

PHYSIQUE

Henri Weyer

# COURS DE PHYSIQUE

## Classes de 2BC

2023-2024



LE GOUVERNEMENT  
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG  
Ministère de l'Éducation nationale,  
de l'Enfance et de la Jeunesse

## IMPRESSUM

### **Titre: Cours de physique**

Élaboré conformément au programme luxembourgeois par :  
Gilles Frising, Laurent Hild, Michel Reisenauer, Sandrino Savini.

Contenus et concept didactique pour l'enseignement  
au Grand-Duché de Luxembourg.



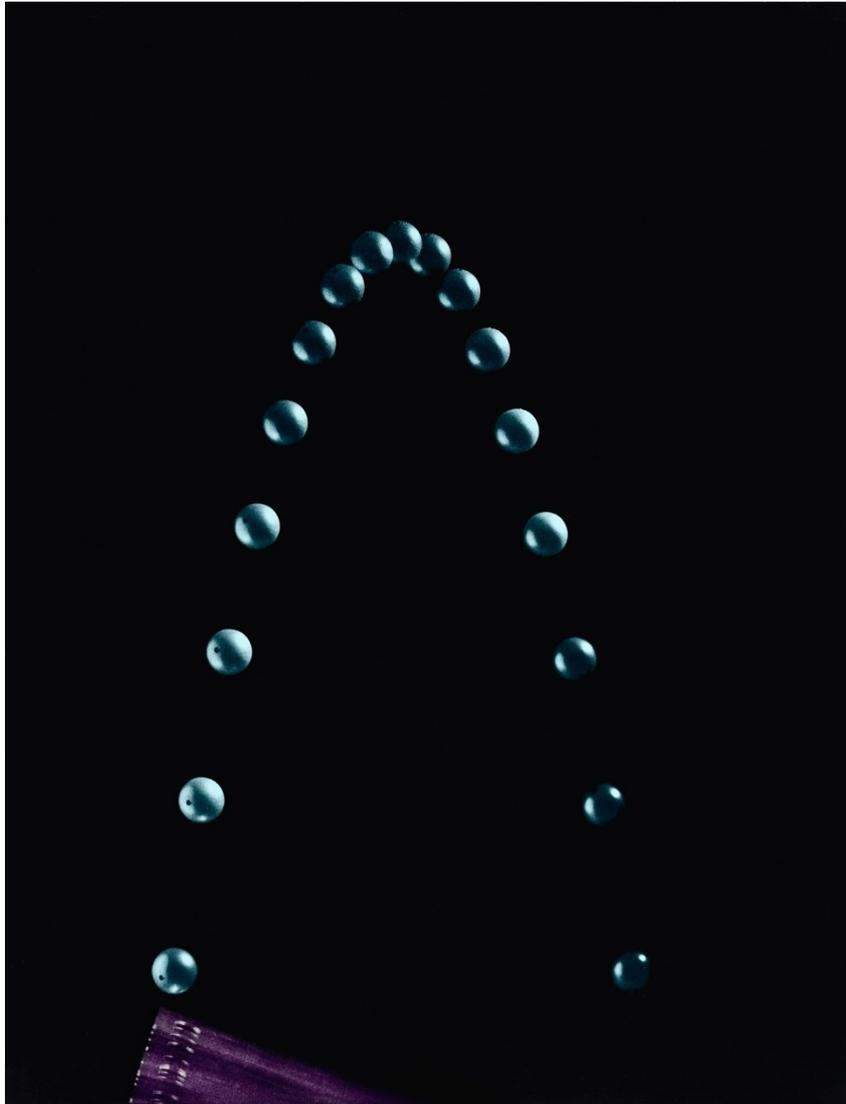
### **Éditeur:**

Service de Coordination de la Recherche  
et de l'Innovation pédagogiques et technologiques (SCRIPT)  
33 Rives de Clausen  
L-2165 Luxembourg  
secretariat@script.lu

Réalisation/Conception: SCRIPT

# 1.

## Cinématique dans le plan



© George Resch FUNDAMENTAL PHOTOGRAPHS, NYC



## Sommaire

1	Référentiel et trajectoire.....	1
2	Tir horizontal .....	2
3	Grandeurs cinématiques vectorielles.....	4
3.1	Vecteur position et vecteur déplacement .....	4
3.2	Vecteur vitesse .....	5
3.3	Vecteur accélération .....	7
4	Tir oblique .....	9
4.1	Équations horaires du mouvement.....	10
4.2	Équation cartésienne de la trajectoire.....	11
4.3	Sommet de la trajectoire.....	11
4.4	Portée du tir dans le cas d'une trajectoire symétrique.....	12
4.5	Angle d'impact .....	13
5	Accélération tangentielle et accélération normale.....	17
5.1	Accélération tangentielle .....	17
5.2	Accélération normale.....	18
5.3	Cas particuliers .....	18
6	Exercices.....	19

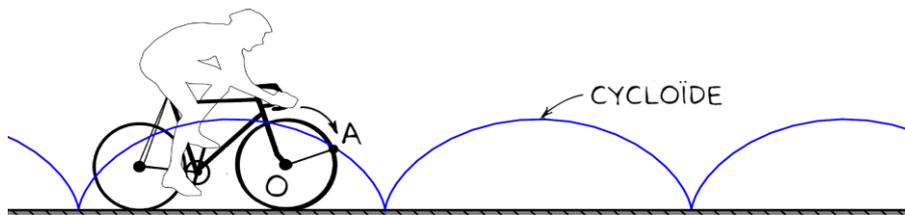


# 1 Référentiel et trajectoire

Tout mouvement ou repos est relatif. Le mouvement ou le repos d'un corps est constaté par rapport à un cadre de référence, appelé **référentiel**. La description du mouvement dépend du référentiel choisi.

## Exemple

Considérons un point *A* au bord de la roue d'une bicyclette d'un coureur en plein sprint. Par rapport au référentiel « axe de rotation *O* » le point *A* décrit une courbe circulaire. Par rapport au référentiel « roue », le point *A* est immobile. Par rapport au référentiel « sol », le point *A* décrit une courbe que l'on appelle cycloïde.

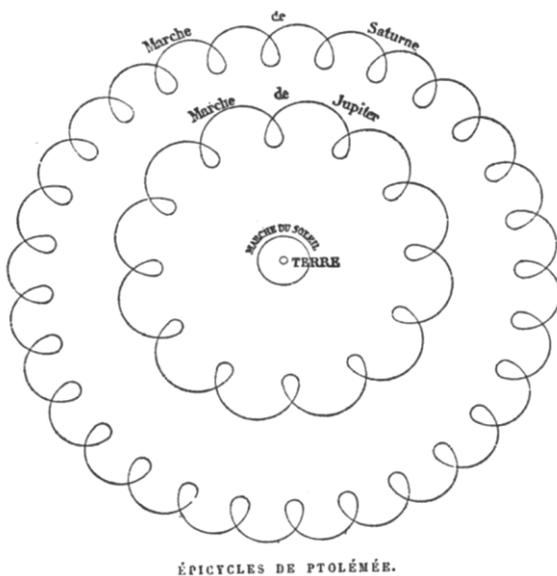


Plus généralement, on distingue :

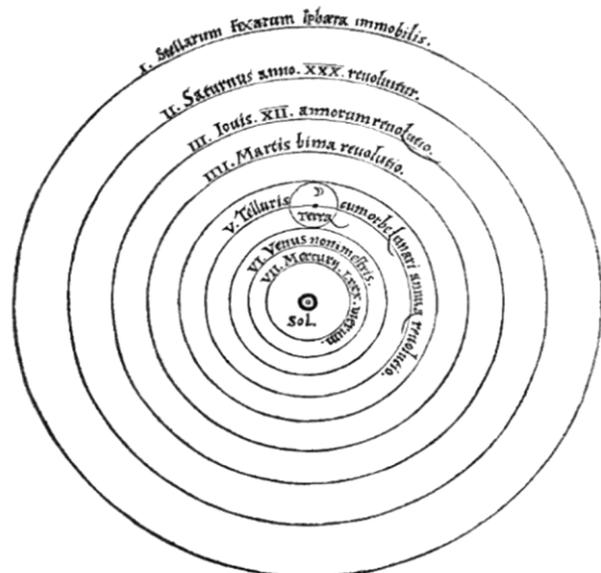
- Le **référentiel terrestre** ou **référentiel du laboratoire** qui est fixe par rapport à la surface de la Terre et donc lié à la rotation de celle-ci (p.ex. référentiel « sol », référentiel « salle de classe »).
- Le **référentiel géocentrique** dont l'origine est le centre d'inertie de la Terre et qui est fixe par rapport aux étoiles lointaines ; il est p.ex. utilisé pour l'étude des mouvements des satellites terrestres.
- Le **référentiel héliocentrique** (ou référentiel de Kepler) dont l'origine est le centre d'inertie du Soleil et dont l'orientation est fixe par rapport aux étoiles lointaines ; il est p.ex. utilisé pour l'étude des mouvements des planètes.



La **trajectoire** d'un point mobile est l'ensemble des points de l'espace par lesquels il passe lors de son mouvement. La forme de la trajectoire dépend du référentiel choisi.



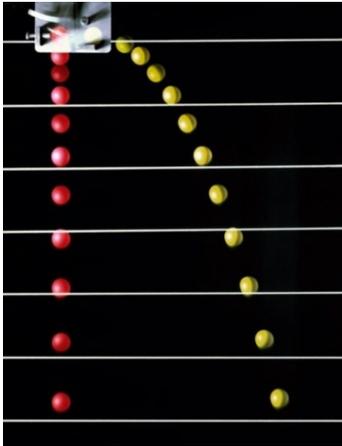
ÉPICYCLES DE PTOLÉMÉE.



Trajectoires des corps célestes dans le référentiel géocentrique (à gauche) et dans le référentiel héliocentrique (à droite)

## 2 Tir horizontal

Un caillou, un obus, une balle de baseball - toute chose qui est projetée et qui reste en mouvement dû à son inertie, est appelée **projectile**. Pour les canoniers des siècles derniers, les trajectoires courbées des projectiles semblaient être très complexes. Aujourd'hui, on sait que ces trajectoires sont étonnamment simples si le frottement est négligeable. Étudions le cas d'un **tir horizontal** :



La photographie stroboscopique (fréquence 30 Hz) montre deux billes en chute libre partant simultanément de la même hauteur : la bille rouge est lâchée sans vitesse initiale ; la bille jaune est tirée avec une vitesse initiale  $v_0$  horizontale.

On constate que les distances verticales parcourues par les deux billes sont identiques à chaque instant. Le mouvement de la bille jaune selon la verticale n'est donc pas influencé par son mouvement selon l'horizontale. C'est le principe de l'indépendance des mouvements simultanés découvert par Galilée.

© Richard Megna FUNDAMENTAL PHOTOGRAPHS, NYC

- Sans frottement, le mouvement horizontal de la bille jaune correspond à un MRU de vitesse  $v_0$ . En orientant l'axe des abscisses horizontalement vers la droite, les équations horaires du mouvement horizontal s'écrivent (abscisse initiale  $x_0 = 0$ ) :

$$a_x = 0$$

$$v_x = v_0$$

$$x = v_0 t$$

- Le mouvement vertical de la bille jaune est identique à celui de la bille rouge en chute libre sans vitesse initiale. C'est un mouvement rectiligne uniformément varié (MRUV) d'accélération  $a = g$ . En orientant l'axe des ordonnées verticalement vers le bas et en fixant l'origine à la position initiale ( $y_0 = 0$ ), les équations horaires du mouvement vertical s'écrivent :

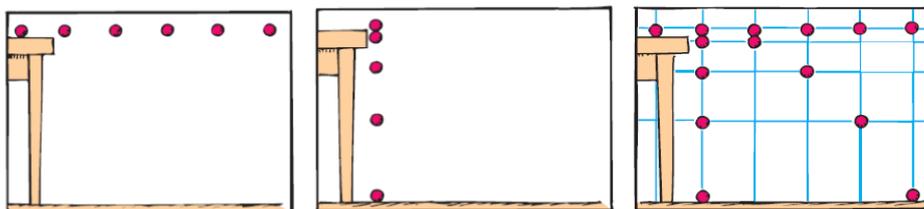
$$a_y = g$$

$$v_y = g t$$

$$y = \frac{1}{2} g t^2$$

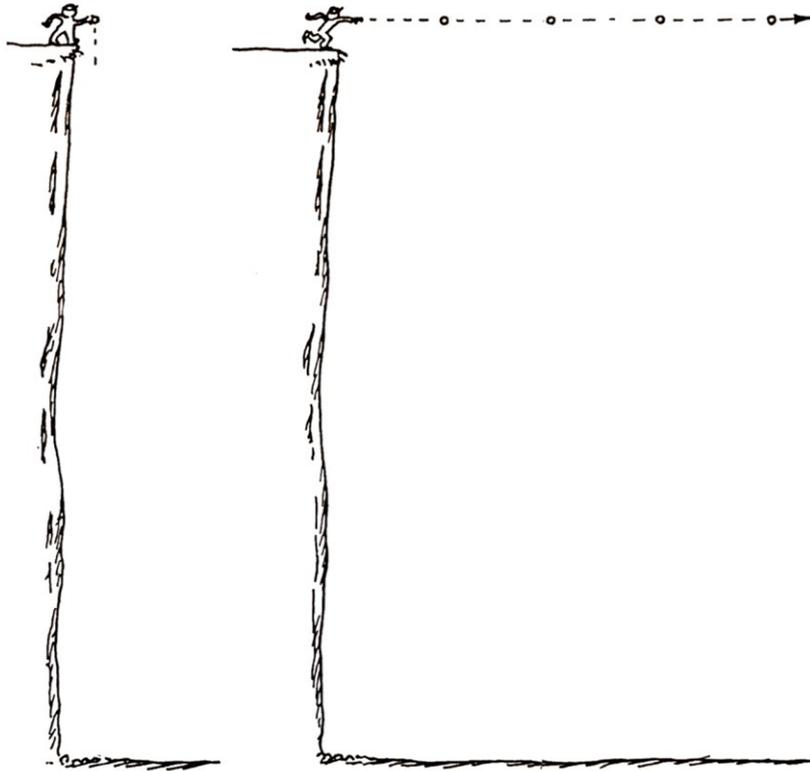
Le mouvement d'un projectile est la superposition de deux mouvements indépendants :

- un *mouvement rectiligne horizontal uniforme*.
- un *mouvement rectiligne vertical uniformément varié d'accélération  $a = g = 9,81 \frac{m}{s^2}$*



■ **As-tu compris ?**

1. Sur la figure de droite, les 4 positions d'une balle lancée horizontalement sans champ de pesanteur sont représentées à des intervalles de temps égaux de  $\Delta t = 1$  s. La résistance de l'air est négligée. Utiliser  $g = 10 \frac{m}{s^2}$ .
  - a. En utilisant l'échelle  $1 \text{ cm} \leftrightarrow 10 \text{ m}$ , représenter les 4 positions réelles de la balle.
  - b. Tracer la trajectoire de la balle.



2. Un canon tire un boulet horizontalement. La résistance de l'air est négligée.



- a. Comment varie la vitesse horizontale du boulet durant le vol ?
- b. Comment varie la vitesse verticale du boulet durant le vol ?
- c. En déduire comment varie la vitesse du boulet durant le vol.
- d. Comment varie la durée de vol si un deuxième boulet est tiré avec une vitesse initiale inférieure à celle du premier boulet ?
- e. Comparer la vitesse d'impact du deuxième boulet à celle du premier boulet.

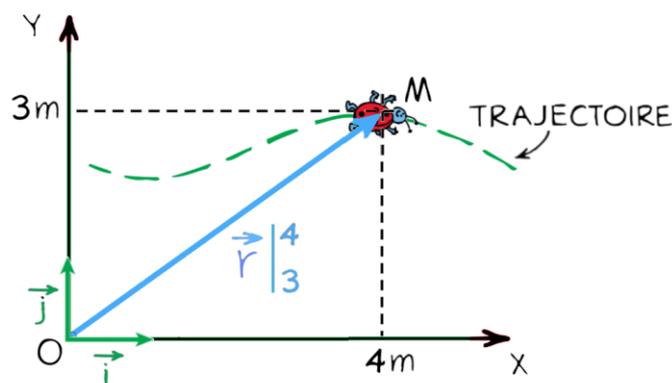
### 3 Grandeurs cinématiques vectorielles

#### 3.1 Vecteur position et vecteur déplacement

Pour indiquer la position d'un corps dans l'espace, on a besoin d'un **système de coordonnées** ou **repère** ; il est lié à un référentiel. Par exemple, pour indiquer la position sur la Terre, on peut utiliser un repère géographique avec les coordonnées GPS latitude, longitude et altitude.

Pour repérer un point mobile  $M$  qui se déplace dans un plan, on peut utiliser un repère cartésien  $(O, \vec{i}, \vec{j})$ . La position  $M$  du mobile par rapport à l'origine  $O$  est déterminée à chaque instant par le **vecteur position**  $\vec{r} = \overrightarrow{OM}$ .

$$\vec{r} = x \vec{i} + y \vec{j} \text{ respectivement } \vec{r} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \text{ ou } \vec{r} \begin{vmatrix} x \\ y \end{vmatrix}$$



$x$  et  $y$  sont les **coordonnées cartésiennes** du point  $M$ . Si le mobile se déplace, alors les coordonnées  $x$  et  $y$  varient au cours du temps et on a  $x = x(t)$  et  $y = y(t)$ . Les relations exprimant  $x$  et  $y$  en fonction du temps sont appelées les **équations horaires** ou **équations paramétriques** de la position du mobile.

La variation du vecteur position entre deux positions  $M_1$  et  $M_2$  du mobile est appelée **vecteur déplacement** et s'écrit :

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

#### ■ As-tu compris ?

3. Montrer que le vecteur déplacement entre deux positions  $M_1$  et  $M_2$  s'écrit :  $\Delta \vec{r} = \overrightarrow{M_1 M_2}$   
Représenter la trajectoire et les vecteurs utilisés sur une figure explicative.
4. Dans un repère cartésien  $(O, \vec{i}, \vec{j})$ , la position d'un point  $M$  est définie à chaque instant par :

$$\vec{r} \begin{vmatrix} x = 2t \\ y = 4t^2 + 3 \end{vmatrix}$$

- a. Déterminer les coordonnées du vecteur position du point  $M$  aux instants 0 s, 1 s, 2 s, 3 s, 4 s.
- b. Représenter la trajectoire de  $M$  entre  $t = 0$  et  $t = 4$  s.
- c. Déterminer l'équation de la trajectoire  $y = f(x)$  suivie par  $M$ .
- d. Déterminer les coordonnées du vecteur déplacement  $\Delta \vec{r} = \vec{r}_4 - \vec{r}_0$ . Représenter le vecteur  $\Delta \vec{r}$  sur la figure.

### 3.2 Vecteur vitesse

La vitesse d'un mobile renseigne sur la rapidité de son déplacement.

Soit un mobile qui passe à l'instant  $t_1$  par le point  $M_1$ , caractérisé par le vecteur position  $\vec{r}_1$  et à l'instant  $t_2 > t_1$  par le point  $M_2$ , caractérisé par le vecteur position  $\vec{r}_2$  :

Le **vecteur vitesse moyenne**  $\vec{v}_m$  d'un mobile est égal au quotient du vecteur déplacement  $\Delta\vec{r}$  par la durée nécessaire  $\Delta t$  :

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

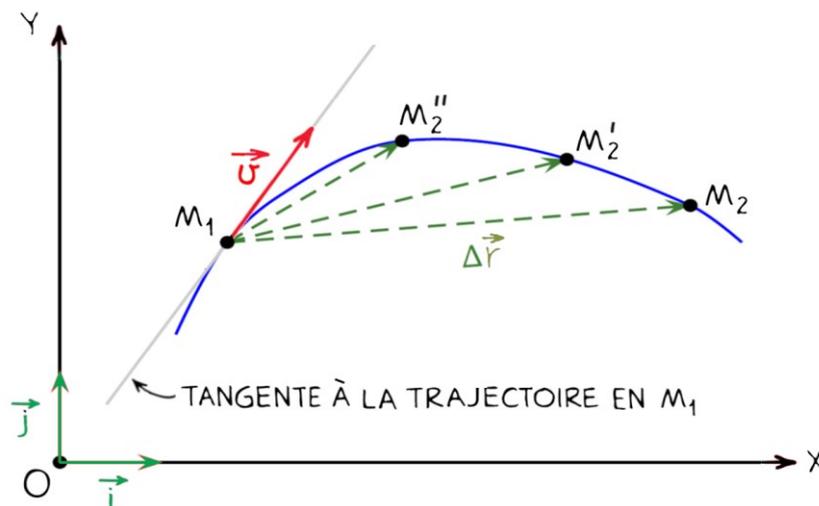
Le vecteur vitesse instantanée à un instant donné s'obtient en réduisant l'intervalle de temps  $\Delta t$  autant, qu'on puisse admettre que la vitesse reste constante au cours de cet intervalle de temps infiniment petit. Ceci entraîne que le vecteur déplacement  $\Delta\vec{r}$  devient également infinitésimal.

Le **vecteur vitesse instantanée**  $\vec{v}(t)$  est égal au vecteur vitesse moyenne au cours d'un intervalle de temps infinitésimal. Mathématiquement :

$$\vec{v}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

#### Caractéristiques de $\vec{v}(t)$

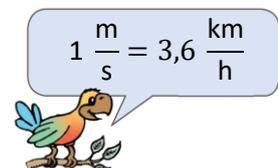
Lorsque  $\Delta t$  devient infinitésimal,  $t_2$  tend vers  $t_1$ , et  $M_2$  tend vers  $M_1$ . Le vecteur déplacement  $\Delta\vec{r}$  pivote autour de  $M_1$  et tend vers la tangente à la trajectoire au point  $M_1$ .



Puisque le vecteur vitesse  $\vec{v}$  est colinéaire et de même sens que le vecteur infinitésimal  $d\vec{r}$ , il a les caractéristiques suivantes :

1. *Point d'application* : le mobile  $M$
2. *Direction* : tangente à la trajectoire
3. *Sens* : celui du mouvement
4. *Intensité (norme, valeur)* : exprimée en m/s et notée  $\|\vec{v}\| = v$

Dans une voiture, la norme de la vitesse est indiquée par le tachymètre.

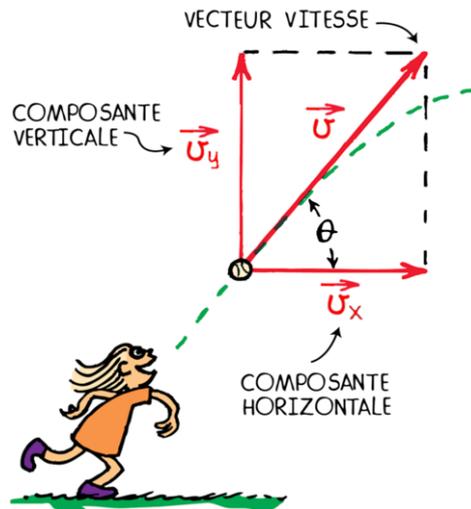


Coordonnées cartésiennes de  $\vec{v}(t)$

Dans le repère cartésien  $(O, \vec{i}, \vec{j})$ , le vecteur vitesse  $\vec{v}$  s'écrit :

$$\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} \quad \text{respectivement} \quad \vec{v} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} \quad \text{ou} \quad \vec{v} \begin{vmatrix} v_x \\ v_y \end{vmatrix}$$

$v_x$  et  $v_y$  sont appelées **coordonnées horizontale et verticale** du vecteur vitesse.



Les vecteurs  $\vec{v}_x = v_x \vec{i}$  et  $\vec{v}_y = v_y \vec{j}$  sont les **composantes horizontale et verticale** du vecteur vitesse.

La norme (intensité, valeur)  $v$  est donnée par la relation de Pythagore :

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

En notant  $\theta$  l'angle que le vecteur vitesse  $\vec{v}$  fait avec l'axe des abscisses on a :

$$\vec{v} \begin{vmatrix} v_x = v \cos \theta \\ v_y = v \sin \theta \end{vmatrix} \quad \text{et} \quad \tan \theta = \frac{v_y}{v_x}$$

### ■ As-tu compris ?

5. Dans un repère cartésien  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  le vecteur vitesse  $\vec{v}$  en un point  $M$  s'écrit :

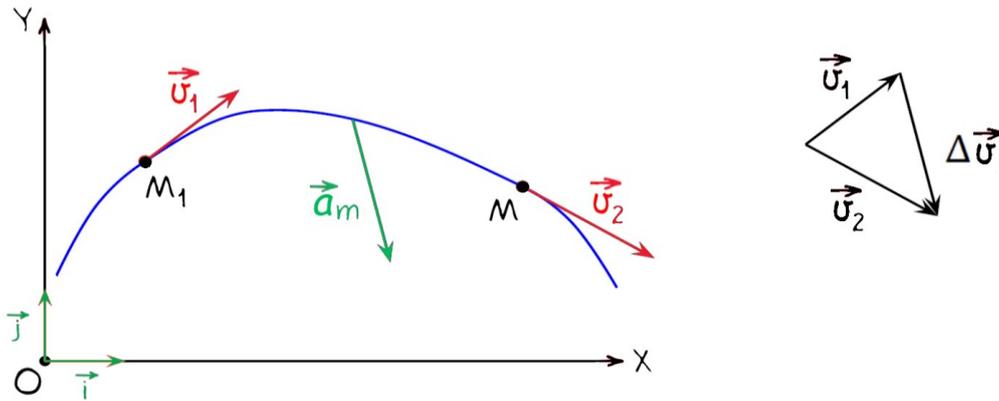
$$\vec{v} \begin{vmatrix} v_x = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ v_y = -40 \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{vmatrix}$$

- a. Représenter le vecteur vitesse en utilisant l'échelle  $1 \text{ cm} \leftrightarrow 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .
  - b. Calculer la norme de  $\vec{v}$ , ainsi que l'angle que fait  $\vec{v}$  avec l'axe des abscisses.
6. Un nageur veut traverser perpendiculairement une rivière de 30 m en nageant à une vitesse constante de 3 m/s. Le courant de l'eau l'entraîne vers la droite avec une vitesse de 2 m/s.
- a. Calculer sa vitesse résultante.
  - b. Calculer la durée de la traversée.
  - c. Calculer la distance parcourue lorsqu'il atteint l'autre côté de la rivière.

### 3.3 Vecteur accélération

L'accélération renseigne sur la variation du vecteur vitesse  $\vec{v}$  par unité de temps. Le vecteur vitesse  $\vec{v}$  ne peut pas seulement varier en norme, mais aussi en direction.<sup>1</sup>

Soit un mobile qui passe à l'instant  $t_1$  par le point  $M_1$ , où il possède la vitesse  $\vec{v}_1$ , et à l'instant  $t_2 > t_1$  par le point  $M_2$ , où il possède la vitesse  $\vec{v}_2$ .



Le **vecteur accélération moyenne**  $\vec{a}_m$  d'un mobile est égal au quotient de la variation du vecteur vitesse  $\Delta\vec{v}$  par la durée nécessaire  $\Delta t$  :

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

Le vecteur accélération à un instant donné s'obtient en réduisant l'intervalle de temps  $\Delta t$  autant, qu'on puisse admettre que l'accélération reste constante au cours de cet intervalle de temps infiniment petit. Ceci entraîne que le vecteur  $\Delta\vec{v}$  devient également infinitésimal.

Le **vecteur accélération instantanée**  $\vec{a}(t)$  est égal au vecteur accélération moyenne au cours d'un intervalle de temps infinitésimal. Mathématiquement :

$$\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Caractéristiques de  $\vec{a}$

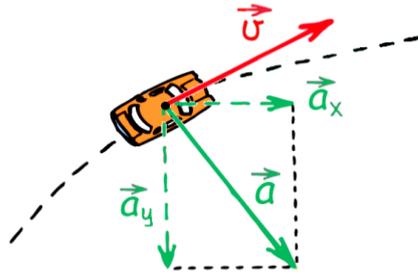
1. *Point d'application* : le mobile  $M$
2. *Direction* : celle de la variation infinitésimale  $d\vec{v}$  du vecteur vitesse
3. *Sens* : vers l'intérieur de la concavité de la trajectoire (voir figure page 8)
4. *Intensité (norme, valeur)* : exprimée en  $m/s^2$  et notée  $\|\vec{a}\| = a$

Coordonnées cartésiennes de  $\vec{a}$

Les coordonnées du vecteur accélération instantanée  $\vec{a}$  peuvent être exprimées dans le repère cartésien  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  :

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} \text{ respectivement } \vec{a} \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} \text{ ou } \vec{a} \begin{vmatrix} a_x \\ a_y \end{vmatrix}$$

<sup>1</sup> Le seul mouvement pour lequel  $\vec{v}$  reste constant est un mouvement rectiligne non accéléré, donc un MRU.



Les vecteurs  $\vec{a}_x = a_x \vec{i}$  et  $\vec{a}_y = a_y \vec{j}$  sont les **composantes horizontale et verticale** du vecteur accélération.

La norme  $a$  est donnée par la relation de Pythagore :  $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$

■ **As-tu compris ?**

7. Une voiture de course roule à vitesse constante sur un quart de cercle de rayon 300 m. Son compteur affiche 144 km/h.
  - a. Faire une figure et représenter le vecteur vitesse aux deux extrémités  $A$  et  $B$  du quart de cercle.
  - b. Construire le vecteur  $\Delta\vec{v}$ .
  - c. Calculer la durée nécessaire pour parcourir le quart de cercle.
  - d. Représenter le vecteur accélération moyenne en  $M$ , à mi-chemin entre  $A$  et  $B$ . Préciser sa direction, son sens et sa norme.
8. Dans un repère cartésien  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  le vecteur vitesse  $\vec{v}$  en un point  $M$  s'écrit :

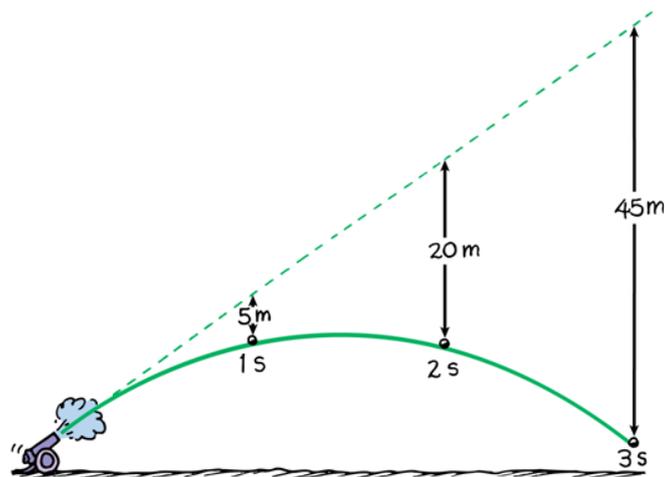
$$\vec{a} \left| \begin{array}{l} a_x = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\ a_y = -3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \end{array} \right.$$

- a. Représenter le vecteur accélération en utilisant l'échelle  $1 \text{ cm} \leftrightarrow 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ .
- b. Calculer la norme de  $\vec{v}$ , ainsi que l'angle que fait  $\vec{v}$  avec l'axe des abscisses.

## 4 Tir oblique

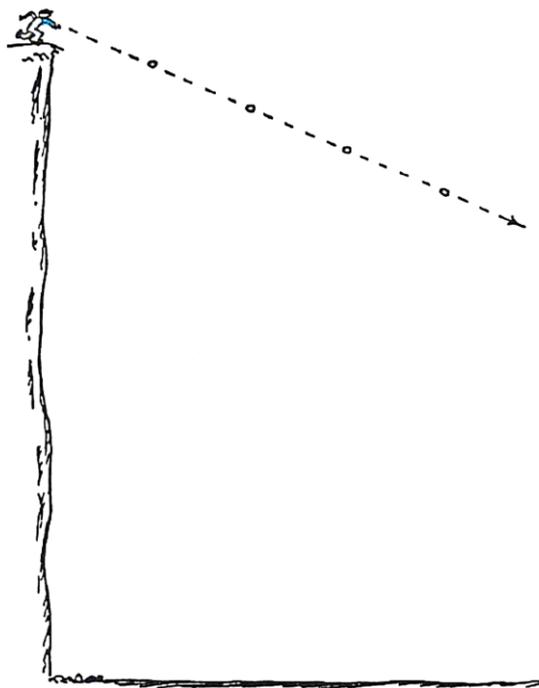
La figure ci-dessous montre un **tir oblique** d'un boulet de canon.

- Sans résistance de l'air, le boulet parcourt des distances horizontales identiques pendant des intervalles de temps égaux. En effet, aucune accélération n'a lieu dans la direction horizontale.
- La seule accélération est l'accélération de chute libre, qui est orientée verticalement vers le bas. Sans pesanteur, le boulet de canon suivrait la ligne pointillée, appelée **ligne de mire**. La distance verticale que le boulet tombe en dessous de la ligne de mire correspond à la hauteur sur laquelle il tomberait sans vitesse initiale pendant la même durée de temps. Cette hauteur est donnée par  $h = \frac{1}{2} g t^2$ , où  $t$  est la durée de chute libre.



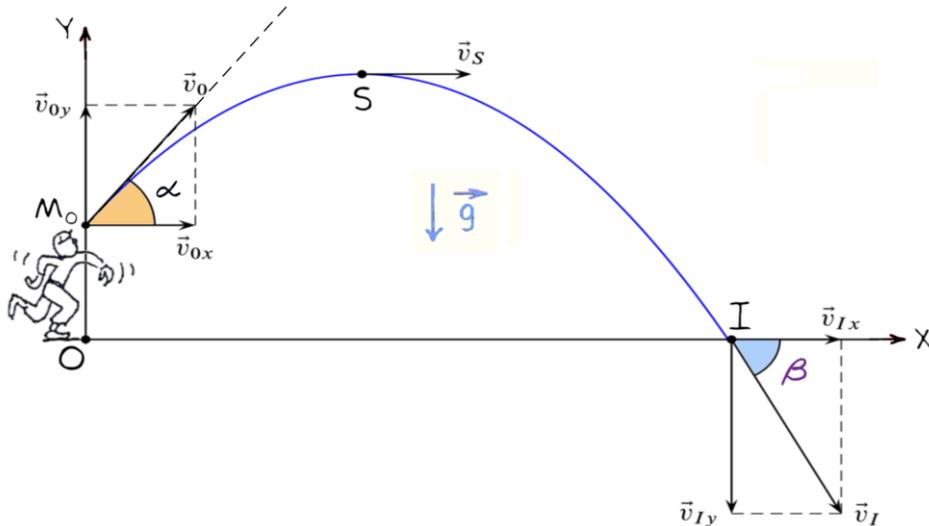
### ■ As-tu compris ?

9. Reprendre l'exercice 1 p. 3 dans le cas où la balle est lancée de manière oblique vers le bas.



## 4.1 Équations horaires du mouvement

Considérons un projectile de masse  $m$  lancé avec une vitesse initiale  $\vec{v}_0$  faisant un angle de tir  $\alpha$  avec l'horizontale. On étudie le mouvement du projectile dans le référentiel terrestre. On se sert d'un repère cartésien dont on convient que l'axe  $(Oy)$  passe par le point de lancement  $M_0(0 ; y_0)$ .



En notant  $\vec{r}(t = 0) = \vec{r}_0$  et  $\vec{v}(t = 0) = \vec{v}_0$ , les **conditions initiales** du mouvement sont :

$$\vec{r}_0 \left| \begin{array}{l} x_0 = 0 \\ y_0 \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \vec{v}_0 \left| \begin{array}{l} v_{0x} = v_0 \cos \alpha \\ v_{0y} = v_0 \sin \alpha \end{array} \right.$$

Vecteur accélération

$$\vec{a} \left| \begin{array}{l} a_x = 0 \quad (\text{MRU}) \\ a_y = -g \quad (\text{MRUV}) \end{array} \right.$$

Vecteur vitesse

- La vitesse horizontale du projectile est constante :  $v_x = v_{0x}$
- La vitesse verticale du projectile varie selon :  $\Delta v_y = a_y t \Leftrightarrow v_y = -g t + v_{0y}$

En tenant compte des conditions initiales, on obtient :

$$\vec{v} \left| \begin{array}{l} v_x = v_0 \cos \alpha \quad (1) \\ v_y = -g t + v_0 \sin \alpha \quad (2) \end{array} \right.$$

Vecteur position

- L'abscisse du projectile varie selon :  $\Delta x = v_{0x} t \Leftrightarrow x = v_{0x} t + x_0$
- Sans accélération, l'ordonnée du projectile varierait selon :  $\Delta y = v_{0y} t \Leftrightarrow y = v_{0y} t + y_0$

Or, en réalité, le projectile tombe une distance  $h = \frac{1}{2} g t^2$  en dessous de la ligne de mire. Ainsi :

$$y = -\frac{1}{2} g t^2 + v_{0y} t + y_0$$

En tenant compte des conditions initiales, on obtient :

$$\vec{r} \left| \begin{array}{l} x = v_0 \cos \alpha t \quad (3) \\ y = -\frac{1}{2} g t^2 + v_0 \sin \alpha t + y_0 \quad (4) \end{array} \right.$$

## 4.2 Équation cartésienne de la trajectoire

L'équation cartésienne de la trajectoire s'obtient en éliminant le paramètre temps dans les équations horaires du mouvement. En isolant le temps dans (3), on obtient :

$$t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha} \quad (5)$$

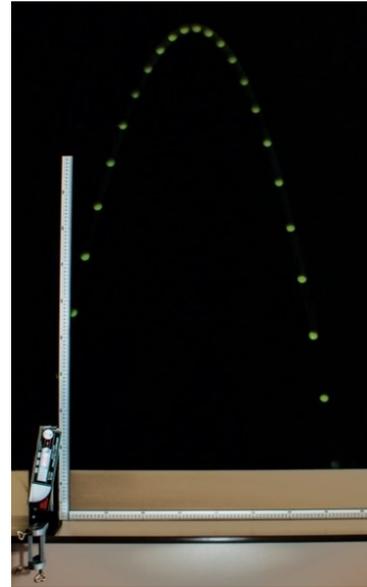
En remplaçant (5) dans (4), il vient :

$$y = -\frac{1}{2} g \left( \frac{x}{v_0 \cos \alpha} \right)^2 + v_0 \sin \alpha \left( \frac{x}{v_0 \cos \alpha} \right) + y_0$$

Finalement :

$$y = -\frac{g}{2 v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 + \tan \alpha x + y_0 \quad (6)$$

La trajectoire du tir oblique est un arc de **parabole concave**.



### Remarques

- Dans le cas  $\alpha = \pm 90^\circ$ , le tir est vertical. Dans le cas  $\alpha = 0^\circ$ , le tir est horizontal.
- En négligeant le frottement, la seule force extérieure qui agit sur le projectile est le poids  $\vec{P} = m \vec{g}$ . Le projectile se trouve donc en chute libre. D'après le PFD (Newton II) :

$$\vec{P} = m \vec{a}$$

$$m \vec{g} = m \vec{a}$$

$$\vec{a} = \vec{g}$$

Le mouvement du projectile est donc indépendant de la masse  $m$  du projectile.

## 4.3 Sommet de la trajectoire

On peut déterminer l'altitude  $y_S$  du sommet  $S$  de la trajectoire en partant du fait qu'au sommet la coordonnée  $v_{Sy} = 0$ . En remplaçant dans (2), on obtient :

$$0 = -g t_S + v_0 \sin \alpha \Leftrightarrow t_S = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$$

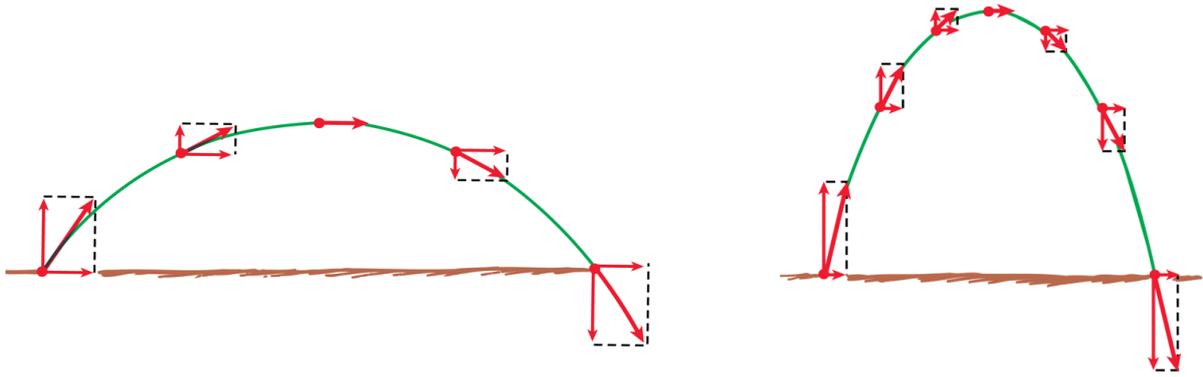
En insérant  $t_S$  dans (4), on obtient :

$$y_S = -\frac{1}{2} g \left( \frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right)^2 + v_0 \sin \alpha \left( \frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right) + y_0$$

$$y_S = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2 g} + y_0$$

Dans le cas où l'altitude initiale est nulle, l'altitude  $y_S$  du sommet s'écrit :

$$y_S = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2 g} \quad (y_0 = 0)$$



Lorsque le projectile est lancé avec une même vitesse initiale, mais avec un angle de tir plus grand, le sommet de la trajectoire est plus haut.

#### 4.4 Portée du tir dans le cas d'une trajectoire symétrique

La portée du tir correspond à la distance horizontale parcourue par le projectile. En supposant que l'abscisse initiale  $x_0 = 0$ , la portée du tir correspond à l'abscisse  $x_I$  du point d'impact  $I$ . Déterminons son expression dans le cas où la trajectoire est symétrique par rapport à la verticale qui passe par le sommet  $S$  de la trajectoire. L'ordonnée  $y_I$  du point d'impact est alors égale à l'ordonnée initiale  $y_0$ .

En remplaçant  $y = y_I = y_0$  dans l'équation (6), il vient :

$$0 = -\frac{g}{2 v_0^2 \cos^2 \alpha} x_I^2 + \tan \alpha x_I$$

$$0 = x_I \left( -\frac{g}{2 v_0^2 \cos^2 \alpha} x_I + \tan \alpha \right)$$

$$x_I = 0 \text{ (à rejeter, car point de lancement)} \quad \text{ou} \quad x_I = \frac{2 v_0^2 \cos \alpha \sin \alpha}{g}$$

En utilisant la relation trigonométrique  $2 \cos \alpha \sin \alpha = \sin(2\alpha)$ , on obtient :

$$x_I = \frac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{g} \quad (7)$$

Remarques

- Puisque la trajectoire est symétrique, on a :  $x_I = 2x_S$
- La position d'impact  $x_I$  est maximale si :

$$\sin(2\alpha) = 1$$

Ainsi, pour une vitesse initiale  $v_0$  donnée, la portée est maximale pour un angle de tir  $\alpha = 45^\circ$ .

- La relation (7) nous permet de calculer l'angle de tir  $\alpha$  pour une vitesse initiale  $v_0$  donnée :

$$\sin(2\alpha) = \frac{g x_I}{v_0^2}$$

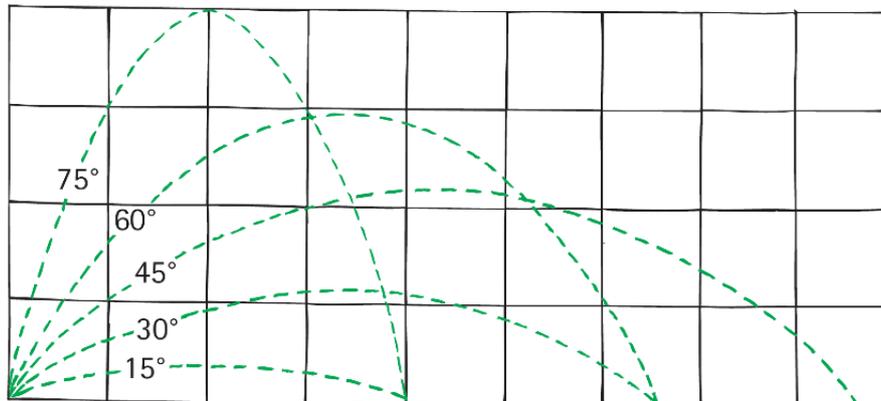
Cette équation admet deux solutions, à savoir :

$$2\alpha_1 \text{ et } 2\alpha_2 = 180^\circ - 2\alpha_1$$

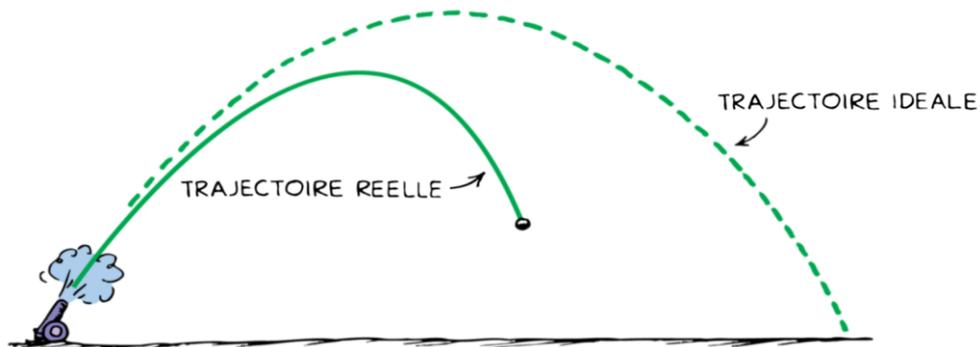
Le deuxième angle de tir possible vaut :

$$\alpha_2 = 90^\circ - \alpha_1$$

Ainsi, pour une vitesse initiale  $v_0$  donnée, une même position d'impact  $x_I$  est atteinte pour deux angles de tir différents, à savoir  $\alpha_1$  et  $\alpha_2 = 90^\circ - \alpha_1$ . Ces 2 angles sont **complémentaires**.



- Si le frottement n'est pas négligeable, la trajectoire du mouvement n'est plus parabolique. Le sommet de la trajectoire et la portée du tir sont inférieurs à ceux déterminés dans le cas idéal.



#### 4.5 Angle d'impact

L'angle d'impact  $\beta$  est déterminé à partir des composantes du vecteur vitesse en  $I$  (voir figure p.10) :

$$\beta = \arctan\left(\frac{v_{Iy}}{v_{Ix}}\right) = \arctan\left(\frac{-g t_I + v_0 \sin \alpha}{v_0 \cos \alpha}\right)$$

où le temps de vol jusqu'au point d'impact  $I$  est donné par (5) :

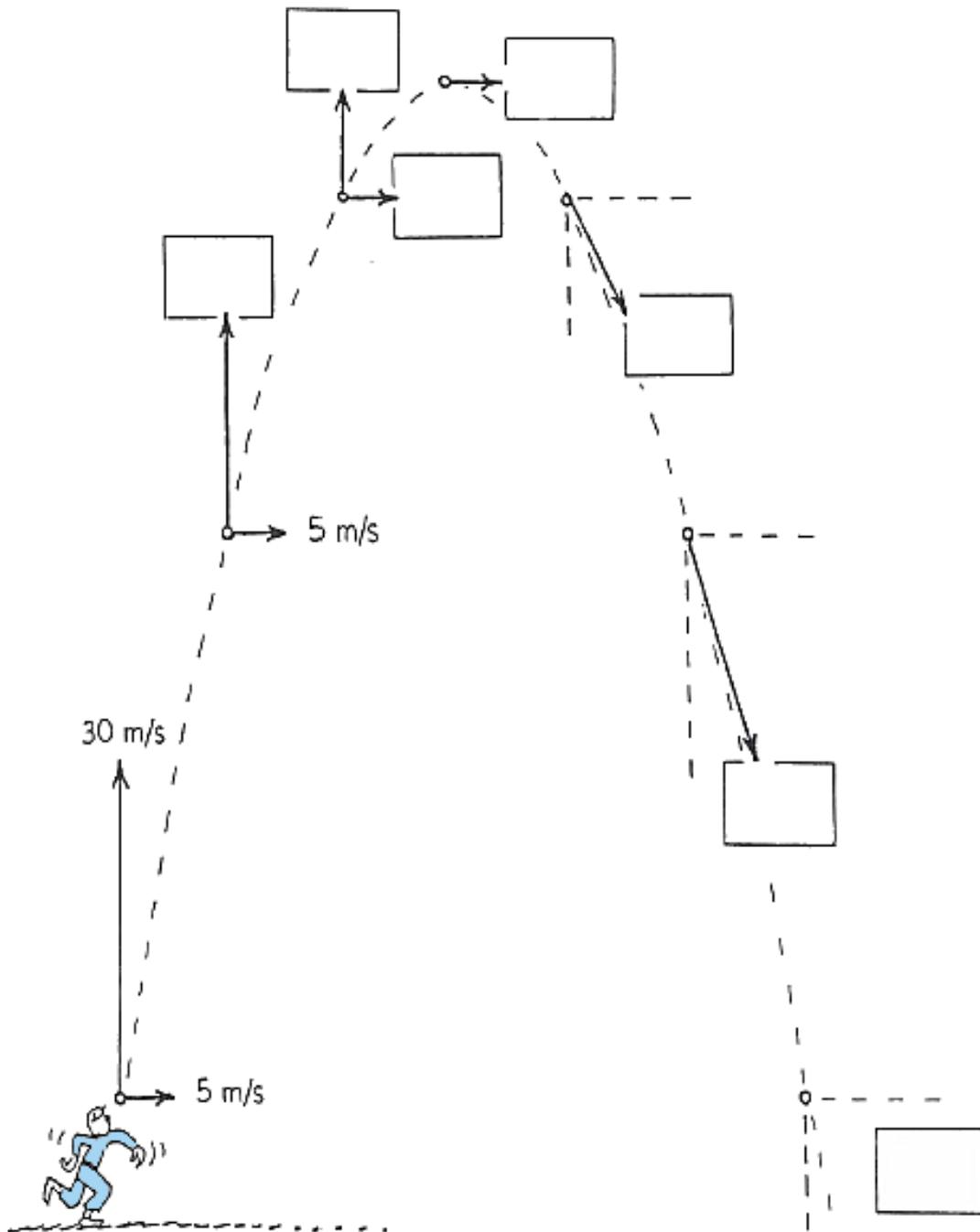
$$t_I = \frac{x_I}{v_0 \cos \alpha}$$

#### ■ As-tu compris ?

- 10.** Une balle de golf est tirée sur un terrain parfaitement horizontal.
- Indiquer les coordonnées du vecteur accélération de la balle durant le vol.
  - Indiquer la position où la vitesse de la balle est minimale respectivement maximale.
  - Comparer la durée du mouvement ascendant à la durée du mouvement descendant. Justifier.
  - Comparer la vitesse d'impact et la vitesse de tir. Justifier.

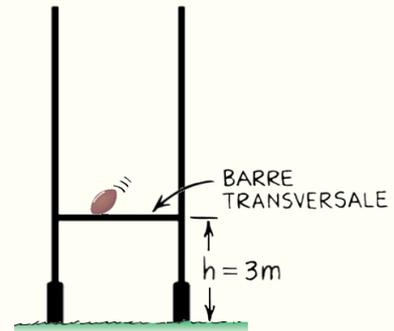
11. La position d'une balle lancée est illustrée à des intervalles de temps réguliers de 1 s. La résistance de l'air est négligée.

- Remplir les cases avec les valeurs des composantes de la vitesse lors de la montée et la valeur de la vitesse lors de la descente. Utiliser la valeur approximative  $g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ .
- Représenter le vecteur vitesse et ses composantes horizontales et verticales aux différentes positions.



### Exercice résolu

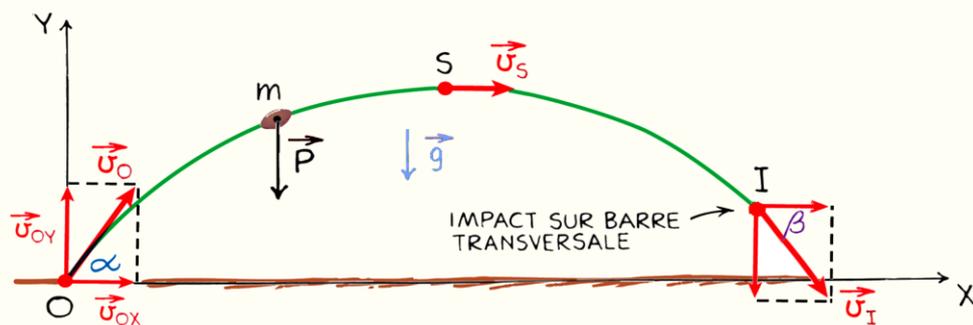
**Énoncé :** Afin de tenter une pénalité, un joueur de rugby place le ballon de masse 450 g sur le sol à 35 m des poteaux. Pour réussir son tir, le ballon doit passer au-dessus de la barre transversale se trouvant à une hauteur de 3 m au-dessus du sol. Le joueur frappe le ballon avec un angle de tir de  $35^\circ$ , mais rate la pénalité, car le ballon frappe la barre transversale.



1. Donner les conditions nécessaires afin d'étudier le mouvement du ballon.
2. Tracer la trajectoire du ballon à partir du point de lancement jusqu'au point d'impact avec la barre, puis représenter le vecteur vitesse  $\vec{v}_I$  du centre d'inertie du ballon à l'instant d'impact au point  $I$ , ainsi que le vecteur vitesse  $\vec{v}_S$  au sommet de la trajectoire.
3. Écrire les coordonnées du vecteur accélération  $\vec{a}$  dans un repère cartésien et préciser les conditions initiales.
4. Donner les équations horaires de vitesse et de la position du centre d'inertie du ballon et en déduire l'équation cartésienne de sa trajectoire.
5. Calculer l'intensité de la vitesse initiale  $v_0$  du ballon.
6. Déterminer la durée du vol du ballon jusqu'à l'impact.
7. Déterminer le sommet  $S$  de la trajectoire.
8. Calculer la norme de  $\vec{v}_I$  et déterminer l'angle  $\beta$  que  $\vec{v}_I$  fait avec l'horizontale.

**Solution :**

1. Le ballon de rugby est supposé ponctuel (centre d'inertie du ballon). On néglige les frottements.
2. La trajectoire est un arc de parabole qui commence en  $O$  et se termine en  $I$ .



3. Dans le repère cartésien choisi, les coordonnées du vecteur accélération sont :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases}$$

Les conditions initiales du mouvement sont les suivantes :

$$\vec{r}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \vec{v}_0 \begin{cases} v_{0x} = v_0 \cos \alpha \\ v_{0y} = v_0 \sin \alpha \end{cases}$$

4. En tenant compte des conditions initiales, on trouve les équations horaires de la vitesse  $\vec{v}$  et de la position  $\vec{r}$  :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \cos \alpha & (1) \\ v_y = -g t + v_0 \sin \alpha & (2) \end{cases}$$

$$\vec{r} \begin{cases} x = v_0 \cos \alpha t & (3) \\ y = -\frac{1}{2} g t^2 + v_0 \sin \alpha t & (4) \end{cases}$$

On isole le temps de (3) :

$$t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha} \quad (5)$$

En remplaçant dans (4), on obtient l'équation cartésienne de la trajectoire :

$$\begin{aligned} y &= -\frac{1}{2} g \left( \frac{x}{v_0 \cos \alpha} \right)^2 + v_0 \sin \alpha \left( \frac{x}{v_0 \cos \alpha} \right) \\ &= -\frac{g}{2 v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 + \tan \alpha x \quad (6) \end{aligned}$$

5. Le point  $I(x = 35 \text{ m} ; y = 3 \text{ m})$  appartient à la trajectoire.

On isole  $v_0$  de (6) :

$$\begin{aligned} \frac{g}{2 v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 &= \tan \alpha x - y \\ 2 v_0^2 \cos^2 \alpha &= \frac{g x^2}{\tan \alpha x - y} \\ v_0 &= \sqrt{\frac{g x^2}{2 \cos^2 \alpha (\tan \alpha x - y)}} \end{aligned}$$

A.N. :

$$v_0 = \sqrt{\frac{9,81 \cdot 35^2}{2 \cdot \cos^2 35^\circ \cdot (\tan 35^\circ \cdot 35 - 3,00)}} = 20,40 \text{ m/s}$$

6. A.N. de l'équation (5) :

$$t_I = \frac{35}{20,40 \cdot \cos 35^\circ} = 2,09 \text{ s}$$

7. Le projectile est lancé à partir du sol. L'altitude  $y_S$  du sommet s'écrit :

$$y_S = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2 g}$$

A.N. :

$$y_S = \frac{20,40^2 \cdot (\sin 35^\circ)^2}{2 \cdot 9,81} = 6,98 \text{ m}$$

8. On a :

$$\vec{v}_I \begin{cases} v_{Ix} = v_0 \cos \alpha = 20,40 \cdot \cos 35^\circ = 16,71 \text{ m/s} \\ v_{Iy} = -g t_I + v_0 \sin \alpha = -9,81 \cdot 2,09 + 20,40 \cdot \sin 35^\circ = -8,80 \text{ m/s} \end{cases}$$

Norme :

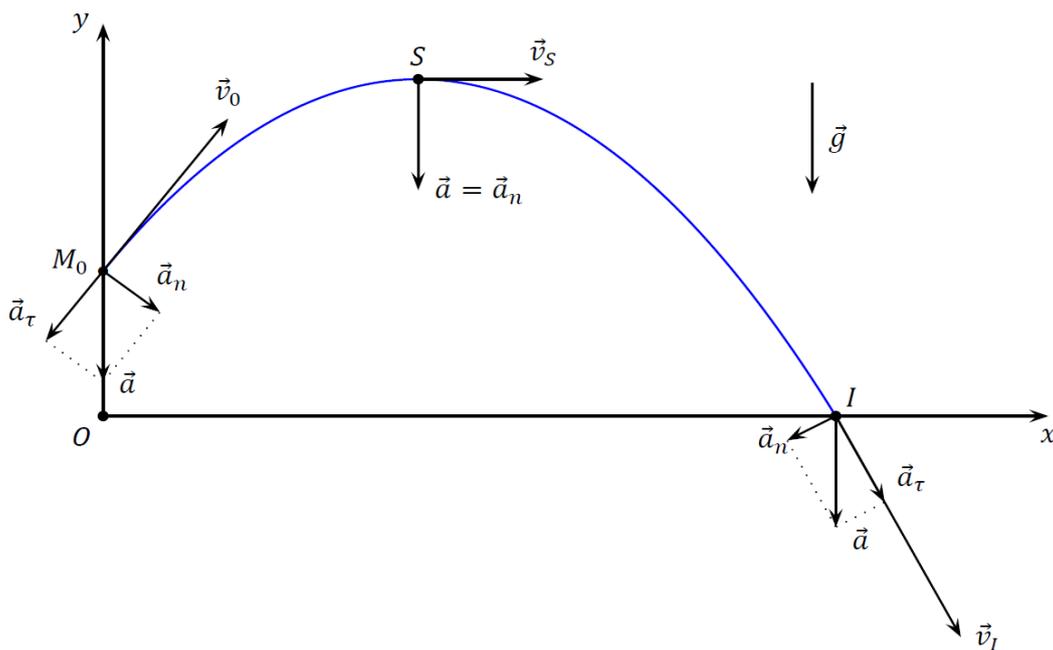
$$v_I = \sqrt{16,71^2 + (-8,80)^2} = 18,89 \text{ m/s}$$

Angle au point I :

$$\beta = \arctan\left(\frac{v_{Iy}}{v_{Ix}}\right) = \arctan\left(\frac{-8,80}{16,71}\right) = -27,8^\circ$$

## 5 Accélération tangentielle et accélération normale

Le vecteur accélération instantanée  $\vec{a}$  a en général une composante tangentielle  $\vec{a}_\tau$  au mouvement (colinéaire au vecteur vitesse  $\vec{v}$ ) et une composante normale  $\vec{a}_n$  au mouvement (perpendiculaire au vecteur vitesse  $\vec{v}$ ), comme illustré ci-après pour le tir oblique.



### 5.1 Accélération tangentielle

L'**accélération tangentielle**  $\vec{a}_\tau$  renseigne sur la variation de la valeur de la vitesse.

- Si  $\vec{a}_\tau = \vec{0}$ , alors le vecteur accélération n'a pas de composante dans la direction du vecteur vitesse ; la norme de la vitesse a atteint un maximum ou un minimum ou elle reste constante. (*MU*)
- Si  $\vec{a}_\tau$  pointe dans le sens du mouvement (c.-à-d. si  $\vec{a}_\tau$  et  $\vec{v}$  ont même sens), la norme de la vitesse augmente. (*mouvement accéléré*)
- Si  $\vec{a}_\tau$  pointe dans le sens opposé du mouvement (c.-à-d. si  $\vec{a}_\tau$  et  $\vec{v}$  sont de sens opposés), la norme de la vitesse diminue. (*mouvement décéléré*)

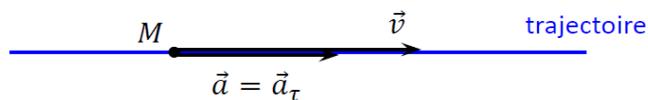
## 5.2 Accélération normale

L'**accélération normale**  $\vec{a}_n$  renseigne sur la variation de la direction de la vitesse.

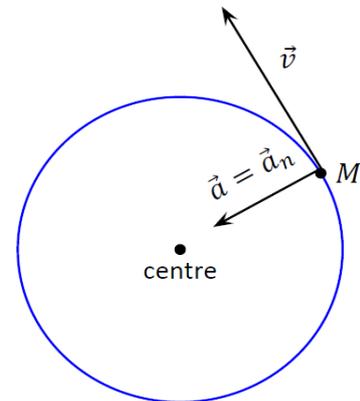
- Si  $\vec{a}_n = \vec{0}$ , alors le vecteur accélération n'a pas de composante perpendiculaire à la direction du vecteur vitesse et la direction de la vitesse reste constante. Le mouvement est donc *rectiligne*.
- Si  $\vec{a}_n \neq \vec{0}$ , alors la direction du vecteur vitesse change et le mouvement est *curviligne*. Pour une valeur de vitesse donnée, l'accélération normale est d'autant plus grande que la trajectoire est incurvée.

## 5.3 Cas particuliers

- Lors d'un MRUV l'accélération n'a qu'une composante tangentielle puisque seule la norme de la vitesse varie, la direction de la vitesse demeurant constante :

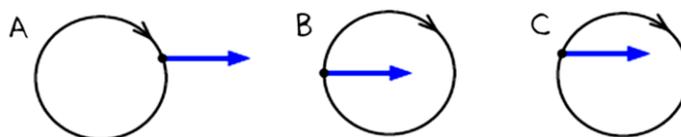


- Lors d'un mouvement circulaire uniforme (MCU) l'accélération n'a qu'une composante normale puisque seule la direction de la vitesse varie, la norme de la vitesse demeurant constante.



### ■ As-tu compris ?

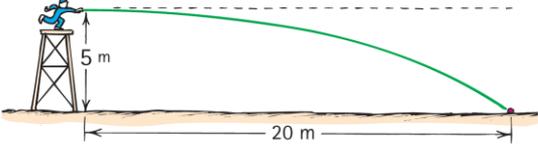
- Quelle commande d'une voiture permet de réaliser ...
  - une accélération tangentielle  $\vec{a}_t$  dans le sens du mouvement ?
  - une accélération tangentielle  $\vec{a}_t$  dans le sens opposé du mouvement ?
  - une accélération normale  $\vec{a}_n$  ?
- Que peut-on déduire sur l'évolution de la valeur de la vitesse à partir de l'accélération tangentielle  $\vec{a}_t$  aux points  $M_0, S$  et  $I$  du tir oblique illustré page 17 ?
- On propose trois trajectoires circulaires avec un vecteur accélération hypothétique :



- Expliquer qu'un seul des mouvements est impossible.
- En supposant que les accélérations tangentielle et normale ne varient pas en intensité, préciser la nature des deux autres mouvements.

## 6 Exercices

### Tir horizontal

- Une fille est assise dans un train qui roule en MRU. Elle laisse tomber une bille.
  - Quelle est la trajectoire de la bille du point de vue de la fille ?
  - Quelle est la trajectoire de la bille du point de vue d'un observateur qui se trouve sur le quai et voyant passer le train ?
- On lâche un paquet d'un hélicoptère qui vole horizontalement et à vitesse constante. La résistance de l'air est négligée. Où le paquet va-t-il toucher le sol dans le référentiel de l'hélicoptère ?
- Avec quelle vitesse horizontale l'enfant doit-il lancer la balle pour qu'elle effectue la trajectoire illustrée ? Négliger la résistance de l'air et utiliser  $g = 10 \frac{m}{s^2}$ .
- Une bille roule avec une vitesse  $v_0$  sur une table horizontale de hauteur  $y_0 = 1,10$  m. Arrivée au bord de la table, elle effectue une trajectoire de telle façon qu'elle tombe sur le sol à une distance de 1,8 m du pied de la table.
  - Calculer la durée de vol de la bille.
  - En déduire la vitesse initiale  $v_0$  de la bille.
- Un spectateur immobile sur le bord d'un canal voit passer vers la droite un bateau en mouvement rectiligne uniforme et de vitesse  $v_0$ . Du haut du mât du bateau, un marin laisse tomber une bille en chute libre d'une hauteur  $y_0 = 8$  m afin qu'elle tombe sur la coque du bateau.
  - Quelle est la forme de la trajectoire de la bille dans le référentiel du marin ?
  - Quelle est la forme de la trajectoire de la bille dans le référentiel du spectateur immobile ?
  - Calculer la durée de chute de la bille.
  - Le spectateur sur le bord du canal voit qu'entre le moment où le marin a lâché la bille et le moment qu'elle touche la coque bateau, ce dernier a avancé de 6 m. En déduire la vitesse  $v_0$ .

### Grandeurs cinématiques vectorielles

- Dans un repère cartésien, la position d'un point  $M$  est définie à chaque instant par :

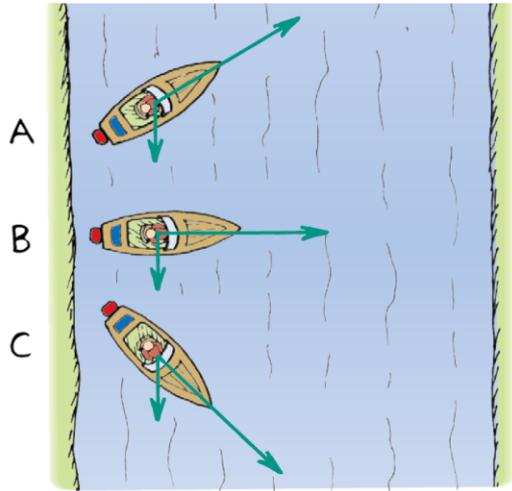
$$\vec{r} \begin{cases} x = t + 1 \\ y = -\frac{1}{2}t^2 + 2t + 3 \end{cases}$$

- Déterminer les coordonnées du vecteur position du point  $M$  aux instants 0 s, 1 s, 2 s, 3 s, 4 s.
  - Représenter la trajectoire de  $M$  entre  $t = 0$  et  $t = 5$  s.
  - Déterminer l'équation de la trajectoire  $y = f(x)$  suivie par  $M$ .
  - Déterminer les coordonnées du vecteur déplacement  $\Delta\vec{r} = \vec{r}_4 - \vec{r}_0$ . Représenter le vecteur  $\Delta\vec{r}$  sur la figure.
- Dans un repère cartésien, le vecteur vitesse  $\vec{v}$  d'un point mobile  $M$  s'écrit :

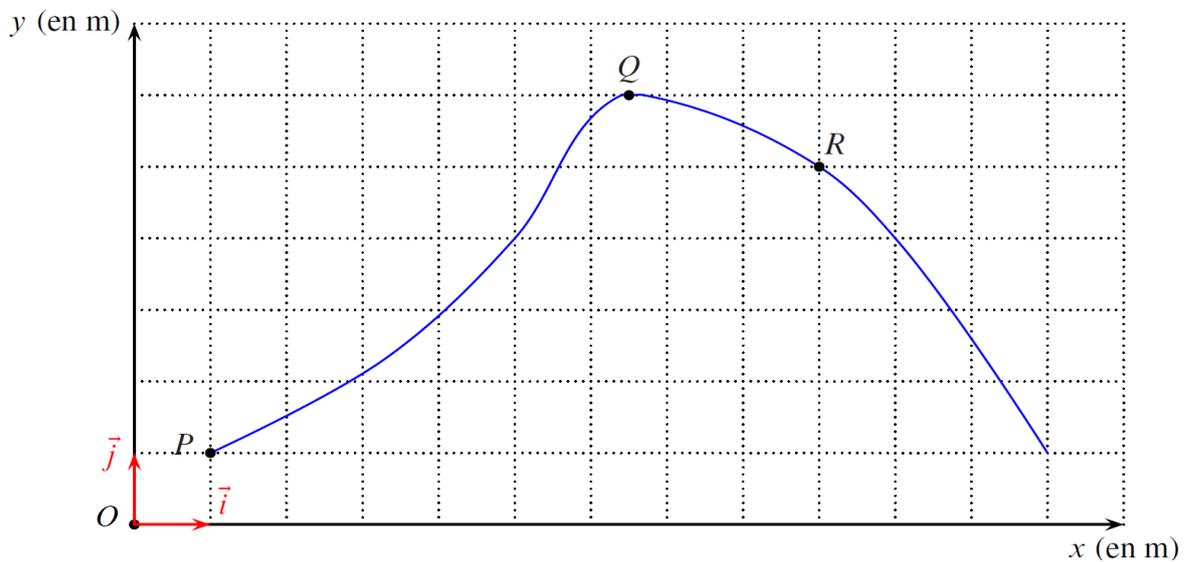
$$\vec{v} \begin{cases} v_x = 12 \frac{m}{s} \\ v_y = -16 \frac{m}{s} \end{cases}$$

Calculer la norme du vecteur vitesse en km/h, ainsi que l'angle  $\theta$  que fait  $\vec{v}$  avec l'axe des abscisses.

8. Sur la figure ci-contre, trois bateaux à moteur identiques traversent un fleuve.
- Construire le vecteur vitesse de chaque bateau.
  - Quel bateau a la plus grande norme de vitesse ?
  - Quel bateau emprunte le chemin le plus court à travers le fleuve ? Justifier.
  - Quel bateau atteindra le bord du fleuve en premier ? Justifier.



9. Un mobile passe par les points P, Q et R de sa trajectoire aux dates  $t_P = 0$ ,  $t_Q = 5$  s et  $t_R = 7$  s.



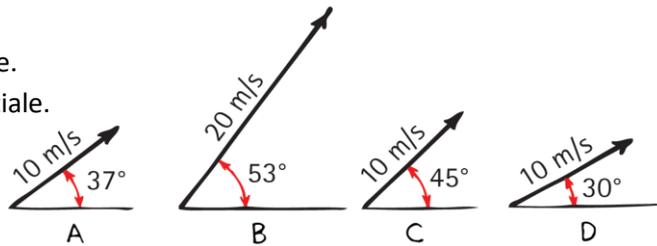
- Déterminer les coordonnées du vecteur position aux point P, Q et R.
  - Déterminer graphiquement les coordonnées du vecteur vitesse instantanée aux point P, Q et R, sachant que  $v_P = 20 \frac{m}{s}$ ,  $v_Q = 10 \frac{m}{s}$  et  $v_R = 15 \frac{m}{s}$ . (Échelle à utiliser :  $1 \text{ cm} \leftrightarrow 5 \frac{m}{s}$ )
10. Dans un repère cartésien, le vecteur accélération  $\vec{a}$  d'un point mobile  $M$  s'écrit :

$$\vec{a} \left| \begin{array}{l} a_x = -3 \frac{m}{s^2} \\ a_y = -4 \frac{m}{s^2} \end{array} \right.$$

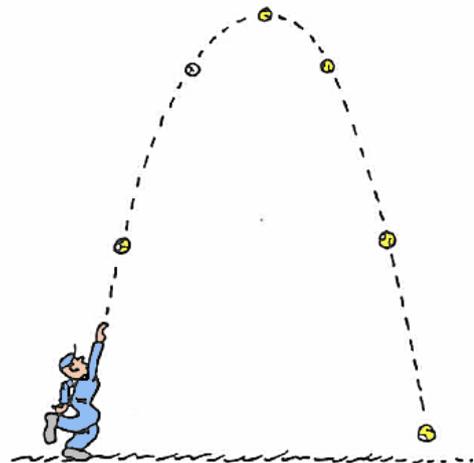
Calculer la norme du vecteur accélération.

## Tir oblique

11. Compléter la phrase : En l'absence d'air, l'accélération horizontale d'un projectile est ...
12. Une balle est lancée avec un angle de tir de  $45^\circ$ . Au moment du lancement, ...
- A. les coordonnées horizontale et verticale de la vitesse sont égales.
  - B. la coordonnée horizontale de la vitesse est plus grande que la coordonnée verticale.
  - C. la coordonnée verticale de la vitesse est plus grande que la coordonnée horizontale.
13. Des balles sont lancées avec les normes de vitesses et les angles de tir illustrés. Classer par ordre croissant les coordonnées...
- a. ... verticales du vecteur vitesse initiale.
  - b. ... horizontales du vecteur vitesse initiale.



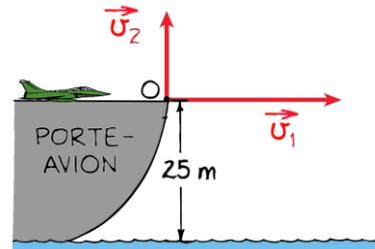
14. Représenter sur la figure le poids de la balle (en vert) et le vecteur vitesse (en rouge) aux positions illustrées.
- a. Quelle coordonnée de la vitesse reste constante lors du mouvement ? Pourquoi ?
  - b. Quelle coordonnée de la vitesse change lors du mouvement ? Pourquoi ?



15. Sur un terrain horizontal, deux golfeurs frappent une balle avec la même norme de vitesse initiale, mais l'un avec un angle de tir de  $60^\circ$ , l'autre avec un angle de tir de  $30^\circ$ . Laquelle des deux balles va atterrir plus loin ? Laquelle va toucher le sol la première ? Ignorer les effets de l'air.
16. Vrai ou faux ? Justifier.  
« Pour un tir oblique dans le champ de pesanteur terrestre, il existe toujours un point de la trajectoire où le vecteur vitesse est perpendiculaire au vecteur accélération. »
17. Deux obus de masses différentes  $m_1$  et  $m_2$  ( $m_1 < m_2$ ), sont tirés avec la même norme de vitesse initiale et le même angle de tir. Comparer les hauteurs maximales atteintes et les portées horizontales des deux trajectoires.
18. Un tireur au fusil souhaite toucher une cible se trouvant à une distance de 170 m en tirant une balle avec une vitesse initiale de 450 m/s. Les effets de l'air sont négligés.
- a. Sous quel angle de tir le tireur doit-il tenir son fusil pour toucher la cible qui se trouve à la même hauteur que le fusil ? On ignore les effets de l'air.
  - b. À quelle distance verticale au-dessus de la cible se trouve le point que le tireur doit viser s'il veut toucher la cible ?

