
COURS DE PHYSIQUE

Classes de 3C-BCF

2021 - 2022

CNESC

Auteurs : Laurent Hild & Robert Droulans

Illustrations : Paul G. Hewitt

Partie I - Mécanique

La mécanique (du grec ancien « mēchanikē » : l'art de construire une machine) est une branche de la physique dont l'objet est l'étude du mouvement des systèmes physiques. Les notions de force et d'accélération jouent un rôle central en mécanique.



Table des matières

1	Cinématique	1
1.1	Référentiel	1
1.2	Position, déplacement et distance parcourue	1
1.3	Vitesse	3
1.3.1	Définition	3
1.3.2	Vitesse instantanée	3
1.3.3	Calcul de la vitesse à partir de la courbe de position	4
1.3.4	Norme de la vitesse	5
1.3.5	Calcul du déplacement à partir de la courbe de vitesse	5
1.3.6	Vitesse moyenne sur un parcours	5
1.4	Accélération.....	10
1.4.1	Définition	10
1.4.2	Accélération instantanée	10
1.4.3	Calcul de l'accélération à partir de la courbe de vitesse	11
1.5	Équations du mouvement	11
1.5.1	MRUV.....	11
1.5.2	MRU.....	13
1.5.3	Résumé des formules cinématiques	13
1.6	Chute libre	17
1.6.1	Expérience du tube de Newton	17
1.6.2	Les lois de chute de Galilée	17
1.6.3	Équations horaires de la chute libre verticale.....	18
2	Dynamique	20
2.1	Les forces.....	20
2.1.1	Notion et représentation.....	20
2.1.2	Force résultante et décomposition de forces	21
2.2	La première loi de Newton.....	24
2.2.1	Un peu d'histoire	24
2.2.2	Newton et le principe d'inertie	25
2.2.3	Masse et poids (rappel)	26
2.2.4	Équilibre de forces.....	30
2.3	La deuxième loi de Newton.....	39
2.4	La troisième loi de Newton	47

3	Énergie.....	50
3.1	Le travail d'une force.....	50
3.1.1	Introduction.....	50
3.1.2	D'une définition simple	51
3.1.3	Vers une définition générale	51
3.2	La puissance mécanique.....	54
3.2.1	Le cheval-vapeur	55
3.3	L'énergie mécanique	56
3.3.1	Lien entre les grandeurs travail et énergie.....	56
3.3.2	Différentes formes d'énergie mécanique	56
3.3.3	Synthèse	59
3.3.4	Formes d'énergie non-mécaniques.....	59
3.4	Conservation de l'énergie	60
3.4.1	Conditions de conservation de l'énergie mécanique.....	61
3.4.2	Application : Le pendule simple	62
3.4.3	Puissance d'un transfert ou d'une transformation énergétique	62
3.4.4	Rendement d'un transfert ou d'une transformation énergétique	62
4	Mécanique des fluides	67
4.1	Définition de la pression.....	67
4.2	La pression hydrostatique	68
4.3	La pression atmosphérique	71
4.3.1	L'atmosphère terrestre	71
4.3.2	La pression atmosphérique normale.....	71
4.3.3	Mise en évidence expérimentale	72
4.3.4	Les instruments de mesure	73
4.4	La poussée d'Archimède	76
4.4.1	Le principe d'Archimède.....	76
4.4.2	Flotter, couler, rester entre deux eaux	77
4.4.3	Le principe de flottage.....	78

1 Cinématique



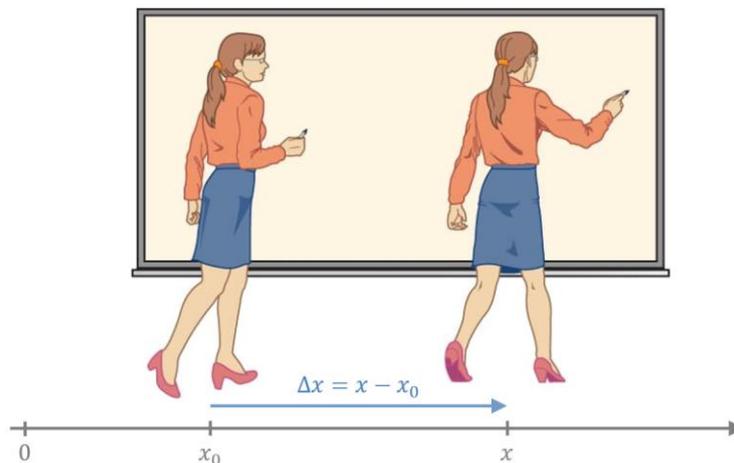
La cinématique est l'étude du mouvement. Un corps est en mouvement lorsque sa position dans l'espace change. Cela dit, tout est en mouvement, même les corps qui paraissent immobiles. En effet, en lisant ce cours, tu te déplaces (avec la Terre entière) à une vitesse d'environ 107'000 km/h par rapport au Soleil et plus vite encore par rapport au centre de notre galaxie, la Voie Lactée.

1.1 Référentiel

On décrit le mouvement d'un corps par rapport à un cadre choisi comme référence, appelé **référentiel**. Le référentiel peut être la salle de classe, un train, le centre du Soleil, Par exemple, si on dit qu'une voiture de formule-1 roule à une vitesse de 300 km/h, on sous-entend que sa vitesse est mesurée par rapport à la piste. En général, les vitesses des corps de notre environnement sont données par rapport à la surface de la Terre. On appelle ce référentiel le **référentiel terrestre**.

1.2 Position, déplacement et distance parcourue

Dans ce chapitre, nous allons étudier les **mouvements rectilignes**, c'est-à-dire les mouvements dont la trajectoire est une ligne droite. Pour décrire le mouvement d'un corps, il faut d'abord spécifier sa position, c'est-à-dire exprimer où il se trouve à un instant donné. Sur la trajectoire rectiligne du corps, on fixe un repère à une dimension, c'est-à-dire un axe muni d'une origine et d'un sens positif. La **position** du corps est alors exprimée par sa coordonnée x . Si un objet est en mouvement, cela signifie que sa position varie. Ce changement de position par rapport au repère est appelé **déplacement**.



Le **déplacement** d'un mobile est la variation de sa position : $\Delta x = x - x_0$
 x représente la position finale ;
 x_0 représente la position initiale.

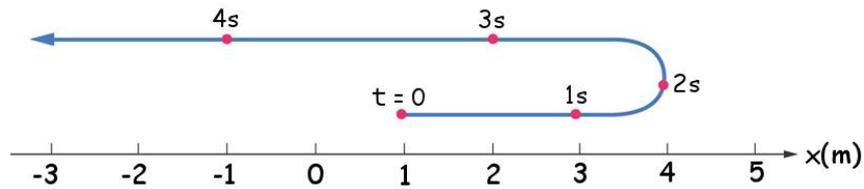
Le déplacement Δx est une grandeur algébrique, c'est-à-dire une grandeur qui peut avoir une valeur positive ou négative. Un déplacement positif signifie que le corps s'est déplacé dans le sens positif de l'axe x ; un déplacement négatif correspond à un corps qui s'est déplacé dans le sens négatif de l'axe.

La **distance parcourue**, notée d , est la longueur totale du chemin parcouru lors du mouvement. La distance parcourue est toujours positive.

Attention : Lorsque le mobile change de sens au cours de son mouvement, les notions de déplacement et de distance parcourue sont différentes.

■ As-tu compris ?

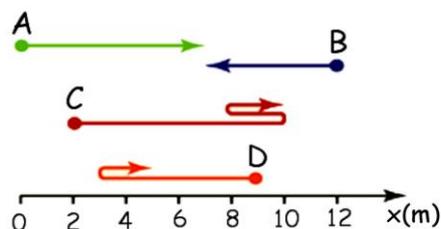
1. La représentation graphique ci-dessous décrit un mouvement rectiligne d'un corps.



- a. Quelle est la position du corps à l'instant $t = 1 \text{ s}$? Et à l'instant $t = 4 \text{ s}$?
 - a. Calculer le déplacement du corps après les 4 premières secondes.
 - b. Calculer la distance parcourue par le corps après les 4 premières secondes.
2. Dans un avion en plein vol, un passager se déplace de son siège vers l'arrière de l'avion.



- a. Préciser le référentiel adéquat pour décrire le mouvement du passager.
 - b. Quelle est la position initiale du passager ?
 - c. Quelle est la position finale du passager ?
 - d. Calculer le déplacement du passager.
 - e. Quelle est la distance parcourue par le passager ?
3. Quelles sont les déplacements et les distances parcourues par les points A, B, C et D ?
Ajouter la représentation du mouvement d'un point E pour lequel la distance parcourue vaut 16 m et le déplacement est nul.



4. Sous quelle(s) condition(s) le déplacement et la distance parcourue ont-ils la même valeur ?

1.3 Vitesse

1.3.1 Définition

La **vitesse** v décrit la rapidité d'un déplacement. Elle s'obtient en divisant le déplacement Δx par sa durée Δt :

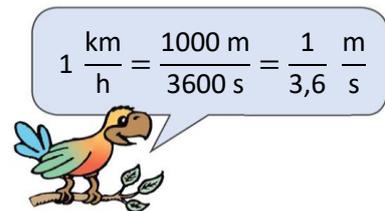
$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

L'unité SI de la vitesse est le mètre par seconde ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$).

La vitesse ainsi définie est une grandeur algébrique de même signe que le déplacement. Une vitesse positive correspond à un mouvement dans le sens positif, une vitesse négative signifie un mouvement dans le sens négatif.

Remarque

Une autre unité de vitesse couramment utilisée est le kilomètre par heure ($\frac{\text{km}}{\text{h}}$)¹. Toutefois, ce n'est pas l'unité SI !



Exemple

Reprenons la situation de l'exercice 2 de la page précédente et supposons que le passager a mis 8 secondes pour se rendre à l'arrière de l'avion. Le passager s'est alors déplacé avec une vitesse :

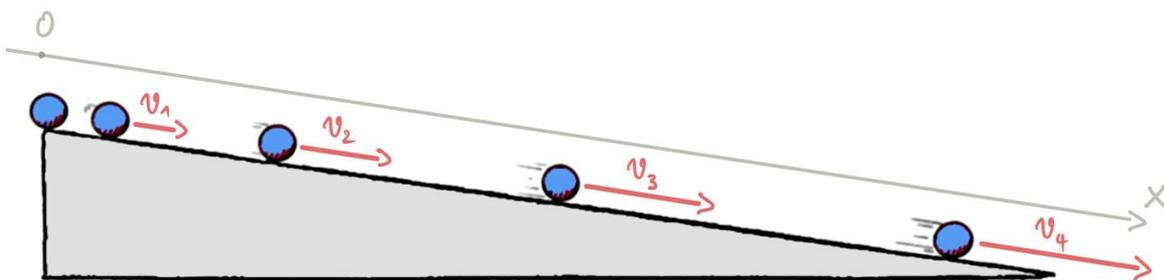
$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-4 \text{ m}}{8 \text{ s}} = -0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = -50 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Le signe « - » indique que le passager s'est déplacé dans le sens négatif de l'axe x .

1.3.2 Vitesse instantanée

Une boule est lâchée à partir du repos en haut d'un rail incliné. À l'aide de deux cellules photoélectriques, on peut mesurer la durée de la descente. Connaissant la longueur du rail, on peut alors calculer la vitesse en appliquant la définition : $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

Or, la boule roule de plus en plus vite. Par conséquent, la valeur obtenue exprime seulement la **vitesse moyenne** avec laquelle la boule a effectué son déplacement.



Pour avoir une résolution plus fine, on peut rapprocher les cellules photoélectriques et répéter le procédé de mesure sur différents segments de la trajectoire. En réduisant progressivement l'intervalle de mesure, la valeur de la vitesse s'approche d'une valeur dite « instantanée ». En effet, à la limite, l'intervalle de mesure devient tellement court qu'on peut l'assimiler à un seul instant.

¹ Tout rapport d'unités de distance et de temps est une unité de vitesse : miles par heure (mi/h) ; centimètres par jour ; millimètres par minute, année lumière par siècle ; ...

La **vitesse instantanée** $v(t)$ d'un mobile décrit la rapidité de son déplacement à un instant t donné :

$$v(t) = \frac{dx}{dt}$$

dt représente un intervalle de temps extrêmement court autour de l'instant t ;

dx représente le déplacement effectué par le mobile pendant dt .

Remarque

La vitesse instantanée d'une voiture est indiquée par le tachymètre.



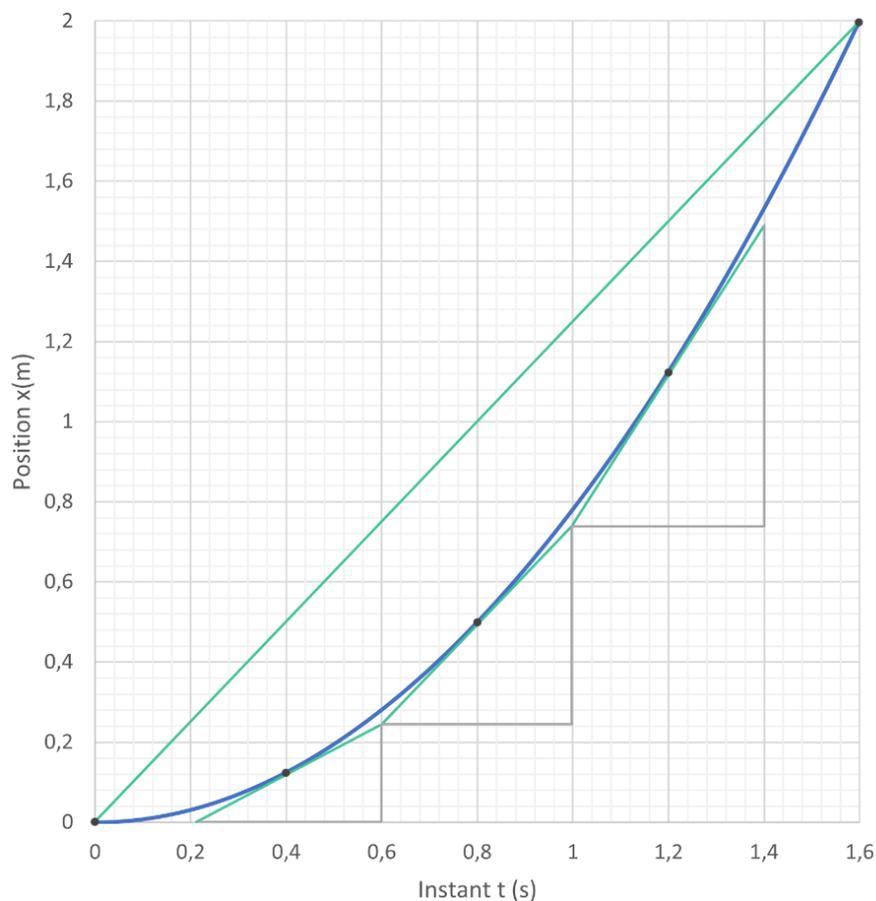
Exemple

Dans la descente d'un col de haute montagne, le capteur du vélo d'un coureur cycliste a enregistré que la roue avant (diamètre 645 mm) a mis 80 ms pour effectuer une rotation complète. À cet instant t , la vitesse du cycliste vaut donc :

$$v(t) = \frac{dx}{dt} \cong \frac{\pi \cdot 0,645 \text{ m}}{0,080 \text{ s}} = 25,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cong 91,2 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

1.3.3 Calcul de la vitesse à partir de la courbe de position

Reprenons l'expérience 1.3.2 et traçons l'évolution de la position x de la boule en fonction du temps. La vitesse moyenne v sur la descente totale correspond à la pente du segment de droite qui relie le point de départ au point d'arrivée (en vert). La vitesse instantanée $v(t)$ peut elle-aussi être « lue » sur ce graphique. À tout instant t , elle correspond à la pente de la tangente à la courbe en ce point (en rouge). Le fait que la courbe devient de plus en plus pentue indique donc que la vitesse instantanée de la boule augmente au cours du temps.



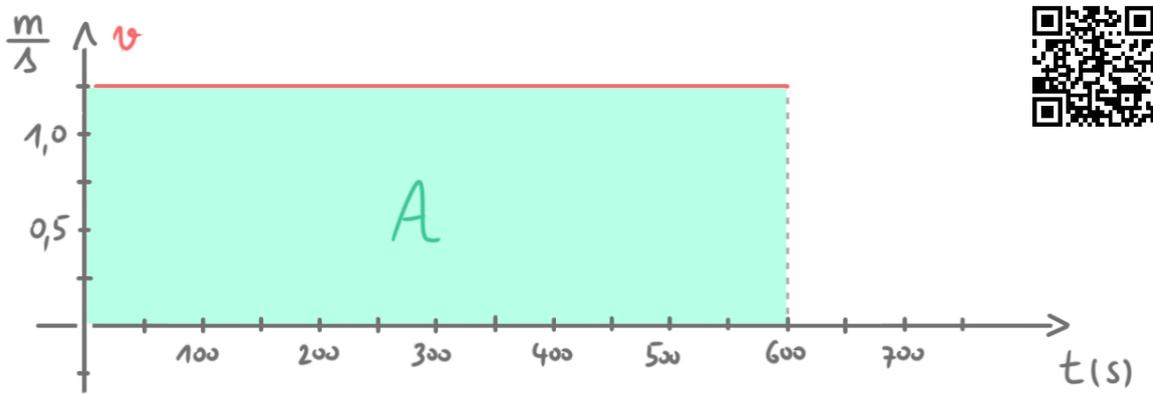
1.3.4 Norme de la vitesse

La norme de la vitesse est toujours positive. Si le passager de l'exercice 2 de la page 2 avait une vitesse de $-0,5$ m/s, la norme de sa vitesse vaut toutefois $0,5$ m/s par rapport à l'avion.

La **norme de la vitesse** décrit la rapidité du déplacement sans tenir compte du sens du mouvement. Dans le cas d'un mouvement rectiligne, il s'agit simplement de la valeur absolue de la vitesse.

1.3.5 Calcul du déplacement à partir de la courbe de vitesse

Une piétonne part de la place de la Concorde à Paris et monte les Champs Élysées en direction de l'Arc de Triomphe. Elle marche pendant 10 minutes à une vitesse constante de $1,25$ m/s. Calculons le déplacement total de la piétonne à l'aide d'un raisonnement graphique. À cet effet, traçons la vitesse de la piétonne en fonction du temps :



On constate que l'aire du rectangle vert sur le graphique représente le déplacement². En effet :

$$\Delta x = A = 1,25 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 600 \text{ s} = 750 \text{ m}$$

Cette méthode reste valable en général : l'aire de la surface sous la courbe de vitesse est numériquement égale au déplacement, même si la vitesse n'est pas constante.

1.3.6 Vitesse moyenne sur un parcours

Sur la route des vacances, la voiture familiale s'arrête pour une pause environ toutes les deux heures, avant de reprendre l'autoroute. Arrivé à destination, le tableau de bord indique une distance parcourue de 850 km pour une durée du trajet de 10 h (pauses comprises). La vitesse moyenne sur ce parcours vaut donc 85 km/h.

La **vitesse moyenne** sur un parcours quelconque (pas nécessairement rectiligne) est donnée par le quotient :

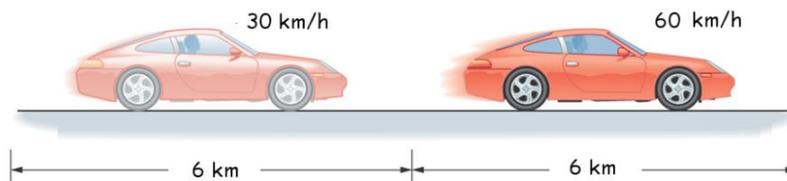
$$v_m = \frac{d}{\Delta t}$$

où d est la distance parcourue et Δt la durée du trajet.

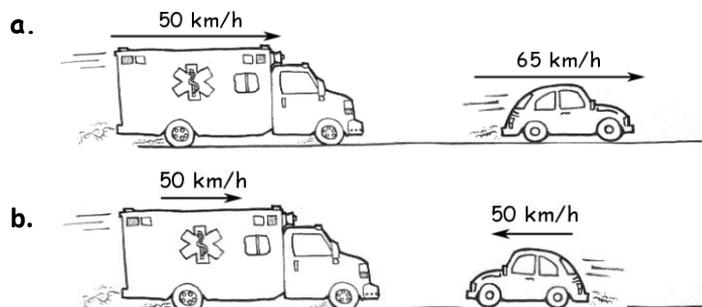
² L'aire du rectangle délimité par la courbe de vitesse et l'axe t a la dimension d'une longueur. En effet, en multipliant une vitesse (en m/s) par une durée (en s), on obtient bien une longueur (en m).

■ **As-tu compris ?**

5. Que vaut ta vitesse de marche lorsque tu parcoures 8 km en 1 h 30 ?
S'agit-il d'une vitesse moyenne ou d'une vitesse instantanée ?
6. Quelle distance parcoures-tu à vélo si ta vitesse moyenne est de 30 km/h et que tu roules pendant une demi-heure ?
7. Déterminer :
 - a. la vitesse moyenne d'un coureur cycliste qui parcourt une distance de 70 km en 2 h.
 - b. la distance parcourue par un avion volant avec une vitesse de 600 km/h pendant 3 h.
 - c. le temps de course d'un athlète qui court 400 m avec une vitesse moyenne de 8 m/s.
 - d. la vitesse moyenne de la voiture sur la figure ci-dessous sur les 12 km parcourus.



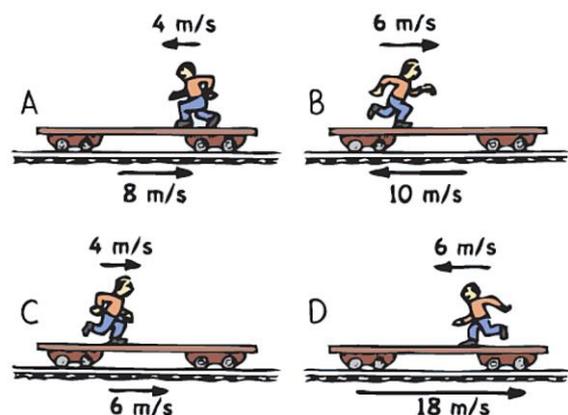
8. Un avion vole à 300 km/h vers le nord et un autre avion vole à 300 km/h vers le sud. Ont-ils la même vitesse ? Expliquer.
9. On choisit un axe x orienté dans le sens du mouvement de l'ambulance.



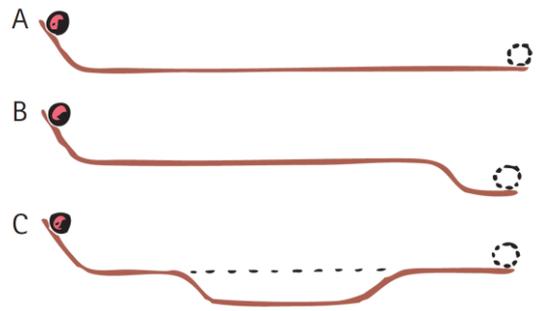
Pour les situations a et b, indiquer les vitesses des deux mobiles dans le référentiel ...

- terrestre
- de l'ambulance
- de la voiture

10. Un homme court sur des wagons en mouvement comme indiqué sur les figures A-D. Exprimer les vitesses du coureur dans le référentiel terrestre pour un axe dont le sens positif est vers la droite.

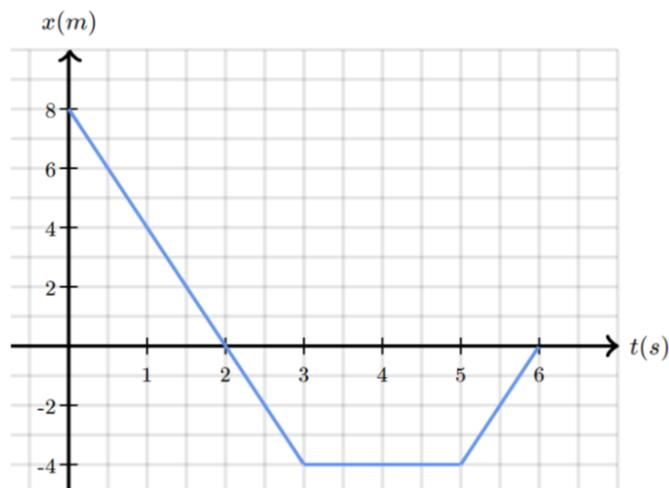


11. Trois billes identiques A, B et C sont lâchées sans vitesse initiale à l'extrémité gauche des trois rails illustrés. Les rails ont tous la même longueur. Ranger par ordre décroissant les ...



- vitesse instantanée des billes aux extrémités droites des rails.
- durées nécessaires aux billes pour parcourir les rails.
- vitesse moyenne des billes sur leurs parcours respectifs.

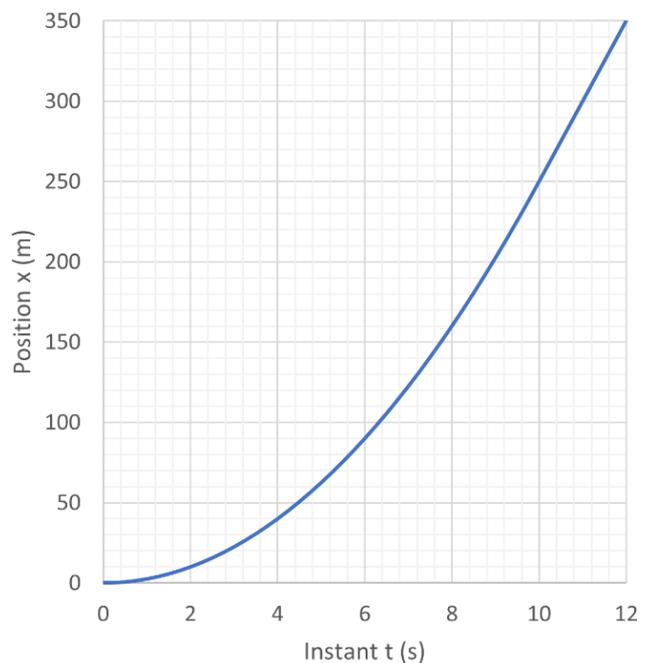
12. Un dauphin nage horizontalement pour chercher de la nourriture. Son mouvement est décrit par la représentation graphique ci-dessous.



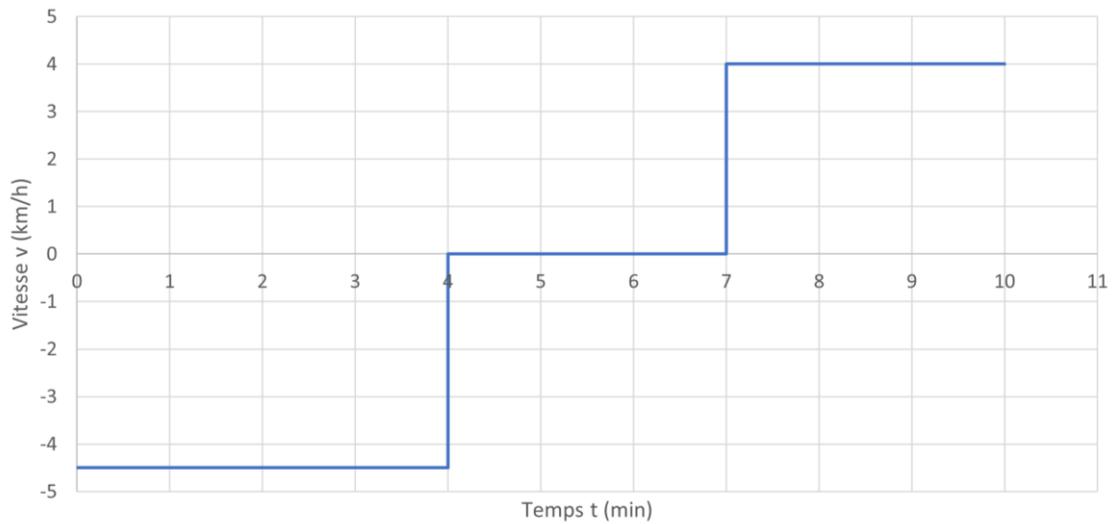
- Réaliser un diagramme représentant la vitesse et la norme de la vitesse du dauphin en fonction du temps.
- Déterminer le déplacement et la distance parcourue par le dauphin à l'aide du diagramme.

13. Le diagramme ci-contre décrit le départ d'une voiture de course.

- Déterminer la vitesse instantanée de la voiture à $t = 4$ s et $t = 11$ s.
- Est-ce que la vitesse instantanée de la voiture augmente entre $t = 10$ s et $t = 12$ s ? Justifier.
- Que vaut la vitesse moyenne de la voiture sur les 10 premières secondes de course ?



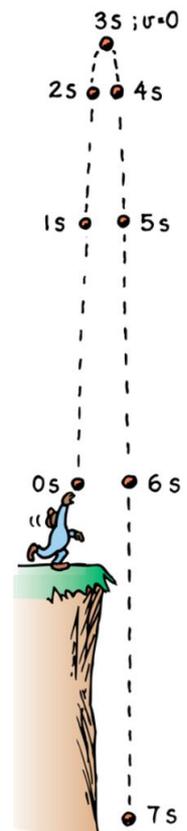
14. Un touriste se balade le long de l'avenue de la liberté à Luxembourg-Ville. En partant de la place de Paris ($x = 450$ m), il se dirige vers le pont Adolphe. Le graphique ci-dessous montre sa vitesse en fonction du temps.



- Quand le touriste s'est-il baladé dans le sens positif de l'axe ?
 - Que vaut la distance parcourue par le touriste ?
 - Que vaut le déplacement total du touriste ?
 - Que vaut la vitesse moyenne sur le parcours du touriste ?
 - Faire une représentation graphique de la position du touriste en fonction du temps.
15. Au bord d'une falaise, un garçon lance une balle verticalement vers le haut. L'origine du repère correspond à la position de la balle lorsqu'elle quitte la main du garçon. Le tableau ci-dessous donne les positions de la balle sur l'axe vertical orienté vers le haut en fonction du temps :

t(s)	0	1	2	3	4	5	6	7
y(m)	0	12	19	22	19	12	0	-17

- Faire une représentation graphique de la position de la balle en fonction du temps.
- Que vaut le déplacement de la balle entre 0 s et 7 s ?
- Que vaut la distance parcourue entre 0 s et 7 s ?
- Que vaut la vitesse instantanée de la balle en $t = 3$ s ? Justifier à l'aide du graphique.
- Sur quel(s) intervalle(s) de temps la vitesse de la balle diminue-t-elle ? Justifier à l'aide du graphique.
- Que vaut la vitesse moyenne sur le parcours de la balle entre 0 s et 7 s ?



1.4 Accélération

1.4.1 Définition

Dans le langage courant, accélérer signifie augmenter de vitesse. Effectivement, l'accélérateur dans une voiture permet d'augmenter sa vitesse. La définition physique de l'accélération est toutefois plus générale : un corps accélère lorsque sa **vitesse change**.

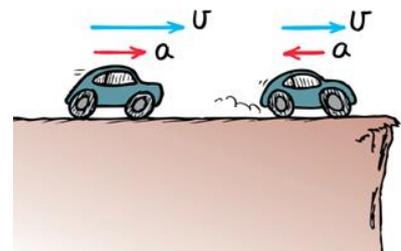
L'**accélération a** décrit la rapidité de la variation de la vitesse d'un corps. Elle s'obtient en divisant la variation de la vitesse Δv par la durée Δt pendant laquelle cette variation a lieu :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{\Delta t}$$

L'unité SI de l'accélération est le $\frac{\frac{m}{s}}{s} = \frac{m}{s \cdot s} = \frac{m}{s^2}$.

L'accélération est une grandeur algébrique :

- Une accélération dans le sens du mouvement signifie une augmentation de la vitesse.
- Une accélération dans le sens opposé du mouvement signifie une diminution de la vitesse.



Exemples

La vitesse d'un « Top Fuel » passe de 0 à 140 m/s en 5 s. Son accélération vaut :

$$a = \frac{v - v_0}{\Delta t} = \frac{140 \text{ m/s} - 0 \text{ m/s}}{5 \text{ s}} = 28 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



Chaque seconde, la vitesse du « Top Fuel » augmente (en moyenne) de 28 m/s.

Une voiture freine brusquement. Sa vitesse est réduite de 25 m/s à 1 m/s en 3 s. L'accélération de la voiture lors du freinage vaut :

$$a = \frac{v - v_0}{\Delta t} = \frac{1 - 25}{3} = -8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



Chaque seconde, la vitesse de la voiture diminue (en moyenne) de 8 m/s.

1.4.2 Accélération instantanée

Lorsque l'accélération n'est pas constante, on peut s'intéresser à sa valeur à un instant donné. Cette accélération instantanée est obtenue par le même procédé que celui utilisé pour la vitesse instantanée : on considère un intervalle de temps extrêmement court.

