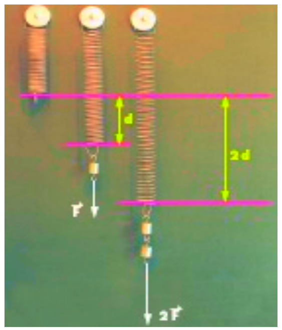
Mécanique : forces et équilibre

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

Ex : une balle frappée par un bâton subit à la fois une déformation et une accélération.

Au début de son grand ouvrage « Philosophiae naturalis principia mathematica » ou « Principia », Newton définit la force comme « une action exercée sur un corps, pour changer son état, soit de repos, soit de mouvement uniforme… ». La force est donc l'agent du changement ou ce qui modifie le mouvement. La *dynamique* est une branche de la mécanique qui fait appel à la notion de force pour expliquer le mouvement alors que la *statique* est l'étude des objets en équilibre soumis à plusieurs forces.

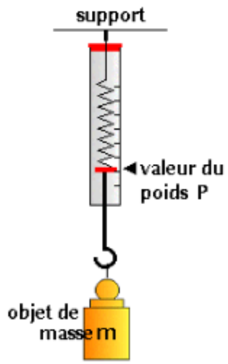
Bien que toute force soit une manifestation de l'une des interactions fondamentales (gravitationnelle, électromagnétique, interaction faible (radioactivité), interaction forte), il est parfois commode de préciser s'il s'agit d'une *force de contact* ou *d'action à distance*. Il y a force de contact lorsqu'un corps est en contact physique avec un autre. Les forces de contact comprennent par exemple les forces exercées par des cordes ou des ressorts, les forces intervenant dans les collisions, la force de frottement entre 2 surfaces et la force exercée par un fluide sur son contenant. Ces forces résultent de l'interaction électromagnétique entre les atomes présents sur la surface de chacun de ces 2 corps. Une action à distance se manifeste lorsque 2 corps, comme la Terre et le Soleil, interagissent en l'absence d'un milieu matériel entre eux. Les aimants et les charges électriques peuvent également interagir dans le vide.



Mesure de la force

Pour mesurer l'intensité d'une force, on utilise un ressort : son allongement d est proportionnel à l'intensité F de la force appliquée. (Si l'intensité de la force double, l'allongement double aussi).
Cette propriété se traduit algébriquement par :

$F/d = k$ ou $F = k \cdot d$

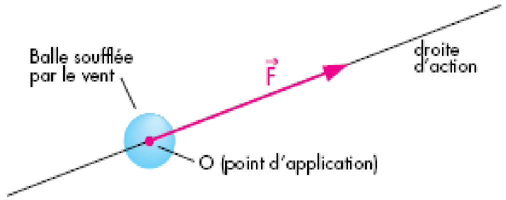


Le nombre k, exprimé en [N·m⁻¹] si la force est en [N] et l'allongement en [m], est la raideur du ressort utilisé. Sa valeur représente le «nombre de newtons» qu'il faut appliquer au ressort pour l'allonger de 1 m. Les ressorts se déformant facilement ont une raideur faible alors que les ressorts difficiles 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. Dans la pratique, on utilise des dynamomètres, constitués d'un ressort et munis d'une graduation en [N]. Notons toutefois qu'il est impensable d'attacher un ressort à un atome pour mesurer la force qui agit sur lui. D'autres moyens seront employés.

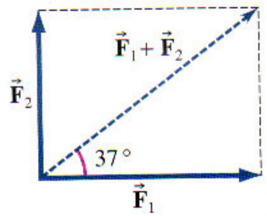
Une force est représentée par un **vecteur** (flèche) dans lequel on retrouve ses quatre caractéristiques (norme, direction, sens et point d'application), l'intensité de la force étant indiquée par la norme (longueur ou module) du vecteur.

Notations

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



Pour pouvoir dire qu'il s'agit d'un vecteur, on doit vérifier si elle obéit à la loi de l'addition vectorielle.
La figure représente une force F_1 de 4 unités orientée vers l'est et une force F_2 de 3 unités orientée vers le nord. L'expérience montre que l'effet combiné de ces 2 forces est le même que celui d'une force de 5 unités orientée à 37° nord par rapport à l'est. C'est tout simplement le module et l'orientation du vecteur somme des ces deux forces, ce qui confirme bien la nature vectorielle de la force.



Exemples de forces

Le poids

Lorsqu'un corps de masse m est en chute libre dans le vide au voisinage de la Terre, il a une accélération $\vec{g}$. S'il est accéléré, c'est qu'une force agit sur lui, la force d'attraction gravitationnelle entre ce corps de masse m et la Terre de masse M_T :

$$F = G\frac{M_T m}{R_T{}^2}$$

où M_T = masse de la Terre = $5{,}97 \cdot 10^{24}$ [kg]
R_T = rayon de la Terre = $6{,}371 \cdot 10^{6}$ [m]
G = constante de gravitation universelle = $6{,}67 \cdot 10^{-11}$ [$N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$]

Le **poids** d'un objet est la force gravitationnelle qui agit sur lui. Le poids d'un objet de masse m situé à la surface de la Terre vaut :

$$P = G\frac{M_T}{R_T^2}m = mg \text{ [N]}$$

où

$$g = G\frac{M_T}{R_T^2} = \mathbf{9{,}81} \text{ [N/kg]} = \text{[m/s}^2\text{]}$$

(Suisse : 9,81 ; Pôle : 9,83 ; Equateur : 9,78)

Variation de la force de pesanteur d'un corps sur Terre.
Lagos 6°27'N F_p = 100,00 N
Genève 46°10'N F_p = 100,25 N
Ballon (altitude : 10 000 m) F_p = 99,95 N

Exemple :
Une masse de 1 kg a donc un poids de P = 9,81 [N].