19. Dans le concours du lancer de poids, un athlète a lancé la boule à une distance  $d = 21,09$  m. À l'instant  $t = 0$ , correspondant à l'instant du lancer, la boule se trouve à une hauteur  $h = 2$  m au-dessus du sol et part avec une vitesse initiale  $\vec{v}_0$  faisant un angle  $\alpha = 45^\circ$  avec l'axe horizontal. Le poids est assimilé à un objet ponctuel.
- Etablir les équations horaires et l'équation cartésienne de la trajectoire.
  - Calculer la valeur de la vitesse initiale.
  - Combien de temps la boule reste-t-elle dans les airs ?
  - Calculer la hauteur maximale atteinte par la boule au cours de sa trajectoire.

20. Un bombardier part d'un porte-avion. Arrivé en O, il a une vitesse horizontale de norme  $v_1 = 180$  km/h et alors le pilote actionne par erreur son siège éjectable et se voit propulsé dans l'air avec une vitesse initiale verticale de norme  $v_2 = 72$  km/h.

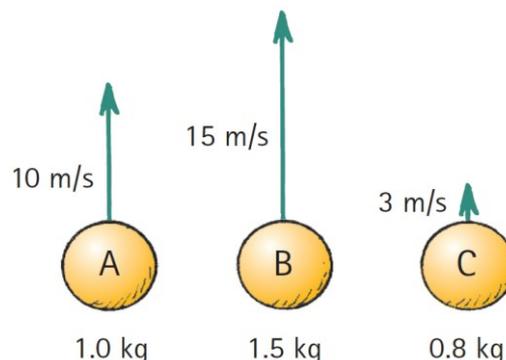


- Calculer la norme de la vitesse résultante en O et son angle avec l'horizontale.
- Si le point de départ se trouve à une hauteur de 25 m au-dessus de l'eau, calculer la distance horizontale entre le point de départ O et le point d'impact sur l'eau (son parachute ne s'est pas ouvert et on suppose les frottements nuls).
- Calculer la durée de son vol et la vitesse du pilote à l'impact sur l'eau.

21. Un joueur de fléchettes veut lancer sa fléchette dans la zone du triple 20 pour obtenir le maximum possible de 60 points. Cette zone se trouve à une hauteur de 1,83 m du sol. Lors des entraînements, des mesures ont montré que le joueur lâche ses fléchettes à la hauteur de son œil, situé à 1,70 m du sol, avec un angle de tir de  $23^\circ$  avec l'horizontale. La fléchette est considérée comme une masse ponctuelle et la résistance de l'air est négligeable.

- Faire une figure de la situation et donner les équations horaires du mouvement de la fléchette. En déduire l'équation cartésienne de la trajectoire.
- Sachant qu'initialement la fléchette se trouve à une distance horizontale de 2,10 m de la cible, déterminer la norme de la vitesse initiale pour que le joueur réussisse son tir.
- Sachant que la fléchette est lancée avec une vitesse initiale de norme 20,85 km/h, calculer la norme de la vitesse d'impact de la fléchette sur la cible.
- Calculer l'angle d'impact de la fléchette par rapport à la cible. Indiquer cet angle sur un schéma.

22. Les trois balles sont lancées verticalement vers le haut avec les vitesses initiales indiquées. La résistance de l'air est négligée. Calculer les vitesses instantanées des balles après 1 s.



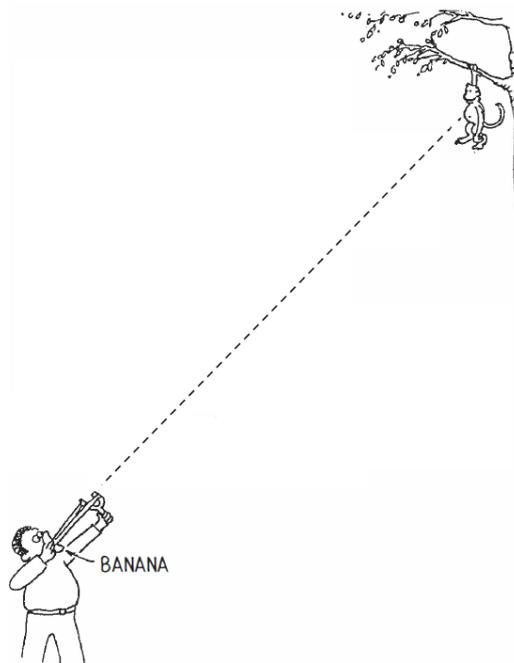
23. Robin des Bois tire une flèche verticalement vers le haut. La norme de la vitesse initiale de la flèche vaut 30 m/s. La résistance de l'air est négligée.

- Après combien de temps la flèche atteint-elle le sommet de sa trajectoire ?
- Calculer la hauteur maximale atteinte par la flèche.
- Quelle est l'accélération de la flèche au sommet de sa trajectoire ?
- Calculer la vitesse instantanée de la flèche après 5 s.
- Calculer la hauteur de la flèche après 5 s.



24. *Facultatif* : Le gardien du zoo veut tirer une banane vers un singe accroché à la branche d'un arbre, à 20 m à vol d'oiseau (ligne droite du lance-pierre au singe). Il vise le singe, la ligne de mire faisant alors un angle de  $30^\circ$  avec l'horizontale. Dès que la banane quitte le lance-pierre, le singe lâche prise et tombe. On néglige tout frottement.

- Donner les équations horaires de la banane et du singe dans un repère cartésien.
- Montrer que la banane va atteindre le singe indépendamment de la norme de la vitesse initiale (à condition que la rencontre puisse avoir lieu avant que le singe n'atteigne le sol).
- Calculer le temps entre le tir et le choc ainsi que la hauteur du choc si la banane part avec une vitesse initiale de 20 m/s.
- Que se passerait-il si la banane partait avec une vitesse initiale plus grande ?
- Qu'est ce qui changerait si le gardien et le singe se trouvaient sur la Lune ? Justifier.

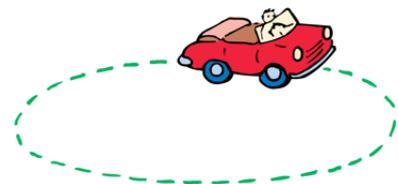


### Accélération tangentielle et accélération normale

25. Une voiture effectue un mouvement circulaire uniforme. Faire une figure et représenter les vecteurs vitesse et accélération de la voiture

26. Décrire une situation dans laquelle un corps a ...

- uniquement une accélération tangentielle.
- uniquement une accélération normale.
- à la fois une accélération normale et une accélération tangentielle.



## Révision

A. Un savon glisse sans frottement sur une table horizontale et tombe de son bord. Si l'on reproduisait cette même expérience sur la Lune avec une vitesse initiale identique,

a. le temps de chute du savon serait

A. identique

B. plus grande

C. plus petite

b. la portée serait

A. identique

B. plus grande

C. plus petite

B. Répondre par vrai ou faux dans le cas d'un **tir oblique**.

	Affirmation	Vrai	Faux
1	L'intensité du vecteur accélération est constante.		
2	L'intensité du vecteur accélération ne dépend pas de la masse du projectile.		
3	La durée de vol dépend de la masse du corps.		
4	La durée de vol dépend de l'angle de tir.		
5	La norme du vecteur vitesse varie pendant le mouvement.		
6	L'énergie potentielle de pesanteur du corps varie pendant le mouvement.		
7	L'énergie cinétique du corps varie pendant le mouvement.		
8	L'énergie mécanique du corps varie pendant le mouvement.		
9	La projection horizontale du mouvement est un mouvement uniforme.		
10	La projection verticale du mouvement est un mouvement uniforme.		

C. Un corps de masse  $m$  est lancé à  $t = 0$  s d'une certaine hauteur  $h_0 = 2$  m, avec une vitesse initiale  $v_0 = 10 \frac{m}{s}$  sous un angle  $\alpha = 60^\circ$  par rapport à l'horizontale et frappe le sol à une position d'impact tel que  $y_I = 0$ . Indiquer l'affirmation qui est correcte :

a. La vitesse au sommet est égale à...

A.  $0 \frac{m}{s}$

B.  $5 \frac{m}{s}$

C.  $8,7 \frac{m}{s}$

D.  $10 \frac{m}{s}$

E. Aucune des réponses

b. La vitesse d'impact...

A.  $v_I < 10 \frac{m}{s}$

B.  $v_I = 10 \frac{m}{s}$

C.  $v_I > 10 \frac{m}{s}$

c. La durée du mouvement ascendant est...

A. inférieure à la durée du mouvement descendant

B. égale à la durée du mouvement descendant

C. supérieure à la durée du mouvement descendant

d. La hauteur du sommet  $y_S$  est égale à...

A. 3,00 m

B. 3,27 m

C. 5,82 m

D. 7,10 m

E. Aucune des réponses

e. La coordonnée tangentielle du vecteur accélération  $a_\tau$  est nulle...

- A. à l'instant initial
- B. au sommet
- C. lors de l'impact
- D. toujours pendant le mouvement
- E. jamais pendant le mouvement

f. La norme de la vitesse d'impact dépend de...

	Vrai	Faux
• L'intensité de la vitesse initiale $\vec{v}_0$		
• L'angle de tir $\alpha$		
• La hauteur initiale $h_0$		
• La masse du corps $m$		

g. La durée de vol dépend de...

	Vrai	Faux
• L'intensité de la vitesse initiale $\vec{v}_0$		
• L'angle de tir $\alpha$		
• La hauteur initiale $h_0$		
• La masse du corps $m$		

D. Une voiture roule dans un rond-point avec une vitesse  $v$  et on suppose que le mouvement de la voiture est circulaire.

a. Si la vitesse  $v$  est constante, alors...

- A.  $a_\tau = 0$
- B.  $a_\tau > 0$
- C.  $a_\tau < 0$
- D.  $a_n = 0$
- E. Aucune des réponses

b. Si le conducteur freine dans le rond-point, alors...

- A.  $a_\tau = 0$
- B.  $a_\tau > 0$
- C.  $a_\tau < 0$
- D.  $a_n = 0$
- E. Aucune des réponses

c. Si le conducteur roule maintenant avec une vitesse constante  $v' < v$ , alors...

- A.  $a'_\tau > a_\tau$
- B.  $a'_n > a_n$
- C.  $a'_\tau < a_\tau$
- D.  $a'_n < a_n$
- E. Aucune des réponses

## Crédits Photos

© George Resch / FUNDAMENTAL PHOTOGRAPHS, NYC – p.0 (page titre)

© Richard Megna / FUNDAMENTAL PHOTOGRAPHS, NYC – p.2 (chute libre et tir horizontal)

© Henri Weyer – p.11 (tir oblique)

## Crédits Illustrations

© Bibliothèque de l'Observatoire de Paris – p.1 (Mouvement des corps célestes dans le référentiel géocentrique et dans le référentiel héliocentrique)

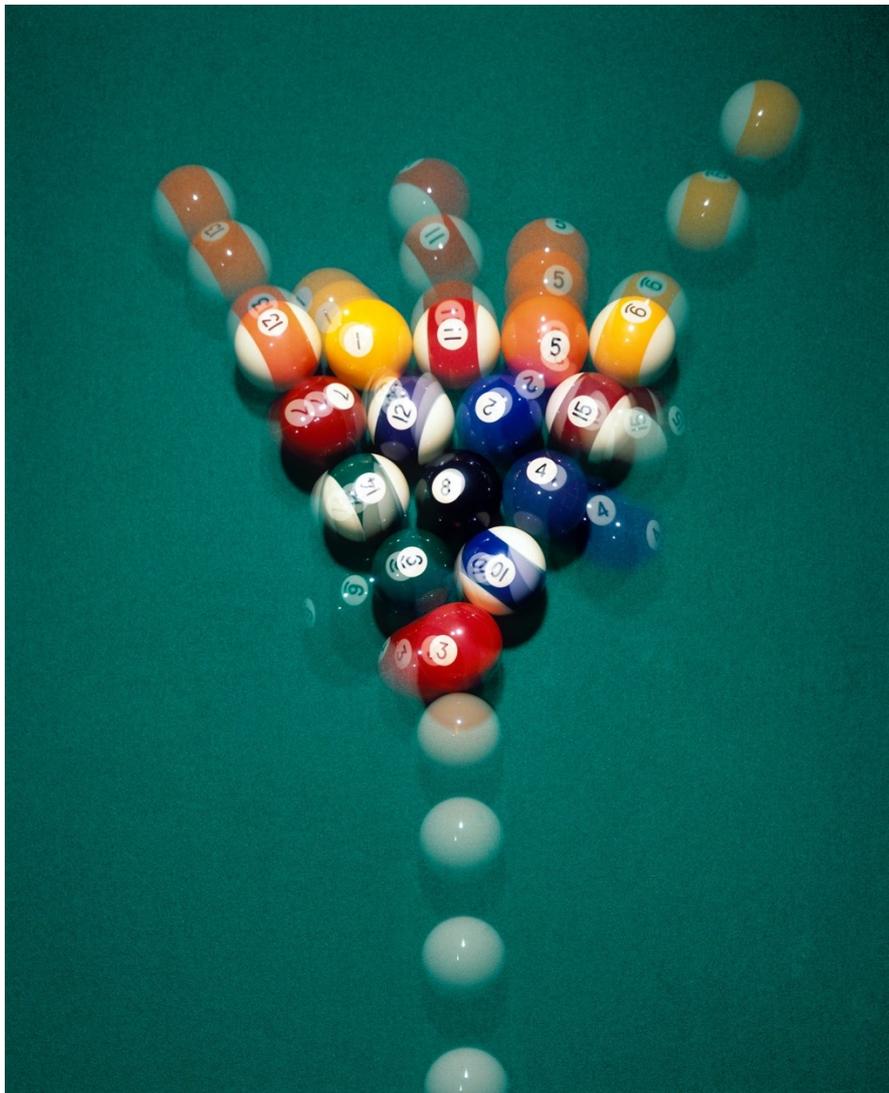
Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours. Les illustrations de Paul G. HEWITT ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

© HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson

© HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson

# 2.

## Dynamique





## Sommaire

1	Les trois lois de Newton (1686).....	1
1.1	1 <sup>ère</sup> loi de Newton : principe d'inertie .....	1
1.2	2 <sup>e</sup> loi de Newton : principe fondamental de la dynamique (PFD) .....	1
1.3	3 <sup>e</sup> loi de Newton : principe d'action et de réaction .....	1
2	Théorème de l'énergie cinétique (TEC).....	5
2.1	Travail d'une force constante.....	5
2.2	Le travail accélérateur et l'énergie cinétique.....	6
2.3	Énoncé du TEC.....	6
2.4	Distance de freinage.....	7
3	Quantité de mouvement.....	8
3.1	Définition.....	8
3.2	Variation de la quantité de mouvement.....	9
4	Explosions et collisions.....	11
4.1	Principe de la conservation de la quantité de mouvement (PCQ).....	11
4.2	Explosions.....	12
4.3	Collisions inélastiques .....	14
4.4	Collisions élastiques .....	16
4.5	Collisions à deux dimensions.....	17
5	Pour en savoir plus .....	19
6	Exercices.....	21



# 1 Les trois lois de Newton (1686)

## 1.1 1<sup>ère</sup> loi de Newton : principe d'inertie

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

Autrement dit :

Si la résultante des forces extérieures sur un corps est nulle, alors le vecteur vitesse du centre d'inertie du corps est constant :

$$\vec{F}_{res} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{v} = \overline{\text{const}}$$

- Un corps au repos restera au repos.
- Un corps en mouvement est animé d'un MRU.



## 1.2 2<sup>e</sup> loi de Newton : principe fondamental de la dynamique (PFD)

Lorsqu'une force résultante non nulle agit sur un corps, alors son vecteur vitesse n'est pas constant. Cela signifie que le corps accélère.

Un corps de masse  $m$  subit une accélération  $\vec{a}$  dans la direction et le sens de la force extérieure résultante qui agit sur le corps d'après :

$$\vec{F}_{res} = m \vec{a}$$



Norme :  $F_{res} = m a$

Unités SI :  $[F] = [m] \cdot [a] = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \text{N}$

**1 newton (N)** est la norme d'une force qui accélère une masse de 1 kg de 1 m/s<sup>2</sup>.

Remarque

La norme de l'accélération d'un corps est proportionnelle à la norme de la force résultante qui agit sur le corps et inversement proportionnelle à la masse du corps :  $a = \frac{F_{res}}{m}$

## 1.3 3<sup>e</sup> loi de Newton : principe d'action et de réaction

Les forces apparaissent toujours en paires car toute force fait partie d'une interaction entre deux corps.

Si un corps A exerce une force sur un corps B (action  $\vec{F}_{A/B}$ ), alors le corps B exerce une force sur le corps A (réaction  $\vec{F}_{B/A}$ ). Les deux forces ont même norme et même direction, mais sont de sens opposé. Mathématiquement :  $\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$

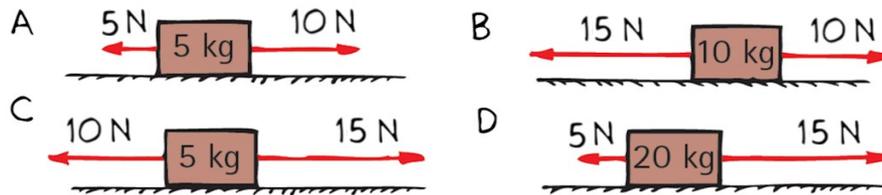


Remarque

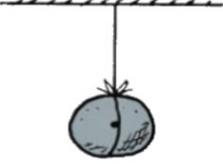
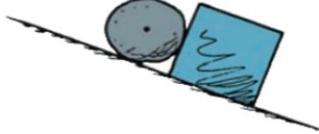
Les forces d'interaction agissent simultanément. Il est donc arbitraire laquelle des deux forces on appelle « action » et laquelle on appelle « réaction ».

■ **As-tu-compris ?**

1. Considérer les différents blocs sur une surface horizontale sans frottement. Déterminer :
  - a. les normes des forces résultantes qui agissent sur les blocs.
  - b. les caractéristiques du vecteur accélération des blocs.



2. Représenter pour chaque cas les forces extérieures qui agissent sur le corps.

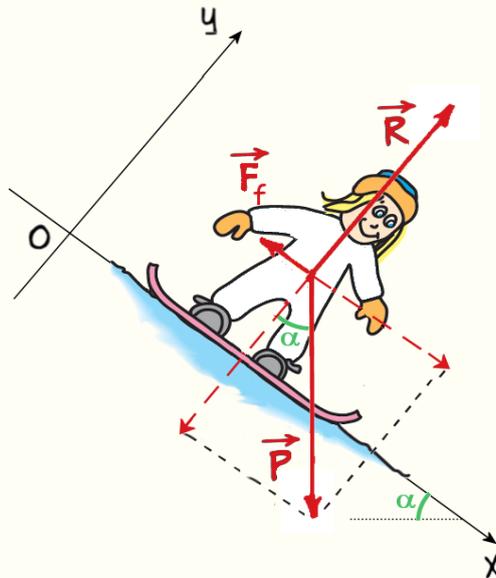
REPOS 	ACCELERATION VERS LE HAUT 	CHUTE LIBRE 
REPOS 	MRU SANS FROTTEMENT 	DECELERATION DUE AU FROTTEMENT 
REPOS 	ACCELERATION SANS FROTTEMENT 	REPOS SANS FROTTEMENT 

### Exercice résolu 1

**Énoncé :** Un snowboardeur de masse totale 60 kg se trouve initialement au repos en haut d'une piste inclinée de  $\alpha = 35^\circ$  par rapport à l'horizontale et longue de 100 m. Lors de la glisse, l'intensité de la force de frottement  $\vec{F}_f$  est supposée constante et vaut 150 N.

- Faire le bilan des forces extérieures qui agissent sur le snowboardeur.
- Calculer son accélération.
- Calculer la durée de la descente et la vitesse finale.
- Calculer la norme de la réaction  $\vec{R}$  exercée par la piste sur le snowboardeur.

**Solution :**



- Bilan des forces extérieures :
  - le poids  $\vec{P} = m\vec{g}$  exercé par la Terre
  - la force de support (réaction  $\vec{R}$ ) exercée par la piste
  - la force de frottement  $\vec{F}_f$  exercée par la neige et l'air
- Appliquons le principe fondamental de la dynamique (PFD) :

$$\vec{F}_{res} = m \vec{a}$$

$$\vec{P} + \vec{R} + \vec{F}_f = m \vec{a} \quad (*)$$

Projetons la relation (\*) sur l'axe  $Ox$  :

$$P_x + R_x + F_{f_x} = m a_x$$

$$P \sin \alpha + 0 - F_f = m a_x$$

$$a_x = \frac{m g \sin \alpha - F_f}{m}$$

$$a_x = g \sin \alpha - \frac{F_f}{m}$$

A.N. :

$$a_x = 9,81 \cdot \sin(35^\circ) - \frac{150}{60} = 3,13 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

- c. Le snowboardeur effectue un mouvement rectiligne uniformément varié (MRUV). En supposant qu'il démarre en  $t = 0$  à l'abscisse  $x = 0$  :

Equation horaire de la position :

$$x = \frac{1}{2} a_x t^2 + \underbrace{v_{0x}}_0 t + \underbrace{x_0}_0 = \frac{1}{2} a_x t^2$$

$$t = \sqrt{\frac{2x}{a_x}}$$

A.N. :

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot 100}{3,13}} = 8,00 \text{ s}$$

Equation horaire de la vitesse instantanée :

$$v_x = a_x t + \underbrace{v_{0x}}_0$$

A.N. :

$$v_x = 3,13 \cdot 8,00 = 25,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- d. Projetons la relation (\*) sur l'axe  $Oy$  :

$$P_y + R_y + F_{f_y} = m a_y$$

$$-P \cos \alpha + R + 0 = m a_y$$

Le mouvement du snowboardeur est rectiligne le long de l'axe  $Ox$ . Il n'y a donc aucune accélération suivant l'axe  $Oy$  :  $a_y = 0$

Donc :

$$-P \cos \alpha + R = 0$$

$$R = m g \cos \alpha$$

A.N. :

$$\begin{aligned} R &= 60 \cdot 9,81 \cdot \cos(35^\circ) \\ &= 482 \text{ N} \end{aligned}$$

### Remarque

Les lois de Newton sont valables dans un **référentiel galiléen**, c'est-à-dire un référentiel non accéléré. Un exemple d'un référentiel galiléen est un train se déplaçant en MRU. Les référentiels terrestre, géocentrique et héliocentrique peuvent être considérés comme des référentiels galiléens.

Un train qui accélère ou freine n'est pas un référentiel galiléen, tout comme une voiture dans un virage ou un avion faisant un looping.

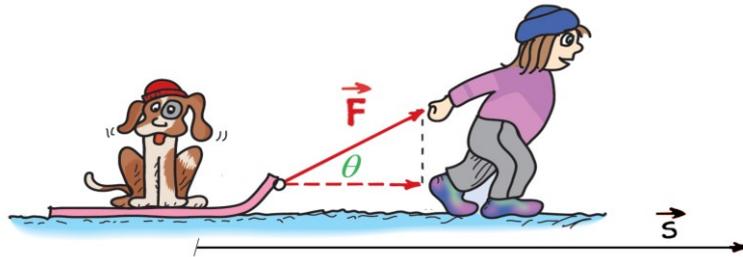
## 2 Théorème de l'énergie cinétique (TEC)

### 2.1 Travail d'une force constante

Travail d'une force constante  $\vec{F}$  qui forme un angle  $\theta$  avec le vecteur déplacement  $\vec{s}$  :

$$W(\vec{F}) = F s \cos \theta = \vec{F} \cdot \vec{s}$$

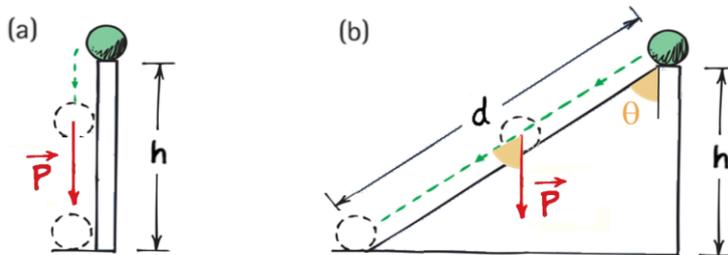
Unité SI : le joule (J) avec  $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$



- $\theta = 0^\circ$  :  $\vec{F}$  agit dans le sens de  $\vec{s}$  et effectue un travail moteur maximal :  $W = F s$
- $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$  :  $\vec{F}$  effectue un travail moteur ( $W > 0$ ).
- $\theta = 90^\circ$  :  $\vec{F}$  est perpendiculaire à  $\vec{s}$  et n'effectue aucun travail ( $W = 0$ ).
- $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$  :  $\vec{F}$  effectue un travail résistant ( $W < 0$ ).
- $\theta = 180^\circ$  :  $\vec{F}$  effectue un travail résistant maximal :  $W = - F s$   
C'est le cas pour toute **force de frottement** car elle s'oppose toujours au mouvement.

#### Exemple : le travail du poids

Calculons le travail du poids d'un corps de masse  $m$  qui descend d'une hauteur  $h$  selon les deux chemins (a) et (b) :



(a)  $W(\vec{P}) = P h = m g h$

(b)  $W(\vec{P}) = P d \cos \theta = P h = m g h$

Généralisation :

Le travail du poids est indépendant du chemin suivi. Il dépend uniquement du poids du corps et de la différence d'altitude des points d'arrivée et de départ.

$$W(\vec{P}) = \pm m g h$$

Le travail du poids est moteur ( $> 0$ ) si le corps descend et résistant ( $< 0$ ) si le corps monte.

Ce qui est vrai pour le poids  $\vec{P}$  est vrai pour toute force  $\vec{F}$  constante. Le travail d'une telle force est toujours indépendant du chemin suivi entre le point de départ et le point d'arrivée. Le travail des forces de frottement dépend en revanche toujours du chemin suivi entre les points de départ et d'arrivée.

## 2.2 Le travail accélérateur et l'énergie cinétique

Considérons un corps de masse  $m$  initialement au repos, accéléré par une force résultante constante  $\vec{F}_{res}$ . Le corps est accéléré en direction de cette force et l'on a :  $F_{res} = m a$  (PFD)

L'accélération  $a$  étant constante, l'étude cinématique du MRUV nous permet d'exprimer la distance  $d$  parcourue par le corps ainsi que sa vitesse  $v$  en fonction du temps. En fixant l'origine du repère au point de départ, les équations horaires s'écrivent :

$$d = \frac{1}{2} a t^2 \quad \text{et} \quad v = a t$$

Travail accélérateur effectué par la force  $\vec{F}_{res}$  :

$$\begin{aligned} W(\vec{F}_{res}) &= F_{res} d \\ &= m a d \\ &= m a \cdot \frac{1}{2} a t^2 \\ &= \frac{1}{2} m (a t)^2 \\ &= \frac{1}{2} m v^2 \\ &= E_c \end{aligned}$$

Le travail accélérateur est stocké par le corps sous forme d'énergie cinétique. Le travail effectué par une force résultante sur un corps provoque donc une variation de son énergie cinétique.

## 2.3 Énoncé du TEC

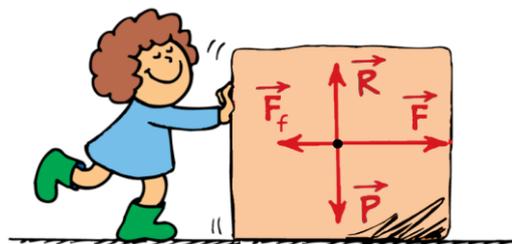
La **variation** de l'énergie cinétique d'un corps solide entre deux instants est égale au **travail total** de toutes les forces extérieures qui agissent sur ce corps :

$$\Delta E_c = W_{tot} = \sum_i W(\vec{F}_i)$$

### Exemple

Une fille pousse une caisse avec une force constante  $\vec{F}$  le long d'une distance  $d$  sur un sol horizontal. La force de frottement  $\vec{F}_f$  agit dans le sens opposé du mouvement. Appliquons le TEC :

$$\begin{aligned} \Delta E_c &= W_{tot} \\ &= W(\vec{F}) + W(\vec{F}_f) + \underbrace{W(\vec{P})}_0 + \underbrace{W(\vec{R})}_0 \\ &= F d - F_f d \\ &= (F - F_f) d \\ &= F_{res} d \end{aligned}$$



Seule une partie du travail  $F d$  effectué par la fille sur la caisse augmente son énergie cinétique. Le reste est dissipé sous forme d'énergie thermique par le travail résistant de la force de frottement.

Si  $F = F_f$ , aucun travail résultant n'est effectué. Dans ce cas, il n'y a aucune variation d'énergie cinétique de la caisse et elle reste dans son état de repos ou de MRU.

## 2.4 Distance de freinage

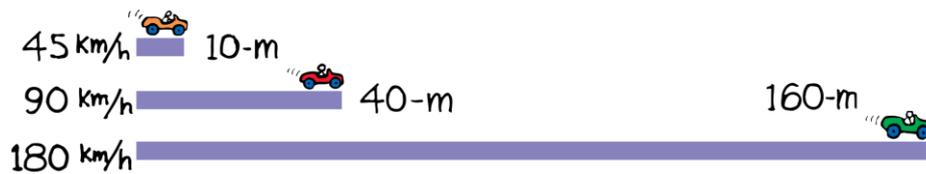
Lorsqu'on appuie sur les freins d'une voiture sur une route horizontale, la force de frottement effectue un travail résistant sur la voiture qui transforme son énergie cinétique en énergie thermique :

$$\Delta E_c = W(\vec{F}_f)$$

$$0 - \frac{1}{2} m v^2 = -F_f d$$

$$d = \frac{m}{2 F_f} v^2$$

La force de frottement que la route peut exercer sur un pneu qui glisse est quasi indépendante de la vitesse. La distance de freinage est donc proportionnelle au carré de la vitesse ( $d \sim v^2$ ). Une voiture se déplaçant à une vitesse deux fois plus grande glisse une distance de freinage quatre fois plus longue.<sup>1</sup>



### Exercice résolu 2

**Énoncé :** Déterminer la vitesse finale du snowboardeur de l'exercice résolu 1 en utilisant le TEC.

**Solution :**

Travail de toutes les forces qui agissent sur le snowboardeur :

- Le poids  $\vec{P}$  effectue un travail moteur :  $W(\vec{P}) = m g h = m g d \sin \alpha$
- La réaction  $\vec{R}$  n'effectue aucun travail :  $W(\vec{R}) = 0$
- La force de frottement  $\vec{F}_f$  effectue un travail résistant :  $W(\vec{F}_f) = -F_f d$

TEC :

$$\Delta E_c = W_{tot}$$

$$\frac{1}{2} m v_f^2 - \frac{1}{2} m \underbrace{v_i^2}_0 = W(\vec{P}) + W(\vec{F}_f)$$

$$\frac{1}{2} m v_f^2 = m g d \sin \alpha - F_f d$$

$$v_f = \sqrt{(m g \sin \alpha - F_f) \frac{2 d}{m}}$$

A.N. :

$$v_f = \sqrt{(60 \cdot 9,81 \cdot \sin(35^\circ) - 150) \cdot \frac{2 \cdot 100}{60}} = 25,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Le TEC remplace avantageusement (pas de calcul vectoriel) la 2<sup>ème</sup> loi de Newton (PFD) chaque fois que l'évolution temporelle du mouvement est sans intérêt.

<sup>1</sup> Le même raisonnement s'applique aux freins antiblocages qui empêchent les pneus de glisser. Le frottement est dans ce cas également quasi indépendant de la vitesse, donc même avec des freins antiblocages, il faut quatre fois plus de distance de freinage pour une vitesse double.

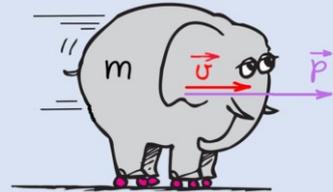
### 3 Quantité de mouvement

En s'interrogeant sur le fait qu'une boule de fer roule plus loin qu'une boule de bois de même taille et lancée à la même vitesse, Jean Buridan contribue vers 1330 à la notion de quantité de mouvement. Il a l'idée que la vitesse seule n'explique pas le mouvement de la boule, mais qu'il intervient également sa masse (c'est-à-dire son inertie). Plus tard, Isaac Newton utilise le terme anglais de *momentum* comme étant la masse multipliée par la vitesse.

#### 3.1 Définition

Le vecteur **quantité de mouvement**  $\vec{p}$  d'un corps est le produit de sa masse (son inertie)  $m$  par son vecteur vitesse  $\vec{v}$  :

$$\vec{p} = m \vec{v}$$



La quantité de mouvement  $\vec{p}$  est une grandeur vectorielle puisque c'est le produit d'un scalaire et d'un vecteur.

#### Caractéristiques du vecteur $\vec{p}$

- *Point d'application* : le centre d'inertie du corps
- *Direction* : celle du vecteur vitesse
- *Sens* : celui du vecteur vitesse
- *Intensité (norme, valeur)* :  $p = m v$   
Unité SI :  $[p] = [m] \cdot [v] = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$



#### Exemple

Un camion a plus de quantité de mouvement qu'un patin à roulettes roulant à la même vitesse, parce que le camion a une masse plus grande. Or, le patin à roulettes pourrait avoir une quantité de mouvement égale ou même supérieure à celle du camion, s'il roulait beaucoup plus vite. Si le camion est au repos, sa quantité de mouvement est nulle.

#### Remarques

- S'il n'est pas évident, il faut préciser le référentiel dans lequel on étudie la quantité de mouvement car la vitesse en dépend.
- Le vecteur quantité de mouvement totale  $\vec{p}$  d'un système formé de plusieurs corps 1, 2, ...,  $n$  est la somme vectorielle des vecteurs quantités de mouvement individuels :

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i$$

#### ■ As-tu-compris ?

3. Deux voitures, l'une ayant une masse deux fois plus grande que l'autre, roulent à la même vitesse. Comparée à l'autre voiture, la quantité de mouvement de la voiture plus lourde est  
A. le double      B. identique      C. la moitié
4. Si l'énergie cinétique d'un corps est nulle, que vaut sa quantité de mouvement ?

### 3.2 Variation de la quantité de mouvement

D'après la définition, le vecteur accélération (moyenne) est égale à la variation du vecteur vitesse par unité de temps :

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (1)$$

D'après le PFD (2<sup>e</sup> loi de Newton), le vecteur accélération d'un corps de masse  $m$  qui subit une force extérieure résultante  $\vec{F}_{res}$  s'écrit :

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{res}}{m} \quad (2)$$

(1) et (2) :

$$\vec{F}_{res} \Delta t = m \Delta \vec{v} = \Delta(m \vec{v}) = \Delta \vec{p} \quad (m = \text{const})$$

La **variation du vecteur quantité de mouvement**  $\Delta \vec{p}$  d'un corps qui subit une force extérieure résultante  $\vec{F}_{res}$  durant une durée  $\Delta t$  s'écrit :

$$\Delta \vec{p} = \vec{F}_{res} \Delta t$$

La norme de la variation du vecteur quantité de mouvement s'écrit :

$$\|\Delta \vec{p}\| = F_{res} \Delta t$$



#### Remarques

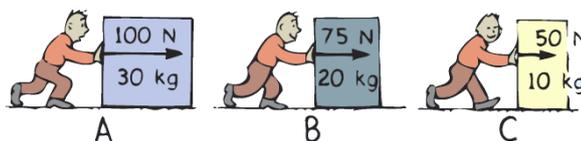
La variation de la vitesse d'un corps de masse  $m$  donnée ne dépend donc pas seulement de la force mais du produit force · durée.<sup>2</sup>

- Pour  $\Delta t$  donnée :  $\|\Delta \vec{p}\| \sim F_{res}$
- Pour  $F_{res}$  donnée :  $\|\Delta \vec{p}\| \sim \Delta t$

Une force très faible appliquée pendant une durée très longue peut provoquer une variation de quantité de mouvement notable. Une force limitée pendant une durée très courte ne produit pratiquement pas de variation de quantité de mouvement. Différentes forces exercées pendant des intervalles de temps différents peuvent produire la même variation de quantité de mouvement.

#### ■ As-tu-compris ?

5. Une personne pousse les caisses à partir du repos pendant 3 s avec une force résultante constante.



Classer par ordre décroissant

- a. la variation de la quantité de mouvement des caisses
- b. leurs quantités de mouvement après 3 s
- c. leurs vitesses finales

<sup>2</sup> La grandeur force · durée est appelée *impulsion*. C'est en somme la cause d'une variation de la quantité de mouvement. L'unité SI de l'impulsion est le N · s.

### Exercice résolu 3

**Énoncé :** Un conducteur de scooter de masse totale  $m = 160 \text{ kg}$  roule en ligne droite à une vitesse de  $8 \text{ m/s}$ . Pour s'immobiliser, il freine avec une force constante.

- Calculer la norme de cette force sachant que le freinage dure  $4 \text{ s}$ .
- Comment varie la norme de la force si l'on réalise le même freinage en  $3 \text{ s}$  ?

**Solution :**

- Quantité de mouvement initiale (au début) :

$$p = m v = 160 \text{ kg} \cdot 8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1280 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Quantité de mouvement finale (à l'arrêt) :

$$p' = m v' = 160 \text{ kg} \cdot 0 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0$$

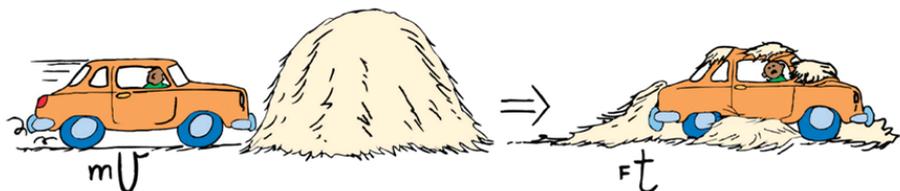
$$F_{res} = \frac{|\Delta p|}{\Delta t} = \frac{|p' - p|}{\Delta t} = \frac{1280 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4 \text{ s}} = 320 \text{ N}$$

- 

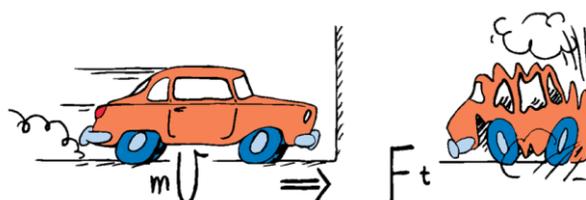
$$F_{res} = \frac{|\Delta p|}{\Delta t} = \frac{1280 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3 \text{ s}} = 427 \text{ N}$$

### Applications

- Pour augmenter au maximum la quantité de mouvement d'un corps, il faut appliquer une force résultante maximale durant une durée d'impact aussi longue que possible. Un joueur de golf, un joueur de baseball, un joueur de tennis - tous ces sportifs appliquent ce principe lorsqu'ils frappent la balle avec beaucoup de force, tout en accompagnant la balle avec leur swing.
- Pour diminuer la quantité de mouvement d'un corps avec une force d'impact aussi petite que possible, il faut prolonger au maximum la durée d'impact. Par exemple, si on se trouve dans une voiture hors de contrôle et qu'on a le choix entre une collision avec un tas de foin ou un mur, on choisira le tas de foin. La variation de la quantité de mouvement est la même dans les deux cas (la vitesse finale est nulle). Or la même variation de la quantité de mouvement ne signifie pas nécessairement la même force ou la même durée, mais le même produit  $F_{res} \Delta t$ .
  - Si la variation de la quantité de mouvement a lieu durant une longue durée, la force d'impact est petite.



- Si la variation de la quantité de mouvement a lieu durant un bref instant, la force d'impact est grande



## 4 Explosions et collisions

Pour faire varier la quantité de mouvement d'un système, il faut exercer une force extérieure résultante sur le système :

$$\Delta \vec{p} = \vec{F}_{res} \Delta t$$

Des forces intérieures au systèmes n'ont aucun effet sur sa quantité de mouvement<sup>3</sup>. Par exemple, les forces moléculaires qui existent à l'intérieur d'une balle de tennis n'influencent pas sa quantité de mouvement. De même, pousser contre le volant d'une voiture dans laquelle on est assis ne peut pas changer sa quantité de mouvement. Si aucune force extérieure résultante n'agit sur un système, alors sa quantité de mouvement ne varie pas. C'est l'un des principes fondamentaux de la physique.

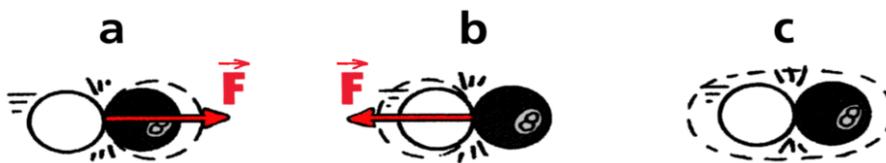
### 4.1 Principe de la conservation de la quantité de mouvement (PCQ)

Si la force extérieure résultante sur un système est nulle, alors la quantité de mouvement  $\vec{p}$  du système est conservée :

$$\vec{F}_{res} = \vec{0} \Leftrightarrow \Delta \vec{p} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{p} = \overline{\vec{p}}$$

#### Exemple

Considérons la collision en plein centre entre la boule de billard blanche et la boule noire qui se trouve initialement au repos. Étudions la variation de la quantité de mouvement des trois systèmes indiqués en pointillés sur la figure. Notons  $\vec{p}$  la quantité de mouvement initiale du système et  $\vec{p}'$  sa quantité de mouvement finale.



- a. La boule blanche exerce une force extérieure sur le système  $\bullet$ . Cette force augmente la quantité de mouvement du système  $\bullet$ . La boule noire accélère.

$$p'_{\bullet} > p_{\bullet} \Leftrightarrow \Delta p_{\bullet} > 0$$

- b. La boule noire exerce une force extérieure sur le système  $\circ$ . Cette force diminue la quantité de mouvement du système  $\circ$ . La boule blanche décélère.

$$p'_{\circ} < p_{\circ} \Leftrightarrow \Delta p_{\circ} < 0$$

- c. La force extérieure résultante sur le système  $\circ + \bullet$  est nulle<sup>4</sup>. L'interaction entre les deux boules constituent des forces intérieures au système. La boule noire est accélérée et la balle blanche est freinée, mais la quantité de mouvement globale du système  $\circ + \bullet$  est conservée durant la collision. Il s'avère que les boules de billard échangent simplement leurs vitesses. La boule blanche s'immobilise et la boule noire acquiert la vitesse initiale de la boule blanche.

$$p'_{\circ + \bullet} = p_{\circ + \bullet} \Leftrightarrow \Delta p_{\circ + \bullet} = 0$$

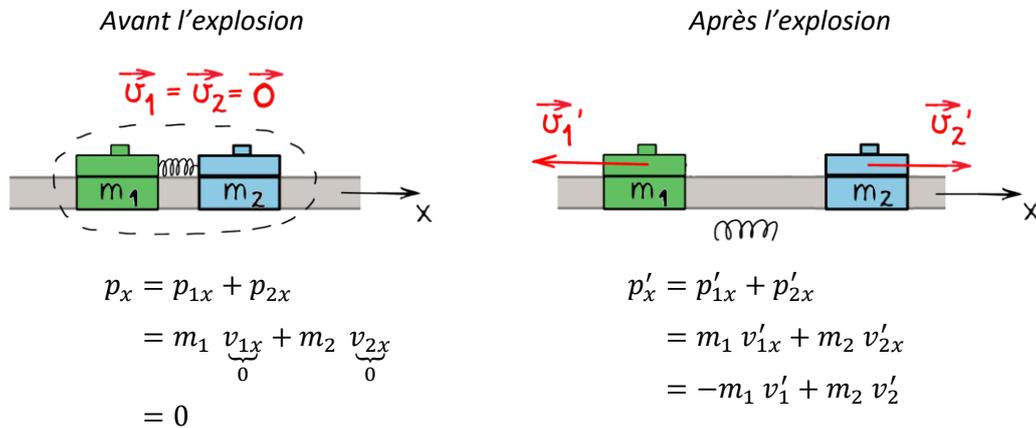
<sup>3</sup> Selon le principe d'action-réaction, toutes les forces internes au système s'annulent.

<sup>4</sup> Le poids des boules est compensé par la réaction de la table horizontale. Le frottement entre les boules et la table, ainsi que la résistance de l'air sont négligeables durant la courte durée de la collision. On pourrait aussi imaginer que cet événement a lieu dans l'espace intersidéral.

## 4.2 Explosions

On dispose de deux chariots pouvant circuler horizontalement sur un banc à coussin d'air afin de pouvoir négliger les frottements. Un ressort est fixé entre les deux chariots initialement au repos. On rapproche les chariots afin de comprimer le ressort et on relâche ensuite les chariots qui s'éloignent l'un de l'autre dans des sens opposés. C'est un exemple simple d'une explosion.

Considérons le système composé des deux chariots et du ressort avant et après l'explosion :



Les forces que les chariots exercent l'un sur l'autre sont des forces intérieures au système. La force de frottement entre les chariots et le support est négligeable. La force extérieure résultante sur le système est nulle et la quantité de mouvement du système est conservée :

$$\begin{aligned} p'_x &= p_x \\ -m_1 v'_1 + m_2 v'_2 &= 0 \\ m_1 v'_1 &= m_2 v'_2 \end{aligned}$$

$$\frac{v'_2}{v'_1} = \frac{m_1}{m_2}$$

### Cas particuliers

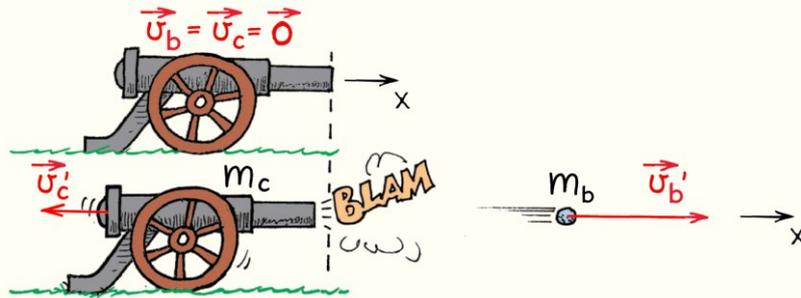
- Si  $m_1 = m_2 = m$ , alors  $v'_1 = v'_2$ . Les deux chariots s'éloignent avec des vitesses de normes identiques.
- Si  $m_1 = 2 m_2$ , alors  $v'_1 = \frac{1}{2} v'_2$ . Le chariot avec une masse double, acquiert une vitesse de norme deux fois plus petite.

### Remarques

- L'énergie cinétique initiale du système est nulle :  $E_c = 0$ . Après l'explosion, l'énergie cinétique du système vaut  $E'_c = \frac{1}{2} m_1 (v'_1)^2 + \frac{1}{2} m_2 (v'_2)^2 > 0$ . Le système gagne donc en énergie cinétique. En effet, l'énergie potentielle élastique initialement stockée dans le ressort a été transférée aux chariots sous forme d'énergie cinétique.
- Lors de l'explosion, ce sont des forces intérieures qui accélèrent les deux chariots. Puisque le système ne subit pas de force extérieure résultante, le centre d'inertie du système reste au repos lors de l'explosion (d'après la première loi de Newton). Les forces intérieures à un système ne peuvent pas changer l'état de mouvement de son centre d'inertie.

#### Exercice résolu 4

Énoncé : Un canon de masse  $m_c = 500$  kg tire un boulet de masse  $m_b = 10$  kg à une vitesse  $v'_b = 320$  m/s. Calculer la norme de la vitesse de recul  $v'_c$  du canon.



Solution :

Considérons le système isolé canon + boulet. La quantité de mouvement du système avant le tir est nulle. Puisque la quantité de mouvement du système est conservée, elle est également nulle juste après le tir.

$$\frac{v'_c}{v'_b} = \frac{m_b}{m_c}$$

$$v'_c = \frac{m_b}{m_c} v'_b$$

A.N. :

$$v'_c = \frac{10}{500} \cdot 320$$

$$= 6,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Le canon recule avec une vitesse de 6,4 m/s.

#### Remarques

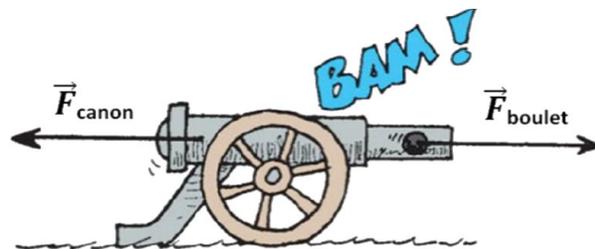
- D'après le principe d'action-réaction, le boulet et le canon subissent des forces de même norme. C'est une conséquence directe du principe de la conservation de la quantité de mouvement :

$$m_c v'_c = m_b v'_b$$

$$m_c a_c t = m_b a_b t$$

$$F_c t = F_b t$$

$$F_c = F_b$$

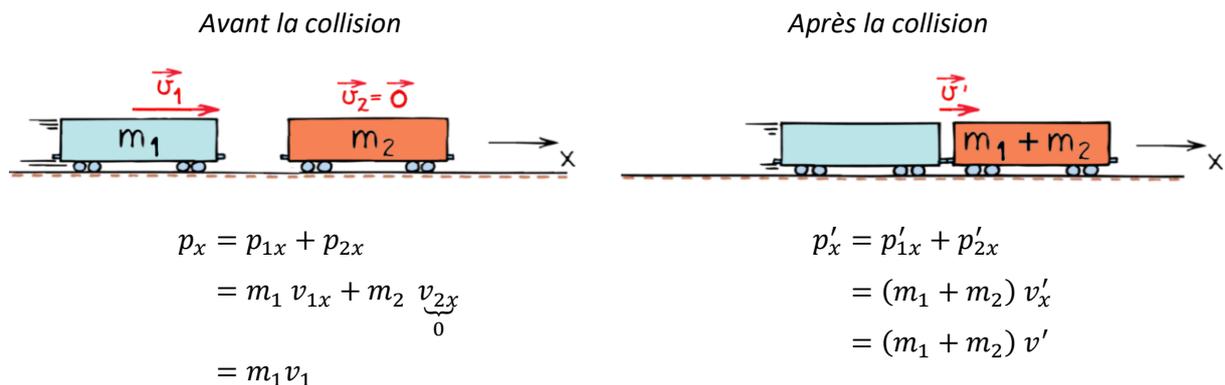


- D'après le principe fondamental de la dynamique ( $a = \frac{F}{m}$ ), la force fait accélérer le boulet davantage que le canon car la masse du boulet est plus petite.
- D'après le principe d'inertie, le canon a une inertie plus grande, donc plus de tendance à rester dans son état de mouvement (le repos).

### 4.3 Collisions inélastiques

Lors d'une **collision inélastique**, une partie de l'énergie cinétique du système des corps en interaction est dissipée (par exemple sous forme d'énergie thermique). Si les corps en interaction restent accrochés après le choc, on parle d'une collision totalement inélastique.

Sur une voie ferrée, un wagon 1 de masse  $m_1$  roulant à une vitesse  $v_1$  heurte un wagon 2 de masse  $m_2$  initialement au repos. Les deux wagons restent couplés après la collision (collision totalement inélastique). Considérons le système des deux wagons et déterminons l'expression de la vitesse  $v'$  du système après la collision.



Les forces que les wagons exercent l'un sur l'autre sont des forces intérieures au système. Puisque l'impact est bref, la force de frottement entre les wagons et les rails est négligeable durant la collision. La quantité de mouvement du système est donc conservée :

$$p_x = p'_x$$

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v'$$

$$v' = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1$$

#### Cas particuliers

- Si  $m_1 = m_2 = m$ , alors  $v' = \frac{1}{2} v_1$
- Si  $m_1 = 2 m_2$ , alors  $v' = \frac{2}{3} v_1$
- Si  $m_2 = 2 m_1$ , alors  $v' = \frac{1}{3} v_1$
- Si  $m_1 \gg m_2$  ( $m_2 \rightarrow 0$ ), alors  $v' = v_1$
- Si  $m_2 \gg m_1$  ( $m_1 \rightarrow 0$ ), alors  $v' = 0$

#### Remarque

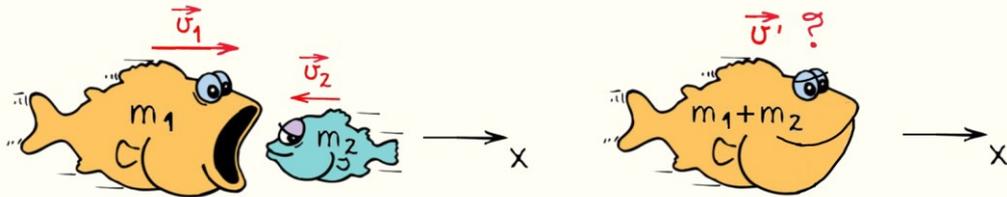
L'énergie cinétique du système juste avant la collision vaut  $E_c = \frac{1}{2} m_1 v_1^2$ . L'énergie cinétique du système juste après la collision s'écrit :

$$E'_c = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v'^2 = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \left( \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1 \right)^2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} E_c < E_c$$

Une partie de l'énergie cinétique initiale du système est transformée lors de la collision (notamment en énergie thermique et en énergie acoustique).

### Exercice résolu 5

**Énoncé :** Un grand poisson affamé de masse  $m_1 = 6 \text{ kg}$  qui nage à une vitesse  $v_1 = 1 \text{ m/s}$  s'apprête à dévorer un petit poisson inattentif de masse  $m_2 = 2 \text{ kg}$  qui nage à une vitesse  $v_2 = 2 \text{ m/s}$  dans la même direction, mais dans le sens opposé.



- Déterminer la vitesse du grand poisson juste après avoir dévoré le petit.
- Déterminer le pourcentage en énergie cinétique dissipée durant la dévoration.

**Solution :**

- Il s'agit d'une collision totalement inélastique. Considérons le système renfermant les deux poissons.

Quantité de mouvement initiale du système :

$$p_x = p_{1x} + p_{2x} = m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x} = m_1 v_1 - m_2 v_2$$

Quantité de mouvement du système après la dévoration :

$$p'_x = p'_{1x} + p'_{2x} = (m_1 + m_2) v'_x$$

Pendant la dévoration, il n'y a pas de force extérieure qui agit sur le système des deux poissons (on néglige la résistance de l'eau). La quantité de mouvement totale du système est conservée :

$$\begin{aligned} p_x &= p'_x \\ m_1 v_1 - m_2 v_2 &= (m_1 + m_2) v'_x \\ v'_x &= \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2} \end{aligned}$$

A.N. :

$$v'_x = \frac{6 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 2 \text{ kg} \cdot 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{8 \text{ kg}} = \frac{1 \text{ m}}{4 \text{ s}} > 0$$

Après le repas, le grand poisson se déplace avec une vitesse de  $0,25 \text{ m/s}$  vers la droite.

- Énergie cinétique initiale du système :

$$E_c = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} \cdot 6 \text{ kg} \cdot \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + \frac{1}{2} \cdot 2 \text{ kg} \cdot \left(2 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 7 \text{ J}$$

Énergie cinétique finale du système :

$$E'_c = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v'^2 = \frac{1}{2} \cdot 8 \text{ kg} \cdot \left(\frac{1 \text{ m}}{4 \text{ s}}\right)^2 = \frac{1}{4} \text{ J}$$

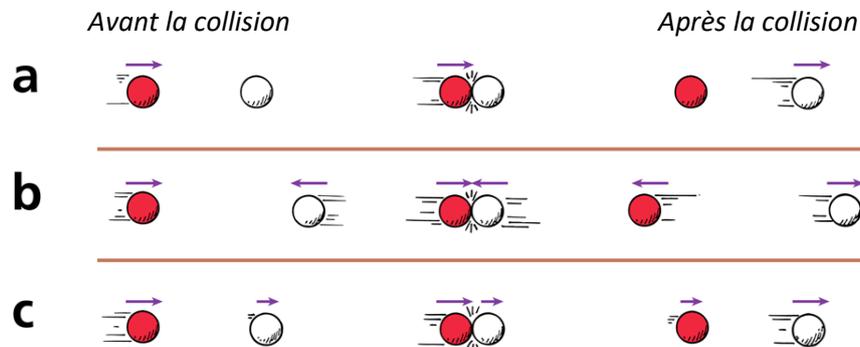
$$\frac{E'_c}{E_c} = \frac{1}{28} = 0,036 = 3,6\%$$

96,4% de l'énergie cinétique initiale du système a été dissipée.

## 4.4 Collisions élastiques

Lors d'une **collision élastique**, les corps en interaction ne subissent soit aucune déformation, soit une déformation parfaitement élastique. L'énergie cinétique du système est conservée.

Considérant la collision en plein centre de deux boules et supposons que la collision soit élastique. Différentes situations initiales et finales peuvent avoir lieu :



Puisque les forces extérieures durant la collision sont négligeables et puisque la collision est élastique, la quantité de mouvement et l'énergie cinétique du système des deux boules en interaction sont conservées lors du choc. En connaissant les vitesses initiales  $v_1$  et  $v_2$  des deux boules ainsi que leurs masses respectives  $m_1$  et  $m_2$ , on peut calculer leur vitesses  $v'_1$  et  $v'_2$  après le choc. Le calcul peut être consulté dans le chapitre « pour en savoir plus ».

Pour le cas particulier où la **deuxième boule est initialement au repos ( $v_2 = 0$ )**, on obtient :

$$v'_{1x} = \left( \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right) v_{1x} \quad \text{et} \quad v'_{2x} = \left( \frac{2 m_1}{m_1 + m_2} \right) v_{1x}$$

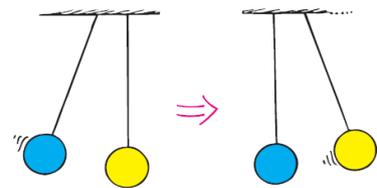
### Conclusions

- Après le choc, la vitesse de la boule 2 est évidemment orientée dans le même sens que la vitesse initiale de la boule 1. En effet,  $v'_{2x}$  a même signe que  $v_{1x}$ , car  $\frac{2 m_1}{m_1 + m_2} > 0$ .

- Si  $m_1 = m_2 = m$ , alors  $v'_{1x} = 0$  et  $v'_{2x} = v_{1x}$

Les deux boules échangent simplement leurs vitesses lors de la collision. La boule 1 s'immobilise et la boule 2 avance avec la vitesse initiale de la boule 1.

Application : le **pendule de Newton**



- Si  $m_1 < m_2$ , alors  $v'_{1x}$  est de signe opposé que  $v_{1x}$ . La boule 1 est réfléchiée lors de la collision.

- Si  $m_1 \ll m_2$  ( $m_1 \rightarrow 0$ ), alors  $v'_{1x} = -v_{1x}$  et  $v'_{2x} = 0$

Exemple : Collision en plein centre entre une balle de tennis de table et une boule de bowling au repos.

- Si  $m_1 > m_2$ , alors  $v'_{1x}$  est de même signe que  $v_{1x}$ . La boule 1 continue à rouler dans le même sens après la collision.

- Si  $m_1 \gg m_2$  ( $m_2 \rightarrow 0$ ), alors  $v'_{1x} = v_{1x}$  et  $v'_{2x} = 2 v_{1x}$

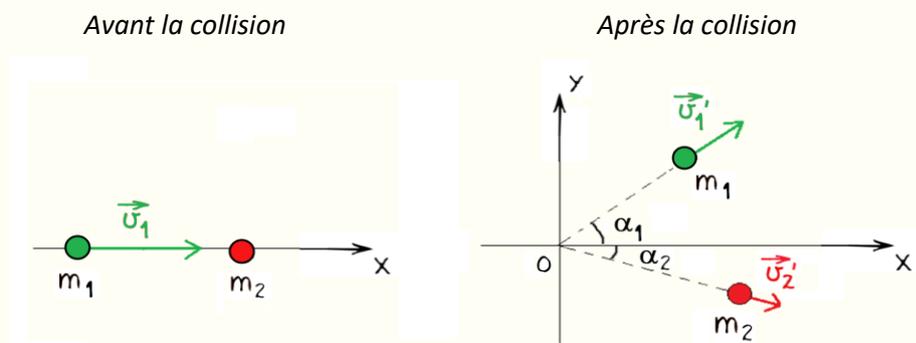
Exemple : Collision en plein centre entre une boule de bowling et une balle de tennis de table au repos.

## 4.5 Collisions à deux dimensions

Lorsque les mouvements de deux corps entrant en collision s'effectuent dans un plan, on parle de chocs à deux dimensions. La quantité de mouvement est une grandeur vectorielle. Pour étudier des collisions à deux dimensions, il est utile d'employer les techniques du calcul vectoriel.

### Exercice résolu 6

**Énoncé :** Un proton de masse  $m_1 = 1,6726 \cdot 10^{-27}$  kg se déplace vers la droite avec une vitesse  $v_1$  et heurte une particule 2 qui se trouve au repos. Après la collision non frontale, le proton se déplace à une vitesse  $v'_1 = 8 \cdot 10^4$  m/s et sa trajectoire forme un angle  $\alpha_1 = 65^\circ$  avec l'horizontale. La particule 2 acquiert une vitesse  $v'_2 = 5,33 \cdot 10^4$  m/s et sa trajectoire forme un angle  $\alpha_2 = -20^\circ$  avec cette même horizontale. En déduire la masse  $m_2$  de la particule 2, ainsi que la vitesse  $v_1$  du proton.



**Solution :**

Aucune force extérieure n'agit sur le système des deux particules et sa quantité de mouvement est conservée :

$$\vec{p} = \vec{p}'$$

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2$$

$$m_1 \vec{v}_1 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2$$

Projection sur les axes  $(Ox)$  et  $(Oy)$  :

$$\begin{cases} m_1 v_{1x} = m_1 v'_{1x} + m_2 v'_{2x} \\ m_1 v_{1y} = m_1 v'_{1y} + m_2 v'_{2y} \end{cases}$$

On obtient un système de 2 équations à deux inconnues  $m_2$  et  $v_1$  :

$$\begin{cases} m_1 v_1 = m_1 v'_1 \cos \alpha_1 + m_2 v'_2 \cos \alpha_2 & (1) \\ 0 = m_1 v'_1 \sin \alpha_1 - m_2 v'_2 \sin \alpha_2 & (2) \end{cases}$$

Isolons  $m_2$  de (2) :

$$m_2 = \frac{m_1 v'_1 \sin \alpha_1}{v'_2 \sin \alpha_2}$$

A.N. :

$$m_2 = \frac{1,6726 \cdot 10^{-27} \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot \sin(65^\circ)}{5,33 \cdot 10^4 \sin(20^\circ)} = 6,6524 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Isolons  $v_1$  de (1) :

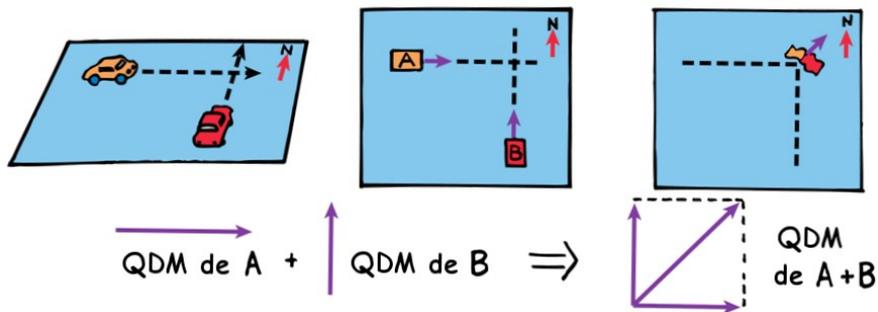
$$v_1 = v_1' \cos \alpha_1 + \frac{m_2 v_2' \cos \alpha_2}{m_1}$$

A.N. :

$$v_1 = 8 \cdot 10^4 \cdot \cos(65^\circ) + \frac{6,6524 \cdot 10^{-27} \cdot 5,33 \cdot 10^4 \cdot \cos(20^\circ)}{1,6726 \cdot 10^{-27}} = 2,33 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

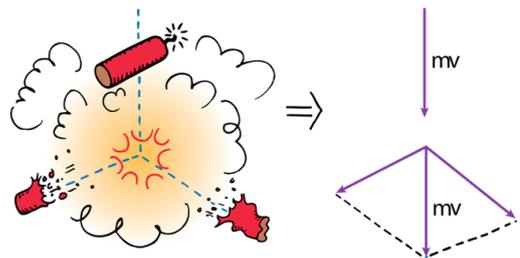
### Autres exemples

- Collision totalement inélastique entre 2 voitures se déplaçant dans des directions différentes



- Explosion d'un bâton de dynamite qui tombe

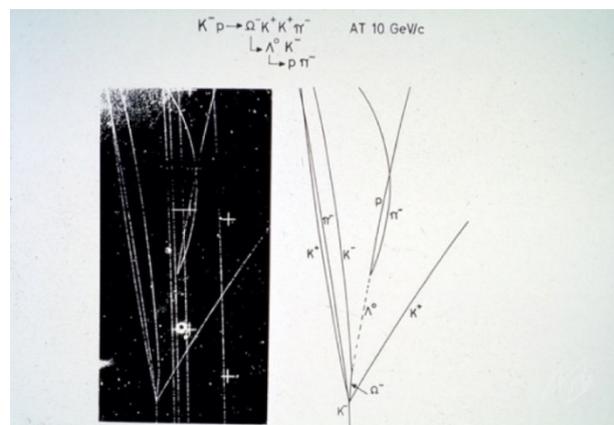
La somme vectorielle des quantités de mouvement des deux fragments après l'explosion est égale à la quantité de mouvement du bâton juste avant l'explosion. Des exemples similaires sont les explosions d'un feu d'artifice ou d'une étoile ou encore la désintégration d'un noyau atomique.



- Boules de billard

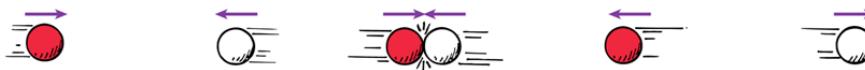
Lors de la casse, la somme vectorielle des quantités de mouvement individuelles des boules juste après le choc est égale à la quantité de mouvement de la boule blanche juste avant le choc.

- Un autre exemple est la collision et la désintégration de particules subatomiques. Les trajectoires de ces particules avant et après la collision avec d'autres particules élémentaires sont visibles dans des chambres à bulles. La masse de ces particules peut alors être déduite en appliquant les lois de la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie. L'image ci-dessous a été prise dans une chambre à bulles au CERN.



## 5 Pour en savoir plus

### Solutions pour une collision élastique à une dimension



D'après le PCQ :

$$m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x} = m_1 v'_{1x} + m_2 v'_{2x} \quad (1)$$

$$m_1 (v_{1x} - v'_{1x}) = m_2 (v'_{2x} - v_{2x}) \quad (2)$$

Conservation de l' $E_c$  :

$$\frac{1}{2} m_1 v_{1x}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{2x}^2 = \frac{1}{2} m_1 v'_{1x}{}^2 + \frac{1}{2} m_2 v'_{2x}{}^2$$

$$m_1 (v_{1x}^2 - v'_{1x}{}^2) = m_2 (v'_{2x}{}^2 - v_{2x}^2)$$

$$m_1 (v_{1x} + v'_{1x})(v_{1x} - v'_{1x}) = m_2 (v'_{2x} + v_{2x})(v'_{2x} - v_{2x}) \quad (3)$$

C'est un système de 2 équations à 2 inconnues. En divisant (3) par (2), on obtient :

$$v_{1x} + v'_{1x} = v'_{2x} + v_{2x}$$

$$v'_{2x} = v_{1x} + v'_{1x} - v_{2x} \quad (4)$$

En remplaçant (4) dans (1) :

$$m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x} = m_1 v'_{1x} + m_2 (v_{1x} + v'_{1x} - v_{2x})$$

$$m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x} = m_1 v'_{1x} + m_2 v_{1x} + m_2 v'_{1x} - m_2 v_{2x}$$

$$(m_1 + m_2) v'_{1x} + (m_2 - m_1) v_{1x} - 2 m_2 v_{2x} = 0$$

$$v'_{1x} = \left( \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right) v_{1x} + \left( \frac{2m_2}{m_1 + m_2} \right) v_{2x} \quad (5)$$

En remplaçant (5) dans (4) :

$$v'_{2x} = v_{1x} + \left( \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right) v_{1x} + \left( \frac{2m_2}{m_1 + m_2} \right) v_{2x} - v_{2x}$$

$$v'_{2x} = \left( \frac{2m_1}{m_1 + m_2} \right) v_{1x} + \left( \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} \right) v_{2x}$$

Solutions :

$$v'_{1x} = \left( \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right) v_{1x} + \left( \frac{2m_2}{m_1 + m_2} \right) v_{2x}$$

$$v'_{2x} = \left( \frac{2m_1}{m_1 + m_2} \right) v_{1x} + \left( \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} \right) v_{2x}$$

Cas particulier :

Si  $m_1 = m_2 = m$ , alors  $v'_{1x} = v_{2x}$  et  $v'_{2x} = v_{1x}$

Les deux boules échangent simplement leurs vitesses lors de la collision.

## Choc élastique non frontal entre deux particules de même masse

Lors d'une collision élastique non frontale entre deux particules de même masse, et dont l'une se trouve initialement au repos, l'angle entre les vecteurs vitesse après la collision vaut toujours  $90^\circ$ .

Démonstration :

Conservation de la quantité de mouvement :

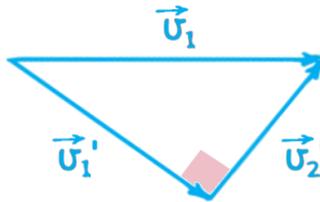
$$m \vec{v}_1 = m \vec{v}'_1 + m \vec{v}'_2$$
$$\vec{v}_1 = \vec{v}'_1 + \vec{v}'_2$$

Les vecteurs  $\vec{v}_1$ ,  $\vec{v}'_1$  et  $\vec{v}'_2$  forment donc un triangle dont le vecteur  $\vec{v}_1$  représente le côté le plus long.

Puisque la collision est élastique, l'énergie cinétique du système est conservée :

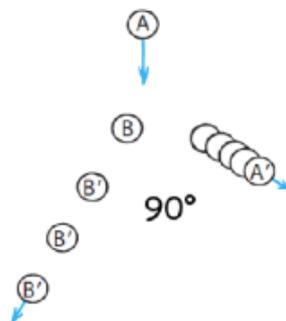
$$\frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} m v_1'^2 + \frac{1}{2} m v_2'^2$$
$$v_1^2 = v_1'^2 + v_2'^2$$

D'après le théorème de Pythagore dans le triangle rectangle, cette relation est vérifiée si et seulement si les vecteurs  $\vec{v}'_1$  et  $\vec{v}'_2$  sont perpendiculaires. L'angle entre  $\vec{v}'_1$  et  $\vec{v}'_2$  vaut donc  $90^\circ$ .



Exemple

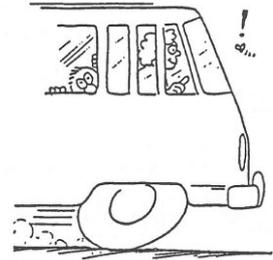
Une boule de billard vient frapper une autre boule de billard au repos. Les directions des mouvements des deux boules après le choc forment un angle de  $90^\circ$ .



## 6 Exercices

### Lois de Newton

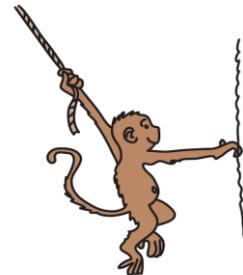
- Un glaçon avance sur le sol en mouvement rectiligne uniforme. Que peut-on en déduire au sujet de la force résultante agissant sur lui ?
- Un ami te dit que si un astéroïde dans l'espace intersidéral ne subit aucune force, alors l'astéroïde est forcément immobile. A-t-il raison ?
- Une malheureuse mouche s'écrase sur la vitre frontale d'un bus qui roule sur une autoroute. Comparée à la norme de la force qui s'exerce sur la mouche, la norme de la force qui s'exerce sur le bus est ...



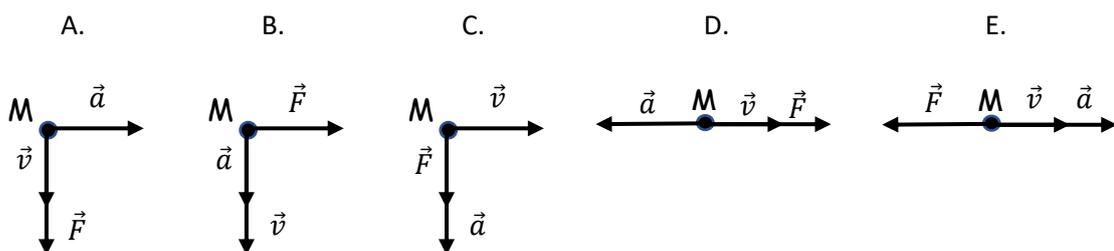
- plus grande
  - identique
  - plus petite
- Un objet de masse  $m = 0,8 \text{ kg}$  est poussé avec une force résultante d'intensité  $F = 3 \text{ N}$ .
    - Calculer l'accélération de l'objet.
    - Comment varie l'accélération si on tire le même objet avec une force d'intensité  $2F$  ?
    - Comment varie l'accélération si on tire avec la même force  $F$  un objet de masses  $2m$  ?
  - Deux amis Jean et Pierre font un concours et tirent une corde l'un contre l'autre à ses extrémités. Jean arrive à faire glisser son ami Pierre vers lui.

Laquelle des affirmations est correcte ?

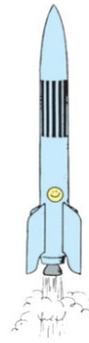
- La force que Jean exerce est plus grande que celle qu'exerce Pierre
  - La force que Jean exerce est plus grande que le poids de Pierre
  - Les forces exercées par Jean et Pierre sont identiques :  $F_J = F_P$
  - Jean a triché et a exercé sa force avant Pierre
  - Aucune des réponses
- La figure montre un singe suspendu au repos. Avec sa main gauche il s'agrippe à une corde, avec sa main droite il tient une tige. Faire le diagramme de forces.