L'**accélération instantanée $a(t)$** décrit la rapidité de la variation de la vitesse à un instant t donné :

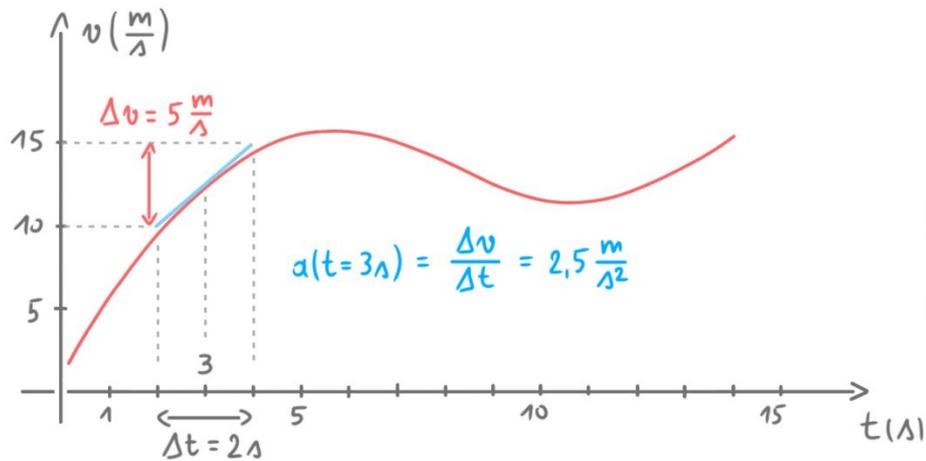
$$a(t) = \frac{dv}{dt}$$

dt représente un intervalle de temps extrêmement court autour de l'instant t ,

dv représente la variation de la vitesse du mobile pendant dt .

1.4.3 Calcul de l'accélération à partir de la courbe de vitesse

Le diagramme ci-dessous donne l'évolution de la vitesse instantanée d'une voiture. L'accélération à tout instant t correspond à la **pente de la tangente à la courbe de vitesse** à cet instant. Pour $t = 3$ s, on trouve par exemple une accélération instantanée de $a(t = 3 \text{ s}) = 2,5 \text{ m/s}^2$.



À quel(s) instant(s), l'accélération de la voiture est-elle nulle ? _____

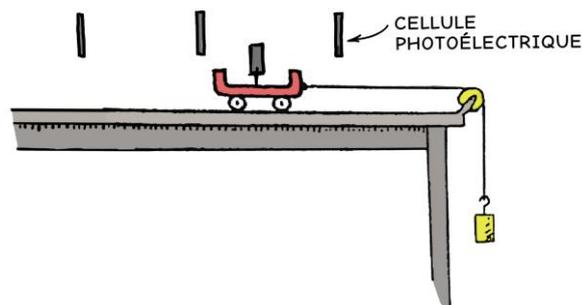
1.5 Équations du mouvement

Dans la suite, on se propose d'établir les équations du mouvement rectiligne à accélération constante³.

1.5.1 MRUV

Un corps effectue un **mouvement rectiligne uniformément varié (MRUV)** si et seulement si son accélération reste constante au cours du temps.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{\Delta t} = \text{constante}$$



En supposant que le mouvement étudié commence à $t = 0$, nous pouvons réécrire l'expression qui définit l'accélération :

$$a \cdot t = v - v_0 \quad (1)$$

et, après réarrangement des termes, on obtient l'expression de la vitesse v en fonction du temps t :

$$v = a \cdot t + v_0$$

Cette équation permet de calculer la vitesse instantanée v du corps à n'importe quel instant t si l'on connaît les constantes a (accélération) et v_0 (vitesse initiale).

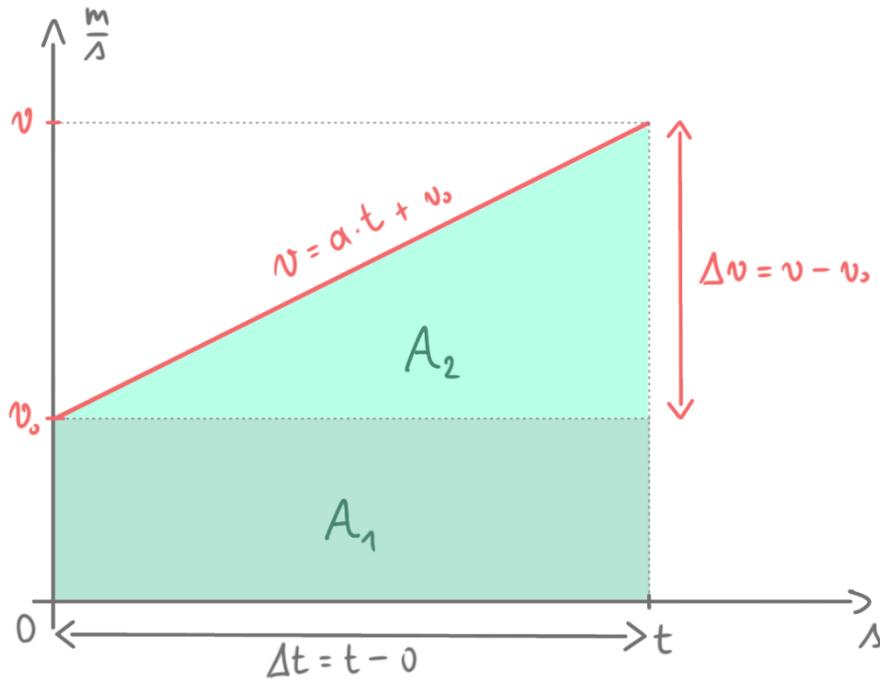
³ Ceci ne limite pas tellement les situations que nous pouvons étudier. En effet, lorsque l'accélération change, le mouvement peut être subdivisé en différentes parties, chacune ayant sa propre accélération approximativement constante.

Equation horaire de la vitesse pour le MRUV :

$$v(t) = a \cdot t + v_0 \quad (v)$$

Il s'agit d'une équation du 1^{er} degré en la variable t ; lors d'un MRUV, la vitesse varie linéairement en fonction du temps (fonction affine).

On se propose maintenant d'établir une expression qui permet de calculer la position x du corps à n'importe quel instant t . Pour cela, commençons par tracer la courbe de vitesse pour des valeurs positives de a et de v_0 .



L'aire de la surface colorée en vert représente le déplacement du corps entre l'instant initial et un instant ultérieur quelconque t . Cette surface comprend deux parties :

- une partie rectangulaire qui est due au fait que le corps possède une vitesse initiale $v_0 > 0$,
- une partie triangulaire qui est due au fait que le corps est accéléré (dans notre cas la vitesse du corps augmente au cours du temps puisque $a > 0$).

L'aire de la partie (i) vaut :

$$A_1 = v_0 \cdot t$$

et, vu (v), l'aire de la partie (ii) peut s'écrire :

$$A_2 = \frac{1}{2}(v - v_0) \cdot t = \frac{1}{2}(a \cdot t) \cdot t = \frac{1}{2}a \cdot t^2.$$

Le déplacement total du corps correspond à la somme des deux parties :

$$\Delta x = A_2 + A_1 = \frac{1}{2}a \cdot t^2 + v_0 \cdot t$$

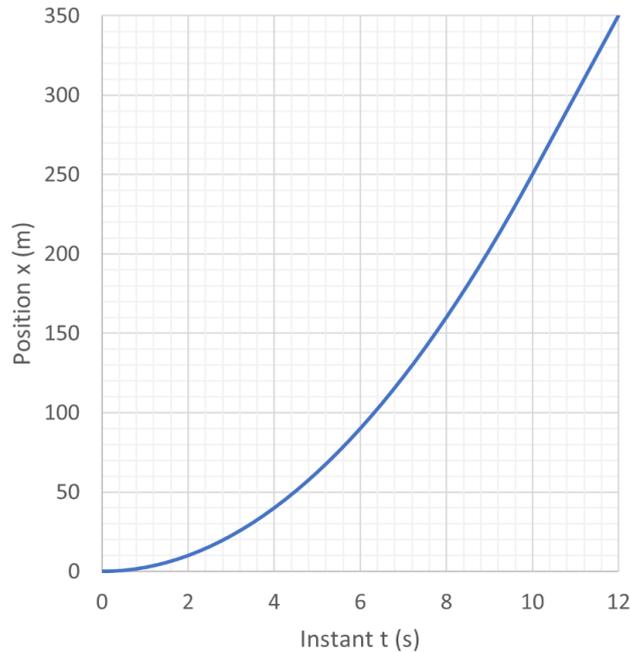
et, comme le déplacement équivaut au changement de position $\Delta x = x - x_0$, on vient d'établir une expression mathématique pour la position x du corps en fonction du temps t :

$$x - x_0 = \frac{1}{2}a t^2 + v_0 t \quad \Leftrightarrow \quad x = \frac{1}{2}a t^2 + v_0 t + x_0$$

Equation horaire de la position pour le MRUV :

$$x(t) = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + x_0 \quad (\text{p})$$

La position x du corps peut ainsi être calculée pour n'importe quel instant t à l'aide d'une équation du 2^e degré en la variable t une fois qu'on connaît les constantes a (accélération), v_0 (vitesse initiale) et x_0 (position initiale). Graphiquement, la fonction $x(t)$ est une branche de parabole (ici pour $x_0 = 0$) :



1.5.2 MRU

Un corps effectue un **mouvement rectiligne uniforme (MRU)** si et seulement si son accélération est nulle. Un corps qui effectue un MRU se déplace en ligne droite et à vitesse constante :

$$a = 0 \Rightarrow v = \text{constante}$$

Le MRU apparaît donc comme un cas particulier du MRUV. Les équations (v) et (p) restent valables mais prennent des formes plus simples étant donné que $a = 0$.

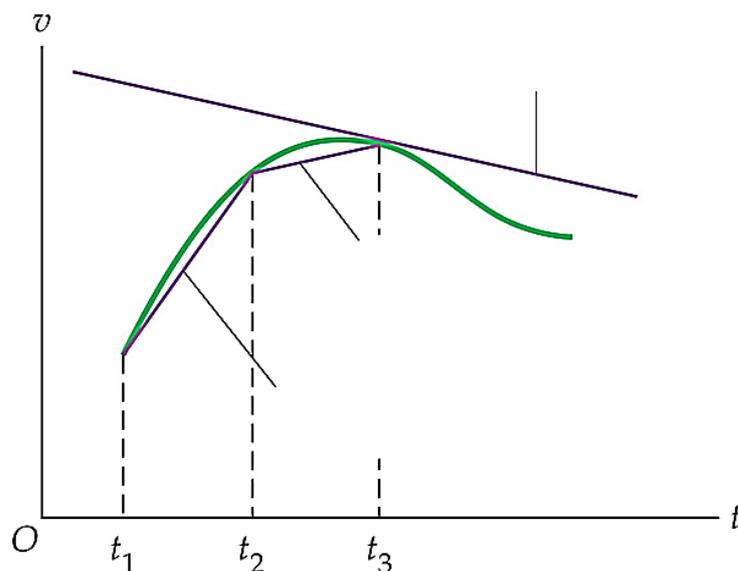
1.5.3 Résumé des formules cinématiques

MRU	MRUV
$a = 0$	$a = \text{const.}$
$v = v_0 = \text{const.}$	$v(t) = a t + v_0$
$x(t) = v t + x_0$	$x(t) = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + x_0$



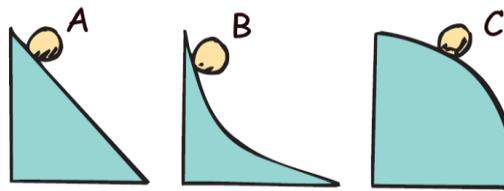
■ **As-tu compris ?**

16. Déterminer les accélérations des mobiles dans les situations suivantes :
- Un athlète passe de 2 m/s à 6 m/s en 4 s.
 - Un camion freine de 20 m/s à 5 m/s en 2 s.
 - Une voiture passe de 0 à 100 km/h en 5 s.
 - Un bus passe de 10 km/h à 50 km/h en 10 secondes.
17. Que vaut l'accélération d'une voiture qui roule à une vitesse de 100 km/h pendant 100 s ?
18. Une voiture qui se déplace vers le nord peut-elle avoir en même temps une accélération vers le sud ? Expliquer.
19. Laquelle des accélérations est plus grande, sachant que les deux ont lieu pendant la même durée ?
- Une accélération de 25 km/h à 30 km/h.
 - Une accélération de 96 km/h à 100 km/h.
20. En partant du repos, une première voiture accélère jusqu'à 50 km/h et une deuxième jusqu'à 60 km/h. Laquelle des deux voitures a subi la plus grande accélération ?
- La première voiture.
 - La deuxième voiture.
 - Identique pour les deux.
 - Impossible à dire, car il manque une donnée.
21. Quelles grandeurs physiques correspondent aux pentes des segments de droite représentés sur le graphique ci-dessous ?

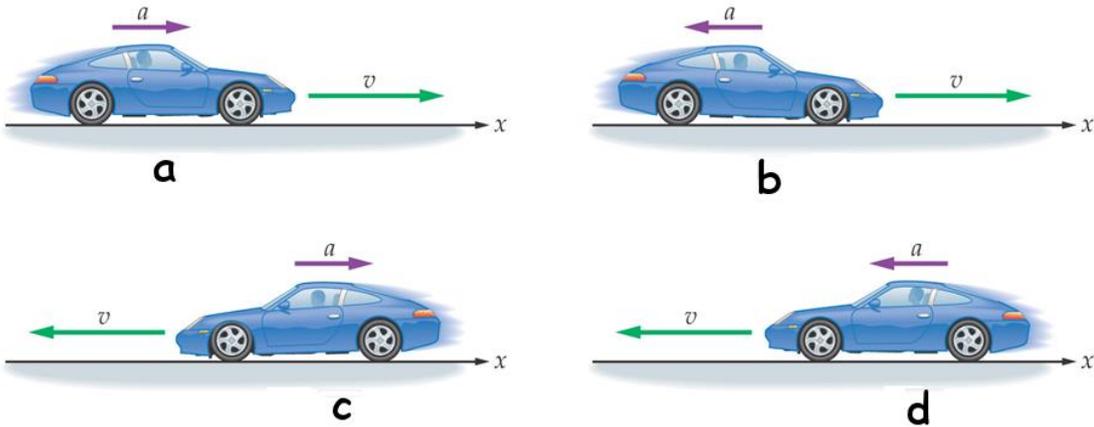


22. Laquelle des trois boules descend avec une accélération...

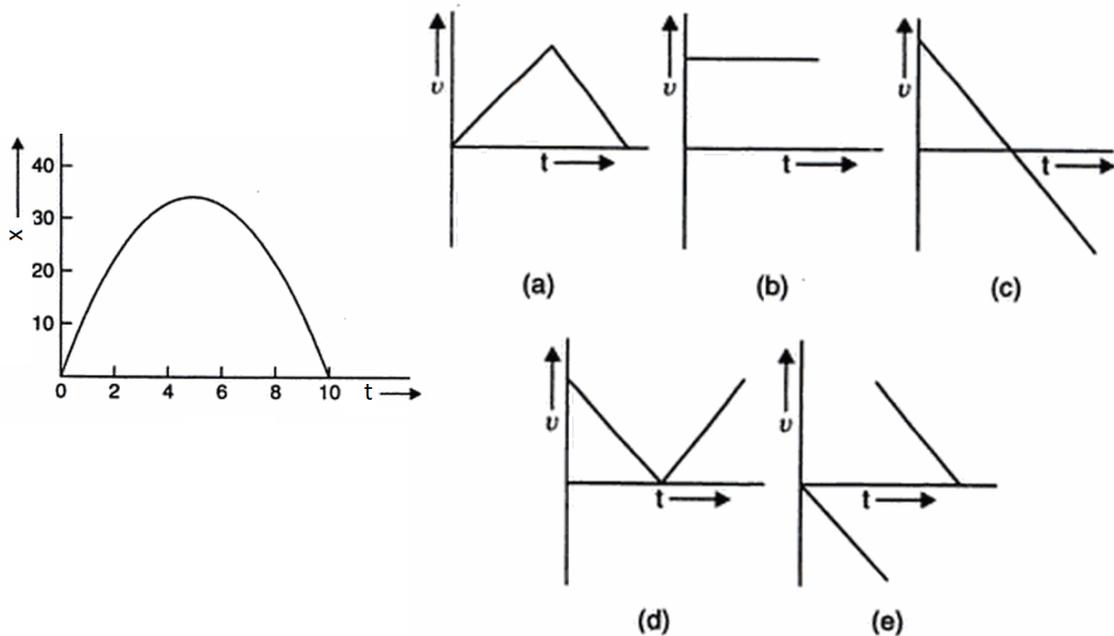
- a. croissante ?
- b. constante ?
- c. décroissante ?



23. Donner pour chaque cas le signe de l'accélération et de la vitesse. Préciser si la vitesse de la voiture augmente ou diminue.

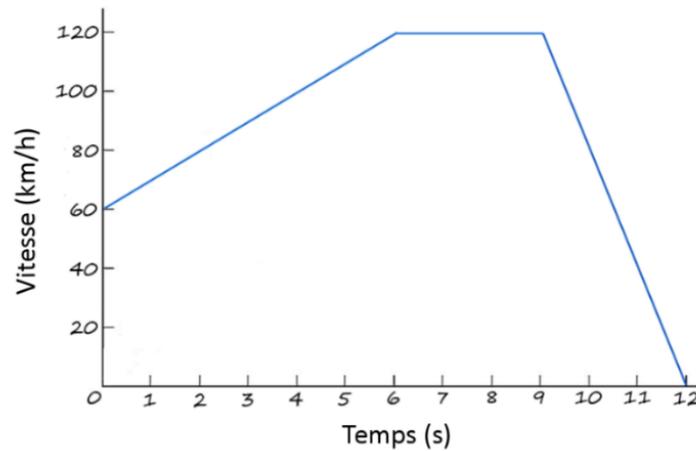


24. Le diagramme à gauche donne la position en fonction du temps pour un mouvement rectiligne.



- a. Lequel des diagrammes de droite représente la vitesse en fonction du temps pour ce mouvement ?
- b. Donner une situation réaliste qui correspond à ce mouvement.

25. Considérons le diagramme suivant qui décrit le mouvement d'une voiture.



- Calculer les accélérations de la voiture durant les trois phases du mouvement.
- À quoi correspondent ces valeurs sur le graphique ?

26. Une voiture part du repos avec une accélération constante de 2 m/s^2 . Calculer la vitesse instantanée de la voiture après 10 secondes.

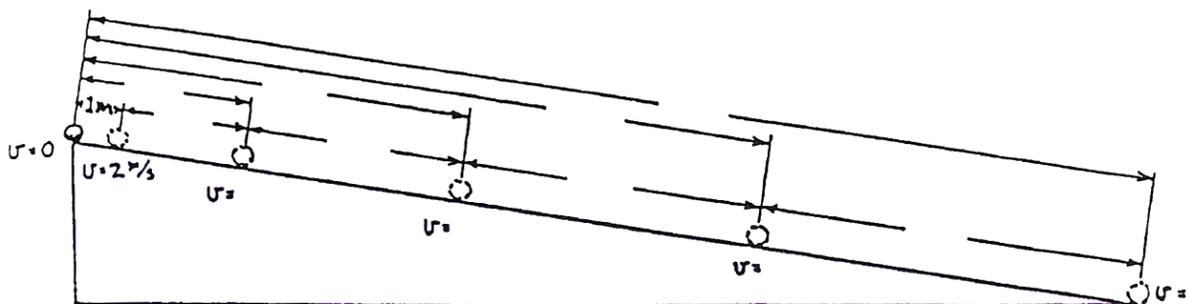
27. Calculer l'accélération d'un chariot qui est lâché sans vitesse initiale du haut d'un plan incliné et qui acquiert ensuite une vitesse instantanée de 25 m/s en 5 secondes.

28. Une voiture de sport part du repos et accélère uniformément en 8 s jusqu'à une vitesse de 180 km/h . Déterminer la distance parcourue lors de ces 8 s.



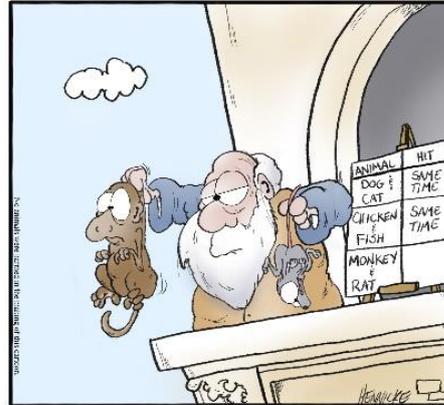
29. Une moto accélère uniformément de 30 km/h à 90 km/h . Durant cette phase d'accélération, elle parcourt une distance de 80 m . Déterminer la valeur de l'accélération.

30. Le rail ci-dessous est incliné de manière qu'une balle gagne 2 m/s en vitesse lors de chaque seconde de descente. Les positions de la balle sont indiquées à des intervalles réguliers (une seconde entre deux positions successives). Déterminer les valeurs de la vitesse et les distances parcourues pour les différentes positions.



1.6 Chute libre

Selon la légende, Galilée laissa tomber deux boules de même taille, mais l'une en bois et l'autre en fer, du haut de la tour de Pise. Contrairement à la conviction générale des scientifiques de l'époque, Galilée et son public ont observé que deux boules de masses différentes tombent de manière identique.



1.6.1 Expérience du tube de Newton

Dans un tube en verre se trouvent une plume et une pièce de monnaie. Lorsque le tube est retourné rapidement, les deux corps tombent vers le fond du tube.

- Lorsque le tube est rempli d'air, la plume tombe nettement moins vite que la pièce de monnaie. En effet, l'air s'oppose au mouvement de chute des deux corps. L'effet de cette résistance est plus prononcé pour la plume (explication page 40).
- Lorsque l'air est évacué du tube à l'aide d'une pompe à vide, les deux corps ont exactement le même mouvement de chute. On dit qu'ils tombent en **chute libre**.



Un corps est en **chute libre** lorsqu'il tombe sous la seule action de son poids.

1.6.2 Les lois de chute de Galilée

- Tous les corps ont le même mouvement de chute libre, indépendamment de leur masse ou de leur forme.
- Sans vitesse initiale, la chute libre est un MRUV de direction verticale, de sens descendant et d'accélération constante :

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2 \text{ (environ } 10 \text{ m/s}^2\text{)}$$

Les lois de Galilée sont vraies au sens strict si le corps tombe en chute libre, c'est-à-dire dans le vide. Toutefois, elles restent valables si la résistance de l'air est négligeable, c'est-à-dire très faible comparée au poids du corps en chute. Ceci est notamment le cas pour des corps de forme aérodynamique qui tombent à des vitesses relativement petites.

1.6.3 Équations horaires de la chute libre verticale

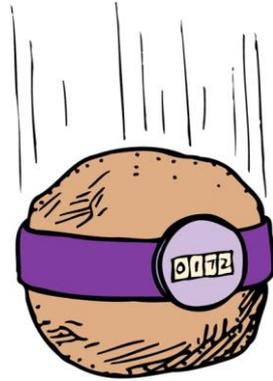
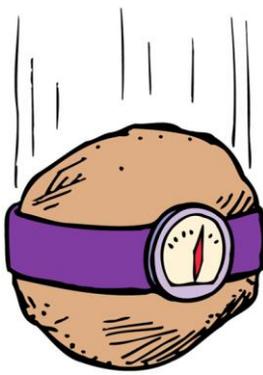
Fixons l'origine de l'axe y au point de départ du mouvement : $y_0 = 0$

- Sans vitesse initiale (axe y orienté vers le bas)

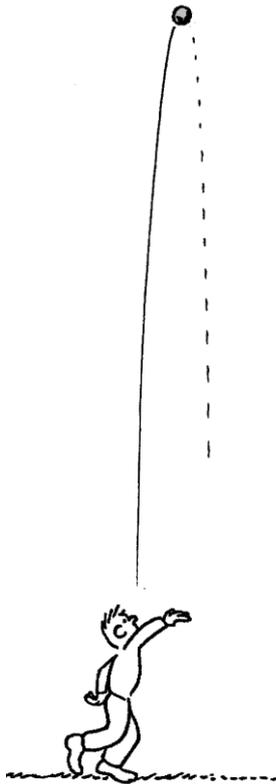
$$a = g \cong +10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$v = g t \cong 10 t \text{ (en m/s)}$$

$$y = \frac{1}{2} g t^2 \cong 5 t^2 \text{ (en m)}$$



- Avec une vitesse initiale verticale v_0



Si l'axe des y est orienté vers le **bas** :

$$a = g \cong +10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$v = g t + v_0 \cong 10 t + v_0$$

$$y = \frac{1}{2} g t^2 + v_0 t \cong 5 t^2 + v_0 t$$

Si l'axe des y est orienté vers le **haut** :

$$a = -g \cong -10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$v = -g t + v_0 \cong -10 t + v_0$$

$$y = -\frac{1}{2} g t^2 + v_0 t \cong -5 t^2 + v_0 t$$



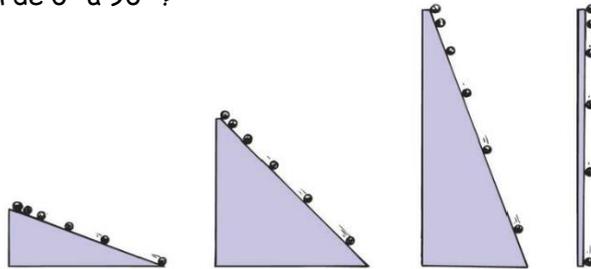
Attention au signe de v_0 :

- Si la vitesse initiale est orientée dans le sens positif de l'axe, alors $v_0 > 0$.
- Si la vitesse initiale est orientée dans le sens négatif de l'axe, alors $v_0 < 0$.

Exercice : Sur la figure de droite, choisir une échelle convenable et indiquer la position et la vitesse d'une pierre 1 s, 2s et 3s après le début de la chute (supposée libre).

■ **As-tu compris ?**

31. Galilée a fait des expériences avec des boules qui descendent des plans inclinés. Entre quelles valeurs limites se trouvent les accélérations des boules lorsqu'on fait varier l'angle d'inclinaison du plan de 0° à 90° ?

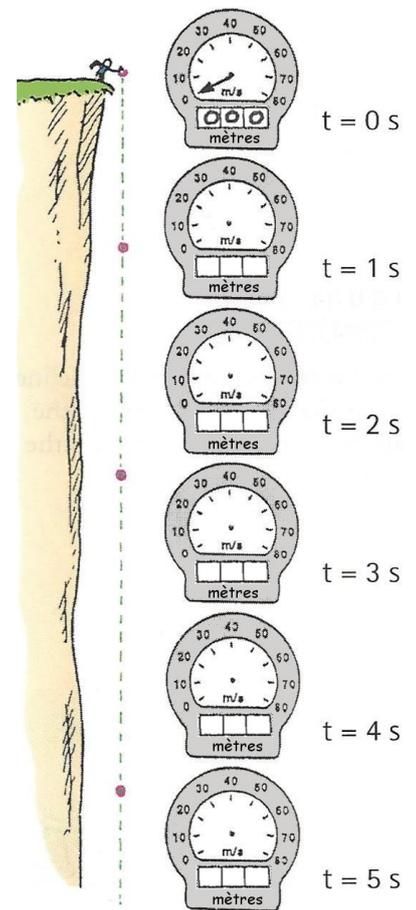


32. Existe-t-il une situation où ta vitesse est nulle mais ton accélération est non nulle ?

33. Un objet peut-il inverser son sens de mouvement en gardant une accélération constante ? Si oui, donner un exemple. Sinon, justifier.

34. La figure ci-contre illustre la chute d'une pierre sans vitesse initiale du haut d'une falaise. Supposons qu'un indicateur de vitesse et un compteur de distance soient attachés à la pierre et qu'ils indiquent une mesure à des intervalles de temps réguliers de 1 s.

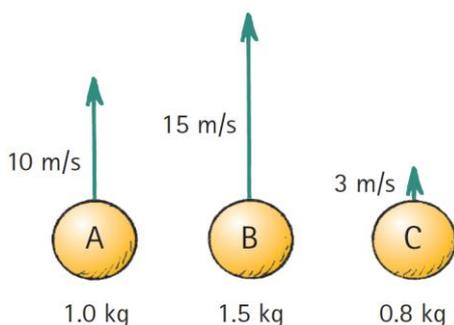
- Compléter les indications en négligeant la résistance de l'air (chute libre).
- Au bout de 5 secondes, la pierre touche le sol. Que vaut son accélération juste avant l'impact ?
- Construire les diagrammes $y(t)$, $v(t)$ et $a(t)$ pour cette chute libre de 5 secondes.



35. Pourquoi serait-il dangereux de sortir lors d'une averse si la résistance de l'air sur les gouttes d'eau était négligeable ?

36. Une pomme tombe d'un arbre à partir du repos. On suppose que la résistance de l'air est négligeable.

- Que vaut la vitesse de la pomme après 1,5 s.
- La pomme touche le sol après 1,5 s. De quelle hauteur est-elle tombée ?



37. Trois balles de masses différentes sont lancées verticalement vers le haut avec les vitesses initiales indiquées. Ranger, par ordre décroissant, ...

- les vitesses instantanées des balles après 1 s.
- leurs accélérations instantanées après 1 s.

2 Dynamique

2.1 Les forces

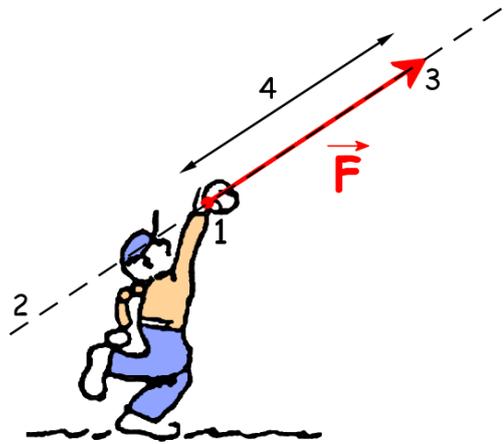
2.1.1 Notion et représentation

Une force est une poussée ou une traction.

Une force a quatre **caractéristiques** :

1. Un point d'application
2. Une direction (droite d'action)
3. Un sens
4. Une norme (intensité)

Une force est représentée par un **vecteur force** \vec{F} . Ce vecteur indique les quatre caractéristiques de la force de manière visuelle.



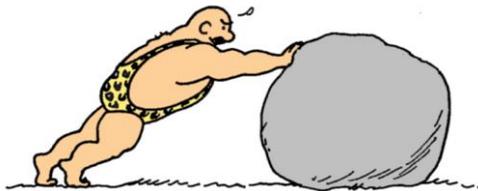
La norme d'une force est représentée par le symbole F . Dans le Système International (SI), la norme d'une force est exprimée en **newton (N)**.

On mesure la norme d'une force avec un **dynamomètre**.

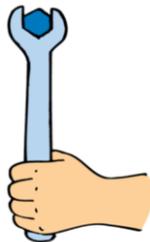
■ As-tu compris ?

1. Représenter le vecteur force en précisant l'échelle utilisée.

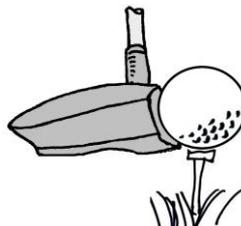
a. L'homme exerce une poussée de 1250 N sur le rocher.



b. La main exerce une traction de 100 N sur la clé anglaise.



c. Une crosse de golf exerce une force de 5000 N sur une balle. La force est dirigée selon un angle de 10° par rapport à l'horizontale.



2. Représenter deux forces de même direction, mais de sens opposés.

2.1.2 Force résultante et décomposition de forces

Si plusieurs forces agissent simultanément sur un corps, leurs effets combinés sont équivalents à l'effet d'une seule **force résultante**, obtenue par addition vectorielle des forces individuelles :

$$\vec{F}_{res} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n$$

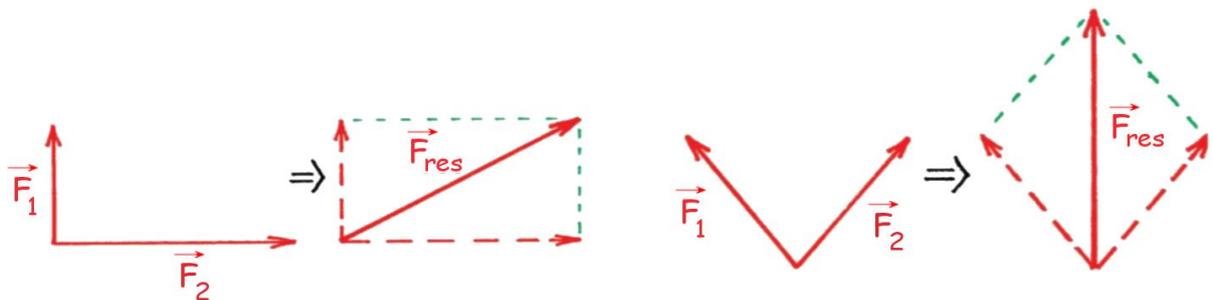
La force résultante dépend de la norme, de la direction et du sens des différentes forces en présence.

