$a_x = g \sin\theta \ ,$$

c'est-à-dire que l'accélération est $\vec{\mathbf{a}} = g\sin\theta, \overrightarrow{\text{vers le bas du plan incliné}}$. C'est bien le résultat qui est obtenu dans la section 3.9.

Le poids

Jusqu'à présent, on a appelé « force gravitationnelle » la force $\vec{\mathbf{F}}_g$ exercée par la Terre sur les objets. Cette force est ressentie par tous les objets. Contrairement aux forces de contact, on ne ressent pas la force de traction ou la poussée exercées par la Terre. Mais comment fait-on pour mesurer cette force à distance ? Comment fait-on pour se rendre compte que cette force existe réellement ?

Pour mesurer le module de la force gravitationnelle, on utilise un dynamomètre (qu'on appelle habituellement une « balance ») et on recourt à la première loi de Newton. La figure 5.29 illustre cette méthode. Il y a deux forces appliquées sur l'objet : la force du ressort étiré $\vec{\mathbf{F}}_{él}$ (vers le haut) et la force gravitationnelle $\vec{\mathbf{F}}_g$ vers le bas. Si l'objet n'accélère pas, alors le module de la force élastique est égal au module de la force gravitationnelle :

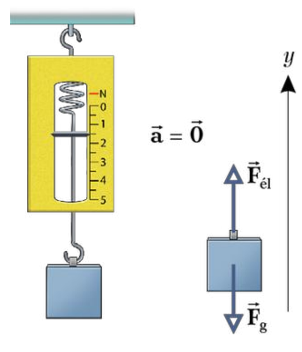


FIGURE 5.29
On mesure le poids d'un objet à l'aide d'un dynamomètre. L'accélération doit être nulle.

$$\vec{\mathbf{F}}_{rés} = \vec{\mathbf{F}}_{él} + \vec{\mathbf{F}}_g = (F_{él} - F_g)\,\vec{\boldsymbol{j}} = 0$$
$$\Rightarrow F_g = F_{él} \ . \qquad (5.12)$$

Le dynamomètre ne donne que le module de la force gravitationnelle. Ce module est appelé le *poids* de l'objet :

Poids

$$\boxed{P \equiv F_g = mg \ .} \qquad (5.13)$$

Un pèse-personne mesure le poids en mesurant la compression d'un ressort, plutôt que l'étirement. L'unité du poids est le newton (N), car c'est le module d'une force.

REMARQUE

Pour certains auteurs, le poids est une force qui correspond à la force gravitationnelle près de la surface de la Terre. Dans ce manuel, On utilise plutôt la définition utilisée dans la vie de tous les jours : le poids est le module de la force gravitationnelle. Personne ne donne une orientation si on lui demande son poids. On utilise explicitement le terme *force gravitationnelle* pour parler de la force exercée par la Terre, y compris l'orientation de cette force.

MISE EN GARDE

De manière courante, les pèse-personnes sont gradués en kilogrammes (l'unité de la masse) plutôt qu'en newtons. Dans le domaine de la physique, on ne doit pas confondre la masse d'un objet (la mesure de son inertie) et son poids (le module d'une force). La masse est une propriété intrinsèque de l'objet, alors que le poids dépend de l'endroit où on le mesure : sur la Lune, le poids d'un objet est six fois plus petit (l'attraction gravitationnelle y est plus petite que sur Terre), tandis que la masse ne change pas.

Une balance affiche la mesure du poids uniquement lorsque le système n'accélère pas et qu'il n'y a pas d'autre force appliquée sur l'objet. Sinon, la mesure de la balance est appelée le *poids apparent.*

Supposons qu'une personne se pèse dans un ascenseur qui accélère vers le haut, comme à la figure 5.30a. on doit utiliser la deuxième loi de Newton pour analyser la situation. La mesure de la balance correspond encore au module de la force $\vec{\mathbf{F}}_{\text{él}}$ exercée par le ressort de la balance. On obtient

$$\sum F_y = F_{\text{él}} - mg = ma_y \Rightarrow F_{\text{él}} = mg + ma_y > P \; . \qquad (5.14)$$

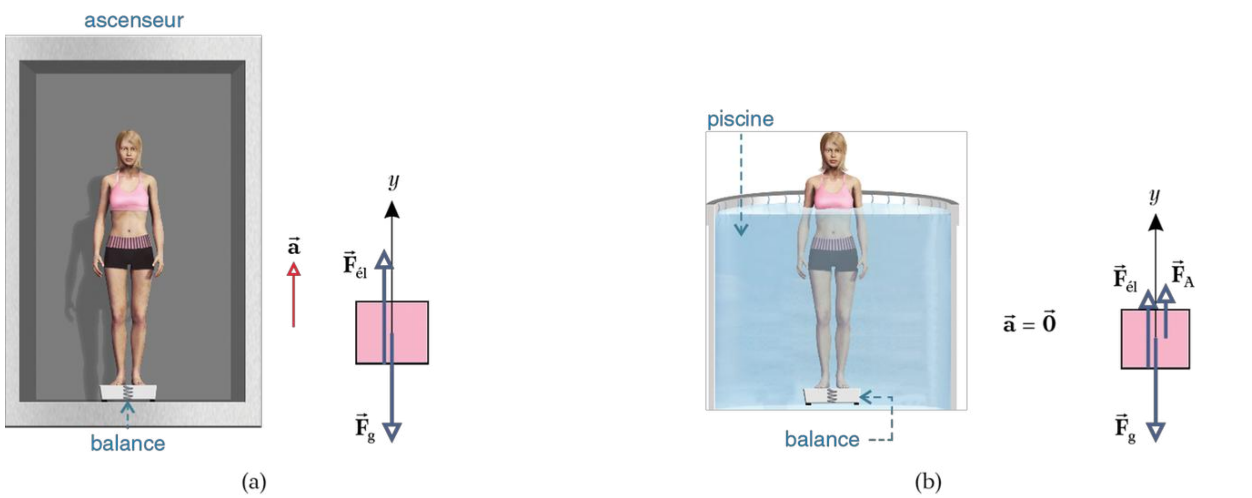


FIGURE 5.30

Deux exemples où le poids apparent est différent du poids : (a) une personne dans un ascenseur qui accélère vers le haut ; (b) une personne dans une piscine.

Dans cette situation, le poids apparent s'avère plus grand que le poids ($P = mg$). Lorsque l'accélération de l'ascenseur est vers le bas, l'analyse est semblable, avec $a_y < 0$, et le poids apparent est plus faible que le poids.

La figure 5.30b illustre une autre situation où le poids apparent est différent du poids. Lorsqu'un objet est dans l'eau (ou un autre fluide), l'eau exerce sur l'objet une poussée d'Archimède $\vec{\mathbf{F}}_\mathrm{A}$. Pour un objet immobile, la première loi de Newton permet de calculer la force exercée par le ressort de la balance :

$$\sum F_y = F_{\text{él}} + F_\mathrm{A} - mg = 0 \Rightarrow F_{\text{él}} = mg - F_\mathrm{A} < P \ . \qquad (5.15)$$

Le poids apparent est plus faible que le poids ($P = mg$) dans cette situation. On dit couramment qu'on pèse moins dans l'eau, c'est-à-dire que le poids apparent diminue lorsqu'on est dans l'eau.

Dans les exemples précédents, on se sert d'une balance pour obtenir le poids apparent. Cependant, le poids apparent d'un objet existe même si on n'utilise pas de balance. De façon générale, on définit le poids apparent de la façon suivante :

Le **poids apparent** d'un objet est le module de la force de contact nécessaire pour le supporter. C'est le résultat de la mesure d'une balance à ressort et il correspond à notre sensation du poids.

Poids apparent

La force de contact peut être la force normale (pour un objet sur une surface) ou la force de tension (pour un objet suspendu par une corde). Lorsque le poids apparent est nul, l'objet est en état d'*apesanteur*.

EXEMPLE 5.8 Gagner et perdre du poids rapidement

Une personne de 65,0 kg se trouve dans un ascenseur qui se déplace vers le bas. Calculez le poids apparent de la personne lorsque :

a. l'ascenseur accélère à un taux de 1,60 m/s^2 ;
b. l'ascenseur se déplace à vitesse constante ;
c. l'ascenseur ralentit à un taux de 1,60 m/s^2.

SOLUTION

Illustrer la situation

Dans les trois situations, l'accélération est verticale (ou nulle). Nous choisissons un axe des y orienté vers le haut. Le diagramme des forces est présenté à la figure 5.31.

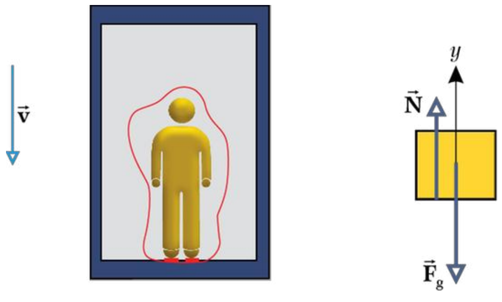


FIGURE 5.31
Le diagramme des forces de la personne dans l'ascenseur

Décortiquer le problème

Connues		Inconnue
$m = 65{,}0\,\text{kg}$	$a = 1{,}60\,\text{m/s}^2$	P_{app}

Identifier la clé

La **clé** est que le poids apparent correspond ici au module de la force normale ($P_{\text{app}} = N$), car c'est la force de contact qui supporte la personne. Selon la deuxième loi de Newton,

$$\sum F_y = N - mg = ma_y\,. \qquad \text{(i)}$$

SOLUTION a.

Résoudre le problème

La vitesse est orientée vers le bas, et son module augmente. L'accélération est orientée vers le bas, ce qui implique que $a_y = -1{,}60\ \text{m/s}^2$. En isolant N dans l'équation (i), nous obtenons

$$\begin{aligned} P_{\text{app}} &= N = m(a_y + g) \\ &= 65{,}0\,\text{kg}(-1{,}60\,\text{m/s}^2 + 9{,}81\,\text{m/s}^2) = 534\,\text{N}\,. \end{aligned} \qquad \text{(réponse)}$$

Valider la réponse

Le poids apparent est plus faible que le poids. La personne se sentira plus légère.

SOLUTION b.

Résoudre le problème

Comme la vitesse est constante, l'accélération est nulle ($a_y = 0$). Le poids apparent est

$$\begin{aligned} P_{\text{app}} &= N = mg \\ &= 65{,}0\,\text{kg} \times 9{,}81\,\text{m/s}^2 = 638\,\text{N}\,. \end{aligned} \qquad \text{(réponse)}$$

Valider la réponse

Le poids apparent est égal au poids, car il n'y a pas d'accélération.

SOLUTION c.

Résoudre le problème

Comme la vitesse est orientée vers le bas et que l'ascenseur ralentit, l'accélération est opposée à la vitesse, donc elle est vers le haut : $a_y = 1{,}60\ \text{m/s}^2$. En insérant ce résultat dans l'équation (i), nous obtenons

$$\begin{aligned} P_{\text{app}} &= N = m(a_y + g) \\ &= 65{,}0\,\text{kg}(1{,}60\,\text{m/s}^2 + 9{,}81\,\text{m/s}^2) = 742\,\text{N}\,. \end{aligned} \qquad \text{(réponse)}$$

Valider la réponse

Cette fois-ci, la personne se sentira comprimée, car son poids apparent est plus grand que son poids.

TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 5.4

Dans l'exemple précédent, quel est le poids apparent de la personne si le câble de l'ascenseur se rompt et que ce dernier tombe en chute libre ? (N'essayez pas cela à la maison.)

Le principe d'équivalence

Nous avons vu à la section 5.5 que la masse m d'un objet est une mesure de son inertie, c'est-à-dire de sa capacité à résister au changement de mouvement. Ce paramètre apparaît dans la deuxième loi de Newton : $\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = m\vec{\mathbf{a}}$. On parle alors de la masse inertielle m_{i} de l'objet.

La masse joue aussi un autre rôle. Elle est la source de la force gravitationnelle. En effet, le module de la force gravitationnelle exercée par la Terre sur un objet est $F_{\text{g}} = mg$. Cette équation diffère totalement de la deuxième loi de Newton. Lorsqu'on calcule la force gravitationnelle, on a besoin de sa masse gravitationnelle m_{g}. À première vue, rien n'indique que la masse inertielle m_{i} d'un objet devrait être égale à sa masse gravitationnelle.

Qu'est-ce qui arriverait si ces masses étaient différentes ? Dans le cas d'un objet en chute libre, pour lequel la résistance de l'air est négligeable, seule la force gravitationnelle est exercée, et la deuxième loi de Newton donne

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = m_{\text{i}}\vec{\mathbf{a}}$$
$$\sum F_y = -m_{\text{g}}g = m_{\text{i}}a_y$$
$$\Rightarrow a_y = -\frac{m_{\text{g}}}{m_{\text{i}}}g\ .$$

Selon le résultat de Galilée que nous avons vu à la page 76, tous les objets en chute libre ont la même accélération. Cela implique que le rapport $m_{\text{g}}/m_{\text{i}}$ doit être le même pour tous les objets. Il est alors possible de choisir le même étalon pour les deux types de masse, ce qui donne

$$m_{\text{g}} = m_{\text{i}}\ . \tag{5.16}$$

Principe d'équivalence de Newton

L'expression ci-dessus est la formulation de Newton du principe d'équivalence. Newton a été le premier à vérifier que la masse inertielle et la masse gravitationnelle étaient identiques en utilisant des pendules. Les résultats de Newton ont montré que

$$\frac{|m_{\text{i}} - m_{\text{g}}|}{m_{\text{i}}} < 1 \times 10^{-3}\ .$$

Depuis ce temps, les méthodes et la précision des mesures ont été grandement améliorées, de telle sorte que l'écart relatif expérimental des masses est de l'ordre de 1×10^{-13}. Il est donc inutile de faire la différence entre la masse inertielle et la masse gravitationnelle d'un objet.

Les formulations du principe d'équivalence par Galilée et par Newton sont équivalentes. Pour Newton, le principe d'équivalence est un hasard de la nature. Cependant, ce principe a guidé Einstein vers la découverte de la théorie de la relativité générale, la théorie de la gravitation ayant un domaine d'application beaucoup plus grand que la théorie de Newton. Nous verrons un bref aperçu de cette théorie au chapitre 13.

5.8 La force de frottement

Nous avons analysé dans les dernières sections plusieurs situations où le frottement était négligeable. Dans la vie de tous les jours, puisque la force de frottement est souvent présente, cette section présente un modèle simple pour tenir compte de cette force. Cette dernière est importante : sans frottement, on ne pourrait pas se déplacer en marchant, les automobiles non plus ne pourraient avancer. La force de frottement est aussi importante pour freiner différents appareils.

Pour débuter, supposons qu'une personne veut pousser un réfrigérateur sur un plancher rugueux (*voir la figure 5.32 à la page suivante*). Le réfrigérateur demeure immobile à cause du frottement. La force de frottement statique $\vec{\mathbf{f}}_{\text{s}}$ est une force de contact exercée par le plancher sur le réfrigérateur, qui équilibre le réfrigérateur. La personne pousse de plus en plus fort, mais le réfrigérateur ne bouge pas. Celui-ci demeure à l'équilibre, ce qui indique que le module de la force de frottement statique $\vec{\mathbf{f}}_{\text{s}}$ augmente lorsque le module de la force $\vec{\mathbf{F}}_{\text{app}}$ augmente

$$\sum F_x = F_{\text{app}} - f_{\text{s}} = 0 \Rightarrow f_{\text{s}} = F_{\text{app}}\ .$$

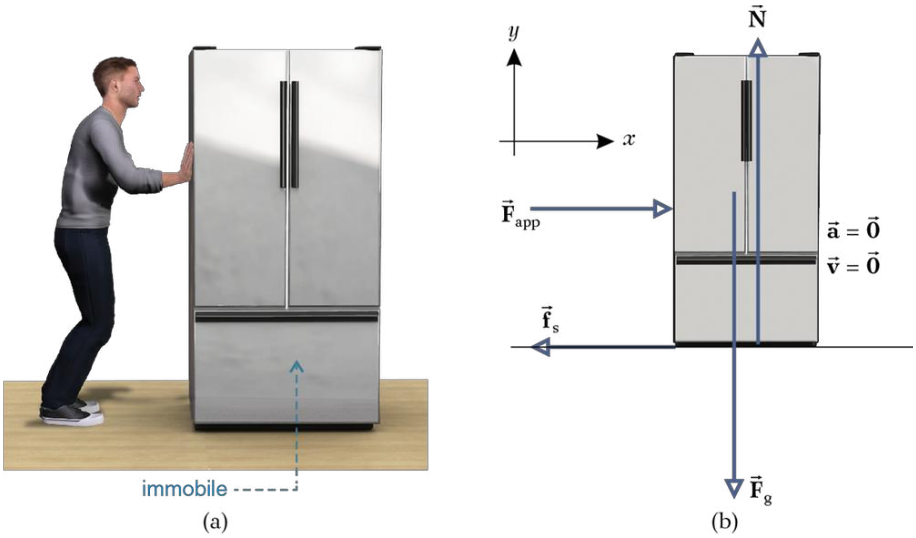


FIGURE 5.32

(a) Une personne pousse un réfrigérateur avec une force $\vec{F}_{app}$. Le réfrigérateur reste immobile à cause de la force de frottement statique $\vec{f}_s$. (b) Le diagramme des forces du réfrigérateur. La force $\vec{f}_s$ est orientée de telle manière que le réfrigérateur reste immobile par rapport à la surface.

Comme la tension et la force normale, $\vec{f}_s$ a un module qui change selon les autres forces appliquées. Cette force est toujours parallèle à la surface, et son sens est celui qui est nécessaire pour que la caisse demeure **immobile par rapport à la surface.**

Si la personne pousse très fort (ou si la personne a de l'aide), le réfrigérateur se met à glisser. Ce résultat indique que le module de la force de frottement statique atteint une valeur maximale f_{smax}. On trouve empiriquement (par l'expérience) que f_{smax} est proportionnel au module de la force normale, mais qu'il ne dépend pas de l'aire de la surface de l'objet :

Module maximal de la force de frottement statique

$$f_{smax} = \mu_s N \, . \qquad (5.17)$$

Le paramètre μ_s est le *coefficient de frottement statique*. Ce coefficient est sans unité et il dépend de la surface de l'objet et de la surface qui exerce la force. Lorsque les surfaces sont lisses, le coefficient est faible ; par contre, lorsque les surfaces sont rugueuses, le coefficient est élevé. Les valeurs de μ_s pour quelques surfaces sont présentées dans le tableau 5.1.

TABLEAU 5.1

Les coefficients de frottement typiques pour différentes surfaces. Ces valeurs sont approximatives et ne sont données qu'à titre indicatif.

Surfaces	μ_s	μ_c
Acier sur acier (non lubrifié)	0,8	0,6
Acier sur acier (lubrifié)	0,10	0,05
Bois sur bois	0,25-0,50	0,2
Caoutchouc sur béton sec	1,0	0,8
Caoutchouc sur béton mouillé	0,7	0,5
Glace sur glace	0,1	0,03

On peut donc écrire une inégalité pour exprimer le module de la force de frottement statique :

$$f_s \leq \mu_s N \, . \tag{5.18}$$

Module de la force de frottement statique

L'égalité correspond à la situation où l'objet est sur le point de glisser.

Lorsque le réfrigérateur glisse sur le plancher, ce dernier exerce sur le réfrigérateur une force de frottement cinétique $\vec{\mathbf{f}}_c$. Cette force de contact est toujours parallèle à la surface, et elle est **opposée à la vitesse de l'objet par rapport à la surface,** comme le montre la figure 5.33. On trouve empiriquement que le module f_c est aussi proportionnel au module de la force normale (et ne dépend pas de l'aire de la surface de l'objet) :

$$f_c = \mu_c N \, . \tag{5.19}$$

Module de la force de frottement cinétique

La constante de proportionnalité μ_c est le *coefficient de frottement cinétique.* Il s'agit d'un facteur sans unité qui dépend des deux surfaces en contact. Les valeurs de μ_c pour quelques surfaces sont présentées dans le tableau 5.1. Notez que le coefficient de frottement cinétique est plus faible que le coefficient de frottement statique. Cela indique qu'une fois l'objet en mouvement, il est plus facile de le garder en mouvement : la force de poussée nécessaire pour que l'objet se déplace à vitesse constante est plus faible que la force nécessaire pour le mettre en mouvement.

Défi animé 5.3
Si la force résultante change de sens, le mouvement change-t-il de sens immédiatement ?

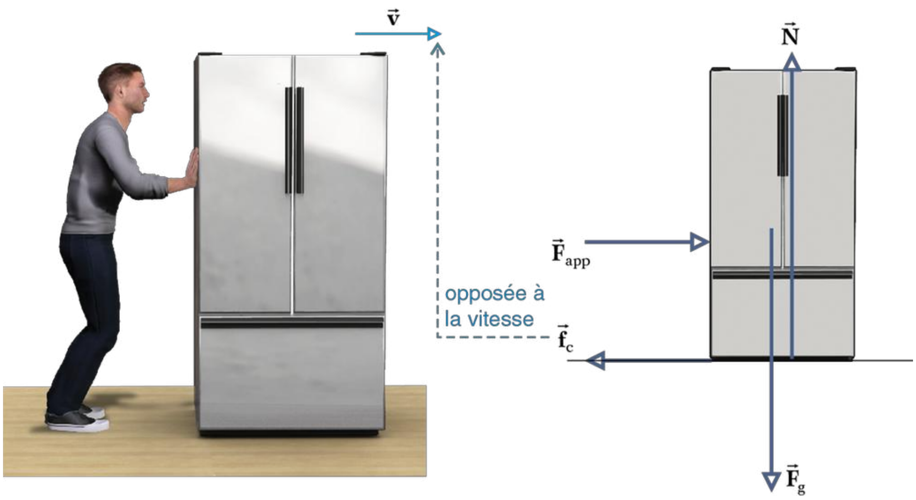


FIGURE 5.33
Une personne pousse, avec une force $\vec{\mathbf{F}}_{app}$, un réfrigérateur qui se déplace à la vitesse $\vec{\mathbf{v}}$. La force $\vec{\mathbf{f}}_c$ est parallèle à la surface et opposée à la vitesse $\vec{\mathbf{v}}$ du réfrigérateur par rapport à la surface.

En résumé, il y a trois possibilités lorsqu'un objet se trouve sur une surface rugueuse :

- L'objet est immobile par rapport à la surface. La force $\vec{\mathbf{f}}_s$ est orientée de manière à garder l'objet **immobile par rapport à la surface** ; on utilise la première ou la deuxième loi de Newton pour la calculer.
- L'objet est sur le point de glisser. $f_s = \mu_s N$, et $\vec{\mathbf{f}}_s$ est orientée de manière à garder l'objet **immobile par rapport à la surface.**
- L'objet glisse. $f_c = \mu_c N$, et $\vec{\mathbf{f}}_c$ est **opposée à la vitesse de l'objet par rapport à la surface.**

La figure 5.34 résume ces situations lorsqu'on applique à un objet une poussée qui augmente.

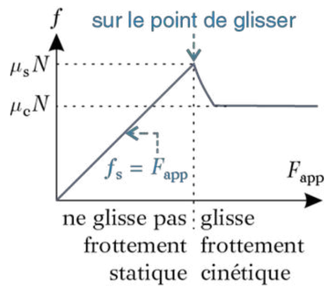


FIGURE 5.34
Le module de la force de frottement lorsque la poussée sur un objet augmente graduellement.

REMARQUE

Les équations 5.18 et 5.19 ne sont pas des lois, mais des résultats empiriques approximatifs. Ils donnent des résultats corrects. Pour obtenir des résultats plus précis, il faudrait faire intervenir plus de facteurs, comme le module de la vitesse, la température et le degré d'humidité.

EXEMPLE 5.9 La mesure de μ_s

Une pièce de monnaie est placée sur une planche horizontale. On incline lentement la planche. Lorsque l'angle entre la planche et l'horizontale atteint 14°, la pièce se met à glisser. Calculez le coefficient de frottement statique entre la pièce et la planche.

SOLUTION

Illustrer la situation

Le diagramme des forces de la pièce est présenté à la figure 5.35. La pièce est sur le point de glisser lorsque $\theta = 14°$. L'accélération est nulle. Les composantes de la force gravitationnelle $\vec{\mathbf{F}}_g$ sont illustrées ci-contre.