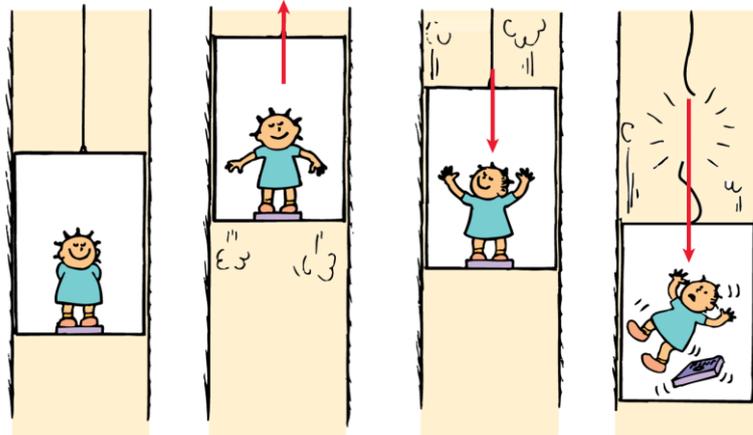
- On a un corps  $M$  en mouvement et on suppose que la force  $\vec{F}$  est la seule force extérieure s'exerçant sur le corps. Lequel des cas suivants peut être correct ?



8. Lors du lancement, une fusée Saturn V a une masse  $m = 2,7 \cdot 10^6$  kg. La propulsion des gaz de combustion fournit une poussée verticale  $F = 3,3 \cdot 10^7$  N.
- Identifier la paire de forces d'interaction action-réaction qui permet l'accélération de la fusée.
  - Calculer l'accélération de la fusée.
  - L'accélération est supposée constante et la résistance de l'air ainsi que la diminution de la masse de la fusée sont négligées. Calculer la vitesse de la fusée après 10 secondes.



9. Par l'application d'une force de freinage  $F$  constante, la vitesse d'une voiture de masse  $m = 800$  kg passe de 90 km/h à 60 km/h en 5 s. Déterminez la valeur de la décélération de la voiture et déduisez-en l'intensité de la force de freinage.
10. Une fille de masse  $m = 30$  kg se trouve sur une balance électronique dans un ascenseur au repos. Ensuite, l'ascenseur accélère uniformément vers le haut avec une accélération de  $a_y = 1,5$  m/s<sup>2</sup>. Ensuite le mouvement devient uniforme et finalement l'ascenseur freine avec une accélération uniforme de  $a_y = -2$  m/s<sup>2</sup>. Pour chacune des phases du mouvement :
- Représenter les forces qui agissent sur la fille.
  - Calculer la valeur indiquée par la balance.
  - Quelle sont l'accélération de la fille et la valeur indiquée par la balance si la corde de l'ascenseur se déchire ?

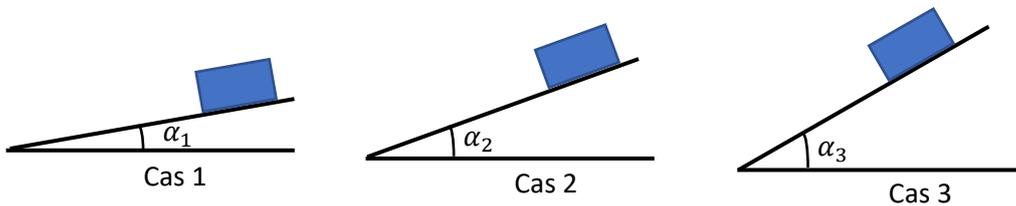


11. Trois blocs de masse 1 kg chacun et reliés avec un fil de masse négligeable sont tirés avec une force  $\vec{F}$  de norme 30 N vers la droite sur une surface horizontale sans frottement.



- Calculer l'accélération du système.
- Déterminer les tensions dans les fils entre les blocs et représenter-les sur une figure.

12. Une savonnette de masse  $m$  glisse sur un plan incliné d'un angle  $\alpha = 15^\circ$  par rapport à l'horizontale. On néglige les frottements. Calculer l'accélération de la savonnette.
13. Trois corps de masses de différentes sont accélérées à partir du repos le long de 3 plans inclinés différents. On suppose que l'on peut négliger tout frottement.



Données :  $\alpha_1 = 10^\circ$ ;  $\alpha_2 = 20^\circ$ ;  $\alpha_3 = 30^\circ$

$m_1 = 6 \text{ kg}$ ;  $m_2 = 2 \text{ kg}$ ;  $m_3 = 4 \text{ kg}$

Classer par ordre croissant les accélérations pour les trois cas.

14. Une voiture de masse 1 t est garée en haut d'une côte faisant un angle de  $10^\circ$  avec l'horizontale. Soudain le frein à main cède et la voiture commence à descendre la côte. On néglige les frottements dus au sol et à l'air.
- Faire le bilan des forces extérieures sur la voiture et représenter les forces sur un schéma.
  - Calculer l'accélération de la voiture.
  - Calculer la vitesse de la voiture après 10 m.
  - Vérifier le résultat à l'aide d'une considération énergétique.
15. Une voiture de masse  $m = 800 \text{ kg}$  monte à une vitesse constante de 60 km/h une côte de 10%. La force de frottement est supposée constante et vaut 500 N.
- Faire le bilan et un schéma des forces extérieures appliquées à la voiture.
  - Calculer l'intensité de la force motrice.
  - Le chauffeur retire son pied de la pédale de vitesse. Calculer la décélération de la voiture.
16. Une voiture de masse 2000 kg descend une côte, faisant un angle de  $20^\circ$  avec l'horizontale, avec une vitesse constante de 54 km/h. On prend  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

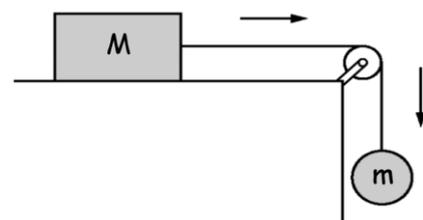
a. Les forces de frottement ont une intensité de :

A. 0 N      B. 684 N      C. 1880 N      D. 6710 N      E. 18437 N      F. 19620 N

b. La réaction du support a une intensité de :

A. 0 N      B. 684 N      C. 1880 N      D. 6710 N      E. 18437 N      F. 19620 N

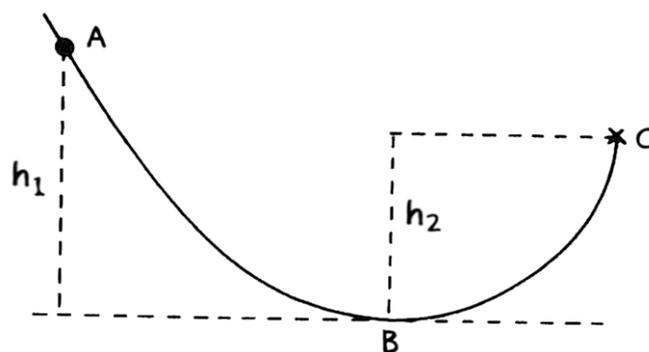
17. Sur un rail horizontal, un chariot de masse  $M = 190 \text{ g}$  peut se déplacer sans frottement. Il est accroché à une masse de  $m = 10 \text{ g}$  suspendue par l'intermédiaire d'un fil de masse négligeable passant par une poulie.



- Calculer l'accélération du système.
- Calculer la distance parcourue par le système durant la première seconde.
- Calculer la tension du fil.

## Théorème de l'énergie cinétique

18. On pousse une caisse horizontalement avec une force de norme 100 N sur une distance de 10 m. La force de frottement entre la caisse et le plancher est constante et de norme 70 N.
- Calculer la variation de l'énergie cinétique de la caisse.
  - Quelle quantité d'énergie mécanique est dissipée ?
19. Calculer le travail résultant effectué sur une voiture de 1500 kg qui est accélérée du repos à une vitesse de 30 m/s.
20. La même voiture roule à la vitesse de 72 km/h sur une route horizontale. Le conducteur freine et la voiture s'arrête après 20 m. Calculer l'intensité de la force de freinage exercée sur la voiture.
21. La même voiture roule à présent à une vitesse de 36 km/h. L'intensité de la force de freinage reste la même. Calculer la distance de freinage à cette vitesse.
22. La diminution de la vitesse d'un passager lors d'un choc est due essentiellement à l'action de la ceinture de sécurité. Un passager de masse  $m = 60$  kg circule en voiture à la vitesse  $v_0 = 72$  km/h. Au cours du choc, la vitesse de la voiture s'annule sur une distance  $d = 3,5$  m.
- Calculer l'intensité de la force moyenne exercée par la ceinture de sécurité sur le passager.
  - Refaire le calcul en supposant que la voiture circule initialement à  $v_0' = 36$  km/h et conclure.
23. Dans un parc d'attraction, une nacelle est remontée au sommet d'une tour. Elle est abandonnée en chute libre sur une hauteur  $h = 20$  m, avant d'être freinée sur une distance  $h' = 8$  m jusqu'à son arrêt.
- Quelle est la vitesse de la nacelle après la chute libre ?
  - Quelle est, lors du freinage, l'intensité  $F$  de la force supposée constante exercée par le siège sur un passager de masse 60 kg ? Comparer cette force au poids  $P$  du passager.
24. La figure montre une bille glissant le long d'un fil rigide.

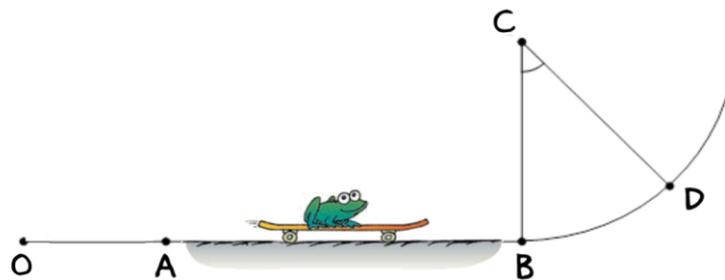


- Quelle doit être la hauteur  $h_1$  si la bille, partant au repos de A, atteint une vitesse de 3,1 m/s au point B ? Le frottement est négligé.
- On suppose maintenant que  $h_1 = 0,5$  m,  $h_2 = 0,3$  m et que la distance de A à C est de 4 m. Une bille de 3 g est lâchée en A, glisse jusqu'en C et s'arrête. Déterminer l'intensité de la force de frottement supposée constante.

25. Un traineau de masse  $m = 20 \text{ kg}$  initialement au repos en  $A$  glisse sans frottement le long d'une pente pour atteindre un point  $B$  situé à une altitude de 3 m plus bas. À partir de  $B$ , le sol est rugueux et exerce une force de frottement  $\vec{F}_f$  constante sur le traineau de telle sorte qu'il s'immobilise en  $C$  après un trajet de 8 m. On considèrera le traineau comme ponctuel et on le représente par son centre d'inertie  $G$ .



- Représenter les forces qui agissent sur le traineau entre  $A$  et  $B$  et déterminer la vitesse du traineau en  $B$ .
  - Représenter les forces qui agissent sur le traineau entre  $B$  et  $C$  et déterminer l'intensité de la force de frottement  $\vec{F}_f$ .
26. Un fusil de fléchettes comprend un ressort de raideur  $k = 250 \text{ N/m}$ , de longueur  $l_0 = 12 \text{ cm}$  et qui, comprimé par la fléchette de masse 25 g, ne mesure plus que  $l = 4 \text{ cm}$ .
- Avec quelle vitesse la fléchette sort-elle du fusil dans le cas d'un tir horizontal ? Faire le calcul
    - sans tenir compte du frottement entre fléchette et fusil.
    - en tenant compte d'une force de frottement constante d'intensité 0,15 N.
  - Quelle altitude maximale  $h_{max}$  peut-elle atteindre dans le cas d'un tir vertical ? Faire le calcul sans tenir compte du frottement entre fléchette et fusil ni de la résistance de l'air.
27. Une grenouille sur une planche à roulettes de masse totale 3 kg roule sans frottement sur une piste horizontale à bord relevé. La planche part en  $O$  à partir du repos et accélère sur une distance  $OA = 2 \text{ m}$  sous l'action d'une force résultante supposée constante. Sa vitesse en  $A$  vaut 2 m/s. La planche continue à rouler librement sur une distance  $AB = 4 \text{ m}$ , puis suit une trajectoire circulaire de centre  $C$  et de rayon  $R = CB = 2 \text{ m}$ . En  $D$ , elle s'arrête et rebrousse chemin. La force de frottement est négligée.



- Calculer l'intensité de la force résultante entre  $O$  et  $A$ .
- Calculer l'angle  $\alpha = \widehat{BCD}$ .

En réalité, la planche n'est montée que jusqu'en  $D'$  donné par  $\alpha' = \widehat{BCD'} = 20^\circ$ , puis est redescendue et s'est arrêtée en  $A$ .

- Calculer la force de frottement supposée constante sur le chemin de retour  $D'BA$ .

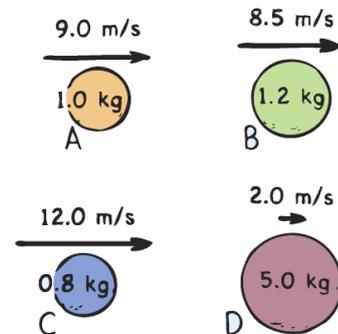
*Indication :*

Longueur de l'arc de cercle :  $s = R \alpha$ , où  $\alpha$  est exprimé en radians et  $R$  est le rayon.

## Quantité de mouvement

28. Calculer la quantité de mouvement d'une boule de 10 kg roulant à une vitesse de 2 m/s.
29. Comparer la quantité de mouvement d'une balle de fusil de masse 6,8 g à une vitesse de 800 m/s avec la quantité de mouvement d'un ballon de football de masse de 450 g et à une vitesse de 100 km/h.

30. Les balles ont des masses et des vitesses différentes. Ranger par ordre décroissant les normes de leurs quantités de mouvement.



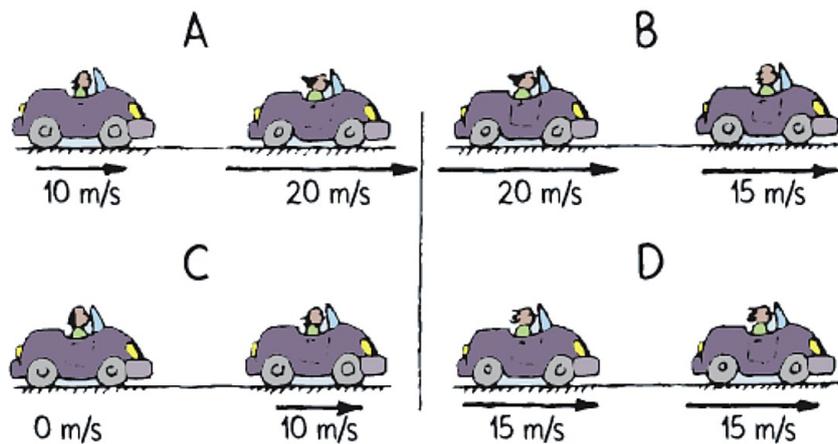
31. Deux voitures, l'une avec une masse deux fois plus grande que l'autre, descendent une colline à la même vitesse. Comparée à la voiture plus légère, la quantité de mouvement de la voiture plus lourde est...
- le double
  - la moitié
  - identique
32. Lorsque la vitesse d'un objet est doublée, sa quantité de mouvement...
- reste identique
  - double
  - quadruple
  - diminue
33. Un véhicule lunaire est testé sur Terre et roule à une vitesse de 10 km/h. Lorsque le véhicule se déplace à la même vitesse sur la Lune, sa quantité de mouvement est
- plus grande
  - plus petite
  - identique

Justifier.

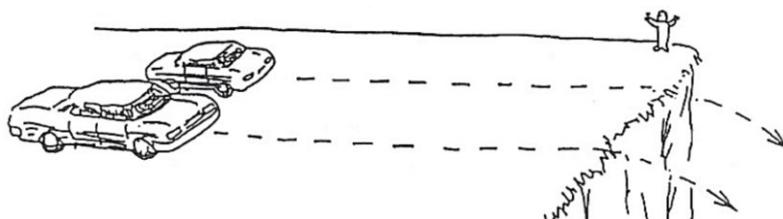
34. Pourquoi les airbags des voitures réduisent le risque de blessures lors d'un accident.
35. Il est en général beaucoup plus difficile d'arrêter un camion qu'un cycliste roulant à la même vitesse. Imaginer un cas de figure pour lequel la force de freinage pour arrêter le cycliste est plus grande (le cycliste roulant toujours à la même vitesse que le camion).
36. Autrefois les voitures étaient conçues pour être aussi rigides que possibles. Aujourd'hui les voitures sont conçues pour se déformer lors d'un impact. Pourquoi ?
37. Qui a la plus grande masse ?
- Un camion au repos.
  - Une planche à roulette qui roule.

Qui a la plus grande quantité de mouvement ?

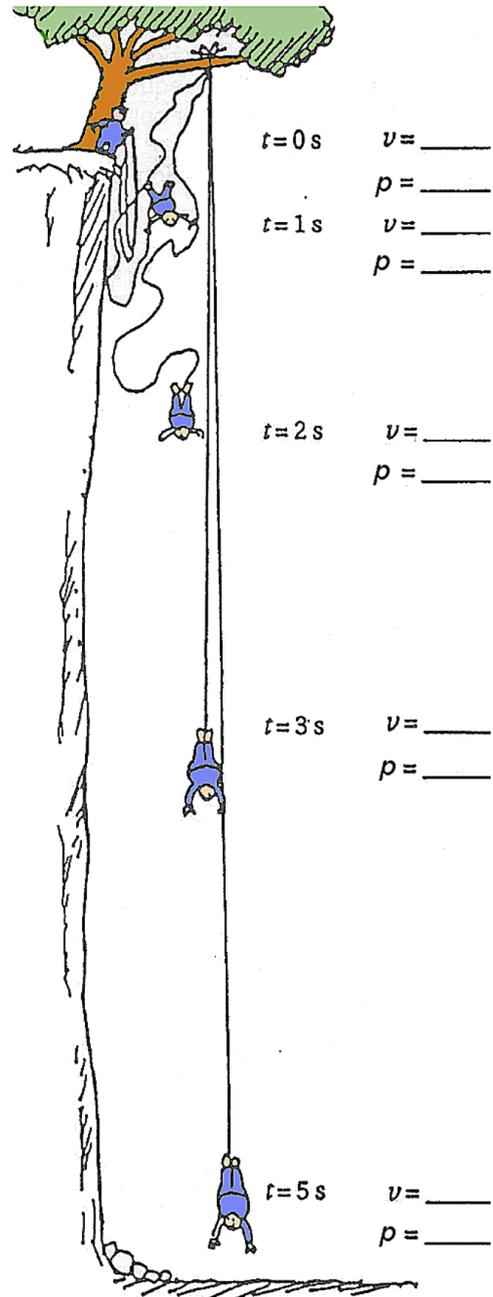
38. Calculer la variation de la quantité de mouvement lorsqu'une force moyenne de 10 N est exercée sur un chariot pendant 2,5 s.
39. Une voiture a la même énergie cinétique, qu'elle se déplace vers le nord ou avec la même vitesse vers le sud. Est-ce que la quantité de mouvement de la voiture est la même dans les deux cas ?
40. La voiture illustrée a une masse de 1000 kg. Ranger par ordre décroissant :
- les variations de quantité de mouvement subies par la voiture entre les deux instants représentés.
  - les variations de l'énergie cinétique de la voiture entre les deux instants représentés.
  - les travaux résultants effectués sur la voiture entre les deux instants représentés.



41. Voici une question qui, à première vue, pourrait sembler facile à répondre pour un physicien : avec quelle force un rocher de 10 N frappe le sol s'il est lâché d'une hauteur de 10 m ? Or, on ne peut pas répondre à la question à moins de connaître une information supplémentaire. Laquelle ?
42. Un corps peut-il avoir de l'énergie cinétique sans avoir de quantité de mouvement ?
43. Comparer la quantité de mouvement d'une balle de 1 kg qui roule à une vitesse de 2 m/s à celle d'une balle de 2 kg qui roule à une vitesse de 1 m/s. Comparer également leurs énergies cinétiques.
44. Une balle de tennis de masse  $m = 56$  g est lancée à une vitesse de 25 m/s vers une raquette de tennis. Cette dernière frappe la balle afin de lui donner une vitesse de 40 m/s dans le sens opposé. Sachant que la durée de contact entre la balle et la raquette est estimée à 0,01 s, déterminer la force moyenne qui agit sur la balle.
45. Lors d'une cascade pour un film, une petite et une grande voiture se trouvent initialement au repos sur un parking en haut d'une falaise. La masse de la grande voiture vaut le double de celle de la petite voiture. Des forces accélératrices constantes et identiques s'appliquent ensuite aux deux voitures. Elles parcourent une distance identique jusqu'au bord de la falaise (pour finir dans la mer située en contrebas). Répondre aux questions suivantes en justifiant.



- a. Quelle voiture subit la plus grande accélération ?
- b. Quelle voiture subit la plus grande variation de la quantité de mouvement ?
- c. Quelle voiture a donc la plus grande quantité de mouvement au bord de la falaise ?
- d. Quelle voiture reçoit le plus grand travail de la part de la force accélératrice ?
- e. Quelle voiture a donc la plus grande énergie cinétique au bord de la falaise ?
46. Un sauteur de bungee de 100 kg s'élanche du haut d'une falaise et se trouve en chute libre pendant 3s. C'est alors que l'élastique commence à s'allonger et la vitesse du sauteur s'annule ensuite en 2 s. Tout frottement est négligé.
- Calculer la distance de chute après les 3 premières secondes.
  - Calculer la variation de la quantité de mouvement durant la phase de chute libre.
  - Calculer la variation de la quantité de mouvement pendant la phase de décélération.
  - Calculer la force moyenne exercée par l'élastique sur le sauteur durant la phase de décélération.
  - Calculer l'énergie cinétique du sauteur après les 3 s de chute libre.
  - En quelle forme d'énergie cette énergie cinétique du sauteur est-elle transformée durant la phase de freinage.



## Explosions et collisions

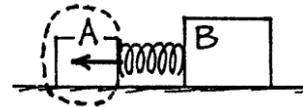
47. Lorsque le ressort comprimé est lâché, les blocs A et B vont s'éloigner l'un de l'autre. Trois systèmes différents sont encerclés.

a. Est-ce qu'une force extérieure résultante agit sur le système A ?

(oui) (non)

La quantité de mouvement du système A va-t-elle changer ?

(oui) (non)



b. Est-ce qu'une force extérieure résultante agit sur le système B ?

(oui) (non)

La quantité de mouvement du système B va-t-elle changer ?

(oui) (non)



c. Est-ce qu'une force extérieure résultante agit sur le système A + B + ressort ?

(oui) (non)

La quantité de mouvement du système va-t-elle changer ?

(oui) (non)



48. Une fille saute sur la Terre vers le haut.

a. Sur la figure, indiquer le système « fille » en rouge.

Est-ce que le système fille est isolé ? (oui) (non)

Est-ce que la quantité de mouvement de la fille est conservée ?

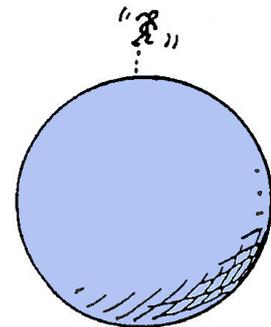
(oui) (non)

b. Sur la figure, indiquer le système « fille + Terre » en bleu.

Est-ce que le système fille + Terre est isolé ? (oui) (non)

La quantité de mouvement du système est-elle conservée ?

(oui) (non)



49. Tu lances une balle horizontalement en étant debout sur une planche à roulettes. La masse de la balle vaut un dixième de ta propre masse. Comparée à la vitesse transmise à la balle, ta vitesse de recul sera

- A. 10 fois plus petite
- B. identique
- C. 10 fois plus grande
- D. 100 fois plus grande



50. Lorsqu'un chasseur tient fermement le fusil au moment de tirer, la quantité de mouvement de la balle et des gaz propulsés est égale à la quantité de mouvement

- A. du fusil
- B. du système fusil + tireur
- C. du tireur

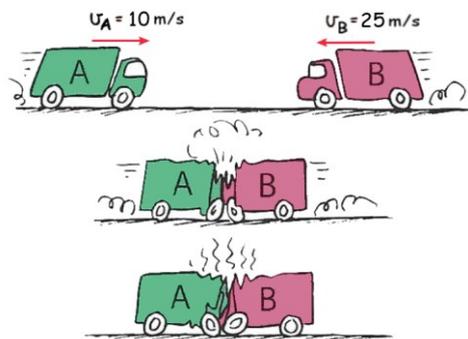


51. On tire une balle de masse  $m_b = 40 \text{ g}$  avec une vitesse  $v_b' = 250 \text{ m/s}$  à l'aide d'un fusil de masse  $m_f = 4 \text{ kg}$ . Calculer la vitesse de recul du fusil.
52. Un neutron vient frapper, à la vitesse  $v_n = 10^6 \text{ m/s}$ , un noyau d'hélium (particule  $\alpha$ ) immobile. Le noyau d'hélium est projeté dans le sens de  $\vec{v}_n$  à la vitesse  $v_\alpha = 4 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ , tandis que le neutron rebondit dans le sens inverse, à la vitesse  $v_n' = 6 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ . En déduire une relation entre la masse  $m_\alpha$  du noyau d'hélium et la masse  $m_n$  du neutron.

53. Une mémé de masse  $80 \text{ kg}$  roule en patins à roulettes à une vitesse de  $3 \text{ m/s}$ . Sans freiner, elle soulève son neveu de  $40 \text{ kg}$  qui se trouvait immobile sur son chemin, et continue sa trajectoire rectiligne avec son neveu dans les bras. Déterminer la vitesse de la mémé juste après l'événement.

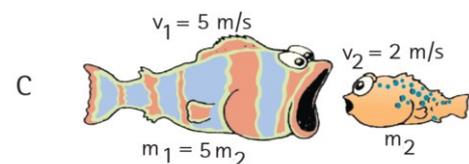
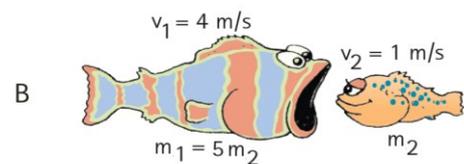
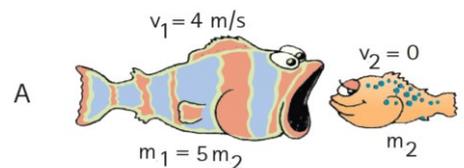


54. Une camionnette A de masse  $m_A = 2,4 \text{ t}$  roule avec une vitesse  $v_A = 10 \text{ m/s}$  et entre en collision frontale avec une camionnette B de masse  $m_B = 3,2 \text{ t}$  roulant avec une vitesse  $v_B = 25 \text{ m/s}$ . Après le choc, les deux véhicules restent encastés mais continuent à se déplacer à une vitesse  $v'$ .

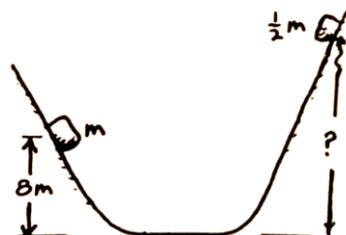


- De quel type de collision s'agit-il ?
- Trouver la vitesse  $v'$  ainsi que le sens dans lequel se déplacent les véhicules.
- L'énergie cinétique du système des deux camionnettes est-elle conservée ? Sinon, déterminer le pourcentage d'énergie cinétique transformée.
- À quelle vitesse aurait dû rouler la camionnette A pour que les deux camionnettes s'immobilisent après le choc ( $v' = 0$ ) ?

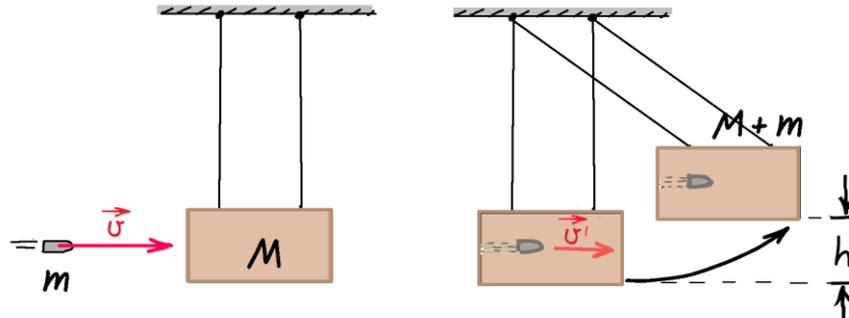
55. Un grand poisson affamé s'apprête à dévorer un pauvre petit poisson. Le grand poisson a une masse 5 fois plus grande que le petit. Ranger par ordre décroissant la vitesse du grand poisson juste après avoir dévoré le petit poisson.



56. Un savon de masse  $m$  glisse sans frottement sur une pente à partir d'une hauteur de  $8 \text{ m}$ . Un autre savon de masse  $\frac{1}{2} m$  glisse sans frottement sur une pente en face, et les deux savons s'immobilisent en bas lors d'une collision totalement inélastique. Déterminer la hauteur de laquelle a glissé le petit savon.



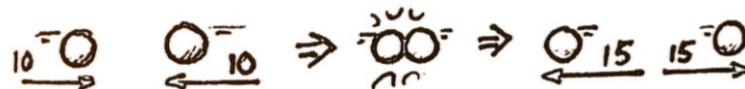
57. Un pendule balistique est utilisé pour déterminer la vitesse d'une balle tirée par un fusil de chasse. Le pendule est constitué d'un bloc de bois de masse  $M = 10 \text{ kg}$  suspendu à deux tiges de même longueur et de masse négligeable. La balle, de masse  $m = 40 \text{ g}$ , est tirée horizontalement en direction du bloc de bois qui se trouve initialement au repos. Après la collision inélastique le bloc, avec la balle à l'intérieur, monte d'une hauteur de  $h = 15 \text{ cm}$ .



- Déterminer la vitesse de la balle avant l'impact.
  - Calculer le pourcentage d'énergie dissipée lors du choc.
58. Deux boules de billard identiques roulent à une vitesse de norme  $10 \text{ m/s}$  et font une collision frontale. Les forces extérieures qui agissent sur le système des deux boules durant la collision sont négligeables. Après la collision, les boules continuent à rouler dans le sens indiqué sur la figure, chacune avec une vitesse de  $10 \text{ m/s}$ . Cette collision est-elle possible ? Justifier.



59. Après la collision, les boules continuent à rouler dans le sens indiqué sur la figure, chacune avec une vitesse de norme  $15 \text{ m/s}$ .



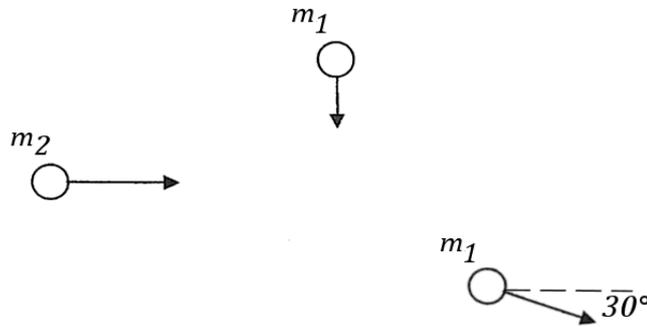
- Est-ce que cette collision satisfait au principe de la conservation de la quantité de mouvement ? Justifier.
- Cette collision est-elle possible ? Justifier.

### Collisions à deux dimensions

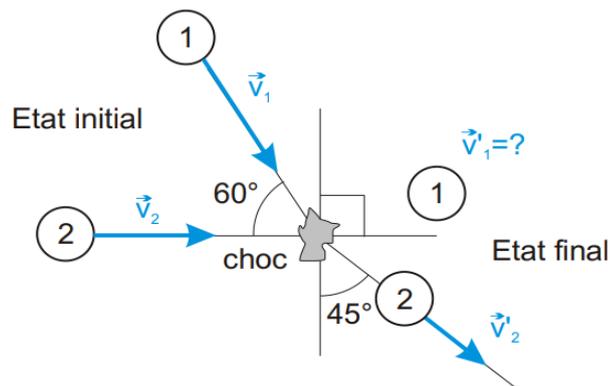
60. Un proton 1 se déplace vers la droite à une vitesse  $v_1 = 5 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ . Il entre en collision avec un deuxième proton 2 immobile. Après le choc, le proton 1 se déplace avec une vitesse  $v_1' = 4 \cdot 10^5 \text{ m/s}$  en faisant un angle  $\alpha_1 = 35^\circ$  avec l'horizontale.
- Déterminer la vitesse  $v_2'$  du proton 2, ainsi que l'angle  $\alpha_2$  qu'il fait avec l'horizontale.
  - Vérifier si la collision est inélastique ou élastique.

61. Juste avant leur collision, une boule de masse  $m_1 = 2 \text{ kg}$  se déplace verticalement vers le bas avec une vitesse  $v_1 = 4 \text{ m/s}$  et une boule de masse  $m_2 = 3 \text{ kg}$  se déplace horizontalement vers la droite à une vitesse  $v_2 = 5 \text{ m/s}$ .

Juste après la collision,  $m_1$  se déplace à une vitesse  $v'_1 = 3 \text{ m/s}$  selon une direction de  $30^\circ$  par rapport à l'horizontale (voir figure). Déterminer la direction et la norme de la vitesse de  $m_2$  juste après la collision.



62. Dans la réaction chimique  $\text{H}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{HCl}$ , un ion hydrogène qui se déplace de gauche à droite à la vitesse  $v_{\text{H}} = 1,57 \cdot 10^5 \text{ m/s}$  réagit avec un ion chlore qui se déplace de haut vers le bas avec une vitesse  $v_{\text{Cl}} = 3,4 \cdot 10^4 \text{ m/s}$ .
- De quel type de collision s'agit-il ?
  - Faire un schéma annoté des situations avant et après la collision.
  - Trouver la norme et la direction (par rapport à la direction initiale de l'ion  $\text{H}^+$ ) de la vitesse de la molécule  $\text{HCl}$  formée.
63. Deux boules de billard de même masse progressent suivant des directions qui font un angle de  $60^\circ$  aux vitesses respectives  $v_1 = 1 \text{ m/s}$  et  $v_2 = 0,8 \text{ m/s}$ . Après le choc, la boule (2) part avec un angle de  $45^\circ$  par rapport à sa direction initiale, à la vitesse  $v'_2 = 0,6 \text{ m/s}$ .



- Déterminer la vitesse (norme et direction et sens) de la boule (1) après le choc.
- Comparer l'énergie cinétique du système des deux boules avant et après le choc.

## Révision

Les affirmations sont-elles vraies ou fausses ?

	Affirmation	Vrai	Faux
1	Si la force résultante s'exerçant sur un solide est nulle, alors le solide est obligatoirement au repos.		
2	Un solide subissant une force extérieure non nulle peut avoir un mouvement rectiligne.		
3	Un solide subissant une force extérieure non nulle peut avoir un mouvement uniforme.		
4	Un solide subissant une force extérieure non nulle peut avoir un mouvement rectiligne uniforme.		
5	La quantité de mouvement d'un corps est une grandeur vectorielle.		
6	L'unité SI de la quantité de mouvement est $1 \frac{\text{kg}}{\text{m s}^2}$ .		
7	La force résultante s'exerçant sur un corps ponctuel est égale à la variation de la quantité de mouvement $\vec{p}$ par unité de temps.		
8	La force s'exerçant sur un corps est grande si la quantité de mouvement varie rapidement.		
9	Lors d'une collision élastique, on a conservation de l'énergie cinétique et de la quantité de mouvement.		
10	Lors d'une collision inélastique, on a conservation de l'énergie cinétique et de la quantité de mouvement.		

## Crédits Photos

© Richard Megna / FUNDAMENTAL PHOTOGRAPHS, NYC – p.0 (page titre)

© CERN – p.18 (chambre à bulles : omega production and decay)

## Crédits Illustrations

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours. Les illustrations de Paul G. HEWITT ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

© HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson

© HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson

© EPSTEIN Lewis C., HEWITT, Paul G., *Thinking Physics* – 1981, Insight Press

# 3.

## Champ de gravitation



© Chonlatee42 Shutterstock.com



## Sommaire

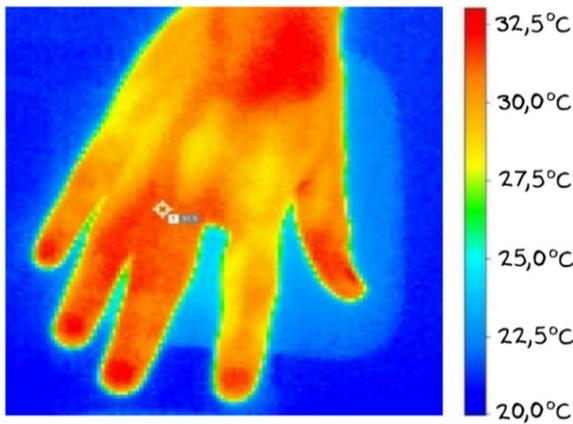
1	Notion de champ.....	1
2	Force gravitationnelle.....	2
3	Champ de gravitation.....	4
3.1	Définition du vecteur champ de gravitation.....	4
3.2	Caractéristiques pour une masse source à symétrie sphérique.....	4
3.3	Lignes de champ de gravitation.....	5
3.4	Champ de gravitation uniforme.....	6
3.5	Différence entre le champ de gravitation et le champ de pesanteur terrestres.....	6
3.6	Champ de gravitation à l'intérieur d'une planète (facultatif).....	7
4	Énergie potentielle de gravitation.....	8
4.1	Force conservative et énergie potentielle.....	8
4.2	Définition de l'énergie potentielle de gravitation.....	9
4.3	Surfaces et lignes équipotentiels.....	9
5	Pour en savoir plus.....	11
6	Exercices.....	14



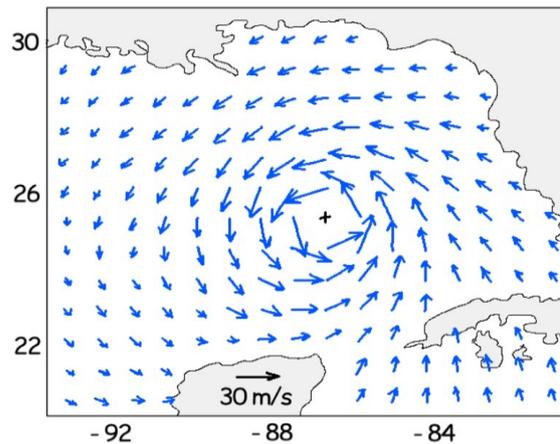
# 1 Notion de champ

Un champ décrit la distribution spatiale d'une grandeur physique. À cet effet, il attribue en tout point de l'espace la grandeur physique en question avec ses caractéristiques locales.

- a. Dans le cas d'un **champ scalaire**, la grandeur physique attribuée possède seulement une valeur.
- b. Dans le cas d'un **champ vectoriel**, la grandeur physique attribuée s'appelle **vecteur champ**. En particulier, si le champ vectoriel détermine en tout point de l'espace le vecteur force qui s'y exerce sur un corps, on parle d'un **champ de force**<sup>1</sup>.



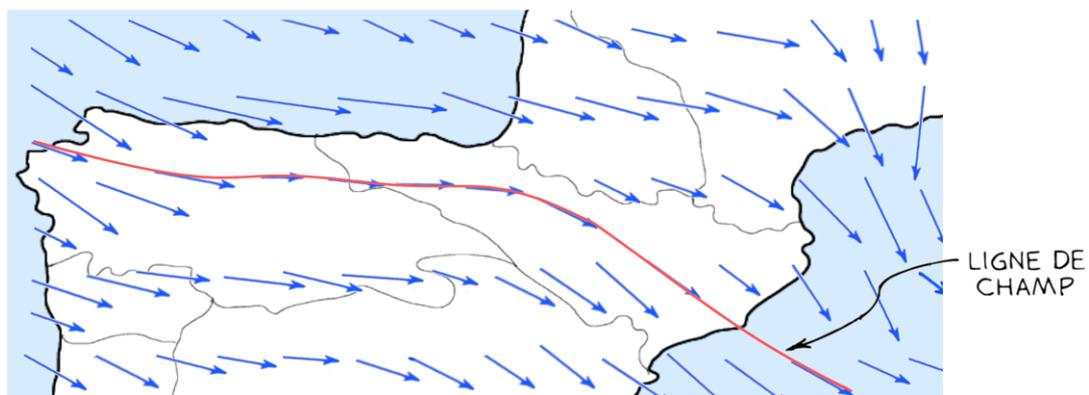
(a) Champ scalaire de température



(b) Champ vectoriel de vitesse du vent

Afin de mieux pouvoir représenter un champ vectoriel, le physicien et chimiste britannique Michael Faraday (1791-1867) a introduit le concept de la ligne de champ.

La **ligne de champ** est une courbe de l'espace à laquelle le vecteur champ est tangent en tout point. Elle est orientée dans le sens du champ.



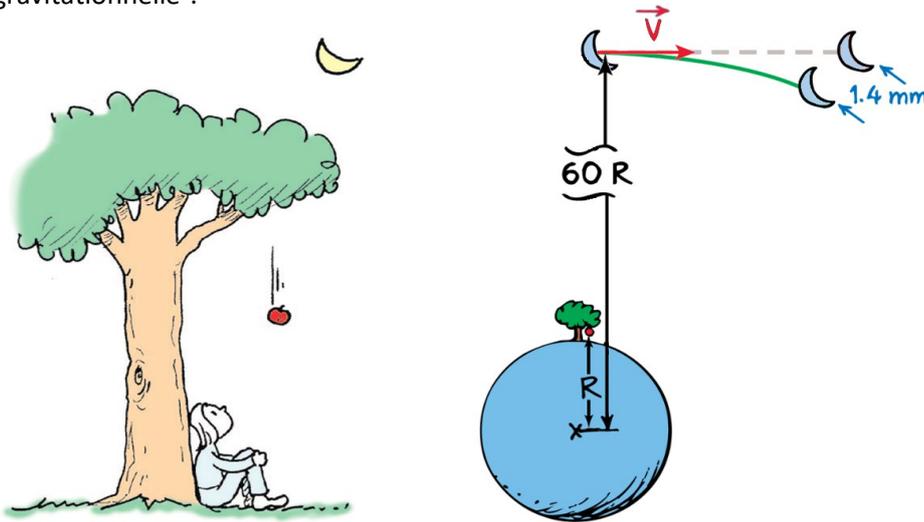
Remarques

- Les lignes de champ ne peuvent jamais se toucher, ni se croiser, ni se subdiviser.
- Plus les lignes de champ sont denses, plus le champ est intense.
- Si le vecteur champ a partout même direction, même sens et même intensité, il s'agit d'un **champ uniforme**. Les lignes de champ d'un champ uniforme sont parallèles et équidistantes.

<sup>1</sup> Parmi les champs de force on compte le champ de gravitation, le champ de pesanteur, le champ électrique et le champ magnétique.

## 2 Force gravitationnelle

D'après la légende, Newton a découvert la gravitation lorsque la fameuse pomme lui tomba sur la tête. Or, ce que Newton a découvert est le fait que l'interaction gravitationnelle a un caractère **universel**, c'est-à-dire qu'elle n'est pas limitée à la Terre mais s'étend à travers tout l'univers. Newton a eu l'intuition que la force qui contraint la Lune sur sa trajectoire approximativement circulaire, et la force qui fait tomber une pomme d'un arbre sont de même nature : dans les deux cas, il s'agit de la force d'attraction gravitationnelle<sup>2</sup>.



*Les chutes de la pomme et de la Lune sont dues à la force de gravitation exercée par la Terre*

Newton réalisa que la Lune tombe en permanence en dessous de la ligne droite qu'elle suivrait en l'absence de force. Une pomme tombe près de 5 m lors de la première seconde de chute. Pour pouvoir expliquer le mouvement de la Lune, Newton doit admettre que l'attraction gravitationnelle diminue avec la distance  $r$  au centre de la Terre d'un facteur  $\frac{1}{r^2}$ . La Lune étant 60 fois plus éloignée du centre de la Terre que la pomme, elle tombe de  $\frac{5\text{m}}{60^2} \cong 1,4 \text{ mm}$  durant la première seconde de chute. Cette valeur est en accord avec la trajectoire de la Lune. Sa grande vitesse tangentielle permet à la Lune de tomber autour de la Terre, plutôt que sur la Terre. Newton a généralisé sa théorie à tous les corps de l'univers. En 1684, il énonce sa **loi de gravitation** :

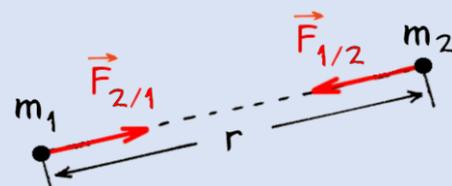
Deux masses ponctuelles  $m_1$  et  $m_2$ , séparées d'une distance  $r$ , s'attirent mutuellement avec des forces  $\vec{F}_{1/2}$  et  $\vec{F}_{2/1}$ , dont les intensités sont

- égales d'après le principe de l'action et de la réaction ;
- proportionnelles au produit des deux masses ;
- inversement proportionnelles au carré de leur distance.

Mathématiquement :

$$F_{1/2} = F_{2/1} = F_g = K \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

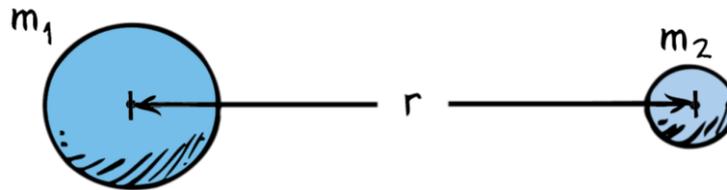
où  $K = 6,673 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N m}^2}{\text{kg}^2}$  désigne la constante de proportionnalité (constante universelle).



<sup>2</sup> Newton connaît ses propres lois : Sans force extérieure, tout corps en mouvement effectue un MRU. Si le vecteur vitesse d'un corps change, alors il subit une accélération, donc une force. Le changement de direction que la Lune subit lors de sa trajectoire circulaire autour de la Terre nécessite donc la présence d'une force.

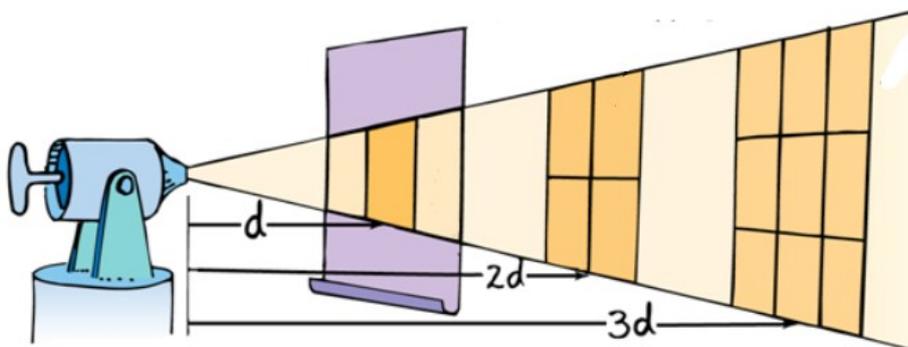
## Remarques

- L'interaction gravitationnelle est toujours attractive et sa portée est infinie.
- Après des années d'efforts, Newton a su prouver que sa loi de gravitation, valable pour des masses ponctuelles, décrit aussi en excellente approximation l'attraction entre les centres de masse des astres.



*Un corps à répartition sphérique de masse est assimilable à son centre d'inertie, affecté de la masse totale du corps.*

- La force gravitationnelle est une **force centrale**, c'est-à-dire qu'elle a une droite d'action qui passe toujours par un point fixe, le **centre de force**. En effet, la force gravitationnelle pointe toujours vers le centre de masse de la masse attirante (= centre de force).
- La **constante universelle  $K$**  a été mesurée par Henry Cavendish, environ 150 ans après la formulation de la loi de gravitation. Sa très petite valeur indique que la force gravitationnelle est une force extrêmement faible. C'est la plus faible des quatre forces fondamentales de la nature (les trois autres étant la force électromagnétique et deux types de forces nucléaires). La force de gravitation n'est prédominante que si de très grandes masses sont en jeu.
- La loi de gravitation est une **loi en carré inverse**, loi qui postule qu'une grandeur physique est inversement proportionnelle au carré de la distance de l'origine de cette grandeur physique.



*La force gravitationnelle diminue avec la distance à l'astre de la même manière que l'intensité lumineuse diminue avec la distance à la source de lumière ponctuelle.*

### ■ As-tu-compris ?

1. Considérer un astronaute qui est trois fois plus éloigné du centre de la Terre que lorsqu'il se trouve à sa surface. La force d'attraction gravitationnelle ressentie à cette distance vaut
  - A. zéro
  - B. un tiers de l'attraction à la surface
  - C. un neuvième de l'attraction à la surface

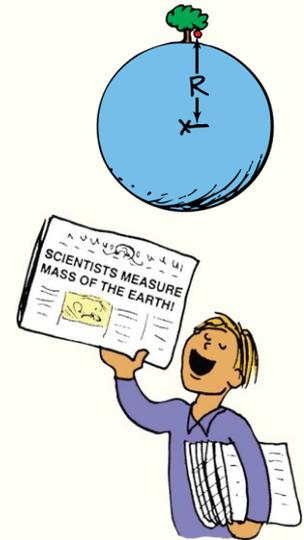
### Exercice résolu

**Énoncé :** Calculer la masse de la Terre à l'aide d'une pomme de 100 g, sachant que le rayon terrestre vaut 6370 km.

**Solution :** La Terre attire la pomme de masse  $m = 0,1$  kg avec une force gravitationnelle d'environ  $F_g = 1$  N (son poids). La distance entre leurs centres de masse vaut  $r = R = 6,370 \cdot 10^6$  m. En utilisant la loi de gravitation de Newton, on peut calculer la masse  $M$  de la Terre :

$$M = \frac{F_g R^2}{K m} = \frac{1 \cdot (6,370 \cdot 10^6)^2}{6,673 \cdot 10^{-11} \cdot 0,1} \cong 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

Une fois la valeur de  $K$  connue, la masse de la Terre a pu être calculée, bien avant que certaines régions de la Terre aient été découvertes !



## 3 Champ de gravitation

### 3.1 Définition du vecteur champ de gravitation

On dit qu'il existe un champ de gravitation en un point de l'espace, si une masse témoin placée en ce point est soumise à une force de gravitation. Même si l'on enlève la masse témoin, le champ de gravitation persiste.

Le **vecteur champ de gravitation**  $\vec{G}$  en un point de l'espace correspond à la force gravitationnelle qui s'exerce en ce point sur l'unité de masse :

$$\vec{G} = \frac{\vec{F}_g}{m}$$

L'unité SI d'intensité du champ de gravitation est le newton par kilogramme :  $[G] = 1 \text{ N/kg}$

La force gravitationnelle entre deux masses  $m$  et  $M$  peut dès lors s'interpréter de deux manières :

- La masse  $m$  subit la force de gravitation qui est *exercée à distance par l'autre masse  $M$* .
- La masse  $M$ , appelée **masse source**, associe à tout point de l'espace un champ de gravitation. La masse  $m$ , appelée **masse témoin**, « sent » la présence du champ de gravitation et subit la force gravitationnelle qui est *exercée directement par le champ*.

À l'aide de la notion de champ, on sépare la force de gravitation en deux parties : une partie qui est le champ de gravitation produit par une masse source et une partie, la masse témoin, qui subit l'influence du champ de gravitation. La force gravitationnelle que subit la masse témoin s'écrit dès lors :  $\vec{F}_g = m \vec{G}$

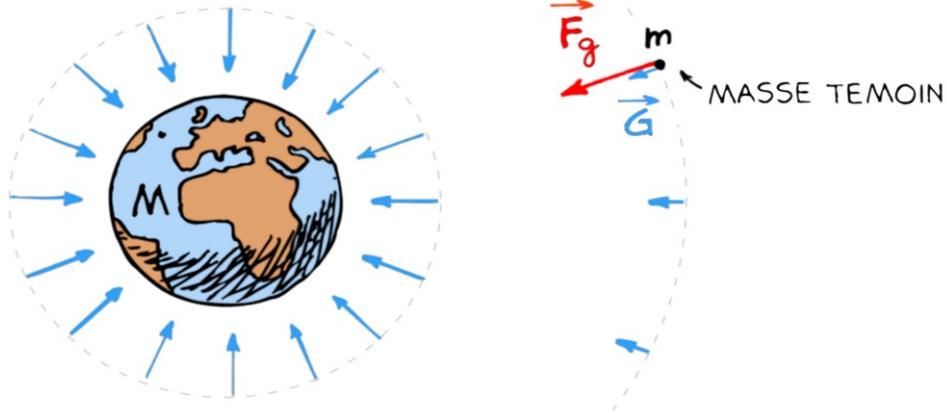
### 3.2 Caractéristiques pour une masse source à symétrie sphérique

1. **Origine** :  $\vec{G}$  est associé à tout point de l'espace où règne le champ gravitationnel
2. **Direction** : celle de la force gravitationnelle  $\vec{F}_g$  (radiale, passant par le centre de masse de  $M$ )
3. **Sens** : celui de  $\vec{F}_g$  (centripète, vers  $M$ )

4. **Intensité (norme)** : 
$$G = \frac{F_g}{m} = \frac{K \frac{mM}{r^2}}{m} = K \frac{M}{r^2}$$

$G \sim M$  :  $G$  est proportionnel à la masse source

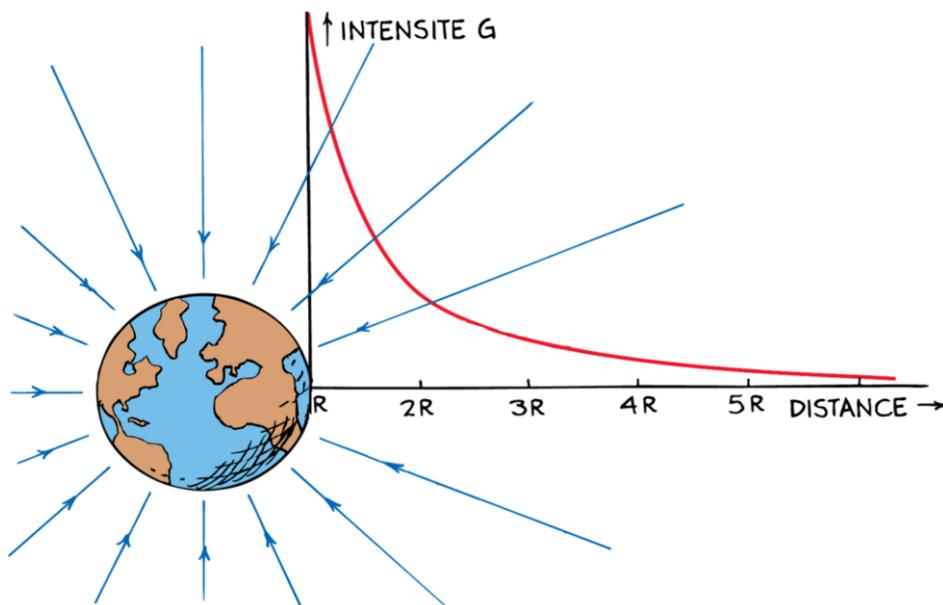
$G \sim \frac{1}{r^2}$  :  $G$  est inversement proportionnel au carré de la distance (loi en carré inverse)



### 3.3 Lignes de champ de gravitation

Le vecteur champ de gravitation est tangent en tout point d'une **ligne de champ de gravitation**. La tangente en un point de la ligne de champ de gravitation indique également la direction de la force de gravitation en ce point.

- Toute ligne de champ de gravitation aboutit à la masse source.
- La densité des lignes de champ est proportionnelle à l'intensité du champ de gravitation.



*L'intensité du champ de gravitation décroît avec la distance au centre de la masse source selon la loi en carré inverse (en rouge). Les lignes de champ représentent le champ de gravitation radial et centripète (en bleu).*

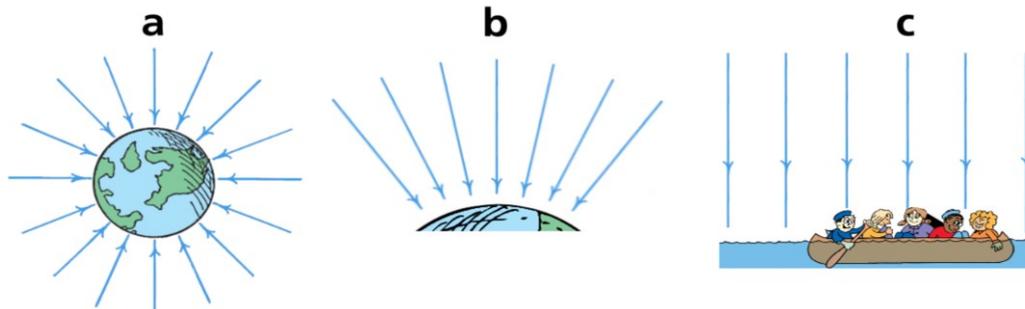
#### ■ As-tu-compris ?

2. Que devient l'intensité du champ de gravitation lorsqu'on double respectivement triple
  - a. la masse témoin  $m$  ?
  - b. la masse source  $M$  ?
  - c. la distance  $r$  à la masse source  $M$  ?

### 3.4 Champ de gravitation uniforme

Un champ de gravitation est uniforme dans une région de l'espace, si, en tout point de cette région, il a même direction, même sens et même intensité :  $\vec{G} = \overrightarrow{\text{const}}$

Les lignes d'un champ gravitation uniforme sont des droites parallèles et équidistantes.



*Vue de loin, le champ de gravitation de la Terre est radial (a). Si la région considérée n'est pas trop étendue<sup>3</sup>, le champ de gravitation est uniforme (c).*

### 3.5 Différence entre le champ de gravitation et le champ de pesanteur terrestres

L'accélération d'un corps en chute libre est déterminée par le champ de pesanteur  $\vec{g}$ . Elle résulte d'un effet combiné du champ de gravitation  $\vec{G}$  et de la rotation propre de la Terre.

En effet, la rotation de la Terre imprime une accélération centrifuge aux corps qui compense partiellement leur accélération gravitationnelle donnée par  $\vec{G}$ . L'effet centrifuge est maximal à l'équateur et nul sur l'axe de rotation, en particulier aux pôles. Ceci est confirmé par les mesures de l'accélération en chute libre  $g$  au niveau de la mer en différents endroits :

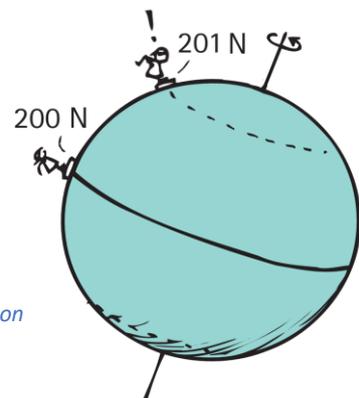
	Équateur	Europe centrale	Pôles
$g$ (en $\text{m/s}^2$ )	9,78	9,81	9,83

Pour l'accélération gravitationnelle à la surface de la Terre on retrouve la valeur de  $g$  aux pôles<sup>4</sup> :

$$G = K \frac{M_T}{R_T^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \cdot 10^{24}}{(6370 \cdot 10^3)^2} = 9,83 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 9,83 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

En tout point hors de l'axe de rotation, le champ de pesanteur  $\vec{g}$  diffère ainsi faiblement (en direction et en intensité) du champ de gravitation  $\vec{G}$ . Il en est de même pour le poids  $\vec{P} = m \vec{g}$  et la force de gravitation  $\vec{F}_g = m \vec{G}$  qu'un corps de masse  $m$  subit. Si la Terre ne tournait pas, ces différences (souvent négligeables) n'existeraient pas.

*Due à l'accélération centrifuge causée par la rotation de la Terre, l'accélération gravitationnelle  $\vec{G}$  diffère légèrement de l'accélération de la chute libre  $\vec{g}$ .*

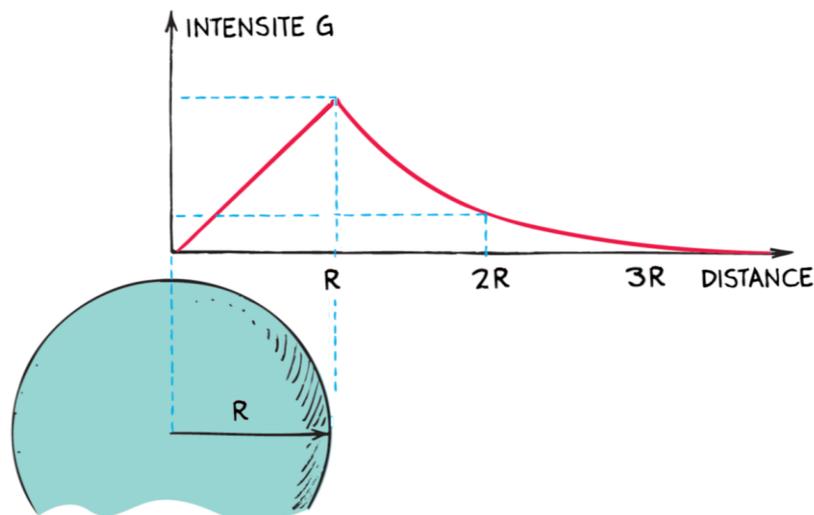


<sup>3</sup> On peut montrer que dans un volume parallélépipédique de base 100 km · 100 km et de hauteur 30 km, le vecteur champ varie de moins de 1 degré en direction et de moins de 1% en intensité.

<sup>4</sup> Pour le calcul on peut négliger que la Terre n'est pas une sphère parfaite (elle est aplatie aux pôles) et que la répartition de sa masse n'est pas parfaitement homogène par couches.

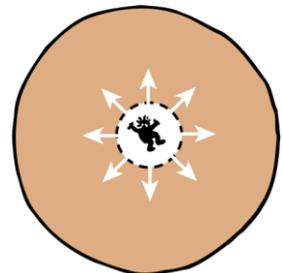
### 3.6 Champ de gravitation à l'intérieur d'une planète (facultatif)

L'attraction gravitationnelle existe aussi à l'intérieur d'une planète. En supposant que la planète soit une boule homogène, l'intensité du champ de gravitation à l'intérieur de la planète diminue linéairement avec la distance au centre de masse de la planète et devient nulle en son centre. Au-delà de la planète, l'intensité du champ de gravitation diminue selon la loi en carré inverse.



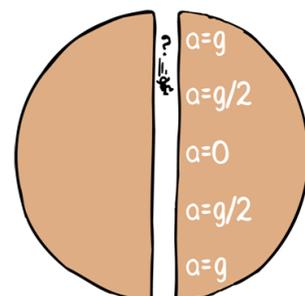
*L'intensité du champ de gravitation à l'intérieur d'une planète de masse volumique uniforme est proportionnelle à la distance radiale de son centre et est maximale à sa surface.*

Imaginons une caverne sphérique au centre d'une planète. Dans cette caverne le champ de gravitation serait nul en raison de l'annulation des forces gravitationnelles dans toutes les directions. On peut montrer que la taille de la caverne ne change rien à ce fait, même si elle constitue la plupart du volume de la planète. Ainsi, une planète creuse n'aurait aucun champ de gravitation à l'intérieur. Une annulation complète des forces de gravitation a lieu partout à l'intérieur de la planète creuse.



Imaginons un tunnel creusé à travers la Terre, par exemple du pôle Nord jusqu'au pôle Sud. Négligeons tous les problèmes pratiques, tels que la haute température au centre de la Terre ou la résistance de l'air, et considérons le mouvement qu'on effectuerait si on sautait dans un tel trou.

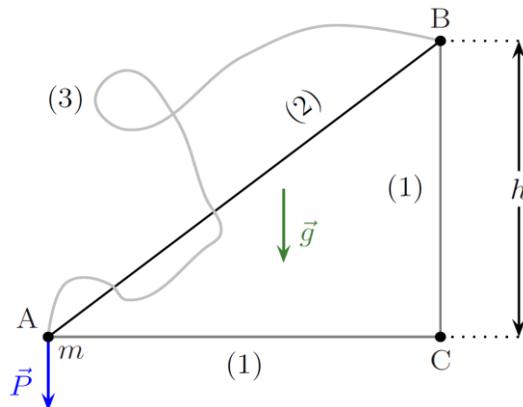
- Au début, l'accélération est égale à  $g \cong G$ . Elle diminue linéairement en s'approchant du centre de masse de la Terre, mais la vitesse de chute augmente tout au long de la descente jusqu'au centre de la Terre.
- Au passage par le centre de la Terre, la force de gravitation subie est nulle. En effet, on y est attiré avec la même force dans toutes les directions. L'accélération est donc nulle à l'instant où on file avec une vitesse maximale vertigineuse de 7,9 km/s par le centre de la Terre.
- Ensuite, on subit une décélération de plus en plus grande en s'éloignant de nouveau du centre. La vitesse diminue progressivement et on atteindrait le bout du tunnel avec une vitesse nulle. Ce trajet durerait 42 minutes. Si on ne s'accroche pas aux bords du tunnel, on effectue un mouvement de va-et-vient (une oscillation) de période 84 minutes.



## 4 Énergie potentielle de gravitation

### 4.1 Force conservative et énergie potentielle

Considérons un corps de masse  $m$  qui est soulevé d'une hauteur  $h$  dans le champ de pesanteur :



On a vu que peu importe si le point d'application du poids suit le chemin (1), (2) ou (3), le travail effectué par le poids entre les points A et B s'écrit :

$$W(\vec{P}) = -m g h$$

où  $g$  désigne l'intensité de la pesanteur. Puisque le travail du poids ne dépend pas du chemin suivi, on dit que le poids est une *force conservative*.

Une **force conservative** est une force dont le travail est indépendant du chemin. Cela signifie en particulier que si le chemin constitue une boucle fermée, le travail effectué est nul.

Puisque le travail d'une force conservative ne dépend que des positions initiale et finale, on peut comptabiliser ce travail dans les considérations énergétiques sous forme d'une énergie qui ne dépend que de la position : l'**énergie potentielle**. Dans l'exemple, la variation de l'**énergie potentielle de pesanteur** du système « corps + Terre »<sup>5</sup> s'écrit :

$$\Delta E_p = -W(\vec{P}) = m g h$$

Le signe - tient compte du fait que pour augmenter l'énergie potentielle ( $\Delta E_p > 0$ ), il faut que le corps soit déplacé vers le haut et donc que le poids effectue un travail résistant  $W(\vec{P}) < 0$ . En convenant que l'énergie potentielle initiale est nulle, on trouve :

$$E_p = m g h$$

De façon similaire, on peut attribuer une énergie potentielle à toute force conservative  $\vec{F}$  selon la prescription :

$$\Delta E_p = -W(\vec{F}) \quad (*)$$

Parmi les forces conservatives, on compte entre autres les forces constantes, la force de gravitation, la tension élastique d'un ressort et la force électrique. Une force non conservative est la force de frottement.

<sup>5</sup> L'énergie potentielle dépend de la position relative des éléments d'un système. Lorsque, comme ici dans le système « corps + Terre », c'est seulement le corps qui se déplace (le mouvement de la Terre étant négligeable), on peut parler de façon simplifiée de l'énergie potentielle de cet élément, en l'occurrence de l'énergie potentielle de pesanteur du corps.

## 4.2 Définition de l'énergie potentielle de gravitation

Puisque la force de gravitation est une force conservative, on peut lui attribuer une énergie potentielle d'après la formule générale (\*) :

$$\Delta E_p = -W(\vec{F}_g)$$

L'énergie potentielle de gravitation d'un système composé d'une masse source et d'une masse témoin est l'énergie qu'il possède du fait de la position de la masse témoin dans le champ de gravitation de la masse source.

Lorsque le champ de gravitation est uniforme, l'énergie potentielle se laisse facilement calculer :

$$\Delta E_p = -W(\vec{F}_g) = F_g h = m G h$$

où  $m$  est la masse d'un corps soulevé d'une hauteur  $h$  dans le champ de gravitation uniforme  $\vec{G}$ .

En convenant que l'énergie potentielle de gravitation est nulle à la surface de la Terre :

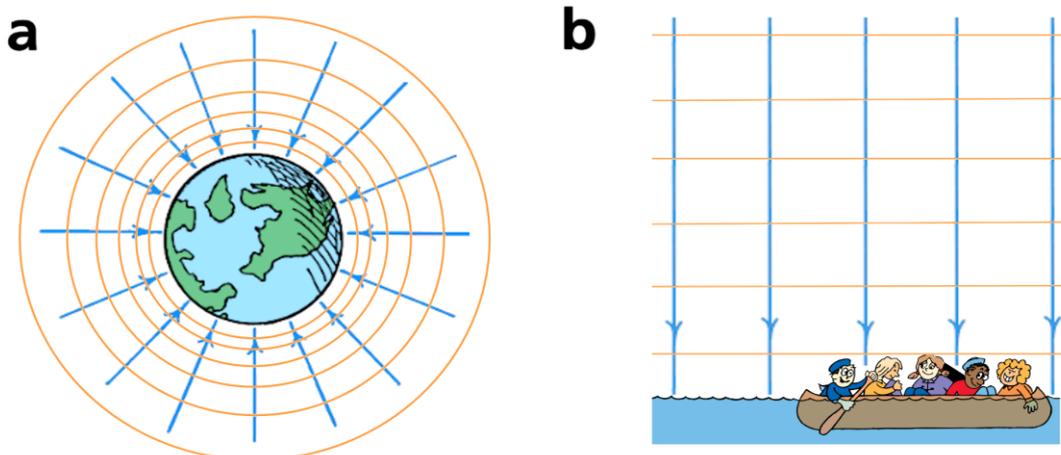
$$E_p = m G h$$

Puisque  $G \simeq g$ , on retrouve l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur.

Lorsque le champ de gravitation n'est plus uniforme, le calcul s'avère plus compliqué. Il sera traité en classe de 1<sup>ère</sup> BC pour le cas particulier du champ radial.

## 4.3 Surfaces et lignes équipotentielles

Lorsqu'on déplace un corps perpendiculairement aux lignes de champ, la force de gravitation n'effectue aucun travail puisque la force est à tout instant perpendiculaire au déplacement. L'énergie potentielle gravitationnelle du corps ne change pas. Pour cette raison, on appelle une surface qui est perpendiculaire aux lignes de champ **surface équipotentielle**. Similairement, une ligne qui est perpendiculaire aux lignes de champ est appelée **ligne équipotentielle**. Sur les figures (p.ex. les figures a et b ci-dessous), l'énergie potentielle d'un corps varie en général de la même valeur entre deux lignes ou surfaces équipotentielles voisines.

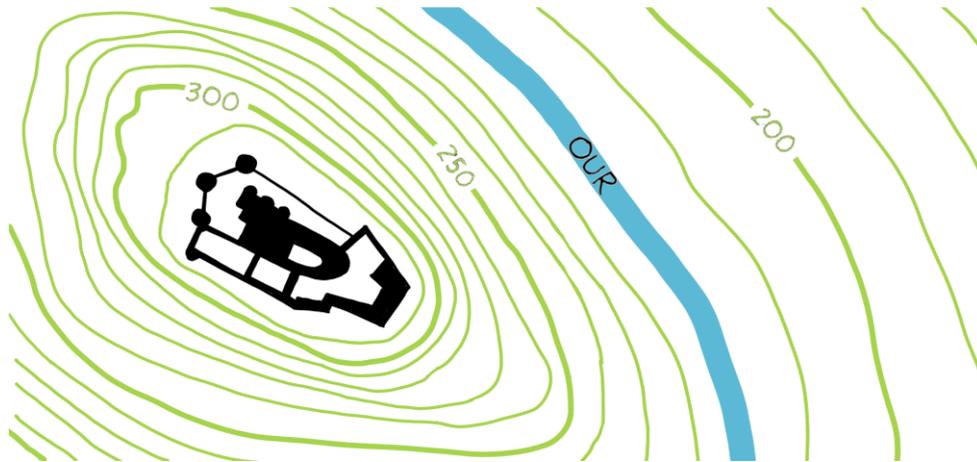


a. Champ radial : Les lignes et surfaces équipotentielles (en orange) sont respectivement des cercles et des sphères concentriques centrés sur le centre de gravité de la Terre.

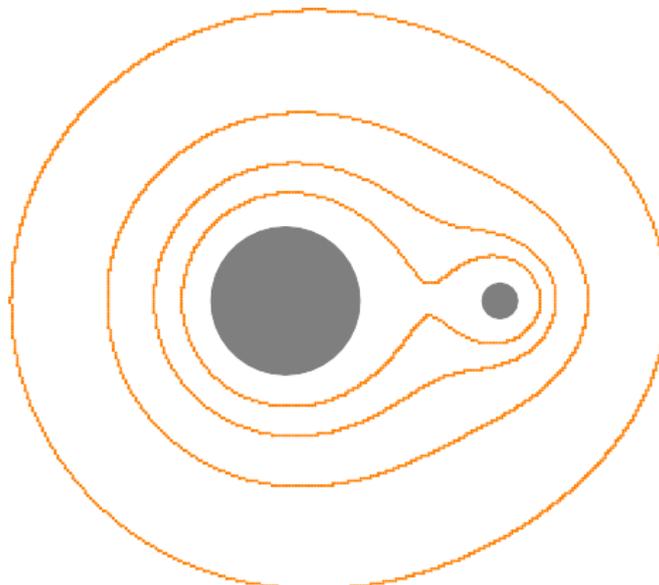
b. Champ uniforme : Les lignes et surfaces équipotentielles (en orange) sont respectivement des droites et des plans parallèles au sol horizontal.

■ **As-tu-compris ?**

3. La carte topographique représente les courbes de niveau aux alentours du château de Vianden.



- Quel est l'écart de l'altitude entre deux courbes de niveaux successives ?
  - À quelles altitudes se trouvent le château et la partie de l'Our représentée sur la carte ?
  - Comparer le dénivelé à gauche et à droite de l'Our. Justifier.
  - Calculer la variation de l'énergie potentielle gravitationnelle d'une personne qui se déplace :
    - le long de la courbe de niveau annotée 300.
    - de l'Our vers le château.
  - Les courbes de niveau sur une carte topographique sont-elles analogues aux lignes équipotentiellles ou aux lignes de champ ? Justifier.
4. La figure montre les lignes équipotentiellles autour de deux astres sphériques :



- Expliquer ce que l'on entend par une ligne équipotentielle.
- Rajouter 6 lignes de champ de gravitation sur la figure ci-dessus.
- Les lignes équipotentiellles tendent à devenir circulaires à grande distance des deux astres. Quelle en est la raison ?

## 5 Pour en savoir plus

### Découverte de Neptune et de Pluton

La force résultante qui dicte le mouvement d'une planète n'est pas exclusivement la force de gravitation exercée par le Soleil, mais inclut également celle exercée par les autres planètes. Leur effet est faible par rapport à l'attraction du Soleil, mais néanmoins observable. La déviation de la trajectoire d'une planète causée par l'action d'un centre de force supplémentaire est appelée une **perturbation**. Jusqu'au milieu du 19<sup>e</sup> siècle, les astronomes étaient intrigués par les perturbations de la planète Uranus. En appliquant la loi de la gravitation, deux astronomes – John Adams en Angleterre (1845) et Urbain Leverrier en France (1846) – ont conclu qu'il y avait à avoir un corps céleste au-delà de l'orbite d'Uranus. La planète Neptune a ainsi été prédite avant d'être découverte ! De même, en analysant les perturbations d'Uranus et de Neptune, on a prédit Pluton avant sa découverte en 1930.

