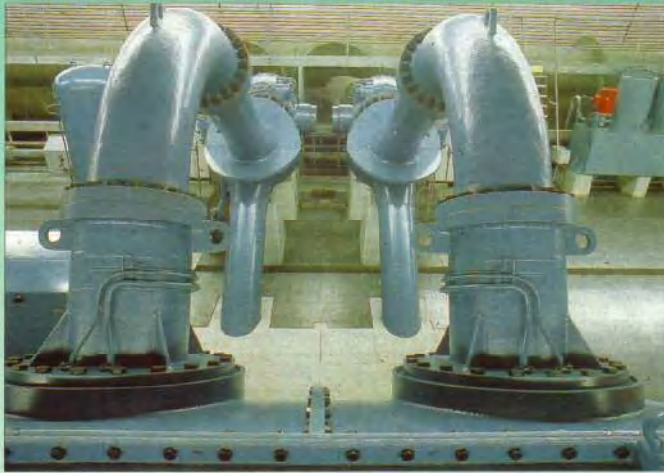


# MÉCANIQUE



## Chapitre 4. Les forces

Quand on parle de force, la première idée qui vient à l'esprit est notre force musculaire. D'autres types de forces cependant existent dans la nature pour assurer par exemple la cohésion d'un atome ou celle du système solaire.

### 1 Définition

Grâce à notre force musculaire, nous pouvons:

- modifier le mouvement d'un corps
- déformer un corps.

On désignera plus généralement par le mot **force** toute cause capable de déformer un corps ou de modifier son mouvement.



Modification du mouvement ou déformation d'un corps.

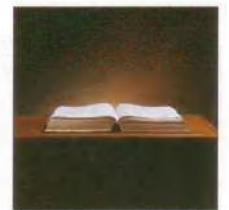
### 2 Quelques exemples de forces



La force de pesanteur.



La force musculaire.



La force de réaction de la table qui retient le livre.



La force de frottement qui empêche le soulier de glisser.



La tension d'un câble.



La force pressante du vent sur les voiles.



La force d'Archimède qui soutient la nageuse.



La force élastique de l'arc qui propulse la flèche.



La force d'interaction électrique qui retient les cheveux contre la brosse.



La force d'interaction magnétique qui retient les clous contre l'aimant.

### 3 Les caractéristiques d'une force

Pour connaître complètement une force et prévoir son effet, il est indispensable de préciser:

- sa **direction** suivant laquelle elle s'applique (horizontalement, verticalement,...); cette direction est représentée par une droite appelée **droite d'action**
- son **sens** (de haut en bas, de bas en haut, de gauche à droite, de droite à gauche,...)
- son **point d'application**
- son **intensité**.

Ces quatre éléments constituent les **caractéristiques** d'une force.

Une force est dite **constante** si aucune de ses quatre caractéristiques ne change durant tout le temps pendant lequel elle agit. La force qu'il faut exercer pour pousser une voiture en panne, le long d'une route horizontale, n'est pas constante: au moment du démarrage elle est très intense puis elle diminue au fur et à mesure que le mouvement s'établit. Les situations examinées dans la suite ne feront intervenir que des forces constantes.

Deux forces sont dites **opposées** si elles ont la même droite d'action et la même intensité, mais des sens opposés.

### 4 L'unité de mesure

L'intensité d'une force s'exprime en newtons [N]. Pour fixer les idées, précisons que lorsque nous portons une livre de pain, nous exerçons une force d'environ 5 N alors que pour se maintenir pendu à bout de bras à une barre, il faut une force variant entre 500 et 1000 N suivant les individus.

### 5 Les ressorts et les dynamomètres

Pour mesurer l'intensité d'une force, on utilise un ressort: son allongement **d** est proportionnel à l'intensité **F** de la force



Dynamomètre.



appliquée. (Si l'intensité de la force double, l'allongement double aussi).

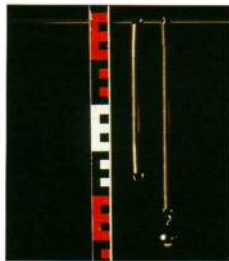
Cette propriété se traduit algébriquement par :

$$\frac{F}{d} = k \text{ ou } F = k \cdot d$$

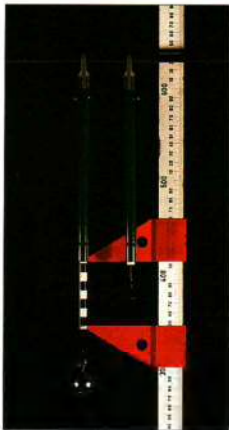
Le nombre  $k$ , exprimé en  $[N \cdot m^{-1}]$  si la force est en  $[N]$  et l'allongement en  $[m]$ , est la raideur du ressort utilisé. Sa valeur représente le «nombre de newtons» qu'il faut appliquer au ressort pour l'allonger de 1m. Les ressorts se déformant facilement ont une raideur faible alors que les ressorts difficiles à étirer ou à comprimer ont une raideur élevée.

Une trop grande déformation du ressort peut détruire ses propriétés élastiques: sa déformation reste alors permanente. Un ressort utilisé dans de telles circonstances ne permet évidemment pas de mesurer correctement l'intensité d'une force.

Dans la pratique, on utilise des **dynamomètres**, constitués d'un ressort et munis d'une graduation en  $[N]$ .



Déformation d'un ressort.



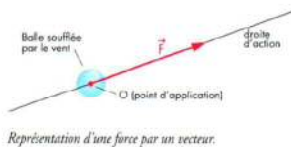
Dynamomètre.

## 6 Représentation d'une force

Une force est représentée par un **vecteur** (flèche) dans lequel on retrouve ses quatre caractéristiques. L'intensité de la force étant indiquée par la longueur du vecteur, le dessin devra être accompagné d'une échelle.

### Notations

- Le symbole utilisé pour désigner une force est une lettre majuscule surmontée d'une flèche; exemple:  $\vec{F}$
- La même lettre sans la flèche ne désigne que l'intensité de la force; exemple:  $F = 50 \text{ N}$



Représentation d'une force par un vecteur.

## 9 Forces de frottement entre solides

Pour simplifier la lecture des schémas, le point d'application de chaque force est ramené au centre de gravité de l'objet considéré.

### Frottement statique

On considère un solide au repos sur une surface horizontale.

Il est soumis à deux forces extérieures opposées:

- sa force de pesanteur  $\vec{F}_p$ ;
- la force de réaction  $\vec{F}_n$ , normale à la surface.

Si l'on tire l'objet avec une force  $\vec{F}$  parallèle à la surface, on constate que le solide reste au repos tant que l'intensité de  $F$  est inférieure à une certaine valeur limite.

Il existe dans ce cas une force de frottement  $\vec{F}_f$  opposée à  $\vec{F}$ .

Lorsque l'intensité de  $\vec{F}$  atteint une valeur limite, il y a imminence de glissement; la force de frottement est maximale:  $\vec{F}_{f \text{ max}}$ .

L'intensité maximale de la force de frottement :

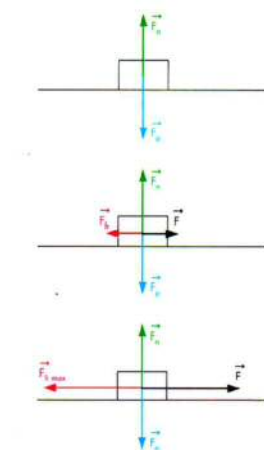
- est proportionnelle à l'intensité  $F_n$  de la réaction normale à la surface:

$$\mu_s = \frac{F_{f \text{ max}}}{F_n} \text{ ou } F_{f \text{ max}} = \mu_s \cdot F_n$$

( $\mu_s$  est le coefficient de frottement statique);

- dépend de la nature des surfaces de contact;
- est indépendante de la dimension de la surface de contact.

Ces propriétés constituent les lois empiriques de Coulomb relatives au frottement statique. La valeur du coefficient  $\mu_s$  dépend de la nature des surfaces en contact (le tableau indique des valeurs approximatives).



Corps en contact	$\mu_s$
bois sur bois	0,25 - 0,7
bois sur fonte	0,6
acier sur acier	0,15
pneu sur route sèche	0,6 - 1,0
pneu sur route humide	0,6
cuir sur fonte	0,4
cuir sur bois	0,5

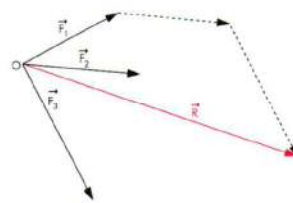
## 7 Forces concourantes

Plusieurs forces peuvent agir simultanément sur un corps. Ces forces sont **concourantes** si leurs droites d'action se coupent en un même point.

On nomme **résultante** la force qui aurait sur le corps le même effet que l'ensemble des forces concourantes.

Si toutes les forces ont même point d'application, on construit graphiquement leur résultante en amenant tous les vecteurs bout à bout par des translations.

La résultante est donc une force fictive par laquelle on pourrait remplacer les forces existant réellement sans que l'on puisse constater une différence de comportement du corps sur lequel elles s'appliquent.



Résultante de trois forces.

## 8 Force et mouvement

L'effet d'une force sur le mouvement d'un corps est d'en modifier la vitesse.

Si la **résultante des forces agissant sur un corps n'est pas nulle**, ce corps subit une **variation de vitesse**.

Si cette **résultante est nulle**, la **vitesse du corps reste constante**.

Lorsqu'un corps se déplace à **vitesse constante**, on dit qu'il est à l'**équilibre**; cette définition englobe le cas du repos pour lequel la vitesse est nulle.

### Exemple

Un parachutiste saute d'un avion et ouvre son parachute. Au début, la force de frottement de l'air n'est pas suffisante pour compenser la force de pesanteur. La résultante de ces forces n'est pas nulle et la vitesse de chute augmente.

L'intensité de la force de frottement augmente avec la vitesse jusqu'à atteindre la valeur de la force de pesanteur. Dès cet instant, leur résultante est nulle et la vitesse de chute reste constante.



### Frottement cinétique ou dynamique

Si le corps est en mouvement par rapport à la surface, on parle de frottement cinétique ou dynamique. La force de frottement cinétique  $\vec{F}_{f \text{ cin}}$  satisfait les propriétés décrites ci-dessous.

Son intensité :

- est proportionnelle à l'intensité  $F_n$  de la réaction normale à la surface:

$$\mu = \frac{F_{f \text{ cin}}}{F_n} \text{ ou } F_{f \text{ cin}} = \mu \cdot F_n$$

- dépend de la nature des surfaces de contact;
- est indépendante de la dimension de la surface de contact;
- est pratiquement indépendante de la vitesse du mouvement.

Ces propriétés constituent les lois empiriques de Coulomb relatives au frottement cinétique. Le facteur de proportionnalité  $\mu$  est le coefficient de frottement cinétique; sa valeur dépend de la nature des surfaces en contact (le tableau indique des valeurs approximatives).

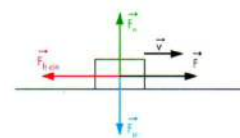
En général:  $\mu < \mu_s$ ; ce n'est pas le cas du cuir sur la fonte. Pour cette raison, on a utilisé des courroies de cuir sur des poulies de fonte dans des mécanismes de transmission.

### Le cas d'un solide sur un plan incliné

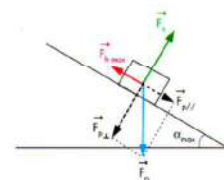
Un solide de masse  $m$  est initialement posé sur un plan horizontal. On incline ce plan en soulevant l'une de ses extrémités. Le corps reste immobile sur le plan incliné jusqu'à une certaine valeur maximale de l'angle d'inclinaison:  $\alpha_{\text{max}}$ .

Pour cet angle limite, le corps est soumis aux forces suivantes:

- sa force de pesanteur  $\vec{F}_p$  que l'on décompose en  $\vec{F}_{p \parallel}$  et  $\vec{F}_{p \perp}$ ;
- la force de réaction normale au plan incliné  $\vec{F}_n$ ;
- la force de frottement statique  $\vec{F}_{f \text{ max}}$  telle que  $F_{f \text{ max}} = \mu_s \cdot F_n$  où  $\mu_s$  est le coefficient de frottement statique.



Corps en contact	$\mu$	$\mu_s$
bois sur bois	0,2 - 0,6	0,25 - 0,7
bois sur fonte	0,5	0,6
acier sur acier	0,12	0,15
pneu sur route sèche	0,6	0,6 - 1,0
pneu sur route humide	0,3 - 0,5	0,6
cuir sur fonte	0,44	0,4
cuir sur bois	0,4	0,5



Or,  $F_{f, \max} = F_{p, \max} = m \cdot g \cdot \sin \alpha_{\max}$  et  $F_n = F_{p, \max} = m \cdot g \cdot \cos \alpha_{\max}$ .

Donc :  $m \cdot g \cdot \sin \alpha_{\max} = \mu_0 \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha_{\max}$   
et par suite  $\tan \alpha_{\max} = \mu_0$ .

L'angle maximal d'inclinaison pour que le corps reste immobile est donné par:  
 $\tan \alpha_{\max} = \mu_0$

Si l'on augmente encore l'angle d'inclinaison  $\alpha$ , le corps glisse le long du plan incliné avec une accélération  $a$ .

Dans ce cas, l'intensité de la force de frottement est donnée par:

$$F_{fi} = \mu \cdot F_n$$

où  $\mu$  est le coefficient de frottement cinétique.

La force de frottement étant moins intense que  $F_{p, \max}$ , la résultante des forces agissant le long du plan incliné est orientée vers le bas. Son intensité vaut:

$$F_{rés} = F_{p, \max} - F_{fi} = m \cdot g \cdot \sin \alpha - \mu \cdot F_n =$$

$$m \cdot g \cdot \sin \alpha - \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha =$$

$$m \cdot g \cdot (\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha).$$

On en déduit l'accélération  $a$  du corps (voir chapitre « Dynamique »):

$$a = \frac{F_{rés}}{m} = g \cdot (\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha)$$

**E**  
EXERCICES

1 Quel personnage doit tirer son chariot avec la force de plus grande intensité ?



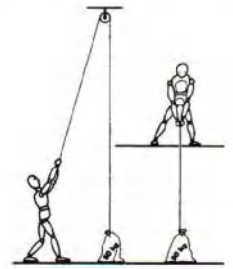
2 Que se passe-t-il lorsque le doigt libère la poulie ?



3 Que se passe-t-il lorsqu'on lâche la masse ?



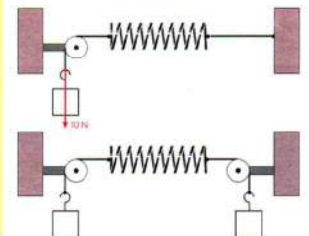
4 Quel personnage doit exercer la plus grande force sur la corde pour hisser le sac ?



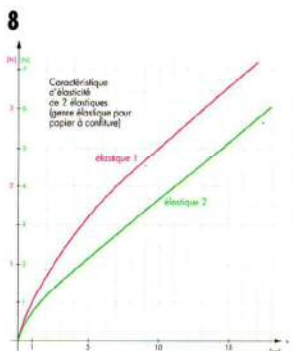
5 Un aimant attire une bille qui roule vers lui.  
a) Est-il juste de dire que la bille attire l'aimant ?  
b) Comment le vérifier ?

6 Dans les deux dessins ci-dessous, il s'agit du même ressort.

Dans le premier cas, une extrémité du ressort est accrochée à un mur. La masse suspendue à son autre extrémité par l'intermédiaire d'une poulie tire sur le ressort avec une force de pesanteur dont l'intensité vaut 10 N.  
Dans le second cas, on a mis le ressort en équilibre en suspendant, par l'intermédiaire de poulies, une masse à chacune de ses extrémités. Indiquer sur le dessin l'intensité de la force de pesanteur que doivent avoir chacune de ces masses de manière à ce que l'allongement du ressort soit le même que dans le premier cas.



7 Deux personnes tirent en sens contraire sur chaque extrémité d'un dynamomètre. Chacune exerce une force d'intensité égale à 300 N. Quelle est l'intensité indiquée par ce dynamomètre ?



- Y a-t-il proportionnalité entre l'intensité de la force et l'allongement de l'élastique ?
- Déterminer pour chaque élastique l'intensité de la force provoquant un allongement de 2 cm.
- Même question pour un allongement de 4 cm.
- Déterminer pour chaque élastique l'allongement correspondant à une force d'intensité 1 N; 2 N; 3 N.

9 Le ressort d'un tampon de wagon de chemin de fer se comprime de 0,08 m lorsqu'il subit une poussée d'intensité 16 kN. Quelle est la raideur de ce ressort ?



**E**  
EXERCICES

10 Un ressort s'allonge de 200 mm lorsqu'on lui applique une traction dont l'intensité vaut 10 N.

- Quelle est l'intensité d'une traction qui provoque un allongement de 96 mm ?
- Quel est l'allongement de ce ressort quand on lui applique une traction d'intensité 7,5 N ?

11 L'intensité du frottement de l'air sur une voiture est proportionnelle au carré de la vitesse de cette voiture.

Le facteur de proportionnalité dépend de la forme plus ou moins aérodynamique de la voiture.

Pour les voitures courantes, ce facteur est d'environ  $0,60 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ .

Que vaut l'intensité du frottement de l'air sur une telle voiture quand elle roule:

- à  $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 8,33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- à  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 16,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- à  $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 25,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- à  $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 33,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

12 Un objet dont l'intensité de sa force de pesanteur vaut 0,3 N est suspendu au moyen d'un fil.

Dessiner sur une figure les forces s'exerçant au point A.

Note: Utiliser une échelle faisant correspondre 0,01 N à 1 mm.



13 Une balle est posée sur une table. L'intensité de sa force de pesanteur vaut 2 N.

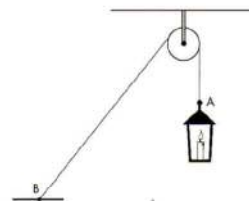
Dessiner la force de pesanteur de la balle et la réaction exercée par la table.

Note: Utiliser une échelle faisant correspondre 0,1 N à 1 mm.



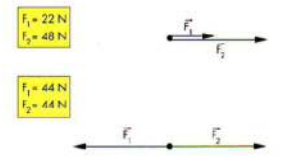
**E**  
EXERCICES

14 Une lanterne de 3 kg est suspendue à une corde qui, après avoir passé sur une poulie, est attachée au sol.



Dessiner, sur la figure, toutes les forces s'exerçant sur les extrémités A et B de la corde.

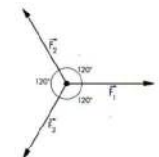
15 a) Déterminer graphiquement la résultante  $\vec{F}$  des forces  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  pour chaque situation représentée sur les figures.  
b) Citer le(s) cas d'équilibre (justifier).



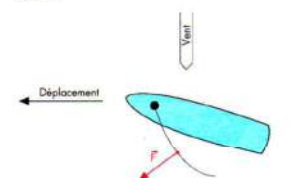
16 Que peut-on dire de la résultante de deux forces opposées ?

17 Construire la résultante de 3 forces ayant même point d'application et des directions différentes.

18 3 forces de même intensité sont disposées comme sur la figure. Déterminer graphiquement leur résultante.



19 Ce voilier, que l'on voit depuis dessus, se déplace dans une direction perpendiculaire au vent. Le vent est dévié par la voile et exerce sur celle-ci une force  $\vec{F}$ .



Comment se fait-il que le bateau ne se déplace pas dans la direction de la force  $\vec{F}$  ?



# Corrigé des exercices

## Les forces Exercice 1

Pour obtenir la même force utile (parallèle à la direction du déplacement) l'intensité de la force de traction doit être d'autant plus grande que l'angle avec la direction du déplacement est grand. L'intensité de la force de traction de la ficelle doit être plus grande dans la photo du bas.

## Les forces Exercice 2

La force de pesanteur de la masse de droite étant plus intense que celle de la masse de gauche, la masse de gauche va monter, celle de droite va descendre et la poulie va tourner dans le sens des aiguilles d'une montre.

## Les forces Exercice 3

La masse tombe (accélère en direction du centre de la Terre) sous l'action de sa force de pesanteur.

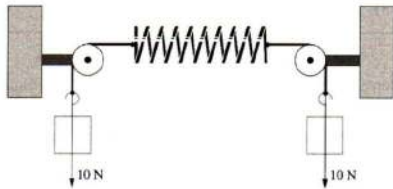
## Les forces Exercice 4

La force sera de même intensité puisque les sacs sont de même masse (on ne tient pas compte de l'influence des cordes et des frottements). Cependant, la position de l'image de gauche sera plus confortable, moins pénible et moins dangereuse pour le dos.

## Les forces Exercice 5

- La bille attire l'aimant avec une force de même intensité.
- On peut le vérifier en posant l'aimant sur un chariot et en approchant la bille tenue dans la main.

## Les forces Exercice 6

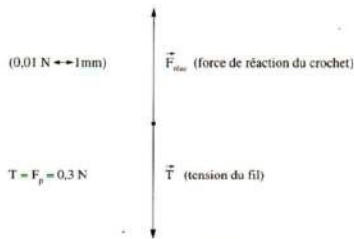


Pour maintenir l'équilibre du montage, le mur devait exercer une force de réaction égale à la force de pesanteur de la masse. Ici, cette réaction du mur est remplacée par une force de pesanteur d'intensité égale.

Un ressort tendu en équilibre subit à ses extrémités deux forces opposées (d'intensité égale).

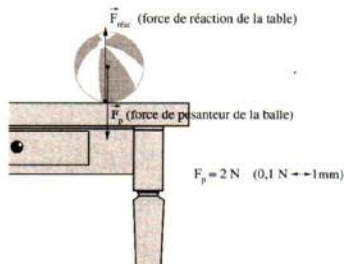
## Les forces Exercice 12

Pour un objet dont l'intensité de la force de pesanteur vaut 0,3 N, on obtient le schéma suivant:



## Les forces Exercice 13

Pour une balle dont l'intensité de la force de pesanteur vaut 2 N, on obtient le schéma suivant:



## Les forces Exercice 7

Le dynamomètre est en équilibre, il indique 300 newtons.

## Les forces Exercice 8

- Les relations de proportionnalité ont une représentation graphique qui se traduit par une droite passant par l'origine. Ce n'est pas le cas!
- Elastique n° 1: environ 0,9 N.  
Elastique n° 2: environ 1,2 N
- Elastique n° 1: environ 1,4 N.  
Elastique n° 2: environ 1,9 N
- Allongement approximatif
 

	Pour 1 N	Pour 2 N	Pour 3 N
Elastique n° 1:	2,5 cm	7 cm	13,1 cm
Elastique n° 2:	1,5 cm	4,5 cm	7,8 cm

## Les forces Exercice 9

$$k = \frac{F}{d} = \frac{16\,000\text{ N}}{0,08\text{ m}} = 2 \cdot 10^5\text{ N/m}$$

La raideur de ce ressort vaut environ 200 000 newtons par mètre ou 200 N/mm.

## Les forces Exercice 10

$$\text{Raideur du ressort: } k = \frac{F}{d} = \frac{10\text{ N}}{0,2\text{ m}} = 50\text{ N/m} = 0,05\text{ N/mm}$$

$$a) k = \frac{F}{d} \Rightarrow F = k \cdot d = 0,05\text{ N/mm} \cdot 96\text{ mm} = 4,8\text{ N}$$

Il faut une force de 4,8 N pour provoquer un allongement de 96 mm.

$$b) k = \frac{F'}{d'} \Rightarrow d' = \frac{F'}{k} = \frac{7,5\text{ N}}{0,05\text{ N/mm}} = 150\text{ mm}$$

Une force de 7,5 N provoque un allongement de 150 mm.

## Les forces Exercice 11

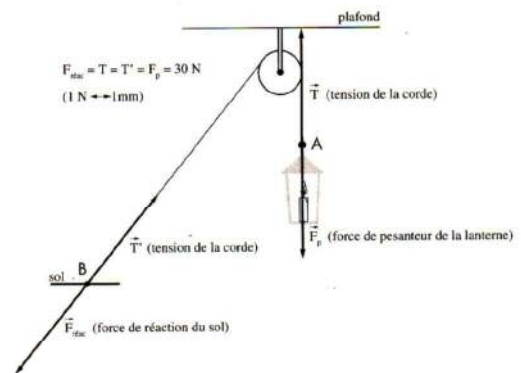
L'intensité  $F$  de la force de frottement de l'air sur une voiture est proportionnelle au carré de la vitesse ( $v^2$ ). Le facteur de proportionnalité  $k$  vaut dans le cas présent  $0,60\text{ N}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-2}$ .

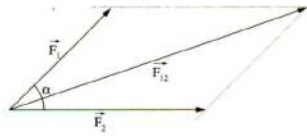
Cela peut s'écrire aussi:  $\frac{F}{v^2} = k \Rightarrow F = v^2 \cdot k = v^2 \cdot 0,6$  (dans le cas présent)

- Intensité de la force de frottement de l'air à  $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ :  $(8,33\text{ m}\cdot\text{s}^{-1})^2 \cdot 0,6\text{ N}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-2} = 41,6\text{ N}$
- Intensité de la force de frottement de l'air à  $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ :  $(16,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1})^2 \cdot 0,6\text{ N}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-2} = 167\text{ N}$
- Intensité de la force de frottement de l'air à  $90\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ :  $(25,0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1})^2 \cdot 0,6\text{ N}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-2} = 375\text{ N}$
- Intensité de la force de frottement de l'air à  $120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ :  $(33,3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1})^2 \cdot 0,6\text{ N}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-2} = 665\text{ N}$

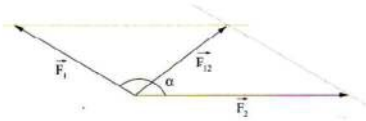
Nous pouvons comprendre pourquoi la consommation d'essence d'une voiture augmente considérablement avec la vitesse.

## Les forces Exercice 14

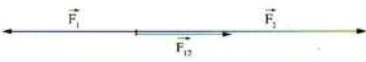




$F_1 = 34 \text{ N}$   
 $F_2 = 46 \text{ N}$   
 $\alpha = 45^\circ$   
 $\vec{F}_{12} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$   
 $F_{12} = 74 \text{ N}$



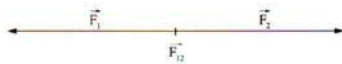
$F_1 = 36 \text{ N}$   
 $F_2 = 56 \text{ N}$   
 $\alpha = 150^\circ$   
 $\vec{F}_{12} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$   
 $F_{12} = 30 \text{ N}$



$F_1 = 35 \text{ N}$   
 $F_2 = 60 \text{ N}$   
 $\alpha = 180^\circ$   
 $\vec{F}_{12} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$   
 $F_{12} = 25 \text{ N}$



$F_1 = 22 \text{ N}$   
 $F_2 = 48 \text{ N}$   
 $\alpha = 0^\circ$   
 $\vec{F}_{12} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$   
 $F_{12} = 70 \text{ N}$



$F_1 = 44 \text{ N}$   
 $F_2 = 44 \text{ N}$   
 $\alpha = 180^\circ$   
 $\vec{F}_{12} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \text{force nulle}$   
 $F_{12} = 0 \text{ N}$

Un système est en équilibre lorsque la somme des forces qu'il subit est nulle.

Le dernier schéma est le seul qui représente un système en équilibre.

La résultante de deux forces opposées est nulle.