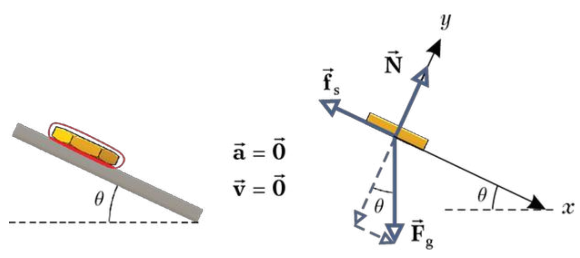


FIGURE 5.35
Le diagramme des forces de la pièce

Décortiquer le problème

Connues		Inconnue
$\theta = 14°$	$\vec{\mathbf{a}} = \vec{\mathbf{0}}$	μ_s

Nous décomposons les forces selon leurs composantes cartésiennes :

Force	Composante x	Composante y
$\vec{\mathbf{N}}$	0	N
$\vec{\mathbf{f}}_s$	$-f_s$	0
$\vec{\mathbf{F}}_g$	$mg\sin\theta$	$-mg\cos\theta$

Identifier les clés

La première **clé** est que lorsque la pièce est sur le point de glisser,

$$f_s = f_{s\,max} = \mu_s N\,. \tag{i}$$

La deuxième **clé** est la première loi de Newton, car la pièce n'accélère pas tout à fait :

$$\sum F_x = -f_s + mg\sin\theta = 0 \tag{ii}$$

$$\sum F_y = N - mg\cos\theta = 0\,. \tag{iii}$$

Résoudre le problème

L'équation (iii) permet de calculer N:

$$N = mg\cos\theta\ .$$

Nous pouvons alors utiliser les équations (i) et (ii), et isoler μ_s:

$$-\mu_s N + mg\sin\theta = 0$$

$$\mu_s(mg\cos\theta) = mg\sin\theta$$

$$\Rightarrow \mu_s = \tan\theta = \tan(14°) = 0{,}25\ .$$

(réponse)

REMARQUE

Il n'est pas nécessaire de connaître la masse de la pièce de monnaie pour calculer le coefficient de frottement statique. Si on ne vous donne pas la masse dans l'énoncé d'un problème, écrivez la deuxième loi de Newton avec une masse inconnue m. Dans plusieurs situations, comme celle qui fait partie du présent exemple, la masse va se simplifier.

Valider la réponse

Le signe est correct. L'ordre de grandeur de notre réponse est le même que l'ordre de grandeur des valeurs présentes dans le tableau 5.1.

EXEMPLE 5.10 On monte, avant de redescendre

Un enfant tire son traîneau avec une force de 6,00 N, à l'aide d'une corde, le long d'une pente inclinée à 15,0°. Le traîneau a une masse égale à 1,00 kg, la corde forme un angle de 25,0° par rapport au plan, et le coefficient de frottement cinétique entre le traîneau et la neige est de 0,150. Calculez l'accélération du traîneau.

SOLUTION

Illustrer la situation

L'objet est le traîneau. Nous traçons d'abord le diagramme des forces, présenté à la figure 5.36.

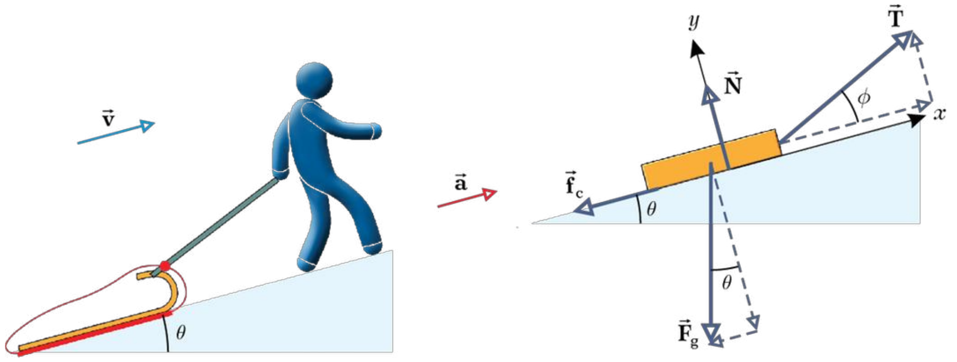


FIGURE 5.36
Le diagramme des forces du traîneau

Décortiquer le problème

Nous utilisons θ pour désigner l'angle de la pente et ϕ pour exprimer l'orientation de $\vec{T}$.

Connues			Inconnue
$T = 6{,}00$ N	$m = 1{,}00$ kg	$\mu_c = 0{,}150$	$\vec{a}$
$\theta = 15{,}0°$	$\phi = 25{,}0°$		

Les composantes des vecteurs sont les suivantes:

Vecteur	Composante x	Composante y
$\vec{T}$	$T\cos\phi$	$T\sin\phi$
$\vec{N}$	0	N
$\vec{f}_c$	$-f_c$	0
$\vec{F}_g$	$-mg\sin\theta$	$-mg\cos\theta$
$\vec{a}$	a_x	0

Identifier les clés

La première **clé** est que la force de frottement est une force de frottement cinétique, donnée par l'équation 5.19, car le traîneau glisse sur la neige :

$$f_c = \mu_c N \,. \qquad \text{(i)}$$

La deuxième **clé** est la deuxième loi de Newton, qu'on écrit pour chaque composante :

$$\sum F_x = T\cos\phi - \mu_c N - mg\sin\theta = ma_x \qquad \text{(ii)}$$

$$\sum F_y = T\sin\phi + N - mg\cos\theta = 0 \,. \qquad \text{(iii)}$$

Résoudre le problème

Les équations (ii) et (iii) forment un système d'équations à deux inconnues (a_x et N). Nous pouvons isoler N dans l'équation (iii) :

$$\begin{aligned} N &= mg\cos\theta - T\sin\theta \\ &= (1{,}00\ \text{kg} \times 9{,}81\ \text{m/s}^2)\cos(15{,}0°) \\ &\quad - (6{,}00\ \text{N})\sin(25{,}0°) = 6{,}940\ \text{N} \,. \end{aligned}$$

Nous insérons ce résultat dans l'équation (ii) et nous isolons a_x :

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{T\cos\phi - \mu_c N - mg\sin\theta}{m} \\ &= \big[6{,}00\ \text{N}\cos(25{,}0°) - 0{,}150(6{,}940\ \text{N}) \\ &\quad -(1{,}00\ \text{kg})(9{,}81\ \text{m/s}^2)\ \sin(15{,}0°)\big] \times \frac{1}{1{,}00\ \text{kg}} \\ a_x &= 1{,}86\ \text{m/s}^2 \,. \end{aligned}$$

Donc, l'accélération du traîneau est

$$\vec{a} = 1{,}86\,\text{m/s}^2 \ \ \overrightarrow{\text{parallèle au plan, vers son sommet.}}$$

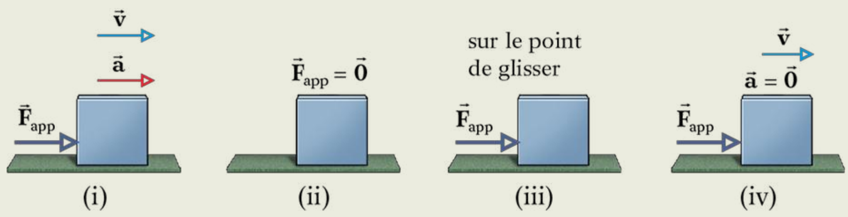
(réponse)

Valider la réponse

La réponse est un vecteur, car on demande l'accélération (un vecteur). L'ordre de grandeur a du sens.

TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 5.5

La figure ci-dessous représente un bloc sur un plancher rugueux, soumis successivement à une poussée $\vec{F}_{app}$ différente. Classez les situations dans l'ordre croissant du module de la force de frottement exercée par le plancher sur le bloc.



Les causes du frottement

Pour mieux comprendre comment une surface peut exercer une force de frottement statique ou cinétique sur un objet, on doit regarder de plus près l'objet sur la surface. Comme le montre la figure 5.37, même si les surfaces semblent planes, elles présentent plutôt des aspérités. Lorsque les surfaces sont grossies, on remarque des pics et des creux. Les deux surfaces se touchent seulement à quelques endroits.

Si on pouvait voir les surfaces d'encore plus près, on verrait des atomes composant l'objet et la surface. Aux points de contact, les atomes de l'objet et de la surface sont suffisamment rapprochés pour produire des liaisons moléculaires. Pour que l'objet se mette à glisser, ces liaisons doivent être brisées. Si la force de poussée n'est pas assez grande, l'objet reste immobile par rapport à la surface. La force de frottement statique maximale augmente lorsqu'on augmente la force normale, car cela rapproche les atomes de l'objet des atomes de la surface.

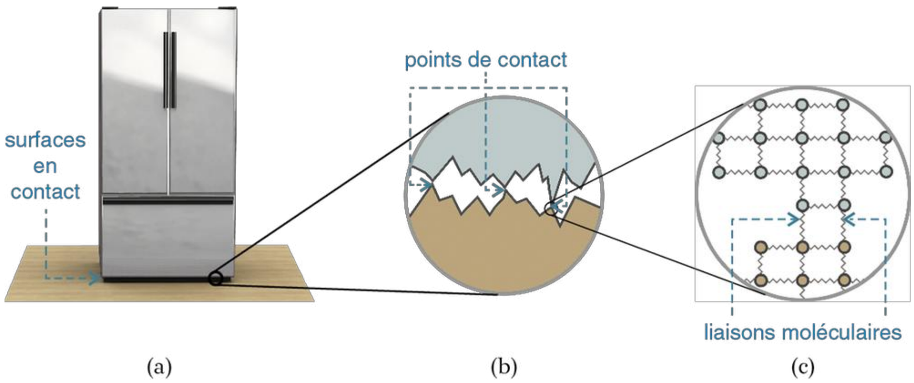


FIGURE 5.37
(a) Un réfrigérateur sur un plancher. (b) Une vue agrandie, où on voit qu'il y a certains points de contact entre les surfaces. (c) Au niveau atomique, des liaisons moléculaires sont formées.

Lorsque l'objet glisse, la surface exerce une force de frottement cinétique. Les atomes de l'objet et ceux de la surface s'attirent lorsque l'objet et la surface passent à faible distance l'un de l'autre. La force de frottement cinétique est plus faible que la force de frottement statique, car les atomes se déplacent trop rapidement pour que les liaisons puissent se former.

5.9 La traînée

À la section 3.8, nous avons étudié la chute verticale en négligeant la résistance de l'air. Dans certaines situations, cette simplification est injustifiée. On doit alors analyser la situation en ajoutant une force. Cette force de résistance est appelée la *traînée*. On expérimente cette force dans la vie de tous les jours quand on court ou qu'on fait de la bicyclette.

De façon générale, la traînée $\vec{\mathbf{f}}_\mathrm{T}$ est exercée sur un objet qui se déplace dans un fluide (un gaz ou un liquide). Cette force a les propriétés suivantes :

- La force de traînée $\vec{\mathbf{f}}_\mathrm{T}$ est opposée à $\vec{\mathbf{v}}$, la vitesse de l'objet par rapport au fluide.
- La force de traînée augmente avec le module de la vitesse : plus le module de la vitesse est élevé, plus la force est grande.

Pour un objet qui se déplace dans un fluide immobile, l'expérience montre que le module de la traînée est

$$f_\mathrm{T} = \frac{1}{2} C_X A \rho_\mathrm{f} v^2 \; . \tag{5.20}$$

Module de la traînée

Ici, ρ_f est la masse volumique du fluide (pour l'air*, $\rho_\mathrm{air} = 1{,}21\ \mathrm{kg/m^3}$). Le facteur A représente l'aire de la section efficace de l'objet, c'est-à-dire l'aire de la

* La valeur indiquée est valable à une température de 20 °C et à une pression atmosphérique de 101,325 kPa.

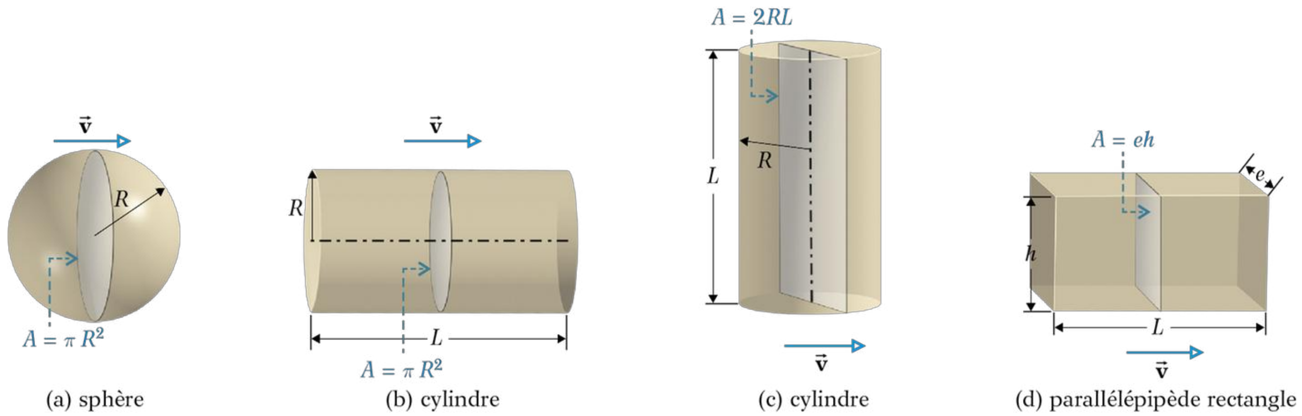


FIGURE 5.38
La section efficace de différents objets

TABLEAU 5.2
Les valeurs typiques du coefficient de traînée

Objet	C_x
Sphère	0,5
Cube	0,8
Disque	1,1
Balle de fusil	0,3
Personne debout	1,0-1,3
Cycliste sur un vélo	0,9-1,1
Skieur	1,1-1,3
Toyota Prius (2010)	0,25
Honda Civic (2005)	0,36
Citroën 2CV (1948)	0,48
Boeing 747	0,031

projection de l'objet perpendiculaire à la vitesse. La figure 5.38 montre la section efficace de quelques objets simples. Finalement, C_X est un coefficient sans unité qu'on appelle le *coefficient de traînée.* Sa valeur dépend de la forme exacte de l'objet et de facteurs complexes comme le type d'écoulement. Plus ce facteur est petit, plus l'objet est aérodynamique ; ce facteur doit être mesuré expérimentalement. Les constructeurs de voiture mesurent le coefficient de traînée de leurs voitures en réalisant des essais en soufflerie. Le tableau 5.2 donne quelques valeurs typiques.

On peut revenir à la chute d'un objet en tenant compte de la résistance de l'air. La figure 5.39 illustre le diagramme des forces d'un objet qui tombe verticalement dans l'air (on néglige la poussée d'Archimède). Selon la deuxième loi de Newton,

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = \vec{\mathbf{f}}_{\text{T}} + \vec{\mathbf{F}}_{\text{g}} = m\vec{\mathbf{a}}$$

$$\sum F_y = \frac{1}{2} C_X A \rho_{\text{f}} v^2 - mg = ma_y \ .$$

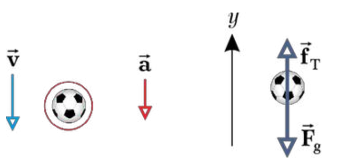


FIGURE 5.39
Un objet en chute vers le bas

Lorsqu'on laisse tomber l'objet, sa vitesse est nulle et la traînée est égale à zéro. L'objet accélère vers le bas. À mesure que le module de la vitesse augmente, la traînée augmente et le module de l'accélération diminue. Après un certain temps, la vitesse atteint une valeur limite pour laquelle l'accélération est nulle. Le module de la traînée est alors égal au module de la force gravitationnelle :

$$\frac{1}{2} C_X A \rho_{\text{f}} v_{\text{lim}}^2 - mg = 0$$

Module de la vitesse limite (chute verticale)

$$v_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{2mg}{C_X A \rho_{\text{f}}}} \ . \tag{5.21}$$

Cette équation montre que plus la masse de l'objet est élevée, plus sa vitesse limite sera grande. La figure 5.40 montre la composante y de la vitesse en fonction du temps pendant la chute.

Pour un objet qui glisse sur un plan incliné, le résultat est équivalent : la vitesse limite augmente avec la masse et diminue avec l'aire de la section efficace. Pour cette raison, à l'occasion d'une épreuve de descente de ski, un skieur ayant une grande masse est favorisé par rapport à un skieur de faible masse. De plus, le skieur doit diminuer le plus possible l'aire de sa section, en prenant par exemple la position arrondie.

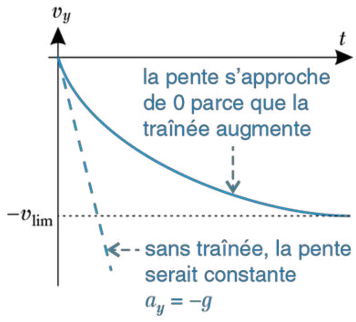


FIGURE 5.40
Le graphique de la composante de la vitesse d'un objet en chute verticale en fonction du temps

TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 5.6

Le module de la vitesse limite d'une balle de ping-pong est de 9 m/s. À partir du haut d'un édifice, on lance une balle de ping-pong avec une vitesse de 20 m/s vers le bas. Tracez le graphique de composante v_y de la balle en fonction du temps, en supposant que l'axe des y est orienté vers le haut.

EXEMPLE 5.11 Un risque d'orage fort

Durant certains orages forts, il tombe de la grêle plutôt que de la pluie, ce qui peut provoquer des dommages matériels. Une goutte de pluie a un rayon de 1,5 mm, alors qu'un gros grêlon a un rayon de 1,0 cm. Tous les deux sont des sphères (on néglige la déformation) composées d'eau, dont la masse volumique est de $1{,}00 \times 10^3$ kg/m^3. Le coefficient de traînée d'une sphère lisse est égal à 0,50.

a. Calculez le module de la vitesse limite dans le cas de la goutte de pluie.

b. Calculez le module de la vitesse limite dans le cas du grêlon.

SOLUTION

Illustrer la situation

Le diagramme des forces apparaît dans la figure 5.41.

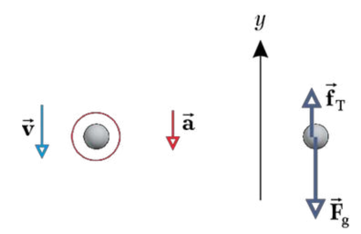


FIGURE 5.41
Le diagramme des forces d'une sphère qui tombe

Décortiquer le problème

Nous utilisons l'indice p pour désigner la goutte de pluie et l'indice g pour désigner le grêlon.

Connues

$R_p = 0{,}0015$ m $\quad R_g = 0{,}010$ m $\quad C_X = 0{,}50$

$\rho_{air} = 1{,}21$ kg/m^3 $\quad \rho_{eau} = 1000$ kg/m^3

Inconnues

$v_{lim,p} \quad v_{lim,g}$

Identifier la clé

La **clé** est celle-ci : lorsque la vitesse atteint la valeur limite, l'objet est à l'équilibre, et le module de la vitesse limite est donné par l'équation 5.21 :

$$v_{lim} = \sqrt{\frac{2mg}{C_X A \rho_{air}}} \,. \qquad \text{(i)}$$

L'aire de la section efficace d'une sphère est $A = \pi R^2$, comme l'indique la figure 5.38. Dans le cas de la masse, il faut la calculer en fonction de la masse volumique et du volume d'une sphère

$$m = \rho_{eau} V = \rho_{eau}\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right) \,. \qquad \text{(ii)}$$

En insérant l'équation (ii) ainsi que la valeur de l'aire dans l'équation (i), nous obtenons

$$v_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{2\rho_{\text{eau}}\frac{4}{3}\pi R^3 g}{C_X \pi R^2 \rho_{\text{air}}}} = \sqrt{\frac{8\rho_{\text{eau}} R g}{3 C_X \rho_{\text{air}}}} \ . \qquad \text{(iii)}$$

SOLUTION a.

Résoudre le problème

Remplaçons les valeurs :

$$v_{\text{lim,p}} = \sqrt{\frac{8 \times 1\,000 \text{ kg/m}^3 \times 0{,}0015 \text{ m} \times 9{,}81 \text{ m/s}^2}{3 \times 0{,}50 \times 1{,}21 \text{ kg/m}^3}} = 8{,}1 \text{ m/s} \ . \qquad \text{(réponse)}$$

SOLUTION b.

Résoudre le problème

De même, pour le grêlon,

$$v_{\text{lim,g}} = \sqrt{\frac{8 \times 1\,000 \text{ kg/m}^3 \times 0{,}010 \text{ m} \times 9{,}81 \text{ m/s}^2}{3 \times 0{,}50 \times 1{,}21 \text{ kg/m}^3}} = 21 \text{ m/s} \ . \qquad \text{(réponse)}$$

Valider la réponse

Les unités sont correctes. Nous avons exprimé toutes les quantités avec les unités du SI. On remarque que le module de la vitesse limite augmente selon la racine carrée du rayon pour une sphère.

RÉSUMÉ

Dans ce chapitre, nous avons étudié la dynamique relative à un objet. Nous avons vu comment trouver le mouvement d'un objet à partir des forces appliquées sur lui.

LES DÉFINITIONS

- La **force** est une action d'un agent sur un autre.
- La **masse** est une mesure de l'inertie d'un objet.
- Un **référentiel inertiel** est un référentiel qui se déplace à vitesse constante. La première et la deuxième lois de Newton peuvent être appliquées dans ces référentiels.

LES LOIS ET PRINCIPES

- La **première loi de Newton:** Tout objet demeure dans son état de repos ou son état de mouvement rectiligne uniforme, à moins de subir une force résultante non nulle.
- La **deuxième loi de Newton:**

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = m\vec{\mathbf{a}}\ .$$

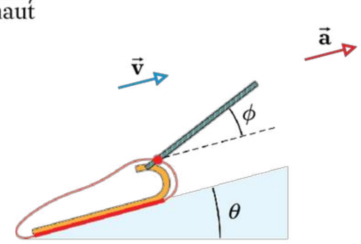
- Le **principe d'équivalence:** La masse est la mesure de l'inertie et la source de force gravitationnelle $\vec{\mathbf{F}}_g$.

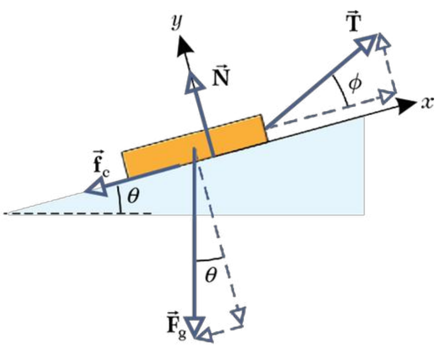
LES FORCES

- $\vec{\mathbf{F}}_g = mg\ \overrightarrow{\text{vers le bas}}$
- $\vec{\mathbf{F}}_{\text{él}} = k\,\Delta L\ \overrightarrow{\text{opposée à la déformation}}$
- $\vec{\mathbf{N}} = N\ \overrightarrow{\text{perpendiculaire à la surface}}$
- $f_s \leq \mu_s N$ et $\vec{\mathbf{f}}_s$ est parallèle à la surface, pour garder l'objet immobile par rapport à celle-ci.
- $f_c = \mu_c N$ et $\vec{\mathbf{f}}_c$ est opposée à $\vec{\mathbf{v}}$, la vitesse de l'objet par rapport à la surface.
- $\vec{\mathbf{T}} = T\ \overrightarrow{\text{en traction}}$
- $\vec{\mathbf{C}} = C\ \overrightarrow{\text{en compression}}$
- $f_T = \dfrac{1}{2}C_X A\rho_f v^2$, et $\vec{\mathbf{f}}_T$ est opposée à $\vec{\mathbf{v}}$, la vitesse de l'objet par rapport au fluide.
- $\vec{\mathbf{F}}_A = \rho_f V_{\text{im}} g\ \overrightarrow{\text{vers le haut}}$

La **construction d'un diagramme des forces** pour bien identifier les forces et calculer leurs composantes:

1. Tracer un schéma de la situation.
2. Tracer une courbe fermée autour du système.
3. Localiser, sur cette courbe, les points de contact où un objet de l'environnement touche le système.
4. Tracer le vecteur accélération $\vec{\mathbf{a}}$.
5. Représenter le système (l'objet) dans un deuxième schéma.
6. Identifier toutes les forces agissant sur le système et tracer les vecteurs correspondants.
7. Tracer un système de coordonnées cartésiennes.





