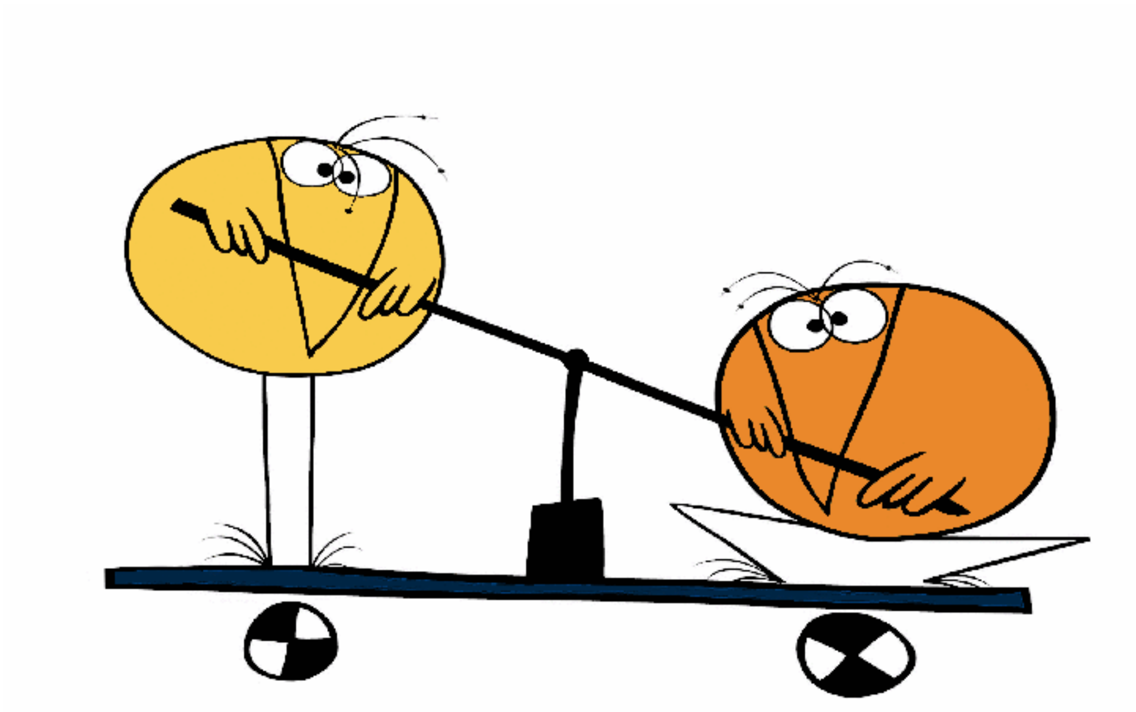
Collège de Genève année 2020-2021

Mécanique

Cours de physique pour la 2$^{\text{ème}}$ année



Alice Gasparini

Table de matières

I **Cinématique** 7

Introduction 8

1 Mouvement dans l'espace 9
- 1.1 Vecteur position . . . 9
- 1.2 Somme de vecteurs position . . . 11
- 1.3 Différence entre deux vecteurs position : le déplacement . . 12
- 1.4 Trajectoire . . . 13
- 1.5 Position et déplacement dans un mouvement rectiligne (1D) 14
- 1.6 Distance parcourue et déplacement . . . 15
- 1.7 Distance parcourue et déplacement dans un mouvement rectiligne . . . 16
- 1.8 Durée . . . 17

2 Vitesse 18
- 2.1 Vitesse vectorielle moyenne, $\vec{v}_m$ . . . 18
- 2.2 Vitesse scalaire moyenne, v_m . . . 19
- 2.3 $\vec{v}_m$ et v_m dans le mouvement rectiligne . . . 20
- 2.4 Vitesse instantanée . . . 21
- 2.5 Le mouvement uniforme (MU) et le mouvement rectiligne (MR) . . . 23
- 2.6 Différence entre deux vecteurs vitesse : la vitesse relative . 25
- 2.7 Equation horaire et diagramme horaire . . . 26
- 2.8 Mouvement rectiligne uniforme (MRU) . . . 27

3 Accélération 32
- 3.1 Accélération moyenne et instantanée . . . 32
- 3.2 Accélération dans le mouvement rectiligne . . . 33
- 3.3 Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) . . . 38

Formulaire de cinématique **45**

II **Dynamique** **48**

Introduction **49**

4 Les lois de Newton **49**
4.1 La première loi de Newton (rappel) 49
4.2 L'inertie 51
4.3 La deuxième loi de Newton 52
4.4 La troisième loi de Newton (rappel) 54

5 Chute libre **55**
5.1 La loi de gravitation universelle (rappel) 55
5.2 Chute libre à la surface terrestre 56
5.2.1 Chute libre verticale 58
5.2.2 Chute libre en deux dimensions : le mouvement du projectile 60
5.3 Chute avec résistance de l'air 64

6 Le plan incliné **66**
6.1 Cas sans frottement et/ou force motrice 67
6.2 Cas avec frottement et/ou force motrice 68

Formulaire de dynamique **69**

III **Energie** **71**

Introduction **72**

7 Travail, puissance et rendement **73**
7.1 Travail d'une force 73
7.2 Le travail comme un produit scalaire 77
7.3 Le travail comme transfert d'énergie 78

7.4 Puissance 79
7.5 Le kilowattheure comme unité d'énergie 80
7.6 Rendement 81

8 Energie mécanique 83
8.1 L'énergie cinétique 83
8.2 La force de pesanteur : un exemple de force conservative . 88
8.3 Energie potentielle gravitationnelle 91

9 Conservation de l'énergie 92
9.1 Conservation de l'énergie mécanique 92
9.2 Le principe de conservation de l'énergie 95
9.3 Différentes formes d'énergie 101

Formulaire de la partie "Energie" 104

IV Chaleur 106

Introduction 107

10 Transfert de chaleur et variation de la température 108
10.1 Mesure de la température 108
10.2 Energie thermique 109
10.3 Quantité de chaleur 110
10.4 Chaleur massique d'une substance 111
10.5 Capacité calorifique d'un corps 114
10.6 Température d'équilibre d'un mélange 115

11 Transfert de chaleur et changement d'état 117
11.1 Structure microscopique des états de la matière (rappel) . 117
11.2 Chaleur latente d'une substance 117
11.3 Température d'équilibre avec transition de phase 119

12 Mécanismes de transfert de la chaleur 120

12.1 Conduction 120
12.2 Convection 120
12.3 Rayonnement 122

Formulaire de la partie "Chaleur" 123

Notation

1. Pour toute quantité physique Q, ΔQ en représente la variation, donnée par la différence entre Q_{final} et $Q_{initial}$ (et pas le contraire !) :

$$\Delta Q = Q_{final} - Q_{initial}.$$

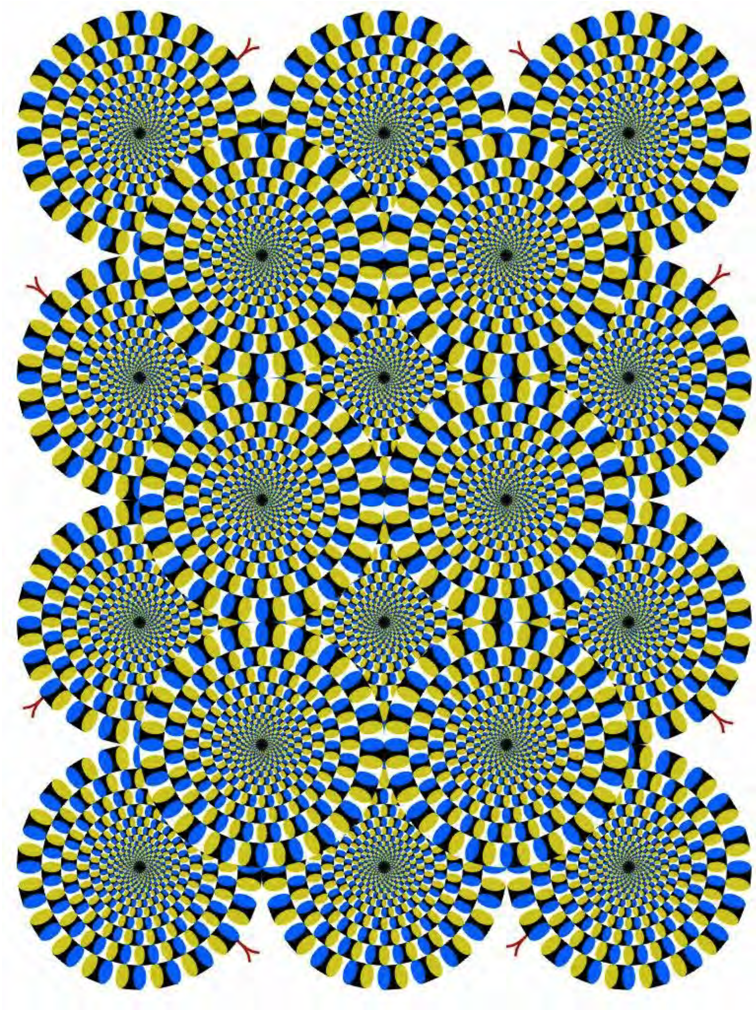
Le symbole Δ est la lettre grecque “delta” qui signifie “différence” ou “intervalle”.

2. On note les grandeurs vectorielles avec une flèche au dessus du symbole, $\vec{Q}$. Néanmoins, lorsque nous travaillons en une dimension, où la direction est fixée, la notation vectorielle pour ces grandeurs n’est plus nécessaire et on écrit simplement Q à la place de $\vec{Q}$. Il faut garder à l’esprit que ces grandeurs peuvent avoir un sens, et cela se traduit par un signe positif ou négatif selon l’orientation de l’axe choisi.

3. L’intensité (ou norme) des vecteurs est toujours positive, et sera notée par deux barres latérales, $||\vec{Q}||$. En une dimension l’intensité ou norme de Q est donnée par sa valeur absolue, $|Q|$.

Première partie

Cinématique



Introduction

La **mécanique**, la plus vieille des sciences, étudie le mouvement des objets. La **cinématique** (du grec "kinéma" : mouvement) est la branche de la mécanique qui s'occupe uniquement de décrire le mouvement. Lorsque nous analysons les liens entre le mouvement et les forces qui le génèrent ou les propriétés des objets, nous faisons face à une autre branche de la mécanique appelée **dynamique**.
La **statique** est l'étude des systèmes physiques en équilibre, c'est à dire qui possèdent une vitesse constante et pour lesquels la position relative des sous-systèmes ne change pas avec le temps.

Approximation ponctuelle

Un objet peut tourner ou vibrer dans son mouvement, comme par exemple une gouttelette d'eau qui tombe. Dans la suite de ce cours, nous voulons éviter les complications supplémentaires dues à cela. Pour simplifier notre analyse, nous allons considérer uniquement le mouvement d'objets idéalisés que nous appelons **points matériels** ou **particules**. Du point de vue mathématique, une particule est assimilée à un point, c'est à dire un objet sans extension, de telle façon que tout mouvement rotatoire ou vibratoire est absent.
Cette approximation se justifie dans la mesure où

— soit l'objet physique à étudier est assez petit par rapport à la taille de son mouvement, de sorte que les effets dus à sa taille peuvent être négligés. Nous pensons par exemple à une balle de golf en mouvement dans un champ ou la Terre qui tourne autour du Soleil ;

— soit nous pouvons analyser le mouvement ponctuel du centre de masse du corps, dans un premier temps, puis prendre en considération les rotations et les vibrations par rapport à ce point par la suite (ces dernières ne feront pas objet de ce cours).

1 Mouvement dans l'espace

Le mouvement d'un point matériel est le changement de sa position par rapport à un observateur. Afin de pouvoir décrire un mouvement, il est nécessaire de définir un **référentiel** dans l'espace, notamment

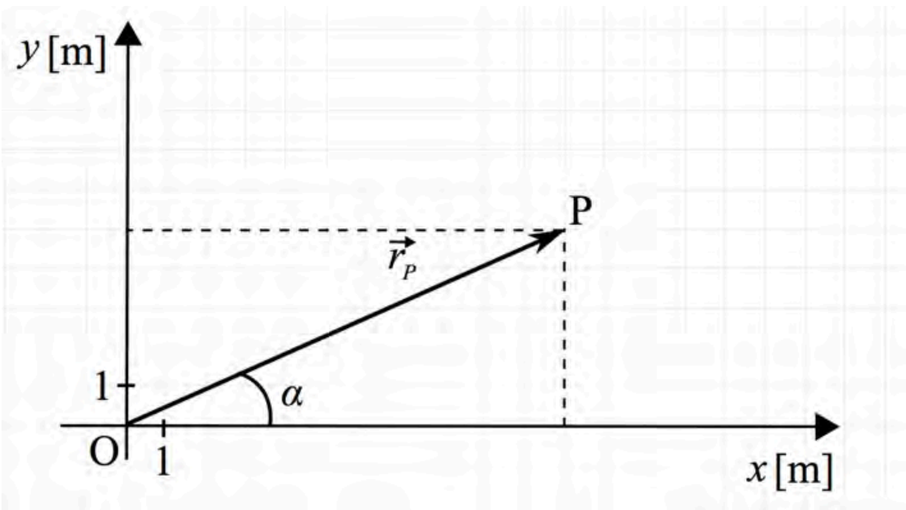
— une **origine O** (la "position de l'observateur");
— des **axes orientés** (un, deux ou trois selon le nombre de dimensions du mouvement);
— une **échelle de longueur** pour ces axes.

1.1 Vecteur position

La position d'une particule est une quantité vectorielle : elle possède
— une direction (par exemple horizontale ou verticale),
— un sens (vers le haut, le bas, etc.),
— une intensité ou norme (sa "taille", en mètres dans l'unité SI).

Elle est représentée par une flèche dans le référentiel choisi. Nous allons travailler dans un système de coordonnées cartésiennes, pour lequel les axes sont orthogonaux entre eux : x, y, z en trois dimensions, mais le concept s'applique à des espaces à une ou deux dimensions.

Si, par exemple, une particule se trouve au point $\mathrm{P}(x_P; y_P)$ dans l'espace à deux dimensions, **son vecteur position** $\vec{r}_P$ **est la flèche qui relie O à P. Ses coordonnées** x_P, y_P **sont les projections de P sur les axes respectifs**.



Nous utilisons la notation :

$$\vec{r}_P = (x_P; y_P) ,$$

Dans l'exemple de la figure précédente

$$\vec{r}_P = (11\,\mathrm{m}; 5\,\mathrm{m}) .$$

L'intensité ou norme ou module du vecteur position, $||\vec{r}_P||$ est la taille de la flèche qui le représente, et s'exprime en mètres (unité SI). Il s'agit d'une quantité scalaire (un nombre) et toujours positive. Dans l'espace à deux dimensions sa valeur est donnée par le théorème de Pythagore, sa direction et son sens par l'angle a formé par le vecteur et l'axe x. Dans l'exemple ci-dessus

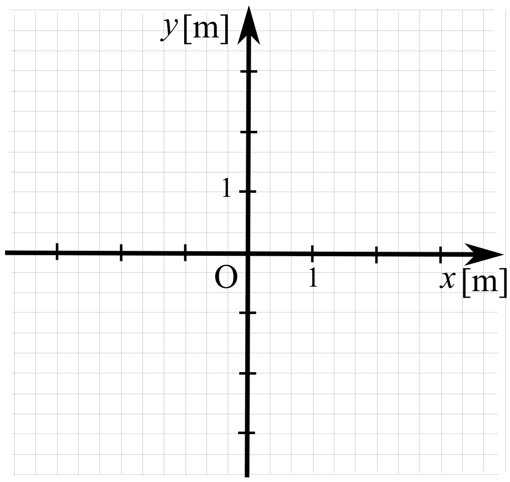
$$||\vec{r}_P|| = \sqrt{x_P^2 + y_P^2} = \sqrt{11^2 + 5^2} = 12\,\mathrm{m}; \quad \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{y_P}{x_P}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{5}{11}\right) = 24°. \quad (1)$$

Dans le cas unidimensionnel l'intensité d'un vecteur est simplement la valeur absolue de la (seule) coordonnée : $||\vec{r}_P|| = |x_P|$ et son sens est indiqué par le signe de x_P (+ ou -), la direction étant fixée.

• **Exemple 1.** *Une tortue se déplace dans un jardin du point* $P(-1,5\,\mathrm{m}; -2,5\,\mathrm{m})$ *au point* $Q(2,0\,\mathrm{m}; 3,0\,\mathrm{m})$*, puis du point* Q *au point* $R(-3,0\,\mathrm{m}; 1,0\,\mathrm{m})$*. Dans le référentiel suivant, dessiner et nommer les trois positions de la tortue ainsi que ses deux déplacements.*

a) *Exprimer (1) les coordonnées et (2) la norme (ou module) de chaque déplacement, puis donner son orientation par rapport à l'axe* x*.*

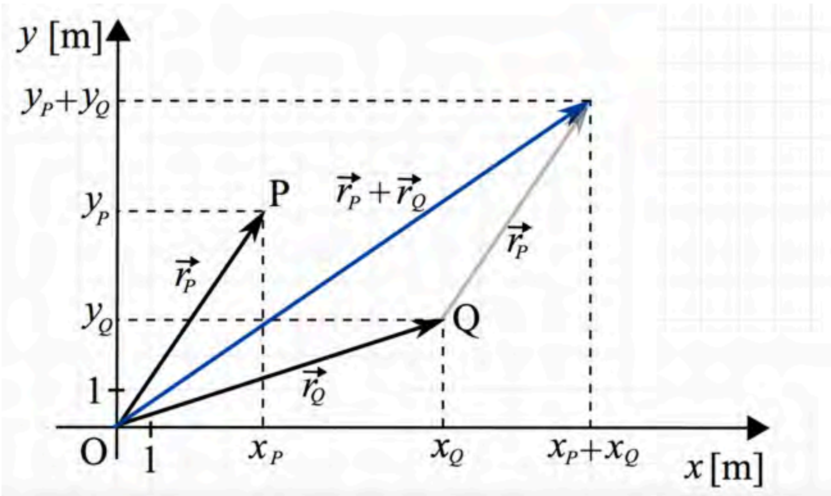
b) *Déterminer les coordonnées, la norme et l'orientation du déplacement résultant.*



1.2 Somme de vecteurs position

La somme de deux positions $\vec{r}_P$ et $\vec{r}_Q$ est donnée par le vecteur que l'on obtient simplement en additionnant les composantes :

$$\vec{r}_P + \vec{r}_Q = (x_P; y_P) + (x_Q; y_Q) = (x_P + x_Q \ ; \ y_P + y_Q) \, .$$



Comme nous pouvons l'observer dans la figure ci-dessus, **géométriquement la somme de deux vecteurs (ou résultante) n'est rien d'autre que le vecteur qui relie l'origine de l'un d'eux avec l'extrémité de l'autre, une fois que nous les avons dessinés "à la queue leu leu"**. Il s'agit aussi de la diagonale du parallélogramme obtenu à partir des deux vecteurs d'origine.

Pour obtenir la somme de plus que deux vecteurs nous pouvons répéter cette procédure. Géométriquement cela revient à dessiner tous les vecteur que nous voulons sommer "à la queue leu leu", puis rejoindre le début du premier avec la pointe du dernier.

D'une manière générale, l'intensité (ou la norme) de la somme de deux vecteurs position n'est pas égale à la somme des intensités de ces vecteurs :

$$||\vec{r}_P + \vec{r}_Q|| \leq ||\vec{r}_P|| + ||\vec{r}_Q||,$$

et nous avons l'égalité lorsque les vecteurs sommés ont la même direction et le même sens. De plus, nous observons que la somme de vecteurs est une opération commutative : le résultat est le même si on change l'ordre des termes additionnés, $\vec{r}_P + \vec{r}_Q = \vec{r}_Q + \vec{r}_P$. Une animation sur la somme des vecteurs est disponible sur le lien suivant :

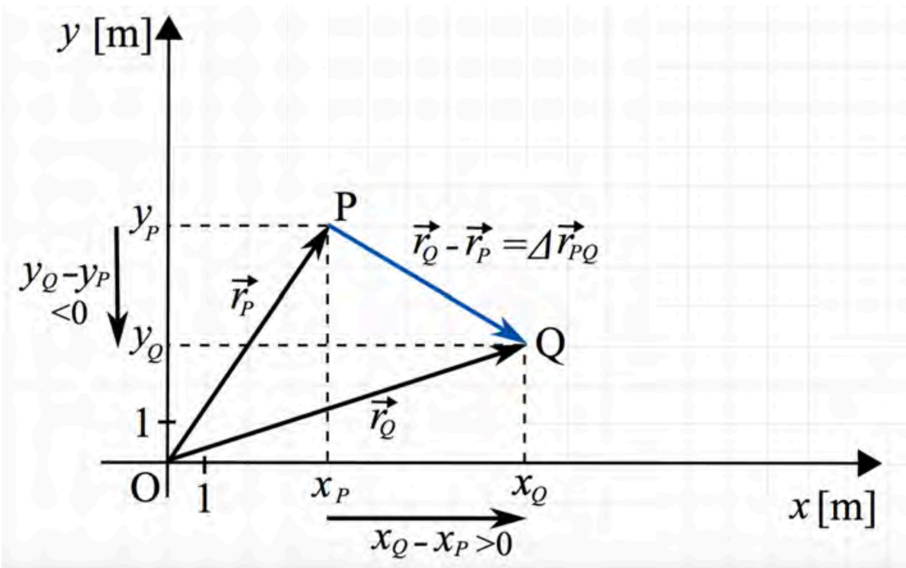
http://www.walter-fendt.de/ph14e/resultant.htm

1.3 Différence entre deux vecteurs position : le déplacement

La différence entre deux positions $\vec{r}_P$ (position initiale) et $\vec{r}_Q$ (position finale) est donnée par le vecteur que l'on obtient simplement en soustrayant les composantes :

$$\Delta\vec{r}_{PQ} = \vec{r}_Q - \vec{r}_P = (x_Q; y_Q) - (x_P; y_P) = (x_Q - x_P\ ;\ y_Q - y_P)\,. \tag{2}$$

Géométriquement, la différence $\Delta\vec{r}_{PQ}$ est donnée simplement par le vecteur qui relie le point P avec le point Q, comme montré dans la figure suivante.



Contrairement que ce que nous avons vu pour la somme, la différence n'est pas commutative, mais elle est <u>anticommutative</u> : $\Delta\vec{r}_{PQ} = -\Delta\vec{r}_{QP}$.

De plus, toujours par la figure, nous pouvons vérifier géométriquement que

$$\vec{r}_P + \Delta\vec{r}_{PQ} = \vec{r}_Q$$

selon la définition de somme que nous avons donnée ci-dessus. Donc $\Delta\vec{r}_{PQ}$ et bien la quantité vectorielle qu'il faut additionner à $\vec{r}_P$ pour arriver à $\vec{r}_Q$, ce qui correspond à la notion de soustraction de manière plus générale.

La différence vectorielle entre deux positions $\Delta\vec{r}_{PQ}$ est aussi appelée le <u>déplacement</u> entre P et Q .

Attention : il est important d'observer que **l'équation (2) est une égalité vectorielle**. La norme de $\Delta\vec{r}_{PQ}$ s'obtient avec le théorème de Pythagore, et pas en soustrayant les normes de $\vec{r}_P$ et $\vec{r}_Q$. En effet, $||\Delta\vec{r}_{PQ}||$, $||\vec{r}_P||$ et $||\vec{r}_Q||$ sont trois côtés d'un triangle quelconque, donc

$$\boxed{||\Delta\vec{r}_{PQ}|| = \sqrt{(x_Q - x_P)^2 + (y_Q - y_P)^2} \geq ||\vec{r}_Q|| - ||\vec{r}_P||. \qquad (3)}$$

1.4 Trajectoire

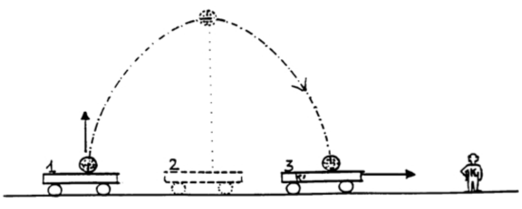
Lorsque sa position change au cours du temps, un point matériel dessine le parcours effectué, ou sa trajectoire. Par exemple, nous pouvons observer la trajectoire d'un skieur marquée par les traces des skis laissées sur la neige fraiche, ou encore celle d'un avion marquée par les trainées de condensation dans le ciel.

La <u>trajectoire</u> est l'ensemble de points de l'espace parcourus par la particule dans le temps.

- Si la trajectoire est une ligne droite, le mouvement est <u>rectiligne</u> (MR).
- Si la trajectoire est un cercle, le mouvement est <u>circulaire</u> (MC).

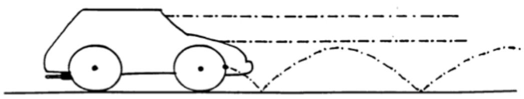
Nous remarquons que :

1. La forme de la trajectoire (et donc la distance parcourue) est relative : elle change selon le référentiel. Par exemple une voiture peut avoir un mouvement rectiligne pour un observateur immobile au bord de la route, alors que la trajectoire se réduit à un point pour un observateur dans la voiture, pour qui la voiture ne bouge pas.



De même, une balle éjectée verticalement du toit d'un wagon en mouvement horizontal décrit une montée et une descente verticale par rapport au wagon et retombe à son point de départ dans le wagon. La trajectoire par rapport au wagon est rectiligne. Par contre, elle décrit une trajectoire parabolique dans l'air par rapport à un observateur terrestre immobile, comme illustré dans la figure ci-dessus. On parle donc de **relativité de la trajectoire**.

2. Pour un corps étendu la trajectoire de son centre de masse peut être différente de celle de chacun de ses points. Pensons par exemple à la voiture dans le dessin ci-dessous, dont le centre de gravité a un mouvement rectiligne : la trajectoire d'un point sur sa roue n'est cependant pas une ligne droite !



1.5 Position et déplacement dans un mouvement rectiligne (1D)

Dans un mouvement rectiligne, le système de coordonnées est choisi dans la direction du mouvement, de sorte que le mouvement soit le long de l'axe x uniquement et que la coordonnée y soit nulle. Dans ce cas, le vecteur position est défini uniquement par la coordonnée x du corps, qui peut être positive ou négative selon le sens du vecteur :

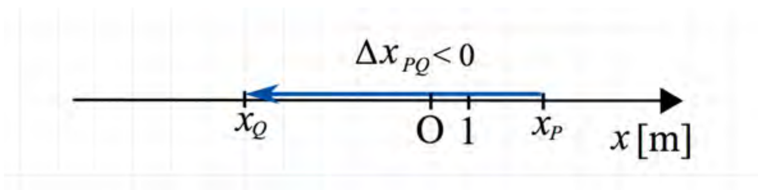
$$\vec{r} = (x; 0) = x.$$

Le vecteur position est ainsi un nombre relatif (avec son unité de distance). La nature vectorielle de la position se traduit par son signe, qui indique le sens. En une dimension, la norme de la position est sa valeur absolue :

$$||\vec{r}|| = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{x^2} = |x|.$$

soit sa distance de l'origine.

Par exemple, si un corps se trouve au point P, à 3m de O dans la direction positive des x, nous écrivons $x_P = +3\,\text{m}$; lorsqu'il se trouve à 5m de O dans la direction négative des x, nous écrivons $x_Q = -5\,\text{m}$. Les normes respectives des ces positions sont $|x_P| = 3\,\text{m}$ et $|x_Q| = 5\,\text{m}$.



En se déplaçant du point P au point Q, le déplacement du corps est négatif :

$$\Delta x_{PQ} = x_Q - x_P = (-5) - (+3) = -8\,\text{m}.$$

Si le corps se déplace au contraire du point Q au point P, son déplacement est positif

$$\Delta x_{QP} = x_P - x_Q = (+3) - (-5) = +8\,\mathrm{m}.$$

Il est important de remarquer qu'on ne peut parler de vecteurs *positifs* ou *négatifs* que par rapport à un sens défini sur un axe, donc uniquement quand le mouvement est à une dimension : à deux dimensions il n'y a pas de direction positive ou négative.

1.6 Distance parcourue et déplacement

Considérons un corps qui se déplace à partir d'une position initiale $\vec{r}_1$ à l'instant t_1 jusqu'à la position $\vec{r}_2$ à un deuxième instant t_2.

D'une part nous avons vu (au paragraphe 1.3) que **le vecteur déplacement entre les instants t_1 et t_2 est la différence entre la position finale $\vec{r}_2$ et la position initiale $\vec{r}_1$ de la particule :**

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1. \tag{4}$$

D'autre part

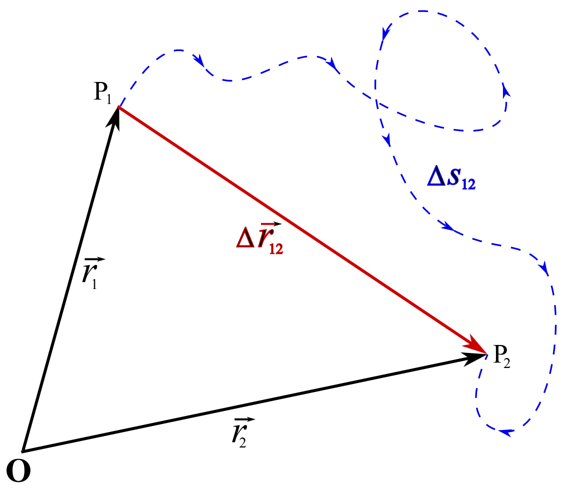
la distance parcourue Δs entre t_1 et t_2 est la longueur de la trajectoire parcourue entre ces deux instants.

Attention : la distance parcourue, notée s *, est une grandeur scalaire, mesurée en mètres dans le système SI.

Comme montré dans la figure ci-contre, de manière générale le déplacement (toujours sur une ligne droite) ne coïncide pas avec la trajectoire d'une particule (qui peut être une courbe) !

Par conséquent, **la distance parcoure par un corps entre deux instants n'est pas toujours égale à la longueur (la norme) du déplacement entre ces deux instants :**

$$||\Delta\vec{r}|| \leq \Delta s.$$



*. La lettre s est pour "space" en anglais.

En effet, la norme du déplacement donne la distance ("à vol d'oiseau") entre la position initiale et finale et ne tient pas compte du parcours effectué. Par exemple lorsqu'un mobile parcourt une boucle et revient au point de départ, son déplacement est nul, mais pas la distance qu'il aura parcourue !

• **Exemple 2.** *Dans chacune des deux chronophotographies suivantes, choisir deux points de la trajectoire et tracer, avec deux couleurs différents, le déplacement et la distance parcourue entre ces deux points.*

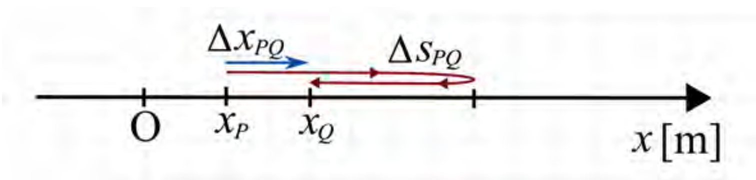
1.7 Distance parcourue et déplacement dans un mouvement rectiligne

Lorsqu'un corps change le sens de son mouvement rectiligne sur un axe (l'axe des x), il peut y avoir une différence entre son déplacement et la distance qu'il a parcourue. Si par exemple, en partant de la position $x_P = 2\,\mathrm{m}$, le corps avance de 6m (dans la direction positive des x) puis il recule de 4m (dans la direction négative des x) pour terminer son mouvement à la position $x_Q = 4\,\mathrm{m}$, ce corps parcourt une distance totale

$$\Delta s_{PQ} = 6 + 4 = 10\,\mathrm{m}$$

mais son déplacement est

$$\Delta x_{PQ} = x_Q - x_P = 4 - 3 = +2\,\mathrm{m}.$$



1.8 Durée

L'intervalle de temps Δt entre les instants t_1 et t_2 est défini comme $\Delta t = t_2 - t_1$ et s'appelle durée. La durée, comme le temps et la distance parcourue, est une grandeur scalaire. De plus elle est toujours positive, car le temps augmente toujours.

