# Physique Générale C

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

## Chapitre 4

Enseignante:
Anna Sfyrla

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

**Bibliographie**

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

# Table des matières

# 4

# La dynamique: force et accélération

Quand toutes les forces externes exercées sur un système agissent de façon à ce que la quantité de mouvement reste constante, le système est en équilibre. L'étude de ces systèmes est le domaine de la *statique*. Par contre, la discipline traitant le comportement des systèmes hors de l'équilibre est la *dynamique*. Un corps soumis à une force est accéléré dans la direction de cette force. Nous examinons dans ce chapitre la relation entre les diverses sortes de forces et les accélérations qui en résultent.

## 4.1 Diagramme du corps isolé

En progressant dans notre analyse des objets et de leurs interactions, nous rencontrerons des situations où plusieurs forces agissent sur un corps dans des directions différentes. Bien que les choses deviennent compliquées, une représentation de **corps isolé** aide parfois à faire cette analyse: on imagine qu'on isole l'objet qui nous intéresse des autres corps du système avec lesquels il est en contact, et on remplace l'action de ces corps sur le corps isolé par les vecteurs forces appropriées. Il reste le corps seul avec l'ensemble des vecteurs forces agissant sur lui.

Plus spécifiquement: (a) on supprime tout objet en contact avec l'objet étudié et (b) on remplace chaque source d'interaction par un vecteur force. Deux exemples sont donnés à la figure 4.1.

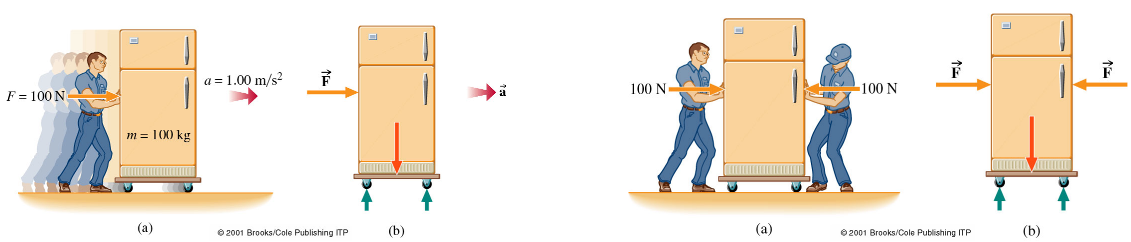



Figure 4.1: Gauche: Si la seule force horizontale qui agit sur un corps de masse $m$ est $F$, alors il accélère horizontalement en satisfaisant la deuxième loi de Newton, $F = ma$. Ce mouvement est independent des forces verticales, que nous traiterons plus loin. La representation de corps isolé montre la force horizontale. Droite: Cas de deux personnes qui agissent sur un corps avec deux forces opposées. La force est une grandeur vectorielle, alors ces deux forces se contrebalancent et $\sum \vec{F}_H = 0$; ce qui veut dire que le corps ne peut avoir aucune accélération horizontale. La représentation de corps isolé rend ce résultat plus visible.

**Exemple 4.1.1.** Un enfant tire un chariot de masse totale $m$ =100 kg. Il applique une force constante de 100 N sous un angle de $\theta = 30^o$. Calculer la force qui induit le mouvement et l'accélération résultante du chariot, en négligeant les frottements.

**Solution** Données: $m = 100$ kg, $F = 100$ N, $\theta = 30^o$. À déterminer: $F_H$ et $a_H$.
Le chariot étant trop lourd pour être soulevé, la composante verticale de la force est sans effet (dans le cas présent où on néglige les frottements).

Définissons un système de coordonnées dont l'axe $x$ horizontal pointe dans la direction de la force. Un diagramme du corps isolé nous dit que la seule force dynamique est la composante horizontale $F_x$:

$$\sum F_x = F_x = F \cos\theta = F \cos 30^o = 86.6 \text{ N}$$

L'équation du mouvement (deuxième loi de Newton) sur cet axe $x$ est:

$$\sum F_x = ma_x$$

Ainsi: $a_x = 0.866$ m/s$^2$.