### Marées océaniques

Le phénomène des marées est dû à la *différence* de la force de gravitation exercée par la Lune sur les océans de part et d'autre de la Terre. Cette différence de forces crée deux bourrelets d'eau d'environ 1 m au-dessus du niveau moyen des océans.



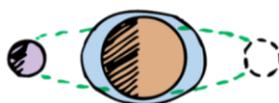
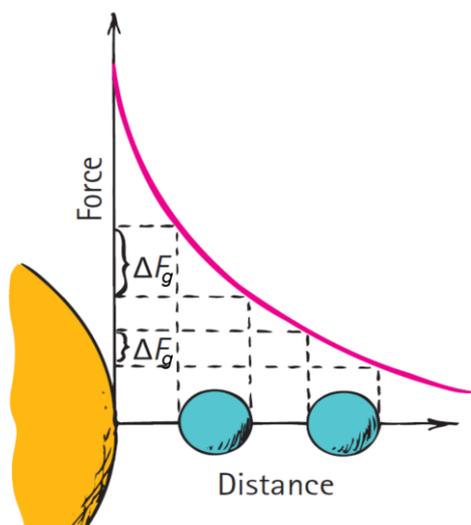
La force de gravitation exercée par la Lune est plus grande sur les océans qui sont face à la Lune parce que la distance à la Lune est plus petite.

Puisque la Terre tourne autour de son axe, un point fixe passe une fois par jour en dessous de ces deux bourrelets d'eau, créant ainsi deux marées hautes et deux marées basses par jour. À cause de l'inclinaison de la Terre, les deux marées hautes d'une journée ne sont pas identiques.

Le Soleil contribue également aux marées. L'attraction gravitationnelle du Soleil sur la Terre est 180 fois plus grande que celle de la Lune. Néanmoins, en raison de la grande distance entre le Soleil et la Terre, la *différence* de la force de gravitation sur les côtés opposés de la Terre est plus petite.

Les vives-eaux sont des marées qui ont une amplitude supérieure à la moyenne. Elles apparaissent lorsque le Soleil, la Terre et la Lune sont sensiblement alignés (pleine lune ou nouvelle lune). Dans ce cas, les effets des marées solaire et lunaire s'additionnent.

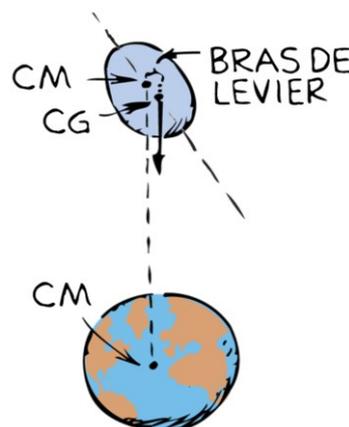
Le phénomène des marées n'est pas limité aux eaux, mais affecte également la croûte terrestre. Il existe même des marées atmosphériques, qui influencent l'intensité du rayonnement cosmique qui atteint la surface de la Terre. Tout comme les marées océaniques, les marées atmosphériques sont les plus prononcées lors d'une pleine lune ou d'une nouvelle lune.



Plus la distance au Soleil est grande, plus la différence des forces de gravitation  $\Delta F_g$  qui agissent de part et d'autre d'une planète est petite.

### La face de la Lune

La Lune subit aussi le phénomène de marée. Puisque le côté de la Lune face à la Terre est attiré plus fortement que la partie opposé, son centre de gravité est légèrement plus proche de la Terre que son centre de masse autour duquel la Lune tourne. Ceci produit un moment de force lorsque le centre de gravité (CG) de la Lune ne se trouve pas sur la ligne reliant les centres de masse (CM) de la Terre et de la Lune<sup>6</sup>. À cause de ce moment de force, la rotation axiale de la Lune s'est peu à peu synchronisée avec la révolution de la Lune autour de la Terre. La Lune nous présente désormais toujours la même face. Comme la Lune subit toujours l'effet de marée au même endroit, sa forme n'est plus sphérique mais légèrement ovale.



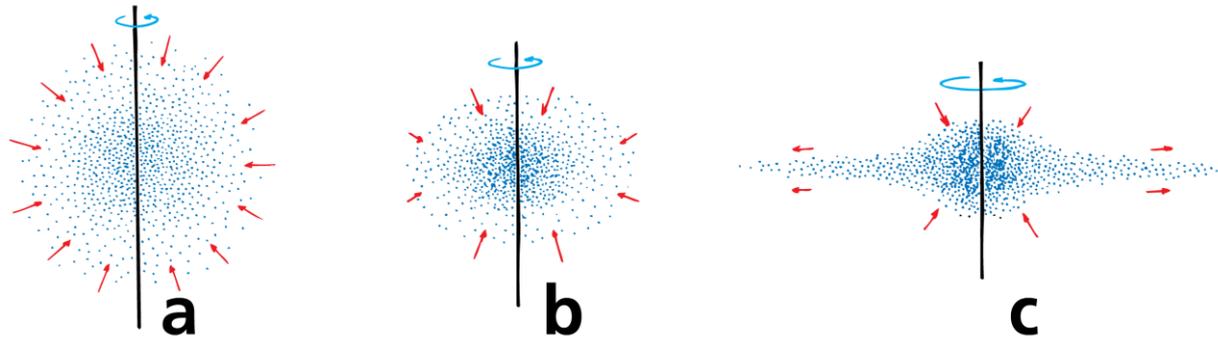
### Sphéricité des astres

Le Soleil et les planètes ont une forme sphérique car les forces de gravitation exercées par ces corps massifs sur leurs parties extérieures sont assez grandes pour les former en boule. En revanche, dans un astéroïde, une comète ou un caillou les forces de gravitation ne sont pas suffisantes pour vaincre leur résistance à la déformation. Voilà pourquoi ils conservent une forme irrégulière.

### Structure et expansion de l'Univers

L'interaction gravitationnelle est responsable de la structure de l'Univers à grande échelle : formation du système solaire, agglomération des étoiles en amas stellaire, agglomération des amas stellaires en galaxies. Les formes des galaxies lointaines fournissent une preuve supplémentaire que la loi de gravitation s'applique à de plus grandes distances.

<sup>6</sup> Le centre de masse d'un corps est le barycentre de ses points matériels. Le centre de gravité d'un corps est le point par rapport auquel s'annule l'effet de rotation de la force de gravitation. Si le champ de gravitation subi par le corps n'est pas uniforme, le centre de gravité ne coïncide pas avec le centre de masse. Ceci peut être le cas pour des corps célestes. Pour d'autres corps bien plus petits, centre de gravité est synonyme de centre de masse.



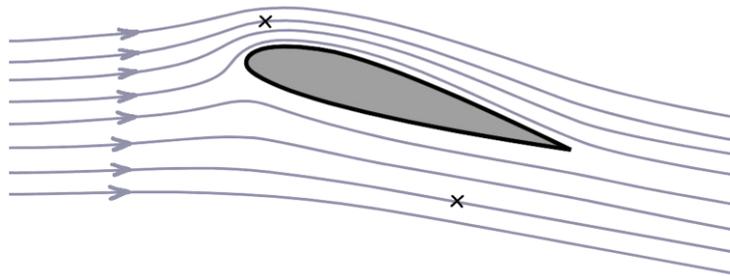
- a. Une boule de gaz interstellaire en légère rotation se contracte à cause de l'attraction gravitationnelle.*
- b. En se contractant, la température et la vitesse de rotation de la boule de gaz augmente. La boule de gaz deviendra le Soleil.*
- c. L'augmentation de la vitesse des amas de matière les amène à balayer sur des orbites plus larges autour de l'axe de rotation, produisant une forme globale de disque. Le refroidissement et les amas de matière en révolution autour du Soleil vont donner naissance aux planètes.*

Selon les théories scientifiques actuelles, l'Univers s'est développé à partir d'une singularité il y a environ 13,7 milliards d'années. C'est la théorie du **Big Bang** de l'origine de l'Univers. Des observations récentes suggèrent que l'Univers est non seulement en expansion, mais que cette expansion s'accélère, comme si l'Univers était poussé par une énergie noire antigravitationnelle, représentant environ 70 % de l'énergie totale de l'Univers. De plus, les vitesses d'orbite des étoiles dans les galaxies suggèrent qu'il y a plus de force sur les étoiles que juste les masses des étoiles visibles ; il y a aussi l'attraction d'une nouvelle sorte de matière invisible, baptisée matière noire, représentant 25% de l'énergie totale de l'Univers. La matière ordinaire ne représenterait en effet qu'environ 5% de l'énergie totale de l'Univers. Les concepts de matière noire et d'énergie noire continueront d'inspirer des recherches passionnantes.

## 6 Exercices

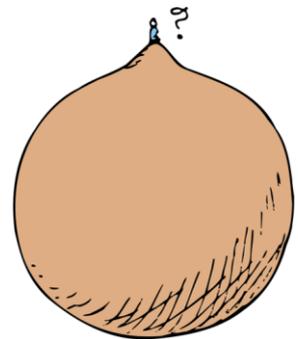
### Notion de champ

1. La figure représente les lignes de champ de vitesse de l'air autour de l'aile d'un avion.
  - a. S'agit-il d'un champ scalaire ou d'un champ vectoriel ? Justifier.
  - b. La vitesse de l'air est-elle plus grande en dessous ou au-dessus de l'aile ? Justifier.
  - c. Ajouter le vecteur vitesse aux deux points marqués.

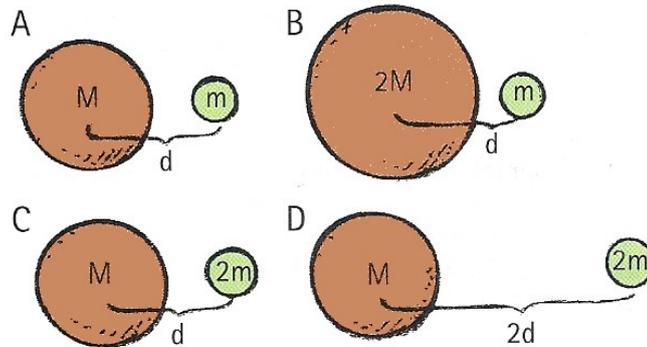


### Force gravitationnelle

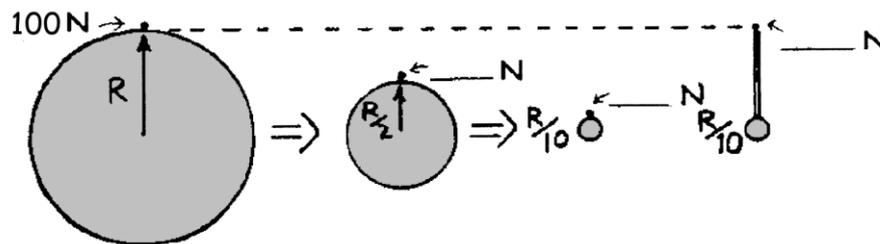
2. Calculer la force d'interaction gravitationnelle entre la Terre (T) et le Soleil (S), sachant que  $m_T = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ ,  $m_S = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ , et  $r_{TS} = 1,496 \cdot 10^8 \text{ km}$
3. Calculer la force de gravitation entre la Terre et la Lune ( $m_L = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$ ). La distance moyenne entre la Terre et la Lune vaut  $r_{TL} = 384400 \text{ km}$ .
4. Qui exerce une plus grande force de gravitation sur un nouveau-né de 3 kg ?
  - A. Sa maman de masse 80 kg qui se trouve à 0,5 m du bébé.
  - B. la planète Mars de masse  $m_M = 6,4 \cdot 10^{23} \text{ kg}$  lorsqu'elle est le plus proche de la Terre (distance  $r_{TM} = 5,6 \cdot 10^{10} \text{ m}$ ).
5. Montrer que la force de gravitation entre deux corps reste identique lorsque leurs masses et la distance entre leurs centres doublent.
6. De combien varie la force de gravitation entre deux planètes lorsque la distance entre leurs centres est réduite d'un facteur 10 ?
7. Pourquoi l'attraction gravitationnelle de la Terre est-elle légèrement plus petite au sommet du mont Everest qu'au niveau de la mer ?
8. Une pomme sur un arbre est attirée avec une force de gravitation de 1 N. Si l'arbre était deux fois plus grand, la force gravitationnelle exercée sur la pomme vaudrait...
  - A. la moitié
  - B. le double
  - C. un quart
  - D. Aucune de ces réponses
9. Comparée à la force de gravitation exercée par la Terre sur un morceau de fer, la force de gravitation sur un bloc en bois de même masse est...
  - A. plus grande
  - B. plus petite que
  - C. identique



10. Tu atterris sur une planète de même masse que la Terre, mais de diamètre deux fois plus grand. Comment la force de gravitation que tu subis y varie-t-elle par rapport à celle sur Terre ?
11. Tu atterris sur une planète dont la masse et le diamètre sont deux fois plus grands que ceux de la Terre. Comment la force de gravitation y diffère-t-elle ?
12. Ranger par ordre croissant la norme de la force gravitationnelle entre la planète et sa lune.



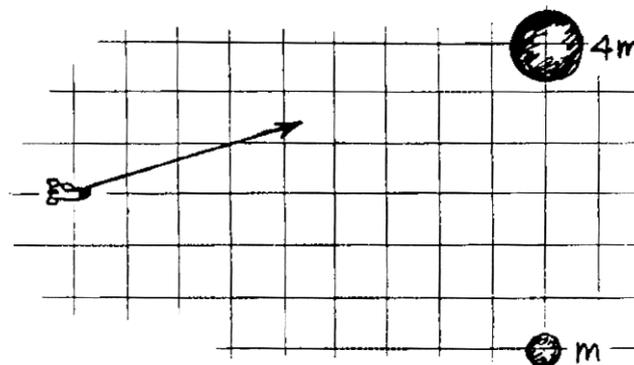
13. Indiquer la force de gravitation subie par le corps qui se trouve sur la surface d'une planète qui s'écroule à masse constante.



14. On considère deux corps ponctuels de masses identiques distants de  $r$ . Si la masse de chaque corps est doublé et que la distance est aussi doublée, alors la nouvelle force gravitationnelle subie par chaque corps vaut

A.  $F'_g = \frac{1}{8} F_g$       B.  $F'_g = \frac{1}{4} F_g$       C.  $F'_g = F_g$       D.  $F'_g = 4 F_g$       E.  $F'_g = 8 F_g$

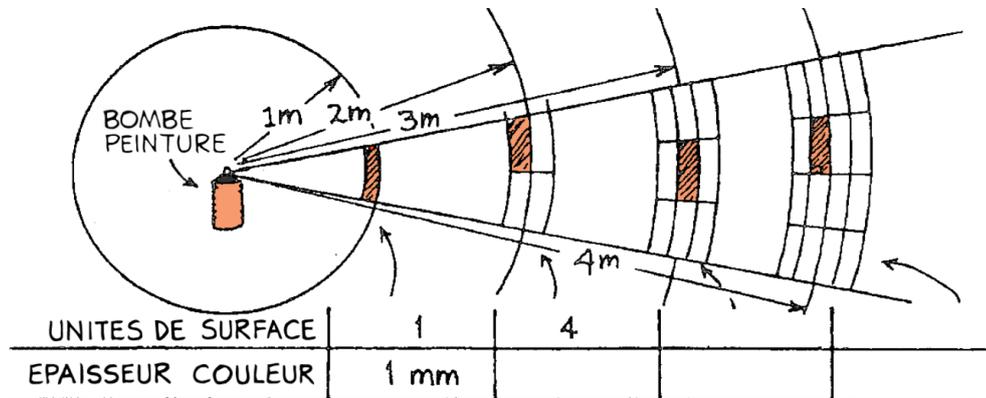
15. Le vaisseau spatial est attiré par la planète et sa lune. La masse de la planète est 4 fois plus grande que celle de la lune, La force de gravitation exercée par la planète sur le vaisseau est illustrée.



- Représenter la force de gravitation exercée par la lune sur le vaisseau.
- Représenter la force résultante sur le vaisseau spatial.
- Représenter le vaisseau spatial à l'endroit entre la planète et la lune où les deux forces de gravitation s'annulent.

## Champ de gravitation

16. Du spray est émis de manière radiale à partir de l'ouverture de la canette. Remplir le tableau.



Quel est le lien de cette question avec le champ de gravitation ?

17. Comment peut-on mesurer l'intensité du champ gravitationnel en un endroit ?

18. Quelle est l'unité du champ gravitationnel ?

- A. N/m      B. N/kg      C. N/s      D. m/s      E.  $m s^2$

19. Est-ce qu'un corps se trouvant dans l'espace interstellaire n'est plus soumis à l'attraction gravitationnelle ? Justifier.

20. Calculer la masse de la Terre sachant que l'intensité du champ de gravitation à la surface terrestre vaut  $9,83 \text{ N/kg}$ .

21. À l'aide de loi de gravitation et de la deuxième loi de Newton, montrer que l'accélération gravitationnelle vers une planète quelconque de masse  $M$  en fonction de la distance  $r$  de son centre de masse est équivalent à l'intensité du champ de gravitation.

22. Montrer qu'à l'altitude  $y$  au-dessus de la surface de la Terre, l'intensité du champ de gravitation s'écrit :

$$G(y) = G_0 \frac{R^2}{(R + y)^2}$$

où  $G_0$  désigne l'intensité du champ de gravitation à la surface de la Terre et  $R$  le rayon moyen de la Terre.

23. En utilisant la relation ci-dessus, trouver l'altitude à laquelle  $G = \frac{1}{2} G_0$ .

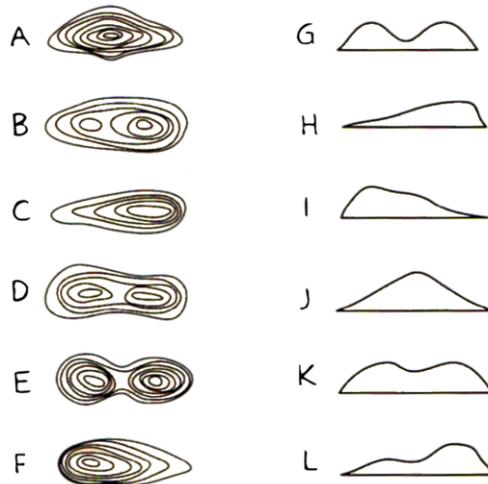
24. Calculer l'intensité du champ de gravitation créé par la Lune à la surface de la Lune et au centre de la Terre.

Indications : rayon lunaire :  $R_L = 1\,740 \text{ km}$  ; masse lunaire :  $m_L = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$ , distance entre le centre de la Lune et le centre de la Terre :  $r_{TL} = 384\,400 \text{ km}$

25. En utilisant les données numériques de l'exercice précédent, trouver le point en lequel le champ de gravitation résultant des deux astres s'annule.

## Énergie potentielle de gravitation

26. Associer les lignes équipotentielles au relief de montagne correspondant.



## Révision

Les affirmations sont-elles vraies ou fausses ?

	Affirmation	Vrai	Faux
1	La force gravitationnelle exercée par la Lune sur la Terre est plus petite que celle exercée par la Terre sur la Lune.		
2	La force gravitationnelle est une force à distance.		
3	L'intensité de la force gravitationnelle entre deux masses ponctuelles quadruple quand la masse de chaque corps est doublée.		
4	L'intensité de la force gravitationnelle entre deux masses ponctuelles reste inchangée quand la masse de chaque corps est doublée et que la distance entre les deux corps double.		
5	La valeur de la constante universelle de gravitation $K$ n'est pas identique sur la Terre et sur la Lune.		
6	L'énergie potentielle de pesanteur d'un corps dépend de la masse du corps.		
7	Le champ gravitationnel est une grandeur vectorielle.		
8	L'intensité du champ gravitationnel terrestre $G$ vaut à une altitude égale au rayon de la Terre $G_0/2$ , où $G_0$ est l'intensité du champ gravitationnel terrestre à une altitude nulle.		
9	Un champ gravitationnel est dit uniforme, si son intensité reste partout constante.		

## Crédits Photos

© Chonlatee42 / Shutterstock.com (1934346833) – p.0 (page titre)

© Gilles Frising – p.3 (champ scalaire de température)

## Crédits Illustrations

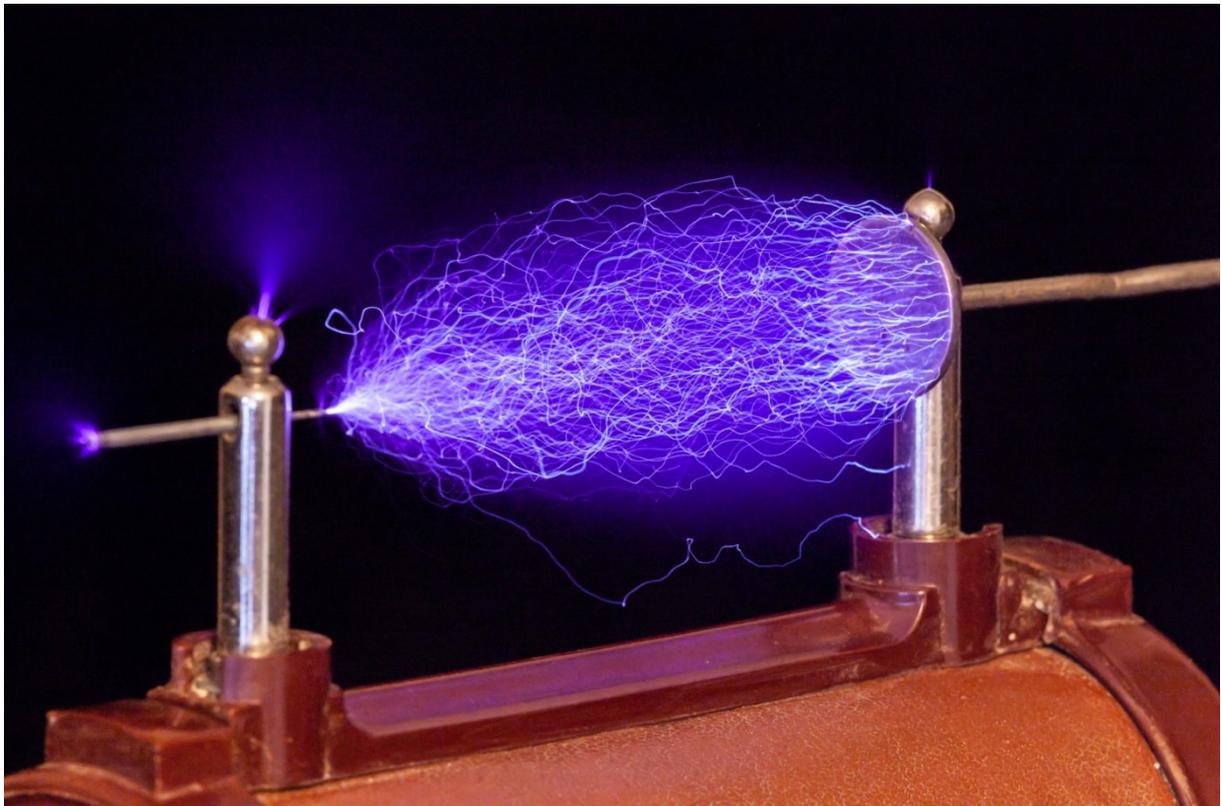
Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours. Les illustrations de Paul G. HEWITT ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

© HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson

© HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson

# 4.

## Champ électrique



© Andrey Semenov Shutterstock.com



## Sommaire

1	Force électrique.....	1
2	Influence électrique.....	3
2.1	Influence électrique dans un conducteur .....	3
2.2	Influence électrique dans un isolant .....	3
3	Champ électrique .....	5
3.1	Définition du vecteur champ électrique .....	5
3.2	Caractéristiques.....	6
3.3	Champ électrique d'une charge ponctuelle .....	6
3.4	Champ électrique de plusieurs charges ponctuelles .....	7
3.5	Lignes de champ et spectres électriques .....	9
3.5.1	Charge ponctuelle isolée .....	9
3.5.2	Deux charges ponctuelles de signe opposé, mais égales en valeur absolue .....	9
3.5.3	Deux charges ponctuelles de même signe et égales en valeur.....	10
3.5.4	Champ électrique autour d'une pointe.....	10
3.6	Champ électrique uniforme .....	11
3.7	Écrantage d'un champ électrique ; cage de Faraday .....	12
4	Énergie potentielle électrique.....	13
4.1	Définition .....	13
4.2	Surfaces et lignes équipotentiels.....	14
4.3	Potentiel électrique et différence de potentiel.....	15
4.4	L'électronvolt.....	17
5	Pour en savoir plus .....	19
6	Exercices.....	23



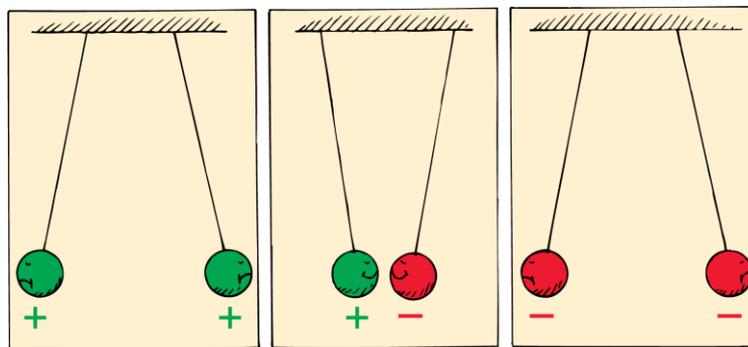
# 1 Force électrique

L'interaction électromagnétique décrit l'interaction entre charges électriques. Elle est à la base de tous les phénomènes électriques et magnétiques, tels que le frottement, le courant électrique, le magnétisme, la lumière et les réactions chimiques. En outre, elle est responsable de la :

- structure de l'Univers à petite échelle (au niveau de l'atome : liaison des électrons au noyau atomique ; au niveau d'une molécule : liaison entre atomes ; au niveau d'un cristal : liaison entre molécules)
- rigidité des corps solides, de la viscosité des fluides

Lorsque les charges sont au repos, l'interaction est purement électrique. La force d'interaction est alors appelée **force électrostatique** ou **force électrique** ou encore **force de Coulomb**. Ce n'est qu'au XVIIIe siècle qu'on a constaté que :

Deux charges de même signe se repoussent. Deux charges de signe opposé s'attirent.



Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) analysa dans de nombreuses expériences les caractéristiques de la force électrique. Il a mesuré pour la première fois l'intensité de la force électrique qu'un corps chargé exerce sur un autre. Les résultats de ses expériences l'ont mené à publier en 1785 une loi, que l'on nomme aujourd'hui en son honneur, la **loi de Coulomb** :

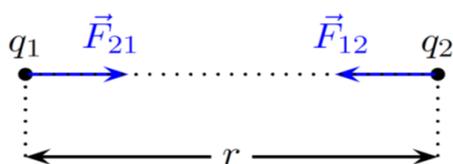
Deux charges ponctuelles  $q_1$  et  $q_2$  au repos, séparées d'une distance  $r$  dans le vide, interagissent électriquement avec des forces  $\vec{F}_{1/2}$  et  $\vec{F}_{2/1}$ , dont les intensités

- sont égales d'après le principe de l'action et de la réaction ;
- sont proportionnelles au produit de leurs charges ;
- sont inversement proportionnelles au carré de leur distance.

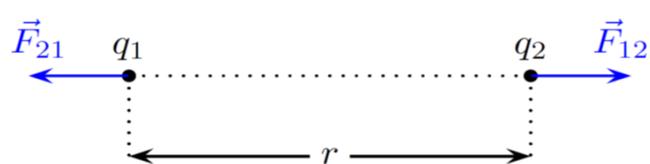
Mathématiquement :

$$F_{1/2} = F_{2/1} = F_e = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

où  $k = 8,987 \cdot 10^9 \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}$  désigne la constante de proportionnalité (constante de Coulomb).



Charges de signe opposé : attraction



Charges de même signe : répulsion

## Remarques

- La force électrique est une force centrale.
- La loi de Coulomb est une loi en carré inverse et sa portée est infinie.
- Alors que la force de gravitation est toujours attractive, la force électrique peut être soit attractive, soit répulsive.

La loi de Coulomb est similaire à la loi de la gravitation de Newton. Cependant, la constante de gravitation universelle  $K$  est énormément plus petite que la constante de Coulomb  $k$ . Voilà pourquoi l'interaction électrique est beaucoup plus forte que l'interaction gravitationnelle<sup>1</sup>.

Diagram comparing Newton's law of gravitation and Coulomb's law of electrostatics. On the left, the formula  $F_g = K \frac{m_1 m_2}{r^2}$  is shown. Labels include 'ATTRACTIVE' pointing to the formula, 'PRODUIT DES MASSES' pointing to the numerator, 'PETITE VALEUR' pointing to the constant  $K$ , and 'LOI EN CARRE INVERSE' pointing to the denominator. On the right, the formula  $F_e = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$  is shown. Labels include 'ATTRACTIVE OU REPULSIVE' pointing to the formula, 'PRODUIT DES CHARGES' pointing to the numerator, 'GRANDE VALEUR' pointing to the constant  $k$ , and 'LOI EN CARRE INVERSE' pointing to the denominator.

### Exercice résolu

**Énoncé :** Considérons deux électrons situés à une distance  $r$  l'un de l'autre. La masse de l'électron vaut  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  kg, sa charge  $q$  est égale, en valeur absolue, à la charge élémentaire :  $|q| = e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C. Comparer les normes des interactions gravitationnelle et électrique entre les deux électrons.

**Solution :** Expression de l'intensité de la force gravitationnelle :  $F_g = K \frac{m_e^2}{r^2}$

Expression de l'intensité de la force de Coulomb :  $F_e = k \frac{e^2}{r^2}$

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{k \frac{e^2}{r^2}}{K \frac{m_e^2}{r^2}} = \frac{k e^2}{K m_e^2} = \frac{k}{K} \left( \frac{e}{m_e} \right)^2 = \frac{8,987 \cdot 10^9}{6,673 \cdot 10^{-11}} \cdot \left( \frac{1,602 \cdot 10^{-19}}{9,11 \cdot 10^{-31}} \right)^2 = 4,2 \cdot 10^{42}$$

Lorsqu'on étudie les mouvements des particules chargées, la force de gravitation peut être négligée devant la force électrique<sup>2</sup>.

### ■ As-tu-compris ?

1. Avec quelle force électrique s'attirent deux ballons sphériques séparés de 2 m, portant des charges respectives de  $+3 \cdot 10^{-8}$  C et  $-2 \cdot 10^{-8}$  C ?

<sup>1</sup> La constante  $k$  est souvent exprimée en fonction d'une autre constante, la permittivité du vide :

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N m}^2}, \text{ suivant la relation : } k = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0}$$

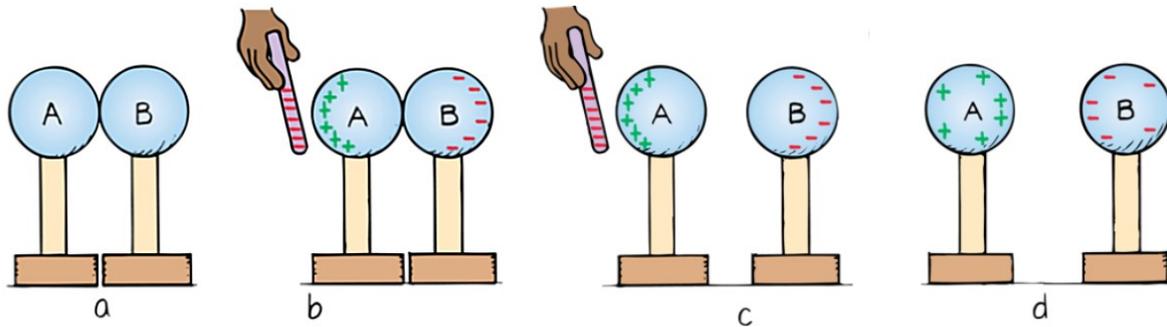
<sup>2</sup> Le physicien et lauréat du prix Nobel de Physique, Richard Feynman (1918-1988), illustre l'énorme différence entre les intensités des forces électrique et gravitationnelle à l'aide d'un exemple :

[https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II\\_01.html#Ch1-S1](https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_01.html#Ch1-S1)

## 2 Influence électrique

On appelle **influence électrique**, la redistribution de charges électriques dans un corps causée par des charges électriques à proximité.

### 2.1 Influence électrique dans un conducteur

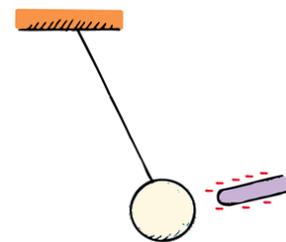


- Deux sphères conductrices A et B électriquement neutres et isolées du sol sont en contact et forment ainsi un seul conducteur non chargé.
- Lorsqu'un bâton d'ébonite chargé négativement est approché de A, les électrons libres sont repoussés sous l'effet de la force électrique exercée par le bâton chargé. B présente un excès d'électrons, c.-à-d. une charge négative ; A présente un défaut d'électrons, c.-à-d. une charge positive : il y a **séparation de charges**.
- Si A et B sont séparées en présence du bâton d'ébonite, les charges opposées ne peuvent plus se neutraliser et les sphères portent une charge électrique équivalente en valeur absolue, mais de signe opposé.
- A et B vont rester chargées si le bâton est éloigné. Les deux sphères ont été chargées par *influence*. Les charges se répartissent uniformément sur les surfaces des sphères car des charges de même signe se repoussent.

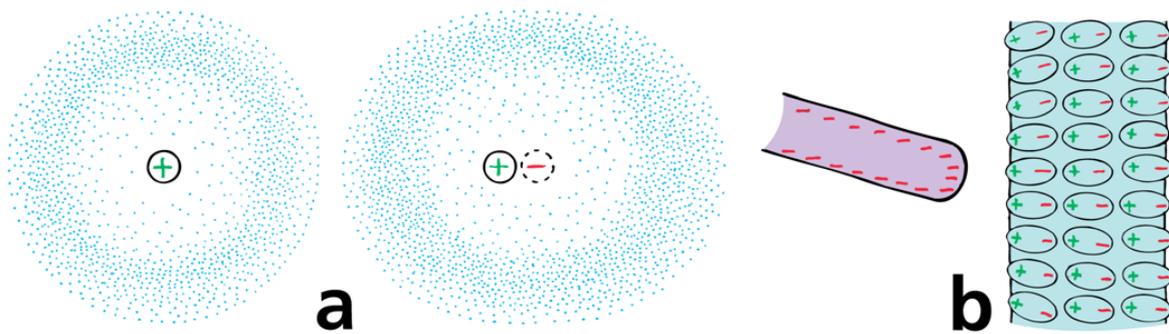
### 2.2 Influence électrique dans un isolant

Contrairement aux conducteurs, les isolants ne renferment pas d'électrons libres de se déplacer. Or, l'influence électrique a également lieu sous forme microscopique dans les isolants.

Lorsqu'on place un bâton d'ébonite chargé négativement à proximité d'une boule isolante d'un pendule électrique, on observe que la boule est attirée par le bâton, bien qu'elle soit électriquement neutre.



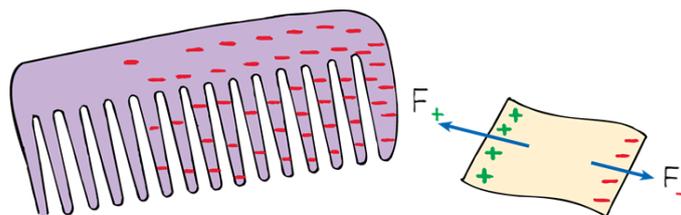
Les nuages électroniques des atomes à la surface de la boule se déforment de sorte qu'il se forme une région chargée négativement et une région chargée positivement dans chaque atome. Les atomes deviennent des **dipôles électriques** ; ce phénomène est appelé **polarisation électronique**. Il en résulte une charge surfacique positive du côté du bâton et une charge surfacique négative de l'autre côté. La charge surfacique positive étant plus près du bâton, la boule est attirée.



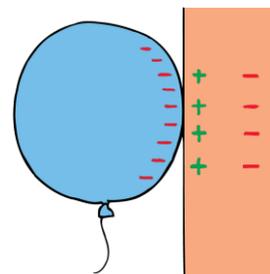
a. Une charge négative à gauche de l'atome neutre provoque une déformation du nuage électronique.  
 b. Une charge surfacique positive se crée sur l'isolant en face au bâton chargé. L'isolant est attiré.

### Exemples

- Des morceaux de papier électriquement neutres sont attirés par influence par un corps chargé, tel qu'un peigne chargé. Si les morceaux touchent le peigne ils s'envolent soudainement. Une électrisation par contact a lieu ; les morceaux de papier acquièrent le même signe de charge que le peigne et sont alors repoussés.

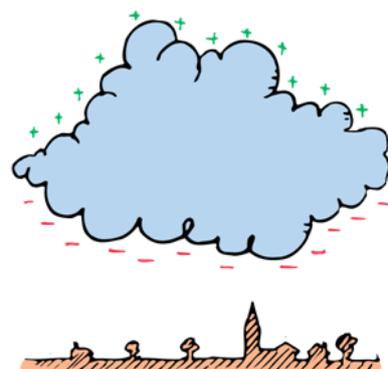


- Un ballon gonflé frotté sur les cheveux est chargé électriquement. Lorsqu'on place le ballon contre un mur il y reste accroché. Par influence, la charge sur le ballon induit une charge de signe opposé sur la surface du mur.



### ■ As-tu-compris ?

2. Lorsqu'un nuage chargé négativement en bas et positivement en haut se déplace au-dessus du sol, le sol
- devient chargé négativement.
  - devient chargé positivement.
  - ne devient pas chargé parce que le nuage est électriquement neutre.



### 3 Champ électrique

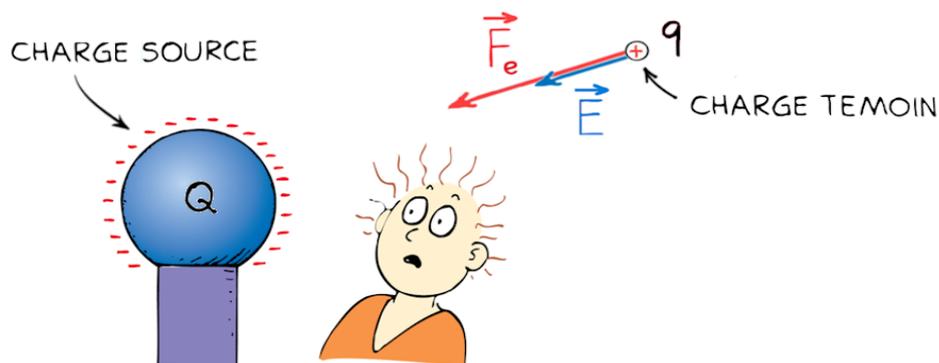
On dit qu'il existe un champ électrique en un point de l'espace, si une charge témoin placée en ce point est soumise à une force électrique. Même si l'on enlève la charge témoin, le champ électrique persiste.

#### 3.1 Définition du vecteur champ électrique

Le **vecteur champ électrique**  $\vec{E}$  en un point de l'espace correspond à la force électrique qui s'exerce en ce point sur l'unité de charge :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q}$$

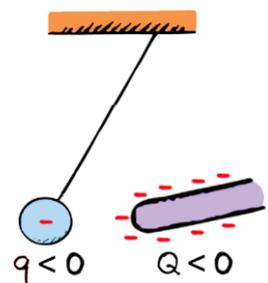
L'unité SI d'intensité du champ électrique est le newton par coulomb :  $[E] = 1 \frac{N}{C}$



#### Exemple

Une boule d'un pendule électrique et un bâton d'ébonite sont tous les deux chargés négativement. Si on approche le bâton de la boule, celle-ci est repoussée. La répulsion électrique de la boule de charge  $q$  peut s'interpréter de deux manières différentes :

- La charge  $q$  subit la force électrique répulsive qui est exercée à distance par l'autre charge  $Q$ .
- La charge  $Q$  du bâton, appelée **charge source**, associe à tout point de l'espace un champ électrique. La **charge témoin**  $q$  « sent » la présence du champ électrique et subit la force électrique qui est exercée directement par le champ.



À l'aide du concept de champ, la force électrique qui s'exerce sur la charge  $q$  peut être déterminée sans avoir besoin de se référer à la charge  $Q$  qui est située au loin. Il suffit de considérer les caractéristiques du vecteur champ électrique  $\vec{E}$  à l'emplacement de la charge  $q$ . L'action à distance de  $Q$  est remplacée par une action locale de  $\vec{E}$ . La force électrique que subit la charge témoin s'écrit dès lors :  $\vec{F}_e = q \vec{E}$

#### Remarque

Dans la suite nous n'allons considérer que des champs électriques qui sont créés ou subis par des charges au repos. De tels champs électriques sont encore appelés **champs électrostatiques**.

### 3.2 Caractéristiques

1. *Origine* :  $\vec{E}$  est associé à tout point de l'espace où règne le champ
2. *Direction* : celle de la force électrique  $\vec{F}_e$
3. *Sens* : celui de  $\vec{F}_e$  si  $q > 0$  ; sens opposé à  $\vec{F}_e$  si  $q < 0$
4. *Intensité (norme)* :  $E = \frac{F_e}{|q|}$

### 3.3 Champ électrique d'une charge ponctuelle

Considérons une charge témoin ponctuelle  $q > 0$  et une charge source ponctuelle  $Q$ , qui sont séparées dans le vide d'une distance  $r$ .

$Q$  exerce sur  $q$  une force électrique  $\vec{F}_e = q \vec{E}$ . Deux cas se présentent :



*Vecteur champ électrique à une distance  $r$  d'une charge source ponctuelle*

Dans les deux cas l'intensité de la force électrique est donnée par la loi de Coulomb :  $F_e = k \frac{|Qq|}{r^2}$

#### Caractéristiques

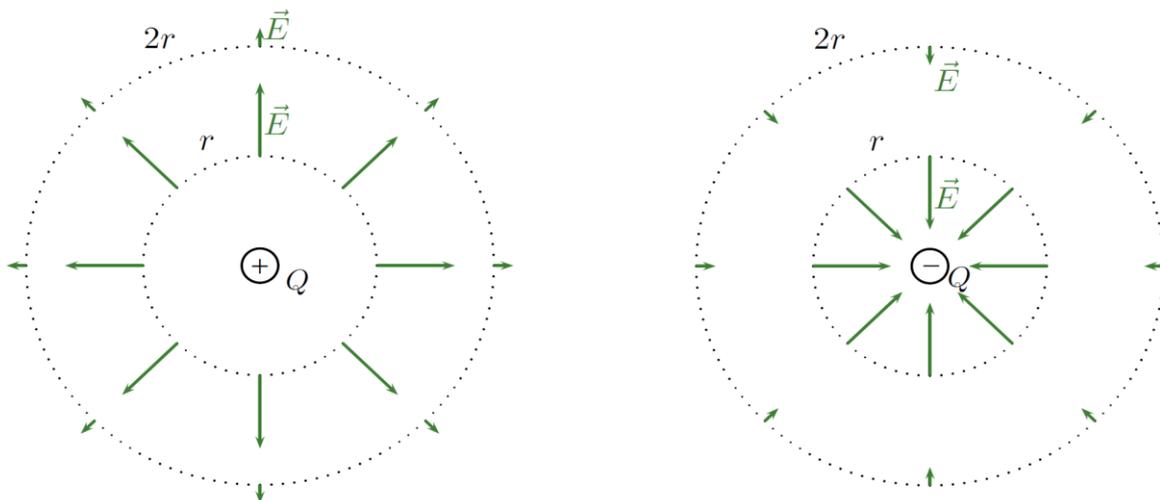
1. *Direction* : radiale, centrée sur la charge source  $Q$
2. *Sens* : centrifuge si  $Q > 0$ , centripète si  $Q < 0$
3. *Intensité (norme)* :

$$E = \frac{F_e}{|q|} = \frac{k \frac{|Qq|}{r^2}}{|q|} = k \frac{|Q|}{r^2}$$

$E \sim |Q|$  :  $E$  est proportionnelle à la valeur absolue de la charge source

$E \sim \frac{1}{r^2}$  :  $E$  est inversement proportionnel à  $r$  (loi en carré inverse)

Le champ électrique créé par la charge source  $Q$  est indépendant de la charge test  $q$ .



*Représentation du champ électrique d'une source ponctuelle positive, respectivement négative*

■ **As-tu-compris ?**

3. Supposons que le champ électrique à une distance de 1 m d'une charge ponctuelle a une certaine intensité. Le champ électrique à une distance de 2 m de la même charge est alors
  - A. identique
  - B. deux fois plus grande
  - C. deux fois petite
  - D. quatre fois plus grande.
  - E. quatre fois plus petite.
4. Des mesures montrent qu'il y a un champ électrique qui entoure la Terre. Son intensité vaut environ 100 N/C à la surface de la Terre et il pointe vers la Terre. Peux-tu en déduire si la Terre est chargée positivement ou négativement ?
5. Remplir les cases vides du tableau. La charge source est ponctuelle.

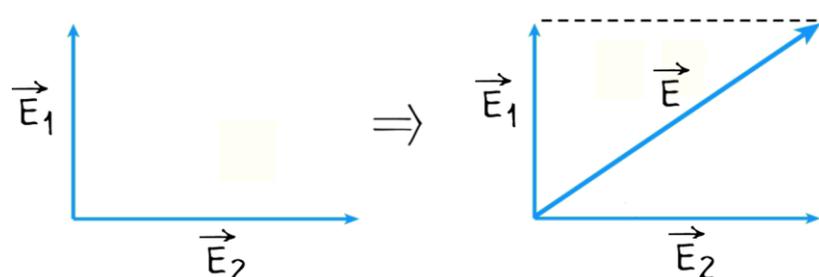
	Charge source (C)	Charge test (C)	$F_e$ (N)	$E$ (N/C)	Distance
<b>a.</b>	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	0,2		$r$
<b>b.</b>	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$		$2 \cdot 10^5$	$r$
<b>c.</b>	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	0,4		$r$
<b>d.</b>	$8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$		$4 \cdot 10^5$	$r$
<b>e.</b>	$8 \cdot 10^{-4}$		0,6		$r$
<b>f.</b>	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$		$1 \cdot 10^5$	$2r$
<b>g.</b>	$8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$			$2r$
<b>h.</b>	$8 \cdot 10^{-4}$		0,1		$2r$

### 3.4 Champ électrique de plusieurs charges ponctuelles

Le vecteur champ électrique  $\vec{E}$  créé en un point de l'espace par plusieurs charges ponctuelles  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$  est égal à la somme vectorielle des vecteurs champ électrique  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots$ , créés par chacune des charges au point considéré :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

Pour déterminer le champ électrique résultant  $\vec{E}$  de plusieurs champs électriques qui n'ont pas la même direction, on peut utiliser la méthode du parallélogramme :



### Exercice résolu

**Énoncé :** Les points  $A$ ,  $B$  et  $C$  forment les sommets d'un triangle équilatéral de longueur de côté 10 cm. En  $A$  et  $B$  sont placées deux charges ponctuelles  $Q = +20 \mu\text{C}$ .

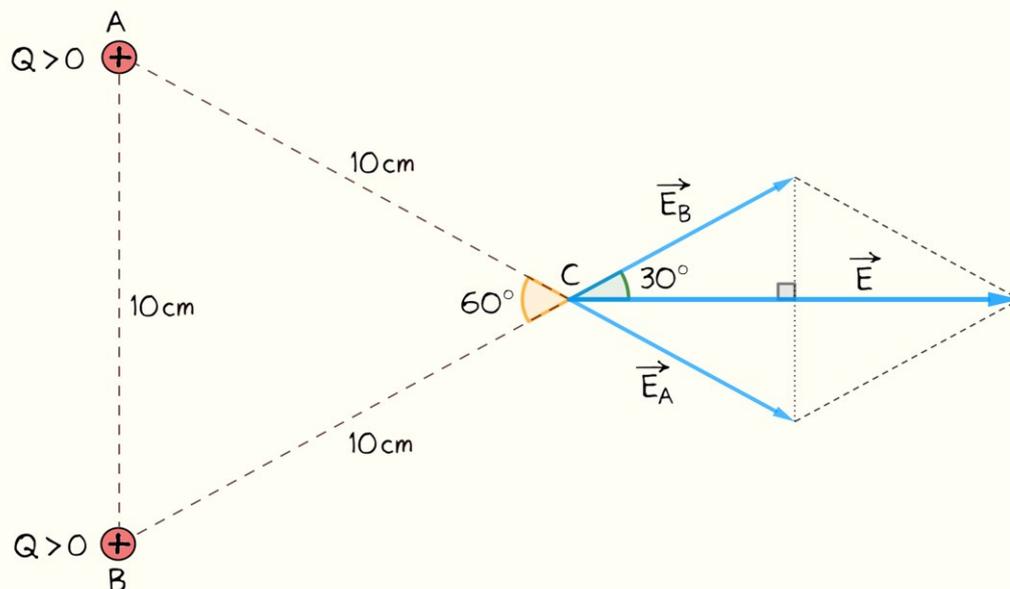
- Déterminer les caractéristiques (direction, sens et intensité) du champ électrique résultant en  $C$ .
- Calculer l'intensité de la force électrique qui agit sur un électron placé en  $C$ . Préciser la direction et le sens de cette force.

**Solution :**

- Intensité du champ électrique créé par la charge  $Q_A$  en  $C$  :

$$E_A(C) = k \frac{|Q_A|}{AC^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{20 \cdot 10^{-6}}{0,1^2} = 1,8 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Comme  $Q_A = Q_B$  et  $AC = BC$ , on a  $E_B(C) = E_A(C) = 1,8 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}}$



Par symétrie, la direction du vecteur champ électrique  $\vec{E}$  est perpendiculaire au segment  $[AB]$ , son sens est orienté vers la droite, et son intensité vaut

$$E(C) = 2 E_A(C) \cos(30^\circ) = 2 \cdot 1,8 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 3,1 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

- Force électrique sur un électron placé en  $C$  :

$$F_e = |q_e| E = e E = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 3,1 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 5 \cdot 10^{-12} \text{ N}$$

Puisque  $q_e < 0$ , la force agit dans le sens opposé de  $\vec{E}$  (direction horizontale et sens vers la gauche sur la figure)

### ■ As-tu-compris ?

- Donner un exemple où en un point de l'espace, un champ électrique de 4 N/C et un champ électrique de 3 N/C donnent un champ résultant de 1 N/C, respectivement de 5 N/C.

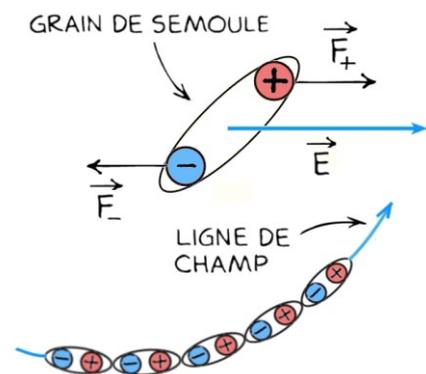
### 3.5 Lignes de champ et spectres électriques

Une **ligne de champ électrique** est une courbe dans l'espace à laquelle le vecteur champ électrique est tangent en tout point. La tangente en un point de la ligne de champ électrique indique également la direction de la force électrique en ce point.

- Les lignes de champ électrique ne peuvent jamais se toucher, ni se croiser, ni se subdiviser.
- Elles aboutissent perpendiculairement à la surface d'une charge source négative, et émergent perpendiculairement de la surface d'une charge source positive.
- La densité des lignes de champ électrique est proportionnelle à l'intensité du champ électrique.

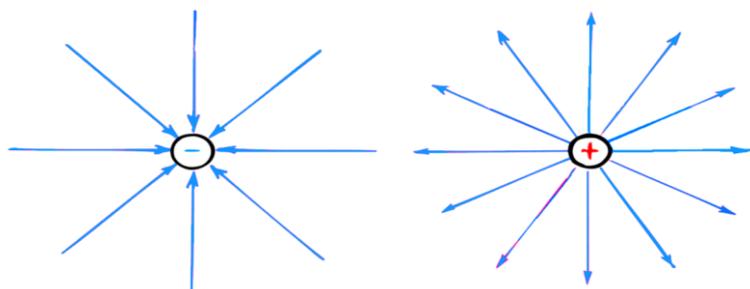
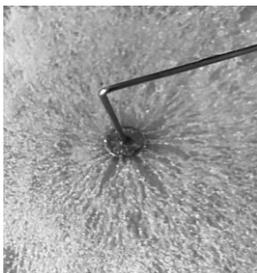
L'ensemble des lignes de champ qui représentent un champ électrique est appelé **spectre électrique**.

On peut visualiser le spectre électrique d'une configuration de charges électriques à l'aide d'une suspension de grains de semoule dans un liquide isolant, p.ex. de l'huile. Les grains de semoule sont polarisés lorsqu'ils sont placés dans le champ électrique intense et constituent dès lors des dipôles électriques induits. Chaque grain de semoule subit des forces électriques à ses extrémités qui ont même direction que celle du champ. Les grains de semoule s'alignent et s'orientent ainsi dans la direction du champ électrique. Il en résulte des chaînes de grains de semoule qui matérialisent les lignes de champ.



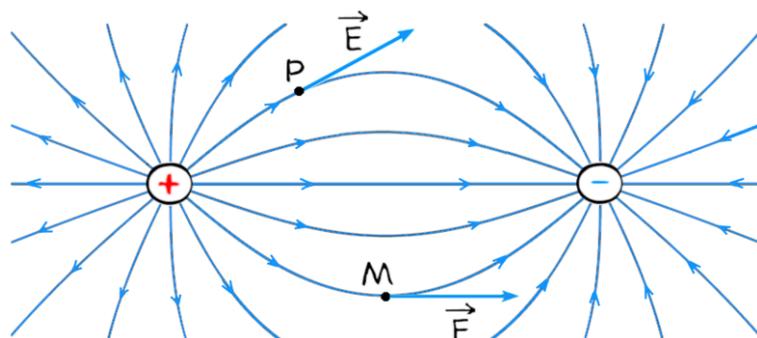
#### 3.5.1 Charge ponctuelle isolée

Le champ électrique d'une charge ponctuelle isolée est **radial**. Il est *centripète* (recherchant le centre) pour une source ponctuelle négative et *centrifuge* (fuyant le centre) pour une source ponctuelle positive.



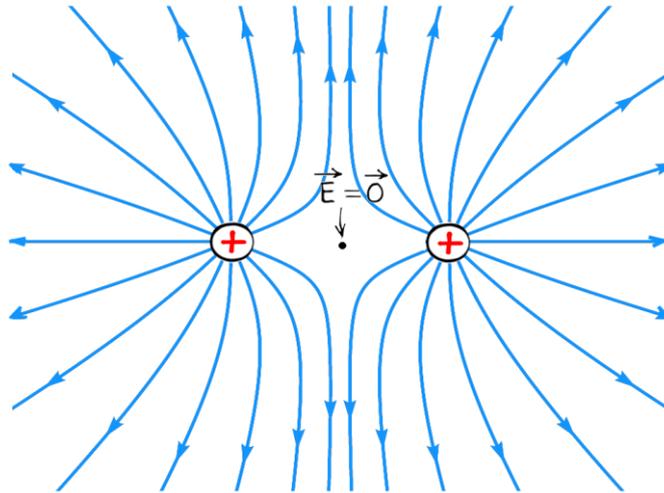
#### 3.5.2 Deux charges ponctuelles de signe opposé, mais égales en valeur absolue

Les lignes de champ électrique émergent de la charge positive et aboutissent sur la charge négative. La direction du vecteur champ électrique en un point (p.ex. P ou M) est celle de la tangente à la ligne de champ en ce point.



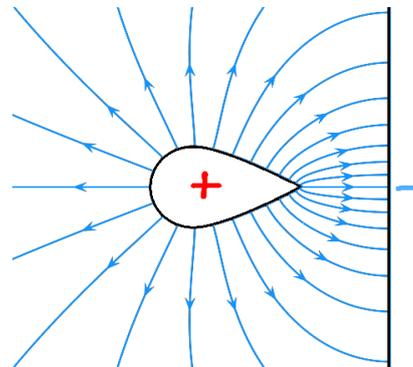
### 3.5.3 Deux charges ponctuelles de même signe et égales en valeur

Les champs électriques de deux charges ponctuelles de même signe et égales en valeur sont répulsifs entre les charges. Le champ électrique résultant est nul au milieu entre les deux charges.



### 3.5.4 Champ électrique autour d'une pointe

Au voisinage d'une pointe le champ électrique est particulièrement intense. C'est l'**effet de pointe**. Le champ électrique peut devenir tellement intense que l'air devient conducteur et qu'une décharge électrique éclate dans l'entourage de la pointe. Une application de l'effet de pointe est le paratonnerre.



La décharge d'une pointe peut aussi être partielle et continue, sans qu'elle produise un arc électrique. La pointe est alors entourée d'une lueur bleuâtre qu'on appelle feu de Saint-Elme en langage populaire.



*Feu de Saint-Elme et aigrettes lumineuses apparaissant aux extrémités des mâts d'un navire lors d'un orage.*

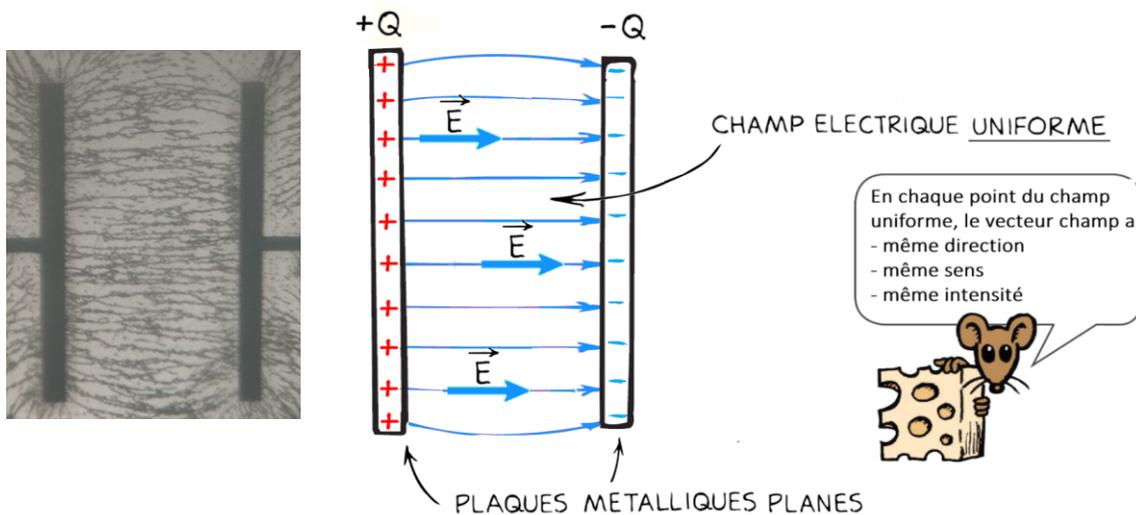
*(Feu de Saint-Elme sur un bateau (G. Hartwig) dans The Aerial World, 1886.)*

### 3.6 Champ électrique uniforme

Un champ électrique est uniforme dans une région de l'espace, si, en tout point de cette région, il a même direction, même sens et même intensité :  $\vec{E} = \overrightarrow{\text{const}}$

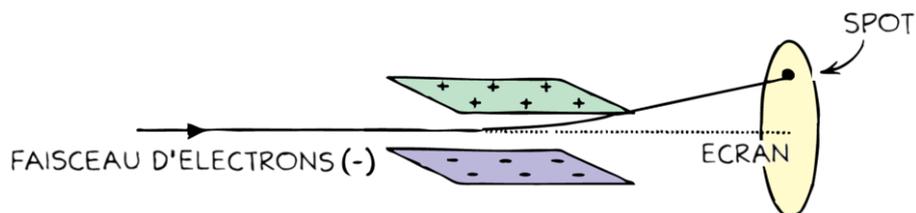
Les lignes d'un champ électrique uniforme sont des droites parallèles et équidistantes.

Le champ électrique entre deux plaques métalliques planes et parallèles, portant des charges opposées mais de même valeur absolue, est, à l'exception des régions de bords, uniforme. Le système ainsi réalisé forme un **condensateur plan**. L'effet de bord négligé, le vecteur champ électrique à l'intérieur d'un condensateur plan est constant, perpendiculaire aux plaques et dirigé de la plaque positive vers la plaque négative.



#### Exemple

Un faisceau d'électrons passe à travers le champ électrique uniforme qui règne entre deux plaques conductrices de charges opposées. Les électrons sont déviés vers le haut par la force électrique et frappent un écran translucide. Lorsque les charges de plaques sont inversées le champ électrique pointe vers le haut et les électrons sont déviés vers le bas de l'écran.

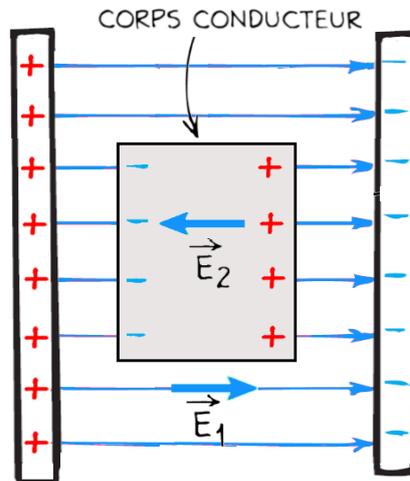


#### ■ As-tu-compris ?

7. Comment les lignes de champ électrique indiquent-elles l'intensité du champ électrique ?
8. Comment les lignes de champ électrique indiquent-elles la direction du champ électrique ?

### 3.7 Écrantage d'un champ électrique ; cage de Faraday

L'écrantage d'un champ de gravitation est impossible, parce que la force de gravitation est toujours attractive. L'écrantage d'un champ électrostatique est en revanche simple : il suffit d'envelopper le corps à blinder d'une surface conductrice. Considérons un corps conducteur qui est placé dans un champ électrique uniforme d'un condensateur plan chargé :



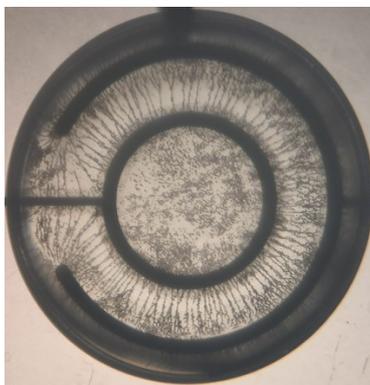
Dû au phénomène d'influence électrique, il se crée un excès d'électrons au côté gauche du corps conducteur et un défaut d'électrons à son côté droit.

Le champ électrique  $\vec{E}_2$ , qui est créé entre les côtés chargés du corps, se superpose au champ électrique  $\vec{E}_1$ , qui est créé par les plaques seules. Les champs  $\vec{E}_1$  et  $\vec{E}_2$  sont de même direction, mais de sens opposé. Puisque l'accumulation des charges influencées s'arrête tôt ou tard, les champs doivent tôt ou tard avoir même intensité et s'annuler mutuellement à l'intérieur du corps conducteur.

Les charges influencées sur les surfaces du corps conducteur isolent l'intérieur du corps conducteur contre le champ électrique extérieur (effet d'écrantage). C'est le **principe de la cage de Faraday** :

Aucun champ électrique n'existe à l'intérieur d'un corps conducteur lorsqu'il est placé dans un champ électrique extérieur.

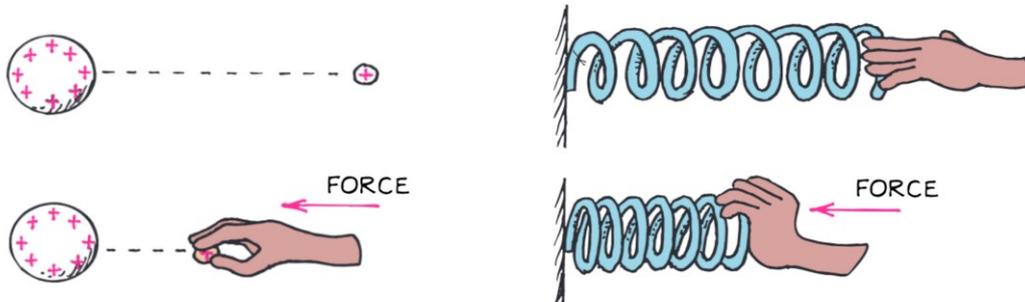
En pratique, la cage de Faraday consiste en une enveloppe conductrice (p.ex. un grillage métallique) qui rend l'intérieur étanche face à tout champ électrique :



*Aucun champ électrique ne règne à l'intérieur du cylindre creux et conducteur. La carrosserie d'une voiture constitue une cage de Faraday.*

## 4 Énergie potentielle électrique

Considérons une petite charge positive (charge témoin) située à une certaine distance d'une charge source positive. Si on rapproche la charge témoin de la charge source, on doit fournir du travail pour vaincre la répulsion électrique. Ce travail augmente l'énergie potentielle du système des deux charges.

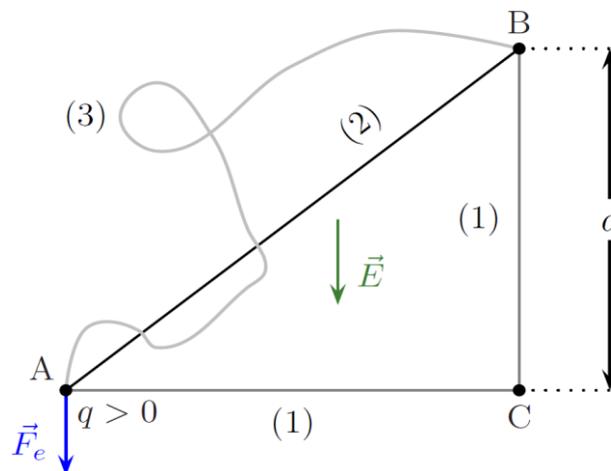


*Du travail est effectué pour vaincre la répulsion électrique, respectivement la tension élastique.*

### 4.1 Définition

L'énergie potentielle électrique  $E_p$  d'un système composé d'une charge source et d'une charge témoin est l'énergie qu'il possède du fait de la position de la charge témoin dans le champ électrique de la charge source. Elle est exprimée en joules (J).

Considérons une charge électrique  $q$  positive qui se déplace dans un champ électrique *uniforme* d'un point  $A$  vers un point  $B$  le long d'un chemin curviligne (3) :



*Le travail de la force électrique ne dépend pas du chemin choisi*

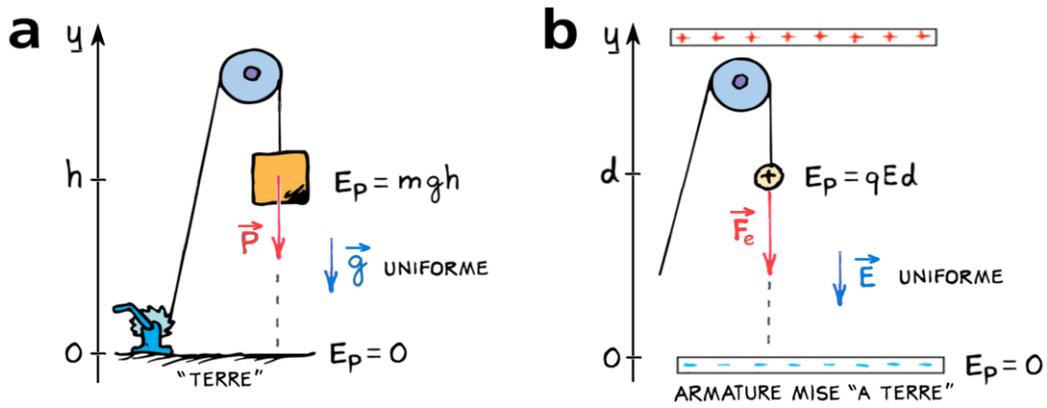
Puisque le travail de la force électrique entre les deux points  $A$  et  $B$  est indépendant du chemin suivi, on a :

$$\Delta E_p = -W_{AB}(\vec{F}_e) = -\vec{F}_e \cdot \overrightarrow{AB} = -q \vec{E} \cdot (\overrightarrow{AC} + \overrightarrow{CB}) = -q \vec{E} \cdot \overrightarrow{CB} = q E d$$

où  $d$  désigne la distance – mesurée dans la direction du champ – entre les points  $A$  et  $B$ .

En convenant que l'énergie potentielle électrique est nulle au point de départ (point de référence) :

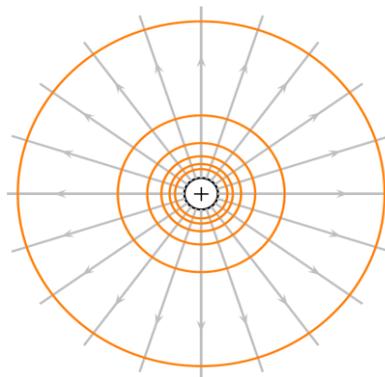
$$E_p = q E d$$



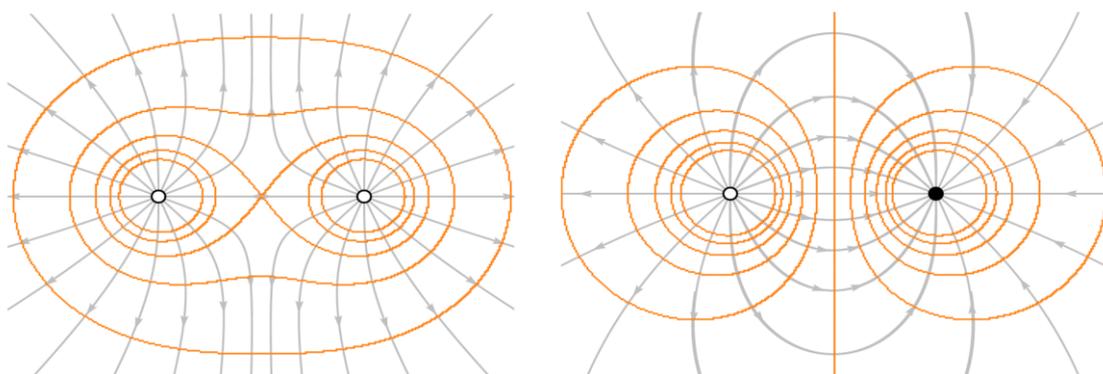
Analogie entre énergies potentielles de pesanteur (a) et électrique (b)

## 4.2 Surfaces et lignes équipotentiels

Lorsqu'on déplace une charge perpendiculairement aux lignes de champ, la force électrique n'effectue aucun travail puisque la force est perpendiculaire au déplacement. L'énergie potentielle électrique de la charge ne change pas. Les surfaces et lignes équipotentiels du champ électrique sont donc dirigées perpendiculairement aux lignes de champ.



Champ radial : Les lignes et surfaces équipotentiels (en orange) sont respectivement des cercles et des sphères concentriques centrés sur la charge source ponctuelle.



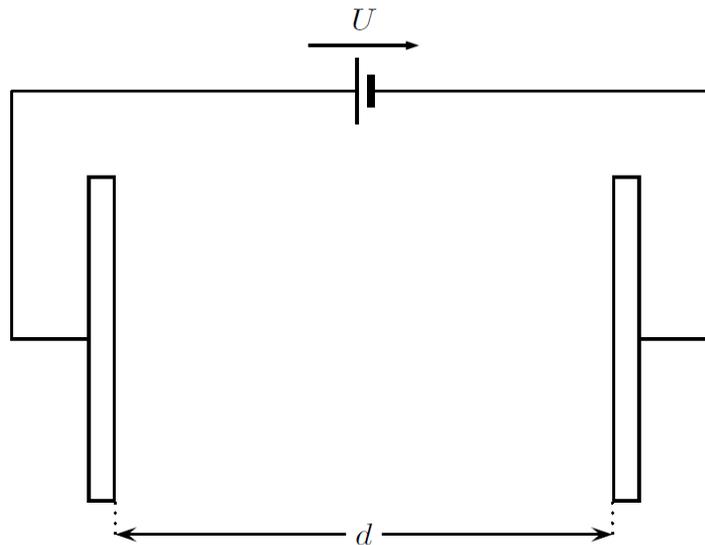
Lignes de champ et lignes équipotentiels pour deux charges identiques (à gauche), respectivement deux charges égales en valeur, mais de signe opposé (à droite)

Puisqu'aucun champ électrique ne peut exister à l'intérieur d'un conducteur hors circuit, l'énergie potentielle d'une charge  $y$  est la même en tout point. L'espace occupé par un conducteur est ainsi une région équipotentielle. De même :

La surface d'un conducteur constitue une surface équipotentielle

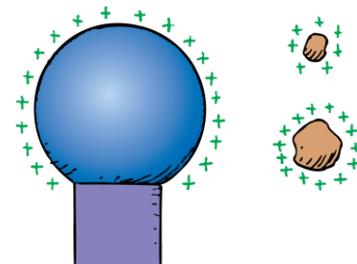
■ **As-tu-compris ?**

9. Rajouter quelques lignes de champ et quelques lignes équipotentiellles pour le champ électrique uniforme du condensateur plan. Préciser également la polarité des armatures.



### 4.3 Potentiel électrique et différence de potentiel

En un endroit donné dans le champ électrique, l'énergie potentielle électrique d'une charge est proportionnelle à la quantité de charge. Le rapport  $\frac{E_p}{q}$  est donc constant. La constante de proportionnalité, notée  $V$ , est appelée **potentiel électrique**.



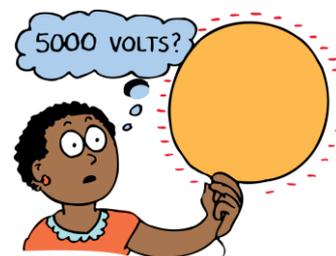
Le **potentiel électrique**  $V_A$  en un point  $A$  d'un champ électrique indique l'énergie potentielle électrique en ce point, par unité de charge :

$$V_A = \frac{E_p}{q}$$

Unité SI :  $[V_A] = 1 \frac{J}{C} = 1 \text{ volt} = 1 \text{ V}$

Le potentiel  $V_A = 0 \text{ V}$  peut être fixé arbitrairement. Souvent il est attribué à la Terre.

Un ballon frotté peut être chargé à un potentiel électrique très élevé, pouvant atteindre plusieurs milliers de volts. Un potentiel élevé signifie beaucoup d'énergie par unité de charge. Or, la charge électrique d'un ballon frotté est en général inférieure à un microcoulomb ( $\mu C = 10^{-6} C$ ). Par conséquent, la quantité d'énergie associée au ballon chargé est très petite.



À l'aide du potentiel électrique, l'énergie potentielle électrique d'une charge  $q$  en un point  $A$  s'écrit :

$$E_p(A) = q V_A$$

L'ensemble des points d'une surface qui ont même potentiel forment une **surface équipotentielle**.