Comme la relation P = mg a la même forme que F = ma (voir p.3 *Les 3 lois de Newton*) et que l'unité [N/kg] correspond à [m/s^2], g est appelé *accélération gravitationnelle*. Cependant, cette appellation risque de donner l'impression que le poids d'un objet dépend de son accélération, ce qui est faux : le poids d'une pomme est le même, que la pomme soit en chute libre ou au repos sur une table.
D'autre part, nous confondons souvent la notion de masse (mesure de l'inertie d'un corps) et de poids (force gravitationnelle sur un corps). Premièrement, notons que la masse est un scalaire (nombre) mesuré en [kg], alors que le poids est un vecteur mesuré en [N]. Deuxièmement, alors que la masse est une propriété intrinsèque des corps (quantité de matière) qui ne varie pas avec le lieu, le poids d'un corps dépend de la valeur locale de g, qui varie en fonction de l'altitude. Sur la Lune, le poids d'un objet est presque 6 fois moins grand que sur la Terre. Dans l'espace, loin de toutes étoiles ou planètes, son poids serait pratiquement nul. Le poids d'une personne, d'un objet, représente la force gravitationnelle qui agit sur l'objet. La force gravitationnelle sur la lune est 6 fois moindre.
Exemple : Même si vous lisez par exemple "63 kg" sur votre balance, votre balance ne mesure pas votre masse. Elle mesure votre poids en [N] à l'aide de ressorts par exemple. Ensuite, l'ordinateur divise par défaut ce poids mesuré par 9,81, la gravité terrestre. Si vous prenez la même balance sur la lune, elle vous indiquera "10 kg", mais vous n'aurez pas perdu de la masse. La balance aura divisé le poids mesuré par 9,81 au lieu de 1,6, qui est la gravité lunaire. Le tableau ci-dessous donne l'intensité de la gravitation g sur différentes planètes

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

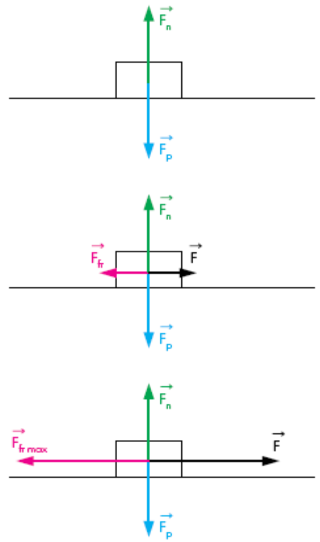
La force de frottement

Le frottement se traduit par l'apparition d'une force de contact qui s'oppose au mouvement relatif de 2 surfaces en contact.

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 $\vec{F}$ est inférieure à une certaine valeur limite. Il existe dans ce cas une force de frottement $\vec{F}_{fr}$ 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: $\vec{F}_{fr\,\max}$.



L'intensité maximale de la force de frottement:
– est proportionnelle à l'intensité $\vec{F}_N$ de la réaction normale à la surface :

$$\mu_0 = \frac{F_{fr\,\max}}{F_N} \quad \text{ou} \quad F_{fr\,\max} = \mu_0 F_N \quad \text{où } \mu_0 \text{ est le coefficient de frottement statique}$$

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

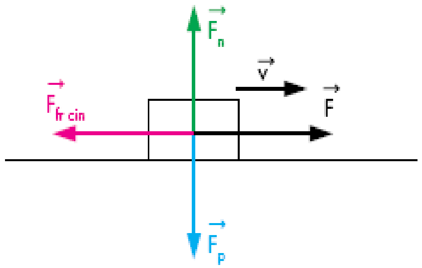
Frottement cinétique ou dynamique

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

– est proportionnelle à l'intensité $\vec{F}_N$ de la réaction normale à la surface :

$$\mu = \frac{F_{frcin}}{F_N} \qquad \text{ou} \qquad F_{frcin} = \mu F_N$$

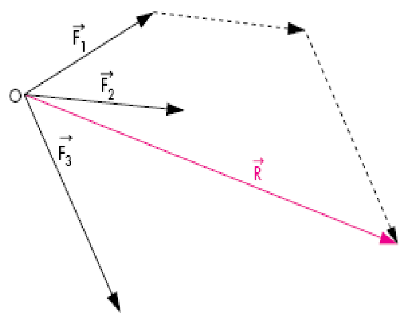
– dépend de la nature des surfaces de contact
– est indépendante de la dimension de la surface de contact
– est pratiquement indépendante de la vitesse du mouvement.



Corps en contact	μ	μ₀
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

Résultante des forces

Plusieurs forces peuvent agir sur un corps. Ces forces sont concourantes si leurs droites d'action se coupent en un même point. On peut additionner les forces appliquées sur un même PM : on parle alors de la somme des forces appliquées, appelées aussi *la résultante*. 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.



Développement :

Conditions d'équilibre d'un PM

Si un PM est en équilibre, la résultante des forces qui s'exercent sur lui est nulle :

$$\vec{F}_{rés} = \sum \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_N = \vec{0}$$

La **statique** est l'étude des objets en équilibre.

Question : Après quelques secondes de chute libre, la résultante des forces qui s'applique sur les parachutistes est-elle nulle ?

L'équilibre va être rompu lorsque la résultante des forces est différente du vecteur nul. La question qu'il convient alors de se poser : quel est l'effet de cette résultante sur le PM ?
La réponse nous est donnée par les 3 lois de Newton.

Les 3 lois de Newton

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.

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.

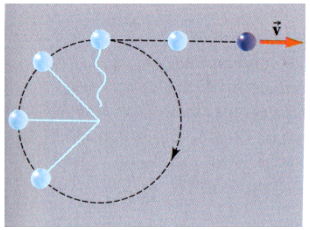
Enoncé de la 1ère loi ou loi d'inertie

Un point matériel qui n'est soumis à aucune force ne modifie pas sa vitesse ; il suit un mouvement rectiligne uniforme (MRU).

$$\text{Si } \sum \vec{F} = \vec{0} \Rightarrow \vec{v} = \text{constante}$$

Cette propriété englobe le cas particulier du repos pour lequel la vitesse est nulle. Dans la réalité, un point matériel subit toujours des forces. *La loi d'inertie peut toutefois être appliquée dans le cas où ces forces se compensent pour donner une* [*résultante nulle.*](#)
Le terme *inertie* sert à décrire la tendance d'un corps à résister à toute variation de sa vitesse.
Nous pouvons déjà dire que la notion d'inertie est liée à la notion de masse, qui est une mesure de l'inertie d'un corps.