FORCES	FORCE RÉSUŁTANTE

Lorsque deux forces agissent simultanément dans une même direction, il faut considérer leur sens :

- Si les forces sont de même sens, leurs normes s'ajoutent.
- Si les forces sont de sens opposés, leurs normes se soustraient.

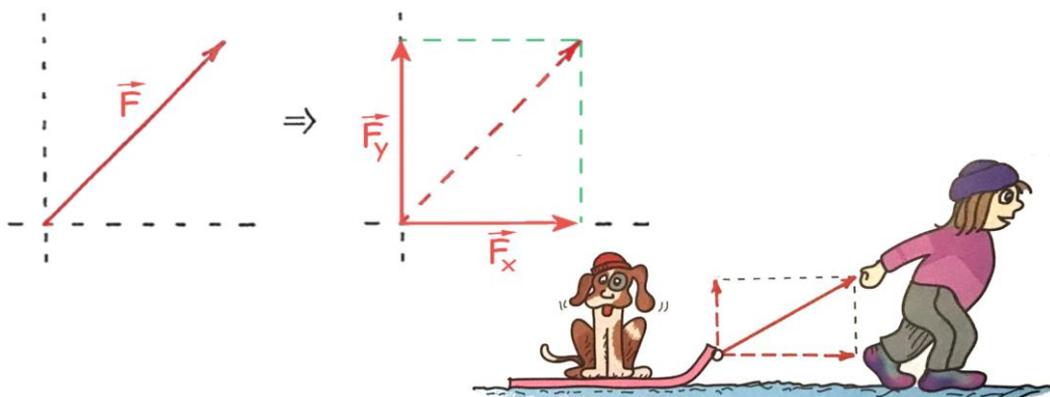
Lorsque les deux forces n'agissent pas dans la même direction, on utilise la **méthode du parallélogramme** : on construit le parallélogramme dont les côtés sont les deux vecteurs forces considérées. La force résultante est alors le « vecteur diagonal » de ce parallélogramme.



Dans le cas particulier de deux forces perpendiculaires (comme dans le premier exemple illustré ci-dessus), le parallélogramme des forces est un rectangle.

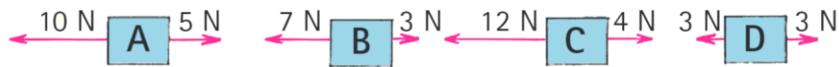


Au même titre que l'on peut combiner une paire de forces en une force résultante, toute force peut être **décomposée** en deux forces appelées **composantes**. Par exemple, il est souvent pratique de décomposer une force \vec{F} en une composante horizontale \vec{F}_x et une composante verticale \vec{F}_y . Pour décomposer une force, on utilise la méthode du parallélogramme à l'envers :



■ **As-tu compris ?**

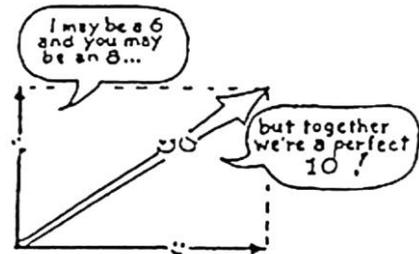
3. Ranger par ordre croissant la norme de la force résultante sur le bloc.



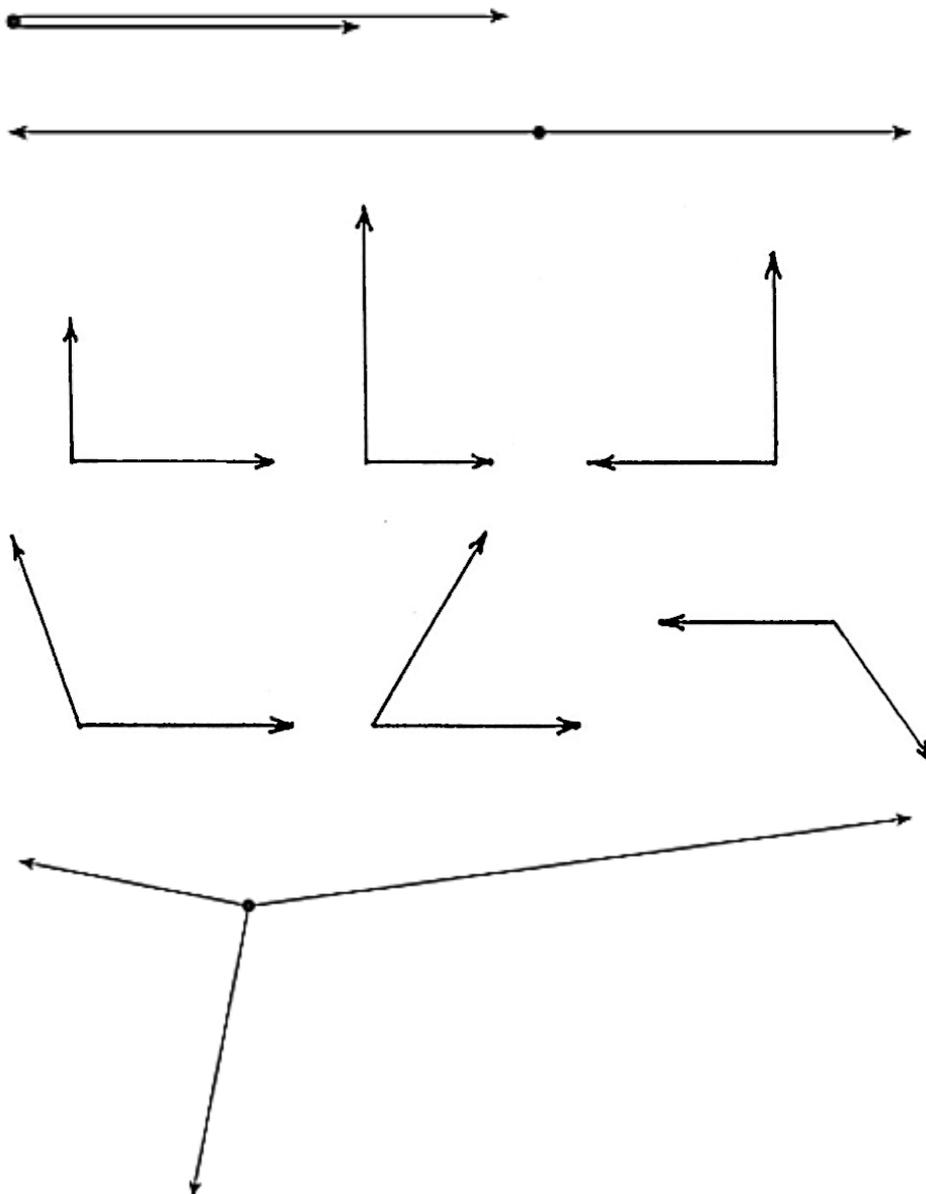
4. Quelle est la norme et le sens de la force résultante sur un chariot qui est tiré vers la droite avec une force de 100 N et tiré vers la gauche avec une force de 30 N ?

5. Quelle force résultante s'applique sur un chariot tiré avec une force de 100 N vers la gauche et avec une force de 100 N vers la droite ?

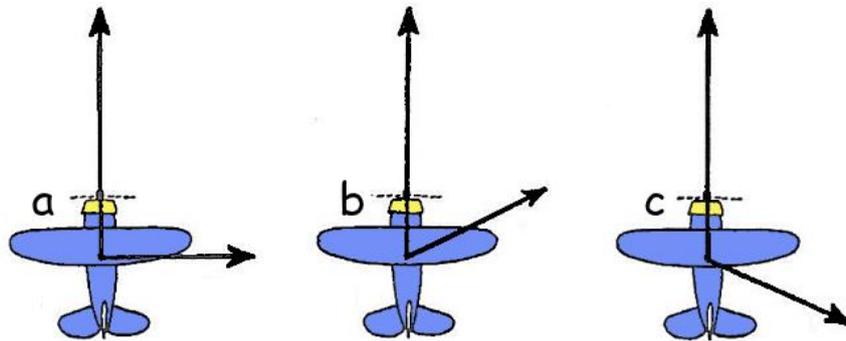
6. On considère une paire de forces, l'une ayant une norme de 20 N et l'autre une norme de 12 N. Quelle force résultante maximale (norme) peut-on obtenir avec ces deux forces ? Quelle force minimale ? Expliquer.



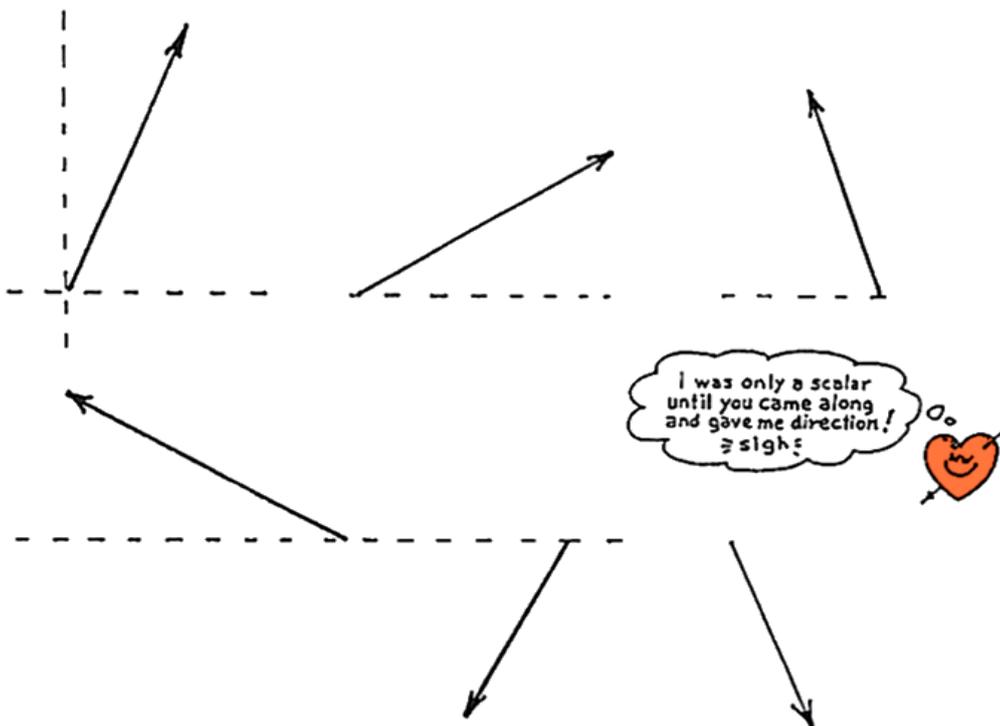
7. Construire le vecteur force résultante.



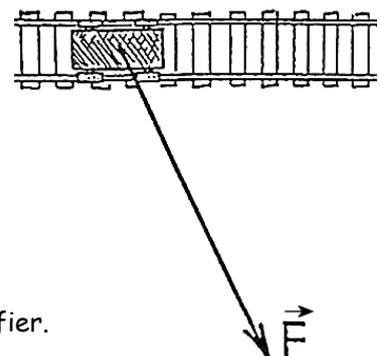
8. Sur la figure sont illustrées la poussée motrice et la poussée latérale de la part du vent qui agissent sur un avion en plein vol.



- Représenter la résultante de ces deux forces dans les trois cas.
 - Dans quel cas la norme de la résultante est-elle la plus grande ?
 - Dans le cas a, l'avion subit une poussée motrice de 5000 N et une poussée latérale de 2000 N. Calculer la norme et la direction (angle par rapport à l'axe de l'avion) de la force résultante.
9. Décomposer le vecteur force en une composante horizontale et une composante verticale.



10. Un wagon est tiré le long des rails par une force de norme 10 kN et inclinée d'un angle de 60° par rapport aux rails.



- Décomposer la force de traction en une composante tangentielle (parallèle) aux rails et une composante normale (perpendiculaire) aux rails.
- Calculer la norme de ces deux composantes.
- Laquelle de ces deux composantes a un effet utile ? Justifier.

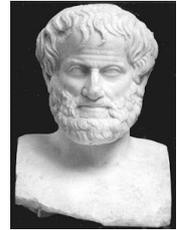
2.2 La première loi de Newton

2.2.1 Un peu d'histoire

Les théories d'Aristote

Selon le philosophe grec Aristote (384-322 BC), chaque corps est constitué des quatre éléments : air, feu, eau et terre. Aristote subdivise le mouvement en deux catégories :

- Le **mouvement naturel** résulte de la tendance des quatre éléments à retrouver leur lieu naturel : la terre et l'eau tombent naturellement vers le bas, l'air et le feu montent naturellement vers le haut. Une pierre est constituée de l'élément terre et tombe donc vers le bas. Les nuages sont constitués de l'élément air et montent donc vers le haut. Selon Aristote, des objets lourds ont une plus forte tendance à retrouver leur lieu naturel. Il en déduit que des corps lourds comme des pierres tombent plus vite que des corps légers comme des plumes. Les corps célestes sont des sphères parfaites constituées d'un cinquième élément éternel, dont le mouvement naturel est une trajectoire circulaire.
- Le **mouvement violent** est provoqué par des forces. Par exemple, une flèche est accélérée parce qu'elle subit une force de la part de la corde de l'arc. Cependant, Aristote n'arrivait pas à expliquer de manière satisfaisante pourquoi la flèche continue son mouvement après avoir quitté l'arc. Une fois qu'un corps se trouve dans son lieu naturel, il ne va plus bouger sans l'action d'une force. À part les corps célestes, tous les corps qui se trouvent dans leur lieu naturel sont au repos.



Les idées d'Aristote sur le mouvement des corps sont restées incontestées pendant près de 2000 ans. Jusqu'au XVI^e siècle, la plupart des philosophes sont convaincus que la Terre se trouve au repos. L'existence d'une force assez grande pour faire bouger la Terre était inconcevable.

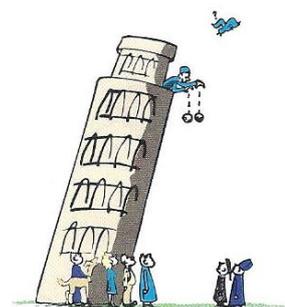
Copernic et la Terre en mouvement

L'astronome Nicolas Copernic (1473-1543) propose le **système héliocentrique**, selon lequel la Terre et les autres planètes décrivent des cercles autour du Soleil. Ce modèle permet en effet d'expliquer le mouvement du Soleil, de la Lune et des planètes à travers le ciel. Craignant une persécution de la part de l'Église, Copernic hésite longtemps à rendre ses idées publiques. Sa théorie risque d'être interprétée comme une attaque contre l'ordre établi. D'ailleurs, Copernic lui-même n'est pas entièrement convaincu de sa théorie, car il n'arrive pas à réconcilier l'idée d'une Terre en mouvement avec les théories d'Aristote. Encouragée par ses amis, il décide finalement de publier son livre *De Revolutionibus*. Il tient dans ses mains la première copie de cette célèbre œuvre le jour de sa mort, le 24 mai 1543.



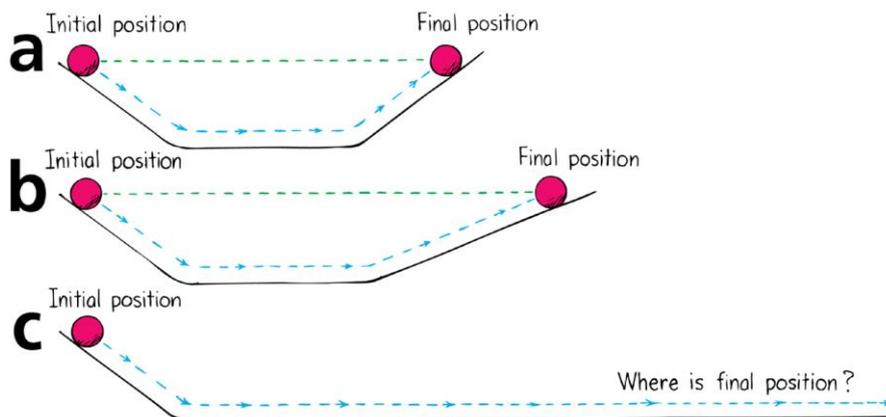
Galilée, la tour de Pise et les plans inclinés

Galilée (1564-1642), scientifique italien de renommée, confirme le modèle héliocentrique de Copernic et est le premier à fournir une réfutation irrévocable des idées d'Aristote sur le mouvement à travers l'expérience et l'observation. Par exemple, Galilée invita une foule de gens à assister à son expérience de la tour de Pise. Contrairement à la prédiction d'Aristote, les deux boules de masses très différentes tombèrent de manière identique. À l'époque d'Aristote, le vide était inconcevable et il n'avait donc pas consacré de réflexions sérieuses sur le concept de mouvement en l'absence



de frottement. Selon Aristote, il était fondamental qu'un corps subisse une force pour qu'il puisse continuer son mouvement. C'est justement cette idée que Galilée remet en question en réalisant des expériences avec des plans inclinés :

- Une boule lâchée sans vitesse initiale descend le premier plan incliné et remonte de l'autre côté. Si la surface est très lisse, la boule peut quasiment atteindre sa hauteur initiale. Galilée en déduit qu'en absence de frottement, la boule pourrait en effet l'atteindre.
- Plus l'inclinaison de la remontée est petite, plus la distance parcourue est grande.
- Si le deuxième plan est horizontal, la boule devrait rouler une distance infinie pour s'approcher de sa hauteur initiale. Seule la force de frottement va l'empêcher de rouler éternellement.



2.2.2 Newton et le principe d'inertie

En se basant sur les découvertes de son prédécesseur, Newton reformula l'idée de Galilée :

Principe d'inertie (1^{ère} loi de Newton)

Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme, à moins qu'une force ne le contraigne à changer son état de mouvement.



- Un corps au repos tend à rester au repos.
- Un corps en mouvement tend à rester en mouvement rectiligne uniforme. Seule une force résultante sur le corps peut changer son état de mouvement.⁴



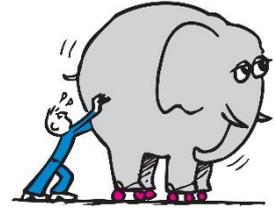
Si un astronaute lance une pierre dans le vide intersidéral, cette pierre va continuer son mouvement rectiligne uniforme à jamais. Cette tendance des corps à rester dans leur état de mouvement est appelée **inertie**.



⁴ Si un corps ne reste pas au repos ou si un corps en mouvement n'effectue pas un mouvement rectiligne uniforme, alors ce corps doit nécessairement subir l'action d'une force résultante.

2.2.3 Masse et poids (rappel)

La masse d'un corps est une mesure pour la quantité de matière contenue dans le corps. Plus un corps contient de la matière, plus son inertie est grande. La masse est donc une mesure pour l'inertie d'un corps, c'est-à-dire sa tendance à s'opposer à un changement de son état de mouvement. Son unité SI est le **kilogramme (kg)**.



Le **poids** \vec{P} d'un corps est la **force de pesanteur** qu'il subit lorsqu'il se trouve à proximité de la surface d'un corps céleste (la Terre, la Lune, Mars, un astéroïde, ...).

Comme toute force, le poids a quatre caractéristiques :

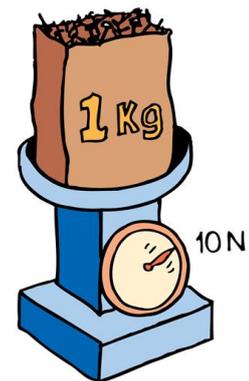
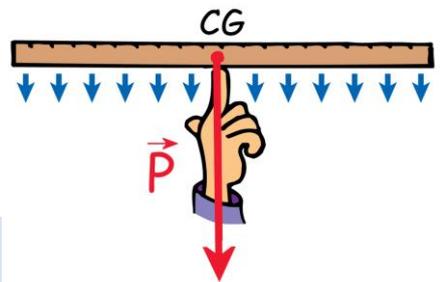
1. Point d'application : le centre de gravité CG du corps
2. Direction : la verticale passant par le CG du corps
3. Sens : Vers le centre du corps céleste
4. Norme :

$P = mg$, où g est l'intensité de la pesanteur du lieu.

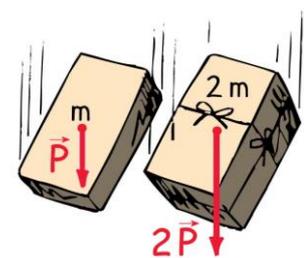
L'unité SI de la norme du poids est le **newton**

Sur Terre, l'intensité de la pesanteur g est proche de $10 \frac{N}{kg}$.

Corps céleste	$g \left(\frac{N}{kg} \right)$	Corps céleste	$g \left(\frac{N}{kg} \right)$
Terre	10	Vénus	8,9
Europe centrale	9,81	Mars	3,7
Pôles	9,83	Jupiter	24,5
Équateur	9,78	Saturne	10,4
Lune	1,62	Uranus	8,9
Mercure	3,7	Neptune	11,2



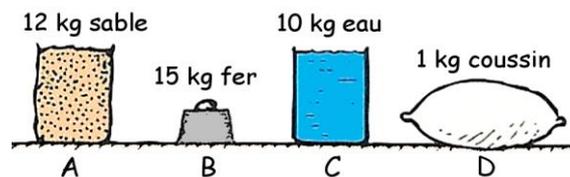
En un lieu donné, le poids et la masse d'un corps sont proportionnels : Lorsque la masse double, le poids double également. Intuitivement, on a donc tendance à dire qu'un corps a une grande masse s'il est lourd⁵. Or, la masse est une grandeur plus fondamentale que le poids, car la masse ne dépend pas du lieu. Par exemple, une brique d'une masse de 1 kg a un poids d'environ 10 N sur Terre. Or, elle serait moins lourde sur la Lune où son poids vaudrait 1,62 N. Sur Jupiter, la brique pèserait environ 25 N. En revanche, la masse de la brique serait partout la même, à savoir 1 kg ! La brique présenterait donc la même résistance à un changement de son état de mouvement, quelle se trouve sur Terre, sur la Lune, sur Jupiter ou sur tout autre corps céleste. Dans le vide intersidéral, où le poids de la brique serait nul, la brique aurait toujours la même masse (donc la même inertie). Un astronaute devrait donc y exercer tout autant de force pour secouer la brique que sur Terre.



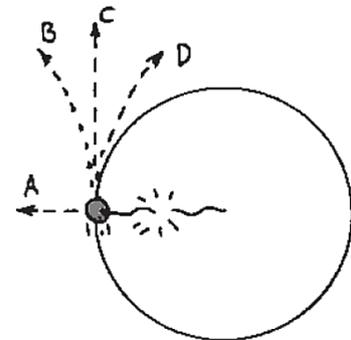
⁵ Voilà pourquoi la masse et le poids sont souvent confondus dans le langage courant. En effet, nous avons l'habitude de déterminer la masse d'un corps en mesurant en réalité son poids (à l'aide d'une balance électronique ou d'un dynamomètre, calibrés pour la pesanteur sur Terre).

■ **As-tu compris ?**

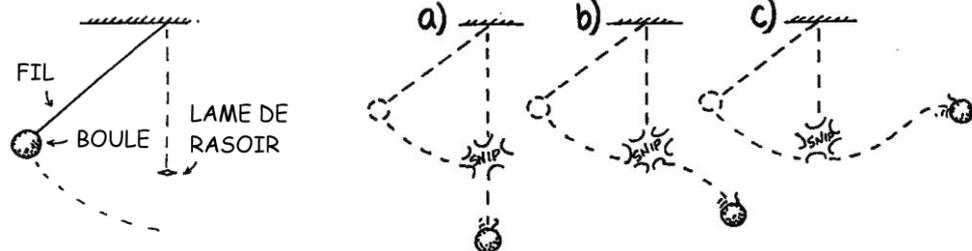
11. Un astronaute dans l'espace intersidéral lance une pierre. La pierre va...
 - A. ralentir peu à peu
 - B. continuer à vitesse constante
 - C. accélérer de plus en plus
12. Un palet de hockey finit par s'immobiliser après une longue glissade sur la glace. Cet arrêt est dû au fait...
 - A. que le palet recherche un état de repos
 - B. qu'une force de frottement agit sur le palet
13. Des planètes se déplacent à travers l'espace depuis des millions d'années. Quelle force les maintient en mouvement ?
14. Ranger par ordre décroissant les objets selon leur tendance à rester au repos.



15. Tu trébuches vers l'avant lorsque le bus freine. Tu bascules vers l'arrière lorsque le bus démarre. Expliquer ces observations à l'aide du principe de l'inertie.
16. Lorsque tu pousses un chariot, il roule. Si tu relâches le chariot, il finit par s'arrêter. Est-ce que cette observation contredit la première loi de Newton ? Justifier.
17. La figure ci-contre montre la trajectoire circulaire d'une pierre attachée à une corde qui est tourbillonnée dans le sens des aiguilles d'une montre. Quel chemin la pierre poursuit-elle lorsque la corde casse ?

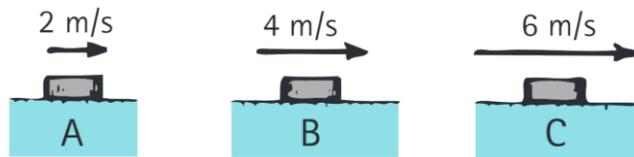


18. La figure ci-dessous montre un pendule. Lorsque la boule atteint le point le plus bas de sa trajectoire, le fil est coupé par une lame de rasoir tranchante. Quelle trajectoire la boule suivra-t-elle ?



19. Ton amie affirme qu'une enclume est plus facile à secouer dans l'espace intersidéral que sur la Terre. Es-tu d'accord ? Justifier.

20. Trois palets de hockey glissent sur la glace avec les vitesses indiquées. La résistance de l'air et le frottement sont négligeables. Ranger par ordre décroissant la force qui est nécessaire pour maintenir les palets en mouvement.



21. Une personne se trouve dans un bus qui roule à 100 km/h sur une autoroute horizontale et rectiligne. Elle tient un stylo dans ses mains comme illustré.



- Par rapport au bus, le stylo a une vitesse de 0 km/h, mais par rapport à la route sa vitesse horizontale vaut...
 - A. moins que 100 km/h
 - B. 100 km/h
 - C. plus que 100 km/h
 - Supposons que la personne lâche le stylo. Pendant sa chute, et par rapport à la route, le stylo a une vitesse horizontale de...
 - A. moins que 100 km/h
 - B. 100 km/h
 - C. plus que 100 km/h
 - Cela signifie que le stylo va toucher le sol...
 - A. derrière les pieds de la personne
 - B. à ses pieds, en dessous de sa main
 - C. devant les pieds de la personne
 - Par rapport à la personne, la façon dont le stylo tombe...
 - A. est la même que si le bus était à l'arrêt
 - B. dépend de la vitesse du bus
22. Tu joues à pile ou face dans un avion qui roule sur la piste d'un aéroport en ligne droite. Où la pièce de monnaie atterrit-elle par rapport à ta main si l'avion...
- A. se déplace à vitesse constante ?
 - B. ralentit pendant que la pièce est en l'air ?
 - C. accélère pendant que la pièce est en l'air ?

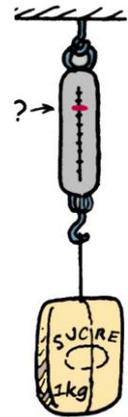


23. S'agit-il de la masse ou du poids ?

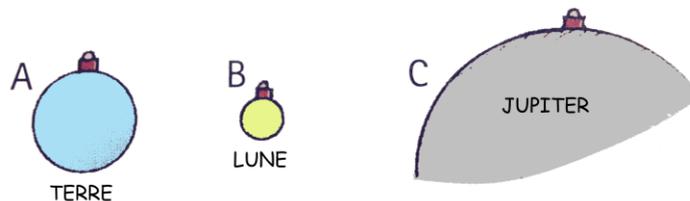
- a. Cette grandeur dépend uniquement du nombre et du type d'atomes dont le corps est constitué.
- b. Cette grandeur dépend de l'endroit où le corps se trouve.
- c. Cette grandeur est une mesure pour l'inertie d'un corps.
- d. Cette grandeur décrit la force avec laquelle un caillou lunaire est attiré par la Lune.

24. Un paquet de sucre de masse 1 kg est suspendu au crochet d'un dynamomètre.

- Quel corps tire le paquet de sucre vers le bas ?
- Comment appelle-t-on cette force ?
- Représenter cette force sur la figure (1 cm : 5 N)
- Calculer la valeur indiquée par le dynamomètre.
- Quelle serait la masse du paquet de sucre sur la Lune. Justifier.
- Calculer la valeur que le dynamomètre indiquerait sur la Lune, où l'intensité de la pesanteur ne vaut que 1,62 N/kg ?



25. Trois boîtes à outils de 100 kg se trouvent à la surface de la Terre (A), de la Lune (B) et de Jupiter (C). Ranger par ordre décroissant...



- les inerties des boîtes à outils.
- les poids des boîtes à outils.

26. Une fille a une masse de 45 kg.

- Calculer le poids de la fille sur la Terre.
- Quelle serait la masse de la même fille sur la surface de Jupiter, où l'intensité de la pesanteur vaut 25 N/kg.
- Calculer le poids de la fille sur Jupiter.

27. Quel matériel devrais-tu nécessairement emporter dans ton vaisseau spatial pour pouvoir mesurer la pesanteur sur la surface d'une planète inconnue ?

- Une balance à deux plateaux
- Une règle graduée
- Une horloge
- Un dynamomètre
- Un thermomètre
- Une masse marquée



28. Considérons l'expérience illustrée sur la figure ci-contre.

- Quel fil finit par casser en premier lorsque la main tire le fil inférieur de plus en plus fort vers le bas ? Justifier.
 - le fil supérieur
 - le fil inférieur
- Quel fil casse en premier lorsque la main tire le fil inférieur d'un coup sec ? Justifier.
 - le fil supérieur
 - le fil inférieur



2.2.4 Équilibre de forces

Un corps dont l'état de mouvement ne change pas (c'est-à-dire qui reste au repos ou en mouvement rectiligne uniforme) se trouve en **équilibre**. Selon le principe d'inertie, ceci est le cas si et seulement si la force résultante sur ce corps est nulle :

$$\text{Équilibre} \Leftrightarrow \vec{F}_{\text{res}} = \vec{0}$$



Exemples

1. Une masse suspendue à un ressort

- La masse subit son poids \vec{P} qui la tire vers le bas.
- Puisque la masse se trouve en équilibre, une autre force – orientée vers le haut et de même norme que le poids – doit agir sur la masse pour compenser le poids. En effet, le ressort allongé tire la masse vers le haut avec une force appelée tension du ressort \vec{T} . On a :

$$\vec{T} + \vec{P} = \vec{0} \quad \text{et donc} \quad T = P$$

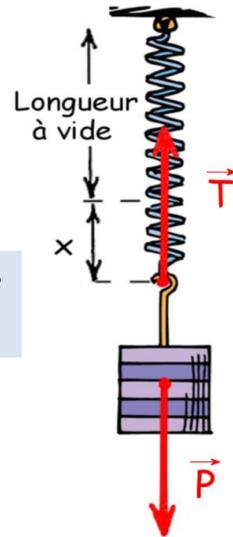
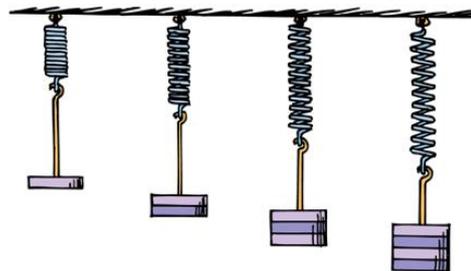
Tout ressort allongé ou comprimé exerce une force de rappel élastique appelée **tension du ressort** \vec{T} .

1. Point d'application : point de contact à l'extrémité du ressort.
2. Direction : suivant l'axe du ressort.
3. Sens : opposé à la déformation.
4. Norme : $T = k x$, où k est la raideur du ressort exprimée en N/m.

La tension du ressort est proportionnelle à l'allongement (ou la compression) x du ressort : $T \sim x$. Cette relation est appelée **loi de Hooke**.⁶

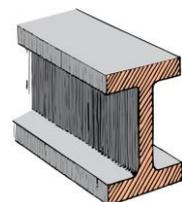
$$\text{raideur} \left(\frac{\text{N}}{\text{m}} \right) = \frac{\text{tension (N)}}{\text{allongement (m)}}$$

$$k = \frac{T}{x} = \text{constante}$$



Remarques

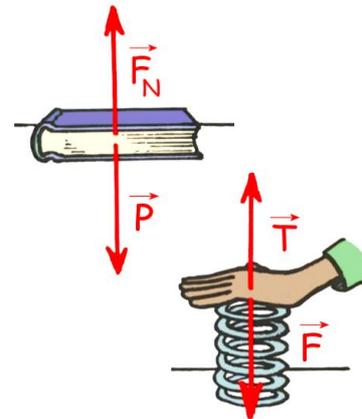
- La loi de Hooke est appliquée dans les dynamomètres pour mesurer la norme des forces.
- Si un corps élastique est allongé au-delà d'une certaine limite, il ne va plus reprendre sa forme initiale après l'action de la force. Le corps subit alors une **déformation durable**. Pour des forces qui dépassent cette **limite d'élasticité** du ressort, la loi de Hooke n'est plus valable.
- L'acier est un excellent matériau de construction. Grâce à sa grande raideur et ses propriétés élastiques, l'acier est utilisé pour la fabrication de poutres et de supports.