## Chapitre 5. La force de pesanteur et la gravitation universelle

Tous les corps tombent les uns sur les autres. En particulier, tout corps lâché au voisinage de la Terre, sauf cas particulier, tombe au sol. La Terre et le corps s'attirent mutuellement. On ne remarque que la chute du corps vers la Terre, car la masse de ce dernier est beaucoup plus faible que celle de la Terre. Ce phénomène d'attraction s'appelle force de pesanteur exercée par la Terre sur le corps.

### 1 Caractéristiques de la force de pesanteur

#### La verticale

La direction de la force de pesanteur, vers le centre de la Terre, définit la **verticale**.

#### EXPERIENCE

Un corps attaché à un fil est en équilibre. Par définition, la direction prise par le fil tendu est une verticale.

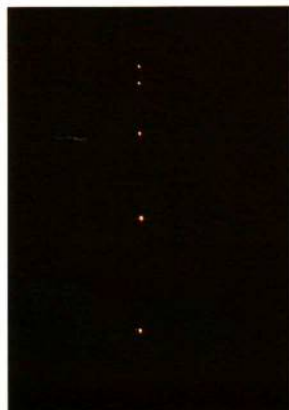
Si on coupe le fil, le corps tombe en suivant la verticale ainsi définie.

Qu'il y ait mouvement ou équilibre, la force de pesanteur s'exerce toujours verticalement vers le bas.

Dans la vie courante, on se sert d'un fil à plomb pour matérialiser la verticale.

#### Le centre de gravité

Le point d'application de la force de pesanteur est nécessairement situé sur la verticale du point de suspension d'un corps à l'équilibre. Recherchons sa position.



Mise en évidence de la droite d'action de la force de pesanteur par la chute d'une bille.

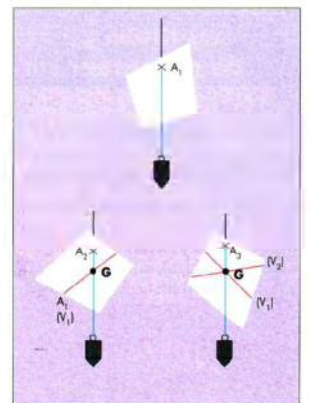
#### EXPERIENCE

On utilise une plaque de carton mince, de forme quelconque que l'on suspend par un fil en un point. Tracer la verticale ( $V_1$ ) du point de suspension  $A_1$  sur le carton. Changer de point de suspension et tracer la verticale ( $V_2$ ). On vérifie que la verticale ( $V_2$ ) obtenue à partir d'un troisième point de suspension  $A_3$  passe par ce point.

La force de pesanteur s'applique à l'intersection de ( $V_1$ ) et ( $V_2$ ). On vérifie que la verticale ( $V_3$ ) obtenue à partir d'un troisième point de suspension  $A_3$  passe par ce point.

Par convention, le point d'un corps où s'applique la force de pesanteur s'appelle le **centre de gravité** (noté  $G$ ). Le centre de gravité est aussi appelé centre de masse.

Remarque: L'attraction de la Terre s'exerce sur tous les particules composant l'objet. On fait cependant comme si toute la matière était concentrée au centre de masse et tout se passe comme si la force de pesanteur y était localisée.



Recherche du centre de gravité.

### L'intensité de la force de pesanteur

#### EXPERIENCE

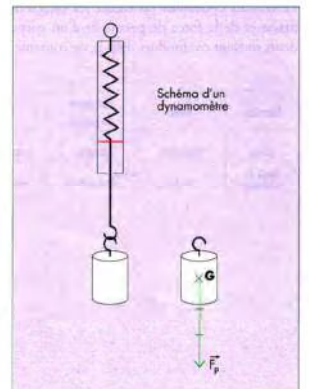
Accrocher un objet à un dynamomètre et attendre qu'il s'immobilise; la valeur indiquée par l'échelle du dynamomètre représente l'intensité de la force de pesanteur de l'objet suspendu.

La force de pesanteur d'un corps se mesure avec un dynamomètre. Elle s'exprime en newtons [N].

### 2 Représentation de la force de pesanteur

La force de pesanteur, notée  $\vec{F}_p$ , a les caractéristiques suivantes:

- **Direction**: la verticale passant par le centre de gravité  $G$ .
- **Intensité**: la valeur indiquée sur le dynamomètre.
- **Sens**: de haut en bas.
- **Point d'application**: le centre de gravité  $G$ .

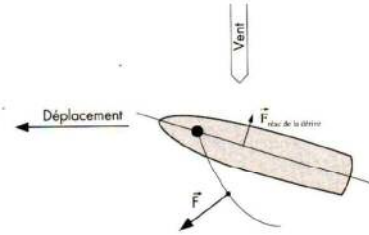


Schématisme de l'expérience et représentation vectorielle de la force de pesanteur.

Il n'y a pas de corrigé pour cet exercice.

Leur résultante est nulle.

Si le fond du bateau était plat, il se déplacerait effectivement dans la direction de la force  $\vec{F}$ .



La dérive du bateau exerce une force de réaction ( $\vec{F}_{\text{réac de la dérive}}$ ) perpendiculaire à l'axe du bateau du côté d'où vient le vent. La composition de ces deux forces donne une résultante qui a la même direction que le déplacement.



### 3 Variations de la force de pesanteur sur Terre

Des mesures précises ont montré que l'intensité de la force de pesanteur d'un corps varie très peu lorsqu'on le transporte en différents endroits sur la Terre.

Il varie toutefois de quelques millièmes avec la latitude et avec l'altitude.

Ces fluctuations, dues essentiellement à la vitesse de rotation de la Terre sur elle-même et à sa forme non sphérique, peuvent en général être négligées.



Variation de la force de pesanteur d'un corps sur Terre.  
Lagos 6° 27'N  $F_p = 100,00\text{ N}$   
Genève 46° 10'N  $F_p = 100,25\text{ N}$   
Ballon (altitude: 10000 m)  $F_p = 99,95\text{ N}$

### 4 Force de pesanteur et masse

Le tableau ci-dessous rassemble les caractéristiques de la masse et de la force de pesanteur d'un corps, deux grandeurs souvent confondues dans la vie courante.

Grandeur	Unité	Instrument de mesure	Propriété
Masse	kilogramme	balance	invariable avec le lieu
Force de pesanteur	newton	dynamomètre	variable avec le lieu

### 6 Gravitation universelle

Si nous ressentons fortement l'attraction de la Terre par notre force de pesanteur, nous devons à Newton d'avoir découvert le fait que tous les corps s'attirent mutuellement, même si l'effet de cette attraction est souvent trop faible pour être observé.

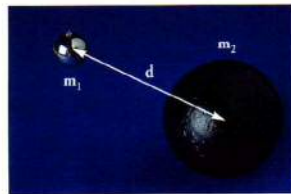
Deux corps quelconques s'attirent mutuellement; la force exercée par chacun des deux corps sur l'autre est telle que:

- sa direction est donnée par la droite reliant les centres de gravité des deux corps;
- son sens est toujours celui d'une attraction;
- son point d'application est le centre de gravité du corps;
- son intensité est:
  - proportionnelle aux masses  $m_1$  et  $m_2$  des corps en présence;
  - inversement proportionnelle au carré de la distance  $d$  entre leurs centres de gravité.

$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

Pour que cette relation soit valable, il faut que la distance séparant les deux corps soit grande par rapport à leur taille, ou que leur forme soit sphérique.

La constante de proportionnalité  $G$  s'appelle **constante de gravitation universelle**.



#### Détermination de G

L'intensité  $F$  de la force d'attraction entre deux objets étant très petite, il a fallu recourir à des expériences complexes pour la mesurer (voir étude de documents); connaissant cette intensité, on a pu ensuite calculer la valeur de  $G$  et l'on a obtenu:

$$G = \frac{F \cdot d^2}{m_1 \cdot m_2} = 6,67 \cdot 10^{-11} [\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}]$$

Ainsi la force d'attraction entre deux objets de 1 kg distants de 1 m a une intensité de  $6,67 \cdot 10^{-11}$  N. L'effet d'une force de si petite intensité est imperceptible.

### EXPERIENCE

Mesurer avec un dynamomètre la force de pesanteur de différents objets de masse connue.

Masse [kg]	0,5	1	2	3	4	5
Force de pesanteur [N]	5	10	20	30	40	50
$F_p$ / $m$ [ $\frac{\text{N}}{\text{kg}}$ ]	10	10	10	10	10	10

On constate que la force de pesanteur est proportionnelle à la masse. Le coefficient de proportionnalité, que l'on nomme gravitation terrestre ( $g_{\text{Terre}}$ ), a une valeur voisine de 10. En réalité, la valeur de 9,8 est plus convenable, comme le montreraient des mesures plus précises.

Les variations de la force de pesanteur avec le lieu étant faibles, on admet que:

Sur Terre, l'intensité de la force de pesanteur  $F_p$  d'un corps est liée à sa masse par la relation

$$F_p = m \cdot g_{\text{Terre}} \text{ où } g_{\text{Terre}} = 9,8 \left[ \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right]$$



Mesure de l'intensité de la force de pesanteur d'un corps à l'aide d'un dynamomètre rotatif.

### 5 Variations de la force de pesanteur sur différentes planètes

Si l'intensité de la force de pesanteur d'un corps ne varie que faiblement d'un endroit à l'autre sur Terre, elle varie par contre fortement si on le transporte sur la Lune ou sur une autre planète. Le tableau ci-dessous donne l'intensité de la force de pesanteur d'un objet de 1 kg:

sur Terre	sur la Lune	sur Jupiter	sur Mars
9,8 N	1,6 N	22,5 N	3,7 N

Valeur de la gravitation  $g$  en [ $\frac{\text{N}}{\text{kg}}$ ] sur différentes planètes:

Mercury	Terre	Jupiter	Uranus	Pluton
3,8	9,8	22,9	7,8	0,63
Vénus	Mars	Saturne	Néptune	Lune
8,6	3,7	9,1	11,0	1,6

#### Le cas particulier de la force de pesanteur

La force de pesanteur est un cas particulier de l'attraction universelle: l'un des objets en cause est une planète dont la très grande masse provoque une attraction suffisante pour être mesurable. La force de pesanteur d'un corps peut s'exprimer par:

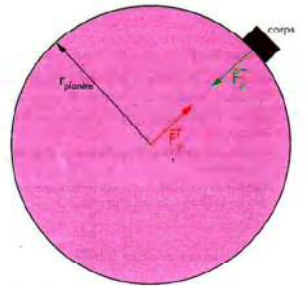
$$F'_p = F_p = \frac{m_{\text{corps}} \cdot m_{\text{planète}}}{r_{\text{planète}}^2} \cdot G$$

en définissant

$$g_{\text{planète}} = \frac{m_{\text{planète}}}{r_{\text{planète}}^2} \cdot G$$

on obtient la relation

$$F_p = m_{\text{corps}} \cdot g_{\text{planète}}$$



Force de pesanteur.





**1 Vrai ou faux ?**

- La direction de la force de pesanteur est verticale.
- Un dynamomètre est un générateur électrique.
- La force de pesanteur peut se représenter par une flèche.
- La force de pesanteur d'un corps s'exprime en kilogrammes.
- La force de pesanteur d'un corps ne varie que très peu sur la Terre, d'un lieu à un autre.

**2** Rappeler les caractéristiques de la force de pesanteur.

**3** Rechercher dans un dictionnaire l'origine du mot «gravité».

**4** Quelles précautions faut-il prendre lors de l'utilisation d'un dynamomètre ?

**5 Centre de gravité**

Découper un triangle quelconque dans un morceau de carton et déterminer expérimentalement son centre de gravité.  
Sur l'autre face, tracer les médianes du triangle et piquer une épingle en leur point de concours. Conclure.  
Déterminer expérimentalement le centre de gravité d'une forme quelconque.

**6 Balance ou dynamomètre ?**

Un pêcheur est souvent une «balance à ressort».  
Il est gradué en kilogrammes. Que mesure-t-il en réalité ?

**7 Chute des corps dans l'air et dans le vide**

Prendre deux feuilles de papier identiques et froisser l'une d'entre elles en boule. Les lâcher simultanément de la même hauteur.  
a) Décrire leur chute.  
b) Imaginer ce qui se passerait si la même expérience était réalisée sur la Lune.

**8 Variation de la force de pesanteur**

On réalise, à Lausanne, un équilibre sur une balance entre un objet et des masses marquées. L'ensemble est mis dans la nacelle d'un ballon qui atteint son plafond vers 10000 m; ensuite, il est transporté à l'Équateur, au niveau de la mer.  
Observe-t-on, à chaque fois, une modification de l'équilibre ? Pourquoi ?  
Qu'observerait-on si l'objet était accroché à un dynamomètre sensible ?

**9 Bon sens ou paradoxe ?**

Avec l'une des méthodes déjà rencontrées, déterminer le centre de gravité d'une plaque de carton évidée dans sa partie centrale.  
Quel résultat paradoxal obtient-on ?

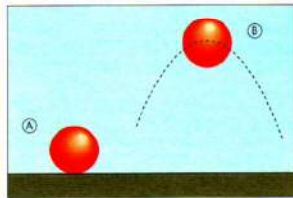
**10** Le dessin A montre un cube de ciment posé sur une face. Le dessin B montre le même cube en équilibre (instable) sur une arête.

Ajouter à ces dessins des vecteurs qui représentent la force de pesanteur du cube.



**11** Le dessin A montre un ballon de jeu posé au sol. Le dessin B montre le même ballon, lancé en l'air, au sommet de la trajectoire représentée en pointillé.

Ajouter à ces dessins des vecteurs qui représentent la force de pesanteur du ballon.



**ÉTUDE DE DOCUMENTS**

**21 La force de gravitation**

Depuis l'Antiquité, de nombreux savants ou philosophes ont échauffé des théories sur la structure du monde dans lequel nous vivons. Chez les Grecs, deux théories principales furent élaborées :



— conception **géocentrique**, dans laquelle la Terre est le centre de l'Univers, le Soleil, la Lune, les planètes et les étoiles tournant autour d'elle. C'est cette théorie, soutenue par Aristote puis par l'Église chrétienne, qui s'imposa et il fallut attendre le XVII<sup>e</sup> siècle pour qu'elle soit remise en question.



— conception **héliocentrique**, dans laquelle le Soleil est le centre de l'Univers, les planètes (dont la Terre) lui tournant autour.

**Copernic** (Pologne, 1473-1543) et surtout **Galilée** (Italie, 1564-1642) réussirent, non sans peine, à imposer l'idée du Soleil central. Mais il restait encore à expliquer pourquoi les planètes tournaient autour du Soleil.

Lorsque l'on veut faire tourner une pierre autour de soi, il faut la retenir avec un fil. Qu'est-ce qui pouvait bien retenir les planètes autour du Soleil ?

La réponse fut apportée par **Newton** (Angleterre, 1642-1727). La légende est que c'est en voyant tomber une pomme d'un pommier que ce savant comprit qu'il existait une **attraction** entre les corps. Si la pomme tombe, c'est qu'elle est attirée par la Terre. Si la Lune est retenue autour de la Terre et les planètes autour du Soleil, c'est aussi en raison de cette attraction.

Il n'était pas facile à cette époque de concevoir ainsi une action à distance, s'exerçant de façon réciproque (la pomme attire également la Terre). Newton démontra également que cette action dépend de la masse de chacun des corps et du carré de la distance qui les sépare. Ce fut la théorie de la **gravitation universelle**.



Ci-dessus : planétaire construit par G. Adams (Londres). Ce planétaire offert à la ville de Genève par Sir Neville en 1773 représente le mouvement des planètes autour du Soleil.

En haut à gauche : le système de Ptolémée. Cette gravure extraite de l'Harmonica macrocosmica d'Andrea Cellarius, XVII<sup>e</sup> siècle, nous montre les orbites des planètes, de la Lune et du Soleil autour de la Terre.

En bas à gauche : le système de Copernic. Cette gravure extraite de l'Harmonica macrocosmica d'Andrea Cellarius, XVII<sup>e</sup> siècle, nous montre les orbites des planètes et de la Terre autour du Soleil ainsi que celle de la Lune autour de la Terre.



**12** Quelle est l'intensité de la force de pesanteur s'exerçant sur un cube de plomb dont l'arête mesure 50 mm ? ( $\rho_{\text{plomb}} = 11\,300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

**13** On monte des bords du Léman (alt. 375 m) au sommet des Rochers-de-Naye (alt. 2040 m) un objet dont la masse mesurée au bord du lac est égale à 50 kg.  
Quelle sera sa masse au sommet ?

**14** Nous sommes en l'an 2088. Des jeux olympiques ont lieu sur la Lune dans un stade hermétiquement clos où l'on a reconstitué l'atmosphère terrestre.  
A votre avis, quelles seraient les compétitions d'athlétisme dont les records seraient fortement améliorés ?

**15** Lors d'une compétition internationale, un haltérophile a soulevé, à l'épaulé, une masse égale à 256 kg.  
Quelle est la masse qu'il aurait pu soulever en exerçant la même force sur la Lune ?  
Note: la gravitation lunaire est de  $1,62 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

**16** Quels sont les ordres de grandeur des intensités des forces de gravitation exercées par :

- la Terre sur la Lune ( $d = 4 \cdot 10^8 \text{ m}$ ) ?
- le Soleil sur la Terre ( $d = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ ) ?
- la Terre sur le Soleil ( $d = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ ) ?
- le Soleil sur la planète Mars ( $d = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ m}$ ) ?
- la Terre sur la planète Mars lorsqu'elles sont le plus proche ( $d = 8 \cdot 10^{10} \text{ m}$ ) ?

**17** Quelle est l'intensité de la force de gravitation exercée sur une personne de 65 kg se trouvant :

- sur la Terre
- sur la Lune
- sur la planète Mars

**18** Compléter le tableau en calculant la gravitation  $g$  à différentes altitudes  $h$  au-dessus de la surface terrestre.

Distance au sol $h$ [km]	Distance au centre de la Terre $d$ [m]	Gravitation $g$ [ $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
0	$6,4 \cdot 10^6$	9,8
1000		
2000		
3000		
4000		
5000		
6000		
7000		
8000		
9000		
10000		

**19** Calculer la gravitation à la surface de la Lune.

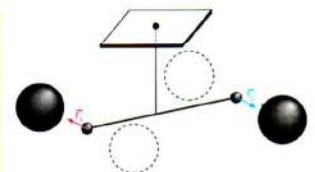
**20** Lorsque nous achetons du pain, le prix doit-il dépendre de la masse ou de la force de pesanteur du pain ?  
Que se passerait-il dans une boulangerie lunaire ?

**ÉTUDE DE DOCUMENTS**

**22 Détermination de G**

En 1798, l'Anglais Cavendish réussit à mesurer la constante  $G$  de la gravitation universelle. La connaissance de  $G$  permit aussitôt de déterminer la masse de la Terre puis, au moyen d'autres lois physiques (les lois de Kepler), celles des planètes et du Soleil. Pour cette raison, l'appareil utilisé par Cavendish fut appelé «balance à peser le monde».

Cette «balance» était constituée de deux sphères de 780 g fixées aux extrémités d'une tige horizontale de 2 m de longueur suspendue en son milieu par un mince fil d'argent.



Cavendish amena deux grosses sphères de 158 kg à proximité des petites sphères fixées à la tige. Sous l'effet des forces gravitationnelles, le fil subit une très faible torsion. Il plaça ensuite les grosses sphères dans la position symétrique de l'autre côté des petites sphères. Le fil se tordit dans l'autre sens. Il mesura alors l'angle dont avait tourné la tige. Ayant équilibré la torsion du fil par une série de petites forces connues, il put de cette façon mesurer l'intensité de la force de gravitation s'exerçant entre les sphères.

- Expliquer comment on a pu déterminer la masse de la Terre grâce à la connaissance de  $G$ .
- Quelle était l'intensité de la force s'exerçant entre une petite et une grande sphère lorsque leurs centres étaient éloignés de 18 cm ?

# Corrigé des exercices

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 1

- La direction de la force de pesanteur est effectivement verticale.
- Un dynamomètre est un appareil utilisé pour mesurer l'intensité des forces.
- On représente effectivement la force de pesanteur par un vecteur.
- Anciennement, on indiquait l'intensité de la force de pesanteur d'un objet en kilogramme force (kgf). Cette unité ne correspond pas au système international; elle est illégale. L'intensité de la force de pesanteur d'un corps s'exprime en newtons (N).
- En effet, la Terre étant quasi sphérique, on peut négliger la variation de la force de pesanteur d'un corps d'un lieu à un autre. L'altitude des montagnes n'est pas suffisante pour mettre en évidence une variation importante de  $g$  avec l'altitude.

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 2

La force de pesanteur d'un corps s'exerce toujours verticalement vers le bas, que le corps soit en mouvement ou non. La force de pesanteur s'applique au centre de gravité (noté G) d'un corps. Son intensité dépend de sa propre masse, de la masse et du rayon de la planète sur laquelle se trouve le corps.

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 3

Il n'y a pas de corrigé pour cet exercice.

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 4

Pour utiliser correctement un dynamomètre, il faut régler le zéro dans la position d'utilisation, attendre que l'appareil soit immobile et prendre garde à éviter tout frottement de la tige du dynamomètre dans son logement. Il ne faut pas l'utiliser pour mesurer des forces qui dépassent la valeur maximale de la graduation.

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 5

Il n'y a pas de corrigé pour cet exercice.

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 6

Une balance à ressort mesure effectivement une force de pesanteur. La variation de la force de pesanteur d'un lieu à un autre sur Terre n'est que de quelques %, donc négligeable. On peut alors admettre que la balance soit graduée en kilogrammes, ce qui est en fait la mesure d'une masse.

Sur la Lune, une balance à ressort, prévue pour être utilisée sur Terre, donnerait un résultat faux, environ six fois trop petit.

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 12

L'intensité de la force de pesanteur est égale à la masse multipliée par  $g$ . La masse s'obtient en multipliant le volume par la masse volumique:

$$\text{Soit a l'arête du cube: } V = a^3 \quad m = V \cdot \rho \quad F_p = m \cdot g = V \cdot \rho \cdot g$$

$$F_p = (50 \cdot 10^{-3})^3 \text{ m}^3 \cdot 1,13 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} = 13,9 \text{ N}$$

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 13

La masse est invariable.

Au sommet des Rochers de Naye, la masse de l'objet sera toujours de 50 kg.

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 14

Sur la Lune, l'intensité de la force de pesanteur d'un corps est environ 6 fois plus faible que sur Terre. Les athlètes conserveraient leur force physique. Par conséquent un grand nombre de records seraient fortement améliorés, qu'il s'agisse de saut en longueur, de saut en hauteur ou de lancer. Par contre, les coureurs auraient plus de peine, l'appui sur le sol étant plus faible et la puissance nécessaire au mouvement restant identique.

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 15

L'haltérophile exerce sur Terre, pour soulever la masse:  $256 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} = 2510 \text{ N}$ .

Sur la Lune, avec la même force musculaire, il pourrait soulever une masse de:

$$m = \frac{2510 \text{ N}}{1,62 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}} = 1550 \text{ kg}$$

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 16

La force d'attraction de deux masses est exprimée par la relation:  $F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$

a) Entre la Terre et la Lune:

$$F = G \cdot \frac{m_T \cdot m_L}{d^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \cdot \frac{6 \cdot 10^{24} \text{ kg} \cdot 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}}{(4 \cdot 10^8 \text{ m})^2} = 1,84 \cdot 10^{20} \text{ N}$$

b) Entre le Soleil et la Terre:  $F = 3,52 \cdot 10^{22} \text{ N}$

c) Entre la Terre et le Soleil:  $F = 3,52 \cdot 10^{22} \text{ N}$

d) Entre Le Soleil et Mars:  $F = 1,76 \cdot 10^{21} \text{ N}$

e) Entre la Terre et Mars:  $F = 4,0 \cdot 10^{16} \text{ N}$

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 7

La feuille de papier chiffonnée tombe plus vite, sur Terre, que la feuille de papier plane. Ceci est dû au frottement de l'air qui ralentit la chute de la feuille de papier plane, sa surface en contact avec l'air étant plus grande.

Sur la Lune, les deux feuilles de papier, chiffonné ou plane, tomberaient de même façon. Il n'y a pas d'atmosphère, donc pas de frottement.

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 8

La balance à deux plateaux mesure des masses. L'équilibre ne serait donc pas rompu quelque soit l'endroit où l'expérience serait tentée. Par contre, un dynamomètre sensible, appareil utilisé pour mesurer des forces, indiquerait de légères variations en fonction de l'endroit. (voir pages précédentes du livre).

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 9

Le centre de gravité d'une plaque de carton évidée en son centre se trouve paradoxalement en un endroit où il n'y a pas de carton.

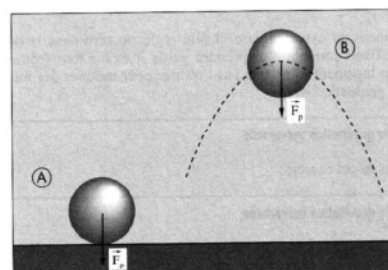
## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 10



## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 11



## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 17

L'intensité de la force de gravitation est donnée par  $F_p = m \cdot g$

a) Sur la Terre:  $F_p = 65 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} = 638 \text{ N}$

b) Sur la Lune:  $F_p = 65 \text{ kg} \cdot 1,62 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} = 105 \text{ N}$

c) Sur Mars:  $F_p = 65 \text{ kg} \cdot 3,7 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} = 241 \text{ N}$

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 18

Distance ou sol H [km]	Distance ou centre de la Terre d [m]	Gravitation g [N · kg <sup>-1</sup> ]
0	$6,4 \cdot 10^6$	9,8
1000	$7,4 \cdot 10^6$	7,33
2000	$8,4 \cdot 10^6$	5,69
3000	$9,4 \cdot 10^6$	4,54
4000	$10,4 \cdot 10^6$	3,71
5000	$11,4 \cdot 10^6$	3,08
6000	$12,4 \cdot 10^6$	2,61
7000	$13,4 \cdot 10^6$	2,24
8000	$14,4 \cdot 10^6$	1,94
9000	$15,4 \cdot 10^6$	1,69
10000	$16,4 \cdot 10^6$	1,49

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 19

La relation générale est:

$$g_{planete} = \frac{m_{planete}}{r_{planete}^2} \cdot G$$

$$g_{Lune} = \frac{7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}}{(1,75 \cdot 10^6 \text{ m})^2} \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} = 1,6 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$$

## La force de pesanteur et la gravitation universelle

### Exercice 20

Le prix du pain, ou d'autres aliments, dépend de la masse et non de la force de pesanteur.

Sur la Lune, la masse de pain serait la même que celle achetée sur Terre.



a) La relation  $F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$  permet de déterminer la masse de la Terre.

On mesure, avec un dynamomètre, l'intensité de la force de pesanteur d'un corps quelconque à la surface de la Terre.

Sur une balance à deux plateaux, on détermine la masse de l'objet.

Le rayon de la Terre est mesuré géométriquement.

Par calcul, on détermine la masse de la Terre.

b)  $F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \cdot \frac{0,78 \text{ kg} \cdot 158 \text{ kg}}{(0,18 \text{ m})^2} = 2,54 \cdot 10^{-7} \text{ N}$

# Chapitre 6. Plusieurs effets d'une même force. La décomposition d'une force

Une force appliquée à un corps peut avoir plusieurs effets simultanés sur ce corps. La force de pesanteur d'un skieur dans la poudreuse le fait glisser le long de la pente et en même temps l'enfonce dans la neige.