LES RÉSULTATS

- Le poids est le module de la force gravitationnelle: $P = F_g = mg$.
- Le **poids apparent** est le module de la force de contact qui soutient l'objet.
- Un objet en chute verticale atteint une **vitesse limite** dont le module est:

$$v_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{2mg}{C_X A\rho_f}}\ .$$

QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES

Q questions qualitatives • **E** exercices simples • **P** problèmes • solution disponible

Section 5.3 Le diagramme des forces

E1 Un ballon est frappé avec un angle θ par rapport à l'horizontale. Tracez le diagramme des forces du ballon dans les airs, en négligeant la résistance de l'air.

E2 Un câble, attaché à un ascenseur, fait déplacer ce dernier vers le haut à vitesse constante. Tracez le diagramme des forces de l'ascenseur.

E3 Une caisse glisse le long d'un plan incliné. La surface du plan est rugueuse. Tracez le diagramme des forces de la caisse dans les situations suivantes :

a. la caisse se déplace vers le haut du plan incliné ;

b. la caisse se déplace vers le bas du plan incliné.

E4 Une personne pousse un piano avec une force $\vec{\mathbf{F}}_{\text{app}}$ orientée selon un angle θ sous l'horizontale. Le plancher est horizontal, et le piano demeure immobile. Tracez le diagramme des forces du piano.

E5 Une femme pousse un chariot d'épicerie pour monter un plan incliné. Le chariot se déplace à vitesse constante. La force de frottement est négligeable à cause des roulettes. Tracez le diagramme des forces du chariot.

E6 Une boîte est déposée sur le plancher d'un camion. Le frottement produit une force suffisante pour que la boîte ne glisse pas sur le plancher. Tracez le diagramme des forces de la boîte lorsque :

a. le camion se déplace à vitesse constante ;

b. le camion accélère vers la droite.

E7 Un bibelot, placé contre un mur, est retenu par un homme qui exerce une poussée $\vec{\mathbf{F}}_{\text{app}}$ horizontale. Tracez le diagramme des forces du bibelot.

E8 Un pendule simple est constitué d'un objet, attaché à une corde légère, qui suit un mouvement de va-et-vient dans un plan vertical (*voir la figure 5.42*). Tracez le diagramme des forces du pendule lorsque la corde forme un angle θ par rapport à la verticale.

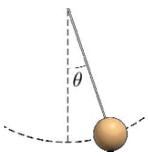


FIGURE 5.42 • Exercice 8

E9 On attache un bloc à des ressorts (*voir la figure 5.43*). Le bloc glisse sur une surface sans frottement, et les ressorts sont étirés. Tracez le diagramme des forces du bloc dans chacun des cas.

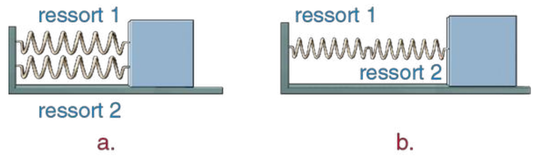


FIGURE 5.43 • Exercice 9

E10 On attache un bloc à deux ressorts (*voir la figure 5.44*). Le bloc est sur une surface sans frottement. Le ressort de gauche est étiré, et le ressort de droite est comprimé. Tracez le diagramme des forces du bloc.

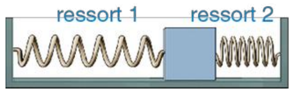


FIGURE 5.44 • Exercice 10

Section 5.4 La première loi de Newton

Q11 Une voiture est immobile. Subit-elle une force ?

Q12 Un objet peut-il être en mouvement si la force résultante est nulle ?

Q13 On attache un poids de 1,0 kg à un dynamomètre dans les trois situations illustrées à la figure 5.45. Dans les deuxième et troisième situations, on utilise une poulie pour changer l'orientation de la force de tension. Comme le frottement dans la poulie est négligeable, la tension est uniforme dans la corde. Classez les situations dans l'ordre croissant de la valeur indiquée par le dynamomètre.

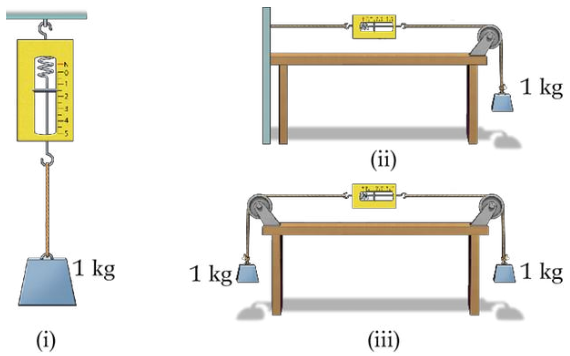


FIGURE 5.45 • Question 13

Q14 La figure 5.46 illustre, au moyen d'une vue en plongée, quatre situations où un bloc sur une surface sans frottement est soumis à des forces horizontales. Le module de chaque force peut être varié.

a. Déterminez la ou les situations dans lesquelles le bloc peut être immobile.

b. Déterminez la ou les situations dans lesquelles le bloc peut se déplacer à vitesse constante.

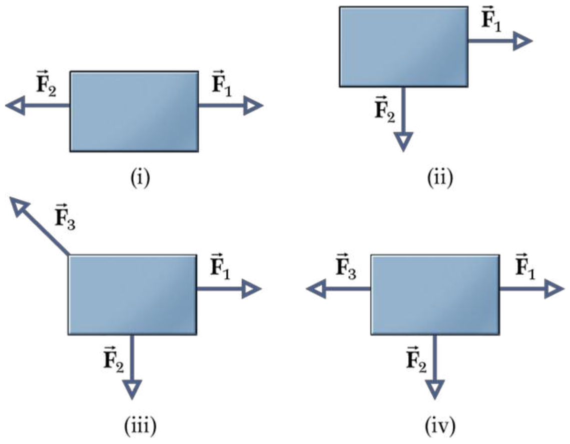


FIGURE 5.46 • Question 14

E15 Une particule soumise à trois forces se déplace à vitesse constante. Les forces sont $\vec{F}_1 = (2{,}0\vec{\imath} - 5{,}0\vec{\jmath} + 1{,}8\vec{k})$ N, $\vec{F}_2 = (-1{,}0\,\vec{\imath} + 3{,}0\vec{\jmath} + 1{,}5\vec{k})$ N et une force $\vec{F}_3$. Calculez la force $\vec{F}_3$.

E16 Trois cordes sont attachées à un anneau de masse négligeable (*voir la figure 5.47*). La tension T_1 est égale à 10,0 N, et la tension T_2 est égale à 25,0 N.

a. Calculez l'angle θ.

b. Calculez la tension T_3.

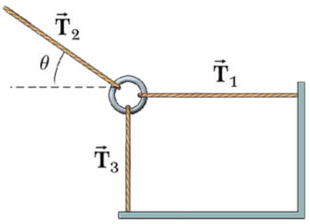


FIGURE 5.47 • Exercice 16

E17 Une sphère d'aluminium repose au fond d'une piscine. Son rayon est de 10,0 cm. La masse volumique de l'eau est de $1{,}00 \times 10^3$ kg/m^3 et celle de l'aluminium, de $2{,}70 \times 10^3$ kg/m^3. Calculez le module de la force normale exercée par le plancher de la piscine sur la sphère.

P18 Un livre de 750 g est placé sur une table, inclinée à 15,0°. Le livre demeure immobile.

a. Calculez le module de la force de frottement statique.

b. Calculez le module de la force normale.

P19 Un bloc de 1,50 kg glisse à vitesse constante le long d'un plan incliné à 20,0°.

a. Calculez le module de la force de frottement cinétique.

b. Calculez le module de la force normale.

P20 Une bille d'acier de 200 g est suspendue au bout d'une corde. On approche un aimant sans que celui-ci touche la bille. L'aimant attire la bille au moyen d'une force magnétique horizontale. La bille est en équilibre lorsque la corde forme un angle de 10,0° par rapport à la verticale.

a. Calculez la tension de la corde.

b. Calculez le module de la force magnétique.

P21 Une poutre d'acier ayant une masse de 500 kg est soutenue par deux câbles (*voir la figure 5.48*). Calculez la tension dans chaque corde.

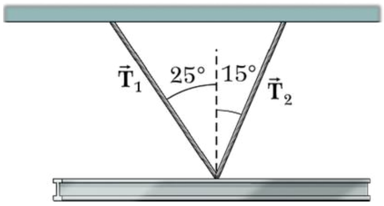


FIGURE 5.48 • Problème 21

P22 Une commerçante veut suspendre une affiche de 1,50 kg à une hauteur de 50,0 cm sous une tige de soutien. Elle utilise une corde de 1,200 m (la corde 1) et une autre corde de 80,0 cm (la corde 2), comme on l'indique dans la figure 5.49. Calculez la tension dans chaque corde.

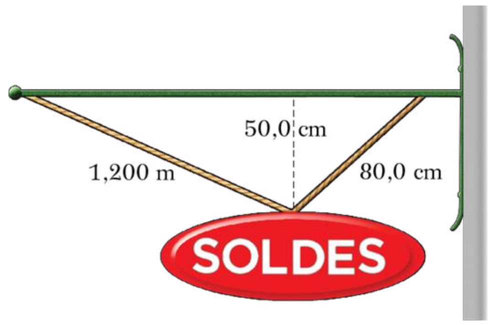


FIGURE 5.49 • Problème 22

Section 5.6 La deuxième loi de Newton

Q23 La figure 5.50 à la page suivante présente quatre situations où une rondelle glisse sur une surface horizontale sans frottement. Les forces appliquées et la vitesse de la rondelle sont illustrées. Donnez les signes des composantes cartésiennes de l'accélération dans chacune des quatre situations.

E24 Une rondelle de 150 g glisse sur une patinoire et parcourt une distance de 30,0 m avant de s'arrêter. Si le module de sa vitesse initiale est de 10,5 m/s, quel est le module de la force de frottement exercée sur la rondelle ?

E25 Une pierre de 200 g se déplace dans l'espace avec une accélération $\vec{a} = (-2{,}0\,\vec{\imath} + 1{,}3\vec{\jmath})$ m/s^2. Elle subit deux forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$, sans force gravitationnelle. Si $\vec{F}_1 = (0{,}50\,\vec{\imath} + 1{,}2\,\vec{\jmath} + 0{,}80\vec{k})$ N, calculez la force $\vec{F}_2$.

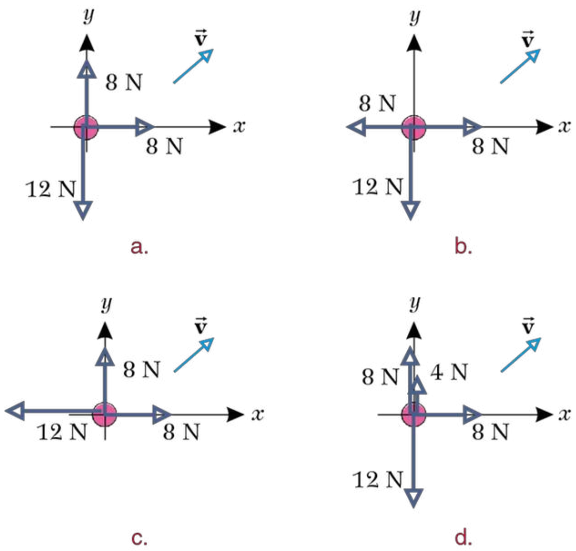


FIGURE 5.50 • Question 23

E26 Une voiture roulant à 50,0 km/h heurte une camionnette immobile. Durant la collision, l'avant de la voiture se déforme pour amortir le choc. Le conducteur, qui porte sa ceinture de sécurité, se déplace de 90,0 cm, vers l'avant durant la collision (par rapport à la route). Le passager, qui ne porte pas sa ceinture de sécurité, est ralenti uniquement par le coussin gonflable sur une distance de 10,0 cm. Le conducteur et le passager ont chacun une masse de 65,0 kg.

a. Quel est le module de la force exercée sur le conducteur ?

b. Quel est le module de la force exercée sur le passager ?

E27 Un disque de 2,50 kg, se déplaçant sur une surface horizontale, subit les forces illustrées dans la figure 5.51. Les modules des forces sont F_1 = 10,0 N, F_2 = 17,0 N, F_3 = 20,0 N et F_4 = 22,0 N. Calculez le module et l'orientation de l'accélération.

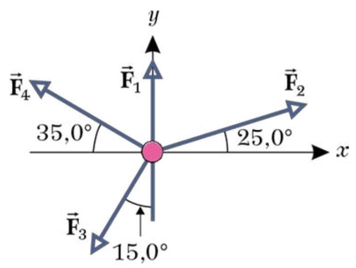


FIGURE 5.51 • Exercice 27

P28 Une femme pousse un chariot d'épicerie dont la masse totale est m. Pour monter un plan incliné à un angle ϕ par rapport à l'horizontale, elle exerce une force horizontale dont le module est F_p.

a. Déterminez le module de l'accélération.

b. Déterminez le module de la force normale.

P29 Une femme pousse un chariot d'épicerie dont la masse totale est de 20,0 kg. Pour monter un plan incliné à 4,50° par rapport à l'horizontale, elle exerce une force horizontale dont le module est F_p = 25,0 N.

a. Calculez le module de l'accélération.

b. Calculez le module de la force normale.

P30 Un pendule est attaché au plafond d'une voiture. Quelle est l'accélération de la voiture lorsque la corde du pendule forme un angle de 17,9° par rapport à la verticale, et qu'elle est orientée vers l'arrière de la voiture, par rapport au point d'attache ?

Section 5.7 La force gravitationnelle et le poids

Q31 Un objet dont le poids est de 30 N est suspendu à l'aide d'une corde dans un ascenseur. L'ascenseur se déplace vers le bas. Dans les situations suivantes, déterminez si la tension de la corde est égale, supérieure ou inférieure à 30 N.

a. Le module de la vitesse de l'ascenseur est constant.

b. Le module de la vitesse de l'ascenseur augmente.

c. Le module de la vitesse de l'ascenseur diminue.

E32 Un astronaute a un poids de 700 N sur la Terre. Sur la Lune, l'accélération gravitationnelle est égale à 1,67 m/s^2.

a. Quel est le poids de l'astronaute sur la Lune ?

b. Quelle est la masse de l'astronaute sur la Lune ?

c. Quelle est la masse de l'astronaute sur la Terre ?

E33 On plonge une sphère d'acier dans une piscine d'eau. Le diamètre de la sphère est égal à 10,00 cm (ρ_{eau} = 1,00 g/cm^3, ρ_{acier} = 7,9 g/cm^3).

a. Quel est le poids de la sphère ?

b. Quel est son poids apparent ?

P34 Une personne se pèse avec un pèse-personne dans un ascenseur. Lorsque l'ascenseur se met en mouvement, le pèse-personne indique 621,5 N. Quand l'ascenseur ralentit, le pèse-personne indique 456,5 N. Dans les deux situations, l'accélération a le même module.

a. Quelle est la masse de la personne ?

b. Quelle est l'accélération lorsque l'ascenseur se met en mouvement ?

c. Quelle est l'accélération lorsque l'ascenseur ralentit ?

Section 5.8 La force de frottement

Q35 Une boîte repose sur une surface horizontale. Les forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ sont appliquées, comme le montre la figure 5.52. La boîte demeure immobile. Le module de la force $\vec{F}_2$ augmente graduellement.

a. Comment le module de la force de frottement statique change-t-il ?

b. Comment le module de la force normale change-t-il ?

c. Comment le module de la force de frottement statique maximale change-t-il ?

Q36 Une boîte glisse vers la droite sur une surface horizontale. Les forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ sont appliquées, comme le montre la figure 5.52. Le module de la force $\vec{F}_2$ diminue graduellement. Comment la force de frottement cinétique change-t-elle ?

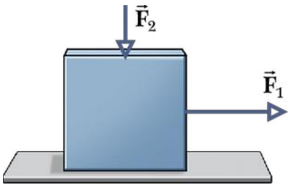


FIGURE 5.52 • Questions 35 et 36

Q37 Une boîte repose sur une surface horizontale. Une force $\vec{F}$ est appliquée comme l'indique la figure 5.53. La boîte demeure immobile. On augmente graduellement l'orientation θ de la force, sans changer son module.

a. Comment le module de la force de frottement statique change-t-il ?

b. Comment le module de la force normale change-t-il ?

c. Comment le module de la force de frottement statique maximale change-t-il ?

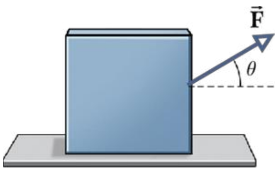


FIGURE 5.53 • Question 37

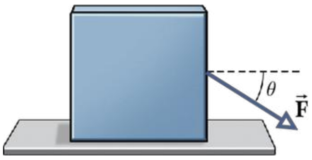


FIGURE 5.54 • Question 38

Q38 Une boîte repose sur une surface horizontale. Une force $\vec{F}$ est appliquée, comme l'indique la figure 5.54. La boîte demeure immobile. On augmente graduellement l'orientation θ de la force, sans changer son module.

a. Comment le module de la force de frottement statique change-t-il ?

b. Comment le module de la force normale change-t-il ?

c. Comment le module de la force de frottement statique maximale change-t-il ?

E39 Un meuble, dont la masse est de 50,0 kg, est immobile sur un plancher horizontal. Un homme pousse le meuble avec une force horizontale. Le coefficient de frottement statique entre le plancher et le meuble est de 0,48, et le coefficient de frottement cinétique est de 0,35.

a. Quel est le module de la force de poussée nécessaire pour mettre le meuble en mouvement ?

b. Quel est le module de l'accélération du meuble une fois que celui-ci est en mouvement si l'homme continue de pousser avec la force calculée en **a.** ?

E40 Sur une patinoire, une rondelle glisse sur une distance totale de 90 m lorsque sa vitesse initiale a un module de 9,3 m/s.

a. Quel est le module de l'accélération de la rondelle ?

b. Quel est le coefficient de frottement cinétique entre la rondelle et la patinoire ?

E41 Un bloc de 2,00 kg est contre un mur et initialement immobile. Le coefficient de frottement statique est de 0,520, et le coefficient de frottement cinétique est de 0,300. Une poussée horizontale $\vec{F}_p$ est exercée sur le bloc, comme l'indique la figure 5.55. Le module de la poussée est de 50,0 N.

a. Calculez l'accélération du bloc.

b. Quelle est la force exercée par le mur sur le bloc ? Le module de la poussée $\vec{F}_p$ est réduit à 30,0 N.

c. Calculez la nouvelle accélération du bloc.

d. Quelle est la nouvelle force exercée par le mur sur le bloc ?

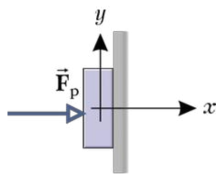


FIGURE 5.55 • Exercice 41

P42 Une caisse de masse m repose sur un plancher. Le coefficient de frottement statique entre la caisse et le plancher est μ_s. Un employé exerce une force $\vec{F}$ formant un angle θ par rapport à l'horizontale. Calculez le module minimal de la force $\vec{F}$ pour que la caisse se mette en mouvement dans les situations suivantes :

a. l'employé pousse la caisse, comme à la figure 5.56a ;

b. l'employé tire la caisse, comme à la figure 5.56b.

FIGURE 5.56 • Problèmes 42 et 43

P43 Une caisse de 70,0 kg repose sur un plancher. Le coefficient de frottement statique entre la caisse et le plancher est de 0,550. Un employé exerce une force $\vec{F}$ formant un angle $\theta = 26{,}0°$ par rapport à l'horizontale. Calculez le module minimal de la force $\vec{F}$ pour que la caisse se mette en mouvement dans les situations suivantes :

a. l'employé pousse la caisse, comme à la figure 5.56a ;

b. l'employé tire la caisse, comme à la figure 5.56b.

P44 Un père tire son enfant dans un traîneau, à l'aide d'une corde, le long d'une pente inclinée à un angle $\theta = 18{,}5°$ (*voir la figure 5.57*). La masse de l'enfant est de 15,0 kg, et la masse du traîneau est de 1,2 kg. Le coefficient de frottement statique entre le traîneau et la neige est de 0,250, et le coefficient de frottement cinétique est de 0,150. La corde forme un angle $\phi = 25{,}0°$ par rapport à la pente.

a. Quelle doit être la tension minimale dans la corde pour empêcher le traîneau de descendre la pente ?

b. Quelle doit être la tension minimale pour mettre en mouvement le traîneau vers le haut de la pente ?

c. Quelle doit être la tension minimale pour que le traîneau se déplace vers le haut de la pente à vitesse constante ?

FIGURE 5.57 • Problème 44

P45 Un bloc est poussé le long d'un plan incliné à $\theta = 20{,}0°$, avec une force horizontale, comme le montre la figure 5.58. Le module de la force est $F = 14{,}7$ N, et la masse du bloc est de 850 g. Initialement au repos, le bloc acquiert une vitesse de 8,00 m/s vers le haut du plan, en 1,53 s. Calculez le coefficient de frottement cinétique.

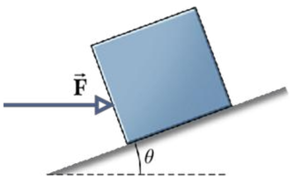


FIGURE 5.58 • Problème 45

P46 Une rondelle de bois est lancée à une vitesse de 7,50 m/s vers le haut, à partir du bas d'un plan incliné à 16,0°. Le coefficient de frottement cinétique entre la rondelle et le plan est de 0,25. La rondelle parcourt une distance d avant de s'arrêter, puis redescend vers le bas du plan.

a. Quelle est l'accélération de la rondelle lorsque celle-ci monte le plan incliné ?

b. Quelle est la distance d parcourue par la rondelle avant que celle-ci redescende ?

c. Quelle est l'accélération de la rondelle lorsque celle-ci redescend ?

d. Quel est le module de la vitesse de la rondelle lorsque celle-ci arrive au bas du plan incliné ?

P47 Une caisse est tirée à l'aide d'une corde le long d'un plan incliné selon un angle $\theta = 20{,}0°$. La caisse a une masse de 1,50 kg, le coefficient de frottement statique est égal à 0,300 et le coefficient de frottement cinétique est égal à 0,150. La corde forme un angle $\phi = 30{,}0°$ par rapport au plan incliné (*voir la figure 5.59*), et la caisse est initialement immobile. Calculez l'accélération de la caisse si la tension dans la corde est

a. $T = 7{,}00$ N ;

b. $T = 10{,}0$ N ;

c. $T = 1{,}00$ N.

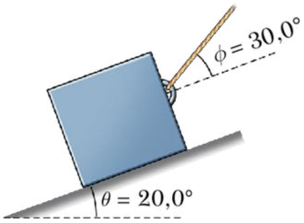


FIGURE 5.59 • Problème 47

Section 5.9 La traînée

E48 Un parachutiste de 65,0 kg atteint une vitesse limite dont le module est de 45,0 m/s.

a. Quelle est l'accélération du parachutiste lorsque celui-ci saute de l'avion ? (Négligez la vitesse de l'avion.)

b. Quelle est la force de traînée lorsque sa vitesse a un module égal à 20,0 m/s ?

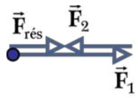
c. Quelle est l'accélération du parachutiste lorsque sa vitesse a un module égal à 20,0 m/s ?

P49 On laisse tomber une bille d'acier de 2,00 cm de diamètre dans un lac. La masse volumique de l'acier est égale à 7,90 g/cm^3, celle de l'eau est égale à 1,00 g/cm^3 et le coefficient de traînée de la bille est de 0,500. Calculez le module de la vitesse limite de la bille dans l'eau.

P50 Un skieur de 70,0 kg descend une pente inclinée à 28,0°. Le coefficient de frottement cinétique entre ses skis et la neige est de 0,100. Calculez le module de la vitesse limite du skieur si l'aire de sa section efficace est de 1,44 m^2, que son coefficient de traînée est de 0,80 et que la masse volumique de l'air est de 1,34 kg/m^3.

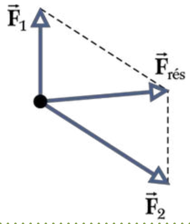
SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION

5.1 **a.**



La force résultante est la somme vectorielle de $\vec{\mathbf{F}}_1$ et de $\vec{\mathbf{F}}_2$. Nous plaçons les deux vecteurs bout à bout. $\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}}$ est le vecteur qui va de l'origine de $\vec{\mathbf{F}}_1$ jusqu'à l'extrémité de $\vec{\mathbf{F}}_2$.

b.



On trace les vecteurs avec leurs origines sur le cercle représentant l'objet. La force résultante est obtenue par la méthode du parallélogramme : les forces $\vec{\mathbf{F}}_1$ et $\vec{\mathbf{F}}_2$ forment les bases d'un parallélogramme. $\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}}$ est la diagonale issue de l'origine des vecteurs $\vec{\mathbf{F}}_1$ et $\vec{\mathbf{F}}_2$.