⁶ En l'honneur de Robert Hooke, éminent scientifique britannique, qui a formulé cette loi au 17^e siècle. Robert Hooke fut le premier à proposer une théorie ondulatoire de la lumière et le premier à décrire la cellule. Voilà pourquoi il est connu en tant que père de la microscopie.

2. Un livre sur une table

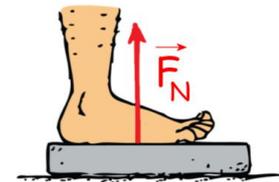
- Le poids \vec{P} du livre agit verticalement vers le bas.
- Une autre force – orientée vers le haut et de même norme que le poids - doit agir sur le livre pour compenser le poids. En comprimant un ressort avec la main, on sent que le ressort pousse la main vers le haut. Similairement, le livre « comprime » les atomes de la table. Ces atomes agissent comme des ressorts microscopiques en poussant le livre vers le haut. C'est donc la table qui pousse le livre vers le haut avec une force, appelée force de support (ou force normale) \vec{F}_N .



$$\vec{F}_N + \vec{P} = \vec{0} \quad \text{et donc} \quad F_N = P$$

Tout corps qui repose sur une surface subit de la part de celle-ci une **force de support** (ou **force normale**) \vec{F}_N . La force normale est toujours perpendiculaire à la surface et orientée vers le corps qui pousse contre la surface.

Une balance électronique mesure la norme de la force de support exercée sur une personne qui se trouve sur la balance. Lorsque la personne se trouve en équilibre sur une balance, la force de support a même norme que le poids de la personne.

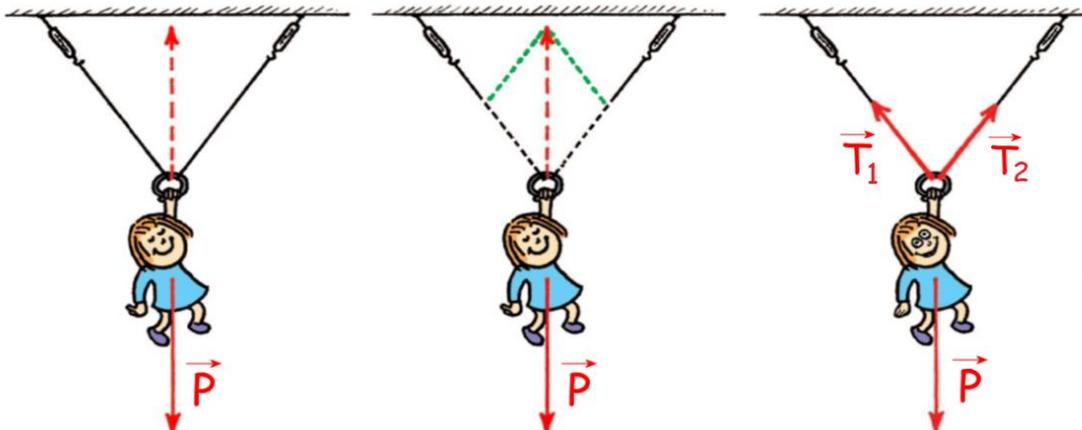
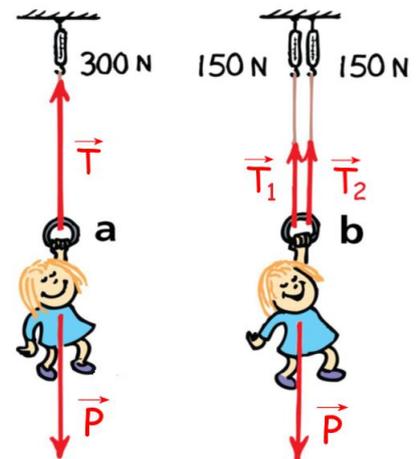


3. Une fille suspendue à une ou plusieurs cordes

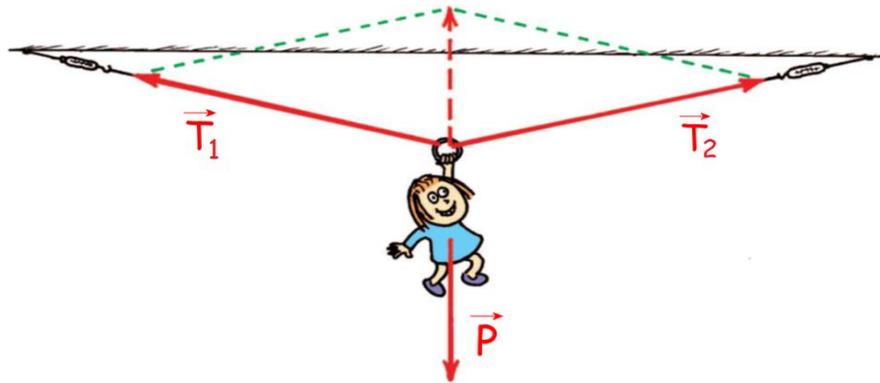
Pour que la fille de poids 300 N soit en équilibre, la somme des tensions dans les cordes doit également avoir une intensité de 300 N.

- Lorsque la fille est suspendue à une seule corde verticale, la norme de la tension dans la corde vaut 300 N.
- Lorsque la fille est suspendue à deux cordes verticales, la norme de la tension dans chaque corde vaut 150 N.

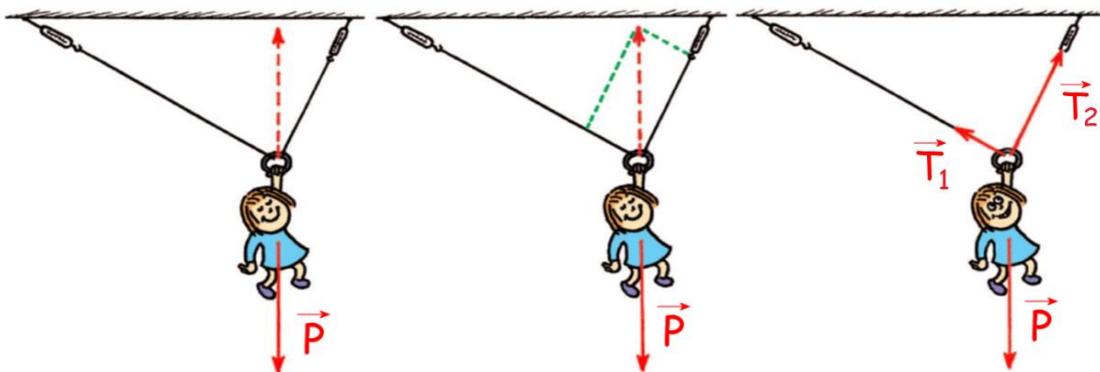
Pour déterminer les tensions des cordes lorsque celles-ci ne sont pas verticales, Il faut utiliser la méthode du parallélogramme :



- On représente un vecteur de même norme que \vec{P} , mais de sens opposé (pointillés). On décompose cette force en deux composantes parallèles aux cordes. Ces deux composantes représentent les tensions dans les cordes. On constate que la tension dans chaque corde est plus grande que la moitié du poids de la fille.
- Au fur et à mesure que l'angle entre les cordes augmente, les tensions dans les cordes augmentent aussi, de sorte que leur somme compense exactement le poids de la fille.



- Si les deux cordes sont inclinées à des angles différents, les tensions des deux cordes sont différentes. La tension dans la corde la moins inclinée par rapport à la verticale est plus grande.

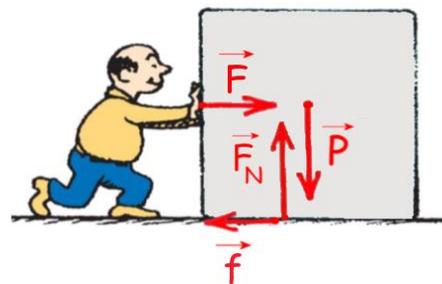


Dans tous les cas, la fille est en équilibre car la force résultante est nulle.

4. Une caisse poussée glisse à vitesse constante sur un sol horizontal

Quelles forces agissent sur la caisse ?

- Le poids \vec{P} agit verticalement vers le bas.
- La force normale \vec{F}_N agit verticalement vers le haut.
- La poussée \vec{F} agit dans le sens du mouvement.
- Puisque la caisse se trouve en équilibre, il doit y avoir une quatrième force orientée dans le sens opposé du mouvement pour que la force résultante sur la caisse soit nulle. Il s'agit de la force de frottement \vec{f} .



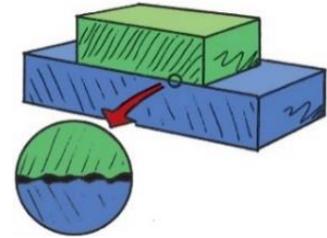
$$\vec{F}_{\text{res}} = \vec{P} + \vec{F}_N + \vec{F} + \vec{f} = \vec{0}$$

Les forces verticales (poids et force normale) ont même norme : $P = F_N$

Les forces horizontales (poussée et force de frottement) ont même norme : $F = f$

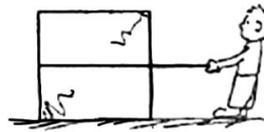
La **force de frottement** \vec{f} est une force d'interaction entre deux corps en contact qui glissent l'un sur l'autre (frottement cinétique) ou adhèrent l'un à l'autre (frottement statique). La force de frottement agit toujours dans le sens opposé du mouvement.

La force de frottement est principalement due aux irrégularités des surfaces de contact. Bien qu'une surface puisse paraître lisse à l'œil nu, elle présente des irrégularités microscopiques qui entravent le mouvement.



- Aucune force de frottement n'agit sur une caisse au repos sur un sol horizontal. Si on tire la caisse, on perturbe les surfaces de contact, ce qui crée du frottement. Si la force est insuffisante pour mettre la caisse en mouvement, c'est que la force de frottement statique la compense exactement. Par exemple, si on tire avec 70 N, la force de frottement statique vaut $f_s = 70$ N. Si on tire avec 100 N et que la caisse est sur le point de glisser, la force de frottement statique est maximale et vaut $f_{s,max} = 100$ N. Si on tire encore un peu plus fort, l'adhésion cède et la caisse commence à glisser. La force de frottement statique maximale est proportionnelle à la force pressante entre les surfaces, c'est-à-dire à la force normale F_N :

$$f_{s,max} = \mu_s \cdot F_N$$



La constante de proportionnalité μ_s est appelée **coefficient de frottement statique**.

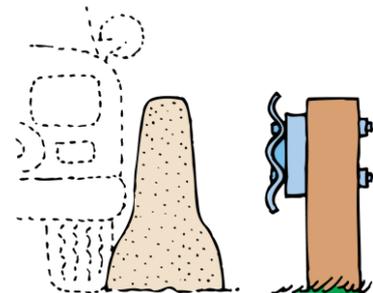
- Lorsque deux surfaces glissent l'une sur l'autre, la force de frottement cinétique f_c est proportionnelle à la force normale :

$$f_c = \mu_c \cdot F_N$$



La constante de proportionnalité μ_c est appelée **coefficient de frottement cinétique**.

Les coefficients de frottement μ_s et μ_c sont des paramètres sans unité et sont déterminés expérimentalement pour différents matériaux en contact. Des surfaces lisses offrent en général moins de frottement que des surfaces rugueuses. Par exemple, le frottement produit par un pneu en caoutchouc contre le béton d'un diviseur de route est plus important que le frottement produit par la carrosserie contre une glissière de sécurité.

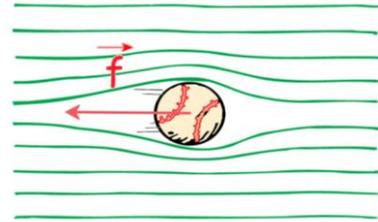


La force de frottement cinétique est légèrement inférieure à la force de frottement statique maximale ($\mu_c < \mu_s$). Il faut donc exercer plus de force pour mettre une caisse en mouvement que pour la maintenir en mouvement.



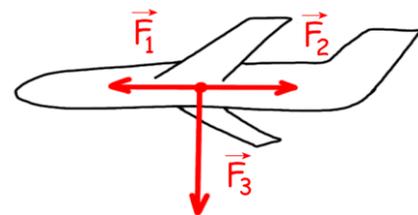
Remarques

- Le frottement cinétique ne dépend pas de la vitesse. Un corps qui glisse à faible vitesse subit la même force de frottement que le même corps glissant à vitesse élevée.
- Le frottement ne dépend pas de l'aire de la surface de contact. Ainsi, le frottement entre une brique donnée et le sol est le même, que la brique soit couchée horizontalement ou posée verticalement.⁷
- Du frottement agit également lorsqu'un corps traverse un **fluide** (liquide ou gaz). Contrairement au frottement entre des surfaces solides, le frottement dans les fluides dépend de la vitesse. Le frottement dans les liquides est appréciable, même à faible vitesse. Le frottement qui agit sur un corps qui se déplace dans l'air est appelé **résistance de l'air** ou **traînée**. Lors d'une promenade ou d'un jogging, on ne s'en rend pas compte, mais on la remarque à des vitesses plus élevées, par exemple lors d'une descente à vélo ou à skis.



■ As-tu compris ?

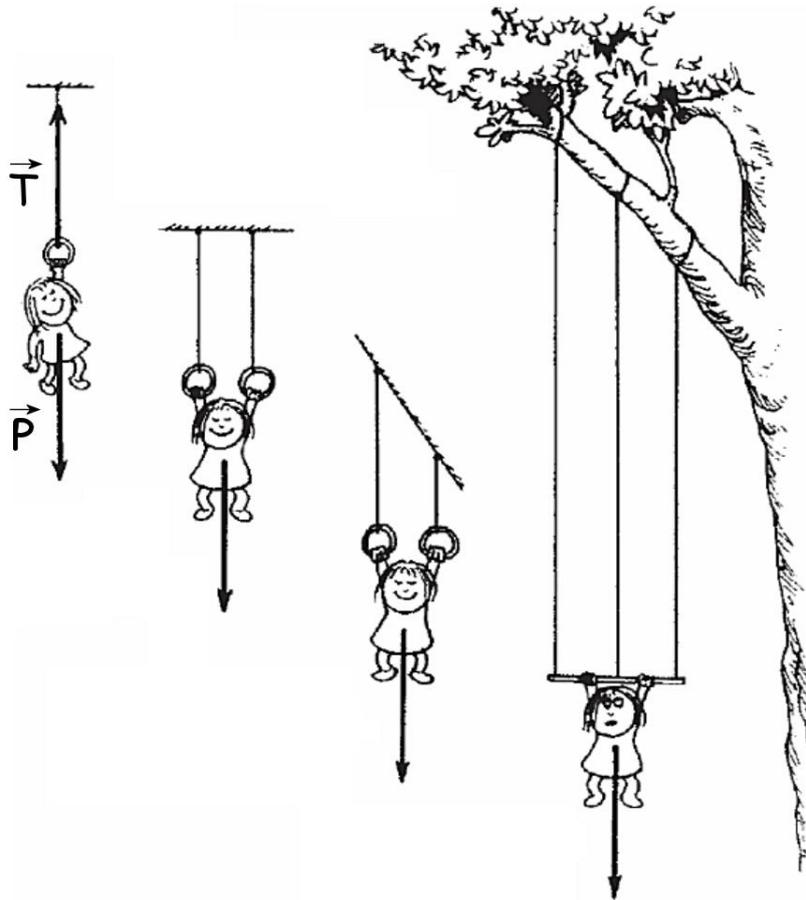
29. Que peux-tu dire au sujet du mouvement d'un corps en équilibre ?
30. Que peux-tu dire au sujet de la force résultante qui agit sur un corps en équilibre ?
31. Un objet peut-il être en équilibre lorsqu'il n'est soumis qu'à une seule force ? Justifier.
32. Un livre qui pèse 15 N repose sur une table horizontale. Quelle est la force de support exercée par la table sur le livre ? Quelle est la force résultante sur le livre ?
33. Un singe est suspendu à une liane verticale. Il est immobile. Quelles forces s'exercent sur le singe ? Comparer la norme de ces forces.
34. Lorsque tu te trouves sur une balance qui est posée sur un sol horizontal, que vaut l'intensité de la force de support exercée par la balance comparée à celle de ton poids ?
35. Une boule de bowling au repos est en équilibre. Peut-elle également être en équilibre lorsqu'elle se déplace ? Si oui, à quelle condition ? Sinon, expliquer pourquoi.
36. Lorsque tu pousses un chariot avec une force constante de 100 N et que le chariot roule alors à vitesse constante, que vaut la force de frottement qui agit sur le chariot ?
37. Un avion vole en MRU à une altitude constante de 10 km.
 - a. Deux forces horizontales agissent sur l'avion. La première est la poussée motrice \vec{F}_1 . Identifier \vec{F}_2 .
 - b. Comparer la norme de ces deux forces, en justifiant.
 - c. Le poids $\vec{P} = \vec{F}_3$ de l'avion agit verticalement vers le bas. L'avion doit subir une quatrième force \vec{F}_4 . Pourquoi ?
 - d. Représenter \vec{F}_4 sur la figure.



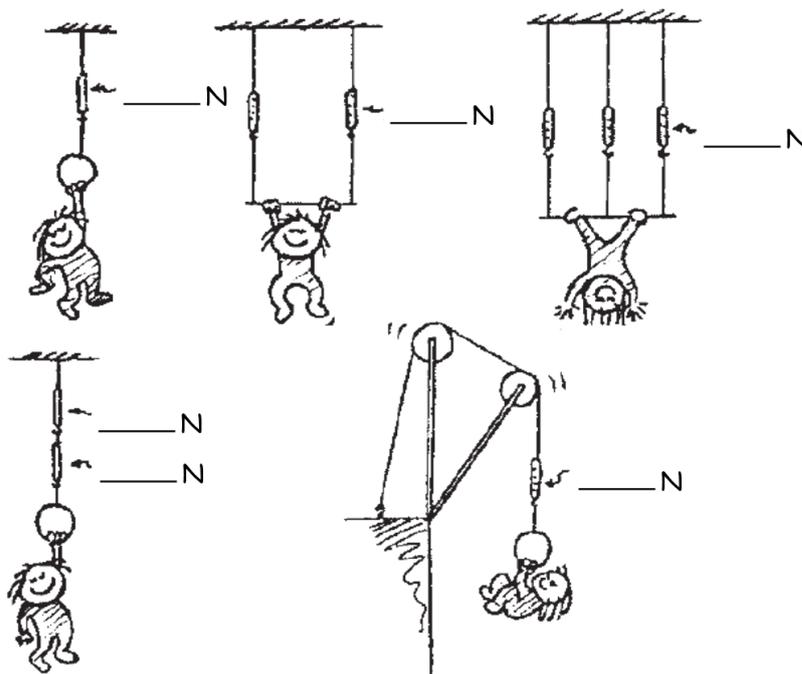
⁷ Une surface de contact plus grande répartit mieux le même poids de la brique, réduisant ainsi la *pression* exercée au niveau de la surface. Bien que le réchauffement et l'usure des surfaces sont réduits, la force de frottement reste inchangée.

38. Lorsqu'une balle est lancée verticalement vers le haut, elle s'immobilise momentanément au sommet de sa trajectoire. Est-elle en équilibre pendant ce bref instant ? Expliquer.

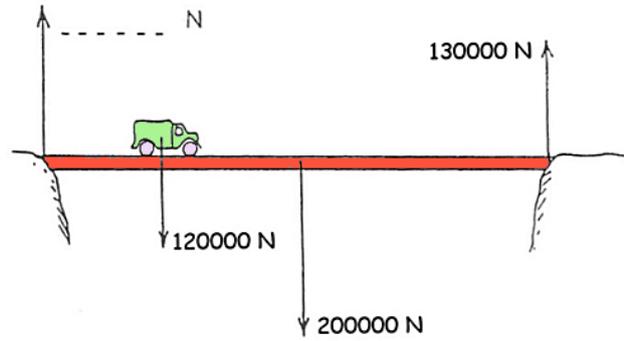
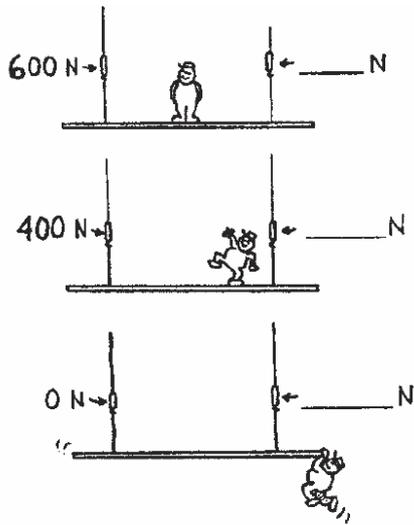
39. Représenter les tensions dans les cordes.



40. La fille qui a un poids de 300 N se trouve en équilibre. Donner la valeur indiquée par le dynamomètre dans chaque cas.

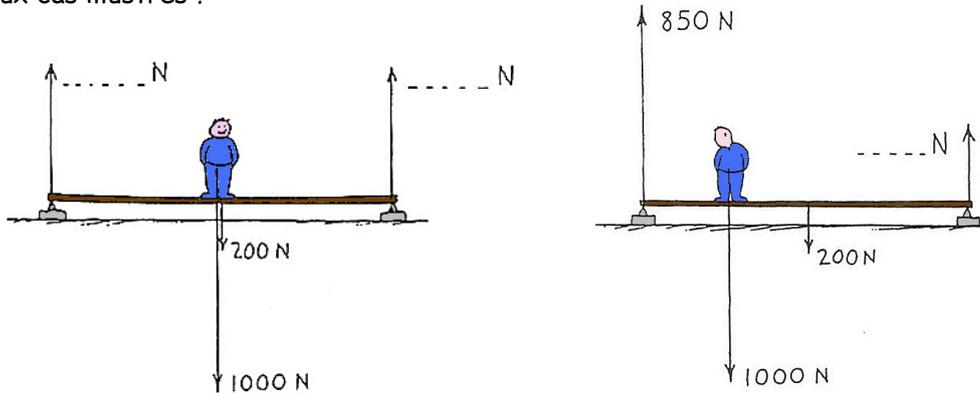


41. Figure gauche : Indiquer à chaque fois la mesure du dynamomètre.

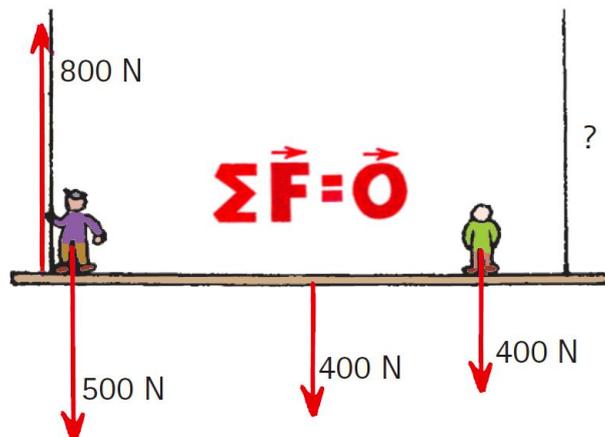


42. Figure droite : Avec quelle force de support le pont est-il soutenu à l'extrémité gauche à l'instant illustré ? Comment évoluent les normes des deux forces de support lorsque la voiture roule vers la droite sur le pont ?

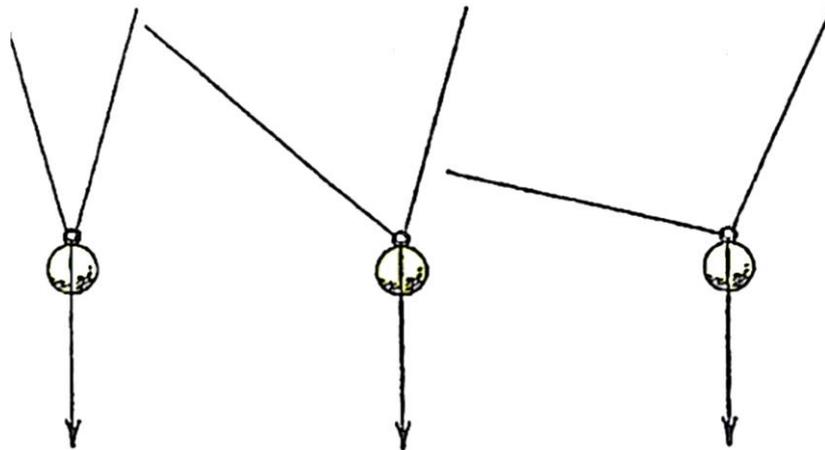
43. Un homme qui pèse 1000 N se trouve sur une planche qui a un poids de 200 N. La planche repose des deux côtés sur des balances. Quelles valeurs les balances indiquent-elles dans les deux cas illustrés ?



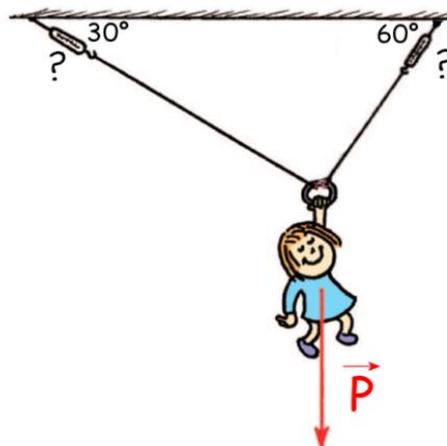
44. Deux peintres se trouvent sur une planche d'un échafaudage de peinture. Calculer la norme de la tension dans la corde gauche et représenter le vecteur tension sur la figure.



45. Construire les vecteurs des tensions dans les fils.



46. Les deux bouts de corde font un angle droit. Calculer la norme des tensions dans les deux cordes.



47. Selon la loi de Hooke, l'allongement d'un ressort est directement proportionnel(le) à

- A. la masse du ressort.
- B. la longueur du ressort.
- C. la tension élastique du ressort.

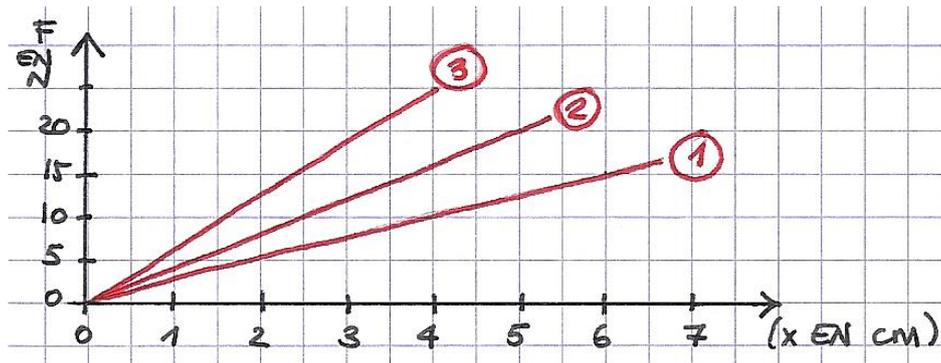
48. Une branche d'un arbre obéit à la loi de Hooke. Si une masse de 20 kg est suspendue à son extrémité, la branche s'abaisse de 10 cm. Si une masse de 60 kg est suspendue au même endroit, de combien la branche va-t-elle s'abaisser ?

49. Un ressort s'allonge de 6 cm lorsqu'on y accroche une masse de 3 kg. Quel sera l'allongement du ressort si une masse de 5 kg y est suspendue ? (On suppose que la limite d'élasticité n'est pas atteinte).

50. Un ressort est allongé de 2 cm par une force de 1 N.

- a. Déterminer la raideur du ressort.
- b. De combien le ressort s'allonge-t-il si on y applique une force de 4,5 N ?
- c. Quelle force faut-il appliquer pour allonger le ressort de 5 cm ?

51. Voici les caractéristiques de trois ressorts différents :



- Lequel des ressorts est le plus raide ? Le moins raide ? Justifier sans calcul.
- Calculer les raideurs des trois ressorts.

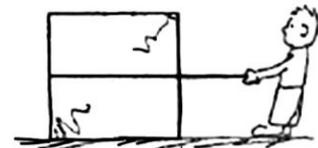
52. L'histoire d'une caisse.

- Une caisse se trouve au repos. Que peut-on dire au sujet de la force résultante sur la caisse ?



- Un garçon exerce une force de traction sur la caisse. Cette force est néanmoins insuffisante pour mettre la caisse en mouvement.

- Que peut-on dire au sujet de la force résultante sur la caisse ?
- Représenter toutes les forces qui s'exercent sur la caisse.



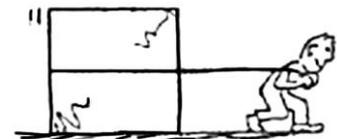
- Le garçon tire plus fort et la caisse est mise en mouvement.

- Que peut-on dire au sujet de la force résultante sur la caisse ?
- Représenter les forces sur le schéma.
- Que peut-on dire de l'état de mouvement de la caisse dans cette phase ?



- Le garçon tire désormais de façon que la caisse se déplace à vitesse constante.

- Que peut-on dire au sujet de la force résultante sur la caisse ?
- Représenter les forces sur le schéma.



2.3 La deuxième loi de Newton

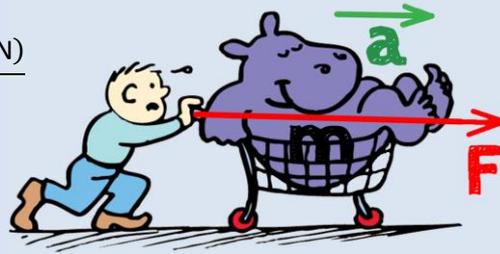
Galilée a défini l'accélération comme étant la variation de la vitesse par unité de temps. Mais comment une accélération est-elle produite ? Selon Newton, la cause de toute accélération est une force résultante. Si une force résultante agit sur un corps, alors son état de mouvement change. Le corps accélère suivant la direction et dans le même sens que la force résultante, et ce façon d'autant plus importante que sa masse (son inertie) est petite.

Principe fondamental de la dynamique (2^e loi de Newton)

L'accélération d'un corps est proportionnelle à la force résultante qui agit sur le corps et inversement proportionnelle à la masse du corps.

$$\text{accélération} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = \frac{\text{force résultante (N)}}{\text{masse (kg)}}$$

$$a = \frac{F_{\text{res}}}{m}$$



Exemples

1. Dans les exemples illustrés ci-dessous, des briques sont accélérées par une force. Les valeurs de l'accélération dépendent de la norme de la force et de la masse des briques.



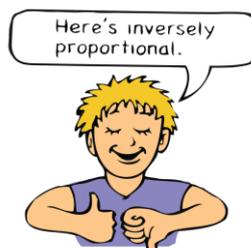
$$a = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg}} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



$$a = \frac{1 \text{ N}}{2 \text{ kg}} = \frac{1}{2} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



$$a = \frac{1 \text{ N}}{3 \text{ kg}} = \frac{1}{3} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



$$a = \frac{2 \text{ N}}{1 \text{ kg}} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



$$a = \frac{2 \text{ N}}{2 \text{ kg}} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

2. Une voiture a une masse de 1 t. L'accélération produite par une force motrice résultante de 2000 N vaut

$$a = \frac{F_{\text{res}}}{m} = \frac{2000 \text{ N}}{1000 \text{ kg}} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Si la force résultante vaut 4000 N, l'accélération de la voiture vaut le double, à savoir $4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Conséquences du PFD

1. Définition de l'unité de force : $[F] = [m] \cdot [a] = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \text{N}$

1 newton (1 N) est la norme d'une force qui accélère une masse de 1 kg de 1 m/s².

2. Galilée avait démontré que tous les corps en chute libre subissent la même accélération, indépendamment de leur masse. Le principe fondamental permet d'expliquer cette observation. En effet, la seule force qui agit sur un corps en chute libre est son poids. Selon la 2^e loi de Newton :

$$a = \frac{F_{res}}{m} = \frac{P}{m} = \frac{mg}{m} = g$$

L'accélération de chute libre est indépendante de la masse du corps.

3. Double signification de $g = \frac{P}{m}$:

- L'intensité de la pesanteur (en Europe centrale) indique le poids d'un corps de 1 kg :
 $g = 9,81 \text{ N/kg}$
- L'accélération de chute libre (en Europe centrale) d'un corps indique sa variation de vitesse par unité de temps :

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

4. Si la force résultante sur un corps est nulle, alors son accélération est nulle. Cela signifie que le corps reste soit au repos soit en mouvement rectiligne uniforme. Le principe d'inertie est donc un cas particulier du principe fondamental.