L'ensemble des points d'une ligne qui ont même potentiel forment une **ligne équipotentielle**.

Lorsqu'une charge positive est lâchée sans vitesse initiale dans un champ électrique, elle est accélérée dans la direction et le sens du champ électrique. Son énergie cinétique augmente et son énergie potentielle diminue. On en déduit :

Le champ électrique est toujours dirigé dans le sens des potentiels décroissants.

Le travail qui est exercé par la force électrique entre deux points  $A$  et  $B$  est égal à l'opposé de la variation de l'énergie potentielle électrique entre ces points :

$$W_{AB}(\vec{F}_e) = -\Delta E_p = -(E_p(B) - E_p(A)) = E_p(A) - E_p(B)$$

En divisant par la charge  $q$  sur laquelle s'exerce la force électrique, il vient :

$$\frac{W_{AB}(\vec{F}_e)}{q} = \frac{E_p(A)}{q} - \frac{E_p(B)}{q} = V_A - V_B = U_{AB}$$

La grandeur  $U_{AB}$  est indépendante de la charge considérée. On l'appelle **tension électrique** entre  $A$  et  $B$  ou encore **différence de potentiel électrique** entre  $A$  et  $B$ .

La tension électrique entre deux points  $A$  et  $B$  (symbole :  $U_{AB}$ ) est égale à la différence des potentiels électriques entre  $A$  et  $B$  :

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

En d'autres mots, la tension électrique entre deux points est numériquement égale à la différence d'énergie potentielle électrique entre ces points, par unité de charge.

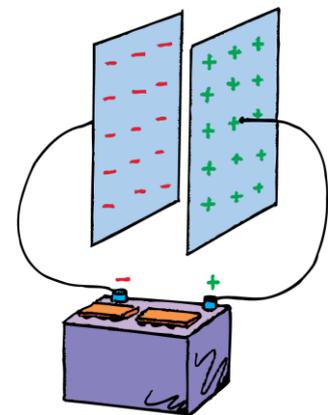
Dans le cas d'un **condensateur plan** dont les armatures sont séparées d'une distance  $d$  on trouve :

$$U = |V_A - V_B| = \frac{|\Delta E_p|}{q} = \frac{q E d}{q} = E d$$

L'intensité du champ électrique créé par un condensateur plan s'écrit :

$$E = \frac{U}{d}$$

On peut donc calculer l'intensité du champ électrique uniforme entre les armatures d'un condensateur en mesurant la tension électrique  $U$  entre les plaques et la distance  $d$  entre les deux plaques.



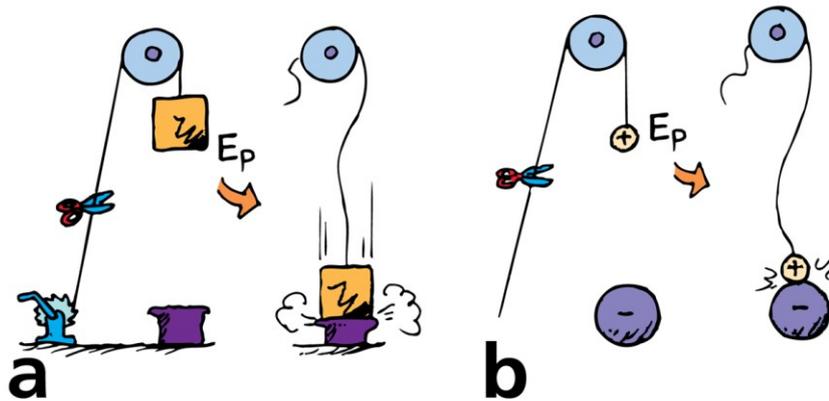
On en déduit une autre unité pour l'intensité de champ électrique :  $[E] = \frac{1\text{ V}}{1\text{ m}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$

### ■ As-tu-compris ?

10. Une charge de 2 mC est déplacée d'un point de potentiel 1 V vers un point de potentiel 5 V. De combien varie son énergie potentielle électrique ?
11. Une charge négative, qui est lâchée dans un champ électrique, est-elle accélérée dans le sens des potentiels croissants ou décroissants ?

## 4.4 L'électronvolt

Une charge électrique qui est lâchée dans un champ électrique quelconque est accélérée et de l'énergie potentielle électrique est transformée en énergie cinétique.



Analogie de la transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique dans le champ de pesanteur (a) et le champ électrique (b).

D'après le TEC :

$$\Delta E_c = W_{AB}(\vec{F}_e) = q U_{AB}$$

Exemple

Un proton est accéléré depuis le repos par une tension électrique de 1V. Son énergie cinétique vaut alors

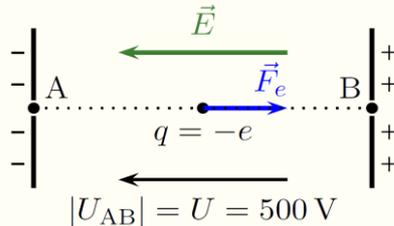
$$\begin{aligned} E_c &= |q| U \\ &= 1e \cdot 1V \\ &= \mathbf{1 \text{ eV}} \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot V \\ &= \mathbf{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \end{aligned}$$

**1 électronvolt = 1 eV =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J** est l'énergie cinétique d'un proton (ou d'un électron) accéléré depuis le repos par une tension de 1V.

L'électronvolt est une unité d'énergie très petite qui est utilisée dans le domaine des particules élémentaires. On utilise souvent le keV =  $10^3$  eV, le MeV =  $10^6$  eV et le GeV =  $10^9$  eV.

### Exercice résolu

**Énoncé :** Un électron ( $q_e = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  ;  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ) entre avec une vitesse négligeable au point  $A$  de l'armature négative d'un condensateur plan. Il est accéléré sous une tension de 500 V qui règne entre les armatures, puis sort par le point  $B$  de l'armature positive.



- Calculer l'énergie cinétique (en eV et en J) de l'électron lorsqu'il sort en  $B$ .
- Calculer la valeur de la vitesse de l'électron lorsqu'il sort en  $B$ .

**Solution :** a. TEC :

$$\begin{aligned}\Delta E_c &= W_{AB}(\vec{F}_e) \\ E_c(B) - \underbrace{E_c(A)}_0 &= |q_e| U \\ E_c(B) &= e U\end{aligned}$$

A.N. :

$$\begin{aligned}E_c(B) &= e \cdot 500 \text{ V} \\ &= 500 \text{ eV} \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 500 \text{ V} \\ &= 8,0 \cdot 10^{-17} \text{ J}\end{aligned}$$

- b. Expression de l'énergie cinétique :

$$E_c(B) = \frac{1}{2} m_e v_B^2$$

Isolons la vitesse  $v_B$  :

$$v_B = \sqrt{\frac{2 E_c(B)}{m_e}}$$

A.N. : Il faut faire attention à calculer avec la valeur de l'énergie cinétique en J !

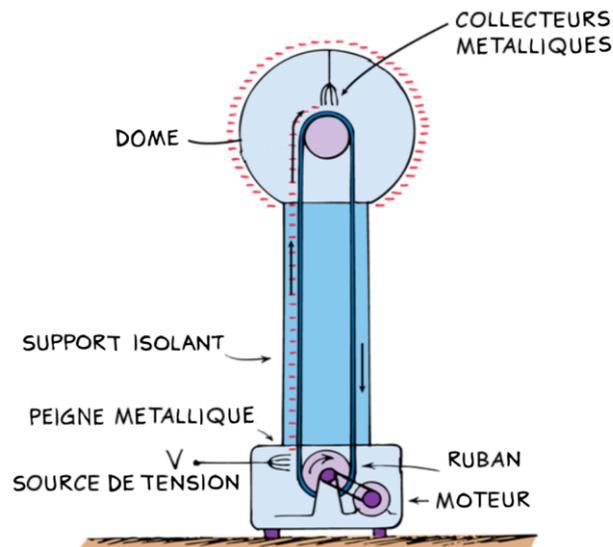
$$\begin{aligned}v_B &= \sqrt{\frac{2 \cdot 8,0 \cdot 10^{-17}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \\ &= 1,3 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}\end{aligned}$$

La valeur de la vitesse des électrons en  $B$  est égale à 4,4 % de la vitesse de la lumière ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ).

## 5 Pour en savoir plus

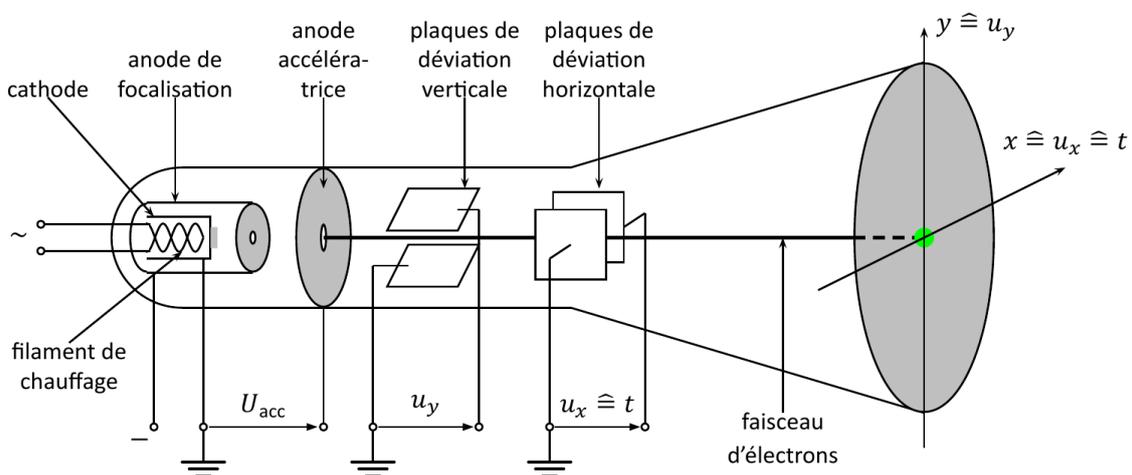
### Générateur Van de Graaff

Un dispositif pour créer de hauts voltages est le générateur Van de Graaff. Dans ce dispositif, un ruban en plastique déplace des électrons depuis la source de tension vers une large sphère conductrice (le dôme) qui est fixée sur un support isolant. Le ruban passe à côté d'un peigne métallique qui est maintenu à un potentiel électrique élevé. Un flux continu d'électrons est déposé sur le ruban par décharge électrique aux pointes du peigne. Les électrons sont transportés par le ruban vers la sphère métallique. Les électrons fuient alors sur des collecteurs métalliques attachés à la surface intérieure du dôme. À cause de leur répulsion mutuelle, les électrons se déplacent vers la surface extérieure du dôme. Sa surface intérieure est donc capable de recevoir plus d'électrons. Le champ électrique à l'intérieur du dôme est toujours nul, de sorte que les électrons suivants transportés par le ruban ne sont pas repoussés par la charge électrique qui se trouve à la surface extérieure du dôme. La charge du dôme augmente jusqu'à un potentiel électrique très élevé qui peut atteindre des millions de volts.



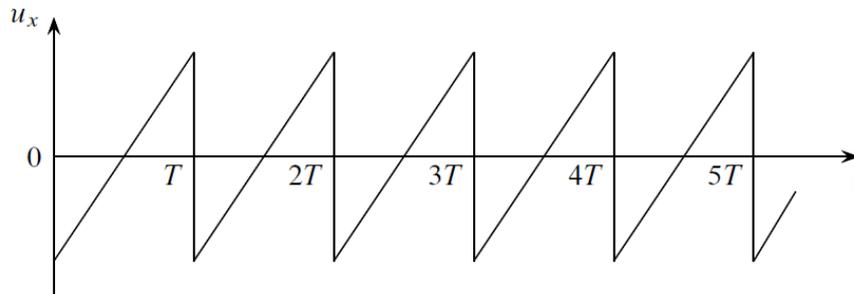
### Oscilloscope analogue

Les oscilloscopes servent à visualiser l'évolution d'une tension électrique au cours du temps. Les oscilloscopes analogues comprennent un tube cathodique (voir section 1.4) dont le faisceau est dévié à l'aide de champs électriques :



Entre les plaques de déviation verticale on applique la tension à analyser  $u_y$ . La déviation est d'autant plus forte que la tension s'écarte de zéro. L'ordonnée  $y$  du spot correspond donc à  $u_y$ .

Entre les plaques de déviation horizontale on applique la tension de balayage ou base de temps  $u_x$ . Il s'agit d'une tension en dents de scie qui augmente linéairement avec le temps  $t$  au cours d'une période  $T$  :



L'abscisse  $x$  du spot correspond donc au temps  $t$ .

### Stockage d'énergie électrique

Le champ électrique d'un condensateur peut stocker de l'énergie électrique :

- Les mémoires informatiques utilisent de très minuscules condensateurs pour stocker les 1 et les 0 du code binaire.
- Les condensateurs des appareils de photo stockent de plus grandes quantités d'énergie et la libèrent rapidement lors du flash.
- D'énormes quantités d'énergie sont stockées dans des condensateurs qui alimentent des lasers géants dans des laboratoires.
- Un condensateur stocke l'énergie dans un défibrillateur qui permet d'appliquer de courtes rafales d'énergie à une victime d'une crise cardiaque.

L'énergie stockée dans un condensateur correspond au travail fourni par le générateur lors de sa charge. La charge d'un condensateur est terminée lorsque la tension entre ses plaques est égale à la tension entre les bornes du générateur auquel elles sont connectées. Plus la tension du générateur est élevée et plus les plaques sont grandes et proches, plus la charge électrique sur les plaques est importante.



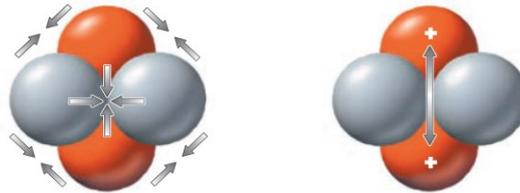
*En pratique, les plaques peuvent être de fines feuilles métalliques séparées par une fine feuille de papier. Ce "sandwich de papier" est ensuite enroulé pour gagner de la place et peut être inséré dans un cylindre.*

## Interaction forte et interaction faible

Il y a quatre interactions fondamentales qui gouvernent notre Univers. L'interaction gravitationnelle et l'interaction électromagnétique en sont deux. Les deux autres sont l'interaction forte et l'interaction faible dont nous allons donner un bref aperçu ci-dessous.

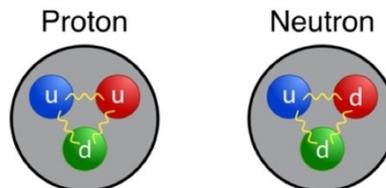
### a. Interaction forte

Le noyau atomique est formé de protons, chargés positivement, et de neutrons, électriquement neutres. Les protons se repoussent mutuellement, à cause de la force électrique répulsive qui s'exerce sur deux charges de même signe.



Bien que soumis à des forces électriques répulsives intenses, les protons ne s'écartent pas l'un de l'autre. La force de gravitation, toujours attractive, est beaucoup trop faible pour les tenir en place. Il doit donc exister un autre de type de force, qui est encore beaucoup plus forte que la force électrique : l'interaction forte. L'interaction forte ne décrit non seulement la liaison entre nucléons<sup>3</sup>, mais aussi des liaisons à l'intérieur des nucléons. En effet, un nucléon présente une structure interne : il est constitué de trois particules, appelées quarks, qui sont liées entre elles par interaction forte. Des expériences ont montré qu'il existe encore nombre de particules, en plus des nucléons, qui sont constituées de deux ou trois quarks. On appelle ces particules de façon générique hadrons.

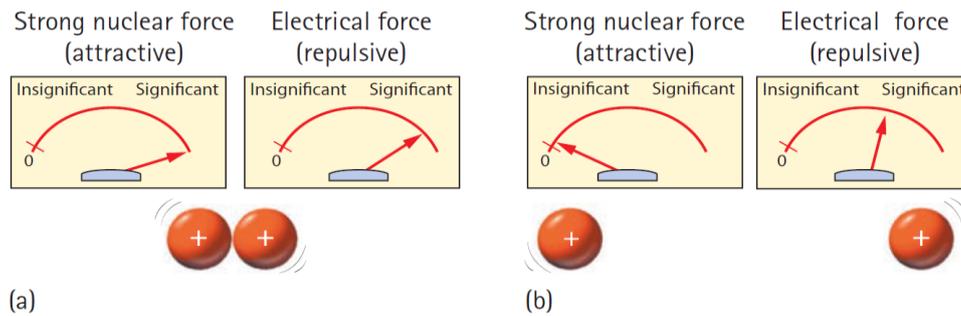
## QUARKS



*Un proton est formé de deux up-quarks et d'un down-quark  
Un neutron est formé de deux down-quarks et d'un up-quark*

L'interaction forte est la plus forte des interactions fondamentales. Elle est 100 fois plus intense que l'interaction électromagnétique. Sa portée est limitée approximativement au diamètre d'un nucléon ( $< 2 \cdot 10^{-15}$  m). L'interaction forte assure, à l'intérieur des hadrons, la liaison entre quarks et, à l'intérieur du noyau atomique, la liaison entre nucléons.

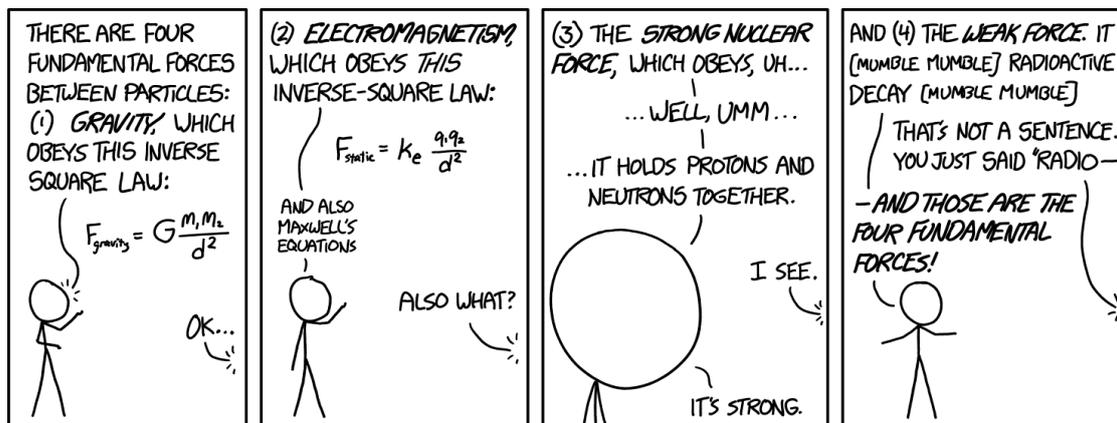
<sup>3</sup> Protons et neutrons sont désignés de façon générique par le terme nucléon.



### b. Interaction faible

L'interaction faible est beaucoup plus faible que l'interaction électromagnétique. Sa portée est très limitée ( $< 10^{-18}$  m). L'interaction faible est la seule interaction qui peut changer la saveur d'un quark. Elle peut par exemple changer un  $d$ -quark en un  $u$ -quark et ainsi transformer un neutron en un proton, et vice-versa. Ainsi, elle est à la base de :

- la radioactivité bêta, un des trois types de la radioactivité, ou un neutron d'un noyau atomique instable est transformée en un proton (ou vice-versa) avec émission d'un rayonnement ;
- la désintégration du neutron libre en un proton ;
- la fusion d'atomes d'hydrogène en atomes d'hélium, qui constitue la source d'énergie principale de la plupart des étoiles, et en particulier du Soleil, et qui serait impossible sans la transformation de protons en neutrons.



Interactions fondamentales par Alex R. Howe sous licence CC BY-NC 2.5

## 6 Exercices

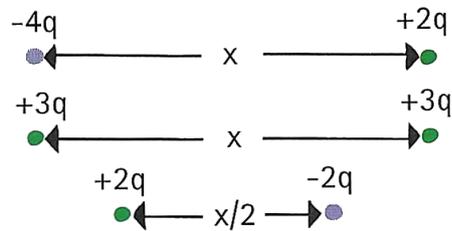
### Force électrique et influence

1. Une différence entre la loi de la gravitation universelle de Newton et la loi de Coulomb est que seulement l'une des deux lois
  - A. est une loi fondamentale de la nature.
  - B. contient une constante de proportionnalité.
  - C. inclut la loi en carré inverse.
  - D. décrit des forces répulsives et des forces attractives.
2. Que signifie le fait que la constante  $K$  dans la loi de la gravitation universelle de Newton soit un nombre très petit et la constante  $k$  dans la loi de Coulomb soit un nombre très grand (lorsque les deux constantes sont exprimées en unités SI) ?
3. Un électron qui se trouve à une certaine distance d'une charge électrique est attiré par une certaine force électrique. Que devient la force d'interaction lorsque
  - a. l'électron se trouve deux fois plus loin de la charge électrique ?
  - b. la distance entre l'électron et la charge électrique triple ?
  - c. l'électron se trouve à moitié de la distance initiale de la charge ?
  - d. la distance entre l'électron et la charge ne vaut qu'un tiers de la distance initiale ?
  - e. la distance entre l'électron et la charge ne vaut qu'un quart de la distance initiale ?
4. Deux charges électriques  $q_A = q_B = q > 0$  se trouvent respectivement aux points A et B, distants de  $r$ . Les affirmations suivantes sont-elles vraies ou fausses ?

	Affirmation	Vrai	Faux
1	Les intensités des forces électriques exercées par A sur B et par B sur A sont identiques		
2	L'intensité du champ électrique créé par A au milieu du segment $[AB]$ vaut le double de celle de A au point B.		
3	Les vecteurs champs électriques créés par A et B sont égaux au milieu du segment $[AB]$ .		
4	Le champ électrique au milieu du segment $[AB]$ est nul.		
5	La force électrique subie par une charge se situant au milieu du segment $[AB]$ est nulle quelle que soit la valeur de la charge.		

5. Il est relativement facile d'arracher des électrons de la couche extérieure d'atomes lourds comme l'uranium (qui devient alors un ion d'uranium), mais il est très difficile d'arracher des électrons des couches intérieures. Pourquoi ?
6. Deux ballons d'hélium sphériques dont les centres sont distants de 1 m se repoussent avec une force électrique de 1N. En sachant que les deux ballons portent des charges électriques négatives identiques, déterminer la valeur de cette charge et le nombre d'électrons en excès sur chacun des ballons.

7. Supposons que l'on puisse donner une charge totale à la Terre et la même charge à la Lune. Pour quelle valeur de la charge la répulsion électrostatique entre la Terre et la Lune serait-elle égale à leur attraction gravitationnelle ? ( $m_T = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$  ;  $m_L = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$  ;  $d = 380000 \text{ km}$ )
8. Considérer les trois paires de charges électriques ponctuelles (on suppose que les deux charges d'une paire n'interagissent qu'entre elles). Ranger, par ordre décroissant, l'intensité de la force électrique entre les charges.



9. Deux protons sont respectivement en deux points A et B distants de  $r$  et se repoussent avec une force électrostatique  $F_e$ . Indiquer l'affirmation qui est correcte :
- a. Il existe aussi une force d'attraction gravitationnelle  $F_g$  entre les 2 protons. On a :
- A.  $F_g \ll F_e$
  - B.  $F_g < F_e$
  - C.  $F_g = F_e$
  - D.  $F_g > F_e$
  - E.  $F_g \gg F_e$
- b. Lorsque les deux protons sont remplacés par 2 électrons, alors pour la nouvelle force électrique  $F'_e$  on a :
- A.  $F'_e \ll F_e$
  - B.  $F'_e < F_e$
  - C.  $F'_e = F_e$
  - D.  $F'_e > F_e$
  - E.  $F'_e \gg F_e$
- c. Lorsque la distance entre les deux protons est réduite à  $r - x$  ( $x > 0$ ), alors l'intensité de la nouvelle force répulsive vaut :
- A.  $F'_e = F_e \left(1 + \frac{x}{r-x}\right)^2$
  - B.  $F'_e = F_e \left(1 - \frac{x}{r+x}\right)^2$
  - C.  $F'_e = F_e \left(1 + \frac{r-x}{x}\right)^2$
  - D.  $F'_e = F_e \left(\frac{x}{r-x}\right)^2$
  - E.  $F'_e = F_e \left(\frac{r-x}{x}\right)^2$

10. Trois charges ponctuelles sont situées sur une droite de la manière suivante :

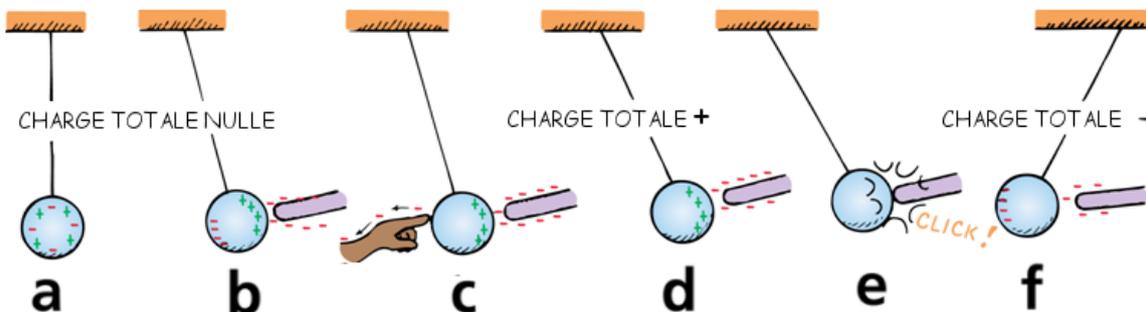


Déterminer l'intensité et le sens de la force électrique exercée par ...

- a.  $q_1$  sur  $q_3$
  - b.  $q_2$  sur  $q_3$
  - c.  $q_1$  et  $q_3$  sur  $q_2$  (force résultante).
11. Deux boules identiques, de charge  $Q$  et de masse 2 g, sont suspendues à des fils de longueur 1 m. À cause de la répulsion électrique des deux boules, les fils font un angle de  $15^\circ$  par rapport à la verticale. Déterminer la charge  $Q$ .
12. Est-il nécessaire de toucher la boule métallique d'un électroscope avec un objet chargé pour que la tige en papier alu se redresse ? Expliquer.



13. Expliquer les étapes de l'expérience illustrée sur les figures a-f.

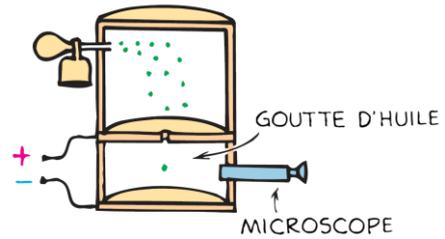


### Champ et potentiel électriques

14. Pourquoi le champ électrique est-il une grandeur vectorielle ?
15. Un champ électrique  $\vec{E}$  ne permet pas de...
- A. mettre un proton en mouvement.
  - B. dévier un électron en mouvement.
  - C. accélérer un neutron.
  - D. augmenter l'énergie cinétique d'un proton.
  - E. freiner une particule chargée.
16. Une charge ponctuelle  $Q$  crée un champ électrique de 40 N/C à 30 cm de la charge. Quelle serait l'intensité du champ électrique à une distance de
- a. 30 cm d'une charge source de  $2Q$  ?
  - b. 60 cm d'une charge source de  $2Q$  ?
  - c. 1,5 m d'une charge source de  $0,5Q$  ?

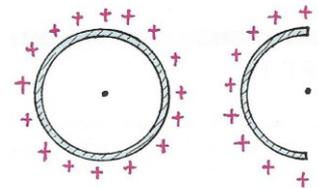
17. Suppose que le champ électrique à une distance de 1 m d'une charge ponctuelle a une certaine intensité. Le champ électrique à une distance de 2 m de la même charge est alors...
- identique
  - deux fois plus grande
  - deux fois petite
  - quatre fois plus grande.
  - quatre fois plus petite.
18. Les charges  $Q_1 = -25 \mu\text{C}$  et  $Q_2 = +50 \mu\text{C}$  sont distantes de 10 cm.
- Calculer l'intensité du champ électrique au point P situé entre les deux charges, à 2 cm de  $Q_1$ .
  - Calculer l'accélération d'un électron situé en P. Indiquer sur une figure le sens du champ électrique et le sens du vecteur accélération.
19. Comparer les normes des forces électriques qui agissent sur un électron libre et un proton libre lorsqu'ils sont placés au même endroit dans un champ électrique. Comparer également leurs accélérations et leurs sens de déplacement.
20. Une charge ponctuelle positive est placée (au repos) dans un champ électrique uniforme. Donner l'équation horaire de la vitesse de la charge, en fonction de sa masse et de sa charge.
21. Pourquoi le champ électrique est-il nul au milieu de deux charges ponctuelles identiques ?
22. Un dipôle électrique est un ensemble formé de deux charges électriques ponctuelles  $q_A = q$  et  $q_B = -q$ , égales en valeur absolue et de signes opposés, situées en deux points A et B qui sont séparés d'une faible distance  $AB = 2a$ . Déterminer le champ électrique :
- au milieu O du dipôle AB
  - en un point M situé tel que  $MA = MB = 2a$
23. Imaginer un proton au repos à une certaine distance d'une plaque chargée négativement. Le proton accélère et entre en collision avec la plaque. Imagine maintenant un électron au repos à la même distance d'une plaque qui porte la même charge électrique, mais positive. Dans quel cas la particule va avoir la plus grande vitesse d'impact sur la plaque ? Justifier.
24. Une charge ponctuelle  $Q = -5 \mu\text{C}$  est située à l'origine d'un repère cartésien. Déterminer l'intensité et la direction (angle par rapport à l'horizontale) du champ électrique aux points de coordonnées (8m, -2m) et (-2m, 5m).
25. On considère un triangle isocèle KLM ( $KL = KM = 6 \text{ cm}$ ), dont l'angle  $\hat{K}$  est égal à  $50^\circ$ . En chacun des points L et M on place une charge de 1 nC. Déterminer le champ électrique résultant en K sur base d'une figure soignée.
26. Deux charges  $q = 10 \text{ mC}$  sont situées en deux sommets opposés d'un carré de côté  $a = 5 \text{ cm}$ . Le troisième sommet porte la charge  $-q$ . Déterminer le champ électrique créé par ces trois charges au quatrième sommet du carré sur base d'une figure soignée.

27. En 1909, Robert Millikan fut le premier à déterminer la charge d'un électron à l'aide d'une fameuse expérience. De petites gouttes d'huile sont chargées négativement par frottement lors de leur injection dans un champ électrique uniforme qui règne entre deux plaques horizontales de charges opposées. Les gouttelettes sont observées avec un microscope et l'intensité du champ électrique est réglée de manière qu'une goutte d'huile reste suspendue. Dans ce cas, le poids de la goutte est exactement compensé par la force électrique. Millikan a mesuré la charge d'un très grand nombre de gouttes et a trouvé que les valeurs étaient des multiples entiers de  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , soit la charge d'un électron (en valeur absolue). Cette découverte lui a valu le prix Nobel.



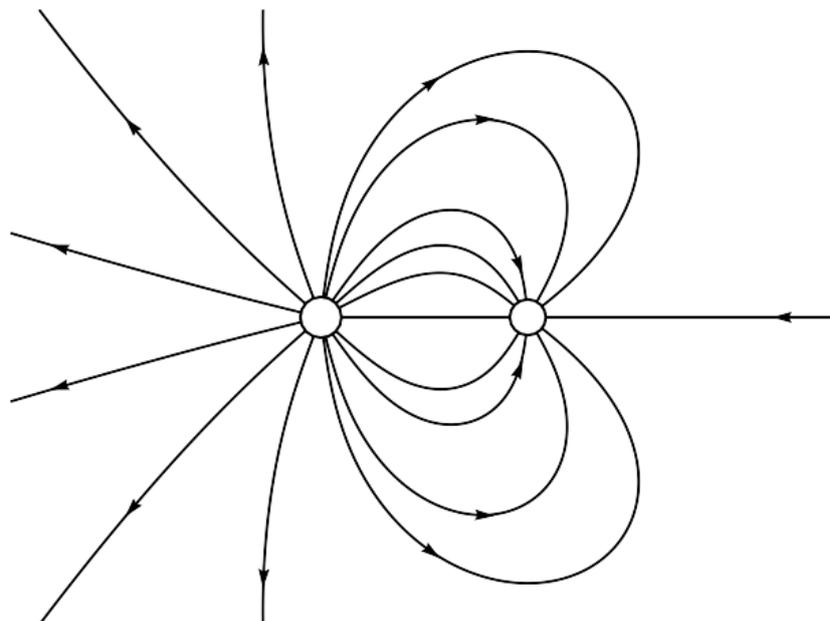
- Si une goutte de masse  $1,1 \cdot 10^{-14} \text{ kg}$  reste suspendue en équilibre dans un champ électrique d'intensité  $1,68 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ , quelle est la charge de la goutte ?
- Quel excès d'électrons se trouve sur cette goutte d'huile ?

28. Deux pièces métalliques, un anneau et un demi-anneau, ont le même rayon et la même densité de charge électrique. Dans quel cas le champ électrique au centre est-il le plus intense. Justifie.



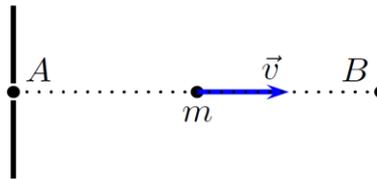
29. Comment évolue le champ électrique à l'intérieur d'une sphère conductrice lorsqu'elle est chargée ?
- L'intensité du champ électrique augmente au fur et à mesure que la charge de la sphère augmente.
  - L'intensité du champ électrique diminue au fur et à mesure que la charge de la sphère augmente.
  - Le champ électrique y est toujours nul.
  - Aucune de ces réponses.

30. La figure ci-dessous montre les lignes de champs électriques de deux charges ponctuelles  $q_1$  (à gauche) et  $q_2$  (à droite) :



- Expliquer ce que l'on entend par une ligne de champ électrique.
- Indiquer trois propriétés des lignes de champ électrique.
- Déterminer le signe des deux charges.
- En faisant des mesures appropriées, déterminer le rapport  $\frac{q_1}{q_2}$  entre les deux charges.

31. Un ion  $Cl^+$  de masse  $5,902 \cdot 10^{-26}$  kg pénètre en un point  $A$  avec une vitesse négligeable dans un condensateur plan dont les plaques sont soumises à une tension de 2 kV :



- Indiquer la polarité des plaques, ainsi que la direction et le sens des vecteurs champ et force subis par l'ion, pour qu'il soit accéléré jusqu'au point  $B$ , sur une figure.
  - Calculer la vitesse de l'ion lorsqu'il sort du condensateur en  $B$ .
  - Calculer l'intensité du champ électrique du condensateur sachant que les plaques sont distantes de 10 cm.
32. Un proton ( $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg) pénètre en un point  $A$  avec une vitesse négligeable dans un condensateur plan dont les plaques sont soumises à une tension de 2 kV :
- Indiquer la polarité des plaques, ainsi que la direction et le sens des vecteurs champ et force subis par l'ion, pour qu'il soit accéléré jusqu'au point  $B$ , sur une figure.
  - Calculez l'énergie cinétique finale du proton en eV.
  - Calculer la vitesse du proton lorsqu'il sort du condensateur en  $B$ .
33. Des particules  $\alpha$  (noyaux d'hélium de masse  $m_\alpha = 6,6447 \cdot 10^{-27}$  kg et de charge électrique  $q_\alpha = 2e$ ) sont accélérées entre les plaques du condensateur de  $A$  vers  $B$ . Les particules  $\alpha$  pénètrent en  $A$  avec une vitesse initiale  $v_A = 2 \cdot 10^5$  m/s.
- Déterminer la polarité des deux plaques.
  - Indiquer sur une figure le champ électrique entre les plaques du condensateur.
  - Calculer l'énergie cinétique initiale en eV.
  - Calculez la variation d'énergie cinétique, ainsi que l'énergie cinétique finale des particules  $\alpha$  en eV, si la tension accélératrice vaut 1kV.
  - Calculer la vitesse des particules  $\alpha$  en  $B$ .
34. Un électron ( $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg) pénètre en  $A$  à l'intérieur d'un condensateur avec une vitesse  $v_A = 2,0 \cdot 10^7$  m/s. L'électron ensuite freiné entre les plaques du condensateur de sorte que sa vitesse en  $B$  soit nulle.
- Indiquer la polarité des plaques, ainsi que la direction et le sens des vecteurs champ et force subis par l'électron, pour qu'il soit freiné jusqu'au point  $B$ , sur une figure.
  - Calculer l'énergie cinétique initiale de l'électron en eV.
  - Calculer la tension de freinage nécessaire.

## Révision

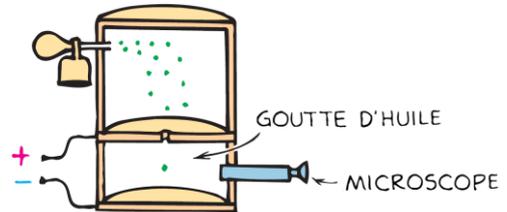
A. Répondre par vrai ou faux.

	<b>Affirmation</b>	<b>Vrai</b>	<b>Faux</b>
1	L'intensité de la force électrique entre deux charges ponctuelles quadruple quand la charge de chaque particule est doublée.		
2	L'intensité de la force électrique entre deux charges ponctuelles quadruple quand la distance entre les deux charges est doublée.		
3	La force électrique exercée dans l'atome d'hydrogène par le proton sur l'électron est plus grande que celle exercée par l'électron sur le proton.		
4	Un corps chargé peut, par influence, repousser un isolant neutre.		
5	Le champ électrique est une grandeur vectorielle.		
6	Le champ électrique créé par une particule de charge $q$ dépend de sa masse $m$ .		
7	L'énergie potentielle électrique d'une particule chargée dépend de la masse de la particule.		
8	L'intensité du champ électrique est en tout point entre les plaques d'un condensateur constante.		
9	Un électron mis en mouvement par un champ électrique se déplace toujours dans le sens du champ électrique.		
10	Un neutron ne subit aucune force électrique lorsqu'il se déplace dans un champ électrique.		

B. Une goutte d'huile de masse égale à  $2,0 \cdot 10^{-11}$  g est immobile entre les plaques d'un condensateur chargé. Les plaques sont distantes de 25 mm et la tension aux bornes du condensateur vaut 200 V. Quelle affirmation est correcte ?

a. La goutte d'huile...

- A. est neutre.
- B. est chargée positivement.
- C. est chargée négativement.
- D. peut être chargée positivement ou négativement.
- E. Aucune des réponses



b. Le poids de la goutte...

- A. peut être négligé par rapport à la force électrique.
- B. est plus petit que la force électrique.
- C. a même intensité que la force électrique.
- D. est plus grand que la force électrique.
- E. est la seule force agissant sur la goutte d'huile.

c. L'intensité du champ électrique entre les plaques du condensateur vaut...

- A.  $800 \frac{\text{V}}{\text{m}}$
- B.  $5000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$
- C.  $8000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$
- D.  $50000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$
- E.  $80000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$

d. La force électrique exercée sur la goutte...

- A. a même sens que le champ électrique en ce point.
- B. est de sens opposé au champ électrique en ce point.
- C. est colinéaire à la ligne équipotentielle en ce point.
- D. est perpendiculaire au champ électrique en ce point.
- E. est colinéaire aux plaques du condensateur.

e. La valeur absolue de la charge de la goutte d'huile vaut...

- A.  $2,45 \cdot 10^{-14}$  C
- B.  $2,45 \cdot 10^{-15}$  C
- C.  $2,45 \cdot 10^{-18}$  C
- D.  $2,45 \cdot 10^{-17}$  C
- E. Aucune des réponses

## Crédits Photos

© Andrey Semenov / Shutterstock.com (1198178257) – **p.0** (page titre)

© Sandrino Savini – **p.9** (champ électrique d'une charge ponctuelle, photo milieu de page)

© Wikimedia Commons / MikeRun – **p.9** (champ électrique de 2 charges ponctuelles de signe opposé, photo bas de page ; sous licence CC BY-SA 4.0)

© Wikimedia Commons / MikeRun – **p.10** (champ électrique autour d'une pointe ; sous licence CC BY-SA 4.0)

© Gilles Frising – **p.11** (champ électrique uniforme)

© Gilles Frising – **p.12** (absence de champ électrique à l'intérieur d'un cylindre creux et conducteur, photo de gauche)

© Wikimedia Commons / Martin Apolin – **p.12** (cage de Faraday, photo de droite ; sous licence CC BY-SA 3.0)

© ETAP / Shutterstock.com (520712602) – **p.20** (condensateurs)

## Crédits Illustrations

© G. Hartwig / The Aerial World (1886) – **p.10** (Feu de Saint-Elme sur un bateau; domaine public)

© aiyoshi597 / Shutterstock.com (1994461613) – **p.20** (quarks)

© Alex R. Howe – **p.21** (interactions fondamentales sous licence CC BY-NC 2.5)

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours. Les illustrations de Paul G. HEWITT ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

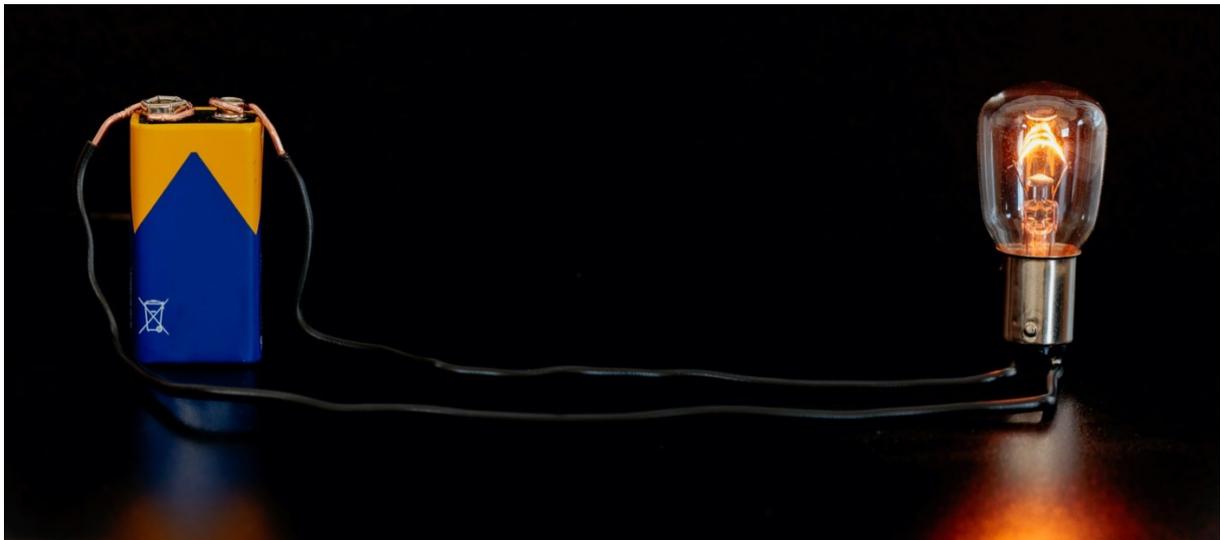
© HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson

© HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson



# 5.

## Générateurs et récepteurs



© Henri Weyer



## Sommaire

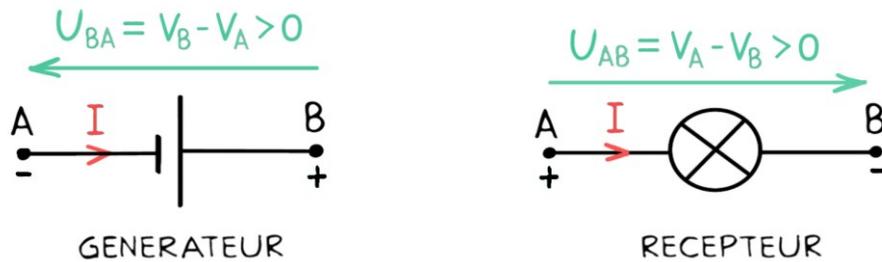
1	Rappels .....	1
1.1	Conventions pour les circuits électriques .....	1
1.2	Puissance électrique.....	1
1.3	Résistance électrique .....	1
1.4	Lois des circuits.....	2
2	Lois de Kirchhoff .....	3
2.1	Première loi de Kirchhoff (Loi des nœuds).....	3
2.2	Deuxième loi de Kirchhoff (Loi des mailles) .....	3
3	Récepteurs.....	5
3.1	Conducteur ohmique.....	5
3.1.1	Loi d'Ohm .....	5
3.1.2	Caractéristique $I = f(U)$ d'un conducteur ohmique .....	5
3.1.3	Puissance dissipée par effet Joule .....	6
3.2	Conducteur non linéaire.....	7
3.2.1	Représentation graphique $I = f(U)$ d'une lampe à incandescence .....	7
3.2.2	Résistance statique et résistance dynamique .....	8
4	Générateurs.....	10
4.1	Caractéristique $U = f(I)$ d'une pile .....	10
4.2	Loi d'Ohm pour un générateur.....	11
4.3	Bilan énergétique .....	11
4.4	Rendement d'un générateur .....	12
4.5	Représentation d'un générateur non idéal.....	12
5	Détermination du point de fonctionnement d'un circuit simple .....	13
5.1	Résolution par le calcul .....	13
5.2	Résolution graphique .....	13
6	Pour en savoir plus .....	14
7	Exercices.....	15



# 1 Rappels

## 1.1 Conventions pour les circuits électriques

- L'**intensité du courant électrique** est indiquée, dans un circuit électrique, à l'aide d'une flèche qui pointe du pôle positif du générateur vers le pôle négatif du générateur (sens conventionnel du courant électrique). À travers un générateur, le courant électrique circule du pôle négatif vers le positif.
- La **tension électrique** positive entre deux points d'un circuit électrique est indiquée à l'aide d'une flèche qui pointe du potentiel plus élevé vers le potentiel moins élevé.



## 1.2 Puissance électrique

La puissance électrique nous renseigne sur la « vitesse » des transformations énergétiques qui ont lieu dans un circuit électrique.

La **puissance électrique** d'un dipôle est égale à l'énergie électrique qu'il fournit/reçoit par unité de temps :

$$P_{el} = \frac{\Delta E_{el}}{\Delta t}$$

En notant  $U$  la tension positive aux bornes d'un dipôle, la puissance électrique s'écrit :

$$P_{el} = U I$$

## 1.3 Résistance électrique

La résistance électrique est la propriété des matériaux à s'opposer au passage du courant électrique.

La résistance  $R$  d'un conducteur est le quotient de la tension  $U$  appliquée entre ses bornes par l'intensité  $I$  du courant qui le traverse :

$$R = \frac{U}{I}$$

Unité SI :  $[R] = \left[ \frac{U}{I} \right] = 1 \frac{V}{A} = 1 \Omega$  (ohm)

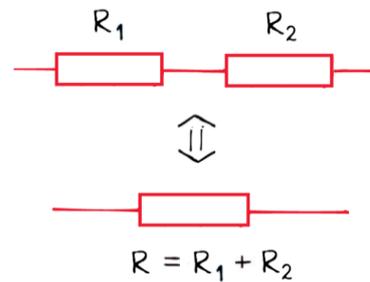
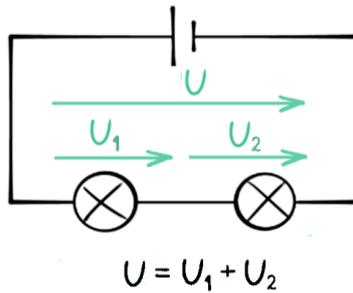
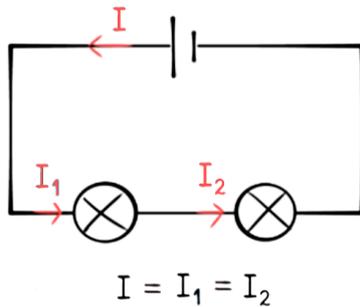
En transformant la formule ci-dessus, on obtient pour l'intensité du courant à travers le conducteur :

$$I = \frac{U}{R}$$

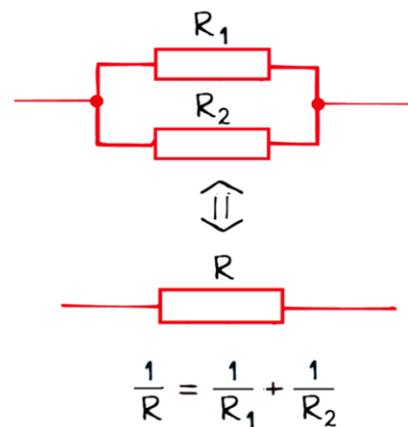
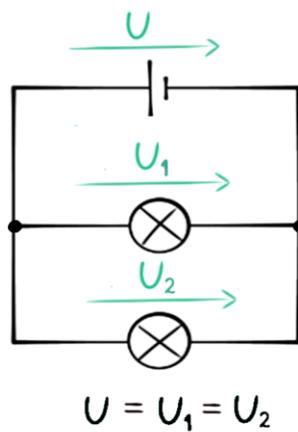
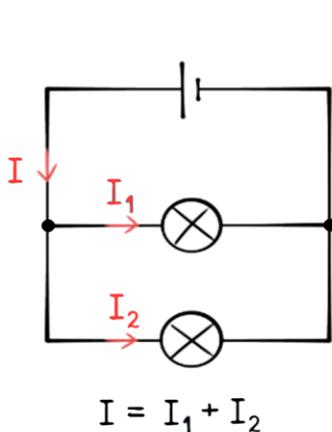


## 1.4 Lois des circuits

Circuit série :



Circuit parallèle :



### ■ As-tu-compris ?

1. On dispose de deux lampes identiques. On branche d'abord une seule lampe et ensuite les deux lampes en série à une même pile de tension supposée fixe.

a. Dans le circuit avec les deux lampes...

- A. l'intensité du courant est plus petite.
- B. l'intensité du courant est plus grande.
- C. l'intensité du courant reste identique.
- D. la tension aux bornes de la pile est plus petite.

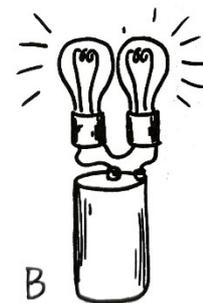
Justifier.

b. Dans quel circuit est transformée le plus de puissance électrique ?

- A. A
- B. B
- C. Identique pour les deux circuits

Justifier.

c. Quelles seraient les réponses aux questions précédentes si les deux lampes étaient branchées en parallèle ?



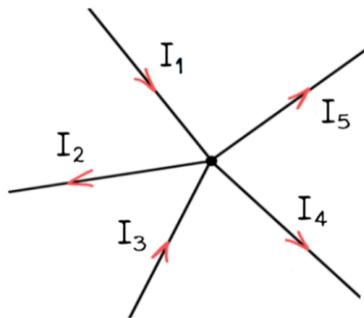
## 2 Lois de Kirchhoff

Les lois des circuits découlent des lois de Kirchhoff, établies en 1845 par le physicien allemand Gustav Kirchhoff.

### 2.1 Première loi de Kirchhoff (Loi des nœuds)

La somme des intensités des courants arrivant à un nœud est égale à la somme des intensités des courants sortant de ce nœud :

$$\sum I_{\text{arrivant}} = \sum I_{\text{sortant}}$$



LOI DES NOEUDS

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4 + I_5$$

La première loi de Kirchhoff décrit la **conservation de la charge** dans un circuit électrique :

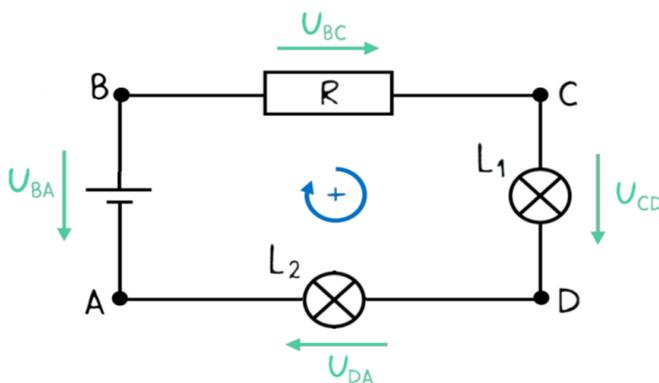
Il n'y a en effet aucune perte de charges électriques dans un circuit électrique. La charge totale arrivant en un point du circuit à chaque instant est égale à celle repartant de ce point.

### 2.2 Deuxième loi de Kirchhoff (Loi des mailles)

La deuxième loi de Kirchhoff décrit la **conservation de l'énergie** lorsque qu'une charge parcourt entièrement une maille<sup>1</sup> :

La somme algébrique des tensions le long d'une maille est toujours égale à zéro :

$$\sum_i U_i = 0$$



LOI DES MAILLES

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_{DA} = 0$$

$$-U_{AB} = U_{BC} + U_{CD} + U_{DA}$$

$$U_{BA} = U_{BC} + U_{CD} + U_{DA}$$

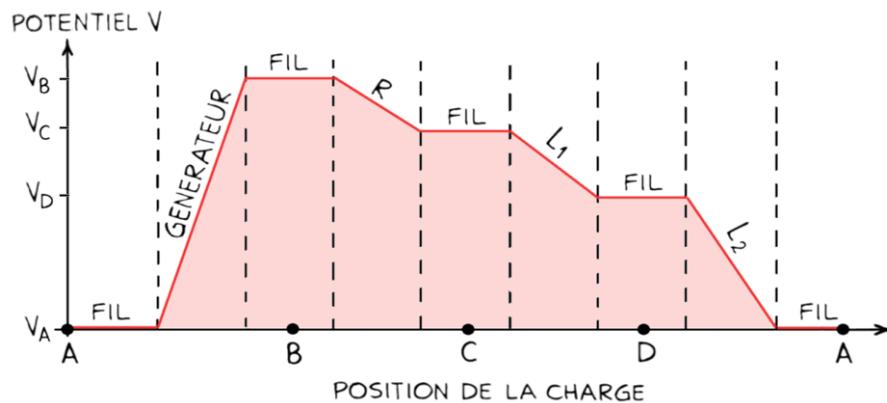
<sup>1</sup> Une maille est une boucle fermée d'un circuit électrique pour lequel on ne passe pas deux fois par le même nœud.

Remarques :

- Le sens du courant est fixé arbitrairement pour chaque branche. Si l'on trouve une valeur négative pour l'intensité d'un courant, le sens du courant est alors contraire au sens initialement choisi.
- Les sens dans lequel on parcourt la maille est fixé arbitrairement. La tension entre deux points est notée en indiquant ces points en indice dans l'ordre qu'ils sont rencontrés.

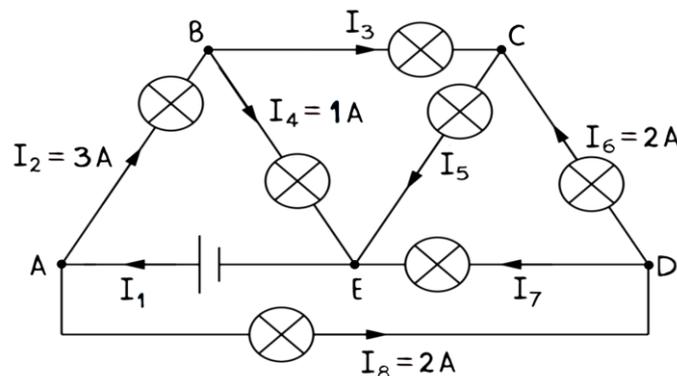
Le courant électrique peut être considéré comme un déplacement de charges positives à travers la maille, dans le sens + indiqué sur la figure<sup>2</sup>. Une charge  $q > 0$  se déplaçant le long de la maille subit des variations d'énergie potentielle électrique. Elle reçoit de l'énergie potentielle électrique lors de la traversée du générateur, car  $V_A < V_B$ . Ensuite, lors du passage par les trois récepteurs, la charge perd à chaque fois de l'énergie potentielle électrique, car  $V_B > V_C > V_D > V_A$ . La différence de potentiel entre le point final et le point initial est nulle. Lorsque la charge a parcouru la maille entière, son énergie potentielle électrique finale est donc égale à son énergie potentielle électrique initiale. La charge a cédé toute l'énergie qu'elle a reçue du générateur.

$$V_f - V_i = V_A - V_A = U_{AA} = 0$$



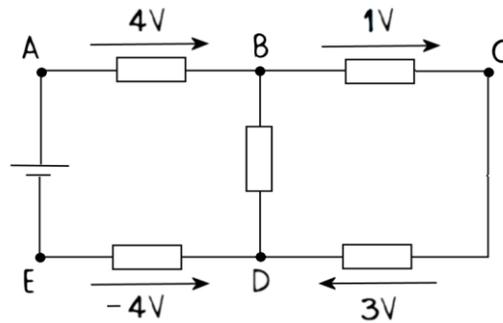
■ As-tu-compris ?

2. Déterminer les intensités de courant  $I_1, I_3, I_5$  et  $I_7$ .



<sup>2</sup> En réalité, les électrons libres de charge négative se déplacent dans le sens inverse.

3. Calculer les tensions  $U_{BD}$  et  $U_{AE}$ . Si  $V_E = 0V$ , calculer les potentiels des points A, B, C et D.



### 3 Récepteurs

#### 3.1 Conducteur ohmique

##### 3.1.1 Loi d'Ohm

L'intensité du courant  $I$  à travers un conducteur ohmique est proportionnelle à la tension  $U$  à ses bornes :

$$I \sim U$$

La résistance d'un conducteur ohmique est donc constante :  $R = \frac{U}{I} = \text{const}$

##### 3.1.2 Caractéristique $I = f(U)$ d'un conducteur ohmique

On branche un conducteur ohmique aux bornes d'un générateur à tension variable et on mesure pour différentes tensions  $U$  l'intensité de courant  $I$  traversant le conducteur ohmique.

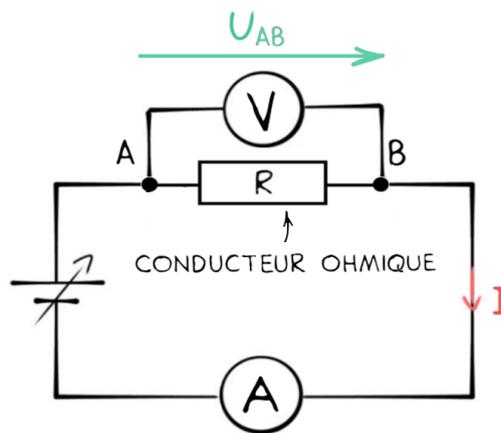
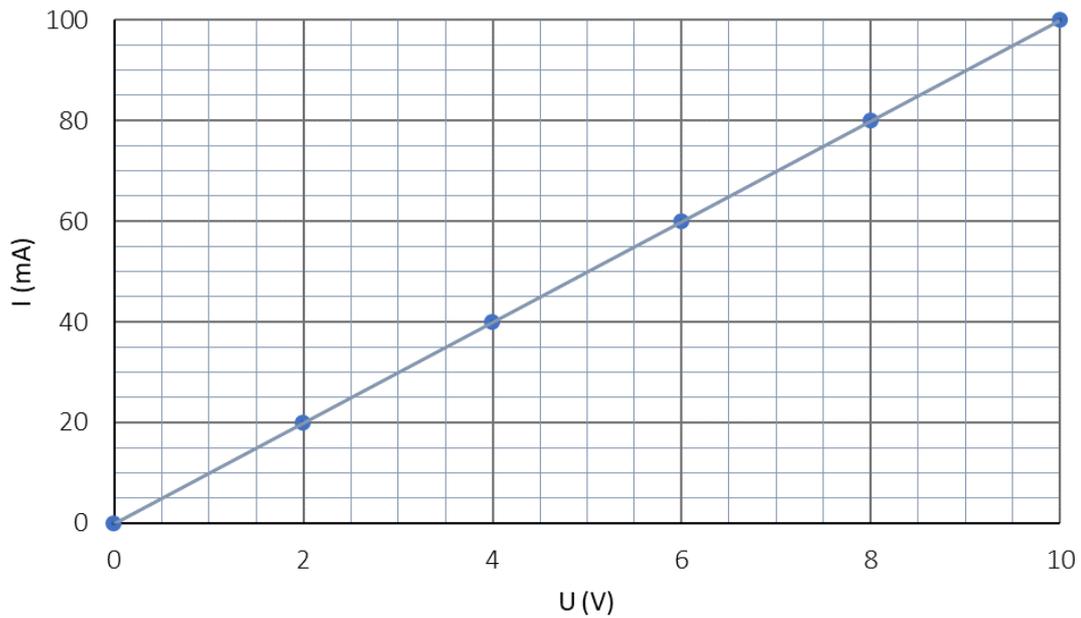


Tableau des mesures :

U(V)	0	2	4	6	8	10
I(mA)	0	20	40	60	80	100

Représentation graphique  $I = f(U)$  :



La caractéristique  $I = f(U)$  d'un conducteur ohmique est une droite passant par l'origine. La pente  $a$  de la droite est égale à l'inverse de la résistance du conducteur ohmique :

$$a = \frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{1}{R}$$

La caractéristique  $I = f(U)$  d'un conducteur ohmique est une droite d'équation :

$$I = \frac{1}{R} U$$

Pour le conducteur ohmique correspondant à la représentation graphique :

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{10 \text{ V}}{0,1 \text{ A}} = 100 \Omega$$

$$I = \frac{1}{100} U = \frac{U}{100} \quad (\text{grandeurs en unités SI})$$

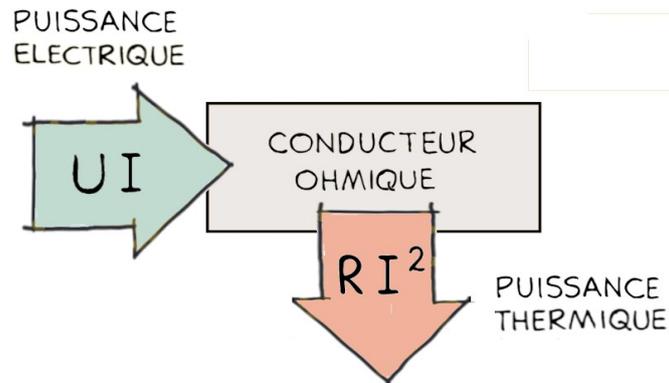
### 3.1.3 Puissance dissipée par effet Joule

Puissance électrique reçue par un conducteur ohmique :

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{\text{él}} &= U I \\ &= (R I) I \\ &= R I^2 \end{aligned}$$

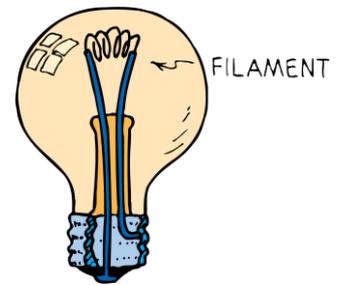
Cette puissance électrique reçue est intégralement transformée en puissance thermique cédée à l'environnement. Cet effet est appelé **effet Joule**. La puissance thermique dissipée par effet Joule s'écrit donc :

$$\mathcal{P}_{\text{th}} = R I^2$$

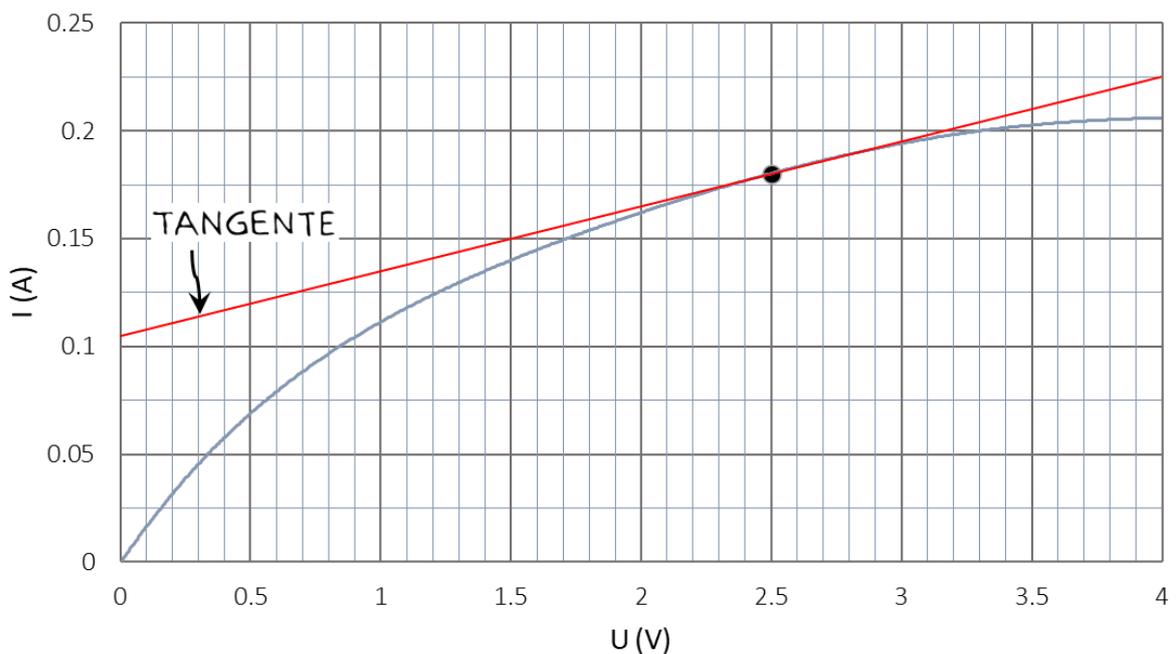


### 3.2 Conducteur non linéaire

Un conducteur non linéaire est un conducteur pour lequel la représentation graphique  $I = f(U)$  n'est pas une fonction linéaire. Ceci signifie que la valeur de la résistance du conducteur non linéaire varie en fonction de la tension appliquée à ses bornes. Un exemple d'un conducteur non linéaire est la lampe à incandescence. La résistance électrique de son filament métallique augmente avec la température et donc avec l'intensité du courant électrique (effet Joule).



#### 3.2.1 Représentation graphique $I = f(U)$ d'une lampe à incandescence



### 3.2.2 Résistance statique et résistance dynamique

Dans le cas d'un conducteur non linéaire, on peut calculer la résistance pour un point de fonctionnement donné en mesurant l'intensité de courant  $I$  le traversant, ainsi que la tension  $U$  à ses bornes. Il s'agit de la **résistance statique**  $R_{stat}$  du conducteur :

$$R_{stat} = \frac{U}{I}$$

Pour le point indiqué dans la représentation graphique :

$$R_{stat} = \frac{2,50 \text{ V}}{0,18 \text{ A}} = 13,9 \Omega$$

La résistance statique ne renseigne pas sur l'augmentation de l'intensité du courant  $I$  qui se produit si la tension  $U$  augmente. Il se pourrait en effet qu'une faible augmentation de la tension entraîne la destruction du conducteur, conséquence d'un courant trop élevé.

C'est la **résistance dynamique**  $r_{dyn}$  du conducteur qui nous permet de prévoir cette augmentation de l'intensité du courant provoquée par une faible augmentation de la tension aux bornes du conducteur.

La résistance dynamique est égale au quotient de la faible variation de la tension appliquée  $\Delta U_{petit}$  au conducteur par la faible variation de l'intensité de courant  $\Delta I_{petit}$  traversant le conducteur, ces faibles variations de tension et de courant étant notées  $dU$  et  $dI$ :

$$r_{dyn} = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{dU}{dI}$$

La résistance dynamique d'un conducteur est égale à l'inverse de la **pen**te de la tangente à la courbe au point considéré. Plus la pente de la tangente en un point de la courbe est petite, plus la résistance dynamique du conducteur est grande pour le point de mesure considéré. La valeur de la pente de la tangente nous informe sur la variation de l'intensité du courant au point considéré de la courbe pour une certaine augmentation de la tension aux bornes du conducteur. En effet :

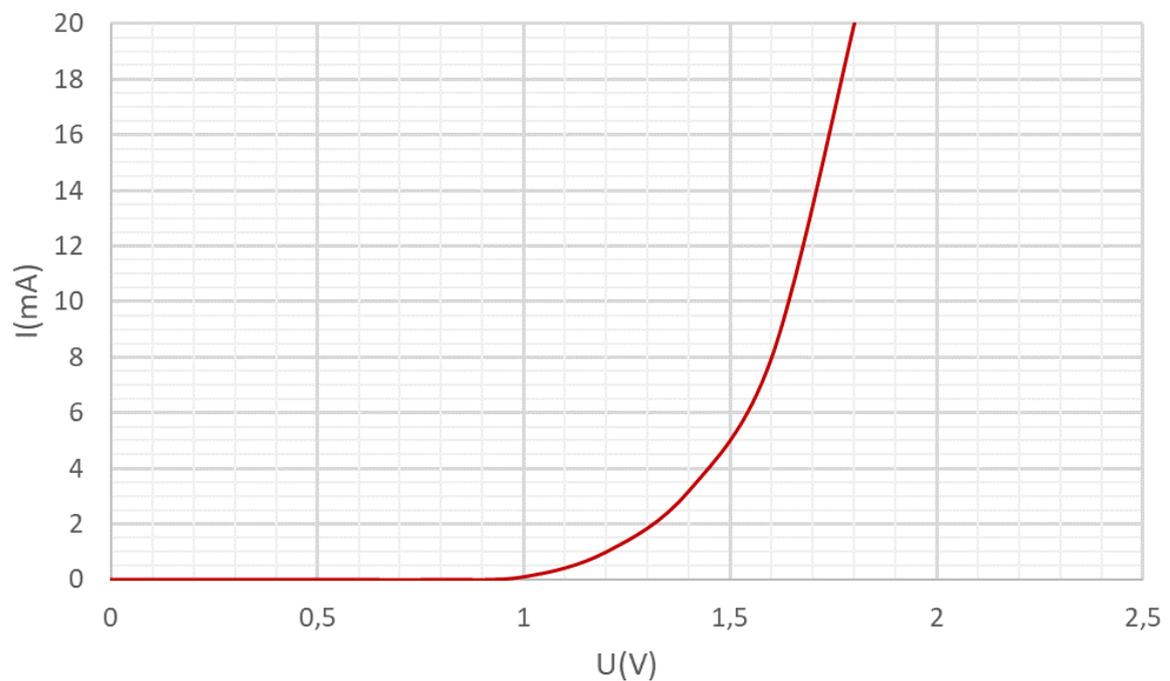
- Si  $r_{dyn}$  est grande, alors l'augmentation de l'intensité du courant sera petite (pas de danger)
- Si  $r_{dyn}$  est petite, alors l'augmentation de l'intensité du courant sera grande (danger)

Pour le point indiqué dans la représentation graphique :

$$r_{dyn} = \frac{1}{a} = \frac{2,50 \text{ V}}{0,075 \text{ A}} = 33,3 \Omega$$

■ **As-tu-compris ?**

4. Faire la représentation graphique  $I = f(U)$  de deux conducteurs ohmiques, si on suppose que  $R_1 < R_2$ . Expliquer.
5. Comment reconnaît-on graphiquement que la résistance dynamique d'un récepteur diminue si l'intensité du courant  $I$  augmente ?
6. La représentation graphique ci-dessous donne l'intensité de courant qui traverse une LED en fonction de la tension appliquée à ses bornes. Déterminer la résistance statique ainsi que la résistance dynamique de la LED lorsqu'on applique à ses bornes une tension de 1,5 V.



## 4 Générateurs

### 4.1 Caractéristique $U = f(I)$ d'une pile

On branche une résistance variable aux bornes d'une pile et on mesure pour différentes intensités de courant  $I$  traversant le générateur la tension  $U$  aux bornes du générateur.

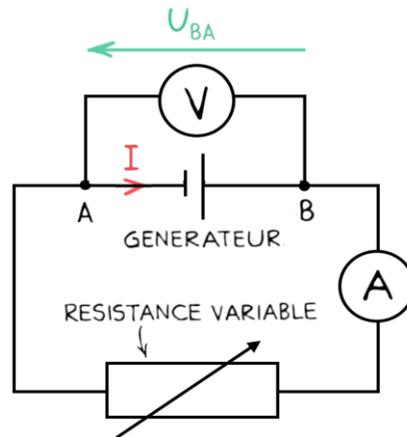
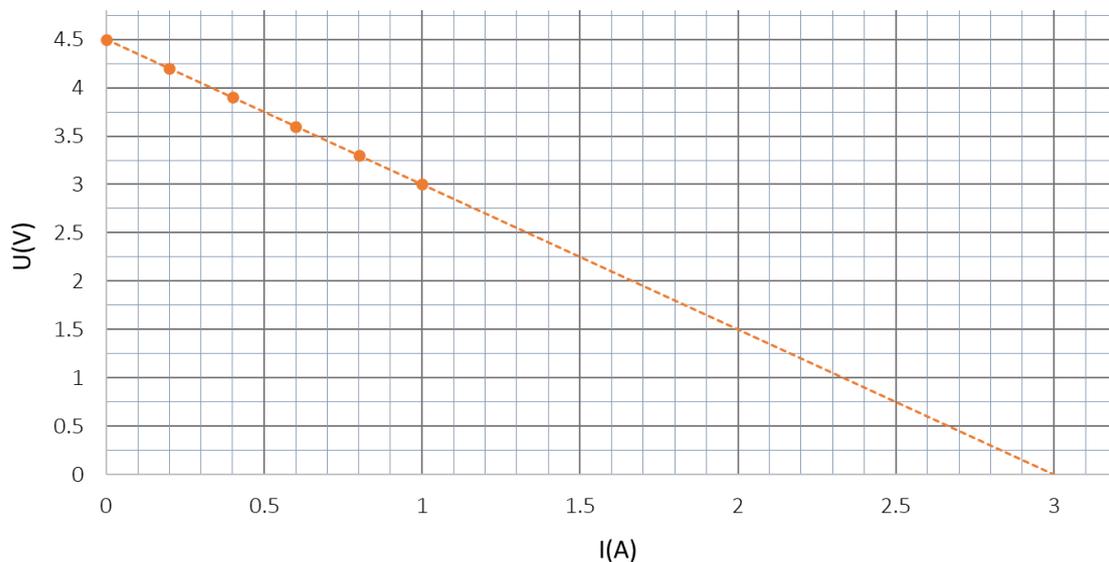


Tableau des mesures :

I(A)	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
U(V)	4,5	4,2	3,9	3,6	3,3	3,0

Représentation graphique  $U = f(I)$  :



La caractéristique  $U = f(I)$  de la pile est une droite d'équation :

$$U = a I + b$$

- L'ordonnée à l'origine  $b = 4,5 \text{ V}$  représente la tension  $U$  aux bornes de la pile lorsque  $I = 0$  (circuit ouvert). Il s'agit de la tension à vide appelée **force électromotrice** (ou **f.é.m.**)  $E$  de la pile.
- La pente négative  $a = \frac{\Delta U}{\Delta I} = -\frac{4,5 \text{ V}}{3 \text{ A}} = -1,5 \Omega$  a la même unité qu'une résistance. La **résistance interne**  $r$  de la pile est donc égale à l'opposé de la pente  $a$ .