• **Exemple 3.** *Un train part de Genève à 13h 54' et arrive à Morges à 14h 27'. Calculer la durée du voyage en minutes, puis donner également la réponse en secondes.*

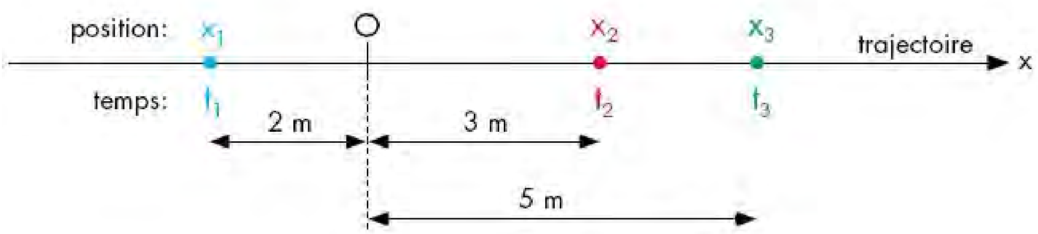
• **Exemple 4.** *La figure ci-dessous montre le mouvement rectiligne d'un mobile.*

- *Ecrire les positions x_1 =.............. ; x_2 =.............. ; x_3 =................ .*

- *Trouver le déplacement du mobile entre les instants t_1 et t_3 : Δx_{13} =.............. .*

- *Sachant que $t_1 = 1s$ et $t_3 = 15s$, calculer la durée Δt_{13} = ...*

- *Calculer le rapport $\frac{\Delta x_{13}}{\Delta t_{13}}$ = ...*



2 Vitesse

Avant Galilée (1564 – 1642), le mouvement des corps était simplement décrit en le qualifiant comme “lent” ou “rapide”. Galilée fut le premier à quantifier ces concepts, en introduisant la grandeur physique de vitesse en mettant en relation la distance parcourue et la durée correspondante.

2.1 Vitesse vectorielle moyenne, $\vec{v}_m$

La vitesse vectorielle ou vitesse de déplacement moyenne $\vec{v}_m$ entre les instants t_1 et t_2 est le rapport entre le vecteur déplacement entre ces deux instants et la durée correspondante :

$$\vec{v}_m = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{t_2 - t_1}. \tag{5}$$

Nous rappelons que $\vec{v}_m$ est un vecteur et donc **l'équation (5) est une égalité vectorielle,** elle nous donne les **trois informations** concernant le vecteur vitesse moyenne :

1. la **direction** de $\vec{v}_m$ est égale à la direction de $\Delta\vec{r}$;
2. le **sens** de $\vec{v}_m$ est égal au sens de $\Delta\vec{r}$;
3. l'**intensité** de $\vec{v}_m$ est égale à l'intensité du déplacement divisée par la durée :

$$||\vec{v}_m|| = \frac{||\Delta\vec{r}||}{\Delta t}. \tag{6}$$

L'unité SI de l'intensité de la vitesse moyenne sera donc le mètre par seconde, **m/s**, mais le kilomètre par heure, **km/h**, est aussi utilisé.
Dans un **mouvement en deux dimensions**, la vitesse vectorielle moyenne s'exprime par ses composantes :

$$\vec{v}_m = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\,;\,\frac{\Delta y}{\Delta t}\right) = (v_x; v_y)\,.$$

2.2 Vitesse scalaire moyenne, v_m

La <u>vitesse scalaire moyenne</u> v_m entre les instants t_1 et t_2 est le rapport entre la <u>distance parcourue</u> entre ces deux instants et la durée correspondante :

$$v_m = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}. \tag{7}$$

Contrairement à $\vec{v}_m$, v_m **est une grandeur <u>scalaire</u> (donc un nombre)**, mesurée en m/s dans le SI. Son utilisation est plus appropriée lorsqu'on s'intéresse à la distance parcourue par unité de temps par le mobile, indépendamment de ses changements de direction.

Attention : dans le langage commun, l'expression "vitesse moyenne" est utilisée de manière inappropriée pour indiquer la "vitesse *scalaire* moyenne". Dans ce cours, la "vitesse moyenne" signifie "vitesse *vectorielle* moyenne". De manière plus générale, chaque fois que nous utilisons le mot "vitesse" tout seul, nous nous référons à la vitesse vectorielle : il faut donc spécifier sa direction et son sens.

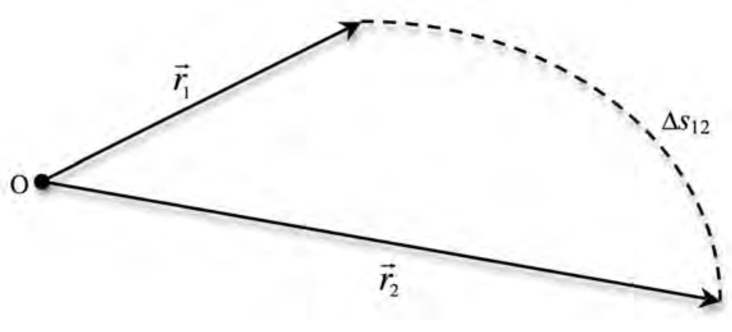
• **Exemple 5.** *Un ballon en mouvement dessine une trajectoire courbe, dont le début est représenté dans le dessin suivant (échelle de longueur* $1\,\mathrm{cm} \leftrightarrow 2\,\mathrm{m}$*). Par rapport à l'observateur O, le ballon passe de la position* $\vec{r}_1$ *au temps* $t_1 = 0,0\,\mathrm{s}$ *à la position* $\vec{r}_2$ *au temps* $t_2 = 2,5\,\mathrm{s}$.

a) *Tracer le déplacement du ballon entre* t_1 *et* t_2, $\Delta\vec{r}_{12}$, *puis déterminer sa norme.*

b) *Calculer l'intensité de sa vitesse vectorielle moyenne* $||\vec{v}_{m12}||$ *entre* t_1 *et* t_2.

c) *Représenter le vecteur* $\vec{v}_{m12}$ *(utiliser l'échelle de vitesse* $1\,\mathrm{cm} \leftrightarrow 2\,\mathrm{m/s}$*).*

d) *En sachant que* $\Delta s_{12} = 15\,\mathrm{m}$, *calculer sa vitesse scalaire moyenne* v_{m12}.



• **Exemple 6.** *Une moto voyage avec une vitesse scalaire constante de* 50 km/ h.
Quelle est la distance parcourue en une heure ?
Quelle est la distance parcourue en deux heures et vingt minutes ?
Quelle est la distance parcourue chaque seconde ?

2.3 $\vec{v}_m$ et v_m dans le mouvement rectiligne

Dans un mouvement rectiligne le **vecteur vitesse moyenne** est donné par la variation dans le temps de la coordonnée x uniquement (il n'y a pas de coordonnée y) :

$$\vec{v}_m = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = v_x. \tag{8}$$

La nature vectorielle de la vitesse moyenne se traduit par son signe, qui nous en donne le sens : il est le même que celui du déplacement, positif s'il est dans le sens positif de l'axe des x, négatif autrement.

Par ailleurs, la **vitesse scalaire moyenne** est un nombre toujours positif, car la distance parcourue est toujours positive et $v_m = \Delta s/\Delta t$ ne donne pas d'informations sur le sens du mouvement mais juste sur la distance parcourue dans l'unité de temps. À noter que si le mouvement est dans le sens positif de l'axe x et s'il n'y a pas de changement de sens ($\Delta x = \Delta s$), alors $\vec{v}_m \equiv v_m$.

• **Exemple 7.** *Un mobile part de la position* $x_0 = -3,0\,\mathrm{m}$ *à l'instant* $t_0 = 0\,\mathrm{s}$*, il atteint la position* $x_1 = 10,0\,\mathrm{m}$ *à* $t_1 = 4,0\,\mathrm{s}$*, puis la position* $x_2 = 3,0\,\mathrm{m}$ *à* $t_2 = 8,0\,\mathrm{s}$.

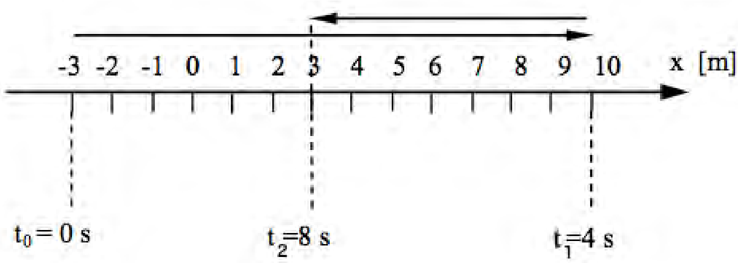
Calculer :

a) $\vec{v}_{m01}$ *et* v_{m01} *entre* t_0 *et* t_1 *;*

b) $\vec{v}_{m12}$ *et* v_{m12} *entre* t_1 *et* t_2 *;*

c) $\vec{v}_{m02}$ *et* v_{m02} *entre* t_0 *et* t_2.

d) *Pourquoi* $\vec{v}_{m02} \neq v_{m02}$ *?*



2.4 Vitesse instantanée

La vitesse moyenne, qu'elle soit vectorielle ou scalaire, ne donne aucune information précise sur le mouvement entre deux instants. Par exemple, la vitesse scalaire moyenne d'une voiture qui parcourt une distance 320 km en 4, 0 heures est

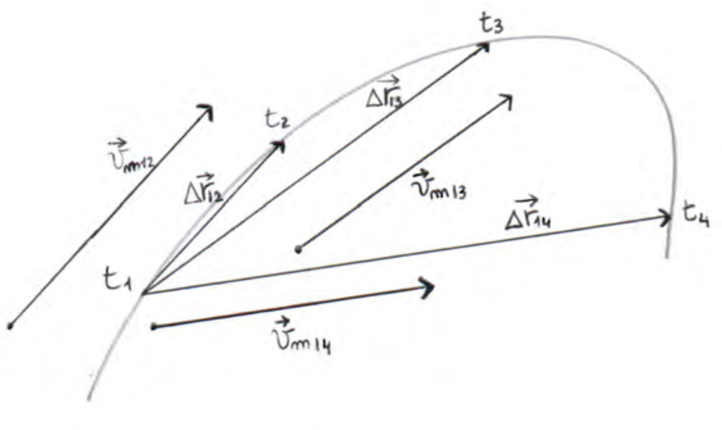
$$v_m = \frac{320\,\mathrm{km}}{4\,\mathrm{h}} = 80\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}.$$

Cependant nous ne pouvons pas savoir si la voiture a roulé plus ou moins lentement pendant son trajet, si elle s'est arrêtée ou si elle a reculé à un certain moment.

• **Exemple 8** (Dans le cahier d'exercices)**.** *Dans certains pays, il existe sur les autoroutes un système permettant de connaître la vitesse scalaire moyenne entre deux péages pour chaque véhicule : on connaît la distance entre les deux portails et on mesure la durée du trajet, le but étant de déterminer si le véhicule a dépassé la limite de vitesse de* $130\,\mathrm{km/h}$*. Quel est le défaut principal de ce système ?*

Considérons un objet dont la vitesse vectorielle moyenne, mesurée pour des durées différentes, n'est pas constante. Si nous souhaitons déterminer sa vitesse vectorielle à un instant précis, par exemple l'instant t_1 dans le mouvement de la figure ci-dessous, nous devons choisir un instant t_2 assez proche de t_1, de manière que pour toute durée plus petite que $\Delta t = t_2 - t_1$, le résultat de la vitesse vectorielle moyenne ne change plus : ni dans son intensité (sa norme), ni dans sa direction. Ainsi, calculée dans cet intervalle de temps très petit, la vitesse vectorielle moyenne entre t_1 et t_2 donne la mesure de la vitesse vectorielle à l'instant t_1 :

$$\vec{v}_1 \cong \frac{\Delta\vec{r}_{12}}{\Delta t_{12}}.$$

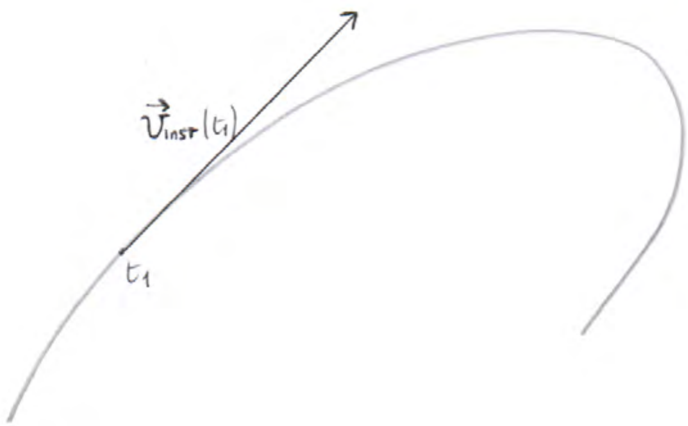


Autrement dit, pour connaître la vitesse instantanée **nous rendons la variation de**

temps (et donc de position) aussi petite que possible, de sorte que pratiquement aucun changement de la vitesse ne se produise durant ce petit laps de temps. Nous indiquons une telle variation de temps (ou de position) avec une lettre d à la place du Δ :

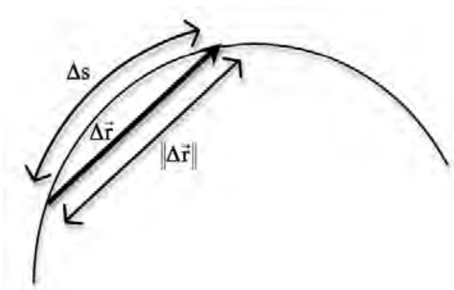
$$\vec{v}_{inst} = \frac{d\vec{r}}{dt}. \tag{9}$$

La <u>vitesse instantanée</u> d'une particule est sa vitesse en un point ou à un instant bien précis de sa trajectoire, c'est une grandeur vectorielle représentée par une flèche <u>tangente</u> à la trajectoire.



De manière analogue, la **<u>vitesse scalaire instantanée</u> est donnée par**

$$\boxed{v_{inst} = \frac{d\,\mathrm{s}}{dt}.} \tag{10}$$



Pour des déplacements assez petits, nous pouvons considérer que $ds \simeq ||d\vec{r}||$, donc la vitesse scalaire instantanée et l'intensité de la vitesse vectorielle instantanée coïncident :

$$v_{inst} = \frac{d\,\mathrm{s}}{dt} \simeq \frac{||d\vec{r}||}{dt} = ||\vec{v}_{inst}||. \tag{11}$$

2.5 Le mouvement uniforme (MU) et le mouvement rectiligne (MR)

Nous définissons un mouvement uniforme (MU) celui d'une particule dont la vitesse scalaire instantanée (ou l'intensité de la vitesse vectorielle) reste constante dans le temps :

$$v_{inst} = ||\vec{v}_{inst}|| = v = \text{constante}$$

Nous remarquons que pour un mouvement uniforme la valeur de la vitesse scalaire moyenne est la même pour n'importe quelle durée Δt :

$$v_m = \frac{\Delta s}{\Delta t} = v_{inst} = \text{constante} = v. \tag{12}$$

Le mobile parcourt des distances égales pendant des durées égales. En d'autres mots : dans un MU, la distance parcourue et la durée sont des grandeurs proportionnelles, et **la constante de proportionnalité est v.**

Nous remarquons que, de manière générale, dans un MU, la distance parcourue n'est pas égale à la norme du déplacement : $\Delta s \neq ||\Delta\vec{r}||$ (cf. figure du paragraphe 1.6). Par conséquent, de façon générale

$$v_m \neq ||\vec{v}_m||.$$

D'autre part, nous rappelons que

Un mouvement est rectiligne (MR) si sa trajectoire est une ligne droite, donc si la direction de la vitesse vectorielle du corps est constante.

Ainsi, dans un MU la vitesse vectorielle peut changer de direction, mais ne change pas d'intensité. Au contraire, dans un MR, l'intensité de la vitesse vectorielle peut changer, mais sa direction reste la même.

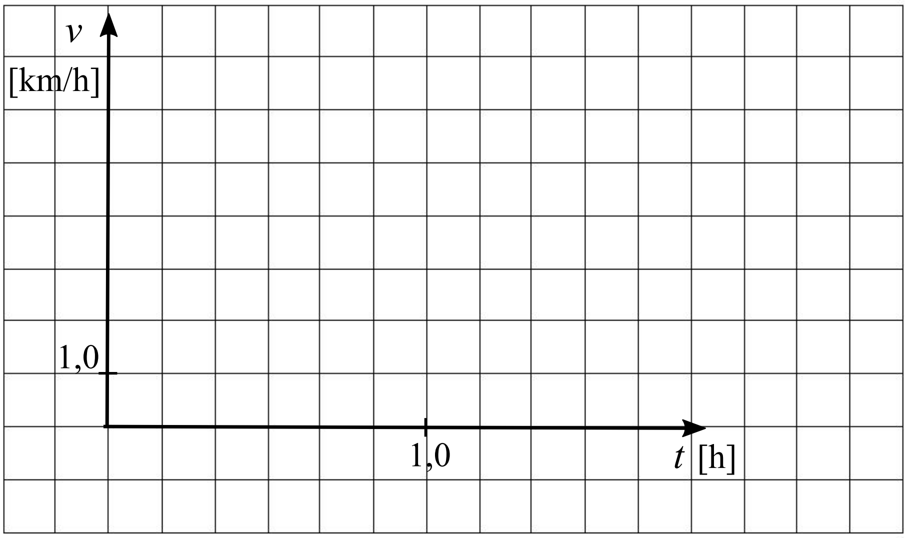
• **Exemple 9** (Sur le cahier d'exercices)**.** *Un touriste monte sur une montagne et revient par le même chemin. L'aller dure 45 minutes à la vitesse scalaire constante* $v_a = 3,00\,\mathrm{km/h}$. *Pour le retour, la vitesse scalaire, constante, est de* $v_r = 5,00\,\mathrm{km/h}$.

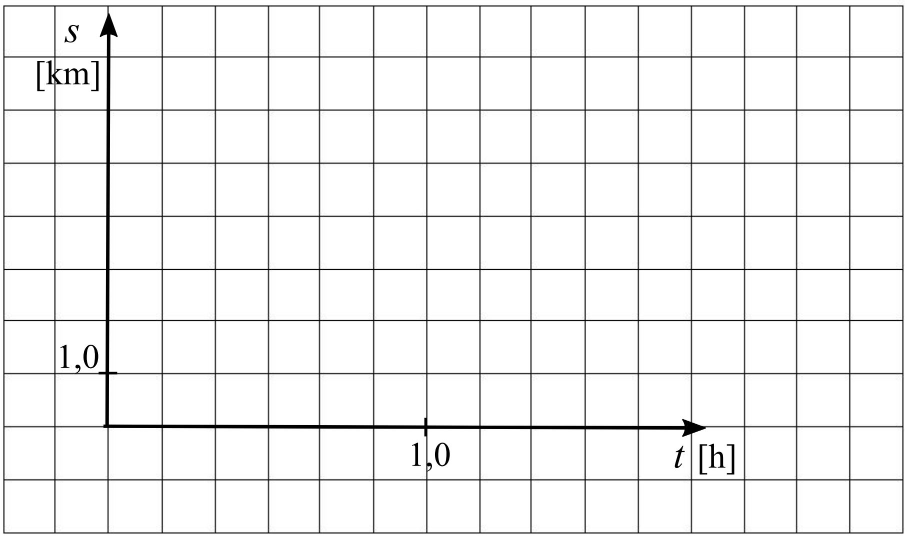
a) *Quel est le type de mouvement de l'aller ? Et celui du retour ?*

b) *Combien de temps dure le retour (en minutes) ?*

c) *Quelle est la vitesse scalaire moyenne pour l'aller-retour ?*
Est-ce que cette valeur est la même qu'en calculant la moyenne arithmétique entre v_a *et* v_r *? Pourquoi ?*

d) *Représenter ci-dessous les graphiques respectifs de l'intensité de la vitesse du touriste* v *et de la distance parcourue par le touriste* s *en fonction du temps :*





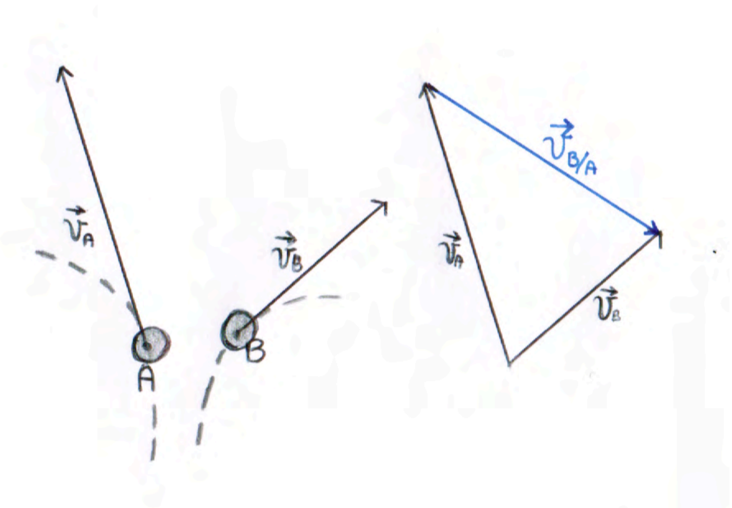
2.6 Différence entre deux vecteurs vitesse : la vitesse relative

Imaginons deux mobiles, A et B, chacun en mouvement dans un référentiel commun. Nous appelons $\vec{v}_A$ et $\vec{v}_B$ leurs vitesses instantanées respectives au temps t dans ce référentiel.

La vitesse du corps B relative au corps A, $\vec{v}_{B/A}$, est la vitesse vectorielle avec laquelle le corps A voit se déplacer le corps B et est donnée par

$$\vec{v}_{B/A} = \vec{v}_B - \vec{v}_A. \tag{13}$$

La différence (13) est vectorielle, et se trouve par construction géométrique de la même manière que nous l'avions vu pour la différence entre deux déplacements (paragraphe 1.3), en traçant le vecteur qui relie la pointe du vecteur $\vec{v}_A$ à celle du vecteur $\vec{v}_B$ lorsqu'il sont dessinés avec l'origine en commun.



• **Exemple 10** (Sur le cahier d'exercices). *Deux voitures ont chacune une vitesse constante par rapport au sol, avec la même intensité de* $50\,\mathrm{km/h}$, *mais de sens opposé. Faire un dessin de la situation et trouver la vitesse relative d'une de deux voitures par rapport à l'autre.*

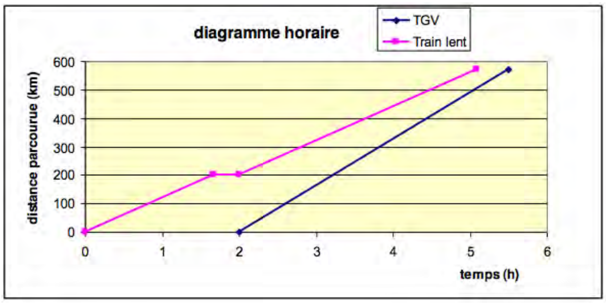
• **Exemple 11** (Sur le cahier d'exercices). *Une voiture traverse un pont en direction nord avec une vitesse vectorielle d'intensité* $60\,\mathrm{km/h}$. *Perpendiculairement au pont, sur les rails, un intercity voyage en direction ouest avec une vitesse vectorielle de* $200\,\mathrm{km/h}$ *intense. Choisir une échelle et représenter les vitesses vectorielles de la voiture et du train. Avec quelle vitesse vectorielle la voiture voit-elle s'éloigner le train ?*

2.7 Equation horaire et diagramme horaire

Considérons le wagon d'un train avec un mouvement rectiligne (MR) par rapport au sol. Nous choisissons de travailler avec un système solidaire avec le sol, pour lequel la trajectoire est une ligne droite et prenons l'axe x dans la direction de la trajectoire. De cette manière, le mouvement est unidimensionnel et le vecteur position générique est défini simplement par sa coordonnée (unique) par rapport à un point de référence choisi (l'origine O) : x. Lorsque nous démarrons le chronomètre ($t_0 = 0$) le wagon occupera une position dite 'initiale" x_0. Ensuite, nous appelons x_1 la position du wagon correspondant à l'instant t_1, x_2 la position du wagon correspondant à l'instant t_2, et ainsi de suite. En d'autres mots, la position du wagon varie en fonction du temps.

L'équation horaire est la fonction mathématique qui donne la position d'un mobile à chaque instant t. Dans le cas du mouvement rectiligne du wagon, l'équation horaire est donnée uniquement par une équation, exprimant la coordonnée $x = x(t) = f(t)$ en fonction de l'instant générique t.

Le diagramme horaire est le graphique de cette fonction : il représente la position du mobile en fonction du temps. Dans le cas d'un mouvement rectiligne d'équation horaire $x(t)$ le diagramme horaire est le graphique constitué par les points de coordonnées $(t, x(t))$. Les diagrammes horaires sont très utilisés, entre autre, pour l'évaluation des correspondances des trains. Dans la figure suivante sont représentés les diagrammes horaires de deux trains sur le parcours Genève-Paris.



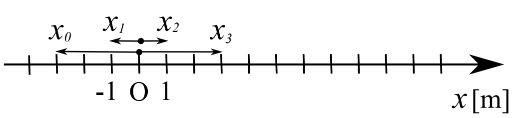
Le train "lent" roule à 120 km/h et s'arrête pendant 20 minutes à une gare intermédiaire, pour repartir à la même vitesse.
Le TGV part 2 heures après le premier train, mais roule plus vite, à vitesse constante de 162 km/h.
Le deux trains ne se croisent pas, la distance minimale entre eux est d'environ 70 km après 5 heures.

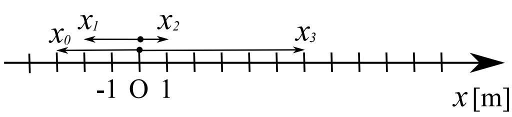
• **Exemple 12** (Sur votre cahier d'exercices). *Pour chacun des deux mouvements rectilignes suivants, les positions indiquées correspondent aux temps respectifs* $t_0 = 0\,\mathrm{s}$, $\mathrm{t}_1 = 1\,\mathrm{s}$, $\mathrm{t}_2 = 2\,\mathrm{s}$, $\mathrm{t}_3 = 3\,\mathrm{s}$.

a) *Faire le graphique de x en fonction de t (le diagramme horaire).*

b) *Exprimer par une équation horaire la position du mobile au cours du temps :* $x(t) = ...$

.





2.8 Mouvement rectiligne uniforme (MRU)

le mouvement rectiligne uniforme est un mouvement dont la vitesse vectorielle ne varie pas avec le temps :
son intensité, sa direction et son sens restent constants.

Quelques exemples de MRU sont :
- un train voyageant sur des rails droites à vitesse constante ;
- une sonde spatiale loin de tout corps ;
- la lumière se déplaçant entre deux points dans le vide loin de tout astre ;
- le son se déplaçant entre deux points dans un milieu homogène.

Si une particule se déplace avec un MRU, alors sa vitesse instantanée est égale à la vitesse moyenne à chaque instant :

$$\vec{v}_m = \vec{v}_{inst} = \vec{v} = \text{constante.}$$

En choisissant l'axe des x dans la même direction que le mouvement (pas de coordonnée y), nous pouvons écrire l'équation (8) du paragraphe 2.1 pour la vitesse vectorielle moyenne dans le MR :

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v_x = v = \text{constante,} \tag{14}$$

de valeur positive ou négative, selon le sens de la vitesse par rapport au choix de l'axe. Cette dernière équation nous dit que le corps parcourt des déplacements égaux pendant des durées égales. En d'autres mots, **le déplacement et la durée sont des quantités proportionnelles** et **la vitesse est la constante de proportionnalité.**

Position en fonction du temps

Nous souhaitons écrire l'équation de la position en fonction du temps $x(t)$ pour ce mouvement. En connaissant la valeur constante de v et la position du corps au temps initial x_0, nous pouvons écrire l'équation (14) comme

$$\frac{x(t) - x_0}{t - t_0} = v$$

$$\iff \quad x(t) - x_0 = v \cdot (t - t_0)$$

$$\iff \quad x(t) = v \cdot (t - t_0) + x_0,$$

ou, en notant la durée $t - t_0 = \Delta t$,

$$\boxed{x(t) = x_0 + v \cdot (t - t_0). \qquad (15)}$$

L'équation (15) est **l'équation horaire** du MRU : il s'agit d'une *fonction* qui décrit comment la position x (dans l'axe vertical, variable dépendante) varie avec le temps t (axe horizontal, variable indépendante). Graphiquement, on reconnait l'équation mathématique représentée par une droite avec **pente** égale à v et **ordonnée au temps** t_0 égale à x_0 *. Comme attendu, la droite représente une relation de **proportionnalité entre le déplacement et le temps**.

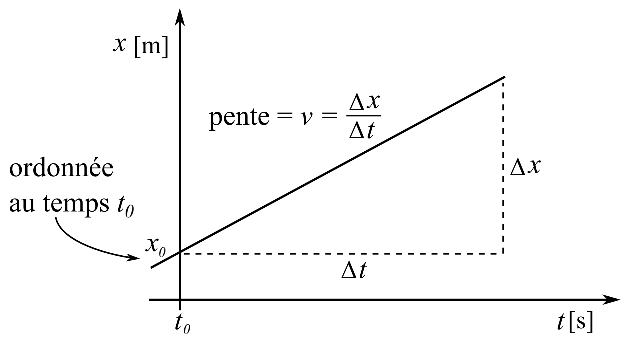


FIGURE 1 – Diagramme horaire (de la fonction $x(t)$) dans le MRU dans le cas où $v > 0$, mais la pente peut aussi être négative, si la position diminue avec le temps.

Dans le diagramme horaire, le fait que la vitesse soit constante se traduit par courbe avec une pente constante, donc une droite. Cette pente est d'autant plus grande que la vitesse du mouvement est intense : si la pente est zéro, la vitesse est nulle et $x(t)$ est constant avec le temps, le diagramme horaire est donc un "plateau".

Vitesse comme pente du graphique de la position

De manière plus générale, dans un mouvement à vitesse variable, où il n'y a pas de proportionnalité entre le déplacement et la durée, nous ne pouvons pas calculer la pente du diagramme horaire mais pouvons calculer la pente de la ligne qui relie deux points du graphique, comme les ponts A et B dans la figure 2. Nous observons que la pente du segment $\overline{\mathrm{AC}}$ est plus grande que celle du segment $\overline{\mathrm{AB}}$ (figure 2, à gauche).

$$v_{AC} = \frac{\Delta x_{AC}}{\Delta t_{AC}} = \frac{\overline{CC'}}{\overline{AC'}} > v_{AB} = \frac{\Delta x_{AB}}{\Delta t_{AB}} = \frac{\overline{BB'}}{\overline{AB'}}$$

*. Attention : en mathématiques on apelle y la variable dépendante (axe vertical) et x celle indépendante (axe horizontal) et on utilise la notation $y(x) = ax + b$, a étant la pente et b l'ordonnée à l'origine. Ici nous retrouvons cette équation en remplaçant $x \to t$ (axe horizontal), $y(x) \to x(t)$ (axe vertical), $a \to v$ (pente) et $b \to x_0$ (ordonnée à l'origine) : la notation change car les variables ont une signification physique (on ne peut pas appeler le temps "x").

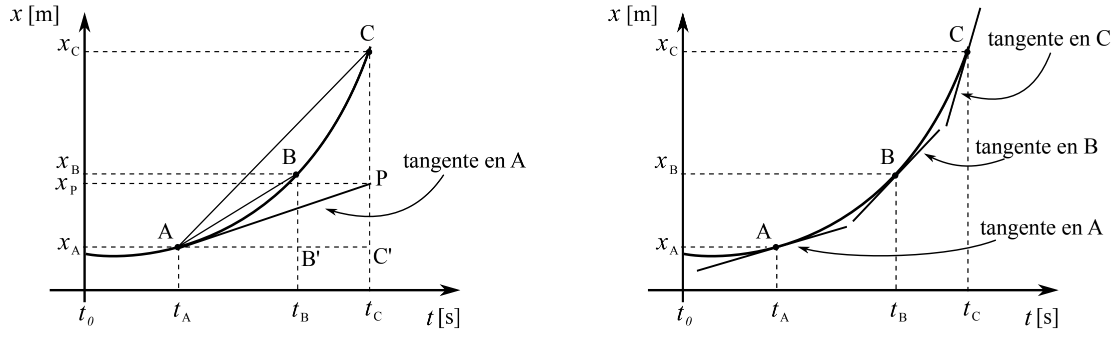


FIGURE 2 – La pente entre deux points (A et B ou A et C) correspond à la vitesse moyenne entre ces deux points. Plus le deuxième point se rapproche du point A, plus la pente se rapproche de la vitesse instantanée au point A. La pente de la tangente au point A (du segment $\overline{\text{AP}}$) correspond à la vitesse instantanée au point A.