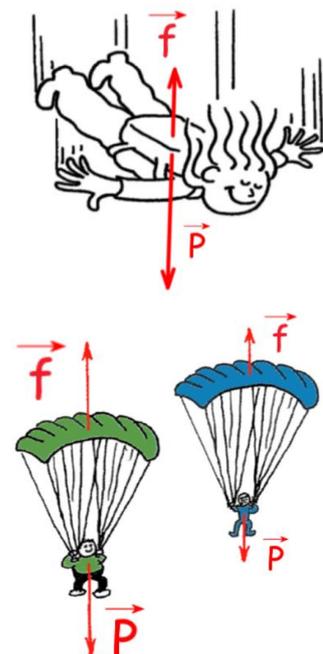
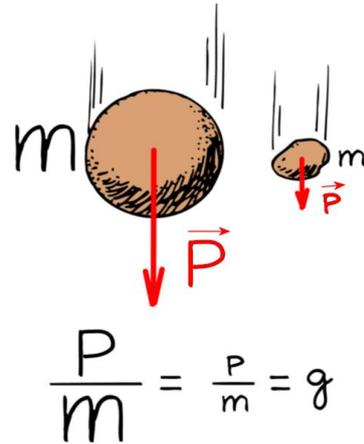
5. Si la résistance de l'air f n'est pas négligeable, l'accélération de chute est inférieure à g :

$$a = \frac{F_{res}}{m} = \frac{P - f}{m} = \frac{mg - f}{m} = g - \frac{f}{m} < g$$

Voilà pourquoi une plume et une pièce de monnaie tombent avec des accélérations identiques dans le vide, mais avec des accélérations différentes dans l'air. Dans l'air, la plume accélère moins parce que la résistance de l'air n'est pas négligeable devant le poids de la plume et diminue considérablement la force résultante qui agit sur la plume.

La résistance de l'air dépend à la fois de la vitesse et de la surface de section du corps qui tombe. Si la vitesse de chute augmente, la résistance de l'air augmente également jusqu'à ce qu'elle compense exactement le poids du corps : $f = mg$.

À partir de ce moment, la force résultante sur le corps est nulle et le corps n'accélère plus. Le corps tombe alors avec une vitesse constante, appelée **vitesse terminale**. Plus la masse du corps est grande, plus la vitesse terminale est élevée (à surface de section constante). Par exemple, le parachutiste vert descend à une vitesse terminale plus grande que le parachutiste bleu.



■ **As-tu compris ?**

53. Expliquer pourquoi la 1^{ère} loi de Newton peut être considérée comme un cas particulier de la 2^{ème} loi de Newton.
54. Lorsqu'une force résultante agit sur un objet, son accélération dépend...
- de la vitesse initiale de l'objet
 - de la masse de l'objet
 - du volume de l'objet
 - du poids de l'objet
55. Une voiture est poussée et subit une certaine accélération. Lorsque la voiture est poussée avec une force résultante deux fois plus grande et que sa masse est augmentée d'un facteur quatre, son accélération devient
- 4 fois plus petite
 - la moitié
 - le double
 - identique
56. Si une voiture peut accélérer de 2 m/s^2 , quelle accélération peut-elle atteindre lorsqu'elle tire une remorque de même masse qu'elle ?
57. Quelle force résultante doit agir sur un avion afin de l'accélérer de $1,5 \text{ m/s}^2$?
58. Quelle est la force résultante sur une pomme de 200 g lorsque tu la tiens au-dessus de ta tête ? Quelle est la force résultante sur la pomme après que tu l'as lâchée ?
59. Une voiture de course roule sur une route rectiligne avec une vitesse constante de 200 km/h. Quelle force résultante agit sur la voiture ?
60. Un homme de 100 kg roule sur son skateboard à une vitesse de 9,0 m/s quand il entre en collision avec une botte en foin et s'arrête en 0,2 s.
- Calculer la décélération de l'homme.
 - Calculer la norme de la force que subit l'homme lors de l'impact.
61. Une personne de masse totale 80 kg est accéléré par une poussée.

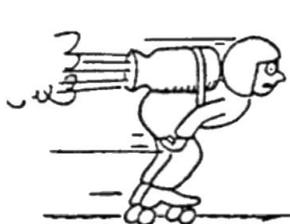


TABLEAU 1

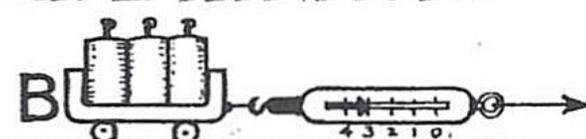
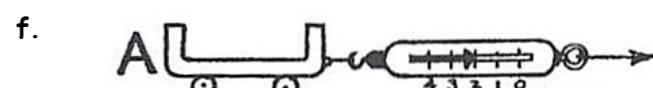
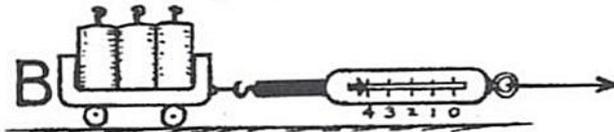
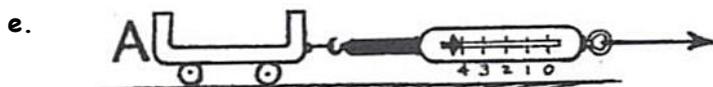
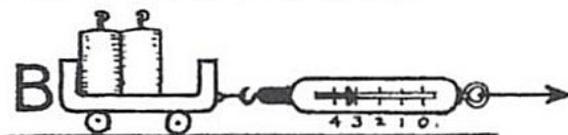
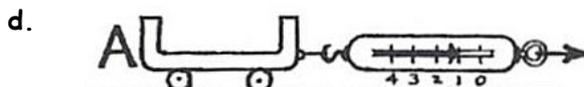
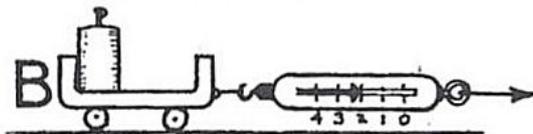
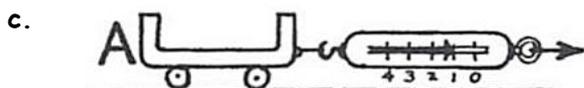
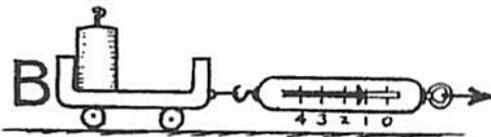
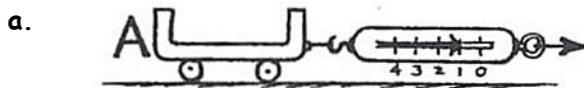
FORCE	ACCÉLÉRATION
100 N	
200 N	
	10 m/s^2

TABLEAU 2

FORCE	ACCÉLÉRATION
50 N	
100 N	
200 N	

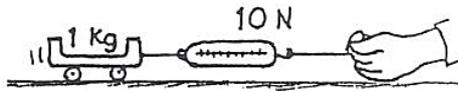
- Remplir le tableau 1 en négligeant le frottement.
- Remplir le tableau 2 en considérant une force de frottement constante de 50 N.

62. Les chariots A et B ci-dessous ont chacun une masse de 1 kg. Les masses marquées sont toutes de 1 kg. L'unité des dynamomètres est le newton. Déterminer lequel des deux chariots subit la plus grande accélération ?

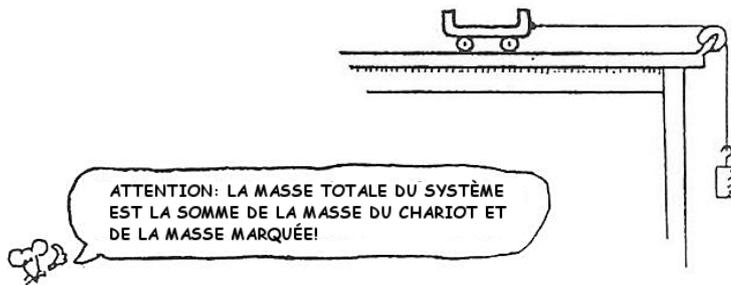


63. Accélération d'un chariot

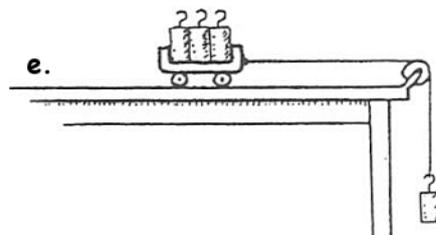
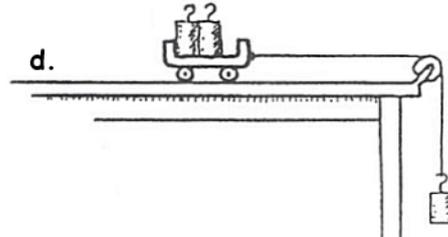
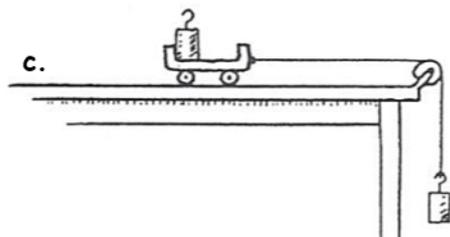
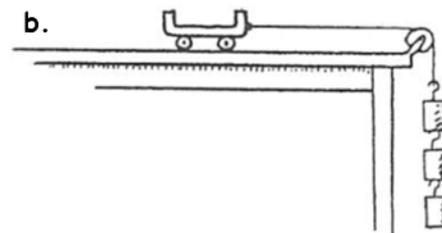
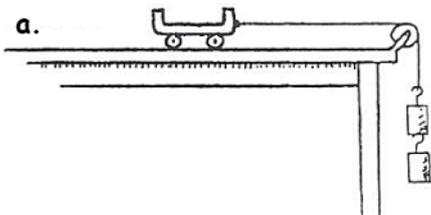
1. Calculer l'accélération du chariot illustré ci-dessous.



2. Une masse de 1 kg est reliée au chariot par l'intermédiaire d'un fil qui passe par une poulie tel qu'illustré. Calculer l'accélération du chariot.



3. Calculer l'accélération du chariot dans les cas suivants. Les masses marquées ont toutes 1 kg.

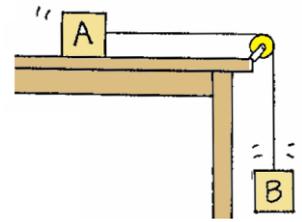


64. Sur une table horizontale sans frottement, le bloc A est accéléré par une force exercée par un fil attaché au bloc B.

1. A et B ont la même masse m et la masse du fil est négligeable.

Encercler les réponses correctes :

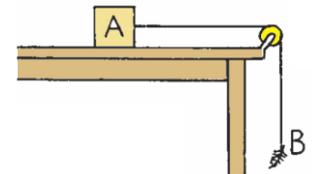
- a. La masse du système A+B est égale à (m) $(2m)$.
- b. La force qui accélère le système est le poids de (A) (B) $(A + B)$.
- c. Le poids de B est égal à $(mg/2)$ (mg) $(2mg)$.
- d. L'accélération de A + B vaut (moins que g) (g) (plus que g).
- e. Utiliser la deuxième loi de Newton pour montrer que l'accélération de A+B est une fraction de g .



2. Supposons que A est toujours un bloc, mais B est une plume.

L'accélération de A + B est dans ce cas

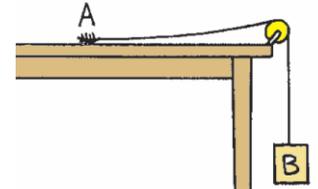
- presque nulle
- presque g



3. Supposons maintenant que A est une plume et que B est un bloc.

Dans ce cas, l'accélération de A + B est

- presque nulle
- presque g

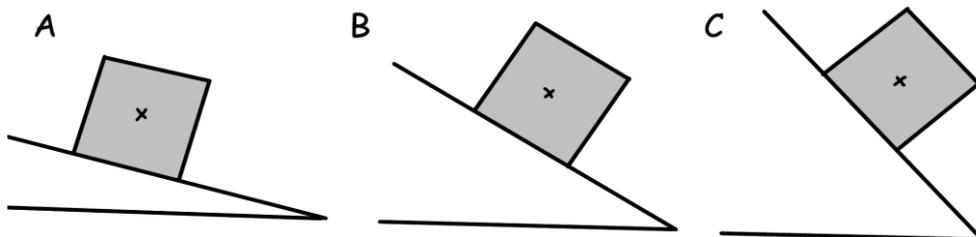


4. En résumé, on constate qu'à chaque fois où le poids d'un corps cause l'accélération de deux corps, le domaine des accélérations possibles est entre

- 0 et g
- 0 et infini
- g et infini

65. Un bloc de masse $m = 2 \text{ kg}$ se trouve sur les trois plans inclinés ci-dessous.

Tout frottement est négligé.



a. Représenter sur les schémas A, B et C le poids du bloc (1 cm correspond à 5 N), ainsi que la composante tangentielle (composante parallèle au plan incliné) du poids.

b. Plus la pente est raide, plus la norme de la composante tangentielle du poids...

- A. devient grande
- B. devient petite
- C. reste identique

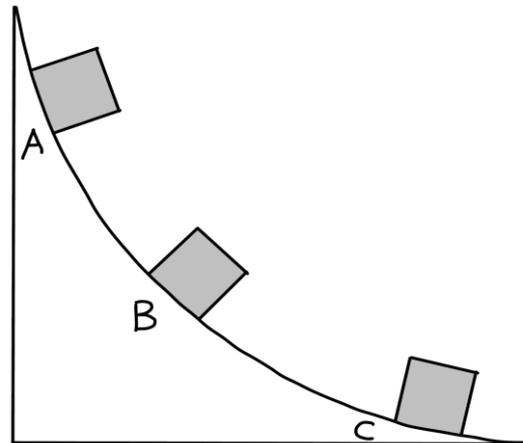
c. Décrire le mouvement des blocs (le frottement est négligé).



- d. Déterminer l'accélération du bloc en fonction de l'angle d'inclinaison du plan incliné. Est-ce qu'elle dépend de la masse du bloc ?

66. Le même bloc glisse le long d'un toboggan.

- Représenter sur le schéma le poids du bloc (1 cm correspond à 10 N) ainsi que les composantes tangentielles du poids en A, B et C.
- En quel point la norme de la composante tangentielle du poids est-elle la plus grande ?
- Le bloc est-il uniformément accéléré ?
- Ranger par ordre décroissant les accélérations du bloc en A, B et C.

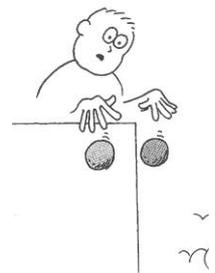


67. Pourquoi une feuille de papier tombe-t-elle moins vite que la même feuille froissée en forme de boule ?

68. Quelle force résultante agit sur une balle de masse 1 kg qui tombe et qui subit une résistance de l'air de 2 N ?

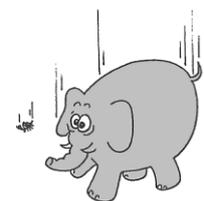
69. Lorsque Galilée a laissé tomber deux boules de la tour penchée de Pise, la résistance de l'air n'était pas vraiment négligeable. Dans ce cas, si les deux boules sont de même taille mais l'une est en métal et l'autre en bois, laquelle des deux boules touchera le sol en premier ?

- La boule en métal
- La boule en bois
- Les deux en même temps
- Le résultat n'est pas prévisible



70. Qui subit une résistance de l'air plus grande lors d'une chute à la vitesse terminale ? Justifier.

- La plume
- L'éléphant
- Identique pour les deux



71. Qui subit une résistance de l'air plus grande lors d'une chute à la vitesse terminale ?

- Une feuille de papier.
- La même feuille de papier froissée en forme de boule.

Justifier le choix.

72. Vrai ou faux ? Justifier.

« Avant qu'une balle qui tombe n'atteigne sa vitesse terminale, sa vitesse augmente, tandis que son accélération diminue. »

73. Lorsqu'on lâche une balle de Ping-Pong et une balle de golf simultanément à hauteur d'épaules, les deux balles atteignent le sol à peu près au même instant. Si, en revanche, on lâche les deux balles du haut d'une échelle, la balle de golf va toucher le sol en premier. Pourquoi ?

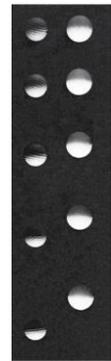
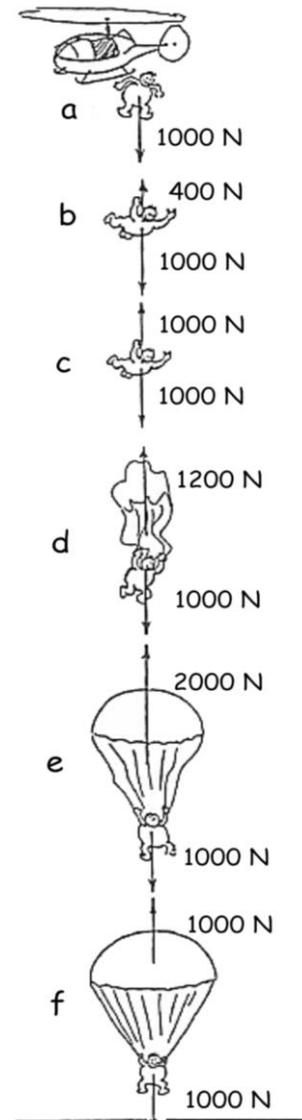
74. Lorsque la résistance de l'air est nulle, une balle lancée verticalement vers le haut avec une certaine vitesse initiale va repasser par le point de lancement avec la même vitesse dans l'autre sens. Lorsque la résistance de l'air n'est pas négligeable, la balle va repasser

- A. plus rapidement
- B. plus lentement
- C. à la même vitesse

75. Un parachutiste de masse 100 kg saute d'un hélicoptère. Différentes phases de la chute sont illustrées.

1. Calculer pour chaque phase l'accélération du parachutiste.
2. Encercler les propositions correctes.

- Lorsque la vitesse du parachutiste est minimale, son accélération est (minimale) (maximale).
- En quelle(s) position(s) le parachutiste subit-il une accélération vers le bas ? (a) (b) (c) (d) (e) (f)
- En quelle(s) position(s) le parachutiste subit-il une accélération vers le haut ? (a) (b) (c) (d) (e) (f)
- Lorsque le parachutiste subit une accélération vers le haut, sa vitesse est dirigée vers (le bas) (le haut).
- En quelle(s) position(s) la vitesse du parachutiste est-elle constante ? (a) (b) (c) (d) (e) (f)
- En quelle(s) position(s) le parachutiste se déplace-t-il à une vitesse terminale ? (a) (b) (c) (d) (e) (f)
- En quelle(s) position(s) sa vitesse terminale est-elle maximale ? (a) (b) (c) (d) (e) (f)
- Si le poids du parachutiste était plus grand, sa vitesse terminale serait (plus petite) (égale) (plus grande).



2.4 La troisième loi de Newton

Principe de l'action et de la réaction (3^e loi de Newton)

Si un corps A exerce une force sur un corps B (action $\vec{F}_{A/B}$), alors le corps B exerce une force sur le corps A (réaction $\vec{F}_{B/A}$).

Les deux forces ont même norme et même direction, mais sont de sens opposés.



Une interaction consiste toujours en une paire de forces qui agissent sur **deux corps différents**. Les deux forces apparaissent et disparaissent en même temps. Il est donc arbitraire laquelle des deux forces on appelle « action » et laquelle on appelle « réaction ».



Exemples

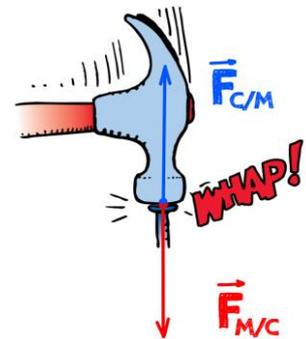
- On frappe un clou avec un marteau :

Action : Le marteau exerce une force $\vec{F}_{M/C}$ sur le clou.

Réaction : Le clou exerce aussi une force $\vec{F}_{C/M}$ sur le marteau.

En effet, cette force freine le marteau lors de l'impact.

Les deux forces ont la même intensité et sont de sens opposés.

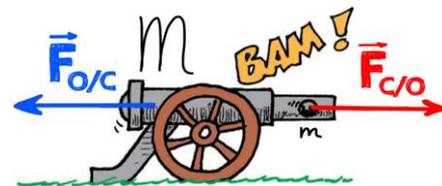


- Un canon tire un obus :

Action : Le canon exerce une poussée $\vec{F}_{C/O}$ sur l'obus.

Réaction : L'obus exerce une poussée $\vec{F}_{O/C}$ sur le canon. C'est le recul du canon !

Les deux forces ont la même intensité et sont de sens opposé. En revanche, les accélérations des deux corps en interaction sont très différentes car leurs masses sont différentes :



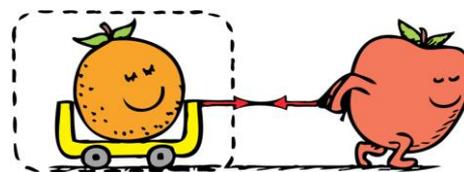
$$\text{Accélération de l'obus : } \frac{F}{m} = a$$

$$\text{Accélération du canon : } \frac{F}{M} = a$$

Remarque

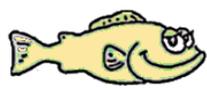
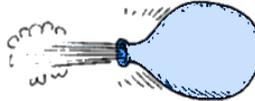
Comme les forces de l'action et de la réaction sont opposées et de même norme, pourquoi ne se neutralisent-elles pas ?

Considérons le système de l'orange. Une force est exercée par la pomme, qui est extérieure au système. D'après le principe fondamental, l'orange accélère vers la droite. Le fait que l'orange exerce simultanément une force sur la pomme influence la pomme, mais pas l'orange. On ne peut pas annuler une force sur l'orange par une force qui agit sur la pomme, extérieur au système.



■ **As-tu compris ?**

76. Identifier pour chacune des interactions la force de réaction.

 <p>a. Le pouce tire l'index.</p>	 <p>b. Le pied frappe la balle.</p>	 <p>c. La Terre attire la Lune.</p>
 <p>d. Les pneus poussent la route vers l'arrière.</p>	 <p>e. Les ailes poussent l'air vers le bas.</p>	 <p>f. Le poisson propulse l'eau vers l'arrière.</p>
 <p>g. L'homme tire le ressort.</p>	 <p>h. Le ballon propulse l'air vers l'arrière.</p>	 <p>i. La fusée propulse le gaz de combustion vers l'arrière.</p>

77. Pour chacune des interactions, identifier les forces de réaction.

- La pale d'un hélicoptère pousse l'air vers le bas.
- Un aimant attire un clou en acier.
- Tu frappes une balle de tennis avec ta raquette.

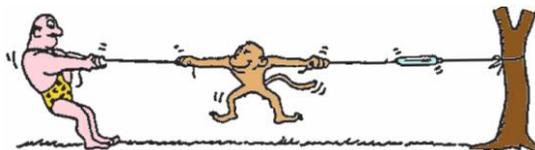
78. Pourquoi une raquette ralentit-elle au moment de frapper la balle ?

79. Pourquoi un grimpeur de corde tire la corde vers le bas quand il veut grimper vers le haut ?

80. Lorsqu'une voiture et un camion subissent une collision frontale, lequel des deux véhicules subit la plus grande force ? Lequel est freiné plus brusquement ?



81. Identifier six paires de forces action-réaction sur la figure.



82. Une pomme tombe d'un arbre.

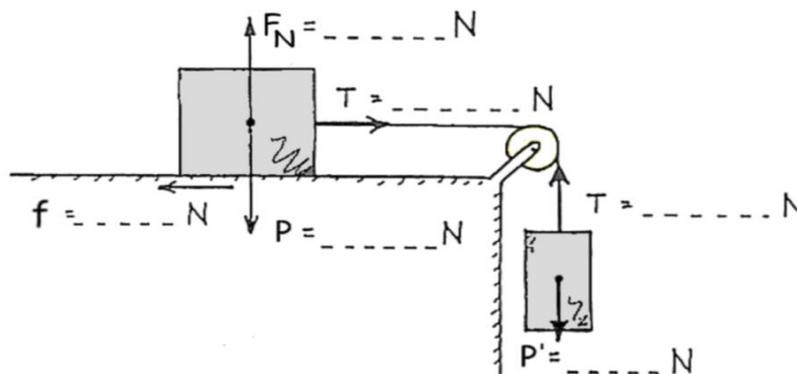
- Quelle est la force responsable de cet effet ?
- Quel corps exerce cette force ?
- Identifier la force de réaction.
- Laquelle des deux forces a une norme plus grande ?
- Pourquoi l'effet de cette réaction n'est-il pas observable ?



83. Une pomme d'un poids de 1 N repose dans la main de Nelly. La main de Nelly supporte la pomme avec une force de support \vec{F}_N , qui agit dans le sens opposé de \vec{P} . Puisque la pomme est au repos, la force résultante sur la pomme est nulle. \vec{P} et \vec{F}_N sont donc de même norme : $P = F_N$



- Nous (pouvons) (ne pouvons pas) dire que \vec{P} et \vec{F}_N forment une paire action-réaction. En effet, l'action et la réaction agissent toujours sur (un même corps) (deux corps différents), et dans ce cas, \vec{P} et \vec{F}_N agissent (les deux sur la pomme) (sur deux corps différents).
 - Si nous appelons action « la Terre attire la pomme vers le bas », alors la réaction est (la pomme attire la Terre vers le haut) (\vec{F}_N , la force de support que la main de Nelly exerce sur la pomme vers le haut).
 - En résumé, nous voyons que \vec{P} et \vec{F}_N sont opposées et de même norme...
 - et forment une paire action-réaction
 - mais ne forment pas une paire action-réaction
 - Une autre paire de forces est \vec{F}_N [montrée sur le dessin] et la force pressante que la pomme exerce sur la main de Nelly [pas indiquée]. Cette paire de forces...
 - est une paire action-réaction
 - n'est pas une paire action-réaction
 - Supposons que Nelly pousse la pomme vers le haut avec une force de 2N. Comparée à P , F_N est (identique) (le double) (ni identique, ni le double). La pomme (est au repos) (accélère vers le haut).
 - Lorsque Nelly descend sa main rapidement de sorte qu'il n'y a plus de contact entre la main et la pomme, F_N est (nulle) (deux fois plus grande P) et la force résultante sur la pomme est (nulle) (égale à P).
84. Un bloc de masse 10 kg se trouve sur une surface horizontale et est relié par un fil à un autre bloc de masse 5 kg (voir figure). Le frottement entre le bloc et la surface est suffisant pour garder le système en équilibre.



3 Énergie

L'énergie est une notion omniprésente, en physique et au-delà. On en parle souvent dans les médias et tout le monde en a une idée intuitive. Néanmoins, il est difficile de saisir de quoi il s'agit exactement.

L'énergie désigne la capacité de créer un changement. Sans énergie, il ne se passe rien !

L'énergie est indispensable à toute sorte de développement. En particulier, il faut de l'énergie pour produire du mouvement, de la chaleur, du rayonnement, de l'électricité. Les réactions chimiques sont possibles grâce à l'énergie des réactifs et/ou du milieu réactionnel. La vie a pu se développer sur Terre grâce à l'énergie du rayonnement solaire.



Mais comment peut-on mesurer cette « capacité » si importante au fonctionnement de la nature ? Pour tenter de répondre à cette question, nous allons d'abord étudier une grandeur liée : le **travail**.

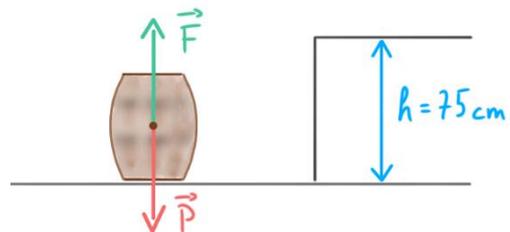
3.1 Le travail d'une force

3.1.1 Introduction

Imaginons qu'on veuille monter un tonneau sur une table haute de 75 cm. Si le tonneau a une masse de 80 kg, difficile d'y arriver tout seul. On peut demander un coup de main à un copain, ou bien on peut utiliser une planche inclinée (p.ex. d'une longueur de 3 m) et faire rouler le tonneau par-dessus. Analysons les deux situations en termes de force et de déplacement :

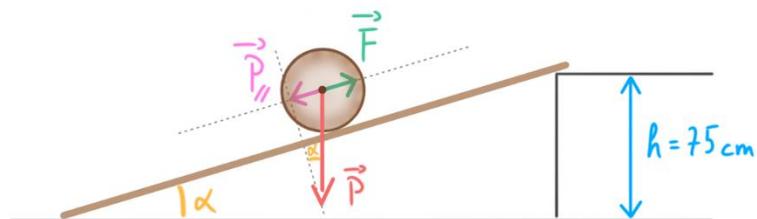
1. Mains nues

- Equilibre de force : $F = P = mg$
- déplacement : h
- produit « force · déplacement » : $F \cdot h = mgh$



2. Planche inclinée

- Equilibre de force :
$$F = P_{//} = mgsin\alpha$$
- déplacement : $s = \frac{h}{sin\alpha}$
- produit « force · déplacement » : $F \cdot s = mgsin\alpha \cdot \frac{h}{sin\alpha} = mgh$



Dans le deuxième cas, l'intensité de la force nécessaire est plus faible, mais on doit exercer cette force sur un déplacement plus grand. Si on avait pris une planche de 4 m, l'intensité de la force nécessaire serait encore plus faible, mais le déplacement encore plus grand. Au final, peu importe la longueur de la planche utilisée, on constate que le produit « force · déplacement » reste le même pour un même travail effectué, à savoir monter le tonneau sur la table.

Cette expérience suggère que le produit « force · déplacement » joue un rôle important en mécanique.

3.1.2 D'une définition simple

Le produit « force · déplacement » permet de quantifier l'effort de déplacement. On appelle ce produit le **travail de la force**.

Lorsqu'une force constante \vec{F} s'exerce dans le même sens que le déplacement s d'un corps, on dit que la force effectue un **travail** donné par :

travail de la force = force · déplacement

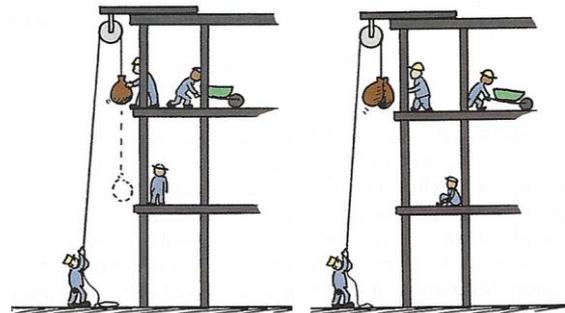
$$W = F \cdot s$$

Unité SI : le **joule (J)** avec $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$



Exemple : Un ouvrier qui monte une charge effectue un travail de levage sur cette charge.

- Si la charge est montée deux fois plus haut, le travail effectué est deux fois plus grand parce que le déplacement est deux fois plus long.
- Si on soulève deux sacs au lieu d'un seul, le travail effectué est deux fois plus grand parce que la force nécessaire est deux fois plus intense.



Attention

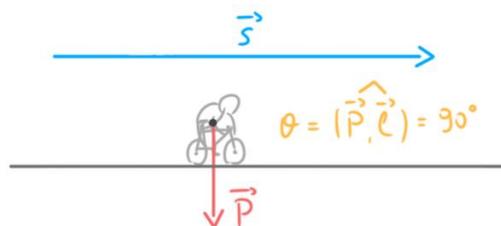
Le travail au sens physique n'est pas lié à la sensation de fatigue. En effet, lorsqu'on pousse contre un mur, on ressent vite une fatigue musculaire⁸, mais aucun travail n'est effectué sur le mur, puisque le déplacement du mur est nul.



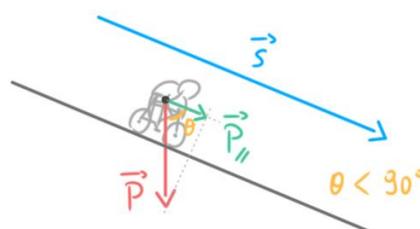
3.1.3 Vers une définition générale

Exemple : Considérons un cycliste sur son vélo.

- Sur une route horizontale, le poids du cycliste n'a pas d'influence sur la façon dont le mouvement se déroule. En effet, à cause de son orientation perpendiculaire au déplacement ($\theta = 90^\circ$), le poids n'agit ni dans le bon sens (effet moteur), ni dans le sens contraire (effet résistant).

