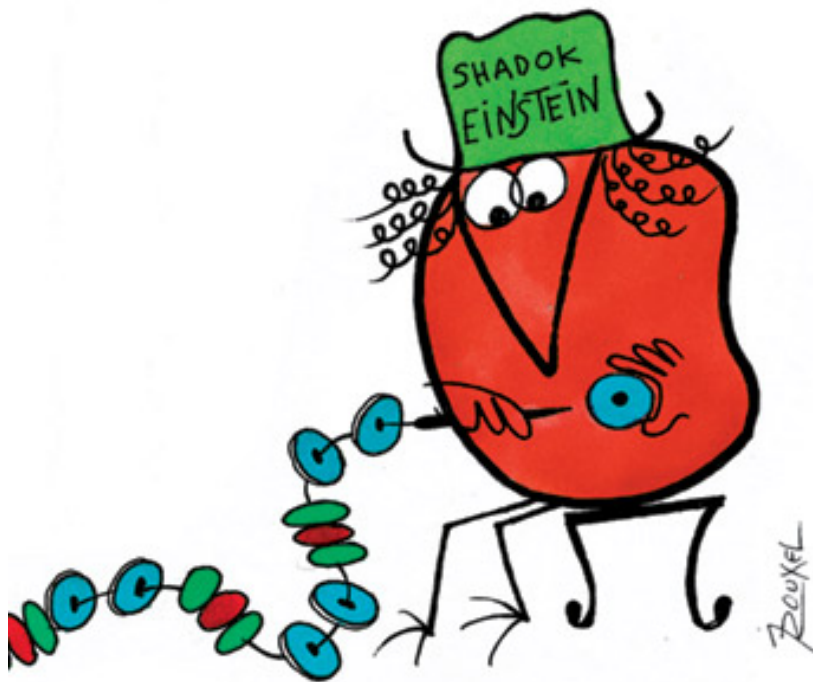


Statique

Cours de physique 1DF

Les devises Shadok



IL VAUT MIEUX MOBILISER
SON INTELLIGENCE SUR DES
CONNERIES QUE MOBILISER
SA CONNERIE SUR DES
CHOSSES INTELLIGENTES.

Alice Gasparini

Table de matières

I	Equilibre de translation	5
	Introduction	6
1	Forces et interactions	7
1.1	Définition de force	7
1.2	Représentation d'une force	8
1.3	Définition d'interaction	11
1.4	Troisième loi de Newton	11
1.5	Les interactions fondamentales	13
1.6	Effets des interactions nucléaires forte et faible	14
1.7	Effets de l'interaction gravitationnelle	15
1.8	Effets de l'interaction électromagnétique	16
2	Gravitation et pesanteur	19
2.1	La loi de gravitation universelle	19
2.2	Force de la pesanteur	21
2.3	Constante de pesanteur g	23
2.4	Variation de g à la surface terrestre	23
2.5	Constante de pesanteur dans le Système Solaire	25
3	Equilibre de translation d'un système	27
3.1	Diagrammes système-interactions	27
3.2	Force résultante	29
3.3	Somme de plus que deux forces	30
3.4	Decomposition d'une force	32
3.5	La première loi de Newton	35
3.6	Force de frottement	36
	Formulaire de la partie “Equilibre de translation”	38

II	Pression et Hydrostatique	40
	Introduction	41
4	Pression	42
4.1	Pression entre solides	42
4.2	Pression dans un fluide	44
4.2.1	Le principe de Pascal	44
4.2.2	La presse hydraulique	45
4.3	Pression dans un liquide	47
4.3.1	La loi fondamentale de l'hydrostatique	47
4.3.2	Le tonneau de Pascal	49
4.3.3	Le principe des vases communicants	50
4.3.4	Le tube en U	50
4.3.5	Le manomètre	52
4.4	Pression dans un gaz	54
4.4.1	Pression atmosphérique	54
5	Principe d'Archimède	57
5.1	Force d'Archimède	57
5.2	Poids apparent	59
5.3	L'anecdote de la couronne	61
5.4	Corps flottants dans un liquide	62
5.5	La poussée d'Archimède dans les gaz	63
	Formulaire de la partie "Pression et Hydrostatique"	65
III	Equilibre de rotation	67
	Introduction	68
6	Equilibre de rotation d'un corps solide	69

6.1	Moment d'une force	69
6.2	Conditions d'équilibre de rotation	72
6.3	Principe du levier	73
6.4	Couple de forces	74
6.5	Equilibre d'un corps posé au sol	74

Première partie
Equilibre de translation



Introduction

La statique est l'étude des systèmes ¹ en équilibre, c'est à dire qui possèdent une vitesse constante (équilibre de translation) et pour lesquels la position relative des sous-systèmes ne change pas avec le temps. Afin d'analyser les conditions d'équilibre de translation d'un corps nous étudierons les notions suivantes :

- Qu'est ce que c'est une **force** et comment la représenter.
- Par la **troisième loi de Newton**, nous verrons ce que c'est une **interaction** et les types d'interaction existants, en particulier l'**interaction gravitationnelle** et la **force de pesanteur**.
- Comment plusieurs forces agissant sur un même système s'additionnent pour donner la **force résultante**.
- Grâce à la première loi de Newton, nous verrons quelles sont les conditions d'**équilibre de translation** d'un système.

1. Nous appelons système n'importe quel objet, partie d'objet ou ensemble d'objets, que nous "découpons" de la réalité pour l'étudier.

1 Forces et interactions

1.1 Définition de force

Une force est une action mécanique qui peut

1. **déformer un corps** (quelquefois de manière imperceptible);

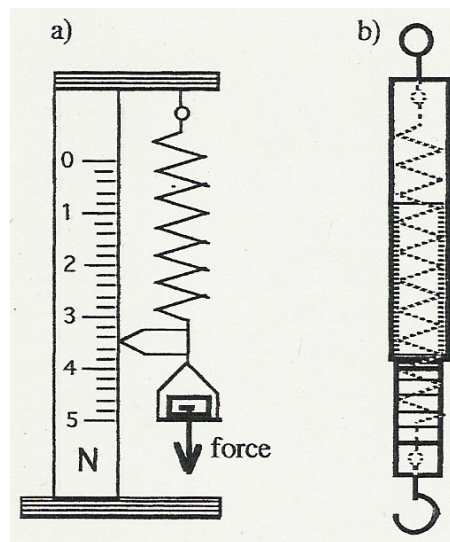
Exemples :

2. **modifier son état de mouvement ou de repos.**

Exemples :

Une force peut déformer un ressort, et l'allongement du ressort est proportionnel à l'intensité de la force appliquée. On utilise cette propriété pour la mesure de l'intensité d'une force avec un instrument appelé **dy-**
namomètre (du Grec ancien "dynamis" qui signifie "force").

L'unité de mesure de la force est le **Newton**, noté **N**. Par exemple, dans la figure a) ci contre, l'intensité de la force mesurée est de 3,5 N.



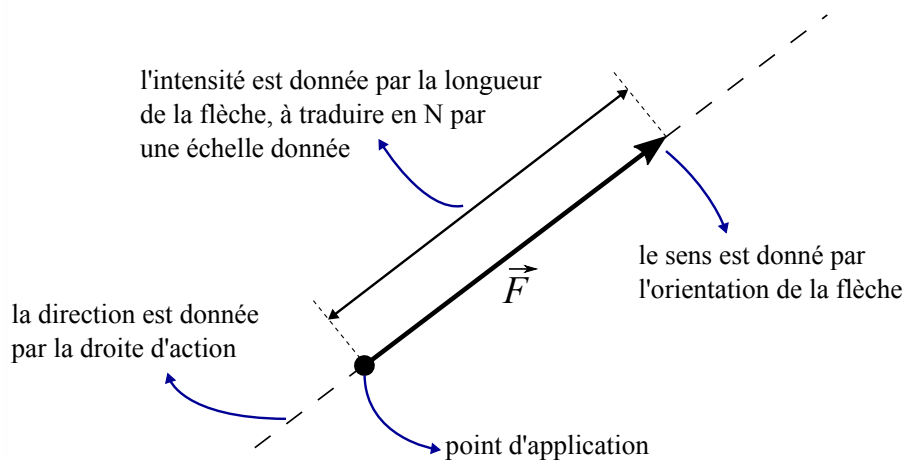
1.2 Représentation d'une force

Une force est un vecteur, représenté par une flèche.

Un vecteur est défini par trois éléments :

1. sa direction, c'est à dire la droite d'action de la force, par exemple horizontale ou verticale ;
2. son sens, donné par l'orientation de la flèche que l'on dessine sur la droite d'action, par exemple vers le haut ou vers la droite ;
3. son intensité ou sa norme, soit la quantité numérique mesurée en Newtons, proportionnelle à la longueur de la flèche.

De plus, il est utile de spécifier le **point d'application** d'une force, c'est à dire le point sur lequel elle agit.



Deux forces qui agissent dans la même direction mais dans le sens contraire sont dites opposées.

Pour indiquer le **vecteur force**, dans les schémas et dans les dessins, nous écrivons une lettre majuscule (généralement une “F”), **surmontée par une flèche** :

$$\vec{F}$$

L'intensité d'une force est une quantité scalaire, autrement dit un nombre : il s'agit de la quantité de Newtons. Pour symboliser uniquement l'intensité de la force nous écrivons la même lettre **sans la flèche**. Nous écrivons exemple²

$$F = 2\text{N}.$$

Attention : l'écriture $\vec{F} = 2\text{N}$ est fautive! Car le symbole \vec{F} nous indique une quantité avec une direction et un sens, et non pas juste une valeur numérique!

Puisque l'intensité d'une force est proportionnelle à la longueur de la flèche qui la représente, quand nous dessinons une force nous devons définir une échelle, par exemple :

$$1 \text{ cm} \longleftrightarrow 2 \text{ N}$$

ou

$$5 \text{ cm} \longleftrightarrow 1 \text{ N}.$$

• **Exemple 1.**




- En utilisant l'échelle $1\text{cm} \longleftrightarrow 2\text{N}$, déterminer l'intensité de la force qui est représentée dans la figure de la page précédente.*
- Avec la même échelle dessiner une force avec une direction horizontale et orientée vers la droite, d'intensité $4,8\text{N}$ et agissant sur le point M.*

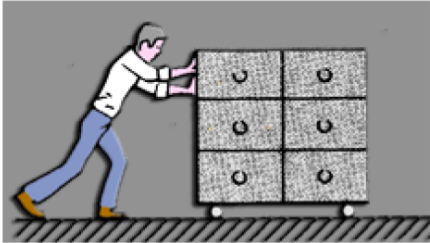

M

.

². On peut indiquer l'intensité d'une force également en entourant le symbole du vecteur par une double barre latérale, par exemple : $F = \|\vec{F}\| = 2\text{N}$.

- **Exemple 2.** Dans chacune des situations suivantes indiquer par une croix dans le tableau correspondant "qui exerce une force sur qui" (de manière directe).

																																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;">caillou</td> <td style="width: 33%;">main</td> </tr> <tr> <td>caillou</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>main</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		caillou	main	caillou			main			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;">lampe</td> <td style="width: 33%;">fil</td> <td style="width: 33%;">plafond</td> </tr> <tr> <td>lampe</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>fil</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>plafond</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		lampe	fil	plafond	lampe				fil				plafond				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;">pot</td> <td style="width: 33%;">commode</td> <td style="width: 33%;">sol</td> </tr> <tr> <td>pot</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>commode</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>sol</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		pot	commode	sol	pot				commode				sol			
	caillou	main																																									
caillou																																											
main																																											
	lampe	fil	plafond																																								
lampe																																											
fil																																											
plafond																																											
	pot	commode	sol																																								
pot																																											
commode																																											
sol																																											

																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;">homme</td> <td style="width: 33%;">armoire</td> <td style="width: 33%;">sol</td> </tr> <tr> <td>homme</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>armoire</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>sol</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		homme	armoire	sol	homme				armoire				sol				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;">cheval</td> <td style="width: 33%;">char</td> <td style="width: 33%;">homme</td> <td style="width: 33%;">sol</td> </tr> <tr> <td>cheval</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>char</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>homme</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>sol</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		cheval	char	homme	sol	cheval					char					homme					sol				
	homme	armoire	sol																																							
homme																																										
armoire																																										
sol																																										
	cheval	char	homme	sol																																						
cheval																																										
char																																										
homme																																										
sol																																										

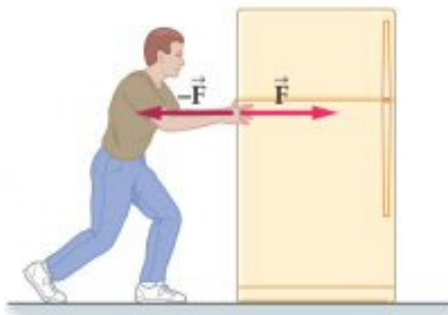
Quel conclusion pouvons nous tirer de ces tableaux ?

1.3 Définition d'interaction

Une interaction est donnée par l'action réciproque qui s'établit entre deux corps. Considérons deux corps A et B.

L'interaction entre A et B est donnée par deux forces :

- la force exercée par A sur B : $\vec{F}_{A/B}$ et
- la force exercée par B sur A : $\vec{F}_{B/A}$.



1.4 Troisième loi de Newton

Si un corps exerce une force $\vec{F}_{A/B}$ sur un autre corps B, alors B exerce une force $\vec{F}_{B/A}$ sur A, avec la même intensité et la même direction, mais dans le sens opposé : $\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$. (1)

Souvent, cet énoncé est simplifié ainsi : **pour chaque action, il existe une réaction égale et opposée**. Pour cette raison, cette loi est aussi appelée principe des actions réciproques ou, de manière moins précise, loi d'action/réaction.




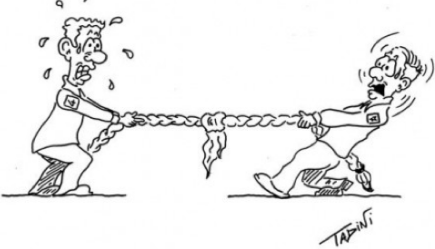
Une conséquence importante de cette loi est le fait qu'**une force n'existe jamais toute seule**, et donc, de manière générale, nous devrions penser en termes d'interactions plutôt

qu'en termes de forces. Il est important d'observer que, **même si les deux forces $\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$ sont opposées, elles ne peuvent pas "s'annuler mutuellement", car chacune agit sur un corps différent.**

Pour conclure, nous observons que, à notre échelle, **nous pouvons classer les interactions en deux sortes :**

- les interactions de contact et
- les interactions à distance.

• **Exemple 3.** Dans chacune des situations suivantes, indiquer par une croix bleue dans le tableau correspondant "qui exerce une force de contact sur qui" et par une croix rouge dans le tableau correspondant "qui exerce une force à distance sur qui".

																																																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td>parachutiste</td> <td>sol</td> <td>Terre</td> </tr> <tr> <td>parachutiste</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>sol</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Terre</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		parachutiste	sol	Terre	parachutiste				sol				Terre				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td>fille</td> <td>chien</td> <td>sol</td> <td>Terre</td> </tr> <tr> <td>fille</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>chien</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>sol</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Terre</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		fille	chien	sol	Terre	fille					chien					sol					Terre																																			
	parachutiste	sol	Terre																																																																						
parachutiste																																																																									
sol																																																																									
Terre																																																																									
	fille	chien	sol	Terre																																																																					
fille																																																																									
chien																																																																									
sol																																																																									
Terre																																																																									
																																																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td>aimant</td> <td>boule</td> <td>fil</td> <td>sol</td> <td>Terre</td> </tr> <tr> <td>aimant (base)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>boule en fer</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>fil</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>sol (table)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Terre</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		aimant	boule	fil	sol	Terre	aimant (base)						boule en fer						fil						sol (table)						Terre						<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td>homme1</td> <td>homme2</td> <td>corde</td> <td>sol</td> <td>Terre</td> </tr> <tr> <td>homme1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>homme2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>corde</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>sol</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Terre</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		homme1	homme2	corde	sol	Terre	homme1						homme2						corde						sol						Terre					
	aimant	boule	fil	sol	Terre																																																																				
aimant (base)																																																																									
boule en fer																																																																									
fil																																																																									
sol (table)																																																																									
Terre																																																																									
	homme1	homme2	corde	sol	Terre																																																																				
homme1																																																																									
homme2																																																																									
corde																																																																									
sol																																																																									
Terre																																																																									

On en conclut que

le sol interagit toujours

la Terre interagit toujours

1.5 Les interactions fondamentales

Malgré l'apparente complexité et diversité des phénomènes naturels, la physique cherche à expliquer le plus simplement possible le monde qui nous entoure. Ainsi, bien que dans la nature nous observions de nombreux types de forces, apparemment très différentes, **on arrive à expliquer toutes ces forces à partir de quatre interactions fondamentales qui s'exercent toujours à distance entre les particules constituant la matière connue** (comme les neutrons et les protons). De la plus forte à la plus faible, nous pouvons compter :

1. **L'interaction nucléaire forte**, qui a effet sur toute particule constituant le noyau d'un atome, c'est à dire les neutrons et les protons.
2. **L'interaction électromagnétique**, qui réunit l'interaction électrique et celle magnétique³. Elle affecte toute charge électrique et magnétique, et est répulsive lorsque les deux charges sont de même signe, attractive si les charges sont de signes opposés.
3. **L'interaction nucléaire faible**, qui affecte toute particule connue.
4. **L'interaction gravitationnelle**, qui a effet sur toute masse. Elle est toujours attractive.

Les interactions électromagnétique et gravitationnelle ont la particularité d'agir à longue portée, tandis que les deux interactions nucléaires agissent seulement à courte portée, sur des distances de l'ordre du noyau atomique, soit 10^{-15} m. C'est la raison pour laquelle toutes les interactions que nous percevons à notre échelle découlent des interactions électromagnétiques et/ou gravitationnelles uniquement.