## 1 Expérience

**EXPERIENCE** Remplaçons au laboratoire le skieur par un chariot posé sur un rail à coussin d'air incliné. La force de pesanteur  $F_P$  du chariot est verticale mais ses effets se manifestent dans deux directions différentes:

- **parallèlement** au plan incliné (le chariot glisse dans cette direction)
- **perpendiculairement** au plan incliné (le chariot est plaqué contre le plan incliné).

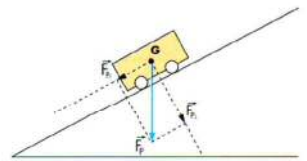


## 2 La décomposition d'une force

Pour trouver **séparément** la contribution de la force de pesanteur à chacun de ces deux effets, il faut la **décomposer** comme le montre la construction ci-contre:

$\vec{F}_{P//}$  représente la force faisant glisser le chariot le long du plan incliné.

$\vec{F}_{P\perp}$  représente la force avec laquelle le chariot est plaqué contre le plan incliné.



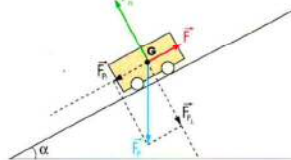
### Remarques

- Il est souvent commode de décomposer la force  $F_P$  en deux autres forces,  $F_{P//}$  et  $F_{P\perp}$ , appelées composantes de  $F_P$ . Des trois forces représentées, seule  $F_P$  existe réellement;  $F_{P//}$  et  $F_{P\perp}$  ne sont que des forces fictives qui auraient ensemble le même effet que  $F_P$ .
- $F_P$  est la résultante de  $F_{P//}$  et  $F_{P\perp}$ .
- Une force peut toujours être décomposée de plusieurs façons; il faut choisir les directions utiles à l'analyse de la situation traitée.

## 3 Equilibre

Pour équilibrer le chariot, il faut qu'à chaque composante de  $F_P$  soit opposée une autre force:

- $\vec{F}_{P\perp}$  est équilibrée par la réaction  $\vec{F}_n$  du plan incliné:  $F_{P\perp} = F_n$ .
  - $\vec{F}_{P//}$  doit être équilibrée par une force  $\vec{F}$  qui empêche le chariot de glisser:  $F_{P//} = F$ .
- $\vec{F}$  peut être la tension d'un fil, une force de frottement...



## 4 L'intensité des composantes

### La mesure des intensités

Le cylindre est maintenu immobile par deux dynamomètres qui mesurent respectivement les intensités  $F_n = F_{P\perp}$  et  $F = F_{P//}$ . En augmentant l'angle d'inclinaison du plan, on constate que  $F$  augmente et que  $F_n$  diminue.

### Le calcul des intensités

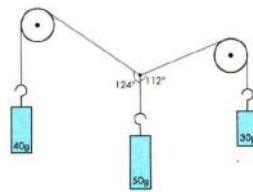
Par la trigonométrie, il est possible de calculer l'intensité des composantes:  $F_{P//} = F_P \cdot \sin \alpha$  et  $F_{P\perp} = F_P \cdot \cos \alpha$ .



Cylindre sur un plan incliné.

## EXERCICES

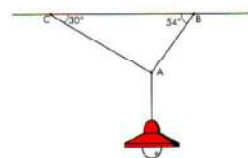
1 Le système représenté sur la figure est-il à l'équilibre? (Résolution graphique)



2 Une lampe, dont l'intensité de la force de pesanteur est égale à 20 N, est suspendue au moyen de trois fils.

Dessiner sur une figure les forces s'exerçant au point A.

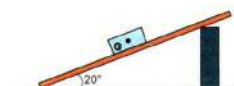
Note: utiliser une échelle faisant correspondre 1 N à 1 mm.



3 Une brique de 5 kg est posée sur une planche inclinée, elle est immobile.

Dessiner les forces s'exerçant sur cette brique.

Note: arrondir  $g$  à  $10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$  et choisir une échelle faisant correspondre 1 N à 1 mm; prendre le point G comme point d'application de ces forces.

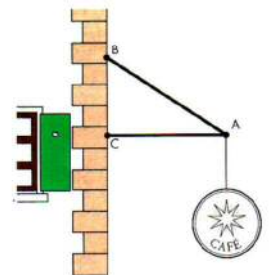


4 Une enseigne est fixée par l'intermédiaire de deux barres rigides de masses négligeables à un mur vertical. L'intensité de sa force de pesanteur est égale à 200 N.

Dessiner les forces s'exerçant:

- a) au point A;
- b) au point B;
- c) au point C.

Note: utiliser une échelle faisant correspondre 10 N à 1 mm. Prendre AC = 7 cm et BC = 4,5 cm.

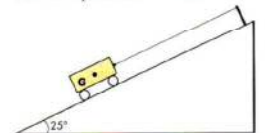


5 Un chariot, dont l'intensité de la force de pesanteur est égale à 0,80 N, est posé sur un plan incliné. Un fil l'empêche de descendre le long du plan.

Représenter sur une figure:

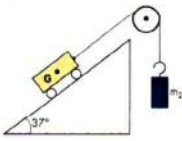
- a) la force de pesanteur de ce chariot;
- b) la réaction exercée par le plan sur ce chariot;
- c) la force exercée par le fil, qui empêche ce chariot de rouler le long du plan.

Note: prendre le point G comme point d'application de ces trois forces et choisir une échelle faisant correspondre 0,02 N à 1 mm.

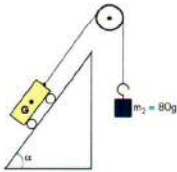


# EXERCICES

6 Calculer la valeur de la masse  $m_2$  pour que le système soit à l'équilibre. La masse du chariot vaut 2 kg.



7 Calculer la valeur de l'angle  $\alpha$  pour que le chariot soit en équilibre. La masse du chariot vaut 0,1 kg.



8 Une pierre est posée sur une planche horizontale. On incline la planche jusqu'au moment où la pierre se met à glisser.

Que peut-on dire de la force de frottement (empêchant la pierre de glisser) pendant que l'on augmente la pente de la planche ?

9 Une pierre est placée sur un plan incliné dont on augmente la pente sans qu'elle se mette en mouvement.

- Que peut-on dire de l'intensité de la force de frottement  $\vec{F}_f$  parallèle au plan incliné ?
- Que peut-on dire de la résultante de  $\vec{F}_f$  et de la force de pesanteur  $\vec{F}_p$  de cette pierre ?

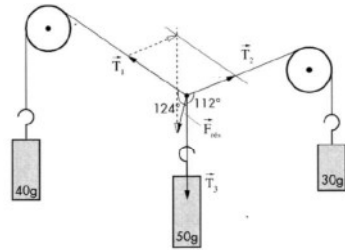
## Corrigé des exercices

### Plusieurs effets d'une même force. La décomposition d'une force

Exercice 1

- Le point A est soumis aux tensions  $\vec{T}_1$ ,  $\vec{T}_2$  et  $\vec{T}_3$  de chaque fil.
- L'intensité de la tension de chaque fil est égale à celle de la force de pesanteur de l'objet qui lui est suspendu.

dessin approximatif

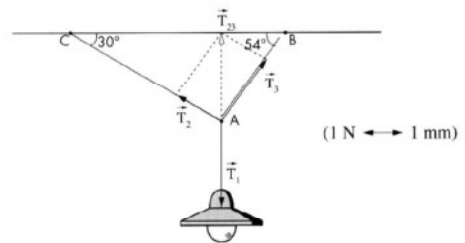


Le système n'est pas à l'équilibre car la résultante  $\vec{F}_{rés}$  de  $\vec{T}_1$ ,  $\vec{T}_2$  et  $\vec{T}_3$  n'est pas nulle.

### Plusieurs effets d'une même force. La décomposition d'une force

Exercice 2

On note  $\vec{T}_1$ ,  $\vec{T}_2$  et  $\vec{T}_3$  les tensions de chaque fil (voir figure).



La résolution se justifie de la façon suivante :

L'intensité de  $\vec{T}_1$  est égale à celle de la force de pesanteur de la lampe (20 N). Si le système est à l'équilibre, la résultante de  $\vec{T}_1$ ,  $\vec{T}_2$  et  $\vec{T}_3$  est nulle; autrement dit, la résultante de  $\vec{T}_2$  et  $\vec{T}_3$  est opposée à  $\vec{T}_1$ .

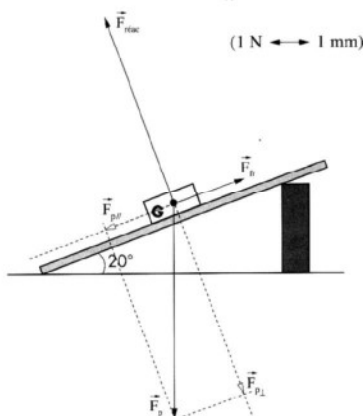
- Construire  $\vec{T}_1$ .
- Construire la force opposée à  $\vec{T}_1$ ; c'est la résultante de  $\vec{T}_2$  et  $\vec{T}_3$ , on la note  $\vec{T}_{23}$ .
- Construire les tensions  $\vec{T}_2$  et  $\vec{T}_3$ , par décomposition de  $\vec{T}_{23}$ .

### Plusieurs effets d'une même force. La décomposition d'une force

Exercice 3

Les forces qui s'exercent sur la brique sont :

- $\vec{F}_p$  : force de pesanteur de la brique;  $F_p = m \cdot g = 50 \text{ N}$
- $\vec{F}_{réac}$  : force de réaction du plan incliné
- $\vec{F}_f$  : force de frottement

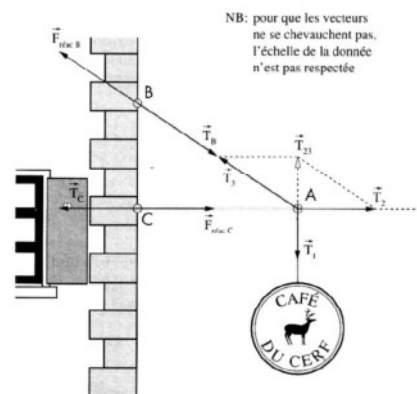


### Plusieurs effets d'une même force. La décomposition d'une force

Exercice 4

Forces en A :

- Le fil «tire» le point A vers le bas avec la force notée  $\vec{T}_1$ .
- La barre AC «pousse» le point A vers la droite avec la force notée  $\vec{T}_2$ .
- La barre AB «tire» le point A avec la force notée  $\vec{T}_3$ .



La résolution se justifie de la façon suivante :

L'intensité de  $\vec{T}_1$  est égale à celle de la force de pesanteur de l'enseigne (200 N). Si le système est à l'équilibre, la résultante de  $\vec{T}_1$ ,  $\vec{T}_2$  et  $\vec{T}_3$  est nulle; autrement dit, la résultante de  $\vec{T}_2$  et  $\vec{T}_3$  est opposée à  $\vec{T}_1$ .

- Construire  $\vec{T}_1$ .
- Construire la résultante de  $\vec{T}_2$  et  $\vec{T}_3$ , opposée à  $\vec{T}_1$ ; on la note  $\vec{T}_{23}$ .
- Construire les tensions  $\vec{T}_2$  et  $\vec{T}_3$ , par décomposition de  $\vec{T}_{23}$ .

Forces en B :

- La barre AB «tire» le point B avec la force notée  $\vec{T}_B$  de même intensité que  $\vec{T}_3$ .
- Le mur exerce une force de réaction notée  $\vec{F}_{réac B}$  opposée à  $\vec{T}_B$ .

Forces en C :

- La barre AC «pousse» le point C vers la gauche avec la force notée  $\vec{T}_C$  de même intensité que  $\vec{T}_2$ .
- Le mur exerce une force de réaction notée  $\vec{F}_{réac C}$  opposée à  $\vec{T}_C$ .

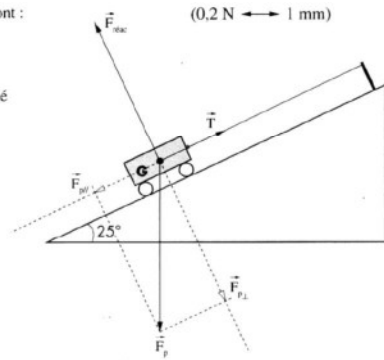


Plusieurs effets d'une même force. La décomposition d'une force

Exercice 5

Les forces qui s'exercent sur le chariot sont :

- $\vec{F}_p$  : force de pesanteur de la brique
- $\vec{F}_{\text{réac}}$  : force de réaction du plan incliné
- $\vec{T}$  : tension du fil



Plusieurs effets d'une même force. La décomposition d'une force

Exercice 6

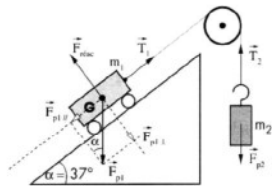
On traite séparément l'équilibre du chariot de masse  $m_1 = 2 \text{ kg}$  et l'équilibre de la masse  $m_2$ .

Chariot

Les forces qui s'exercent sur le chariot sont :

- $\vec{F}_{p1}$  : force de pesanteur du chariot;  $F_{p1} = m_1 \cdot g$
- $\vec{F}_{\text{réac}}$  : force de réaction du plan incliné
- $\vec{T}_1$  : tension du fil

On décompose  $\vec{F}_{p1}$  en  $\vec{F}_{p1\perp}$  et  $\vec{F}_{p1//}$   
 $F_{p1\perp} = m_1 \cdot g \cdot \cos \alpha$  et  $F_{p1//} = m_1 \cdot g \cdot \sin \alpha$



A l'équilibre :  $F_{p1//} = T_1 \Rightarrow m_1 \cdot g \cdot \sin \alpha = T_1$

Masse  $m_2$

Les forces qui s'exercent sur la masse  $m_2$  sont :

- $\vec{F}_{p2}$  : force de pesanteur de la masse  $m_2$ ;  $F_{p2} = m_2 \cdot g$
- $\vec{T}_2$  : tension du fil

A l'équilibre :  $F_{p2} = T_2 \Rightarrow m_2 \cdot g = T_2$

Fil

Si le système est à l'équilibre,  $T_1 = T_2$

$$\Rightarrow m_1 \cdot g \cdot \sin \alpha = m_2 \cdot g \Rightarrow m_2 = m_1 \cdot \sin \alpha = 2 \text{ kg} \cdot \sin 37^\circ = 1,2 \text{ kg}$$

La masse  $m_2$  vaut 1,2 kg.

Plusieurs effets d'une même force. La décomposition d'une force

Exercice 7

On traite séparément l'équilibre du chariot de masse  $m_1 = 0,1 \text{ kg}$  et l'équilibre de la masse  $m_2 = 0,08 \text{ kg}$ .

Chariot

Les forces qui s'exercent sur le chariot sont :

- $\vec{F}_{p1}$  : force de pesanteur du chariot;  $F_{p1} = m_1 \cdot g$
- $\vec{F}_{\text{réac}}$  : force de réaction du plan incliné
- $\vec{T}_1$  : tension du fil

On décompose  $\vec{F}_{p1}$  en  $\vec{F}_{p1\perp}$  et  $\vec{F}_{p1//}$

$$F_{p1\perp} = m_1 \cdot g \cdot \cos \alpha \text{ et } F_{p1//} = m_1 \cdot g \cdot \sin \alpha$$

A l'équilibre :  $F_{p1//} = T_1 \Rightarrow m_1 \cdot g \cdot \sin \alpha = T_1$

Masse  $m_2$

Les forces qui s'exercent sur la masse  $m_2$  sont :

- $\vec{F}_{p2}$  : force de pesanteur de la masse  $m_2$ ;  $F_{p2} = m_2 \cdot g$
- $\vec{T}_2$  : tension du fil

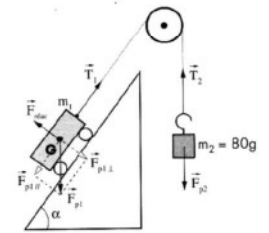
A l'équilibre :  $F_{p2} = T_2 \Rightarrow m_2 \cdot g = T_2$

Fil

Si le système est à l'équilibre,  $T_1 = T_2$

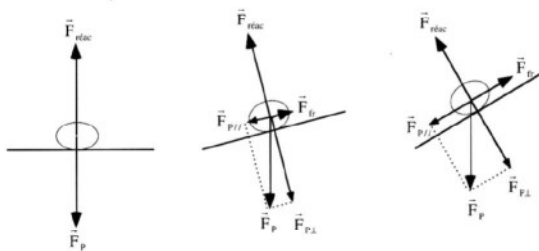
$$\Rightarrow m_1 \cdot g \cdot \sin \alpha = m_2 \cdot g \Rightarrow \sin \alpha = \frac{m_2}{m_1} = \frac{0,08 \text{ kg}}{0,1 \text{ kg}} = 0,8 \Rightarrow \alpha = 53^\circ$$

L'angle du plan incliné vaut environ  $53^\circ$ .



Plusieurs effets d'une même force. La décomposition d'une force

Exercice 8

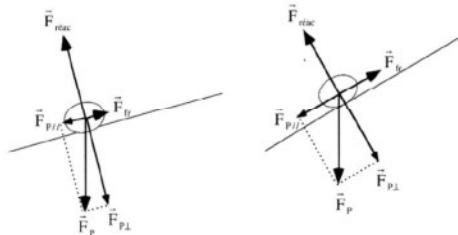


La force de frottement  $\vec{F}_f$  est opposée à  $\vec{F}_{p//}$ ;

son intensité augmente lorsqu'on augmente la pente de la planche.

Plusieurs effets d'une même force. La décomposition d'une force

Exercice 9



a) La force de frottement  $\vec{F}_f$  est opposée à  $\vec{F}_{p//}$ ;  
son intensité augmente lorsqu'on augmente la pente.

b) La résultante de  $\vec{F}_p$  et  $\vec{F}_f$  est  $\vec{F}_{p\perp}$ ;  
elle est compensée par la force de réaction du plan incliné  $\vec{F}_{\text{réac}}$ .

## Chapitre 7. La rotation des solides. Le moment de force

La poignée d'une porte est toujours placée près du bord opposé aux gonds autour desquels la porte pivote. Ce choix n'est pas dû au hasard; cette position est celle qui nécessite une force d'intensité minimale pour ouvrir la porte. La distance à l'axe de rotation influence donc l'intensité de la force nécessaire à l'opération.

### 1 Expérience

Une barre à l'extrémité de laquelle est suspendue une masse peut tourner autour d'un axe passant par son centre. On maintient cette barre dans une position horizontale, à l'aide d'une force  $F$ . On constate qu'il est possible d'y parvenir de plusieurs façons différentes; mais plus on rapproche la force de l'axe, plus son intensité doit être grande.

### 2 Le moment d'une force

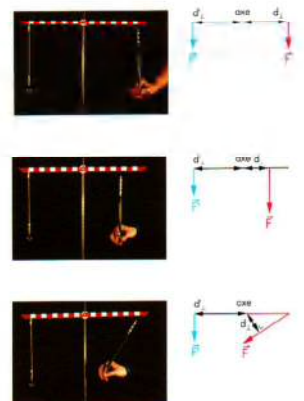
Des mesures adéquates montrent que, pour chaque cas examiné, le produit de l'intensité de la force par sa distance à l'axe de rotation a toujours la même valeur.

Cette quantité, appelée «moment de la force  $\vec{F}$  par rapport à l'axe» et notée  $M_{\vec{F}}$ , est définie par :

$$M_{\vec{F}} = d_{\perp} \cdot F$$

Son unité est le [m·N] (qui se lit «mètre newton» ou «mètre fois newton») et elle mesure l'effet de rotation que la force provoque sur la barre.

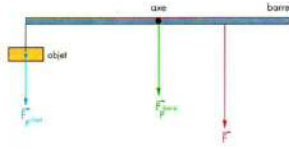
La distance dont il est question est appelée «bras de levier»; elle se mesure depuis l'axe sur une perpendiculaire à la droite d'action de la force; c'est la raison pour laquelle on la note  $d_{\perp}$ .



### 3 Sens de rotation

On se rend facilement compte que la force de pesanteur  $\vec{F}_p$  de l'objet suspendu fait tourner la barre dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, alors que la force  $\vec{F}$  la fait tourner dans l'autre sens.

Une force dont la droite d'action passe par l'axe de rotation (c'est le cas de la force de pesanteur de la barre) ne participe pas à la rotation; son moment est nul.



### 4 Condition d'équilibre

Dans chacun des cas d'équilibre de la barre du paragraphe 1, on constate que le moment de  $\vec{F}$  (agissant dans un sens) est égal au moment de  $\vec{F}_p$  (agissant dans l'autre sens).

On peut énoncer la règle suivante:

**Un corps mobile autour d'un axe est à l'équilibre lorsque le moment de la force le faisant tourner dans un sens est égal au moment de la force le faisant tourner dans l'autre sens.**



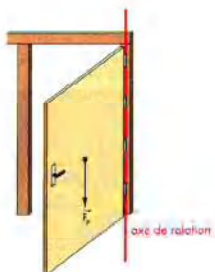
### 5 Plusieurs forces dans le même sens

Dans la vie courante, la plupart des objets soumis à des moments constituent des leviers. Si plusieurs forces appliquées au même levier contribuent à le faire tourner dans le même sens, le moment total agissant dans ce sens s'obtient en additionnant les moments de chacune des forces. La condition d'équilibre se généralise par:

**Un corps (ou un levier) mobile autour d'un axe est à l'équilibre lorsque le moment total des forces le faisant tourner dans un sens est égal au moment total des forces le faisant tourner dans l'autre sens.**

### 8 Forces parallèles à l'axe de rotation

Une force dont la direction est parallèle à l'axe de rotation n'a aucun effet de rotation. C'est le cas par exemple de la force de pesanteur d'une porte qui ne contribue ni à l'ouvrir, ni à la fermer. (Si les gonds ne sont pas sur une verticale, la porte se met spontanément dans la position où son centre de gravité est le plus bas.)



### 6 Couple de forces

Pour dévisser les boulons d'une roue, un mécanicien utilise une «clé en croix». Il lui applique deux forces parallèles, de même intensité mais de sens opposés; on parle alors d'un couple de forces.

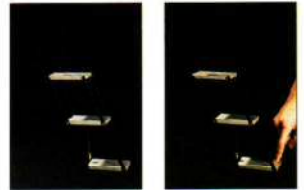
Si  $F$  désigne l'intensité commune aux deux forces et  $d$  la distance entre leurs droites d'action respectives, le moment résultant de ce couple de forces, noté  $M$ , est donné par:

$$M = \frac{d}{2} \cdot F_1 + \frac{d}{2} \cdot F_2 = d \cdot F$$



### 7 Equilibre d'un corps posé sur le sol

Considérons un corps déformable en forme de parallélépipède et posé sur le sol horizontal. Déformons-le à partir de la verticale. Durant la première phase de l'opération, la verticale passant par le centre de gravité du solide traverse sa base d'appui et le corps reste à l'équilibre. Dès que l'inclinaison devient suffisante pour que cette verticale passe à l'extérieur de la base d'appui, le moment de la force de pesanteur le fait basculer.



Il reste à l'équilibre.

Il bascule.



Base d'appui d'une chaise.

#### Remarque

La base d'appui d'un solide posé sur le sol est le polygone obtenu en tendant un élastique autour de la surface du solide en contact avec le sol.

Si le solide possède plusieurs surfaces de contact avec le sol (les quatre pieds d'une chaise), sa base d'appui est le polygone obtenu en tendant un élastique autour des parties en contact avec le sol.

### EXERCICES

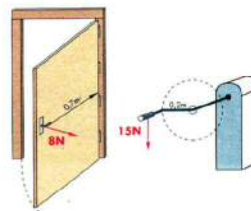
1 Quel est l'avantage des «écrous à ailettes» par rapport aux écrous ordinaires?



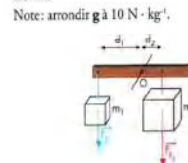
2 Autrefois, les diamètres des volants de camions étaient beaucoup plus grands que ceux des volants d'automobiles. Pourquoi?

3 On dit que le savant grec Archimède affirmait: «Donnez-moi un point d'appui et je soulèverai la Terre.» Que penser de cette affirmation?

4 Calculer, pour chaque situation représentée sur les figures, le moment de la force par rapport à l'axe de rotation.



5 Deux objets de masses  $m_1$  et  $m_2$  sont suspendus à une règle de bois traversée en son milieu par un axe O. Chaque ligne du tableau correspond à un état d'équilibre de ce système. Compléter le tableau.



$m_1$ [kg]	$m_2$ [kg]	$F_1$ [N]	$F_2$ [N]	$d_1$ [m]	$d_2$ [m]	$M_1$ [m·N]	$M_2$ [m·N]
1	2			0,2			
0,5		25					2,5
	9			0,2	0,3		

6 Une noix est serrée entre les mâchoires d'un casse-noix. Les distances de la noix à l'axe et de l'axe aux poignées sont égales à 5 cm et 15 cm. La noix se brise si l'intensité des forces qui la compriment dépasse 400 N.

Avec quelle intensité faut-il presser l'une contre l'autre les poignées du casse-noix pour casser la noix?



7 On trouve sur une table une tige métallique rigide, un crayon, du papier, une règle métrique, une masse de 1 kg munie d'un crochet.

Peut-on se débrouiller avec ce matériel pour déterminer la masse de la tige métallique?

Si oui, comment fait-on?  
Si non que manque-t-il?

8 Un cycliste exerce sur l'une des pédales de sa bicyclette une poussée verticale de 360 N. Le bras de la pédale est horizontal et sa longueur mesure 21 cm.

a) Calculer le moment de cette poussée par rapport à l'axe du pédalier.

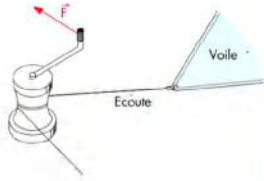
b) Calculer le moment appliqué à la roue arrière par la chaîne si les diamètres des pignons du pédalier et de la roue arrière mesurent respectivement 20 cm et 8 cm.



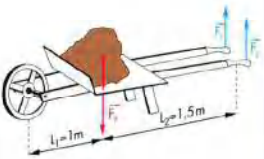


**E**  
**XERCICES**

9 Sur un voilier, un équipier exerce une poussée  $\vec{F}$  perpendiculairement au bras de la manivelle d'un cabestan. La poupée de ce dernier est un cylindre de 80 mm de diamètre, la longueur de sa manivelle mesure 30 cm et l'intensité de  $\vec{F}$  est de 20 N.  
Calculer la tension de l'écoute qui borde la voile.



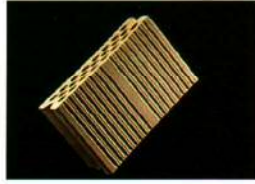
10 Calculer les intensités de tractions  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  exercées par les mains du conducteur de cette brouette si l'intensité de la force de pesantur de la brouette avec son contenu est de 750 N.



11 Que va-t-il arriver à cette brique si on la lâche ?



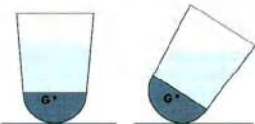
12 Que va-t-il arriver à cette brique si on la lâche ?