◀

## 4.2 Le poids

Le poids d'un objet, n'importe où au voisinage de la Terre, est la force dirigée vers le centre de la planète qui s'exerce sur cet objet du fait de son interaction gravitationnelle avec la Terre.

Nous sommes en interaction gravitationnelle permanente avec la lune, les planètes, le soleil et une bonne partie des étoiles proches du système Solaire. Notre poids est le résultat net de nos interactions avec l'Univers entier. D'un point de vue pratique, l'influence de la Terre est dominante et toute autre influence est négligeable. Parce que la Terre tourne sur elle même, nous sommes tous entraîné dans cette rotation. Ainsi, tout en nous pesant dans notre salle de bains, nous sommes animé d'un mouvement circulaire autour de l'axe de la Terre. Ce mouvement produit une accélération. Ce que nous lisons alors est le poids effectif, légèrement inférieur au poids gravitationnel; mais la différence est négligeable.

La deuxième loi de Newton fournit une relation entre les notions de poids ($F_W$) et de masse (m)[1]. Comme le poids d'un corps sur Terre l'attire vers le bas avec une accélération $g$, la relation $\vec{F} = m\vec{a}$ devient:

$$\vec{F}_W = m\vec{g} \tag{4.1}$$

Plus la masse est grande, plus le poids est grand. Ici, $\vec{g}$ est le vecteur accélération gravitationnelle, dirigé vers le bas.

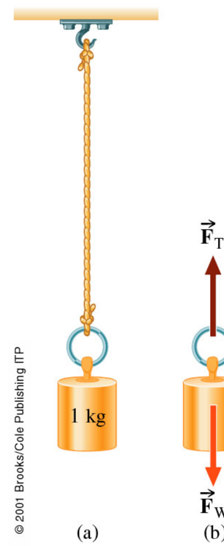
### 4.2.1 Poids et cordes

Nous considérons des cordes de masse négligeable par rapport aux masses qu'elles portent. La tension $F_T$ est alors la même en deux points quelconques de la corde, du moment qu'aucune force tangentielle n'agisse entre ces deux points. La force exercée par une corde

[1] Nous écrivons $F_W$ en référence au mot *Weight*, poids en anglais.

sur un corps auquel elle est attachée a un module $F_T$ et elle est orientée dans la direction de la corde vers le centre de la corde.

La figure à coté montre une masse d'un kilogramme attachée à une corde. La masse est attirée vers la Terre par la gravitation qui agit sur tous ses atomes. Le module $F_W$ de la force totale dirigée vers le bas, est communément appelé le poids. La masse tire vers le bas sur l'extrémité de la corde. La corde tire vers le haut avec une force de magnitude $F_T$ qui est la tension. On néglige le poids de la corde dans cette discussion.




Appliquons la deuxième loi de Newton sur un axe $y$ le long de la corde pointant vers le haut. Pour un corps en équilibre, $\sum \vec{F} = 0$. Donc:

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_T + \vec{F}_W = m\vec{a} = \vec{0}$$

Comme il n'y a qu'un seul axe qui importe, nous pouvons passer en notation scalaire, en respectant les signes:

$$\sum F_y = F_T + (-F_W) = 0 \Rightarrow F_T = F_W$$

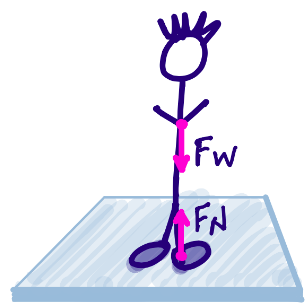
La tension est la même en chaque point de la corde, toujours dirigée le long de la corde.

### 4.2.2 Force de Réaction

La force exercée par une surface sur un objet avec lequel elle est en contact est appelée **force de réaction**. Elle peut avoir à la fois une composante tangentielle, dite **force de frottement** ($F_f$) et une composante normale à la surface, dite **force normale** ($F_N$). Ces forces de contact sont dues à l'interaction électromagnétique entre des atomes de la surface et des atomes de l'objet quand ils sont proches.

Une personne debout et immobile est soumise à une force verticale effective (le poids vers le bas et la force normale du sol vers le haut) qui est nulle (figure 4.2). La deuxième loi de Newton exige alors que la personne reste au repos dans la direction verticale.