Différences entre l'interaction gravitationnelle et électrique

Premièrement, il est important de souligner que deux corps quelconques peuvent interagir gravitationnellement juste par le fait qu'ils ont une masse. Ces mêmes corps, si non chargés électriquement, ne peuvent pas interagir électriquement.

L'interaction gravitationnelle est beaucoup plus faible que celle électrique, raison pour laquelle des effets mesurables apparaissent uniquement lorsqu'au moins un des deux systèmes en interaction a une masse très grande, par exemple de l'ordre d'une planète. Au contraire, l'interaction électrique, plus intense, agit très fortement déjà pour des objets petits comme des particules.

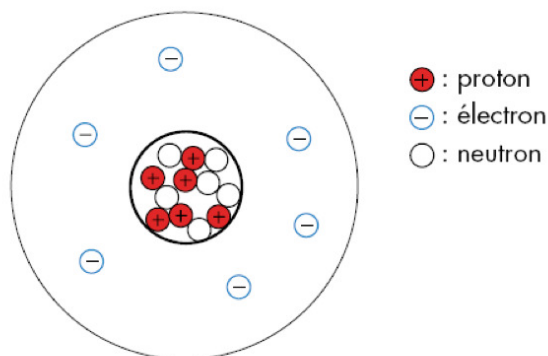
3. La deuxième interaction étant une manifestation relativiste de la première.

Néanmoins, **l'existence de deux charges (positive et négative)** pour cette interaction a des conséquences importantes :

1. alors que **l'interaction gravitationnelle est toujours attractive, l'électrique peut être attractive** (pour deux charges de signe opposé) **ou répulsive** (pour deux charges du même signe) ;
2. pour des objets de taille macroscopique ses effets s'estompent puisque **l'effet des charges positives et celui des charges négatives dans le même corps se compensent**, et la matière tend à être neutre à de grandes échelles.

1.6 Effets des interactions nucléaires forte et faible

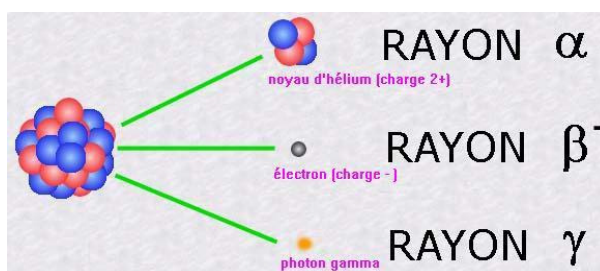
Les noyaux des atomes sont constitués de particules neutres, les neutrons, et de particules chargées positivement, les protons. Ces dernières devraient se repousser vigoureusement par l'effet de l'interaction électrique. L'interaction nucléaire forte est responsable de la cohésion entre ces particules. Comme vu auparavant, cette interaction est dominante par rapport à toutes les autres à très petites échelles, à partir de 10^{-15}m , raison pour laquelle la force électrostatique répulsive entre protons devient négligeable dans le noyau, et les nucléons (les particules constituant le noyau atomique, donc neutrons et protons) restent proches malgré leur charge du même signe.



Atome de carbone : modèle montrant les charges électriques.

Il faut donc de très grandes énergies pour “casser” les noyaux des atomes, afin de “vaincre” la force nucléaire forte et éloigner les nucléons à une distance suffisamment grande pour que l'interaction forte ne soit plus celle dominante. Cependant, une fois le noyau “cassé”, les nucléons des atomes d'origine forment spontanément de nouveaux noyaux en se regroupant différemment, dans des configurations plus stables. Par exemple, il est possible de casser des noyaux très lourds comme celui de l'uranium 238 (238 car il possède 238 nucléons au total) en deux noyaux plus légers : nous parlons de **fission nucléaire**. On peut aussi réunir des noyaux légers pour en former de plus lourds : par exemple quatre d'hydrogène, chacun contenant un proton, peuvent former un noyau d'hélium composé de deux protons et deux neutrons (appelé aussi particule α). Nous parlons de **fusion nucléaire**. Dans tous les cas la masse de l'ensemble des noyaux finales est plus petite que celle de l'ensemble des noyaux du départ. Cet écart de masse a été converti en énergie, appelée donc **énergie nucléaire**.

Lors de réactions nucléaires, des neutrons peuvent se changer en protons en perdant une charge négative (un électron), et vice-versa, ce qui est inexplicable avec les trois autres interactions. Ces réactions sont expliquées par l'interaction faible.



L'interaction nucléaire faible est donc responsable de l'émission de particules β , soit des électrons, de la part des noyaux de quelques éléments instables dans la nature. Tous ces phénomènes d'émission de particules (noyaux d'hélium, protons ou électrons, entre autres) dans les transformations des noyaux d'atomes sont connus sous le nom de **radioactivité nucléaire**.

1.7 Effets de l'interaction gravitationnelle

L'interaction gravitationnelle nous affecte principalement par la force d'attraction vers le centre de la Terre que chaque objet dans son entourage subit. Cette force est aussi appelée force de la pesanteur.

L'interaction gravitationnelle entre les planètes du système solaire et le Soleil est à l'origine de la rotation des planètes autour de celui-ci. De la même manière, l'interaction gravitationnelle entre la Terre et la Lune explique le mouvement de révolution du satellite autour de notre planète. De plus l'interaction de la Terre avec la Lune et le Soleil, qui changent périodiquement leurs positions relatives par rapport à notre planète, ont comme conséquence les phénomènes des changements de marée. Un exemple de ce type de phénomène peut être observé en comparant les deux images ci-dessous. Il s'agit du même endroit, dans le Jersey, mais photographié avec 6h de décalage : dans l'image de gauche la marée est basse, dans celle de droite elle est haute.



Aux plus larges échelles, l'interaction gravitationnelle domine et détermine la distribution et le mouvement de la matière à l'intérieur des galaxies, des galaxies dans l'univers ainsi que l'évolution de l'univers entier. Au voisinage de certains objets astrophysiques assez compacts, cette interaction devient tellement puissante que même la lumière ne peut y échapper, raison pour laquelle ces corps sont nommés "trous noirs". Pour le moment on en détecte l'existence surtout de manière indirecte : soit par le rayonnement émis par la matière avalée, soit par l'effet qu'ils ont sur des corps proches d'eux. Les collisions de ce type d'objets sont parmi les phénomènes les plus puissants de l'univers, et peuvent être détecté directement par leurs émissions d'ondes gravitationnelles.

1.8 Effets de l'interaction électromagnétique

Comme vu dans le paragraphe 1.6, l'interaction électromagnétique commence à dominer sur les interactions nucléaires à partir d'échelles de l'ordre de 10^{-14} m. Elle est largement présente aux échelles microscopique mais aussi **à notre échelle : toutes les forces macroscopiques autres que la force de pesanteur peuvent être expliquées à partir de l'interaction électromagnétique.**

Interaction magnétique

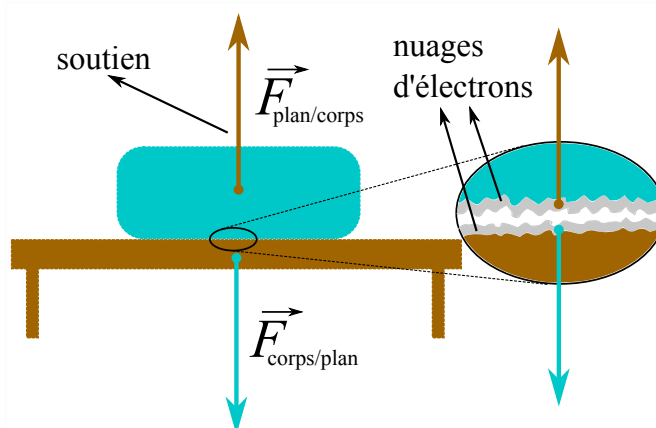
L'interaction magnétique agit à distance entre deux charges magnétiques, appelés les "pôles" : le nord ou le sud. Un corps qui interagit magnétiquement est appelé aimant, et possède toujours ces deux pôles : il n'existe pas une charge magnétique isolée, c'est à dire composé uniquement d'un pôle nord ou d'un pôle sud (un "monopole"). La Terre est un exemple d'aimant astrophysique, tout comme le Soleil. Mais il existe aussi des aimants de taille humaine ou microscopique. Tout aimant interagit aussi avec les charges électriques, en modifiant leur mouvement (le courant électrique). De plus, tout aimant est en réalité un effet relativiste du mouvement des charges électriques.

Interaction électrique

L'interaction électrique, agit à l'échelle microscopique à distance entre les charges des particules qui constituent la matière : les protons (positifs) et électrons (négatifs). Elle assure les liaisons entre les électrons et le noyau atomique, ainsi que celles entre les atomes composant les différentes substances chimiques : par exemple la molécule d'eau, formée de deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène. De plus, elle est à la base des liaisons (plus ou moins fortes) entre les molécules, ce qui explique la cohésion des solides et des liquides au niveau macroscopique. Ces effets microscopiques sont à l'origine de nombreuses interactions courantes à l'échelle humaine.

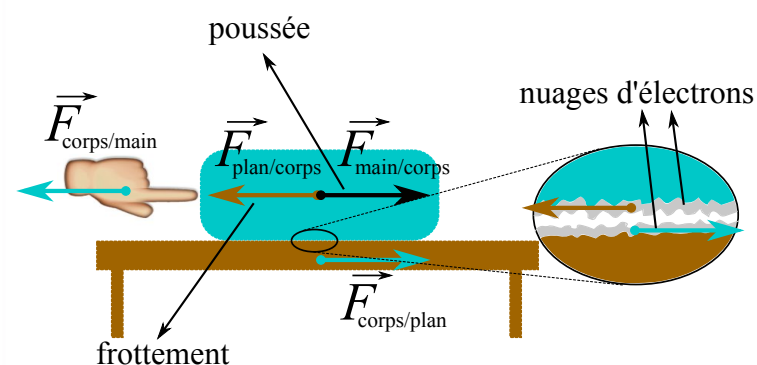
Par exemple :

- **les forces de traction ou forces motrices**, par exemple la tension d'un fil, créé par la force cohésion des molécules qui le composent, ou la force musculaire, conséquence des réactions chimiques comme la combustion du sucre ;
- **la force de rappel**, par exemple celle d'un ressort lorsqu'il est étiré. Ce type de force dépend de l' allongement du corps et est aussi la conséquence de la cohésion des molécules d'un même corps ;
- **les forces de réaction, comme celle de soutien d'un support**, qui explique pourquoi nous pouvons poser un livre sur une table sans qu'il "passe au travers". Elles sont toujours répulsives et perpendiculaires au support. À l'échelle macroscopique les forces de réaction sont considérées comme des forces "de contact". Néanmoins à l'échelle microscopique ces forces sont dues à la répulsion "à distance" entre les électrons (chargés négativement) dans les couches externes des atomes à la surface des objets en question. Ainsi, lorsque deux corps solides sont en contact, la représentation des forces agissant au point de contact n'est qu'une interprétation macroscopique de la répulsion entre les électrons de ces corps.



- **la force de frottement** ⁴, **qui s'oppose toujours au mouvement**. Quand un livre est poussé sur une table, par exemple, elle agit comme "frein" à la poussée. De manière analogue à la force de soutien, l'origine du frottement est à rechercher au niveau microscopique : si nous regardions les surfaces des corps très agrandies, nous verrions qu'elles ne sont pas "lisses", et la répulsion électromagnétique qui s'exerce entre les atomes des matériaux différents (ceux du livre et ceux de la surface d'appui) se traduit par une force parallèle au plan.

4. Nous traiterons ultérieurement le frottement dans le chapitre 3.6.



Par conséquent, dans la suite du cours nous représentons

1. la force de soutien d'un plan sur un objet avec un vecteur toujours perpendiculaire au plan et dans le sens repoussant l'objet du plan ;
2. la force de frottement d'un plan sur un objet poussé avec vecteur toujours parallèle au plan et dirigé dans le sens opposé à la poussée.

2 Gravitation et pesanteur

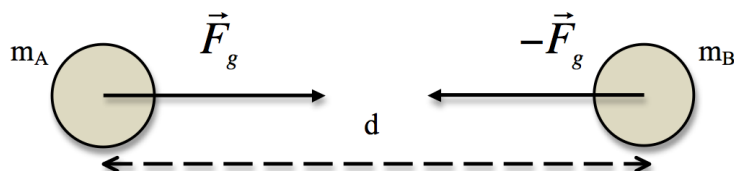
2.1 La loi de gravitation universelle

La force qui fait tomber un objet est une conséquence de l'interaction gravitationnelle (vue dans le paragraphe 1.5) de cet objet avec la Terre. Ainsi une force est exercée par la Terre sur le centre de masse de l'objet et, par la troisième loi de Newton, nous savons qu'une force de la même intensité mais de direction opposée est exercée sur le centre de masse de la Terre par l'objet en question.

Cette interaction ne concerne pas seulement la Terre et les objets à sa surface. Elle est universelle, dans la mesure où elle s'applique à **toute couple de corps dans l'univers ayant une masse**. La **loi de gravitation universelle**, introduite par Isaac Newton au dix-septième siècle, nous décrit quantitativement cette interaction.

L'interaction entre deux corps quelconques de masses m_A et m_B séparés d'une distance d est donnée par un couple de forces attractives (donc opposées) agissant le long de la ligne qui relie les deux corps.

$$\text{Leur intensité est la même : } F_g = G \frac{m_A m_B}{d^2}, \quad (2)$$



où G est une constante universelle qui a la même valeur pour toute couple de corps. [La valeur de \$G\$](#) est mesurée en utilisant la force d'attraction entre deux corps de masse connue. Elle vaut $G = 6,67384(80) \cdot 10^{-11} \text{N} \frac{\text{m}^2}{\text{kg}^2}$. Cette valeur est très petite, c'est pourquoi la force d'attraction ne devient significative que pour des objets assez massifs, comme des planètes.

Nous soulignons que, **même si les masses des deux corps sont très différentes, les forces ont la même intensité (action-réaction)!** Ainsi lorsqu'une pomme tombe par terre, l'intensité F_g de la force gravitationnelle de la Terre sur la pomme est la même que celle de la pomme sur la Terre. Ce qui change est l'effet que chacune de ces forces a sur le mouvement des corps⁵.

5. En l'occurrence l'accélération : la pomme va plus facilement changer de vitesse que la Terre car elle a une masse plus petite.

• **Exemple 4.** *Calculer l'intensité de la force de gravitation entre la Terre et la Lune.*

• **Exemple 5.**

a) *Calculer l'intensité de la force gravitationnelle qui s'exerce entre deux élèves dont les masses respectives sont $m_A = 50\text{kg}$ et $m_B = 70\text{kg}$ séparées par une distance de 1m.*

b) *Dans la vie courante, on ne voit pas les objets tomber les uns sur les autres. Pourquoi ?*

• **Exemple 6.**

a) *La force de gravitation est proportionnelle à la masse de chacun des corps signifie que si on double une des masses, la force*

.....

b) *La force de gravitation est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les centres de masse des corps signifie que si on double cette distance, la force.....*

.....

2.2 Force de la pesanteur

Souvent, dans la situation où l'interaction gravitationnelle que nous analysons est celle entre une planète et un corps quelconque dans son voisinage, nous nous focalisons sur une seule des deux forces de manière particulière : celle exercée par la planète sur le corps, que nous appelons “force de la pesanteur” (ou “poids” de manière plus imprécise).

Sur une planète, la force de la pesanteur d'un corps est la force gravitationnelle exercée par cette planète sur ce corps.

Nous écrivons cette force \vec{F}_g .

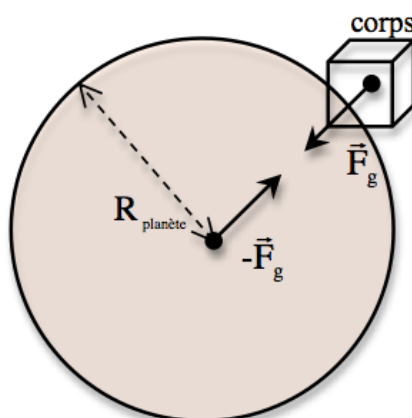
Attention :

— **Le point d'application de \vec{F}_g est le centre de masse de l'objet.** Pour des formes symétriques simples, comme une sphère ou un prisme, le centre de masse correspond au centre géométrique de l'objet.

— **L'intensité de la force de la pesanteur se mesure en N, et pas en kg !**

Elle n'est pas à confondre avec la masse d'un corps, mesurée en kg, qui est une caractéristique du corps uniquement⁶ et ne change donc pas, que celui-ci se trouve sur une planète ou loin de tout astre.

Au contraire, l'intensité de la force de la pesanteur est la conséquence de l'interaction avec une planète, donc elle dépend du lieu où le corps se trouve dans l'espace : pour un même corps de masse m , F_g aura des valeurs différents sur la Lune, sur la Terre, ou loin de toute planète.

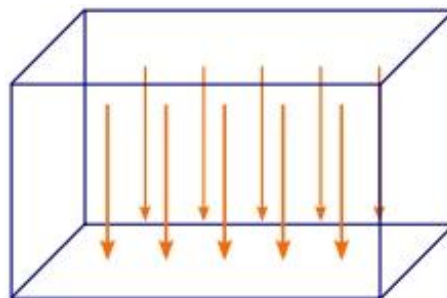
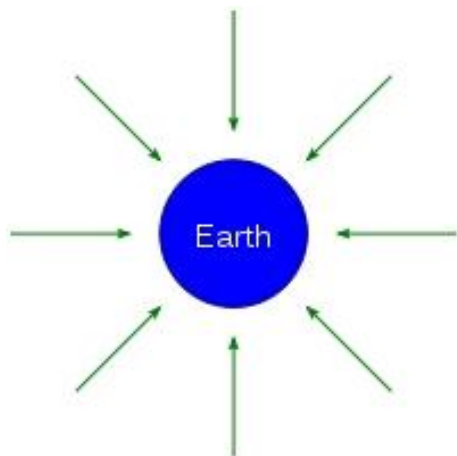


6. On peut penser à la masse comme à la “quantité de matière” qui compose un corps.

• **Exemple 7.** Définir :

la direction de la force de la pesanteur :

le sens de la force de la pesanteur :



Comme montré dans la figure ci dessus à gauche, de manière générale la verticale passant par le centre de gravité d'un objet change selon la position occupée par l'objet à la surface de la planète. Néanmoins, dans une pièce (comme un laboratoire) les distances qui entrent en jeux sont négligeables par rapport au rayon de courbure terrestre. La verticale peut être considérée identique pour tous les points de l'espace de la pièce.