13 Une personne portant une valise assez lourde se penche du côté opposé à celle-ci. Elle a tendance à écarter le bras qui se trouve du côté opposé à la charge. Pourquoi ?

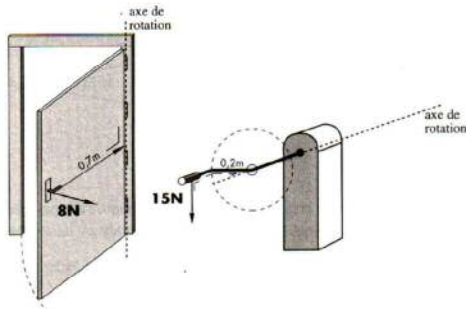


14 La figure représente, dans deux positions différentes, un gobelet (cul de plomb) dont le fond est constitué par une portion de sphère lestée. Pourquoi un tel gobelet ne se renverse-t-il pas ?



**Rotation des solides; le moment d'une force**

**Exercice 4**

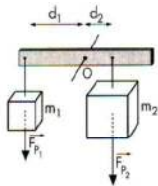


	bras de levier	intensité de la force	moment de la force
Porte	$d = 0,7 \text{ m}$	$F = 8 \text{ N}$	$M_F = F \cdot d = 8 \text{ N} \cdot 0,7 \text{ m} = 5,6 \text{ m} \cdot \text{N}$
Treuil	$d = 0,2 \text{ m}$	$F = 15 \text{ N}$	$M_F = F \cdot d = 15 \text{ N} \cdot 0,2 \text{ m} = 3 \text{ m} \cdot \text{N}$

**Rotation des solides; le moment d'une force**

**Exercice 5**

$F_{p1} = m_1 \cdot g$     $F_{p2} = m_2 \cdot g$     $M_1 = F_{p1} \cdot d_1$     $M_2 = F_{p2} \cdot d_2$



$m_1$	$m_2$	$F_{p1}$	$F_{p2}$	$d_1$	$d_2$	$M_1$	$M_2$
[kg]	[kg]	[N]	[N]	[m]	[m]	[m · N]	[m · N]
1	2	10 (1)	20 (2)	0,2	0,1 (5)	2 (3)	2 (4)
0,5	2,5 (3)	5 (1)	25	0,5 (3)	0,1 (4)	2,5 (2)	2,5
0,9 (2)	0,6 (2)	9	6 (4)	0,2	0,3	1,8 (1)	1,8 (3)

Les petits numéros entre parenthèses indiquent un ordre dans lequel il est possible de remplir les cases.

**Corrigé des exercices**

**Rotation des solides; le moment d'une force**

**Exercice 1**

Sur l'écrou à ailettes la force peut être appliquée à une plus grande distance de l'axe; son intensité est plus petite que sur un écrou ordinaire pour obtenir le même serrage. On peut l'utiliser avec les doigts.



**Rotation des solides; le moment d'une force**

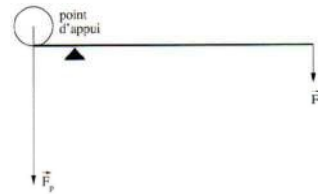
**Exercice 2**

Les roues d'une voiture tournent plus facilement que les roues d'un camion. Le moment de force doit être plus grand sur le volant d'un camion que sur le volant d'une voiture. Plus le diamètre du volant est grand, moins la force à appliquer est intense. Les camions actuels sont équipés d'une direction assistée; il n'est plus nécessaire d'avoir des volants de grand diamètre.

**Rotation des solides; le moment d'une force**

**Exercice 3**

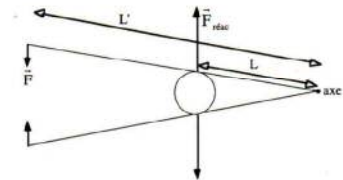
Archimède se réfère à la situation ci-dessous où, pour équilibrer une grande masse, une force  $\vec{F}$  de petite intensité suffit si on l'applique à un grand bras de levier.



**Rotation des solides; le moment d'une force**

**Exercice 6**

$L = 0,03 \text{ m}$   
 $L' = 0,15 \text{ m}$   
 $F_{réac} = 400 \text{ N}$



Les forces appliquées à chaque bras de la pince sont: la force  $\vec{F}$  appliquée à la poignée et la réaction de la noix  $\vec{F}_{réac}$  d'intensité égale à celle qui la comprime ( $F_{réac} = 400 \text{ N}$ ).

Avant que la noix se casse, les moments de ces deux forces sont égaux :

$F \cdot L' = F_{réac} \cdot L \Rightarrow F = \frac{F_{réac} \cdot L}{L'} = \frac{400 \text{ N} \cdot 0,03 \text{ m}}{0,15 \text{ m}} = 80 \text{ N}$

Il faut appliquer une force de 80 N sur les poignées du casse-noix.

**Rotation des solides; le moment d'une force**

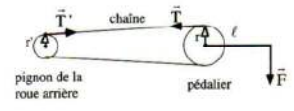
**Exercice 7**

Il n'y a pas de corrigé pour cet exercice.

**Rotation des solides; le moment d'une force**

**Exercice 8**

$F = 360 \text{ N}$   
 $\ell = 0,21 \text{ m}$   
 $r = 0,1 \text{ m}$  : rayon du pédalier  
 $r' = 0,04 \text{ m}$  : rayon du pignon



a) Les forces appliquées au pédalier sont la force de poussée  $\vec{F}$  du cycliste et la tension  $\vec{T}$  de la chaîne. Le moment de la poussée appliquée au pédalier vaut :

$M_F = F \cdot \ell = 360 \text{ N} \cdot 0,21 \text{ m} = 75,6 \text{ m} \cdot \text{N}$

b) A l'équilibre, le moment de la tension de la chaîne est égal au moment de la poussée :

$M_T = T \cdot r = 75,6 \text{ m} \cdot \text{N} \Rightarrow T = \frac{M_F}{r} = \frac{75,6 \text{ m} \cdot \text{N}}{0,1 \text{ m}} = 756 \text{ N}$

La tension de la chaîne a la même intensité en chaque point :  $T = T' = 756 \text{ N}$

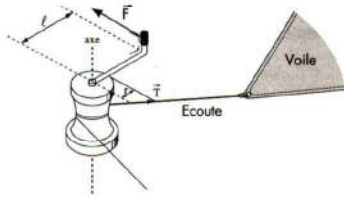
Le moment appliqué au pignon arrière vaut :

$M_{p'} = T \cdot r' = 756 \text{ N} \cdot 0,04 \text{ m} = 30,2 \text{ m} \cdot \text{N}$

**Rotation des solides; le moment d'une force**

**Exercice 9**

$F = 20 \text{ N}$   
 $\ell = 0,3 \text{ m}$   
 $r = 40 \text{ mm} = 0,04 \text{ m}$  : (rayon du treuil)



Les forces appliquées au treuil sont la force  $\vec{F}$  de l'équipier et la tension  $\vec{T}$  de l'écoute.

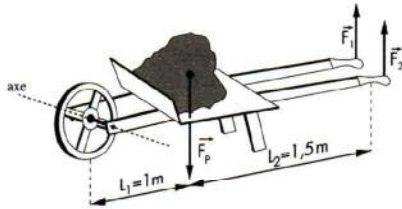
Dans le sens des aiguilles d'une montre :  $M_T = T \cdot r$   
 Dans le sens inverse :  $M_F = F \cdot \ell$   
 A l'équilibre :  $M_F = M_T$   
 $F \cdot \ell = T \cdot r \Rightarrow T = \frac{F \cdot \ell}{r} = \frac{20 \text{ N} \cdot 0,3 \text{ m}}{0,04 \text{ m}} = 150 \text{ N}$

La tension de l'écoute qui borde la voile vaut 150 N.

**Rotation des solides; le moment d'une force**

**Exercice 10**

$F_p = 750 \text{ N}$   
 $L_1 = 1 \text{ m}$   
 $L_2 = 1,5 \text{ m}$



Les forces appliquées à la brouette sont la force de pesanteur  $\vec{F}_p$  et les forces  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  exercées par les mains; on admet que  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  ont la même intensité notée F.

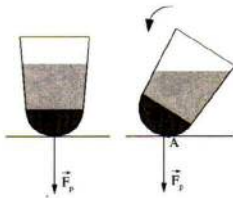
Dans le sens des aiguilles d'une montre :  $M_{F_p} = F_p \cdot L_1$   
 Dans le sens inverse :  $M_{F_1} + M_{F_2} = 2 \cdot F \cdot (L_1 + L_2)$   
 A l'équilibre :  $M_{F_1} + M_{F_2} = M_{F_p}$   
 $2 \cdot F \cdot (L_1 + L_2) = F_p \cdot L_1$   
 $\Rightarrow F = \frac{F_p \cdot L_1}{2 \cdot (L_1 + L_2)} = \frac{750 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}}{2 \cdot (1 \text{ m} + 1,5 \text{ m})} = 150 \text{ N}$

Chaque main exerce une force de 150 N.

**Rotation des solides; le moment d'une force**

**Exercice 14**

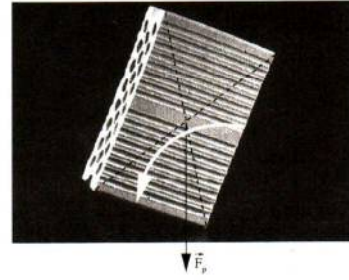
Le plomb dans le fond du gobelet rabaisse le centre de gravité. Le gobelet ne se renverse pas car la verticale passant par le centre de gravité passe à côté du point d'appui A en créant un moment qui le redresse.



**Rotation des solides; le moment d'une force**

**Exercice 11**

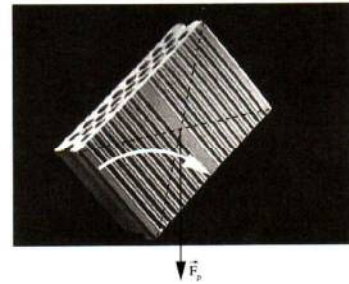
La brique bascule dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, car la droite d'action de la force de pesanteur passe à gauche du point d'appui.



**Rotation des solides; le moment d'une force**

**Exercice 12**

La brique bascule dans le sens des aiguilles d'une montre, car la droite d'action de la force de pesanteur passe à droite du point d'appui.



**Rotation des solides; le moment d'une force**

**Exercice 13**

Si le personnage reste droit, le centre de gravité de l'ensemble personnage-valise se trouve sur une verticale coupant le sol à l'extérieur de la base d'appui déterminée par les pieds; il bascule du côté de la valise. En se penchant du côté opposé, il ramène le centre de gravité sur une verticale coupant le sol à l'intérieur de la base d'appui et l'ensemble est à l'équilibre.

## Chapitre 8. Le travail d'une force. La puissance

La notion de travail est intuitivement liée à la sensation d'effort physique fourni, c'est-à-dire à la fatigue qui en résulte. On se rend compte, à l'occasion d'un déménagement, que la dépense physique dépend de la charge à transporter, et du nombre d'étages à gravir.

### Définition

Pour déplacer un objet horizontalement, il faut le soumettre à une force qui compense les frottements. Cette force (supposée constante) est orientée dans la direction du déplacement; le travail qu'elle effectue sur une distance d vaut par définition :

$$W_F = F \cdot d$$

$W_F$  : travail de la force  $\vec{F}$  en joules [J]

F : intensité de la force  $\vec{F}$  en [N]

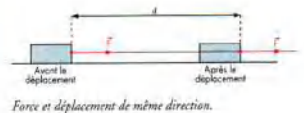
d : distance du déplacement de  $\vec{F}$  en [m]

Si la force agissant sur l'objet n'a pas la même direction que le déplacement, la force utile est la composante parallèle ( $F_{//}$ ) à cette direction. Le travail vaut alors :

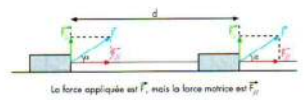
$$W_F = F_{//} \cdot d$$

**Remarques**

— Une force n'effectue du travail que lorsque son point d'application se déplace. La force musculaire d'un haltérophile accomplit du travail quand il soulève l'haltère mais n'en accomplit plus pendant qu'il le maintient à bout de bras au-dessus de sa tête.



Force et déplacement de même direction.



Force et déplacement de directions différentes.





- Une force perpendiculaire à la direction de déplacement n'effectue aucun travail.
- On peut beaucoup se fatiguer sans pour autant effectuer du travail.

## 2 Unités de travail

Le travail a la dimension du produit d'une force par une distance, son unité est le [N·m]. Cette unité est appelée «joule» et abrégée [J], du nom du physicien anglais James Prescott Joule (1818-1889).

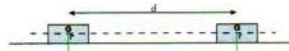
## 3 Travail moteur et travail résistant

Lorsqu'on soulève un corps, deux forces au moins sont en cause :

- la force **motrice** qui provoque ce mouvement;
- la force **résistante** qui s'y oppose.

Dans l'exemple de l'haltérophile, la force motrice est sa force musculaire, la force résistante est la force de pesanteur de l'haltère.

Le point d'application de chacune de ces forces se déplace durant l'opération; les deux accomplissent donc un travail que l'on appelle respectivement **travail moteur (ou fourni)** et **travail résistant (utile dans ce cas)**.



$F_{\perp}$  est perpendiculaire à la direction du déplacement.

La force de pesanteur d'un objet que l'on déplace sur le sol horizontal n'effectue aucun travail.

## 4 Le cas idéal et le cas réel

Dans le cas idéal où l'on admet que le déplacement s'effectue très lentement et sans frottements, il y a égalité entre travail fourni et travail utile :

$$W_{\text{fourni}} = W_{\text{utile}}$$

Dans ce cas, le travail se transmet intégralement. On dit qu'il y a **conservation du travail**. C'est un cas particulier de la loi de conservation de l'énergie.

L'unité de mesure de la puissance est le watt [W], du nom de l'ingénieur écossais James Watt (1736 - 1819).

$$1[W] = \frac{1[J]}{1[s]}$$

On peut régler le débit d'eau sortant d'un robinet: un robinet complètement ouvert laisse couler l'eau avec un grand débit. La puissance d'un moteur mesure son «débit de travail»: un moteur de grande puissance fournit du travail avec un grand débit.

L'emploi d'une machine puissante ne permet pas d'économiser du travail mais de l'effectuer dans un temps plus court (il faut la même quantité d'eau pour remplir un récipient, quel que soit le débit du robinet; un robinet de grand débit diminue le temps de l'opération).

## 7 Puissance et vitesse

La puissance **P** fournie lors du déplacement d'un corps est liée à la vitesse **v** de déplacement.

Désignons par

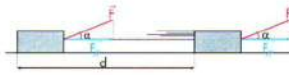
$F_{//}$  : l'intensité de la force motrice parallèle au déplacement (force utile)

$d$  : la distance de déplacement

Si la vitesse **v** est constante, alors:

$$P = \frac{W_F}{t} = \frac{W_{F//}}{t} = \frac{F_{//} \cdot d}{t} = F_{//} \cdot v$$

Quelques multiples du watt:	
Le kilowatt [kW];	1kW = 10 <sup>3</sup> W
Le mégawatt [MW];	1MW = 10 <sup>6</sup> W
Le gigawatt [GW];	1GW = 10 <sup>9</sup> W



## 8 Le cheval-vapeur

Les fabricants de voitures indiquent encore la puissance des moteurs en chevaux-vapeur [ch] même si cette unité n'est pas acceptée dans le système international d'unités.

Il est utile de savoir ce qu'elle représente mais il ne faut pas l'utiliser.

$$1[ch] = 735[W]$$

Un moteur de 100[ch] développe 73,5[kW].



La puissance des voitures...

Dans le cas réel où des frottements accompagnent le déplacement, il faudra fournir plus de travail pour obtenir le même résultat:

$$W_{\text{fourni}} > W_{\text{utile}}$$

Le surplus de travail fourni est alors converti en chaleur.

Le **rendement** de l'opération est un nombre, noté  $\eta$  (éta), défini par:

$$\eta = \frac{W_{\text{utile}}}{W_{\text{fourni}}}$$

Ce nombre sans unité vaut 1 dans le cas idéal; sa valeur est comprise entre 0 et 1 dans les cas réels. On l'exprime souvent sous forme d'un pourcentage (dans ce cas 0% <  $\eta$  < 100%).

Le travail à fournir dans le cas idéal représente le travail minimum nécessaire à l'opération souhaitée.

## 5 Le travail de la force de pesanteur

Le travail effectué par la force de pesanteur, lors du déplacement d'un corps de masse **m**, a même valeur quel que soit le trajet suivi pour relier les positions de départ et d'arrivée.

Il est donné par:

$$W_{F_p} = m \cdot g \cdot \Delta h$$

$\Delta h$  (delta h) étant la différence d'altitude entre les positions du centre de gravité avant et après le déplacement.

## 6 La puissance

La puissance **P** moyenne d'une machine représente la quantité de travail qu'elle est capable de fournir par unité de temps. S'il faut à une machine un temps **t** pour fournir le travail **W**, sa puissance moyenne est donnée par:

$$P_{\text{moy}} = \frac{W}{t}$$

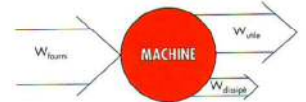
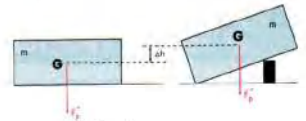
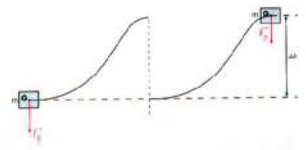
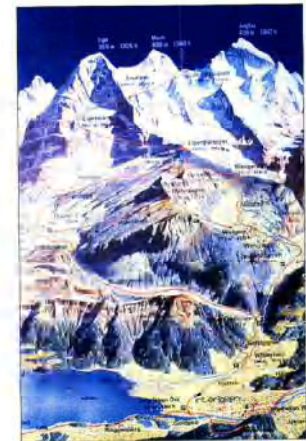


Schéma de définition du rendement.



Le travail de la force de pesanteur.



## EXERCICES

1 Une personne pousse un chariot dans un grand magasin. Elle exerce une poussée d'intensité égale à 8 N dans la direction du déplacement du chariot.

Quel est le travail de cette poussée si elle est exercée sur une distance de 250 m ?

2 Doit-on fournir un travail pour:

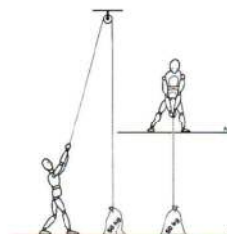
- abaisser la vitre d'un train ?
- mettre en mouvement une balançoire ?
- immobiliser une balançoire ?
- plier une barre de fer ?
- bander un arc ?
- allonger un ressort ?

3 Un enfant tire un jouet au moyen d'une ficelle. La force de traction **F** qu'il exerce forme un angle de 35 degrés avec le déplacement du jouet et son intensité est égale à 2,5 N.

Quel est le travail effectué pour un déplacement de 300 mètres du jouet ?



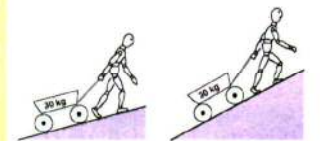
4 Quel personnage doit fournir le plus grand travail pour hisser son sac sur le pont ?



5 Pourquoi est-il moins pénible de monter en ascenseurs plutôt que par les escaliers ?

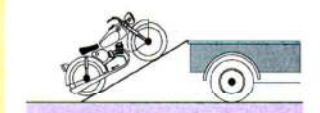
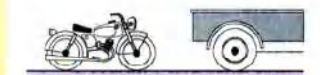
6

- Lequel des deux personnages doit exercer la plus grande force sur le timon du char ?
- Lequel doit fournir le plus grand travail au chariot pour monter la rampe ?



7 On veut charger une moto de 150 kg sur le pont d'un camion. Sachant que le pont est à 130 cm au-dessus du sol, quel est le travail minimal nécessaire à cette opération :

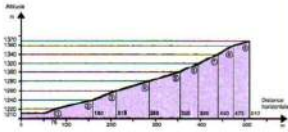
- en soulevant verticalement la moto ?
- en roulant la moto le long d'une planche formant un angle de 30 degrés avec l'horizontale ?
- Une personne ne pouvant exercer une poussée de plus de 600 N peut-elle charger cette moto ?





**E**  
EXERCICES

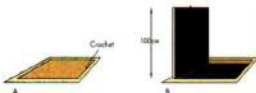
**8** La figure montre le profil d'un téléski.  
Pour calculer le travail nécessaire à faire monter un skieur, un élève a simplement multiplié l'intensité de la pesanteur de ce skieur par la dénivellation totale du téléski.  
Cette façon de faire est-elle correcte si on ne tient pas compte des frottements ?



**9** Le travail nécessaire à soulever une pierre de 2 kg d'une hauteur de 1 mètre est-il le même sur la Terre et sur la Lune ?

**10** Un tuyau de 3 m de longueur et de diamètre négligeable est posé horizontalement sur le sol. La masse de ce tuyau est de 8 kg. Un ouvrier le fait pivoter sur l'une de ses extrémités pour l'amener en position verticale.  
Quel travail doit-il fournir ?  
Note: arrondir g à  $10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

**11** La trappe représentée ici a une masse de 10 kg.  
a) Quel travail fournit-on pour faire passer la trappe de la position fermée A à la position ouverte B ?  
b) Avec quelle force verticale faut-il soulever la trappe (par le crochet) pour amorcer l'ouverture ?



**12** On lâche une balle de 100 g de 1 m de haut. La balle rebondit jusqu'à une certaine hauteur. Lorsqu'elle va retomber pour la 2ème fois, une énergie de 0,15 J s'est dissipée en chaleur.  
A quelle hauteur la balle a-t-elle rebondi ?

**13** Une personne moult son café en exerçant une force  $F$  d'intensité constante égale à 3 N sur la poignée de la manivelle de son moulin à café. Le bras de la manivelle mesure 9 cm et la droite d'action de  $F$  reste constamment tangente au cercle décrit par la poignée.  
Quel est le travail effectué par  $F$  après 50 tours de manivelle ?

**14** Une grue soulève une poutrelle de 2 tonnes d'une hauteur de 10 mètres en 20 secondes. Quelle est la puissance du moteur dans ce cas ?  
Note : arrondir g à  $10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$  et négliger les frottements.

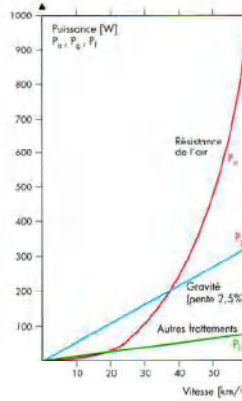
**15** Quand on compare divers sports, on oppose souvent l'endurance à la puissance. Parmi les sports suivants, lesquels exigent plutôt une grande endurance et lesquels plutôt une grande puissance ?  
— course de 100 mètres  
— saut en hauteur  
— marathon  
— natation (50 m)  
— lancer du poids  
— cyclisme (Tour de France)  
— ski de fond.

**16** Un véhicule tout-terrain de 1400 kg gravit une pente de 23 % à la vitesse de 18 km/h. La puissance à ses roues motrices est alors de 19 kW.  
Quelle est l'intensité des frottements qui s'exercent sur ce véhicule ?

**17** Les chutes du Rhin ont une hauteur de 21 mètres. Leur débit moyen est de  $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .  
Quelle est la puissance moyenne de ces chutes ?

**E**  
EXERCICES

**18** La puissance développée par un cycliste varie en fonction de sa vitesse. On peut distinguer plusieurs contributions :  
— la puissance  $P_a$  nécessaire à vaincre la résistance de l'air ;  
— la puissance  $P_g$  nécessaire à vaincre l'effet de la pesanteur si le cycliste ne roule pas sur une route horizontale ;  
— la puissance  $P_f$  nécessaire à vaincre les autres frottements.  
Le graphique indique les valeurs de ces différentes contributions en fonction de la vitesse du cycliste.



a) Tracer la courbe de la puissance totale en fonction de la vitesse, puis la courbe de la puissance en fonction de la vitesse sur une route horizontale.  
b) En admettant qu'un cycliste, pendant un temps court, peut fournir 750 W :  
• Quelle est la vitesse maximale qu'il peut atteindre sur une route de pente 2,5 % ?  
• Quelle est la vitesse maximale qu'il peut atteindre sur une route plate ?

**19** L'usine hydro-électrique de Verbois, installée aux portes de la ville de Genève, est alimentée par un lac de retenue construit sur le Rhône. Sa puissance est de 88000 kW pour une hauteur de chute d'environ 20 mètres.  
Calculer dans ces conditions le débit volumique de l'eau qui actionne ses turbines.  
Note: négliger les pertes d'énergie et arrondir g à  $10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$ .



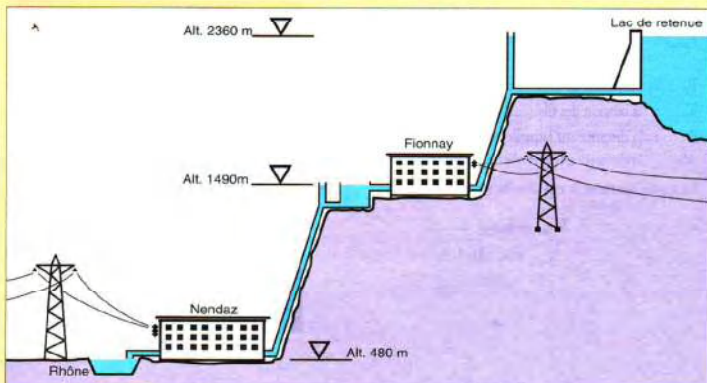
**20** Par son métabolisme, le corps humain utilise approximativement les énergies suivantes pendant 1 heure :  
sommeil : 300 kJ  
rester assis : 400 kJ  
travail ménager : 800 kJ  
monter un escalier : 3700 kJ  
marcher (5 km/h) : 900 kJ  
creuser un fossé : 1700 kJ  
faire du vélo : 1300 kJ  
jouer au tennis : 1700 kJ  
nager : 1600 kJ  
piste vita : 2500 kJ  
skier : 2000 kJ  
courir rapidement : 2500 kJ  
Calculer les puissances correspondant à ces activités.

**ÉTUDE DE DOCUMENTS**

**21**  
L'aménagement hydroélectrique du barrage de la Grande-Dixence comprend plusieurs installations (1993) :  
• le lac de retenue de la Grande-Dixence dont le volume utile est de 400 millions de  $\text{m}^3$  d'eau ;  
• la centrale hydro-électrique de Fionnay dont la puissance utile est d'environ 360 MW ;  
• la centrale hydro-électrique de Nendaz dont la puissance utile est d'environ 480 MW ;  
• l'usine de pompage et de turbinage de Z'Mutt ;  
• les stations de pompage de Ferpècle, de Staffel et d'Arolla qui refoulent de l'eau dans le lac de retenue.  
La production annuelle d'énergie de ce complexe hydro-électrique est de 1680 GWh, dont 1400 GWh en hiver. Les pompes refoulent chaque année de l'eau correspondant au stockage de 270 GWh.



a) Pour quelles raisons a-t-on construit des stations de pompage qui refoulent de l'eau dans le lac de retenue ?  
b) Combien de temps les usines de Fionnay et de Nendaz peuvent-elles fonctionner avec l'eau contenue dans le lac de retenue si le débit total de l'eau qui les alimente est égal à  $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .  
Note: 1 wattheure [Wh] = 3600 [J]



**Corrigé des exercices**

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 1**

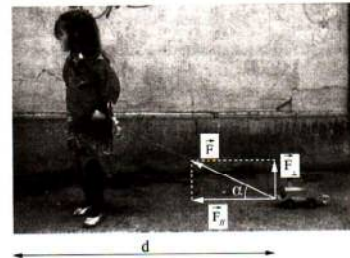
Le travail est le produit de l'intensité de la force par la distance de déplacement :  
 $W = F \cdot d = 8 \text{ N} \cdot 250 \text{ m} = 2000 \text{ J}$

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 2**

Il faut accomplir un travail dans toutes les situations proposées.