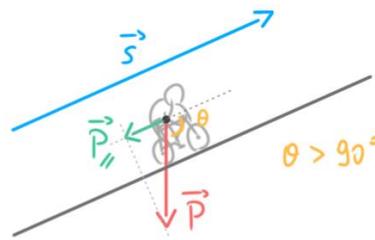


- Dans une descente, le poids du cycliste a un effet moteur car une partie de cette force (on parle de la composante tangentielle $\vec{P}_{//}$) agit dans le bon sens ($\theta < 90^\circ$).



⁸ Nos muscles sont toutefois le siège de processus physiologiques faisant intervenir des forces et des déplacements microscopiques.

- Dans une montée, le poids du cycliste a un effet résistant car sa composante tangentielle s'oppose au déplacement ($\theta > 90^\circ$).



Ces exemples montrent que la **définition générale du travail** doit prendre en compte l'orientation de la force par rapport au déplacement.

Le travail d'une force constante \vec{F} qui forme un angle θ avec le déplacement s est donné par :

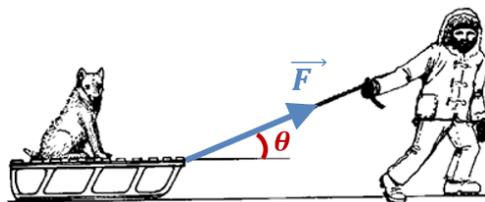
$$W = F \cdot s \cdot \cos \theta$$

Discussion

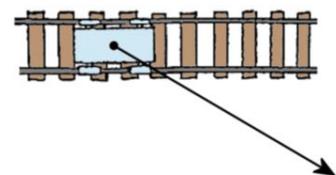
- Si $\theta = 0^\circ$, la force agit pleinement dans le sens du mouvement. Elle effectue un travail moteur maximal et l'on retrouve la définition simple : $W = F \cdot s$
- Si $0^\circ < \theta < 90^\circ$, la force a une composante dans le sens du mouvement. Elle effectue un travail moteur ($W > 0$).
- Si $\theta = 90^\circ$, la force est perpendiculaire au déplacement. Elle n'effectue aucun travail ($W = 0$).
- Si $90^\circ < \theta < 180^\circ$, la force a une composante qui s'oppose au mouvement. Elle effectue un travail résistant ($W < 0$).
- Si $\theta = 180^\circ$: La force s'oppose pleinement au mouvement. Elle effectue un travail résistant maximal et l'on a : $W = -F \cdot s$

■ As-tu compris ?

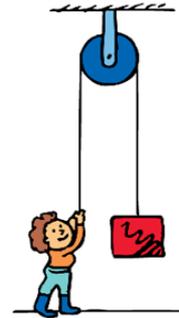
1. Un inuit tire une luge avec une force constante de 200 N sous un angle $\theta = 35^\circ$.



- a. Calculer l'intensité de la composante tangentielle de la force de l'inuit
 - b. En déduire le travail effectué par la force de l'inuit pour un trajet de 2 km.
2. On tire un wagon le long des rails comme indiqué sur la figure. L'angle θ entre la force et le déplacement vaut 30° .
Que vaut l'intensité de cette force si elle effectue un travail de 433 kJ pour un déplacement de 500 m ?

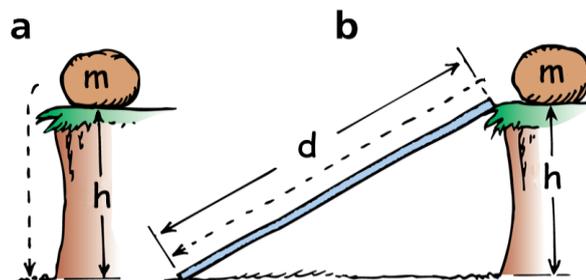


3. En triant sur la corde qui passe par une poulie fixe, un ouvrier monte une charge de 60 kg à une hauteur de 4 m. Quel est le travail effectué par l'ouvrier, sachant que la poulie fixe ne modifie pas l'intensité de la force nécessaire pour soulever la charge.



4. Qu'est-ce qui nécessite un travail plus grand : soulever un sac de 50 kg sur une distance verticale de 2 m ou soulever un sac de 25 kg sur une distance verticale de 4 m ?

5. Un rocher de masse m descend d'une hauteur h de deux manières différentes (a et b). Montrer que dans les deux cas, le travail du poids est le même et établir son expression.



6. Considérons les figures ci-dessous.



a. Le poids de la boule effectue-t-il un travail lorsque la boule de bowling roule le long d'une piste horizontale (situation A) ? Expliquer.

b. Le poids de la boule effectue-t-il un travail lorsque la boule descend un plan incliné (situation B) ? Expliquer.

c. Compléter :

Lorsqu'un corps se déplace horizontalement, le travail du poids ... : $W =$

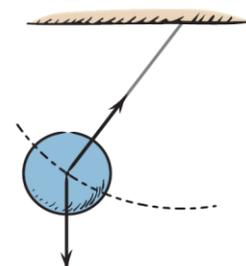
Lorsqu'un corps de masse m descend d'une hauteur h , le travail du poids ... : $W =$

Lorsqu'un corps de masse m monte d'une hauteur h le travail du poids ... : $W =$

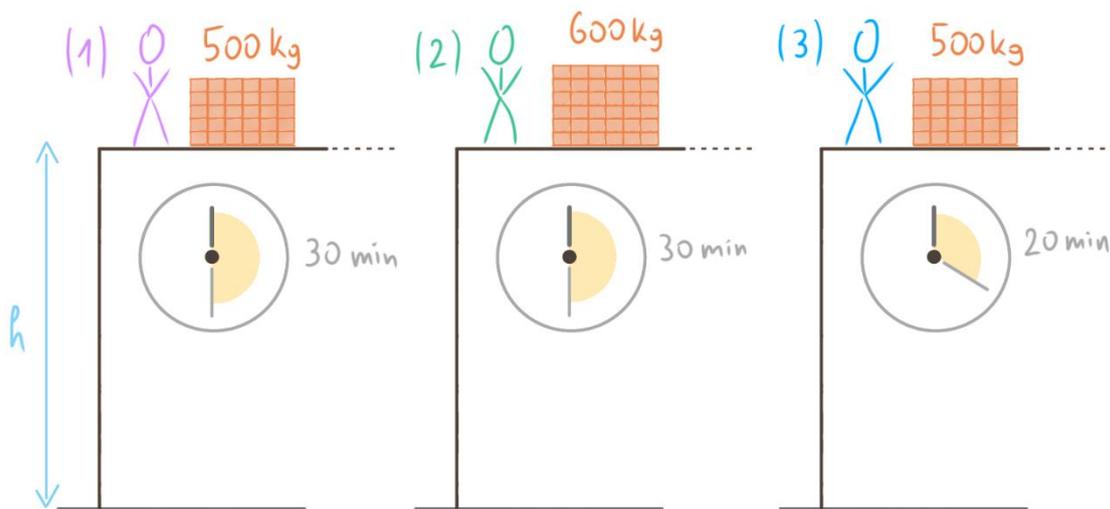
7. Un pendule effectue des oscillations.

a. La tension du fil effectue-t-elle un travail sur la boule ? Expliquer.

b. Sur quelle(s) phase(s) du mouvement le poids effectue-t-il un travail moteur ? Un travail résistant ? Expliquer.



3.2 La puissance mécanique



Exemple introductif : Trois ouvriers effectuent un travail de levage en portant des briques au premier étage d'un immeuble en construction. L'ouvrier (1) monte 500 kg de briques en 30 minutes, l'ouvrier (2) monte 600 kg de briques en 30 minutes et l'ouvrier (3) monte 500 kg de briques en 20 minutes.

Discussion

Lequel des trois ouvriers a effectué le plus de travail ? _____

Lequel des trois ouvriers a effectué son travail de manière la plus intense ? _____

Lequel des trois ouvriers est le plus « puissant » ? _____

La puissance \mathcal{P} est égale au travail effectué par unité de temps, càd. au rapport entre le travail effectué W et le temps écoulé Δt :

$$\mathcal{P} = \frac{W}{\Delta t}$$

L'unité SI de la puissance est le **watt** (W) : $1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}}$

Application : La puissance mécanique développée par les trois ouvriers vaut :

Relation entre puissance et vitesse

Considérons une voiture qui roule à vitesse constante v . La puissance \mathcal{P}_m de la force motrice \vec{F}_m peut alors s'écrire :

$$\mathcal{P}_m = \frac{W}{\Delta t} = \frac{F_m \cdot d}{\Delta t} = F_m \cdot \frac{d}{\Delta t} = F_m \cdot v$$

De manière générale, on peut exprimer la puissance d'une force en fonction de la vitesse :

La puissance d'une force \vec{F} qui s'exerce sur un corps qui se déplace à la vitesse v est donnée par :

$$\mathcal{P} = F \cdot v \cdot \cos \theta$$

avec θ l'angle entre la force et le déplacement.

3.2.1 Le cheval-vapeur

Le cheval-vapeur (Symbole : **ch**) est une unité alternative pour la puissance. Elle fut introduite par James Watt pour comparer la puissance des machines à vapeur à celle des chevaux. Le nom allemand est « Pferdestärke » (Symbole : PS).

Conversion : $1 \text{ ch} = 1 \text{ PS} = 735 \text{ W} = 0,735 \text{ kW}$
 $1 \text{ kW} = 1/0,735 \text{ ch} = 1,36 \text{ ch}$



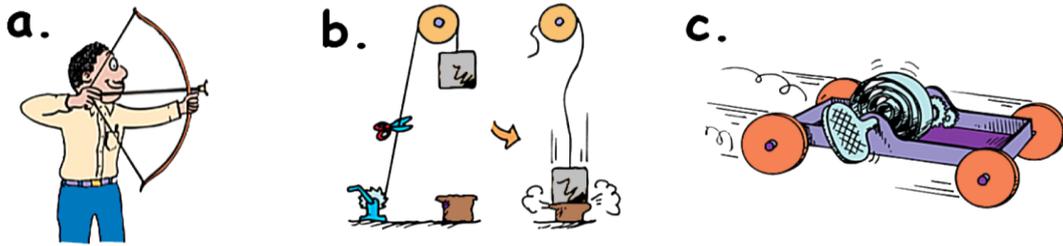
■ As-tu compris ?

8. Deux personnes de même masse montent une cage d'escaliers jusqu'au quatrième étage. La première personne met 30 s, alors que la deuxième personne nécessite 40 s.
 - a. Quelle personne effectue plus de travail ?
 - b. Quelle personne développe plus de puissance ?
9. A l'arraché (« Reißen »), un haltérophile monte une barre de 180 kg d'une hauteur de 2,2 m en 1,8 s. Quelle puissance développe-t-il ?
10. Une machine à vapeur développe une puissance mécanique de 5 ch.
 - a. Donner sa puissance en unité SI.
 - b. Combien de travail cette machine peut-elle effectuer en une heure ?
11. Laquelle de ces affirmations est correcte ?
 - La puissance mécanique développée par une machine dépend de son temps de fonctionnement.
 - Le travail mécanique effectué par une machine dépend de son temps de fonctionnement.
12. Le ventricule gauche du cœur envoie à chaque battement une masse de 90 g de sang dans l'aorte avec une pression capable d'élever le sang d'une hauteur de 2 m. Déterminer la puissance mécanique du cœur lorsqu'il effectue 90 battements par minute.
13. Un cheval tire un traineau. Le cheval avance au pas (8 km/h) et exerce une force de 150 N qui fait un angle de 20° avec la direction de déplacement.
Que vaut la puissance développée par le cheval ?
14. Une péniche navigue à une vitesse constante de 18 km/h sur la Moselle. Son moteur tourne à plein régime (« volle Fahrt ») et développe une puissance mécanique de 280 kW.
 - a. Indiquer toutes les forces mises en jeu sur un schéma.
 - b. Déterminer l'intensité de la force motrice nécessaire pour maintenir la vitesse du bateau.

3.3 L'énergie mécanique

3.3.1 Lien entre les grandeurs travail et énergie

Lorsqu'on effectue un travail sur un corps, ce corps obtient la capacité d'effectuer un travail à son tour.



- Lorsqu'un travail est effectué pour tendre un arc, l'arc acquiert la capacité à effectuer un travail à son tour : il peut accélérer la flèche.
- Lorsqu'un travail est effectué pour soulever un bloc en pierre, le bloc acquiert la capacité à effectuer un travail à son tour : il peut enfoncer un pieux en tombant.
- Lorsqu'un travail est effectué pour déformer un ressort, le ressort acquiert la capacité à effectuer un travail à son tour : il peut faire tourner une montre ou accélérer une voiture-jouet.

Lorsqu'on effectue un travail sur un corps, on introduit dans ce corps la capacité d'effectuer un travail à son tour. Le mot grec « en » signifiant « dans » et le mot « ergon » signifiant « travail », les scientifiques ont désigné la capacité à effectuer un travail par le mot **énergie**. Lorsqu'on effectue un travail sur un corps, son énergie augmente ; lorsque le corps effectue un travail à son tour, son énergie diminue. Le travail apparaît comme une quantité d'énergie échangée.

Définition

L'énergie mécanique d'un corps mesure sa capacité à effectuer du travail.

Les grandeurs travail et énergie s'expriment à l'aide de la même unité SI : le **joule (J)**

Fortement liées, les grandeurs travail et énergie ne sont toutefois pas identiques. L'énergie est une grandeur d'état, c'est-à-dire elle décrit l'état dans lequel un corps se trouve alors que le travail est une grandeur d'échange qui décrit l'action d'un corps sur un autre. Il est important de bien saisir cette différence subtile.

3.3.2 Différentes formes d'énergie mécanique

(1) Le travail de levage et l'énergie potentielle de pesanteur

L'énergie que possède un corps en raison de sa hauteur par rapport à la Terre est appelée **énergie potentielle de pesanteur**. Soulever un corps signifie effectuer un travail de levage.

Travail de levage : Le travail effectué sur un corps de masse m lorsqu'on l'éloigne d'une distance h de la surface terrestre est donné par :

$$W_{\text{lev}} = mgh$$

avec $g = 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$ l'intensité de la pesanteur sur Terre.

Lorsqu'on soulève un corps, son énergie augmente. En effet, le travail effectué n'est pas « perdu », mais il est stocké par le corps sous forme d'énergie potentielle de pesanteur. Si l'on admet qu'au départ, l'énergie potentielle de pesanteur du corps était nulle (on définit par là le **niveau de référence**), le corps soulevé possède une énergie potentielle de pesanteur égale au travail de levage effectué :

$$E_{\text{pp}} = W_{\text{lev}} = mgh$$

L'énergie potentielle de pesanteur que possède un corps de masse m et d'altitude h par rapport à un niveau de référence est donnée par :

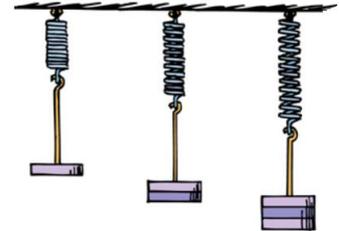
$$E_{pp} = mgh$$

Unité SI : $\text{kg} \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$

(2) Le travail tenseur et l'énergie potentielle élastique

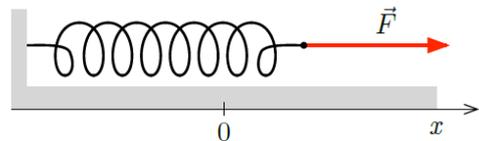
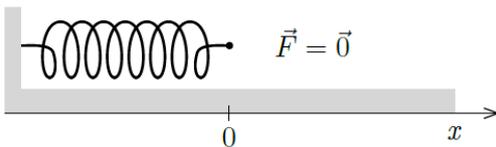
L'énergie que possède un corps élastique déformé est appelée **énergie potentielle élastique**. Un ressort est un exemple typique d'un corps qui peut avoir cette forme d'énergie mécanique.

Rappelons d'abord la relation qui existe entre la force exercée sur un ressort et sa déformation (allongement ou compression) :

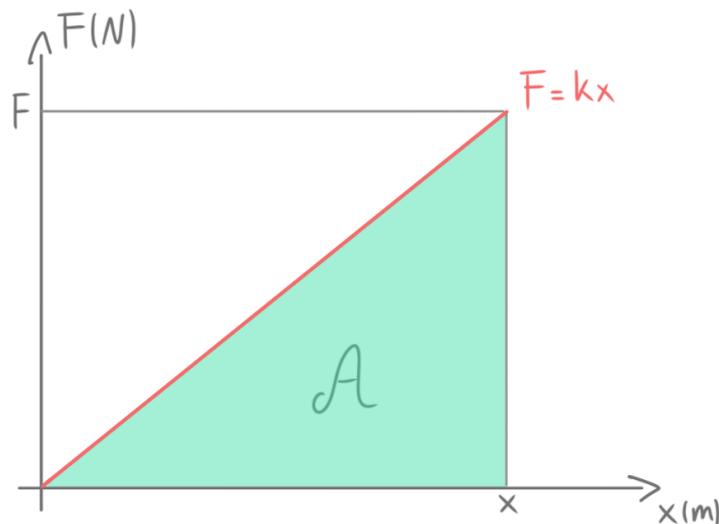


Loi de Hooke : L'intensité F de la force exercée sur un ressort est proportionnelle à la déformation x du ressort :

$$F \sim x \Leftrightarrow \frac{F}{x} = k = \text{const.}$$



Le **travail tenseur** désigne le travail effectué par la force \vec{F} pour allonger un ressort d'une distance x . Pour calculer le travail tenseur, on ne peut pas simplement prendre le produit $F \cdot x$ car la force \vec{F} ne garde pas une valeur constante ; elle augmente linéairement avec le déplacement en vertu de la loi de Hooke : $F = kx$. Toutefois, on peut trouver le résultat de façon relativement simple en exploitant la représentation graphique de la force en fonction de l'allongement.



En effet, on se rend compte que le travail tenseur correspond numériquement à l'aire \mathcal{A} de la surface triangulaire sous la droite $F(x)$:

$$W(\vec{F}) = \frac{1}{2}F \cdot x = \frac{1}{2}kx \cdot x = \frac{1}{2}kx^2$$

Travail tenseur : Le travail effectué pour allonger ou comprimer un ressort de raideur k initialement détendu d'une distance x est donné par :

$$W(\vec{F}) = \frac{1}{2} kx^2$$

En vertu du lien entre le travail et l'énergie, le travail tenseur est stocké par le ressort sous forme d'énergie potentielle élastique.

L'énergie potentielle élastique que possède un ressort de raideur k allongé ou comprimé d'une distance x est donnée par :

$$E_{pe} = \frac{1}{2} kx^2$$

Unité SI : $\frac{N}{m} \cdot m^2 = N \cdot m = J$

(3) Le travail accélérateur et l'énergie cinétique

L'énergie que possède un corps en raison de sa vitesse est appelée **énergie cinétique**. Comme précédemment, on va d'abord établir une expression du **travail accélérateur**, c'est-à-dire du travail nécessaire pour porter un corps à une vitesse v , puis utiliser le lien entre le travail et l'énergie pour en déduire une expression de l'énergie cinétique.

Considérons un corps de masse m initialement au repos. Lorsqu'on exerce sur ce corps une force constante \vec{F} , le corps est accéléré en direction de cette force et l'on a :

$$F = ma \quad (\text{PFD})$$

L'accélération du corps étant constante en norme et en direction, l'étude cinématique menée en page 12 nous permet d'exprimer le déplacement x du corps ainsi que sa vitesse $v = v_x$ en fonction du temps :

$$x = \frac{1}{2} at^2$$
$$v = at$$

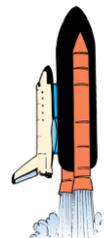
En remplaçant les trois expressions précédentes dans la formule du travail effectué par la force \vec{F} , on obtient :

$$W = F \cdot x$$
$$W = ma \cdot x$$
$$W = ma \cdot \frac{1}{2} at^2 = \frac{1}{2} m(at)^2$$
$$W = \frac{1}{2} mv^2$$

Travail accélérateur : Le travail effectué pour accélérer un corps de masse m à partir du repos à une vitesse v est donné par :

$$W(\vec{F}) = \frac{1}{2} mv^2$$

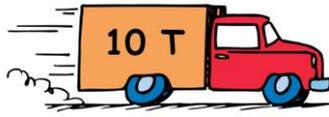
En vertu du lien entre le travail et l'énergie, le travail accélérateur est stocké par le corps sous forme d'énergie cinétique.



L'énergie cinétique que possède un corps de masse m en raison de sa vitesse v est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Unité SI : $\text{kg} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$



3.3.3 Synthèse

L'énergie mécanique d'un système est la somme de l'énergie cinétique, de l'énergie potentielle de pesanteur et de l'énergie potentielle élastique des corps qui forment le système :

$$E_m = E_c + E_{pp} + E_{pe}$$

3.3.4 Formes d'énergie non-mécaniques

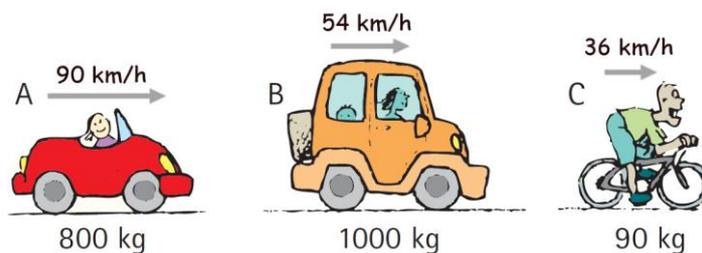
L'énergie n'intervient pas seulement en mécanique. En fonction du domaine d'étude, les scientifiques distinguent parmi les formes d'énergie non-mécaniques suivantes :

- L'énergie thermique est l'énergie associée à l'agitation désordonnée des corpuscules (atomes, molécules, ...) dont un système est formé. Un corps chaud possède plus d'énergie thermique qu'un corps froid.
- L'énergie électrique est l'énergie associée aux charges électriques. Elle est transportée par le courant électrique et responsable de l'essor technologique.
- L'énergie chimique est l'énergie associée aux liaisons chimiques. Elle se manifeste lors des réactions chimiques. Dans le corps humain (par exemple), la réaction entre le glucose et le dioxygène libère l'énergie chimique nécessaire au fonctionnement des muscles.
- L'énergie radiative est l'énergie associée au rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement peut être visible (lumière) ou invisible (rayons infrarouges et ultraviolets). L'énergie radiative émise par le Soleil est à l'origine de la vie sur Terre.
- L'énergie nucléaire est l'énergie associée aux noyaux atomiques. Elle se manifeste lorsque des noyaux atomiques se transforment (fission nucléaire, fusion nucléaire).

■ As-tu compris ?

15. Combien d'énergie potentielle de pesanteur une pierre de 1 kg acquiert-elle lorsqu'on la soulève de 4 m ? De 8 m ?
16. Un livre de physique de 500 g est posé sur un bureau. Le bureau a une hauteur de 75 cm et se trouve au premier étage d'une maison.
 - a. Est-il possible de déterminer l'énergie potentielle de pesanteur du livre de façon absolue ? Justifier !
 - b. On choisit l'entrée de la maison comme niveau de référence. Déterminer l'énergie potentielle de pesanteur du livre sachant que l'escalier qui monte au premier étage a une hauteur de 3 m.

17. Lorsqu'on tire avec une force de 10 N sur l'extrémité d'un ressort initialement détendu, on constate que le ressort s'allonge de 4 cm.
- Que vaut la raideur du ressort ?
 - Quelle énergie (forme et quantité) le ressort possède-t-il lorsqu'il a été allongé ?
 - Quel est le lien entre cette quantité d'énergie et la force avec laquelle le ressort a été allongé ?
18. Une arbalète (« Armbrust ») qui obéit à la loi de Hooke (raideur $k = 1000 \text{ N/m}$) est tendue et possède alors une énergie potentielle élastique de 3,2 J. Que vaut l'intensité de la force avec laquelle l'arbalète a été tendue ?
19. Calculer l'énergie cinétique des corps suivants :



20. Calculer l'énergie cinétique d'une voiture télécommandée de 2 kg qui se déplace à 5 m/s. Calculer l' E_c de la même voiture lorsqu'elle se déplace deux fois plus vite. Commentaire ?
21. Est-ce que l'énergie cinétique d'un corps dépend de la direction dans laquelle il se déplace ? Justifier !
22. Un camion de 20 t qui roule à 36 km/h possède de l'énergie cinétique. Que vaut la vitesse d'une voiture de sport de 1,2 t lorsqu'elle a la même énergie cinétique ?
23. Un camion vide roule en ville et possède une énergie cinétique de 500 kJ. Que vaut son énergie cinétique lorsqu'il est plein et qu'il roule sur l'autoroute (masse et vitesse doublées) ?

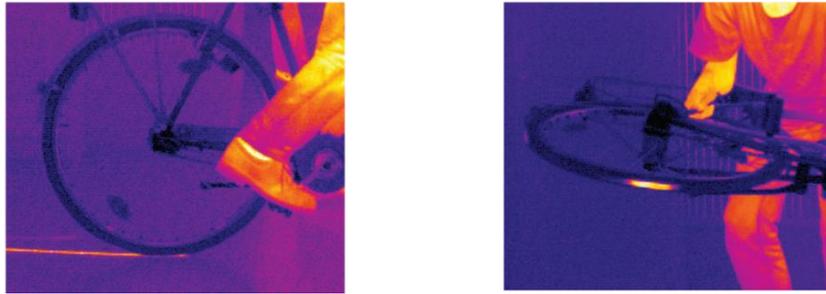
3.4 Conservation de l'énergie

L'énergie présente une propriété remarquable : elle se conserve ! En effet, *toutes* les observations de *tous* les phénomènes naturels montrent que l'énergie peut passer d'un système à un autre et/ou d'une forme à une autre, mais qu'elle ne peut ni être créée, ni être détruite. En raison de sa validité universelle et de sa simplicité, beaucoup de physiciens considèrent que ce **principe de conservation de l'énergie** est la loi physique la plus fondamentale de toutes.

Lors de transferts et de transformations d'énergie, rien ne se crée, rien ne se perd. L'énergie totale d'un système isolé reste constante.

Exemple : Lorsqu'un cycliste freine sur une route horizontale, il perd de l'énergie cinétique. Mais cette énergie n'a pas disparu : le système de freinage, la route et finalement l'air ambiant ont été (légèrement) réchauffés. L'énergie contenue dans le mouvement du vélo a été utilisée pour augmenter l'agitation thermique (càd. le mouvement microscopique désordonné) des corpuscules du système.

À l'aide d'une caméra infrarouge, on peut s'apercevoir que le revêtement de la route ainsi que le pneu se sont réchauffés lors du freinage (température localement plus élevée).

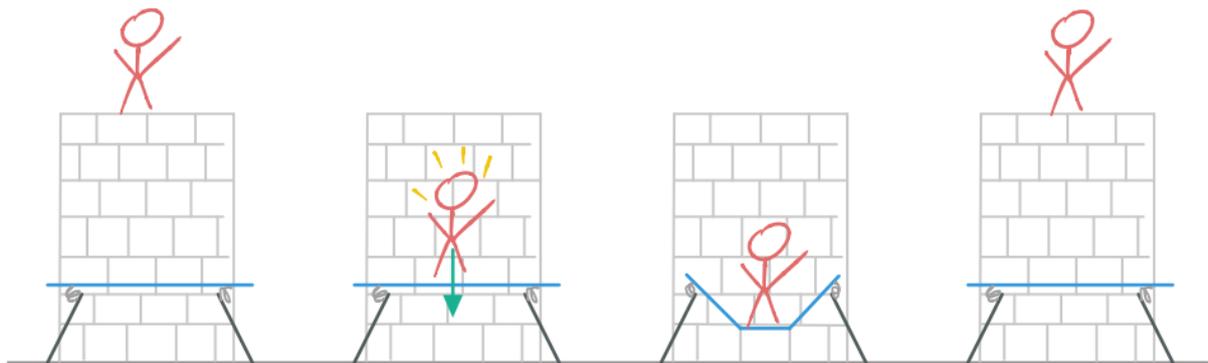


Au bilan, rien ne se crée et rien ne se perd en termes d'énergie : toute l'énergie cinétique du cycliste a été transformée en énergie thermique par le travail des forces de frottement.

Le fait que l'énergie se conserve en fait une grandeur très pratique en sciences naturelles. En effet, étudier un phénomène naturel signifie souvent chercher de réponses à des questions comme : D'où vient l'énergie ? Quelle(s) transformation(s) subit-elle ? À quel taux est-elle transférée ?

3.4.1 Conditions de conservation de l'énergie mécanique

Considérons un athlète qui saute d'une hauteur de 3 m sur un trampoline. Après le rebond, on observe qu'il remonte à sa hauteur de départ.



Analysons les transformations d'énergie que subit le système formé par l'athlète et le trampoline :

- (1) énergie potentielle de pesanteur en raison de la position surélevée de l'athlète
- (2) énergie cinétique en raison de la vitesse de l'athlète
- (3) énergie potentielle élastique en raison de la déformation élastique du trampoline
- (4) énergie potentielle de pesanteur en raison de la position de l'athlète

Comme le système retrouve sa configuration de départ, on en déduit que son énergie finale (4) est égale à son énergie initiale (1). Aucune énergie mécanique n'a été perdue en cours de route.

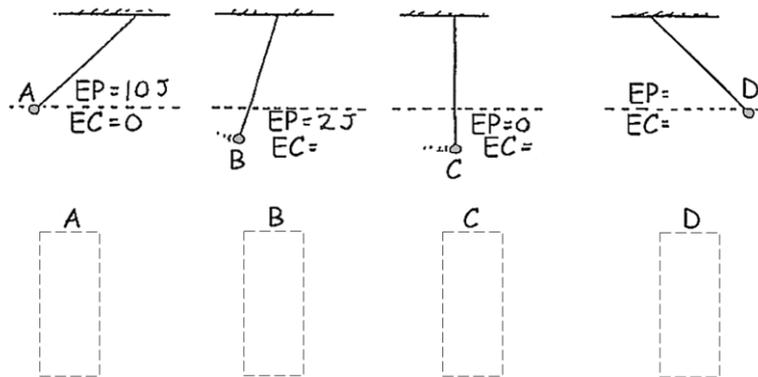
Les situations où l'énergie mécanique d'un système reste approximativement constante ont cela en commun que le frottement (résistance de l'air, résistance au roulement, au glissement etc.) y est négligeable. Dans ces conditions, on peut énoncer le résultat pratique suivant :

En l'absence de frottement, l'énergie mécanique d'un système isolé reste constante.

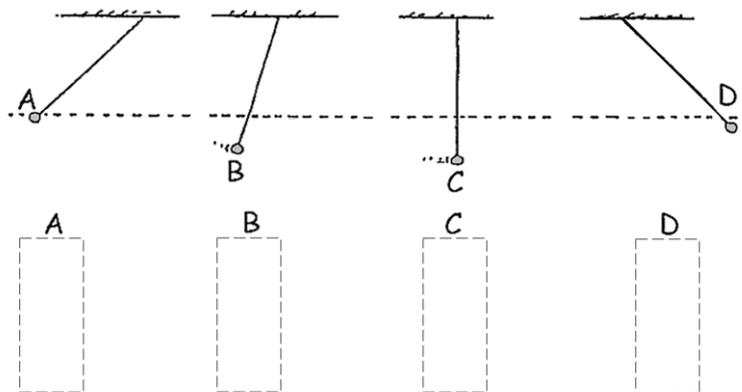
Lorsqu'elle est applicable, la conservation de l'énergie mécanique permet de résoudre de problèmes numériques avec une facilité étonnante.

3.4.2 Application : Le pendule simple

Cas idéal : pas de frottement



Cas réel : frottement faible mais non nul



Le pendule réel ne revient pas exactement à sa hauteur de départ, en raison des forces de frottement (résistance de l'air, frottement au point de suspension) dont le travail transforme progressivement de l'énergie mécanique en énergie thermique.

3.4.3 Puissance d'un transfert ou d'une transformation énergétique

Comme le travail est un mode de transfert/transformation d'énergie, la puissance nous renseigne sur l'intensité avec laquelle ce transfert ou cette transformation a lieu.

Exemple : La puissance des forces de frottement décrit l'intensité avec laquelle de l'énergie mécanique est transformée en énergie thermique. Pour le pendule réel, cette puissance est faible mais non-nulle.

- La puissance exprime l'intensité avec laquelle un travail est effectué.
- La puissance exprime l'intensité d'un transfert ou d'une transformation énergétique.

3.4.4 Rendement d'un transfert ou d'une transformation énergétique

Exemple : Un ventilateur électrique permet de produire un courant d'air. D'abord, l'énergie électrique apporté par le courant électrique est transformée en énergie mécanique (mouvement de rotation de l'hélice), puis, cette énergie mécanique est transférée de l'hélice aux corpuscules d'air. Or, ni la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, ni le transfert de l'énergie mécanique entre l'hélice et l'air n'est efficace à 100%. En effet, il y a des « pertes » inévitables qui sont dues au travail des forces de frottement.