• **Exemple 8.**

a) En utilisant la loi de gravitation universelle (l'équation (2) à la page 19), calculer l'intensité de la force de la pesanteur pour un objet de masse $m = 5,00\text{kg}$ à la surface de la Terre. Utiliser $R_T = 6,372 \cdot 10^6\text{m}$.

b) Faire le même calcul pour un objet de masse $m = 10,0\text{kg}$ puis $m = 20,0\text{kg}$.

2.3 Constante de pesanteur g

À la surface terrestre l'intensité de la force de la pesanteur d'un objet de masse m est donnée par l'équation (2), où nous remplaçons m_1 par la masse de l'objet m , m_2 par la masse de la Terre M_T , et la distance entre les deux centres de masse d par le rayon de la Terre R_T :

$$F_g = G \cdot \frac{m M_T}{R_T^2} = m \cdot \frac{G M_T}{R_T^2}. \quad (3)$$

Puisque M_T et R_T sont des constantes, l'équation (3) nous dit que

F_g ne dépend que de la masse de l'objet m et est directement proportionnelle à cette dernière.

La constante de proportionnalité

$$g = \frac{G M_T}{R_T^2}. \quad (4)$$

s'appelle constante de pesanteur ou accélération de la pesanteur sur Terre. De cette manière, l'équation (3) peut s'écrire simplement

$$F_g = m \cdot g \quad \text{ou} \quad \frac{F_g}{m} = g. \quad (5)$$

Puisque g peut s'obtenir comme l'intensité d'une force divisée par une masse, **son unité de mesure est le Newton par kilogramme : N/kg** ⁷. À Genève $g = 9,81\text{N/kg}$. Numériquement, cela signifie que chaque kilogramme de matière est attiré avec une force d'intensité égale à 9,81N vers le centre de la Terre.

2.4 Variation de g à la surface terrestre

La constante de la pesanteur est constante si l'on considère que R_T et M_T ne changent pas. Néanmoins à la surface de la Terre g varie en fonction du lieu où on se trouve (en altitude ou au bord de la mer). De plus, la rotation terrestre autour de son axe a un double effet :

- premièrement la Terre est aplatie aux pôles, sa forme n'est donc pas sphérique mais plutôt elliptique. Par conséquent, à sa surface, la distance du centre de la Terre varie avec la latitude ;

⁷. Dans la table CRM g est nommée "accélération de la pesanteur". En effet, nous verrons dans le cours de dynamique que g correspond dimensionnellement à une accélération et son unité est aussi le $\text{m/s}^2 = \text{N/kg}$.

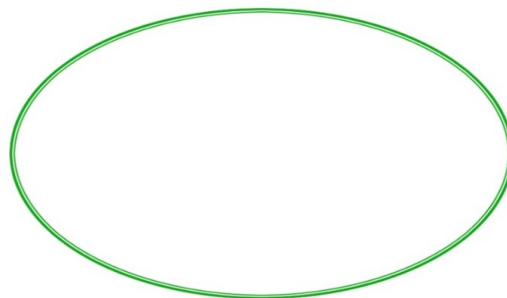
- deuxièmement, la vitesse de rotation à différents endroits sur la surface (aux pôles il n'y a pas de rotation, à l'équateur la vitesse de rotation est maximale) donne une petite correction à la valeur obtenue avec la formule (4).

De manière indicative

au pôle Nord $g_{pn} = 9,83 \text{ N/kg}$,

à Genève $g_{Ge} = 9,81 \text{ N/kg}$,

à l'équateur $g_{eq} = 9,78 \text{ N/kg}$.



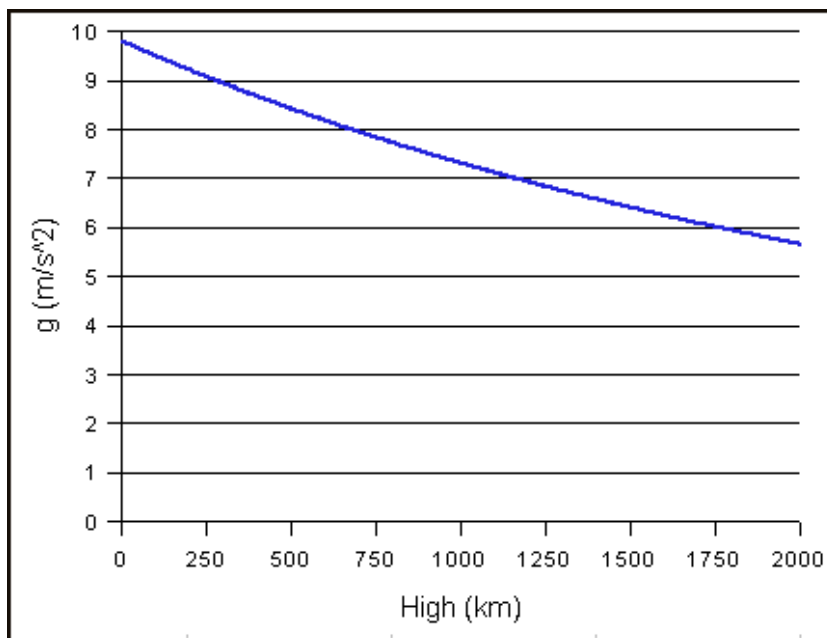
Le tableau suivant indique l'accélération de la pesanteur pour quelques villes dans le monde⁸. La plus faible est à Mexico (9.779N/kg) et la plus grande à Oslo (Norvège) et à Helsinki (Finlande) (9.819N/kg). La variation s'explique par l'altitude et par la latitude de ces villes.

Amsterdam	9.813 m/s ²	Istanbul	9.808 m/s ²	Paris	9.809 m/s ²
Athens	9.807 m/s ²	Havana	9.788 m/s ²	Rio de Janeiro	9.788 m/s ²
Auckland	9.799 m/s ²	Helsinki	9.819 m/s ²	Rome	9.803 m/s ²
Bangkok	9.783 m/s ²	Kuwait	9.793 m/s ²	San Francisco	9.800 m/s ²
Brussels	9.811 m/s ²	Lisbon	9.801 m/s ²	Singapore	9.781 m/s ²
Buenos Aires	9.797 m/s ²	London	9.812 m/s ²	Stockholm	9.818 m/s ²
Calcutta	9.788 m/s ²	Los Angeles	9.796 m/s ²	Sydney	9.797 m/s ²
Cape Town	9.796 m/s ²	Madrid	9.800 m/s ²	Taipei	9.790 m/s ²
Chicago	9.803 m/s ²	Manila	9.784 m/s ²	Tokyo	9.798 m/s ²
Copenhagen	9.815 m/s ²	Mexico City	9.779 m/s ²	Vancouver	9.809 m/s ²
Nicosia	9.797 m/s ²	New York City	9.802 m/s ²	Washington, D.C.	9.801 m/s ²
Jakarta	9.781 m/s ²	Oslo	9.819 m/s ²	Wellington	9.803 m/s ²
Frankfurt	9.810 m/s ²	Ottawa	9.806 m/s ²	Zurich	9.807 m/s ²

- **Exemple 9.** Si la masse d'un étudiant est $m = 50,0\text{kg}$, l'intensité de sa force de pesanteur à Genève est $F_{g_{Ge}} = m \cdot g_{Ge} = 50\text{kg} \cdot 9,81\text{N/kg} = 491\text{N}$. Quel est l'intensité de sa force de pesanteur à l'équateur $F_{g_{eq}}$?

8. Nous verrons dans le cours de dynamique (2DF) que mètre par seconde carré est une unité équivalente au newton par kilogramme : $1\text{m/s}^2 = 1\text{N/kg}$.

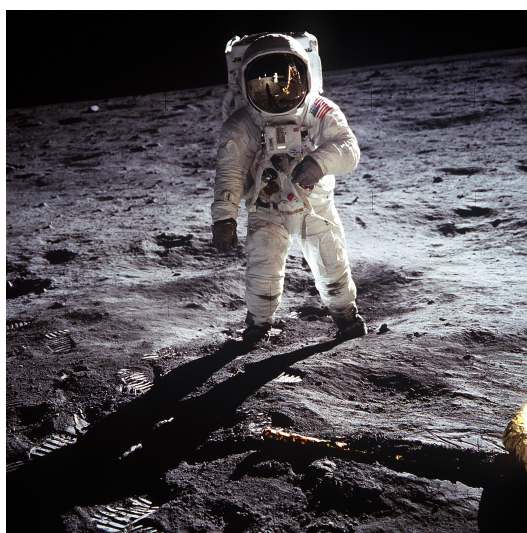
L'accélération de la pesanteur varie en fonction du carré de la distance du centre de la Terre, raison pour laquelle en altitude elle diminue. Le graphique ci dessous montre cette variation.



2.5 Constante de pesanteur dans le Système Solaire

La constante de pesanteur sur la Lune est donnée par l'équation (4), en remplaçant M_T par M_L et R_T par R_L . La Lune a une plus petite masse et un plus petit rayon que la Terre. Globalement, g sur la Lune est environ six fois plus petite que sur la Terre :

$$g_{lune} = \frac{G M_L}{R_L^2} = 1,6N/kg. \quad (6)$$



• **Exemple 10.** La masse d'un étudiant est de 50kg.

- Quel est l'intensité de sa force de pesanteur sur la Lune ?
- Quelle est sa masse sur la Lune ?
- Qu'indiquerait un pèse personne terrestre sur la lune ?

La constante de pesanteur à la surface de planètes du Système Solaire est, en N/kg :

Mercur	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

À la surface du Soleil, g est 28 fois plus grande qu'à la surface de la Terre : 274N/kg. Les valeurs de g à la surface des planètes du système solaire se trouvent également dans la table CRM (sous le nom "accélération de la pesanteur", en $m/s^2 = N/kg$).

Lorsqu'un objet est très éloigné de tout astre (dans l'équation (2) $d \rightarrow \infty$), il ne subit qu'une interaction gravitationnelle infime, donc la force de pesanteur et la constante de pesanteur sont négligeables : $F_g \cong 0N$; $g \cong 0N/kg$. Dans ce cas on parle d'apesanteur. Remarque : même en apesanteur, un corps garde sa masse inchangée !

3 Equilibre de translation d'un système

Un corps est en équilibre de translation quand la vitesse de son centre de masse est constante dans le temps.

En particulier, si la vitesse d'un corps est contante et nulle, alors il est à l'équilibre de translation, mais le contraire n'est pas vrai ! Par exemple lorsque nous sommes tranquillement assis, immobiles par rapport au sol, nous sommes en équilibre translationnel, mais nous possédons quand même une vitesse (pratiquement constante) d'environ 110000km/h par rapport au Soleil : la vitesse d'un corps est une grandeur relative.

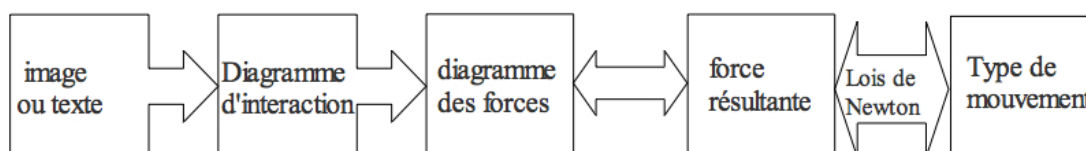
Nous avons vu qu'à notre échelle il peut y avoir différentes types de force agissant en même temps sur le même système⁹ (force de contact, force poids, force de rappel d'un ressort, etc). Chaque force est la conséquence d'une interaction, qu'elle soit fondamentale ou non, avec un autre système.

À partir de maintenant nous allons nous focaliser sur un système donné pour en étudier les conditions d'équilibre de translation. Pour faire cela nous devons

- lister et dessiner toutes les forces qui agissent sur le système ;
- déterminer quel est l'effet de toutes les forces agissantes simultanément sur ce système.

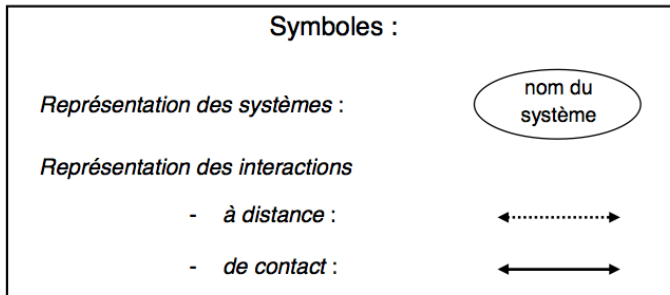
3.1 Diagrammes système-interactions

Une méthode efficace afin de déterminer quelles sont les forces qui agissent sur un système à partir d'un croquis ou d'un énoncé de problème est celle des **diagrammes système-interactions**. Cette procédure nous est utile car elle nous permet de lister toutes les forces agissant sur un un système, pour ensuite dessiner un **diagramme des forces** pour celui-ci. Le diagramme des forces nous permet de déterminer si le système en question est en équilibre ou pas.



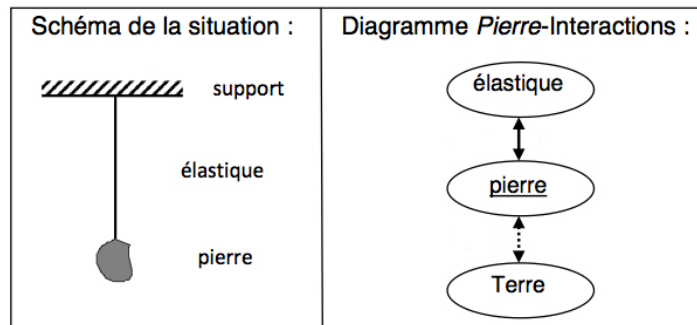
9. Nous rappelons qu'un système est n'importe quel objet, partie d'objet ou ensemble d'objets, que nous "découpons" de la réalité pour l'étudier.

Nous choisissons un système et nous nous intéressons uniquement aux interactions de ce système avec les autres. Chaque système est représenté par un cercle, et chacune des interactions qu'il subit est représentée par une double flèche, comme indiqué dans la figure de la page ci-dessous à droite.



Le diagramme système-interactions s'organise donc autour du système choisi, placé en son centre. La disposition des autres systèmes n'a pas de signification dans ce diagramme. Pour distinguer le système choisi des autres systèmes, on souligne son nom dans le diagramme.

La figure ci-contre montre l'exemple d'une pierre suspendue à un élastique. Nous choisissons le système "pierre" et voulons représenter les forces agissant sur celle-ci. Deux forces agissent sur la pierre : celle due à l'interaction avec la Terre, \vec{F}_g , et celle due à l'interaction avec l'élastique, \vec{F}_e .

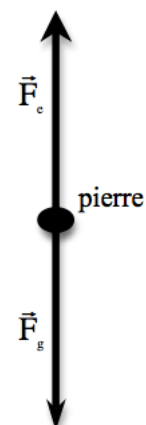


Nous pouvons alors faire le **diagramme des forces** : nous représentons l'objet "pierre" comme un seul point et dessinons les vecteurs représentant ces forces appliqués à ce point (dans ce cas deux).

Diagramme des forces :

Pour cela il est nécessaire de fixer une échelle, par exemple 1cm \longleftrightarrow 2N.

Attention : dans le diagramme des forces, la direction et le sens de chaque flèche est importante ! De plus il est important d'indiquer, à côté de chaque flèche, quelle force celle-ci représente (\vec{F}_g , $\vec{F}_{élastique}$, \vec{F}_{table} , $\vec{F}_{soutien}$, $\vec{F}_{frottement}$, par exemple).



3.2 Force résultante

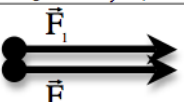





Lorsque plusieurs forces agissent sur le même système, nous définissons

la **force résultante** ou **somme vectorielle des forces** comme la force qui aurait le même effet sur le centre de masse du système que l'ensemble des forces agissant sur ce système.

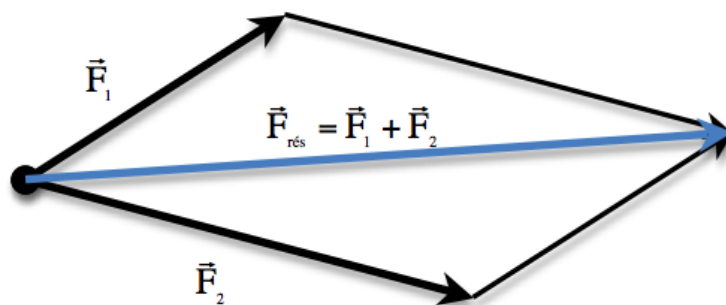
À noter que la **force résultante est unique et remplace toutes les autres forces qui agissent sur le corps**. Sur un diagramme des forces, il est donc préférable de dessiner la force résultante avec une couleur différente par rapport aux autres forces.

Imaginons d'avoir deux forces dont nous souhaitons trouver la résultante. Trois cas peuvent se présenter :

1. **Les deux forces sont parallèles et ont le même sens.** Dans ce cas, les intensités des deux forces s'additionnent pour donner une force résultante avec le même sens et une intensité égale à la somme des intensités des deux forces de départ.
2. **Les deux forces sont parallèles et opposées.** Dans ce cas, les intensités se soustraient (la plus grande moins la plus petite). Le sens de la force résultante sera celui de la plus grande des deux forces.