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 3**

La force utile est la composante de  $\vec{F}$  parallèle au déplacement ; son intensité vaut  $F_{//} = F \cdot \cos \alpha$



$W = F_{//} \cdot d = F \cdot \cos \alpha \cdot d = 2,5 \text{ N} \cdot \cos 35^\circ \cdot 300 \text{ m} = 614 \text{ J}$

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 4**

Les deux personnages doivent fournir le même travail qui dépend de la masse du fardeau et de la différence d'altitude mais pas du trajet parcouru ni du moyen de levage utilisé.

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 5**

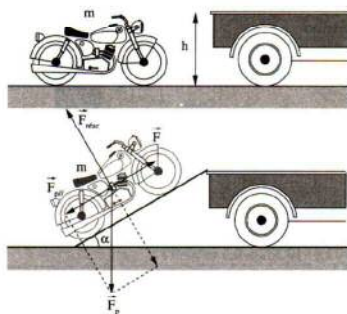
Il est moins pénible de monter en ascenseur plutôt que par les escaliers, car le travail nécessaire est effectué par le moteur de l'ascenseur et pas par les muscles.



**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 6**

- a) Le personnage de droite doit exercer la plus grande force car la pente est plus raide.  
 b) Le personnage de droite doit fournir le plus grand travail car la différence d'altitude entre le départ et l'arrivée est plus grande.

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 7**



- a) et b)  
 Le travail minimal nécessaire à l'opération est dans les deux cas donné par  $W_{\min} = m \cdot g \cdot \Delta h = 150 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot 1,3 \text{ m} = 1950 \text{ J}$
- c) Si la personne soulève verticalement la moto, elle doit exercer une force au moins égale à la force de pesanteur de la moto, c'est-à-dire 1500 N. Elle n'y parvient pas.
- Si la personne roule la moto le long du plan incliné, elle doit exercer une force au moins égale à la composante parallèle à la planche de la force de pesanteur de la moto:
- $$F = F_{p//} = m \cdot g \cdot \sin \alpha = 150 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot \sin 30^\circ = 750 \text{ N}.$$
- Elle n'y parvient pas. (Elle pourrait y parvenir avec une planche plus longue).

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 8**

Cette façon de faire est correcte : le travail à fournir (s'il n'y a pas de frottement) ne dépend que des positions de départ et d'arrivée mais pas du trajet parcouru.

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 9**

Le travail ne sera pas le même sur la Lune que sur la Terre, car il dépend de l'intensité de la gravitation  $g$ . Il sera environ 6 fois plus petit sur la Lune.

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 13**

Si la force reste tangente au cercle décrit par la poignée, le travail fourni est égal au produit de l'intensité de la force appliquée par la longueur de déplacement (c'est-à-dire 50 fois la circonférence du cercle) :

$$W = 50 \cdot F \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = 50 \cdot 3 \text{ N} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,09 \text{ m} = 84,8 \text{ J}$$

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 14**

$$m = 2000 \text{ kg} \quad \Delta h = 10 \text{ m} \quad t = 20 \text{ s}$$

Le travail minimum effectué vaut  $W = m \cdot g \cdot \Delta h$  (voir exercices 4 et 7).

Par définition de la puissance :

$$P = \frac{W}{t} = \frac{m \cdot g \cdot \Delta h}{t} = \frac{2000 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot 10 \text{ m}}{20 \text{ s}} = 10\,000 \text{ W} = 10 \text{ kW}$$

Le moteur de la grue développe une puissance d'au moins 10 kW.

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 15**

Les sports qui exigent une grande puissance sont ceux pour lesquels l'effort fourni est maximal mais sur une courte durée.

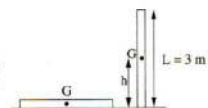
Les sports qui exigent une grande endurance sont ceux pour lesquels l'effort est fourni sur une longue durée.

Grande endurance	Grande puissance
	course de 100 m
	saut en hauteur
marathon	
	natation (50 m)
	lancer du poids
cyclisme (Tour de France)	
ski de fond	

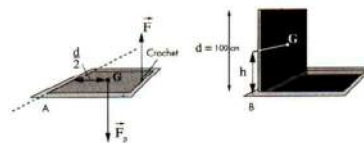
**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 10**

Le travail minimal à fournir vaut  $W_{\min} = m \cdot g \cdot \Delta h = 8 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot 1,5 \text{ m} = 120 \text{ J}$

$\Delta h$  est la différence d'altitude entre les positions du centre de gravité  $G$  avant et après l'opération. Elle vaut la moitié de la longueur du tuyau.



**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 11**



- a) Le travail minimal à fournir vaut  $W_{\min} = m \cdot g \cdot \Delta h = 10 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot 0,5 \text{ m} = 50 \text{ J}$
- $\Delta h$  est la différence d'altitude entre les positions du centre de gravité  $G$  avant et après l'opération. Elle vaut la moitié du côté de la trappe.
- b) Pour amorcer l'ouverture, le moment de la force appliquée au crochet doit être au moins égal à celui de la force de pesanteur de la trappe :
- $$M_F = M_{F_p} \Rightarrow F \cdot d = m \cdot g \cdot \frac{d}{2} \Rightarrow F = \frac{m \cdot g}{2} = 50 \text{ N}$$

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 12**

Une partie de l'énergie potentielle de la balle est dissipée en chaleur.

Energie potentielle au début :  $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$   
 $h$  : altitude de la balle au départ  
 $m$  : masse de la balle

Energie potentielle à la fin :  $E'_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h'$   
 $h'$  : altitude de la balle après le rebond

Différence d'énergie potentielle :  $E_{\text{pot}} - E'_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot (h - h') = 0,15 \text{ J}$

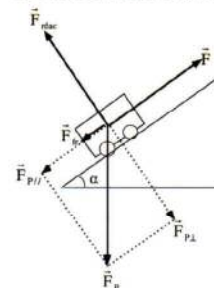
$$h - h' = \frac{0,15 \text{ J}}{m \cdot g} = \frac{0,15 \text{ J}}{0,1 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg}} = 0,15 \text{ m}$$

La balle rebondit à 0,85 m.

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 16**

$$m = 1400 \text{ kg} \quad v = 18 \text{ km/h} = 5 \text{ m/s} \quad P = 19\,000 \text{ W}$$

La valeur de la pente est égale à la tangente de l'angle  $\alpha$  du plan incliné; on en tire  $\alpha = 13^\circ$



Les forces agissant sur le véhicule sont :

- La force de pesanteur  $\vec{F}_p$  que l'on décompose en  $\vec{F}_{p//}$  et  $\vec{F}_{p\perp}$  ( $F_{p//} = m \cdot g \cdot \sin \alpha$ ; voir «Plusieurs effets d'une même force. La décomposition d'une force» du chapitre MÉCANIQUE).
- La force motrice  $\vec{F}$
- La force de frottement  $\vec{F}_{fr}$
- La force de réaction  $\vec{F}_{nac}$

La puissance est le produit de l'intensité de la force motrice par la vitesse :

$$P = F \cdot v \Rightarrow F = \frac{P}{v}$$

Le véhicule est à l'équilibre car sa vitesse est constante :

$$F_{fr} + F_{p//} = F$$

$$F_{fr} = F - F_{p//} = \frac{P}{v} - m \cdot g \cdot \sin \alpha = \frac{19\,000 \text{ W}}{5 \text{ m/s}} - 1400 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot \sin 13^\circ = 650 \text{ N}$$

L'intensité des frottements vaut environ 650 N.

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 17**

Le débit de volume  $d_v$  exprimé en  $\text{m}^3/\text{s}$  mesure le volume d'eau qui s'écoule en 1 s :  $d_v = 700 \text{ m}^3/\text{s}$

Le débit de masse  $d_m$  exprimé en  $\text{kg}/\text{s}$  mesure la masse d'eau qui s'écoule en 1 s :  $d_m = 700\,000 \text{ kg}/\text{s}$

$\Delta h = 21 \text{ m}$

La puissance  $P$  étant par définition le travail effectué en 1 s :

$$P = d_m \cdot g \cdot \Delta h = 700\,000 \text{ kg/s} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot 21 \text{ m} = 1,47 \cdot 10^8 \text{ W} = 147 \text{ MW}$$

La puissance moyenne des chutes vaut 147 MW.

**Le travail d'une force. La puissance** **Exercice 18**

- a) Il n'y a pas de corrigé pour cet exercice.  
 b) Les vitesses de pointe sont respectivement de 48 km/h et 55 km/h.

**Le travail d'une force. La puissance**

**Exercice 19**

Voir exercice 17

La puissance est donnée par :

$$P = d_m \cdot g \cdot \Delta h \Rightarrow d_m = \frac{P}{g \cdot \Delta h} = \frac{88\,000\,000\text{ W}}{10\text{ N/kg} \cdot 20\text{ m}} = 440\,000\text{ kg/s}$$

Le débit de masse vaut 440 000 kg/s; le débit de volume vaut 440 m<sup>3</sup>/s.

**Le travail d'une force. La puissance**

**Exercice 20**

sommeil :	300 kJ	83 W
rester assis :	400 kJ	111 W
travail ménager :	800 kJ	222 W
monter un escalier :	3 700 kJ	1 028 W
marcher (5 km/h) :	900 kJ	250 W
creuser un fossé :	1 700 kJ	472 W
faire du vélo :	1 300 kJ	361 W
jouer au tennis :	1 700 kJ	472 W
nager :	1 600 kJ	444 W
piste vita :	2 500 kJ	694 W
skier :	2 000 kJ	556 W
courir rapidement :	2 500 kJ	694 W

**Le travail d'une force. La puissance**

**Exercice 21**

a) Le réseau suisse de production d'électricité comprend des centrales nucléaires; ces dernières ne peuvent pas être mises en route ou arrêtées en quelques heures, il faut plusieurs jours pour une telle opération.

La consommation d'électricité varie beaucoup en une journée (voir le graphique «Consommation d'énergie électrique» à la dernière page du chapitre ÉLECTRICITÉ). Le surplus d'énergie produit par les centrales nucléaires pendant les heures de faible consommation est stocké sous forme d'énergie potentielle de position en refulant de l'eau dans le lac de retenue pour pouvoir la turbiner (fournir de l'électricité) pendant les heures de forte consommation électrique. Cette opération permet de récupérer une grande partie de l'énergie utilisée pour le pompage qui, sans cela, serait dissipée sous forme de chaleur.

b) Pour vider les 400 000 000 m<sup>3</sup> d'eau du lac à raison de 45 m<sup>3</sup> par seconde, il faut :

$$\frac{400\,000\,000\text{ m}^3}{45\text{ m}^3/\text{s}} = 8,9\text{ millions de secondes} = 103\text{ jours}$$

Il faut environ 100 jours pour que le barrage se vide.

# Chapitre 9. Les machines simples

Soulever directement un fardeau nécessite une force musculaire au moins aussi intense que la force de pesanteur du fardeau. Les machines simples ont comme fonction de réduire l'intensité de la force nécessaire, rendant ainsi l'opération possible même pour les charges très lourdes. Les pyramides d'Égypte, faites d'énormes blocs de pierre ont pu être construites grâce à de telles machines.

Chacune des machines présentées est supposée fonctionner dans le cas idéal: les frottements sont négligés et la montée du fardeau est lente et régulière.

## 1 Introduction

On désigne par:

$F_{\text{idéale}}$  : l'intensité de la force motrice dans un cas idéal (frottements nuls)

$F_P$  : l'intensité de la force de pesanteur du fardeau

$T$  : la tension des fils

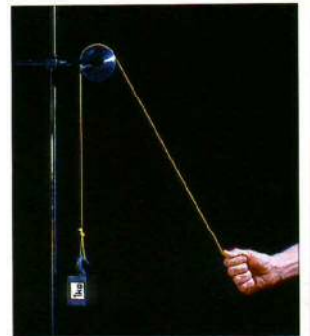
$d$  : la distance sur laquelle agit la force motrice

$\Delta h$  : la différence d'altitude du fardeau

Le travail fourni et le travail utile sont donnés par:

$$W_{\text{fourni}} = F_{\text{idéale}} \cdot d$$

$$W_{\text{utile}} = F_P \cdot \Delta h$$



## 2 La poulie fixe

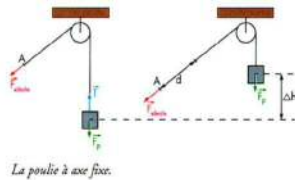
### Relation d'équilibre

Le fardeau est à l'équilibre s'il est soumis à deux forces opposées:

$$T = F_P$$

La force motrice appliquée à l'extrémité du fil ayant la même intensité que  $T$ , on a:

$$F_{\text{idéale}} = F_P$$



### Comparaison des distances

Pour soulever le fardeau sur une hauteur  $\Delta h$ , il faut tirer l'extrémité du fil sur une distance égale:

$$d = \Delta h$$

### Conservation du travail

A l'aide des deux relations ci-dessus, on obtient:

$$W_{\text{fourni}} = F_{\text{idéale}} \cdot d = F_P \cdot \Delta h = W_{\text{utile}}$$

La poulie fixe ne réduit pas l'intensité de la force nécessaire à l'opération; elle en modifie la direction, permettant à l'ouvrier de travailler dans une position plus confortable.

## 3 La poulie mobile

Une poulie mobile à laquelle est accroché le fardeau est parfois associée à une poulie fixe.

### Relation d'équilibre

Le fardeau étant soutenu par deux brins de fil, il est à l'équilibre si

$$F_P = 2T$$

Comme la tension est, dans ce cas, la même en chaque point du fil:

$$F_{\text{idéale}} = T$$

$$\text{donc } F_P = 2 \cdot F_{\text{idéale}} \text{ et } F_{\text{idéale}} = \frac{F_P}{2}$$

### Comparaison des distances

Pour élever le fardeau d'une hauteur  $\Delta h$ , il faut tirer l'extrémité du fil sur une distance  $2 \cdot \Delta h$  (chaque brin de fil soutenant la poulie mobile doit se déplacer sur la hauteur  $\Delta h$ )

$$d = 2 \cdot \Delta h$$

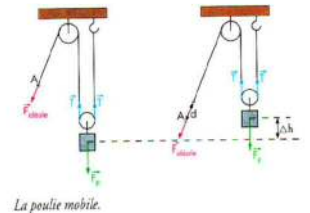
### Conservation du travail

A l'aide des deux relations ci-dessus, on obtient:

$$W_{\text{fourni}} = F_{\text{idéale}} \cdot d = \frac{F_P}{2} \cdot 2 \cdot \Delta h = F_P \cdot \Delta h = W_{\text{utile}}$$

### Remarque:

Si la force de pesanteur de la poulie mobile n'est pas négligeable face à celle du fardeau, il suffit de les additionner pour obtenir la force de pesanteur totale.





## 4 Les palans

Un palan est un assemblage d'un nombre quelconque de poulies fixes et de poulies mobiles. Le fardeau est accroché au système de poulies mobiles. Le palan ci-contre est constitué de deux poulies fixes et d'une poulie mobile soutenue par trois brins de fil.

Pour un palan où un nombre quelconque (noté  $n$ ) de brins de fil soutiennent l'ensemble des poulies mobiles, on aura :

### Relation d'équilibre

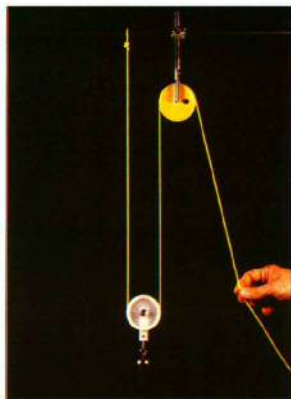
Le fardeau est à l'équilibre si

$$F_P = n \cdot T$$

Comme la tension est, dans ce cas, la même en chaque point du fil :

$$F_{\text{idéale}} = T$$

$$\text{donc } F_P = n \cdot F_{\text{idéale}} \quad \text{et} \quad F_{\text{idéale}} = \frac{F_P}{n}$$



Palan à deux brins.

### Comparaison des distances

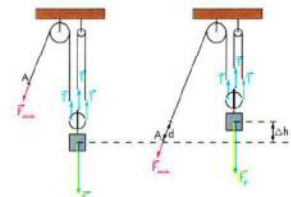
Pour élever le fardeau d'une hauteur  $\Delta h$ , il faut tirer l'extrémité du fil sur une distance  $n \cdot \Delta h$  (chaque brin de fil soutenant l'ensemble de poulies mobiles doit se déplacer sur la hauteur  $\Delta h$ )

$$d = n \cdot \Delta h$$

### Conservation du travail

A l'aide des deux relations ci-dessus, on obtient :

$$W_{\text{fourni}} = F_{\text{idéale}} \cdot d = \frac{F_P}{n} \cdot n \cdot \Delta h = F_P \cdot \Delta h = W_{\text{utile}}$$



Le palan à trois brins.

## 6 Avantage et inconvénient

Une machine qui offre l'avantage de réduire la force motrice nécessaire présente d'autre part l'inconvénient d'augmenter la distance de déplacement de cette force. La conservation du travail implique que la diminution d'intensité de la force est proportionnellement compensée par l'augmentation de la distance de déplacement; une machine ne permet donc pas d'économiser du travail.

## 7 Les machines réelles

Les frottements intervenant dans le fonctionnement d'une machine réelle ont pour effet d'augmenter la force nécessaire et par conséquent le travail à fournir.

Si le rendement  $\eta$  (éta) de la machine est connu, la force motrice réelle peut se calculer à partir de la force idéale. Si l'on note  $F_{\text{réelle}}$  l'intensité de la force à appliquer dans un cas réel, on a :

$$\eta = \frac{F_{\text{idéale}}}{F_{\text{réelle}}}$$

Le travail fourni et le travail utile sont alors liés par la relation :

$$\eta = \frac{W_{\text{utile}}}{W_{\text{fourni}}}$$

(voir chapitre 9 paragraphe 4)

### Remarque

D'autres objets couramment utilisés sont aussi des machines simples :

- le plan incliné (voir chapitre 7);
- les leviers (voir chapitre 8);
- les engrenages (vélo, boîte de vitesses); etc.

## 5 Le treuil

Un treuil est constitué d'un cylindre de rayon  $r$  mobile autour d'un axe et mû par une manivelle de longueur  $R$ . Un fil est enroulé autour du tambour et le fardeau est fixé à son extrémité libre.

### Relation d'équilibre

L'examen des moments de forces permet d'écrire

$$T \cdot r = F_{\text{idéale}} \cdot R$$

Comme la tension est la même en chaque point du fil,  $F_P = T$  et on obtient :

$$F_P \cdot r = F_{\text{idéale}} \cdot R$$

donc

$$F_{\text{idéale}} = \frac{F_P \cdot r}{R}$$

Comme  $r < R$ , alors  $F_{\text{idéale}} < F_P$

### Comparaison des distances

Pour un tour de manivelle, la force motrice décrit une circonférence de rayon  $R$ ; elle se déplace sur la distance

$$d = 2\pi R$$

Le fil s'enroule sur une circonférence du tambour; le fardeau s'élève sur une hauteur

$$\Delta h = 2\pi r$$

En conséquence :

$$d = \frac{\Delta h \cdot R}{r}$$

La distance  $d$  est donc plus grande que  $\Delta h$ .

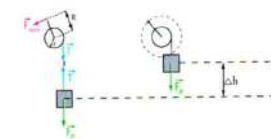
### Conservation du travail

A l'aide des deux relations ci-dessus, on obtient :

$$W_{\text{fourni}} = F_{\text{idéale}} \cdot d = \frac{F_P \cdot r}{R} \cdot \frac{\Delta h \cdot R}{r} = F_P \cdot h = W_{\text{utile}}$$



Treuil d'un puits.



Le treuil.

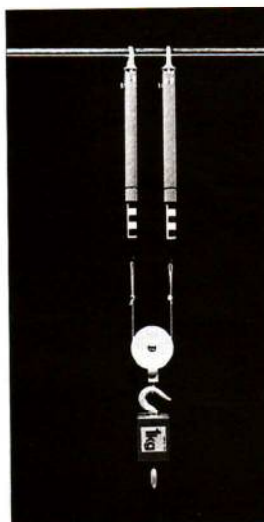
## EXERCICES

### 1 Vrai ou faux ?

- Une machine permet :
  - d'économiser du travail
  - d'économiser du temps
  - d'utiliser une force motrice moins intense
  - de se fatiguer moins
  - de faire le travail à notre place
  - de rendre un travail possible ou moins pénible
  - d'augmenter le rendement de l'utilisateur
  - de multiplier ou de diviser une force
  - d'augmenter la puissance
  - d'augmenter l'énergie
  - de supprimer les frottements.
- Le rendement d'une machine ne peut être plus grand que 1.
- Améliorer le rendement d'une machine permet d'économiser du travail.
- Le mouvement perpétuel est impossible à réaliser sur la Terre.

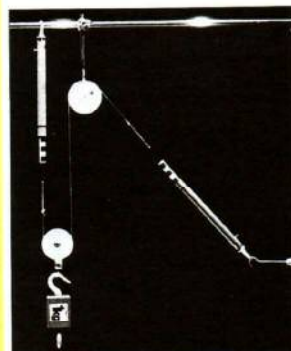
### 2 Quelle intensité indique chaque dynamomètre ?

La masse de la poulie est négligeable.



### 3 Quelle intensité indique chaque dynamomètre ?

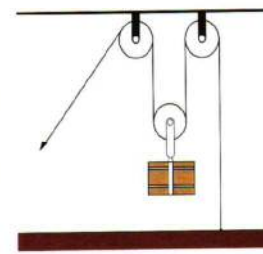
La masse et le frottement des poulies sont négligeables.



### 4 Choisir la ou les bonnes réponses.

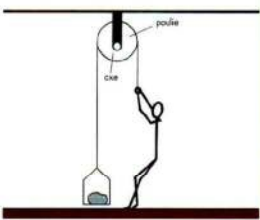
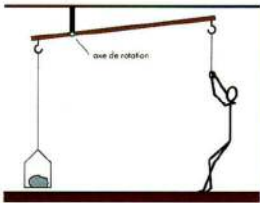
Ce curieux système de palan à trois poulies :

- permet de diviser la force par 2
- permet de diviser la force par 3
- permet de diviser la force par 4
- permet d'économiser de l'énergie
- exige plus d'énergie que si l'on montait la charge avec une seule poulie car il y a plus de frottements ainsi.

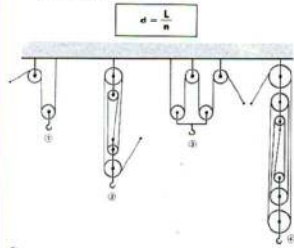


- 5 Dans un dépôt de marchandises, un système de levage à une puissance de 15 kW. Il permet de lever une charge à 9 m de hauteur en 1 minute exactement. On peut en déduire que cette charge est d'environ :
- 100 kg
  - 1,5 tonnes
  - 9 tonnes
  - 10 tonnes
  - 135 tonnes
  - ...

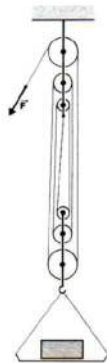
- 6 Ajouter aux dessins des indications faisant comprendre lequel des deux personnages a le plus de peine à soulever la même pierre.



- 7 On considère les quatre palans représentés sur la figure.
- Quel est le nombre de brins de chaque plan ?
  - De quelle distance se déplace la partie mobile de chaque palan si l'on déplace l'extrémité du filin de 240 mm ?



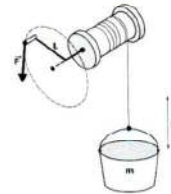
- 8 On considère le palan représenté sur la figure. Sa partie mobile et la charge qui lui est suspendue ont une masse totale de 312 kg.
- Quelle est, dans le cas idéal, l'intensité de la force  $F_{\text{trac}}$  de traction qu'il faut exercer sur l'extrémité libre du filin pour lever la charge ?
  - Quelle puissance faut-il, dans ce cas, pour lever cette charge de 3,6 m en 24 s ?
  - Mêmes questions si le rendement du palan est de 90 %.



- 9 Une grue est équipée d'un moteur de 5 kW. Combien de temps lui faut-il pour lever une charge de 2 tonnes à une hauteur de 12 m si son rendement est égal à 80 % ?  
Note: arrondir  $g$  à  $10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

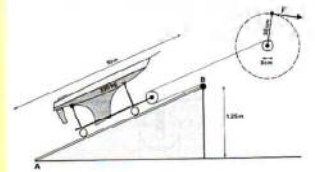


- 10 Un puits est équipé d'un treuil actionné par une manivelle. Pour élever un seau d'eau, il faut exercer, tangentielle au cercle décrit par la poignée de la manivelle, une force d'intensité égale à 15 N. La manivelle a un bras de 20 cm et le tambour du treuil un rayon de 40 mm. La masse du seau est égale à 5,2 kg.  
Quel est le rendement de ce système ?

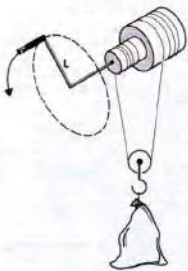


- 11 Un tapis roulant est utilisé pour transporter du sable. Sa longueur est égale à 15 m et il forme un angle de 40 degrés avec l'horizontale. Il est équipé d'un moteur de 1,5 kW et son rendement global est égal à 60 %.  
Quelle est la masse de sable que peut transporter ce tapis roulant en 1 heure ?

- 12 Un bateau de 720 kg est tiré le long d'un plan incliné de 10 m de longueur au moyen d'un treuil. Le tambour de ce dernier a un diamètre de 80 mm et la longueur du bras de sa manivelle est égale à 30 cm. Le câble est attaché au sommet du plan. Il passe dans une poulie puis s'enroule sur le tambour du treuil. La dénivellation entre les extrémités du plan est égale à 1,25 mètre.
- En admettant que le rendement de ce système soit égal à 60 %, quelle est l'intensité de la force qu'il faut exercer tangentielle au cercle décrit par la poignée de la manivelle pour tirer ce bateau ?  
On remplace la manivelle par un moteur électrique. Le rendement du système ne change pas.
  - Quelle doit être la puissance de ce moteur pour que la vitesse du bateau le long du plan soit égale à 5,4 km/h ?  
Note: arrondir  $g$  à  $10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$ .



- 13 Un treuil différentiel comporte deux tambours coaxiaux soudés. Un filin qui passe dans une poulie mobile est enroulé sur chaque tambour de façon à s'enrouler sur le grand tambour et simultanément se dérouler du petit tambour (ou inversement) quand on actionne la manivelle. La charge à soulever est suspendue à la poulie mobile.