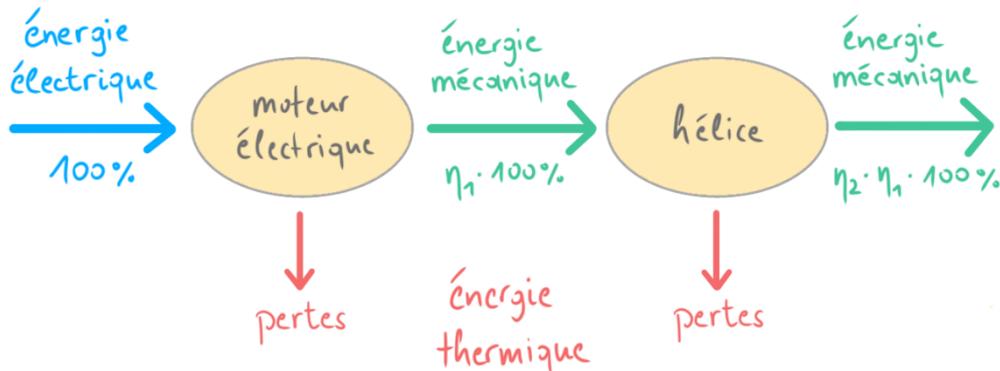
Pour quantifier l'efficacité d'un transfert ou d'une transformation énergétique, on utilise la notion de **rendement**.

Le rendement η d'un transfert ou d'une transformation énergétique est égal au rapport entre l'énergie utile restituée et l'énergie reçue :

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{reçue}}}$$

Le rendement est un nombre sans dimension : $0 \leq \eta < 1$. Il est généralement exprimé en pourcent.

Il est pratique d'illustrer les flux d'énergie à l'aide d'un diagramme :



Comme la puissance représente la quantité d'énergie reçue / restituée / perdue par unité de temps, on peut définir le rendement également à l'aide des puissances :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{reçue}}}$$

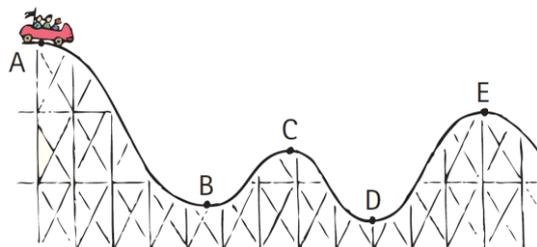
Pour un ventilateur électrique, les valeurs typiques sont $\eta_1 = 0,85$ et $\eta_2 = 0,60$. Au total, environ la moitié de la puissance électrique reçue est restituée sous forme de puissance mécanique du courant d'air :

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 = 0,5 = 50\%$$

■ As-tu compris ?

24. Un wagon sur une montagne russe démarre du repos au point A et se déplace ensuite sans frottement. Ranger par ordre décroissant les grandeurs suivantes en chaque point :

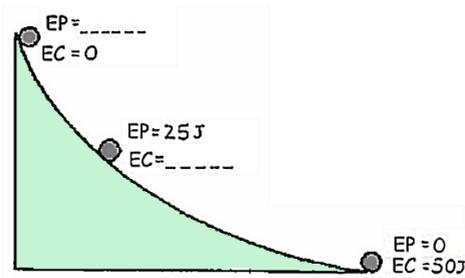
- Vitesse
- E_C
- E_{PP}



25. En quel point de son mouvement la boule d'un pendule a-t-elle une énergie cinétique maximale ? En quel point son énergie potentielle de pesanteur est-elle maximale ?

26. Est-ce que l'énergie cinétique d'une voiture change davantage lorsqu'elle accélère de 10 m/s à 20 m/s ou lorsqu'elle accélère de 20 m/s à 30 m/s ? Justifier.

27. Compléter les valeurs manquantes. On néglige le frottement.

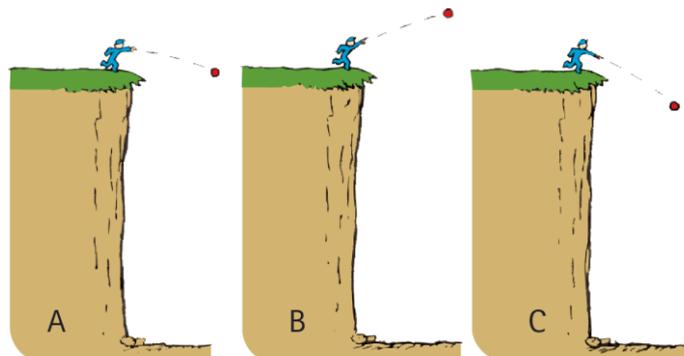


28. Une balle est lancée verticalement vers le haut. En quel point de sa trajectoire a-t-elle...

- une énergie cinétique maximale ?
- une énergie potentielle de pesanteur maximale ?
- Que peut-on conclure, si l'expérience est réalisée sur la Lune où il n'y a pas d'atmosphère ?

29. A la piscine découverte, une fille saute du plongoir de 3 m. Calculer sa vitesse lors de l'impact dans l'eau ?

30. Trois balles sont lancées d'une falaise avec une vitesse initiale de même norme, mais dans des directions différentes, tel qu'illustré sur la figure. On néglige la résistance de l'air.



Ranger par ordre décroissant...

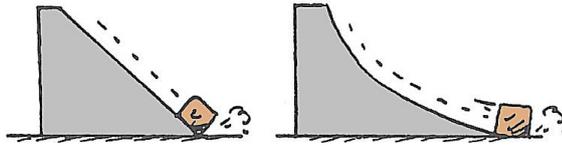
- les énergies potentielles de pesanteur initiales par rapport au bas de la falaise.
- les énergies cinétiques initiales.
- les énergies cinétiques lors de l'impact au sol.
- les vitesses d'impact.
- les temps de vol.

31. Reprendre l'exercice précédente et calculer les vitesses à l'impact pour une falaise haute de 20 m et une vitesse initiale égale à 8 m/s.

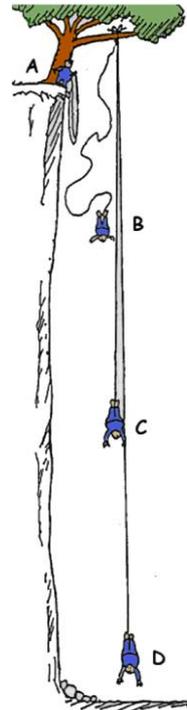
32. Pour illustrer le principe de la conservation de l'énergie mécanique, le professeur lâche la boule (15 kg) d'un pendule dans la position illustré. Que se passerait-il si, par mégarde, il donnait une vitesse initiale à la boule. Expliquer.



33. Les rampes ont une hauteur de 50 cm et le bloc glisse sans frottement. Comparer la vitesse du bloc au bas de la rampe dans les deux cas. Peut-on calculer ces vitesses numériquement ?



34. La figure ci-contre montre un sauteur de bungee (un peu fou) qui s'élanche sans vitesse initiale d'une falaise. L'élastique commence à s'allonger en C. Décrire schématiquement les transformations d'énergie qui ont lieu jusqu'au moment où l'élastique est allongé au maximum (en D). Fixer le niveau de référence en ce point et tenir compte de la résistance de l'air.



35. Pourquoi une balle magique n'atteint-elle pas la même hauteur après le rebond ?
36. En descendant un toboggan sur une aire de jeux, l'énergie potentielle de pesanteur d'un enfant diminue de 1000 J alors que son énergie cinétique augmente de 900 J. Quelle autre forme d'énergie est impliquée et en quelle quantité ?
37. Un arc qui obéit à la loi de Hooke a une raideur de 240 N/m. Pour lancer une flèche verticalement vers le haut, on tire sur la corde avec une force de 96 N, puis on lâche la corde.
- Quelle hauteur maximale la flèche atteindra-t-elle si l'on néglige les forces de frottement ?
 - Que vaut la hauteur réelle, si l'on suppose qu'un quart de l'énergie mécanique est dissipée par la résistance de l'air.
 - Sous quelle forme retrouve-t-on l'énergie mécanique perdue ?
38. Un jouet contient un ressort de raideur 120 N/m. En comprimant le ressort, il permet de lancer une boule en caoutchouc de 15 g à une hauteur de 1,2 m. On néglige le frottement. Que vaut l'intensité de la force qui a comprimé le ressort ?
39. Paul a une masse de 60 kg et tient dans chaque main un haltère (« Hantel ») de 30 kg. Il saute d'une hauteur de 2 m sur un trampoline. Au point le plus bas de sa trajectoire, quand la toile du trampoline est tendue au maximum, il jette les deux haltères par terre. En déduire la hauteur maximale qu'il va atteindre lors du rebond si l'on néglige tout frottement.
40. Les pompiers utilisent une pompe électrique de 2000 W pour vider une cave inondée de 16 m² de surface où l'eau est montée à 90 cm. La pompe évacue l'eau vers la rue qui se trouve à une hauteur de 2,2 m au-dessus du niveau de la cave.
- Quelle est la puissance mécanique restituée par la pompe, sachant que son rendement est de 80%.
 - Combien de temps la pompe met-elle pour vider la cave ?

41. La centrale hydroélectrique de Rosport se trouve près du barrage situé sur la boucle de la Sûre à Rosport. La centrale comporte deux turbines entraînées par la chute de 300 m^3 d'eau par seconde sur une distance verticale de 3 m. Calculer la puissance électrique restituée par l'installation, si l'on admet un rendement de 70%.
42. Lors des vacances au ski, un téléphérique alimenté par un courant électrique provenant d'une centrale nucléaire transporte un groupe de skieurs en haut d'une montagne. Les skieurs descendent en ski et, de retour à la station, ils s'installent dans un restaurant pour se ressourcer autour d'un repas convivial.

Remplir le tableau suivant afin de décrire les transformations d'énergie qui ont lieu.

Dispositif ou situation	Forme(s) d'énergie avant	Forme(s) d'énergie après
Centrale électrique		
Téléphérique		
Descente en ski		
Salle à manger		
Les skieurs mangent		

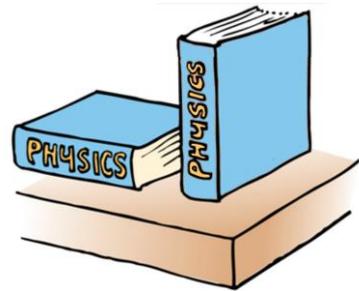
43. Lorsqu'il fonctionne en air froid, un sèche-cheveux convertit l'énergie du courant électrique en énergie de rotation de l'hélice avec un rendement de 80%. Ensuite, l'hélice transmet cette énergie mécanique aux corpuscules d'air avec un rendement de 70%.
- Etablir un diagramme représentant les flux énergétiques.
 - Que vaut la puissance mécanique du courant d'air produit par le sèche-cheveux ?
44. La centrale hydroélectrique de Vianden convertit l'énergie mécanique de l'eau en énergie électrique. La différence d'altitude entre le bassin supérieur en haut du « Niklosbiërg » et les turbines s'élève à 283 m. La puissance électrique totale de l'installation est de 1,296 GW en plein régime⁹. En supposant un rendement de 75% (valeur typique pour ce genre d'installation), déterminer la masse d'eau qui alimente les turbines par minute lorsque la centrale fonctionne en plein régime.

⁹Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_de_Vianden

4 Mécanique des fluides

4.1 Définition de la pression

Les deux livres sont de poids égal et exercent donc la même **force pressante** sur la surface (chacun enregistrerait la même valeur sur une balance). Cependant, dans le cas du livre couché horizontalement, cette force s'applique sur une surface beaucoup plus grande. Ce livre exerce une **pression** plus petite sur la surface que le livre posé verticalement.



La **pression** exprime la force par unité de surface :

$$\text{pression} = \frac{\text{force pressante}}{\text{aire de la surface de contact}}$$

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

L'unité SI de la pression est le $\text{N/m}^2 = \text{pascal} = \text{Pa}^1$



Autres unités courantes

1 hPa (hectopascal) = 100 Pa

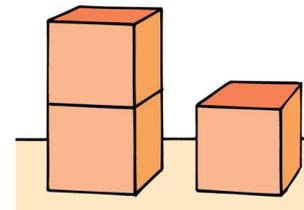
1 bar = 100000 Pa = 10^5 Pa

1 mbar = 100 Pa = 1hPa

Pour une force donnée, la pression et l'aire de la surface sont **inversement proportionnelles**. Si l'aire de la surface pressée augmente deux fois, alors la pression sur cette surface diminue de la moitié.

■ As-tu compris ?

1. Pourquoi un camion lourd a-t-il plus que quatre roues ?
2. Comparée à la pression exercée par les deux blocs superposés sur la table, la pression exercée par le bloc individuel est...
 - A. deux fois plus grande
 - B. identique
 - C. deux fois plus petite

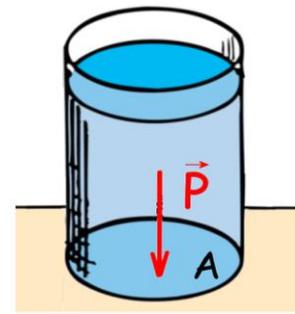


3. Si tu te tiens debout sur une jambe au lieu des deux,
 - a. la force que tu exerces sur le sol est
 - A. la moitié
 - B. identique
 - C. le double
 - b. la pression que tu exerces sur le sol est
 - A. la moitié
 - B. identique
 - C. le double
4. En voulant tester l'expérience de se coucher sur un lit de clous, est-il plus prudent de commencer avec un seul clou et d'augmenter peu à peu le nombre de clous ? Justifier.

4.2 La pression hydrostatique

Lorsqu'on plonge sous l'eau, on sent une pression dans les oreilles. Cette pression est due au poids de l'eau qui se trouve au-dessus. Au fur et à mesure que la profondeur augmente, la pression contre les tympans devient plus grande.

Dans un liquide règne donc une pression, appelée **pression hydrostatique**, qui est due au poids du liquide. La pression qu'un liquide dans un récipient cylindrique exerce sur le fond du récipient est donnée par le poids du liquide divisé par l'aire de la surface du fond du récipient :



$$p = \frac{P}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{A} = \frac{\rho \cdot A \cdot h \cdot g}{A} = \rho \cdot g \cdot h$$

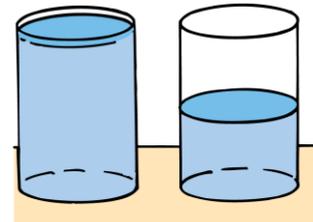
pression hydrostatique (Pa) = masse volumique $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$ · pesanteur $\left(\frac{\text{N}}{\text{kg}}\right)$ · profondeur (m)

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

Conclusions

- La pression hydrostatique est proportionnelle à la **profondeur h** :

Lorsque la profondeur du liquide double, la pression hydrostatique du liquide double également. La pression hydrostatique au fond du récipient plein est donc deux fois plus grande que celle au fond du récipient rempli à moitié.

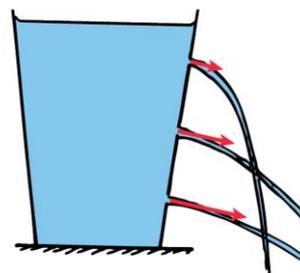
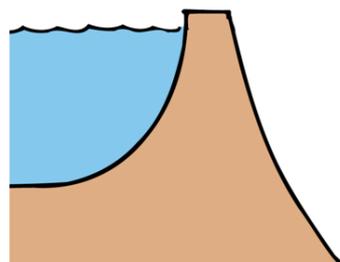


- La pression hydrostatique est proportionnelle à la **masse volumique ρ du liquide¹⁰** :

À une profondeur donnée, un liquide de masse volumique plus élevée exerce une pression plus grande. Par exemple, le mercure a une masse volumique 13,6 fois plus grande que l'eau. À une profondeur donnée, la pression hydrostatique exercée par le mercure est donc 13,6 fois plus grande que celle exercée par l'eau.

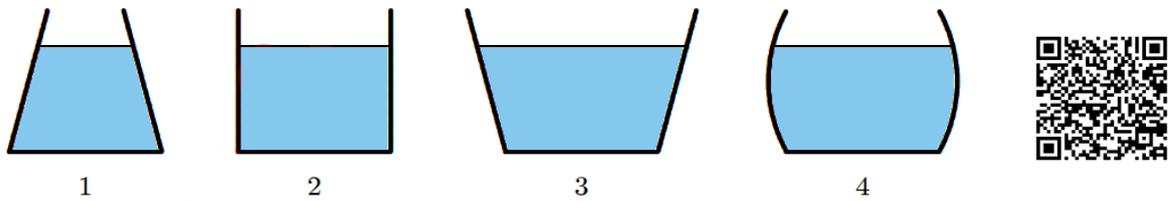
À une profondeur donnée, un liquide exerce la **même pression dans toutes les directions**, que ce soit sur le fond ou les côtés du récipient ou encore la surface d'un objet immergé dans le liquide. En effet, lorsqu'on plonge dans l'eau, quelle que soit la manière dont on incline la tête, on ressent la même pression dans les oreilles.

Les **forces pressantes** exercées par le liquide sur une surface agissent en chaque point **perpendiculairement à la surface**. Voilà pourquoi l'eau qui jaillit d'un trou dans un seau y sort perpendiculairement à la surface.



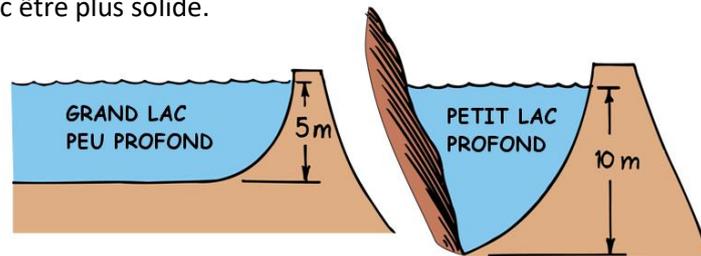
¹⁰Un liquide est pratiquement incompressible, donc sa masse volumique est la même à chaque profondeur (hormis quelques petites variations dues à la température).

- La pression hydrostatique ne dépend pas de la quantité de liquide, mais uniquement de sa profondeur. Cette propriété est connue sous le nom de **paradoxe hydrostatique**. La pression hydrostatique au fond de chacun des quatre récipients illustrés ci-dessous est identique.



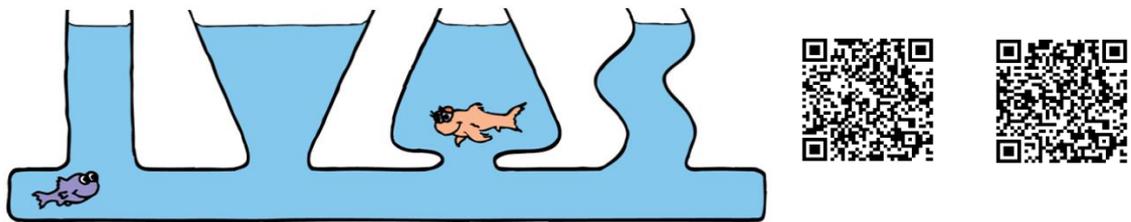
Exemple

La pression hydrostatique est deux fois plus élevée au fond du petit lac profond qu'au fond du grand lac peu profond. Le barrage retenant l'eau du lac profond doit résister à une pression moyenne plus élevée et doit donc être plus solide.

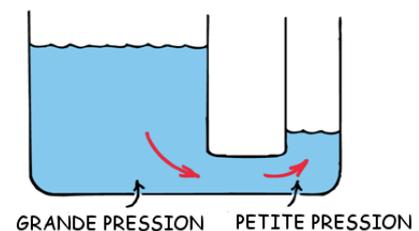


Application

Des **vases communicants** sont des récipients de formes quelconques, ouverts à l'air libre et reliés entre eux. Le niveau de l'eau est identique dans tous les vases.



En effet, le liquide dans le tube de connexion ne reste en équilibre que si la pression à ses deux extrémités est identique, ce qui est le cas lorsque la hauteur du liquide est la même dans les deux vases.



En remplissant un tuyau flexible avec de l'eau et en tenant les deux extrémités à la même hauteur, les niveaux d'eau sont égaux. Si l'une des extrémités est surélevée par rapport à l'autre, l'eau s'écoule de l'extrémité inférieure, même si elle doit couler une partie du chemin « en montée ». Ce fait est utile pour vider un aquarium ou un réservoir de carburant. À l'époque romaine, on a fait construire des aqueducs inutilement élaborés pour s'assurer que l'eau coule légèrement vers le bas à chaque endroit le long de son parcours entre le réservoir et la ville.



■ **As-tu compris ?**

5. La pression de l'eau au fond d'un lac dépend...

- A. de l'aire de la surface du lac
- B. de la profondeur du lac

6. Un réservoir d'eau est renforcé par des cerceaux métalliques.

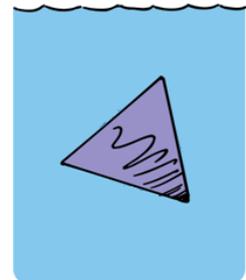
- a. Pourquoi le réservoir est-il élevé ?
- b. Pourquoi la distance entre les cerceaux est-elle plus petite au fond qu'en haut du réservoir ?



7. Calculer les pressions hydrostatiques :

- a. au fond d'un récipient rempli d'eau d'une hauteur 20 cm.
- b. au fond d'un récipient rempli de mercure d'une hauteur 5 cm.

8. Comment évoluent la masse, le volume et la masse volumique d'une bulle d'air expirée par un plongeur dans l'eau lorsqu'elle remonte à la surface ?



9. Calculer la pression de l'eau au fond d'un château d'eau qui mesure 30 m de hauteur et qui est entièrement rempli d'eau.

10. Représenter la force pressante exercée par l'eau sur chacune des surfaces latérales du corps submergé.

11. Calculer la pression à 4 m de profondeur dans l'eau et en déduire l'intensité de la force qui s'y exerce sur ton tympan (« Trommelfell ») de surface $0,5 \text{ cm}^2$.

12. En 1960, le sous-marin *Trieste* est descendu jusqu'à une profondeur de 11 km dans le fossé des Mariannes. Le sous-marin n'avait qu'une petite lucarne circulaire de 15 cm de diamètre. Expliquer en utilisant les termes *pression hydrostatique* et *force pressante*.



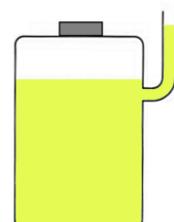
13. Comparer la pression de l'eau à une profondeur de 1 m en dessous de la surface d'un lac à la pression de l'eau à une profondeur de 1 m en dessous d'une piscine.



14. Quelle théière peut contenir plus de liquide ? Justifier.

15. Expliquer schématiquement le principe de fonctionnement d'une écluse (« Schleuse »).

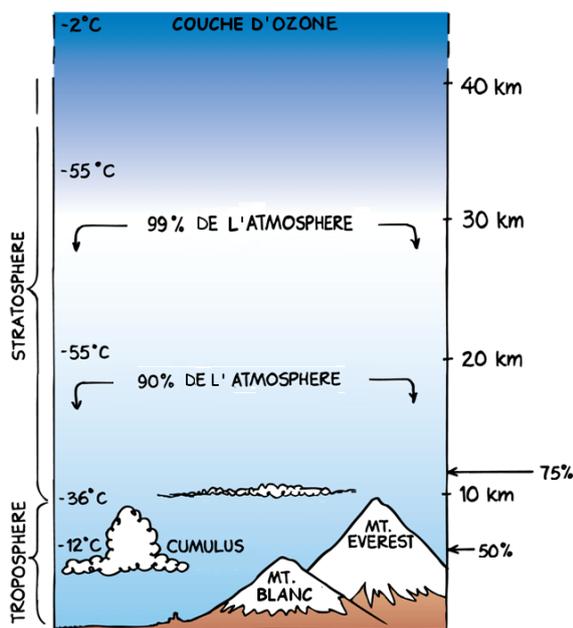
16. Sur la figure ci-contre, le niveau d'essence est plus élevé dans le tube de remplissage que dans le réservoir. Pourquoi ? Comment pourrait-on remplir le réservoir complètement ?



4.3 La pression atmosphérique

4.3.1 L'atmosphère terrestre

Nous vivons au fond d'un océan d'air, appelé atmosphère, qui est constitué de molécules. Grâce à l'énergie solaire, ces molécules se déplacent à des vitesses au-delà des 1000 km/h, se frayant un chemin jusqu'à des altitudes de plusieurs kilomètres. Sans l'énergie solaire, l'atmosphère refroidirait et les molécules d'air se déplaceraient de moins en moins vite pour finir en fine couche liquide ou solide sur la surface terrestre.¹¹ En revanche, sans l'attraction gravitationnelle de la Terre, les molécules d'air s'évaderaient peu à peu dans l'espace. L'atmosphère de la Terre existe donc grâce à un équilibre entre la tendance des molécules d'air énergétiques à s'évader et la gravitation terrestre qui les retient.



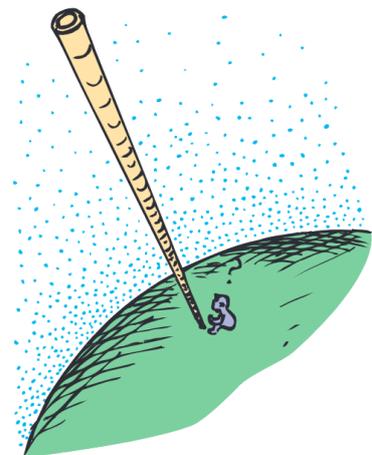
Contrairement à un océan d'eau, l'atmosphère n'a pas de surface limite définie et sa masse volumique n'est pas constante. En effet, les molécules d'air sont plus rapprochées au niveau de la mer qu'en haute montagne. L'air devient donc de moins en moins dense avec l'altitude. 99% de l'atmosphère se trouve en dessous d'une altitude de 30 km. Même l'espace intersidéral ne constitue pas un vide parfait. En effet, la densité de gaz y vaut environ une molécule par cm^3 . Il s'agit principalement d'hydrogène, l'élément le plus abondant de l'univers.

La température de l'atmosphère diminue d'abord avec l'altitude. Elle augmente ensuite à des altitudes très hautes, pour finalement diminuer de nouveau. La température dans le vide intersidéral vaut environ -270°C .

4.3.2 La pression atmosphérique normale

L'atmosphère, comme l'eau, exerce une pression appelée pression atmosphérique. Imaginons une très longue tige qui s'étendrait du sol jusqu'au « sommet » de l'atmosphère, à 30 km d'altitude. Supposons que la partie creuse de la tige ait une surface de section d' 1 cm^2 et que les masses volumiques de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la tige soient identiques à chaque altitude. La masse d'air à l'intérieur de la tige vaudrait alors 1 kg. Le poids de cette quantité d'air vaut :

$$P = mg = 1 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 10 \text{ N}$$



¹¹ Comme des grains de pop-corn qui reposent au fond d'une casserole. Si de la chaleur est fournie aux grains, ils atteignent des vitesses de quelques kilomètres par heure et peuvent sauter à des hauteurs allant jusqu'à deux mètres (ne jamais oublier le couvercle !)

La pression atmosphérique au fond de la tige vaut donc :

$$p = \frac{P}{A} = \frac{10 \text{ N}}{1 \text{ cm}^2} = 10 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$$

Il y a $10\,000 = 10^5$ centimètres carrés dans 1 mètre carré. Une colonne d'air d'une surface de section de 1 m^2 qui s'étend à travers toute l'atmosphère a donc une masse d'environ 10000 kg et un poids de $10000 \text{ N} = 10^5 \text{ N}$. La pression atmosphérique vaut donc :

$$p = 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 10^5 \text{ Pa} = 1000 \text{ hPa}$$

On est tellement habitué à la pression de l'air qui nous entoure qu'on ne s'en rend pas compte. On ne ressent pas le poids de l'air pour la même raison qu'on ne ressent pas le poids d'un ballon rempli d'eau lorsqu'on le tient sous l'eau. La pression de l'air dans nos poumons et nos vaisseaux sanguins est identique à celle de l'air ambiant.

La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer vaut 1013,25 hPa. On l'appelle **pression atmosphérique normale (1 atm)**. Des courants d'air et des vents provoquent des variations de la pression atmosphérique.

La pression atmosphérique diminue avec l'altitude, parce que de moins en moins de molécules d'air se trouvent au-dessus.

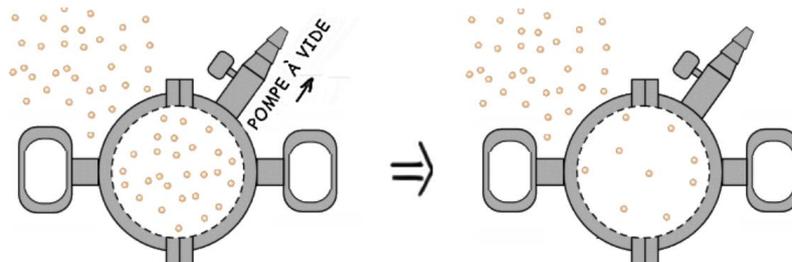
4.3.3 Mise en évidence expérimentale



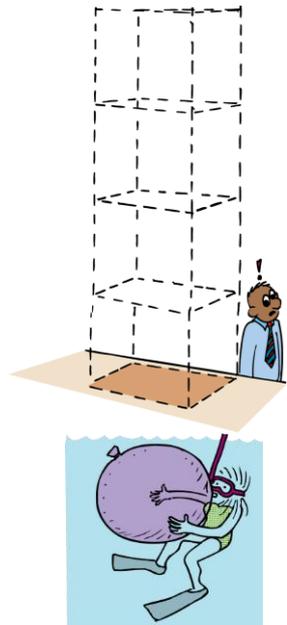
Otto von Guericke (1602-1686) et les hémisphères de Magdebourg :



« Après avoir intercalé l'anneau entre les deux demi-sphères, j'aspirais l'air rapidement. Je pouvais voir avec quelle force les hémisphères se pressaient contre l'anneau. Sous l'action de la pression atmosphérique, ils collaient l'un contre l'autre avec une véhémence que 16 chevaux parvenaient à peine à les séparer. La séparation produit une détonation pareille à celle qui accompagne un coup de fusil. »



Lorsque l'air à l'intérieur des deux hémisphères est évacué à l'aide d'une pompe, on n'arrive plus à les séparer. En effet, la pression atmosphérique de l'air ambiant est largement supérieure à la pression atmosphérique à l'intérieur des hémisphères. Si on laisse entrer l'air dans la cavité en ouvrant le robinet, les pressions intérieures et extérieures s'équilibrent et les hémisphères peuvent être séparés.



4.3.4 Les instruments de mesure

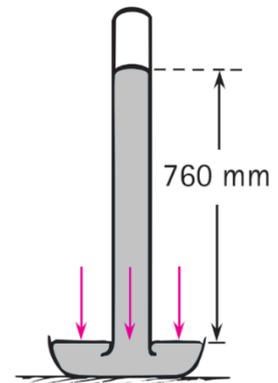
- En 1643, le scientifique italien Evangelista Torricelli a inventé un instrument qui permet de mesurer la pression atmosphérique : le **baromètre à mercure**. Un tube de verre, fermé à l'une de ses extrémités, est rempli à ras bord avec du mercure. L'extrémité ouverte du tube est plongée dans une cuve remplie de mercure. Le mercure dans le tube s'écoule jusqu'à ce que le niveau se stabilise à environ 76 cm (au niveau de la mer), laissant un vide en haut du tube.

Principe

Le niveau du mercure se stabilise lorsque la pression hydrostatique exercée par le mercure dans le tube sur la surface libre du mercure dans la cuve est identique à la pression atmosphérique exercée par l'air :



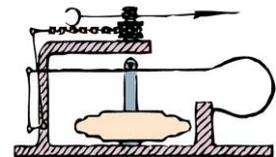
$$\begin{aligned}
 p_{atm} &= p_{Hg} \\
 &= \rho_{Hg} \cdot g \cdot h \\
 &= 13600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 0,76 \text{ m} \\
 &\cong 1013 \text{ hPa}
 \end{aligned}$$



On pourrait utiliser de l'eau au lieu du mercure, mais le tube devrait être 13,6 fois plus long. Un baromètre à eau devrait donc avoir une hauteur d'au moins 10,3 m.

Des variations du niveau de mercure sont dues à des variations de la pression atmosphérique. Si la pression atmosphérique augmente, alors la colonne de mercure atteint plus que 76 cm. Les variations de la pression atmosphérique nous permettent de faire des prévisions météorologiques. Une grande pression atmosphérique prédit en général du beau temps et une basse pression atmosphérique prédit en général du mauvais temps.

- Un **baromètre anéroïde** est un instrument de mesure de la pression atmosphérique qui est facilement transportable et qui fonctionne sans liquide. Des variations de la pression atmosphérique y sont indiquées par une aiguille sur la face de l'instrument. Tel qu'illustré sur la coupe verticale, le baromètre anéroïde contient une capsule anéroïde sous vide dont les parois sont flexibles. La pression atmosphérique exerce des forces pressantes plus ou moins grandes sur le couvercle ondulé de la capsule anéroïde. Un système mécanique de leviers et de ressorts fait alors tourner l'aiguille sur un cadran.