Exemple :
Considérons une pierre attachée à une corde et que l'on fait tourner sur une surface horizontale sans frottement. En tout point de sa trajectoire circulaire, la vitesse instantanée de la pierre est dirigée selon la tangente au cercle en ce point. A cause de son inertie, la pierre a tendance à poursuivre son chemin dans cette direction. Mais la traction vers l'intérieur exercée par la corde l'empêche de suivre ce trajet naturel d'inertie. Si on lâche la corde, la pierre est soumise à une force résultante nulle et obéit alors à la première loi : elle poursuit son mouvement à vitesse constante sur la tangente au cercle.



Selon Aristote (384 - 322 av J.C), le mouvement vertical d'un objet qui tombe s'expliquait par la tendance naturelle des objets à s'approcher le plus possible du centre de l'Univers, qu'on croyait à l'époque situé au centre de la Terre. D'autre part, pour qu'un objet se déplace horizontalement, il fallait absolument qu'une force horizontale agisse constamment sur lui. Il fallut attendre le XVIIème siècle pour d'une part réaliser que le centre de la Terre ne correspond pas au centre de l'Univers, ce qui rendit caduque l'explication aristotélicienne de la chute des corps. Puis, on comprit que c'est en raison des forces de frottement que la plupart des mouvements horizontaux (par exemple, celui d'une voiture roulant à vitesse constante en ligne droite) nécessitent l'application d'une force (de propulsion ou de traction) pour avoir lieu.
Le vecteur vitesse d'un objet a simplement tendance à demeurer inchangé si aucune force n'agit sur l'objet ou si la résultante des forces agissant sur l'objet est nulle. Lorsqu'un objet est au repos, il a tendance à demeurer au repos. Lorsqu'un objet est déjà en mouvement, il a tendance à continuer à se déplacer en ligne droite à vitesse constante. La situation au repos est donc un cas particulier de mouvement en ligne droite avec une vitesse constante égale à zéro.

Applications :
- Equilibre instable ;
- Polygone de sustentation

Enoncé de la 2ème loi de Newton

Une force $\vec{F}$ appliquée à un corps de masse *m* lui imprime une accélération $\vec{a}$ telle que :

$\vec{F} = m\vec{a}$ où m = masse du corps subissant la force [kg]

Lorsqu'un objet ne se déplace pas en ligne droite à vitesse constante, son mouvement est forcé, c'est-à-dire perturbé par une ou plusieurs influences extérieures.
L'accélération a même direction et même sens que la force. Leurs intensités satisfont l'équation F = m· a. Si plusieurs forces agissent sur un corps donné, il faut faire figurer leur résultante dans la seconde loi de Newton:

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

La seconde loi de Newton traduit les idées suivantes :
1.- pour provoquer la même accélération sur deux corps de masses différentes, il faut appliquer une force plus intense sur le corps de plus grande masse. Il est plus difficile de modifier le vecteur vitesse d'un camion que celui d'une balle de tennis. Ainsi, la relation de cause à effet entre la force et l'accélération doit tenir compte de l'inertie de l'objet sur lequel la force s'applique.
2.- pour provoquer une plus grande accélération sur un corps donné, il faut lui appliquer une force plus intense
3.- La masse d'un corps apparaît comme la mesure de son inertie, c'est-à-dire de sa résistance aux variations de vitesse. Plus la masse d'un corps est grande, plus il est difficile de modifier son vecteur vitesse.

Remarques
1.- Si la résultante des forces agissant sur un corps est nulle, son accélération est nulle ; le corps est en mouvement rectiligne uniforme (dont le repos est un cas particulier). La 1ère loi de Newton apparaît comme un cas particulier de la 2ème loi.
2.- Telle qu'elle est formulée ci-dessus, la deuxième loi de Newton n'est valable que pour des corps dont la masse reste constante. Ce n'est pas le cas par exemple d'une fusée qui « perd » une masse importante de carburant durant son trajet.

Définition de l'unité de force: le newton

On peut à présent, à l'aide de la 2ème loi de Newton, définir l'unité de la force : c'est le **Newton,** noté par N.

1 N est l'intensité d'une force provoquant sur une masse de 1 kg une accélération de 1 m· s^{-2}.

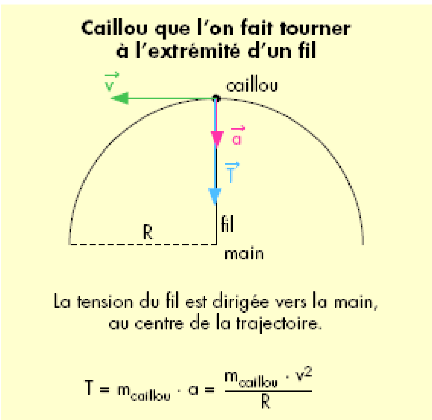
$$1\ [\mathrm{N}] = 1\ [\mathrm{kg}] \cdot 1\ [\mathrm{m}\cdot \mathrm{s}^{-2}] = [\, kg \cdot \frac{m}{s^2}\,]$$

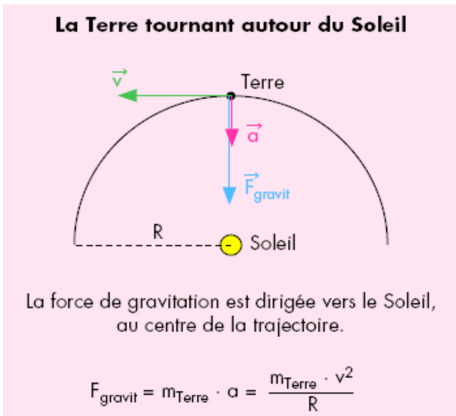
Pour fixer les idées, précisons que lorsque nous portons une livre de pain (500 g), nous exerçons une force d'environ 5 N alors que pour se maintenir pendu à bout de bras à une barre, il faut une force variant entre 500 N et 1000 N suivant les individus.