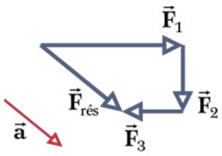
5.2 **a.** $\vec{\mathbf{F}}_3 = 4\,\text{N}\ \overrightarrow{\text{vers la gauche}}$

L'objet est immobile, donc $\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = \vec{\mathbf{F}}_1 + \vec{\mathbf{F}}_2 + \vec{\mathbf{F}}_3 = \vec{\mathbf{0}}$. On peut alors écrire $\vec{\mathbf{F}}_3 = -(\vec{\mathbf{F}}_1 + \vec{\mathbf{F}}_2)$. La somme de $\vec{\mathbf{F}}_1$ et de $\vec{\mathbf{F}}_2$ donne une force de $4\,\text{N}\ \overrightarrow{\text{vers la droite}}$. L'opposé de cette force est $4\,\text{N}\ \overrightarrow{\text{vers la gauche}}$.

b. $\vec{\mathbf{F}}_3 = 4\,\text{N}\ \overrightarrow{\text{vers la gauche}}$

L'objet se déplace à vitesse constante, donc $\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}} = \vec{\mathbf{F}}_1 + \vec{\mathbf{F}}_2 + \vec{\mathbf{F}}_3 = \vec{\mathbf{0}}$. C'est la même situation qu'en **a.**

5.3



L'accélération $\vec{\mathbf{a}}$ a la même orientation que la force résultante, selon la deuxième loi de Newton. Nous avons calculé $\vec{\mathbf{F}}_{\text{rés}}$ à l'aide de la méthode du polygone. La vitesse de l'objet ne sert pas à trouver l'accélération.

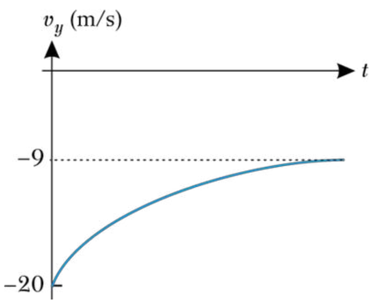
5.4 $P_{\text{app}} = 0{,}00\,\text{N}$

Dans la chute libre, $a_y = -g$ et l'équation (i) donne $P_{\text{app}} = 0{,}00$ N. Physiquement, l'ascenseur tombe en même temps que la personne ; il n'y a pas de contact entre le plancher et la personne.

5.5 $f_{\text{(ii)}} < f_{\text{(i)}} = f_{\text{(iv)}} < f_{\text{(iii)}}$

En (ii), la force de frottement est nulle, car il n'y a pas d'autre force ayant une composante horizontale. Aux situations (i) et (iv), le bloc glisse, alors $f_c = \mu_c N$. En (iii), la force de frottement est égale à la force de frottement statique maximale $\vec{\mathbf{f}}_{\text{smax}}$, dont le module est $f_{\text{smax}} = \mu_s N$. En général, $\mu_s > \mu_c$, et alors $f_{\text{smax}} > f_c$.

5.6



Le module de la vitesse initiale est plus grand que le module de la vitesse limite. Alors, le module de la traînée est plus grand que le module de la force gravitationnelle. La force résultante est vers le haut, ce qui donne une accélération avec une composante positive $a_y > 0$ (la pente de la courbe est positive). Cette accélération est opposée à la vitesse, ce qui diminue le module de la vitesse graduellement, jusqu'à ce que la vitesse limite soit atteinte.

Chapitre 06

Les interactions et la troisième loi de Newton

Buts du chapitre

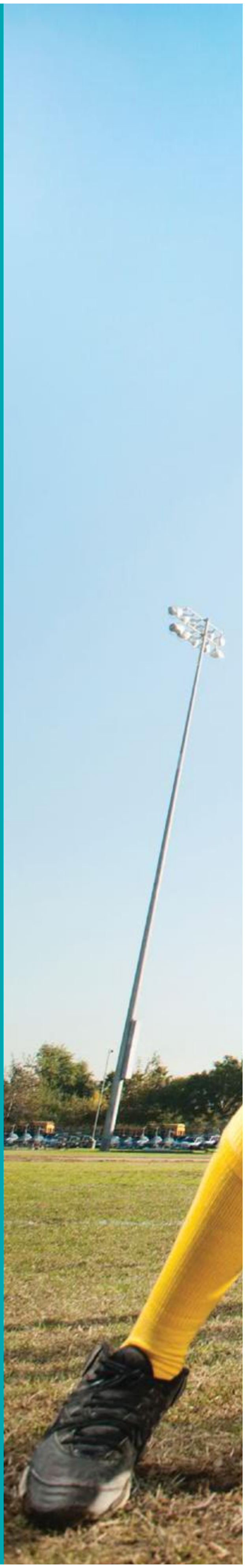
Ce chapitre porte sur l'étude de la dynamique des systèmes en interaction. Après l'étude de ce chapitre, vous serez en mesure :

- d'identifier les paires action-réaction ;
- de comprendre et utiliser la troisième loi de Newton ;
- d'utiliser les deuxième et troisième lois de Newton pour résoudre des problèmes faisant intervenir des systèmes en interaction ;
- de résoudre des problèmes faisant intervenir des cordes et des poulies.

Préalables

Ce chapitre est la suite du chapitre précédent. Revoyez :

- le répertoire de forces, présenté à la section 5.2 ;
- les diagrammes des forces, expliqués à la section 5.3 ;
- la force de frottement, présentée à la section 5.8.



Les joueurs de football adverses exercent l'un sur l'autre des forces d'interaction.

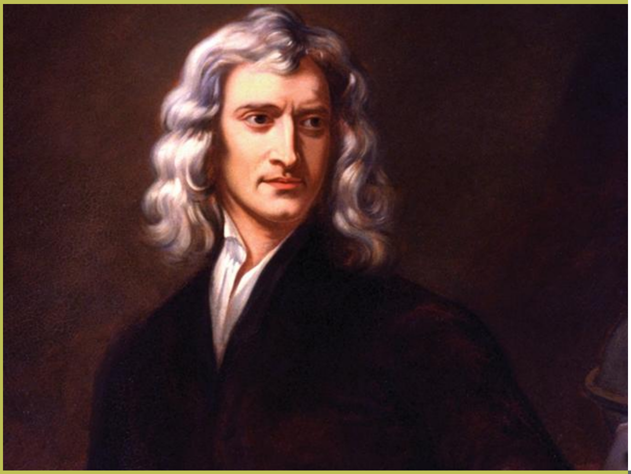
UN PEU D'HISTOIRE

Le dernier mot et le premier mot : Newton formule les lois mathématiques de la physique

Au moment où il publie ses *Principia* en 1687 (dont le titre complet se traduit par *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*), le physicien, mathématicien et astronome Isaac Newton (1642-1727) est déjà professeur à Cambridge, au Royaume-Uni, depuis 1669. C'est une période de grandes avancées scientifiques, alors que la génération précédente, dont notamment Galilée et Kepler, a établi des observations et des calculs qui servent de base aux travaux scientifiques subséquents.

De fil en aiguille, Newton complète donc ses calculs et développe des démonstrations qui lui permettront d'accoucher d'un ouvrage fondateur : ses fameux *Principia*. L'importance de ce livre, c'est qu'il établit le lien entre la pratique et la théorie, mais aussi entre le passé et le futur, entre la géométrie et le calcul infinitésimal, et entre la mécanique et la physique.

Les savants de l'époque sont souvent des hommes pratiques. Galilée (1564-1642) perfectionne la lunette astronomique. Son étude du mouvement s'inspire de ses tentatives d'analyser la trajectoire des boulets de canon, tandis que ses travaux sur la résistance des matériaux s'enracinent dans un autre défi militaire : la construction de galères géantes à Venise, qui exige une meilleure compréhension des caractéristiques des rames requises par ces nouveaux vaisseaux de guerre.



Isaac Newton (1642-1727)

Quant à Newton, il fabrique le premier télescope astronomique ; plus tard, il dirigera la Monnaie royale d'Angleterre, où il mènera la vie dure aux faux-monnayeurs.

Si ces savants connaissent bien le monde des objets, ils vivent aussi dans le monde des chiffres, de la géométrie pure et de la logique abstraite. Galilée et Newton citent souvent des expériences et des exemples concrets : navires, plans inclinés, pendules… Mais ils appartiennent aussi à une tradition intellectuelle qui remonte à Aristote (–384 à –322). L'étude du mouvement des corps sous l'influence des forces qui s'exercent sur eux n'a pas été inventée par Newton. Le texte latin des *Principia* et les démonstrations géométriques rattachent l'ouvrage au passé, mais l'usage du calcul infinitésimal prépare l'avenir.

En effet, Newton découvrira alors la loi de la gravitation universelle, qu'on peut décrire comme une force responsable de la chute des corps et du mouvement des corps terrestres. L'attraction qu'exerce une planète comme la Terre sur son satellite naturel, la Lune, ou sur des objets près de sa surface, s'explique par cette loi.

Ce qui fait la grandeur de la dynamique de Newton, c'est qu'elle part d'axiomes élémentaires pour aboutir à la gravitation universelle. Les *Principia* unifient la mécanique (associée aux mouvements produits par des actions humaines) et la physique (associée aux mouvements naturels, comme la chute des corps). La troisième loi est la plus originale, puisque les deux premières étaient redevables à Galilée, à Descartes et à Huygens. Elle s'avère également cruciale pour élaborer le concept d'attraction mutuelle entre les corps célestes, ce qui permet à Newton de démontrer que l'opération de cette force entre la Terre et la Lune possède les mêmes caractéristiques que la gravité, responsable de la chute des corps sur Terre. La gravitation est donc universelle et la dynamique terrestre s'étend désormais aux phénomènes célestes.

Dans le chapitre précédent, nous avons résolu des problèmes de dynamique : pour connaître l'accélération d'un objet, nous identifions les forces exercées sur l'objet, puis nous appliquons la deuxième loi de Newton. Cette méthode fonctionne très bien dans le cas d'objets isolés, mais comment faire pour trouver les forces lorsque plusieurs objets exercent des forces l'un sur l'autre ? Quand, au football, le joueur en foncé pousse le joueur en blanc (*voir l'ouverture du chapitre*), de quelle façon son mouvement est-il modifié ? Le joueur en blanc pousse aussi le joueur en foncé. Les deux joueurs de football sont *en interaction* : ils exercent une force l'un sur l'autre.

Il existe plusieurs autres exemples de systèmes en interaction : lorsqu'on frappe un clou avec un marteau, ce dernier exerce une force sur le clou pour l'enfoncer, et le clou exerce une force sur le marteau pour l'arrêter. De même, la Terre attire la Lune, ce qui la fait tourner autour de la Terre ; et la Lune attire la Terre, ce qui produit les marées. La deuxième loi de Newton n'étant pas suffisante pour étudier les systèmes en interaction, la troisième loi de Newton est présentée dans ce chapitre. Celle-ci est également connue sous le nom de « principe d'action-réaction ».

6.1 Les interactions

La figure 6.1 illustre un marteau qui frappe un clou. Le marteau exerce une force vers la droite sur le clou pour l'enfoncer. En même temps, le marteau s'arrête rapidement. Le marteau subit une force qui provoque cette grande décélération. C'est le clou qui exerce cette force vers la gauche. Le marteau et le clou interagissent ; ils exercent une force l'un sur l'autre.

FIGURE 6.1
Un marteau frappe (l'action) un clou, et le clou exerce une force (la réaction) sur le marteau.

Les forces viennent toujours par paires, comme le montre la figure 6.2. Pour bien distinguer les deux forces formant une paire, on utilise dans ce manuel une notation à deux indices séparés par une flèche vers la gauche. Le premier indice désigne l'objet qui subit la force, la flèche vers la gauche est présente pour se souvenir que la force est exercée sur l'objet, et le deuxième indice désigne l'agent qui applique la force. $\vec{\mathbf{F}}_{A \leftarrow B}$ se lit ainsi : la force *sur A par B*. Lorsque la force $\vec{\mathbf{F}}_{A \leftarrow B}$ est exercée sur un corps A par un corps B, une force $\vec{\mathbf{F}}_{B \leftarrow A}$ est **toujours exercée simultanément** sur l'objet B par l'objet A. Pour faciliter l'analyse, on appelle A l'objet et la force $\vec{\mathbf{F}}_{A \leftarrow B}$ est l'*action*, alors que l'objet B est l'agent et la force $\vec{\mathbf{F}}_{B \leftarrow A}$ est appelée la *réaction*. Les deux forces formant une paire action-réaction, on dit que les deux objets sont en interaction. Comme le montre la figure 6.2, l'action et la réaction sont des forces opposées. De plus, elles sont de même nature : si $\vec{\mathbf{F}}_{A \leftarrow B}$ est une force de frottement, alors $\vec{\mathbf{F}}_{B \leftarrow A}$ est aussi une force de frottement.

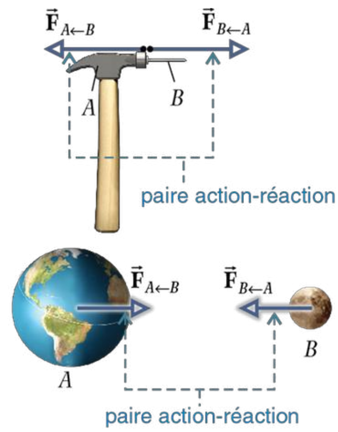


FIGURE 6.2
Deux situations où les forces $\vec{\mathbf{F}}_{A \leftarrow B}$ et $\vec{\mathbf{F}}_{B \leftarrow A}$ forment une paire action-réaction.

On peut dire ceci : dans la situation où le marteau frappe le clou, l'action est la force que le marteau (l'agent) exerce sur le clou (l'objet). Il y a donc nécessairement une force de réaction que subit le marteau et qui est causée par le clou. On peut inverser la situation et dire ce qui suit : l'action est la force que le clou exerce sur le marteau, et la réaction est la force que le marteau exerce sur le clou. Les deux interprétations sont valables et tout à fait équivalentes. En général, on choisit l'interprétation qui convient le mieux au point de vue adopté.

MISE EN GARDE

Dans une paire action-réaction, la force d'action et la force de réaction s'exercent toujours sur des systèmes différents, par exemple l'action qui s'exerce sur le clou et la réaction sur le marteau, ou inversement. De plus, elles sont de même nature.

La propulsion

Lorsqu'on marche, on exerce une poussée sur le sol, comme le montre la figure 6.3a. Cette poussée est une force de frottement statique $\vec{\mathbf{f}}_{s,s\leftarrow m}$, exercée sur le sol par le marcheur, et elle est orientée vers l'arrière. En réaction, le sol exerce sur le marcheur une force $\vec{\mathbf{f}}_{s,m\leftarrow s}$, la force sur le marcheur par le sol, vers l'avant. C'est la force qui permet au marcheur d'avancer, car elle est exercée sur lui. La force exercée sur le sol est une force de frottement statique ; le pied ne glisse pas sur le sol lorsqu'on marche. Si la surface est glissante, comme un trottoir gelé, il est alors difficile d'avancer parce que la force de frottement statique maximale est faible.

Une automobile qui avance (*voir la figure 6.3b*) exerce aussi une force de frottement statique $\vec{\mathbf{f}}_{s,s\leftarrow a}$ sur le sol, vers l'arrière. La force qui fait avancer est la réaction de cette force, soit la force de frottement statique $\vec{\mathbf{f}}_{s,a\leftarrow s}$ exercée sur l'automobile par le sol. Le point de contact entre le pneu et la route est immobile. Nous reviendrons en détail sur ce point lorsque nous étudierons le mouvement de roulement au chapitre 11.

Une fusée volant dans les airs ne s'appuie pas sur le sol. Pour accélérer vers le haut, elle propulse à grande vitesse des gaz vers le bas avec une force $\vec{\mathbf{F}}_{g\leftarrow f}$. En réaction, les gaz exercent sur la fusée une force $\vec{\mathbf{F}}_{f\leftarrow g}$ orientée vers le haut (*voir la figure 6.3c*), qui propulse la fusée.

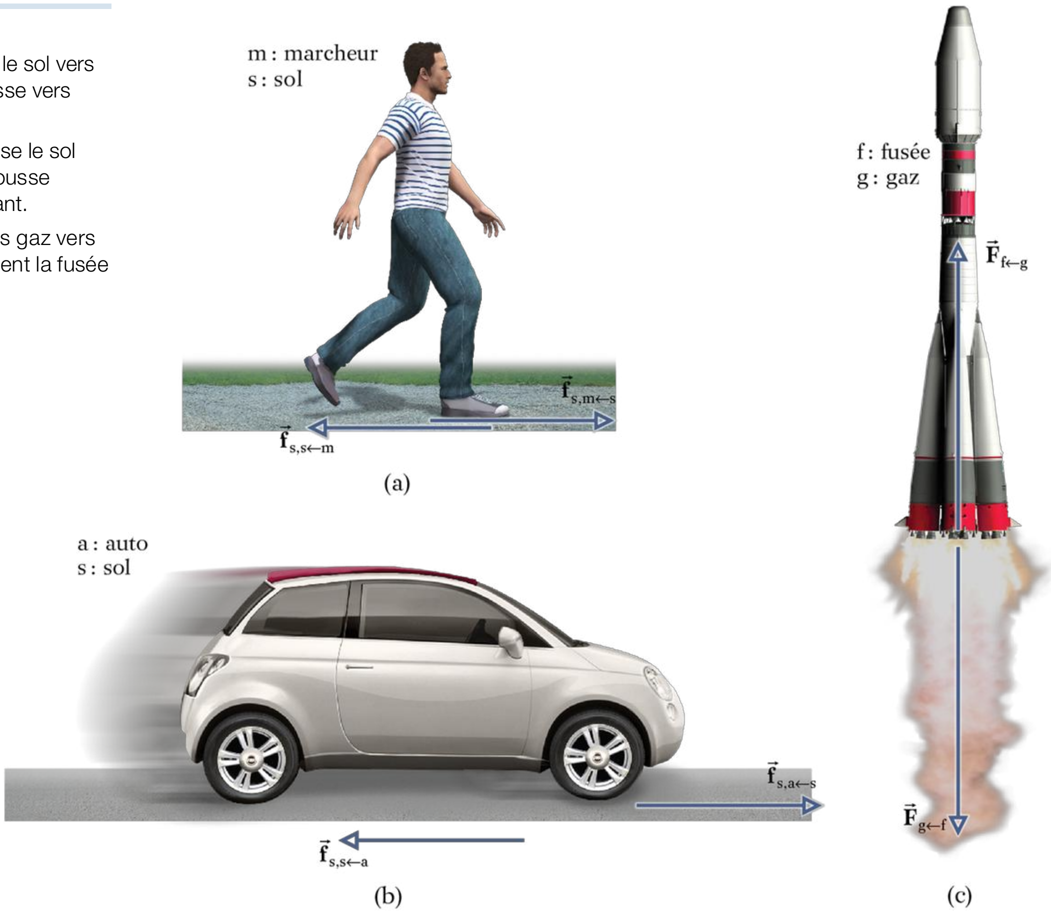


FIGURE 6.3

(a) Un marcheur pousse le sol vers l'arrière ; le sol le pousse vers l'avant.

(b) Une automobile pousse le sol vers l'arrière ; le sol pousse l'automobile vers l'avant.

(c) Une fusée pousse des gaz vers le bas ; les gaz poussent la fusée vers le haut.

6.2 L'identification des paires

À partir de la figure 6.4a, qui montre un livre reposant sur une étagère, regardons en détail les forces exercées sur le livre (l'objet). Le diagramme des forces du livre est illustré à la figure 6.4b. Dans le cas présent, il est important de bien identifier l'objet et l'agent d'une force. Pour ce faire, on utilise la notation avec indices afin d'indiquer clairement l'objet et l'agent. L'expression $\vec{\mathbf{N}}_{\mathrm{l} \leftarrow \mathrm{e}}$ désigne la force normale exercée sur le livre, et $\vec{\mathbf{F}}_{\mathrm{g,l} \leftarrow \mathrm{T}}$ désigne la force gravitationnelle exercée sur le livre par la Terre. Dans cet exemple, la force normale et la force gravitationnelle sont opposées. Peut-on dire que ces forces forment une paire action-réaction ? Non, car elles s'exercent toutes les deux sur le même objet (le livre) et ne sont pas de même nature.

Pour trouver la réaction de la force normale $\vec{\mathbf{N}}_{\mathrm{l} \leftarrow \mathrm{e}}$, il faut inverser l'objet et l'agent. Cette réaction est la force normale sur l'étagère par le livre $\vec{\mathbf{N}}_{\mathrm{e} \leftarrow \mathrm{l}}$; elle est opposée à $\vec{\mathbf{N}}_{\mathrm{l} \leftarrow \mathrm{e}}$, c'est-à-dire vers le bas. Donc, le livre pousse sur l'étagère avec une force orientée vers le bas. La réaction de la force gravitationnelle $\vec{\mathbf{F}}_{\mathrm{g,l} \leftarrow \mathrm{T}}$ est la force gravitationnelle $\vec{\mathbf{F}}_{\mathrm{g,T} \leftarrow \mathrm{l}}$. Cette force est exercée sur le centre de la Terre et est orientée vers le haut (opposée à $\vec{\mathbf{F}}_{\mathrm{g,l} \leftarrow \mathrm{T}}$). La Terre est attirée vers le haut par le livre.

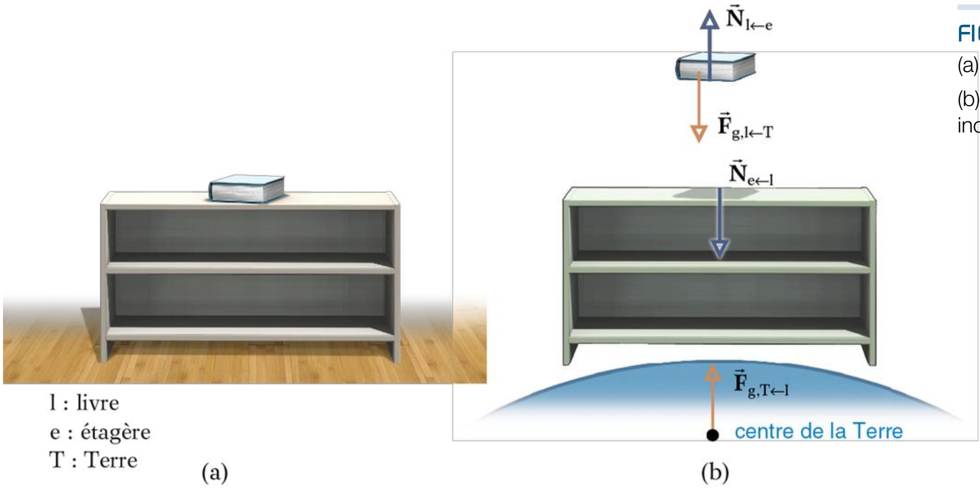


FIGURE 6.4
(a) Un livre repose sur une étagère.
(b) Le diagramme des forces du livre, incluant les paires action-réaction.

REMARQUE

Pour déterminer si deux forces constituent bien une paire action-réaction, vérifiez si les indices des deux forces sont les mêmes, mais dans le sens inverse.

TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 6.1

Dans la situation illustrée à la figure 6.4, l'étagère subit aussi une force normale $\vec{\mathbf{N}}_{\mathrm{e} \leftarrow \mathrm{s}}$, exercée vers le haut par le sol. Parmi les forces suivantes, déterminez quelle est la réaction de cette force et quelle est l'orientation de cette réaction :

(i) $\vec{\mathbf{F}}_{\mathrm{g,e} \leftarrow \mathrm{T}}$, orientée vers le bas ;
(ii) $\vec{\mathbf{N}}_{\mathrm{l} \leftarrow \mathrm{e}}$, orientée vers le haut ;
(iii) $\vec{\mathbf{N}}_{\mathrm{s} \leftarrow \mathrm{e}}$, orientée vers le bas ;
(iv) $\vec{\mathbf{F}}_{\mathrm{g,l} \leftarrow \mathrm{T}}$, orientée vers le bas.

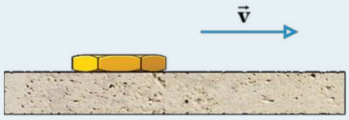
Il est important de pouvoir identifier toutes les paires action-réaction dans une situation donnée. La technique 6.1, présentée ci-dessous, décrit la procédure à suivre.