Ainsi :

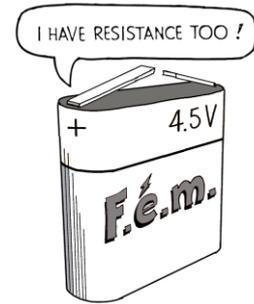
$$U = E - r I = 4,5 - 1,5 I \quad (\text{grandeurs en unités SI})$$

## 4.2 Loi d'Ohm pour un générateur

$$U = E - r \cdot I$$

TENSION (V) →  $U$  ← INTENSITE DU COURANT (A) →  $I$

f.e.m. (V) →  $E$  ← RESISTANCE INTERNE ( $\Omega$ ) →  $r$



- La tension  $U$  aux bornes de la pile est maximale lorsqu'aucun courant ne traverse la pile ( $I = 0$ ). Cette tension maximale correspond à la force électromotrice  $E$  de la pile.
- La tension  $U$  chute linéairement quand l'intensité du courant  $I$  traversant la pile augmente.
- En reliant les deux pôles de la pile par un fil conducteur, on met la pile en court-circuit. La tension  $U$  aux bornes de la pile est alors nulle et l'intensité de courant est maximale. On l'appelle **intensité de court-circuit**  $I_{cc}$

$$U = E - r I_{cc} = 0$$

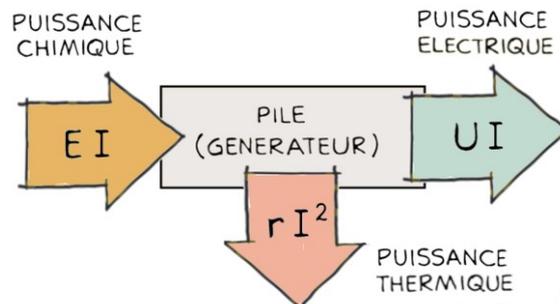
$$I_{cc} = \frac{E}{r}$$

## 4.3 Bilan énergétique

Multiplions l'expression de la loi d'Ohm pour un générateur par  $I$  :

$$U I = (E - r I) I = E I - r I^2 \Rightarrow E I = U I + r I^2$$

Tous les termes ont la dimension d'une puissance et cette équation traduit la conservation de l'énergie.



- Un générateur transforme différentes formes de puissances (chimique, mécanique, rayonnée, ...) en séparant les charges électriques :

$$\mathcal{P}_{reçue} = E I \text{ (input)}$$

- Une partie de la puissance reçue est dissipée par effet Joule dans la résistance interne du générateur (sous forme de puissance thermique). En effet, le générateur devient chaud lors de l'utilisation.

$$\mathcal{P}_{th} = r I^2$$

- Le reste de la puissance reçue est transformé en puissance électrique utile qui est fournie par le générateur au circuit électrique.

$$\mathcal{P}_{utile} = U I \text{ (output)}$$

#### 4.4 Rendement d'un générateur

Le rendement d'un dipôle électrique est défini par la relation :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{reçue}}} = \frac{U I}{E I} = \frac{U}{E} \quad (I \neq 0)$$

#### Exemples

Pour le couple de mesures ( $I = 0,4 \text{ A}$  ;  $U = 4,1 \text{ V}$ ) de la représentation graphique :

$$\eta = \frac{U}{E} = \frac{4,1 \text{ V}}{4,5 \text{ V}} = 0,91 = 91\%$$

Pour le couple ( $I = 1 \text{ A}$  ;  $U = 3 \text{ V}$ ) :

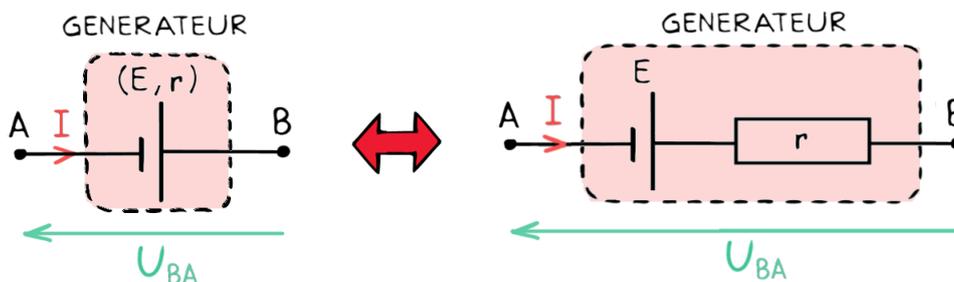
$$\eta = \frac{U}{E} = \frac{3 \text{ V}}{4,5 \text{ V}} = 0,67 = 67\%$$

Comme l'intensité du courant est plus grande, une plus grande partie de la puissance reçue par le générateur est dissipée par effet Joule (33 %).

En reliant les deux pôles de la pile par un fil conducteur de résistance négligeable (court-circuit), la tension aux bornes de la pile est nulle :  $U = 0$ . Le rendement du générateur est alors  $\eta = 0$ . Toute la puissance reçue est cédée par effet Joule à l'environnement sous forme de puissance thermique.

#### 4.5 Représentation d'un générateur non idéal

Un générateur réel peut être considéré comme le branchement en série d'un générateur idéal de f.é.m.  $E$  et d'une résistance ohmique  $r$ .



On peut considérer que l'énergie potentielle électrique des charges traversant le générateur réel augmente lors du passage à travers le générateur idéal de f.é.m.  $E$ , pour ensuite diminuer lors du passage à travers la résistance  $r$  par effet Joule (elles cèdent une partie de l'énergie reçue directement au générateur qui s'échauffe).

#### ■ As-tu-compris ?

7. Quelles sont les 2 grandeurs caractéristiques d'une pile ? Expliquer brièvement leur signification
8. Expliquer ce qu'on entend par courant de court-circuit.

## 5 Détermination du point de fonctionnement d'un circuit simple

Le but est d'établir le **point de fonctionnement** d'un circuit simple composé d'un générateur et d'un conducteur ohmique, c'est-à-dire le couple de valeurs  $(U; I)$  unique valable pour ce circuit.

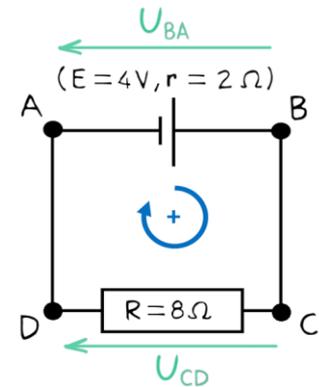
### 5.1 Résolution par le calcul

Considérons le circuit simple comprenant une pile de f.é.m.  $E = 4\text{ V}$  et de résistance interne  $r = 2\ \Omega$  et un conducteur ohmique de résistance  $R = 8\ \Omega$ .

On a :

$$\begin{aligned}U_{BA} &= U_{CD} (= U) \\ E - r I &= R I \\ I &= \frac{E}{R + r} = \frac{4\text{ V}}{8\ \Omega + 2\ \Omega} = 0,4\text{ A} \\ U &= R I = 8\ \Omega \cdot 0,4\text{ A} = 3,20\text{ V}\end{aligned}$$

Le point de fonctionnement du circuit est le couple  $(3,2\text{ V}; 0,4\text{ A})$ .



### 5.2 Résolution graphique

Considérons le même circuit simple et représentons sur un même graphique les caractéristiques linéaires  $U = f(I)$  :

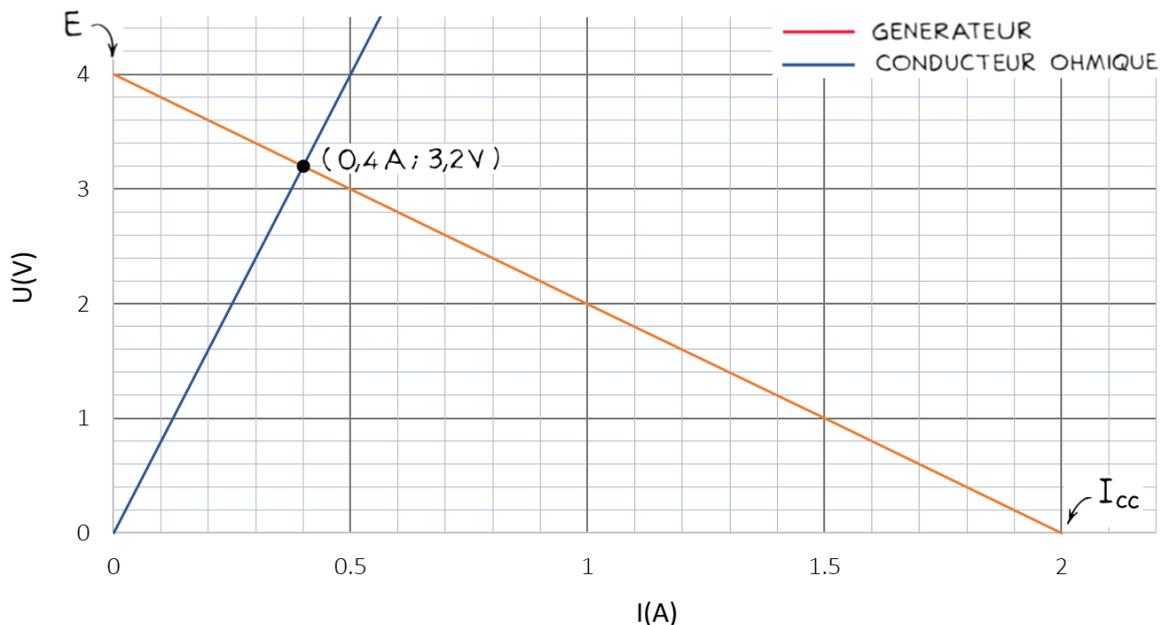
- du générateur :

$$U = E - r I = 4 - 2 I$$

- du conducteur ohmique :

$$U = R I = 8 I$$

Le point de fonctionnement du circuit équivaut à l'intersection des deux caractéristiques.



#### Remarque

La résolution graphique est pratique si le récepteur est non linéaire.

## 6 Pour en savoir plus

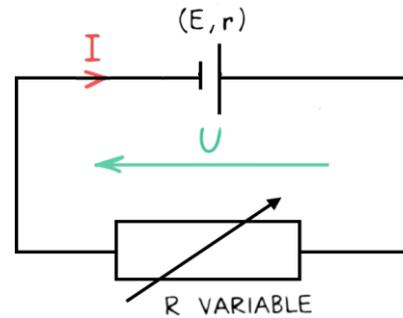
### Optimisation de l'énergie électrique fournie par un générateur

Dans certains domaines de l'électronique, comme par exemple en télécommunication, on ne recherche pas à obtenir le meilleur rendement, mais la plus grande puissance utile fournie quitte à augmenter la part de l'énergie dissipée par effet Joule.

On branche une résistance variable aux bornes du générateur et on veut déterminer pour quelle valeur de la résistance variable la puissance utile fournie par le générateur est maximale.

Pour les cas extrêmes, on obtient pour la puissance utile :

- Circuit ouvert :  $R \rightarrow \infty \Rightarrow I = 0 \Rightarrow \mathcal{P} = U \cdot I = 0$
- Court-circuit :  $R = 0 \Rightarrow I = I_{cc} \Rightarrow U = 0 \Rightarrow \mathcal{P} = 0$



Entre ces 2 valeurs, la puissance utile va être maximale pour une certaine résistance.

Exprimons la puissance utile en fonction de la résistance  $R$  :

$$\begin{aligned}\mathcal{P}(R) &= U I \\ &= (R I) I \\ &= R I^2 \\ &= R \frac{E^2}{(R + r)^2}\end{aligned}$$

La puissance utile est maximale lorsque la dérivée de la puissance  $\mathcal{P}$  en fonction de la résistance  $R$  est nulle :

$$\begin{aligned}\frac{d\mathcal{P}}{dR} &= 0 \\ \frac{E^2}{(R + r)^2} - \frac{2R E^2}{(R + r)^3} &= 0 \\ E^2 \frac{R + r - 2R}{(R + r)^3} &= 0 \\ E^2 \cdot \frac{r - R}{(R + r)^3} &= 0 \\ r - R &= 0 \\ R &= r\end{aligned}$$

La puissance utile est maximale si la résistance  $R$  est égale à la résistance interne  $r$  du générateur.

Puissance utile maximale d'un générateur :

$$\mathcal{P} = r \frac{E^2}{(r + r)^2} = \frac{E^2}{4r}$$

Point de fonctionnement :

$$I = \frac{E}{r+r} = \frac{1}{2} \frac{E}{r} = \frac{1}{2} I_{cc}$$

$$U = E - r \frac{1}{2} \frac{E}{r} = \frac{1}{2} E$$

Rendement :

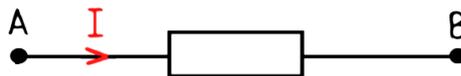
$$\eta = \frac{U}{E} = \frac{1}{2}$$

La puissance utile fournie par le générateur au circuit est maximale, bien que 50% de l'énergie totale soit perdue sous forme de chaleur,

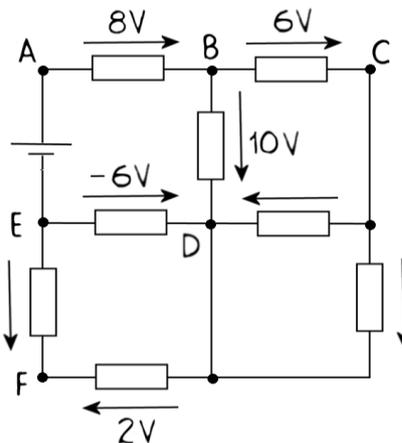
## 7 Exercices

### Lois de Kirchhoff

- Un courant électrique traverse un conducteur ohmique.

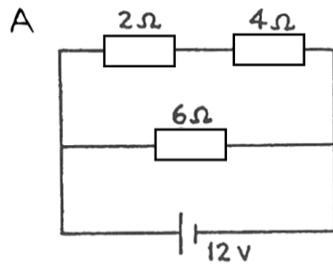


- Le potentiel électrique est-il plus élevé en A ou en B ? Expliquer.
  - Le courant électrique est-il plus élevé en A ou en B ? Expliquer.
- Calculer les valeurs de toutes les tensions représentées.

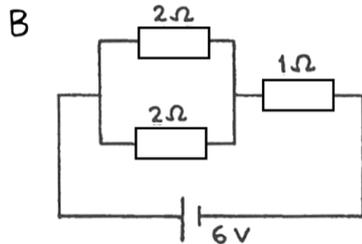


Si  $V_E = 0 \text{ V}$ , calculer les potentiels de tous les autres points.

- Pour les deux circuits complexes A et B ci-dessous :
  - Déterminer la résistance équivalente à l'aide de réductions successives d'associations d'éléments en série ou en parallèle.
  - Calculer l'intensité de courant débitée par le générateur.
  - Compléter les cases du tableau en justifiant.
  - Calculer la puissance électrique totale transformée dans les résistances et comparer-la à la puissance fournie par le générateur. Conclure.



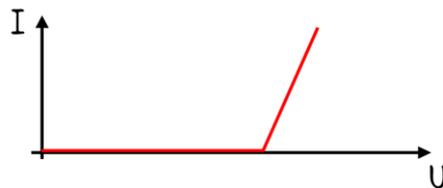
R	I	U	P <sub>el</sub>
2 Ω			
4 Ω			
6 Ω			



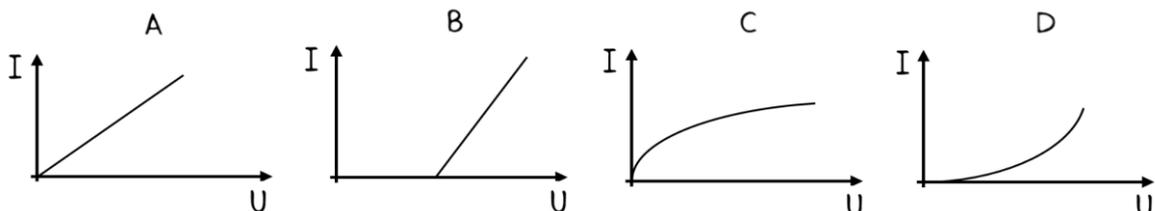
R	I	U	P <sub>el</sub>
2 Ω			
2 Ω			
1 Ω			

## Récepteurs

4. La caractéristique  $I = f(U)$  d'un électrolyseur est la suivante :

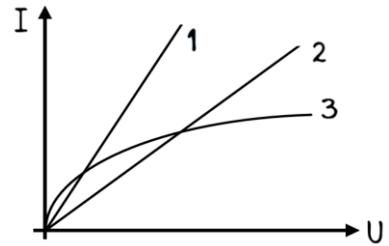


- Décrire le comportement de l'électrolyseur.
  - Les affirmations suivantes sont-elles correctes ? Motiver votre choix.
    - Le récepteur vérifie la loi d'Ohm.
    - Le récepteur n'est pas un conducteur ohmique.
    - La résistance statique du récepteur reste constante, dès qu'un courant électrique traverse le récepteur.
    - La résistance dynamique du récepteur reste constante, dès qu'un courant électrique traverse le récepteur.
5. Une lampe, dont la résistance augmente avec la température, est branchée aux bornes d'un générateur de tension variable. On mesure l'intensité de courant traversant la lampe pour différentes valeurs de la tension aux bornes de la lampe. Lequel des graphiques suivants correspond aux résultats de nos mesures ?



6. Le graphique ci-contre représente l'intensité du courant  $I$  en fonction de la tension  $U$  aux bornes de 3 récepteurs.

Les affirmations suivantes sont-elles vraies ou fausses ?



	Affirmation	Vrai	Faux
1	La loi d'Ohm est valable pour les 3 récepteurs.		
2	La résistance statique du récepteur 1 est constante.		
3	La résistance dynamique du récepteur 2 est constante.		
4	Le récepteur 1 conduit mieux le courant électrique que le récepteur 2.		
5	La résistance dynamique du conducteur 3 diminue si la tension aux bornes du récepteur augmente.		
6	On a : $R_1 < R_2$ .		

## Générateurs

7. Expliquer comment on peut mesurer la f.é.m. d'une pile.
8. Vrai ou faux ? Motiver votre réponse.  
La tension aux bornes d'une pile réelle est toujours inférieure à la f.é.m. de la pile, lorsqu'elle débite un courant d'intensité  $I$ .
9. Quels sont les deux grandeurs caractérisant une pile ?  
A. La tension à vide et la résistance interne  
B. La tension à vide et la force électromotrice  
C. La force électromotrice et la tension aux bornes de la pile  
D. La tension aux bornes de la pile et la résistance interne  
E. Aucune des réponses
10. La tension aux bornes d'une pile dans un circuit ouvert vaut  $U = 4,5 \text{ V}$ .  
La f.é.m. de la pile est-elle :  
A. inférieure à  $4,5 \text{ V}$   
B. égale à  $4,5 \text{ V}$   
C. supérieure à  $4,5 \text{ V}$
11. Expliquer pourquoi la tension aux bornes d'une pile diminue quand l'intensité du courant débitée augmente.
12. Que valent la tension aux bornes d'une pile et l'intensité du courant  $I$ , si on relie les bornes de la pile à l'aide d'un fil électrique en cuivre ?
13. Expliquer les échanges d'énergie en présence, lorsque qu'une pile est court-circuitée.

- 14.** Que vaut l'énergie utile fournie au circuit électrique, lorsque :
- le circuit électrique est ouvert ?
  - la pile est court-circuitée ?
- Justifier.
- 15.** Une résistance  $R$  variable est branchée aux bornes d'un générateur de f.é.m.  $E$  et de résistance interne  $r$ . Laquelle des propositions est correcte ?
- La tension aux bornes du générateur diminue si la valeur de  $R$  augmente
  - La tension aux bornes du générateur augmente si la valeur de  $R$  diminue
  - La tension aux bornes du générateur diminue si la valeur de  $R$  diminue
  - La tension aux bornes du générateur tend vers zéro si  $R$  tend vers infini
  - L'intensité du courant débitée par le générateur tend vers zéro si  $R$  tend vers zéro
- 16.** On a une pile de f.é.m.  $E$  et de résistance interne  $r$ .
- Quelle est la valeur maximale de l'intensité du courant électrique que peut débiter cette pile ?
  - Quand l'intensité prend-elle cette valeur ?
  - Quelle est alors la tension aux bornes de la pile ?
  - Que vaut alors le rendement de la pile ?
- 17.** Une résistance est branchée aux bornes d'un générateur de f.é.m.  $E$  et de résistance interne  $r$ . On branche ensuite une deuxième résistance parallèlement à la première. Laquelle des propositions est correcte ?
- La tension aux bornes du générateur augmente
  - La tension aux bornes du générateur diminue
  - La tension aux bornes du générateur reste constante
  - Il est impossible de prévoir, sans calculs, comment la tension aux bornes du générateur va varier
- 18.** La tension aux bornes d'un générateur est de 8,25 V lorsqu'il débite un courant d'intensité 1,5 A et de 7,0 V lorsque le courant vaut 2,0 A. Calculer la f.é.m., la résistance interne, ainsi que le rendement de ce générateur.
- 19.** On désire tracer la représentation graphique  $U = f(I)$  d'une pile. Pour ceci on dispose de deux multimètres, d'une résistance variable, d'un interrupteur poussoir, ainsi de fils de connexion.
- Faire le schéma du montage électrique permettant d'effectuer cette représentation graphique. Préciser en outre le rôle de chacun des multimètres employés.
  - Les différentes mesures sont consignées dans le tableau suivant :

$I$ en mA	0	100	200	300	400	500	600
$U$ en V	4,70	4,55	4,39	4,25	4,12	3,95	3,82

Tracer la représentation graphique  $U = f(I)$  de la pile.

- En utilisant de la représentation graphique, déterminer la f.é.m.  $E$  de la pile et sa résistance interne  $r$ .
- Calculer la tension aux bornes de la pile lorsqu'elle débite un courant de 450 mA. Contrôler la valeur obtenue à l'aide de la courbe.
- Calculer alors la puissance chimique fournie à la pile.
- Calculer l'intensité de court-circuit  $I_{cc}$ .

- 20.** Une pile possède une f.é.m.  $E = 1,50 \text{ V}$  et une résistance interne  $r = 0,50 \Omega$ .
- Dessiner la caractéristique  $U = f(I)$  pour  $I$  allant de  $0 \text{ A}$  à  $1 \text{ A}$ .
  - Déterminer sur le graphique la tension  $U$ , si la pile débite un courant de  $0,50 \text{ A}$ . Vérifier le résultat en calculant la tension  $U$ .
  - Déterminer sur le graphique l'intensité du courant  $I$  débitée par la pile si la tension aux bornes de la pile vaut  $1,15 \text{ V}$ . Vérifier votre résultat en calculant la tension  $U$ .
  - Calculer l'intensité de court-circuit de cette pile.
- 21.** On aimerait déterminer la f.é.m. et la résistance interne d'une pile. À cet effet, on branche en premier lieu un voltmètre à la pile. Le voltmètre indique alors une valeur de  $6,0 \text{ V}$ . Ensuite on relie la pile et le voltmètre à un récepteur et à un ampèremètre. Les indications du voltmètre et de l'ampèremètre sont respectivement  $5,8 \text{ V}$  et  $100 \text{ mA}$ . Quelles sont les valeurs de la f.é.m. et la résistance interne de la pile ?

### Circuits simples

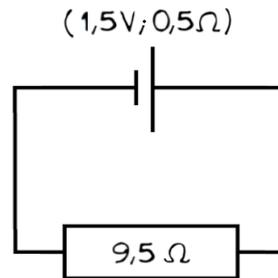
- 22.** On branche un conducteur ohmique de résistance variable  $R$  aux bornes d'un générateur de f.é.m.  $E = 6,0 \text{ V}$  et de résistance interne  $r$ . Le courant débitée par le générateur vaut  $I = 0,50 \text{ A}$ , si  $R = 10 \Omega$ .
- Déterminer la résistance interne  $r$ , ainsi que l'intensité du courant  $I$  si  $R = 15 \Omega$ .
  - Déterminer l'intensité du courant  $I$ , si la résistance variable est court-circuitée.
- 23.** On a un générateur ayant une f.é.m. de  $9,0 \text{ V}$  et une résistance interne de  $2,0 \Omega$ .
- On branche une résistance aux bornes de la de sorte que la tension aux bornes du générateur soit égal à  $7,0 \text{ V}$ . Le courant débité par le générateur est alors égal à :
 

A. $0,5 \text{ A}$	B. $1,0 \text{ A}$	C. $1,5 \text{ A}$	D. $2,0 \text{ A}$
--------------------	--------------------	--------------------	--------------------
  - Le rendement du générateur est alors égal à :
 

A. $0,75$	B. $0,76$	C. $0,77$	D. $0,78$	E. $0,79$
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------
  - On change la résistance aux bornes du générateur par une résistance plus petite. La puissance utile du générateur est alors égal à  $4,0 \text{ W}$ . Le courant débité par le générateur est alors égal à :
 

A. $0,44 \text{ A}$	B. $0,50 \text{ A}$	C. $0,71 \text{ A}$	D. $2,50 \text{ A}$	E. $4,00 \text{ A}$
---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------
- 24.** Une batterie de voiture de f.é.m.  $E = 12,0 \text{ V}$  débite un courant de  $60 \text{ A}$  lors du démarrage de la voiture. La tension aux bornes de la voiture vaut alors  $9,8 \text{ V}$ . Déterminer :
- la résistance interne de la batterie
  - le courant de court-circuit de la batterie
  - la puissance utile et la puissance totale dissipée par effet Joule dans ce circuit
  - le rendement de la batterie

25. Une pile (1,5 V ; 0,5  $\Omega$ ) est reliée à un conducteur ohmique de résistance 9,5  $\Omega$ .



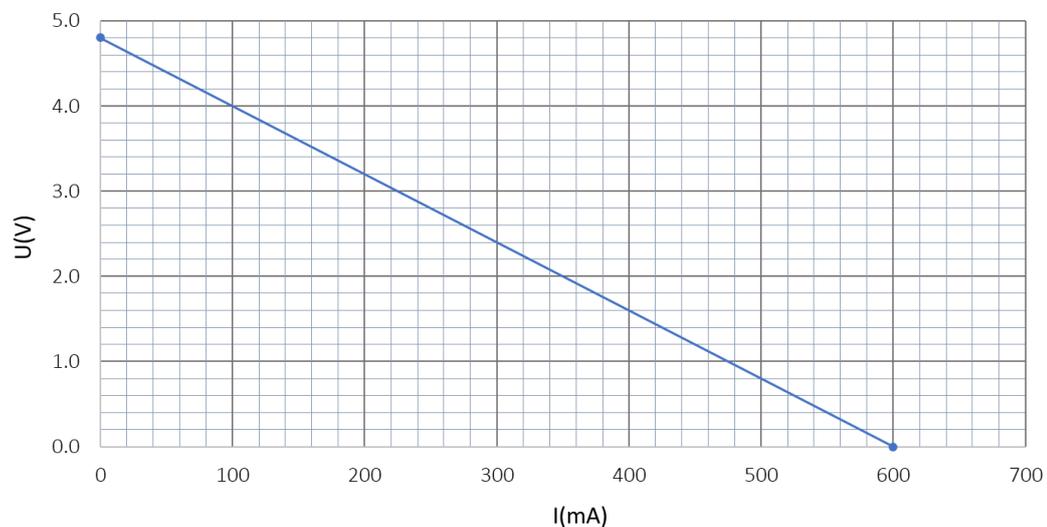
- a. Déterminer le point de fonctionnement du circuit.
  - b. Indiquer sur un schéma la puissance chimique, la puissance utile et la puissance dissipée par effet Joule au niveau du générateur
26. Une pile de f.é.m.  $E$  et de résistance interne  $r = 5,0 \Omega$  est reliée à un conducteur ohmique de résistance  $R$ . Le point de fonctionnement du circuit vaut :  $U_{AB} = 10,0 \text{ V}$  ;  $I = 3,0 \text{ A}$   
Déterminer :
- a. la résistance  $R$
  - b. la f.é.m.  $E$
  - c. le courant de court-circuit  $I_{cc}$
27. Un circuit comprend un générateur (9,0 V ; 0,5  $\Omega$ ), ainsi que deux résistances identiques  $R = 10 \Omega$  branchées en série.
- a. Dessiner le schéma du circuit.
  - b. Déterminer la tension aux bornes du générateur, ainsi que l'intensité de courant débitée par le générateur, ainsi que le rendement du générateur.
28. Un circuit comprend un générateur (9,0 V ; 0,5  $\Omega$ ), ainsi que deux résistances identiques  $R = 10 \Omega$  branchées en parallèle.
- a. Dessiner le schéma du circuit.
  - b. Déterminer la tension aux bornes du générateur, ainsi que l'intensité de courant débitée par le générateur.
29. Un générateur est relié à différents conducteurs ohmiques. Lorsqu'il est relié à une résistance de 10  $\Omega$ , le courant débité par le générateur vaut 750 mA et lorsqu'il est relié à une résistance de 22  $\Omega$ , le courant débité par le générateur vaut 375 mA. Déterminer la tension aux bornes du générateur quand il est relié à une résistance de 15  $\Omega$ .

## Révision

A. Les affirmations suivantes sont-elles vraies ou fausses ?

	Affirmation	Vrai	Faux
1	La loi des mailles décrit la conservation de l'énergie.		
2	La tension aux bornes d'une pile peut être supérieure à la force électromotrice.		
3	La force électromotrice d'une pile représente la tension à vide.		
4	Un générateur électrique peut être symbolisé par une source tension idéale associée à une résistance en série.		
5	La tension aux bornes d'un générateur réel diminue si l'intensité du courant débitée par le générateur augmente		
6	Une pile fournit au circuit une énergie électrique égale à $E \cdot I \cdot \Delta t$ .		
7	La puissance utile fournie par une pile peut être supérieure à la puissance reçue.		
8	Le rendement d'une pile court-circuitée est nul.		
9	La puissance thermique libérée par un conducteur ohmique est proportionnelle à l'intensité de courant le traversant.		
10	La résistance dynamique d'un conducteur ohmique est constante.		
11	Si la résistance statique d'un conducteur est constante, alors on a $I \sim U$ .		

B. Le graphique ci-dessous représente la variation de la tension  $U$  aux bornes d'un générateur de f.é.m.  $E$  et de résistance interne  $r$  en fonction de l'intensité du courant  $I$  débitée par le générateur. On branche ensuite un conducteur ohmique de résistance  $R$  aux bornes du générateur. L'intensité du courant débitée par le générateur vaut 400 mA.



Indiquer l'affirmation qui est correcte :

a. La f.é.m.  $E$  du générateur vaut :

- A. 5,00 V                      B. 4,90 V                      C. 4,80 V                      D. 4,60 V

b. La résistance interne  $r$  du générateur vaut :

- A. 8,0  $\Omega$                       B. 8,2  $\Omega$                       C. 8,3  $\Omega$                       D. 80  $\Omega$                       E. 82  $\Omega$

c. La résistance  $R$  du conducteur ohmique vaut :

- A. 0,35  $\Omega$       B. 0,40  $\Omega$       C. 0,48  $\Omega$       D. 3,50  $\Omega$       E. 4,00  $\Omega$       F. 4,75  $\Omega$

d. Que vaut la puissance utile  $P_{utile}$  fournie par le générateur ?

- A. 0,64 W                      B. 0,72 W                      C. 0,84 W                      D. 1,24 W                      E. 1,92 W

e. Que vaut la puissance thermique  $P_{th}$  dissipée par effet Joule au niveau du générateur ?

- A. 0,14 W      B. 0,24 W      C. 1,28 W      D. 2,4 W      E. 1,44 W      F. 24 W

f. On branche un deuxième conducteur ohmique identique en série avec le premier. Que vaut la tension  $U$  aux bornes du générateur ?

- A. 2,0 V                      B. 2,2 V                      C. 2,4 V                      D. 2,6 V                      E. 2,8 V

## Crédits Photos

© Henri Weyer – p.0 (page titre)

## Crédits Illustrations

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours. Les illustrations de Paul G. HEWITT ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

© HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson

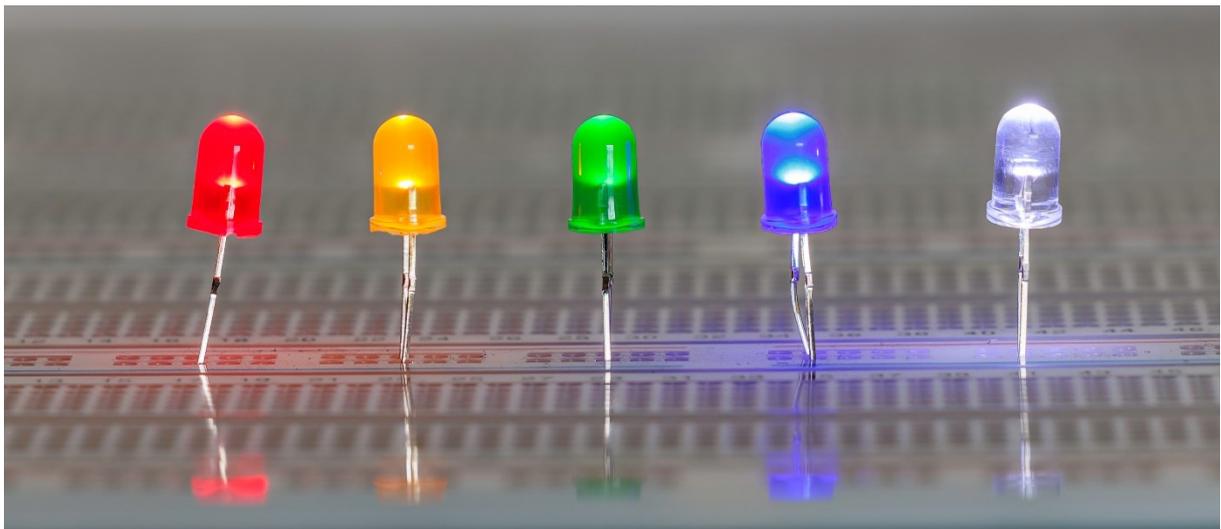
© HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson

© EPSTEIN Lewis C., HEWITT, Paul G., *Thinking Physics* – 1981, Insight Press



# 6.

## Semi-conducteurs



© Henri Weyer



## Sommaire

1	Semi-conducteurs.....	1
1.1	Résistivité d'un matériau.....	1
1.2	Conducteurs, semi-conducteurs et isolants .....	1
1.3	Électrons de valence et électrons libres.....	1
1.4	Bandes d'énergie.....	2
2	Semi-conducteur intrinsèque.....	3
2.1	Définition.....	3
2.2	Structure cristalline .....	3
2.3	Conduction .....	4
3	Semi-conducteur extrinsèque .....	5
3.1	Définition.....	5
3.2	Dopage de type N.....	5
3.3	Dopage de type P .....	6
4	Jonction PN.....	7
4.1	Définition.....	7
4.2	Jonction PN non polarisée.....	7
4.3	Jonction PN polarisée.....	8
4.3.1	Polarisation dans le sens direct.....	8
4.3.2	Polarisation dans le sens inverse.....	8
5	Diode à jonction .....	9
5.1	Constitution.....	9
5.2	Symbole.....	9
5.3	Caractéristique d'une diode à jonction .....	10
5.4	Modélisation.....	12
5.5	Étude d'une diode dans un circuit simple.....	13
6	LED.....	17
6.1	Introduction.....	17
6.2	Structure.....	17
6.3	Principe de fonctionnement.....	17
6.4	Caractéristiques électriques.....	18
7	Exercices.....	19



# 1 Semi-conducteurs

## 1.1 Résistivité d'un matériau

La résistance d'un tronçon de matériau donné dépend du matériau utilisé. C'est la résistivité  $\rho$  du matériau qui représente sa capacité à s'opposer au passage du courant électrique.

La résistivité  $\rho$  dépend du matériau et de la température et est numériquement égale à la résistance d'un matériau de longueur 1 m et de section 1 mm<sup>2</sup> (respectivement 1m<sup>2</sup> suivant l'unité utilisée).

**Formule :** 
$$R = \rho \frac{\ell}{S}$$

## 1.2 Conducteurs, semi-conducteurs et isolants

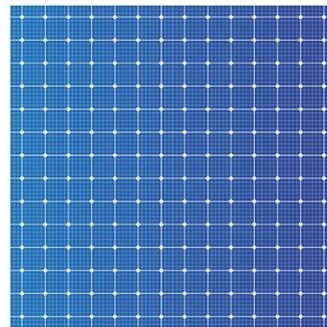
On peut classer les matériaux solides selon leur résistivité électrique en trois groupes ; à savoir les conducteurs, les semi-conducteurs et les isolants. Les trois groupes se distinguent par leurs différentes résistivités électriques. En effet les conducteurs possèdent une très petite résistivité ( $\rho < 1 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$ ), tandis que les isolants possèdent une très grande résistivité ( $\rho > 10^{12} \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$ ). Les semi-conducteurs possèdent une résistivité intermédiaire aux valeurs des conducteurs et isolants.

Au groupe des semi-conducteurs appartiennent des éléments tels que le silicium et le germanium ou des alliages tels que l'arséniure de gallium (GaAs) et le nitrure d'indium (InN).

Les semi-conducteurs sont entre autres utilisés en électronique (diodes, diodes électroluminescentes communément appelées LED, transistors, ...) et dans la construction des cellules photovoltaïques.



*Lampes LED pour l'éclairage résidentiel*



*Cellules photovoltaïques*

## 1.3 Électrons de valence et électrons libres

Le courant électrique dans un métal correspond à un mouvement d'électrons libres (cf. classe de 4<sup>e</sup>) du conducteur. Ces électrons étaient à l'origine des électrons de valence, qui faiblement liés au noyau atomique, ont pu facilement quitter le noyau atomique, et peuvent se déplacer librement dans le conducteur. Les électrons de valence sont des électrons de la couche externe de l'atome, moins liés à l'atome que les électrons des couches internes, qui ne participent pas au courant électrique. Les électrons de valence qui se sont échappés de l'atome sont alors libres de se déplacer et peuvent participer au courant électrique. Les ions positifs restants sont par contre emprisonnés dans le réseau métallique et ne peuvent donc pas participer au courant.

Dans un isolant par contre les électrons de valence sont solidement liés à leur atome et n'ont pas assez d'énergie pour le quitter dans des conditions normales. Ainsi, à moins d'un apport d'énergie considérable, il n'y a pas ou peu d'électrons libres dans un isolant.

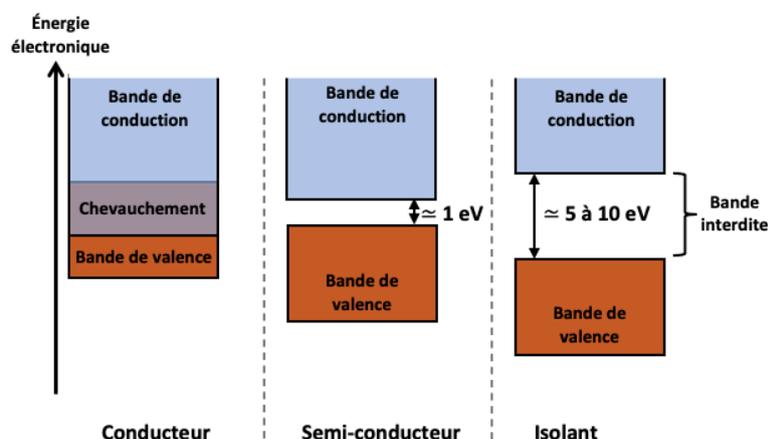
Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la résistivité se situe entre celle des conducteurs et des isolants. Les électrons de valence sont plus liés aux atomes que ceux des conducteurs et ne peuvent pas quitter d'eux-mêmes leurs atomes. Cependant ils ont seulement besoin d'un petit apport énergétique, qui est plus petit que pour les isolants, pour se transformer en électrons libres et faire en sorte que les semi-conducteurs conduisent le courant électrique.

#### 1.4 Bandes d'énergie

Les électrons de valence, liés à l'atome, sont confinés dans une bande d'énergie délimitée, appelée **bande de valence**. Un électron de valence ayant reçu assez d'énergie peut quitter la bande de valence et devenir un électron libre. Il se retrouve alors dans une bande d'énergie supérieure, la **bande de conduction**. L'électron est alors libre de se déplacer dans tout le matériau, n'étant lié à aucun atome.

Entre les deux bandes d'énergie se trouve une bande d'énergie interdite pour les électrons, dont la largeur est appelée **gap d'énergie**. Il faut donc apporter aux électrons une énergie supérieure au gap d'énergie, afin qu'ils puissent quitter la bande de valence et traverser la bande interdite pour se placer dans la bande de conduction.

La figure ci-dessous indique les diagrammes des bandes d'énergie avec l'écart énergétique pour un conducteur, un semi-conducteur et isolant.



*Bandes d'énergie et bande interdite pour les conducteurs, semi-conducteurs et isolants*

La figure nous permet de conclure que :

- dans un conducteur il y a chevauchement des bandes de valence et de conduction, expliquant le grand nombre d'électrons libres. Les électrons peuvent en effet passer librement de la bande de valence à la bande de conduction.
- dans un semi-conducteur le gap d'énergie est assez faible, de l'ordre de 1 eV (électronvolt). Si on apporte aux électrons de valence cette faible quantité d'énergie (ou plus), alors ces électrons sont capables de « sauter » vers la bande de conduction et donc de se transformer en électrons libres. On peut apporter cette quantité d'énergie en chauffant le matériau ou en lui appliquant un champ électrique ou suivant le matériau en l'illuminant avec de la lumière.

- dans un isolant la largeur de la bande interdite est si grande, de l'ordre de 5 à 10 eV, qu'elle est quasiment infranchissable et ainsi les électrons ne peuvent pas passer dans la bande de conduction, à moins d'appliquer une tension élevée au matériau pouvant en provoquer sa détérioration.

### ■ As-tu compris ?

Déterminer pour chacun des éléments suivants s'il se comporte comme un conducteur, un semi-conducteur ou un isolant.

Élément	Gap d'énergie en eV	Type de matériau
Silicium	1,1	
Diamant	5,5	
Germanium	0,7	
Cuivre	0	

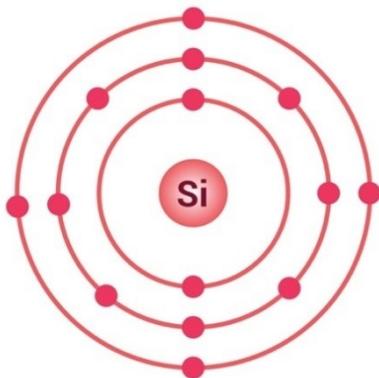
## 2 Semi-conducteur intrinsèque

### 2.1 Définition

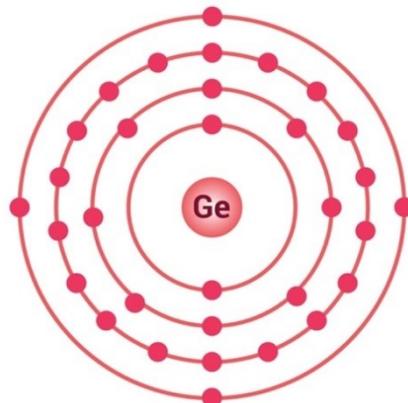
Un **semi-conducteur** est dit **intrinsèque** s'il est pur, c.-à-d. s'il ne possède aucune impureté (ou atome étranger). Son comportement électrique, ne dépendant que de la structure du matériau, correspond à celui d'un semi-conducteur parfait.

### 2.2 Structure cristalline

Les éléments les plus utilisés pour les semi-conducteurs sont le silicium et le germanium. Ils appartiennent à la colonne IV du tableau périodique et possèdent 4 électrons dans la bande de valence (voir figures 1 et 2).

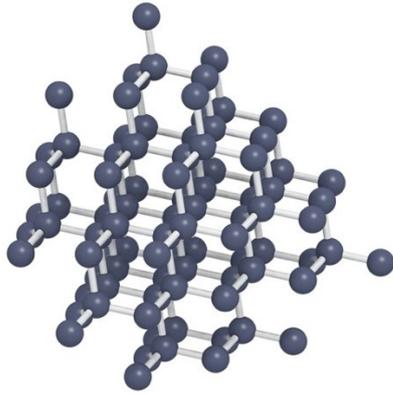


*Configuration électronique du silicium*

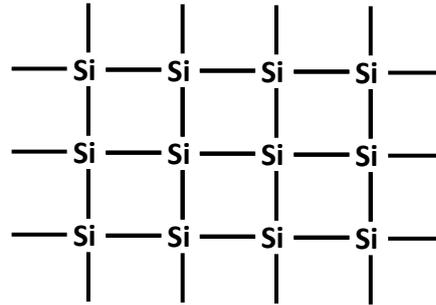


*Configuration électronique du germanium*

Ainsi chaque atome de silicium ou de germanium possède 4 atomes voisins et ils possèdent une structure cristalline analogue à celle du diamant, appelée structure cubique. Ci-dessous est représentée la structure cristalline du silicium.



Structure cristalline du silicium (en 3 dimensions)



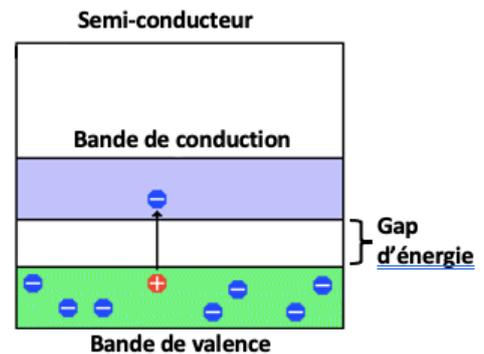
Structure cristalline du silicium (en 2 dimensions)

### ■ As-tu compris ?

Explique pourquoi la valeur de la bande d'énergie interdite est plus petite pour le germanium que pour le silicium.

## 2.3 Conduction

Suite à une excitation thermique, des électrons de valence peuvent acquérir une énergie suffisante pour passer de la bande de valence dans la bande de conduction (voir fig. 3). Chaque électron, chargé négativement, passant dans la bande de conduction, laisse derrière lui, après avoir quitté l'atome, une charge positive appelée **trou**. Ceci entraîne que la **résistivité** d'un semi-conducteur intrinsèque **diminue** avec la température, contrairement au conducteur métallique où la résistivité augmente généralement avec la température (dû à l'agitation des ions du réseau métallique).



Excitation d'un semi-conducteur

Cependant il faut savoir qu'un semi-conducteur intrinsèque est un mauvais conducteur, à moins de l'amener à température élevée.

### Remarque :

Chaque électron libre peut ainsi participer à la conduction en tant que porteur de charge négative. On peut en outre considérer le trou positif laissé par l'électron comme un porteur de charge positive participant également à la conduction. Dans un semi-conducteur intrinsèque, le nombre de trous positifs est toujours égal au nombre d'électrons libres.

Considérons que dans un semi-conducteur les électrons libres se déplacent vers la gauche. L'atome initial, ayant perdu un électron est alors chargé positivement. Or un électron libre voisin a, quant à lui, tendance à neutraliser le trou positif. On parle alors de **recombinaison**. Cet électron libre rend alors cet atome de nouveau neutre, mais laisse à son tour derrière-lui un nouveau trou positif. Les trous positifs, quant à eux, ont l'air de se déplacer vers la droite.

Le courant électrique peut de ce fait être considéré comme :

- un mouvement de charges négatives : les électrons libres de la bande de conduction
- un mouvement de charges positives : les trous de la bande de valence se déplaçant dans le sens opposé à celui des électrons

Animation :

<https://www.leifiphysik.de/elektronik/einfuehrung-die-elektronik/downloads/eigenleitung-im-siliziumkristall-halbleitereigenschaften-animation>

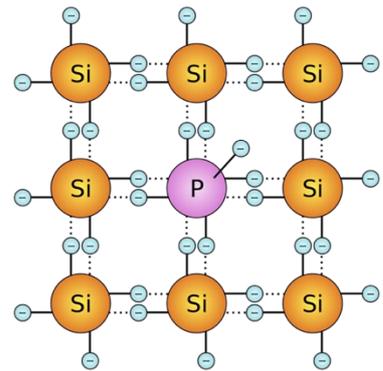
### 3 Semi-conducteur extrinsèque

#### 3.1 Définition

Un **semi-conducteur** est dit **extrinsèque**, lorsqu'on introduit des impuretés spécifiques dans un semi-conducteur intrinsèque, afin d'en modifier la conductivité, qui est l'inverse de la résistivité. L'introduction de ces impuretés est appelée **dopage** du semi-conducteur.

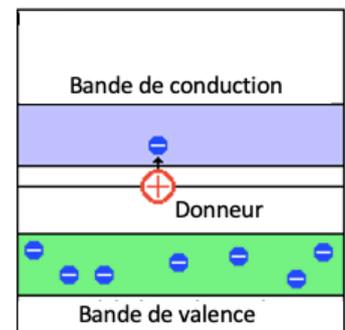
#### 3.2 Dopage de type N

Le **dopage de type N** consiste à introduire des impuretés qui sont des atomes donneurs d'électrons. Ces impuretés sont des atomes de valence V (p.ex. phosphore ou arsenic) où un **électron** faiblement lié à l'atome est en excédent dans les liaisons covalentes avec les atomes de valence IV du réseau cristallin (p.ex. silicium). Cet électron excédentaire non utilisé dans ces liaisons peut facilement passer dans la bande de conduction. L'élément servant au dopage est ainsi dit **donneur** (d'électrons).



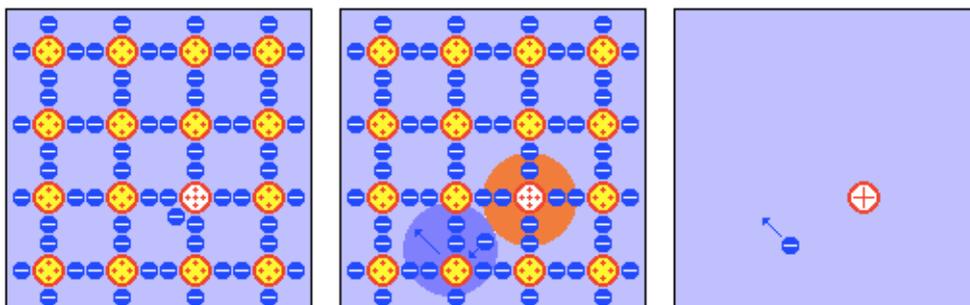
Le taux de dopage des impuretés est de l'ordre de  $10^{-10}$ . Ceci veut dire que dans un **semi-conducteur de type N**, on a 1 atome p.ex. de phosphore pour  $10^{10}$  atomes de silicium.

Le donneur, p.ex. le phosphore, possède en effet une bande d'énergie intercalée entre les bandes de valence et de conduction du semi-conducteur. Cette bande d'énergie est très proche du niveau d'énergie de la bande de conduction du semi-conducteur et un faible apport d'énergie (de l'ordre de 0,04 eV), nettement inférieur au gap d'énergie entre bande de valence et de conduction, suffit à faire passer un électron de cette bande d'énergie vers la bande de conduction.



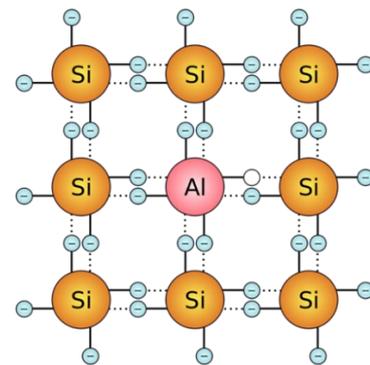
De cette façon le cinquième électron de l'atome donneur peut passer plus facilement dans la bande de conduction et devenir un électron libre. L'atome donneur, de charge positive, reste immobile. Ainsi dans un semi-conducteur de type N, le courant électrique est constitué principalement par le mouvement d'électrons libres.

Mouvement d'électrons libres dans un semi-conducteur de type N

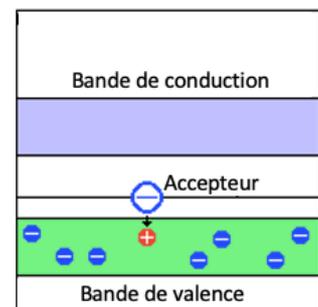


### 3.3 Dopage de type P

Le **dopage de type P** consiste à introduire des impuretés qui sont des atomes accepteurs d'électrons. Ces impuretés sont des atomes de valence III (p.ex. bore ou aluminium) où il manque un électron, afin que cet atome établisse quatre liaisons covalentes avec les atomes de valence IV du réseau cristallin (p.ex. silicium). Ce quatrième électron manquant laisse ainsi un trou qui peut facilement recevoir un électron supplémentaire issu de la bande de valence d'un atome voisin. De ce fait il y apparaît alors un trou, chargé positivement. L'élément servant au dopage est ainsi dit **accepteur** (d'électrons).

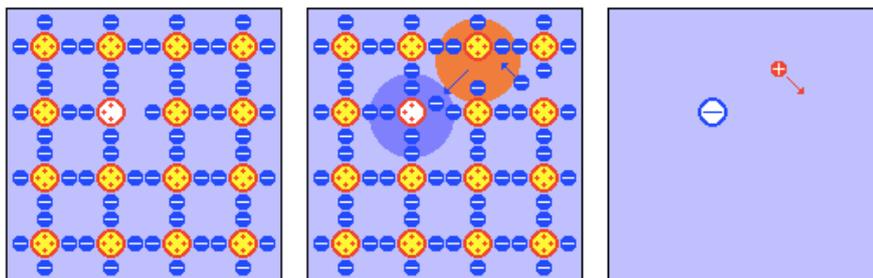


L'accepteur, p.ex. le bore ou l'aluminium, possède en effet une bande d'énergie intercalée entre les bandes de valence et de conduction du semi-conducteur. Cette bande d'énergie est très proche du niveau d'énergie de la bande de valence du semi-conducteur et cette faible différence d'énergie (de l'ordre de 0,04 eV), nettement inférieur au gap d'énergie entre bande de valence et de conduction, permet à un électron de passer facilement d'une bande d'énergie vers l'autre.



Grâce à l'électron supplémentaire, l'atome accepteur réalise une liaison covalente avec un quatrième atome du cristal semi-conducteur. L'atome accepteur est maintenant chargé négativement, alors que l'atome du semi-conducteur voisin possède un trou chargé positivement. On obtient ainsi une charge négative fixe, l'atome accepteur, et une charge positive mobile en mouvement ; le trou positif. Dans un **semi-conducteur de type P**, le courant électrique est ainsi principalement constitué par le mouvement de trous.

#### Mouvement de trous positifs dans un semi-conducteur de type P



#### ■ As-tu compris ?

Explique ce qu'on entend par donneur ou accepteur lors du dopage d'un semi-conducteur. Quelle est leur valence respective ?

## 4 Jonction PN

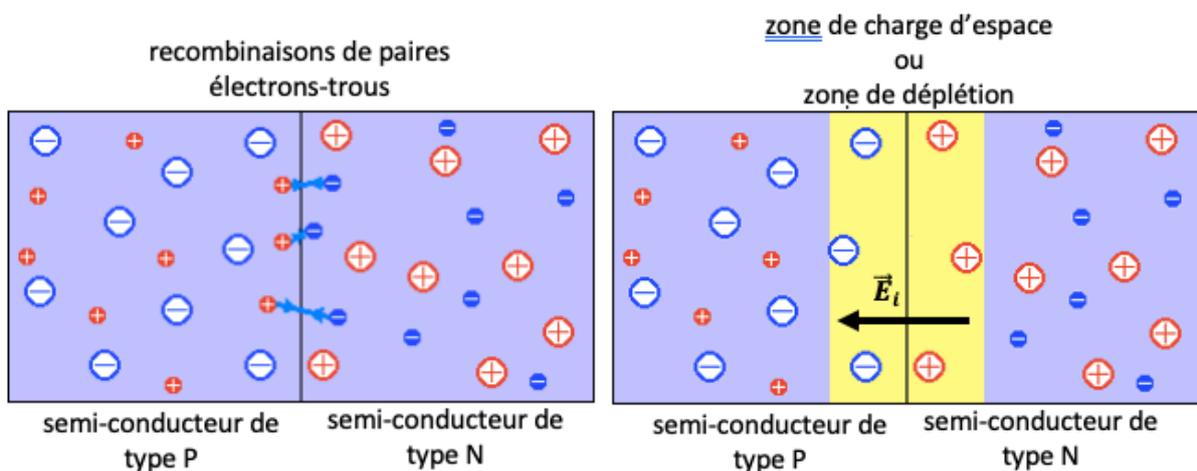
Un semi-conducteur dopé seul de type N ou P ne présente que peu d'intérêt. C'est l'association de plusieurs semi-conducteurs dopés qui est intéressante et permet de créer des composants semi-conducteurs. L'exemple le plus simple est la **jonction PN** utilisée pour les diodes.

### 4.1 Définition

Une jonction PN est la mise en contact d'un semi-conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N issu d'un même cristal.

### 4.2 Jonction PN non polarisée

Lorsqu'un semi-conducteur de type P est mis en contact avec un semi-conducteur de type N, des électrons libres du semi-conducteur de type N vont diffuser vers le semi-conducteur de type P en laissant derrière eux des charges positives immobiles. Ils vont se recombiner avec les trous positifs du semi-conducteur de type P, de sorte que seules des charges négatives immobiles y persistent.



Animation :

<https://www.leifiphysik.de/elektronik/halbleiterdiode/downloads/p-n-uebergang-halbleiterdiode-raumladungszone-animation>

Il se crée alors de part et d'autre de la zone de contact une zone dépourvue de charges mobiles avec :

- du côté du semi-conducteur de type P un espace contenant des charges négatives immobiles, p.ex. des ions négatifs de bore
- du côté du semi-conducteur de type N un espace contenant des charges positives immobiles, p.ex. des ions positifs de phosphore

Cette zone, chargée électriquement, ne possédant plus de charges mobiles est appelée **zone de charge d'espace** ou **zone de déplétion**.

Les charges électriques présentes dans la zone de déplétion sont à l'origine de la création d'un champ électrique interne  $\vec{E}_i$  dans la zone de déplétion et d'une différence de potentiel entre les semi-conducteurs de type N et P. Cette différence de potentiel, appelée **tension de diffusion  $U_d$** , joue le rôle d'une barrière qui empêche des charges libres de migrer d'une zone vers l'autre ou plus précisément le passage des électrons libres vers le semi-conducteur de type P, respectivement le passage des trous mobiles positifs vers celui de type N.

Afin de permettre le passage des charges mobiles à travers la zone de déplétion, il faut apporter de l'énergie externe, sous forme d'énergie thermique ou électrique, aux charges mobiles, afin de leur permettre de vaincre cette barrière et de pouvoir traverser la zone de déplétion.

### 4.3 Jonction PN polarisée

#### 4.3.1 Polarisation dans le sens direct

La jonction PN est alimentée par un générateur de tension variable  $U_0$ , la borne « + » du générateur étant reliée à la région « P » de la jonction PN et la borne « - » du générateur à la région « N ».

La tension externe  $U_0$  va agir sur cette barrière de la zone de déplétion en créant un champ électrique externe  $\vec{E}_{ext}$  opposé au champ électrique interne  $\vec{E}_i$ . De cette façon des charges mobiles vont recevoir de l'énergie électrique et pouvoir pénétrer dans la zone de déplétion et se recombiner de façon continue, réduisant la taille de la zone de déplétion et la valeur de la différence de potentiel entre les régions P et N.

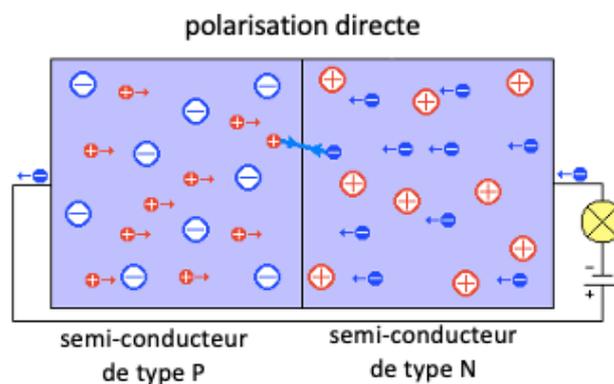
On doit distinguer deux cas :

##### 1) Tension externe inférieure à la tension de diffusion $U_0 < U_d$

L'énergie externe fournie n'est pas suffisante et ne n'arrive pas à faire complètement disparaître la zone de déplétion. Cette « barrière » n'étant pas entièrement éliminée, il ne peut s'établir une véritable conduction.

##### 2) Tension externe supérieure à la tension de diffusion $U_0 > U_d$

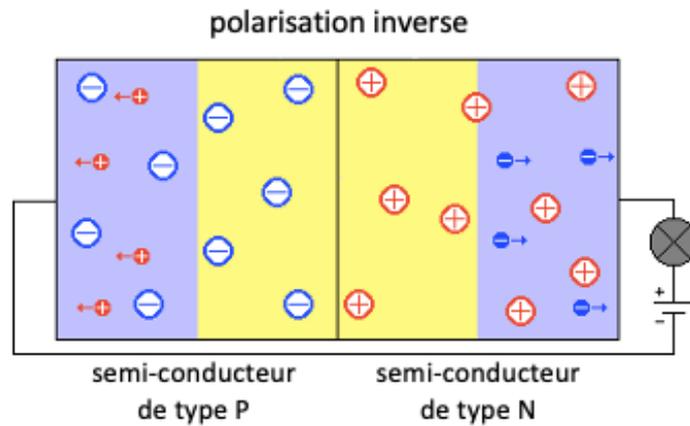
Le champ électrique externe  $\vec{E}_{ext}$  arrive à compenser le champ électrique interne  $\vec{E}_i$ , faisant disparaître la zone de déplétion entre les régions P et N de la jonction PN. Ceci permet alors la diffusion des électrons libres de la région N vers P, respectivement des trous de la région P vers N. Il y a alors apparition d'un courant électrique dans la jonction PN polarisée en direct.



#### 4.3.2 Polarisation dans le sens inverse

La jonction PN est alimentée par un générateur de tension variable  $U_0$ , la borne « + » du générateur étant reliée à la région « N » de la jonction PN et la borne « - » du générateur à la région « P ».

La tension externe  $U_0$  crée un champ électrique externe  $\vec{E}_{ext}$  qui a le même sens que le champ électrique interne  $\vec{E}_i$  et augmente ainsi la taille de la zone de déplétion. De ce fait *aucun courant* ne circule à travers la jonction PN.



Remarque :

En réalité, on a un courant très faible intensité de l'ordre du nanoampère à travers la jonction PN lorsqu'elle est polarisée en inverse.

Animation 1 :

<https://www.leifiphysik.de/elektronik/halbleiterdiode/downloads/p-n-uebergang-halbleiterdiode-beschaltung-animation>

Animation 2 :

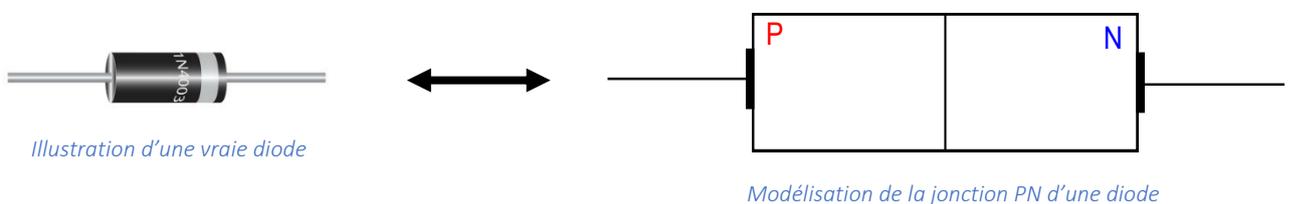
[https://javalab.org/en/diode\\_en/](https://javalab.org/en/diode_en/)

## 5 Diode à jonction

### 5.1 Constitution

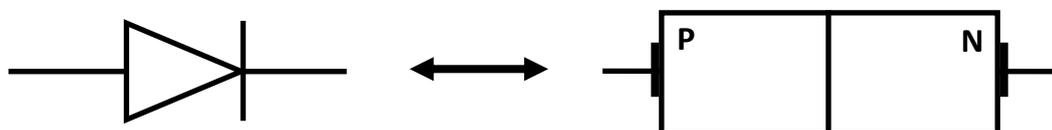
La **diode à jonction** est un élément électronique important. La diode à jonction est un dipôle passif non linéaire qui peut être assimilé à un interrupteur ne laissant passer le courant électrique que dans un seul sens, à l'instar d'une soupape.

Elle est souvent constituée des semi-conducteurs silicium et germanium. Une diode à jonction est constituée par la jonction de deux semi-conducteurs, un semi-conducteur dopé P, où les trous positifs sont majoritaires, et l'autre dopé N, où les électrons libres sont majoritaires. L'anneau de repérage se situant sur les diodes indique le semi-conducteur de type N.

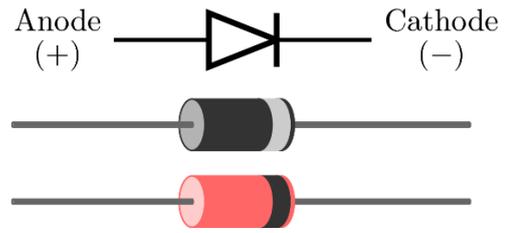


### 5.2 Symbole

La diode à jonction PN est symbolisée de la façon suivante :



Dans le symbole de la diode, le triangle, c.-à-d. l'anode, représente le semi-conducteur de type P et le trait, c.à.d. la cathode, représente le semi-conducteur de type N (représenté par l'anneau de repérage sur la diode).

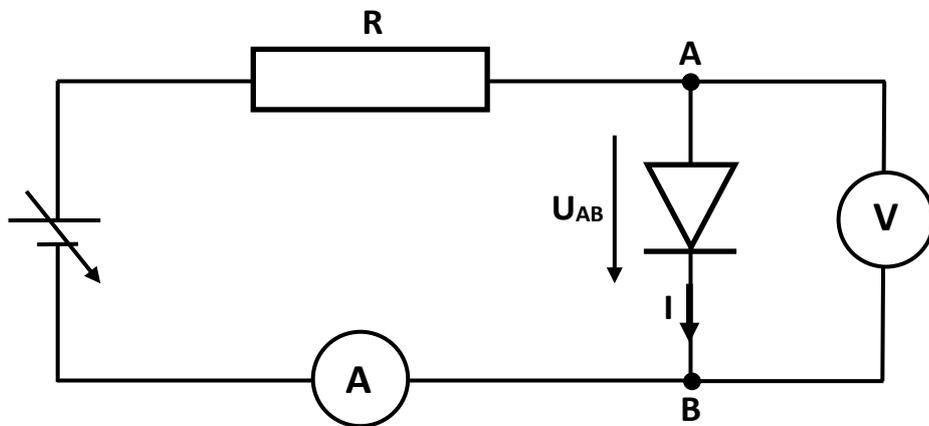


### 5.3 Caractéristique d'une diode à jonction

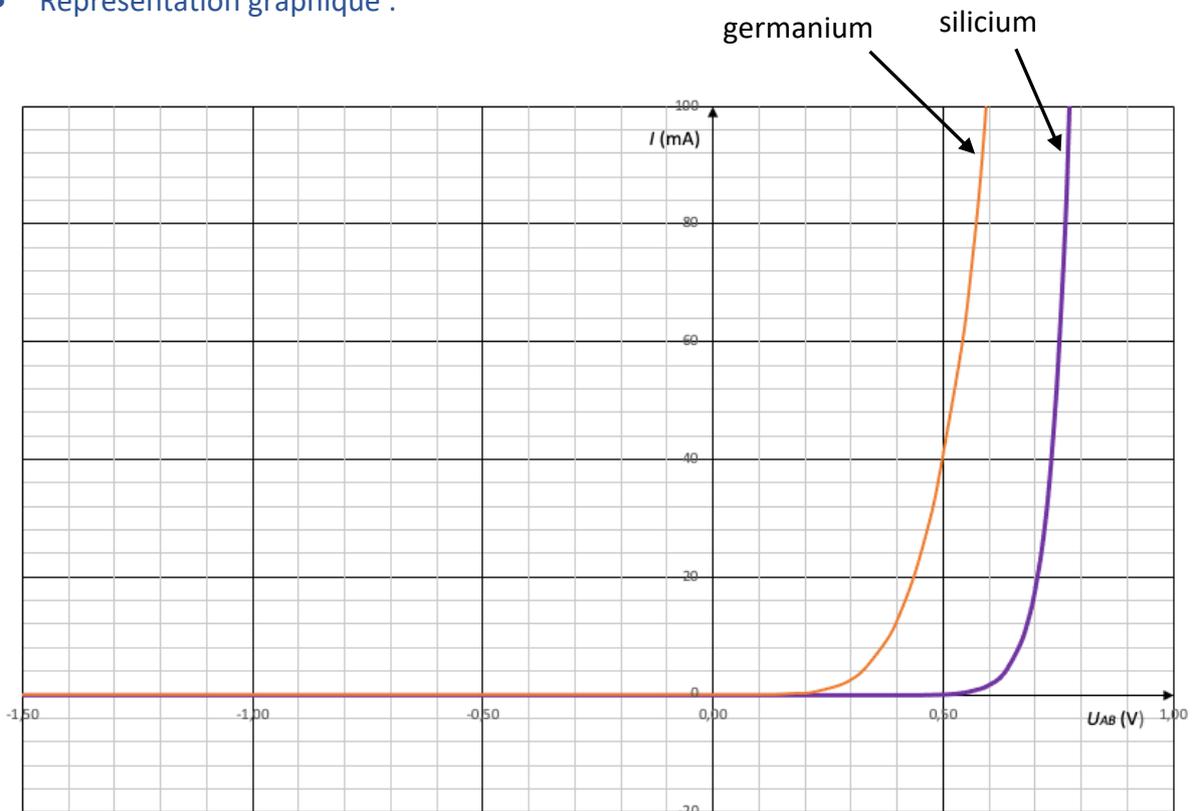
On soumet d'une diode à jonction à une tension extérieure variable  $U_{AB}$  et on mesure l'intensité du courant  $I$  traversant la diode en fonction de la tension extérieure appliquée  $U_{AB}$  pour une polarisation directe ( $U_{AB} > 0$ ) et une polarisation inverse ( $U_{AB} < 0$ ) de la diode.

Remarque : Une résistance doit en outre être branchée en série avec la diode afin de la protéger.

- Circuit électrique



- Représentation graphique :



- **Interprétation :**

**Polarisation directe ( $U_{AB} > 0$ )**

La diode ne laisse passer le courant électrique qu'en polarisation directe à partir d'une certaine valeur de la tension extérieure appliquée appelée **tension de seuil  $U_S$** . Aucun courant électrique ne traverse la diode tant que la tension aux bornes de la diode est inférieure à  $U_S$ , car la tension aux bornes de la diode n'est pas suffisante pour « débloquer » la diode. Au-delà de  $U_S$  et de la zone du « coude », la variation d'intensité du courant  $I$  en fonction de la tension aux bornes de la diode est une fonction linéaire.

En effet à partir de la tension de seuil, le champ électrique extérieur parvient à compenser le champ électrique interne dans la zone de déplétion. Ainsi la barrière de potentiel s'opposant au passage des électrons libres est annulée, ce qui permet le passage d'un courant électrique à travers la diode.

On obtient deux représentations graphiques différentes pour les diodes au silicium et celles au germanium. Ainsi, la valeur de la tension seuil  $U_S$  dépend du type de semi-conducteur utilisée. On obtient comme valeur typique pour la tension seuil :

- Diode au silicium :  $U_S = 0,6 - 0,7 \text{ V}$
- Diode au germanium :  $U_S = 0,3 - 0,4 \text{ V}$

Au-delà de la tension de seuil, l'intensité du courant  $I$  augmente rapidement. On peut donc conclure que la résistance dynamique (cf. chapitre 4) de la diode est petite à partir du moment où un courant électrique la traverse.

**Polarisation inverse ( $U_{AB} < 0$ )**

Aucun courant électrique ne circule à travers la diode. En effet la zone de déplétion de la jonction PN de la diode empêche le passage des électrons libres.

**Résumé :**

- **Polarisation inverse ( $U_{AB} < 0$ ) :** La diode n'est pas conductrice
  - **Polarisation directe ( $U_{AB} > 0$ ) :**
    - $U_{AB} < U_S$  : la diode n'est pas conductrice
    - $U_{AB} > U_S$  : la diode est conductrice
- avec  $U_S$  : tension de seuil dépendant du semi-conducteur utilisée ; c'est la valeur minimale de la tension  $U_{AB}$  aux bornes de la diode à partir de laquelle la diode devient conductrice

**Remarques :**

- Comme l'intensité du courant augmente rapidement quand la tension seuil est atteinte, il faut faire attention à ne pas dépasser l'intensité de courant maximale  $I_{\max}$  de la diode afin de ne pas la détruire.
- Il faut faire attention en polarisation inverse à ne pas dépasser une tension appelée **tension de claquage**. En effet au-delà de cette tension l'intensité du courant électrique traversant la diode augmente de façon exponentielle provoquant la destruction de la diode.

■ **As-tu compris ?**

1. La diode est-elle un dipôle linéaire ? Expliquer.
2. Dans quelles conditions une diode est-elle conductrice, respectivement non conductrice ?

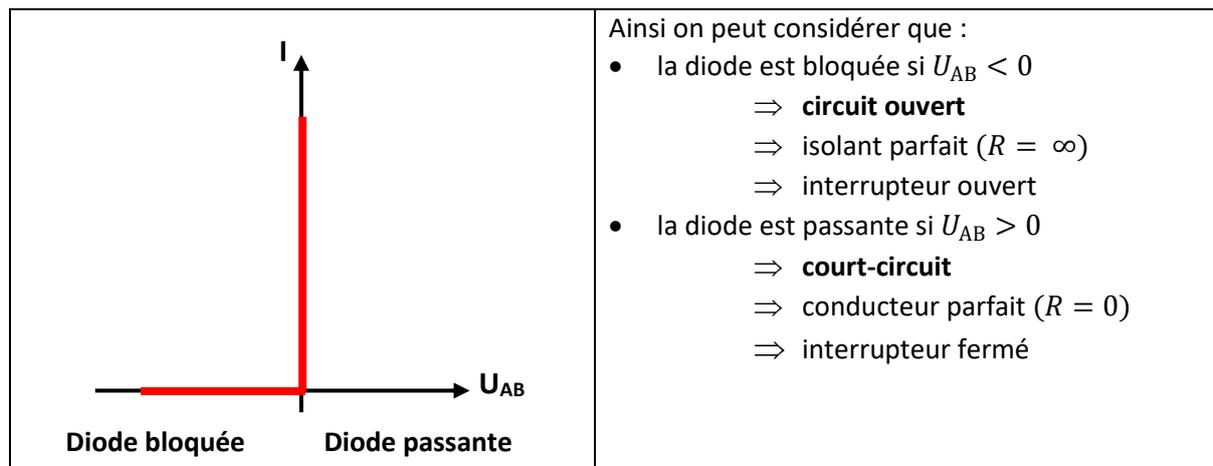
## 5.4 Modélisation

### • Diode idéale

Une **diode idéale** est un modèle théorique d'une diode « parfaite ». Comme la tension de seuil et la résistance dynamique de la diode sont des valeurs très petites, on peut en première approximation supposer que ces deux valeurs sont égales à zéro, lorsque l'on idéalise une diode à jonction.