Figure 4.2: Le poids d'un corps est équilibré par une force normale opposée, exercée par le plancher dans le sens ascendant. La représentation du corps isolé montre les deux forces agissant sur la personne debout. En fait, la force normale est répartie sur les deux pieds.



**Le plan incliné** Considérons maintenant un objet placé sur un plan incliné (figure 4.3), qui a une angle d'inclinaison $\theta$ par rapport à l'horizontale. La force gravitationnelle agit strictement vers le bas. Mais par rapport au plan incliné elle a deux composantes:

- $F_{W\parallel} = F_W \cos\theta$, parallèle au plan,
- $F_{W\perp} = F_W \sin\theta$, perpendiculaire au plan.

La deuxième loi de Newton peut être appliquée dans chacune des deux directions séparément. La force qui accélère le corps vers le bas du plan est $F_{W\parallel}$. Nous avons: $\sum F_\parallel = ma_\parallel$, d'où nous pouvons calculer $a_\parallel$. Comme il n'y a aucune accélération perpendiculaire au plan, $\sum F_\perp = ma_\perp = 0$, donc la force $F_{W\perp}$ doit être équilibrée par une force opposée, la **réaction normale** $F_N$.

---

**Exemple 4.2.1.** Une skieuse de 50 kg (figure 4.3) descend une pente enneigée inclinée à $30^o$. On néglige le frottement et la résistance de l'air. Calculer (a) le module de la force normale agissant sur elle, (b) le module de la force qui la fait glisser le long du plan incliné et (c) l'accélération résultante.

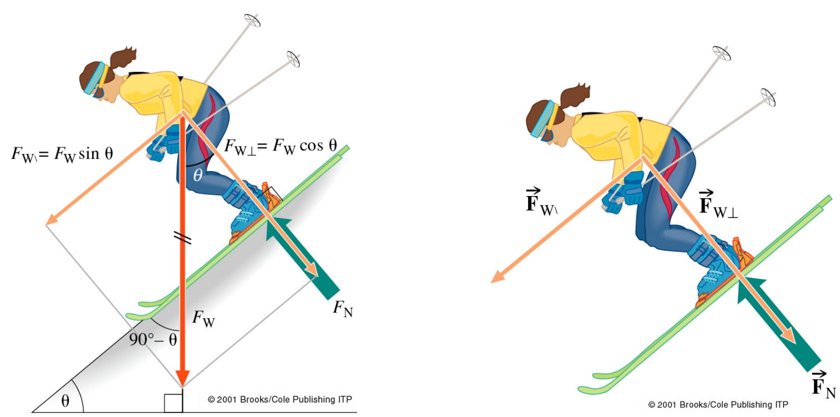



Figure 4.3: Un corps sur un plan incliné. La composante du poids parallèle au plan incliné entraîne le corps vers le bas du plan. La composante du poids normale au plan est équilibrée par la réaction normale du plan. L'application de la deuxième loi de Newton dans la direction du plan donne $\sum F_\parallel = F_{p\parallel} = ma_\parallel$.

**Solution** Données: $m = 50$ kg et $\theta = 30^0$. À déterminer: (a) $F_N$, (b) la force parallèle au plan incliné et (c) $a_\parallel$.
(a) La composante du poids de la skieuse qui l'appuie sur la surface est:

$$F_{W\perp} = mg\cos\theta = (50 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2)\cos 30^o$$

soit:

$$F_{W\perp} = 425 \text{ N}$$

Comme la skieuse ne quitte pas la surface du plan, alors $a_\perp = 0$. Prenons la direction normale à la surface, dirigée vers le haut, comme positive. La somme des forces perpendiculaires au plan incliné est nulle, ainsi: $\sum F_\perp = 0 = F_N + (-F_{W\perp})$. Donc $F_{W\perp}$ est dirigée vers l'intérieur de la surface, dans la direction négative. Alors, $F_N = 425$ N.