TECHNIQUE 6.1 L'identification des paires action-réaction

1. **Dessiner les objets séparément.** Respectez leur position relative. N'oubliez pas les objets comme le sol ou le centre de la Terre. Faites une légende pour bien associer les symboles aux objets.
2. **Tracer toutes les forces** en respectant leurs points d'application. Utilisez les symboles usuels ($\vec{\mathbf{F}}_g, \vec{\mathbf{N}}, \vec{\mathbf{f}}_c$, ...), avec les indices désignant l'objet et l'agent : la force $\vec{\mathbf{F}}_{A\leftarrow B}$ est la force exercée sur *A* par *B*.
3. **Regrouper les paires dans un tableau.** Les membres d'une paire sont des forces de même nature, avec des orientations opposées ; elles ont le même symbole avec des indices inversés.

EXEMPLE 6.1 Une pièce de monnaie qui glisse

La figure ci-contre montre une pièce de monnaie qui glisse vers la droite sur le sol horizontal rugueux (avec frottement). Identifiez toutes les paires action-réaction relativement à la pièce de monnaie. Considérez que la force qui a mis la pièce en mouvement n'est plus appliquée sur celle-ci.



SOLUTION

Illustrer la situation

1. Il y a trois objets : la pièce (p), le sol (s) et le centre de la Terre (T).
2. La pièce subit trois forces : la force normale $\vec{\mathbf{N}}_{p\leftarrow s}$ et la force de frottement cinétique $\vec{\mathbf{f}}_{c,p\leftarrow s}$, toutes les deux exercées par le sol, et la force gravitationnelle $\vec{\mathbf{F}}_{g,p\leftarrow T}$ exercée par la Terre. Le sol subit les forces exercées par la pièce $\vec{\mathbf{N}}_{s\leftarrow p}$ et $\vec{\mathbf{f}}_{c,s\leftarrow p}$. Finalement, le centre de la Terre subit la force gravitationnelle $\vec{\mathbf{F}}_{g,T\leftarrow p}$, qui est exercée par la pièce. La figure 6.5 présente l'identification des paires. Les membres d'une paire sont tracés avec la même couleur pour faciliter l'identification.
3. La figure 6.5 présente les trois paires action-réaction.

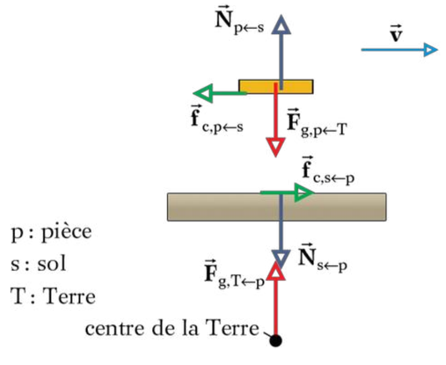


FIGURE 6.5
L'identification des paires pour une pièce qui glisse

Paires

$\vec{\mathbf{N}}_{p\leftarrow s} — \vec{\mathbf{N}}_{s\leftarrow p}$

$\vec{\mathbf{f}}_{c,p\leftarrow s} — \vec{\mathbf{f}}_{c,s\leftarrow p}$

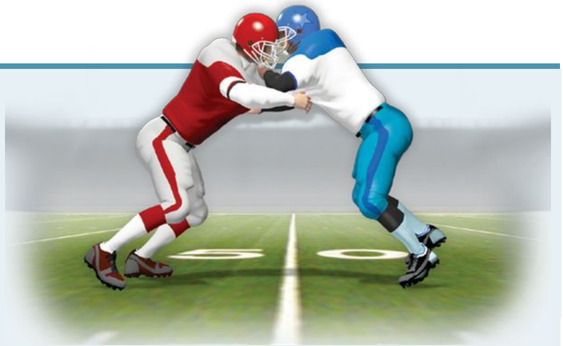
$\vec{\mathbf{F}}_{g,p\leftarrow T} — \vec{\mathbf{F}}_{g,T\leftarrow p}$

Valider la réponse

Toutes les forces font partie d'une paire. Les membres d'une paire sont des forces opposées.

EXEMPLE 6.2 La protection du quart arrière

Un joueur de football de ligne pousse un joueur adverse pour l'empêcher de se rendre jusqu'au quart arrière. Identifiez les paires action-réaction.



SOLUTION

Illustrer la situation

1. Il y a quatre objets : le joueur offensif (o) en rouge, le joueur défensif (d) en bleu, le sol (s) et la Terre (T).

2. Chaque joueur pousse le sol vers l'arrière et pousse l'autre joueur vers l'avant. Donc, chaque joueur est poussé par l'adversaire (vers l'arrière) et il est poussé par le sol (vers l'avant). Chaque joueur subit une force normale, exercée par le sol, et une force gravitationnelle, exercée par la Terre. Les forces sont illustrées à la figure 6.6.

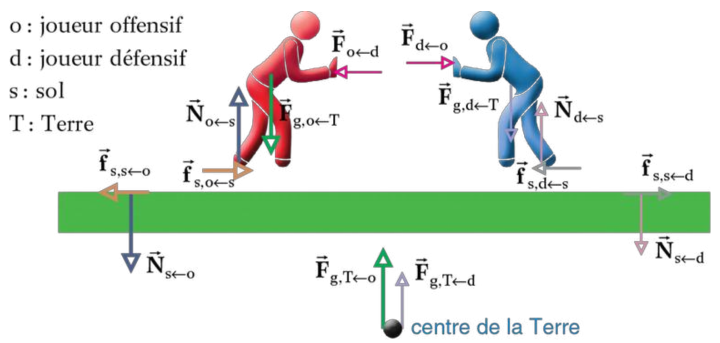


FIGURE 6.6
L'identification des paires lorsque deux joueurs de football se poussent

3. Il y a sept paires action-réaction, illustrées par des couleurs différentes dans la figure 6.6 :

$$\vec{F}_{o\leftarrow d} — \vec{F}_{d\leftarrow o}$$

$$\vec{F}_{g,o\leftarrow T} — \vec{F}_{g,T\leftarrow o} \qquad \vec{F}_{g,d\leftarrow T} — \vec{F}_{g,T\leftarrow d}$$

$$\vec{N}_{o\leftarrow s} — \vec{N}_{s\leftarrow o} \qquad \vec{N}_{d\leftarrow s} — \vec{N}_{s\leftarrow d}$$

$$\vec{f}_{s,o\leftarrow s} — \vec{f}_{s,s\leftarrow o} \qquad \vec{f}_{s,d\leftarrow s} — \vec{f}_{s,s\leftarrow d}$$

Valider la réponse

Toutes les forces font partie d'une paire. Les membres d'une paire sont des forces opposées.

6.3 La troisième loi de Newton

Dans les sections précédentes, nous avons vu que chaque force fait toujours partie d'une paire action-réaction. L'action et la réaction sont des forces de sens opposés qui s'appliquent sur des objets différents. Pour résoudre les problèmes d'interaction, nous avons aussi besoin de connaître la relation entre les modules d'une paire. C'est Isaac Newton qui a établi cette relation. Dans son ouvrage *Principia,* il écrit :

> L'action est toujours égale et opposée à la réaction ; c'est-à-dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales, et dans des sens contraires.

Pour arriver à cet énoncé, Newton a réalisé des expériences où des pendules entraient en collision. La figure 6.7 présente un extrait de son ouvrage dans lequel il explique les manipulations effectuées à l'aide d'un schéma.

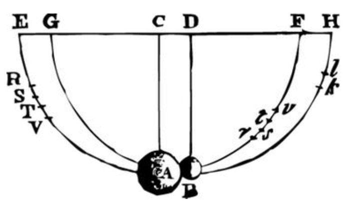


FIGURE 6.7
Un extrait de *Principia*

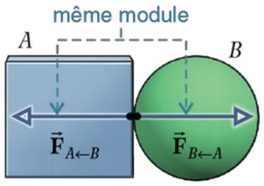


FIGURE 6.8
Lorsque A et B sont en interaction, les forces $\vec{\mathbf{F}}_{A\leftarrow B}$ et $\vec{\mathbf{F}}_{B\leftarrow A}$ ont le même module et des sens opposés.

On peut donc dire que, selon la troisième loi de Newton, si un objet A subit une force d'action $\vec{\mathbf{F}}_{A\leftarrow B}$ par l'agent B, alors l'agent B subit une force de réaction $\vec{\mathbf{F}}_{B\leftarrow A}$ par l'objet A (*voir la figure 6.8*) ; les deux objets sont en interaction. Les forces $\vec{\mathbf{F}}_{A\leftarrow B}$ et $\vec{\mathbf{F}}_{B\leftarrow A}$ forment une paire action-réaction ayant les propriétés suivantes :

- Les forces $\vec{\mathbf{F}}_{A\leftarrow B}$ et $\vec{\mathbf{F}}_{B\leftarrow A}$ s'appliquent sur des objets différents.
- Les forces ont le même module :
$$F_{A\leftarrow B} = F_{B\leftarrow A}.$$
- Les forces ont la même direction et des sens opposés.

On peut résumer l'information contenue dans cet encadré à l'aide de l'équation vectorielle suivante :

Troisième loi de Newton (le principe d'action-réaction)

$$\vec{\mathbf{F}}_{A\leftarrow B} = -\vec{\mathbf{F}}_{B\leftarrow A}. \tag{6.1}$$

Le signe négatif indique que les forces sont de sens opposés.

Dans le diagramme des forces, l'orientation de chaque force est indiquée, et on en tient compte lorsqu'on applique la deuxième loi de Newton. Ainsi, on insère un signe « moins » si la composante de la force est opposée au sens de l'axe. Cette stratégie permet de trouver l'orientation des forces dans le diagramme des forces. Quand on résout des problèmes d'interaction, il ne reste qu'à appliquer la troisième loi de Newton pour mettre en relation les modules d'une paire action-réaction :

Troisième loi de Newton (modules)

$$F_{A\leftarrow B} = F_{B\leftarrow A}. \tag{6.2}$$

REMARQUE
Dans la notation $\vec{\mathbf{F}}_{A\leftarrow B}$, la flèche vers la gauche en indice est utilisée pour indiquer clairement que la force est exercée sur l'objet A par l'agent B. Cette notation est utile lorsque les deux objets en interaction font partie du problème. Lorsqu'on a besoin uniquement du module de la force, la distinction entre l'objet et l'agent n'est plus essentielle, car le module de l'action et le module de la réaction sont égaux. On peut alors simplifier la notation en enlevant la flèche vers la gauche en indice.

TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 6.2

Un livre (l) est placé sur une étagère (é) qui se trouve dans l'ascenseur (*voir l'illustration ci-contre*). L'ascenseur accélère vers le haut. Classez les forces suivantes dans l'ordre croissant de leur module : $\vec{\mathbf{F}}_{g,l\leftarrow T}$, $\vec{\mathbf{F}}_{g,T\leftarrow l}$, $\vec{\mathbf{N}}_{l\leftarrow é}$, $\vec{\mathbf{N}}_{é\leftarrow l}$.

On peut résoudre les problèmes qui font intervenir des objets en interaction à l'aide de la stratégie suivante, dans laquelle on utilise les deuxième et troisième lois de Newton.

STRATÉGIE 6.1 Les objets en interaction

Illustrer la situation
Tracez un schéma de la situation dans laquelle vous identifiez les objets ou les systèmes d'intérêt. Pour chaque objet, tracez le diagramme des forces, selon la technique 5.1 de la page 139. Identifiez les paires action-réaction. Vous pouvez choisir un système de coordonnées différent pour chacun des objets.

Décortiquer le problème
Identifiez les quantités connues et inconnues. Décomposez les forces selon leurs composantes.

Identifier les clés
La première **clé** est la deuxième loi de Newton, écrite séparément pour chaque objet. Utilisez des indices pour ne pas confondre les masses et les accélérations. La deuxième **clé** est la troisième loi de Newton. Pour chaque paire identifiée, les modules des forces sont égaux :

$$F_{A\leftarrow B} = F_{B\leftarrow A} = F_{AB}\ . \tag{6.2}$$

Résoudre le problème
Insérez les équations de la troisième loi de Newton dans les équations obtenues avec la deuxième loi de Newton. Résolvez le système d'équations.

Valider la réponse
Vérifiez que vous répondez bien à la question. Est-ce que l'ordre de grandeur a du sens ? Est-ce que les vecteurs ont l'orientation prévue ?

EXEMPLE 6.3 Attention, c'est glissant !

Une femme marche sur un trottoir glacé incliné selon un angle de 5,0°. Le coefficient de frottement statique est de 0,10. Calculez le module de l'accélération maximale de la femme.

SOLUTION

Illustrer la situation
Pour avancer, la femme pousse le trottoir avec une force de frottement statique $\vec{\mathbf{f}}_{s,t\leftarrow f}$, orientée vers l'arrière. La force de réaction est la force de frottement statique $\vec{\mathbf{f}}_{s,f\leftarrow t}$, exercée sur la femme par le trottoir. La figure 6.9 présente le diagramme des forces de la femme.

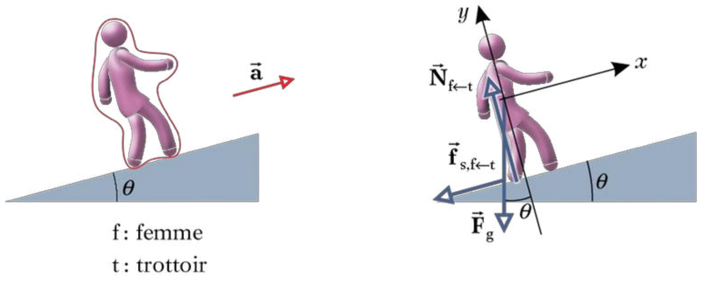


FIGURE 6.9
Le diagramme des forces pour la femme

Décortiquer le problème

Connues		Inconnue
$\theta = 5{,}0°$	$\mu_s = 0{,}10$	a

Identifier les clés

La première **clé** est la troisième loi de Newton : la femme pousse sur le trottoir avec une force de frottement statique $\vec{\mathbf{f}}_{s,t\leftarrow f}$, vers l'arrière. La réaction du trottoir est une force de frottement $\vec{\mathbf{f}}_{s,f\leftarrow t}$, exercée sur la femme, vers l'avant.

C'est cette force qui fait avancer la femme. La deuxième **clé** est la deuxième loi de Newton, appliquée à la femme :

$$\sum F_x = f_{s,ft} - mg \sin\theta = ma_x \qquad \text{(i)}$$

$$\sum F_y = N_{ft} - mg\cos\theta = 0\ . \qquad \text{(ii)}$$

Puisque nous cherchons la plus grande accélération possible, la troisième **clé** est que la force de frottement statique doit être égale à sa valeur maximale :

$$f_{s,ft} = f_{smax,ft} = \mu_s N_{ft}\ . \qquad \text{(iii)}$$

Résoudre le problème

Nous pouvons isoler N_{ft} dans l'équation (ii) :

$$N_{ft} = mg\cos\theta\ . \qquad \text{(iv)}$$

En insérant ce résultat et l'équation (iii) dans l'équation (i), nous obtenons

$$\mu_s mg\cos\theta - mg\sin\theta = ma_x\ .$$

La masse de la femme se simplifie (le principe d'équivalence est encore en œuvre ici). Nous obtenons le module de l'accélération a :

$$a = |a_x| = g[\mu_s\cos\theta - \sin\theta]$$
$$= 9{,}81\ \text{m/s}^2\left[0{,}10\cos(5{,}0°) - \sin(5{,}0°)\right]$$
$$a = 0{,}12\ \text{m/s}^2\ . \qquad \text{(réponse)}$$

Valider la réponse

La réponse obtenue est positive, car un module est toujours une quantité positive. Le module de l'accélération est très faible, parce qu'il est difficile d'avancer sur un trottoir glacé. Ce résultat est indépendant de la masse de la femme.

EXEMPLE 6.4 Deux boîtes en contact

Une boîte A de 3,0 kg est placée contre une boîte B de 1,5 kg. Les deux boîtes sont sur un plancher sans frottement. On applique une force $\vec{\mathbf{F}}_p = 5{,}00$ N vers la droite sur la boîte A.

a. Calculez l'accélération de la boîte A.

b. Calculez la force de la boîte B sur la boîte A.

c. Calculez la force de la boîte A sur la boîte B.

SOLUTION

Illustrer la situation

Nous devons faire un diagramme des forces pour chaque boîte (*voir la figure 6.10*). Comme les boîtes sont en contact, elles exercent l'une sur l'autre des forces d'interaction $\vec{\mathbf{N}}_{A\leftarrow B}$ et $\vec{\mathbf{N}}_{B\leftarrow A}$; ces forces forment une paire action-réaction. La boîte A pousse la boîte B vers la droite, ce qui implique que la boîte B pousse la boîte A vers la gauche.

Décortiquer le problème

Connues		Inconnues	
$m_A = 3{,}0$ kg	$m_B = 1{,}5$ kg	$\vec{\mathbf{a}}_A$	
$F_{px} = 5{,}00$ N		$\vec{\mathbf{N}}_{A\leftarrow B}$	$\vec{\mathbf{N}}_{B\leftarrow A}$

Dans ce problème, nous limitons l'analyse à la composante x, car les inconnues sont des vecteurs ayant uniquement une composante horizontale.

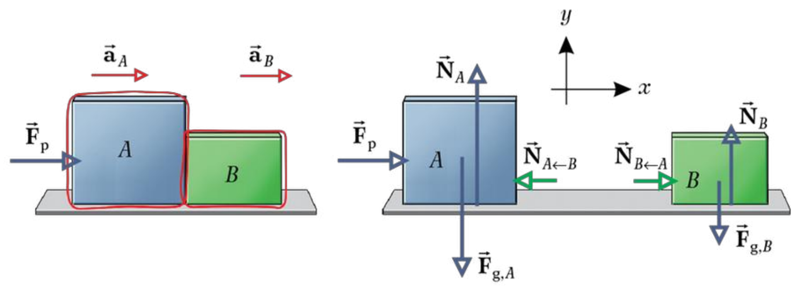


FIGURE 6.10
Le diagramme des forces pour chaque boîte

Il est important de remarquer ici que les boîtes sont en contact, ce qui implique qu'elles ont la même accélération, ce que nous notons a_x:

$$a_{Ax} = a_{Bx} = a_x \ . \qquad \text{(i)}$$

Si les accélérations étaient différentes, soit la boîte A entrerait dans la boîte B, soit la boîte B se déplacerait plus rapidement que la boîte A et il n'y aurait plus de contact.

Identifier les clés

La première **clé** est la deuxième loi de Newton, appliquée aux deux boîtes séparément:

$$\text{(boîte } A\text{)} \qquad \sum F_x = F_p - N_{AB} = m_A a_{Ax} \qquad \text{(ii)}$$

$$\text{(boîte } B\text{)} \qquad \sum F_x = N_{BA} = m_B a_{Bx} \ . \qquad \text{(iii)}$$

REMARQUE

Lorsqu'on applique la deuxième loi de Newton à la boîte A, on doit utiliser la masse de la boîte A dans le membre droit de l'équation. On procède de la même façon avec la boîte B: dans la deuxième équation, c'est la masse de la boîte B qui se retrouve dans le membre droit de l'équation.

MISE EN GARDE

$\vec{\mathbf{F}}_p$ est appliquée uniquement sur l'objet A.

La deuxième **clé** est la troisième loi de Newton. Les forces $\vec{\mathbf{N}}_{A\leftarrow B}$ et $\vec{\mathbf{N}}_{B\leftarrow A}$ forment une paire action-réaction. Selon l'équation 6.2, leurs modules sont égaux:

$$N_{AB} = N_{BA} \ . \qquad \text{(iv)}$$

SOLUTION a.

Résoudre le problème

En additionnant les équations (ii) et (iii) et en utilisant les équations (i) et (iv), nous obtenons

$$F_p = (m_A + m_B)a_x$$

$$\Rightarrow a_x = \frac{F_p}{m_A + m_B} = \frac{5{,}00\ \text{N}}{3{,}0\ \text{kg} + 1{,}5\ \text{kg}} = 1{,}11\ \text{m/s}^2 \ .$$

L'accélération de la boîte A est donc

$$\vec{\mathbf{a}}_A = 1{,}1\ \text{m/s}^2 \quad \overrightarrow{\text{vers la droite}} \ . \quad \text{(réponse)}$$

SOLUTION b.

Résoudre le problème

Nous insérons le résultat précédent dans l'équation (ii):

$$N_{AB} = F_p - m_A a_x = 5{,}00\ \text{N} - 3{,}0\ \text{kg} \times 1{,}11\ \text{m/s}^2$$
$$= 1{,}67\ \text{N} \ .$$

La force sur A par B est donc

$$\vec{\mathbf{N}}_{A\leftarrow B} = 1{,}7\ \text{N} \quad \overrightarrow{\text{vers la gauche}} \ . \quad \text{(réponse)}$$

SOLUTION c.

Résoudre le problème

Selon l'équation (iii) et le diagramme des forces de la figure 6.10, la force exercée sur B par A est

$$\vec{\mathbf{N}}_{B\leftarrow A} = -\vec{\mathbf{N}}_{A\leftarrow B} = 1{,}7\ \text{N} \quad \overrightarrow{\text{vers la droite}} \ . \quad \text{(réponse)}$$

Valider la réponse

Les réponses sont des vecteurs horizontaux; l'ordre de grandeur des réponses a du sens. Les réponses sont données avec deux chiffres significatifs, car les masses ne comportent que deux chiffres significatifs.

La contrainte d'accélération

L'exemple précédent fait intervenir un résultat important dans l'étude des objets en interaction. Lorsqu'un objet A a le même déplacement qu'un objet B à tout instant, ces objets ont la même vitesse à tout instant et donc ils ont la même accélération :

$$\vec{\mathbf{a}}_A = \vec{\mathbf{a}}_B \ . \tag{6.3}$$

On obtient le même résultat quand les objets sont reliés de façon rigide, comme la locomotive et le wagon illustrés dans la figure 6.11 : l'accélération de la locomotive est égale à l'accélération du wagon.

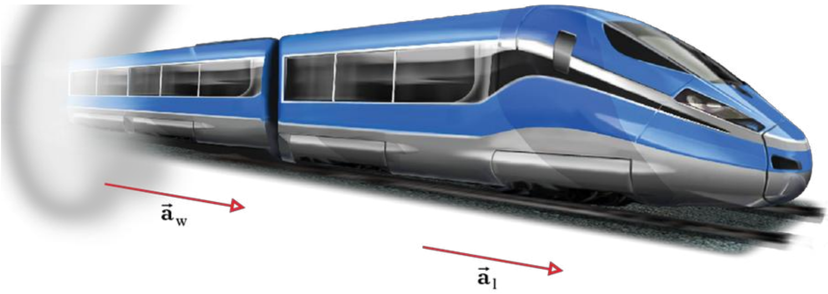


FIGURE 6.11
L'accélération de la locomotive est égale à l'accélération du wagon.

Il y a aussi une contrainte pour l'accélération lorsque deux objets exercent l'un sur l'autre une force de frottement statique. La figure 6.12 montre un camion qui transporte une boîte. La force de frottement statique exercée par le camion sur la boîte est suffisante pour que celle-ci demeure immobile par rapport au camion. Même si le camion accélère, la boîte a la même accélération :

$$\vec{\mathbf{a}}_b = \vec{\mathbf{a}}_c \ .$$

Cependant, si la boîte se met à glisser, alors son accélération ne sera plus égale à celle du camion.

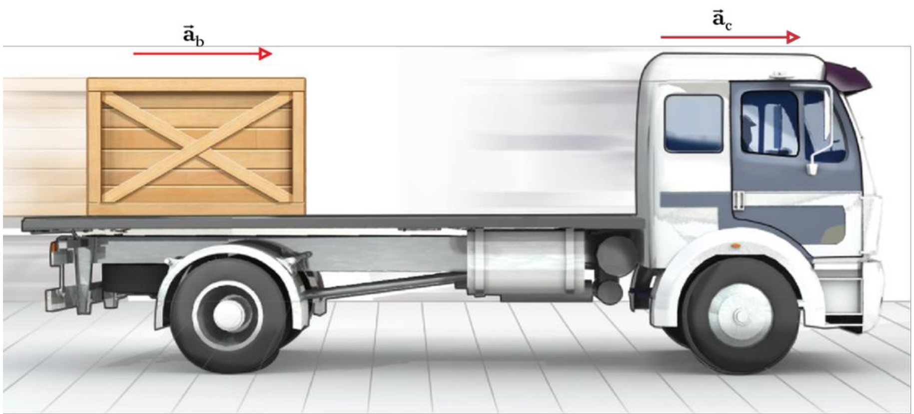


FIGURE 6.12
L'accélération de la boîte et l'accélération du camion sont égales si la boîte ne glisse pas.