2ème loi et mouvement circulaire uniforme

Un corps en mouvement circulaire uniforme est soumis à une force dirigée, comme l'accélération, vers le centre de la trajectoire. La force est centripète. Si le corps de masse m se déplace à la vitesse v sur une circonférence de rayon R, la force qui lui est appliquée a une intensité

$$F = ma = m\frac{v^2}{R}$$

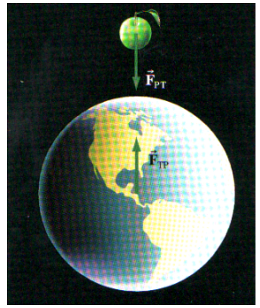




Enoncé de la 3ème loi de Newton

Si un corps rigide A exerce une force $\vec{F}_{BA}$ sur un corps rigide B, le corps B exerce sur A une force $\vec{F}_{AB}$ opposée à $\vec{F}_{BA}$:

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



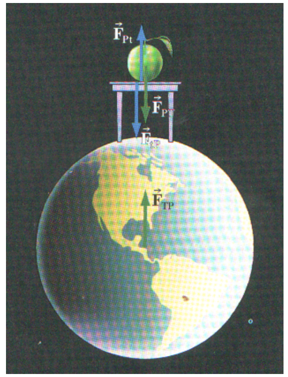
La force exercée par le premier corps sur le second est appelée « action » et la force exercée par le second sur le premier est appelée « réaction ». Les deux forces ont la même intensité : $F_{BA} = F_{AB}$

Exemples

1.- Le Soleil attire la Terre et la Terre attire le Soleil avec une force opposée.

2.- La balle d'un fusil est propulsée vers l'avant et le fusil est poussé vers l'arrière avec une force de même intensité.

3.- Lorsque vous exercez une poussée ou une traction sur un mur, vous ressentez une force de sens opposé. Plus vous poussez (ou tirez), plus le mur résiste. En fait, la force exercée par le mur sur vous est exactement égale en norme et de sens opposé à la force que vous exercez sur lui. La 3ème loi nous indique qu'une force n'est jamais isolée mais que les forces vont toujours par paires. On dit que 2 forces qui apparaissent dans l'équation ci-dessus forment une paire action-réaction. Il est important de réaliser que l'action et la réaction agissent sur des *corps différents*.



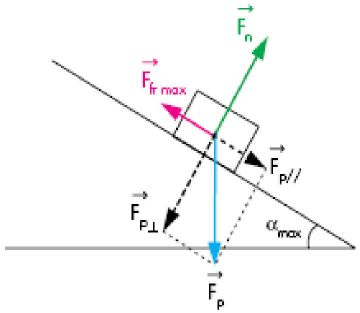
Exemple :

Sur la figure, la pomme subit une force perpendiculaire à la surface de la table que l'on nomme force normale ou force de soutien et que l'on note $\vec{F}_N$ ou $\vec{S}$. La force résultante agissant sur la pomme est nulle : son poids $\vec{P}$ ou $m\vec{g}$ est compensé par la force normale $\vec{F}_N$ exercée par la table. Par conséquent,

$$\vec{F}_N + \vec{P} = \vec{0} \qquad \text{ou} \qquad \vec{F}_N = -\vec{P}$$

Ces forces sont de même module et de sens opposés, mais $\vec{F}_N$ et $\vec{P}$ ne sont pas une paire action-réaction parce qu'elles agissent sur *le même corps*. Les normes des forces $\vec{F}_N$ et $\vec{P}$ sont égales parce que la pomme n'a pas d'accélération, par suite de la 2ème loi de Newton ($\sum \vec{F} = m\vec{a} = \vec{0}$). De plus, ce sont des forces de nature complètement différente : $\vec{P} = \vec{F}_{PT}$ est la force gravitationnelle exercée sur la pomme par la Terre alors que $\vec{F}_N = \vec{F}_{Pt}$ est une force électromagnétique exercée sur la pomme par les atomes superficiels de la table.

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: α_{max}.
Pour cet angle limite, le corps est soumis aux forces suivantes :

– sa force de pesanteur $\vec{F}_P$ que l'on décompose en $\vec{F}_{P//}$ et $\vec{F}_{P\perp}$

– la force de réaction normale au plan incliné $\vec{F}_N$

– la force de frottement statique $\vec{F}_{fr.\ max}$ telle que :

$F_{fr\max} = \mu_0 F_N$ où μ_o est le coefficient de frottement statique.

L'angle maximal d'inclinaison pour que le corps reste immobile est donné par :

$$\tan \alpha_{\max} = \mu_0$$

Développement :

Si l'on augmente encore l'angle d'inclinaison α, 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 :

$F_{frcin} = \mu F_N$ où μ est le coefficient de frottement cinétique.

Les poulies

Les poulies, comme les leviers, constituent des machines simples qui ont de nombreuses applications. Une simple poulie est employée pour modifier la direction d'une force, alors qu'un ensemble de poulies peut servir à réduire la force nécessaire pour soulever une charge.
Si le frottement dans la gorge de la poulie est négligeable, la tension d'équilibre dans la corde ou dans le câble est identique de part et d'autre de la poulie. Cette propriété permet de discuter certaines applications qui font intervenir des poulies. On fait généralement l'hypothèse que le frottement est négligeable et que les poulies et les cordes ont une masse nulle.
D'après les exercices sur les poulies (voir série d'exercice), nous pouvons déduire une règle relative à l'avantage mécanique d'un système de poulies servant à soulever des poids. L'avantage mécanique d'un système est donné par le nombre de cordes parallèles supportant la poulie à laquelle la charge est attachée.

Equilibre statique des fluides

Masse volumique et densité

Au IIIe siècle av. J.-C., le roi Hiéron de Syracuse confia un certain poids d'or à un orfèvre pour en faire une couronne. Une fois la couronne terminée, le roi, suspicieux, demanda à Archimède de trouver un moyen de déterminer si de l'argent avait été mélangé à l'or. Un jour, en entrant dans son bain, Archimède remarqua que le niveau de l'eau s'élevait ou s'abaissait selon qu'une partie plus ou moins grande de son corps était immergée. Il fut immédiatement frappé par le lien avec le problème qui lui était posé. Selon la légende, il s'écria « Eurêka ! » (« J'ai trouvé ! ») et s'élança tout nu dans les rues de Syracuse. Archimède venait de réaliser que, malgré la forme compliquée de la couronne, il pouvait mesurer son volume à partir d'un volume d'eau qu'elle déplaçait et en déduire sa masse volumique et la comparer à celle de l'or. La masse volumique moyenne ρ d'un objet de masse m et de volume V est définie par :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3]$$

La masse volumique d'un matériau dépend de la pression et de la température, mais cette variation est beaucoup plus importante pour un gaz que pour un solide ou un liquide.
La densité d'une substance est le rapport entre sa masse volumique et celle de l'eau à 4°C, qui est égale à 1000 kg/m^3. La densité est une grandeur sans dimension.
Exemple : la densité du mercure est de 13,6 ; la densité de l'eau à 20° est de 0,998.