Forces agissant Intensités : $F_1 = F_2 = F_3 = 5\text{N}$; $F_4 = 10\text{N}$	Force résultante (net force)
	 $F_{rés} = 10\text{N}$
	 $F_{rés} = 0\text{N}$
	 $F_{rés} = 5\text{N}$

3. **Les deux forces ne sont pas parallèles** (cas général). Dans ce cas nous utilisons la "règle du parallélogramme" qui consiste à déplacer (ou glisser) un vecteur à la suite de l'autre : le deuxième à la suite du premier ou vice-versa, nous obtenons un parallélogramme. La force résultante est donnée par la diagonale qui part du point d'application de deux forces initiales.



Attention : d'une manière générale, l'intensité de la force résultante n'est pas égale à la somme des intensités des forces qu'elle remplace (inégalité du triangle) :

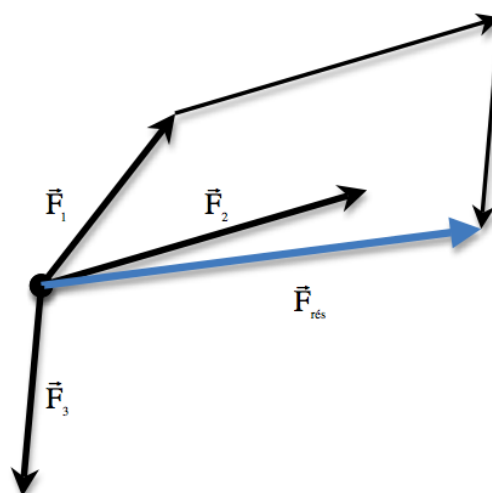
$$\vec{F}_{rés} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \quad \text{mais} \quad F_{rés} \leq F_1 + F_2!$$

L'équation ci dessus à gauche est une égalité vectorielle : le signe “+” a la signification de “somme de vecteurs selon la règle du parallélogramme”, et pas de “somme de nombres”. À droite nous avons une inégalité scalaire, elle concerne l'intensité des forces, soit la “longueur” des flèches : le signe “+” a la signification de “somme de nombres”. Elle nous dit que dans un triangle quelconque la somme de la longueur de deux côtés est toujours plus grande à la longueur du troisième côté, et elle est égale uniquement lorsque le triangle est complètement aplati.

3.3 Somme de plus que deux forces

Pour additionner plus que deux forces, nous répétons la procédure décrite ci-dessus : après avoir trouvé la résultante pour les deux premières forces nous l'additionnons avec la troisième, etc.. Cela revient à **déplacer tous les vecteur l'un à la suite de l'autre (“à la queue leu-leu”)**, puis dessiner le vecteur qui rejoint l'origine du premier avec l'extrémité du dernier, comme montré dans la figure ci-contre.

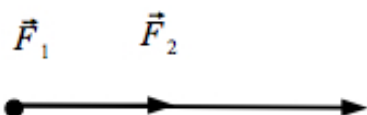
Remarque : puisque la **somme des vecteurs est commutative**, le résultat finale ne change pas en changeant l'ordre avec lequel les vecteurs de départ sont additionnés.



À l'adresse web suivante une application montrant comment construire la résultante à partir de deux ou plus forces est disponible : <http://www.walter-fendt.de/ph14e/resultant.htm>



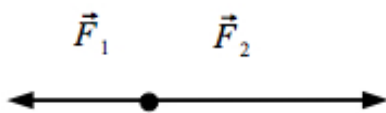
• **Exemple 11.** Dessiner la force résultante (\vec{F}_{net}) pour les cas suivants, puis déterminer son intensité. Utiliser l'échelle $1\text{cm} \longleftrightarrow 5\text{N}$.



$$F_1 =$$

$$F_2 =$$

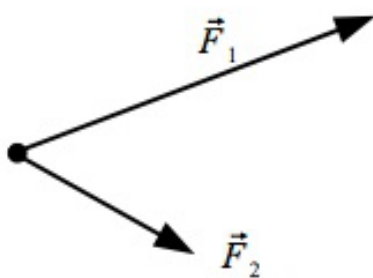
$$F_{net} =$$



$$F_1 =$$

$$F_2 =$$

$$F_{net} =$$



$$F_1 =$$

$$F_2 =$$

$$F_{net} =$$

3.4 Décomposition d'une force

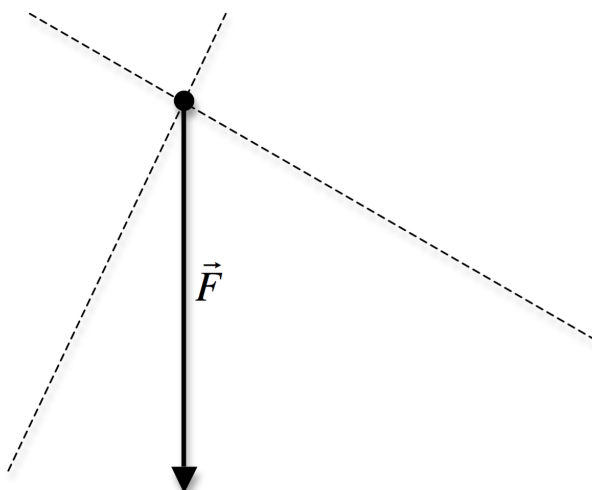
Pour résoudre certains problèmes, les conditions géométriques sont telles qu'il devient utile de faire l'opération inverse à la somme des forces : à partir d'une force que l'on considère comme "résultante", nous voulons trouver deux (ou plus) forces qui, sommées, nous donnent la force du départ. Chacune de ces deux forces s'appelle composante de la force initiale. Ces composantes remplacent la force initiale.

La décomposition d'une force n'est pas unique, il existe une infinité de décompositions possibles. Le choix est fait en tenant compte des conditions géométriques de la situation : par exemple la présence d'un plan ou d'un câble incliné, qui fixe la direction d'action d'une des composantes de la force.

- **Exemple 12.** Décomposer le vecteur ci-dessous en la somme de deux vecteurs :



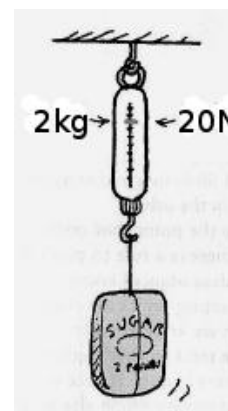
- **Exemple 13.** Décomposer le vecteur \vec{F} ci-dessous en la somme de deux composantes selon les directions indiquées :



• Exemple 14.

On suspend un paquet de 2kg de sucre à un dynamomètre et ce dernier indique environ 20N.

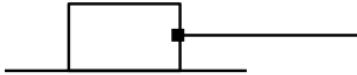
- Faire le diagramme système - interaction pour le paquet.
- Représenter les forces agissant sur le paquet puis la force résultante.
- Comment interpréter ce résultat (pour la force résultante) ?

**• Exemple 15.** Faire de même pour les exemples suivants.

- Un livre de 2kg posé sur une table.



b) *Le même livre posé sur la table, tiré par un fil avec une force d'intensité $F = 20\text{N}$, mais qui ne bouge pas.*



c) *Que peut-on dire si le livre que l'on tire bouge dans la direction du fil ?*

3.5 La première loi de Newton

Dans l'exemple 14 de la page 33, le paquet est soumis à deux forces : la force de la pesanteur qui agit verticalement vers le bas et la force du dynamomètre qui agit verticalement vers le haut. Ces deux forces agissent en sens opposé, ont la même intensité et la résultante est nulle. Cela est la raison pour laquelle le paquet est au repos et sa vitesse ne varie pas. Il s'agit d'un exemple simple d'équilibre d'un système, décrit de manière générale par la **première loi de Newton**.

**Si la force résultante sur un système est nulle,
alors la vitesse de son centre de masse ne varie pas,
donc le système est en équilibre de translation.**

**Réciproquement, si un système est en équilibre de translation,
donc la vitesse de son centre de masse ne varie pas,
alors la force résultante sur ce système est nulle.**

Exemples :

- un livre immobile posé sur un bureau ;
- la sonde Voyager, qui voyage à vitesse constante ;
- une voiture à vitesse constante sur l'autoroute.

Les contraposés sont aussi vraies :

**Si la vitesse du centre de masse d'un système varie,
donc il n'est pas en équilibre de translation,
alors la force résultante sur ce système n'est pas nulle.**

**Réciproquement, si la force résultante sur un système est non nulle, alors
la vitesse du centre de masse du système varie (en intensité et/ou
en direction) donc le système n'est pas en équilibre de translation.**

Exemples :

- une balle qu'on laisse tomber ;
- la Terre qui tourne autour du Soleil ;
- en vélo quand on arrête de pédaler.

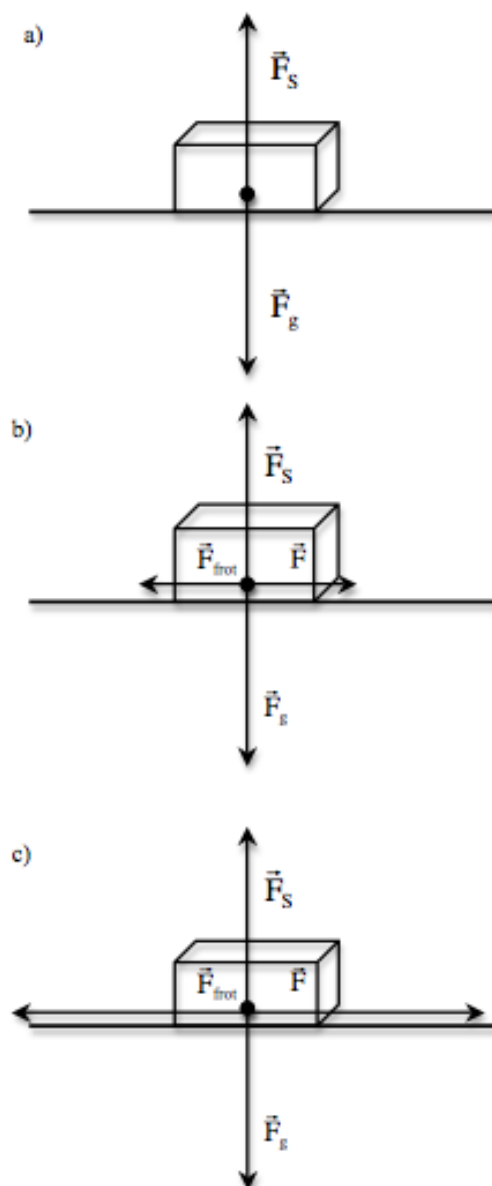
3.6 Force de frottement

La force de frottement est toujours opposée au mouvement. Il s'agit d'un type de force de contact résultant de l'interaction électromagnétique répulsive entre les couches d'électrons externes des atomes dont les matériaux mis en contact se composent (cf. paragraphe 1.8). Le frottement joue un double rôle dans les phénomènes de la vie courante : d'une part, il gêne le mouvement des objets ; d'autre part, sans frottement, nous ne pourrions pas marcher, rouler en voiture ou planter un clou.

Considérons un bloc de masse m au repos sur une surface horizontale. Deux forces qui s'annulent agissent sur ce bloc : la force de la pesanteur \vec{F}_g et la force de soutien du plan \vec{F}_s , perpendiculaire à la surface, comme montré dans la figure a) ci-contre.

Lorsque le corps est poussé, une force \vec{F} parallèle au plan agit sur lui. Le bloc restera immobile tant que F reste inférieure à une valeur limite. Par la première loi de Newton, cela signifie qu'une autre force, de même intensité que \vec{F} mais de sens opposé, agit sur le bloc pour compenser la poussée. C'est la force de frottement statique : $\vec{F}_{frot} = -\vec{F}$. Jusqu'à la valeur limite cette force est d'autant plus intense que \vec{F} l'est, comme montré dans les figures b) et c) ci-contre, car tant que le bloque reste immobile, la résultante doit être nulle.

Lorsque la force \vec{F} dépasse une intensité limite, appelons-la $F_{frot\ max}$, le bloc commence à bouger dans la direction de la poussée. Cela signifie que la force de frottement statique ne peut plus empêcher la mise en mouvement, $F > F_{frot\ max}$.



De manière générale :

a) $F_{frot\ max}$ est toujours proportionnelle à l'intensité de la force de soutien, qui est normale (perpendiculaire) au plan, par un facteur μ_0 , appelé **coefficient de frottement statique** :

$$F_{frot\ max} = \mu_0 \cdot F_s;$$

b) μ_0 dépend du type de surfaces en contact. Les valeurs pour les différents matériaux sont donnés dans la table CRM.

c) μ_0 ne dépend pas de l'aire de la surface de contact.

Si le corps se déplace, le coefficient de frottement statique μ_0 est remplacé par un **coefficient de frottement dynamique** μ qui varie également en fonction de la nature des surfaces en jeux, mais généralement reste plus petit que μ_0 . Il est important d'observer que μ garde son indépendance de la taille des surfaces en contact. Pour des petites vitesses μ est constant. Par des grandes vitesses, le frottement dépend de la vitesse : si la vitesse augmente, le frottement augmente. Avec une force de poussée constante, on obtiendra toujours une valeur limite de la vitesse. Par exemple un bateau dans la mer, un skieur sur la neige, un parachutiste en chute libre ou une voiture sur l'autoroute.

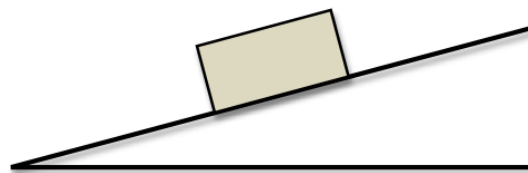
• **Exemple 16.** *Un livre de masse $m = 2\text{kg}$ est immobile, posé sur un plan incliné de 15° , comme dans le schéma suivant.*

a) *Faire le diagramme système - interaction pour le livre.*

b) *Que vaut la force résultante sur le livre ?*

c) *Quels sont les intensités de sa force de pesanteur, du soutien et du frottement agissantes sur le livre ?*

d) *Faire le diagramme des forces agissantes sur le livre (échelle : $1\text{cm} \leftrightarrow 5\text{N}$).*



Resumé de la partie “Equilibre de translation”

- Une force est un vecteur (indiqué \vec{F}), défini par sa direction, son sens et son intensité (nombre de Newtons, indiquée F).
- Une force se représente dans un dessin par une flèche à l'échelle (indiquée \vec{F}), appliquée au point sur lequel la force agit.
- Deux forces de même direction mais de sens contraire sont dites opposées.
- La troisième loi de Newton ou loi d'action-réaction ou loi des interactions concerne l'interaction entre deux objets, A et B :

Si un corps exerce une force $\vec{F}_{A/B}$ sur un autre corps B, alors B exerce une force $\vec{F}_{B/A}$ sur A, avec la même intensité et la même direction, mais dans le sens opposé : $\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$. (7)

Une interaction entre deux corps est définie par l'ensemble de ces deux forces opposées : $\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$.

- Du point de vue **macroscopique**, les interactions peuvent être **de contact** ou à **distance**. Du point de vue **microscopique** (particules et molécules), toutes les interactions sont reductibles à **4 interactions fondamentales (toutes à distance)** : nucléaires forte et faible, électromagnétique et gravitationnelle.
- Deux types de force agissent fréquemment sur les objets ordinaires au contact avec une surface : 1) les forces de soutien de la surface, toujours **perpendiculaires à la surface** et 2) les forces de frottement, toujours **parallèles à la surface et opposées au mouvement**. Ces deux types de force sont dus à l'interaction électrique répulsive des électrons qui constituent la matière.
- La loi de gravitation universelle (écrite par Newton aussi) **définit l'interaction gravitationnelle, toujours attractive, entre deux objets A et B**, dont les centres sont à une distance d . L'intensité de chacune des forces vaut

$$F_g = G \cdot \frac{m_A \cdot m_B}{d^2}.$$

- **L'intensité de la force de la pesanteur** - qui n'est rien d'autre que la force de l'attraction gravitationnelle d'une planète (la Terre) sur un objet de masse m à sa surface - vaut

$$F_g = m \cdot g \quad \text{avec} \quad g = G \cdot \frac{m_{\text{Terre}}}{R_{\text{Terre}}^2},$$

g est la constante de pesanteur ou accélération de la pesanteur à la surface terrestre et se mesure en N/kg.

- La **force résultante** est la somme vectorielle des forces agissantes sur un corps. Elle aurait le même effet sur le centre de masse du corps que l'ensemble des forces agissantes sur ce corps. Donc la force résultante remplace toutes les autres forces qui agissent sur le corps.
- La **première loi de Newton** ou loi de l'équilibre concerne un seul objet :

$$\text{Equilibre de translation} \iff \text{vitesse du centre de masse constante} \iff \vec{F}_{res} = \vec{0}.$$

Unités

Grandeur(s)	Unité SI	Autres unités utiles
longueur	mètre [m]	-
temps t	seconde [s]	minute [mn], heure [h], année [an]
masse m	kilogramme [kg]	-
force \vec{F}	Newton [N]	-
constante de pesanteur ou accélération de la pesanteur g	[N/kg](=[m/s ²])	-

Deuxième partie
Pression et Hydrostatique



Introduction

L'hydrostatique est la branche de la physique qui étudie les liquides au repos. Or les liquides, comme les gaz, sont des fluides¹⁰. Contrairement aux gaz, les liquides ont la propriété d'être incompressibles.