En prenant un point sur la courbe de plus en plus proche de A pour en obtenir la vitesse instantanée

$$v_A = \frac{dx}{dt},$$

avec dx et dt ultrapetits, nous calculons la pente d'un triangle de plus en plus petit, qui tend à être semblable (avec la même pente) au triangle APC', avec AP tangent à la courbe † : v_A correspond donc à la pente de la tangente à la courbe en A.

Dans la figure 2, nous observons que la vitesse instantanée en A est plus petite que v_{AB} et que v_{AC}. En effet, en considérant successivement la pente des droites tangentes aux points A, B et C (figure 2, graphique de droite) nous pouvons constater qu'elle augmente ($v_A < v_B < v_C$) et donc que la vitesse augmente progressivement entre A et C : v_{AC} étant la vitesse moyenne entre A et C, elle est forcement plus grande que v_A et plus petite que v_C.

Vitesse en fonction du temps

La constance de la vitesse est aussi visible dans le graphique de la vitesse en fonction du temps : $v(t)$ = constante, un simple "plateau" qui est d'autant plus haut que la valeur de v est grande, comme montré dans la figure 3. Notons que, dans ce graphique de vitesse, le déplacement $\Delta x = v \cdot \Delta t$ correspond à l'aire de la surface en dessous du plateau (surface coloriée dans la figure).

†. Cette procédure, consistant à calculer la pente de la tangente d'une courbe en un point d'abscisse t, prend le nom de *dérivation*. Pour une fonction générique $f(t)$, la fonction qui donne la pente de la tangente en chaque point s'appelle *dérivée* et est notée $f'(t) = df/dt$. Ainsi, dans tout mouvement la vitesse instantanée correspond à la dérivée de la fonction position à chaque instant

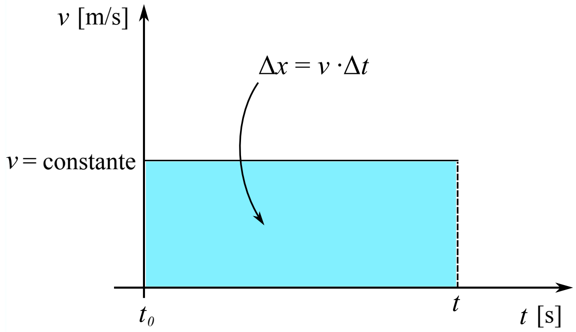


FIGURE 3 – Diagramme de vitesse dans le MRU. L'aire en dessous de la courbe représente le déplacement entre t_0 et t.

Déplacement comme aire du graphique de la vitesse

Le fait que l'aire en dessous du graphique de la vitesse correspond au déplacement dans une certaine durée n'est pas une propriété spécifique au MRU mais est en réalité généralisable à tout mouvement. Prenons par exemple le graphique du mouvement à vitesse variable de la figure 4 : bien qu'il ne s'agisse pas d'un MRU, une première estimation du déplacement entre t_0 et t peut être effectuée en construisant des rectangles de hauteurs différentes (correspondant à des vitesses constantes différentes) sur des durées à l'intérieur de l'intervalle $[t_0\ ;\ t]$ et en sommant les aires de chacun de ces rectangles. L'aire

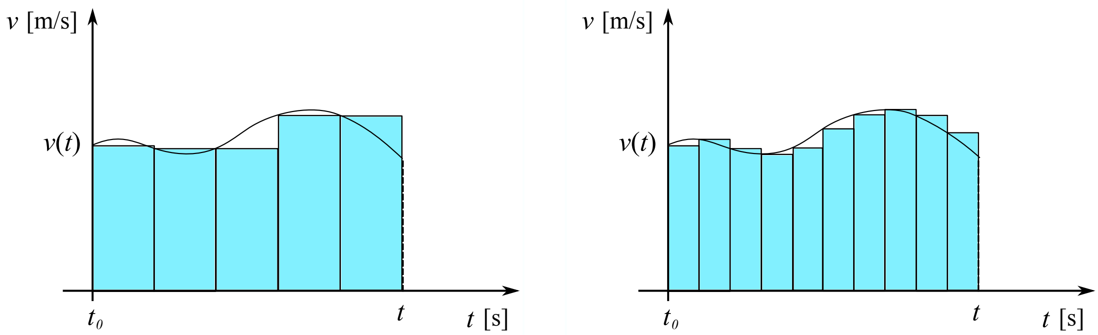


FIGURE 4 – Diagramme de la vitesse en fonction du temps pour un mouvement à vitesse variée. Le déplacement entre t_0 et t peut être estimé en additionnant l'aire des rectangles de base assez petite.

de chaque rectangle représente le déplacement que corps aurait s'il était en MRU avec une vitesse représentative du mouvement dans la durée correspondante, ce qui constitue une approximation du déplacement effectif dans cet intervalle de temps. En choisissant un nombre grandissant de rectangles dont la base (la durée) est assez petite pour que la vitesse puisse être considérée comme constante à l'intérieur de chacun, nous pouvons donner une estimation de plus en plus précise du déplacement total. Dans la limite où le le nombre de rectangles tend vers l'infini et la longueur de leur base tend vers zéro, cette procédure permet de calculer l'aire en dessous de la courbe, correspondant au déplacement parcouru au temps t ‡.

En conclusion, il est toujours possible de connaître le déplacement pendant une certaine durée à partir du diagramme de la vitesse, en calculant l'aire en dessous du graphique de $v(t)$. Réciproquement, il est aussi toujours possible connaître la vitesse à un instant donnée à partir du diagramme de la position, en calculant la pente de la tangente du graphique de $x(t)$ à cet instant. Ces deux procédures nous permettant de passer de $v(t)$ à $x(t)$ et vice-vérsa sont complémentaires, elles montrent le lien mathématique profond entre ces deux grandeurs cinématiques.

Généralisation des lois du MRU au mouvement uniforme (MU)

Nous avons déjà remarqué au paragraphe 2.5 que, dans le cas d'un mouvement uniforme (MU) mais pas rectiligne, on a une proportionnalité entre la distance parcourue Δs et la durée Δt. En effet l'équation (15) et toutes les considérations faites pour le MRU peuvent être généralisées au MU en remplaçant le déplacement par la distance parcourue :

$$s(t) = s_0 + v \cdot \Delta t \qquad \text{et} \qquad v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \text{constante} \tag{16}$$

où v n'est pas la seule composante x de la vitesse mais la vitesse scalaire constante.

Attention : dans ce cas $s(t)$ ne nous donne aucune information sur la *position* du mobile, mais uniquement sur la distance qu'il a parcourue au temps t : par exemple nous ne pouvons pas savoir s'il est revenu à la position de départ (en parcourant une boucle, par exemple). De plus, v étant une intensité, elle peut uniquement être positive (on n'a plus aucune information sur le sens et la direction de la vitesse).

‡. Cette procédure s'appelle *intégration* : si nous considérons une fonction générique $f(t)$, la fonction $F(t)$ qui donne l'aire de la surface en dessous, obtenue par cette "somme" de rectangles, s'appelle *primitive* de $f(t)$. Les primitives F des fonctions classiques les plus connues sont données dans les tables CRM.

3 Accélération

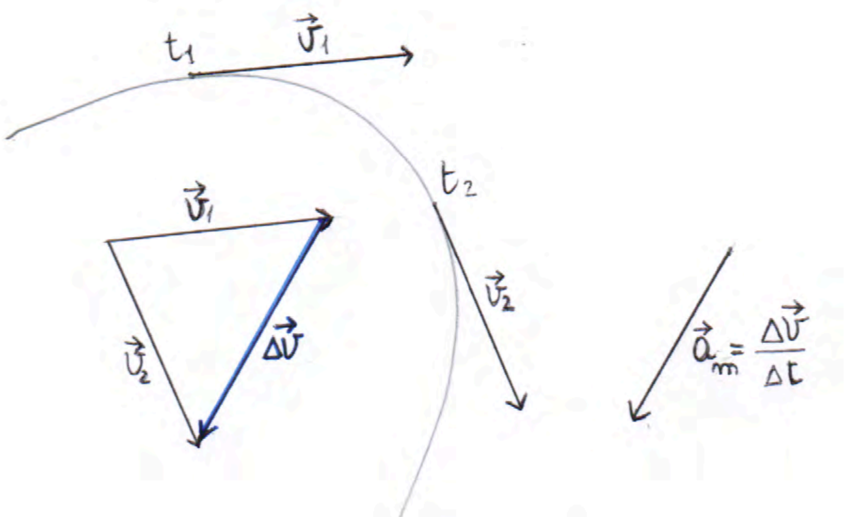
Quand la vitesse d'un mobile change son intensité, sa direction ou les deux, on dit que ce mobile subit une accélération. **L' accélération d'un corps est définie comme la variation de sa vitesse par unité de temps.** Afin de quantifier ce concept, nous allons définir l'accélération moyenne et l'accélération instantanée en procédant de la même manière que pour la vitesse.

3.1 Accélération moyenne et instantanée

L'accélération moyenne $\vec{a}_m$ entre les instants t_1 et t_2 est le vecteur qui représente la variation de la vitesse vectorielle entre ces deux instants divisée par la durée correspondante :

$$\vec{a}_m = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}. \tag{17}$$

L'**unité utilisée pour l'intensité de l'accélération est le mètre par seconde au carré**, dont le symbole est $\mathrm{m/s^2}$ ou $\mathrm{m \cdot s^{-2}}$. Si un corps possède une accélération d'intensité $1\,\mathrm{m/s^2}$ cela signifie que, à chaque seconde, sa vitesse vectorielle varie de $1\,\mathrm{m/s}$.



Comme on le voit bien sur le dessin, $\vec{a}_m$ **est un vecteur, et sa direction et son sens sont les mêmes que ceux de la variation de vitesse $\Delta\vec{v}$. Son intensité est donnée par l'intensité $||\Delta\vec{v}||$ divisée par la durée.**

Attention : par sa nature vectorielle, **une vitesse peut rester constante dans son intensité (MU) tout en changeant sa <u>direction</u> : dans ce cas il y a bien une accélération non nulle !** La figure à la page 32 nous montre un tel exemple.

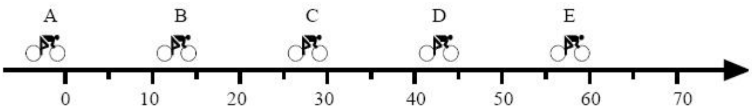
• **Exemple 13.** *Calculer l'intensité de l'accélération moyenne entre* t_1 *et* t_2 *dans le MU de la figure à la page 32, en sachant que* $\Delta t = 8,0\,\mathrm{s}$ *et que l'échelle pour l'intensité de la vitesse est* $1\,\mathrm{cm} \leftrightarrow 10\,\mathrm{m/s}$.

De la même manière que nous l'avons fait pour la vitesse (vectorielle et scalaire), nous pouvons définir **l'<u>accélération instantanée</u> à un instant précis** t**, en calculant l'accélération moyenne sur une durée aussi petite que possible, de façon que, si calculée sur toute durée plus petite, elle ne change pratiquement pas, ni dans son intensité, ni dans sa direction ou dans son sens :**

$$\vec{a}_{inst}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt}. \tag{18}$$

3.2 Accélération dans le mouvement rectiligne

Nous avons vu que quand la vitesse d'un corps est constante, dans son intensité et dans sa direction, le mouvement est rectiligne et uniforme. Dans ce cas, le corps parcourt des distances égales dans des durées égales, comme montré dans l'exemple de la figure suivante, où la position d'un cycliste est indiquée à des intervalles de temps réguliers.



Dans le cas où la vitesse d'un corps ne change pas dans sa direction, mais elle change dans son intensité ou dans son sens (son signe), le corps possède un mouvement rectiligne accéléré.

Dans un MR l'accélération entre deux instants t_1 et t_2 est donnée par la variation de la composante x de la vitesse instantanée divisée par la durée correspondante :

$$\vec{a} = a_x = \frac{v_{x2} - v_{x1}}{t_2 - t_1}. \tag{19}$$

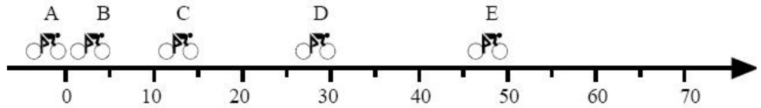
Elle se mesure toujours en **m/s**^{2} : dans un mouvement rectiligne, une accélération d'intensité $1\,\mathrm{m/s^2}$ signifie que la vitesse change son intensité de $1\,\mathrm{m/s}$ à chaque seconde.

Puisque dans le cas unidimensionnel tous les vecteurs du mouvement (position, accélération et vitesse) ne possèdent que des composantes le long de x, l'indice "x" pour l'accélération et la vitesse devient superflu. Ainsi, par la suite nous le laisserons tomber en écrivant simplement x, $v_x = v$, et $a_x = a$. Ces grandeurs sont positives si elles sont dans le même sens que l'axe des x, négatives autrement.

• **Exemple 14.** *Une voiture garée démarre un mouvement rectiligne jusqu'à la vitesse d'intensité* $100\,\mathrm{km/h}$ *en* $10\,\mathrm{s}$. *Quelle a été son accélération moyenne ?*

Nous allons maintenant analyser deux exemples :

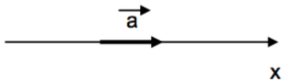
1. Quand la vitesse augmente avec le temps, la distance parcourue par unité de temps augmente aussi, comme montré dans la figure suivante, où les images des positions du cycliste sont prises à des intervalles de temps égaux.



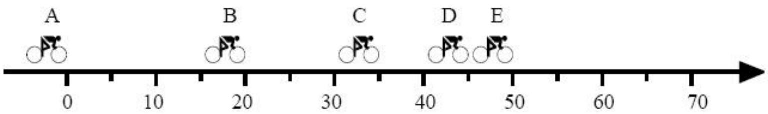
Afin de donner un exemple numérique, nous choisissons le sens de l'axe égal au sens de la vitesse initiale. Dans ce cas, nous avons une **vitesse positive, en augmentation**.
Nous prenons $t_1 = 1\,\mathrm{s}$ $\quad \mathrm{v}_1 = 5\,\mathrm{m/s}$ $\quad \mathrm{t}_2 = 7\,\mathrm{s}$ $\quad \mathrm{v}_2 = 8\,\mathrm{m/s}$,
l'accélération moyenne est

$$a_m = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{8-5}{7-1} = \frac{3}{6} = 0,5\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} > 0.$$

Dans ce cas **l'accélération est positive**, dans le même sens que l'axe x. Il s'agit d'un **mouvement rectiligne accéléré**.



2. Quand la vitesse diminue en fonction du temps, la distance parcourue par unité de temps diminue aussi.

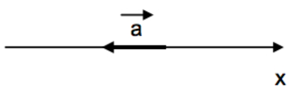


En choisissant l'axe des x dans le même sens que la vitesse initiale, le corps avance avec une **vitesse positive, mais en diminution**.
Par exemple[§] $t_1 = 3\,\mathrm{s}$ $\quad \mathrm{v}_1 = 10\,\mathrm{m/s}$ $\quad \mathrm{t}_2 = 5\,\mathrm{s}$ $\quad \mathrm{v}_2 = 6\,\mathrm{m/s}$,

l'accélération moyenne est

$$a_m = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{6 - 10}{5 - 3} = \frac{-4}{2} = -2\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} < 0.$$

L'accélération est négative, opposée au sens de l'axe des x. Le mouvement à vitesse variable est un **mouvement rectiligne décéléré** : une décélération peut être vue comme une accélération négative.



§. Dans cet exemple nous prenons une valeur positive pour la vitesse finale. Toutefois, elle pourrait également être négative, cela ne changerait pas les conclusions.

Pour conclure, nous soulignons que, indépendamment du signe de la vitesse, dans un mouvement rectiligne

$a_m > 0$ quand **elle est dans le même sens que l'axe des x.**

$a_m < 0$ quand **elle est opposée à l'axe des x.**

• **Exemple 15.** *Quel est le signe de l'accélération dans le cas où l'intensité de la vitesse augmente, mais l'axe des x est choisi opposé à la direction de la vitesse ?*

Par exemple si $t_1 = 1\,\mathrm{s}$ $\quad \mathrm{v}_1 = -5\,\mathrm{m/s}$ $\quad \mathrm{t}_2 = 7\,\mathrm{s}$ $\quad \mathrm{v}_2 = -8\,\mathrm{m/s}$

• **Exemple 16.** *Une voiture avance avec une vitesse constante d'intensité* $80\,\mathrm{km/h}$ *lorsqu'un chat apparaît soudainement sur son chemin. Le conducteur freine à fond et après* $6,0\,\mathrm{s}$ *la vitesse de la voiture atteint l'intensité de* $10\,\mathrm{km/h}$. *Quelle est l'accélération moyenne de la voiture ?*

• **Exemple 17** (Dans le cahier d'exercices)**.** *En se référant au graphique ci-dessous, représentant la vitesse d'un vélo en mouvement rectiligne en fonction du temps, répondre aux questions suivantes (réponse avec 2 chiffres significatifs).*

1. *Quelle est l'accélération entre 0* s *et 2* s *? Comment peut-on calculer l'accélération à partir du graphique ?*
2. *Dans quels intervalles de temps le vélo a une accélération positive ?*
3. *Dans quel(s) intervalle(s) de temps l'accélération du vélo est maximale ? Quelle est sa valeur ?*
4. *Dans quels intervalles de temps le vélo a une accélération négative ?*
5. *Dans quel(s) intervalle(s) de temps l'accélération du vélo est minimale ? Quelle est sa valeur ?*
6. *Dans quel(s) intervalle(s) de temps l'accélération du vélo est nulle ?*
7. *Quand le vélo est-il à l'arrêt ?*

3.3 Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)

Le mouvement rectiligne uniformément accéléré d'une particule est un mouvement rectiligne avec une accélération instantanée constante.
Cela signifie que seule l'intensité de la vitesse de la particule varie, et cela de manière régulière (l'intensité de la vitesse change de quantités égales dans des intervalles de temps égaux). Attention : la condition que $\vec{a}_{inst}$ ne change pas avec le temps n'est pas suffisante pour assurer un mouvement rectiligne : **l'accélération doit dans ce cas avoir la même direction que la trajectoire**.

Dans ce paragraphe, **nous souhaitons trouver l'équation horaire et l'équation de la vitesse en fonction du temps pour ce type de mouvement.** Comme auparavant, en choisissant l'axe des x avec la même direction que la trajectoire, nous pouvons indiquer l'accélération moyenne et celle instantanée par une même valeur scalaire constante :

$$\vec{a} = a_x = a = \text{constante.}$$

De plus, nous indiquons

- t_0 l'instant initial, souvent choisi égal à 0,
- x_0 la position du mobile à l'instant t_0, ou la "position initiale",
- $v_{x0} = v_0$ la vitesse de la particule à l'instant t_0, ou la "vitesse initiale",
- t un instant générique,
- $x(t)$ la position de la particule à l'instant t,
- $v_x(t) = v(t)$ la vitesse de la particule à l'instant t.

Nous pouvons ainsi écrire l'équation de l'accélération (17)

$$\frac{v(t) - v_0}{t - t_0} = a = \text{constante,} \tag{20}$$

Ce qui nous permet d'affirmer que dans un MRUA la vitesse change de quantités égales pour des intervalles de temps égaux, soit que **la variation de la vitesse est proportionnelle à la durée** et que **la constante de proportionnalité est a.**

Vitesse en fonction du temps

Nous allons maintenant trouver l'équation de la vitesse en fonction du temps $v(t)$ puis dessiner la courbe correspondante (qui sera une droite ¶). À partir de l'équation (20) nous écrivons :

$$v(t) - v_0 = a \cdot (t - t_0)$$

¶. Nous rappelons qu'une relation de proportionnalité se traduit par une courbe à pente constante (la pente étant la constante de proportionnalité), ici le temps est proportionnel à la vitesse et la pente est a.

$$\iff \quad v(t) = a \cdot (t - t_0) + v_0,$$

ou, en écrivant $t - t_0 = \Delta t$

$$\boxed{v(t) = v_0 + a \cdot \Delta t. \qquad (21)}$$

L'équation (21) est la *fonction* donnant la vitesse du corps en fonction du temps. Le graphique relatif est, comme attendu, une droite avec ordonnée au temps t_0 égale à v_0 et pente a.

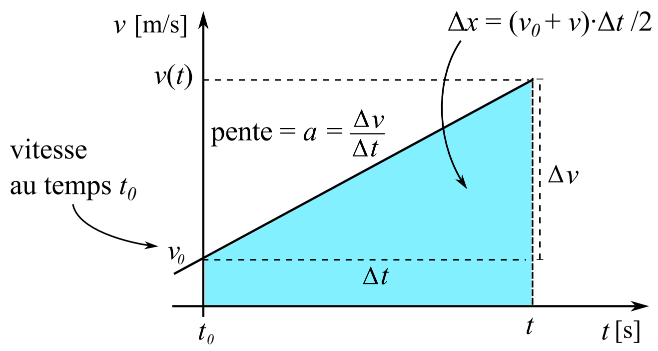


FIGURE 5 – Graphique de la vitesse en fonction du temps dans un MRUA. L'aire en dessous de la courbe représente le déplacement entre t_0 et t.

Position en fonction du temps

Nous souhaitons maintenant trouver l'équation horaire $x(t)$ pour le MRUA. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2.8 pour le MRU, nous pouvons déterminer le déplacement entre t_0 et t en calculant l'aire (l'"intégral") en dessous du graphique de $v(t)$; il s'agit ici du trapèze coloriée dans la figure 5, composé de

— l'aire du rectangle en dessous de v_0 ($= v_0 \cdot \Delta t$), correspondant au déplacement effectué si le corps maintenait un MRU à vitesse constante v_0 ;

— à cela nous devons ajouter l'aire du triangle en dessus de v_0 ($\Delta v \cdot \Delta t/2$) qui est le"supplément" causé par l'augmentation linéaire de la vitesse. Le fait de diviser par 2 s'explique car, sinon, nous aurions un déplacement total $\Delta x = v \cdot \Delta t$, donc l'aire de tout le rectangle en dessous de v, ce qui signifierait de considérer que le corps avance avec la vitesse v pendant toute la durée entre t_0 et t (MRU avec vitesse constante $= v$), nous conduisant à une surestimation du déplacement effectué. En réalité la vitesse a varié *uniformément* entre v_0 (dans le graphique ci dessus plus petite que v) et v : donc v est la valeur de la vitesse uniquement à l'instant final et pas la valeur moyenne.

Nous obtenons ainsi pour le déplacement au temps t

$$x(t) - x_0 = v_0 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot (v(t) - v_0) \cdot \Delta t = \frac{1}{2} \cdot (v_0 + v(t)) \cdot \Delta t. \tag{22}$$

qui correspond à l'aire du trapèze colorié dans la figure 5. En sachant que $v(t)$ varie entre t_0 et t nous remplaçons son expression, donnée par la fonction (21), dans l'équation (22) :

$$x(t) - x_0 = \frac{1}{2} \cdot (v_0 + v_0 + a \cdot \Delta t) \cdot \Delta t$$

$$\Longleftrightarrow \qquad x(t) - x_0 = \frac{1}{2} \cdot 2v_0 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a \cdot \Delta t^2. \tag{23}$$

En simplifiant puis en ajoutant x_0 des deux côtés de l'égalité, nous obtenons finalement l'**équation horaire pour le MRUA** qui est l'équation d'une parabole‖ :

$$\boxed{x(t) = x_0 + v_0 \cdot (t - t_0) + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (t - t_0)^2. \qquad (24)}$$

Le diagramme horaire est une parabole avec ordonnée x_0 au temps t_0. La figure 6 montre l'exemple où $a > 0$ (parabole convexe) $v_0 > 0$ et $x_0 > 0$, mais ces paramètres peuvent changer : si par exemple $a < 0$, la parabole est concave (figure 8). À chaque instant la

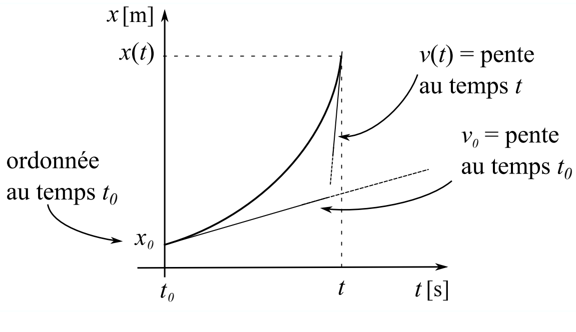


FIGURE 6 – Diagramme horaire pour un MRUA avec $a > 0$, $v_0 > 0$ et $x_0 > 0$.

vitesse est donnée par la pente de la tangente à la courbe. Dans la figure 6 on observe la

‖. En mathématiques on utilise la notation $y(x) = ax^2 + bx + c$, le paramètre a étant la concavité et c l'ordonnée à l'origine. Ici nous retrouvons cette équation en remplaçant $x \to t$, $y(x) \to x(t)$, a (paramètre) $\to a/2$ (accélération), $b \to v_0$ et $c \to x_0$: ici la notation change car les variables ont une signification physique.

tangente à la parabole au temps t_0, dont la pente correspond à v_0, ainsi que la tangente au temps t, dont la pente est $v(t)$. Dans ce graphique la pente augmente avec le temps, ce qui confirme que l'accélération est positive. Par ailleurs, si v_0 est nulle (le corps démarre son mouvement depuis le repos), la tangente au temps t_0 est la droite horizontale et la parabole est symétrique par rapport à l'axe vertical. Les figures 7 et 8 montrent des exemples de diagrammes horaires où $a < 0$ et $v_0 > 0$ (figure 7) et où $a > 0$ mais la vitesse initiale est négative ($v_0 < 0$, figure 8).

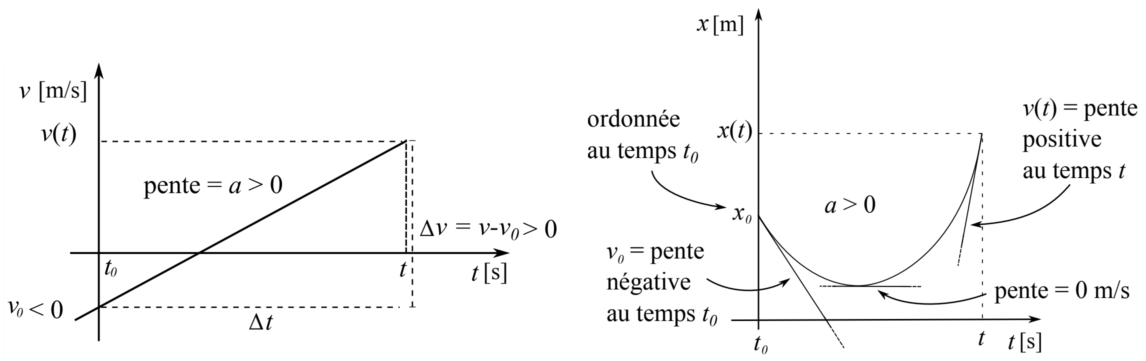


FIGURE 7 – Diagramme de vitesse et diagramme horaire pour un MRUA avec $a > 0$ et $v_0 < 0$. La vitesse initiale est négative, puis elle augmente jusqu'à atteindre une valeur nulle (intersection avec l'axe horizontal à gauche et point où la pente est nulle à droite). Ensuite sa valeur, positive, continue d'augmenter.

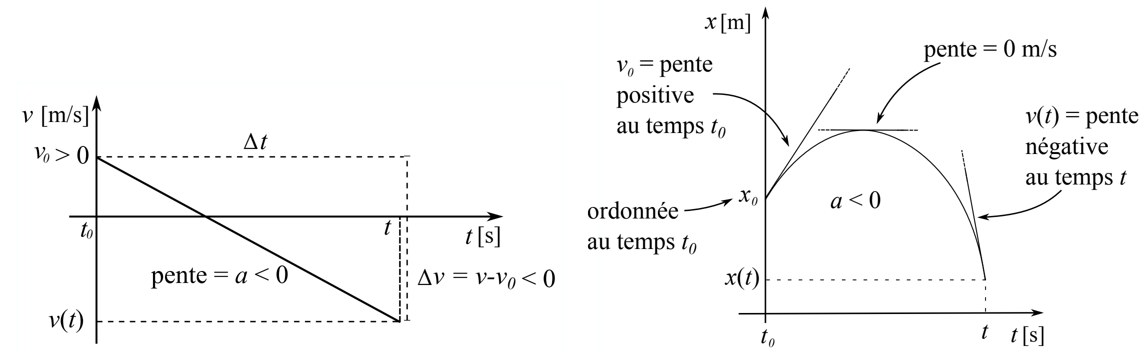


FIGURE 8 – Diagramme de vitesse et diagramme horaire pour un MRUA avec $a < 0$ et $v_0 > 0$. La vitesse initiale est positive, puis elle diminue jusqu'à atteindre une valeur nulle (intersection avec l'axe horizontal à gauche et point où la pente est nulle à droite). Ensuite elle devient négative en augmentant son intensité (mais en diminuant sa valeur).

Un cas spécial de MRUA est celui où $a = 0$. Dans ce cas l'équation (21) de la vitesse devient une constante en fonction du temps, et l'équation (24) devient simplement l'équation horaire du MRU.

Accélération comme pente du graphique de la vitesse

Nous avons vu que dans un MRUA la variation de vitesse est directement proportionnelle à la durée et que l'accélération est la constante de proportionnalité ; le diagramme de la vitesse en fonction du temps est donc une droite de pente a.

Lorsque la vitesse varie de manière que l'accélération n'est pas contante, comme dans l'exemple de la figure ci-dessous, le graphique de $v(t)$ n'est pas une droite et nous allons alors procéder de manière analogue à ce que nous fait au paragraphe 2.8 : premièrement, en observant que la pente de la ligne qui relie deux points du graphique de vitesse correspond à l'accélération *moyenne* entre ces deux points. En calculant l'accélération moyenne sur des intervalles de temps (et donc de variation de vitesse aussi) ultrapetits, nous obtenons que l'accélération *instantanée* est donnée par la pente de la tangente à la courbe $v(t)$ au point correspondant. Par exemple, dans la figure 9 l'accélération moyenne

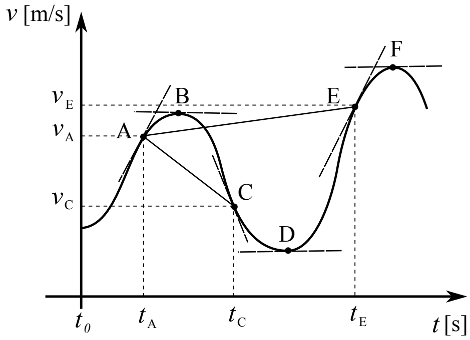


FIGURE 9 – Dans un mouvement à accélération variable, la pente d'un segment qui relie deux points du graphique correspond à l'accélération moyenne entre ces deux points (segments solides AC et AE), l'accélération instantanée se trouve par la pente de la tangente à chaque point du graphique (lignes en traitillé tangentes aux points A, B, C, D, E et F).

entre t_A et t_C est négative car $v_C < v_A$:

$$a_{AC} = \frac{v_C - v_A}{t_C - t_A} < 0,$$

alors que, puisque $v_E > v_A$

$$a_{AE} = \frac{v_E - v_A}{t_E - t_A} > 0.$$

Ce mouvement débute au temps t_0 avec une augmentation de la vitesse (accélération positive) et nous observons qu'en particulier au temps t_A la pente de la tangente est positive, donc $a_A = a(t_A) > 0\,\text{m/s}$. De A à B l'accélération continue d'augmenter, mais à un taux plus lent : l'accélération reste positive mais diminue jusqu'à devenir nulle au point B, où la pente de la tangente vaut zéro, ce qui signifie que la vitesse n'augmente plus. Ensuite, bien que toujours positive, entre B et D la vitesse diminue avec le temps, cela de manière de plus en plus rapide jusqu'au point C (où a_C est négative), puis plus lentement jusqu'à se stabiliser à une valeur positive et minimale au point D (où $a_D = 0\,\mathrm{m/s^2}$). Pour terminer, la vitesse augmente à nouveau (en passant par le pont E où $a_E > 0$) et se stabilise une dernière fois au point F, où la valeur de la vitesse est maximale et $a_F = 0\,\mathrm{m/s^2}$.