(b) Le module de la force motrice vers le bas du plan incliné est:

$$F_{p\|} = mg\sin\theta = (50\ \text{kg})(9.81\ \text{m/s}^2)\sin 30^o$$

et ainsi $F_{p\|} = 245$ N.
(c) Pour calculer l'accélération vers le bas le long du plan, nous prenons la direction du mouvement vers le bas comme positive. La deuxième loi de Newton donne:

$$F_{\|} = ma_{\|} = F_{W\|}$$

alors $a_{\|} = g\sin\theta$, et pour $\theta = 30^o$, $a_{\|} = \frac{1}{2}g$. Ce résultat est indépendant de la masse, et s'applique à tout corps glissant vers le bas sans frottement sur un plan incliné à $\theta = 30^o$.

**Cas special: la physique du saut** Quand on veut sauter, il faut une force nette sur notre corps dirigée vers le haut. La troisième loi de Newton nous enseigne comment procéder: appuyons sur le plancher et celui-ci va nous pousser vers le haut. La force des muscles, $F_M$, pousse vers le bas. La charge totale est la somme de cette force, $F_M$, et du poids, $F_W$. La réaction du plancher devient:

$$\vec{F}_N = \vec{F}_M + \vec{F}_W$$

Seules deux forces externes agissent sur le corps, $\vec{F}_W$ vers le bas et $\vec{F}_N$ vers le haut. Donc:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = \vec{F}_W + \vec{F}_N$$

$$\sum F_y = F_W - (F_M + F_W) = -F_M$$

Cette somme correspond à une force nette dirigée vers le haut qui nous permet de sauter.

## 4.3 Mouvements couplés

Les deux masses dans les exemples de la figure 4.4 sont reliées par une corde de longueur fixe. Les poulies sont légères et sans frottement, il n'y a donc pas de force tangentielle et la tension est constante le long de chaque corde. Nous négligeons les frottements des surfaces.

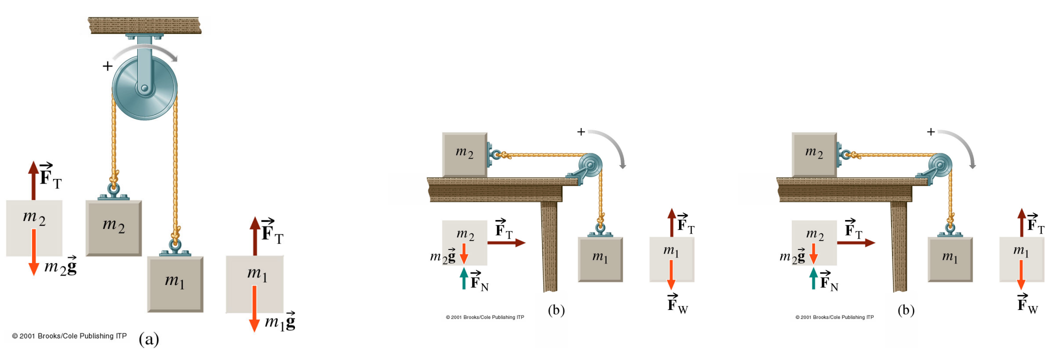



Figure 4.4: Trois exemples de systèmes couplés formés par deux masses attachées ensemble par une corde. La représentation de corps isolé pour chaque masse est illustrée. Dans chacun des trois exemples la même tension agit sur les deux masses et elles ont la même accélération.

Supposons que le mouvement ait lieu dans chaque cas dans la direction de la flèche. La plus grande masse $m_1$ tire la corde et la corde tire la masse $m_2$. Les deux masses ont la même accélération $a$, car la masse entraînée ne peut pas rattraper $m_1$ et détendre la corde, ni avoir une accélération inférieure à celle de la corde.

La deuxième loi de Newton permet d'écrire deux équations couplées et déterminer deux inconnues, $F_T$ et $a$.

---

**Exemple 4.3.1.** Marie ($m_M = 50$ kg) et son ami Daniel ($m_D = 70$ kg) sont reliés par une corde de masse négligeable. Elle est debout et marche sans frottement sur une plaque horizontale de glace mouillée quand son ami tombe d'une falaise (figure 4.5). La corde passe sans frottement sur une branche d'arbre. Nous supposons que la partie de la corde vers la fille est horizontale. Déterminez: (a) la tension dans la corde et (b) les accélérations des deux personnes.