Afin d'étudier les liquides en équilibre, nous allons aborder les sujets suivants :

- La notion de **pression** entre les corps solides.
- La **pression dans un fluide** et son explication d'un point de vue microscopique.
- Conséquence du modèle microscopique, le **principe de Pascal** décrit comment la pression exercée dans un fluide en équilibre se propage en tout point.
- Les lois qui décrivent les liquides en équilibre, notamment la **loi fondamentale de l'hydrostatique** et le **principe des vases communicants**.
- Les caractéristiques principales de la pression dans un gaz, en particulier celles de la **pression atmosphérique**.
- Les conditions d'équilibre d'un corps immergé dans un fluide homogène, grâce à la **loi d'Archimède** : d'abord dans les liquides, ensuite dans les gaz.

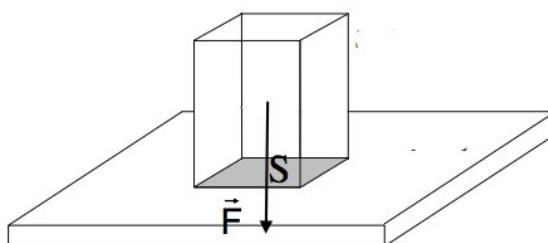
10. Par définition, un **fluide** est un milieu parfaitement déformable.

4 Pression

4.1 Pression entre solides

Lors du contact entre deux surfaces, les forces ne sont plus suffisantes pour décrire complètement le phénomène. Par exemple, nous savons qu'il est préférable de choisir un couteau bien aiguisé pour couper de la viande ou des légumes. Un couteau aiguisé a une lame qui est très fine du côté coupant. Ainsi la force que l'on applique sur le couteau est concentrée sur une petite aire de la surface de la lame, ce qui crée une grande pression. De même, lorsque nous marchons dans la neige, nous sommes plus à l'aise en utilisant des raquettes ou des skis pour moins nous enfoncer.

En effet, dans ce cas, notre force de pesanteur peut "se distribuer" sur une plus grande aire : la force pesante subie par unité de surface des raquettes est plus faible que celle subie par unité surface de semelles des chaussures.



Nous définissons la pression P entre deux solides comme le rapport entre l'intensité de la force exercée perpendiculairement à une surface et l'aire de la surface même :

$$P = \frac{F}{S}. \quad (8)$$

La pression est une grandeur scalaire (c'est à dire seulement un nombre, sans direction ni sens!). Son unité de mesure est le N/m^2 ou Pascal noté Pa :

$$1\text{Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}.$$

D'autres unités de mesure fréquemment utilisées sont :

- le **bar** : $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$;
- le **millibar** : $1 \text{ millibar} = 10^2 \text{ Pa}$;
- l'**atmosphère** : $P_{atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ou environ 1 bar.

Comme son nom le suggère, cette dernière représente la pression due au poids de la couche atmosphérique sur Terre, au niveau de la mer.

- **Exemple 17.** *Expliquer pourquoi :*
 - *dans certains endroits les talons hauts sont interdits (par exemple sur le pont des bateaux).*
 - *quand on plante une punaise, elle ne s'enfonce pas dans le doigt mais pénètre dans le bois.*



- **Exemple 18.** *Un objet de 50 kg est posé sur le sol. Sa section horizontale vaut 0,25 m². Quelle est la pression due à la pesanteur, entre sa base et le sol ?*

4.2 Pression dans un fluide

Un **fluide** est un milieu matériel parfaitement déformable. On regroupe sous cette appellation les gaz, qui sont des fluides compressibles, et les liquides, qui sont des fluides incompressibles¹¹.

Du point de vue microscopique, nous savons que la matière est constituée de molécules et d'atomes. Dans un fluide ces particules sont libres de bouger à l'intérieur d'un récipient. Cela conduit à des fréquentes collisions entr'elles et sur les parois du récipient. Ces chocs produisent de petites forces en tout point du fluide et sur les parois. **L'effet global de ces chocs sur une surface est une force pressante toujours perpendiculaire à celle-ci. La pression en un point du fluide s'interprète donc comme l'intensité de cette force pressante par unité de surface créée par les chocs des molécules : plus les chocs sont fréquents et/ou violents, plus la pression est élevée.**

Attention : la pression est une grandeur scalaire, elle n'a pas de direction ni de sens ! Sa valeur numérique, mesurée en Pa, est une fonction du point considéré dans le fluide. C'est la **force pressante sur une surface immergée qui a une direction : toujours perpendiculaire à la surface en question.** L'intensité de cette force pressante est donnée par le produit de la pression hydrostatique où se trouve la surface par l'aire de la surface. De plus, puisque les particules bougent de manière isotrope dans toutes les directions, **l'intensité de la force pressante ne varie pas avec l'orientation de la surface considérée.**

4.2.1 Le principe de Pascal

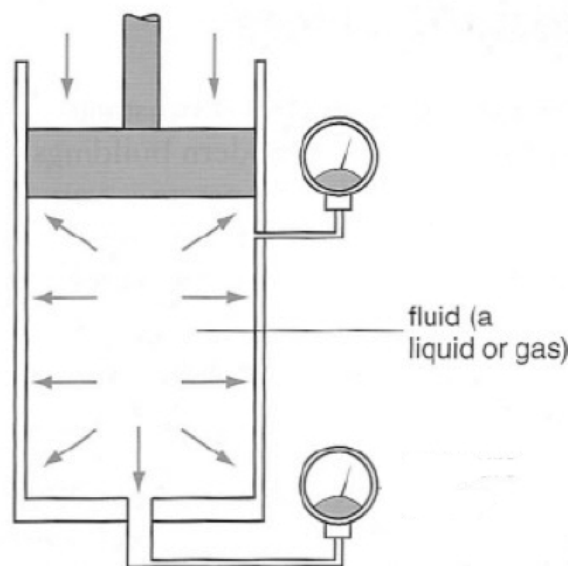
Le principe suivant est une conséquence du modèle microscopique décrit ci-dessus, expliquant la pression dans un fluide.

Lorsqu'une pression est présente en un point particulier d'un fluide, celle-ci est transmise en tout autre point du fluide. Si le fluide est un liquide (donc incompressible) cette transmission est immédiate.

11. Nous rappelons qu'un fluide est incompressible si sa masse volumique ne dépend pas de la pression exercée sur ce fluide.

En effet

- lorsqu'on augmente le nombre ou la violence des chocs en une partie du fluide, cela induit un plus grand nombre de collisions ou des chocs plus violents dans le reste du fluide, parce que les molécules s'éparpillent et se percutent ;
- les molécules d'un liquide sont plus rapprochées que celles d'un gaz et elles peuvent ainsi bien se percuter et transmettre leur agitation. C'est justement à cause de leur fort rapprochement que la pression se transmet très rapidement dans les liquides.



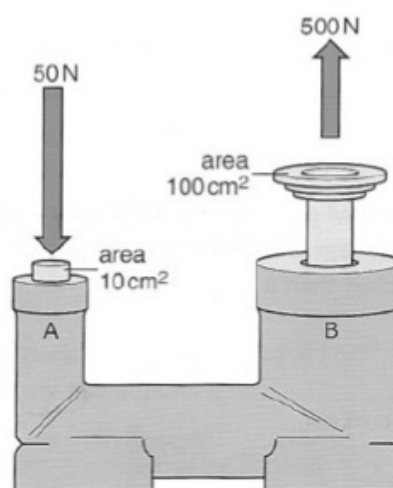
4.2.2 La presse hydraulique

Le principe de Pascal est à la base du fonctionnement d'une presse hydraulique : l'idée est de soulever de grosses masses avec des forces d'intensité relativement faible, en utilisant des surfaces d'aires différentes et le fait que la pression dans le liquide est la même partout et se transmet immédiatement. C'est grâce à cela que dans les garages automobiles les voitures peuvent être soulevées !

L'image ci-contre nous montre un exemple : une force d'une intensité de 50N est exercée vers le bas sur la surface A, ayant une aire $S_A = 10\text{cm}^2$. La pression dans le liquide sous la surface de A est

$$P_A = \frac{F_A}{S_A} = \frac{50\text{N}}{10\text{cm}^2} = 5 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}.$$

Par le principe de Pascal, cette augmentation de la pression se propage immédiatement dans tout le fluide, en particulier sous le piston B, que nous supposons être à la même hauteur que A.



Nous avons que

$$P_A = P_B = 5 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} \quad \text{ou} \quad \frac{F_A}{S_A} = \frac{F_B}{S_B} = 5 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2},$$

où $S_B = 100\text{cm}^2$. La force pressante exercée par le piston B vers le haut vaut donc

$$F_B = \frac{F_A}{S_A} \cdot S_B = 50\text{N} \cdot \frac{100\text{cm}^2}{10\text{cm}^2} = 500\text{N}.$$

Ainsi, avec cette presse hydraulique nous pouvons exercer une force d'une intensité de 500N en appliquant une force d'une intensité de 50N seulement ! Le "prix à payer" est que nous aurons un déplacement plus petit.

4.3 Pression dans un liquide

Un liquide est un fluide incompressible. Lorsque le liquide considéré est l'eau, nous parlons de pression hydrostatique. Par exemple, en nageant sous l'eau nous constatons que la force pressante que nous ressentons sur nos tympanes est plus forte au fond que près de la surface. Cette force est la conséquence de la pression hydrostatique de l'eau que l'on a au dessus de la tête.

4.3.1 La loi fondamentale de l'hydrostatique

Nous souhaitons trouver une formule qui décrit de manière quantitative la pression en un point A, à une profondeur h , dans un liquide de masse volumique ρ . Nous supposons qu'à la surface du liquide la pression soit celle atmosphérique P_{atm} .

Pour cela faire, considérons une portion de ce fluide en forme de prisme à base rectangulaire d'hauteur h et surface de base S contenant le point A, comme montré dans la figure ci-contre.

Puisque portion de liquide est en équilibre, les forces agissant sur celui-ci doivent s'annuler, horizontalement et verticalement.

Verticalement, nous avons trois forces agissant sur cette portion de liquide :

1. la force de la pesanteur du prisme de liquide, \vec{F}_g , dirigée vers le bas :

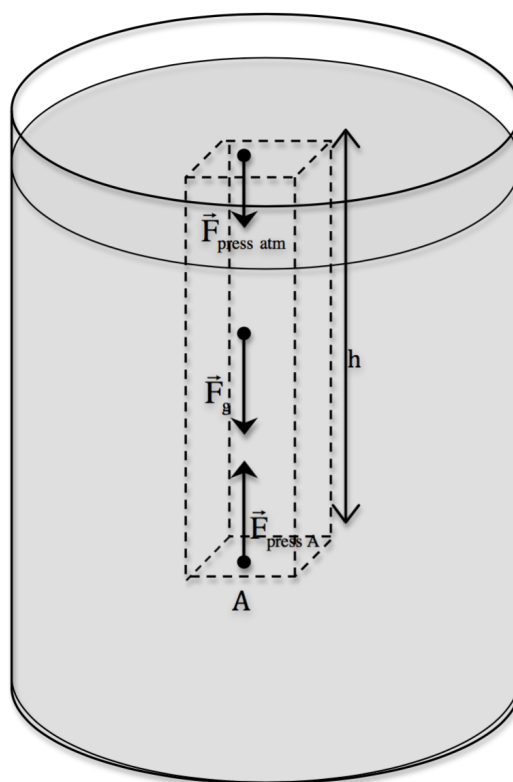
$$F_g = m_{prisme} g = \rho V_{prisme} g = \rho h S g; \quad (9)$$

2. la force pressante due à la pression du liquide au point A, $\vec{F}_{press A}$, exercée sur la base du cube, vers le haut, d'intensité

$$F_{press A} = P_A S; \quad (10)$$

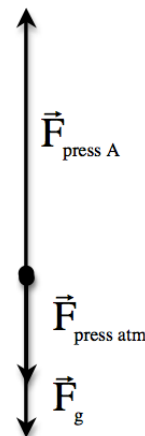
3. la force pressante due à la pression atmosphérique à la surface du liquide, $\vec{F}_{press atm}$, exercée vers le bas, d'intensité

$$F_{press atm} = P_{atm} S. \quad (11)$$



La figure ci-contre montre le diagramme des forces pour le prisme de liquide. Nous observons que, pour que la portion de liquide soit en équilibre, il faut que

$$\begin{aligned}\vec{F}_{press A} &= -\vec{F}_{press atm} - \vec{F}_g \\ \Rightarrow F_{press A} &= F_{press atm} + F_g \\ \Rightarrow P_A S &= P_{atm} S + \rho g h S \\ \Rightarrow P_A &= P_{atm} + \rho g h.\end{aligned}\tag{12}$$



Au fait, ce résultat ne dépend pas de la forme de la portion de liquide considérée et il se généralise en tout point dans le liquide :

$$\mathbf{P}(\mathbf{h}) = \mathbf{P}_{atm} + \rho \mathbf{g} \mathbf{h}.\tag{13}$$

L'équation (13), s'appelle **loi fondamentale de l'hydrostatique**.

La quantité $\rho g h$ est la contribution à la pression due uniquement à la colonne de liquide en dessus du point considéré. Elle est aussi connue sous le nom de pression partielle en un point à la profondeur h . Comme nous l'avons vu, elle correspond au poids de cette colonne de liquide (par unité de surface).

• **Exemple 19** (Sur le cahier d'exercices).

a) Calculer la pression qui agit sur un plongeur à une profondeur de 10,0m et de 30,0m. Utiliser $\rho_{mer} = 1030\text{kg/m}^3$ et $P_{sl} = P_{atm} = 1,01 \cdot 10^5\text{Pa}$.

b) Quelle est la force pressante exercée par l'eau sur le masque du plongeur à la profondeur de 30m, en sachant qu'il est de forme rectangulaire et ses côtés mesurent 10cm et 20cm ?

• **Exemple 20** (Sur le cahier d'exercices). *Un liquide possède une masse de 10,0 kg et est placé dans un récipient cylindrique de 100 cm² de section. Sa surface se trouve à 7,35 cm au-dessus du fond du récipient.*

1. *Quelle est la masse volumique de ce fluide ?*
2. *Quel est ce fluide ?*
3. *Quelle pression partielle il y a au fond du récipient ?*
4. *Quelle pression totale y a-t-il au fond du récipient à Genève, au bord du lac ?*
($P_{atm\ Ge} = 969\text{hPa}$)

4.3.2 Le tonneau de Pascal

Au 18^e siècle, Pascal réalisa cette expérience qui devint célèbre. Elle est souvent citée comme le **paradoxe de l'hydrostatique**. Un tube vertical étroit de quelques mètres de hauteur est fixé au centre de la paroi supérieure d'un tonneau rempli d'eau. Si nous remplissons le tube en versant de l'eau jusqu'au sommet, ce qui exige un faible volume de liquide, nous observons que les douves du tonneau cèdent et le liquide déborde.

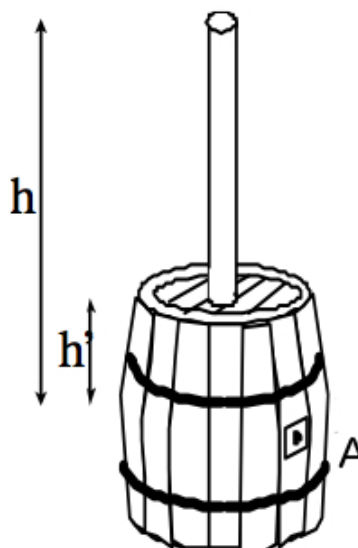
Voici le lien vers une vidéo sur le tonneau de Pascal :

<http://autospeed.celeonet.fr/khufu/spip.php?article13>



• **Exemple 21** (Sur le cahier d'exercices). *Considérons la portion de douve de 50cm² de surface, dessinée autour du point A dans la figure ci-contre. Le tube vertical fixé sur la douve est rempli d'eau et fait 11,0m de hauteur.*

1. *Déterminer la pression partielle due à l'eau au point A, en sachant que $h' = 50\text{cm}$.*
2. *Quelle est la force pressante exercée par l'eau sur cette surface ?*



4.3.3 Le principe des vases communicants

Dans le paragraphe 4.3.1 nous avons fait le bilan des forces agissant verticalement sur une portion de liquide en équilibre : cela nous a permis de dériver l'équation (13). La pesanteur d'une colonne de liquide, qui agit verticalement, génère une augmentation de la pression proportionnelle à la profondeur h .

D'autre part, le bilan horizontal des forces appliquées à une portion de liquide au repos nous permet d'énoncer une deuxième loi à la base de l'hydrostatique, connue sous le nom de principe des vases communicants.

Deux points d'un même liquide à l'équilibre et situés dans un même plan horizontal doivent avoir la même pression. En effet, si la pression n'était pas la même, le liquide s'écoulerait du point où la pression est la plus grande vers le point où la pression est la plus petite.

Considérons une portion cubique de liquide¹². Si la pression sur une face latérale n'était pas identique à celle de la face latérale opposée, alors la force résultante horizontale sur le cube de liquide ne serait pas nulle. La portion de liquide bougerait dans le sens de la résultante, soit vers la face où la pression est plus petite.

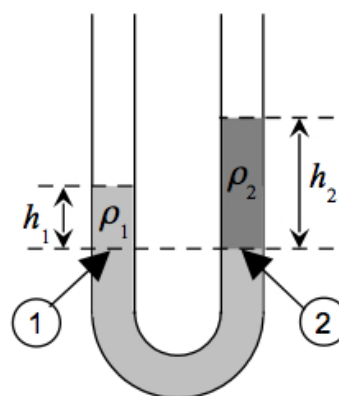
4.3.4 Le tube en U

Considérons un tube en U rempli avec deux liquides qui ne se mélangent pas (non miscibles), comme l'eau et l'huile. Le **principe des vases communicants** implique que les pressions mesurées aux points 1 et 2 de la figure suivante soient égales.

En utilisant la **loi fondamentale de l'hydrostatique**, soit l'équation (13), cela s'écrit

$$\rho_1 g h_1 + P_{atm} = \rho_2 g h_2 + P_{atm},$$

ou, après simplification



¹². Mais le raisonnement peut être généralisé à n'importe quelle portion de liquide.

$$\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2. \quad (14)$$

Grâce à ce procédé, nous pouvons par exemple déterminer la masse volumique ρ_2 d'un liquide inconnu, en connaissant la masse volumique ρ_1 du premier liquide et les mesures de h_1 et h_2 .