EXEMPLE 6.5 Jeu d'hiver

Un enfant tire son traîneau le long d'une surface horizontale à l'aide d'une corde horizontale. Il a placé un bloc de neige de 1,50 kg dans le traîneau. La masse du traîneau est de 1,00 kg. Le coefficient de frottement statique entre le traîneau et le bloc de neige est de 0,20, et le coefficient de frottement cinétique entre le traîneau et le sol est de 0,10. Lorsque l'enfant tire le traîneau, le bloc de neige est sur le point de glisser dans le traîneau. Quelle est la tension dans la corde ?

SOLUTION

Illustrer la situation

Le diagramme des forces du traîneau et du bloc de neige est présenté dans la figure 6.13. Le sens de la force de frottement statique sur le bloc de neige est vers l'avant de manière à ce que celui-ci ne glisse pas vers l'arrière par rapport au traîneau.

Décortiquer le problème

Connues		Inconnue
$m_t = 1{,}00$ kg	$m_b = 1{,}50$ kg	T
$\mu_s = 0{,}20$	$\mu_c = 0{,}10$	

Le bloc de neige ne glisse pas sur le traîneau. Il a le même déplacement que le traîneau. Donc, les deux objets ont la même accélération, qui est horizontale :

$$a_{bx} = a_{tx} = a_x \ .$$

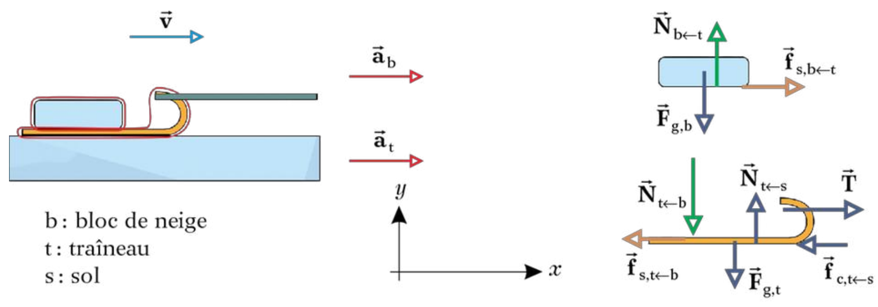


FIGURE 6.13

Le diagramme des forces du bloc de neige et du traîneau

Identifier les clés

La première **clé** est la deuxième loi de Newton, appliquée séparément au bloc de neige et au traîneau :

(bloc)

$$\sum F_x = f_{s,bt} = m_b a_x \qquad \text{(i)}$$

$$\sum F_y = N_{bt} - m_b g = 0 \qquad \text{(ii)}$$

(traîneau)

$$\sum F_x = T - f_{s,tb} - f_{c,ts} = m_t a_x \qquad \text{(iii)}$$

$$\sum F_y = N_{ts} - N_{tb} - m_t g = 0 \ . \qquad \text{(iv)}$$

La deuxième **clé** est la troisième loi de Newton :

$$f_{s,bt} = f_{s,tb}$$
$$N_{bt} = N_{tb} \ .$$

La troisième **clé** est que le module de la force de frottement est relié au module de la force normale. Nous obtenons, pour la force de frottement cinétique exercée sur le traîneau :

$$f_{c,ts} = \mu_c N_{ts} \ . \qquad \text{(v)}$$

De plus, le bloc de neige est sur le point de glisser. La force de frottement statique sur le bloc est égale à la force de frottement statique maximale :

$$f_{s,bt} = f_{s\max,bt} = \mu_s N_{bt} \ . \qquad \text{(vi)}$$

Résoudre le problème

La tension T apparaît dans l'équation (iii), mais cette équation contient plusieurs inconnues.

Nous utilisons les autres équations pour trouver ces inconnues. D'abord, l'équation (ii) permet de calculer N_{bt} :

$$N_{bt} = m_b g = 1{,}50 \text{ kg} \times 9{,}81 \text{ m/s}^2 = 14{,}7 \text{ N} . \quad \text{(vii)}$$

L'équation (i) permet de calculer a_x, après avoir utilisé l'équation (vi) :

$$a_x = \frac{\mu_s N_{bt}}{m_b} = \mu_s g = 0{,}20 \times 9{,}81 \text{ m/s}^2 = 1{,}96 \text{ m/s}^2 . \quad \text{(viii)}$$

L'équation (iv) permet de calculer N_{ts} :

$$N_{ts} = N_{tb} + m_t g$$
$$= 14{,}7 \text{ N} + 1{,}00 \text{ kg} \times 9{,}81 \text{ m/s}^2 = 24{,}5 \text{ N} . \quad \text{(ix)}$$

En insérant les résultats des équations (v), (vii), (viii) et (ix) dans l'équation (iii), nous obtenons

$$T = \mu_s N_{tb} + \mu_c N_{ts} + m_t a_x$$
$$T = 0{,}2(14{,}7 \text{ N}) + 0{,}10(24{,}5 \text{ N}) + 1{,}00 \text{ kg}(1{,}96 \text{ m/s}^2)$$
$$T = 7{,}4 \text{ N} . \quad \text{(réponse)}$$

Valider la réponse

Nous trouvons bien une valeur positive pour la tension, car la tension représente le module d'une force. L'ordre de grandeur est correct. Remarquez que nous avons omis d'utiliser la flèche vers la gauche en indice pour alléger les équations.

Les forces internes

Un système peut être constitué de plusieurs objets. Quand les objets ont tous la même accélération, il est possible d'analyser le mouvement du système comme un seul objet. Les forces d'interaction entre les éléments du système n'ont pas à être incluses dans les équations du système complet, car ce sont des forces internes. Cette analyse permet par exemple de calculer l'accélération du système (égale à l'accélération des objets formant le système). Par contre, si on veut calculer une force d'interaction, alors il faut analyser un élément du système de telle sorte que la force inconnue apparaisse dans le diagramme des forces, mais pas sa réaction. L'exemple suivant illustre comment un choix approprié de l'objet à analyser simplifie le calcul.

EXEMPLE 6.6 Prochaine station...

Une rame de métro est constituée de trois voitures, ayant chacune une masse de $3{,}0 \times 10^4$ kg (incluant les passagers). La voiture de tête est une voiture motrice, qui pousse la voie ferrée vers l'arrière avec une force de 43 kN.

a. Calculez le module de l'accélération de la voiture motrice.

b. Calculez la force exercée sur la voiture du centre par la voiture motrice.

SOLUTION a.

Illustrer la situation

La voiture motrice (m), la voiture centrale (c) et la voiture de queue (q) ont la même accélération $\vec{\mathbf{a}}$, qui est l'accélération de la rame de métro. Nous pouvons trouver cette accélération en choisissant la rame complète comme objet. Le diagramme des forces est présenté à la figure 6.14.

Décortiquer le problème

Connues	Inconnue
$F_{s\leftarrow m} = 4{,}3 \times 10^4$ N	a_m
$m_{voiture} = 3{,}0 \times 10^4$ kg	

La masse du système est la masse totale de la rame :

$$m_{rame} = 3m_{voiture} = 3 \times 3{,}0 \times 10^4 \text{ kg} = 9{,}0 \times 10^4 \text{ kg} . \quad \text{(i)}$$

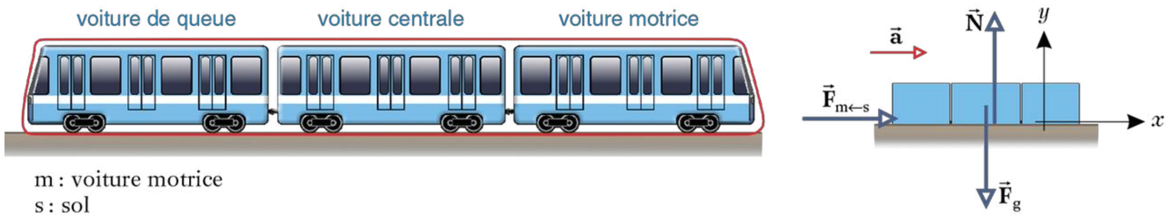


FIGURE 6.14
Le diagramme des forces de la rame de métro contient une seule force horizontale : $\vec{\mathbf{F}}_{m\leftarrow s}$, la force sur la voiture motrice par le sol.

Identifier les clés
La première **clé** est la deuxième loi de Newton, appliquée au système. Seule la composante x est utile :

$$\sum F_x = F_{ms} = m_{rame}a_x \ . \qquad \text{(ii)}$$

La deuxième **clé** est la troisième loi de Newton : la voiture motrice pousse la voie ferrée avec une force $\vec{\mathbf{F}}_{s\leftarrow m}$. La force exercée par la voie ferrée sur la voiture motrice est $\vec{\mathbf{F}}_{m\leftarrow s}$, et son module est

$$F_{ms} = F_{sm} = 4{,}3\times10^4 \text{ N} \ . \qquad \text{(iii)}$$

Résoudre le problème
Nous isolons l'accélération dans l'équation (ii) :

$$a_x = \frac{F_{ms}}{m_{rame}} = \frac{4{,}3\times10^4 \text{ N}}{9{,}0\times10^4 \text{ kg}} = 0{,}478 \ \text{m/s}^2 \ .$$

Le module de l'accélération de la voiture motrice est donc :

$$a_m = |\,a_x\,| = 0{,}48 \ \text{m/s}^2 \ . \qquad \text{(réponse)}$$

SOLUTION b.
Illustrer la situation
Pour calculer la force $\vec{\mathbf{F}}_{c\leftarrow m}$ exercée sur la voiture centrale par la voiture motrice, nous pouvons analyser le mouvement de la voiture centrale. Cependant, le diagramme des forces de la voiture centrale, illustré à la figure 6.15, donne une équation avec deux inconnues : la force de la voiture motrice $\vec{\mathbf{F}}_{c\leftarrow m}$ et la force exercée par la voiture de queue $\vec{\mathbf{F}}_{c\leftarrow q}$. À la place, nous analysons le mouvement de la voiture motrice. La voiture centrale exerce la force $\vec{\mathbf{F}}_{m\leftarrow c}$, la réaction de $\vec{\mathbf{F}}_{c\leftarrow m}$ (la force de voiture motrice sur la voiture centrale). Le diagramme des forces de la voiture motrice apparaît à la figure 6.15.

Décortiquer le problème
Cette fois-ci, il faut utiliser seulement la masse de la voiture centrale, car c'est l'objet qui nous intéresse.

Connues	Inconnue
$F_{ms} = 4{,}3\times10^4$ N	$\vec{\mathbf{F}}_{2\leftarrow m}$
$m_m = 3{,}0\times10^4$ kg	

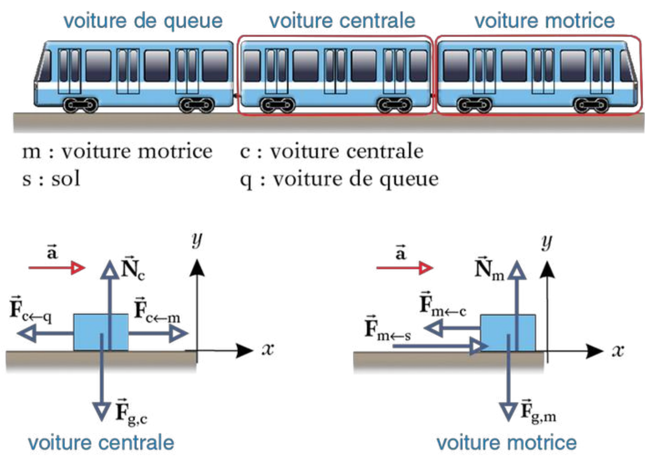


FIGURE 6.15
Le diagramme des forces pour la voiture centrale et pour la voiture motrice

Identifier les clés

Selon la deuxième loi de Newton pour la composante x,

$$\sum F_x = F_{\text{ms}} - F_{\text{mc}} = m_{\text{m}} a_x \ . \qquad \text{(iv)}$$

De plus, selon la troisième loi de Newton,

$$F_{\text{mc}} = F_{\text{cm}} \ . \qquad \text{(v)}$$

Résoudre le problème

Avec l'accélération calculée dans la partie **a.**, nous insérons l'équation (v) dans l'équation (iv), et nous isolons F_{cm} :

$$\begin{aligned} F_{\text{cm}} &= F_{\text{ms}} - m_{\text{m}} a_x \\ &= 4{,}3\times10^4\ \text{N} - (3{,}0\times10^4\ \text{kg})(0{,}487\ \text{m/s}^2) \\ &= 2{,}9\times10^4\ \text{N} \ . \end{aligned}$$

La voiture motrice tire sur la voiture centrale. Alors,

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{c}\leftarrow\text{m}} = 29\ \text{kN}\ \ \overrightarrow{\text{vers l'avant}} \ . \qquad \text{(réponse)}$$

Valider la réponse

Nous avons bien répondu aux questions. L'ordre de grandeur des réponses semble correct. Si nous avions analysé chaque objet séparément dans la partie **a.**, nous aurions eu trois diagrammes des forces avec un système de trois équations à trois inconnues. Dans la partie **b.**, nous aurions aussi pu analyser le système constitué des deux dernières voitures. La seule force extérieure horizontale est alors $\vec{\mathbf{F}}_{\text{c}\leftarrow\text{m}}$.

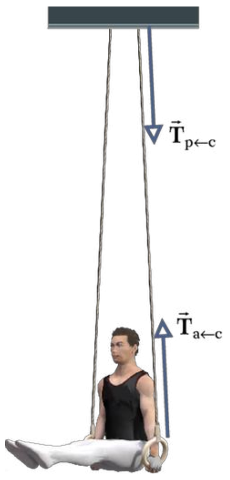


FIGURE 6.16
La corde exerce une force $\vec{\mathbf{T}}_{\text{a}\leftarrow\text{c}}$ sur l'anneau et une force $\vec{\mathbf{T}}_{\text{p}\leftarrow\text{c}}$ sur le plafond.

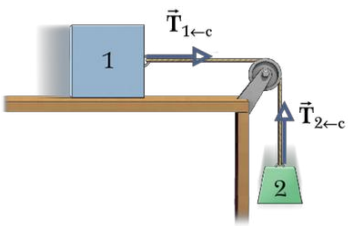


FIGURE 6.17
La corde exerce une force $\vec{\mathbf{T}}_{1\leftarrow\text{c}}$ à une extrémité et une force $\vec{\mathbf{T}}_{2\leftarrow\text{c}}$ à l'autre extrémité.

6.4 Les cordes et les poulies

Une corde permet de relier deux objets en interaction. À la section 5.2 (*voir la page 132*), nous avons vu qu'une corde tendue exerce une force de tension. Il y a une force de tension aux deux extrémités. La figure 6.16 illustre un gymnaste aux anneaux. Chaque anneau est relié au plafond à l'aide d'une corde. Lorsque la corde est tendue, elle exerce une force $\vec{\mathbf{T}}_{\text{a}\leftarrow\text{c}}$ sur l'anneau. La corde exerce aussi une force $\vec{\mathbf{T}}_{\text{p}\leftarrow\text{c}}$ sur le plafond, à l'autre extrémité. Ces deux forces sont différentes : la figure montre qu'elles n'ont pas le même sens. Par contre, on peut dire que ces deux forces exercées par la même corde ont le même module ($T_{\text{a}\leftarrow\text{c}} = T_{\text{p}\leftarrow\text{c}} = T$) lorsque les conditions suivantes sont respectées :

- la masse de la corde est négligeable par rapport aux autres objets ;
- l'étirement de la corde est négligeable.

On dit alors que la corde est idéale. Si la masse de la corde est importante, il faut alors l'analyser comme un objet en soi. Si la corde s'étire, alors elle se comporte comme un ressort.

Les poulies fixes

Une poulie fixe est une poulie dont l'axe de rotation reste immobile. Elle permet de changer l'orientation d'une corde. Par exemple, dans la figure 6.17, la corde tire le bloc 1 vers la droite avec une force $\vec{\mathbf{T}}_{1\leftarrow\text{c}}$, et elle tire le bloc 2 vers le haut avec une force $\vec{\mathbf{T}}_{2\leftarrow\text{c}}$. La tension de la corde est la même sur toute la longueur de la corde ($T_{1\leftarrow\text{c}} = T_{2\leftarrow\text{c}} = T$) si la corde est idéale et que les conditions suivantes sont respectées :

- la masse de la poulie est négligeable ;
- la poulie tourne sans frottement autour de son axe.

À moins d'avis contraire, on suppose que toutes ces conditions sont respectées. On dit alors que la poulie est «idéale». Dans le chapitre 11, au moment d'étudier la rotation, la masse de la poulie ne sera plus considérée comme négligeable.

Les deux objets reliés par la poulie n'ont pas le même mouvement. Les accélérations des deux objets ne sont pas égales parce qu'elles n'ont pas la même orientation. Cependant, elles ont le même module. À partir du mouvement des deux objets, on peut trouver une relation entre les composantes des accélérations. Par exemple, à la figure 6.18a, l'objet 1 monte ($a_{1y} > 0$), alors que l'objet 2 descend ($a_{2y} < 0$). Les accélérations ont le même module, alors

$$a_{2y} = -a_{1y} \; .$$

Dans la figure 6.18b, le mouvement de l'objet 1 s'effectue vers la droite, et le mouvement de l'objet 2 s'effectue vers le bas. On obtient

$$a_{2y} = -a_{1x} \; .$$

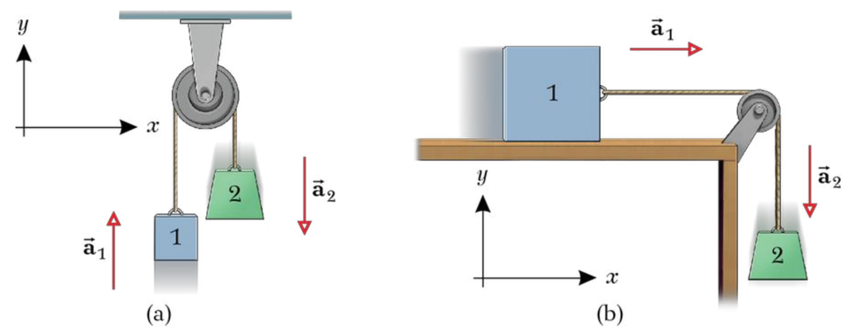


FIGURE 6.18
Lorsqu'une poulie fixe est utilisée, les accélérations des objets ont le même module.

EXEMPLE 6.7 La machine d'Atwood

Pour illustrer l'application des lois de Newton, le physicien britannique George Atwood (1745-1807) a inventé un appareil appelé la *machine d'Atwood*. Une machine d'Atwood est constituée de deux objets, de masses m_1 et m_2, respectivement, reliés à l'aide d'une corde idéale qui passe par une poulie fixe. Si $m_2 > m_1$, calculez:

a. l'accélération de l'objet 1;

b. l'accélération de l'objet 2;

c. la tension de la corde.

SOLUTION

Illustrer la situation

La figure 6.19 montre le schéma de la situation ainsi que le diagramme des forces de chaque objet. Nous avons choisi un axe des y orienté vers le haut pour les deux objets.

Décortiquer le problème

Connues		Inconnues	
m_1	m_2	$\vec{\mathbf{a}}_1$	$\vec{\mathbf{a}}_2$
		T	

Les deux objets sont reliés par une corde, et les modules de leurs accélérations sont égaux. Comme $m_2 > m_1$, l'objet 2 va accélérer vers le bas ($a_{2y} < 0$), et l'objet 1 va accélérer vers le haut ($a_{1y} > 0$). La contrainte d'accélération est

$$a_{1y} = +a \qquad a_{2y} = -a \;. \tag{i}$$

De plus, les deux forces de tension ont le même module, car les deux objets sont reliés par la même corde, si les conditions précédentes sont respectées :

$$T_1 = T_2 = T \;. \tag{ii}$$

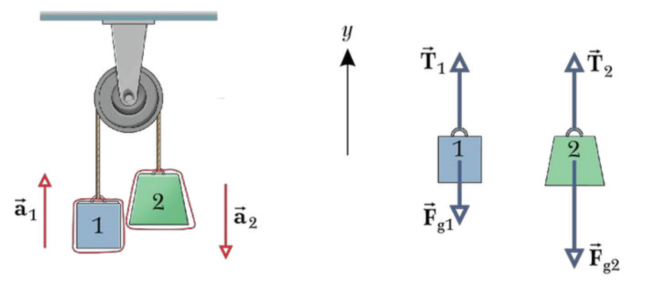


FIGURE 6.19

Le schéma de la situation et le diagramme des forces pour l'exemple 6.7

Identifier la clé

La **clé** est la deuxième loi de Newton appliquée aux deux objets séparément :

$$\text{(objet 1)} \quad \sum F_y = T_1 - m_1 g = m_1 a_{1y} \tag{iii}$$

$$\text{(objet 2)} \quad \sum F_y = T_2 - m_2 g = m_2 a_{2y} \;. \tag{iv}$$

SOLUTION a.

Résoudre le problème

Nous avons un système d'équations. En insérant l'équation (i) dans l'équation (iii) et en isolant T_1 (égal à la tension de la corde T), nous trouvons

$$T = m_1 a + m_1 g \;. \tag{v}$$

Sachant que $T_2 = T$, nous insérons l'équation (v) dans l'équation (iv), en plus de la contrainte d'accélération (i). Nous obtenons

$$m_1 a + m_1 g - m_2 g = -m_2 a$$

$$\Rightarrow (m_1 + m_2)\, a = (m_2 - m_1) g$$

$$a = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}\right) g \;, \tag{vi}$$

ce qui correspond au module des accélérations des deux objets. L'objet 1 a une accélération vers le haut :

$$\vec{\mathbf{a}}_1 = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}\right) g \;\; \overrightarrow{\text{vers le haut}} \;. \quad \text{(réponse)}$$

SOLUTION b.

Résoudre le problème

L'objet 2 a une accélération vers le bas :

$$\vec{\mathbf{a}}_2 = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}\right) g \;\; \overrightarrow{\text{vers le bas}} \;. \quad \text{(réponse)}$$

SOLUTION c.

Résoudre le problème

Pour trouver la tension, nous insérons l'équation (vi) dans l'équation (v) :

$$T = m_1 \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}\right) g + m_1 g$$

$$= \left(\frac{m_1 m_2 - m_1^2 + m_1^2 + m_1 m_2}{m_1 + m_2}\right) g$$

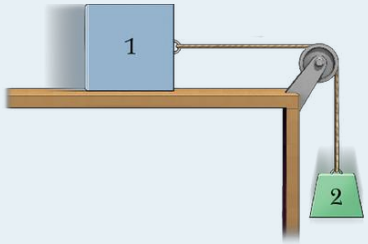
$$T = \left(\frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2}\right) g \; . \qquad \text{(réponse)}$$

Valider la réponse

Nous trouvons que le module des accélérations est une fraction plus petite que 1 multipliant g. Dans le cas limite où $m_1 = m_2$, alors $a = 0$, les objets sont en équilibre et $T = m_1 g = m_2 g$. Dans l'autre cas limite où $m_2 \gg m_1$, nous obtenons $\vec{\mathbf{a}}_2 \approx \overrightarrow{g \text{ vers le bas}}$, c'est-à-dire que l'objet 2 tombe en chute libre, l'objet 1 ayant un effet négligeable sur lui. Toutes les réponses sont exprimées en fonction des paramètres de l'énoncé et de g.

EXEMPLE 6.8 Attention en bas !

Une boîte de $m_1 = 4{,}50$ kg est reliée par une corde à un poids de $m_2 = 1{,}70$ kg qui tombe, comme le montre la figure ci-contre. La corde est idéale et passe par une poulie sans masse ; le frottement du roulement est négligeable. Le coefficient de frottement cinétique entre le plancher et la boîte est $\mu_c = 0{,}30$. La surface ainsi que la partie de la corde entre la boîte et la poulie sont horizontales.



Calculez l'accélération de la boîte.

SOLUTION

Illustrer la situation

Nous devons tracer un diagramme des forces pour chaque objet. Ce diagramme apparaît à la figure 6.20.

Décortiquer le problème

Connues		Inconnue
$m_1 = 4{,}50$ kg	$m_2 = 1{,}70$ kg	$\vec{\mathbf{a}}_1$
$\mu_c = 0{,}30$		

La boîte accélère vers la droite lorsque le poids accélère vers le bas. La poulie est fixe. La contrainte d'accélération est

$$a_{2y} = -a_{1x} \; . \qquad \text{(i)}$$

Les forces de tension $\vec{\mathbf{T}}_1$ et $\vec{\mathbf{T}}_2$ sont exercées par la même corde. Leurs modules sont égaux $(T_1 = T_2 = T)$, car la masse de la corde et celle de la poulie sont négligeables, comme le frottement du roulement de la poulie.