- Calculer littéralement la hauteur  $h$  à laquelle s'élève la charge en fonction des rayons  $R$  et  $R'$  des tambours et du nombre  $N$  de tours de manivelle.  
On considère un treuil différentiel pour lequel les rayons  $R$  et  $R'$  sont respectivement égaux à 20 cm et 15 cm et la longueur  $L$  du bras de la manivelle à 30 cm.
- En admettant que les frottements puissent être négligés, calculer l'intensité de la force qu'il faut exercer tangentielle au cercle décrit par l'extrémité de la manivelle pour lever une charge de 80 kg suspendue à la poulie.

- 14 A la centrale hydroélectrique de Veytaux, on peut pomper de l'eau du lac Léman dans le lac de l'Hongrin et utiliser ensuite cette eau pour produire de l'électricité.
- La quantité d'électricité produite avec l'eau pompée est-elle la même que celle qui a été nécessaire à pomper l'eau ?
  - Quel est l'intérêt de cette façon de procéder ?



Salle des machines de la centrale de Veytaux. Au premier plan: la pompe, puis le moteur-alternateur, et enfin la turbine de l'un des quatre groupes.

## Corrigé des exercices

### Les machines simples

### Exercice 1

Une machine simple est un système mécanique sans moteur.

- Une machine **permet** effectivement
  - d'économiser du temps
  - d'utiliser une force motrice moins intense
  - de se fatiguer moins
  - de rendre un travail possible ou moins pénible
  - d'augmenter parfois le rendement de l'utilisateur (faire monter un sac en utilisant une poulie évite de devoir monter sa propre masse en portant le sac sur son dos)
  - de multiplier ou de démultiplier une force

Une machine **ne permet pas**

- d'économiser du travail
  - de faire le travail à notre place
  - d'augmenter la puissance
  - d'augmenter l'énergie
  - de supprimer les frottements
- Le rendement d'une machine ne peut effectivement jamais être plus grand que 1.
  - Améliorer le rendement d'une machine permet de réaliser une opération donnée en lui fournissant une quantité moindre d'énergie, car une plus grande proportion de l'énergie fournie est transformée sous forme utile.
  - Le mouvement perpétuel est impossible à réaliser.

### Les machines simples

### Exercice 2

Le fardeau est soutenu par deux brins de fil.

Chaque dynamomètre indique la moitié de la force de pesanteur, c'est-à-dire 5 N.



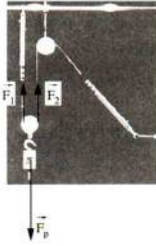


**Les machines simples**

**Exercice 3**

Le fardeau est soutenu par deux brins de fil.

Chaque dynamomètre indique la moitié de la force de pesanteur, c'est-à-dire 5 N.



**Les machines simples**

**Exercice 4**

Bien qu'il ait trois poulies, le fardeau est soutenu par deux brins de fil; il permet de diviser la force par 2.

Il exige plus d'énergie que si l'on montait la charge avec une seule poulie, car il faut monter la poulie mobile avec le fardeau et il y a plus de frottements.

**Les machines simples**

**Exercice 5**

$$P = \frac{m \cdot g \cdot \Delta h}{t} \Rightarrow m = \frac{P \cdot t}{g \cdot \Delta h} = \frac{150\,000 \text{ W} \cdot 60 \text{ s}}{10 \text{ N/kg} \cdot 9 \text{ m}} = 10^4 \text{ kg}$$

La masse vaut environ 10 tonnes.

**Les machines simples**

**Exercice 6**

Le personnage qui utilise la poulie a le plus de peine, car il doit appliquer une force au moins aussi intense que la force de pesanteur de la pierre alors que le levier permet d'utiliser une force moins intense, mais la pierre ne pourrait pas être soulevée aussi haut.

**Les machines simples**

**Exercice 7**

Palan numéro	1	2	3	4
Nombre de brins	2	5	4	6
Distance de déplacement	120 mm	48 mm	60 mm	40 mm

**Les machines simples**

**Exercice 10**

$$m = 5,2 \text{ kg} \quad L = 0,2 \text{ m} \quad r = 0,04 \text{ m} \quad F = 15 \text{ N}$$

- Travail fourni pour un tour de manivelle

$$W_{\text{fourni}} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot F$$

- Pour un tour de manivelle, le fil s'enroule sur une circonférence du tambour; le fardeau monte de  $\Delta h = 2 \cdot \pi \cdot r$

$$\text{Le travail du seau vaut } W_{\text{seau}} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot m \cdot g$$

- Rendement :

$$\eta = \frac{W_{\text{seau}}}{W_{\text{fourni}}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot m \cdot g}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot F} = \frac{r \cdot m \cdot g}{L \cdot F} = \frac{0,04 \cdot 5,2 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg}}{0,2 \text{ m} \cdot 15 \text{ N}} = 0,69 = 69\%$$

Le rendement vaut environ 70 %.

**Les machines simples**

**Exercice 11**

$$L = 15 \text{ m} \quad \alpha = 40^\circ \quad \eta = 0,6 \quad t = 3600 \text{ s} \quad P_{\text{fournie}} = 1500 \text{ W}$$



Puissance utile :

$$P_{\text{utile}} = \frac{m \cdot g \cdot \Delta h}{t} = \frac{m \cdot g \cdot L \cdot \sin \alpha}{t}$$

Rendement :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{fournie}}} = \frac{m \cdot g \cdot L \cdot \sin \alpha}{t \cdot P_{\text{fournie}}} \Rightarrow m = \frac{\eta \cdot t \cdot P_{\text{fournie}}}{g \cdot L \cdot \sin \alpha} = \frac{0,6 \cdot 3600 \text{ s} \cdot 1500 \text{ W}}{10 \text{ N/kg} \cdot 15 \text{ m} \cdot \sin 40^\circ} = 33\,600 \text{ kg}$$

Le tapis roulant transporte environ 33,6 tonnes de sable en 1 heure.

**Les machines simples**

**Exercice 8**

$$m = 312 \text{ kg} \quad \Delta h = 3,6 \text{ m} \quad t = 24 \text{ s}$$

- a) La partie mobile est soutenue par 6 brins de fil

$$F_{\text{idéale}} = \frac{m \cdot g}{6} = \frac{312 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg}}{6} = 520 \text{ N}$$

La force idéale a une intensité de 520 N.

- b) La puissance dans le cas idéal vaut

$$P_{\text{fournie}} = P_{\text{utile}} = \frac{m \cdot g \cdot \Delta h}{t} = \frac{312 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot 3,6 \text{ m}}{24 \text{ s}} = 468 \text{ W}$$

La puissance fournie vaut 468 W.

- c)  $\eta = 0,9$

Dans le cas réel :

$$\eta = \frac{F_{\text{idéale}}}{F_{\text{réelle}}} \Rightarrow F_{\text{réelle}} = \frac{F_{\text{idéale}}}{\eta} = \frac{520 \text{ N}}{0,9} = 578 \text{ N}$$

La force réelle a une intensité de 578 N.

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{fournie}}} \Rightarrow P_{\text{fournie}} = \frac{P_{\text{utile}}}{\eta} = \frac{468 \text{ W}}{0,9} = 520 \text{ W}$$

La puissance fournie vaut 520 W.

**Les machines simples**

**Exercice 9**

$$m = 2000 \text{ kg} \quad \Delta h = 12 \text{ m} \quad P = 5000 \text{ W} \quad \eta = 0,8$$

Définition du rendement :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{fournie}}} \Rightarrow \eta \cdot P_{\text{fournie}} = P_{\text{utile}} = \frac{m \cdot g \cdot \Delta h}{t} \Rightarrow t = \frac{m \cdot g \cdot \Delta h}{\eta \cdot P_{\text{fournie}}} = \frac{2000 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot 12 \text{ m}}{0,8 \cdot 5000 \text{ W}} = 60 \text{ s}$$

La grue met 60 s pour soulever la charge.

**Les machines simples**

**Exercice 12**

$$m = 720 \text{ kg}$$

$$L = 10 \text{ m}$$

$$\Delta h = 1,25 \text{ m}$$

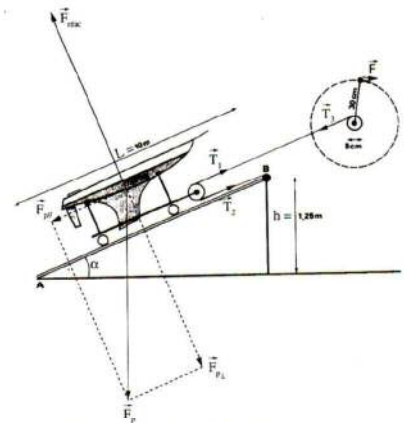
$$\eta = 0,6$$

$$v = 1,5 \text{ m/s}$$

$$\ell = 0,3 \text{ m}$$

$$r = 0,04 \text{ m} : \text{rayon du treuil}$$

$$\sin \alpha = \frac{\Delta h}{L} = 0,125$$



Les tensions  $\vec{T}_1$ ,  $\vec{T}_2$  et  $\vec{T}_3$  ont la même intensité notée T dans la résolution.

- a) Equilibre du bateau dans le cas idéal :

$$F_{p//} = 2 \cdot T \Rightarrow m \cdot g \cdot \sin \alpha = 2 \cdot T \Rightarrow T = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha}{2}$$

Equilibre du treuil dans le cas idéal :

$$T \cdot r = F_{\text{idéale}} \cdot \ell \Rightarrow T = \frac{F_{\text{idéale}} \cdot \ell}{r}$$

En égalant les deux expressions pour T :

$$\frac{F_{\text{idéale}} \cdot \ell}{r} = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha}{2} \Rightarrow F_{\text{idéale}} = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot r}{2 \cdot \ell}$$

Rendement :

$$\eta = \frac{F_{\text{idéale}}}{F_{\text{réelle}}} \Rightarrow F_{\text{réelle}} = \frac{F_{\text{idéale}}}{\eta} = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot r}{2 \cdot \ell \cdot \eta} = \frac{720 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot 0,125 \cdot 0,04 \text{ m}}{2 \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 0,6} = 100 \text{ N}$$

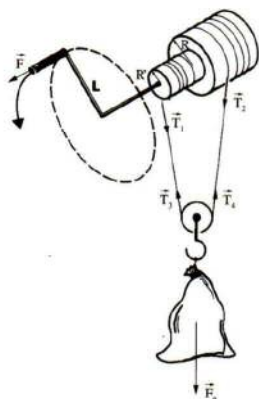
Il faut appliquer une force de 100 N à la manivelle du treuil.

- b) Puissance utile :

$$P_{\text{utile}} = F_{p//} \cdot v = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v$$

Rendement :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{fournie}}} = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v}{P_{\text{fournie}}} \Rightarrow P_{\text{fournie}} = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v}{\eta} = \frac{720 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot 0,125 \cdot 1,5 \text{ m/s}}{0,6} = 2250 \text{ W}$$



a) Pour un tour de manivelle le fil se déroule sur une circonférence du petit cylindre ( $2\pi R'$ ) et s'enroule sur une circonférence du grand cylindre ( $2\pi R$ ). La différence vaut  $2\pi(R - R')$ ; elle se répartit sur les deux brins de fil soutenant la poulie mobile et le fardeau monte de  $\frac{2\pi \cdot (R - R')}{2} = \pi \cdot (R - R')$

Pour N tours de manivelle, le fardeau s'élève de  $\Delta h = N\pi(R - R')$ .

b)  $m = 80 \text{ kg}$     $L = 0,30 \text{ m}$     $R = 0,20 \text{ m}$     $R' = 0,15 \text{ m}$

Les tensions  $\vec{T}_1$ ,  $\vec{T}_2$ ,  $\vec{T}_3$  et  $\vec{T}_4$  ont la même intensité notée T dans la résolution.

Equilibre du treuil :

$\vec{T}_1$  et  $\vec{F}$  font tourner le treuil dans le sens inverse des aiguilles d'une montre; la somme des moments de force vaut  $F \cdot L + T \cdot R'$

$\vec{T}_2$  fait tourner le treuil dans le sens des aiguilles d'une montre; son moment vaut  $T \cdot R$

A l'équilibre :  $F \cdot L + T \cdot R' = T \cdot R \Rightarrow F \cdot L = T(R - R') \Rightarrow T = \frac{F \cdot L}{(R - R')}$

Equilibre de la charge :

Bien que les brins de fil ne soient pas verticaux, on admet que  $m \cdot g = 2 \cdot T \Rightarrow T = \frac{m \cdot g}{2}$

En égalant les deux expressions pour T :

$$\frac{F \cdot L}{(R - R')} = \frac{m \cdot g}{2} \Rightarrow F = \frac{m \cdot g \cdot (R - R')}{2 \cdot L} = \frac{80 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot (0,20 \text{ m} - 0,15 \text{ m})}{2 \cdot 0,3 \text{ m}} = 66,7 \text{ N}$$

L'intensité de la force appliquée à la manivelle vaut environ 67 N.

## Chapitre 10. La pression

*Marcher dans la neige fraîche est délicat puisque l'on y enfonce très profondément; avec des skis, on enfonce beaucoup moins. La force de pesanteur du personnage, qui n'a pourtant pas changé, est cette fois répartie sur une plus grande surface de contact, ce qui en diminue les effets.*

### 1 Pression au contact de deux solides

La pression entre deux corps solides est une grandeur qui caractérise le contact entre ces corps. Les effets de ce contact sont d'autant plus marqués que :

- la force qui provoque le contact (force pressante  $\vec{F}$ ) est intense;
- la surface de contact (surface pressée S) est petite.

On définit dans ce cas la pression p par :

$$p = \frac{F}{S}$$

#### Remarques

La force pressante est la composante perpendiculaire de la force qui agit sur la surface pressée.

Pour augmenter l'effet d'une force pressante, on en diminue la surface de contact (couteau aiguisé, punaise, etc).

Pour diminuer l'effet d'une force pressante, on en augmente la surface de contact (skis, roues de camions, bretelles de sacs à dos, etc).



- a) La quantité d'électricité produite est plus petite que celle qui a été nécessaire à pomper l'eau car le rendement d'une transformation d'énergie est toujours plus petit que 1.
- b) Le réseau suisse de production d'électricité comprend des centrales nucléaires; ces dernières ne peuvent pas être mises en route ou arrêtées en quelques heures, il faut plusieurs jours pour une telle opération. La consommation d'électricité varie beaucoup en une journée (voir le graphique «Consommation d'énergie électrique» à la dernière page du chapitre ÉLECTRICITÉ). Le surplus d'énergie produit par les centrales nucléaires pendant les heures de faible consommation est stocké sous forme d'énergie potentielle de position en pompant de l'eau du lac Léman dans le lac de l'Hongrin pour pouvoir la turbiner (fournir de l'électricité) pendant les heures de forte consommation électrique. Cette opération permet de récupérer une grande partie de l'énergie utilisée pour le pompage qui, sans cela, serait dissipée sous forme de chaleur.

## 2 Unités

L'unité de mesure de pression est le pascal [Pa], du nom du savant français Blaise Pascal (1623 - 1662). Une pression de 1Pa caractérise l'effet d'une force de 1N uniformément répartie sur une surface de 1m<sup>2</sup>.

Un multiple du pascal est utilisé :

— l'hectopascal: 1[hPa] = 100[Pa]

#### Notes

Le bar (1bar=10<sup>5</sup>Pa) et le millibar (1millibar=10<sup>2</sup>Pa) sont encore utilisés mais ne font pas partie du système international d'unités.

On rencontre encore des pressions exprimées en atmosphères, dont la valeur est proche du bar.

**Il est utile de savoir ce que ces unités représentent mais il ne faut pas les utiliser.**



Intérieur d'un manomètre.

## 3 La pression dans les fluides

Une pression règne aussi au sein d'un liquide ou d'un gaz; il en résulte l'existence d'une force pressante sur toute surface en contact avec le liquide ou le gaz. On peut mettre cette force en évidence avec un tube à obturateur.

#### Remarque

L'obturateur n'est là que pour mettre en évidence la force pressante qu'il subit, prouvant ainsi l'existence d'une pression dans le liquide. Cette pression existe même en l'absence de l'obturateur.

## 4 Le principe fondamental de l'hydrostatique

La pression varie au sein d'un liquide. On peut s'en rendre compte en nageant sous l'eau: la force pressante que nous ressentons sur nos tympans est plus forte au fond de la piscine que près de la surface.



Sonde manométrique.



Centrons l'obturateur du tube de la figure en un point **A** du liquide. Notons **S** la surface de l'obturateur et **F** l'intensité de la force pressante exercée par le liquide. La valeur de la pression  $p_A$  au point **A** du liquide est donnée par :

$$p_A = \frac{F}{S}$$

L'emploi d'une sonde manométrique montre que cette pression dépend de :

- la profondeur  $h_A$  à laquelle se trouve le point considéré sous la surface libre
  - la masse volumique  $\rho_{liq}$  du liquide
  - l'intensité de la gravitation  $g$ ,
- ce qui se traduit algébriquement par :

$$p_A = \rho_{liq} \cdot g \cdot h_A$$

Si on tient compte de la pression  $p_{at}$  exercée sur la surface libre :

$$p_A = p_{at} + \rho_{liq} \cdot g \cdot h_A$$

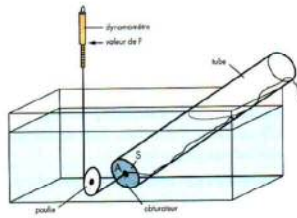
**Remarque**

La pression d'un liquide ne dépend ni de la forme, ni du volume du récipient qui le contient, mais de la hauteur de liquide.

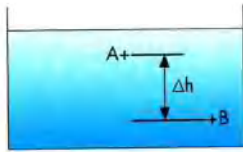
Le principe fondamental de l'hydrostatique exprime, à partir de la relation ci-dessus, la différence de pression  $\Delta p$  entre deux points **A** et **B** d'un même liquide à l'équilibre :

$$\Delta p = \rho_{liq} \cdot g \cdot \Delta h$$

$\Delta h$  étant la différence d'altitude entre **A** et **B**.



On tire le dynamomètre vers le haut. A l'ouverture de l'obturateur, le dynamomètre mesure l'intensité de la force pressante.

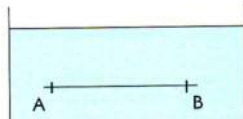


## 5 Conditions d'équilibre d'un liquide

D'après le principe fondamental, deux points **d'un même liquide à l'équilibre et situés dans un même plan horizontal** doivent être soumis à la même pression :

$$p_A = p_B$$

Si ce n'est pas le cas, le liquide va s'écouler du point où la pression est la plus grande vers le point où la pression est la plus petite. C'est le principe des vases communicants.



Nous avons étudié jusqu'ici des solides et des liquides. La matière existe aussi à l'état gazeux. Parmi les gaz bien connus, citons l'air, la vapeur d'eau, l'oxygène gazeux, le dioxyde de carbone (gaz carbonique). Pour faciliter le stockage des gaz, on les comprime dans des bouteilles.

## 8 Volume et pression d'un gaz

On comprime un gaz en diminuant son volume. Les gaz sont **compressibles**.

On détend un gaz en augmentant son volume. Les gaz sont **expansibles**.

Plus on comprime un gaz, plus il agit sur les parois du récipient. On dit que le gaz exerce une certaine **pression**.

La pression d'un gaz contenu dans un récipient se mesure avec un **manomètre**. Elle s'exprime en pascals [Pa].

La différence de pression  $\Delta p$  entre deux points **A** et **B** d'un gaz s'exprime, comme pour les liquides, par :

$$\Delta p = \rho_{gaz} \cdot g \cdot \Delta h$$

$\Delta h$  étant la différence d'altitude entre **A** et **B**.



Un scaphandre de plongée contient de l'air comprimé.

## 9 Pression atmosphérique

La pression atmosphérique est la pression de l'air qui nous entoure. Elle se mesure avec un manomètre spécial appelé **baromètre**.

La pression atmosphérique est souvent donnée en hectopascals. A titre d'exemple, la pression atmosphérique normale, au niveau de la mer, vaut 1013 hPa.



Compression d'un gaz à l'aide d'une seringue.

## 6 Liquides non miscibles

Certains liquides différents mis dans un même récipient ne se mélangent pas. C'est le cas du mercure, de l'eau et de l'huile. On dit que de tels liquides sont non miscibles; ils se placent spontanément dans l'ordre décroissant de leurs masses volumiques depuis le fond du récipient.



## 7 Principe de Pascal

Si l'on modifie la pression en un point d'un liquide, cette variation est transmise en tout point du liquide.

Cette propriété est exploitée dans une presse hydraulique. Deux cylindres de sections différentes sont reliés par un canal et remplis de liquide (en général de l'huile); des pistons coulisent dans les cylindres (fig. ci-contre).

Une lourde charge dont la force de pesanteur a une intensité  $F_p$  est posée sur le grand piston, de section **S**; l'ensemble est équilibré par une force d'intensité **F** appliquée sur le petit piston, de section **S'**.

Le fardeau provoque une augmentation de pression

$$\Delta p = \frac{F_p}{S}$$

au sein de tout le liquide, y compris sous le petit piston.

A l'équilibre, cette augmentation de pression est compensée par le petit piston :

$$\Delta p = \frac{F}{S'}$$

L'équilibre de la presse est ainsi donné par :

$$\frac{F_p}{S} = \frac{F}{S'}$$

Comme  $S' < S$ , alors  $F < F_p$ . Une force de petite intensité permet d'équilibrer une charge ayant une grande force de pesanteur.

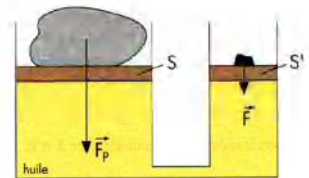


Schéma d'une presse hydraulique.

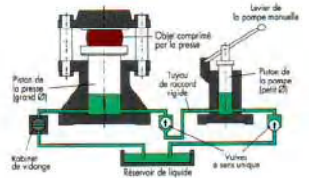


Schéma d'une presse hydraulique.

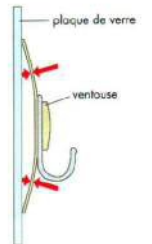
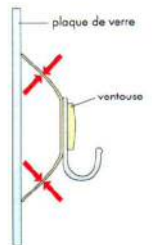
## Masse d'un litre d'air

A la température et à la pression atmosphérique ambiantes, un litre d'air sec a une masse d'environ 1,3 g.

## Effets de la pression atmosphérique

La pression de l'air s'exerce sur tous les objets, de chaque côté des parois, par exemple sur celles d'une ventouse.

En appuyant la ventouse sur la plaque de verre, on chasse la plus grande partie de l'air emprisonné entre la ventouse et la plaque. La pression de l'air enfermé est alors inférieure à la pression atmosphérique et la ventouse reste plaquée.



Fonctionnement d'une ventouse.

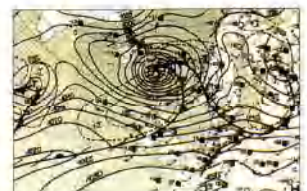
## 10 Variations de la pression atmosphérique

La pression atmosphérique varie, comme l'indiquent les bulletins météorologiques.

Une région où la pression atmosphérique est inférieure à celle des régions avoisinantes est appelée zone de basse pression ou de **dépression**.

Une région où la pression est supérieure à celles des régions avoisinantes est appelée zone haute pression ou de **surpression**, ou encore **anticyclone**.

Une dépression s'accompagne de vent et en général de pluie. Un anticyclone est au contraire signe de stabilité et en général de beau temps.



Carte météorologique.



**E**  
EXERCICES

- 1 Pourquoi un couteau dont le tranchant est émoussé coupe-t-il moins bien qu'un couteau aiguisé ?
- 2 Lorsqu'on mange, les incisives, les canines et les molaires ont des fonctions différentes. Les incisives et les canines permettent de couper et déchirer les aliments; les molaires permettent de les broyer.

Expliquer comment la forme et la position des dents leur donnent leur spécialisation.



- 3 Durant les années soixante, la mode était aux souliers ayant des talons aiguille. Ces souliers causaient de tels dégâts sur les sols qu'on a dû parfois en interdire le port.

Quelle était la nature de ces dégâts ?

- 4 a) Quelle est la pression exercée par les pattes d'un éléphant d'Afrique de 5 tonnes si l'on admet qu'il est immobile et que la surface de contact de chacune de ses pattes avec le sol est un disque de 30 cm de diamètre ?



- b) Comparer cette pression à celle exercée par les sabots d'une vache de 600 kg en admettant que la surface d'un sabot avec le sol est un disque de 10 cm de diamètre.
- c) Comparer cette pression à celle exercée par les talons aiguille d'une femme de 60 kg en admettant que leur surface vaut 1 cm<sup>2</sup> et qu'ils supportent chacun le quart de la force de pesanteur de la femme.

Note: arrondir g à 10 N · kg<sup>-1</sup>.

- 5 Une personne exerce une poussée de 10 N sur la tête d'une épingle.

Quel est l'ordre de grandeur de la pression exercée par la pointe de cette épingle si l'on admet que sa surface vaut un centième de millimètre carré ?



- 6 Un bloc d'acier à la forme d'un parallélépipède rectangle de 20 mm sur 20 mm sur 50 mm.

- a) Quelle est la pression qu'il exerce sur une planche horizontale quand il est posé sur sa face carrée ?
- b) Cette pression varie-t-elle si l'on incline la planche ?

- 7 On recouvre une dalle de béton d'une couche de terre de 60 cm d'épaisseur.

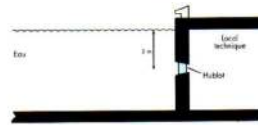
Quelle est la pression qu'elle exerce si sa masse volumique est égale à 1400 kg · m<sup>-3</sup> ?

Note: arrondir g à 10 N · kg<sup>-1</sup>.

**E**  
EXERCICES

- 8 Représenter la pression dans la piscine en coloriant l'eau avec un crayon gris en fonction de la couleur à mesure que la pression augmente.

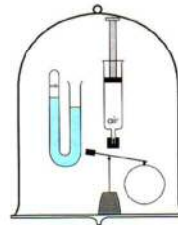
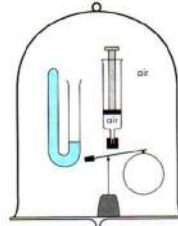
Représenter également les forces pressantes qui agissent sur le fond et sur la paroi de la piscine.



- 9 Pressions et forces pressantes

Expériences sous la cloche à vide

Reproduire les dessins et griser/bleuir les régions de l'espace où règne une pression d'air. Si nécessaire, utiliser des gris plus ou moins foncés pour exprimer des pressions plus ou moins grandes.

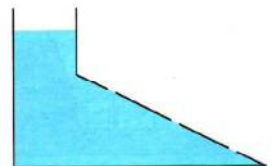


- 10 La photo montre deux récipients dont les fonds ont des surfaces de même aire. Ils sont remplis avec un même liquide jusqu'à une même hauteur au-dessus de leur fond.



L'intensité de la force exercée par le liquide sur le fond de chaque récipient est-elle la même ?

- 11 Esquisser sur une figure les jets de liquide sortant par les trois trous.



- 12 On réalise une perfusion sanguine dans le bras d'un malade. La pression du sang dans la veine surpasse de 1,5 kPa la pression atmosphérique.

Quelle doit être la dénivellation minimale entre le bras et le flacon pour que le sang s'écoule du flacon dans la veine ?