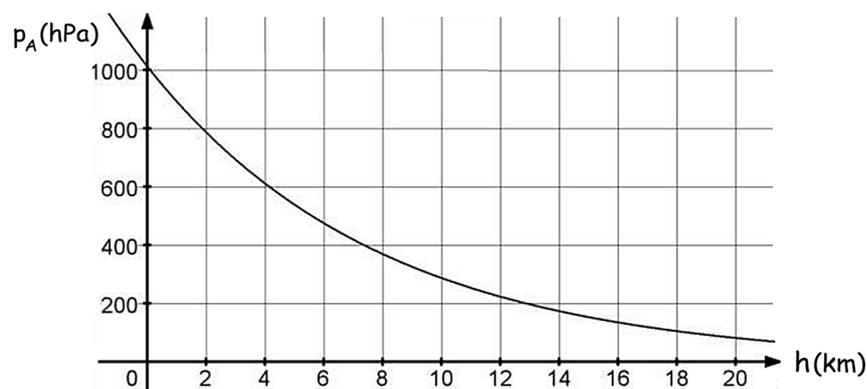


Puisque la pression atmosphérique varie avec l'altitude, un baromètre peut être utilisé pour déterminer l'altitude. Un baromètre anéroïde calibré pour mesurer l'altitude est appelé **altimètre**. Il existe des altimètres avec une sensibilité telle qu'ils peuvent détecter des variations d'altitudes de moins d'un mètre.

- Un **manomètre** est un instrument de mesure de la pression de l'air dans les pneus. Il est conseillé de contrôler la pression des pneus régulièrement, notamment avant un long voyage. À part d'être un facteur de sécurité, la pression des pneus influence considérablement l'usure des pneus et la consommation de carburant de la voiture.

■ **As-tu compris ?**

17. Dans le cours de chimie on apprend qu'un gaz occupe tout l'espace mis à sa disposition. Pour quelle raison l'atmosphère ne se dissipe-t-elle pas dans l'espace ?
18. La pression atmosphérique est due...
- A. au poids de l'atmosphère
 - B. au volume de l'atmosphère
 - C. à la masse volumique de l'atmosphère
19. Comparée au sommet du mont Everest, la limite supérieure de l'atmosphère est...
- A. énormément plus haute
 - B. plus haute, mais pas énormément
 - C. nettement plus petite
 - D. environ aussi haute
20. Un paquet de chips a l'air de gonfler lorsqu'il est amené en montagne. Pourquoi ?
21. Pourquoi les fenêtres d'avion sont-elles nettement plus petites que les fenêtres d'un bus ?
22. Après une semaine de pluie, les prévisions de météo annoncent du froid et du soleil. Que peut-on en déduire quant à l'évolution de la pression atmosphérique ?
23. Un altimètre fonctionne selon le principe que la pression atmosphérique...
- A. reste plus ou moins constante avec l'altitude
 - B. diminue avec l'altitude
 - C. augmente avec l'altitude
24. Le diagramme ci-dessous montre la diminution de la pression atmosphérique avec l'altitude.

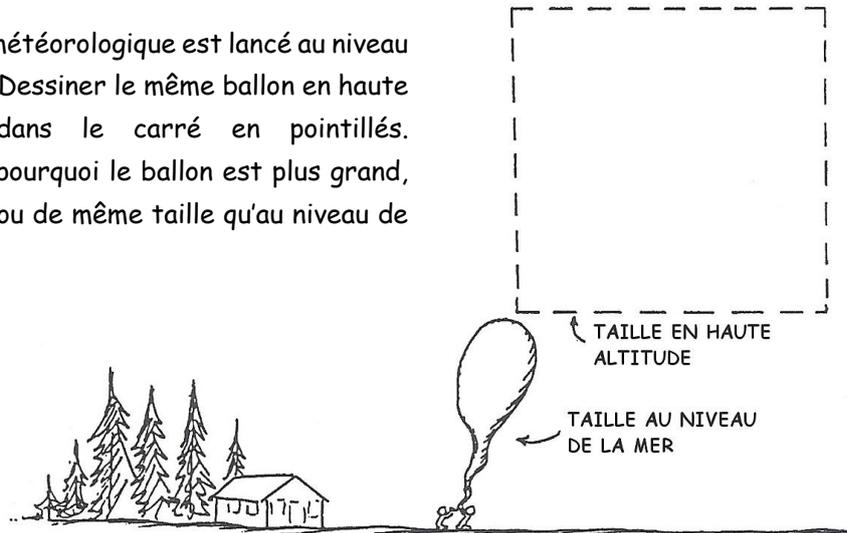


- a. Pourquoi la pression atmosphérique diminue-t-elle avec l'altitude.
- b. À quelle altitude la pression atmosphérique est-elle 10 fois plus petite qu'au niveau de la mer ?
- c. Combien vaut la pression atmosphérique en haut de la Zugspitze (3000 m) ? Et en haut du mont Everest (9000 m) ?
- d. L'altitude au sommet du mont Everest est 3 fois plus élevée qu'au sommet de la Zugspitze. Pourtant la pression atmosphérique au mont Everest n'est pas 3 fois plus petite. Que peut-on en déduire ?

25. Une différence fondamentale entre un liquide et un gaz est que si le liquide est mis sous pression, son volume (augmente) (diminue) (ne change pas de manière significative) et sa masse volumique (augmente) (diminue) (ne change pas de manière significative).

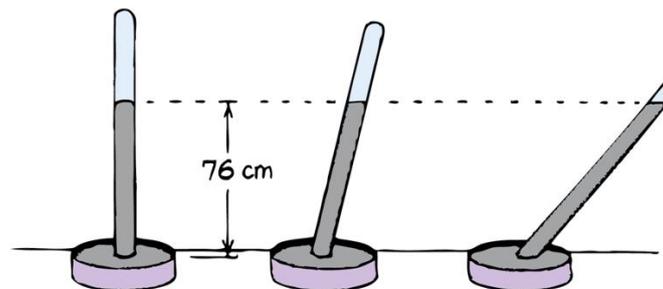
Si un gaz est mis sous pression, son volume (augmente) (diminue) (ne change pas de manière significative) et sa masse volumique (augmente) (diminue) (ne change pas de manière significative).

26. Un ballon météorologique est lancé au niveau de la mer. Dessiner le même ballon en haute altitude dans le carré en pointillés. Expliquer pourquoi le ballon est plus grand, plus petit ou de même taille qu'au niveau de la mer.



27. Si, au lieu du mercure, on pouvait utiliser un liquide plus dense dans un baromètre de Torricelli, le niveau du liquide serait-il supérieur ou inférieur au niveau du mercure ? Pourquoi ?

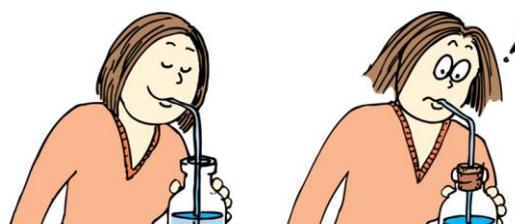
28. Expliquer pourquoi le niveau du mercure dans le baromètre de Torricelli reste identique lorsque le tube est incliné.



29. La taille de la section du tube d'un baromètre à mercure influence-t-elle la hauteur de la colonne de mercure ? Justifier.

30. Est-ce qu'il est plus facile ou plus difficile de boire un soda avec une paille au niveau de la mer qu'en haut d'une montagne ? Expliquer.

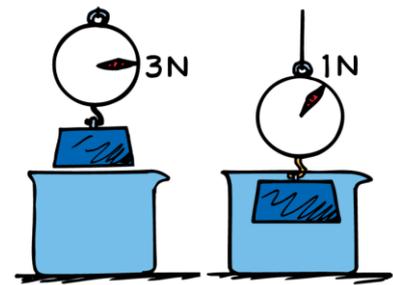
31. Pourquoi la femme n'arrive-t-elle pas à boire son soda dans la figure de droite ?



4.4 La poussée d'Archimède

4.4.1 Le principe d'Archimède

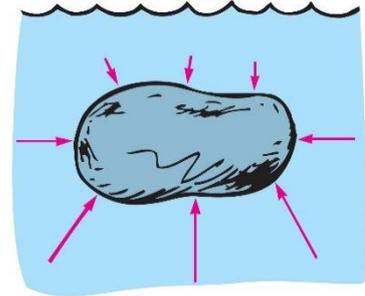
Le corps de poids 3 N paraît plus léger dans l'eau que dans l'air. Or, le poids du corps n'a pas changé, puisqu'il se trouve au même endroit sur la Terre. L'observation que le poids apparent est plus petit que le poids réel doit venir du fait que l'eau exerce sur le corps immergé une poussée verticale vers le haut, appelée la **poussée d'Archimède**.



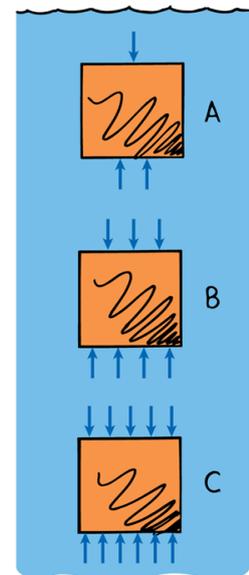
$$F_A = P_{réel} - P_{apparent} = 3 \text{ N} - 1 \text{ N} = 2 \text{ N}$$

Explication

La pression hydrostatique qui règne en bas du corps submergé est plus grande qu'en haut du corps. La force pressante exercée par l'eau sur la partie inférieure du corps est donc plus grande que sur la partie supérieure. Les forces latérales se compensent, puisqu'elles s'appliquent à une même profondeur. Il en résulte une force résultante verticale vers le haut. C'est la poussée d'Archimède.

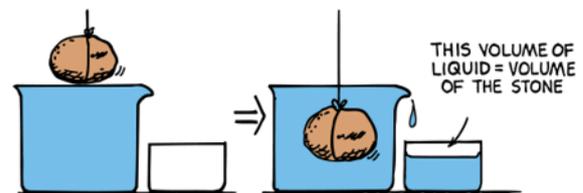
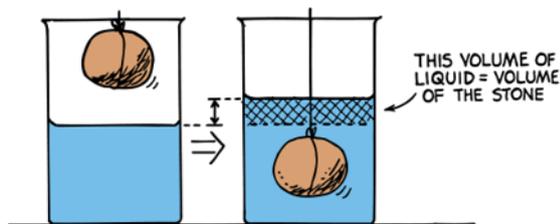


Considérons un corps de forme cubique de longueur d'arête a qui est submergé dans l'eau. La poussée d'Archimède subie par le corps est égale à la différence entre la force pressante exercée sur la face inférieure du corps vers le haut et la force pressante exercée sur la face supérieure du corps vers le bas. Tant que le corps est complètement immergé, cette différence reste identique à toute profondeur.



$$\begin{aligned} F_A &= F_{\uparrow} - F_{\downarrow} \\ &= p_{bas} \cdot S - p_{haut} \cdot S \\ &= \rho_{liquide} \cdot g \cdot h_{bas} \cdot S - \rho_{liquide} \cdot g \cdot h_{haut} \cdot S \\ &= \rho_{liquide} \cdot g \cdot S \cdot (h_{bas} - h_{haut}) \\ &= \rho_{liquide} \cdot g \cdot S \cdot a \\ &= \rho_{liquide} \cdot g \cdot V_{corps} \end{aligned}$$

Archimède réalisa que le volume du corps submergé est identique au volume du liquide déplacé par le corps submergé : $V_{corps} = V_{liquide \text{ déplacé}}$



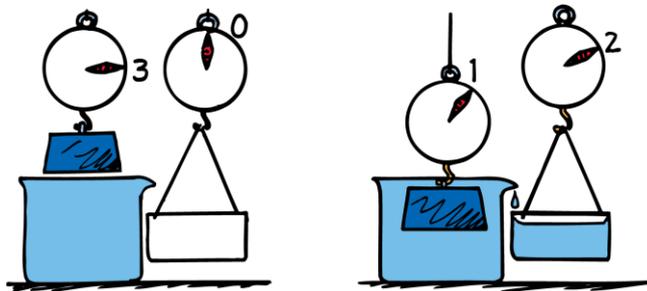
L'expression de la poussée d'Archimède peut donc être reformulée :

$$F_A = \rho_{liquide} \cdot g \cdot V_{liquide \text{ déplacé}} = m_{liquide \text{ déplacé}} \cdot g = P_{liquide \text{ déplacé}}$$

PRINCIPE D'ARCHIMÈDE

La poussée d'Archimède subie par un corps immergé dans un fluide (liquide ou gaz) a même norme que le poids du fluide déplacé :

$$F_A = P_{\text{fluide déplacé}}$$

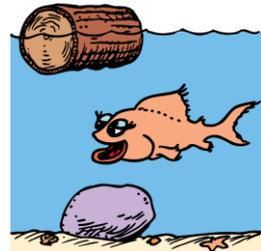


La poussée d'Archimède ne dépend ni de la profondeur d'immersion (tant que le corps est complètement submergé), ni de la nature du corps immergé. Elle dépend uniquement du volume du liquide déplacé et de la masse volumique du liquide.

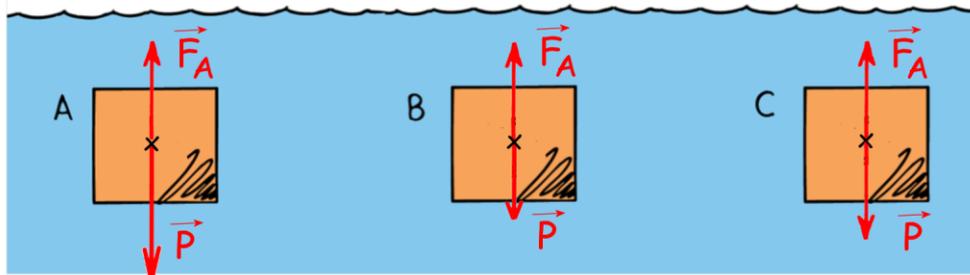
4.4.2 Flotter, couler, rester entre deux eaux

La poussée d'Archimède permet d'expliquer pourquoi les corps coulent, flottent ou restent entre deux eaux. Les deux forces qui s'exercent sur un corps submergé dans un liquide sont :

- le poids : $P = m \cdot g = \rho_{\text{corps}} \cdot g \cdot V_{\text{corps}}$ (vers le bas)
- la poussée d'Archimède : $F_A = \rho_{\text{liq}} \cdot g \cdot V_{\text{liq déplacé}}$ (vers le haut).



Lorsque le corps est complètement immergé dans l'eau, le volume du corps est identique au volume du liquide déplacé. Pour déterminer si le corps va couler, rester entre deux eaux ou flotter, il faut considérer la force résultante sur le corps.



$$P > F_A \\ \rho_{\text{corps}} > \rho_{\text{liquide}}$$

$$P < F_A \\ \rho_{\text{corps}} < \rho_{\text{liquide}}$$

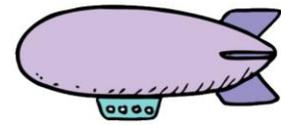
$$P = F_A \\ \rho_{\text{corps}} = \rho_{\text{liquide}}$$

Conclusion

Un corps de masse volumique plus grande que celle du liquide coule.

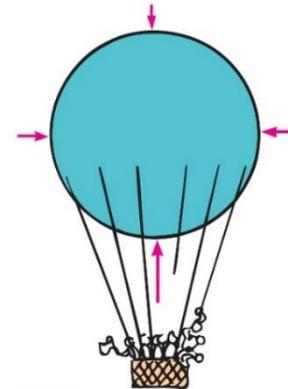
Un corps de masse volumique plus petite que celle du liquide flotte.

Un dirigeable (Zeppelin) reste en suspension dans l'air, alors qu'il est attiré par la Terre. La raison pour laquelle le dirigeable ne tombe pas dans l'air est la même pour laquelle un poisson ne coule pas dans l'eau. Un corps dans un gaz subit également une poussée d'Archimède vers le haut, exercée par le gaz. Le principe d'Archimède s'applique également aux corps dans un gaz.



Explication

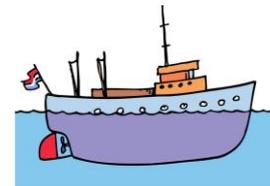
Prenons l'exemple de la montgolfière. La pression atmosphérique est plus grande en bas de la montgolfière qu'en haut car la pression atmosphérique diminue avec l'altitude. La force pressante exercée par l'air sur la partie inférieure de la montgolfière est donc plus grande que la force pressante exercée par l'air sur la partie supérieure. Les forces latérales se compensent. Il en résulte une force résultante verticale vers le haut. C'est la poussée d'Archimède exercée par l'atmosphère.



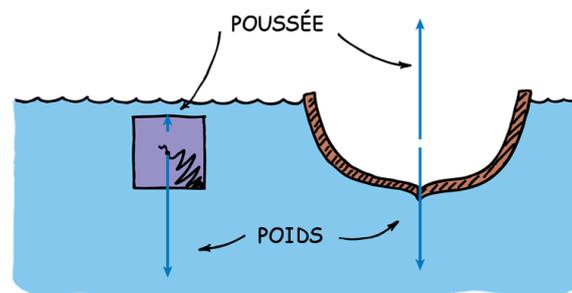
- Un corps de masse volumique plus grande que celle de l'air tombe dans l'air.
- Un corps de masse volumique plus petite que celle de l'air monte dans l'air.
- Un corps de même masse volumique que l'air reste suspendu dans l'air.

4.4.3 Le principe de flottage

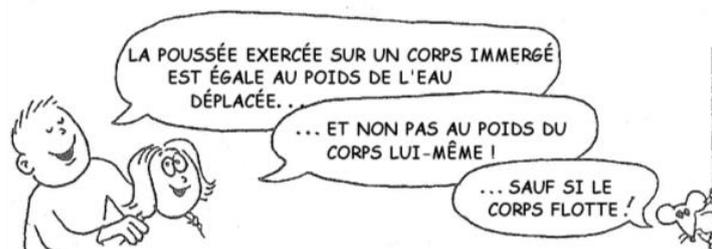
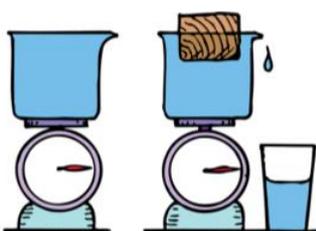
Comment un énorme pétrolier constitué de fer peut-il flotter, alors que la masse volumique du fer est plus grande que celle de l'eau ?



Le fer a une masse volumique environ huit fois plus grande que l'eau. La poussée d'Archimède sur un bloc de fer est largement insuffisante pour compenser son poids et le bloc coule. En refaçonnant le bloc de fer en forme de bateau, le poids reste inchangé. En revanche, à cause de sa forme, le bateau déplace un volume d'eau beaucoup plus grand, même en n'étant pas encore complètement immergé. Plus le bateau est immergé, plus il déplace d'eau et plus la poussée d'Archimède sur le bateau est grande. Lorsque le poids de l'eau déplacé correspond exactement au poids du bateau, le bateau se trouve en équilibre et flotte sur l'eau.



Pour un corps qui **flotte**, la poussée d'Archimède a même norme que le poids du corps.

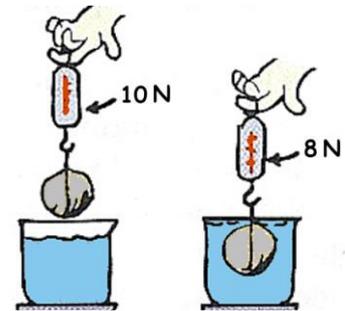


■ **As-tu compris ?**

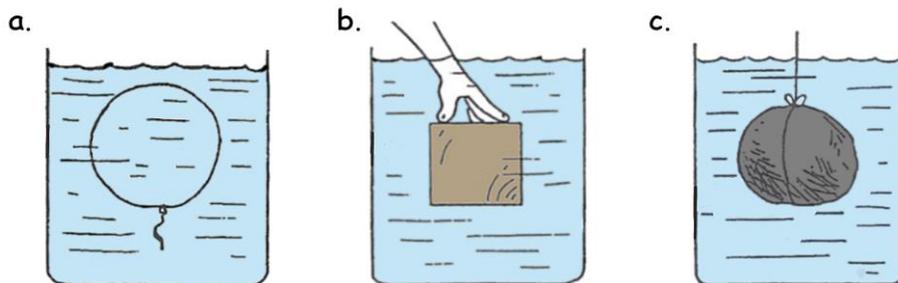
32. Expliquer pourquoi sur une plage rocheuse les pierres font moins mal aux pieds lorsqu'on se trouve debout dans l'eau profonde que lorsqu'on se trouve debout à l'extérieur de l'eau ?
33. Si la pression hydrostatique était la même à toute profondeur, y aurait-il une poussée d'Archimède sur un objet immergé ? Justifier.

34. La figure ci-contre montre une pierre qui est suspendue à un dynamomètre et qui est plongée dans un récipient d'eau.

- Quel est le poids de la pierre ?
- Quel est le poids apparent de la pierre lorsqu'elle est immergée dans l'eau ?
- Quelle poussée d'Archimède l'eau exerce-t-elle sur la pierre immergée ?

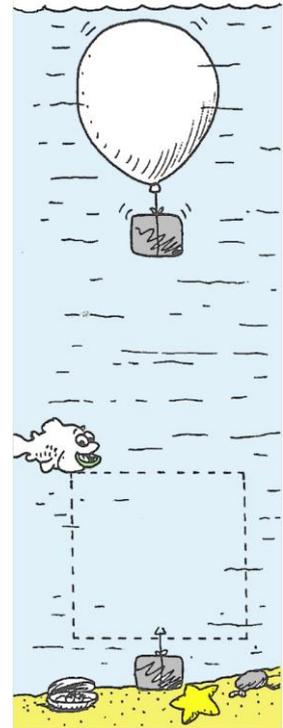


35. Un bloc d'aluminium d'un volume de 10 cm^3 est plongé dans un récipient d'eau rempli à ras bord. L'eau déborde. On refait l'expérience avec un bloc de plomb de 10 cm^3 . Est-ce que le bloc de plomb déplace plus, moins ou la même quantité d'eau ?
36. Même question pour un bloc d'aluminium de 1 kg et un bloc de plomb de 1 kg.
37. Considère un bloc submergé aux positions A, B, et C. En quelle position la poussée d'Archimède est-elle la plus grande ? Justifie
38. Qui subit une poussée d'Archimède plus grande dans l'eau ? Justifier.
- Un bloc de polystyrène qui flotte.
 - Un bloc de fer de même volume qui coule.
39. Différents corps immergés.

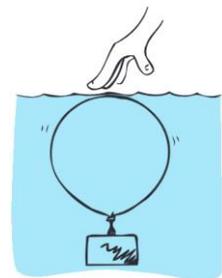


- Un ballon rempli d'1 litre d'eau est immergé dans de l'eau.
 - Calculer le poids de l'eau dans le ballon.
 - Calculer la poussée d'Archimède subie par le ballon.
 - Représenter le poids du ballon et la poussée d'Archimède au centre de gravité du ballon (1 cm correspond à 5 N).
 - Le ballon va-t-il couler, flotter ou rester entre deux eaux ? Justifier.
- Mêmes questions pour un bloc de bois d'une masse de 0,5 kg et d'un volume de 1 dm^3 que l'on tient immergé sous la surface de l'eau.
- Mêmes questions pour un rocher de même volume mais de masse égale à 2 kg, que l'on tient suspendu sous la surface de l'eau.

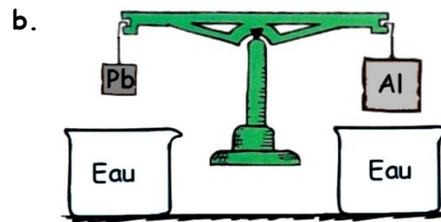
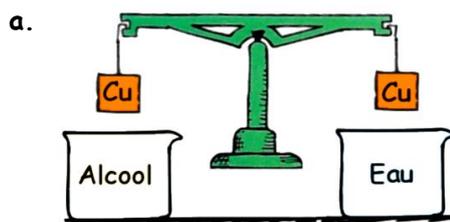
40. Un ballon rempli d'air est lesté de manière qu'il coule dans un lac.
- Dessiner le ballon au fond du lac (dans le carré en pointillés).
 - Comparer, en justifiant, la masse volumique du système qui coule (ballon + lestage) avec la masse volumique de l'eau.
 - Lorsque le système coule, sa masse volumique... (justifier)
 - devient plus grande.
 - reste identique.
 - devient plus petite.
 - Comparer le poids du système et la poussée d'Archimède qu'il subit.
 - Au fur et à mesure que le système coule, la poussée d'Archimède sur le système... (justifier)
 - devient plus grande.
 - reste identique.
 - devient plus petite.
 - Mêmes questions b, c, d, et e si le système est un rocher.



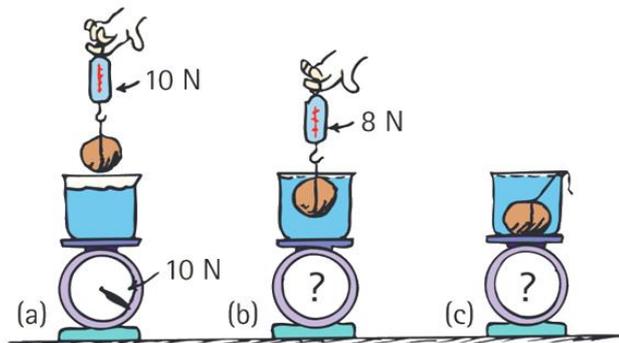
41. Un ballon est lesté de manière qu'il flotte encore tout juste à la surface de l'eau. Lorsqu'on pousse le ballon plus bas, il va... (justifier)
- remonter vers la surface.
 - rester entre deux eaux.
 - couler.



42. Qu'observe-t-on lorsqu'on descend les balances et que les blocs suspendus sont complètement submergés dans les liquides ? Justifier.



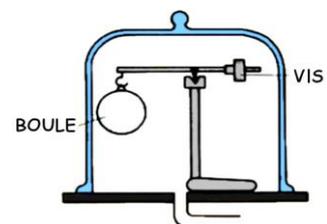
43. Déterminer, en justifiant, la valeur indiquée par la balance dans les cas (b) et (c).



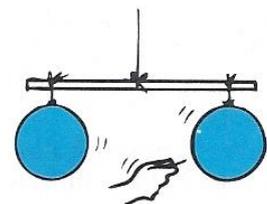
44. Il n'est pas exact de dire que des objets lourds coulent et des objets légers flottent. Donner deux exemples extrêmes pour expliquer.
45. Pourquoi un bloc de fer flotte-t-il sur le mercure alors qu'il coule dans l'eau ?
46. Quelle est la différence entre les méthodes employées par un poisson et un sous-marin pour changer leur masse volumique respective et ainsi contrôler leur profondeur dans l'eau ?
47. Est-ce que la poussée d'Archimède s'exerce sur tous les corps dans l'air ou seulement sur des corps très légers comparé à leur taille ?
48. Un ballon rempli d'hélium lévite sur place dans l'air. La pression atmosphérique sur la partie inférieure du ballon est alors
- égale à celle exercée sur la partie supérieure.
 - inférieure à celle exercée sur la partie supérieure.
 - supérieure à celle exercée sur la partie supérieure.
49. Sur quel corps la poussée d'Archimède atmosphérique est-elle plus grande ? Justifier.
- Un éléphant qui tombe.
 - Un ballon de fête d'anniversaire rempli d'hélium et qui monte.
50. Un ballon qui pèse 1N reste en suspension dans l'air.
- Quelle est la norme de la poussée d'Archimède qui s'exerce sur le ballon ?
 - Que se passe-t-il si la poussée d'Archimède diminue ? Justifier.
 - Que se passe-t-il si la poussée d'Archimède augmente ? Justifier.
51. On remplace l'hélium dans un ballon par du dihydrogène moins lourd.
- La poussée d'Archimède de l'atmosphère change-t-elle en considérant que le volume du ballon reste identique ? Justifier.
 - Lequel des deux ballons en premier le plafond de la salle ? Justifier.

52. Un récipient en acier rempli avec de l'hélium ne monte pas dans l'air, alors qu'un ballon rempli avec de l'hélium monte. Pourquoi ?

53. Lorsque l'air en dessous de la cloche à vide est évacué, le levier illustré ci-contre est en équilibre. Qu'observe-t-on lorsque la cloche est remplie d'air ? Justifier.



54. Deux ballons d'air identiques et de même volume sont suspendus aux extrémités d'une tige horizontale en équilibre. On pique l'un des ballons (à travers un morceau de scotch pour que le ballon n'explose pas) et l'air s'échappe de ce ballon. L'équilibre de la balance est-il rompu ? Si oui, dans quel sens va basculer la balance ? Justifier.

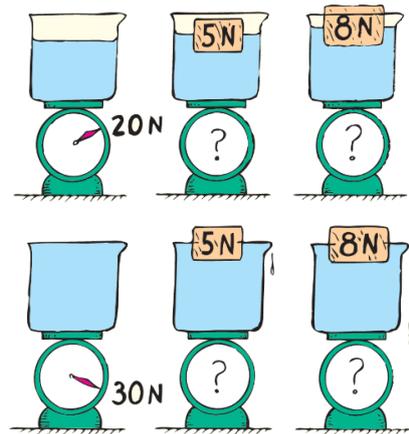


55. Un b cher rempli à plus de la moitié d'eau pèse 20 N. Quelle valeur indique la balance lorsqu'un bloc de bois... (justifier)

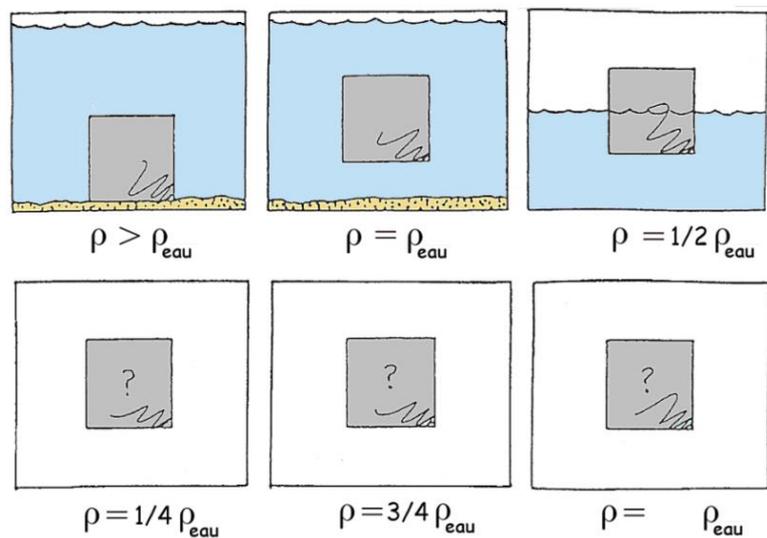
- a. de 5 N flotte dans le b cher ?
- b. de 8 N flotte dans le b cher ?

Le même b cher rempli à ras bord pèse 30 N. Quelle valeur indique la balance lorsqu'un bloc de bois... (justifier)

- a. de 5 N flotte dans le b cher ?
- b. de 8 N flotte dans le b cher ?



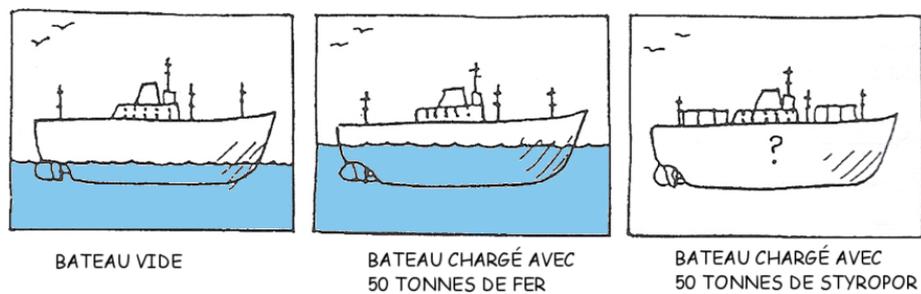
56. Le niveau de l'eau est indiqué dans les trois premières figures. Représenter le niveau pour les autres cas et donner un nouvel exemple pour le dernier cas.



57. Ranger par ordre décroissant le pourcentage de volume d'un ballon de basketball au-dessus d'une surface...

- a. d'eau distillée.
- b. d'eau salée.
- c. du mercure.

58. Représenter le niveau de l'eau dans la troisième figure.



59. Un bloc de bois chargé par un lestage en fer flotte sur l'eau. Que se passera-t-il si le lestage est suspendu en dessous du bois ? Justifier.

- A. Le bois flotte au même niveau.
- B. Le bois flotte plus bas.
- C. Le bois flotte plus haut.