Pression

La pression peut s'exprimer en 5 unités (c.f p.160 F&T) :

- atm : pression atm. = 1 [atm]
- cm Hg : pression atm. = 76 [cm Hg] (une colonne de 76 cm de mercure)
- pascal : pression atm. = $1{,}0133 \cdot 10^5$ [Pa] = 101'325 [Pa]
- mbar : pression atm. = 1013 [mbar] (1 [bar] = 1000 [mbar] = 10^5 [Pa])
- torr : pression atm. = 760 [Torr] = 760 [mm Hg]

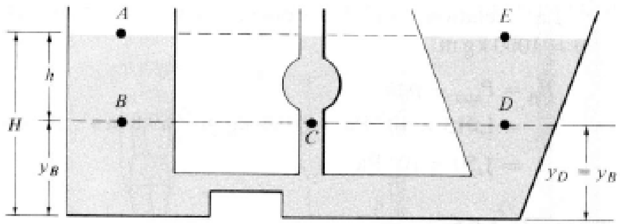
L'unité de la pression dans le système international est le pascal.

La pression P peut s'interpréter comme le quotient d'une force F par l'aire A de la surface sur laquelle s'exerce la force :

$$P = F / A = [\text{Newton} / m^2] = [\text{Pa}]$$

La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer vaut donc 101'325 Pa. Cela signifie que le poids de l'air contenu dans la « colonne » située au-dessus de chaque mètre carré de la surface terrestre est de 101'325 N.

L'augmentation de la pression avec la profondeur dans un liquide



Plusieurs récipients, illustrés sur la figure, de forme et de section différente sont reliés à leur partie inférieure par un tube. Lorsqu'on verse du liquide dans les récipients, il atteint le même niveau dans tous les récipients. La pression à la surface du liquide dans chaque récipient est la pression atmosphérique. C'est pour cela que la surface d'un liquide au repos doit nécessairement être horizontale. Il va de soi que la pression dans un liquide augmente avec la profondeur étant donné que, au fur et à mesure que l'on descend dans le liquide, chacun des éléments de volume successifs doit supporter une plus haute colonne de liquide. La pression dépend uniquement de la profondeur et ne dépend pas de la forme du récipient. La pression exercée au bas d'une colonne de liquide de hauteur h due à son poids propre vaut :

$$P = \rho \cdot g \cdot h = [kg/m^3] \cdot [m/s^2] \cdot [m] = [\text{Pa}]$$

La pression ne dépend ni de la forme, ni de la quantité de liquide, mais uniquement de sa hauteur. Dans un fluide incompressible (liquide), la pression est immédiatement transmise en tout point du fluide.
Dans la figure ci-dessus, en A et en E, la pression est égale à la pression atmosphérique. En B, C, D, donc à une même profondeur, les pressions sont égales et valent :

$$p_B = p_{atm} + \rho g h$$

Développement :

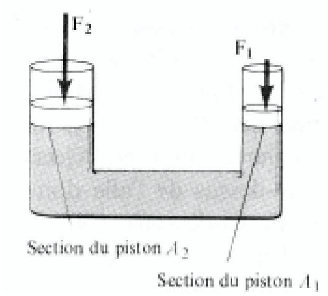
Exemple : on désire déterminer à quelle profondeur sous la surface d'une piscine la pression est égale à 2 fois la pression atmosphérique.

Nous pouvons donc en déduire le principe de Pascal :

Le principe de Pascal

D'après le **principe de Pascal**, en tout point d'un fluide en équilibre il existe une pression. Celle-ci est indépendante de la direction et est la même en tout point (pensez au tympan d'un plongeur qui perçoit la même pression peu importe son orientation) situé à une même profondeur.

Exemple: la presse hydraulique est une illustration du principe de Pascal et de la signification de la définition de la pression. En effet, on a pour une presse hydraulique :

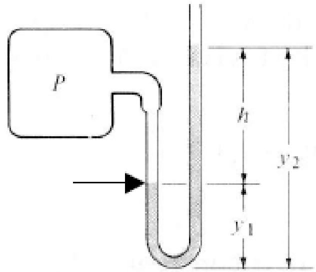


$$p_1 = p_2, \text{ soit } \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

Une petite force appliquée sur une petite surface produit autant d'effet qu'une grande force appliquée sur une grande surface.

Exemple :
Une machine hydraulique est utilisée pour soulever une voiture. Sa masse est de 1200 kg et elle est posée sur un piston de 1,5 m^2. Avec quelle force faut-il agir sur le piston de plus faible section pour soulever la voiture? La section du piston moteur est de 400 cm^2.
………………………………………………………..

Le manomètre



Le principe du manomètre (dispositif pour mesurer la pression d'un gaz contenu dans une enceinte) est également basé sur les propriétés que nous venons de voir : au niveau désigné par la flèche, la pression dans le liquide est la même à gauche et à droite du tube. A gauche, la pression en ce point p_G est égale à la pression p dans le gaz ; à droite la pression p_D est égale à la pression atmosphérique plus la pression exercée par le poids de la colonne de liquide au-dessus du point fléché :

$$p_G = p_D, \text{ soit } p = p_{atm} + \rho \cdot g \cdot h$$

Exemple: une colonne de mercure de 760 mm exerce une pression comparable à celle d'une colonne d'eau de 10,3 m ou une colonne de sang de 9,8 m.