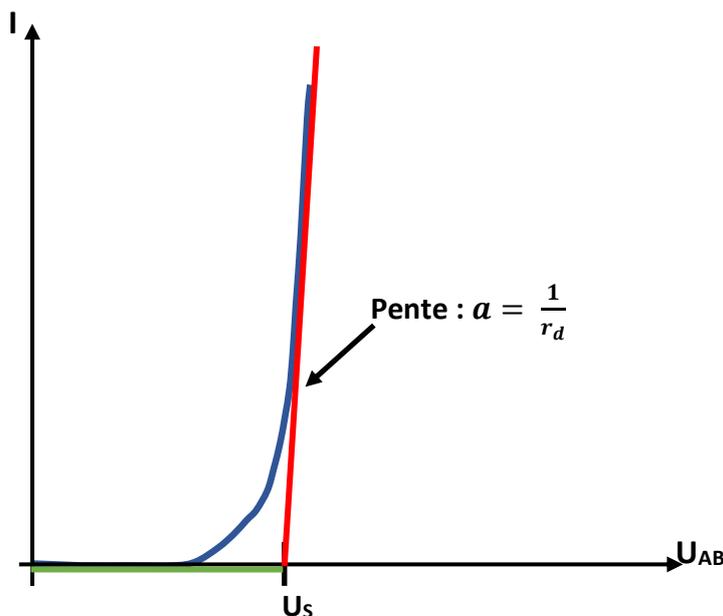
La diode idéale agit alors comme un conducteur parfait en polarisation directe et ce à partir d'une tension de 0 V. En polarisation inverse, elle agit comme un isolant parfait.

La *diode idéale* peut ainsi être considérée comme un *interrupteur* et sa caractéristique  $I = f(U)$  est donc la suivante :



### • Diode réelle

La caractéristique non linéaire d'une diode à jonction peut être modélisée par deux segments de droite ce qui permet d'obtenir une caractéristique linéarisée de la diode.

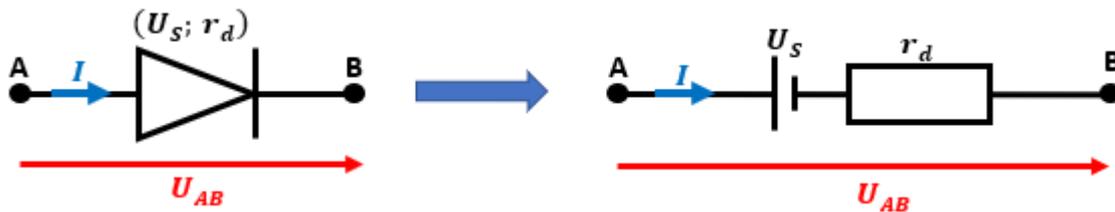


La caractéristique linéarisée d'une diode est la suivante :

À partir de la représentation graphique, on peut déterminer :

- la tension de seuil  $U_s$
- la résistance dynamique de la diode :  $r_d = \frac{1}{a} = \frac{\Delta U_{AB}}{\Delta I}$

La diode peut ainsi être considérée comme le branchement en série d'un générateur « branché à contre-sens » de tension  $U_S$  et d'une résistance ohmique  $r_d$ .

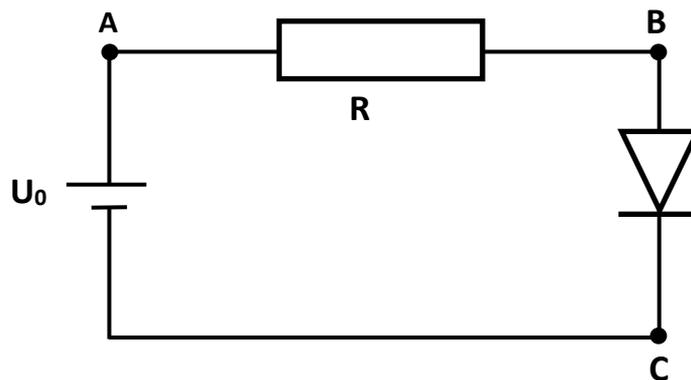


La tension aux bornes de la diode s'écrit alors :

$$U_{AB} = U_S + r_d I$$

### 5.5 Étude d'une diode dans un circuit simple

On considère le circuit électrique suivant contenant, un générateur idéal de tension  $U_0$  une diode, ainsi qu'une résistance de protection R.



Le but est d'établir le **point de fonctionnement** de la diode, c.-à-d. la tension  $U_{BC}$  aux bornes de la diode, ainsi que l'intensité de courant  $I$  traversant la diode.

- Résolution analytique

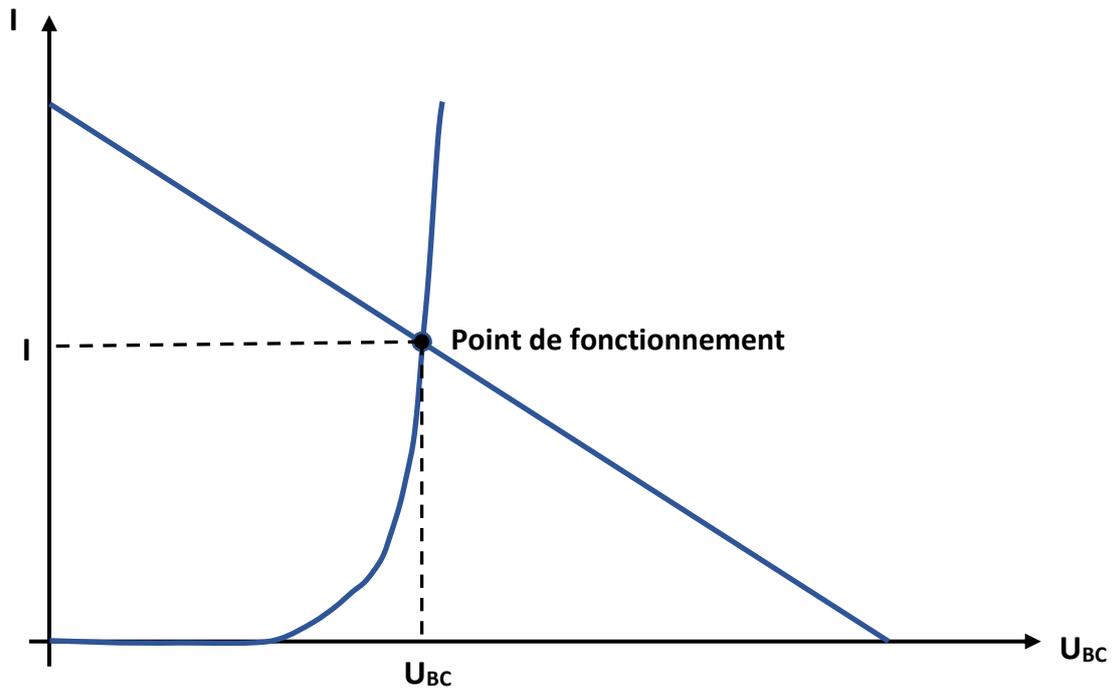
Il faut établir l'équation de la caractéristique linéarisée de la diode et déterminer le point de fonctionnement à partir de la loi des mailles de Kirchhoff.

- Résolution graphique

Il faut représenter sur un même graphique :

- la caractéristique  $I = f(U_{BC})$  de la diode
- la caractéristique linéaire  $I = f(U_{BC})$  de la résistance, c.-à-d. la droite d'équation suivante :

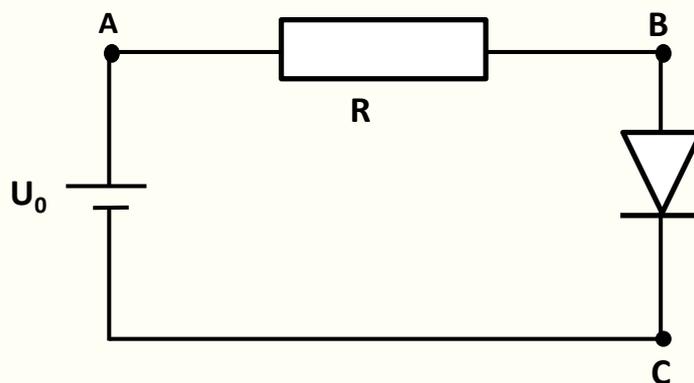
$$I = \frac{U_{AB}}{R} = \frac{U_{AC} - U_{BC}}{R} = \frac{U_0 - U_{BC}}{R}$$

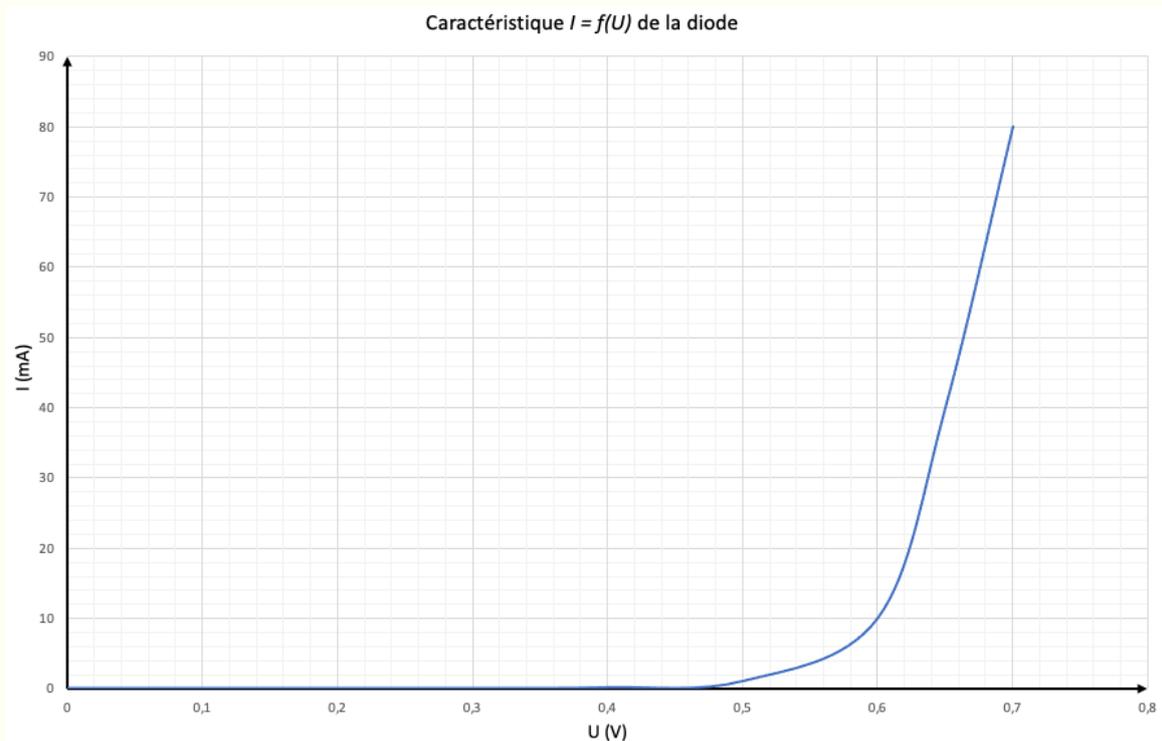


Le point de fonctionnement de la diode s'établit à l'intersection des deux représentations graphiques  $I = f(U_{BC})$ . Bien sûr, la résolution graphique ne donne qu'une valeur approximative pour  $I$  et  $U_{BC}$ .

### Exercice résolu

On considère le circuit électrique suivant contenant, un générateur idéal de tension  $U_0 = 3,0\text{ V}$ , une diode dont la représentation graphique  $I = f(U)$  est indiquée ci-dessous, ainsi qu'une résistance ohmique de valeur  $R = 30\ \Omega$ .





Déterminer le point de fonctionnement de la diode.

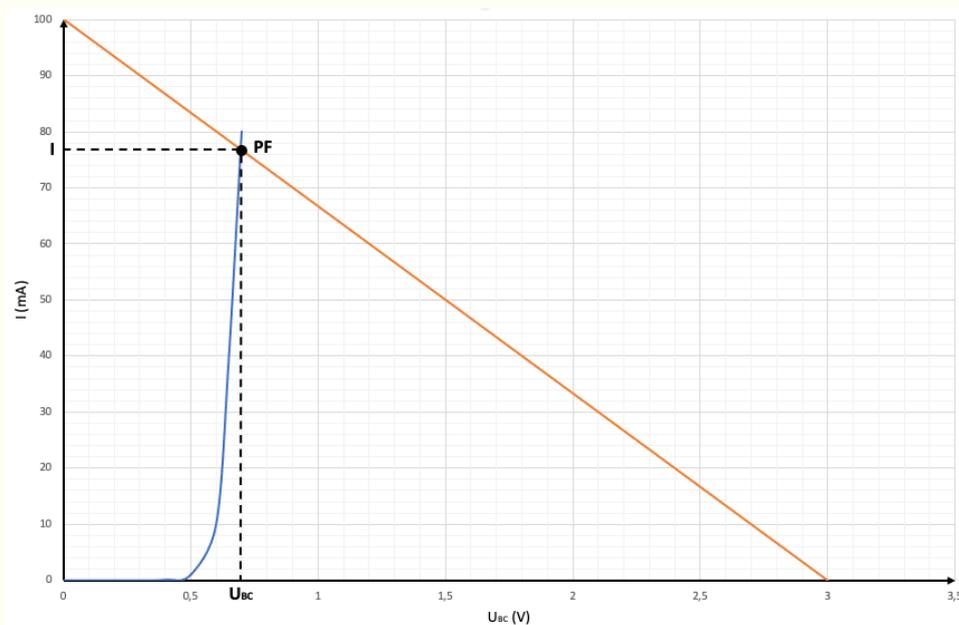
**Résolution graphique :**

Pour la résistance on obtient :

$$U_{BC} = 0 \text{ V} \rightarrow I = 100 \text{ mA}$$

$$U_{BC} = 3,0 \text{ V} \rightarrow I = 0 \text{ mA}$$

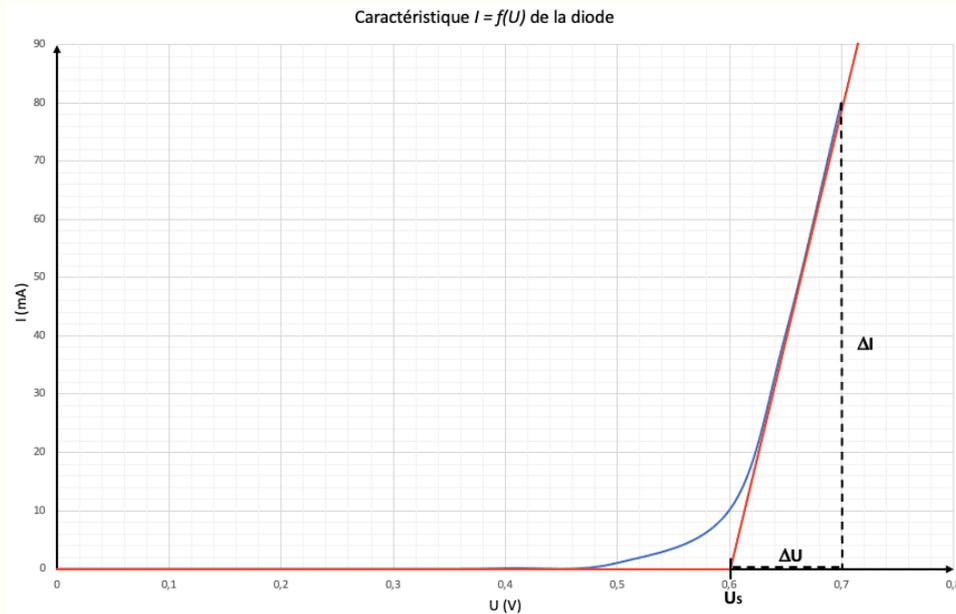
On obtient :



Point de fonctionnement :  $I = 77 \text{ mA}$ ;  $U_{BC} = 0,70 \text{ V}$

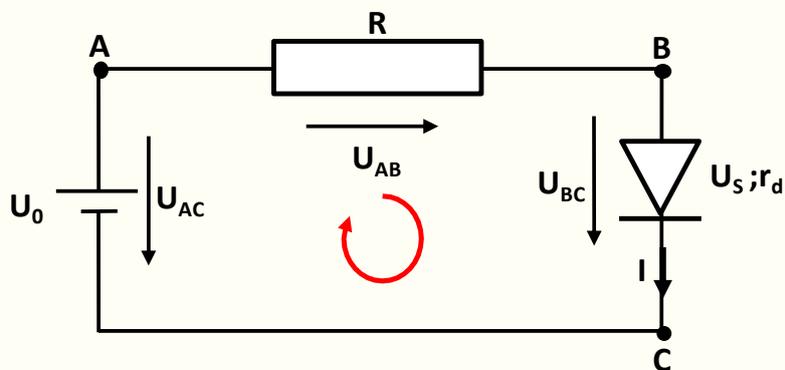
**Résolution analytique :**

On détermine en premier lieu la tension de seuil  $U_s$ , ainsi que la résistance dynamique  $r_d$  de la diode, à partir de la représentation graphique  $I = f(U)$  de la diode.



On obtient :  $U_s = 0,60 \text{ V}$  et  $r_d = \frac{1}{a} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{0,10 \text{ V}}{0,080 \text{ A}} = 1,25 \Omega$

On a le circuit suivant :



La loi des mailles s'écrit :

$$\begin{aligned}U_{AB} + U_{BC} + U_{CA} &= 0 \\R I + (U_s + r_d I) - U_0 &= 0 \\I &= \frac{U_0 - U_s}{R + r_d} = \frac{3,0 \text{ V} - 0,60 \text{ V}}{30 \Omega + 1,25 \Omega} \\I &= 0,0768 \text{ A} = 76,8 \text{ mA}\end{aligned}$$

La tension aux bornes de la diode vaut :

$$\begin{aligned}U_{BC} &= U_s + r_d I \\U_{BC} &= 0,60 \text{ V} + 1,25 \Omega \cdot 0,0768 \text{ A} = 0,696 \text{ V}\end{aligned}$$

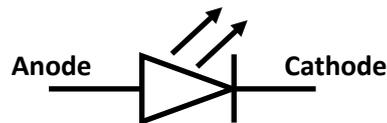
## 6 LED

### 6.1 Introduction

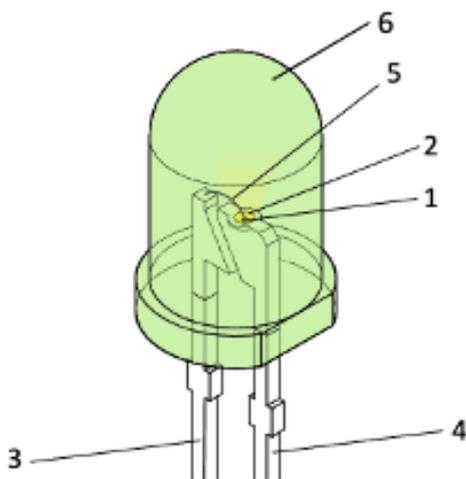
L'abréviation **LED** est issue de l'anglais et signifie « **light-emitting diode** » et est appelé en français diode électroluminescente (aussi abrégé en français par DEL). Une LED est une diode qui émet de la lumière quand elle est polarisée en direct sous condition que la tension aux bornes de la LED dépasse une valeur seuil et qu'elle soit donc parcourue par un courant électrique. Comme les LED ne produisent presque exclusivement que de l'énergie lumineuse, elles ne consomment que peu d'énergie électrique.

Les LED sont donc économes en énergie et respectueuse de l'environnement, puisqu'elles ne contiennent pas de mercure à l'instar des tubes fluorescents.

*Symbole d'une LED :*



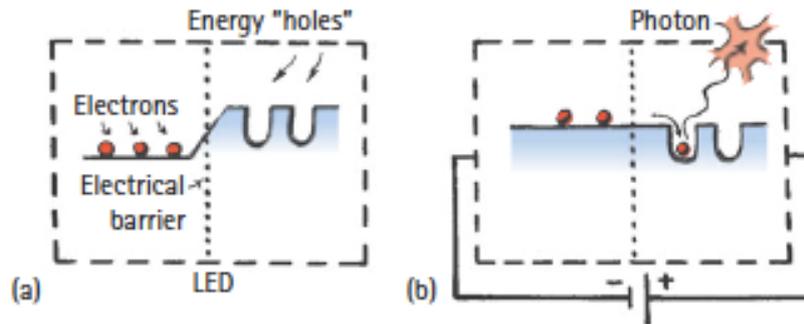
### 6.2 Structure



- 1. Puce semi-conductrice**  
Elle émet de la lumière lors qu'elle est parcourue par un courant électrique
- 2. Cavité réfléchissante**  
Elle augmente par réflexion d'intensité lumineuse de la LED
- 3. Anode**  
Elle est reliée à la borne + du générateur (patte la plus longue)
- 4. Cathode**  
Elle est reliée à la cavité réfléchissante
- 5. Fil de connexion**  
Il relie la puce semi-conductrice à l'anode
- 6. Lentille en résine**  
Elle permet la transmission de la lumière et protège la puce

### 6.3 Principe de fonctionnement

C'est la recombinaison entre un électron de la bande de conduction et d'un trou positif, situé dans la bande de valence, qui conduit à l'émission de lumière. En effet un électron ayant reçu assez d'énergie peut passer dans la bande de conduction. Cet électron libère alors une quantité d'énergie égale au gap d'énergie quand il se recombine (ou « tombe ») avec un trou positif. Cette énergie est émise sous forme de lumière (photons : cf 1<sup>ère</sup>).



C'est l'effet d'**électroluminescence** qui est un phénomène au cours duquel un corps parcouru par un courant électrique ou soumis à un champ électrique intense émet de la lumière ne résultant pas de la chaleur ( $\neq$  incandescence).

Animation : [https://javalab.org/en/led\\_en/](https://javalab.org/en/led_en/)

#### 6.4 Caractéristiques électriques

Une LED, comme toute diode classique, ne conduit le courant électrique que si elle est polarisée en direct. Dans l'autre sens, c.-à-d. en polarisation inverse, elle est bloquée et ne laisse passer aucun courant. Cependant elle ne supporte pas des tensions inverses élevées (souvent 5V max). Au-delà de cette tension la LED est détruite.

Lorsqu'une LED est polarisée en direct, elle ne conduit le courant électrique qu'à partir d'une certaine tension, la tension de seuil  $U_s$ . La valeur de la tension de seuil dépend du matériau utilisé dans la LED, et donc en premier lieu de la *couleur* de la LED, ensuite pour une couleur donnée de la longueur d'onde précise qui est émise.

Cependant, il faut faire attention que la tension aux bornes d'une LED ne soit pas trop grande. En effet le courant maximal supporté par une LED est de l'ordre de 20 mA à 30 mA.

Il faut donc la protéger par une résistance de protection branchée en série dont il faut déterminer la valeur suivant la tension du générateur ou de l'accumulateur utilisé, afin de ne pas dépasser la tension maximale supportée par la LED.

Les *valeurs usuelles* pour les différentes couleurs des LED sont :

Couleur	Tension de seuil $U_s$
Rouge	de 1,6 V à 2,0 V
Orange	de 2,0 V à 2,1 V
Jaune	de 2,1 V à 2,2 V
Vert	de 2,2 V à 2,5 V
Bleu	de 2,5 V à 2,8 V
Violet	de 2,8 V à 3,1 V
Blanc	de 3,4 V à 3,8 V

## 7 Exercices

### Semi-conducteurs

1. Expliquer pourquoi on a des électrons libres qui peuvent se déplacer dans un conducteur, alors qu'il n'y a pas d'électron libre dans un isolant sans apport extérieur d'énergie.
2. Dessiner le réseau cristallin du silicium et expliquer l'apparition d'électrons libres et de trous positifs dans un semi-conducteur intrinsèque.
3. Représenter schématiquement la structure d'un semi-conducteur à base de silicium dopé une fois au gallium, puis une fois à l'arsenic.
4. Un électron passe, à température ambiante, de la bande de valence dans la bande de conduction sans apport d'énergie extérieure.  
Laquelle des affirmations est correcte ?
  - A. Il s'agit d'un conducteur
  - B. Il s'agit d'un semi-conducteur
  - C. Il s'agit d'un isolant
  - D. Il s'agit d'un conducteur ou d'un semi-conducteur
  - E. Il s'agit d'un semi-conducteur ou d'un isolant
5. Laquelle des affirmations est correcte ?
  - A. Un semi-conducteur est conducteur à basse température
  - B. Un semi-conducteur est isolant à température élevée
  - C. Un semi-conducteur possède généralement 4 électrons sur la couche externe de ses atomes
  - D. Un semi-conducteur conduit toujours le courant électrique quand la tension à ses bornes est supérieure à sa tension de seuil indépendamment du sens de branchement
6. La résistivité d'un semi-conducteur...
  - A. augmente avec la température
  - B. diminue avec la température
  - C. est indépendante de la température
  - D. est nulle
7. Quelle impureté peut-on avoir dans un semi-conducteur de type N ? Indiquer la bonne réponse.
  - A. Silicium
  - B. Arsenic
  - C. Bore
  - D. Fer
8. Quelle impureté peut-on avoir dans un semi-conducteur de type P ? Indiquer la bonne réponse.
  - A. Silicium
  - B. Arsenic
  - C. Bore
  - D. Fer
9. Quand on ajoute une impureté, de type N ou P, à un semi-conducteur, alors la conductivité du semi-conducteur...
  - A. augmente
  - B. diminue
  - C. reste constante
  - D. aucune des réponses

## Jonction PN

10. Dessiner la jonction PN d'un semi-conducteur avant et après la recombinaison des électrons libres et des trous positifs. Expliquer ce qu'on entend par « zone de déplétion », ainsi que la création d'un champ électrique interne dans la zone de déplétion.
11. Expliquer pourquoi on doit appliquer, en polarisation directe, une certaine tension extérieure minimale, afin que la jonction PN ne devienne conductrice.
12. Expliquer pourquoi, en polarisation inverse, une jonction PN ne peut pas devenir conductrice.

## Diodes à jonction PN

13. Pourquoi une diode à jonction n'est-elle pas conductrice en polarisation inverse ou si la tension directe appliquée est inférieure à la tension de seuil ?
14. Comment varie la résistance d'une diode lorsqu'on augmente la tension aux bornes de la diode :
  - en polarisation directe
  - en polarisation inverse
15. La résistance d'une diode en polarisation directe est, lorsque la tension aux bornes de la diode réelle est supérieure à la tension seuil, ...
  - A. nulle
  - B. faible
  - C. élevée
  - D. très élevée
16. La résistance d'une diode en polarisation inverse est, lorsque la tension aux bornes de la diode réelle est supérieure à la tension seuil, ...
  - A. Nulle
  - B. Faible
  - C. Élevée
  - D. très élevée
17. Une diode de tension de seuil égale à 0,60 V et de résistance dynamique  $2,5 \Omega$  est branchée en série avec une résistance  $R = 20 \Omega$  à un générateur idéal de tension  $U_0 = 1,5 \text{ V}$ .
  - a) Dessiner le circuit électrique.
  - b) Déterminer, graphiquement et analytiquement, l'intensité de courant traversant la diode, ainsi que la tension aux bornes de la diode.
18. Une diode de tension de seuil égale à 0,60 V et de résistance dynamique  $r_d = 20 \Omega$  est branchée en série avec une résistance  $R = 33 \Omega$  à un générateur de f.é.m.  $E = 1,6 \text{ V}$  et de courant de court-circuit  $I_{cc} = 80 \text{ mA}$ .

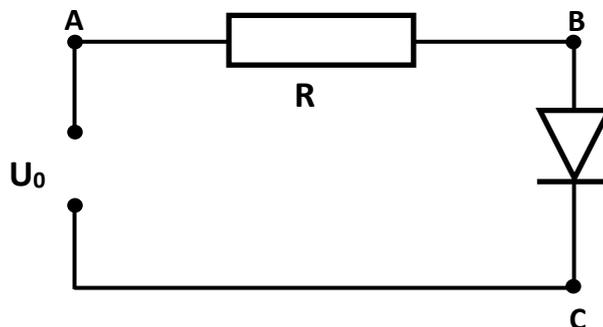
Calculer le courant circulant dans le circuit électrique.
19. Une diode est branchée en série avec une résistance  $R = 40 \Omega$  à un générateur idéal de tension  $U = 3,6 \text{ V}$ .

On obtient les valeurs suivantes pour l'intensité du courant  $I$  traversant la diode en fonction de la tension  $U$  aux bornes de la diode :

$U$ (V)	0	0,20	0,40	0,60	0,65	0,70
$I$ (mA)	0	0	1	10	40	80

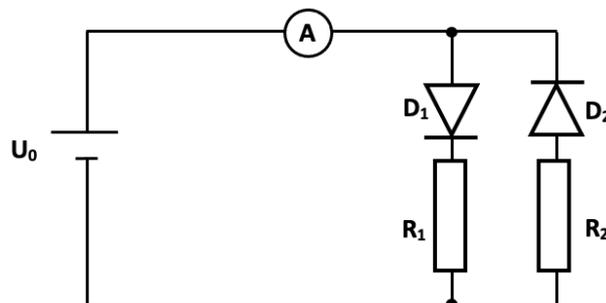
- Déterminer graphiquement l'intensité de courant traversant la diode, ainsi que la tension aux bornes de la diode.
- Déterminer, à l'aide du graphique précédant, l'intensité de courant traversant la diode, ainsi que la tension aux bornes de la diode, si la tension aux bornes du générateur vaut 3,0 V.
- Déterminer, à l'aide du même graphique, l'intensité de courant traversant la diode, ainsi que la tension aux bornes de la diode, si la résistance de protection a une valeur  $R = 30 \Omega$  ; la tension aux bornes du générateur valant toujours 3,0 V.

20. Une diode idéalisée de tension de seuil égale à  $U_S = 0,60$  V et de résistance dynamique  $r_d = 0 \Omega$  est branchée en série avec une résistance  $R = 20 \Omega$  à un générateur idéal de tension  $U_0 = 1,5$  V.



- Dessiner la caractéristique  $I = f(U_{BC})$  de la diode.
- La diode est d'abord branchée en polarisation directe. Déterminer :
  - la tension  $U_{BC}$
  - la tension  $U_{AB}$
  - l'intensité du courant  $I$
- La diode est ensuite branchée en polarisation inverse. Déterminer :
  - la tension  $U_{BC}$
  - la tension  $U_{AB}$
  - l'intensité du courant  $I$

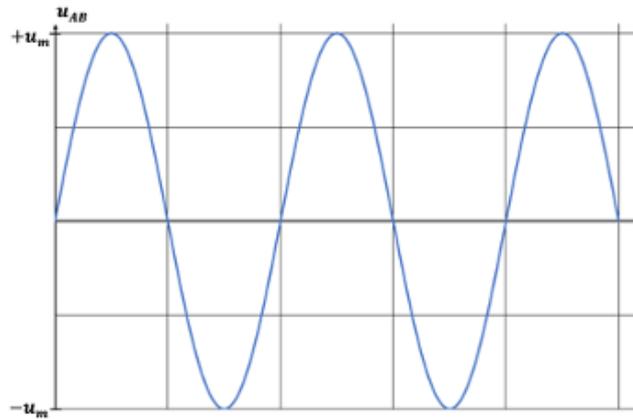
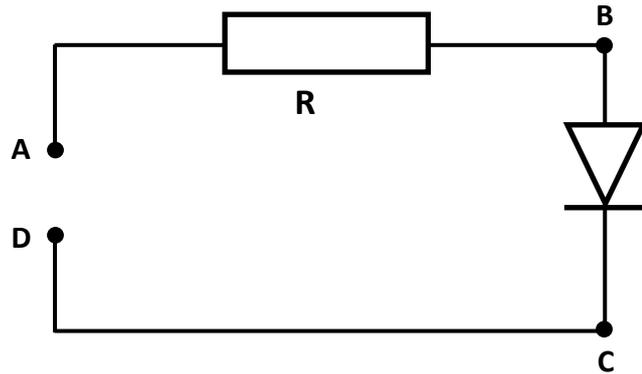
21. On a le circuit suivant qui contient 2 diodes idéalisées de tension de seuil égale à  $U_S = 0,70$  V et de résistance dynamique  $r_d = 0 \Omega$ , deux résistances de protection. Ces dipôles sont reliés à un générateur idéal de tension  $U_0 = 4,5$  V. L'ampèremètre indique un courant de 30 mA.



- Déterminer le courant traversant chaque diode.
- Déterminer la tension aux bornes de chaque diode.
- Calculer les valeurs minimales des 2 résistances.

22. Une diode idéale de tension ( $U_S = 0\text{ V}; r = 0\ \Omega$ ) est branchée en série avec une résistance  $R$  à un générateur idéal de tension variable.

La variation de tension aux bornes du générateur  $u_{AD}(t)$  est sinusoïdale et est représentée par la courbe ci-dessous :

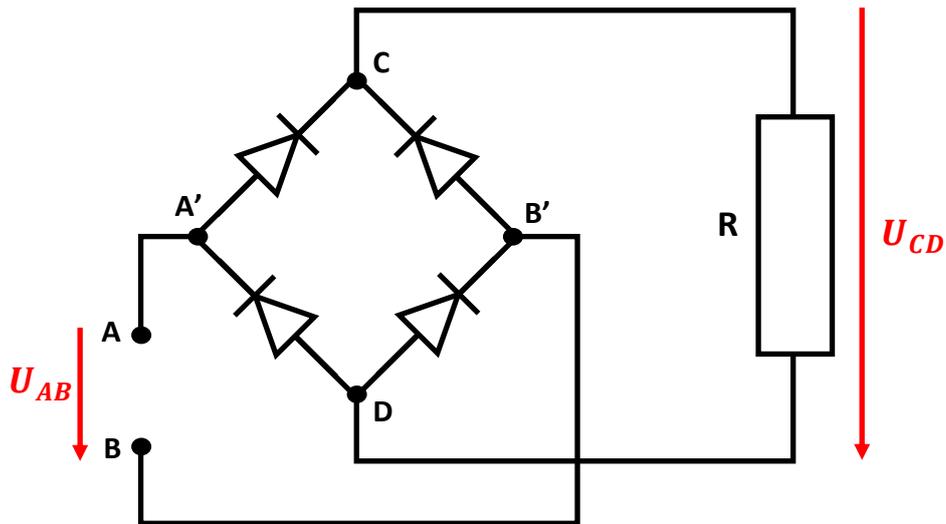


- Déterminer quand la diode est bloquée et quand elle est passant.
- Déterminer pour les deux cas :
  - la tension aux bornes de la diode
  - la tension aux bornes de la résistance
- Donner l'allure de la courbe de la tension  $u_{AB}(t)$  aux bornes de la résistance. Indiquer dans la courbe les intervalles où la diode est bloquée, respectivement passante.

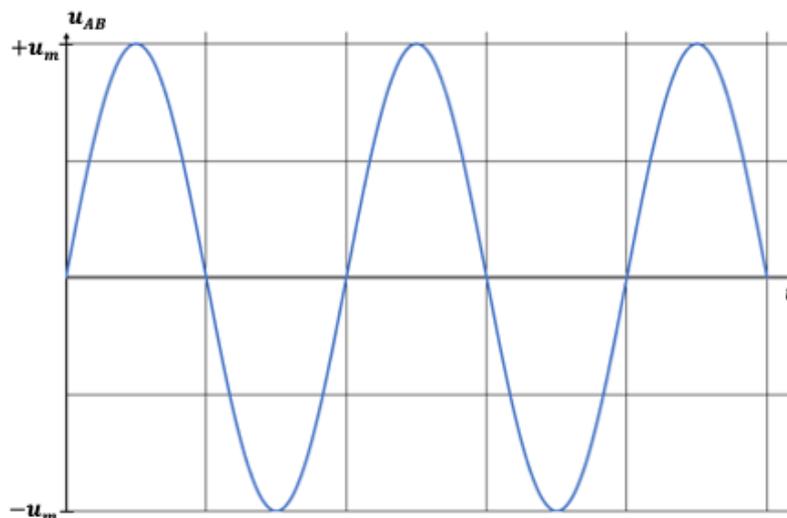
**23. Circuit redresseur de tension**

On a le pont de diodes suivant dans lequel toutes les diodes sont des **diodes idéales** ( $U_S = 0\text{ V}; r = 0\ \Omega$ ).

On établit à l'aide d'un générateur une tension constante  $U_{AB}$  aux bornes AB du pont de diodes. Une tension  $U_{CD}$  apparaît aux bornes de la résistance  $R$ , lorsqu'un courant électrique circule dans le circuit.



- Un courant électrique peut-il circuler à travers le circuit électrique lorsque la tension aux bornes du générateur  $U_{AB} > 0$  ?  
Indiquer le cas échéant le chemin suivi par le courant électrique entre A et B. Motiver votre réponse.  
Que vaut alors la tension  $U_{CD}$  ?
- Un courant électrique peut-il circuler à travers le circuit électrique lorsque la tension aux bornes du générateur  $U_{AB} < 0$  ?  
Indiquer le cas échéant le chemin suivi par le courant électrique entre B et A. Motiver votre réponse.  
Que vaut alors la tension  $U_{CD}$  ?
- La tension aux bornes du générateur  $u_{AB}$  est à présent variable. Sa variation  $u_{AB}(t)$  est sinusoïdale et est représentée par la courbe ci-dessous.  
Donner l'allure de la courbe de la tension  $u_{CD}(t)$  aux bornes de la résistance.



## LED

- 24.** Comparer le gap d'énergie d'une LED rouge à celui d'une LED bleue. Expliquer.
- 25.** Que peut-on dire des pertes d'énergie d'une LED dans les cas suivants. Expliquer
- la tension de l'alimentation est inférieure à la tension de seuil de la LED en polarisation directe
  - la LED, allumée, est supposée idéale, c.à.d. la résistance dynamique est nulle
  - la LED, allumée, est supposée réelle, c.à.d. la résistance dynamique a une valeur très petite
  - la LED est branchée en polarisation inverse
- 26.** On sait que chaque LED a une tension de seuil déterminée et une résistance dynamique dont la valeur est très petite. Expliquer pourquoi on ne doit pas brancher directement une LED à une source d'alimentation dont la tension peut être réglée à la valeur de la tension de seuil de la LED.
- 27.** On désire alimenter une LED idéale bleue de tension de seuil 2,60 V avec une batterie de voiture de tension 12 V. On insère une résistance de protection  $R_p = 470 \Omega$  dans le circuit.
- a) Dessiner le schéma du circuit électrique.
  - b) La valeur de la résistance de protection est-elle suffisante, si le courant maximale supportée par la LED vaut 20 mA ?
  - c) On remplace la LED bleue par une LED rouge. La résistance de protection est-elle encore suffisante ? Expliquer.
- 28.** On branche une LED rouge dont la tension de seuil est de 1,80 V et dont la résistance dynamique est négligeable aux bornes d'une alimentation de 12 V. La LED est protégée par une résistance de protection et l'intensité de courant maximale supportée par la LED est de 20 mA.
- a) Dessiner le schéma du circuit électrique.
  - b) Déterminer la valeur minimale de la résistance de protection à apporter.
  - c) On décide de remplacer la LED rouge par une LED verte. Peut-on encore utiliser cette résistance de protection, si l'intensité de courant maximale supportée par la LED verte est aussi de 20 mA. ? Expliquer.
  - d) Déterminer la valeur minimale de la résistance de protection à apporter, si on décide de brancher une deuxième LED en série avec la première.
  - e) Déterminer la valeur minimale de la résistance de protection à apporter, si on décide de brancher une deuxième LED en parallèle avec la première.

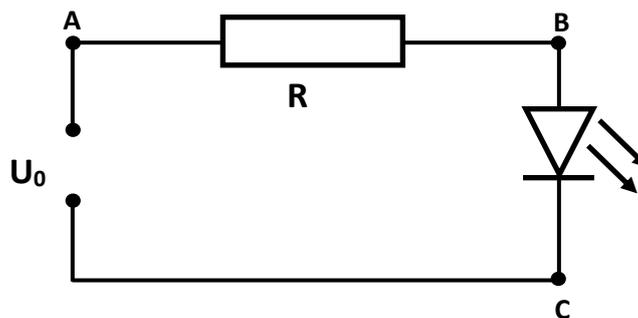
## Révision

A. Répondre par vrai ou faux.

	Affirmation	Vrai	Faux
1	La résistivité d'un semi-conducteur diminue avec la température.		
2	Dans un conducteur, des électrons de valence peuvent passer dans la bande de conduction sans apport d'énergie.		
3	Dans un semi-conducteur, des électrons de valence peuvent passer dans la bande de conduction sans apport d'énergie.		
4	Dans un semi-conducteur de type N, les « impuretés » ont tendance à céder un électron de valence.		
5	Dans un semi-conducteur de type P, les « impuretés » ont tendance à céder un électron de valence.		
6	La caractéristique d'une diode à jonction est linéaire.		
7	La tension de seuil est la même pour toutes les diodes.		
8	Une diode idéale peut être considérée comme un conducteur parfait dès qu'elle est traversée par un courant électrique.		
9	Une diode est traversée par un courant électrique si la tension aux bornes de la diode est supérieure à la tension de seuil.		
10	La tension de seuil d'une LED dépend de la couleur de la LED.		

B. Une LED rouge de tension de seuil égale à  $U_S = 1,80 \text{ V}$  et de résistance dynamique  $r_d = 2,0 \Omega$  est branchée en série avec une résistance  $R$  à un générateur idéal de tension  $U_0 = 9,0 \text{ V}$ . Le courant maximal supporté par la LED est  $I_{max} = 20 \text{ mA}$ .

a. Afin que la LED puisse briller, il faut que :



A.  $U_{AC} = -U_0$     B.  $U_{AC} = U_0$     C.  $U_{AC} = U_0$  ou  $U_{AC} = -U_0$

b. La valeur de la résistance nécessaire dans le cas où l'intensité du courant est égale à  $I_{max}$  est égale à :

A.  $34 \Omega$     B.  $43 \Omega$     C.  $358 \Omega$     D.  $448 \Omega$     E.  $3600 \Omega$

c. La puissance électrique reçue par la LED est égale à :

A.  $36,0 \text{ mW}$     B.  $36,8 \text{ mW}$     C.  $360 \text{ mW}$     D.  $368 \text{ mW}$     E. Aucune des réponses

d. La puissance perdue dans la LED par effet Joule vaut :

A.  $0 \text{ W}$     B.  $0,4 \text{ mW}$     C.  $0,8 \text{ mW}$     D.  $8 \text{ mW}$     E.  $40 \text{ mW}$

- e. Malheureusement on n'a pas la résistance voulue et on a deux résistances dont la résistance est plus grande et une dont la résistance est plus petite.

Laquelle des affirmations est correcte ?

- A. On doit prendre la résistance dont la valeur est plus petite
- B. On doit prendre la résistance dont la valeur est plus grande
- C. On peut prendre les deux résistances
- D. On ne doit prendre aucune des deux résistances

- f. On remplace la LED rouge par une LED verte.

Laquelle des affirmations est correcte ?

- A. On doit remplacer la résistance de protection par une résistance dont la valeur est plus petite
- B. On doit remplacer la résistance de protection par une résistance dont la valeur est plus grande
- C. On ne doit pas remplacer la résistance de protection
- D. On doit absolument garder la même résistance de protection

## Crédits Photos

© Henri Weyer – **p.0** (page titre)

© Wikimedia Commons / National Institute of Standards and Technology – **p.1** (lampes LED ; domaine public)

## Crédits Illustrations

© ngaga / Shutterstock.com (407040679) – **p.1** (motif de cellules photovoltaïques)

© zizou7 / Shutterstock.com (1933410161) – **p.3** (modèle de l'atome de silicium)

© zizou7 / Shutterstock.com (1953292255) – **p.3** (modèle de l'atome de germanium)

© StudioMolekuul / Shutterstock.com (124138447) – **p.4** (Structure cristalline du silicium 3 dimensions)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.4** (Bändermodell (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Markus A. Henning – **p.5** (n-dotiertes Silizium; sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.5** (Halbleiter1 (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.5** (Halbleiter1 (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Markus A. Henning – **p.6** (p-dotiertes Silizium; sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.6** (Halbleiter1 (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.6** (Halbleiter1 (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.7** (Halbleiter2 (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.8** (Halbleiter3 (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.9** (Halbleiter3 (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Serorion / Shutterstock.com (1114403456) – **p.9** (modèle d'une diode)

© Wikimedia Commons / TedPavlic – **p.10** (diode 3D; sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Inductiveload – **p.17** (modèle lampe LED ; domaine public)

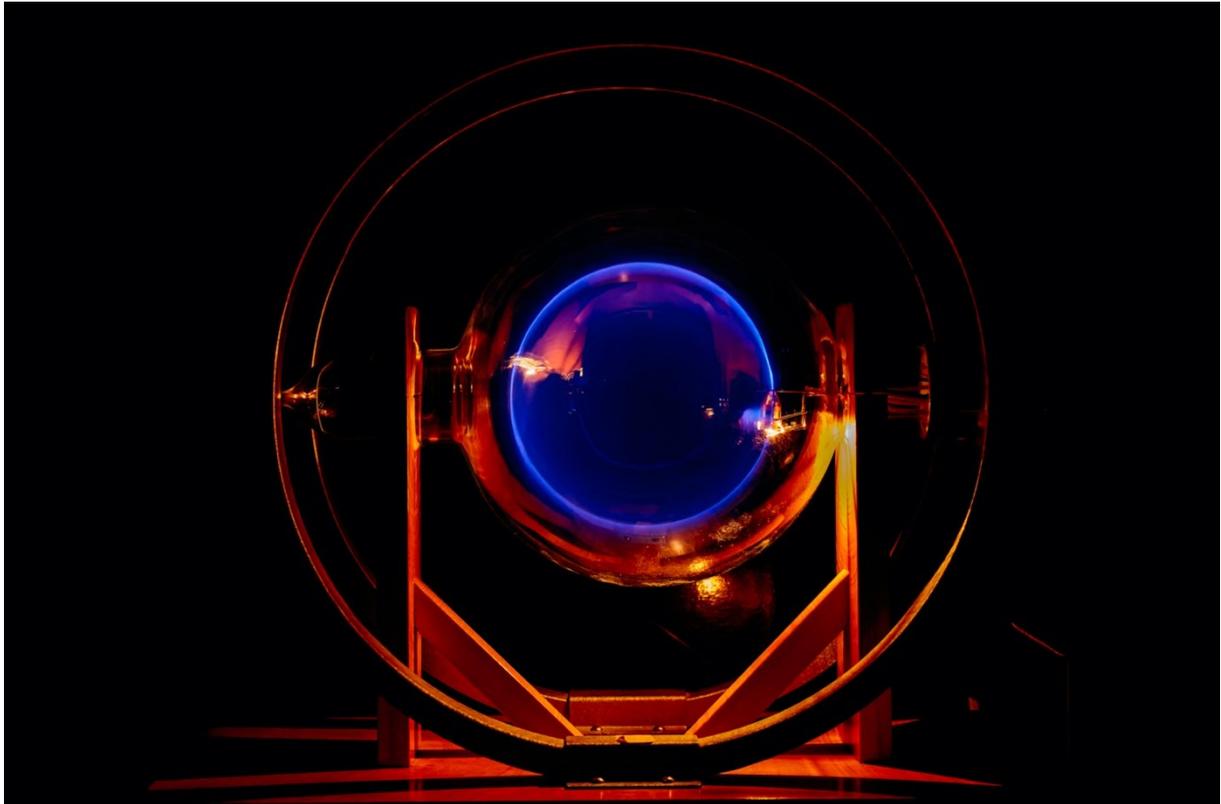
Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours.

© HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson



# 7.

## Champ magnétique



© Henri Weyer



## Sommaire

1	Aimants.....	1
1.1	Types d'aimants.....	1
1.2	Pôles magnétiques .....	1
1.3	Propriétés des aimants.....	2
2	Champ magnétique .....	3
2.1	Définition.....	3
2.2	Caractéristiques du vecteur champ magnétique .....	3
2.3	Champ magnétique créé par plusieurs sources de champ .....	3
2.4	Lignes de champs magnétiques .....	4
2.5	Visualisation du champ magnétique – spectres magnétiques.....	4
2.6	Champ magnétique terrestre .....	6
3	Electromagnétisme .....	8
3.1	Expérience d'Oersted .....	8
3.2	Champ magnétique d'un courant rectiligne .....	8
3.3	Champ magnétique d'une spire de courant.....	9
3.4	Champ magnétique d'un solénoïde .....	10
3.5	Champ magnétique créé par des bobines de Helmholtz .....	11
3.6	Modèle microscopique.....	12
3.6.1	Aimants élémentaires .....	12
3.6.2	Domaines de Weiss .....	12
3.6.3	Méthodes d'aimantation et de désaimantation .....	13
4	Force de Lorentz.....	14
4.1	Mise en évidence expérimentale .....	14
4.2	Définition.....	14
4.3	Caractéristiques de la force de Lorentz.....	15
4.4	Applications techniques .....	16
5	Force de Laplace.....	18
5.1	Mise en évidence expérimentale .....	18
5.2	Interprétation microscopique .....	18
5.3	Expression de la force de Laplace .....	19
5.4	Définition.....	19
5.5	Caractéristiques de la force de Laplace.....	20
5.6	Application technique : le moteur électrique à courant continu.....	21
6	Pour en savoir plus .....	23
7	Exercices.....	26



# 1 Aimants

## 1.1 Types d'aimants

D'après les écrits de Thalès de Milet (ca. 600 av. J.-C.), les Grecs anciens ont découvert le phénomène du magnétisme en observant qu'un minerai de fer naturel, la magnétite ( $Fe_3O_4$ ), attire de la limaille de fer. La magnétite est un aimant naturel qui est particulièrement abondante dans la région grecque *Magnesia* d'où elle tient son nom.

La première application technique du magnétisme était la boussole. Les Chinois, les Arabes et les Scandinaves l'utilisaient déjà vers le 12<sup>e</sup> siècle pour naviguer.



À part les aimants naturels, on distingue :

- les aimants permanents artificiels : ils sont fabriqués en des matériaux qui se laissent fortement aimanter. Ces matériaux sont dits **ferromagnétiques** (Exemples : fer, cobalt, nickel). Les aimants au néodyme sont des aimants permanents puissants composé d'un alliage de néodyme, de fer et de bore ( $Nd_2Fe_{14}B$ ). On les retrouve par exemple dans les disques durs des ordinateurs.
- les électroaimants : ils utilisent le fait qu'un courant électrique peut exercer des forces magnétiques dans son entourage (cf. section 4). Ils sont utilisés, par exemple, à la casse pour soulever de la ferraille.



## 1.2 Pôles magnétiques

La force magnétique est particulièrement intense aux extrémités d'un aimant, appelées **pôles magnétiques**. On distingue entre le pôle Nord (*N*) et le pôle Sud (*S*).

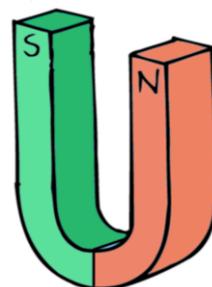
### Exemples

- Dans un **aimant droit** (ou **barreau aimanté**), le pôle *N* et le pôle *S* sont situés aux extrémités.



- Un **aimant en U** est simplement un aimant droit qui a été plié en forme de U. Ses pôles sont situés aux extrémités des deux branches.
- Les aimants conçus pour retenir des feuilles contre la porte du réfrigérateur sont constitués de fines bandes alternées de pôles *N* et *S*. Ces aimants ont une portée très courte car les pôles *N* et *S* sont proches et leurs effets s'annulent à courte distance.

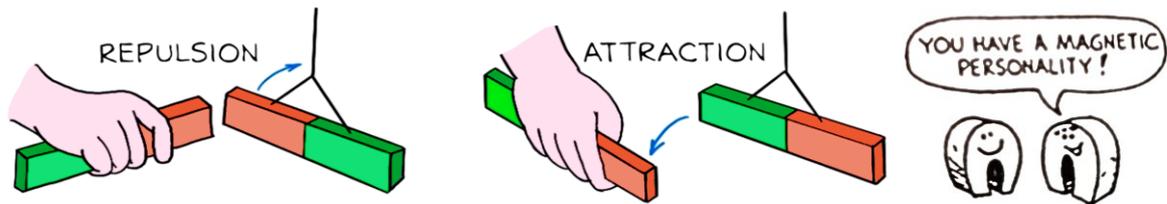
AIMANT EN U



### 1.3 Propriétés des aimants

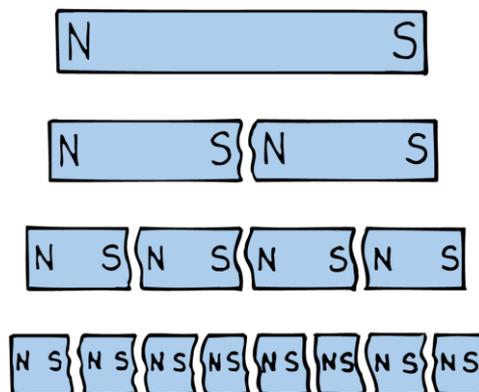
Lorsque le pôle *N* d'un aimant est approché du pôle *N* d'un autre aimant, les deux pôles se repoussent. Il en va de même si un pôle *S* est approché d'un pôle *S*. En revanche, si un pôle *N* est approché d'un pôle *S*, il y a attraction entre les deux pôles. En résumé :

Des pôles magnétiques de même nom se repoussent, des pôles magnétiques de noms différents s'attirent.



Cette propriété est similaire à celles des charges électriques. Il existe cependant une différence fondamentale entre les pôles magnétiques et les charges électriques qui est mise en évidence par **l'expérience de l'aimant brisé** :

Lorsqu'on brise un aimant droit en deux morceaux, on obtient deux nouveaux aimants droits, chacun ayant un pôle *N* et un pôle *S*, et ce indépendamment de la taille de l'aimant.



On peut en conclure qu'il est impossible d'isoler un pôle magnétique. En d'autres mots :

Il n'existe pas de monopôles magnétiques. Tout aimant possède un pôle *N* et un pôle *S*. Les pôles magnétiques apparaissent toujours par paires.

Un pôle *N* n'existe jamais sans la présence d'un pôle *S*, ou vice versa. En revanche, les charges électriques peuvent être isolées. Un électron chargé négativement ou un proton chargé positivement sont des entités en soi.

#### ■ As-tu-compris ?

1. L'attraction ou la répulsion entre deux charges électriques dépend des signes respectifs des charges. De quoi dépend l'attraction ou la répulsion d'aimants ?

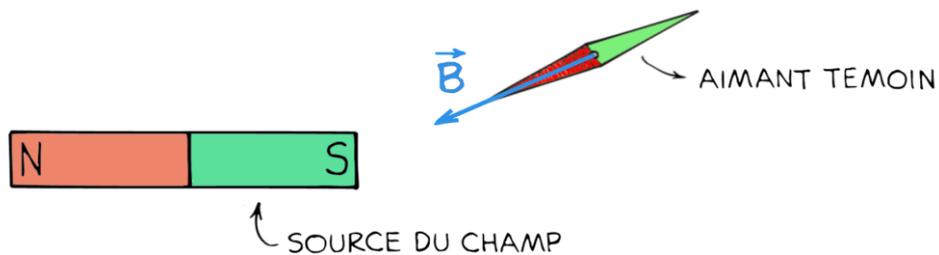
## 2 Champ magnétique

### 2.1 Définition

Il existe un **champ magnétique** en un point de l'espace si un aimant témoin (par exemple une aiguille aimantée) y est soumis à une force magnétique.

### 2.2 Caractéristiques du vecteur champ magnétique

Le champ magnétique est vectoriel ; il est caractérisé par le **vecteur champ magnétique**  $\vec{B}$ .

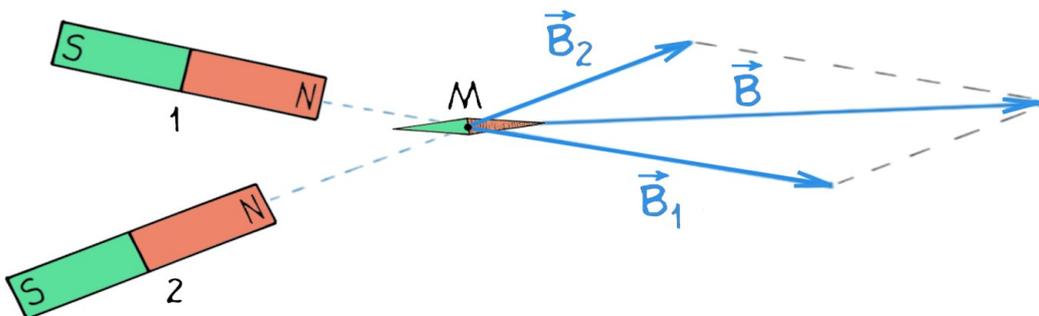


1. *Origine* :  $\vec{B}$  est associé à tout point de l'espace où règne le champ magnétique
2. *Direction* : celle indiquée par une aiguille aimantée placée au point considéré
3. *Sens* : celui où pointe le pôle Nord de l'aiguille aimantée
4. *Intensité* : celle du champ magnétique. Son unité SI est le tesla<sup>1</sup> :  $[B] = 1 \text{ tesla} = 1 \text{ T}$   
L'instrument de mesure de l'intensité du champ magnétique est le **teslamètre**.

### 2.3 Champ magnétique créé par plusieurs sources de champ

Le vecteur champ magnétique  $\vec{B}$  créé en un point de l'espace par plusieurs sources de champ  $S_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) est égal à la somme vectorielle des vecteurs champ magnétique  $\vec{B}_i$ , créés par chacune des sources de champ au point considéré :

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots + \vec{B}_n = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$$



<sup>1</sup> En l'honneur du physicien serbo-américain Nikola Tesla (1856-1943)

## 2.4 Lignes de champs magnétiques

La **ligne de champ magnétique** est une courbe de l'espace à laquelle le vecteur champ magnétique est tangent en tout point. Elle est orientée dans le sens du champ magnétique.

Figure :

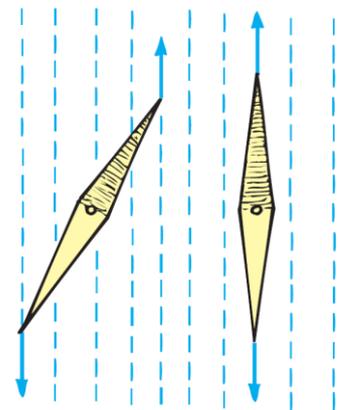


Propriétés des lignes de champ magnétique :

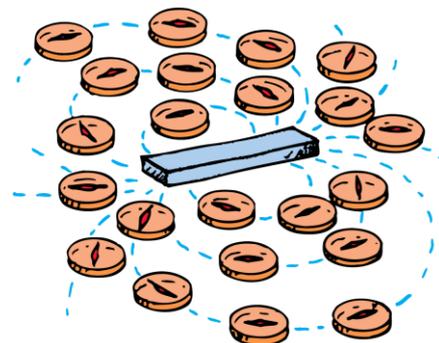
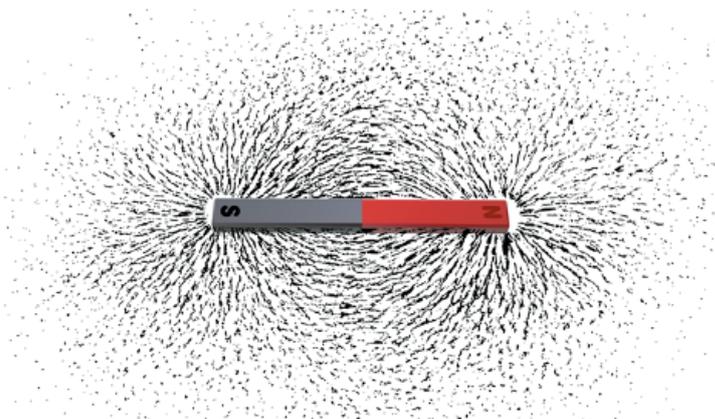
- elles ne se coupent jamais ;
- toute ligne de champ forme une boucle fermée : à l'extérieur d'un aimant la ligne de champ passe du pôle Nord au pôle Sud, à l'intérieur de l'aimant du pôle Sud au pôle Nord ;
- la direction et le sens d'une ligne de champ sont en tout point de l'espace les mêmes que ceux du vecteur champ magnétique respectif ;
- la densité des lignes de champ est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique.

## 2.5 Visualisation du champ magnétique – spectres magnétiques

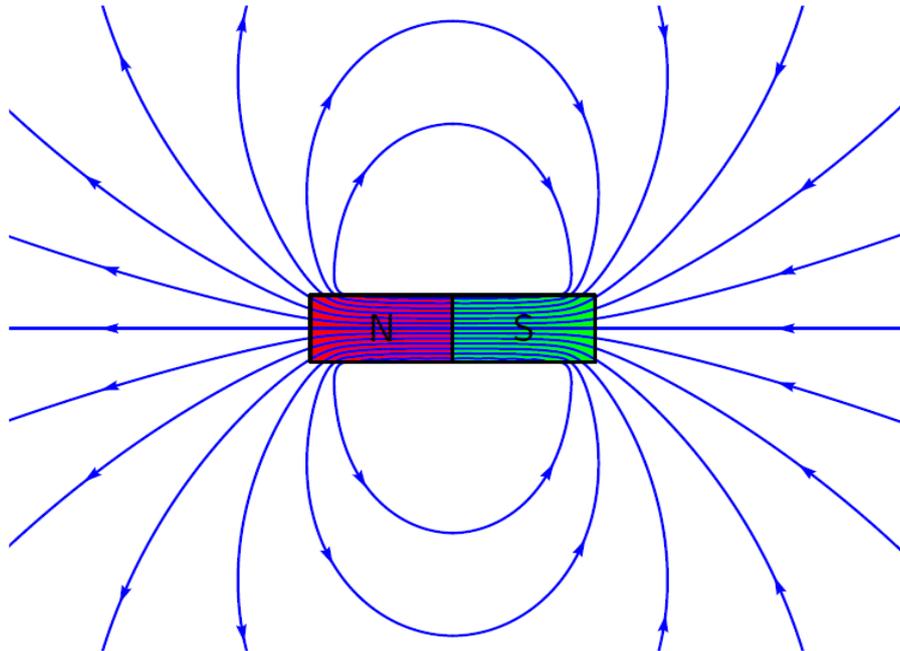
Lorsqu'on dispose des boussoles autour d'un aimant, les aiguilles des boussoles s'orientent selon le champ magnétique de l'aimant, le Nord des boussoles indiquant le sens des lignes de champ. En saupoudrant de la limaille de fer plus ou moins uniformément autour de l'aimant, on constate que la limaille trace un ensemble de lignes de champ, appelée **spectre magnétique**. Les grains de limaille s'aimantent sous l'influence du champ magnétique de l'aimant et deviennent de petits aimants. Ils s'alignent et s'orientent selon le champ magnétique. Il en résulte des chaînes de grains de limaille qui matérialisent les lignes de champ.



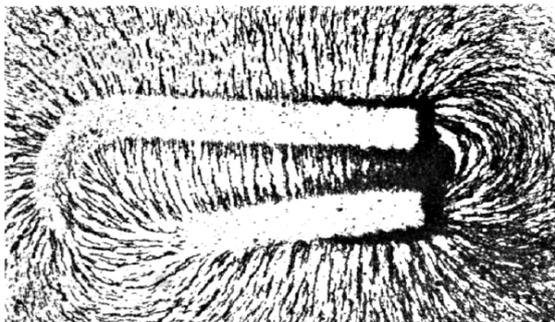
- Spectre magnétique d'un aimant droit (barreau aimanté) :



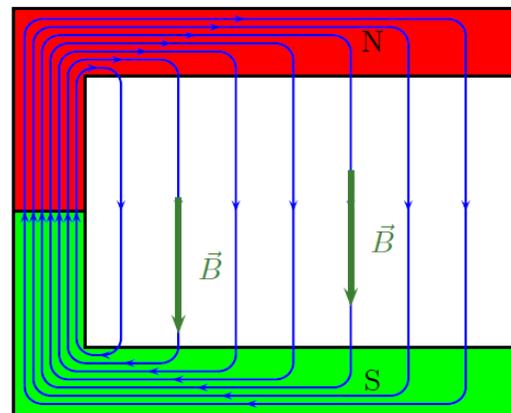
Les lignes de champ émergent du pôle  $N$  et aboutissent au pôle  $S$  et forment des boucles fermées. Le champ magnétique est intense aux pôles, ce qui se traduit par une grande densité de lignes de champ autour des pôles.



- Spectre magnétique entre les branches d'un aimant en U



*Spectre magnétique d'un aimant en U visualisé à l'aide de limaille de fer, Frank Eugene Austen (1916) Examples in Magnetism, 2nd Ed., Hanover, N.H., USA, p.31, plate 2, domaine public*



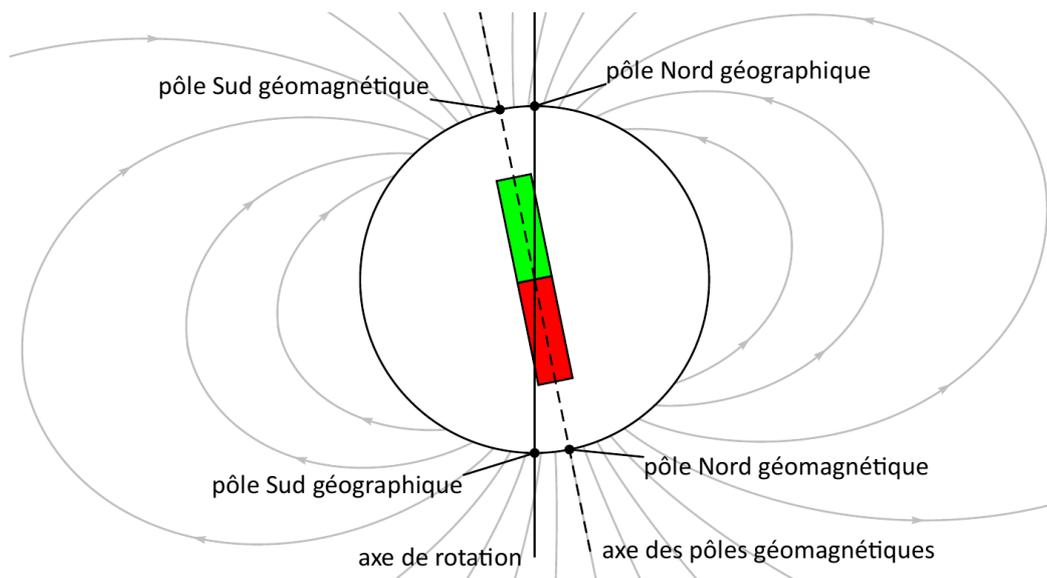
Entre les branches d'un aimant en U, les lignes de champ sont parallèles (perpendiculaires aux branches de l'aimant) et équidistantes : le champ magnétique  $\vec{B}$  y est *uniforme*. Il a même direction, même sens et même intensité en chaque point :  $\vec{B} = \overrightarrow{\text{const}}$

■ **As-tu-compris ?**

3. Rajouter le vecteur champ magnétique en quelques endroits du spectre magnétique de l'aimant droit.
4. Où à la surface d'un barreau aimanté l'intensité du champ magnétique est-elle...
  - a. minimale ?
  - b. maximale ?

## 2.6 Champ magnétique terrestre

L'aiguille d'une boussole pointe vers le Nord car la Terre est elle-même un aimant et l'aiguille s'oriente selon le champ magnétique de la Terre. Le champ magnétique terrestre peut être assimilé à celui d'un immense aimant droit dont le centre se situe approximativement au centre de la Terre et dont l'axe longitudinal est incliné d'environ  $10^\circ$  par rapport à l'axe de rotation de la Terre. L'axe longitudinal de cet aimant fictif définit les positions des pôles magnétiques théoriques (pôles géomagnétiques), l'axe de rotation de la Terre celles des pôles géographiques. Cependant, les vrais pôles magnétiques, endroits où l'on observe que le champ magnétique terrestre est effectivement perpendiculaire à la surface de la Terre, ne coïncident pas tout à fait avec les pôles géomagnétiques et ne sont pas non plus diamétralement opposés.



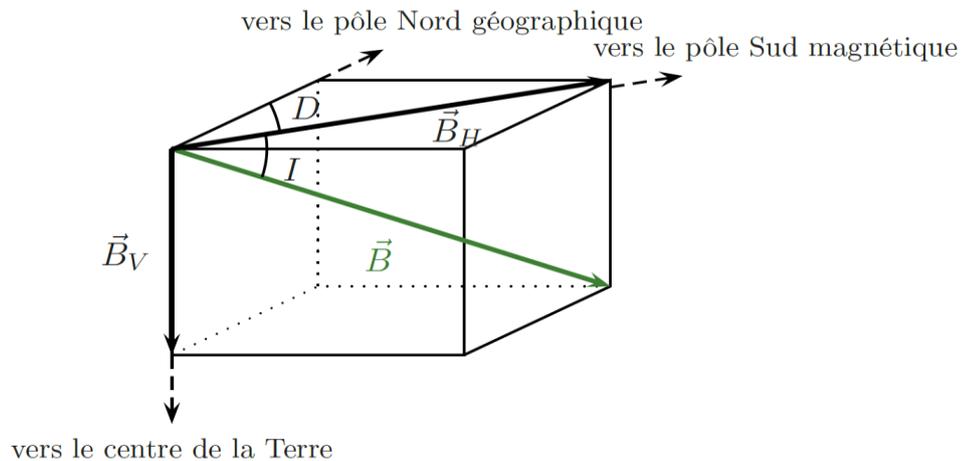
Pour une raison historique, le pôle magnétique de l'aiguille aimantée d'une boussole qui indique le Nord est appelé le pôle « Nord » magnétique de l'aiguille. Près du pôle Nord géographique doit donc se trouver le pôle Sud magnétique, et inversement. Le pôle Sud magnétique est actuellement situé à près de 500 kilomètres du pôle Nord géographique et se déplace rapidement en direction de la Sibérie<sup>2</sup>.



<sup>2</sup> Les termes « North Magnetic Pole » et « North Geomagnetic Pole » dans la figure se réfèrent à la position géographique. Ce sont en réalité des pôles Sud magnétiques.

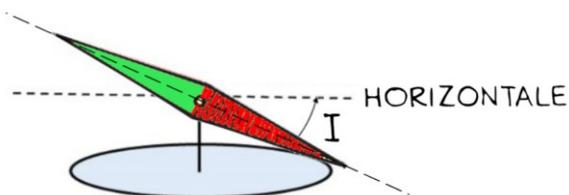
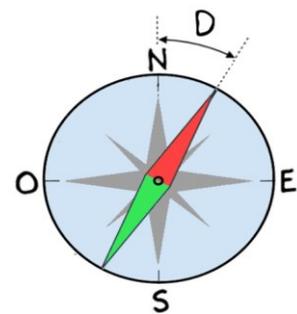
Le vecteur champ magnétique peut être décomposé en une composante horizontale  $\vec{B}_H$  qui pointe vers le pôle Sud magnétique et en une composante verticale  $\vec{B}_V$  qui pointe vers le centre de la Terre :

$$\vec{B} = \vec{B}_H + \vec{B}_V.$$



En un lieu donné, le champ magnétique terrestre est caractérisé par trois paramètres :

1. L'aiguille aimantée d'une boussole, qui matérialise la direction de  $\vec{B}_H$ , n'est pas exactement dirigée selon le méridien géographique, mais selon le méridien magnétique. L'angle formé en un lieu entre les méridiens géographique et magnétique est appelé **déclinaison magnétique** (symbole :  $D$ ).
2. Le vecteur du champ magnétique terrestre n'est en général pas contenu dans le plan horizontal. L'angle qui est formé par le vecteur du champ magnétique terrestre et le plan horizontal est appelé **inclinaison magnétique** (symbole :  $I$ ).



3. Son intensité  $B$

Au Luxembourg, en 2022 :  $D = 2,5^\circ$  Est,  $I = 65^\circ$  vers le bas et  $B = 49 \mu\text{T}$

■ **As-tu-compris ?**

5. Une boussole basculante est une aiguille aimantée qui peut pivoter autour d'un axe horizontal. En quels endroits sur Terre l'aiguille d'une telle boussole s'orientent-elle quasiment selon la verticale ? En quels endroits quasiment selon l'horizontale ?
6. L'aiguille d'une boussole pointe-elle vers le Nord lorsqu'on se trouve dans l'hémisphère Sud ?

### 3 Electromagnétisme

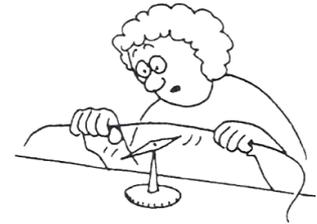
#### 3.1 Expérience d'Oersted

Les domaines du magnétisme et de l'électricité se sont développés indépendamment jusqu'en 1820. C'est alors que le physicien danois Christian Oersted découvre par hasard, lors d'une expérience de démonstration, qu'un courant électrique influence une boussole. Voici une expérience qui met en évidence ce phénomène :

Un fil conducteur connecté à une source de tension est tendu parallèlement au-dessus d'une aiguille aimantée qui est initialement dirigée selon le méridien magnétique.

*Observations :*

- Si  $I = 0$ , l'aiguille est parallèle au fil ;
- Si  $I \neq 0$ , l'aiguille s'oriente plus ou moins perpendiculairement au fil ;
- Si  $I$  change de sens, l'orientation de l'aiguille s'inverse.