Note: la masse volumique du sang est égale à 1060 kg · m<sup>-3</sup>.

**E**  
EXERCICES

- 13 Une des parois verticales d'un aquarium rempli d'eau mesure 40 cm de hauteur sur 90 cm de longueur.

Quelle est l'intensité de la force résultante exercée sur cette paroi ?

Note: arrondir g à 10 N · kg<sup>-1</sup>.

- 14 Une collision navale provoque une voie d'eau à 3 mètres sous la ligne de flottaison d'un bateau. L'air du trou dans la coque est de 100 cm<sup>3</sup>.

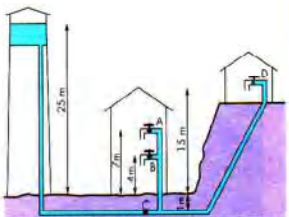
Quelle est l'intensité minimale de la force qu'il faut exercer sur un tampon pour colmater cette voie d'eau ?

Note: arrondir g à 10 N · kg<sup>-1</sup>.

- 15 La figure représente un réseau de distribution d'eau potable.

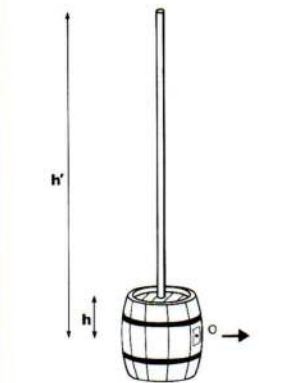
Quelles sont les pressions, dues à l'eau uniquement, en A, B, C et D, quand tous les robinets sont fermés ?

Note: arrondir g à 10 N · kg<sup>-1</sup>.



- 16 Au XVII<sup>e</sup> siècle, Pascal réalisa cette expérience qui devint célèbre. Elle est souvent citée comme un paradoxe de l'hydrostatique.

Au centre de la paroi supérieure d'un tonneau rempli d'eau, on fixe un tube vertical étroit de quelques mètres de hauteur; si l'on achève le remplissage en versant de l'eau jusqu'au sommet du tube, ce qui exige un faible volume de liquide, on est fort surpris de voir les douves du tonneau se disjoindre et le liquide jaillir à l'extérieur.



- a) Expliquer pourquoi.
- Considérons une portion de douve ayant la forme d'un carré de centre O et de 10 cm de côté.
- b) Calculer l'augmentation de l'intensité de la force exercée par l'eau sur cette portion de douve quand la hauteur de l'eau dans le tube passe de h = 0,5 m à h' = 10 m.

Note: arrondir g à 10 N · kg<sup>-1</sup>.

- 17 Un cylindre de verre contient trois liquides non miscibles, la hauteur de chaque liquide vaut 0,1 m:

- du pétrole:  $\rho = 800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- de l'eau:  $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- du mercure:  $\rho = 13600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

La pression atmosphérique est de 100 kPa.

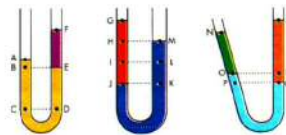
Quelles sont les pressions en kPa:

- a) au point A ? (surface libre du pétrole)
- b) au point B ? (interface eau-pétrole)
- c) au point C ? (interface mercure-eau)
- d) au point D ? (fond du mercure)
- e) Tracer dans un système d'axes le graphe de la pression en fonction de la profondeur.

**E**  
EXERCICES

- 18 Chacun des tubes représentés sur la figure contient plusieurs liquides non miscibles.

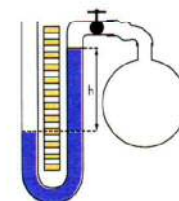
Indiquer, pour chaque figure, les couples de points où les pressions sont identiques.



- 19 Pour mesurer de faibles surpressions (ou dépressions) par rapport à la pression atmosphérique, on se sert habituellement d'un tube en U contenant du liquide.

Une graduation placée entre ses branches permet de déterminer la dénivellation h entre les niveaux du liquide dans chaque branche.

- a) Le gaz contenu dans le récipient représenté sur la figure a-t-il une pression supérieure ou inférieure à la pression atmosphérique ?
- b) Calculer la pression dans le récipient si la dénivellation h mesure 6,8 cm et si le tube contient de l'eau.

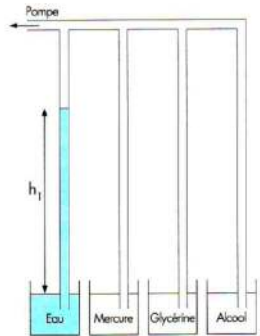


- 20 Les extrémités de quatre tubes verticaux sont immergées dans des récipients contenant respectivement:

- de l'eau:  $\rho_1 = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- du mercure:  $\rho_2 = 13600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- de la glycérine:  $\rho_3 = 1250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- de l'alcool:  $\rho_4 = 800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Au moyen d'une pompe à vide, on aspire partiellement l'air contenu dans ces quatre tubes.

À l'équilibre, la colonne d'eau dans le premier tube s'élève jusqu'à une hauteur h<sub>1</sub> de 102 cm au-dessus de la surface libre.



- a) Calculer les hauteurs h<sub>2</sub>, h<sub>3</sub> et h<sub>4</sub> atteintes par les colonnes de liquide dans les trois autres tubes.
- b) Représenter ces colonnes sur la figure à l'échelle 1:10.

Note: admettre que dans les récipients les niveaux restent les mêmes.

- 21 Vrai ou faux ?

- L'air n'a pas de masse, car il est invisible.
- Le volume d'un gaz ne dépend que de la masse du gaz.
- Avec un manomètre, on peut mesurer la masse d'un gaz.
- La valeur de la pression atmosphérique est voisine de 1000 hPa.
- Les gaz, comme les liquides, sont incompressibles.
- Le baromètre est un manomètre adapté à la mesure de la pression atmosphérique.

- 22 Calculer la masse moyenne de l'air contenu dans une salle de classe de dimensions 10 x 7 x 3 (en mètres).



**23** Remplir un verre d'eau, mettre une feuille de papier et le retourner (au-dessus d'une cuvette, par précaution). Qu'observe-t-on ? Expliquer.

**24** Le piston d'une seringue est enfoncé au maximum; un doigt obture la seringue; on tire sur le piston. On maintient le piston tiré et on retire le doigt après avoir partiellement immergé la seringue dans l'eau.

Que se passe-t-il et pourquoi ?

Expliquer alors comment on remplit une seringue et pourquoi elle se remplit.

**25** Lorsqu'une bouteille d'oxygène comprimé est «vide», reste-t-il encore du gaz dedans ?

Si oui, quelle est sa pression ?

**26** Un baromètre est enfermé dans un sac en matière plastique, fermé hermétiquement. On appuie sur le sac avec les mains. Qu'indique le baromètre ? Pourquoi ?

Vous pouvez réaliser l'expérience.

**27** Certains aliments sont emballés sous vide.

a) Pour quelle raison l'emballage «colle-t-il à la surface de ces aliments ?

b) Que se passe-t-il quand on perce l'emballage ?



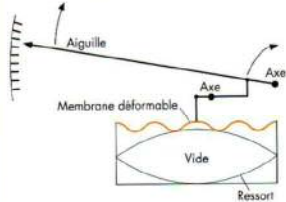
**28** Les baromètres sont des instruments destinés à mesurer la pression atmosphérique.

La figure illustre le principe de fonctionnement d'un type de baromètre dit «anéroïde».

Cet instrument comporte essentiellement une capsule cylindrique à l'intérieur de laquelle règne un vide poussé. Un ressort empêche la capsule de s'écraser. Les déformations subies par une face de cette capsule sous l'effet des variations de la pression atmosphérique sont amplifiées par un mécanisme relié à une aiguille.



Quand l'aiguille de l'instrument représenté sur la figure tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, la pression atmosphérique augmente-t-elle ou diminue-t-elle ?



**29**

a) Quelle est l'intensité de la force pressante par l'atmosphère sur une vitre rectangulaire de 60 cm sur 40 cm si la pression atmosphérique vaut 1000 hPa ?

b) Comment se fait-il que la vitre résiste à une telle poussée ?

**30**

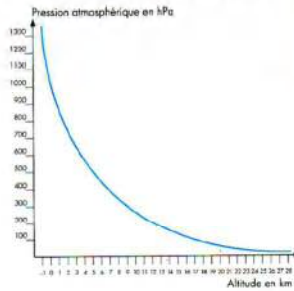
Une seringue dont le piston peut coulisser sans frottements contient un peu d'air. Son robinet est fermé et elle est maintenue verticalement, son orifice dirigé vers le bas.

On est en train de la retourner de façon à ce que son orifice soit dirigé vers le haut. On observe alors que son piston ne tombe pas. Pourquoi ?

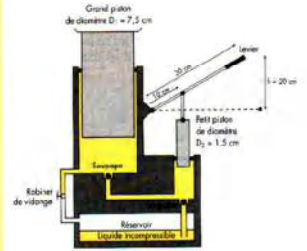


**31** Ce graphique donne la pression atmosphérique en fonction de l'altitude.

- Quelle est la pression atmosphérique à une altitude de 4000 m ?
- À quelle altitude la pression atmosphérique est-elle deux fois plus petite qu'au niveau de la mer ?
- À quelle altitude est-elle quatre fois plus petite ?
- À quelle altitude est-elle huit fois plus petite ?



**32** La figure représente un cric hydraulique.



- Quelle est la fonction du robinet de vidange ?
- De quelle distance s'élève le grand piston si l'on abaisse le levier de 20 cm ?
- Combien de fois faut-il abaisser le levier pour que le grand piston s'élève de 15 cm ?
- Si le rendement de ce cric vaut 85%, quelle est l'intensité de la pesanteur de l'objet qu'il permet de soulever en exerçant une poussée de 50 N sur l'extrémité du levier ?

## ÉTUDE DE DOCUMENTS

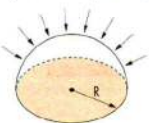
**33** L'intensité de la résultante  $\vec{F}$  de toutes les forces pressantes exercées par l'atmosphère sur une demi-sphère de rayon  $R$  est donnée par la relation :

$$F = p \cdot \pi \cdot R^2$$

F: intensité de la force en [N]

p: pression atmosphérique en [Pa]

R: rayon de la demi-sphère en [m]



En 1654, à Magdebourg, Otto von Guericke effectua l'expérience suivante: il appliqua deux demi-sphères de 51 cm de diamètre l'une contre l'autre. Il pompa ensuite l'air de la cavité sphérique ainsi constituée au moyen d'une pompe de son invention. Il fallut, pour séparer les deux demi-sphères, la force de traction de deux groupes de huit chevaux tirant chacun sur l'une des demi-sphères.



- Quelle aurait dû être l'intensité de la traction exercée par chaque groupe de chevaux si l'on admet que le vide régnait dans la cavité était très poussé et que, au moment de l'expérience, la pression atmosphérique valait 960 hPa ?
- Que penser du résultat précédent sachant que, lors d'un coup de collier, la traction exercée par un cheval est d'environ 3 kN ?
- Comment Otto de Guericke aurait-il pu faire l'économie de huit chevaux lors de sa démonstration ?



## Corrigé des exercices

### La pression

### Exercice 1

Le tranchant émoussé présente une plus grande surface que celui d'un couteau bien aiguisé. Pour une même force exercée, la pression est plus faible, le couteau coupe moins bien.

### La pression

### Exercice 2

Les incisives sont placées sur le devant de la mâchoire, elle sont tranchantes et permettent de couper les aliments. Les canines, placées sur le côté, sont pointues et permettent de déchirer les aliments. Les molaires, placées au fond de la bouche, sont plates. Plus proches de l'articulation de la mâchoire, elles peuvent appliquer une plus grande force. Elles permettent d'écraser les aliments.

### La pression

### Exercice 3

La forte pression exercée par les talons aiguille créaient des «trous», comme le ferait un poinçon, dans les sols.

### La pression

### Exercice 4

La pression étant définie comme le rapport de la force pressante par la surface de contact, on obtient:

a) Un éléphant exerce une pression de:

$$F = m \cdot g \quad p = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{S}$$

$$p = \frac{5 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}}{4 \cdot \pi \cdot (0,15 \text{ m})^2} = 1,77 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

b) Une vache exerce, dans les mêmes conditions, une pression de  $p = 1,91 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

c) Une femme sur des talons aiguille exerce une pression  $p = 4,77 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

D'où les dégâts causés par les talons aiguille !

### La pression

### Exercice 5

L'ordre de grandeur de la pression exercée vaut:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{10 \text{ N}}{10^{-8} \text{ m}^2} = 10^9 \text{ Pa}$$

**La pression** **Exercice 6**

a) La masse du bloc d'acier s'obtient en multipliant son volume par sa masse volumique, le volume étant le produit de la surface de contact par la hauteur du parallélépipède :

$$p = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{S} = \frac{V \cdot \rho \cdot g}{S} = \frac{S \cdot h \cdot \rho \cdot g}{S} = h \cdot \rho \cdot g$$

$$p = 50 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 7,85 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} = 3930 \text{ Pa}$$

La pression exercée par le bloc d'acier vaut environ 3 900 Pa.

b) Cette pression diminue lorsqu'on incline la planche, seule la composante de la force de pesanteur perpendiculaire à la planche exerce une force pressante.

**La pression** **Exercice 7**

On choisit une surface S quelconque pour calculer la pression de l'épaisseur de terre :

$$p = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{S} = \frac{V \cdot \rho \cdot g}{S} = \frac{S \cdot h \cdot \rho \cdot g}{S} = h \cdot \rho \cdot g$$

$$p = 0,6 \text{ m} \cdot 1,4 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} = 8,4 \cdot 10^3 \text{ Pa}$$

**La pression** **Exercice 8**

Il n'y a pas de corrigé pour cet exercice.

**La pression** **Exercice 9**

Il n'y a pas de corrigé pour cet exercice.

**La pression** **Exercice 10**

La pression exercée par un liquide sur le fond du récipient qui le contient ne dépend que de la hauteur de liquide. Elle ne dépend pas de la forme du récipient.

Si la surface du fond du récipient est la même, la force exercée sur le fond sera la même.

**La pression** **Exercice 11**

Il n'y a pas de corrigé pour cet exercice.

**La pression** **Exercice 16**

a) La pression ne dépend que de la hauteur de liquide, elle ne dépend pas du diamètre du tube. Le tonneau est construit pour pouvoir résister à une pression donnée, c'est-à-dire à la pression exercée par le liquide contenu. L'augmentation de pression due à la colonne de liquide contenue dans le tube peut être suffisante pour faire éclater le tonneau. Le tube pourrait être aussi fin que l'on veut, on obtiendrait le même résultat.

b) La pression exercée par le liquide contenu dans le tube de hauteur h' vaut:  $p' = \rho \cdot g \cdot h'$

La pression exercée par le liquide contenu dans le tonneau à la hauteur h vaut:  $p = \rho \cdot g \cdot h$

La différence de pression est de:  $\Delta p = \rho \cdot g \cdot (h' - h)$

L'augmentation de l'intensité de la force est égale à:  $\Delta F = \Delta p \cdot S = \rho \cdot g \cdot (h' - h) \cdot S$

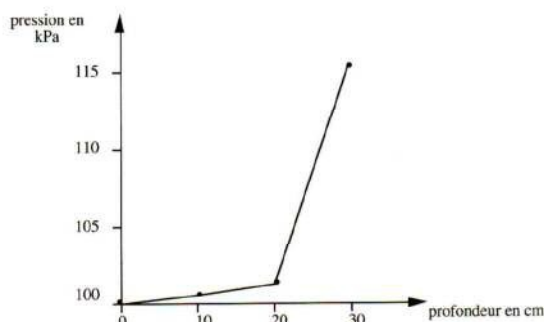
$$\Delta F = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (10 \text{ m} - 0,5 \text{ m}) \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 = 950 \text{ N}$$

L'augmentation de la force pressante vaut 950 N.

**La pression** **Exercice 17**

On supposera une hauteur égale (0,1 m) pour les trois liquides. La pression de chaque colonne de liquide est donnée par:  $p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$

- a) A la surface libre du pétrole  $p_A = 100 \text{ kPa}$
- b) A l'interface eau-pétrole  $p_B = p_A + p_{\text{pétrole}} = 100 \text{ kPa} + 0,8 \text{ kPa} = 100,8 \text{ kPa}$
- c) A l'interface mercure-eau  $p_C = p_A + p_{\text{pétrole}} + p_{\text{eau}} = 100,8 \text{ kPa} + 1 \text{ kPa} = 101,8 \text{ kPa}$
- d) Au fond du cylindre  $p_D = p_A + p_{\text{pétrole}} + p_{\text{eau}} + p_{\text{mercure}} = 101,8 \text{ kPa} + 13,6 \text{ kPa} = 115,4 \text{ kPa}$
- e)



**La pression** **Exercice 12**

La pression du sang dans les veines surpasse de 1,5 kPa la pression atmosphérique; la poche de sang est soumise à la pression atmosphérique (poche scellée). Pour que le sang s'écoule de la poche dans le bras du patient, il faut au minimum compenser la pression sanguine.

$$p_{\text{sang}} = \rho \cdot g \cdot \Delta h_{\text{minimum}} \quad \text{d'où} : \Delta h_{\text{minimum}} = \frac{1,5 \cdot 10^3 \text{ Pa}}{1,06 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}} = 0,144 \text{ m}$$

La différence de hauteur entre la poche de sang et le bras du patient doit être plus grande que 15 cm.

**La pression** **Exercice 13**

La force résultante s'exerce au centre de la paroi de l'aquarium, soit à une profondeur de 0,2 m.

La pression au centre de la paroi vaut:

$$p = \rho \cdot g \cdot \Delta h = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 0,2 \text{ m} = 2 \text{ 000 Pa}$$

La force résultante est le produit de la pression par la surface de la paroi:

$$F = p \cdot S = 2 \text{ 000 Pa} \cdot 0,4 \text{ m} \cdot 0,9 \text{ m} = 720 \text{ N}$$

**La pression** **Exercice 14**

La pression exercée par l'eau de mer à cette profondeur vaut:

$$p = \rho \cdot g \cdot \Delta h = 1030 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 3 \text{ m} = 30,9 \cdot 10^3 \text{ Pa}$$

et  $F = p \cdot S = 30,9 \cdot 10^3 \text{ Pa} \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 = 309 \text{ N}$

La force exercée sur le tampon doit être d'au moins 309 N.

**La pression** **Exercice 15**

Les robinets étant fermés, la pression exercée aux différents points du réseau est donnée par:

$$p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

en A  $p = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 18 \text{ m} = 1,8 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

en B  $p = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

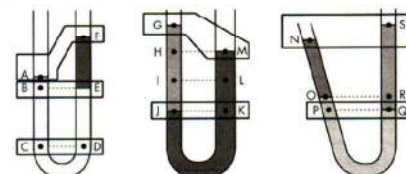
en C  $p = 2,6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

en D  $p = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

La pression est plus élevée lorsque la dénivellation est grande. En D, la pression sera relativement faible surtout si un des robinets placés en A ou B est ouvert.

**La pression** **Exercice 18**

Les couples de points où la pression est identique sont encadrés.



**La pression** **Exercice 19**

a) Le gaz enfermé dans le ballon est à une pression inférieure à la pression atmosphérique. La pression atmosphérique est compensée par la pression du gaz dans le ballon augmentée de la pression exercée par la colonne de liquide de hauteur h.

b) La pression du gaz vaut:

$$p_{\text{gaz}} = p_{\text{atm}} - p_{\text{eau}} = p_{\text{atm}} - \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot h = 10^5 \text{ Pa} - 0,0068 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 0,9932 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

**La pression** **Exercice 20**

La dépression, identique dans chacun des tubes est égale à:  $\Delta p = \rho \cdot g \cdot h$

- a) Tube contenant de l'eau:  $\Delta p = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 1,02 \text{ m} = 10,2 \text{ kPa}$
- b) Tube contenant du mercure:  $\Delta p = 10,2 \text{ kPa}$   $h_2 = 0,075 \text{ m}$
- c) Tube contenant de la glycérine:  $\Delta p = 10,2 \text{ kPa}$   $h_3 = 0,816 \text{ m}$
- d) Tube contenant de l'alcool:  $\Delta p = 10,2 \text{ kPa}$   $h_4 = 1,275 \text{ m}$

**La pression** **Exercice 21**

- L'air, constitué en majorité d'oxygène et d'azote (tous deux étant de la matière), possède une masse.
- Un gaz occupe tout le volume mis à sa disposition.
- Un manomètre mesure la pression.
- La valeur de la pression atmosphérique normale est  $1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  soit 1013 hPa.
- Contrairement aux liquides et aux solides, les gaz sont compressibles.
- Le baromètre mesure effectivement la pression atmosphérique.



**La pression** **Exercice 22**

La masse moyenne de l'air contenu dans une salle s'obtient en multipliant le volume de la salle par la masse volumique de l'air.

$$m = V \cdot \rho \quad m = 10 \text{ m} \cdot 7 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} \cdot 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} = 270,9 \text{ kg}$$

**La pression** **Exercice 23**

La force pressante atmosphérique compense la force de pesanteur de l'eau contenue dans le verre; la feuille de papier est en équilibre, elle reste «collée» au verre.

**La pression** **Exercice 24**

En retirant le piston de la seringue tout en conservant son ouverture bouchée par un doigt, on crée une dépression (un «vide») dans la seringue. La pression est nulle dans la seringue (elle est vide). Lorsqu'on enlève le doigt, la pression à l'embouchure de la seringue (pression de l'eau + pression atmosphérique) pousse l'eau à l'intérieur.

**La pression** **Exercice 25**

Les bouteilles de gaz comprimé contiennent du gaz à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Lorsque la bouteille se vide, la pression du gaz contenu diminue jusqu'à ce qu'elle atteigne la pression atmosphérique. Dès lors la bouteille, en équilibre, ne se vide plus.

Il reste du gaz à l'intérieur; sa pression est égale à la pression atmosphérique ambiante.

**La pression** **Exercice 26**

Le volume d'air enfermé dans le sac, à l'origine à la pression atmosphérique, diminue lorsqu'on appuie sur le sac. Par conséquent, la pression à l'intérieur du sac augmente. Le baromètre indique une pression plus élevée.

**La pression** **Exercice 27**

La pression atmosphérique s'exerce sur l'emballage qui «colle» à son contenu. En perçant l'emballage, on permet à l'air d'entrer; l'emballage se «décolle» du contenu.

**La pression** **Exercice 28**

D'après les positions relatives des deux axes de rotation, si l'aiguille tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, c'est que la pression atmosphérique sur la membrane élastique augmente.

**La pression** **Exercice 29**

La force pressante est égale à:  $F = p \cdot S = 10^5 \text{ Pa} \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,4 \text{ m} = 2,4 \cdot 10^4 \text{ N}$

Cette force pressante est très élevée. La vitre résiste malgré tout à cette force car une force pressante de même intensité s'exerce sur l'autre face de la vitre.

## Chapitre 11. La force d'Archimède

*Une situation courante: on immerge un objet dans un liquide. Va-t-il flotter ou couler? Cela dépend de l'intensité de la force d'Archimède qui s'oppose à la force de pesanteur.*

### 1 Mise en évidence de la force de pesanteur apparente

Il est plus facile de soulever un objet quand il est immergé dans l'eau.

**EXPÉRIENCE** Suspender un objet à un dynamomètre et noter l'intensité de sa force de pesanteur. Immerger progressivement l'objet dans l'eau: la valeur indiquée par le dynamomètre diminue au fur et à mesure de l'immersion. Quand celle-ci est complète, le dynamomètre indique l'intensité de la **force de pesanteur apparente** ( $F_{\text{app}}$ ) de l'objet dans l'eau, inférieure à sa force de pesanteur dans l'air.

On interprète la diminution de la valeur indiquée par le dynamomètre par l'existence d'une **poussée**, résultante de toutes les forces pressantes exercées par l'eau sur l'objet immergé: la force d'Archimède ( $F_A$ ).

La force de pesanteur apparente ( $\vec{F}_{\text{app}}$ ) est la résultante de deux forces de sens opposés: la force de pesanteur ( $\vec{F}_p$ ) et la force d'Archimède ( $F_A$ ).



*Un objet immergé dans l'eau est apparemment moins lourd que dans l'air.*

**La pression** **Exercice 30**

L'air emprisonné dans la seringue est de l'air «atmosphérique». Sa pression est égale à la pression atmosphérique de l'endroit. En retournant la seringue, le piston commence à descendre. L'augmentation de volume dans la seringue crée une baisse de pression qui compense la force de pesanteur du piston. Le piston descend de quelques millimètres et l'équilibre est rétabli. Le piston ne tombe pas.

**La pression** **Exercice 31**

Dans la première édition du manuel, il faut décaler vers la gauche les valeurs d'altitude. L'origine du graphique doit correspondre à la position -2 km.

- a) Sur le graphique, on lit alors une pression d'environ 600 hPa à une altitude d'environ 4 000 m.
- b) Au niveau de la mer (altitude 0 km) la pression est d'environ 1 000 hPa.  
Une pression de 500 hPa règne à une altitude d'environ 5 000 m.
- c) La pression est quatre fois plus faible à une altitude environ 11 000 m qu'au niveau de la mer.
- d) La pression est huit fois plus faible à une altitude d'environ 16 500 m qu'au niveau de la mer.

**La pression** **Exercice 32**

- a) La force de traction des chevaux doit compenser la résultante des forces pressantes sur une demi-sphère:  $F = p \cdot \pi \cdot R^2$

Numériquement la force de traction minimale est égale à:

$$F = 9,6 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot 3,1416 \cdot (0,255 \text{ m})^2 = 1,96 \cdot 10^4 \text{ N}$$

- b) Huit chevaux exercent une force de:  $8 \cdot 3 \cdot 10^3 \text{ N} = 2,4 \cdot 10^4 \text{ N}$ . Cette force de traction était donc suffisante pour séparer les deux demi-sphères.
- c) Il aurait été possible d'attacher l'autre demi-sphère à un rocher ou à un gros arbre par exemple.

**La pression** **Exercice 33**

- a) Une tension de 120/80 correspond à une pression sanguine systolique de 120 mm de mercure (pression maximale) et à une pression diastolique de 80 mm de mercure (pression en phase de repos du cœur).
- b) L'extrémité supérieure du tube contenant le mercure est ouverte. On mesure la pression de gonflage de la manchette c'est à dire la surpression par rapport à la pression atmosphérique.

## 2 Caractéristiques de la force d'Archimède

### Droite d'action

Elle est verticale puisque le fil de suspension reste vertical pendant l'immersion.

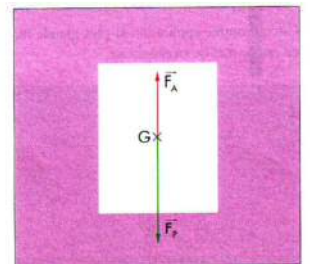
### Sens

De bas en haut puisque la force d'Archimède s'oppose à la force de pesanteur.

### Intensité

Sa valeur ( $F_A$ ) est donnée par la différence entre l'intensité de la force de pesanteur réelle ( $F_p$ ) et l'intensité de la force de pesanteur apparente ( $F_{\text{app}}$ ):

$$F_A = F_p - F_{\text{app}}$$



*Représentation vectorielle de la force d'Archimède et de la force de pesanteur.*

### Point d'application

Par commodité, on choisit l'origine de la force d'Archimède au centre de gravité du liquide déplacé qu'on nomme aussi «centre de poussée».