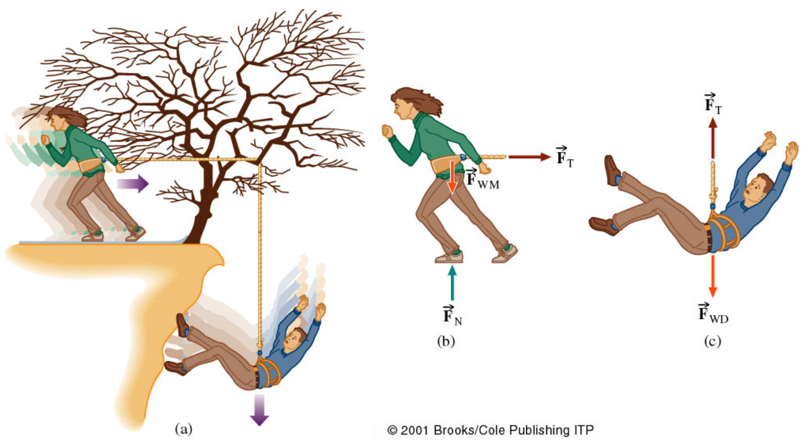



Figure 4.5: (a) La fille glissant sur la grace, après la chute de son ami de la falaise. Représentation de corps isolé pour (b) la fille et (c) le garçon.

**Solution** Commençons par la représentation du corps isolé pour chaque personne. Tant que la corde ne se détend pas, $a_M = a_D \equiv a$. Comme le garçon est plus lourd que la fille, l'expérience nous dit que le mouvement ira de Marie vers Daniel. Pour elle, la direction vers la droite sera positive. Pour lui, elle sera positive vers le bas. On a deux inconnues, $F_T$ et $a$. Nous avons donc besoin de deux équations. Le poids de Marie est compensé par le sol, elle n'a qu'un mouvement horizontal. Daniel ne subit pas de force horizontale et son mouvement est purement vertical.

Appliquons la deuxième loi de Newton au mouvement horizontal et au mouvement vertical:

$$\sum F_{horiz} = F_T = m_M a$$

$$\sum F_{vert} = F_{WD} - F_T = m_D a$$

En substituant $F_T$ de la première équation dans la deuxième équation et sachant que $F_{WD} = m_D g$, on prend:

$$F_{WD} - m_M a = m_D g - m_M a = m_D a \Rightarrow a = \frac{m_D}{m_D + m_M} g$$

$$F_T = m_M a = \frac{m_M m_D}{m_M + m_D} g$$

soit $a = 0.58g$ et $F_T = 0.29$ kN.

◀

## Exercices

**Exercice 4.1.** Une étudiante de masse 40 kg est debout à l'intérieur d'un ascenseur sur un pèse-personne qui indique le poids en newtons. Quel poids est indiqué (a) si l'ascenseur est au repos et (b) si l'ascenseur a une accélération ascendante égale à la moitié de l'accélération de la pesanteur ($a = \frac{1}{2}g$)?

**Exercice 4.2.** Jeanne, une étudiante de 50 kg est sauvée d'un immeuble en flammes par un hélicoptère de la police. Elle est attachée à une corde sous l'hélicoptère. Calculez la tension de la corde (a) lorsque l'hélicoptère vole à vitesse constante et (b) lorsque l'hélicoptère accélère droit vers le sol à 3 m/s$^2$.

**Exercice 4.3.** En 1784, George Atwood a publié la description d'un dispositif pour "diluer" l'effet de la pesanteur, facilitant ainsi la détermination de $g$. La figure 4.4a illustre cet appareil: deux masses sont attachées aux extrémités d'une corde de masse négligeable qui passe dans la gorge d'une poulie de masse et de frottement négligeable. Montrez que, si $m_2 > m_1$, les deux masses ont une accélération:

$$a = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_2 + m_1)} g$$

Montrer que la tension de la corde est:

$$F_T = \frac{2 m_1 m_2}{m_2 + m_1} g$$

Quelle est la valeur de $a$ si $m_2 = 2m_1$? Dans quelle conditions $a$ est nulle? Déterminer $a$ si $m_2 \gg m_1$.