La différence *h* entre les 2 niveaux indique que la pression dans le ballon de gaz est supérieure à la pression atmosphérique. Cette différence, que l'on appelle ***pression manométrique (ou relative)***, correspond à $\rho \cdot g \cdot h$. La valeur réelle de la pression que l'on veut mesurer, ou pression absolue, est la somme de la pression atmosphérique et de la pression manométrique.

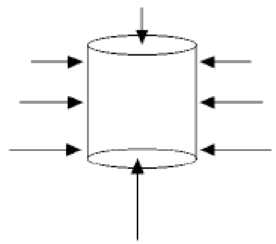
Exemple :

En médecine, on emploie toujours la pression manométrique, si bien qu'on juge habituellement inutile de le préciser : on utilise tout simplement le terme de pression. Par exemple, une pression sanguine de « 120 » signifie que la pression manométrique est égale à 120 mmHg ; en supposant que l'air dans la pièce est à une pression de 760 mmHg, la pression « absolue » du sang est :

$$P = 760 \text{ mmHg} + 120 \text{ mmHg} = 880 \text{ mmHg}$$

Au niveau de la mer, la pression atmosphérique standard est de 101'330 Pa. On peut le mettre en évidence à l'aide d'un tube de Torricelli mesurant 1 m de long, que l'on remplit de mercure et que l'on retourne dans une cuvette de mercure. La colonne de mercure (de 76 cm) est supportée par la pression de l'air sur la surface à l'air libre.

Le principe d'Archimède



Un objet plongé dans un gaz ou dans un liquide subit une pression du fluide en chaque point de sa surface. La force correspondante agit perpendiculairement à l'aire considérée et la pression est plus grande sur les points plus éloignés de la surface du fluide.

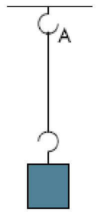
Cylindre plongé dans l'eau : les forces exercées sur chaque unité de surface se compensent horizontalement. Il reste les forces verticales. La force qui s'exerce sur la face inférieure est dirigée vers le haut et est supérieure à la force qui s'exerce sur la face supérieure et est dirigée vers le bas. La force nette due à la pression de l'eau est donc dirigée vers le haut.
Avant d'être déplacé par le cylindre, le fluide qui se trouvait dans la région maintenant occupée par l'objet était en équilibre : son poids était compensé par les forces exercées sur lui par le reste du fluide. Comme l'objet occupe maintenant le même espace que le fluide déplacé, il est évident que le reste du fluide continue d'exercer la même force. C'est pour cela que la poussée d'Archimède est égal au module du poids du fluide déplacé :

$$F_A = \rho_{fluide} \cdot g \cdot V_{immergé}$$

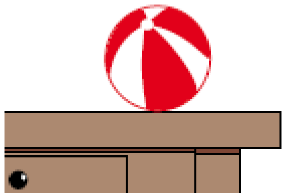
Le corps peut être complètement ou partiellement immergé. Selon que la poussée est plus grande, plus petite ou égale au poids, l'objet monte, descend ou est en équilibre dans le fluide.

Développement :

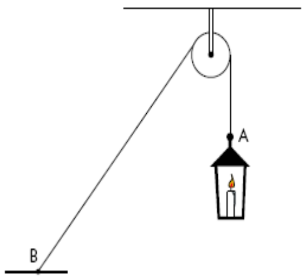
Problèmes



1.- Un objet dont l'intensité de sa force de pesanteur vaut 0,3 N est suspendu au moyen d'un fil. Dessine sur une figure les forces s'exerçant au point A.
Note : Utilise une échelle faisant correspondre 0,01 N à 1 mm.



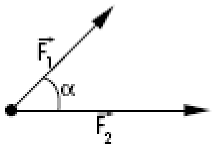
2.- Une balle est posée sur une table. L'intensité de sa force de pesanteur vaut 2 N. Dessine la force de pesanteur de la balle et la réaction exercée par la table.
Note : Utilise une échelle faisant correspondre 0,1 N à 1 mm.



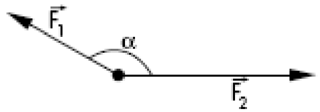
3.- Une lanterne de 3 kg est suspendue à une corde qui, après avoir passé sur une poulie, est attachée au sol. Dessine, sur la figure, toutes les forces s'exerçant sur les extrémités A et B de la corde.

4.
a) Détermine graphiquement la résultante des forces et pour chaque situation sur les figures.
b) Cite le(s) cas d'équilibre (justifier).

$F_1 = 34$ N
$F_2 = 46$ N
$\alpha = 45°$

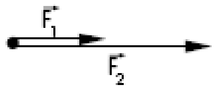


$F_1 = 36$ N
$F_2 = 56$ N
$\alpha = 150°$

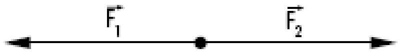


$F_1 = 35$ N
$F_2 = 60$ N

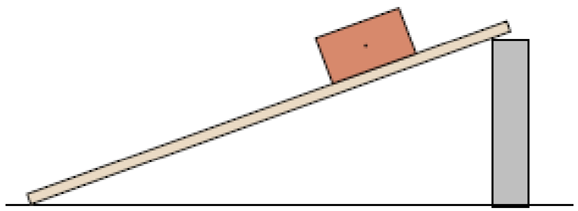
$F_1 = 22$ N
$F_2 = 48$ N



$F_1 = 44$ N
$F_2 = 44$ N

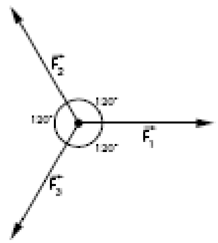


5.- Une brique de 5 kg est posée sur une planche inclinée. Elle est immobile.
Représente et nomme les forces agissant sur la brique.

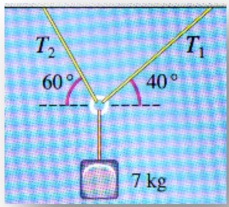


6.- Deux forces de 10 N font entre elles un angle de 120°. Détermine la grandeur et la direction de leur résultante.

7.- 3 forces de même intensité sont disposées comme sur la figure. Détermine graphiquement leur résultante.



8.- Un bloc de 7 kg est suspendu par 2 cordes. Trouve le module de la tension dans chaque corde.