## 3 Influence de la nature du liquide

### Les différents paramètres

L'expérience permet de vérifier que les paramètres suivants n'influent pas sur la valeur de la force d'Archimède: force de pesanteur de l'objet, forme de l'objet, profondeur d'immersion. Par contre, la masse volumique du liquide et le volume de l'objet immergé influencent la valeur de la force d'Archimède.



**EXPERIENCE**

Plongeons un même objet dans deux liquides de masses volumiques différentes.

**La force d'Archimède augmente si la masse volumique du liquide augmente.**

Citons comme application la plus grande facilité à flotter en eau de mer qu'en eau douce.



La force d'Archimède est plus grande dans l'eau salée, de masse volumique  $1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (à gauche) que dans l'eau pure, de masse volumique  $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (à droite).

**4 Influence du volume immergé**

**EXPERIENCE**

On immerge deux solides de même force de pesanteur, mais de volumes différents, dans un même liquide.

**La force d'Archimède augmente si le volume immergé augmente.**

L'immersion s'accompagne d'une montée du niveau du liquide dans le récipient. On utilise un dispositif permettant de recueillir le liquide qui déborde.

**L'intensité de la force d'Archimède est égale à l'intensité de la force de pesanteur du liquide déplacé.**

Cette propriété s'écrit algébriquement :

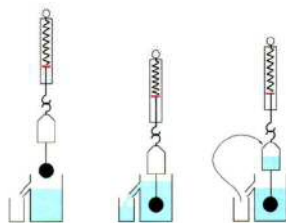
$$F_A = \rho_{\text{liq}} \cdot g \cdot V$$

$V$  : volume de liquide déplacé en  $[\text{m}^3]$

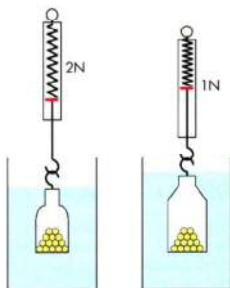
$\rho_{\text{liq}}$  : masse volumique du liquide en  $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

**Remarque**

Si le corps est totalement immergé,  $V$  représente le volume du corps. Si le corps n'est que partiellement immergé,  $V$  représente le volume de la partie immergée de ce corps.



Mesure de l'intensité de la force d'Archimède.



Plus le volume immergé augmente, plus la force d'Archimède augmente.

**5 Corps flottants**

**EXPERIENCE**

Un morceau de bois ou de saxon flotte sur l'eau.

Un bouchon métallique coule dans l'eau mais flotte sur du mercure.

Un corps est maintenu totalement immergé dans un liquide; deux cas peuvent se présenter lorsqu'on le lâche :

- a) si la force de pesanteur est inférieure à la force d'Archimède, il remonte à la surface jusqu'à ce que la poussée sur la partie immergée compense exactement la force de pesanteur; il flotte alors, car dans cette position :

$$F_A = F_p$$

Si le solide immergé et le liquide sont homogènes, il est possible de comparer leurs masses volumiques. On a dans ce cas :

$$\rho_{\text{solide}} < \rho_{\text{liquide}}$$

- b) si la force de pesanteur est supérieure à la force d'Archimède, il coule. On a dans ce cas :

$$\rho_{\text{solide}} > \rho_{\text{liquide}}$$



Selon la valeur de la masse volumique du liquide, le même corps flotte ou coule. La vis de droite paraît plus grande à cause de la refraction de la lumière.

**6 Force d'Archimède dans les gaz**

Tout comme pour les liquides, il existe une force d'Archimède dans les gaz. Son intensité est en général inférieure à celle de la force de pesanteur des corps, ce qui explique que les solides et les liquides tombent dans les gaz, alors que les gaz montent dans les liquides.

Enfin, lorsqu'un gaz est placé dans un autre gaz, il peut monter ou descendre, suivant les conditions. Ainsi des bulles de savon tombent dans l'air ambiant, mais flottent dans un récipient rempli de gaz carbonique, de masse volumique plus élevée.

**7 Densimètre**

Un tube à essai lesté est placé dans l'eau salée, puis dans l'eau et enfin dans l'alcool; il s'enfonce de plus en plus. En effet, pour que la force d'Archimède compense la force de pesanteur, le volume immergé doit être de plus en plus grand.

**Un corps flottant s'enfonce davantage dans un liquide de densité plus faible.**



Comportement d'un même corps dans des liquides différents.

Un densimètre est un flotteur constitué d'un lest surmonté d'une tige fine, graduée. Plus le liquide est dense, moins le densimètre s'enfonce. Il suffit de lire la graduation pour connaître la masse volumique (ou la densité).

Il existe des densimètres de différents types pour des usages particuliers («pèse-acide», «pèse-sirop», «pèse-moût», «pèse-lait»,...).



**EXERCICES**

**1 Vrai ou faux ?**

- La force d'Archimède sur un corps immergé ne dépend que de la nature du liquide.
- La force d'Archimède s'exerce verticalement, de bas en haut.
- Plus son volume est grand, plus la force d'Archimède sur le corps immergé est importante.
- La force d'Archimède sur un corps ne peut jamais être supérieure à la force de pesanteur de ce corps.
- Il existe au moins un liquide sur lequel un bouchon en acier flotte.

**2 Rappelez les facteurs qui influent sur l'intensité de la force d'Archimède.**

**3 Corps flottants et masse volumique du liquide**

Une bouteille en matière plastique est remplie d'eau et immergée dans un récipient contenant également de l'eau. Elle «flotte» juste sous la surface de l'eau.

- 1. Réaliser l'expérience.
- 2. Que peut-on dire de la valeur de la poussée sur la bouteille ?
- 3. La bouteille étant immergée dans de l'alcool, que va-t-il se passer ? Pourquoi ?
- 4. La bouteille étant immergée dans de l'eau salée, que va-t-il se passer ? Pourquoi ?

**4 La force d'Archimède est la résultante des forces pressantes exercées par un fluide sur la surface d'un objet.**

D'autre part, dans un liquide, la pression augmente avec la profondeur. Peut-on en déduire que, dans un liquide, l'intensité de la force d'Archimède augmente avec la profondeur ?

**5 Lorsqu'on casse une pierre en deux, la surface totale des deux morceaux est plus grande que celle de la pierre.**

La force d'Archimède est la résultante des forces pressantes exercées sur la surface d'un corps. Est-il juste de conclure que la force d'Archimède totale s'exerçant sur les deux morceaux de la pierre est plus grande que celle qui s'exerçait sur la pierre avant qu'on ne la casse ?

**6 Choisir les bonnes réponses**

Une bulle de gaz se forme au fond d'un étang et remonte à la surface. La force d'Archimède que subit cette bulle :

- a) est pratiquement nulle car la force de pesanteur du gaz est négligeable;
- b) augmente au cours de l'ascension car la pression diminuant, le volume de la bulle augmente;
- c) diminue au cours de l'ascension car la pression diminuant, la force de pesanteur de l'eau déplacée diminue;
- d) est nulle car elle est compensée par la force de frottement de l'eau durant l'ascension.

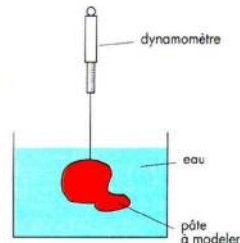
**7 Choisir les bonnes réponses**

Un ballon gonflé à l'hélium monte dans l'air car :

- a) à pression égale, l'hélium est plus léger que l'air;
- b) la pression de l'hélium sur les parois intérieures du ballon crée des forces pressantes dont la résultante, dirigée vers le haut, est supérieure à la force d'attraction terrestre que subit le ballon;
- c) la pression de l'air sur les parois extérieures du ballon crée des forces pressantes dont la résultante, dirigée vers le haut, est supérieure à la force d'attraction terrestre que subit le ballon;
- d) le ballon est aspiré par le vide d'air qui règne au-dessus de l'atmosphère.

**8 On conserve le même morceau de pâte à modeler mais on le déforme.**

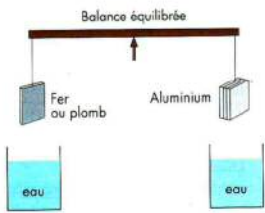
La force indiquée par le dynamomètre change-t-elle ? Justifier la réponse.



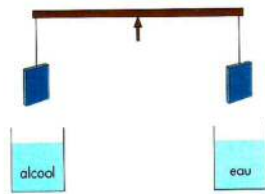


**E**  
**XERCICES**

- 9 Lorsqu'on immerge le fer et l'aluminium dans l'eau:
- la balance reste équilibrée;
  - descend du côté de l'al;
  - descend du côté du fer.
- Justifier le choix de la réponse.



- 10 Les deux objets sont identiques. Lorsqu'on les plonge, l'un dans l'alcool et l'autre dans l'eau...
- la balance reste équilibrée;
  - descend du côté de l'eau;
  - descend du côté de l'alcool.
- Justifier le choix de la réponse.



- 11 L'intensité de la force de pesanteur d'une pierre vaut 2 N. Quand cette pierre est totalement immergée dans de l'eau, l'intensité de sa force de pesanteur apparente vaut 1 N.
- Quelle est l'intensité de la force d'Archimède s'exerçant sur cette pierre ?
  - Quel est le volume de cette pierre ?
  - Quelle est la masse volumique de cette pierre ?
- Note: arrondir  $g$  à  $10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

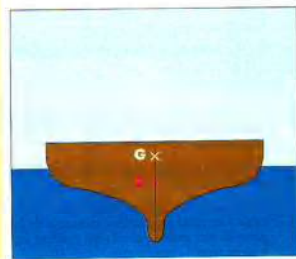
- 12 L'intensité de la force de pesanteur d'un objet vaut  $0,54 \text{ N}$ . L'intensité de sa force de pesanteur apparente, quand il est immergé dans de l'eau, vaut  $0,34 \text{ N}$ .
- Cet objet est-il creux si la masse volumique de la matière dont il est fait vaut  $2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ?
- Note: arrondir  $g$  à  $10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

- 13 Un bateau a une masse de 2,5 tonnes. Quelle est la masse d'eau qu'il déplace:
- sur un lac ( $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) ?
  - en mer ( $\rho = 1030 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) ?

- 14 Que peut-on dire de la force d'Archimède s'exerçant sur un bateau ayant coulé, comparée à celle qui s'exerçait sur le même bateau avant qu'il ne coule.

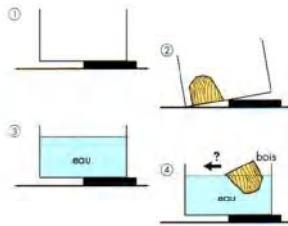
- 15 Expliquer pourquoi un gilet de sauvetage dont le volume vaut  $8 \text{ dm}^3$  suffit à maintenir un naufragé avec la tête hors de l'eau.

- 16 Equilibre d'un bateau
- La figure ci-dessous représente, en coupe schématique, un bateau.
- Que se passe-t-il lorsque le bateau s'incline de quelques degrés ?
  - Pourquoi le fait d'ajouter du lest dans la cale ou la quille augmente la stabilité ?



**E**  
**XERCICES**

- 17 On place une cuve sur un support de 1 ou 2 cm d'épaisseur de manière qu'elle ne bascule pas tout en étant assez près de la position limite d'équilibre (voir figure).
- On vérifie que, en plaçant un morceau de bois dans la partie de la cuve qui n'est pas soutenue par le support, celle-ci bascule.
- On remplit ensuite cette cuve d'eau et on la dispose comme précédemment sur le support, près de la position limite d'équilibre.

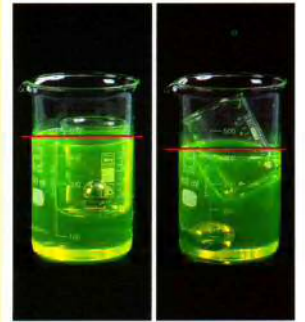


- On place alors le morceau de bois sur l'eau, au-dessus du support, puis on le pousse pour l'amener au-dessus de la partie non soutenue de la cuve. Expliquer ce qui se passe.
- On appuie maintenant sur le morceau de bois jusqu'à l'immerger complètement. Expliquer ce qui se passe.

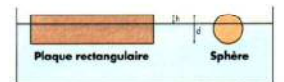
- 18 Un glaçon flotte à la surface de l'eau contenue dans un verre complètement rempli. Le glaçon fond.
- L'eau déborde-t-elle ?
  - Pourquoi dit-on souvent qu'un réchauffement général de l'atmosphère ferait fondre la glace des calottes polaires et monter le niveau des océans ?

- 19 Les icebergs sont des glaces flottantes provenant des glaciers dont les vallées débouchent sur la mer.
- Quel est le rapport du volume de la partie immergée d'un iceberg à son volume total si l'on admet que la masse volumique de l'eau de mer vaut  $1020 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  et celle de la glace  $920 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ?

- 20 Un récipient dans lequel est déposée une bille flotte à la surface de l'eau contenue dans un vase. On retire la bille du petit récipient, puis on la laisse couler dans l'eau du vase. On constate alors que le niveau de l'eau dans le vase a baissé. Expliquer cette baisse de niveau.



- 21 Un glaçon flotte-t-il sur de l'alcool ?
- 22 Une plaque de bois flotte sur un liquide. La hauteur  $h$  qui dépasse hors de l'eau est égale au tiers de son épaisseur  $d$ .
- On peut conclure que la masse volumique de ce bois est égale aux deux tiers de celle du liquide. Pourquoi ?
  - La conclusion est-elle la même si c'est une sphère qui flotte de manière que la hauteur émergente  $h$  soit égale au tiers de son diamètre  $d$  ?



- 23 Un ballonnet de caoutchouc gonflé avec de l'air est déposé sur le plateau d'une balance de précision. Cette dernière indique 2,14 g. La masse du caoutchouc est-elle égale à cette valeur ?

**ÉTUDE DE DOCUMENTS**

**24 Le Graf Zeppelin**

Les dirigeables ont été, avant les avions, les premières machines volantes à assurer des lignes transatlantiques régulières.

Le dirigeable Graf Zeppelin fut l'un des plus prestigieux. Il était constitué par une carosse rigide en alliage léger recouverte d'une toile. L'hydrogène nécessaire à le maintenir en l'air était enfermé dans des ballonnets fixés à l'intérieur de la carosse. Sa longueur mesurait 237 m et son diamètre 30,5 m. Son volume total de  $105\,000 \text{ m}^3$  se répartissait entre  $75\,000 \text{ m}^3$  d'hydrogène et  $30\,000 \text{ m}^3$  de blaugaz servant de carburant à ses moteurs.

La masse totale de sa carosse, de ses nacelles et de ses moteurs était égale à 55 tonnes. Il était équipé de cinq moteurs de 390 kW qui le propulsaient à la vitesse maximale de 130 km/h.

Durant la période entre le 18 septembre 1928 et le 18 juin 1937, ce dirigeable a effectué 590 vols totalisant 1695270 km et 17180 heures de vol.

Note: le blaugaz était un combustible de même masse volumique que l'air; il remplissait plusieurs ballonnets dans le dirigeable. Lors de sa consommation, la diminution de volume de ces ballonnets était compensée par l'entrée dans la carosse d'un même volume d'air; la masse totale du dirigeable restait ainsi la même.



Le Graf Zeppelin survolant Bâle à 400 m d'altitude.

Quelle était la charge en tonnes que ce dirigeable pouvait emporter dans de l'air aux conditions normales ?

**Corrigé des exercices**

**La force d'Archimède**

**Exercice 1**

- La force d'Archimède sur un corps immergé dépend de la nature du liquide, mais aussi du volume immergé, et de l'intensité locale de la gravitation.
- La force d'Archimède s'exerce de bas en haut; c'est la raison pour laquelle les bateaux flottent.
- La force d'Archimède est proportionnelle au volume de liquide déplacé; plus le volume est important, plus la force d'Archimède est grande.
- La force d'Archimède peut être plus grande que la force de pesanteur d'un corps. Sans cela, une balle de ping-pong ne pourrait jamais remonter à la surface.
- En effet, un boulon en acier flotte sur du mercure.

**La force d'Archimède**

**Exercice 2**

Les facteurs influençant l'intensité de la force d'Archimède sont le volume de liquide déplacé, la masse volumique du liquide et la gravitation locale  $g$ .

**La force d'Archimède**

**Exercice 3**

- Il n'y a pas de corrigé pour cette question.
- L'intensité de la force d'Archimède sur la bouteille est quasiment égale à la force de pesanteur de la bouteille remplie d'eau.
- Si la bouteille est immergée dans de l'alcool, elle coule. La masse volumique de l'alcool est plus faible que la masse volumique de l'eau; la poussée est plus faible et ne compense plus la force de pesanteur de la bouteille.
- La bouteille est immergée dans de l'eau salée. On la lâche; elle remonte à la surface et flotte avec une partie qui émerge. Dans ce cas, la masse volumique de l'eau salée est plus élevée que la masse volumique de l'eau contenue dans la bouteille et la poussée d'Archimède est plus grande que la force de pesanteur de la bouteille lorsqu'elle est totalement immergée.

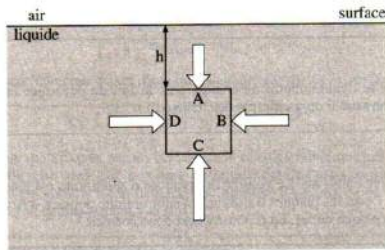
NB: Lorsqu'un objet flotte, il est en situation d'équilibre; l'intensité de la force d'Archimède est égale à l'intensité de la force de pesanteur.



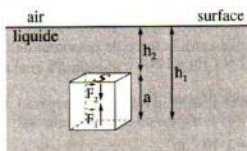
**La force d'Archimède**

**Exercice 4**

La pression exercée par un liquide dépend de la hauteur de liquide (profondeur), de la masse volumique du liquide et de l'intensité locale de la gravitation. La force d'Archimède sur un objet dépend de la **différence de pression** exercée sur le haut et le bas de cet objet. Cette différence ne dépend pas de la valeur absolue de la pression, elle ne varie pas avec la profondeur.



- Les forces pressantes en B et D s'annulent quelle que soit la profondeur.
- La poussée d'Archimède est la différence entre les forces pressantes en A et C.
- La différence des forces pressantes en A et C ne dépend pas de la profondeur h.



Quelle que soit la profondeur  $h_2$  :

$$F_A \text{ (force d'Archimède)} = F_1 - F_2$$

$$= \rho_{\text{liquide}} \cdot g \cdot (h_1 - h_2) \cdot S$$

$$= \rho_{\text{liquide}} \cdot g \cdot a \cdot S = \rho_{\text{liquide}} \cdot g \cdot V$$

**La force d'Archimède**

**Exercice 5**

La force d'Archimède dépend du volume de liquide déplacé. Que la pierre soit en un seul morceau ou en plusieurs, la force d'Archimède totale ne varie pas, la somme des volumes de chaque morceau est égale au volume total de la pierre pour autant qu'on n'ait pas perdu un morceau!

**La force d'Archimède**

**Exercice 6**

La réponse b) proposée est la seule correcte, la force d'Archimède est proportionnelle au volume de liquide déplacé.

**La force d'Archimède**

**Exercice 13**

L'intensité de la force de pesanteur du bateau est égale à  $F_p = m_{\text{bateau}} \cdot g$ . Il subit une force d'Archimède égale à:  $F_A = V \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot g$ .

Il flotte, donc  $F_p = F_A \Rightarrow m_{\text{bateau}} \cdot g = V \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot g$ .

La masse d'eau déplacée est égale à:  $m_{\text{eau}} = V \cdot \rho_{\text{eau}}$ .

D'où:  $m_{\text{bateau}} = m_{\text{eau}}$

Le bateau déplace donc la même masse d'eau qu'il navigue sur un lac ou en mer.

**La force d'Archimède**

**Exercice 14**

La force d'Archimède qui s'exerce sur un bateau coulé est plus faible que celle qui s'exercerait sur le même bateau avant qu'il ne coule car le volume de liquide déplacé est plus petit, le bateau coulé est en effet rempli d'eau (le volume d'eau déplacée est diminué d'autant). Si ce n'était pas le cas, tout bateau coulé remonterait spontanément à la surface !

**La force d'Archimède**

**Exercice 15**

La poussée d'Archimède subie par un gilet de sauvetage de 8 dm<sup>3</sup> est égale à:

$$F_A = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} = 80 \text{ N}$$

La masse de la tête d'un naufragé peut être estimée à 4 kg soit une force de pesanteur de 40 N.

La poussée subie par le gilet est donc suffisante pour maintenir la tête hors de l'eau.

**La force d'Archimède**

**Exercice 16**

- Lorsque le bateau s'incline de quelques degrés, le centre de poussée C se déplace légèrement latéralement, crée un couple et redresse le bateau.
- En ajoutant du lest dans la quille, on abaisse le centre de gravité du bateau. Plus le centre de gravité est bas, plus l'équilibre du bateau est stable.

**La force d'Archimède**

**Exercice 17**

- Le bac reste en équilibre quelque soit la position du morceau de bois. Le volume d'eau déplacé par le morceau de bois ne fait qu'élever le niveau de l'eau. L'eau transmet des pressions et non des forces.
- En immergeant le morceau de bois, le niveau de l'eau monte encore davantage et le bac reste toujours en équilibre.

**La force d'Archimède**

**Exercice 7**

Les réponses a) et c) sont correctes.

- La masse volumique de l'hélium est beaucoup plus faible que celle de l'air, à pression égale; le ballon subit une poussée d'Archimède plus élevée que sa force de pesanteur.
- La force d'Archimède est la résultante des forces pressantes exercées sur le ballon.

**La force d'Archimède**

**Exercice 8**

La force indiquée par le dynamomètre ne change pas; le fait de déformer la pâte à modeler ne modifie pas son volume sauf si on y enferme des bulles d'air.

**La force d'Archimède**

**Exercice 9**

La balance est équilibrée dans l'air. Le volume des plaques d'aluminium est plus grand que celui de la plaque de fer. Dans l'eau, les plaques d'aluminium subiront une poussée d'Archimède plus élevée que celle que subira la plaque de fer. La réponse c) est donc correcte.

**La force d'Archimède**

**Exercice 10**

Le volume des deux plaques est identique. La poussée d'Archimède sera plus élevée du côté de l'eau que du côté de l'alcool parce que la masse volumique de l'eau est plus grande que celle de l'alcool. La réponse c) est correcte.

**La force d'Archimède**

**Exercice 11**

- La valeur de la poussée d'Archimède est égale à la différence entre la force de pesanteur de la pierre et sa force de pesanteur apparente:  $F_A = F_p - F_{\text{app}} = 2 \text{ N} - 1 \text{ N} = 1 \text{ N}$ .
- La force d'Archimède est proportionnelle au volume de liquide déplacé:  $F_A = V \cdot \rho \cdot g$

$$V = \frac{F_A}{\rho \cdot g} = \frac{1 \text{ N}}{10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

- La masse volumique de cette pierre est le rapport de sa masse à son volume:

$$\rho_{\text{pierre}} = \frac{m}{V} = \frac{0,2 \text{ N}}{1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3} = 2 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

**La force d'Archimède**

**Exercice 12**

La force d'Archimède est égale à la différence entre la force de pesanteur et la force de pesanteur apparente:

$$F_A = F_p - F_{\text{app}}$$

$$F_A = 0,54 \text{ N} - 0,34 \text{ N} = 0,2 \text{ N}$$

Le volume immergé est égal à:  $V = F_A / \rho \cdot g = 0,2 \text{ N} / 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

La masse de l'objet est égale à:  $m = V \cdot \rho = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot 2,7 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} = 0,054 \text{ kg}$ , soit une force de pesanteur de 0,54 N. L'objet n'est donc pas creux.

**La force d'Archimède**

**Exercice 18**

- La masse volumique du glaçon est plus faible que celle de l'eau, il flotte (une partie de son volume émerge). Le glaçon déplace sa propre masse d'eau (voir exercice 13). Lorsqu'il fond, la masse totale ne change pas et le verre ne déborde pas. (Exemple: en fondant, 1 kg de glace devient 1 kg d'eau qui aura exactement le même volume que la partie immergée du glaçon.)
- Le continent Arctique flotte; la glace qui le compose, en fondant, ne ferait pas varier le niveau des océans. Le continent Antarctique est un continent solide recouvert de glace. La fonte de ces glaciers ferait monter le niveau des océans.

**La force d'Archimède**

**Exercice 19**

La masse de glace déplace la même masse d'eau, soit:  $m_{\text{glace}} = m_{\text{eau}}$

ou bien:  $V_{\text{eau}} \cdot \rho_{\text{eau}} = V_{\text{glace}} \cdot \rho_{\text{glace}}$  Numériquement:  $\frac{V_{\text{glace}}}{V_{\text{eau}}} = \frac{\rho_{\text{eau}}}{\rho_{\text{glace}}} = \frac{920 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{1020 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = 0,9$

Les 9/10 de l'iceberg sont immergés.

**La force d'Archimède**

**Exercice 20**

Dans la première situation, la force d'Archimède est suffisante pour que la bille et le récipient flottent à la surface du liquide.

Dans la deuxième situation, la force d'Archimède a diminué puisque seul le récipient flotte.

En conséquence, le volume d'eau déplacé dans la deuxième situation est moins grand et le niveau baisse.

**La force d'Archimède**

**Exercice 21**

La masse volumique de la glace vaut 920 kg·m<sup>-3</sup> alors que la masse volumique de l'alcool vaut 800 kg·m<sup>-3</sup>. Donc le glaçon coule dans l'alcool.

**La force d'Archimède**

**Exercice 22**

Voir exercice 19 dans la même série.

- La masse de la plaque de bois est égale à la masse d'eau déplacée. Si la hauteur h au dessus du niveau du liquide est égale au tiers de l'épaisseur, la masse volumique de la plaque est bien égale au deux tiers de celle du liquide. Soit S la section horizontale de la plaque:

$$m_{\text{liquide}} = m_{\text{plaque}}$$

$$V_{\text{plaque}} \cdot \rho_{\text{plaque}} = S \cdot 2 \cdot h \cdot \rho_{\text{liquide}} = S \cdot 3 \cdot h \cdot \rho_{\text{plaque}}$$

d'où:  $\rho_{\text{plaque}} = 2/3 \cdot \rho_{\text{liquide}}$



---

**La force d'Archimède****Exercice 23**

La poussée d'Archimède exercée par l'air est compensée par la force de pesanteur de l'air enfermé dans le ballonnet; la masse indiquée par la balance est bien celle du ballonnet en caoutchouc.

---

**La force d'Archimède****Exercice 24**

Le blaugaz ayant la même masse volumique que l'air, il ne participe pas à la poussée ascensionnelle subie par le Graf Zeppelin. Seul l'hydrogène joue un rôle.

La force ascensionnelle vaut :

$$F_A = V_{\text{hydrogène}} \cdot (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{hydrogène}}) \cdot g$$

$$F_A = 7,5 \cdot 10^4 \text{ m}^3 \cdot (1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} - 0,09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} = 9 \cdot 10^5 \text{ N}$$

Le dirigeable pouvait donc emporter  $9 \cdot 10^5 \text{ N} - 5,5 \cdot 10^5 \text{ N} = 3,5 \cdot 10^5 \text{ N}$  soit une masse de 35 tonnes.