• **Exemple 18** (Résolu)**.** *Dans ce paragraphe nous avons trouvé les équations donnant la vitesse et la position en fonction du temps pour le MRUA. Néanmoins, l'équation reliant directement la vitesse à la position est très utile, trouvons-la ! Essayer d'exprimer la différence des vitesses au carré à deux instants t_0 et t_1 en fonction des positions x_0 et x_1, et cela en utilisant les équations du MRUA ci-dessus :*

$$v_1^2 - v_0^2 = ...$$

Résolution : Pour simplifier l'écriture, prenons $t_0 = 0\,\mathrm{s}$.

$$\begin{cases} v_1^2 = (v_0 + at_1)^2 = v_0^2 + a^2t_1^2 + 2v_0at_1 \\ v_2^2 = (v_0 + at_2)^2 = v_0^2 + a^2t_2^2 + 2v_0at_2 \\ x_1 - x_0 = \frac{1}{2}at_1^2 + v_0t_1 \\ x_2 - x_0 = \frac{1}{2}at_2^2 + v_0t_2 \end{cases}$$

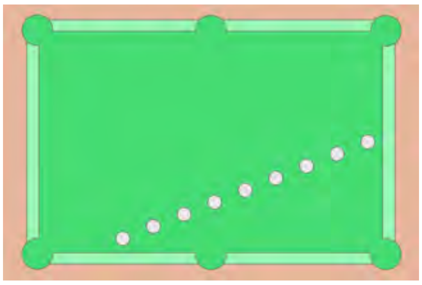
$$\begin{aligned} \Rightarrow \qquad v_2^2 - v_1^2 &= v_0^2 + a^2t_2^2 + 2v_0at_2 - v_0^2 - a^2t_1^2 - 2v_0at_1 \qquad (25) \\ &= a^2t_2^2 + 2v_0at_2 - a^2t_1^2 - 2v_0at_1 \\ &= 2a \cdot \left[\left(\frac{1}{2}at_2^2 + v_0t_2\right) - \left(\frac{1}{2}at_1^2 + v_0t_1\right)\right] \\ &= 2a \cdot [(x_2 - x_0) - (x_1 - x_0)] \\ &= 2a \cdot (x_2 - x_1) \end{aligned}$$

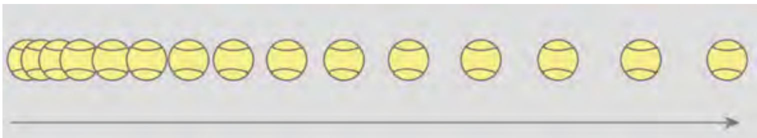
$$\boxed{\Rightarrow \qquad v_2^2 - v_1^2 = 2a \cdot (x_2 - x_1) \qquad (26)}$$

Existe-t-il d'autres manières pour démonter cette formule ?

• **Exemple 19.** *Pour chacun des mouvements dans les chronophotographies suivantes :*

1. *Déterminer s'il s'agit d'un MRU, MRUA ou autre et justifier ;*
2. *Dessiner les vecteurs vitesses instantanées du corps à chaque position ;*
3. *Faire des graphiques approximatifs (sans échelle) de la position, vitesse et accélération du corps en fonction du temps.*





• **Exemple 20** (Dans le cahier d'exercices)**.** *Un vélo qui freine peut décélérer jusqu'à* $-2,5\,\mathrm{m/s^2}$. *Quelle distance au minimum parcourt un vélo avant de s'arrêter, s'il voyageait avec une vitesse de* $10\,\mathrm{m/s}$ *quand il commence à freiner ?*

Formulaire de Cinématique

— La **vitesse vectorielle moyenne** et la **vitesse vectorielle instantanée** sont des **vecteurs** (définies par leur intensité, direction et sens), dont les formules respectives sont :

$$\boxed{\vec{v}_m = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{t_2 - t_1} \quad \text{et} \quad \vec{v}_{inst} = \frac{d\vec{r}}{dt}}$$

La vitesse vectorielle moyenne s'appelle aussi **vitesse de déplacement**, elle a la même direction et le même sens que le déplacement $\Delta \vec{r}$, et la vitesse vectorielle instantanée a la direction tangent à la trajectoire et le sens du mouvement.

— La **vitesse scalaire moyenne** et la **vitesse scalaire instantanée** sont des grandeurs **scalaires** (définies uniquement par une intensité), dont les formules respectives sont :

$$\boxed{v_m = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} \quad \text{et} \quad v_{inst} = \frac{ds}{dt} \cong \frac{||d\vec{r}||}{dt} = ||\vec{v}_{inst}||}$$

— Pour le **MRU**, les équations donnant accélération, vitesse et position en fonction du temps sont :

$$\boxed{a = 0}$$

$$\boxed{v(t) = v \quad \text{(constante)}}$$

$$\boxed{x(t) = x_0 + v \cdot (t - t_0)}$$

— Pour le **MRUA**, les équations correspondantes sont :

$$\boxed{a(t) = a \quad \text{(constante)}}$$

$$\boxed{v(t) = v_0 + a \cdot (t - t_0)}$$

$$\boxed{x(t) = x_0 + v_0 \cdot (t - t_0) + \frac{1}{2}\, a \cdot (t - t_0)^2}$$

De plus, la relation directe entre la vitesse et la position est donnée par

$$\boxed{v_2^2 - v_1^2 = 2\, a \cdot (x_2 - x_1)}$$

Unités

Grandeur(s)	**Unité SI**	**Autres unités utiles**
position $\vec{r}$; distance s ou d	mètre [m]	mile [mi] ; pied [ft]
temps t	seconde [s]	minute [mn], heure [h]
vitesse $\vec{v}$	mètre par seconde [m/s]	kilomètre par heure [km/h]
accélération $\vec{a}$	mètre par seconde au carré [m/s^2]	-

• **Exemple 21** (Dans le cahier d'exercices)**.** *Esquisser la courbe du graphique en fonction du temps (droite, parabole, plateau, ...)correspondant à chacune des grandeurs cinétiques du MRU, puis du MRUA ($a(t)$, $v(t)$ et $x(t)$). On suppose tous les paramètres (x_0, v_0, a, ...) positifs.*

• **Exemple 22.** *Un lion se repose tranquillement au soleil quand, soudain, il voit un zèbre le dépasser avec une vitesse constante d'intensité* $v_z = 27\,\mathrm{km/h}$. *Assumer que le lion part dans la même direction que le zèbre* $3,0\,\mathrm{s}$ *après le dépassement, avec une accélération constante d'intensité* $a_{lion} = 6,0\,\mathrm{m/s^2}$.

1. *Après combien de temps depuis son départ le lion attrapera le zèbre ?*
2. *Quelle distance aura-t-il alors parcouru ?*
3. *Quelle sera sa vitesse lorsqu'il se jettera sur sa proie ?*
4. *Faire les trois graphiques des accélérations vitesses et positions pour les deux animaux (dessiner deux courbes correspondantes aux deux animaux dans chacun de trois graphiques).*

Deuxième partie

Dynamique

Introduction

Dans la première partie, nous avons étudié le mouvement d'une particule et ses variations sans nous préoccuper des causes de ces changements. De fait notre étude était, pour ainsi dire, géométrique. Dans cette partie nous étudierons les **causes du mouvement** des objets, cette branche de la mécanique est appelée la **dynamique**. Les causes du mouvement d'un corps sont les **forces**. Nous rappelons que, par définition, **une force est une influence quelconque sur un objet qui peut produire une modification dans son mouvement et/ou dans sa structure.**

Comme précédemment, nous allons travailler en modélisant les objets par des masses ponctuelles et nous étudierons les trois lois du mouvement de Newton, qui sont la base de la **dynamique classique** et qui décrivent les relations entre les forces agissant sur un corps et le mouvement de celui-ci. Nous savons aujourd'hui que ces lois sont des cas limites de théories plus générales et sont valables uniquement pour des objets macroscopiques se déplacement lentement par rapport à la vitesse de la lumière. **L'étude de la dynamique des objets microscopique nous entrainerait vers la Mécanique Quantique tandis que celui des objets ayant des vitesses proche de celle de la lumière est du ressort de la théorie de la Relativité Restreinte**.

Ici nous nous focalisons donc sur la **Mécanique Newtonienne** car, bien que des théories plus générales existent actuellement, son domaine d'application permet de décrire de manière générale et élégante les mouvements de corps allant des molécules aux galaxies ; cela en n'utilisant que des mathématiques relativement simples.

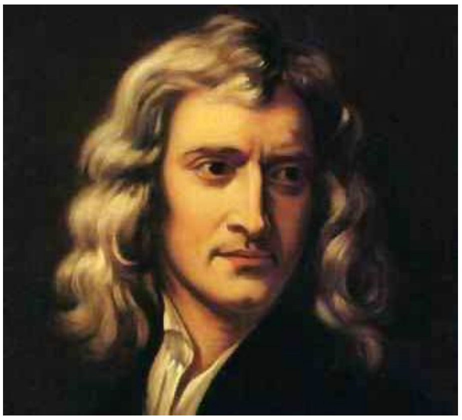
4 Les lois de Newton

Isaac Newton (1642 -1727), né en Angleterre l'année de la mort de Galilée, fut le principal architecte de la mécanique classique. Il suivit et compléta les idées de son prédécesseur italien et d'autres scientifiques qui l'ont précédé. Ses trois lois décrivant le mouvement furent présentés pour la première fois en 1686 dans l'ouvrage *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, mieux connus simplement comme *Principia.*

4.1 La première loi de Newton (rappel)

Avant Galilée, la plupart des philosophes croyaient que quelque influence ou "force" était nécessaire pour maintenir un corps en mouvement. Selon eux, un corps était dans son "état naturel" quant il était immobile. Ils étaient persuadés que, pour qu'un mobile ait un mouvement rectiligne uniforme, un agent externe devrait le pousser continuellement, sinon il s'arrêterait "naturellement".

Newton argumenta contre cette idée, en prétendant que, lorsqu'un mobile glisse sur un plan horizontal, si tout frottement pouvait être éliminé, le corps continuerait indéfiniment à glisser avec une trajectoire droite et une vitesse constante, et qu'une force externe est nécessaire pour changer sa vitesse (en particulier pour l'arrêter). Mais aucune force est nécessaire pour maintenir la vitesse d'un corps constante. Il formula cette idée avec ces paroles :



"tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état".

En sachant que

- par définition, **une particule est en équilibre mécanique quand son mouvement est rectiligne et uniforme, en d'autres mots $\vec{a} = \vec{0}$**;
- quand plusieurs forces agissent sur une particule, nous pouvons toujours les **remplacer** par une seule force, appelée **la résultante $\vec{F}_{res}$, qui correspond à la somme vectorielle des autres,**

nous pouvons ainsi énoncer la première loi de Newton.

Une particule est en équilibre mécanique (MRU ou $\vec{a} = \vec{0}$)
si et seulement si ($\Longleftrightarrow$)
la résultante des forces sur elle est nulle ($\vec{F}_{res} = \vec{0}$).

Cependant, l'application de cette loi est compliquée sur Terre, et cela en raison des forces de frottement et de la gravitation. Ainsi, une force supplémentaire (comme celle d'un moteur) est nécessaire pour les compenser, de manière que la résultante soit nulle et le mouvement rectiligne uniforme.

4.2 L'inertie

La première loi de Newton n'est pas valable dans tous les référentiels. Par exemple, lorsqu'un corps est dans un véhicule qui possède une accélération, comme une voiture qui tourne ou qui accélère/freine, du point de vue du véhicule cet objet subit une accélération même sans être sujet à des forces : du point de vue d'un observateur dans le référentiel du véhicule la loi de Newton est contredite. D'autre part, pour un observateur sur la route,

l'objet n'a pas subi de forces, contrairement à la voiture, et donc il n'a pas de raison de changer sa vitesse : du point de vue de l'observateur dans le référentiel de la route la première loi de Newton est confirmée.

Le camion a des freins, mais le bloc en béton pas !

La propriété des corps à résister à une variation de vitesse et de maintenir leur état de MRU est appelée inertie, et la première loi de Newton est aussi connue sous le nom de loi d'inertie.

Un référentiel est défini comme inertiel lorsque la loi d'inertie y est valable : en particulier, si un référentiel donné est inertiel, alors tout autre référentiel en MRU par rapport à celui-ci est aussi inertiel.

Lien sur la loi d'inertie

- **Exemple 23.**

a) *Expliquer pourquoi il est important de mettre la ceinture de sécurité dans la voiture. Pourquoi il est plus sûr pour le conducteur si les passagers à l'arrière mettent la ceinture aussi ?*

b) *Expliquer pourquoi, dans un grand magasin, il est plus difficile de tourner ou de s'arrêter avec un chariot rempli plutôt que vide.*

c) *Est-ce que la Terre est un référentiel inertiel ?*

4.3 La deuxième loi de Newton

Quand la force résultante sur un corps n'est pas nulle, sa vitesse varie. Cela signifie que le corps subit une accélération. La deuxième loi de Newton nous dit de quelle manière la vitesse du corps change en relation à la force résultante qui lui est appliquée.

L'accélération $\vec{a}$ d'une particule a la <u>même direction</u>, le <u>même sens</u> que la force <u>résultante</u> $\vec{F}_{res}$ appliquée sur elle, et une <u>intensité</u>
— <u>directement</u> proportionnelle à l'intensité de la force <u>résultante</u> et
— <u>inversement</u> proportionnelle à sa masse m :

$$\vec{F}_{res} = m\vec{a} \qquad \text{ou} \qquad \frac{\vec{F}_{res}}{m} = \vec{a}. \tag{27}$$

Suite à l'équation (27), nous pouvons dire que

- la direction de l'accélération est .... à la direction de la force résultante ;
- pour obtenir une accélération plus grande sur un corps donné, il faut lui appliquer une force résultante .... ;
- pour avoir la même accélération sur deux corps ayant deux masses différentes, il faut appliquer une force résultante .... sur le corps qui possède la plus grande masse ;
- si deux corps subissent la même force résultante, le corps de masse plus petite subira une accélération .... ;
- si la force résultante appliquée sur un corps est constante, alors l'accélération du corps est .... et le mouvement du corps est défini comme .... ;
- si la force résultante appliquée sur un corps est nulle ($\vec{F}_{res} = \vec{0}$), alors $\vec{a} =$ .... et le mouvement du corps est .... (c'est la loi ....).

Enfin, nous observons que, en termes d'unités de mesure, une conséquence de l'équation (27) est que

$$1\ \mathrm{N} = 1\ \mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}.$$

• **Exemple 24.** *Une luge possède une masse de* $700\,\mathrm{g}$. *Un garçon la pousse avec une force d'intensité* $||\vec{F}|| = 20\,\mathrm{N}$. *Quelle est la norme de son accélération ?*

• **Exemple 25.** *Quelle intensité devrait avoir une force appliquée à une moto de* $300\,\mathrm{kg}$ *si on veut qu'elle accélère de* $5,0\,\mathrm{m/\,s^2}$ *?*

• **Exemple 26.** *Dessiner toute force agissant sur un avion (I) juste après le décollage et (II) en vol, à vitesse constante et hauteur constante.*

4.4 La troisième loi de Newton (rappel)

Si un corps A exerce une force $\vec{F}_{AB}$ sur un autre corps B, alors B exerce une force sur A, $\vec{F}_{BA}$, avec la même intensité et la même direction, mais dans le sens opposé :

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}. \tag{28}$$

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

Une conséquence importante de cette loi est le fait qu'une force n'existe jamais toute seule mais que les forces se manifestent toujours par paires (chacune agissant sur un corps différent). Donc il **faut penser en termes d'interaction plutôt qu'en termes de force**.

Nous rappelons qu'il existe deux types d'interactions :

- avec contact, ou
- à distance.

• **Exemple 27.**

a) *Donner quelques exemples d'interactions avec contact et à distance.*

b) *Une voiture est bloquée sur une route glacée. Expliquer pourquoi pour cette voiture il peut s'avérer difficile de démarrer sur la glace.*

c) *Les sprinters fixent un "starting block" dans le terrain afin d'avoir un meilleur départ. Expliquer pourquoi.*

5 Chute libre

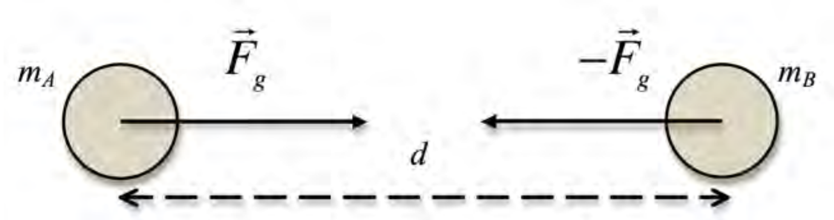
5.1 La loi de gravitation universelle (rappel)

Nous rappelons que l'**interaction gravitationnelle** est l'une des quatre interactions fondamentales en physique. Elle est décrite par Newton dans sa **loi de la gravitation universelle** :

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

Leur intensité est la même : $$||\vec{F}_g|| = G \cdot \frac{m_A \cdot m_B}{d^2}, \tag{29}$$

où G est la <u>**constante de gravitation universelle**</u> **et possède la même valeur pour toute couple de corps**.



La valeur de G est mesurée en utilisant la force d'attraction entre deux corps de masse connue. Elle est actualisée à $6,667384(80) \cdot 10^{-11} \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{s}^2}$ (ou $\frac{\mathrm{N\ m}^2}{\mathrm{kg}^2}$).

L'interaction gravitationnelle consiste donc en un couple de forces réciproques, ayant la même intensité et le sens opposé. Nous soulignons que, **même si les masses des deux corps sont très différentes, les forces ont la même intensité !** Ainsi lorsqu'une pomme tombe par terre, l'intensité $||\vec{F}_g||$ de la force gravitationnelle de la Terre sur la pomme est la même que celle de la pomme sur la Terre. **Ce qui change est l'accélération gravitationnelle :** en effet, pour la deuxième loi de Newton nous avons

$$||\vec{a}_{pomme}|| = \frac{||\vec{F}_g||}{m_{pomme}} \quad \text{et} \quad ||\vec{a}_{Terre}|| = \frac{||\vec{F}_g||}{m_{Terre}},$$

la masse de la pomme étant beaucoup plus petite que celle de laTerre, son accélération vers le centre de gravité commun est beaucoup plus grande !

5.2 Chute libre à la surface terrestre

Nous voulons maintenant calculer l'intensité de **l'accélération agissant sur un objet de masse m_A, comme une pomme, due à son interaction gravitationnelle avec la Terre, avec masse $m_B = m_{Terre}$. Cette quantité s'appelle accélération gravitationnelle ou accélération de la pesanteur, notée $\vec{a}_g = \vec{g}$.** Pour cela nous utilisons la deuxième loi de Newton, l'équation (27), en remplaçant m par m_A :

$$\boxed{g = ||\vec{g}|| = \frac{||\vec{F}_g||}{m_A}. \qquad (30)}$$

En remplaçant $||\vec{F}_g||$ par son équation (29), nous avons

$$g = G \cdot \frac{m_A \cdot m_{Terre}}{m_A \cdot d^2} = G \cdot \frac{m_{Terre}}{d^2}.$$

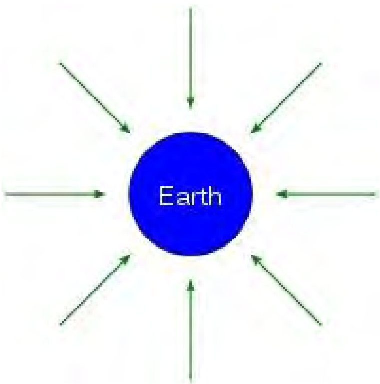
L'intensité de l'accélération gravitationnelle terrestre g est indépendante de la masse de l'objet en question (dans ce cas m_A). d est la distance entre le centre de gravité de m_A et le centre de gravité de la Terre. **Lorsque la masse m_A se trouve à la surface terrestre (et uniquement dans ce cas !), nous pouvons remplacer d par le rayon de la Terre R_{Terre}**, qui varie selon l'endroit choisi ** :

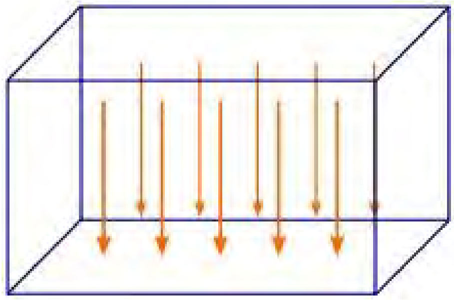
$$\boxed{g = G \cdot \frac{m_{Terre}}{R^2_{Terre}}. \qquad (31)}$$

À la latitude de 50°, au niveau de la mer, $g \simeq 9,81071$ m/s^2 (ou N/kg). Mais cette valeur change en fonction de la distance du centre de masse de la Terre.

L'accélération gravitationnelle est une quantité vectorielle dont la direction est toujours donnée par la ligne droite passant par le centre de gravité de la Terre et de m_1, comme montré dans la figure suivante, à gauche. Néanmoins, lorsque nous étudions le mouvement de particules dont la taille est plusieurs ordres de grandeur plus petite que R_{Terre}, comme c'est le cas pour une pomme qui tombe ou même d'un avion qui décolle, nous considérons la surface terrestre comme plate, et $\vec{g}$ vertical pointant vers le bas.

**. Nous avons négligé également les effets de la rotation terrestre sur g.



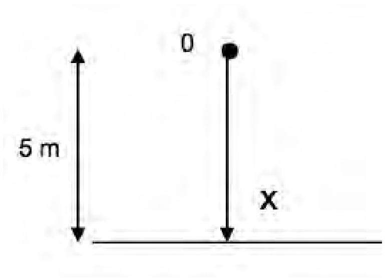


Nous avons donc que, **à la surface terrestre (et cela peut être généralisé à n'importe quel corps céleste), si la force de gravitation est la seule qui agit, l'accélération d'un corps est constante, indépendamment de la masse ou la forme du corps.** Ou encore, en l'absence de toute résistance au mouvement, comme le frottement, une plume et un marteau laissés tomber depuis la même hauteur dans le vide, arrivent au sol en même temps. Dans la vidéo suivante Dave Scott (mission Apollo15) laisse tomber une plume et un marteau sur la Lune, en l'absence d'atmosphère :

http://www.youtube.com/watch?v=5C5_dOEyAfk.

5.2.1 Chute libre verticale

Considérons l'exemple d'un objet laissé tomber d'une hauteur de 5 m sur la surface terrestre ($g \cong 9,81\,\mathrm{m/s^2}$). Sa vitesse initiale est $v_0 = 0$, sans frottements. Combien de temps faut-il avant qu'il touche le sol ?
Pour ce mouvement, en une dimension, nous prenons l'axe x avec le même sens que l'accélération, vers le bas. Donc $a = g$ positive, comme en figure.



Ce mouvement suit ainsi les équations du MRUA : (21) et (24), que nous avons vues au paragraphe 3.3, avec $a = g$. En inversant l'équation (24) nous trouvons la durée en fonction de l'accélération et du déplacement :

$$x(t) = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad \Rightarrow \quad t = \sqrt{\frac{2x}{g}}.$$

En sachant que $x = 5\,\mathrm{m}$ et que $g = 9,81\,\mathrm{m/s^2}$ nous avons

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot 5\,\mathrm{m}}{9,81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}}} \cong 1\,\mathrm{s}.$$

L'objet touche le sol après environ 1 s de chute libre.

• **Exemple 28** (Dans le cahier d'exercices). *Ecrire les deux équations (I) de la vitesse et (II) de la position en fonction du temps pour une pierre qui tombe d'une hauteur de* 30 m *sur la surface de la Terre. La vitesse initiale est zéro. Prendre comme positif le sens vers le bas.*

a) *Après combien de temps la pierre touche le sol ?*

b) *Dessiner les trois graphiques de (I) l'accélération, (II) la vitesse et (III) la position en fonction du temps entre* $t = 0\,\mathrm{s}$ *et l'instant où la pierre touche le sol.*

• **Exemple 29** (Résolu). *Phiz lance une pièce verticalement vers le haut, avec une vitesse initiale* $8,0\,\mathrm{m/s}$ *intense (point A). En négligeant la résistance de l'air, calculer :*

a) *le temps emplyé par la pièce pour atteindre la hauteur maximale (point B),* t_{max} *;*

b) *la hauteur maximale atteinte par la pièce,* x_{max} *;*

c) *le temps* t_r *pour que la pièce retourne dans la main ;*

d) *la vitesse* v_r *de la pièce quand elle retourne dans la main.*

Résolution :
Nous prenons comme positive la direction de la vitesse initiale de la pièce $v_0 = 8,0\,\mathrm{m/s}$, verticale vers le haut. À noter que le temps initial $t_0 = 0\,\mathrm{s}$ est **le premier instant où la pièce n'est plus en contact avec la main** : c'est à partir de ce moment qu'elle ne subit que l'attraction gravitationnelle et donc son accélération est $a = -g = -9,81\,\mathrm{m/s^2}$ (elle a subi une accélération vers le haut *avant* de quitter la main, ce qui lui permis d'atteindre la vitesse v_0). Il s'agit donc d'un MRUA avec $t_0 = 0\,\mathrm{s}$; $x_0 = 0\,\mathrm{m}$; $v_0 = 8,0\,\mathrm{m/s}$; $a = -9,81\,\mathrm{m/s^2}$:

$$\begin{cases} v(t) = v_0 + a \cdot t \\ \\ x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v(t) = 8 - 9,8 \cdot t \\ \\ x(t) = 8t - 4,9 \cdot t^2 \end{cases}$$

a) L'équation de la vitesse ci dessus indique que $v(t)$ est une fonction décroissante du temps : v est au départ positive ($8,0\,\mathrm{m/s}$ pour $t = 0\,\mathrm{s}$), puis elle diminue proportionnellement au temps : elle perd $9,8\,\mathrm{m/s}$ à chaque seconde, jusqu'à devenir négative (donc changer de sens). Quand $v(t) = 0\,\mathrm{m/s}$ la pièce atteint son hauteur maximale. Nous appellons t_m le temps correspondant :

$$v(t_m) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad v(t_m) = 8 - 9,8 \cdot t_m = 0 \quad \Leftrightarrow \quad t_m = \frac{v_0}{g} = \frac{8\,\mathrm{m/s}}{9,8\,\mathrm{m/s^2}} = 0,81\,\mathrm{s}.$$

b) Nous remplaçons la valeur de t_m dans l'équation horaire du mouvement ci-dessus pour trouver la hauteur maximale :

$$h = x(t_m) = 8t_m - 4,9 \cdot t_m^2 = 8 \cdot 0,81 - 4,9 \cdot 0,81^2 = 3,3\,\mathrm{m}.$$

c) Pour trouver l'instant t_r où la pièce retourne dans la main, nous posons $x(t_r) = 0\,\mathrm{m}$:

$$x(t_r) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad 8t_r - 4,9 \cdot t_r^2 = 0 \quad \Leftrightarrow \quad t_r \cdot (8 - 4,9t_r) = 0$$

Cette équation de deuxième degré possède deux solutions : $t_0 = 0\,\mathrm{s}$ (l'instant de départ, qui ne correspond pas à la solution qui nous intéresse)

$$t_r = \frac{8\,\mathrm{m/s}}{4,9\,\mathrm{m/s^2}} = 1,6\,\mathrm{s}.$$

d) La vitesse correspondante se trouve en remplaçant la valeur de t_r dans l'équation de la vitesse en fonction du temps :

$$v(t_r) = 8 - 9,8 \cdot t_r = 8 - 9,8 \cdot 1,6 = -8,0\,\mathrm{m/s}$$

$$\Rightarrow \quad v_r = -v_0 \quad \text{et} \quad |v_r| = |v_0|.$$

5.2.2 Chute libre en deux dimensions : le mouvement du projectile

Lorsqu'un objet est lancé avec une vitesse vectorielle initiale non verticale et la seule accélération est celle gravitationnelle, nous avons un mouvement en **deux dimensions**, appelé "mouvement du projectile". Le mouvement idéal d'une balle de golf ou de foot lancée par un joueur est un exemple de ce type de situation. Si nous négligeons la résistance de l'air, le mouvement du projectile a une accélération constante $\vec{g}$, verticale et dirigée vers le bas - la composante horizontale de l'accélération étant nulle.

Nous choisissons un système d'axes en deux dimensions $(x; y)$ avec comme origine O le point de lancée et l'axe des y vertical vers le haut (mais il peut aussi être choisi orienté vers le bas, et l'accélération sera dans ce cas positive). Nous pouvons ainsi écrire :

$$\begin{cases} a_x = 0, \\ a_y = -g. \end{cases}$$

Nous avons donc un problème avec deux composantes :
- le long de l'axe des x, où l'accélération est nulle et la vitesse est constante, nous avons un MRU ;
- le long de l'axe des y nous avons un MRUA avec accélération négative.

Par conséquent, nous pouvons trouver les équations horaires pour les deux coordonnées en utilisant les équations du MRU pour la coordonnée x et du MRUA pour la coordonnée y. Nous appelons la vitesse initiale $\vec{v}_0$, formant une angle α_0 avec l'axe des x, comme montré dans le schéma.

$$\vec{v}_0 = (v_{0x}; v_{0y}) \quad \Longleftrightarrow \quad tan(\alpha_0) = \frac{v_{0y}}{v_{0x}} \quad \Longleftrightarrow \quad v_0 = ||\vec{v}_0|| = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0y}^2},$$

D'abord nous écrivons les équations des composantes x et y de la vitesse à un instant générique t :

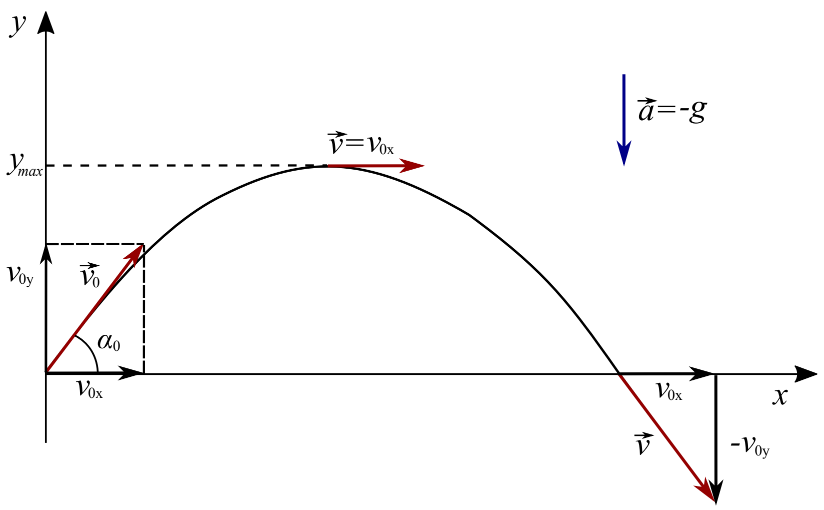
$$\begin{cases} v_x(t) = v_{0x} \ = \ \text{constante} \\ \\ v_y(t) = v_{0y} - gt \end{cases} \tag{32}$$

Ensuite les équations horaires pour chacune des composantes du déplacement, x et y :

$$\begin{cases} x(t) = v_{0x}t \\ \\ y(t) = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \tag{33}$$

Si nous inversons la première équation de (33) pour expliciter t en fonction de x, puis remplaçons cette expression pour t dans l'équation de $y(t)$, nous obtenons

$$\begin{cases} t = \frac{x}{v_{0x}} \\ \\ y = \frac{v_{0y}}{v_{0x}} \ x - \frac{1}{2} \ g \ \frac{x^2}{v_{0x}^2}. \end{cases} \tag{34}$$



En réécrivant la deuxième équation de (34), il résulte que la coordonnée y est une fonction quadratique de la coordonnée x :

$$y = \frac{v_{0y}}{v_{0x}} \ x - \frac{g}{2 \, v_{0x}^2} \ x^2. \tag{35}$$

Le graphique relatif est la trajectoire du projectile, soit une parabole
- démarrant à l'origine avec une une pente $tan(\alpha_0) = v_{0y}/v_{0x}$;
- avec une concavité négative $-g/2 \, v_{0x}^2$.