• **Exemple 22.** *Un tube en U de $1,00\text{cm}^2$ de section est rempli avec $24,0\text{cm}^3$ d'eau et $12,0\text{cm}^3$ d'huile. En tenant compte que la masse volumique de l'eau vaut 998kg/m^3 et celle de l'huile vaut 840kg/m^3*

— *quelle est la hauteur h_2 de l'huile ?*

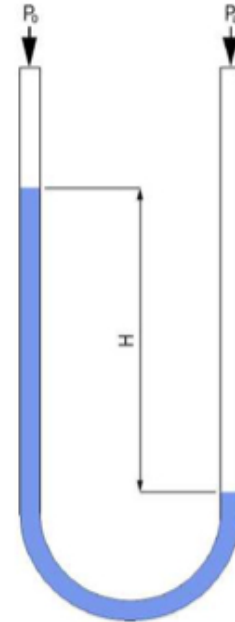
— *quelle est la hauteur $h_2 - h_1$ séparant les surfaces supérieures des deux liquides ?*

(Faire un dessin du tube en U avec toutes les indications données)

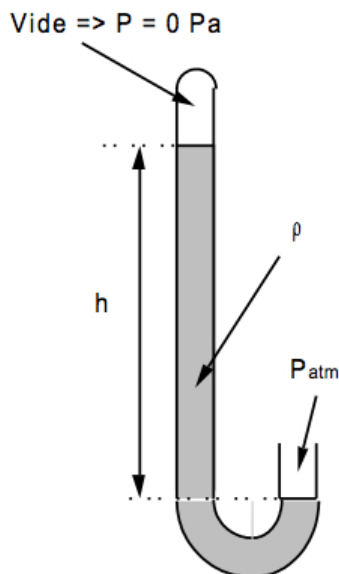
4.3.5 Le manomètre

Un manomètre est un instrument de mesure de la pression. Il peut s'agir d'un tube en U, rempli de liquide. L'une de ses extrémités est à une pression de référence (par exemple la pression atmosphérique), tandis que l'autre est à la pression à mesurer. La différence de niveau de liquide observée dans les deux parties du tube correspond à la différence de pression et permet d'effectuer la mesure. La différence de hauteur entre les deux tubes dépend de la densité du produit utilisé (mercure, eau, etc.).

Un deuxième type de manomètre est constitué d'une membrane flexible qui ferme hermétiquement un volume de gaz déterminé. La mesure de la déformation, effectuée pour des pressions connues, permet d'obtenir des tables de référence.



Le baromètre



Un baromètre est un manomètre en U, dont l'une de ses deux ouvertures est fermée. Il est utilisé pour mesurer la pression atmosphérique.

En appliquant le principe des vases communicants nous avons :

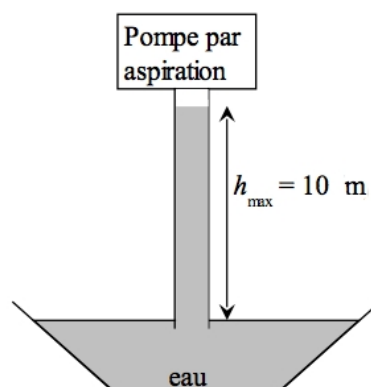
$$\rho g h + 0 = P_{atm} \implies P_{atm} = \rho g h.$$

Ainsi, pour mesurer la pression atmosphérique, il suffit de mesurer la hauteur d'une colonne d'un liquide de masse volumique connu.

• **Exemple 23.** En prenant $P_{atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{Pa}$, la masse volumique de l'eau de 998kg/m^3 et celle du mercure de $13'590 \text{kg/m}^3$,

- quelle serait la hauteur d'une colonne d'eau dans le baromètre ci-dessus ?
- Quelle serait la hauteur d'une colonne de mercure ?
- Pourquoi le liquide choisi dans un baromètre est généralement du mercure ?
- Est-ce que la mesure de la pression à l'aide d'un baromètre au mercure dépend de la température ? (Justifier)

• **Exemple 24.** Tout sapeur-pompier qui se respecte vous dira qu'il est impossible d'effectuer un pompage d'eau par aspiration sur une dénivellation supérieure à 10 mètres. Expliquer pourquoi.



4.4 Pression dans un gaz

Si un liquide n'a pas de forme définie, un gaz n'a ni de forme ni de volume définis. S'il est contenu dans un récipient il prend toute la place disponible. Nous nous intéressons uniquement à la différence de pression entre deux points du gaz : entre P_1 à la hauteur h_1 et P_2 à la hauteur h_2 cette différence s'exprime avec une formule analogue à l'équation (13) pour les liquides :

$$P_2 - P_1 = \rho_{gaz} g (h_2 - h_1) \quad (15)$$

ou

$$\Delta P = \rho_{gaz} g \Delta h \quad (16)$$

où le symbole Δ est la lettre grecque "delta", qui signifie "intervalle de" ou "différence de".

Dans cette formule :

- ρ_{gaz} est la masse volumique du gaz considéré, généralement beaucoup plus petite que celle d'un liquide. De plus, contrairement au cas des liquides ρ_{gaz} n'est généralement pas constante à cause de la compressibilité des gaz. Par exemple, la densité de l'air dans l'atmosphère terrestre varie avec l'altitude par rapport au niveau de la mer : elle est plus grande près de la surface terrestre. Cela entraîne une augmentation spécialement rapide de la pression atmosphérique lorsqu'on se rapproche de la surface.
- g est l'intensité de l'accélération de la gravité, également dépendant de l'altitude (voir le chapitre 2.3) ;

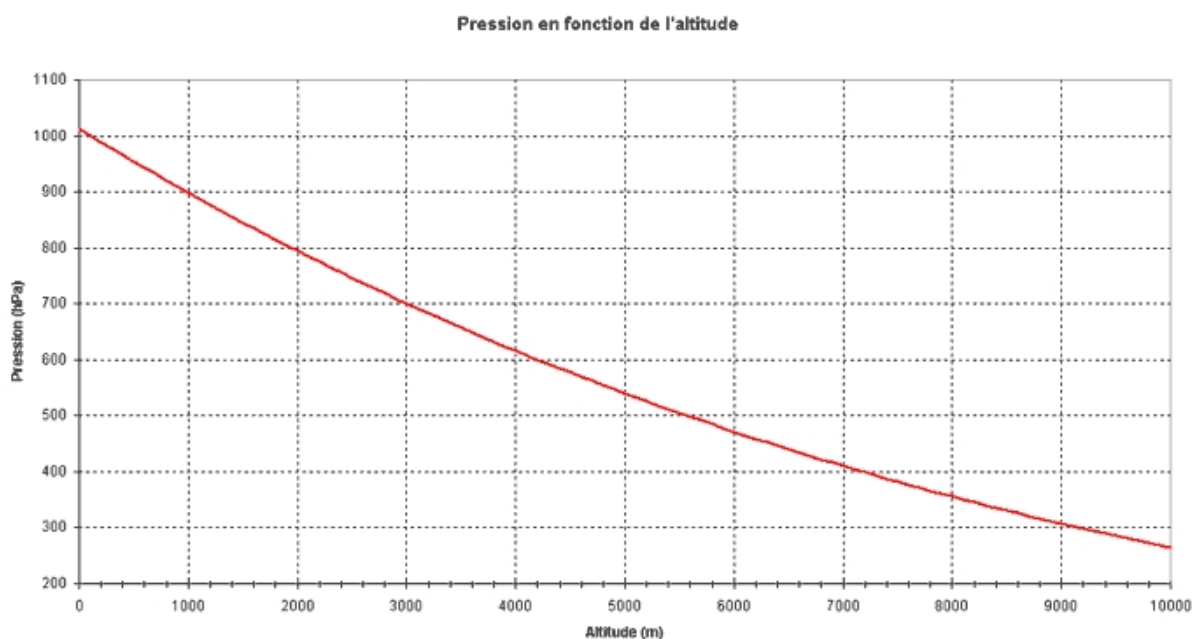
Tout cela signifie que la formule (16) n'est valable en bonne approximation que pour des variations d'altitude suffisamment petites, ou alors pour des masses volumiques et des constantes de pesanteur moyennes.

4.4.1 Pression atmosphérique



Une expérience toute simple met en évidence la pression atmosphérique. Il suffit de chauffer une canette de soda vide et de la refroidir brutalement après en avoir bouché l'ouverture. En se réchauffant, le gaz qui se trouve à l'intérieur se dilate et diminue sa densité : il sort de la canette. Lorsque le gaz qui reste à l'intérieur est refroidi à la température ambiante, il reste moins dense qu'à l'extérieur, puisqu'on a bouché l'ouverture. La pression extérieure à la canette devient donc plus importante que la pression à l'intérieur : la canette s'écrase sous l'effet de la pression atmosphérique !

Nous pouvons mesurer cette pression au moyen d'un baromètre, étudié dans le chapitre précédent. **La pression atmosphérique décroît vite avec l'altitude.** L'air se raréfiant, le nombre de molécules frappant une surface quelconque diminue. À la limite supérieure de l'atmosphère, on atteint un vide presque parfait. En l'absence de matière, donc de molécules et d'atomes, nous n'avons aucune pression. Le graphique ci-dessous donne la pression atmosphérique moyenne en fonction de l'altitude par rapport au niveau de la mer.

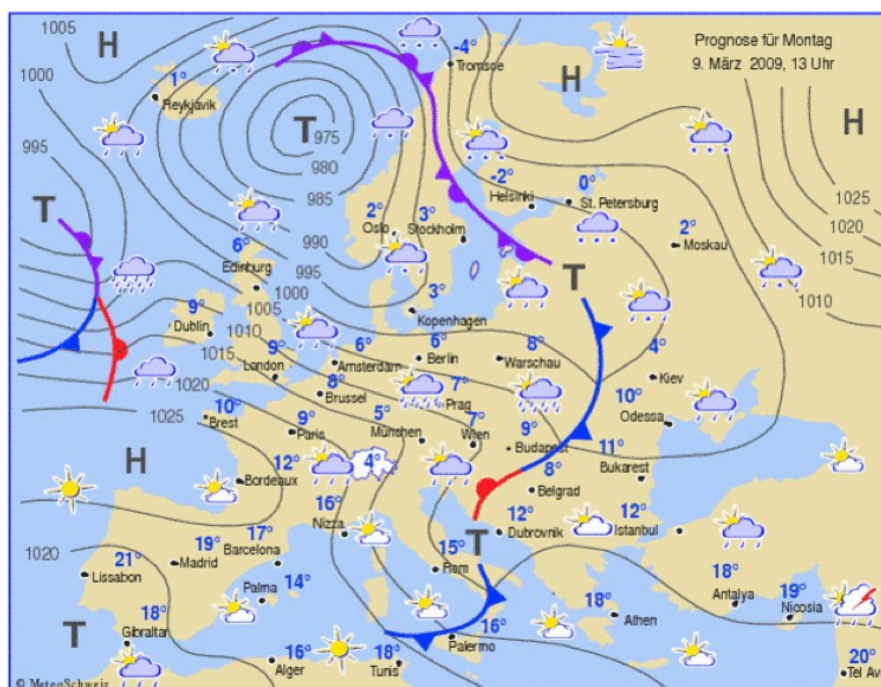


- Au bord de la mer, P_{atm} moyenne est de 1 atmosphère, soit $1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$;
- À Genève, au bord du lac ($h = 374 \text{ m}$), P_{atm} moyenne est de $0,969 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.

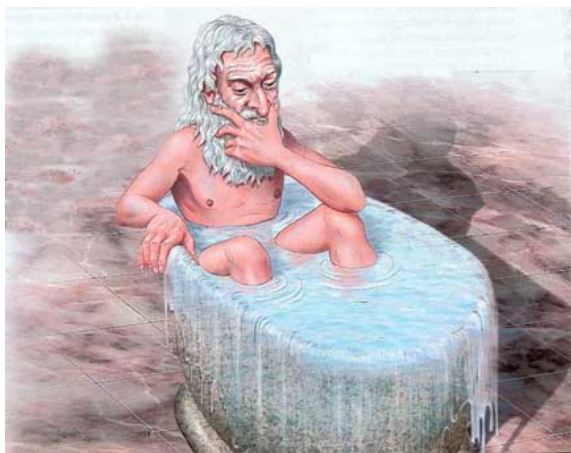
• **Exemple 25.** En se référant au graphique ci-dessus, trouver :

- a) quelle est la pression atmosphérique à une altitude de 4000 m ;
- b) à quelle altitude la pression atmosphérique est la moitié de la pression atmosphérique au niveau de la mer ;
- c) à quelle altitude la pression atmosphérique est quatre fois plus petite que la pression atmosphérique au niveau de la mer ;
- d) à quelle altitude la pression atmosphérique est huit fois plus petite que la pression atmosphérique au niveau de la mer.

La pression atmosphérique au niveau de la mer change également en fonction du lieu géographique et des conditions météorologiques, comme l'indiquent les bulletins. Une région où la pression atmosphérique est inférieure à celle des régions avoisinantes est appelée zone de basse pression ou de dépression (T). Une région où la pression est supérieure à celles des régions avoisinantes est appelée zone haute pression ou de surpression, ou encore anticyclone (H). 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.



5 Principe d'Archimède



La légende dit qu'Archimède (287-212 av. JC), savant grec né à Syracuse, trouva le principe qui porte son nom dans son bain, et s'élança tout nu dans la ville en criant "eurêka" (en grec : j'ai trouvé).

Nous savons qu'en présence de gravité, il est plus facile de soulever un objet quand il est immergé dans l'eau. On remarque aussi que le corps humain peut flotter dans l'eau salée.

Ceci signifie que l'eau interagit avec les objets immergés, et exerce une force vers le haut qui tend à compenser leur force de pesanteur, la **force d'Archimède**.

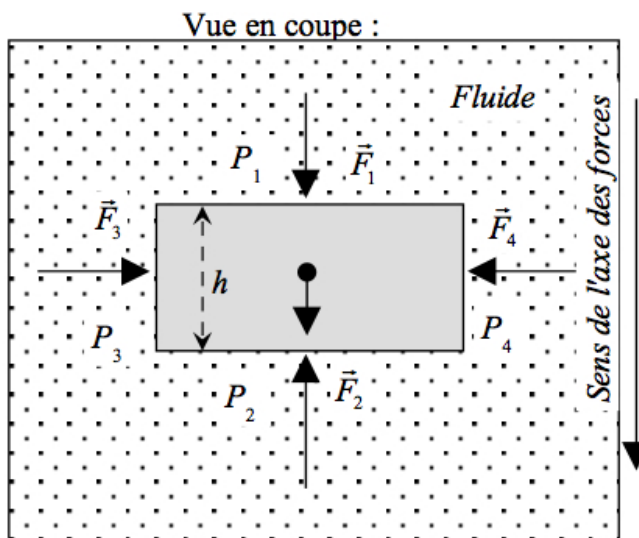
5.1 Force d'Archimède

Nous souhaitons trouver une formule qui nous décrit quantitativement cette poussée vers le haut, due **uniquement à l'interaction avec le fluide**¹³.

Pour cela, considérons le parallélépipède rectangle représenté en section dans la figure ci-contre : il est immergé dans un fluide de masse volumique ρ_f .

De plus nous connaissons les données suivantes :

- sa masse m ,
- son hauteur h ,
- sa section horizontale S ,
- son volume $V = S \cdot h$,
- la masse volumique de cet objet $\rho_o = m/V$.



Quelles sont les forces agissantes sur cet objet, dues uniquement à son interaction avec le fluide (pour le moment on ne tient pas compte de sa force de pesanteur) ?

¹³. Une fois que nous aurons trouvé la force du liquide sur le corps immergé, nous pourrons calculer la résultante en tenant compte de toutes les autres interactions, et en étudier l'équilibre.

Horizontalement, pour des raisons de symétrie, toutes les forces pressantes sur les faces latérales opposées (comme \vec{F}_3 et \vec{F}_4 dans la figure ci-dessus) ont la même intensité et le sens contraire. Elles s'annulent.

Verticalement, nous avons deux forces pressantes du liquide : celle sur la base du haut, \vec{F}_1 , dirigée vers le bas (comme le poids) et celle sur la base du bas, \vec{F}_2 , dirigée vers le haut. Grâce à l'équation (13), nous pouvons écrire la relation entre les pressions au niveau des surfaces supérieure (P_1) et inférieure (P_2) de l'objet :

$$\begin{aligned}
 P_1 &= P_{atm} + \rho_f g h_1 & \text{et} & & P_2 &= P_{atm} + \rho_f g h_2 \\
 \Rightarrow P_2 - P_1 &= P_{atm} + \rho_f g h_2 - (P_{atm} + \rho_f g h_1) \\
 &= \rho_f g \cdot (h_2 - h_1) \\
 &= \rho_f g h \\
 \Rightarrow P_2 &= P_1 + \rho_f g h, & & & & (17)
 \end{aligned}$$

où nous avons utilisé que $h_2 - h_1 = h$.

L'intensité des forces pressantes du liquide \vec{F}_1 et \vec{F}_2 sont

$$F_1 = P_1 S \quad \text{et} \quad F_2 = P_2 S = (P_1 + \rho_f g h) \cdot S. \quad (18)$$

La somme des ces deux forces $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_A$ s'appelle la **force d'Archimède** et est le résultat de l'action du liquide sur le corps : elle est dirigée vers le haut, car F_2 est toujours plus intense que F_1 . Son intensité vaut

$$\begin{aligned}
 F_A &= F_2 - F_1 \\
 &= (P_1 + \rho_f g h) \cdot S - P_1 S \\
 &= \rho_f g h S \\
 &= g \rho_f V, & & & & (19)
 \end{aligned}$$

où V est le volume occupé par le pavé. En généralisant ce résultat à tout solide immergé, le **principe d'Archimède** dit :

Un objet immergé dans un fluide est poussé vers le haut avec une force d'intensité égale au poids du fluide qu'il déplace :

$$F_A = g \rho_f V. \quad (20)$$

Attention : la force d'Archimède n'est pas la résultante sur l'objet, mais elle est la force due uniquement à l'interaction du corps immergé avec le liquide. Cette force est une conséquence directe de la loi fondamentale de l'hydrostatique. Afin d'étudier l'équilibre de l'objet dans le liquide, nous devons additionner toutes les autres forces agissant sur le corps, notamment la force de la pesanteur.