Identifier les clés

La première **clé** est la deuxième loi de Newton appliquée à chaque objet :

$$\text{(boîte 1)} \quad \sum F_x = T - f_c = m_1 a_{1x} \qquad \text{(ii)}$$

$$\sum F_y = N - m_1 g = 0 \qquad \text{(iii)}$$

$$\text{(poids 2)} \quad \sum F_y = T - m_2 g = m_2 a_{2y} \; . \qquad \text{(iv)}$$

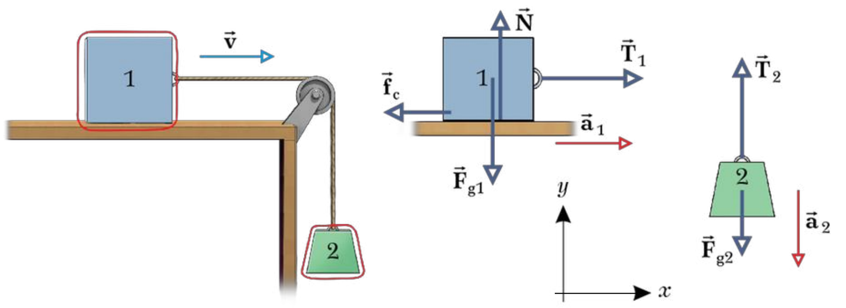


FIGURE 6.20

Le diagramme des forces pour la situation de l'exemple 6.8

La deuxième **clé** est celle-ci: la force de frottement est une force de frottement cinétique dont le module est donné par l'équation 5.19 de la page 159:

$$f_c = \mu_c N \,. \qquad \text{(v)}$$

Résoudre le problème

L'équation principale est l'équation (ii). Nous trouvons f_c à l'aide des équations (v) et (iii):

$$f_c = \mu_c N = \mu_c m_1 g \,. \qquad \text{(vi)}$$

Nous obtenons la tension en isolant T dans l'équation (iv) et en insérant la contrainte d'accélération (i):

$$T = m_2 g + m_2 a_{2y} = m_2 g - m_2 a_{1x} \,. \qquad \text{(vii)}$$

Nous insérons ces résultats dans l'équation (ii) et nous isolons a_{1x}:

$$m_2 g - m_2 a_{1x} - \mu_c m_1 g = m_1 a_{1x}$$
$$(m_2 - \mu_c m_1) g = (m_1 + m_2) a_{1x}$$
$$\Rightarrow a_{1x} = \left(\frac{m_2 - \mu_c m_1}{m_1 + m_2}\right) g$$
$$a_{1x} = \left(\frac{1{,}70 \text{ kg} - 0{,}30 \times 4{,}50 \text{ kg}}{4{,}50 \text{ kg} + 1{,}70 \text{ kg}}\right) 9{,}81 \text{ m/s}^2$$
$$a_{1x} = 0{,}55 \text{ m/s}^2 \,.$$

Donc,

$$\vec{\mathbf{a}}_1 = 0{,}55 \text{ m/s}^2 \ \overrightarrow{\text{vers la droite}} \,. \qquad \text{(réponse)}$$

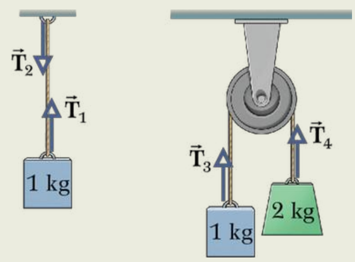
Valider la réponse

La réponse est un vecteur. L'ordre de grandeur est correct. Selon l'équation algébrique obtenue, si nous augmentons la masse de la boîte, l'accélération sera plus faible, car le frottement sera ainsi augmenté. Selon cette même relation, si $m_2 = \mu_c m_1$, l'accélération sera nulle et la boîte glissera à vitesse constante.

REMARQUE

Dans le dernier exemple, nous avons utilisé le même système de coordonnées cartésiennes pour analyser le mouvement des deux objets. Quand l'un des objets se déplace le long d'un plan incliné, il est préférable d'utiliser deux systèmes de coordonnées: le système des x_1y_1 avec un axe parallèle au mouvement de l'objet 1 et le système des x_2y_2 avec un axe parallèle au mouvement de l'objet 2.

TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 6.3



La figure ci-contre illustre des blocs suspendus par des cordes. Dans le premier cas, la masse est immobile, alors que dans le deuxième cas, la masse de 1 kg accélère vers le haut. Classez les tensions dans l'ordre décroissant.

Les poulies mobiles

Une poulie mobile est une poulie qui n'est pas attachée et dont l'axe de rotation peut se déplacer. La figure 6.21 montre une situation où une corde, attachée à une extrémité à un point fixe, passe par une poulie mobile. Lorsque l'objet 1 descend, il entraîne la poulie mobile et l'objet 2 vers le haut. La poulie fixe est utilisée afin de changer l'orientation de la corde. Pour trouver la contrainte d'accélération entre les deux objets, il faut regarder attentivement le mouvement de ceux-ci. Lorsque l'objet 1 se déplace vers le bas d'une distance d_1, la corde se raccourcit de chaque côté de la poulie mobile, de telle sorte que la corde monte d'une distance $d_2 = d_1/2$.

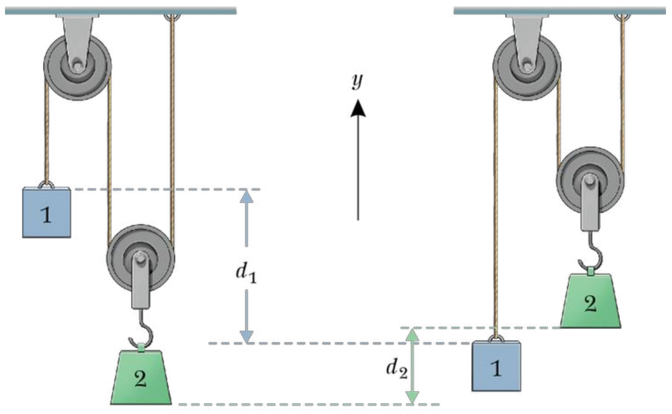


FIGURE 6.21
Lorsque l'objet 1 descend d'une hauteur d_1, la poulie mobile et l'objet 2 montent d'une distance $d_2 = d_1/2$.

On calcule la contrainte d'accélération en prenant la dérivée seconde de la position des objets. Ainsi, les modules des accélérations sont liés dans la même relation que les distances :

$$|a_{2y}| = \frac{|a_{1y}|}{2}. \tag{6.4}$$

Dans la figure 6.21, on a choisi un axe des y orienté vers le haut. Le sens du mouvement des objets implique que

$$a_{2y} = -\frac{a_{1y}}{2}.$$

Pour étudier la dynamique d'une situation avec une poulie mobile, nous devons tracer le diagramme des forces du système formé de la poulie mobile et de l'objet accroché à celle-ci. Lorsque la corde est idéale et que les conditions énoncées à la page 190 sont respectées, la tension dans la corde a la même valeur tout le long de cette dernière. La figure 6.22 illustre le diagramme des forces du système poulie-objet 2. La corde a deux contacts avec la poulie ; elle exerce deux forces de tension égales à $\vec{\mathbf{T}}$, orientées vers le haut. La force vers le haut, qui est exercée sur l'objet 2, est différente de $\vec{\mathbf{T}}$. L'exemple suivant montre comment analyser ce système.

Il existe d'autres enroulements possibles de la corde autour d'une poulie mobile. Il faut adapter la présente méthode en fonction de l'enroulement : obtenir la contrainte d'accélération, puis tracer le diagramme des forces.

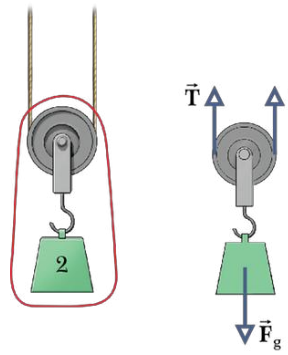


FIGURE 6.22
La corde tire de chaque côté de la poulie avec une force $\vec{\mathbf{T}}$.

EXEMPLE 6.9 Un multiplicateur de force

Un objet de masse $m_1 = 0{,}500$ kg est attaché à l'aide d'une corde à un système de poulie comme celui de la figure 6.21. Le deuxième objet de masse $m_2 = 0{,}750$ kg est relié à la poulie mobile. Les poulies ont une masse négligeable et tournent sans frottement.

a. Calculez l'accélération de chaque objet.

b. Calculez la tension dans la corde.

SOLUTION

Illustrer la situation

Nous analysons les forces agissant sur deux systèmes : l'objet 1 et le système constitué de l'objet 2 et de la poulie mobile. Le diagramme des forces est présenté à la figure 6.23.

Décortiquer le problème

Connues	Inconnues
$m_1 = 0{,}500$ kg	$\vec{\mathbf{a}}_1 \quad \vec{\mathbf{a}}_2$
$m_2 = 0{,}750$ kg	T

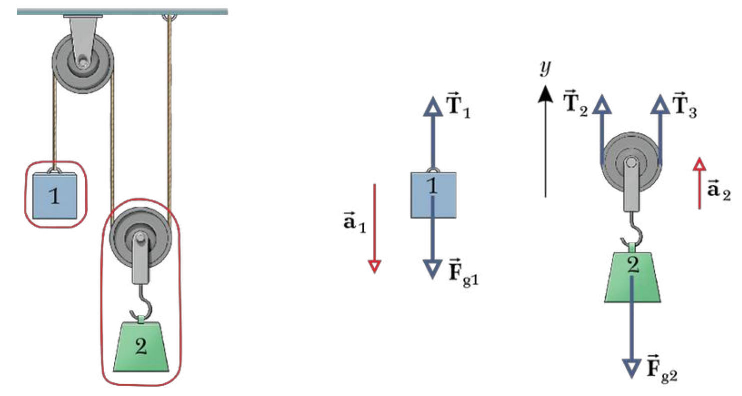


FIGURE 6.23
Le diagramme des forces pour l'objet 1 et pour le système poulie mobile et objet 2

Nous formulons l'hypothèse que l'accélération de l'objet 1 est orientée vers le bas et, de ce fait, que l'accélération de l'objet 2 est orientée vers le haut. Nous verrons à la fin de l'exercice si cette hypothèse est correcte. Lorsque l'objet 1 descend d'une distance d, la poulie mobile monte d'une distance $d/2$. Alors, le module de l'accélération de l'objet 1 est deux fois plus élevé que le module de l'accélération de l'objet 2. La contrainte d'accélération est

$$a_{1y} = -2a_{2y}, \tag{i}$$

où le signe est nécessaire puisque les accélérations sont de sens opposés. Les forces de tension $\vec{\mathbf{T}}_1$, $\vec{\mathbf{T}}_2$ et $\vec{\mathbf{T}}_3$ sont exercées par la même corde. Étant donné que les masses des poulies sont négligeables et qu'elles tournent sans frottement, ces forces ont le même module :

$$T_1 = T_2 = T_3 = T\ . \tag{ii}$$

Identifier la clé

La clé est la deuxième loi de Newton appliquée à chaque système. Nous insérons dès maintenant l'équation (ii) pour simplifier les équations :

$$\text{(objet 1)} \quad \sum F_y = T - m_1 g = m_1 a_{1y} \tag{iii}$$

$$\text{(système 2)} \sum F_y = T + T - m_2 g = m_2 a_{2y}\ . \tag{iv}$$

SOLUTION a.

Résoudre le problème

Les équations (i), (iii) et (iv) forment un système d'équations à trois inconnues. Nous pouvons d'abord isoler T dans l'équation (iii) :

$$T = m_1 g + m_1 a_{1y} = m_1 g - 2m_1 a_{2y}\ , \tag{v}$$

où nous avons aussi inséré l'équation (i). En remplaçant T dans l'équation (iv), nous trouvons la composante a_{2y} :

$$2(m_1 g - 2m_1 a_{2y}) - m_2 g = m_2 a_{2y}$$
$$(2m_1 - m_2)\, g = (4m_1 + m_2) a_{2y}$$
$$a_{2y} = \left(\frac{2m_1 - m_2}{4m_1 + m_2}\right) g$$
$$a_{2y} = \left(\frac{2 \times 0{,}500 \text{ kg} - 0{,}750 \text{ kg}}{4 \times 0{,}500 \text{ kg} + 0{,}750 \text{ kg}}\right) 9{,}81 \text{ m/s}^2$$
$$a_{2y} = 0{,}89 \text{ m/s}^2 \,.$$

Ce résultat positif indique que l'objet 2 a une accélération ayant le même sens que l'axe des y, donc vers le haut:

$$\vec{\mathbf{a}}_2 = 0{,}89 \text{ m/s}^2 \; \overrightarrow{\text{vers le haut}} \,. \qquad \text{(réponse)}$$

Nous trouvons l'accélération de l'objet 1 à l'aide de l'équation (i):

$$\vec{\mathbf{a}}_1 = -\,2\vec{\mathbf{a}}_1 = 1{,}8 \text{ m/s}^2 \; \overrightarrow{\text{vers le bas}} \,. \text{(réponse)}$$

SOLUTION b.

Résoudre le problème

En remplaçant la valeur de a_{2y} dans l'équation (v), nous trouvons

$$T = (0{,}500 \text{ kg} \times 9{,}81 \text{ m/s}^2) - 2(0{,}500 \text{ kg} \times 0{,}89 \text{ m/s}^2)$$
$$= 4{,}0 \text{ N} \,. \qquad \text{(réponse)}$$

Valider la réponse

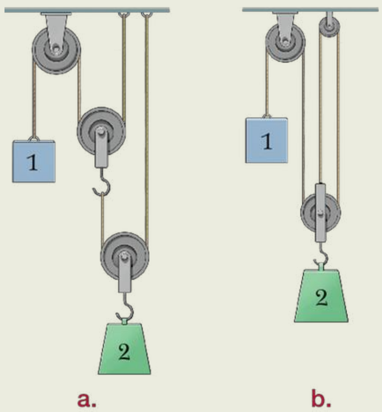
La tension est une valeur positive, car c'est le module d'une force. L'hypothèse de départ était bonne, mais la solution serait valide même si les accélérations étaient opposées. En effet, si $m_2 > 2m_1$, $a_{2y} < 0$, l'objet 2 aurait une accélération vers le bas, et l'objet 1 aurait une accélération vers le haut.

REMARQUE

Le système de l'exemple précédent permet de soulever une masse de 0,750 kg par la chute d'une masse de 0,500 kg. On peut l'utiliser pour soulever de lourdes charges avec une plus petite force. La force appliquée sur l'objet 2 est multipliée par 2 parce que la corde exerce deux forces de tension sur la poulie. Cette multiplication a un prix: l'objet 2 a un déplacement deux fois moins grand. Nous verrons dans le chapitre 8 que le produit d'une force par un déplacement représente un transfert d'énergie, qu'on nomme «travail», d'un système vers un autre.

TESTEZ VOTRE COMPRÉHENSION 6.4

Quelles sont les contraintes d'accélération entre les deux objets dans les deux systèmes de poulies ci-contre? Supposez que l'axe des y est orienté vers le haut.



RÉSUMÉ

Dans ce chapitre, nous avons étudié la dynamique des objets en interaction. La troisième loi de Newton donne la relation entre les forces d'interaction entre deux objets.

LES LOIS ET PRINCIPES

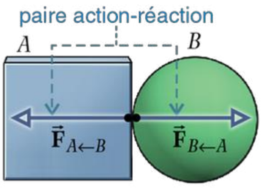
La **troisième loi de Newton:** Si un objet A subit une force d'action $\vec{\mathbf{F}}_{A\leftarrow B}$ par l'agent B, alors l'agent B subit une force de réaction $\vec{\mathbf{F}}_{B\leftarrow A}$ par l'objet A:

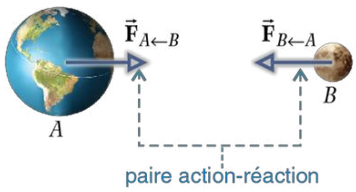
$$\vec{\mathbf{F}}_{A\leftarrow B} = -\vec{\mathbf{F}}_{B\leftarrow A} .$$

- Les forces $\vec{\mathbf{F}}_{A\leftarrow B}$ et $\vec{\mathbf{F}}_{B\leftarrow A}$ s'appliquent sur des objets différents et sont de même nature.
- Les forces ont le même module:

$$F_{A\leftarrow B} = F_{B\leftarrow A} .$$

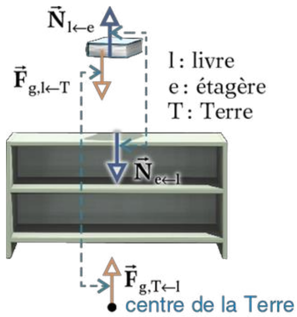
- Les forces ont la même direction et des sens opposés.





L'**identification des paires**

1. **Dessiner les objets séparément.** Respectez leur position relative.
2. **Tracer toutes les forces en respectant leurs points d'application.** Utilisez la notation $\vec{\mathbf{F}}_{A\leftarrow B}$: la force $\vec{\mathbf{F}}_{A\leftarrow B}$ est la force sur A par B.
3. **Identifier les paires action-réaction.** Les membres d'une paire action-réaction sont des forces de même nature, avec des orientations opposées.



LES APPLICATIONS

- Une **corde** permet de relier deux objets en interaction en exerçant une force de tension.
- Une **poulie fixe** permet de changer l'orientation d'une force de tension.
- Une **poulie mobile** permet d'exercer une force différente de la tension sur un objet.

La tension dans la corde est uniforme tout le long de la corde $(T_1 = T_2 = T)$ si:

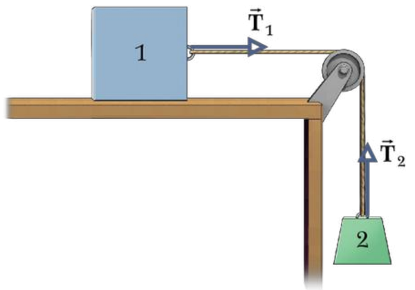
- la masse de la corde est négligeable par rapport aux autres objets;
- l'étirement de la corde est négligeable;
- la masse de la poulie est négligeable;
- la poulie tourne sans frottement autour de son axe.

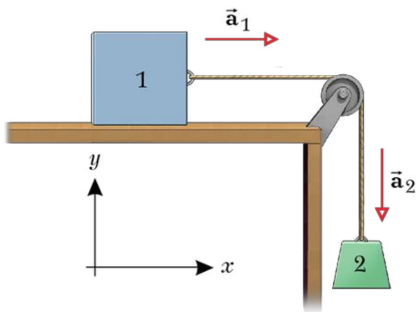
La **contrainte d'accélération**

Lorsque deux objets sont reliés par une corde idéale (directement ou à l'aide d'une poulie fixe) ou qu'ils sont en contact sans glissement, alors leurs accélérations ont le même module:

$$a_1 = a_2 .$$

Selon le système de coordonnées utilisé, il existe une relation entre les composantes des accélérations, par exemple $a_{1x} = -a_{2y}$.





QUESTIONS, EXERCICES ET PROBLÈMES

Q questions qualitatives • **E** exercices simples • **P** problèmes • solution disponible

Section 6.2 L'identification des paires

Pour effectuer les exercices de cette section, vous devez tracer les diagrammes des forces et identifier toutes les paires action-réaction.

E1 Une lampe est suspendue au plafond à l'aide d'une corde verticale. Identifiez les paires action-réaction.

E2 Une rondelle est frappée vers la droite par un bâton de hockey. Le frottement est négligeable. Identifiez les paires action-réaction.

E3 Un ballon de basketball, qui se déplace verticalement vers le bas, rebondit sur un plancher. Identifiez les paires action-réaction.

E4 Dans une épreuve de souque à la corde, deux personnes tirent horizontalement sur une corde pour déséquilibrer l'autre (*voir la figure 6.24*). Le concours s'effectue sur une surface glacée, où le frottement est faible mais non négligeable. Chaque personne pousse la glace vers l'avant, afin de reculer et d'entraîner l'autre personne avec elle. En supposant que les personnes sont immobiles, identifiez les paires action-réaction si on considère les personnes et la corde comme trois objets distincts.

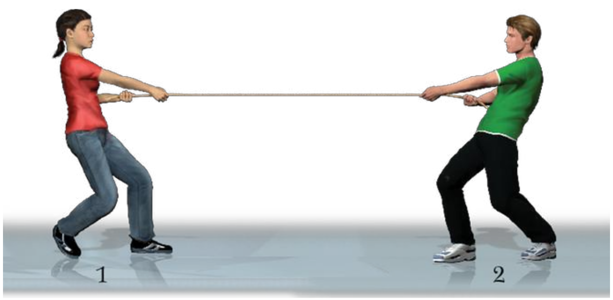


FIGURE 6.24 • Exercice 4

E5 Une boîte est déposée sur la plate-forme d'un camion (*voir la figure 6.25*). Le camion accélère vers l'avant à cause de la traction de ses roues avant. La force de frottement entre la boîte et le camion empêche celle-ci de glisser. Identifiez les paires action-réaction, en considérant la boîte et le camion comme deux objets distincts.

FIGURE 6.25 • Exercice 5

E6 Une femme pousse un chariot vers le haut d'un plan incliné. Le chariot est muni de roues, ce qui rend le frottement négligeable. Identifiez les paires action-réaction. Considérez la femme et le chariot comme deux objets distincts.

E7 Un bol est placé sur une planche de bois qui repose sur une surface sans frottement, comme le montre la figure 6.26. Le frottement entre la planche et le bol n'est pas négligeable. Une force horizontale $\vec{F}_p$ est exercée sur le bol, ce qui fait glisser le bol vers la droite sur la planche. Identifiez les paires action-réaction, en considérant le bol et la planche comme deux objets distincts.

FIGURE 6.26 • Exercice 7

E8 Un bol est placé sur une planche de bois qui repose sur une surface sans frottement, comme le montre la figure 6.27. Le frottement entre la planche et le bol n'est pas négligeable. Une force horizontale $\vec{F}_p$ est appliquée sur la planche. Cette dernière glisse sur la surface vers la droite, et le bol glisse par rapport à la planche. Identifiez les paires action-réaction, en considérant le bol et la planche comme deux objets distincts.

FIGURE 6.27 • Exercice 8

Section 6.3 La troisième loi de Newton

Q9 Un marin utilise un grand ventilateur pour faire avancer son voilier. Comment doit-il orienter son ventilateur pour que le voilier avance ?

Q10 Un homme pousse un chariot d'épicerie vers l'avant. En réaction, le chariot d'épicerie pousse l'homme vers l'arrière. Pourquoi, dans ce cas, l'homme est-il capable de faire accélérer le chariot ?

Q11 Un camion entre en collision avec une petite voiture initialement immobile.

a. Quel véhicule subit la force d'impact ayant le plus grand module ?

b. Quel véhicule subit l'accélération ayant le plus grand module ?

Q12 Trois boîtes sont en contact, comme le montre la figure 6.28. Une force horizontale est appliquée sur la boîte de gauche. Classez les boîtes, dans l'ordre croissant, selon:

a. leurs accélérations;

b. la force résultante qu'elles subissent.

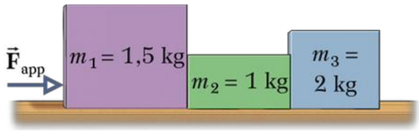


FIGURE 6.28 • Question 12

E13 Deux blocs ($m_1 = 2{,}50$ kg et $m_2 = 3{,}80$ kg) se trouvent sur une surface horizontale sans frottement (*voir la figure 6.29*). Une force de 25,0 N est appliquée selon un angle $\theta = 15{,}0°$ sous l'horizontale.

a. Calculez l'accélération du bloc de droite.

b. Calculez la force $\vec{\mathbf{N}}_{1\leftarrow 2}$.

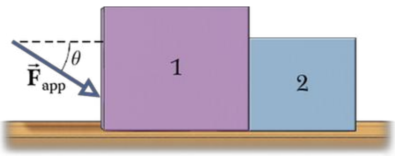


FIGURE 6.29 • Exercice 13

E14 Un homme pousse un chariot à roulettes sur lequel se trouve un téléviseur. La force de l'homme sur le chariot forme un angle de 30,0° sous l'horizontale. La masse du chariot est de 10,0 kg, et la masse du téléviseur est de 2,50 kg. Le coefficient de frottement statique entre la surface du chariot et le téléviseur est de 0,70. Le frottement entre les roues et le plancher est négligeable. Calculez le module de la force maximale exercée par l'homme de manière à ce que le téléviseur ne glisse pas.