Lien Java : https://www.walter-fendt.de/html5/phfr/

Flèche et portée

La valeur maximale de l'ordonnée y_{max} s'appelle **flèche**.
Le déplacement horizontal parcouru, de l'origine jusqu'au point où le y du projectile est à nouveau nul, s'appelle **portée**, notée x_p. Nous pouvons la trouver en calculant pour quelle valeur non nulle de x le membre de droite de l'équation (35) s'annule :

$$\frac{v_{0y}}{v_{0x}}\, x - \frac{g}{2\, v_{0x}^2}\, x^2 = 0 \qquad \Longleftrightarrow \qquad \frac{x}{v_{0x}} \cdot \left(v_{0y} - \frac{g}{2\, v_{0x}}\, x \right) = 0,$$

dont les solutions sont

$$x_0 = 0 \quad \text{and} \quad x_p = \frac{2\, v_{0x}\, v_{0y}}{g}. \tag{36}$$

• **Exemple 30.** *Soit α_0 l'angle entre $\vec{v}_0$ et l'axe des x.*

a) *Ecrire v_{0x} et v_{0y} en fonction de v_0 et de α_0.*

b) *Remplacer les expressions pour v_{0x} et v_{0y} dans l'équation de la portée* (36)*.*

c) *Déterminer pour quel valeur de α_0 la portée est maximale.*

d) *Montrer que la flèche $y_{max} = \frac{v_{0y}^2}{2\,g}$.*

e) *Trouver l'angle α_0 pour lequel la portée et la flèche ont la même valeur.*

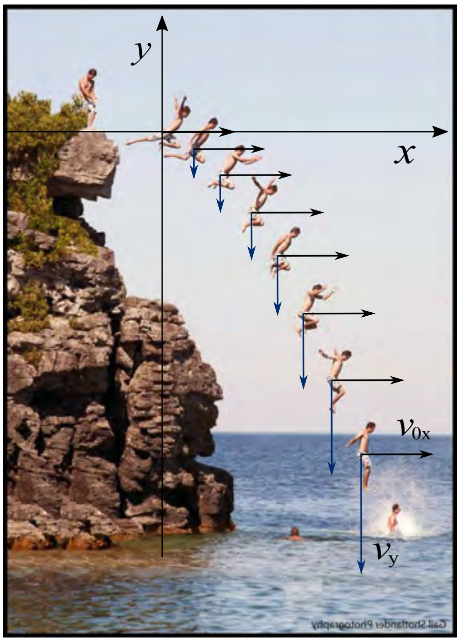
Cas où $\vec{v}_0$ est horizontale ($v_{0y} = 0\,\mathrm{m/s}$)

Si le projectile est lancé parallèlement à la surface terrestre, $\vec{v}_0 = (v_{0x}; 0)$. Les équations du mouvement (32) et (33) deviennent

$$\begin{cases} v_x(t) = v_{0x} \\ \\ v_y(t) = -gt \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} x(t) = v_{0x} t \\ \\ y(t) = -\frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \tag{37}$$

et l'équation de la trajectoire (35) devient celle d'une parabole avec sommet à l'origine et concavité négative

$$y = -\frac{g}{2\,v_{0x}^2}\,x^2. \qquad (38)$$



Si un corps tombe depuis une hauteur h (touche le sol quand $y = -h$), le temps de chute se trouve en utilisant l'équation horaire pour le y dans (37) :

$$-h = -\frac{1}{2} g t_{sol}^2 \;\Rightarrow\; t_{sol} = \sqrt{2h/g}.$$

En remplaçant t_{sol} dans l'équation horaire pour le y dans (37) nous trouvons que la distance horizontale parcourue jusqu'au sol est ainsi proportionnelle à la vitesse initiale v_{0x} :

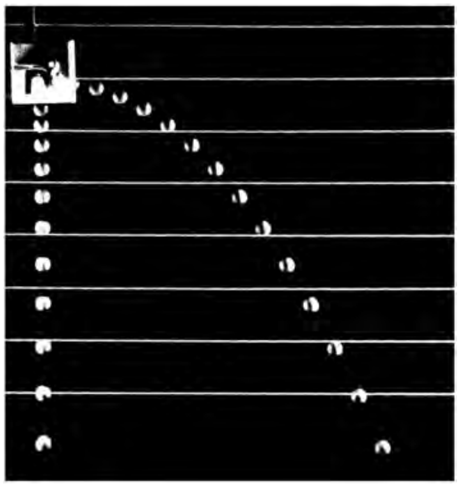
$$x_{sol} = v_{0x} \cdot \sqrt{2h/g}.$$

Pour conclure, nous précisons que même si dans ce cours nous n'analysons que des mouvements de projectiles ponctuels, le formalisme introduit peut être étendu aux mouvements de corps plus complexes, à condition de les appliquer au centre de masse du corps analysé, comme celui de la personne qui saute depuis la falaise.

• **Exemple 31.** *La chronophotographie suivante montre la chute de deux billes. Un système d'enclenchement simultané (visible dans la figure en haut gauche) permet de synchroniser le départ des deux balles.*

a) *Expliquer la(les) différence(s) entre les deux mouvements.*

b) *Quelle balle touchera en première le sol ? Justifier.*



5.3 Chute avec résistance de l'air

Felix Baumgartner est un parachutiste et sauteur de l'extrême autrichien. Il est connu pour la nature dangereuse des sauts réalisés durant sa carrière. Le 14 octobre 2012, il a battu le record de l'époque du saut le plus haut du monde à 39045m d'altitude
Le lien suivant montre une vidéo sur la physique du parachutisme (“sky diving” en anglais) :

https://www.youtube.com/watch?v=ur40O6nQHsw.

Si une plume et un marteau tombent avec la même accélération dans le vide, cela n'est pas le cas dans l'air. Cela s'explique par le fait que les molécules d'air génèrent une force de frottement (la “traînée”) $\vec{F}_{fr}$, toujours opposée au mouvement. Ainsi, $\vec{F}_{fr}$ se rajoute à la force de gravité, en diminuant la résultante sur le corps en chute donc son accélération.

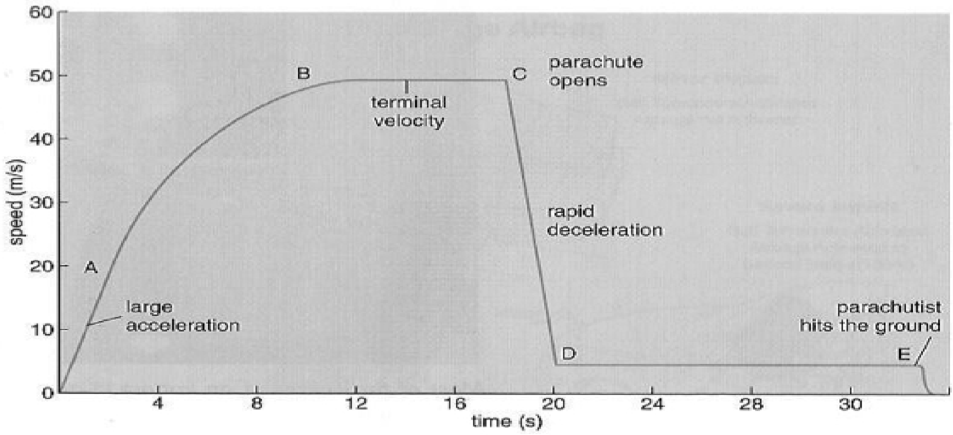
Le sens de $\vec{F}_{fr}$ est toujours opposé à la vitesse $\vec{v}$ de l'objet en chute, sa norme dépend de la forme de l'objet et de sa taille, et est proportionnelle à la vitesse du corps au carré et la densité de l'air :

$$||\vec{F}_{fr}|| \sim \rho_{air} v^2, \tag{39}$$

De manière générale, on distingue trois phases :

- au début de la chute la vitesse est petite, donc la résistance de l'air aussi, $||\vec{F}_{fr}|| \simeq 0$. Le mouvement peut être assimilé à une chute libre dans le vide, soit un MRUA avec $a \simeq g$;
- lorsque la norme de la vitesse augmente, la résistance de l'air augmente également, jusqu'à ce qu'elle ne puisse plus être négligée. Ainsi l'intensité de la résultante diminue et, avec celle-ci, l'accélération du corps ;
- bien qu'avec une accélération toujours plus petite, la vitesse augmente jusqu'au moment où la résistance tend à devenir égale au poids dans son intensité, mais opposée dans sa direction : ($\vec{F}_{fr} \to -\vec{F}_g$). À ce point, la résultante tend à être nulle, et la vitesse de chute tend vers une valeur constante appelée **<u>vitesse limite</u>**. Sa valeur n'est jamais atteinte par la vitesse réelle de chute, bien qu'elle devienne extrêmement proche.

• **Exemple 32.** *La graphique suivant montre comme la vitesse d'un parachutiste change pendant sa chute au sol. Expliquer ce qui se passe pendant les cinq parties du vol indiquées :*



1. *OA :*

2. *AB :*

3. *BC :*

4. *CD :*

5. *DE :*

a) *Quelle est la vitesse du parachutiste quand il arrive au sol ?*

b) *Pourquoi son accélération dans la partie AB est inférieure à celle du début de sa chute ?*

c) *Pourquoi son accélération dans la partie CD est négative ?*

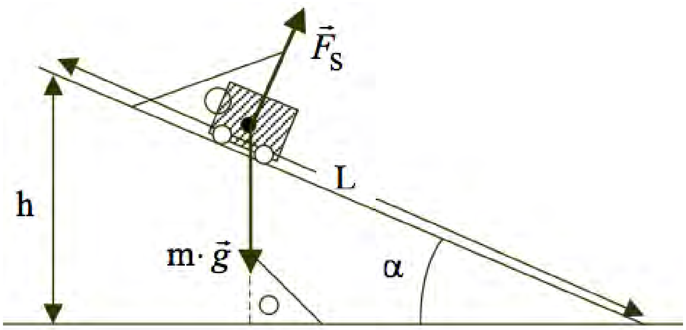
c) *Utiliser le graphique pour donner une estimation grossière de la distance totale parcourue lors de la chute.*

6 Le plan incliné

Prenons un corps de masse m qui se trouve sur un plan incliné d'un angle α. Ce corps subit au moins deux forces [††] :

— la force de la pesanteur, $\vec{F}_g = m\,\vec{g}$;

— la force de soutien du plan, $\vec{F}_s$, **toujours orientée perpendiculairement** à la surface du plan.

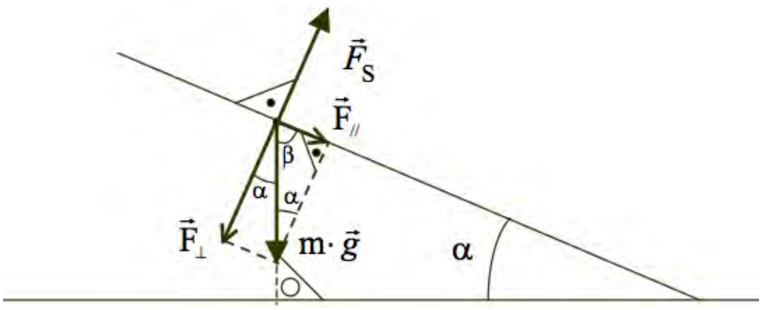


La figure ci-contre nous montre la représentation vectorielle du problème.

Pour savoir quelle est l'accélération du corps, nous devons trouver la force résultante $\vec{F}_{res}$ puis appliquer la deuxième loi de Newton.

Nous savons que l'addition de deux vecteurs donne un vecteur résultant qui produit exactement le même effet que les deux vecteurs de départ. L'opération inverse est aussi possible : **nous pouvons décomposer un vecteur en la somme de deux vecteurs : les deux composantes**. Ces composantes ont ensemble le même effet que le vecteur initial. Or, pour chaque vecteur initial, il existe une infinité de possibilités de décomposition, et nous choisissons la plus convenable dans le but de résoudre un problème donné.

Dans la situation du plan incliné, nous allons décomposer la force de pesanteur $\vec{F}_g$ (et donc la remplacer) en :



— **une composante parallèle au plan, $\vec{F}_\parallel$;**

— **une deuxième composante perpendiculaire au plan, $\vec{F}_\perp$.**

Ainsi, nous pouvons vectoriellement écrire

$$\vec{F}_g = \vec{F}_\parallel + \vec{F}_\perp.$$

Attention, **cette égalité n'est pas vraie pour les intensités :** $||\vec{F}_g|| \neq ||\vec{F}_\parallel|| + ||\vec{F}_\perp||$ **!**

††. Nous négligeons le frottement pour commencer.

Afin de connaître la valeur des intensités des deux composantes de la force de pesanteur, nous avons besoin de la **trigonométrie du triangle rectangle**. En effet $||\vec{F}_g||$, $||\vec{F}_{\parallel}||$ et $||\vec{F}_{\perp}||$ correspondent aux trois côtés d'un triangle rectangle :

— $||\vec{F}_g||$ étant la longueur de l'hypoténuse,

— $||\vec{F}_{\parallel}||$ étant la longueur du côté opposé à l'angle α :

$$\boxed{||\vec{F}_{\parallel}|| = ||\vec{F}_g|| \cdot \sin\alpha = m\ g \cdot \sin\alpha, \qquad (40)}$$

— $||\vec{F}_{\perp}||$ étant la longueur du côté adjacent à l'angle α :

$$\boxed{||\vec{F}_{\perp}|| = ||\vec{F}_g|| \cdot \cos\alpha = m\ g \cdot \cos\alpha. \qquad (41)}$$

Nous savons que, puisque le corps n'accélère pas perpendiculairement au plan, **son accélération doit forcement avoir la direction parallèle au plan. Donc, la force résultante aussi.** C'est pour cette raison que nous avons choisi une telle décomposition.

6.1 Cas sans frottement et/ou force motrice

Nous étudions l'équilibre du corps le long des deux axes ($\parallel$ et $\perp$) séparément :

— **perpendiculairement au plan** il y a deux forces : $\vec{F}_{g\perp}$ et $\vec{F}_s$. Puisque il n'y a pas d'accélération

$$\boxed{\vec{F}_s + \vec{F}_{g\perp} = \vec{0} \qquad \Longleftrightarrow \qquad \vec{F}_s = -\vec{F}_{g\perp} \qquad (42)}$$

$$\Rightarrow \quad ||\vec{F}_s|| \ = \ ||\vec{F}_{g\perp}|| = m\ g\ \cos\alpha. \qquad (43)$$

Le signe $(-)$ dans l'équation vectorielle (42) nous indique que la force de soutien et $\vec{F}_{g\perp}$ sont opposées. Il est important de souligner qu'en augmentant α (l'inclinaison du plan) $||\vec{F}_{g\perp}||$ diminue, et par conséquent le soutien du plan aussi, dans son intensité. Dans tous les cas **c'est le soutien qui s'adapte afin de compenser exactement la composante du poids perpendiculaire au plan : c'est la conséquence directe de la troisième loi de Newton (action-réaction).**

— **Parallèlement au plan** nous avons uniquement la composante de la force de pesanteur $\vec{F}_{g\|}$. Lorsque celle-ci n'est pas "compensée" par une autre force (frottement, poussée, entre autres), nous pouvons écrire

$$\boxed{\vec{F}_{res} = \vec{F}_{g\|} \qquad (44)}$$

$$\Rightarrow \quad ||\vec{F}_{res}|| \quad = \quad ||\vec{F}_{g\|}|| = m\ g\ \sin\alpha. \tag{45}$$

Une fois la force résultante obtenue, il suffit d'utiliser la deuxième loi de Newton pour trouver l'accélération du corps. En l'absence d'autres forces l'intensité de l'accélération est simplement donnée par

$$||\vec{a}|| = g\ \sin\alpha.$$

Sans surprise, l'accélération est maximale pour $\alpha = 90° \quad \Rightarrow \quad \sin\alpha = 1 \quad \Rightarrow ||\vec{a}|| = g$, c'est le cas d'une chute libre sans résistance de l'air. Elle est nulle lorsque $\alpha = 0 \quad \Rightarrow \sin\alpha = 0 \quad \Rightarrow \quad ||\vec{a}|| = 0$, c'est le cas d'un objet posé sur un plan horizontal.

6.2 Cas avec frottement et/ou force motrice

Quand d'autres forces agissent sur le corps parallèlement au plan incliné, comme une force de frottement ($\vec{F}_{fr}$, toujours opposée au mouvement) ou une force motrice ($\vec{F}_{mo}$, qu'elle soit dans le même sens que $\vec{F}_{\|}$ ou opposée) nous devons en tenir compte dans l'équation (44) des forces parallèles au plan, en les additionnant vectoriellement à $\vec{F}_{\|}$ ‡‡. Dans ce cas

$$\boxed{\vec{F}_{res} = \vec{F}_{g\|} + \vec{F}_{fr} + \vec{F}_{mo}. \qquad (46)}$$

Le mouvement le long du plan étant uni-dimensionnel, nous pouvons écrire l'équation (46) en laissant tomber la notation vectorielle

$$F_{res} = F_{g\|} + F_{fr} + F_{mo}, \tag{47}$$

en gardant à l'esprit que **ces forces peuvent avoir un signe positif ou négatif selon leur sens.** Si nous choisissons le sens du mouvement (de la vitesse) comme positif, alors F_{fr} sera négative, $F_{fr} < 0$. Comme auparavant, l'accélération du corps et donnée par le rapport entre force résultante et la masse, et peut également être positive ou négative.

‡‡. Perpendiculairement au plan la situation reste inchangée par rapport au cas sans frottement et/ou force motrice : $\vec{F}_{\perp} = -\vec{F}_s$.

Formulaire de dynamique

— La **première loi de Newton** ou **loi d'inertie** ou **loi de l'équilibre** (qui concerne **un** objet) :

$$\boxed{\text{Equilibre} \iff \text{MRU} \iff \vec{a} = \vec{0} \iff \vec{F}_{res} = \vec{0}.}$$

— La **deuxième loi de Newton** est une généralisation de la première loi de Newton (et concerne **un** objet) :

$$\boxed{\vec{a} = \frac{\vec{F}_{res}}{m} \quad \text{ou} \quad \vec{F}_{res} = m \cdot \vec{a}.}$$

Si $\vec{F}_{res}$ est constante (en direction, sens et intensité), alors $\vec{a}$ est constante aussi. Dans ce cas, si de plus $\vec{a}$ a la même direction que $\vec{v}$, nous avons un MRUA.

— La **troisième loi de Newton** ou **loi d'action/réaction** ou **loi des interactions** (concernant l'interaction entre **deux** objets, A et B) :

$$\boxed{\vec{F}_{B/A} = -\vec{F}_{A/B}.}$$

— La **loi de gravitation universelle** (écrite par Newton aussi) définit l'interaction attractive gravitationnelle entre deux objets A et B, dont les centres sont à une distance d. L'intensité de chacune des forces vaut

$$\boxed{||\vec{F}_g|| = G \cdot \frac{m_A \cdot m_B}{d^2}.}$$

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

$$\boxed{||\vec{F}_g|| = m \cdot g \quad \text{avec} \quad g = G \cdot \frac{m_{Terre}}{R_{Terre}^2},}$$

g est l'intensité de **l'accélération de la pesanteur** à la surface terrestre. Si $\vec{F}_{res} = \vec{F}_g$, alors $\vec{a} = \vec{g}$, le corps est en **chute libre dans le vide**.

— Le long d'un plan incliné d'un angle α, afin d'en étudier le mouvement, il est utile de décomposer la force de la pesanteur d'un objet en sa composante parallèle au plan, $\vec{F}_{g\parallel}$ et sa composante perpendiculaire au plan, $\vec{F}_{g\perp}$.

$$\boxed{\vec{F}_g = \vec{F}_{g\parallel} + \vec{F}_{g\perp} \quad \text{avec} \quad ||\vec{F}_{g\parallel}|| = m\ g\ \sin(\alpha) \quad \text{et} \quad ||\vec{F}_{g\perp}|| = m\ g\ \cos(\alpha).}$$

La dynamique de l'objet sera étudiée séparément le long de deux directions.

Unités

Grandeur(s)	**Unité SI**	**Autres unités utiles**
masse m	kilogramme [kg]	-
force $\vec{F}$	Newton [N]=[kg]·[m]/[s^2]	-
accélération $\vec{a}$; accélération de la gravité $\vec{g}$	[m/s^2]=[N/kg]	-

Troisième partie
Energie

Introduction

La description du mouvement des corps en termes de forces et en utilisant les lois de Newton est assez efficace lorsque nous analysons les déplacements de corps d'une taille qui ne soit pas trop éloignée de celle humaine - des molécules jusqu'aux planètes - et à de vitesses petites par rapport à celle de la lumière.

La description de la nature en termes d'énergie est plus abstraite, car le concept même d'énergie est plus difficile à saisir : nous ne pouvons pas "voir", ou "sentir" l'énergie d'un objet avec nos sens. De plus, cette grandeur physique a la capacité de prendre les formes les plus variées et nous pouvons constater sa présence essentiellement lorsqu'elle change sa forme ou se transfère d'un système à l'autre.

La nature abstraite et théorique du concept d'énergie est aussi la raison pour laquelle, historiquement, cette grandeur a pris du temps à être comprise dans son essence et dans sa portée. Par exemple, une fois compris qu'il existe une forme d'énergie liée au mouvement - l'énergie mécanique - les scientifiques ont pris un certain temps à réaliser que la chaleur est aussi une forme d'énergie, et que là où on croyait que l'énergie du mouvement disparaissait, en réalité elle changeait simplement de forme : elle se conservait. Au cours des siècle suivants, et encore aujourd'hui, l'idée que l'énergie se conserve en se transformant nous a toujours poussé à en trouver de nouvelles formes : électrique, radiation, masse, ... D'autre part, c'est bien son abstraction qui confère au concept d'énergie son caractère généralisant et transverse à toutes les branches scientifiques, permettant d'être toujours à la frontière de la connaissance. Même là où la description en termes de forces newtoniennes atteint ses limites - par exemple dans la description microscopique des atomes et de particules fondamentales ou dans la description du mouvement à de très grandes vitesses, proches de celle de la lumière - le concept d'énergie ne perd pas son sens et garde une place centrale.

Dans cette partie, nous allons introduire l'énergie mécanique, liée au mouvement, à partir des grandeurs étudiées dans les chapitres précédents : les forces et les autres grandeurs cinématiques. Nous allons ainsi définir les différentes formes que l'énergie mécanique peut assumer et comment elles peuvent se transformer les unes dans les autres. Nous verrons ensuite quelles sont les conditions pour que l'énergie mécanique soit conservée, et, lorsque ce n'est pas le cas, nous généraliserons cette idée de la conservation en découvrant de nouvelles formes d'énergie.

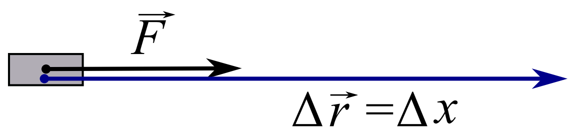
7 Travail, puissance et rendement

7.1 Travail d'une force

Dans la vie de tous les jours, nous appelons *travail* de nombreuses activités humaines ; par exemple nous dirons qu'une personne travaille si elle lit un livre ou transporte des objets. En physique ce terme a une signification beaucoup plus précise et il est toujours lié à une force. De fait, en mécanique, une condition nécessaire pour qu'une force fournisse un travail est que son point d'application subisse, dans un système de référence inertiel donné, un déplacement.

Force et déplacement parallèles

Considérons le cas simple unidimensionnel de la figure ci-dessous : une force unique constante $\vec{F}$ est appliquée à un corps qui se déplace dans la même direction ($\Delta\vec{r} \parallel \vec{F}$).



En choisissant judicieusement le référentiel, nous pouvons simplifier la notation et écrire $\Delta\vec{r} = \Delta x$ et la force F. F et Δx sont des quantités positives ou négatives selon l'orientation de l'axe choisi.

Pour une telle situation nous définissons **le <u>travail d'une force</u> sur une particule comme le produit entre la force et le déplacement.** Ce qui s'écrit :

$$W = F \cdot \Delta x.$$

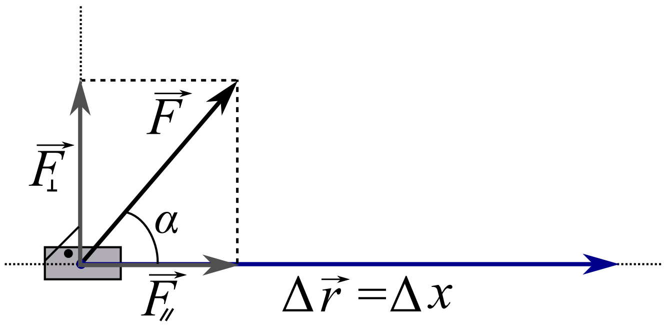
Donc le travail est :

— <u>positif</u> si F et Δx ont la même direction : $(+) \cdot (+) = (-) \cdot (-) = +$;

— <u>négatif</u> si F et Δx sont opposés : $(+) \cdot (-) = (-) \cdot (+) = -$.

Cas général

Cependant une force, même constante, ne s'applique pas toujours dans la direction du déplacement de la particule. Dans la figure suivante un cas plus générale que le précédent est montré.



Dans ce cas, on considère que seulement la composante de la force parallèle au déplacement $\vec{F}_\parallel$ travaille. Ainsi, nous généralisons notre définition du travail en "projetant" la force $\vec{F}$ le long de la direction du mouvement, de façon à nous ramener à la situation à une dimension du paragraphe précédent.

Le <u>travail d'une force</u> sur une particule est le produit de la composante de la force parallèle à la direction du déplacement $F_\parallel$ par la distance parcourue par la particule Δx :

$$\boxed{W = F_\parallel \cdot \Delta x. \qquad (48)}$$

Nous prenons le sens du déplacement comme positif de sorte que $\Delta x = ||\Delta\vec{r}|| > 0$ et appelons α l'angle que $\vec{F}$ forme avec $\Delta\vec{r}$. De telle manière $F_\parallel > 0$ (resp. ≤ 0) uniquement si $\alpha < 90°$ (resp. $\geq 90°$). En écrivant

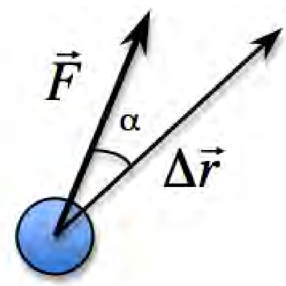
$$F_\parallel = ||\vec{F}|| \cdot \cos\alpha,$$

l'équation (48) devient :

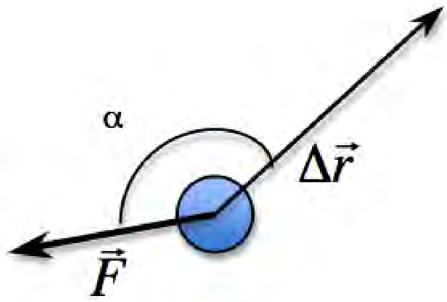
$$\boxed{W = ||\vec{F}|| \cdot ||\Delta\vec{r}|| \cdot \cos\alpha. \qquad (49)}$$

Nous avons les trois cas possibles, montrés dans les figures suivantes :

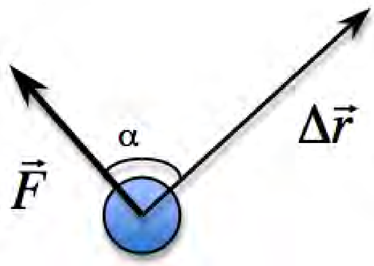
• Lorsque $0 \leq \alpha < 90°$ alors $F_{\parallel} > 0$ et $\cos\alpha > 0$: le travail est **positif** et on parle alors de travail **moteur**. Cela signifie que la force agit **favorablement** au déplacement. En particulier, lorsque $\alpha = 0$ le travail de la force est positif et maximal :
$W = ||\vec{F}|| \cdot ||\Delta\vec{r}|| = F \cdot \Delta x > 0$, ce qui correspond à la définition uni-dimensionnelle précédente.



• Lorsque $90° < \alpha \leq 180°$ alors $F_{\parallel} < 0$ et $\cos\alpha < 0$. Dans ce cas la force agit **en opposition** au déplacement et le travail est **négatif** : il s'agit de travail **résistant**. En particulier si $\alpha = 180°$, le travail est négatif et d'intensité maximale : $W = -||\vec{F}|| \cdot ||\Delta\vec{r}|| = F \cdot \Delta x < 0$, nous avons à nouveau la définition uni-dimensionnelle. C'est le cas de la force de frottement.



• Pour le cas limite $\alpha = 90°$ nous avons que $F_{\parallel} = 0$ et $\cos\alpha = 0$, donc $W = 0$. En effet, la projection de la force dans la direction du déplacement est nulle. Or, **si la force n'a pas de composante dans la direction du mouvement elle ne travaille pas, même si le corps se déplace !** Cela signifie que la force n'agit ni favorablement, ni en opposition au déplacement.



• **Exemple 33.** *Quel est le travail de la force gravitationnelle qui agit sur la lune lors de son mouvement de révolution autour de la Terre ? (Supposer une orbite circulaire.)*

Propriétés du travail d'une force

Le travail d'une force dépend linéairement du déplacement et de la force, il s'agit donc d'une grandeur additive. Par conséquent :

— Sur un déplacement $\Delta\vec{r}$ donné, le travail de la force résultante de plusieurs forces est égal à la somme des travaux de chacune de ces forces :

$$\vec{F}_{res} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 \quad \Rightarrow \quad W(\vec{F}_{res}) = W(\vec{F}_1) + W(\vec{F}_2) + W(\vec{F}_3).$$

— Le calcul du travail d'une force lors d'un mouvement *non rectiligne* se fait en sommant les travaux de la force le long d'éléments rectilignes plus petits épousant au mieux la trajectoire. En particulier, on peut partager une trajectoire non rectiligne d'un point A à un point B en un nombre n arbitrairement grand de déplacements rectilignes ultrapetits ($\Delta\vec{r}_{AB} = d\vec{r}_1 + d\vec{r}_2 + ... + d\vec{r}_n$) :

$$W_{AB}(\vec{F}) = W_{d\vec{r}_1}(\vec{F}) + W_{d\vec{r}_1}(\vec{F}) + ... + W_{d\vec{r}_n}(\vec{F})$$

— Le travail d'une force $\vec{F}$ sur un trajet non rectiligne du point A au point C en passant par le point B est égal au travail de la force de A à B plus le travail de la force de B à C :

$$W_{AC}(\vec{F}) = W_{AB}(\vec{F}) + W_{BC}(\vec{F}).$$

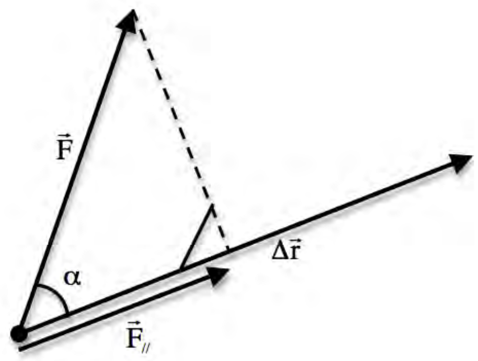
7.2 Le travail comme un produit scalaire

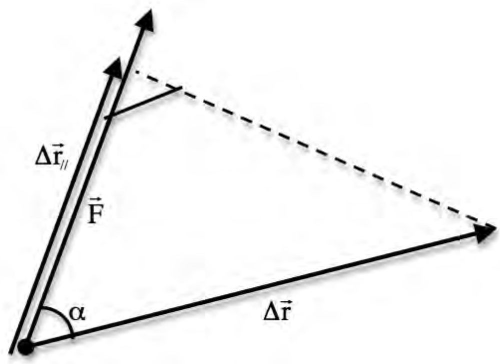
Nous pouvons écrire l'équation (49) de deux manières :
— sous la forme $W = (||\vec{F}|| \cdot \cos\alpha) \cdot ||\Delta\vec{r}||$,
— ou $W = ||\vec{F}|| \cdot (||\Delta\vec{r}|| \cos\alpha)$.

Cela suggère qu'il est possible de calculer le travail de deux différentes manières :

- en multipliant la norme du déplacement par la composante de la force qui est dans sa direction (cf. la première équation ci-dessus et le dessin à gauche de la figure suivante) ;

- ou en multipliant la norme de la force par la composante du déplacement dans la direction de la force (cf. la seconde équation ci-dessus et le dessin à droite de la figure suivante).