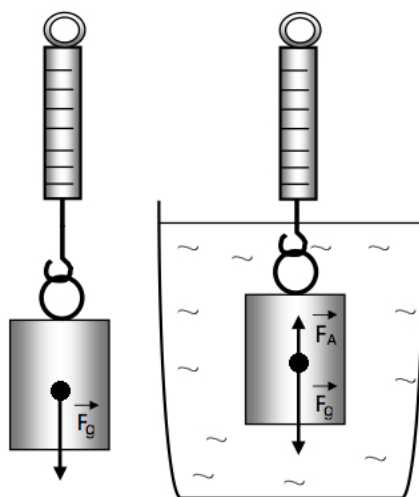
5.2 Poids apparent

Nous souhaitons étudier l'équilibre d'un corps immergé dans un fluide : lorsqu'il est lâché, va-t-il rester immobile, couler ou monter ? Pour cela, nous devons tenir compte de toutes les forces agissant sur le corps, notamment :

- La **force d'Archimède**, $F_A = \rho_f g V$, où V le volume de fluide déplacé, ρ_f est la masse volumique du fluide et g la constante de pesanteur. Cette force est la conséquence de l'interaction du corps avec le liquide et est dirigée **vers le haut**.
- La **force de la pesanteur**, dirigée vers le bas : $F_g = \rho_o g V$, où V le volume du corps et $\rho_o = m/V$ est sa masse volumique.

Si seules ces deux forces agissent sur le corps, l'intensité de la force résultante vaut (nous choisissons le sens de \vec{F}_g , vers le bas, comme positif) :

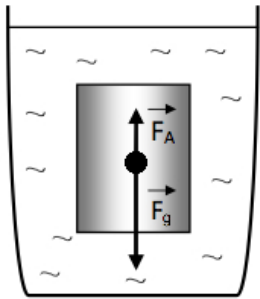
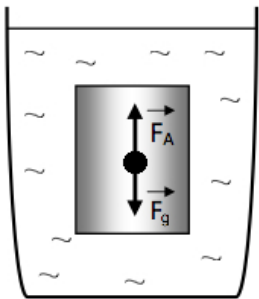
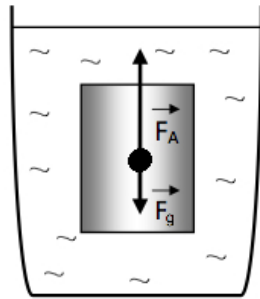
$$\begin{aligned} F_{res} &= F_g - F_A \\ &= \rho_o g V - \rho_f g V \\ &= (\rho_o - \rho_f) \cdot g V. \end{aligned} \quad (21)$$



Dans le cas d'un corps immergé, la force résultante \vec{F}_{res} est appelée aussi poids apparent du corps.

L'équation (21), nous indique qu'il y a trois possibilités :

1. $\rho_o > \rho_f \implies F_g > F_A \implies F_{res} > 0$. Dans ce cas la force résultante est dirigée vers le bas, comme \vec{F}_g (qu'on a considéré positive), donc **le corps coule**.
2. $\rho_o = \rho_f \implies F_g = F_A \implies F_{res} = 0$. Dans ce cas la force d'Archimède compense de manière exacte la force de la pesanteur et le corps est en équilibre, donc **le corps ne bouge pas**.
3. $\rho_o < \rho_f \implies F_g < F_A \implies F_{res} < 0$. Dans ce cas la force résultante est dirigée vers le haut, elle est opposée à la force de la pesanteur (qu'on a considérée comme positive), donc **le corps remonte à la surface**.

$F_A < F_g$	$F_A = F_g$	$F_A > F_g$
La résultante des forces est dirigée vers le bas → le corps coule	La résultante des forces est nulle → le corps est immobile	La résultante des forces est dirigée vers le haut → le corps remonte
		

• **Exemple 26.** *Quel est le poids apparent d'un bloc cubique de fer de 50kg immergé dans de l'eau ? La masse volumique de fer est de 7'870kg/m³, celle de l'eau est de 998kg/m³.*

• **Exemple 27** (Sur le cahier d'exercices).

a) *D'après votre expérience personnelle, un être humain dans la mer, flotte-t-il, coule-t-il ou reste-t-il en équilibre ? Estimez la masse volumique moyenne du corps humain (avec 1 chiffre significatif).*

b) *Calculez la force d'Archimède s'exerçant sur une personne de masse $m = 70\text{kg}$ qui monte sur un pèse-personne chez elle, sachant que la masse volumique de l'air vaut environ $1,3\text{kg/m}^3$. Cette force d'Archimède fausse-t-elle beaucoup la mesure de la pesée de cette personne ?*

5.3 L'anecdote de la couronne

Selon une légende, Archimède prononça son fameux "eurêka", car il venait de trouver la solution à un problème posé par Hiéron II, tyran de Syracuse. En effet, Hiéron avait fourni à un orfèvre une certaine quantité d'or à façonner en une couronne.

Afin d'être sûr que l'orfèvre ne l'avait pas dupé en substituant de l'argent (métal moins cher) à une partie de l'or, Hiéron demanda à Archimède de déterminer si cette couronne était effectivement constituée d'or uniquement, et sinon, d'identifier sa composition exacte.



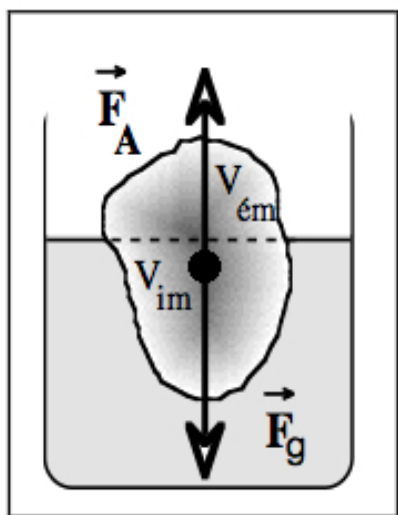
C'est dans sa baignoire, alors qu'il cherchait depuis longtemps, qu'Archimède trouva la solution et sortit de chez lui en prononçant la célèbre phrase.

• **Exemple 28** (Sur le cahier d'exercices). *La couronne du roi a une masse $M = 2,00\text{kg}$, et elle est soupçonnée contenir du fer. En immergeant la couronne dans de l'eau, sa force de pesanteur diminue de $1,47\text{N}$ (la balance affiche 150g de moins).*

1. *Est-ce que la couronne est entièrement en or ou pas ?*
2. *Si non, quel est la masse de fer (et d'or) qui compose la couronne ?*

($\rho_{or} = 19300\text{kg/m}^3$ et $\rho_{fer} = 7800\text{kg/m}^3$.)

5.4 Corps flottants dans un liquide



Après simplification

Lorsque, dans un liquide, l'intensité de la poussée d'Archimède sur un corps immergé est plus grande que la force de la pesanteur ($F_A > F_g$), le corps remonte vers la surface et émerge partiellement en se stabilisant. À l'équilibre, le volume de liquide déplacé V_{im} est plus petit que le volume du corps, donc la nouvelle force d'Archimède, appelons-la \vec{F}'_A , générée par la seule partie immergée du corps V_{im} , est forcément inférieure à F_A . En effet, le mouvement ascensionnel cesse quand la nouvelle force d'Archimède, compense exactement \vec{F}'_g .

Si le corps flotte il est à l'équilibre, donc

$$F'_A = F_g \implies \rho_f g V_{im} = \rho_o g V.$$

$$\rho_f V_{im} = \rho_o V$$

$$\implies \frac{V_{im}}{V} = \frac{\rho_o}{\rho_f}. \quad (22)$$

Donc la fraction de volume immergée est égale au rapport entre la masse volumique de l'objet et celle du fluide.

Si l'objet en question est un prisme droit d'hauteur h , on peut écrire $V = S \cdot h$ et $V_{im} = S \cdot h_{im}$, et l'équation (22) se simplifie ultérieurement¹⁴ :

$$\frac{h_{im}}{h} = \frac{\rho_o}{\rho_f}.$$

• **Exemple 29** (Sur le cahier d'exercices). *Entre quels valeurs varie la fraction du volume immergée d'un bloc de glace de volume V flottant sur de l'eau salée ? La masse volumique de la glace est de 917kg/m^3 , celle de l'eau salée varie entre $1'020\text{kg/m}^3$ et $1'070\text{kg/m}^3$.*

14. Nous supposons que le prisme soit dans une position où h reste vertical.

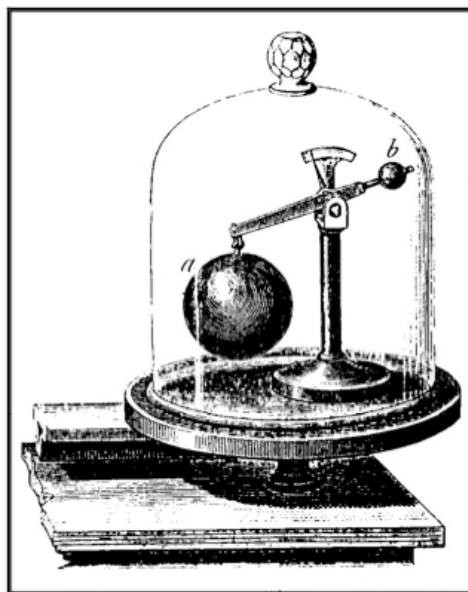
5.5 La poussée d'Archimède dans les gaz

Le baroscope

La force d'Archimède dans les gaz peut être mise en évidence à l'aide du baroscope :

1. En équilibrant la balance dans l'air, nous avons que la force de pesanteur de la sphère creuse (a) est en apparence "compensée" par celle d'une petite sphère pleine (b).
2. Si ensuite le vide est fait sous la cloche, la balance n'est plus en équilibre.

Nous en concluons que l'équilibre du départ, dans l'air, se fait avec les forces d'Archimède. Ces mêmes forces disparaissent dans le vide entraînant le déséquilibre de la balance. En effet, les forces d'Archimède sur les sphères ne sont pas identiques car $V_a > V_b$.



La montgolfière



C'est en novembre 1783 que Pilâtre de Rosier et le marquis d'Arlandes firent le premier voyage aérien avec un ballon à air chaud. En partant du Bois de Boulogne la Montgolfière s'éleva à environ 1000 mètres et traversa tout Paris. L'air chaud intérieur a une densité plus faible que l'air froid extérieur. La poussée d'Archimède permet de compenser la force de pesanteur de l'air chaud, de l'enveloppe et des passagers.

• **Exemple 30.** *Un ballon de masse 2,00g est gonflé avec de l'hélium ($\rho_{\text{helium}} = 0,178\text{kg/m}^3$), jusqu'à un volume de 4,00l. Si la densité de l'air est de $1,29\text{kg/m}^3$, quelle est la force ascensionnelle qui agit sur le ballon lorsqu'il est libéré dans l'air ?*

• **Exemple 31.** *Un dirigeable rempli d'hydrogène ($\rho_{\text{hydrogene}} = 0,90\text{kg/m}^3$) subit une poussée ascensionnelle de 9800N.*

1. *Calculer son volume. (Prendre ρ_{air} de l'exercice précédent et négliger la force de la pesanteur du dirigeable.)*

2. *Quelle serait l'intensité de la poussée vers le haut s'il était rempli d'hélium ?*

Resumé de la partie “Pression et Hydrostatique”

- La pression P entre deux solides est une grandeur scalaire, définie par l’intensité de la force exercée perpendiculairement à une surface divisée par l’aire de cette surface. Son unité SI est le Pascal : $1\text{N}/\text{m}^2 = 1\text{Pa}$.

$$P = F/S \quad \Longleftrightarrow \quad F = P \cdot S.$$

- Le principe de Pascal :

Lorsqu’une pression est présente en un point particulier d’un fluide, celle-ci est transmise en tout autre point du fluide. Si le fluide est un liquide, cette transmission est immédiate.

- La loi fondamentale de l’hydrostatique nous donne la pression hydrostatique en un point à une profondeur h dans un liquide de masse volumique ρ , dans le cas où la pression à la surface du liquide soit donnée par la pression atmosphérique P_{atm} ($\sim 10^5\text{Pa}$) :

$$P(h) = P_{atm} + \rho g h.$$

- Le principe des vases communicants nous donne la relation entre la pression en deux points à la même hauteur dans un liquide à l’équilibre :

Deux points d’un même liquide à l’équilibre et situés dans un même plan horizontal doivent avoir la même pression. Si la pression n’était pas la même, le liquide s’écoulerait du point où la pression est la plus grande vers le point où la pression est la plus petite.

En appliquant ce principe à deux points à la même hauteur dans un tube en U rempli avec deux liquides de densités différentes ρ_1 et ρ_2 , on trouve la relation entre ces densités et la hauteur atteinte par chaque liquide (à partir du plan horizontal de l’interface entre les deux liquides) : $\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2$.

- Le **principe d'Archimède** nous donne la force due à l'interaction avec un **liquide** sur un corps immergé :

Un objet immergé dans un fluide est poussé vers le haut avec une force d'intensité égale au poids du fluide qu'il déplace :

$$F_A = g \rho_f V = g m_f. \quad (23)$$

Cela implique que

- 1) Si un objet de densité ρ_o est complètement immergé et sa pesanteur et la force d'Archimède sont les seules forces agissantes sur lui, **l'objet sera à l'équilibre** ($\vec{F}_{res} = \vec{0}$) **si et seulement si** $\rho_o = \rho_f$.
- 2) Si un corps est **à l'équilibre** et partiellement immergé dans un fluide (corps flottant), **la fraction de volume immergé est égale au rapport entre la masse volumique du corps et celle du fluide** : $V_{im}/V = \rho_o/\rho_f$.

Unités

Grandeur(s)	Unité SI	Autres unités utiles
longueur	mètre [m]	-
aire d'une surface S	mètre au carré [m ²]	-
masse m	kilogramme [kg]	-
force \vec{F}	Newton [N]	-
Pression P	Pascal [Pa](=[N/m ²])	bar = 10 ⁵ Pa, hPa = 10 ² Pa, atmosphère = 1,01325 · 10 ⁵ Pa

Troisième partie
Equilibre de rotation



Introduction

Dans cette partie nous allons étudier quelles sont les conditions d'**équilibre de rotation d'un système : c'est à dire la position relative des sous-systèmes ne change pas avec le temps**. En effet, même si la force résultante sur un système est nulle et le système est en équilibre de translation, il est possible que ses parties aient un mouvement de rotation par rapport à son centre de masse, tout en gardant la vitesse de ce point constante.

Pour fire cela, nous allons étudier les notions suivantes :

- Le **moment d'une force** qui agit sur le plan perpendiculaire à l'axe de rotation du système et son rôle dans l'équilibre rotationnel ;
- Le **principe du levier** conséquence directe des conditions d'équilibre de rotation d'un système ;
- Le concept de **couple de forces** agissant sur la rotation d'un corps ;
- Les conditions d'équilibre pour un corps posé au sol.

6 Equilibre de rotation d'un corps solide

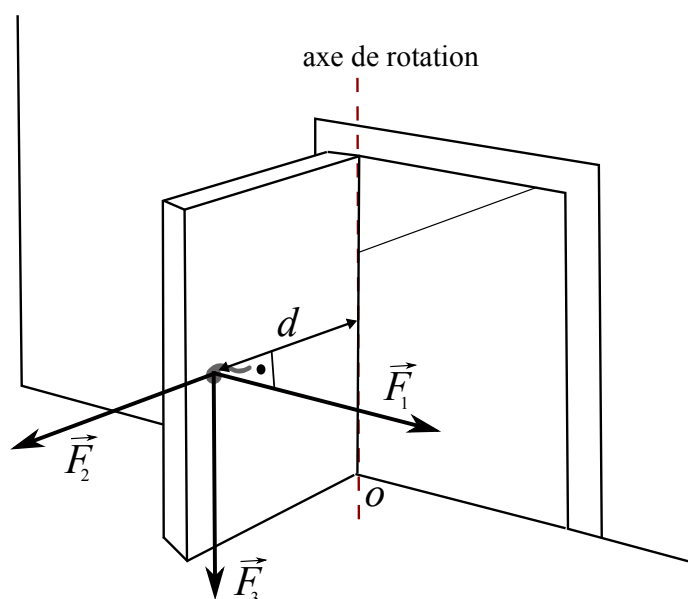
De nombreux objets usuels comme les portes, les roues ou les boulons, ont une particularité : ils pivotent autour d'un **axe de rotation**, que nous appelons O . De ce fait leur mouvement ne peut qu'être une rotation. Quels effets une force a-t-elle sur ce type de corps? Lorsque l'on veut ouvrir une porte, en la poussant par exemple, nous constatons qu'il est bien plus facile de faire tourner la porte en appliquant une force à l'extrémité la plus éloignée de l'axe de rotation, que de pousser au centre de la porte. C'est la raison pour laquelle les poignées sont placées aux extrémités des portes !