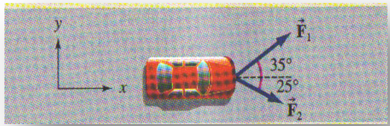


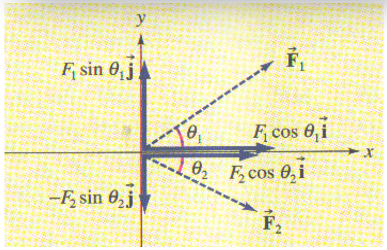
9.- Lors d'une compétition internationale, un haltérophile a soulevé, à l'épaulé, une masse égale à 256 kg. Quelle est la masse qu'il aurait pu soulever en exerçant la même force sur la Lune ?

10.- Un funambule de 70 kg se tient au milieu d'une corde de 100 m de longueur. Si le centre de la corde s'abaisse de 1,5 m, trouve le module

a) De la force
b) De la tension de la corde

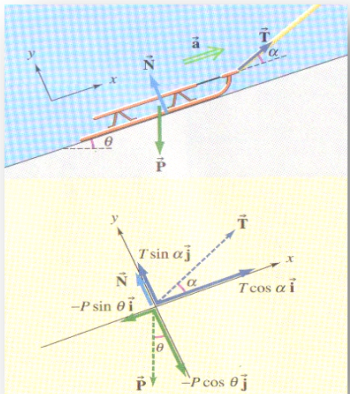
11.- Une automobile de 1200 kg est en panne sur une plaque de verglas. On lui attache des cordes et l'on exerce les forces F_1=800 N à 35° nord par rapport à l'est et F_2 = 600 N à 25° sud par rapport à l'est.



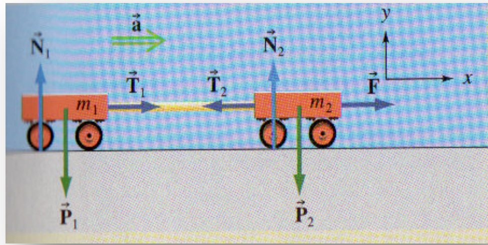


Quelle est l'accélération de l'automobile ?
On considère l'automobile comme une particule et on suppose le frottement négligeable.

12.- Soit une luge d'une masse de 8 kg située sur une pente sans frottement inclinée à 35° par rapport à l'horizontale. Elle est attachée à une corde faisant un angle de 20° par rapport à la pente et soumise à une tension dont le module vaut 40 N. Détermine les modules de l'accélération de la luge et de la force normale exercée par la pente sur la luge.

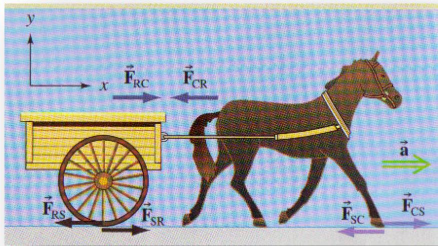


13.- 2 chariots de masses m_1 et m_2 sont reliés par une corde et sont libres de rouler sur une surface horizontale. On tire sur le chariot de masse m_2 avec une force horizontale $\vec{F}$.

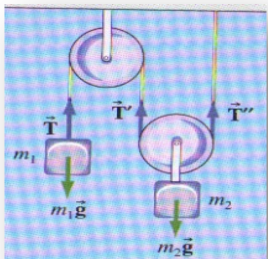


a.- En analysant les forces agissant sur la corde, montrer que la corde exerce des tensions de même module sur les 2 chariots.
b.- Les tensions exercées sur les 2 chariots par la corde forment-elles une paire action-réaction ?
c.- F = 20 N, m_1 = 4 kg et m_2 = 6 kg et la corde a une masse négligeable. Déterminer l'accélération des chariots et la tension dans la corde

14.- Le paradoxe du « cheval et de la remorque » nous donne une illustration amusante et instructive de la 3ème loi. Selon le cheval, qui croit connaître les lois de la dynamique, plus il tire vers l'avant, plus la remorque tire vers l'arrière : il se fatigue donc inutilement. Expliquer pourquoi la remorque avance quand même.

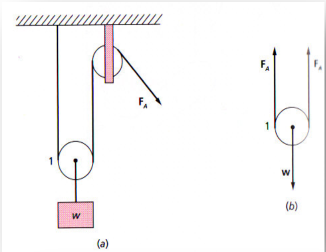


15.- Un bloc de masse m_1 = 3 kg est accroché à l'extrémité d'une corde qui passe dans un système de poulies. Son poids permet de maintenir immobile un bloc de masse m_2 fixé à l'une des poulies. La masse de la corde et des poulies est négligeable.

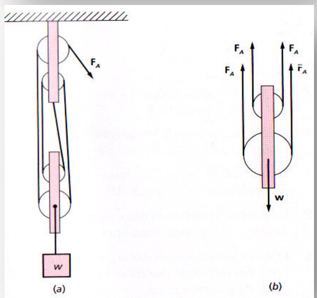


a.- Que vaut m_2 ?
b.- Si on tire le bloc de masse m_1 vers le bas et qu'on le fait descendre de 10 cm, sur quelle distance montera le bloc de masse m_2 ?

16.- Dans la figure, quelle doit être la force appliquée $\mathbf{F_A}$ pour soulever le poids (**w** sur la figure) ?



17.- Dans la figure, quelle force $\mathbf{F_A}$ doit être appliquée pour soulever le poids (noté **w** sur la figure) ? Que vaut l'avantage mécanique du système ?



18.- Une grue soulève un bloc de pierre de 500 kg posé sur le sol. Le long du 1er mètre de son ascension, le bloc subit une accélération de 1 m/s^2. Ensuite, il a une vitesse constante.
Calcule la force exercée par le câble sur le bloc durant le premier mètre et durant la suite.

19.- Un homme de 60 kg se trouve debout sur une balance à ressort, dans un ascenseur. Lorsque celui-ci se met en mouvement vers le haut, il a une accélération de 2 m/s^2.
Quelle est l'indication de la balance à ce moment-là ?

20.- Un skieur de 50 kg passe à une vitesse de 60 km/h sur une bosse, puis dans une dépression dont les rayons de courbure mesurent 35m.
Calcule la force de soutien exercée par la neige lorsque le skieur est au sommet de la bosse et lorsqu'il est au fond de la dépression.