Nous voyons que ces deux méthodes donnent le même résultat (par les propriétés d'associativité et commutativité de la multiplication). Auparavant nous avons souligné que **le travail est une quantité scalaire bien que les grandeur utilisées dans sa définition (la force et le déplacement) soient des vecteurs**. En fait, l'opération consistant à multiplier les normes de deux vecteurs et le cosinus de l'angle qui les séparent correspond à la définition du **produit scalaire** entre ces deux vecteurs. Suivant les convention de l'algèbre vectorielle, on écrit cela

$$W = \vec{F} \bullet \Delta\vec{r} = ||\vec{F}|| \cdot ||\Delta\vec{r}|| \cdot \cos\alpha \qquad (50)$$

• **Exemple 34** (Dans le cahier d'exercices). *Si nous écrivons les vecteurs force et déplacement composante par composante :*

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} \qquad \Delta\vec{r} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix},$$

Le produit scalaire (ici le travail) peut être calculé de la manière suivante :

$$W = F_x \cdot \Delta x + F_y \cdot \Delta y.$$

Montrez que, dans tous les cas, cette définition donne le même résultat que l'équation (50). (Suggestion : dessinez le système de coordonnées et les vecteurs et écrivez chaque composante comme une fonction de la norme et de l'angle avec l'axe des x.)

7.3 Le travail comme transfert d'énergie

Notons que, contrairement à la force ou au déplacement qui sont des grandeurs vectorielles, **le travail est une grandeur scalaire**.

Son unité dans le système SI est le **Joule** noté **J**, qui correspond au Newton · mètre. En unités fondamentales, nous avons

$$1\,\mathrm{J} = 1\,\mathrm{N}\cdot\,\mathrm{m} = 1\,\mathrm{kg}\cdot\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}\cdot\,\mathrm{m} = 1\,\mathrm{kg}\cdot\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)^2.$$

Le travail d'une force sur un corps est l'une des manières possibles de transférer de l'énergie d'un système (ici celui qui produit la force) à un autre (le corps en mouvement) :

$$\Delta E = W \tag{51}$$

Le Joule est ainsi l'unité utilisée pour mesurer cette énergie transférée.

La nature du transfert d'énergie dépend de la force. De manière générale, si le **travail** de la force est **positif** on a un **gain d'énergie** du corps qui subit la force (aux dépenses de celui qui produit la force), alors que si le travail de la force est **négatif** on a une **perte d'énergie** du corps qui subit la force et un gain d'énergie pour le système qui produit la force.

• **Exemple 35.** *Enumérer et dessiner toutes les forces agissantes sur une voiture qui se déplace sur la route en MRU et, pour chacune, indiquer si le travail est positif, négatif ou nul. À quel transfert d'énergie correspond le travail de chaque force ?*

7.4 Puissance

Jusqu'à présent, nous n'avons pas considéré le temps mis pour exécuter un travail. La même quantité de travail est fournie pour soulever un corps à une hauteur donnée, que cette opération dure une seconde ou une année. La quantité de travail par unité de temps est pourtant fort différente. Nous définissons la **puissance d'un système comme son travail (ou sa variation d'énergie) pendant l'unité de temps.**

• **La puissance moyenne fournie par un système est le travail total divisé par la durée de ce travail :**

$$\boxed{P_m = \frac{W}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\Delta t}. \qquad (52)}$$

• **La puissance instantanée au temps t est donnée par la puissance moyenne calculée sur une durée assez petite pour que sa valeur ne change pas :**

$$\boxed{P_{inst} = \frac{dE}{dt}. \qquad (53)}$$

Comme le travail et le temps, la puissance est une grandeur scalaire.

Nous pouvons aussi exprimer une puissance instantanée en fonction de la force qui agit sur le corps et de sa vitesse instantanée. Partons de la définition du travail donnée par l'équation (49) pour une durée infinitésimale, que nous substituons dans l'équation (53) :

$$\begin{aligned} P_{inst} &= \frac{||\vec{F}|| \cdot ||d\vec{r}|| \cos\alpha}{dt} \\ &= ||\vec{F}|| \cdot \frac{||d\vec{r}||}{dt} \cdot \cos\alpha \\ &= ||\vec{F}|| \cdot ||\vec{v}_{inst}|| \cdot \cos\alpha. \end{aligned} \qquad (54)$$

Si $\vec{F} \parallel d\vec{r}$ cela devient simplement

$$P_{inst} = F \cdot v_{inst}. \qquad (55)$$

De plus, si la vitesse est constante, l'équation (54) peut 's'écrire simplement

$$P = F \cdot v. \tag{56}$$

Dans le SI, **l'unité de puissance est le $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}$, appelé <u>watt</u> et dont le symbole est** W. **En unités SI <u>fondamentales</u> :**

$$1\ \mathrm{W} = 1\ \mathrm{J}\,\frac{1}{\mathrm{s}} = 1\ \mathrm{kg}\,\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2} \cdot \frac{1}{\mathrm{s}} = 1\ \mathrm{kg}\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^3}.$$

7.5 Le kilowattheure comme unité d'énergie

Il est important d'observer que, grâce à la définition de puissance donnée par l'équation (52), nous pouvons également exprimer le travail d'une force à partir d'une puissance :

$$W = P \cdot \Delta t. \tag{57}$$

En d'autres mots, si l'on connait la puissance (constante) d'un dispositif et on veut connaître le travail (la quantité d'énergie transférée) dans un certain temps, il suffit de multiplier cette puissance par le temps considéré.

Pour cette raison **le <u>travail</u> (ou la <u>variation d'énergie</u>) est souvent exprimé avec une unité de puissance multipliée par celle d'une durée : le <u>kilowattheure</u> ou <u>kWh</u>**. Un kilowattheure correspond au travail effectué par un système qui fournit une puissance de mille watt pendant une heure :

$$1\mathrm{kWh} = 10^3\ \mathrm{W} \cdot 1\mathrm{h} = 10^3\ \mathrm{W} \cdot 3600\mathrm{s} = 3,6 \cdot 10^6\ \mathrm{W} \cdot \mathrm{s} = 3,6 \cdot 10^6\ \mathrm{J}$$

En effet, le joule étant relativement petit, le kilowattheure est une unité largement utilisée pour les applications quotidiennes.

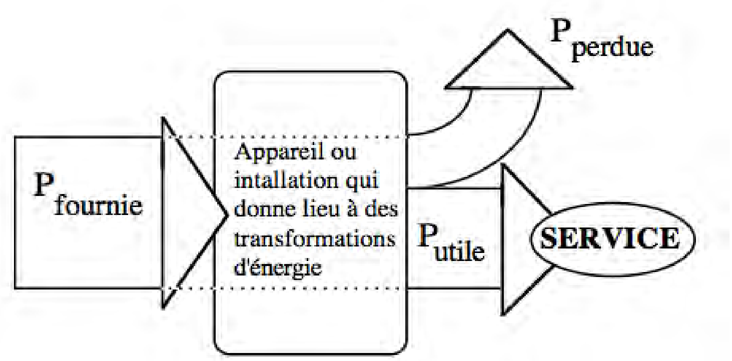
• **Exemple 36.** *Quel travail effectue un aspirateur de* 2000W *qui reste allumé pendant 60 minutes ? Donner la réponse en* J *et en* kWh.

• **Exemple 37** (Sur le cahier d'exercices)**.** *Une grue soulève une charge de* 2t *sur* 10 m *en* 20 s *avec une vitesse constante. En négligeant le frottement, quelle est la puissance développée par le moteur de la grue ?*

7.6 Rendement

Tout appareil ou installation permet d'utiliser une partie de l'énergie (qu'elle soit mécanique ou d'autre type, comme nous verrons par la suite) pour le service souhaité alors qu'une partie de l'énergie est "perdue" ou inutile. Il est donc utile de quantifier cette "perte", en définissant le **rendement d'un dispositif, comme le rapport entre la puissance utilisable sur le total de la puissance fournie à partir d'une source d'énergie. Le rendement est une grandeur sans dimensions, notée η.**

$$\boxed{\eta = \frac{P_{utile}}{P_{fournie}}. \qquad (58)}$$



Pour une durée de temps donnée, en simplifiant par Δt, le rendement peut aussi être calculé à partir de la variation des énergies (ou le travail) pendant cette durée :

$$\eta = \frac{\Delta E_{utile}/\Delta t}{\Delta E_{fournie}/\Delta t} = \frac{\Delta E_{utile}}{\Delta E_{fournie}} = \frac{W_{utile}}{W_{fourni}}. \qquad (59)$$

Nous soulignons que le rendement est une quantité toujours positive et, comme l'énergie utile est toujours plus petite que celle fournie, le rendement est toujours strictement plus petit que 1 (ou 100%). Plus η se rapproche de l'unité, plus le dispositif est efficace et la quantité d'énergie perdue est petite. Dans la réalité toutefois, bien que l'efficacité puisse se rapprocher de l'unité, elle ne peut jamais être égale à un car les frottements, même réduits au minimum, sont toujours présents et entraînent une déperdition d'énergie.

Nous remarquons que dans le cas d'une chaîne de n dispositif, chacun avec sa perte d'énergie et donc son rendement : $\eta_1,\ \eta_2,\ ...\ \eta_n$, le rendement total de l'entrée dans le premier dispositif jusqu'à la sortie du $n$ème dispositif est le produit des rendements :

$$\eta_{tot} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot ... \cdot \eta_n.$$

En effet $P_{utile\ globale} = P_{utile\ n}$ à la sortie du $n$ème système, et $P_{fournie\ globale} = P_{fournie\ 1}$ au début de la chaîne. De plus pour chaque système la puissance fournie correspond à la puissance utile du système précédent : $P_{fournie\ n} = P_{utile\ n-1}$. Par exemple pour trois dispositifs

$$\begin{aligned} \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 &= \frac{P_{utile\ 1}}{P_{fournie\ 1}} \cdot \frac{P_{utile\ 2}}{P_{fournie\ 2}} \cdot \frac{P_{utile\ 3}}{P_{fournie\ 3}} \\ &= \frac{P_{utile\ 1}}{P_{fournie\ 1}} \cdot \frac{P_{utile\ 2}}{P_{utile\ 1}} \cdot \frac{P_{utile\ 3}}{P_{utile\ 2}} \\ &= \frac{P_{utile\ 3}}{P_{fournie\ 1}} = \eta_{tot} \end{aligned} \tag{60}$$

• **Exemple 38** (Dans le cahier d'exercices)**.** *Les chutes du Rhin font* $21\,\mathrm{m}$ *de haut. Le débit du Rhin au niveau des chutes est de* $700\,\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}$*. Quelle est la puissance moyenne de ces chutes ? Quelle est la puissance moyenne de la centrale hydroélectrique du Rhin si son rendement est de 80% ?*

• **Exemple 39** (Dans le cahier d'exercices)**.** *Pour chauffer de l'eau, une bouilloire est enclenché pendant une minute avec une puissance de* $2,0\mathrm{kW}$*. Calculer l'énergie consommée par la bouilloire et celle utilisée pour chauffer l'eau si le rendement de la bouilloire est* $\eta = 70\%$.

• **Exemple 40** (Sur le cahier d'exercices)**.**

a) Sur une ampoule électrique ordinaire, la puissance électrique indiquée est de $60\,\mathrm{W}$ *et son rendement est* $\eta_{ord} = 5,0\%$*. Pour une durée de fonctionnement de* $3,0$ *heures :*

- *calculer l'énergie électrique consommée ;*
- *calculer l'énergie transformée en lumière (énergie utile) et l'énergie transformée en chaleur (énergie perdue) ;*

b) Si l'ampoule ordinaire est remplacée par une ampoule économique dont le rendement est 5 fois supérieur, soit $\eta_{eco} = 25\%$*,*

- *calculer la puissance électrique de l'ampoule économique si sa puissance lumineuse est identique à l'ampoule ordinaire.*

8 Energie mécanique

Un corps possède de l'énergie quand il a la capacité d'accomplir un travail. En effet l'énergie d'un corps (qu'il s'agisse d'une particule ou d'un corps macroscopique) est toujours une quantité positive, et sa mesure est donnée par la quantité de travail qu'elle peut fournir.

Nous verrons qu'il peut y avoir de multiples formes d'énergie, qui peuvent être associés à différents types de force. Dans cette partie nous allons étudier l'énergie qui peut être possédée par un corps ponctuel dans son mouvement grâce à sa position et/ou sa vitesse.

L'énergie mécanique d'un corps ponctuel est donnée par la somme de :
- l'énergie liée à sa vitesse, appelée énergie cinétique,
- l'énergie liée à sa position, appelée énergie potentielle.

8.1 L'énergie cinétique

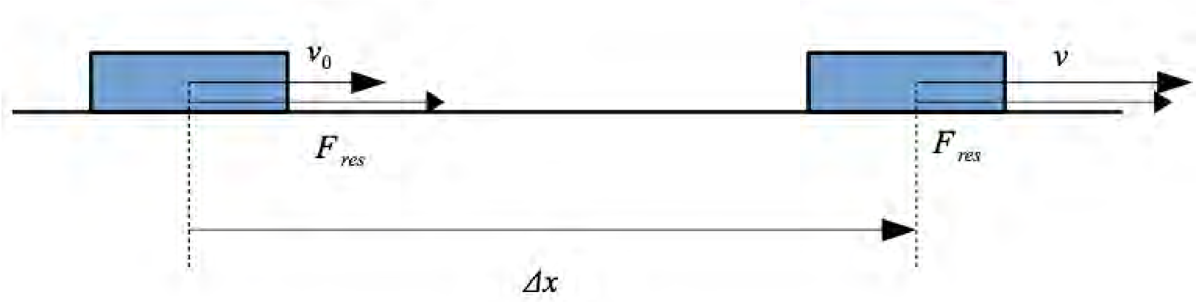
La mesure de l'énergie cinétique d'une particule avec vitesse $\vec{v}$ est donnée par le travail nécessaire pour accélérer la particule depuis un état de repos jusqu'à une vitesse $\vec{v}$. De manière équivalente, la mesure de cette énergie cinétique est aussi le travail mécanique fourni par la particule lorsque celle-ci passe de la vitesse $\vec{v}$ à un état de repos.

Par exemple, pour planter un clou, votre bras donne une certaine vitesse $\vec{v}$ à la tête du marteau. Au moment où le marteau frappe le clou, il exerce une certaine force sur celui-ci. La force agissant sur le clou fournit un travail positif (celui-ci se déplace dans la direction de la force). En utilisant la troisième lois de Newton, le clou en retour exerce une force de réaction sur le marteau, qui est de direction opposée au mouvement du marteau. Le travail de la force agissant sur le marteau est négatif, ce qui correspond à la décélération du marteau.

Nous allons maintenant dériver la formule de l'énergie cinétique d'un corps se déplaçant à une vitesse $\vec{v}$.

Pour cela, nous commençons en calculant le travail nécessaire pour accélérer un corps d'une vitesse initiale $\vec{v}_0$ à l'instant t_0 à une vitesse finale $\vec{v} > \vec{v}_0$ à l'instant t.

Considérons le cas simple, à une dimension, où une force résultante constante F_{res} agit sur un cops de masse m, dans la même direction que les vitesses initiale et finale. Nous pouvons ainsi délaisser les flèches de vecteurs et écrire ces quantités vectorielles F_{res}, v_0 et v, positives ou négatives selon le sens par rapport à l'axe x.



Une telle force donne lieu à un MRUA, avec une accélération a constante, qui est liée à la variation de vitesse sur l'intervalle de temps $\Delta t = t - t_0$ par

$$a \cdot \Delta t = v - v_0 \qquad \Rightarrow \qquad \Delta t = \frac{v - v_0}{a}. \tag{61}$$

D'autre part, en utilisant l'équation (24) du paragraphe 3.3, le déplacement d'une particule en MRUA est donné par

$$\Delta x = v_0 \, \Delta t + \frac{1}{2} \, a \, \Delta t^2. \tag{62}$$

Si nous remplaçons dans cette équation (62) l'expression de Δt obtenue dans l'équation (61), nous avons

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{v_0 \, (v - v_0)}{a} + \frac{1}{2} \, a \cdot \left(\frac{v - v_0}{a} \right)^2 \\ &= \frac{1}{a} \left(v_0 \, v - v_0^2 + \frac{1}{2} \, (v^2 + v_0^2 - 2 \, v_0 \, v) \right) \\ &= \frac{1}{2 \, a} \left(v^2 - v_0^2 \right). \end{aligned} \tag{63}$$

Donc, le travail effectué par la force est

$$\begin{aligned} W_{res} &= F_{res} \cdot \Delta x = m\,a \cdot \Delta x \\ &= m\,a \cdot \frac{1}{2\,a}\left(v^2 - v_0^2\right) \\ &= \frac{1}{2}\,m\,v^2 - \frac{1}{2}\,m\,v_0^2. \end{aligned} \tag{64}$$

Nous avons trouvé l'équation (64) en supposant une force résultante constante et un MRUA. Cependant, on peut montrer qu'elle se généralise pour tout mouvement.

Pour une vitesse initiale nulle, le travail pour accélérer un corps jusqu'à une vitesse $\vec{v}$ quelconque est $\frac{1}{2}\,m\,v^2$. De la même manière, le travail nécessaire pour arrêter un corps se déplaçant à une vitesse $\vec{v}_0$ est $-\frac{1}{2}\,m\,v_0^2$. Comme nous pouvions nous y attendre nous trouvons qu'**un travail positif produit une accélération alors qu'un travail négatif correspond à une décélération de la particule.**

La quantité $E_k(v) = \frac{1}{2}\,m\,v^2$ est définie comme l'énergie cinétique d'une particule qui se déplace avec une vitesse $\vec{v}$.

Avec cette définition pour l'énergie cinétique, nous pouvons écrire l'équation (64) comme

$$E_k - E_{k0} = W_{res}, \tag{65}$$

avec $E_{k0}(v) = \frac{1}{2}\,m\,v_0^2$ l'énergie cinétique initiale. L'équation (65) est aussi connue comme **le théorème de l'énergie cinétique** :

la variation d'énergie cinétique d'une particule est égale au travail accompli par la force résultante qui agit sur elle.

Le théorème de l'énergie cinétique n'est pas une loi nouvelle et indépendante de la mécanique classique. Pour trouver cette équation, nous avons simplement défini le travail et l'énergie cinétique, puis nous avons déduit la relation entre ces deux grandeurs en utilisant la deuxième loi de Newton. Néanmoins, **le théorème de l'énergie cinétique est utile lorsque nous voulons trouver la vitesse à un instant et/ou une position donnés, dans les situations pour lesquelles le travail fait par la force résultante se calcule facilement**.

De plus le théorème de l'énergie cinétique est le point de départ pour une généralisation de grande envergure en physique. En effet, même si la variation de l'énergie cinétique fait intervenir le travail de la force *résultante*, nous pouvons calculer séparément le travail fait par chaque force agissant sur la particule. Chacune donne une contribution à la variation de l'énergie cinétique (positive, négative ou nulle, selon la direction de la force) et **le travail de la force résultante correspond à la somme des travaux de chaque force**. Ainsi l'équation (65) peut être aussi écrite

$$\boxed{E_k - E_{k0} = \text{somme de tous les travaux des forces agissantes sur la particule.}} \tag{66}$$

ou

$$\boxed{E_k - E_{k0} = W_1 + W_2 + ... + W_n \qquad \text{avec } n \in \mathbb{N}.} \tag{67}$$

Cela suggère l'idée de l'existence de différents types d'énergie, une pour le travail de chaque force.

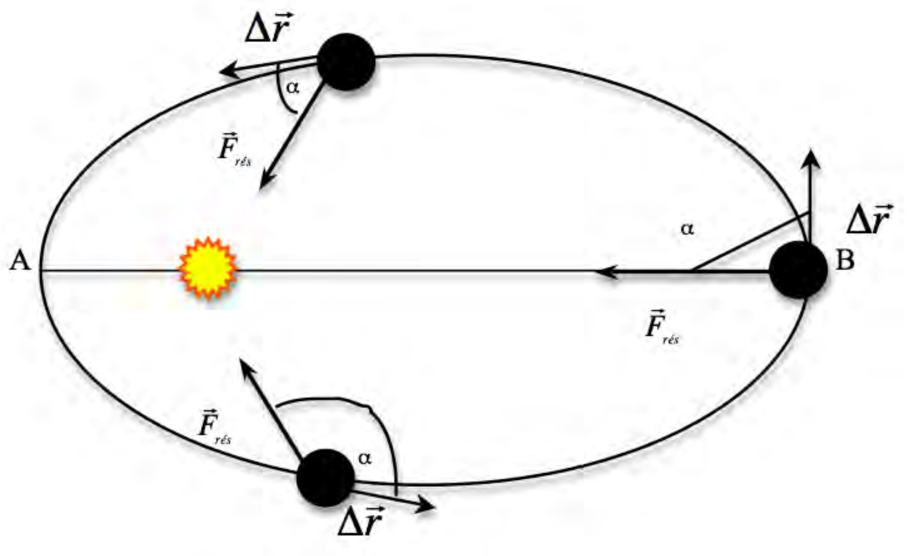
• **Exemple 41** (Dans le cahier d'exercices)**.** *Considérons une voiture qui se déplace avec un MRU.*

1. *Enumérer et dessiner toutes les forces agissantes sur la voiture ainsi que la force résultante.*
2. *Quelle est la variation de l'énergie cinétique de la voiture ?*
3. *Pour chaque force dessinée ainsi que pour la résultante, indiquer le signe du travail effectué (positif, négatif ou nul).*
4. *Que dire de l'énergie cinétique de la même voiture si l'on éteint le moteur ?*

• **Exemple 42.** *Vérifier que l'unité SI de l'énergie cinétique est bien le Joule.*

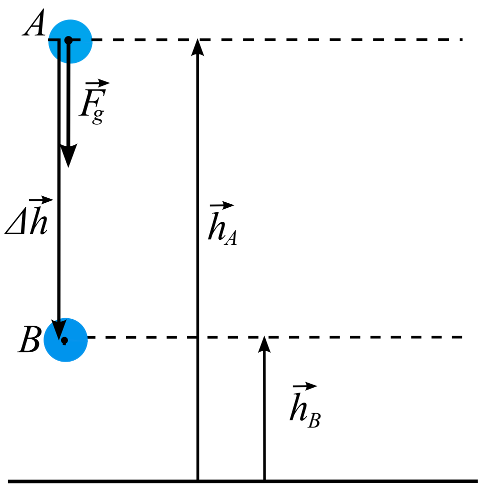
• **Exemple 43** (Dans le cahier d'exercices)**.** *La Terre tourne autour du Soleil avec une orbite elliptique dont le Soleil occupe un des foyers, comme montré dans la figure ci-dessous. Comment change l'intensité de la vitesse instantanée de la Terre*

1. *lorsqu'elle se déplace du périhélie (point A) à l'aphélie (point B) ?*
2. *Lorsqu'elle se déplace de l'aphélie (point B) au périhélie (point A) ?*



8.2 La force de pesanteur : un exemple de force conservative

Nous calculons **le travail fait uniquement par la force gravitationnelle** lorsqu'un corps de masse m s'approche de la surface terrestre. Pour cela, nous appelons h la hauteur par rapport à un point de référence (le sol, par exemple) et supposons que la distance de la surface terrestre est petite par rapport au rayon de la Terre, de telle manière nous pouvons considérer l'accélération de la gravité constante en intensité ($g = 9,8\,\mathrm{m/s^2}$), direction et sens.

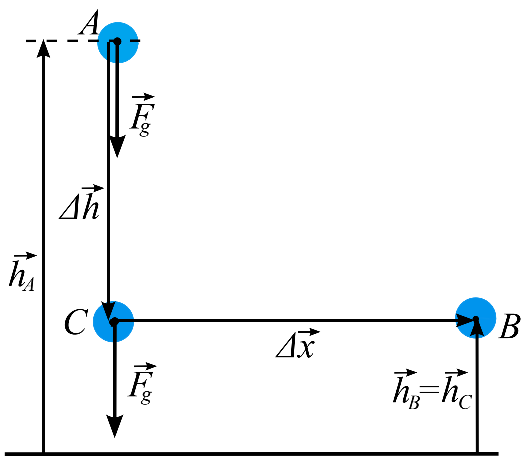


Analysons d'abord le cas simple où **le corps se déplace verticalement vers le bas** d'un point A à un point final B, comme montré dans la figure ci-contre (par exemple une chute libre). Dans ce cas, **la force de la pesanteur $\vec{F}_g$ est parallèle au déplacement et a le même sens, donc elle accomplit un travail positif** sur le corps :

$$\begin{aligned} W_{g\ A\to B} &= |F_g| \cdot |\Delta h| \cdot \cos(0°) \\ &= m\,g\,(h_A - h_B). \end{aligned} \tag{68}$$

Si le déplacement est vers le haut, du point B au point A de la figure ci-dessus (par exemple lorsqu'on lance un caillou en l'air) **le travail de la force de gravité est négatif, car $\vec{F}_g$ est opposé au déplacement :**

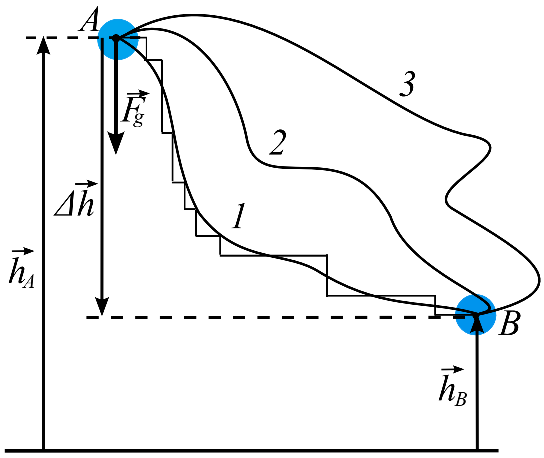
$$W_{g\ B\to A} = |F_g| \cdot |\Delta h| \cdot \cos(180°) = -m\,g\,(h_A - h_B) = -W_{g\ A\to B}. \tag{69}$$



D'autre part, si le point B est plus bas que A, mais il n'est pas dans la verticale passant par A, et **le corps se déplace d'abord verticalement** (trait AC dans le dessin ci-contre), **puis horizontalement** (trait CB dans le même dessin), la seule contribution non nulle au travail de A a B vient du déplacement vertical :

$$\begin{aligned} W_{g\ A\to B} &= |F_g| \cdot |\Delta h| \cdot \cos(0°) \\ &\quad + |F_g| \cdot |\Delta x| \cdot \cos(90°) \\ &= m\,g\,(h_A - h_B) + 0 \\ &= m\,g\,(h_A - h_B). \end{aligned}$$

En effet, **pour tout déplacement horizontal, le travail fait par la force de la pesanteur est nul car $\vec{F}_g$ est perpendiculaire à Δx**, et le produit scalaire que nous avons défini dans l'équation (49) vaut zéro. Par conséquent, le travail accompli par la force de pesanteur sur le corps reste le même que dans la situation où le déplacement est vertical. En fait, pour toute trajectoire "en escalier" de A à B, par exemple celle superposée à la trajectoire 1 dans la figure ci-dessous : chaque contribution au travail de la force de la pesanteur provenant des trajets horizontaux est nulle, alors que les contributions provenantes des trajets verticaux s'additionnent et donnent le même résultat que l'équation (68).



Plus encore, en imaginant des trajets en escaliers avec des marches ultrapetites se superposant à une trajectoire donnée, on peut montrer que ce résultat se généralise pour tout chemin de A à B : le travail fait par la force de pesanteur est toujours donné par la formule (68),

$$W_{g\ A\to B} = m\,g\,(h_A - h_B) = -m\,g\,(h_B - h_A).$$

Cela est aussi le cas, par exemple, pour les trajectoires 1, 2 et 3 dessinées dans la figure ci-contre. De la même manière, le travail de la force de la pesanteur pour tout chemin inverse, de B à A, donne le même résultat que l'équation (69), négatif :

$$W_{g\ B\to A} = -m\,g\,(h_A - h_B).$$

En conclusion, nous pouvons affirmer que **pour toute trajectoire à partir d'un point à la hauteur $h_{initiale}$ jusqu'à un point à la hauteur h_{finale}, le travail fait par la force de la pesanteur est indépendant du chemin parcouru, et vaut**

$$W_g = -m\,g\,(h_{finale} - h_{initiale}). \tag{70}$$

En d'autres mots $\vec{F}_g$ est une force conservative, selon la définition suivante.

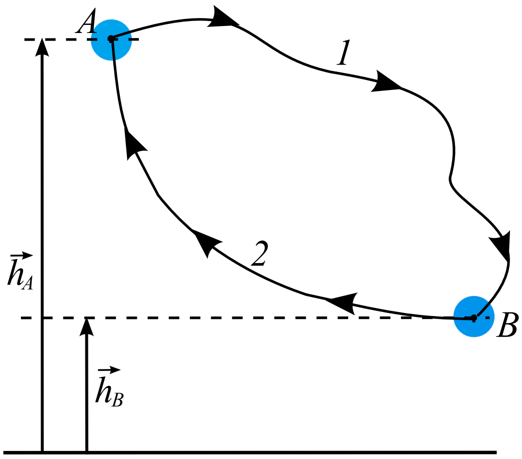
Une force est <u>conservative</u> quand son travail sur un corps est indépendant de son chemin, mais dépend seulement des positions initiale et finale.

En particulier, si les positions initiale et finale coïncident et la trajectoire est une boucle fermée, l'équation (68) donne

$$W_{g\ A\to A} = m\,g\,(h_A - h_A) = 0.$$

Nous pouvons aussi voir un chemin de ce type comme formé de deux chemins, de A à B (chemin 1 de la figure ci-contre) puis de B à A (chemin 2 de la même figure) :

$$\begin{aligned} W_{g\ A\to A} &= W_{g\ A\to B} + W_{g\ B\to A} \\ &= W_{g\ A\to B} - W_{g\ A\to B} = 0. \end{aligned}$$



Ce résultat peut être considéré comme une autre propriété caractérisant les forces conservatives et être utilisé comme définition équivalente à la précédente.

Une force est <u>conservative</u> si son travail sur toute boucle fermée est nul.

8.3 Energie potentielle gravitationnelle

La propriété de la force de gravité d'être une force conservative (son travail sur un trajet entre deux points ne dépend que de ces deux points) nous suggère que W_g doit correspondre à la variation d'une quantité dépendant uniquement de ces deux points : cette grandeur est l'énergie potentielle gravitationnelle.

L'énergie potentielle gravitationnelle d'un corps à une hauteur h par rapport à un point de référence choisi arbitrairement est le travail fait par la force de la pesanteur lorsque le corps se déplace jusqu'à ce point, où $h = 0$:

$$E_g(h) = m\,g\,h. \tag{71}$$

Avec cette définition, nous pouvons écrire l'équation (70) comme

$$\boxed{W_g = E_{g\;initiale} - E_{g\;finale} = -\Delta E_g \quad (72)}$$

pour n'importe quelle trajectoire d'un point initial générique à un point final générique de l'espace [§§].

En particulier, **si la gravité est la seule force agissant sur la particule** ($\vec{F}_{res} = \vec{F}_g$) :

- lorsque $h_{initial} > h_{final}$ (chute libre dans le vide) le travail de la force de la pesanteur est positif, l'énergie potentielle de la particule diminue ($\Delta E_g < 0$) et son énergie cinétique augmente ($\Delta E_k > 0$) ;

- lorsque $h_{initial} < h_{final}$ (la particule s'éloigne du sol, comme par exemple dans le cas d'une pièce lancée en l'air) le travail de la force de la pesanteur est ...., l'énergie potentielle .... (ΔE_g ..... 0), et son énergie cinétique .... (ΔE_k ..... 0).

§§. Le signe moins vient du fait que la variation Δ d'une quantité est la différence entre cette quantité à la fin et la même quantité au début : $\Delta E_g = E_{g\;finale} - E_{g\;initiale}$.