6.1 Moment d'une force

Donc l'intensité de la force n'est pas le seul paramètre qui a un effet sur la rotation d'une porte : **la distance entre son point d'application et l'axe O , notée d , est aussi importante**. De plus, on peut constater que, même pour une force intense et une distance entre le point d'application et l'axe O suffisamment grande, si la direction de la force

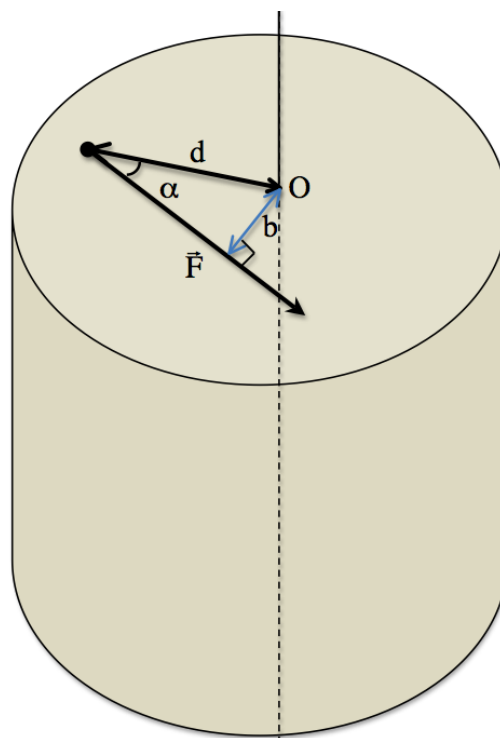
- passe par l'axe O , comme la force \vec{F}_2 du dessin ci-dessous, ou
 - est parallèle au même axe, comme la force \vec{F}_3 du dessin ci-dessous
- alors il n'y a pas de rotation.



Même si les trois forces dessinées dans la figure de la page précédente ont la même intensité et le même point d'application, la seule force qui est efficace dans la rotation de la porte est \vec{F}_1 , car elle est dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation O et, de plus, sa direction est perpendiculaire à d .

Dans la suite de cette partie, nous analyserons uniquement le cas où la force est dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation, comme l'exemple montré dans la figure ci-contre. Afin de quantifier l'effet d'une force sur la rotation d'un corps autour d'un axe O donné, nous définissons une nouvelle grandeur, qui fait intervenir les trois paramètres "importants" cités ci-dessus,

1. l'**intensité** de la force F ,
2. la **distance d entre son point d'application et l'axe de rotation O** et
3. sa **direction**, qui, pour être efficace, doit être le plus possible perpendiculaire à d et à l'axe de rotation.



Le moment de la force \vec{F} par rapport à O , est une quantité qui mesure l'effet de rotation produite par \vec{F} autour de O .

On le note $M_O(\vec{F})$ et il est donné par le produit

$$M_O(\vec{F}) = F \cdot d \cdot \sin \alpha, \quad (24)$$

où α est l'angle entre la force et la direction de d .

L'unité de mesure du moment d'une force est le $N \cdot m$.

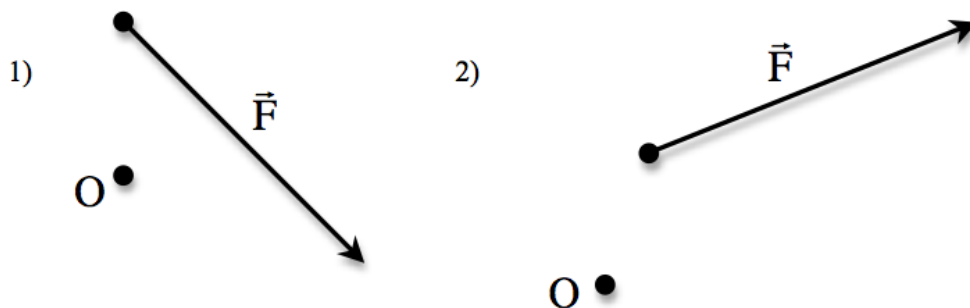
Nous avons les deux cas limite suivants :

- Lorsque $\alpha = 0^\circ$ ou $\alpha = 180^\circ$, la direction de la force passe par O , comme \vec{F}_2 dans la figure de la page précédente. On a que $\sin \alpha = 0$ et donc $M_O(\vec{F}) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$: dans ce cas la force ne crée aucun effet de rotation sur le corps.
- Lorsque $\alpha = 90^\circ$, la direction de la force est perpendiculaire à O , comme \vec{F}_1 dans

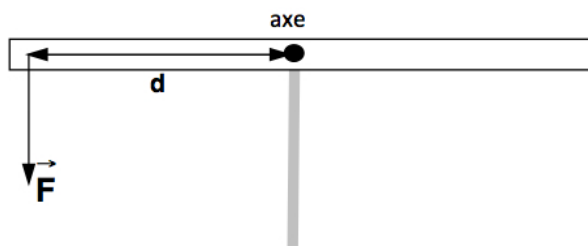
la figure de la page précédente. On a que $\sin \alpha = 1$ et donc $M_O(\vec{F}) = F \cdot d$: la force est efficace au maximum pour faire tourner le corps.

Nous remarquons que **la quantité $d \cdot \sin \alpha$ représente la distance entre la direction de la force et O , soit la distance “efficace” pour la rotation, elle est appelée bras de levier, noté b .**

• **Exemple 32.** Dans les deux cas suivants dessiner la distance d et la bras de levier b , puis indiquer dans quel sens le moment fait tourner le système (dans le sens inverse des aiguilles d’une montre : \curvearrowright ou dans le même sens des aiguilles d’une montre : \curvearrowleft).



• **Exemple 33.** Calculer le moment de la force \vec{F} agissant sur la barre pivotant ci dessous, en sachant que $F = 50\text{N}$ et $d = 45\text{cm}$. Indiquer également le sens de rotation.



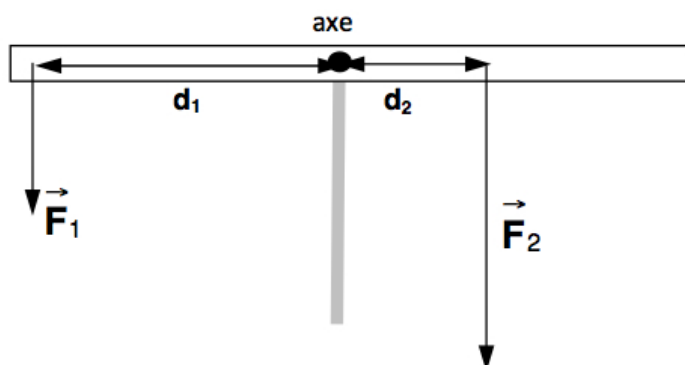
6.2 Conditions d'équilibre de rotation

Un corps peut tourner dans deux sens : quand le moment d'une force fait tourner l'objet dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, nous l'indiquons par le symbole \odot . Si le moment fait tourner l'objet dans le même sens des aiguilles d'une montre, alors nous écrivons \ominus .

Un solide mobile autour d'un axe O est en équilibre rotatif lorsque la somme (que l'on indique par le symbole Σ) des moments qui le poussent à tourner dans un sens est égale à la somme des moments qui le poussent à tourner dans l'autre sens :

$$\Sigma M_O \odot = \Sigma M_O \ominus . \quad (25)$$

Considérons par exemple la barre du dessin ci-dessous, que nous supposons être en équilibre de rotation. D'un coté nous avons une force $F_1 = 1\text{N}$ s'exerçant à une dis-



tance $d_1 = 4\text{m}$ de l'axe de rotation. De l'autre côté de l'axe, le point d'appui de la force \vec{F}_2 est à une distance $d_2 = 2\text{m}$. Pour avoir l'équilibre de rotation, l'intensité F_2 se trouve par l'équation $M_O \odot = M_O \ominus$. Puisque pour les deux forces $\alpha = 90^\circ$, nous avons

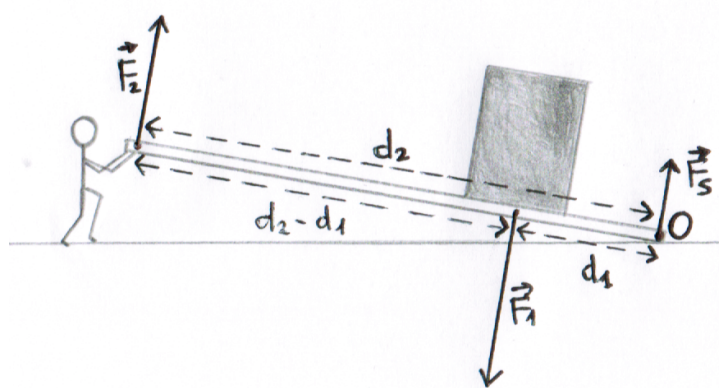
$$\implies M_O(F_1) = M_O(F_2) \implies F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2 \implies F_2 = \frac{F_1 \cdot d_1}{d_2} = \frac{1\text{N} \cdot 4\text{m}}{2\text{m}} = 2\text{N}.$$

Donc il faut exercer une force deux fois plus intense à une distance deux fois plus petite, pour avoir l'équilibre.

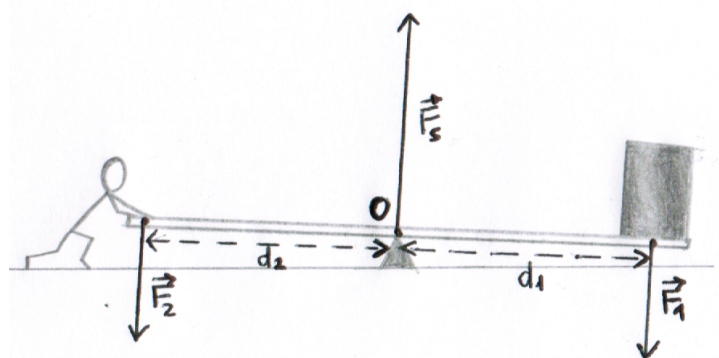
6.3 Principe du levier

Nous pouvons utiliser la loi d'équilibre de rotation (25) appliquée à une barre posée sur un appui afin de soulever un poids important avec une force d'intensité relativement faible. Prenons l'exemple d'un homme qui veut soulever une commode d'une force de pesanteur d'intensité $F_1 = 10000\text{N}$ (qui, sur Terre, correspond à une masse d'environ 1000kg), et qu'il peut fournir au maximum une force d'intensité $F_2 = 800\text{N}$ (correspondant à sa force de pesanteur environ). Les figures suivantes montrent les deux types de levier possibles (croquis sans échelle).

- Le **levier à un bras**, quand les forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 agissent du même côté par rapport à O .



- Le **levier à deux bras**, quand les forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 agissent du côté opposé par rapport à O .



Dans les deux cas, pour \vec{F}_1 et \vec{F}_2 on a $\alpha = 90^\circ$. De plus $M_O(F_s) = 0$. Donc nous avons l'équilibre quand

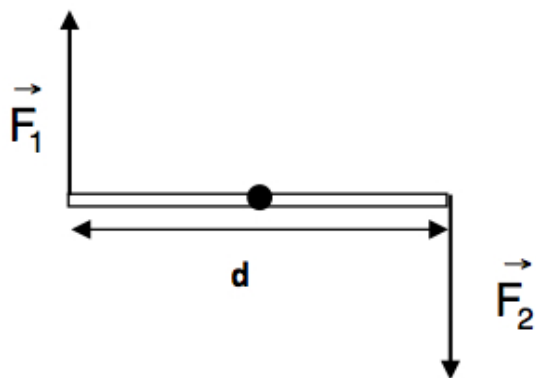
$$F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2 \quad \implies \quad d_2 = \frac{10000\text{N}}{800\text{N}} \cdot d_1 = 12,5 \cdot d_1.$$

Si par exemple $d_1 = 1\text{m}$, alors il suffit d'avoir $d_2 > 12,5\text{m}$ pour que l'homme puisse faire tourner la barre dans le sens de sa poussée, et donc soulever la commode.

“Donnez moi un point d'appui et je soulèverai le monde.” (Archimède, 287 a.c. - 212 a.c.)

6.4 Couple de forces

Nous parlons de couple de forces si nous avons deux forces parallèles et opposées, \vec{F}_1 et $\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$, appliquées au même corps. Cela crée un mouvement rotatif. Un exemple de couple de forces est donné par les forces appliquées sur une clé en croix pour dévisser un boulon.



Si d désigne la distance entre leurs points d'application respectifs, $F = F_1 = F_2$ leur intensité (la même) et $\alpha = 90^\circ$ pour les deux forces, le moment résultant de ce couple de forces, par rapport au point situé à mi-chemin entre leurs points d'application respectifs, est donné par :

$$M = \frac{d}{2} \cdot F_1 + \frac{d}{2} \cdot F_2 = d \cdot F. \quad (26)$$

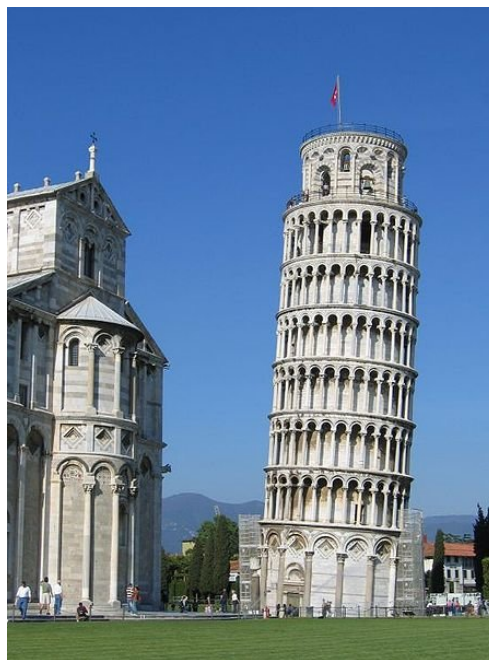
Dans la figure ci-contre, le sens de rotation est celui des aiguilles d'une montre (\odot).

6.5 Equilibre d'un corps posé au sol

Nous appelons base d'appui d'un solide posé sur le sol la surface obtenue en tendant un élastique autour des parties du solide en contact avec le sol.

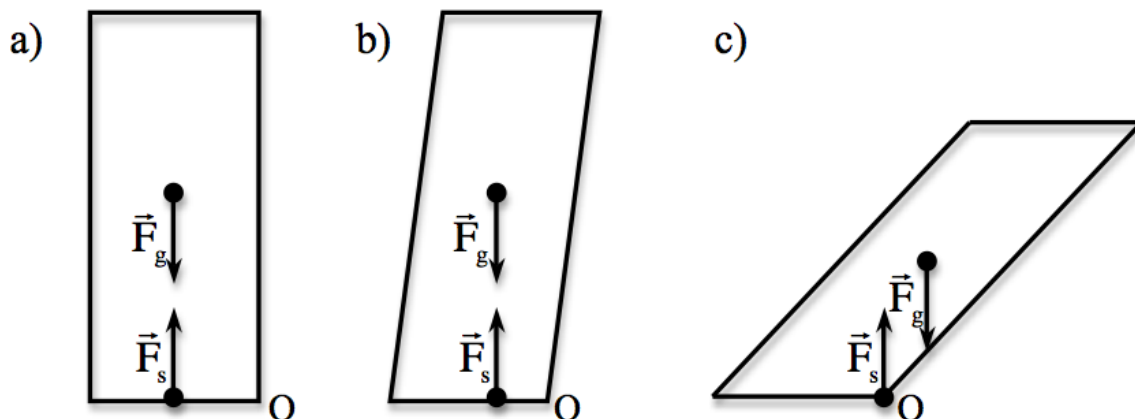
Tant que \vec{F}_g , toujours appliquée au centre de masse, et le soutien \vec{F}_s , toujours perpendiculaire au plan, ont la même droite d'action et le sens inverse, elles se compensent, et leur moments par rapport au point O de la base du corps (éventuel axe de rotation) aussi. Donc le corps reste en équilibre. Ce cas est montré dans les figures a) et b) de la page suivante.

Si la force de la pesanteur et le soutien n'ont plus la même droite d'action, car \vec{F}_s n'arrive plus à "suivre" la droite d'action de \vec{F}_g , ces deux forces forment un couple de forces : $M_O(\vec{F}_g)$ et $M_O(\vec{F}_s)$ poussent le corps à une rotation dans le même sens par rapport au point O , l'équilibre est donc perdu. C'est le cas de la figure c) de la page suivante.



On en conclut que

pour que un corps posé au sol soit en équilibre, il faut que la verticale passant par son centre de masse traverse sa base d'appui.



• **Exemple 34.** Compléter :

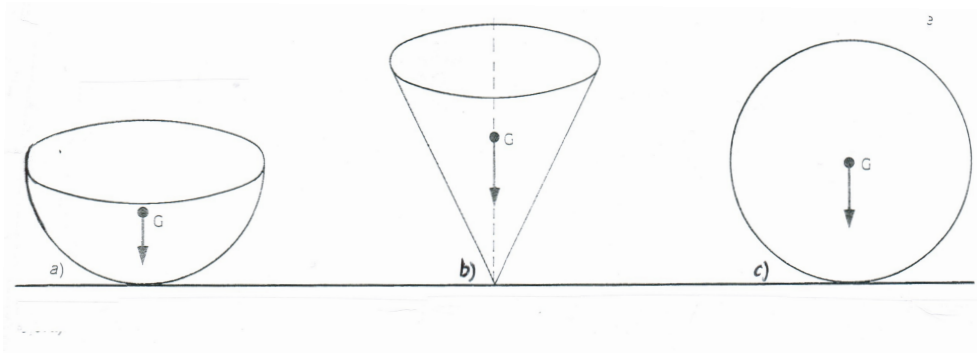
Un corps en équilibre sur le sol est d'autant plus stable que :

1.

2.

• **Exemple 35.** Pourquoi à Londres, dans les bus à deux étages, est il interdit de voyager debout à l'étage alors que c'est autorisé en bas ?

- **Exemple 36.** *Les trois corps a, b et c du dessin ci-dessous sont en équilibre. Pourquoi ?*



Pour chacun de ces trois corps, qu'est-ce qu'il se passe si l'on essaie de les déplacer légèrement de leur position d'équilibre ?