E15 Une voiture de 1 500 kg tire une remorque de 500 kg. Elle monte à vitesse constante une pente inclinée selon un angle de 5,70°.

a. Calculez la composante parallèle à la pente de la force exercée par la voiture sur le sol.

b. Calculez la force exercée par la voiture sur la remorque.

E16 Une petite fille de 20,5 kg se tient en équilibre en poussant horizontalement sur un cadre de porte, comme le montre la figure 6.30. Le coefficient de frottement statique entre ses pieds et le bois est de 0,80, et le coefficient de frottement statique entre ses mains et le bois est de 0,70. Si la force de poussée exercée par les pieds est deux fois plus grande que celle qui est exercée par les mains, quel est le module de la poussée d'un pied sur le bois lorsque la petite fille est sur le point de glisser?

FIGURE 6.30 • Exercice 16

P17 Un train est composé d'une locomotive et de 20 wagons. La locomotive a une masse de $1{,}35 \times 10^5$ kg, et chacun des wagons a une masse de $3{,}10 \times 10^4$ kg. Le frottement dû au roulement des roues est négligeable. Le train accélère à 0,800 m/s² vers le nord.

a. Quelle est la force exercée par la locomotive sur les rails?

b. Quelle est la force exercée sur la locomotive par le premier wagon?

c. Quelle est la force exercée sur le dernier wagon par l'avant-dernier wagon?

P18 Une chaîne verticale est composée de quatre maillons identiques, chacun ayant une masse de 0,125 kg. Une force $\vec{\mathbf{F}}_p = 5{,}00\ \text{N}\,\vec{\boldsymbol{j}}$ est appliquée sur le premier maillon (le maillon du haut), ce qui fait accélérer la chaîne vers le haut (*voir la figure 6.31*).

a. Quelle est l'accélération de la chaîne?

b. Calculez la force exercée par le deuxième maillon sur le troisième maillon.

c. Calculez la force exercée par le quatrième maillon sur le troisième maillon.

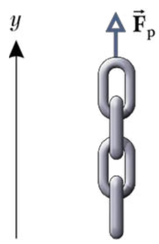


FIGURE 6.31 • Problème 18

P19 Un bol est placé sur une planche de bois. On exerce une force horizontale $\vec{\mathbf{F}}_p$ sur la planche, comme le montre la figure 6.32. La planche a une masse de 1,40 kg, et le bol, une masse de 300 g. Le frottement entre la planche et le sol est négligeable. Le coefficient de frottement statique entre la planche et le bol est de 0,50, et le coefficient de frottement cinétique est de 0,25. Calculez le module de l'accélération du bol et le module de l'accélération de la planche dans les cas suivants :

a. $F_p = 5{,}00$ N ;

b. $F_p = 10{,}0$ N.

FIGURE 6.32 • Problème 19

P20 Une boîte ayant une masse de 5,00 kg est placée sur un traîneau de 1,50 kg. Le traîneau se trouve sur une surface horizontale dont le coefficient de frottement cinétique est de 0,200. Le coefficient de frottement cinétique entre le traîneau et la boîte est de 0,300. Une force $\vec{F}$ ($F = 40{,}0$ N et $\theta = 35{,}0°$) est appliquée sur le traîneau, comme l'indique la figure 6.33. La boîte glisse par rapport au traîneau.

a. Quelle est l'accélération de la boîte ?

b. Quelle est l'accélération du traîneau ?

c. Quelle est la force exercée sur la boîte par le traîneau ?

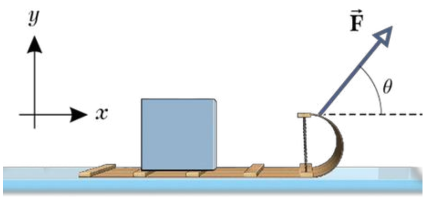


FIGURE 6.33 • Problème 20

P21 Un bloc de masse m_1 est poussé contre un bloc de masse m_2 avec une force horizontale $\vec{F}_{app}$ (*voir la figure 6.34*). La surface horizontale est sans frottement, mais le coefficient de frottement statique entre les deux blocs est μ_s. Le module de la force est tout juste suffisant pour que le premier bloc ne glisse pas.

a. Calculez le module de $\vec{F}_{app}$.

b. Quelle est l'accélération des blocs ?

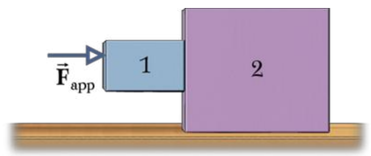


FIGURE 6.34 • Problèmes 21 et 22

P22 Un bloc de masse $m_1 = 1{,}40$ kg est poussé contre un bloc de masse $m_2 = 3{,}30$ kg avec une force horizontale $\vec{F}_{app}$ (*voir la figure 6.34*). La surface horizontale est sans frottement, mais le coefficient de frottement statique entre les deux blocs est $\mu_s = 0{,}600$. Le module de la force est tout juste suffisant pour que le premier bloc ne glisse pas.

a. Calculez le module de $\vec{F}_{app}$.

b. Quelle est l'accélération des blocs ?

P23 Un homme de 65,0 kg pousse un chariot de 20,0 kg le long d'une pente inclinée selon un angle $\theta = 15{,}0°$. La poussée de l'homme sur le chariot forme un angle $\phi = 30{,}0°$ par rapport à la pente (*voir la figure 6.35*). Le coefficient de frottement cinétique entre la pente et le chariot est de 0,300, et le coefficient de frottement statique entre les pieds de l'homme et la pente est de 0,700. En demeurant immobile, l'homme pousse le plus fort qu'il peut avec ses bras, sans que ses pieds glissent.

a. Quel est le module de la force de l'homme sur le chariot ?

b. Quelle est l'accélération du chariot ?

c. Quelle est la force de l'homme sur le sol ?

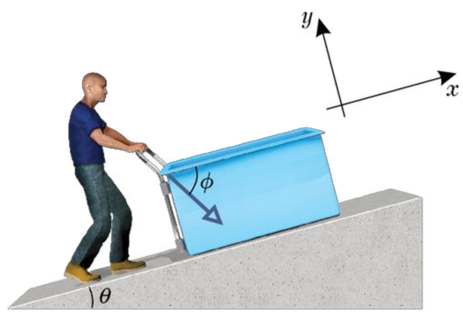


FIGURE 6.35 • Problème 23

P24 Un bloc de masse m est placé sur un coin de masse M. Une force horizontale $\vec{F}_{app}$ est appliquée sur le coin, comme le montre la figure 6.36. Le frottement est négligeable sur toutes les surfaces. Quel est le module de la force $\vec{F}_{app}$ si le bloc ne glisse pas sur le coin ?

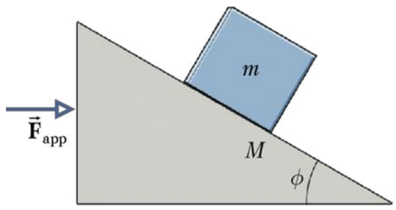


FIGURE 6.36 • Problème 24

Section 6.4 Les cordes et les poulies

Dans cette section, toutes les cordes ont une masse et un étirement négligeables. De plus, les poulies ont une masse négligeable et tournent sans frottement.

Q25 La figure 6.37 illustre deux objets reliés par une corde qui passe par une poulie. L'objet 2 descend, et l'objet 1 monte sans frottement le plan incliné. Classez dans l'ordre décroissant les modules suivants : (1) la composante parallèle au plan de la force gravitationnelle $\vec{\mathbf{F}}_{g1}$ sur l'objet 1 ; (2) la force gravitationnelle $\vec{\mathbf{F}}_{g2}$ sur l'objet 2 ; (3) la force de tension $\vec{\mathbf{T}}_1$ sur l'objet 1.

a. Les objets se déplacent à vitesse constante.

b. L'objet 2 accélère vers le bas.

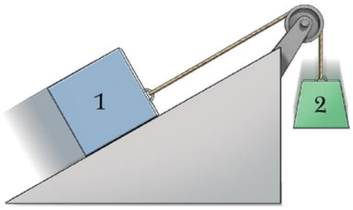


FIGURE 6.37 • Question 25

E26 Deux blocs sont reliés par une corde de masse négligeable. Une force $\vec{\mathbf{F}}$ est appliquée sur le bloc 2, comme le montre la figure 6.38. Le module de la force est de 12,3 N, la masse du bloc 1 est de 1,30 kg, et la masse du bloc 2, de 3,70 kg.

a. Quelle est la force de tension sur le bloc 1 ?

b. Quelle est la force de tension sur le bloc 2 ?

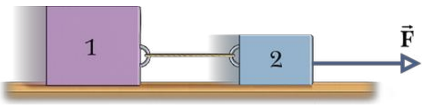


FIGURE 6.38 • Exercice 26

E27 Un poids est attaché à un chariot au moyen d'une ficelle qui passe par une poulie, comme le montre la figure 6.39. Le chariot glisse sans frottement sur la surface horizontale. Sa masse est de 405,0 g, et celle du poids, de 50,0 g.

a. Quelle est l'accélération du chariot ?

b. Quelle est la tension dans la corde ?

c. Le chariot étant d'abord au repos, quelle est sa vitesse après qu'il a parcouru 50,0 cm ?

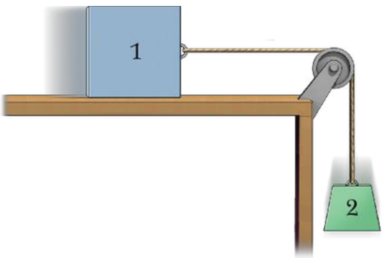


FIGURE 6.39 • Exercice 27

E28 Deux blocs sont reliés au moyen d'une corde qui passe par une poulie, comme le montre la figure 6.40. Les surfaces sont sans frottement. Le bloc 1 a une masse m_1, et le bloc 2, une masse m_2. Le plan est incliné selon un angle θ.

a. Quelle est l'accélération du bloc 1 ?

b. Quelle est la tension dans la corde ?

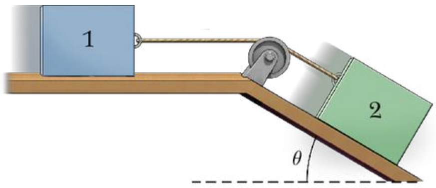


FIGURE 6.40 • Exercices 28 et 29

E29 Deux blocs sont reliés au moyen d'une corde qui passe par une poulie, comme le montre la figure 6.40. Les surfaces sont sans frottement. Le bloc 1 a une masse de 4,50 kg, et le bloc 2, une masse de 2,50 kg. Le plan est incliné selon un angle $\theta = 22{,}5°$.

a. Quelle est l'accélération du bloc 1 ?

b. Quelle est la tension dans la corde ?

P30 Deux blocs sont reliés au moyen d'une corde qui passe par une poulie. Une force $\vec{\mathbf{F}}_{\text{app}}$ est appliquée sur le premier bloc (*voir la figure 6.41*). Les surfaces sont sans frottement. Les masses des blocs sont $m_1 = 450$ g et $m_2 = 125$ g, et le plan est incliné selon un angle $\theta = 35{,}0°$.

a. Calculez la tension dans la corde si le module de $\vec{\mathbf{F}}_{\text{app}}$ est égal à 0,800 N.

b. Calculez le plus petit module de $\vec{\mathbf{F}}_{\text{app}}$ pour que la corde ne soit pas tendue.

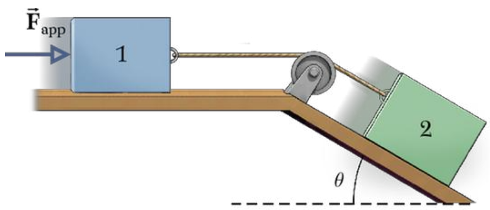


FIGURE 6.41 • Problème 30

P31 Une caisse de 10,5 kg est immobile sur un plan incliné selon un angle $\theta = 25{,}0°$ par rapport à l'horizontale. Le coefficient de frottement statique est de 0,600, et le coefficient de frottement cinétique est de 0,300. On veut mettre la caisse en mouvement. Pour y arriver, on attache la caisse, au moyen d'une corde qui passe par une poulie, à un contrepoids de masse m_2, comme le montre la figure 6.42.

a. Quelle est la plus petite masse du contrepoids pour que la caisse se mette en mouvement ?

b. Avec la masse m_2 obtenue en **a.**, calculez le module de l'accélération de la caisse lorsque celle-ci est en mouvement.

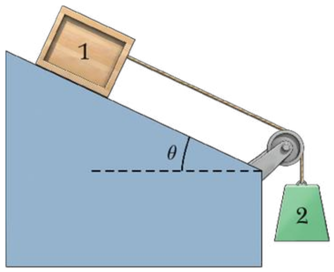


FIGURE 6.42 • Problème 31

P32 Une caisse est placée sur un plan incliné formant un angle ϕ = 22,0° par rapport à l'horizontale. La caisse est reliée au moyen d'une corde, qui passe par une poulie, à une masse m_2 = 150 g. La caisse a une masse m_1 = 650 g. Une force supplémentaire $\vec{\mathbf{F}}_{\text{app}}$ est appliquée sur la caisse, comme le montre la figure 6.43. Cette force forme un angle θ = 30,0° par rapport au plan. Le coefficient de frottement cinétique entre la caisse et le plan est μ_c = 0,400. L'accélération de la masse suspendue est égale à 1,24 m/s² vers le haut et celle-ci se déplace vers le haut.

a. Calculez la tension dans la corde.

b. Calculez le module de la force $\vec{\mathbf{F}}_{\text{app}}$.

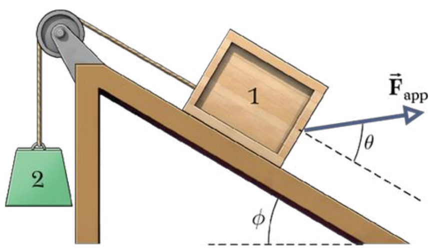


FIGURE 6.43 • Problème 32

P33 Un bloc, dont la masse est m_1 = 580 g, est tiré vers le haut d'un plan incliné par une force $\vec{\mathbf{F}}_{\text{app}}$ dont le module est de 11,0 N et qui forme un angle θ = 25,0° par rapport au plan. De plus, le bloc est relié à un deuxième bloc dont la masse est de 880 g, comme le montre la figure 6.44. Le coefficient de frottement cinétique entre les blocs et le plan est égal à 0,300. Le plan est incliné selon un angle ϕ = 33,0°.

a. Quelle est l'accélération du bloc 2 ?

b. Quelle est la tension dans la corde ?

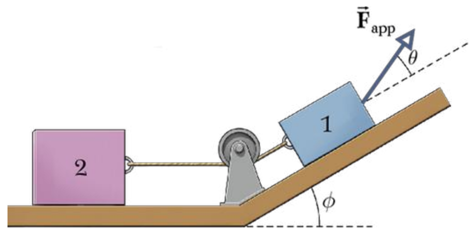


FIGURE 6.44 • Problème 33

P34 Deux blocs sont reliés ensemble, comme le montre la figure 6.45. Le bloc 1 a une masse m_1 = 450 g, et le bloc 2, une masse m_2 = 250 g. Le bloc 1 glisse le long d'un plan incliné selon un angle ϕ_1 = 35,0°, et le bloc 2 glisse le long d'un plan incliné selon un angle ϕ_2 = 55,0°. Le coefficient de frottement cinétique entre les blocs et la surface des plans inclinés est de 0,340. Calculez l'accélération du bloc 1 dans les cas suivants :

a. le bloc 1 monte ;

b. le bloc 1 descend.

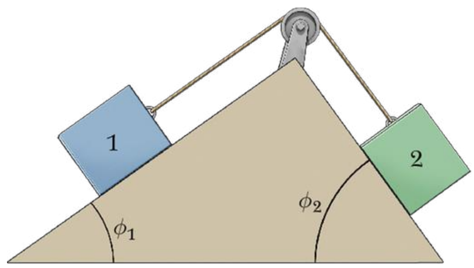


FIGURE 6.45 • Problème 34

P35 Un bloc de 3,40 kg est placé sur un deuxième bloc de 5,80 kg. Le premier bloc est attaché à un mur au moyen d'une corde (*voir la figure 6.46*). Une force $\vec{\mathbf{F}}_{\text{app}}$ est appliquée sur le deuxième bloc, qui se déplace vers la droite. Son module est de 40,0 N, et la force forme un angle θ = 35,0° par rapport à l'horizontale. Le coefficient de frottement cinétique est de 0,250 sur toutes les surfaces.

a. Quelle est la tension dans la corde ?

b. Quelle est l'accélération du bloc inférieur ?

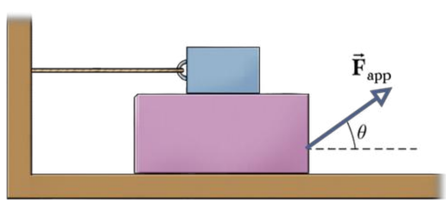


FIGURE 6.46 • Problème 35

P36 Un bloc de 1,65 kg est placé sur un deuxième bloc de 3,80 kg. Les deux objets sont aussi reliés au moyen d'une corde qui passe par une poulie (*voir la figure 6.47*). Une force horizontale $\vec{\mathbf{F}}_{app}$ est appliquée sur le deuxième bloc. Son module est de 30,0 N. Le coefficient de frottement cinétique est de 0,250 sur toutes les surfaces. (Indice : il y a une contrainte d'accélération.)

a. Quelle est l'accélération du bloc supérieur ?

b. Quelle est l'accélération du bloc inférieur ?

c. Quelle est la tension dans la corde ?

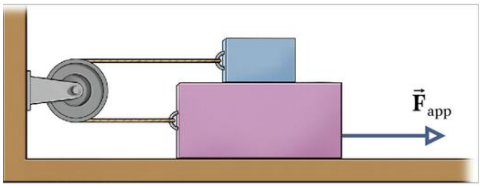


FIGURE 6.47 • Problème 36

P37 Un homme de 70,0 kg est assis sur un siège suspendu au moyen d'une corde qui passe dans une poulie, comme le montre la figure 6.48. Le siège a une masse de 5,0 kg.

a. Dans la figure 6.48a, l'homme tire sur la corde. Quelle force l'homme exerce-t-il sur la corde s'il monte avec une accélération de 1,00 m/s^2 ?

b. Dans la figure 6.48b, un autre homme tire sur la corde. Quelle force cet homme exerce-t-il sur la corde pour que le premier homme monte avec une accélération de 1,00 m/s^2 ?

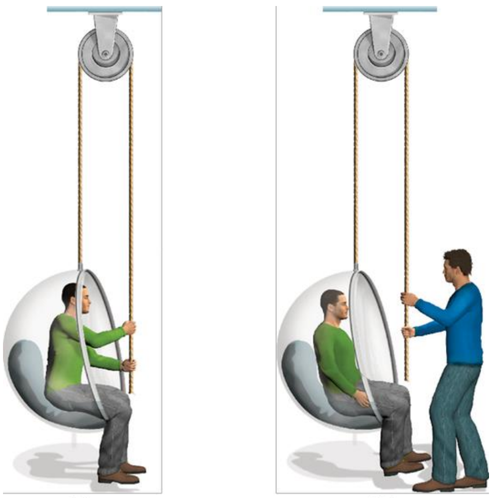


FIGURE 6.48 • Problème 37

P38 Une poulie est attachée à un bloc. Celui-ci est placé sur une surface horizontale, dont le coefficient de frottement cinétique est μ_c. Le montage de la figure 6.49 contient le premier bloc et un second bloc suspendu. La masse du premier bloc (y compris la poulie) est m_1, et la masse du deuxième bloc est m_2.

a. Quelle est l'accélération du premier bloc ?

b. Quelle est l'accélération du deuxième bloc ?

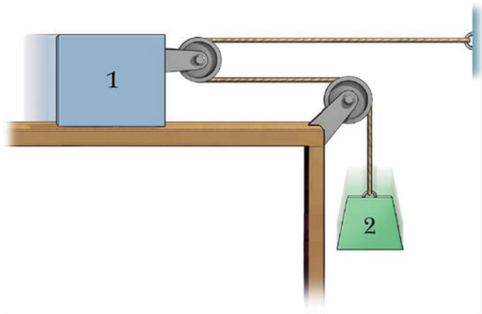


FIGURE 6.49 • Problème 38 et 39

P39 Une poulie est attachée à un bloc. Celui-ci est placé sur une surface horizontale, dont le coefficient de frottement cinétique est $\mu_c = 0{,}100$. Le montage de la figure 6.49 contient le premier bloc et un deuxième bloc suspendu. La masse du premier bloc est de 506 g, et la masse du second bloc, de 200,0 g.

a. Quelle est l'accélération du premier bloc ?

b. Quelle est l'accélération du deuxième bloc ?

P40 Le montage de la figure 6.50 comprend un bloc $m_1 = 1{,}20$ kg sur une surface horizontale ($\mu_s = 0{,}600$ et $\mu_c = 0{,}200$) et un deuxième bloc. Le système est initialement immobile. Calculez l'accélération du bloc 1 dans les cas suivants :

a. $m_2 = 0{,}50$ kg ;

b. $m_2 = 1{,}50$ kg.

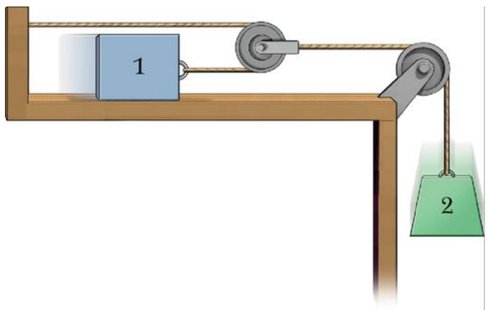


FIGURE 6.50 • Problème 40

SOLUTIONS AUX TESTS DE COMPRÉHENSION

6.1	(iii) $\vec{\mathbf{N}}_{s\leftarrow e}$, orientée vers le bas	La réaction doit être une force de même nature que l'action, une force normale dans le cas présent. Il faut aussi inverser l'objet et l'agent. Donc, la réaction de la force normale sur l'étagère par le sol est la force normale sur le sol par l'étagère $\vec{\mathbf{N}}_{s\leftarrow e}$. La réaction est opposée à l'action : $\vec{\mathbf{N}}_{e\leftarrow s}$ est vers le haut, et $\vec{\mathbf{N}}_{s\leftarrow e}$ est vers le bas.
6.2	$F_{g,l\leftarrow T} = F_{g,T\leftarrow l} < N_{l\leftarrow é} = N_{é\leftarrow l}$	Les forces sur le livre sont $\vec{\mathbf{N}}_{l\leftarrow é}$ vers le haut et $\vec{\mathbf{F}}_{g,l\leftarrow T}$ vers le bas. Comme le livre accélère vers le haut, le module de la force normale doit être plus grand. Selon la troisième loi de Newton, $N_{l\leftarrow é} = N_{é\leftarrow l}$ et $F_{g,l\leftarrow T} = F_{g,T\leftarrow l}$.
6.3	$T_3 = T_4 > T_1 = T_2$	Dans une corde, la tension est la même en tout point. Donc, $T_1 = T_2$ et $T_3 = T_4$. Dans le deuxième cas, la masse de 1 kg accélère vers le haut, ce qui indique que la tension T_3 est plus grande que le module de la force gravitationnelle sur ce bloc. Dans le premier cas, $T_1 = F_g$, car le bloc est immobile.
6.4	**a.** $a_{1y} = -4a_{2y}$	Il y a deux poulies mobiles. Lorsque l'objet 1 descend d'une distance d_1, ceci raccourcit la corde de chaque côté de la poulie mobile supérieure, et elle monte d'une distance $d_1/2$. En montant, cette poulie mobile réduit la corde de chaque côté de la poulie mobile inférieure. Cette deuxième poulie mobile monte alors de la moitié de la distance parcourue par la poulie mobile supérieure, donc de $d_1/4$. Par conséquent, le module de l'accélération de l'objet 1 est quatre fois plus grand que le module de l'accélération de l'objet 2. Les accélérations sont opposées.
	b. $a_{1y} = -3a_{2y}$	La même corde est en contact en trois points avec la poulie mobile. Lorsque l'objet 1 descend d'une distance d, la poulie mobile monte d'une distance $d/3$. Le module de l'accélération de l'objet 1 doit être trois fois plus élevé que celui de l'objet 2. Les accélérations sont opposées.