9 Conservation de l'énergie

9.1 Conservation de l'énergie mécanique

Dans les chapitres précédents, nous avons vu que

- **le travail d'une force sur un objet est toujours équivalent à un transfert d'énergie** de ou vers l'objet, selon le signe ;
- **la somme de l'énergie cinétique et l'énergie potentielle (dans notre cas gravitationnelle) d'une particule s'appelle énergie mécanique :** $E_{mec} = E_k + E_g$ **;**
- si une particule se déplace avec une certaine vitesse, elle possède de **l'énergie cinétique, dont la variation est égale au travail de la force résultante des forces qui agit sur elle** (équation (67)) :
$$\Delta E_k = W_{res}\,; \tag{73}$$
- si une particule subit une force conservative (la force de la pesanteur), alors elle possède une **énergie potentielle, dont la variation est donnée par le travail effectué par cette force, mais avec le signe opposé**. Pour la force de la gravité (équation (72))
$$W_g = -\Delta E_g\,. \tag{74}$$

Considérons le cas d'un corps qui se déplace d'un point initial A à un point final B tel que **la seule force qui travaille sur lui est le poids**, alors

$$W_{res} = W_g \tag{75}$$

On remarque que cette condition **exclut toute force qui ne soit pas perpendiculaire au déplacement, comme le frottement ou une force motrice** (ces deux dernières sont parallèles au déplacement). Toutefois une force perpendiculaire au déplacement, comme le soutien, peut être présente, car de toute façon son travail est nul et ne rajoute aucun terme à l'équation (75). Dans ces conditions nous pouvons égaliser les équations (73) et (74) et réécrire l'équation (75) comme

$$\Delta E_k = -\Delta E_g$$

$$\Rightarrow E_{kB} - E_{kA} = E_{gA} - E_{gB}$$

$$\Rightarrow E_{gB} + E_{kB} - E_{gA} - E_{kA} = 0$$

$$\Rightarrow E_{mec\,B} - E_{mec\,A} = 0. \tag{76}$$

Ce qu'on peut aussi écrire

$$\Delta E_{mec} = 0 \qquad \text{ou} \qquad E_{mec\,B} = E_{mec\,A}. \tag{77}$$

Comme A et B sont arbitraires, cette égalité est valable pour toute paire de points dans la trajectoire du corps. De plus, ce résultat reste vrai pour tout type d'énergie potentielle (pas seulement celle gravitationnelle[¶¶]) issue d'une force conservative[***], et il est connu sous le nom de **principe de conservation de l'énergie mécanique**.

Si les seules forces agissant sur une particule sont conservatives, alors son énergie mécanique est conservée :

$$E_{mec} = \text{constant} \qquad \text{ou} \qquad \Delta E_{mec} = 0. \tag{78}$$

Dans le cas où la seule force qui agit sur la particule est le poids, l'énergie potentielle est donnée par l'équation (71) et l'équation (78) s'écrit

$$\boxed{\frac{1}{2}mv^2 + mgh = \text{constant}. \qquad (79)}$$

• **Exemple 44.** *Quelle est la vitesse finale d'un corps en chute libre d'une hauteur h, quand il arrive au sol (en négligeant le frottement de l'air) si la vitesse initiale est*

1. *nulle ?*
2. *d'intensité v_0 verticale vers le haut ?*
3. *d'intensité v_0 verticale vers le bas ?*

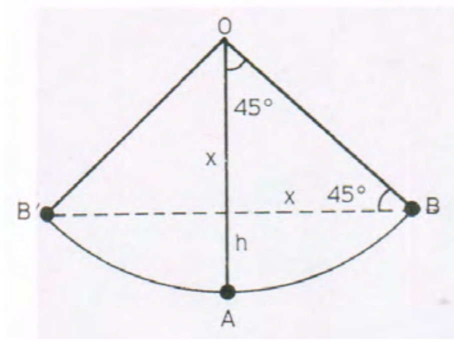
Donner le résultat sous forme d'une expression littérale $v = ...$

¶¶. Il existe d'autres forces conservatives comme celle élastique ou celle électrique, donc les énergies potentielles correspondantes aussi.
***. En particulier en l'absence de frottement et/ou forces motrices qui ne sont pas conservatives.

• **Exemple 45.** *Phiz lance une pièce verticalement vers le haut avec une vitesse initiale de norme* $v_0 = 8,0\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

En négligeant la résistance de l'air écrire la formule donnant la hauteur maximale h_{max} *atteinte par la pièce en fonction de* v_0. *Puis trouver le résultat numérique et le comparer avec celui trouvé dans l'exercice 29 du paragraphe 5.2.*

• **Exemple 46** (Dans le cahier d'exercices)**.** *La corde du pendule simple dans la figure mesure* $l = 1,00\,\mathrm{m}$. *La bille est lâchée avec vitesse nulle de la position B, où la corde forme un angle de* $45°$ *avec la verticale. Trouver sa vitesse au point A.*



9.2 Le principe de conservation de l'énergie

Dans le chapitre précédent nous avons uniquement considéré l'action d'une force conservative sur une particule (la force de pesanteur). Cela nous a permis de définir son énergie potentielle, dont la variation est égale au travail sur la particule, mais avec le signe opposé. En utilisant le théorème de l'énergie cinétique nous sommes arrivés à la conclusion que l'énergie mécanique de la particule est conservée (équation (78)) :

$$\Delta E_{mec} = 0.$$

Cependant, nous savons que l'énergie mécanique d'un corps en mouvement n'est pas conservée dans la réalité. Pensons par exemple aux forces de frottement et de trainée, présentes sur Terre : un pendule simple ne continuera pas à osciller pour toujours. **La force de frottement est non conservative car elle est toujours opposée au mouvement et donc elle effectue toujours un travail négatif, même dans une trajectoire fermée. La force motrice est aussi un exemple de force non conservative, car de façon analogue elle produit un travail positif**.

Imaginons que, par rapport au cas du paragraphe précédent, en plus de la force de la pesanteur (ou une autre force conservative), d'autres forces non conservatives, comme le frottement ou la force motrice agissent sur la particule. Le travail total effectué sur elle est donc la somme du travail fait par la force poids (qui est égal à l'opposé de la variation d'énergie potentielle) plus celui fait par le les forces non conservatives, W_{fr}, W_{mo}, W_{autre}. Ainsi, nous pouvons écrire le théorème de l'énergie cinétique (73) comme

$$\Delta E_k = W_{res} = W_g + W_{fr} + W_{mo} + W_{autre} \tag{80}$$

ou

$$\Delta E_k = -\Delta E_g + W_{fr} + W_{mo} + W_{autre} \tag{81}$$

$$\Rightarrow \Delta E_k + \Delta E_g = W_{fr} + W_{mo} + W_{autre}$$

$$\Rightarrow \Delta E_{mec} = W_{fr} + W_{mo} + W_{autre} \tag{82}$$

Nous obtenons ainsi que

la variation de l'énergie mécanique est donnée par la somme des travaux effectués par les forces non conservatives

$$\Delta E_{mec} = W_{fr} + W_{mo} + W_{autre}. \tag{83}$$

Frottement

Si toutes les forces non conservatives sont nulles sauf le frottement, l'équation (83) devient

$$\Delta E_{mec} = W_{fr} < 0 \tag{84}$$

ce qui signifie que la variation de l'énergie mécanique est négative et donc que l'énergie mécanique finale de la particule est toujours plus petite que celle du départ. En effet, puisque $\vec{F}_{fr}$ est toujours parallèle et opposée au déplacement, lorsque son intensité est constante sur une trajectoire entre un point initial A et un point final B, nous pouvons écrire

$$W_{fr} = -||\vec{F}_{fr}|| \cdot \Delta d,$$

où Δd est la distance parcourue entre A et B. L'équation (83) devient alors

$$E_{mec\,B} = E_{mec\,A} - ||\vec{F}_{fr}|| \cdot \Delta d, \tag{85}$$

ou, en explicitant les expressions $E_{mec\,B}$ et $E_{mec\,A}$,

$$\frac{1}{2}mv_B^2 + mgh_B = \frac{1}{2}mv_A^2 + mgh_A - ||\vec{F}_{fr}||\,\Delta d. \tag{86}$$

Que devient l'énergie mécanique "perdue" dans ce cas ? Considérons un corps étendu, par exemple une brique lancée sur une surface rugueuse qui finit par s'arrêter à cause du frottement. **L'énergie cinétique directionnelle de son mouvement du départ a été transformée en énergie cinétique désordonnée du mouvement microscopique et aléatoire des molécules qui constituent la brique et la surface sur laquelle elle s'arrête**. Comme nous le verrons dans la prochaine partie, ce type d'énergie s'appelle **énergie thermique,** E_{th}, et se manifeste par une petite augmentation de la température du système "brique + surface + air".

De la même manière que l'opposé du travail fait par une force conservative sur une particule correspond à la variation de l'énergie potentielle de cette particule, l'opposé du travail fait par une force de frottement sur un système correspond à la variation de l'énergie thermique du système environnement.

Donc, si nous remplaçons

$$W_{fr} = -\Delta E_{th}$$

dans l'équation (83), nous obtenons

$$\Delta E_{mec} = -\Delta E_{th} \tag{87}$$

$$\Rightarrow \Delta E_{mec} + \Delta E_{th} = 0. \tag{88}$$

Ce qui veut dire que la somme de l'énergie mécanique plus thermique du système reste constante si seule une force conservative et le frottement agissent sur lui. En particulier, l'équation (87) nous dit que **la perte d'énergie mécanique est égale au gain en énergie thermique**, et donc que, bien que l'énergie mécanique ne soit pas conservée, l'énergie totale du système + l'environnement reste conservée.

Un exemple de conservation de l'énergie en présence de la force de frottement est celui du grimpeur : en montant une paroi (figure de gauche) il augmente son énergie potentielle gravitationnelle aux dépens de sa propre réserve d'énergie interne biochimique.

Lorsqu'il descend en rappel à une vitesse à peu près constante (figure de droite), en faisant glisser une corde dans une pièce en métal (le descendeur), il perd son énergie potentielle, qui est convertie en énergie thermique de la corde, et de la pièce métallique. Le système corde-descendeur est utilisé pour éviter que l'énergie potentielle gravitationnelle soit entièrement transformée en énergie cinétique du grimpeur !

Force motrice

Considérons le cas où, en plus du poids et de la force de frottement, nous avons aussi une force motrice $\vec{F}_{mo}$, non-conservative car elle agit toujours dans le même sens que le déplacement $d\vec{r}$ du corps. L'équation (83) devient alors

$$\Delta E_{mec} = W_{fr} + W_{mo}. \tag{89}$$

Dans ce cas la variation de l'énergie mécanique peut être positive, négative ou nulle, selon le bilan de l'énergie dissipée par le travail du frottement, donnant une contribution négative, et celle gagnée par le travail de la force motrice, positive. Dans le cas où $\vec{F}_{fr}$ et $\vec{F}_{mo}$ sont constantes et toujours parallèles au déplacement (le frottement opposé, la force motrice dans le même sens), nous avons que $W_{fr} = -||\vec{F}_{fr}|| \cdot \Delta d < 0$ et $W_{mo} = ||\vec{F}_{mo}|| \cdot \Delta d > 0$. Donc l'équation (89) peut aussi s'écrire (pour un point initial A et un point final B)

$$E_{mec\,B} = E_{mec\,A} - ||\vec{F}_{fr}|| \cdot \Delta d + ||\vec{F}_{mo}|| \cdot \Delta d, \tag{90}$$

ou

$$\frac{1}{2}mv_B^2 + mgh_B = \frac{1}{2}mv_A^2 + mgh_A + \Big(||\vec{F}_{mo}|| - ||\vec{F}_{fr}||\Big) \cdot \Delta d. \tag{91}$$

L'énergie mécanique finale sera plus grande ou plus petite que celle initiale, selon l'importance des valeurs absolus $||\vec{F}_{fr}||$ et $||\vec{F}_{mo}||$.

Nous avons vu que nous pouvons écrire $W_g = -\Delta E_g$ et $W_{fr} = -\Delta E_{th}$. De la même manière, le travail positif W_{mo} correspond à un transfert d'énergie vers le corps qui entraine un gain (variation positive) de l'énergie du corps, mais il correspond également à une variation négative d'une autre forme d'énergie du système agissant sur le corps ; par exemple l'énergie chimique du muscle qui “tire” le corps :

$$W_{mo} = -\Delta E_{ch}.$$

En remplaçant cette contribution dans l'équation (83) on obtient

$$\Delta E_{mec} = -\Delta E_{th} - \Delta E_{ch} \tag{92}$$

$$\Rightarrow \Delta E_{mec} + \Delta E_{th} + \Delta E_{ch} = 0. \tag{93}$$

Donc la somme de l'énergie mécanique plus thermique + chimique du système “particule + environment ” reste constante.

Cas général

En généralisant, il s'avère qu'il est possible de trouver des variations des formes d'énergie pour le travail de chaque type de force : $W_{autre} = -\Delta E_{autre}$ et nous pouvons ainsi représenter W_{autre} de l'équation (83) par un terme de variation d'énergie correspondant. Le résultat reste une équation du type

$$\Delta E_{mec} + \Delta E_{th} + \Delta E_{ch} + \Delta E_{autre} = 0 \tag{94}$$

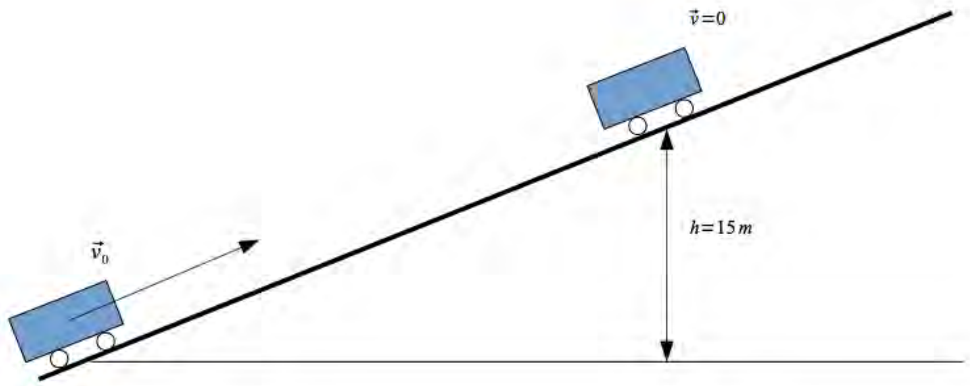
L'énergie totale (cinétique + potentielle + thermique + toute autre forme) d'un système fermé est conservée. Elle peut être transformée d'un type à l'autre, mais ne peut pas être crée ou détruite.

Cette affirmation est une généralisation faite à partir de l'expérience, connue comme **le principe de conservation de l'énergie**.

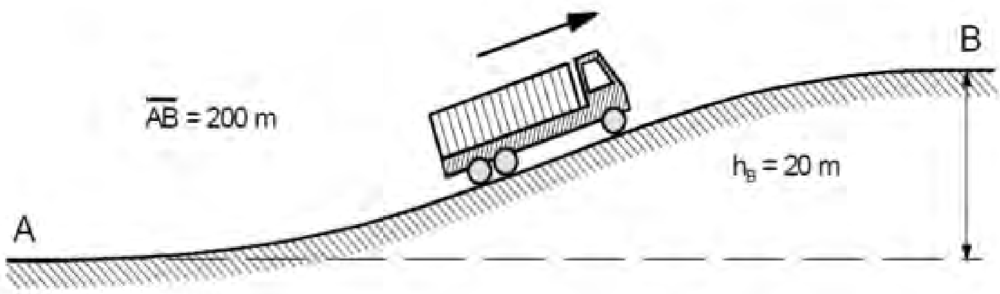
Dans l'histoire de la physique ce principe a été souvent remis en question. Pourtant son apparente violation a été le point de départ pour des nouvelles pistes de recherche : historiquement, les expérimentateurs ont été poussés à rechercher des phénomènes physiques qui allaient au delà du mouvement causé par des forces qui agissent entre corps directement observables en découvrant des nouvelles formes d'énergie : par le travail fait par le frottement (et la non conservation de l'énergie si on se limite à celle mécanique), on produit de l'énergie thermique ; par le travail fait par d'autres types d'interactions (et la non conservation de l'énergie si on se limite à certains types), on produit de l'énergie sous la forme de son, lumière, électricité etc.. A chaque fois le concept d'énergie a été généralisé pour inclure d'autres formes différentes que celle cinétique ou potentielle des corps directement observables. Cette procédure, qui met en relation la mécanique des corps en mouvement avec des phénomènes qui ne font pas partie de la mécanique ou dont les mouvements ne sont pas observables "à l'oeil", a pu relier la mécanique aux autres branches de la physique. Le concept d'énergie est maintenant transversal à toutes les branches de la physique ; c'est devenu une des grandes idées unificatrices de cette science.

• **Exemple 47** (Sur le cahier d'exercices). *On lâche une balle de* $150\,\mathrm{g}$ *de* $1,5\,\mathrm{m}$ *de haut. La balle rebondit jusqu'à une certaine hauteur. Au sommet de son rebond une énergie de* $0,13\,\mathrm{J}$ *s'est dissipée sous forme de chaleur.*
A quelle hauteur la balle a rebondi ? $[h_2 = 1,4\,\mathrm{m}]$

• **Exemple 48** (Sur le cahier d'exercices). *Un wagon de 1,25 tonnes est lancé à une vitesse* $\vec{v}_0$ *de norme* $18\,\mathrm{m/s}$ *sur un rail en pente. Il s'arrête après avoir parcouru une distance de* $450\,\mathrm{m}$ *sur le rail et gravi une dénivellation de* $15\,\mathrm{m}$. *Quelle est l'intensité de la force due aux frottements si l'on considère qu'elle est constante ?* $[||\vec{F}_{fr}|| = 41\,\mathrm{N}]$



• **Exemple 49** (Dans le cahier d'exercices). *Un camion de 16,0 tonnes roule au bas d'une pente (point A) à la vitesse de* $36,0\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$. *Il gravit la pente à pleine puissance et passe le sommet (point B) à la vitesse de* $45,0\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$. *Le camion subit une force de frottement constante d'intensité* $||\vec{F}_{fr}|| = 850\,\mathrm{N}$.



Calculer la force motrice (considérée comme constante) pendant la montée.
Prendre $h_B - h_A = 20,0\,\mathrm{m}$. $[||\vec{F}_{mo}|| = 18,8 \cdot 10^3\,\mathrm{N}]$

9.3 Différentes formes d'énergie

Dans ce chapitre nous allons énumérer les différentes formes d'énergie qui nous entourent. Certaines ont déjà été décrites dans les chapitres précédents.
Il est important de savoir que, **bien que les formes d'énergie existantes soient multiples et différentes, leur origine est toujours à rechercher dans les quatre interactions fondamentales**.

• **Exemple 50.** *Quelles sont les quatre interactions fondamentales ? Pour chacune, donner un exemple.*

Nous faisons la distinction entre :

• **Les énergies d'un corps considéré comme ponctuel, ou particule.**

- **L'énergie cinétique** définie dans le chapitre 8.1, qui est liée à la vitesse et à la masse d'une particule dans un système de référence donné.
- **L'énergie potentielle** est liée à la position d'une particule en présence d'une interaction conservative. Dans le chapitre 8.3 nous avons vu **l'énergie potentielle gravitationnelle**, à laquelle nous ajoutons **l'énergie potentielle élastique** et **l'énergie potentielle électrostatique**, dues à la présence respective d'une force de rappel ou d'une force électrostatique agissant sur la particule. Par exemple, dans un circuit électrique, un générateur produit une force électrique sur les charges du fil, qui acquirent de l'énergie potentielle.
- **L'énergie de masse**. Selon la théorie de la relativité d'Einstein, le fait qu'un corps possède une masse au repos m_0 lui confère une énergie égal à $m_0\ c^2$, où c est la vitesse de la lumière dans le vide. Par conséquent une masse peut être convertie en une autre forme d'énergie et vice-versa. C'est ce qui arrive dans les réactions nucléaires : le(s) noyau(x) d'un ou plusieurs éléments chimiques sont transformés en noyaux d'autres éléments, où la masse finale est plus petite que celle du départ. La masse manquante est convertie en énergie cinétique ou rayonnante, mentionnée ci-dessous.

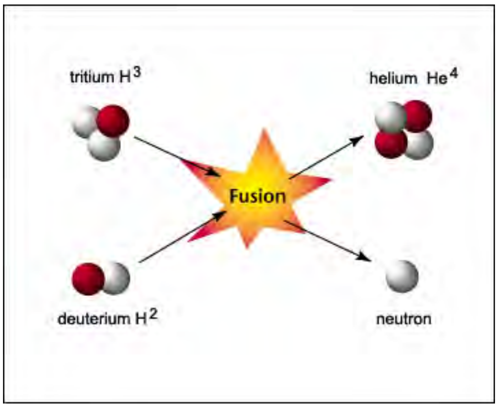
Nous rappelons que **l'énergie mécanique** est la somme de l'énergie cinétique plus l'énergie potentielle.

• **Les énergies propres aux systèmes de particules**, comme les molécules qui forment un corps macroscopique.

- **L'énergie thermique d'un système est la somme des énergies cinétiques de toutes ses particules.** Ces particules peuvent être des atomes, des molécules, des électrons, par exemple. Nous verrons dans les prochains chapitres que cette énergie correspond à l'agitation aléatoire et désordonnée des particules lorsque elles sont très nombreuses. Du point de vue macroscopique, l'énergie thermique d'un système se manifeste par sa température.

- **L'énergie chimique** est donnée par les **liaisons entre les atomes ou les molécules** formant une substance chimique ; ces liaisons sont de nature potentielle électrique et sont reliées à la disposition structurelle des atomes ou des molécules. Ainsi, lorsque des atomes ou molécules de plusieurs substances se combinent pour former des molécules d'une ou plusieurs autres substances, les liaisons chimiques changent et l'énergie chimique aussi. Si à la fin l'énergie chimique est plus petite qu'au début, ceci se traduit par une libération d'énergie, généralement sous forme de chaleur (réaction exothermique). A l'inverse, si au début l'énergie chimique est plus petite qu'à la fin, il faut fournir de l'énergie pour que cette réaction ait lieu (réaction endothermique). Par exemple, dans la combustion d'essence, ou dans la digestion de la nourriture qui est métabolisée dans les organismes, l'énergie chimique est convertie en d'autres types d'énergie (mécanique ou chaleur entre autres). Au contraire, l'énergie rayonnante est convertie in énergie chimique dans les plantes vertes, par le processus de la photosynthèse.

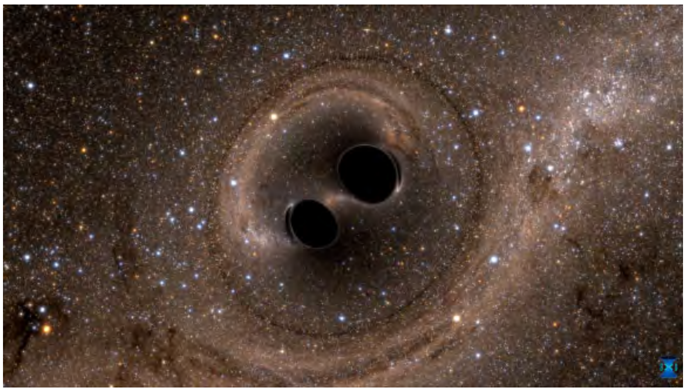
- **L'énergie nucléaire** est l'énergie potentielle associée aux interactions responsables de la **cohésion des nucléons (les protons et les neutrons) au sein du noyau des atomes**. Ce sont deux des quatre interactions fondamentales, connues sous les noms d'**interaction nucléaire forte et interaction nucléaire faible**. Au niveau macroscopique cette énergie correspond à l'énergie de masse.
En effet, le même nombre de nucléons peuvent posséder plus ou moins énergie de liaison nucléaire (donc plus ou moins de masse) selon comment ils sont regroupés. Par exemple, cinq nucléons ont moins d'énergie lorsqu'ils forment un noyau d'hélium-4 plus un neutron libre que lorsqu'ils forment un noyau d'hydrogène-3 (tritium) plus un noyau d'hydrogène-2 (deutérium). En changeant d'une configuration à l'autre, nous avons une réaction nucléaire libérant de l'énergie sous forme de radiation et énergie cinétique.



Dans le Soleil ce processus de fusion transforme environ 4 millions de tonnes de matière en énergie rayonnante chaque jour.

• **L'énergie sous forme de radiation**. Dans ce cas la propagation de l'énergie peut aussi avoir lieu au travers du vide.

- **L'énergie rayonnante électromagnétique**. Lorsqu'une charge électrique subit une accélération, elle produit une onde électromagnétique, qui transporte de l'énergie (comme le font les ondes dans la mer).
  Quand de la radiation électromagnétique est absorbée par un corps, l'énergie des ondes est convertie en chaleur ou en électricité. Par exemple nous savons que les rayons du soleil réchauffent les surfaces qu'ils éclairent.
- **L'énergie rayonnante gravitationnelle** est l'énergie transportée par les ondes gravitationnelles. En effet, de la même manière que l'accélération d'une charge produit de la radiation électromagnétique, l'accélération d'une masse produit de la radiation gravitationnelle. La différence entre l'énergie transportée par les ondes électromagnétiques et celle transportée par les ondes gravitationnelles est dans l'énorme écart entre la taille des deux interactions correspondantes : celle électromagnétique est environ 42 ordres des grandeurs plus grande que celle gravitationnelle.Par conséquent les ondes gravitationnelles sont si faibles que leur détection est très difficile.



Formulaire de la partie "Energie"

— Le **travail d'une force** sur objet est une grandeur **scalaire**, et représente un **transfert d'énergie, de ou vers l'objet, selon le signe** :

$$W = ||\vec{F}|| \cdot ||\Delta\vec{r}|| \cdot \cos\alpha \quad \text{ou} \quad W = F_{\parallel} \cdot \Delta x,$$

où α est l'angle formé par la force et le déplacement rectiligne. $F_{\parallel}$ est la composante de la force parallèle au déplacement.

— La **puissance moyenne** et la **puissance instantanée** sont des grandeurs **scalaires**, données par le rapport entre une variation d'énergie et la durée correspondante :

$$P_m = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{W}{\Delta t} \quad \text{et} \quad P_{inst} = \frac{dE}{dt}.$$

— Le **rendement** d'un dispositif, $0 \leq \eta < 1$, est le rapport adimensionnel

$$\eta = \frac{\Delta E_{utile}}{\Delta E_{fournie}} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{P_{utile}}{P_{fournie}}.$$

— L' **énergie mécanique est la somme de l'énergie cinétique plus l'énergie potentielle d'un objet**. Dans le cas de l'énergie potentielle gravitationnelle :

$$E_{mec} = E_k + E_g = \frac{1}{2}mv^2 + mgh.$$

— Le **théorème de l'énergie cinétique** décrit la variation de l'énergie cinétique d'un objet

$$\Delta E_k = W_{res} = \frac{1}{2}mv_{final}^2 - \frac{1}{2}mv_{initial}^2.$$

— **La pesanteur est une force conservative : son travail sur un chemin dépend uniquement de la hauteur des points de départ et d'arrivée**. Cela nous permet d'exprimer la variation de l'énergie potentielle gravitationnelle comme

$$\boxed{\Delta E_g = -W_g = mg(h_{final} - h_{initial}).}$$

— Le **principe de conservation de l'énergie mécanique s'applique lorsque les seules forces qui travaillent sur un objet sont conservatives** (pas de frottements ni de forces motrices, par exemple) :

$$\boxed{\Delta E_{mec} = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{2}mv_{final}^2 + mgh_{final} - \left(\frac{1}{2}mv_{initial}^2 + mgh_{initial}\right) = 0.}$$

— En la présence de forces motrices ou frottements, ou d'autres forces non conservatives

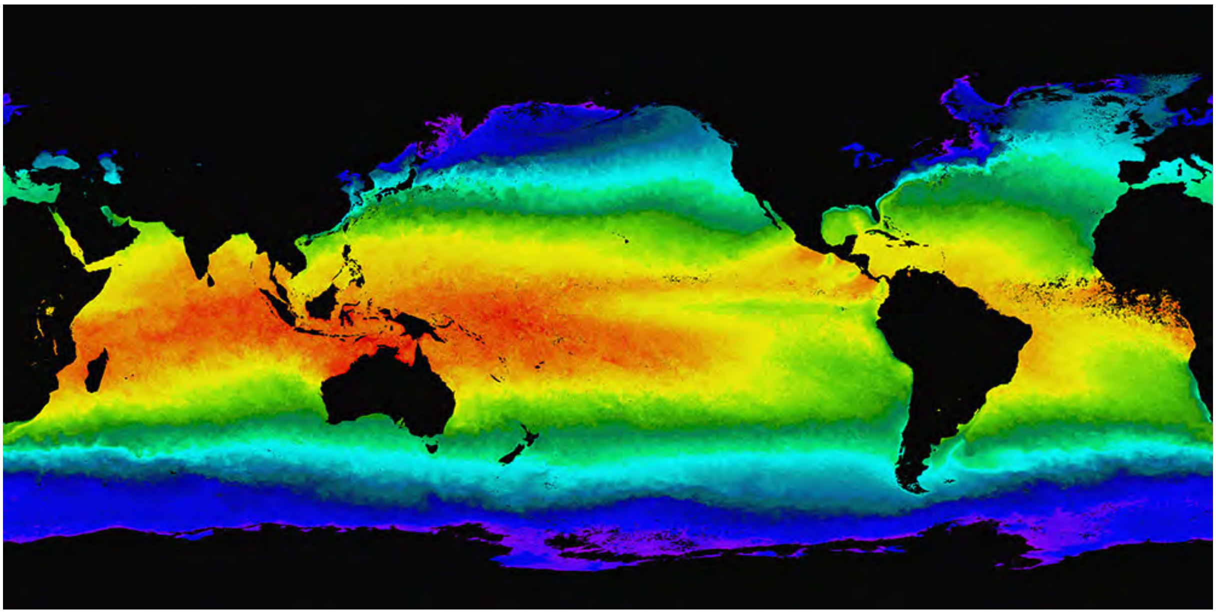
$$\boxed{\begin{gathered}\Delta E_{mec} = W_{mo} + W_{fr} + W_{autre} \quad \text{ou} \\ \frac{1}{2}mv_{final}^2 + mgh_{final} - \left(\frac{1}{2}mv_{initial}^2 + mgh_{initial}\right) = W_{mo} + W_{fr} + W_{autre}.\end{gathered}}$$

— On peut toujours associer une variation d'un certain type d'énergie à chaque travail (**vers** l'objet pour un travail positif, **de** l'objet pour un travail négatif), de sorte que **l'énergie totale du système "objet et environnement" est toujours conservée : $\Delta E_{tot} = 0$. Ceci est le principe de conservation de l'énergie.**

Unités

Grandeur(s)	**Unité SI**	**Autres unités utiles**
travail W ; energie E	Joule [J]=[N]·[m]=[kg]·[m^2]/[s^2]	kilowattheure [kWh]=10^3[W]·1[h]=$3,6\cdot10^6$[J]
puissance P	Watt [W]=[J]/[s]=[kg]·[m^2]/[s^3]	-
rendement η	adimensionnel	-

Quatrième partie
Chaleur



Introduction

Dans les parties précédentes nous nous sommes intéressés aux corps ponctuels. Dans la suite, nous allons étudier de nouvelles situations ; **nous considérons des portions de matière que nous séparons, dans notre imagination, de la matière externe à elles. Nous appelons système une telle portion de matière et environnement tout ce qui est extérieur au système, et qui peut avoir une influence sur lui.**

Nous allons déterminer le comportement d'un système en analysant la manière dont il interagit avec son environnement, et cela en choisissant des grandeurs physiques caractéristiques du comportement du système, comme la pression, la température, le volume ou l'énergie interne. **Ces propriétés "à grande échelle" sont dites macroscopiques**. **Les lois reliant ces grandeurs macroscopiques constituent la branche de la physique appelée thermodynamique.** Dans ce cas, la plupart des grandeurs macroscopiques concernées peuvent être perçues directement par nos sens (par exemple la température ou la pression).

Cependant, nous pouvons aussi adopter un **point de vue microscopique. Dans ce cas, nous considérons les grandeurs physiques qui décrivent les particules constituant le système**, comme leur masses, vitesses, énergies, etc. Les lois qui relient ces grandeurs microscopiques sont la base de la branche de la physique appelée **mécanique statistique**. Les propriétés microscopiques d'un système ne peuvent pas être associées directement à nos perceptions.

Pour tout système, les grandeurs macroscopiques et celles microscopiques sont reliées, car ce sont tout simplement deux manières de décrire la même situation ; ainsi nous devrions pouvoir exprimer les unes en fonction des autres. Par exemple, la température d'un système est une mesure de l'agitation moyenne des particules de ce système : lorsque l'agitation des particules augmente, la température augmente également, et il y a une proportionnalité directe entre la quantité macroscopique (la température) et son correspondant microscopique (l'énergie cinétique moyenne des particules).

10 Transfert de chaleur et variation de la température

10.1 Mesure de la température

Le toucher est la manière la plus simple pour différencier les corps chauds de ceux froids. Cependant, cette méthode pour mesurer la température repose sur nos sensations, et est trop subjective pour être utilisée en sciences. Imaginons par exemple d'immerger une main dans de l'eau froide, et l'autre dans de l'eau chaude, puis d'immerger les deux mains dans de l'eau de température intermédiaire. Elle semblera chaude à la première main, et froide à la deuxième. De même, l'eau et l'air à 20°C ne semblent pas avoir la même température selon notre perception. Cela prouve que nos sensations peuvent être trompeuses. De plus, la plage de températures que nous pouvons mesurer par le toucher est bien limitée.