21.- Une skieuse de 50 kg descend une pente enneigée inclinée de 30°. On néglige le frottement et la résistance de l'air. Calcule
a) le module de la force de soutien (force normale) agissant sur elle
b) le module de la force qui la fait glisser le long du plan incliné et
c) l'accélération résultante

22.- Un avion de combat piquant à la vitesse de 290 m/s fait un looping de rayon R.
Supposant que l'avion est conçu pour résister à des forces associées à des accélérations jusqu'à 9g, calcule la valeur minimale de R.

23.- Quelle est la plus grande pente que peut monter une voiture à vitesse constante, si le coefficient de frottement statique des pneus sur la route est de 0,9 ?

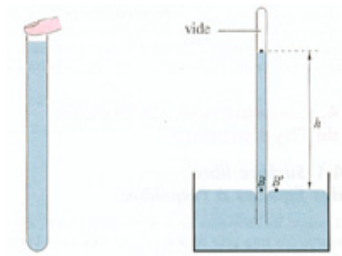
24.- L'élève qui est à côté de vous en classe a une masse de 60 kg et se trouve à 1 m de vous. Votre masse est de 70 kg. Quelle force d'attraction gravitationnelle agit sur vous ?

25.- Une fusée Saturne V lancée verticalement a une masse de $2{,}7 \cdot 10^6$ kg et une poussée de $3{,}3 \cdot 10^7$ [N].
Quel est le module de son accélération lors du lancement ?

26.- On place une des extrémités d'un tuyau en forme de « U » inversé dans un seau d'eau, puis on aspire à l'autre extrémité pour remplir le tuyau d'eau et on met un bouchon.
a.- Calculez la pression manométrique en chacun des points indiqués sur le schéma.
b.- Lorsqu'on enlève le bouchon, le seau se vide-t-il ?

27.- On désire transfuser du sang (densité 1,05) dans une veine où la pression manométrique est de 15 mmHg.
Quelle doit être la hauteur minimale entre le haut du sang dans le sac et l'endroit où le tube de transfusion pénètre dans la veine ?

28.- On remplit complètement un tube de Torricelli et on bouche le tube avec un doigt. On retourne l'éprouvette et l'on met l'embouchure ouverte dans une cuve contenant du mercure puis on retire le doigt. Une fois l'éprouvette renversée, le haut de l'éprouvette est à 85 cm au-dessus du niveau du mercure dans la cuve.



a.- En supposant que l'éprouvette demeure remplie de mercure, calculez la pression absolue dans le mercure au sommet ; le résultat obtenu est-il possible ?
b.- Calculez la hauteur de la poche de vide qui se forme dans le haut de l'éprouvette.

29.- Quelle est la pression à 30 m sous la surface de la mer (densité: 1,026)? Quelle est la force s'exerçant sur le tympan (surface 1 cm^2)?

30.- Calculer la pression au sommet du Mont-Blanc. Comparer avec la valeur des tables et discuter le résultat.

31.- Un morceau de métal de volume inconnu est suspendu à une corde. Avant l'immersion, la tension dans la corde vaut 10 N. Quand le métal est immergé dans de l'eau, la tension est de 8 N. Quelle est la masse volumique ρ du métal ?

32.- La masse volumique de la glace vaut 917 kg/m^3 tandis que celle de l'eau de mer est de 1025 kg/m^3. Calcule la fraction du volume d'un iceberg qui se trouve immergée.

33.- Lorsqu'on la plonge dans de l'eau, une couronne de 3 kg a un poids apparent de module 26 N. Quelle est la masse volumique de la couronne ?

34.-Un ballon sphérique rempli d'hélium à 1 atm parvient tout juste à soulever une charge de 2 kg (qui comprend la masse du ballon). Quel est son rayon ?

35.- Que vaut la poussée d'Archimède s'exerçant dans la mer sur un nageur de 70 kg entièrement immergé? Immergé aux 3/4?
Indication : la masse volumique de l'être humain est de 980 kg/m^3 (avec les poumons remplis d'air).

36.- Une plaque de liège flotte sur de l'eau. Elle a une épaisseur de 1 cm et une aire de base de 100 cm^2. La masse volumique du liège est de 250 kg/m^3. Un objet de 60 g repose sur cette plaque de liège, la laissant horizontale.
Calcule la hauteur immergée.

Méthode de résolution d'un problème de mécanique

1.- Faire un *schéma* clair représentant la situation physique. Identifier les corps dont on étudie la dynamique.

2.- Représenter *toutes les forces* agissant sur chaque corps qui sont produites par des objets extérieurs au corps. Pour ne pas en oublier, essayer de se mettre à la place de chaque corps pour voir quelles sont les forces exercées sur lui par le milieu environnant. Avant d'inclure une force, s'assurer de pouvoir en indiquer la source ou la cause, comme la Terre, une table, une corde, …

3.- Choisir *un référentiel* d'inertie. Chaque particule ou point matériel peut avoir ses propres axes de coordonnées. En général, il est plus aisé de faire coïncider un des axes avec l'orientation de l'accélération, donnée ou prise par hypothèse.

4.- Tracer un *diagramme des forces* pour chaque corps. Considérer chaque corps comme une particule à l'origine et décomposer, selon les axes, toutes les forces agissant sur elle.
n.b : la grandeur m$\vec{a}$ ne doit pas figurer sur le diagramme des forces. Elle est égale à la résultante des forces agissant sur la particule.

5.- A l'aide du diagramme des forces, écrire *la 2ème loi* en fonction des composantes :

$$\sum F_x = ma_x \,;\, \sum F_y = ma_y$$

Résoudre ces équations pour trouver les inconnues.

6.- Les résultats obtenus sont-ils plausibles ? Quelques points à vérifier :
- Le résultat « négatif » (signe négatif) a-t-il une signification évidente ou indique-t-il une erreur faite auparavant ou une fausse hypothèse ?
- Vérifier les dimensions des expressions algébriques. Essayer de donner aux variables des valeurs caractéristiques ou extrêmes pour voir si elles mènent à des résultats déjà connus.