Afin d'obtenir une mesure de la température quantitative et plus objective, il existe plusieurs propriétés physiques qui changent lorsque la température change. Par exemple le volume d'un liquide[†††], la taille d'une tige, la résistance électrique d'un fil, la pression d'un gaz à volume constant ou la couleur du filament d'une lampe. **Chacune de ces propriétés peut être utilisée pour construire un thermomètre, en choisissant un point de référence et une échelle**. Par simplicité, le point de référence dépendra de la substance choisie et ses propriétés thermométriques macroscopiques et l'échelle de telle sorte que nous aurons la relation la plus simple (de proportionnalité directe) entre la propriété choisie et la variation de température.

Nous avons par exemple que, pendant une transition de phase à pression constante, lorsque deux états de la matière coexistent, toute substance maintien sa température constante, même si elle est chauffée. Pour cette raison nous appelons ces températures *points fixes*. Historiquement, ces points fixes ont été choisis pour définir les échelles de température les plus communes.

- Dans **l'échelle Celsius** l'intervalle de température entre la solidification et le point d'ébullition de l'eau à la pression de 1 atm est partagé en cent intervalles égaux. Chacun d'entre eux est l'unité de température Celsius : le **degré Celsius ou °C**. Le 0°C correspond à la température de solidification de l'eau.
- L'intervalle unitaire de **l'échelle Kelvin** est le même que celui de l'échelle Celsius. Néanmoins, l'origine de l'échelle Kelvin est fixée à -273,15°C. A cette température l'énergie thermique d'un système s'approche de zéro et l'agitation thermique des particules est minimale. Si nous appelons θ la température exprimée en °C, et T la même température exprimée en °K, nous avons

$$\theta = T - 273,15. \tag{95}$$

[†††]. Par exemple nous savons que le volume du mercure liquide augmente avec la température.

- **L'échelle Fahrenheit** est encore utilisée dans certains pays anglophones, mais elle n'est pratiquement pas utilisée dans le milieu scientifique. La relation entre la température en °F (T_F) et en °C est

$$T_F = 32 + \frac{9}{5}\theta.$$

10.2 Energie thermique

Nous avons vu dans le chapitre sur l'énergie que l'énergie due à l'agitation microscopique désordonnée des molécules d'un système correspond macroscopiquement à l'énergie thermique de ce système.

L'énergie thermique d'un système (E_{th}) est la somme des énergies cinétiques de toutes ses particules :

$$E_{th} = E_{k\,1} + E_{k\,2} + E_{k\,3} + ... + E_{k\,n}, \tag{96}$$

L'énergie thermique est directement proportionnelle à la température du système.

avec $n \sim 10^{23}$ le nombre de molécules qui constituent le système macroscopique. Pour chaque molécule, E_k inclut aussi bien l'énergie liée à la vitesse du centre de masse ($1/2mv^2$) que celle liée à ses vibrations et/ou rotations.

Nous soulignons que l'**énergie thermique** d'un système et sa **température** sont des quantités corrélées (proportionnelles), mais elles ne sont **pas la même grandeur** et ne sont pas à confondre !

De plus il faut différencier l'énergie thermique et l'énergie interne d'un système : en effet

l'énergie interne d'un système (E_i) est la somme de l'énergie thermique (cinétique) et de l'énergie potentielle des liaisons (chimique) entre les molécules du système.

10.3 Quantité de chaleur

Lorsque nous mettons en contact **deux** systèmes qui ont des températures différentes, donc des énergies thermiques moyennes différentes, nous observons qu'après un temps suffisamment long la température finale atteinte par chaque système se situe quelque part entre les deux températures initiales. Nous disons alors que ces deux systèmes sont en **équilibre thermique** entre eux, et que de la **chaleur** est transférée du système plus chaud au système plus froid. **La chaleur est une grandeur qu'un système échange avec son environnement uniquement à cause de différences de température.** Cela s'explique du point de vue microscopique par le fait que les particules du système plus chaud, plus agitées, transmettent une partie de leur énergie cinétique aux particules du système plus froid. Nous pouvons ainsi donner la définition suivante.

La quantité de chaleur, ou simplement la chaleur, est l'énergie thermique transférée d'un système à un autre lorsque leur températures sont différentes. Elle est notés ΔE_{th} ou Q.

La quantité de chaleur, comme le travail, est un type de transfert d'énergie. Par conséquent, $Q = \Delta E_{th}$ peut être

— **positive** lorsque le système **gagne de l'énergie thermique**, ou

— **négative** si le système **perd de l'énergie thermique**.

Comme auparavant nous remarquons que, même si la chaleur et la variation de température sont reliées, elles sont des grandeurs physiques différentes !

L'unité de la chaleur est donc la même que pour le travail, le joule dans le SI. Toutefois, du point de vue historique, l'équivalence entre chaleur et énergie transférée fut reconnue seulement dans le dix-neuvième siècle. Avant cela, une autre unité était utilisée pour la chaleur, la **kilocalorie (kcal)**, définie comme la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un kilogramme d'eau de 14,5 à 15,5°C. La kilocalorie et la calorie (= 10^{-3} kcal) sont encore utilisées [‡‡‡].

James Joule (1818 - 1889) le premier montra l'équivalence entre une certaine quantité de travail mécanique et une quantité de chaleur cédée au système par une source externe à plus haute température. Les résultats expérimentaux donnent

‡‡‡. Au fait, la "calorie" utilisée pour mesurer le contenu énergétique alimentaire est en réalité une kilocalorie.

$$1\text{kcal} = 4187\,\text{J}. \qquad (97)$$

Nous pouvons ainsi énoncer **le principe de conservation de l'énergie pour un système fermé**, c'est à dire un système qui peut échanger uniquement de l'énergie avec le milieu extérieur, sous la forme de chaleur ou de travail, mais pas de la masse : **au cours d'une transformation quelconque d'un système fermé, la variation de son énergie est égale à la quantité d'énergie échangée avec l'environnement, sous forme de chaleur et sous forme de travail.** Sous cette forme le principe de conservation de l'énergie est connu comme la **première loi de la thermodynamique**.

10.4 Chaleur massique d'une substance

La quantité de chaleur nécessaire pour produire une augmentation de la température pour une masse donnée varie selon la substance chauffée. Cette énergie est proportionnelle à la masse m de la substance et à l'écart de température $\Delta\theta$ souhaité :

$$\Delta E_{th} = c\, m\, \Delta\theta. \qquad (98)$$

La constante de proportionnalité c s'appelle chaleur massique et est caractéristique de la substance chauffée. En inversant l'équation (98) nous avons

$$c = \frac{\Delta E_{th}}{m\,\Delta\theta} = \frac{Q}{m\,\Delta\theta}. \qquad (99)$$

Ainsi, **la chaleur massique peut être définie numériquement comme la quantité de chaleur qu'il faut fournir à $1\,\text{kg}$ de substance pour la réchauffer d'un degré Kelvin (ou Celsius).**

La valeur numérique de la chaleur massique pour les différents matériaux, solides ou liquides ou gazeux (ce n'est pas la même !), se trouve dans les tables CRM. **L' unité SI**

de la chaleur massique est le $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}\cdot\mathrm{kg}} = \mathrm{J}\cdot\mathrm{K}^{-1}\cdot\mathrm{kg}^{-1}$.

Par exemple $c_{eau} = 4,18 \cdot 10^3\,\mathrm{J}\cdot\mathrm{K}^{-1}\cdot\mathrm{kg}^{-1}$. Cela signifie qu'il faut $4,18 \cdot 10^3$ joules pour augmenter d'un degré Kelvin (ou Celsius) la température d'un kilogramme d'eau.

• **Exemple 51.** *Pour cuire des pâtes il faut chauffer* $3,0\,\mathrm{kg}$ *d'eau de* $20\,°\mathrm{C}$ *à* $100\,°\mathrm{C}$*. Quelle chaleur faut-il fournir ?*

• **Exemple 52.**

a) *Expliquer pourquoi la présence d'un lac, de la mer ou d'un océan peut modérer les pics de températures des côtes adjacentes.*

b) *Un morceau de bois et un morceau de métal ont la même température. Quand les deux morceaux sont plus froids que la main, le morceau de métal semble plus froid que le morceau de bois. Alors que, quand les deux morceaux sont plus chauds que la main, le morceau de métal semble plus chaud que le morceau de bois. Pourquoi ?*

• **Exemple 53.** *Une boule de plomb de* 10 g *tombe d'une hauteur de* 40 m *sur le sol sans rebondir. Quelle élévation de température subit-elle si toute la chaleur dégagée par le choc est prise par la boule ? Même question pour une boule de* 20 g.

• **Exemple 54.** *Une casserole d'aluminium de* 500 g *contient* 2, 0 *litres d'eau. Un corps de chauffe de* 1500 W *plonge dans cette eau. Quelle chaleur faut-il fournir au système casserole + eau pour élever leur température de* 15 °C *à* 98 °C *? Combien de temps faudra-t-il chauffer ?*

10.5 Capacité calorifique d'un corps

Considérons un corps fait d'une substance déterminée. Si on multiplie la chaleur massique de cette substance par la masse du corps nous trouvons numériquement l'énergie qu'il faut fournir à ce corps pour le réchauffer d'un degré Kelvin (ou Celsius).

La quantité $C = c\, m$ est appelée capacité calorifique du corps. Avec cette définition, l'équation (98) peut être aussi écrite comme

$$\boxed{\Delta E_{th} = c\, m\, \Delta\theta = C\, \Delta\theta. \quad (100)}$$

Ainsi, la capacité calorifique d'un corps peut être vue comme le rapport entre la quantité de chaleur fournie à un corps et l'augmentation de la température associée

$$\boxed{C = \frac{\Delta E_{th}}{\Delta\theta} = \frac{Q}{\Delta\theta}. \qquad (101)}$$

La capacité calorifique est souvent donnée (plutôt que la masse et la chaleur massique) pour des récipients où on mélange des substances à des températures différentes (les calorimètres) ou pour des objets constitués de différents matériaux, afin de calculer rapidement quelle est l'énergie absorbé par ces objets.

L'unité SI pour la capacité calorifique est le joule par degré Kelvin (ou Celsius) : J/ K ou J/ °C.

Alors que la chaleur massique ne dépend pas de la quantité de matière, mais seulement du type de substance, la capacité calorifique est d'autant plus grande que le corps considéré est massif. Par exemple, nous pouvons parler de la capacité calorifique d'une pièce de cinq centimes, mais de la chaleur massique du cuivre. L'eau contenue dans une piscine ou dans un bocal peuvent bien avoir la même chaleur massique, mais leurs capacités calorifiques sont bien différentes !

Nous remarquons enfin que ni la capacité calorifique d'un corps, ni la chaleur massique d'une substance ne sont constantes, mais dépendent de l'intervalle de température dans lequel l'on travaille et de la pression. Néanmoins, à des températures ordinaires et des pressions terrestres, les chaleurs massiques de différentes substances peuvent être considérées comme constantes. Leurs valeurs numériques sont listés dans les tables CRM.

- **Exemple 55.** *Quelle est la capacité calorifique de l'eau de l'exercice 51 ?*

10.6 Température d'équilibre d'un mélange

Si nous mélangeons deux substances qui se trouvent initialement à des températures différentes, nous devons tenir compte de la conservation de l'énergie (thermique) afin de pouvoir trouver la température d'équilibre finale. Lorsque le système est isolé, la variation de l'énergie thermique totale doit être zéro.

$$\Delta E_{th\ tot} = 0$$

$$\Rightarrow \Delta E_{th\ gagnée} + \Delta E_{th\ perdue} = 0$$

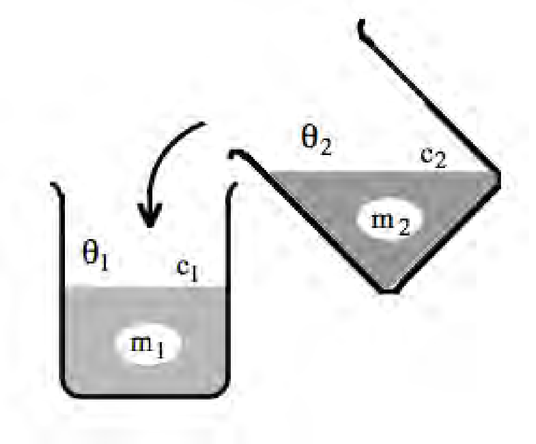
$$\Rightarrow \Delta E_{th\ gagnée} = -\Delta E_{th\ perdue}$$

$$\text{ou} \quad Q_{\ gagnée} = -Q_{\ perdue}. \tag{102}$$

L'énergie thermique gagnée par la substance à température plus basse (positive) doit être opposée à l'énergie thermique perdue par la substance à température plus élevée (négative).

Le moins devant la variation d'énergie perdue nous assure que la quantité à droite de l'égalité est bien positive.
Sans tenir compte de la capacité calorifique du récipient, et en faisant référence à la figure ci-contre avec $\theta_1 < \theta_2$, l'équation (102) devient

$$m_1 \cdot c_1 \cdot \Delta\theta_1 = -m_2 \cdot c_2 \cdot \Delta\theta_2, \tag{103}$$



Pour tenir compte du récipient qui contient le mélange (dans le dessin ci-dessus il s'agit du récipient 1), nous devons additionner le terme correspondant :

$$m_{récipient\ 1} \cdot c_{récipient\ 1} \cdot \Delta\theta_{récipient\ 1} = C_{récipient\ 1}\ \Delta\theta_1.$$

L'équation (103) devient alors

$$(m_1 \cdot c_1 + C_{récipient\ 1})\ \Delta\theta_1 = -m_2 \cdot c_2 \cdot \Delta\theta_2.$$

• **Exemple 56.** *On mélange* $1,0$ *kilogramme d'eau à* $10\,°\mathrm{C}$ *avec* $2,0$ *kilogrammes d'huile à* $70\,°\mathrm{C}$*. Quelle est la température d'équilibre ? (*$c_{huile} = 1,87 \cdot 10^3 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\ °C}}$*)*

• **Exemple 57.** *On verse* $200\,\mathrm{g}$ *d'eau à* $50\,°\mathrm{C}$ *dans un récipient en fer à* $20\,°\mathrm{C}$ *de capacité calorifique* $C = 132\ \mathrm{J/°C}$*. Quelle est la température d'équilibre du système "eau + récipient" ?*

11 Transfert de chaleur et changement d'état

11.1 Structure microscopique des états de la matière (rappel)

Etat	**Structure microscopique et mouvement des particules**	**Forces de liaisons entre les particules**
Solide	Les particules sont "collés" les unes aux autres et occupent une place déterminée. L'agitation thermique se traduit par une vibration de chaque atome ou molécule.	Elevées
Liquide	En plus de l'agitation thermique des atomes ou molécules qui se traduit par des vibrations et des rotations, les particules peuvent glisser ou rouler les unes sur les autres ce qui correspond à l'écoulement des liquides.	Moyennes
Gaz	Les atomes ou molécules ne sont plus "collés" les uns aux autres et sont animés de grandes vitesses de translation et de rotation. Les collisions sont permanentes entre les particules et sur les parois du récipient.	Faibles

Auparavant, nous avons vu qu'il faut fournir de l'énergie à un système pour augmenter sa température. Des échanges d'énergie se produisent également quand une substance subit une transition de phase. En effet, tout changement d'état correspond à une variation de l'énergie de liaison (énergie potentielle chimique) entre les atomes ou molécules : la fusion (passage de l'état solide à liquide), la vaporisation (passage de liquide à gaz) ou la sublimation (passage directement de solide à gaz) d'une substance sont des transitions qui nécessitent une absorption d'énergie de la part de cette substance. Lors des transitions inverses (la solidification, la condensation et la sublimation inverse), la substance cède de l'énergie.

11.2 Chaleur latente d'une substance

Lorsqu'une substance change d'état, par exemple pour passer d'une phase moins énergétique à une phase plus énergétique (mais le même raisonnement s'applique pour le passage contraire), **l'énergie fournie n'est plus utilisée pour augmenter l'intensité de la vitesse des molécules, mais uniquement pour changer les liens**

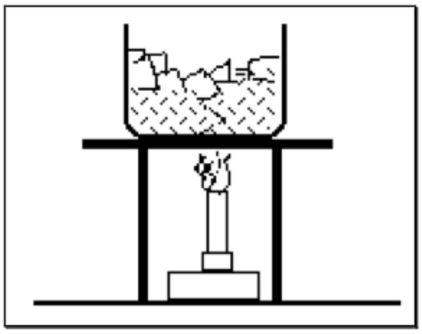
chimiques entre les molécules. Du point de vue macroscopique cela se traduit par le fait que **pendant une transition de phase** **la température reste constante.**

La quantité d'énergie par unité de masse qui est transférée sous forme de chaleur lorsque une de ces transitions a lieu s'appelle chaleur latente, indiquée L.

Pour une quantité m de masse qui change d'état (à température constante $\Rightarrow \Delta\theta = 0\,°\mathrm{C}$!), nous avons donc

$$L = \frac{\Delta E_{th}}{m} = \frac{Q}{m}. \qquad (104)$$

Comme pour les chaleurs massiques, les chaleurs latentes des différentes substances varient en fonction des conditions externes dans lesquelles la transition a lieu. Leurs valeurs numériques sont listés dans les tables CRM. Par exemple, la **chaleur latente de vaporisation** de l'eau à 1 atm est de $23 \cdot 10^5\,\mathrm{J/\,kg}$. Sa **chaleur latente de fusion** est de $3,3 \cdot 10^5\,\mathrm{J/\,kg}$.

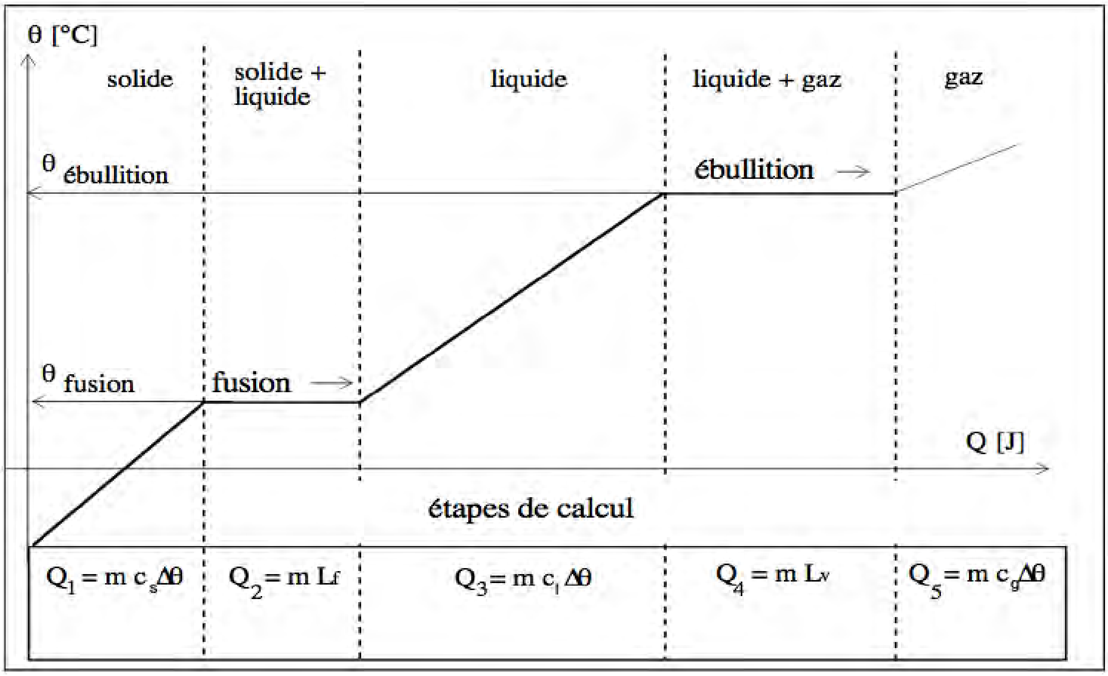


• **Exemple 58.** *Pour la même substance, la chaleur latente de fusion et celle de vaporisation ont des valeurs différentes. Pourquoi ?*

• **Exemple 59.** *Quelle quantité de chaleur est nécessaire pour fondre complètement* 50 g *de plomb à une température initiale de* 20 °C *?*

11.3 Température d'équilibre avec transition de phase

Pour conclure, nous rappelons que la quantité de chaleur transférée à une substance peut produire une variation de sa température, un changement d'état ou les deux, l'un à la suite de l'autre. Donc, lorsque nous mélangeons deux substances à des températures différentes, nous devons tenir compte aussi de l'énergie gagnée ou perdue dans une transition de phase, en écrivant l'équation (102). On peut ainsi déterminer la ou les étapes de calcul à effectuer.



Le graphique ci-dessus, ensemble avec les tables CRM, nous aide à déterminer les étapes de calcul pour résoudre un problème.

— **En se déplaçant de gauche à droite dans le graphique, le système (formé de la matière et de son contenant) reçoit de la chaleur, elle est comptée positivement :** $\Delta E_{th} = Q > 0$.
— **En se déplaçant de droite à gauche, le système perd de la chaleur, et cette fois elle est comptée négativement :** $\Delta E_{th} = Q < 0$.

• **Exemple 60** (Dans le cahier d'exercices). *Nous mettons en contact* 1 kg *d'eau à* 10 °C *et* 1 kg *de glace à* −10 °C. *Quelle est la température d'équilibre ? Quelles sont les quantités d'eau et de glace à la température d'équilibre ?*

12 Mécanismes de transfert de la chaleur

12.1 Conduction

La conduction thermique a lieu lorsque deux substances à températures différentes sont mises en contact. Si un objet est à une température différente d'un autre objet mis en contact avec lui, la chaleur se répand jusqu'à ce que les deux corps atteignent la même température, qui est la température d'équilibre thermique. Un tel **transfert de chaleur spontané se produit toujours de la région à plus haute température à celle plus froide**. Cette dernière affirmation est une formulation possible de la **deuxième loi de la thermodynamique**.

Du point de vue microscopique, la conduction thermique s'explique par le fait que, en mettant en contact des matières de température différente, l'agitation thermique des molécules se transmet de proche en proche, de molécule à molécule. Les molécules ayant une agitation plus élevée transfèrent une partie de leur mouvement aux molécules moins agitées. Ce transfert de chaleur s'arrête lorsque l'agitation thermique est uniforme.

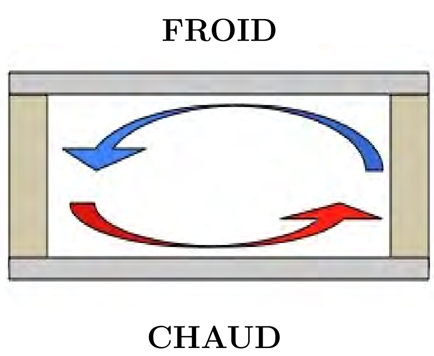
De manière générale :
- les métaux sont de très bons conducteurs de chaleur ;
- les gaz sont de très bons isolants pour la conduction ;
- le vide est un isolant parfait pour les phénomènes de conduction.

12.2 Convection

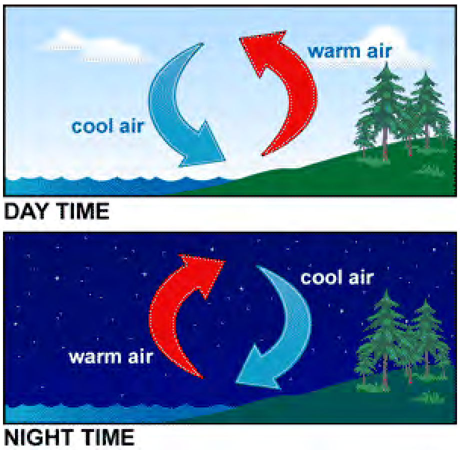
La convection thermique a lieu quand deux corps à température différente sont en contact avec le même fluide : le corps chaud en bas et le corps froid en haut en présence de gravité. Le fluide en contact avec le corps chaud en bas se réchauffe et, dans la plupart des cas, il se dilate et devient moins dense que le fluide autour.

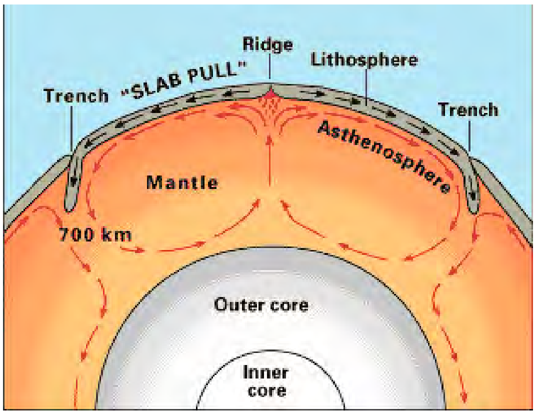
Donc il remonte et sa place est prise par le fluide plus froid et plus dense, qui descend. Une fois descendu, le fluide froid se réchauffe de la même manière et remonte à son tour.

Le résultat est un courant de fluide chaud vers l'objet froid, et de fluide froid vers le corps chaud, ce qui créé un flux circulaire continu, appelé cellule convective, qui transfère de l'énergie du corps chaud au corps froid.



Ce processus se produit régulièrement dans l'atmosphère, et est à l'origine de nombreux phénomènes météorologiques. De même, la convection est présente dans les océans ou même sous la croûte terrestre, en entraînant la dérive des continents.





Le type de convection décrite ci-dessus, engendrée par la gravité, est appelée convection "naturelle". En effet, la convection peut être aussi "forcée", comme dans certains systèmes de chauffage pour intérieur, à ventilation.

Nous remarquons que
- les solides ne permettent évidemment aucune convection ;
- pour qu'un gaz soit un bon isolant thermique, il faut empêcher la convection. Pour cela on utilise des corps contenant des espaces vides (corps lacunaires) comme la laine ou la laine de verre.

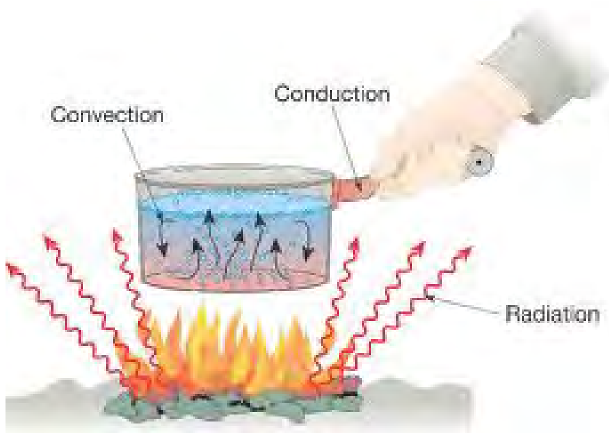
• **Exemple 61.** *Qu'est-ce qu'il se passe si le corps froid est placé en dessous du fluide et le corps chaud en dessus ? Y a-t-il de la convection dans ce cas ?*

12.3 Rayonnement

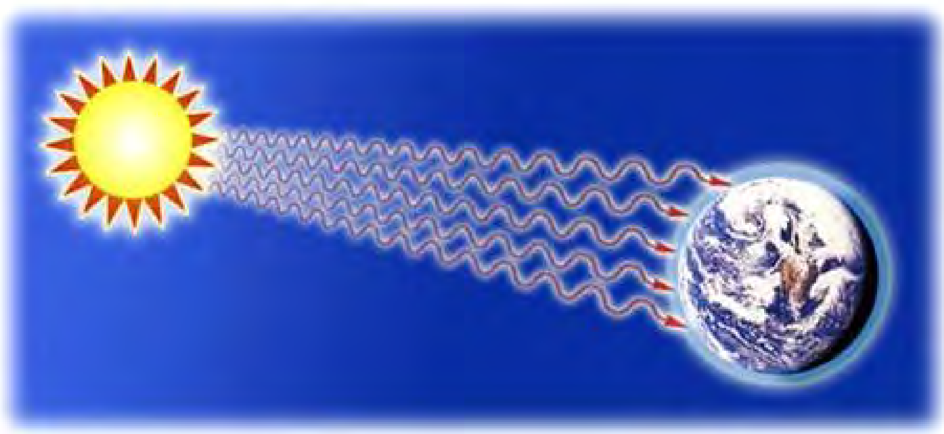
Le rayonnement est le phénomène de propagation d'énergie rayonnante électromagnétique, que nous avons vue dans la chapitre 9.3. Tout objet émet de la radiation électromagnétique. L'intensité et le caractère des ondes émises dépendent de la température de l'objet, de sa surface et de la substance dont il est fait.

De manière générale l'énergie émise sous forme de radiation électromagnétique est proportionnelle à la température en degrés Kelvin à la puissance quatre (T^4). Donc un corps chaud émet de l'énergie, qui sera en partie absorbée par d'autres objets qu'elle rencontre. Un objet plus froid émet également de l'énergie, mais moins que ce qu'il absorbe, car il possède une plus basse température.

Le résultat est un transfert d'énergie du corps plus chaud au corps plus froid.



Puisque les ondes électromagnétiques se propagent dans le vide, elles peuvent transmettre de l'énergie sans qu'il y ait un contact physique d'aucun type. Par exemple, le soleil peut transmettre de l'énergie à la Terre par rayonnement, même s'il n'y a pas de matière entre les deux corps.



Formulaire de la partie "Chaleur"

— **L'énergie thermique d'un système, E_{th}, est la somme des énergies cinétiques de toutes ses particules, elle est directement proportionnelle à la température du système :**

$$\boxed{E_{th} = E_{k\,1} + E_{k\,2} + E_{k\,3} + ... + E_{k\,n}.}$$

— **L'énergie interne d'un système, E_i, est la somme de l'énergie thermique et de l'énergie potentielle des liaisons chimiques entre les particules du système.**

— **La quantité de chaleur, $Q = \Delta E_{th}$, est l'énergie thermique transférée d'un système à un autre lorsque leur température est différente.**

— La **chaleur massique d'une substance** est numériquement la quantité de chaleur qu'il faut fournir à cette substance pour en augmenter la température d'un degré Kelvin (ou Celsius), par kilogramme :

$$\boxed{c = \frac{\Delta E_{th}}{m\ \Delta\theta} = \frac{Q}{m\ \Delta\theta} \quad \Longleftrightarrow \quad Q = c \cdot m \cdot \Delta\theta.}$$

— La **capacité calorifique d'un objet** est numériquement la quantité de chaleur qu'il faut fournir à cet objet pour en augmenter la température d'un degré Kelvin (ou Celsius) :

$$\boxed{C = \frac{\Delta E_{th}}{\Delta\theta} = \frac{Q}{\Delta\theta} \quad \Longleftrightarrow \quad Q = C \cdot \Delta\theta.}$$

Si l'objet en question est fait d'une seule substance, alors on peut exprimer sa capacité calorifique en fonction de sa masse et de la chaleur massique de la substance :

$$\boxed{C = c \cdot m}$$

— La **chaleur latente d'une substance** est la quantité de chaleur transférée par kilogramme de cette substance lorsqu'elle subit une transition de phase (sans variation de la température) :

$$\boxed{L = \frac{\Delta E_{th}}{m} = \frac{Q}{m} \quad \Longleftrightarrow \quad Q = L \cdot m.}$$

— Lorsqu'on met en contact plusieurs substances à des températures différentes, **à l'équilibre thermique l'énergie thermique totale du système est conservée** : la chaleur gagnée (positive) par la (les) substance(s) plus froide(s) doit être opposée à la chaleur perdue (négative) par la (les) substance(s) plus chaude(s),

$$\boxed{\Delta E_{th\ totale} = \Delta E_{th\ gagnée} + \Delta E_{th\ perdue} = 0 \quad \text{ou} \quad \Delta E_{th\ gagnée} = -\Delta E_{th\ perdue}.}$$

Unités

Grandeur(s)	**Unité SI**	**Autres unités utiles**
energie thermique E_{th} ; chaleur Q	[J]=[N]·[m]=[kg]·[m^2]/[s^2]	kilocalorie : 1[kcal] = 4190[J] ; 1[kWh] $= 3,6 \cdot 10^6$[J]
chaleur massique c	[J]/([K]·[kg])	-
capacité calorifique C	[J]/[K]	-
chaleur latente L	[J]/[kg]	-