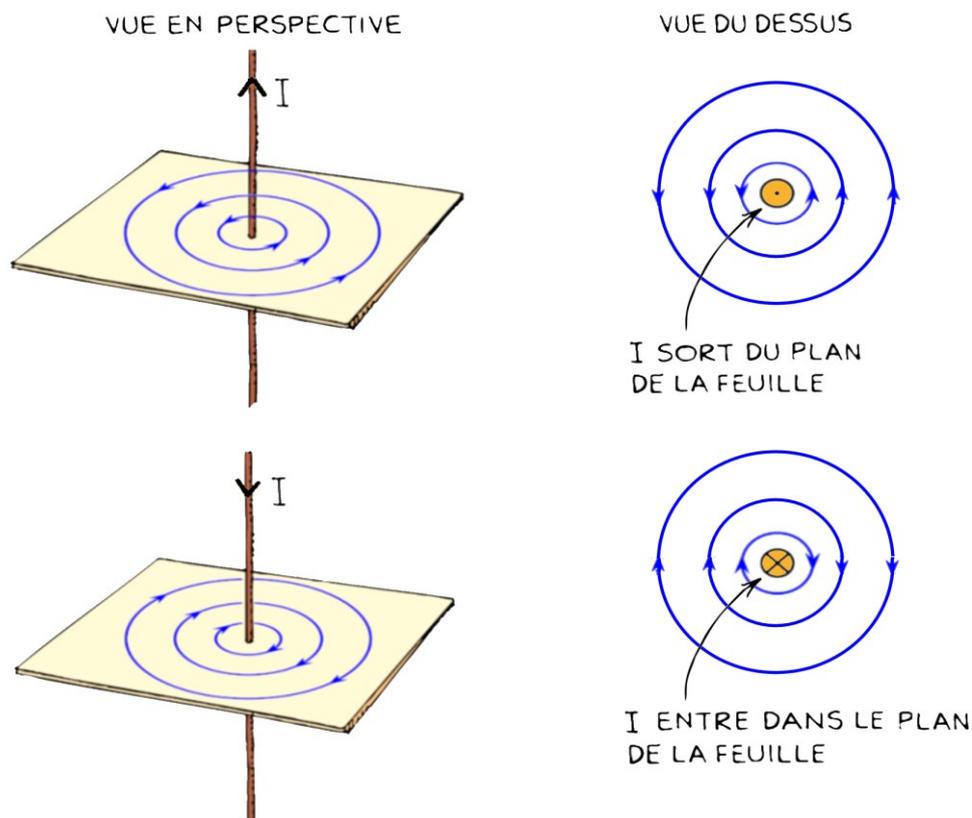


*Conclusion :*

Tout courant électrique crée un champ magnétique dans son entourage.

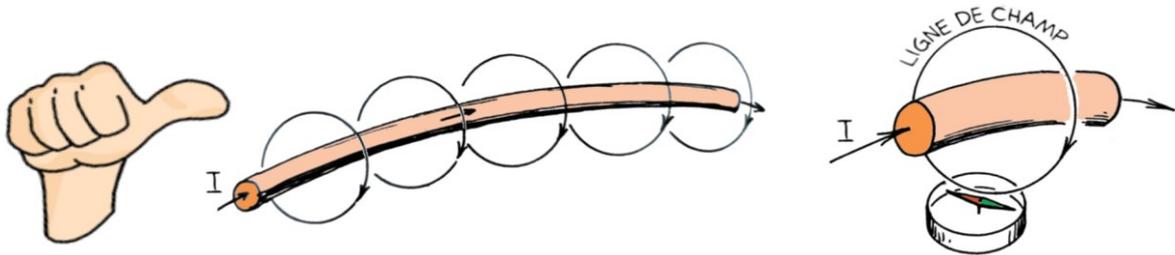
#### 3.2 Champ magnétique d'un courant rectiligne

Les lignes de champ magnétique d'un fil rectiligne parcouru par un courant sont des cercles concentriques centrés sur le fil dans chaque plan perpendiculaire au fil. On dit que le champ magnétique d'un courant rectiligne est *orthoradial*. L'intensité du champ magnétique diminue avec la distance radiale au conducteur. En inversant le sens du courant, le sens des lignes de champ s'inverse.



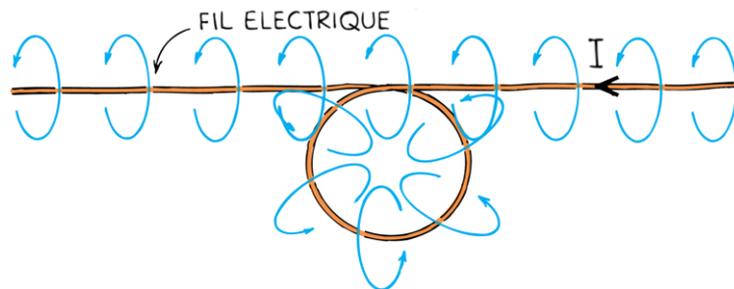
La **règle de la main droite #1** permet de déterminer le sens du vecteur champ magnétique en fonction du sens de courant et vice-versa :

Lorsque le pouce de la main droite pointe dans le sens du courant, les doigts recourbés indiquent le sens des lignes de champ magnétique respectivement celui du vecteur champ magnétique.

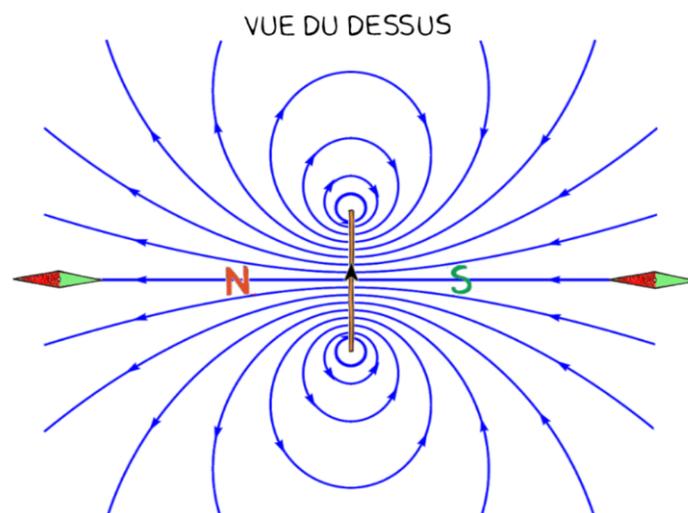


### 3.3 Champ magnétique d'une spire de courant

Lorsque le câble est enroulé en forme de spire, les lignes de champ magnétique se concentrent à l'intérieur de la spire. Le champ magnétique y est donc plus intense.

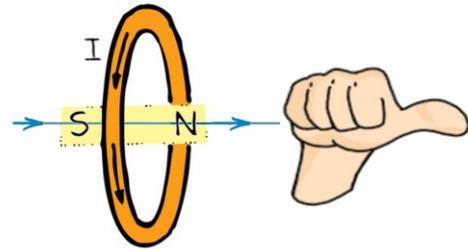


Le spectre d'une spire de courant ressemble à celui d'un aimant droit. La face par laquelle les lignes de champ magnétique sortent de la spire se comporte comme le pôle Nord d'un aimant : on l'appelle face Nord de la spire. La face par laquelle les lignes de champ magnétique entrent dans la spire se comporte comme le pôle Sud d'un aimant : on l'appelle face Sud de la spire.



Dans un plan perpendiculaire à la spire et contenant son centre, le champ magnétique créé par la spire peut être considéré comme superposition de deux champs magnétiques créés par des fils rectilignes parallèles traversés par des courants en sens inverse. À l'intérieur de la spire, le champ magnétique créé par le courant entrant dans le plan et celui créé par le courant sortant du plan se renforcent mutuellement, à l'extérieur de la spire ils s'annulent partiellement.

La **règle de la main droite #2** permet de déterminer le sens du champ magnétique à l'intérieur de la spire en fonction du sens de courant et vice-versa :



Lorsque les doigts recourbés de la main droite indiquent le sens du courant, le pouce pointe vers la face Nord de la spire.

En enroulant  $N$  tours d'un fil conducteur isolé sur un court cylindre on obtient une bobine à  $N$  spires. La superposition des champs magnétiques créés par les spires individuelles conduit :

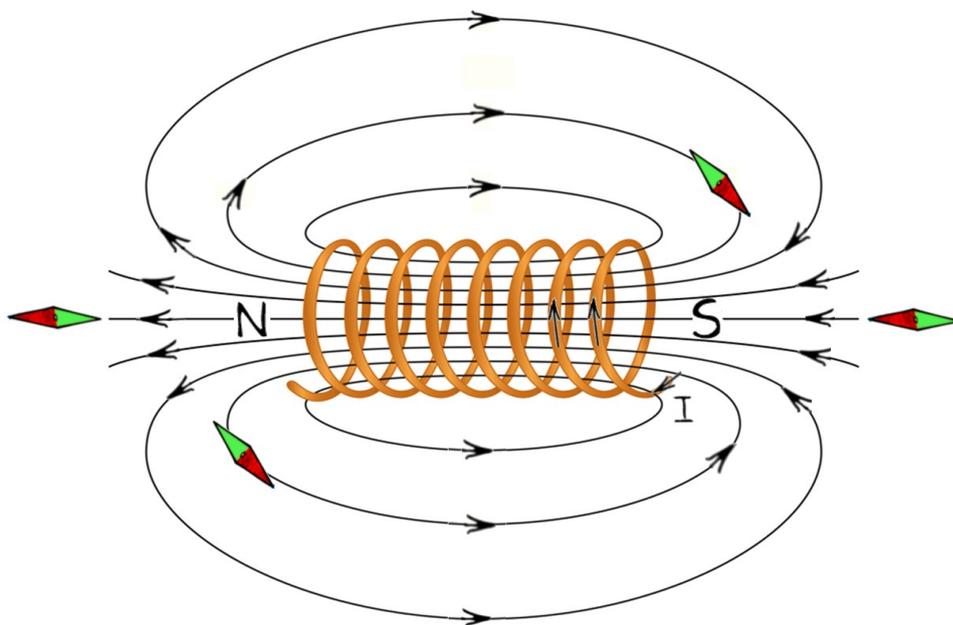
- à l'intérieur de la bobine plate, à un champ magnétique  $\vec{B}$  intense ;
- à l'extérieur de la bobine plate, à un champ magnétique négligeable, sauf sur l'axe de la bobine.

Les caractéristiques du champ magnétique  $\vec{B}$  sont les mêmes que celles du champ magnétique créé par une seule spire de courant, mais l'intensité du champ magnétique est à multiplier par  $N$ .

### 3.4 Champ magnétique d'un solénoïde

Un **solénoïde** (du mot grec *solen* : tuyau) est une bobine très longue. La superposition des champs magnétiques créés par les spires individuelles conduit :

- à l'intérieur du solénoïde, à un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme et intense. Les lignes de champ magnétique y sont parallèles et équidistantes ;
- à l'extérieur du solénoïde, à un champ magnétique négligeable, sauf sur l'axe du solénoïde. Les lignes de champs sortent par la face nord du solénoïde et entrent par la face sud.



Caractéristiques du champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  à l'intérieur du solénoïde :

1. *Origine* : tout point à l'intérieur du solénoïde
2. *Direction* : celle de l'axe du solénoïde
3. *Sens* : déterminé à l'aide de la règle de la main droite #2

#### 4. Intensité (norme) :

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I = \mu_0 n I$$

$\mu_0 = 4\pi \frac{\text{T m}}{\text{A}}$  est la perméabilité magnétique du vide

$N$  est le nombre de spires

$L$  est la longueur du solénoïde (en m)

$n = \frac{N}{L}$  est la densité des spires (en  $\text{m}^{-1}$ )

$I$  est l'intensité du courant électrique (en A) à travers le solénoïde

L'expression donnant l'intensité  $B$  du champ magnétique  $\vec{B}$  créé par un solénoïde reflète une propriété générale des champs magnétiques qui sont créés par des courants électriques :

L'intensité du champ magnétique créé par un courant est proportionnelle à l'intensité du courant électrique qui le crée :  $B \sim I$



(a)

(b)

(c)

*Spectres magnétiques d'un fil rectiligne (a), d'une spire circulaire (b) et d'un solénoïde (c)*

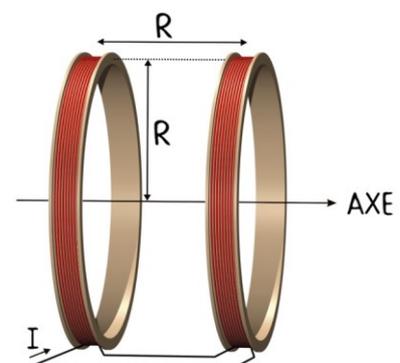
*© Richard Megna FUNDAMENTAL PHOTOGRAPHS, NYC*

### 3.5 Champ magnétique créé par des bobines de Helmholtz

Les **bobines de Helmholtz** sont constituées par deux bobines plates circulaires de même rayon  $R$  qui sont montées en regard sur le même axe à la distance  $R$  et qui sont parcourues par des courants dans le même sens.

Hermann von Helmholtz (1821-1894) a trouvé par calcul que le champ magnétique entre les bobines est uniforme à excellente approximation et ce dans un assez grand domaine.

Le champ magnétique a la direction de l'axe longitudinal des bobines. Son sens peut être trouvé à l'aide de la règle de la main droite.



*Bobines de Helmholtz par Ansgar Hellwig sous licence CC BY-SA 2.0.*

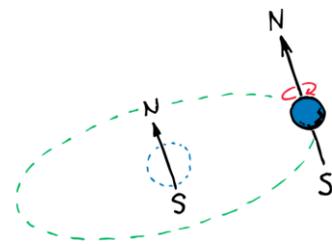
■ **As-tu-compris ?**

7. Un solénoïde est branché à un générateur de courant continu.
  - a. Effectuer un schéma du montage et y insérer le générateur, le courant électrique à travers la bobine, les lignes de champ magnétique ainsi que les pôles des deux faces de la bobine.
  - b. Déterminer la valeur du champ magnétique si le solénoïde a une longueur de 5 cm, contient 1000 spires et est parcouru par un courant d'intensité 6 A.
8. Déterminer la direction et le sens du champ magnétique des bobines de Helmholtz représentées sur la page précédente.

### 3.6 Modèle microscopique

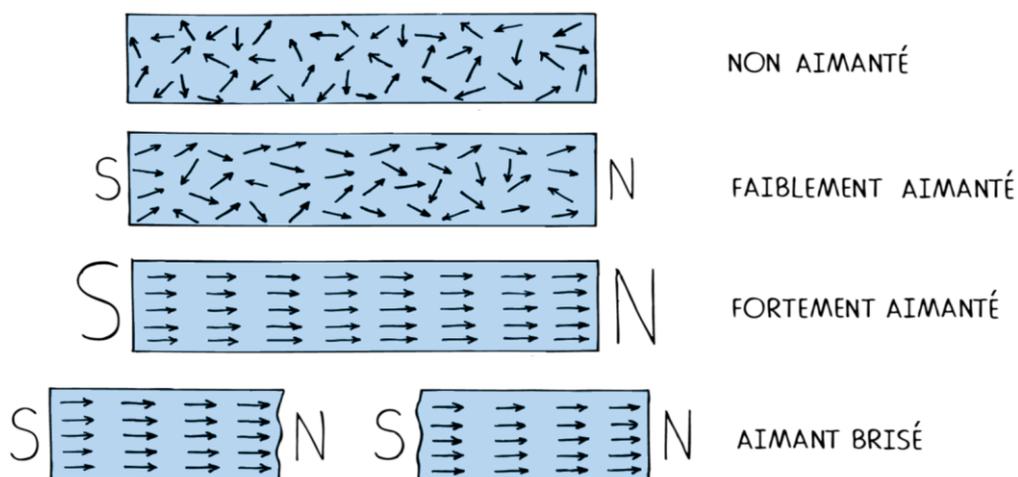
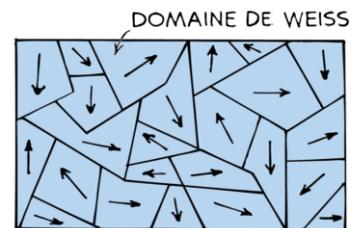
#### 3.6.1 Aimants élémentaires

Le champ magnétique d'un aimant permanent est créé par le mouvement de charges électriques à l'intérieur de l'aimant (électrons en orbite autour des noyaux atomiques et spins des électrons) qui engendre un champ magnétique élémentaire des atomes<sup>3</sup>.



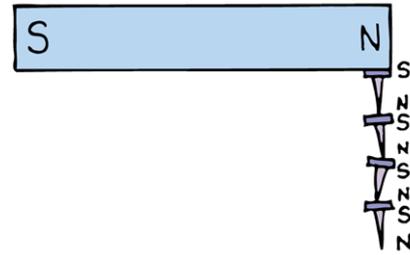
#### 3.6.2 Domaines de Weiss

Dans un corps ferromagnétique, les interactions magnétiques entre atomes voisins causent des groupes d'atomes à s'orienter dans le même sens. Ces groupes d'atomes alignés sont appelés domaines magnétiques ou **domaines de Weiss**. Sans influence extérieure, le champ magnétique résultant de ces domaines est nul car les domaines sont orientés aléatoirement. Le corps macroscopique n'est donc pas aimanté. En revanche, si on introduit le corps ferromagnétique dans un champ magnétique extérieur intense, les domaines de Weiss ont tendance à s'orienter selon ce champ extérieur. Une fois les domaines orientés, l'interaction entre les domaines assure qu'une forte aimantation globale persiste, même si on annule le champ magnétique extérieur. On a alors créé un aimant permanent. Ce modèle permet d'expliquer notamment l'expérience de l'aimant brisé (cf. 1.3).



<sup>3</sup> La plupart des matériaux ne sont pas magnétiques, parce que les champs microscopiques élémentaires se neutralisent à cause des spins opposés de leurs électrons.

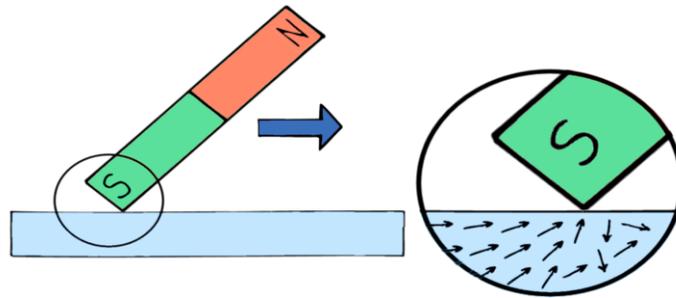
Lorsqu'un clou faiblement aimanté est retiré de l'aimant droit, l'agitation thermique cause la plupart des domaines à reprendre une orientation aléatoire. Une aimantation résiduelle peut cependant subsister.



### 3.6.3 Méthodes d'aimantation et de désaimantation

Pour **aimanter** un corps ferromagnétique, il faut orienter ses domaines de Weiss dans une même direction et un même sens. Méthodes :

- À l'aide d'un aimant permanent :  
On glisse le corps à aimanter le long d'un pôle d'un aimant, toujours dans le même sens.



- À l'aide d'un électroaimant :  
On introduit le corps à aimanter à l'intérieur de la bobine d'un électroaimant qui est parcouru par un courant continu.

Pour **désaimanter** un corps ferromagnétique, il faut orienter ses domaines de Weiss de façon aléatoire.

Méthodes :

- Frapper le corps aimanté violemment contre un corps dur.
- Placer le corps aimanté dans une bobine parcourue par un courant alternatif.
- Chauffer le corps aimanté au-delà d'une température limite, appelée température de Curie. La température de Curie est caractéristique du matériau ferromagnétique.

Par exemple :  $\vartheta_{Curie}(Fe) = 768\text{ }^{\circ}\text{C}$

#### ■ As-tu compris ?

9. Pourquoi l'intensité du champ magnétique d'un aimant devient-il plus faible lorsqu'on le laisse tomber sur un sol dur ?
10. Si on approche un clou du pôle Nord d'un aimant, le clou sera attiré. Si on l'approche du pôle Sud de l'aimant, il sera également attiré. Pourquoi ?
11. Expliquer pourquoi la source du champ magnétique terrestre ne peut pas être un énorme aimant permanent se trouvant au centre de la Terre.

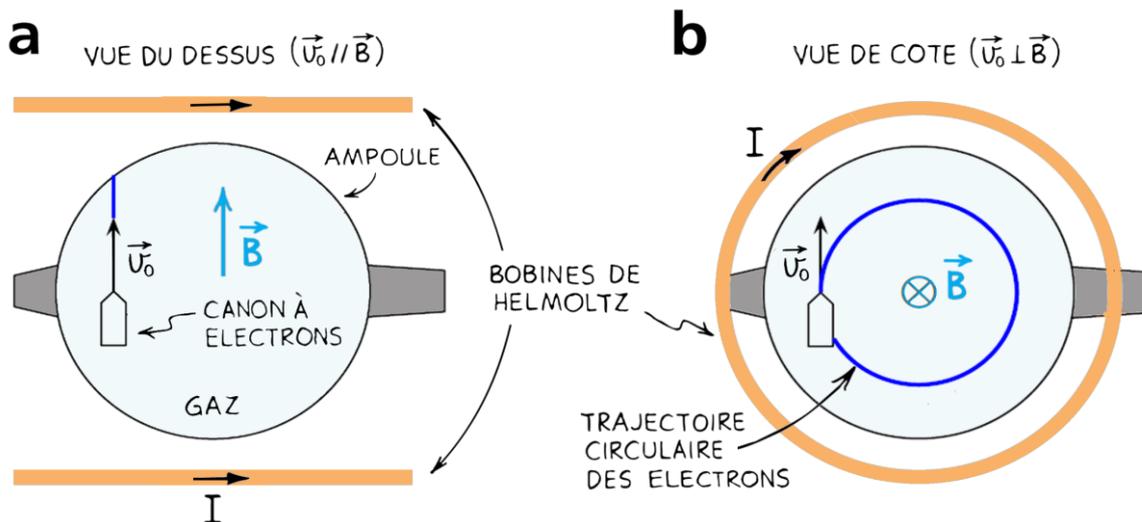
## 4 Force de Lorentz

### 4.1 Mise en évidence expérimentale

Un canon à électrons sert à produire un faisceau d'électrons monocinétique de vecteur vitesse initiale  $\vec{v}_0$ . Le faisceau d'électrons est injecté dans une ampoule de verre qui contient du gaz dihydrogène ou néon sous faible pression. À la suite des collisions avec des électrons, quelques molécules de gaz sont excitées ou s'ionisent. Lorsque ces molécules retournent à l'état fondamental, elles émettent de la lumière qui est en partie visible ; la trajectoire des électrons apparaît alors dans une couleur caractéristique au gaz. L'ampoule peut être complètement plongée dans un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  créé par des bobines de Helmholtz.

Observations :

- En l'absence du champ magnétique les électrons ne sont pas déviés. (Mouvement rectiligne)
- En présence du champ magnétique, les électrons :
  - a) ne sont pas déviés lorsque  $\vec{v}_0$  est colinéaire à  $\vec{B}$  (mouvement rectiligne) ;
  - b) sont contraints sur un cercle lorsque  $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$ , la déviation se faisant dans le sens opposé si l'on inverse le sens de  $\vec{v}_0$  ou le sens de  $\vec{B}$  (mouvement circulaire) ;
  - c) sont contraints sur une hélice circulaire dans tous les autres cas (Mouvement hélicoïdale pouvant être interprété comme superposition des mouvements circulaire et rectiligne précédents).



On conclut que les électrons qui se déplacent dans un champ magnétique sont déviés par une force magnétique qui est à la fois perpendiculaire à leur vecteur vitesse et perpendiculaire au champ magnétique. Cette force porte le nom de **force de Lorentz**.

### 4.2 Définition

Une particule de charge  $q$  se déplaçant avec un vecteur vitesse  $\vec{v}$  dans un champ magnétique  $\vec{B}$  subit une force magnétique  $\vec{F}_m$ , appelée force de Lorentz, telle que :

$$\vec{F}_m = q \vec{v} \times \vec{B}$$

Le symbole  $\times$  (ou  $\wedge$ ) est l'opérateur mathématique du produit vectoriel.

### 4.3 Caractéristiques de la force de Lorentz

1. *Point d'application* : la particule de charge  $q$
2. *Direction* : perpendiculaire au plan formé par  $q \vec{v}$  et  $\vec{B}$  (fig. 1)
3. *Sens* : déterminé à l'aide de la règle de la main droite (fig. 2) :
  - Le pouce suivant  $q \vec{v}$  (dans le sens de  $\vec{v}$  si  $q > 0$ , dans le sens opposé si  $q < 0$ )
  - L'index suivant le champ magnétique  $\vec{B}$
  - Le majeur indique alors le sens de la force magnétique  $\vec{F}_m$
4. *Intensité (norme)* :  $F_m = |q| v B \sin \alpha$ , où  $\alpha$  est l'angle formé entre  $q \vec{v}$  et  $\vec{B}$ .  
L'intensité  $F_m$  correspond à l'aire du parallélogramme formé par  $q \vec{v}$  et  $\vec{B}$ .

Unité SI :  $N = C \cdot \frac{m}{s} \cdot T$

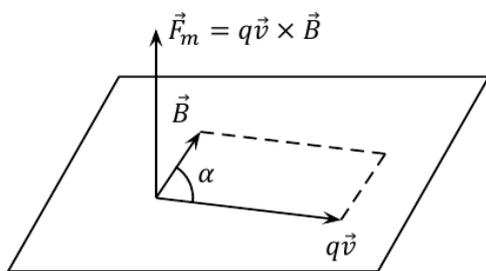


Fig. 1 : Direction de la force de Lorentz

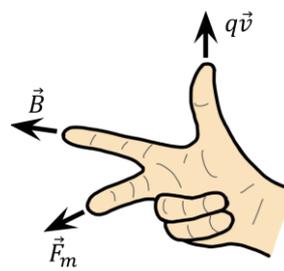


Fig. 2 : Règle de la main droite

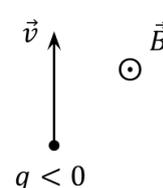
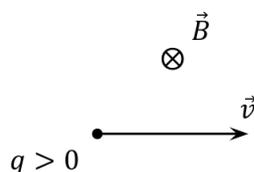
#### Remarques

- Une particule ne subit pas de force de Lorentz :
  - si elle est électriquement neutre ( $q = 0$ )
  - si elle est au repos ( $v = 0$ )
  - en l'absence de champ magnétique ( $B = 0$ )
  - si elle se déplace dans la direction du champ magnétique ( $\alpha = 0$  ou  $180^\circ \Rightarrow \sin \alpha = 0$ )
- Une particule subit une force de Lorentz maximale si elle se déplace perpendiculairement au champ magnétique ( $\alpha = 90^\circ : F_m = |q| v B \underbrace{\sin 90^\circ}_1 = |q| v B$ )
- Puisque la force de Lorentz est toujours normale au vecteur vitesse de la particule, elle n'effectue aucun travail sur la particule. D'après le TEC, un champ magnétique peut dévier une particule chargée en mouvement, mais il ne peut jamais varier la norme de la vitesse ! *Le mouvement d'une particule sous l'influence seule d'un champ magnétique est donc toujours uniforme.*



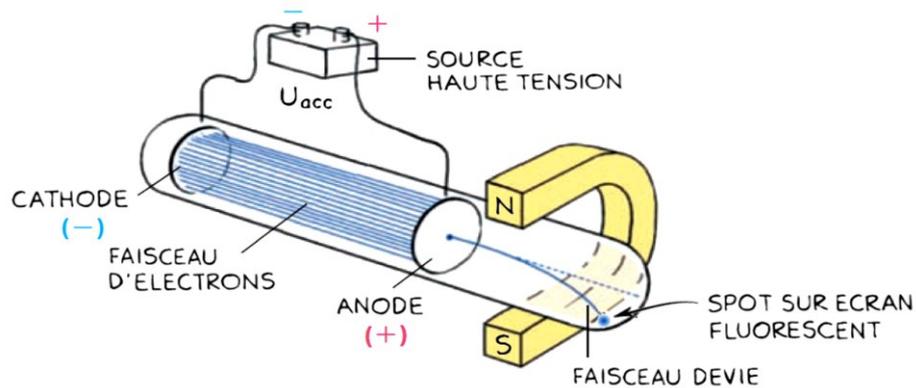
#### ■ As-tu compris ?

1. Pourquoi un neutron dans un champ magnétique ne subit-il pas de déviation ?
2. Représenter la force de Lorentz s'exerçant sur la particule pour les deux situations suivantes :
  - a)
  - b)



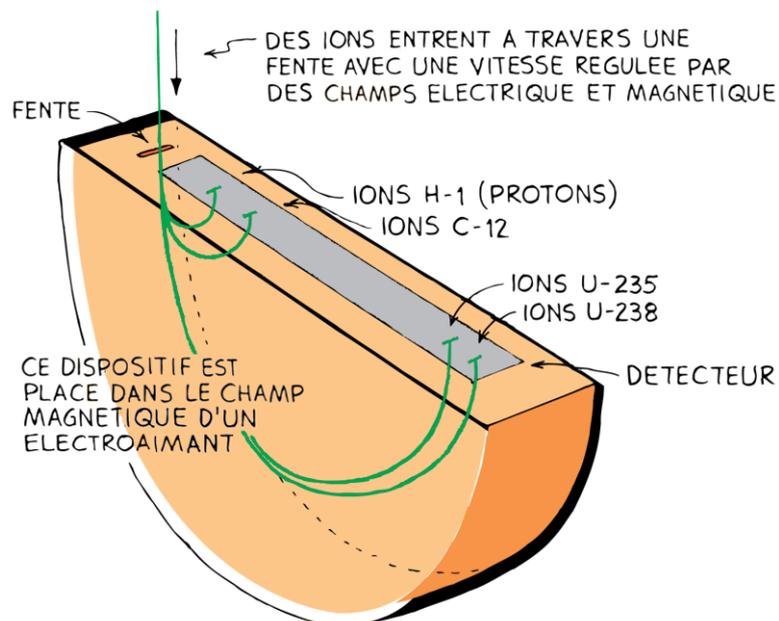
#### 4.4 Applications techniques

- Le **tube cathodique** est un tube à vide qui comporte dans sa forme la plus simple :
  - une cathode, entourant un filament de chauffage qui émet des électrons par effet thermoïonique ;
  - une anode, percée d'un trou, créant ensemble avec la cathode émissive, par rapport à laquelle elle se trouve à une tension  $U_{acc} > 0$ , un champ électrique qui accélère les électrons ;
  - un écran fluorescent sur lequel l'impact du faisceau d'électrons produit un spot lumineux.



Le faisceau électronique peut être dévié à l'aide d'un champ magnétique qui est p.ex. créé par des bobines (non montrées). Si la déviation se fait rapidement on peut dessiner des courbes sur l'écran voire produire des figures ou images. Le tube cathodique à déviation magnétique était longtemps la pièce maîtresse d'écrans de télévisions ou d'ordinateurs. Ces types d'écrans ont cependant été largement supplantés par les écrans à cristaux liquides (LCD) et les écrans électroluminescents (OLED ou QLED).

- Dans un **spectromètre de masse**, des ions sont déviés à l'aide d'un champ magnétique, puis récupérés par un détecteur sur lequel la position des ions va permettre d'analyser leur composition.



- Dans un **cyclotron**, des particules chargées sont déviées à l'aide d'un champ magnétique, mais aussi accélérées à l'aide d'un champ électrique afin d'atteindre des vitesses vertigineuses.

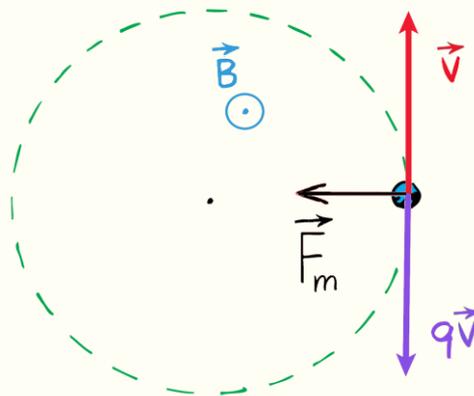
### Exercice résolu 1

**Énoncé :** Dans le dispositif expérimental de la page titre (photo), des électrons sont injectés à une vitesse de 1800 km/s vers le haut. L'intensité du courant électrique dans les bobines de Helmholtz est telle que l'intensité du champ magnétique uniforme entre les bobines vaut  $10^{-4}$  T.

- En analysant la trajectoire des électrons sur la photo, déterminer le sens du champ magnétique régnant entre les bobines de Helmholtz.
- Calculer l'intensité de la force de Lorentz.
- On tourne l'ampoule d'un quart de tour autour de son axe. Que devient alors la trajectoire des électrons ? Justifier.

**Solutions :**

- D'après la règle de la main droite,  $\vec{B}$  sort dans le plan de la feuille :



- Intensité de la force de Lorentz :

$$F_m = |q| v B \sin \alpha$$

Puisque  $q = -e$  et  $\alpha = 90^\circ$ , il vient :

$$F_m = e v B$$

A.N. :

$$F_m = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1,8 \cdot 10^6 \cdot 10^{-4} = 2,9 \cdot 10^{-17} \text{ N}$$

- Le vecteur champ magnétique  $\vec{B}$  devient colinéaire à  $\vec{v}$ .

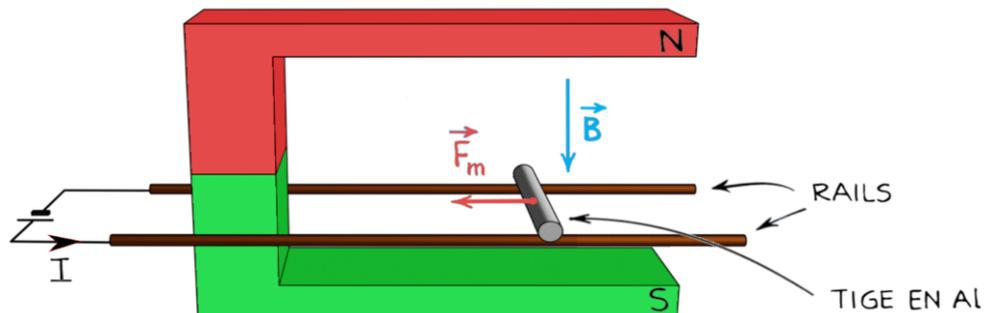
D'où :  $F_m = |q| v B \underbrace{\sin \alpha}_0 = 0$  (car  $\alpha = 0$  ou  $\alpha = 180^\circ$ ).

D'après le principe d'inertie, les électrons effectuent un MRU.

## 5 Force de Laplace

### 5.1 Mise en évidence expérimentale

Une tige en aluminium est placée dans le champ magnétique d'un aimant en U, perpendiculairement à deux rails conducteurs horizontaux et parallèles qui sont connectés à une batterie :



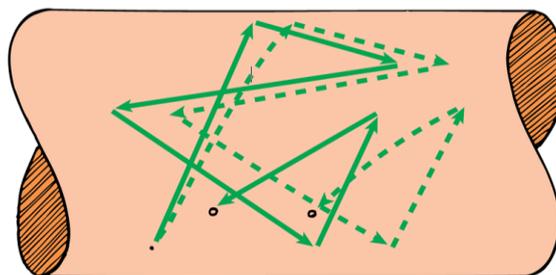
Observations :

- Lorsqu'on fait passer un courant dans les rails et la tige, la tige se déplace en restant perpendiculaire aux rails.
- Si l'on inverse le sens du courant (inversion des pôles de la batterie) ou si l'on inverse le sens du champ magnétique (rotation de l'aimant de 180 degrés autour de son axe longitudinal), la tige se déplace dans l'autre sens que précédemment.
- Si le champ magnétique est dirigé parallèlement à la tige, la tige ne se déplace pas.

On conclut qu'un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique subit une force magnétique. La force magnétique est dirigée perpendiculairement au conducteur et perpendiculairement au champ magnétique. Cette force porte le nom de **force de Laplace**.

### 5.2 Interprétation microscopique

Le courant électrique qui traverse un conducteur métallique est un déplacement orienté d'électrons libres, qui sont animés d'un mouvement très varié. Les chocs avec les ions du réseau métallique les ralentissent, le champ électrique créé par le générateur les accélère. Leur vitesse de dérive est de l'ordre de seulement quelques millimètres par minute.



*La trajectoire en trait continu représente le mouvement désordonné d'un électron libre sans courant électrique. La trajectoire en pointillé représente le mouvement de l'électron dans le cas d'un courant électrique vers la gauche (mouvement orienté de l'électron vers la droite).*

Lorsqu'on place un conducteur dans un champ magnétique et on le fait traverser par un courant électrique, chaque électron va subir la force de Lorentz. La résultante des forces de Lorentz sur les électrons en mouvement dans le conducteur s'identifie à la force de Laplace sur le conducteur.

### 5.3 Expression de la force de Laplace

Considérons un conducteur métallique rectiligne de longueur  $\ell$  et de section  $S$ , parcouru par un courant d'intensité  $I$  et plongé dans un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  qui lui est perpendiculaire. La force de Lorentz s'exerçant sur un électron de conduction s'écrit :

$$\vec{F}_{m,e} = q \vec{v} \times \vec{B} = -e \vec{v} \times \vec{B}$$

Soit  $N$  le nombre d'électrons se trouvant à un instant donné dans le volume considéré. En supposant que tous les électrons se déplacent à la même vitesse de dérive  $\vec{v}$ , la force magnétique résultante appliquée au milieu  $M$  du conducteur s'écrit :

$$\vec{F}_m = N \vec{F}_{m,e} = -N e \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

En supposant que les électrons de conduction parcourent la distance  $\ell$  pendant la durée  $\Delta t$  :

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

En introduisant le **vecteur longueur**  $\vec{\ell}$ , orienté dans le sens du courant et de norme  $\ell$  :

$$\vec{v} = -\frac{\vec{\ell}}{\Delta t} \quad (2)$$

Le signe moins traduit le fait que les électrons de conduction se déplacent dans le sens inverse du sens conventionnel du courant.

En insérant (2) dans (1) :

$$\vec{F}_m = N e \frac{\vec{\ell}}{\Delta t} \times \vec{B} \quad (3)$$

La charge positive transportée pendant la durée  $\Delta t$  valant  $Ne$ , l'intensité du courant s'écrit :

$$I = \frac{N e}{\Delta t} \quad (4)$$

En insérant (4) dans (3) :

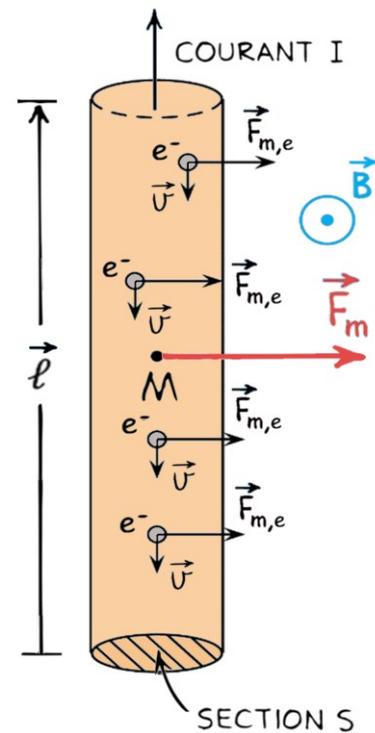
$$\vec{F}_m = I \vec{\ell} \times \vec{B}$$

### 5.4 Définition

Un conducteur rectiligne parcouru par un courant électrique d'intensité  $I$  et plongé sur sa longueur  $\ell$  dans un champ magnétique  $\vec{B}$  subit une force magnétique  $\vec{F}_m$ , appelée force de Laplace, telle que :

$$\vec{F}_m = I \vec{\ell} \times \vec{B}$$

$\vec{\ell}$  est orienté dans le sens du courant et de norme  $\ell$ .



## 5.5 Caractéristiques de la force de Laplace

1. *Point d'application* : centre de la partie du conducteur qui est plongée dans le champ magnétique
2. *Direction* : perpendiculaire au plan formé par  $\vec{\ell}$  et  $\vec{B}$  (fig. 3)
3. *Sens* : déterminé à l'aide de la règle de la main droite (fig. 4)
  - Le pouce suivant  $\vec{\ell}$  c.-à-d. dans le sens du courant
  - L'index suivant le champ magnétique  $\vec{B}$
  - Le majeur indique alors le sens de la force magnétique  $\vec{F}_m$
4. *Norme* :  $F_m = I \ell B \sin \alpha$ , où  $\alpha$  est l'angle formé entre  $\vec{\ell}$  et  $\vec{B}$

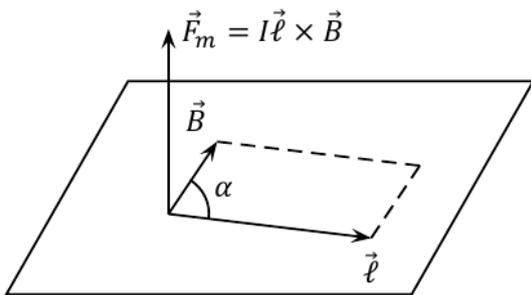


Fig. 3 : Direction de la force de Laplace

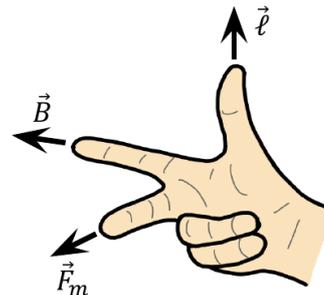


Fig. 4 : Règle de la main droite

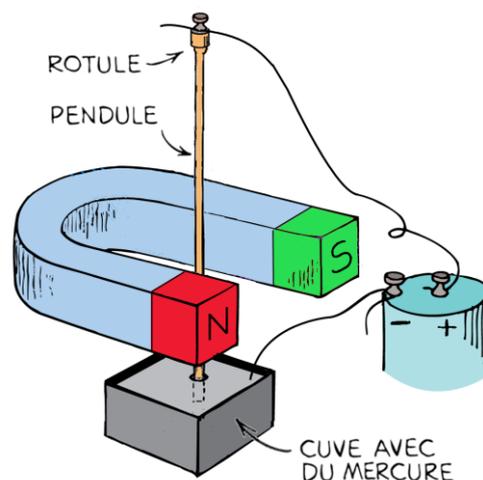
### Remarques

- Un conducteur ne subit pas de force de Laplace :
  - en l'absence de courant ( $I = 0$ )
  - en l'absence de champ magnétique ( $B = 0$ )
  - s'il est dirigé parallèlement au champ magnétique ( $\alpha = 0$  ou  $\alpha = 180^\circ \Rightarrow \sin \alpha = 0$ )
- Un conducteur subit une force de Laplace maximale s'il est dirigé perpendiculairement au champ magnétique :  $F_m = I \ell B \underbrace{\sin 90^\circ}_1 = I \ell B$
- Si le champ magnétique n'englobe pas la totalité du conducteur, la longueur  $\ell$  se rapporte à la partie du conducteur qui est effectivement plongée dans le champ magnétique.

### ■ As-tu compris ?

Le conducteur-pendule est mobile autour d'une rotule (voir figure).

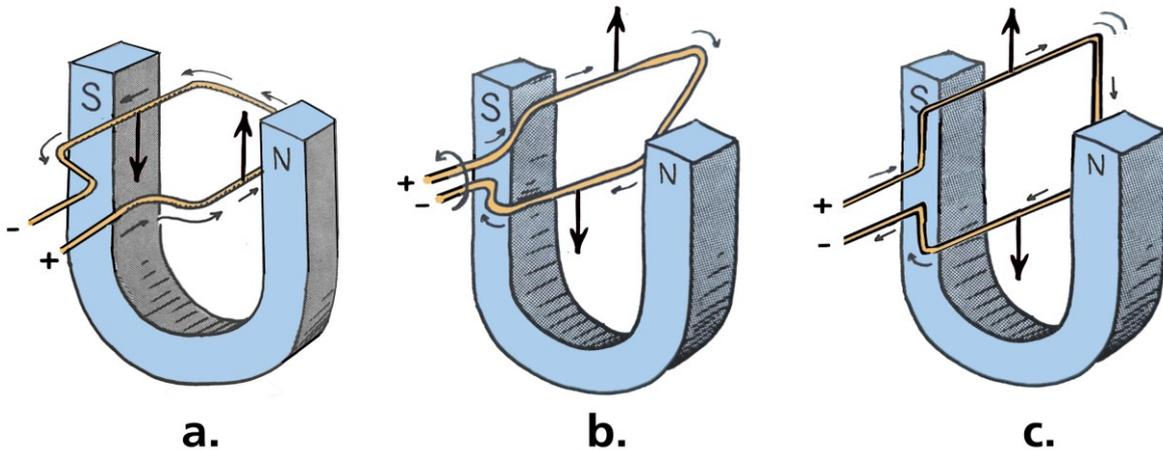
- a) Représenter la force de Laplace qui fait dévier le pendule.
- b) Que devient le sens de déviation du pendule si
  - les pôles de la batterie sont inversés ?
  - l'aimant est retourné ?
  - les pôles de la batterie sont inversés et l'aimant est retourné ?



## 5.6 Application technique : le moteur électrique à courant continu

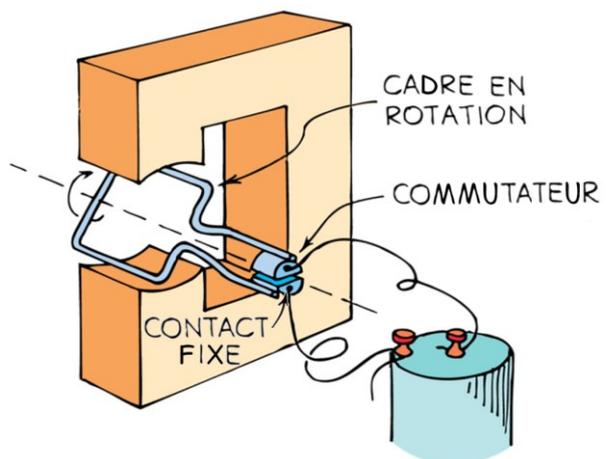
Un moteur électrique transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation. Son principe de fonctionnement peut être expliqué à l'aide de la force de Laplace.

Considérons un cadre rectangulaire qui est plongé dans le champ magnétique d'un aimant en U :



- Lorsque le cadre est parcouru par un courant, il se met en rotation sous l'action d'un couple de forces de Laplace (flèches noires sur le schéma).
- L'accélération rotationnelle est plus petite parce que les bras de levier des forces sont plus petits.
- En position verticale, le couple de forces n'a plus d'effet de rotation car les droites d'action des forces passent par l'axe de rotation (point mort). Grâce à son inertie, le cadre dépasse la position verticale. Cependant, le couple de forces n'agit alors plus dans le bon sens et tend à inverser le sens de rotation du cadre. Après plusieurs oscillations autour de la position verticale, le cadre finit par s'immobiliser dans la position verticale.

Pour entretenir la rotation, il faut donc inverser le sens du courant lorsque le cadre passe par la position verticale. À cet effet, on utilise un **commutateur**. Il est constitué par deux demi-cylindres métalliques (**collecteurs**), séparés par un isolant, qui sont fixés aux bornes du cadre. Lorsque le cadre tourne solidement avec le commutateur, les collecteurs frottent contre des contacts fixes (**balais**) ayant chacun une polarité donnée. Le système balais et commutateur assure ainsi que le sens du courant soit permuté après chaque demi-tour.



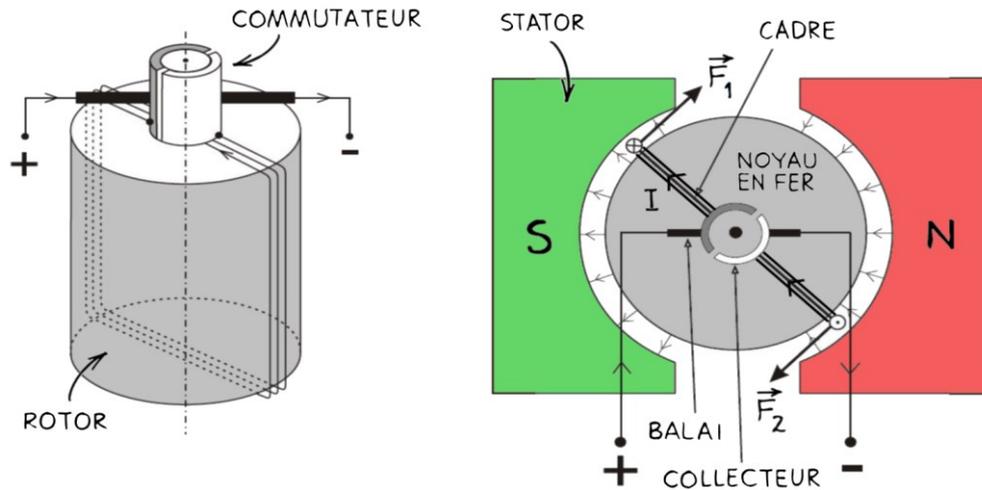
L'applet suivant illustre le fonctionnement du moteur électrique :

[https://www.walter-fendt.de/html5/phfr/electricmotor\\_fr.htm](https://www.walter-fendt.de/html5/phfr/electricmotor_fr.htm)

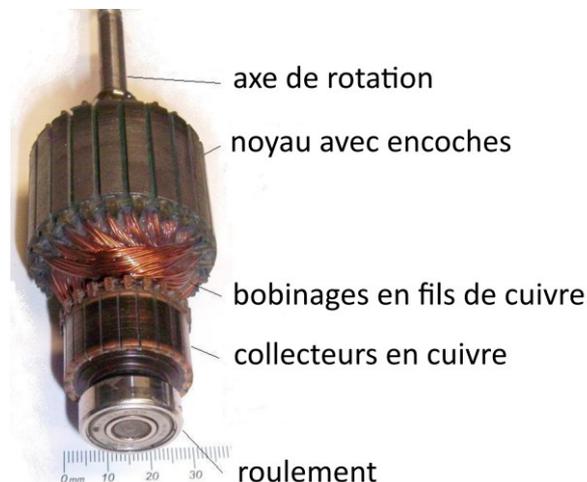
De façon générale, tout moteur électrique comprend un **stator** (partie fixe) qui crée un champ magnétique dans lequel tourne le **rotor** (partie mobile).

## Réalisation pratique

Afin d'augmenter l'effet de rotation de la force magnétique, un moteur réel ne possède pas seulement une spire de courant mais une multitude. Dans le rotor inventé par Werner von Siemens en 1856, le noyau de fer cylindrique assure que le champ magnétique est radial, de sorte que l'effet de rotation du couple de forces de Laplace  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  est toujours maximal.



Un inconvénient de ce moteur est qu'il possède deux points morts (deux positions verticales de la bobine plate sur un tour). Afin d'y remédier, on peut utiliser plusieurs bobinages décalés angulairement les uns des autres de manière régulière autour de l'axe de rotation. Le commutateur dispose alors d'une paire de collecteurs distincte pour chacun des bobinages.



## Remarques

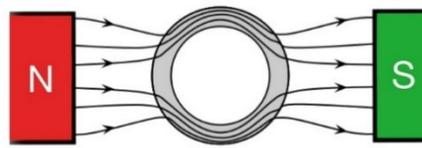
- L'aimant permanent du stator peut être remplacé par un ou plusieurs électroaimants.
- Il existe des moteurs électriques à courant continu sans commutateur et balais (« *brushless DC motor* »). Le champ magnétique du stator doit alors être réglé électroniquement pour assurer la rotation du rotor. Le rotor peut dans ce cas aussi être réalisé à l'aide d'un ou plusieurs aimants permanents.

À part le moteur électrique à courant continu, il existe également le moteur électrique à courant alternatif. Un avantage en est qu'il n'a pas besoin de commutateur et de balais.

## 6 Pour en savoir plus

### Écrantage d'un champ magnétique

Si on introduit un anneau de fer épais dans un champ magnétique, les lignes de champ magnétique restent confinées à l'intérieur de l'anneau et contournent l'intérieur de l'anneau.

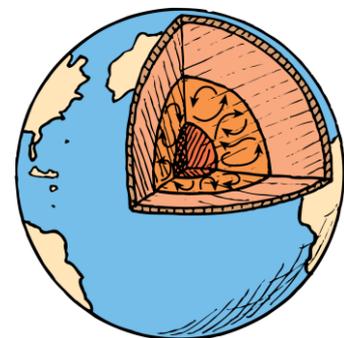


Cet écrantage magnétique est utilisé pour maintenir le champ magnétique terrestre à l'écart de matériel expérimental très sensible, de sorte à pouvoir exclure des erreurs de mesure lors de la détermination d'intensités de champs magnétiques.

L'écrantage magnétique a un effet néfaste lorsqu'on souhaite utiliser une boussole. Lorsque les voiliers en bois furent remplacés par des navires en fer, la boussole à aiguille magnétique a dû être remplacée par les gyrocompas mécaniques, dont la conception est nettement plus sophistiquée.

### Source du champ magnétique terrestre

Bien que le spectre magnétique de la Terre soit semblable à celui d'un énorme aimant droit placé au centre de la Terre, il ne peut pas en être ainsi. En effet, la température y est simplement trop élevée (au-dessus de la température de Curie). Le champ magnétique terrestre est probablement créé par des courants électriques à l'intérieur de la Terre. Sous le manteau rocheux extérieur se trouve une partie de fer fondu qui entoure le noyau solide de la Terre. Un déplacement de charges électriques en boucles dans cette partie liquide pourrait être la source du champ magnétique terrestre. Ce déplacement de charges pourrait résulter de **courants de convection**, provoqués par la température élevée du noyau central, dans cette partie liquide à l'intérieur de la Terre. Ces courants de convection, combinés aux effets de rotation de la Terre produiraient un déplacement de charges. En raison de la grande taille de la Terre, il suffit que la vitesse de déplacement des charges soit d'environ un millimètre par seconde pour créer le champ magnétique terrestre actuel.



### Inversion du champ magnétique terrestre

Le champ magnétique terrestre n'est pas stable. Des analyses magnétiques des couches rocheuses ont révélé que le champ magnétique terrestre a fluctué tout au long de l'histoire géologique. Les domaines magnétiques dans le fer fondu sont désorientés en raison de l'agitation thermique, mais ont cependant une légère tendance à s'aligner selon le champ magnétique terrestre. Après le refroidissement et la solidification du fer, cette orientation persiste dans le fer de la roche. Ces traces dans les couches rocheuses montrent qu'il y a eu des périodes pendant lesquelles l'intensité du champ magnétique de la Terre a diminué à zéro, suivi d'une inversion des pôles magnétiques. Plus de 20 inversions ont eu lieu au cours des 5 derniers millions d'années. La plus récente a eu lieu il y a près de 700000 ans. Les inversions antérieures se sont produites il y a 870000 et 950000 ans. On ne peut pas prédire quand la prochaine inversion des pôles aura lieu car les séquences d'inversion ne sont pas régulières. Cependant, des mesures récentes



montrent une diminution de plus de 5% de l'intensité du champ magnétique terrestre au cours des 100 dernières années. Si cette évolution se poursuit, nous pourrions bien connaître une nouvelle inversion d'ici 2000 ans. L'inversion des pôles magnétiques n'est pas propre à la Terre. Le champ magnétique du Soleil s'inverse régulièrement, avec une période de 22 ans.

## Applications des électroaimants

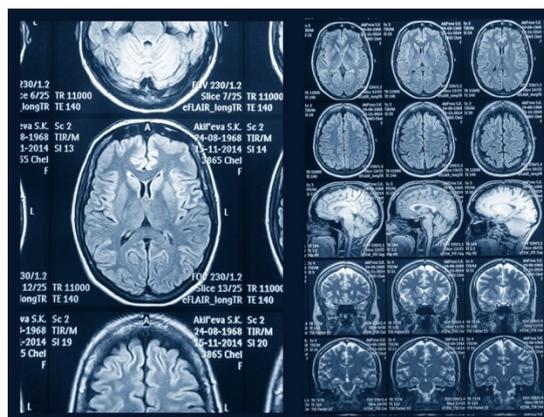
Les électroaimants font partie de notre vie quotidienne, que ce soit dans les systèmes sonores ou toutes sortes de moteurs électriques (contenus dans à peu près tous les engins qui tournent). En voici quelques applications techniques :

- Dans les dépotoirs, des électroaimants puissants sont utilisés pour soulever des déchets ferromagnétiques.
- Dans les trains *Maglev* (trains à lévitation magnétique), la lévitation du train est accomplie par des électroaimants situés le long du rail. Ces électroaimants repoussent les gros aimants permanents fixés en bas du train. Une fois que le train lévite de quelques centimètres au-dessus du rail, un courant alternatif circule à travers d'autres électroaimants fixés sur les bords du rail. La polarité magnétique de ces électroaimants alterne. Des poussées et tractions alternées propulsent le train vers l'avant. À l'aide de la lévitation, le frottement sur les rails subi par les trains conventionnels est éliminé. Les vitesses des trains *Maglev* ne sont limitées que par la résistance de l'air et le confort des passagers.



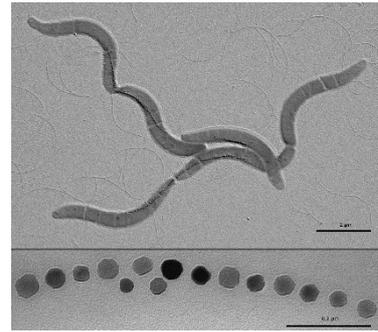
- Dans les accélérateurs de particules :  
Les électroaimants les plus puissants utilisent des bobines supraconductrices, à travers lesquelles d'énormes courants électriques circulent sans aucune résistance électrique, et donc sans perte d'énergie sous forme d'énergie thermique. Les électroaimants qui utilisent des bobines supraconductrices produisent des champs magnétiques extrêmement puissants (bien que beaucoup d'énergie soit nécessaire pour maintenir les supraconducteurs à une température très froide). Dans le « Large Hadron Collider (LHC) » au CERN à Genève, des aimants supraconducteurs guident des particules de haute énergie dans un tunnel d'un accélérateur ayant une circonférence de 27 km.
- Les aimants supraconducteurs sont également utilisés dans les appareils d'imagerie par résonance magnétique (IRM) dans les hôpitaux. En effet, on a besoin d'un champ magnétique d'une grande puissance et stable, afin de créer une magnétisation des tissus grâce à l'alignement des moments magnétiques de spin.

De cette façon l'IRM nous permet d'avoir, de façon non invasive, des images en deux ou en trois dimensions de l'intérieur du corps humain.



## Biomagnétisme

Les bactéries magnétotactiques sont des procaryotes aquatiques qui ne peuvent pas distinguer le haut et le bas à l'aide de la gravitation. En revanche, elles ont la particularité de biosynthétiser des cristaux intracellulaires constitués de magnétite. Ces nanocristaux s'alignent en chaînes dans le cytoplasme de la bactérie pour former de minuscules boussoles, appelées magnétosomes. Ils utilisent ensuite ces magnétosomes pour détecter l'inclinaison du champ magnétique terrestre. Doté de ce sens d'orientation, ces organismes sont ainsi capables de se déplacer le long des lignes de champ magnétique.



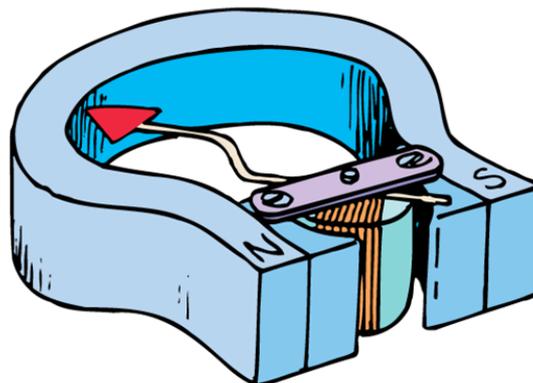
Ces bactéries ne sont pas les seuls organismes avec un sens magnétique. Les pigeons ont des boussoles naturelles dans leur crâne qui sont reliés par un grand nombre de nerfs au cerveau du pigeon. Les pigeons peuvent non seulement discerner les directions longitudinales le long du champ magnétique, mais ils peuvent également détecter la latitude par l'inclinaison du champ magnétique terrestre.

Les abeilles, les guêpes, les papillons monarques, les tortues de mer et les poissons rejoignent le groupe de créatures dotées d'un sens magnétique. Des cristaux de magnétite qui ressemblent à ceux trouvés dans les bactéries magnétotactiques ont même été détectés dans le cerveau humain.

rapidement avec l'altitude. Les rayons cosmiques pénètrent donc dans ton corps pendant que tu lis ce cours - et même lorsque tu ne le lis pas.

## Galvanomètre à cadre mobile

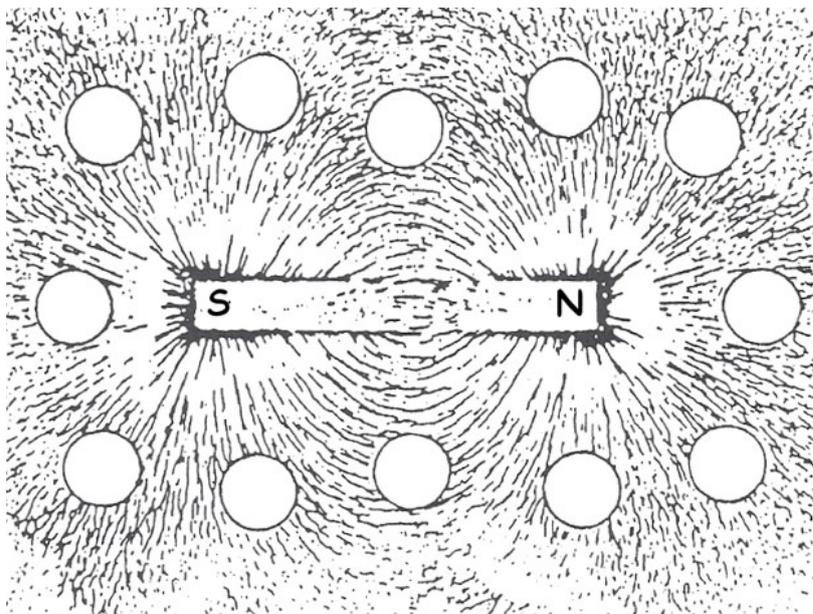
Le galvanomètre à cadre mobile est un type d'ampèremètre très sensible qui utilise la force de Laplace à la mesure de l'intensité de courant. Un cadre comportant plusieurs spires qui sont embobinées autour d'un noyau de fer cylindrique est mobile autour d'un axe de rotation. Lorsque le cadre, qui est placé dans l'entrefer d'un aimant permanent, est parcouru par un courant il commence à tourner sous l'effet d'un couple de forces de Laplace  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$ . Un ressort spiral limite alors le mouvement en exerçant un couple de rappel qui devient d'autant plus grand que l'angle de déviation de l'aiguille est grand. Finalement, l'aiguille s'immobilise dans une position d'équilibre stable. La déviation de l'aiguille est d'autant plus grande que l'intensité  $I$  du courant est grande.



## 7 Exercices

### Champ magnétique

1. Laquelle des affirmations suivantes est fausse ?
  - A. L'intensité du champ magnétique augmente lorsque les lignes de champ se rapprochent
  - B. L'intensité du champ magnétique reste constante lorsque les lignes de champ sont parallèles
  - C. L'intensité du champ magnétique diminue lorsque les lignes de champ s'écartent
  - D. L'intensité du champ magnétique diminue lorsque les lignes de champ se rapprochent
2. Le champ magnétique entre les branches d'un aimant en U est caractérisé par :
  - A. Uniquement une direction constante
  - B. Uniquement une intensité constante
  - C. Uniquement un sens constant
  - D. Une direction, un sens et une intensité constants
3. La figure ci-dessous montre un aimant droit autour duquel on a saupoudré de la limaille de fer et disposé des boussoles. Représenter les aiguilles des boussoles par une flèche (la pointe de la flèche représente le pôle N de l'aiguille).

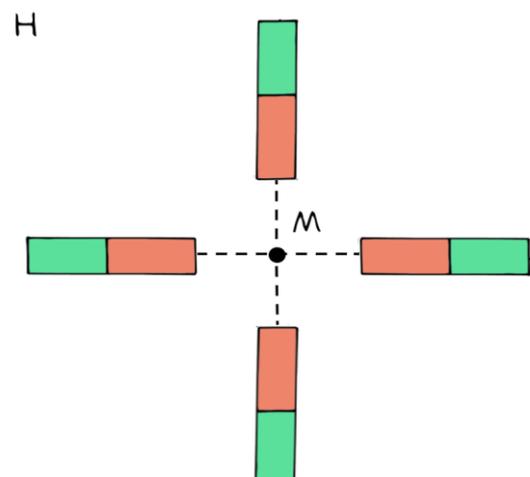
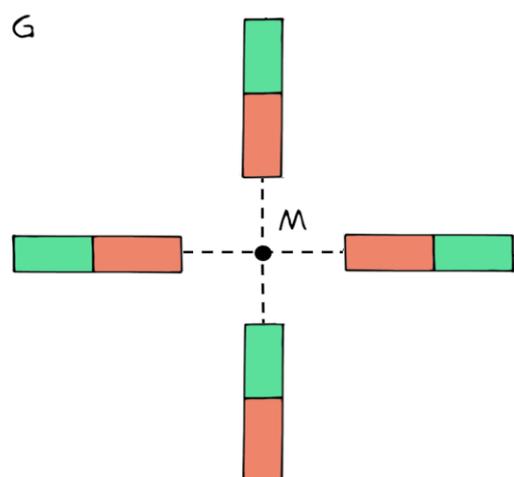
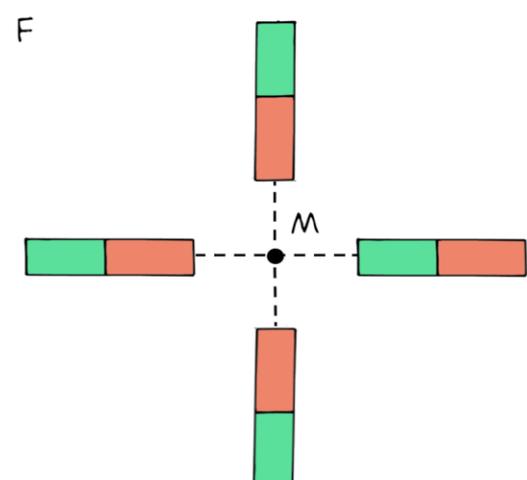
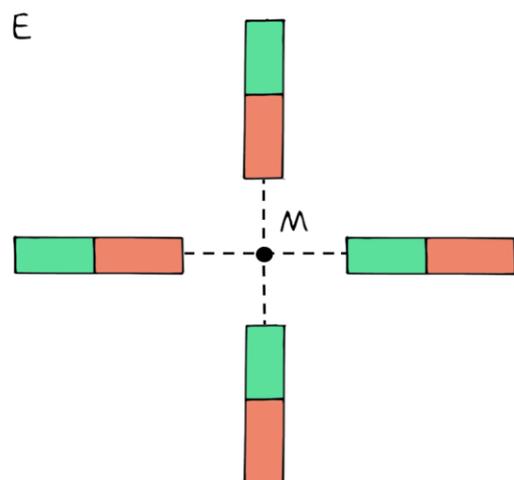
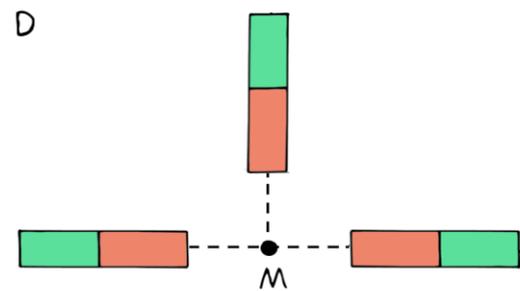
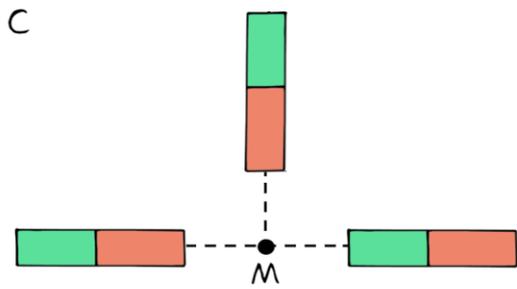
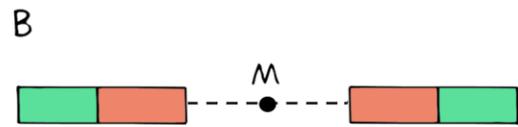
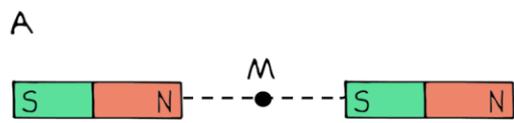


4. Tu disposes de deux barres de fer dont l'une est aimantée et l'autre ne l'est pas. Comment peux-tu déterminer quelle barre est aimantée si tu ne disposes d'aucun autre outil ?



5. On veut désaimanter un corps en fer. Laquelle des méthodes proposées est fausse ?
  - A. On peut le désaimanter à l'aide d'un champ magnétique.
  - B. On peut le désaimanter à l'aide d'un champ électrique.
  - C. On peut le désaimanter en le chauffant à une température assez élevée.
  - D. On peut le désaimanter en le frappant assez fortement contre un corps très dur.

6. On suppose que tous les aimants sont identiques et que le point M est équidistant de tous les aimants. L'intensité du champ magnétique créé par un seul aimant en M vaut  $B$ .  
On a les cas suivants :

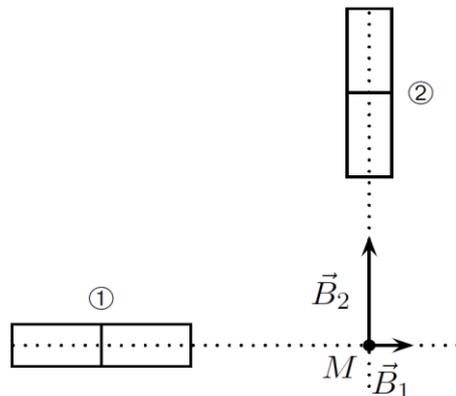


Indiquer pour quels cas l'affirmation concernant le vecteur champ magnétique résultant en M est correcte.

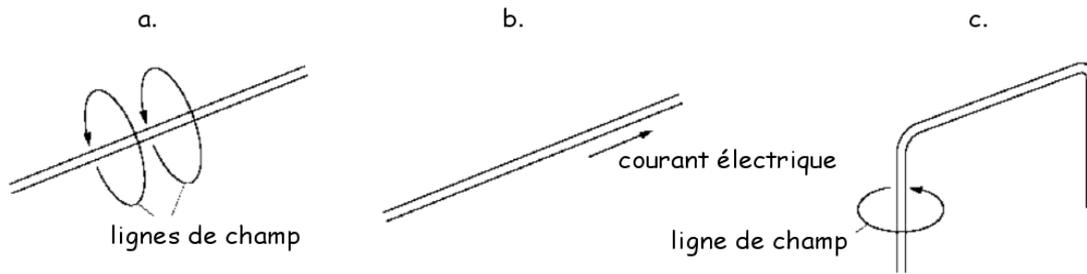
	Affirmation	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Le champ magnétique est nul.								
2	La direction du champ magnétique est horizontale.								
3	La direction du champ magnétique est verticale.								
4	L'intensité du champ magnétique est égale à B.								
5	L'intensité du champ magnétique est égale à 2B.								
6	L'intensité du champ magnétique est égale à $\sqrt{5}B$ .								
7	L'intensité du champ magnétique est égale à $2\sqrt{2}B$ .								

7. En un point  $M$  de l'espace, on superpose deux champs magnétiques  $\vec{B}_1$  et  $\vec{B}_2$  qui sont créés par deux aimants droits 1 et 2 dont les axes sont perpendiculaires ; les intensités des champs valent  $B_1 = 10 \text{ mT}$  et  $B_2 = 30 \text{ mT}$ .

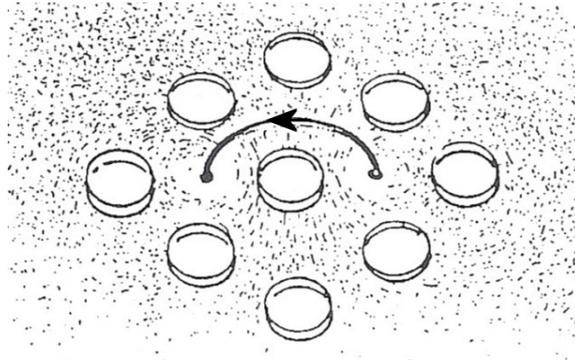
- Déterminer les pôles des aimants.
- Déterminer la direction prise par une aiguille aimantée placée au point  $M$ .
- Calculer l'intensité du champ magnétique résultant en  $M$ .



- Quel(s) champ(s) de force entoure(nt) une charge électrique au repos ? Quel champ de force supplémentaire entoure la charge lorsque celle-ci est en mouvement ?
- Un faisceau de protons à haute énergie émerge d'un accélérateur de particules. Est-ce qu'un champ magnétique est associé à ces particules ? Justifier.
- Un câble parcouru par un courant électrique est orienté dans la direction Nord-Sud. Dans quelle direction une boussole placée en dessous du câble s'orienter-elle ?
- Un fil rectiligne est parcouru par un courant électrique et crée un champ magnétique dans son entourage. Laquelle des affirmations est correcte ?
  - L'intensité du champ magnétique diminue si la distance au conducteur diminue.
  - L'intensité du champ magnétique augmente si la distance au conducteur augmente.
  - L'intensité du champ magnétique diminue si la distance au conducteur augmente.
  - L'intensité du champ magnétique est indépendante de la distance au conducteur.
- Un fil rectiligne est parcouru par un courant électrique. Que se passe-t-il avec les lignes de champ magnétique lorsque le sens du courant est inversé ?
- Est-ce que le champ magnétique créé par une spire de courant est-il uniforme ? Justifier.
- Déterminer dans les 3 cas ci-dessous, soit le sens du courant électrique soit le sens des lignes de champ magnétique tout au long du conducteur.



15. La figure ci-dessous montre une spire traversant un plan et parcourue par un courant électrique (sens indiqué par la flèche) autour de laquelle on a saupoudré de la limaille de fer et disposé des boussoles. Représenter les aiguilles des boussoles par une flèche.



16. On branche un solénoïde aux bornes d'un générateur. Laquelle des affirmations est fausse pour le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde :
- Le champ magnétique  $\vec{B}$  est constant
  - Les lignes de champ sont parallèles
  - L'intensité du champ magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant  $I$  traversant le solénoïde
  - L'intensité du champ magnétique est proportionnelle au nombre de spires du solénoïde
  - L'intensité du champ magnétique est proportionnelle à la longueur du solénoïde
  - L'intensité du champ magnétique est proportionnelle au nombre de spires par unité de longueur du solénoïde
17. On branche un solénoïde aux bornes d'un générateur. On veut ensuite augmenter l'intensité du champ magnétique créé par le solénoïde. Laquelle des propositions suivantes est fausse ?
- On peut augmenter l'intensité du courant à travers le solénoïde
  - On peut augmenter seulement la longueur du solénoïde
  - On peut augmenter seulement le nombre de spires du solénoïde
  - On peut augmenter le nombre de spires par unité de longueur du solénoïde
  - On peut insérer un noyau de fer à l'intérieur du solénoïde
18. Que devient l'intensité du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde lorsque qu'on :
- double sa longueur tout en assurant que la densité des spires reste la même ?
  - diminue le rayon du solénoïde de moitié sans changer d'autres paramètres ?
  - rembobine le fil conducteur du solénoïde de façon homogène sur la moitié de sa longueur ?
  - introduit un noyau de fer dans le solénoïde ?
19. Un ressort à spires non jointives est suspendu verticalement. Lorsqu'on le fait parcourir par un courant continue ses spires vont-elles a) s'éloigner b) s'approcher ou c) rester immobiles ? Justifier.

20. Deux solénoïdes 1 et 2 sont parcourus par des courants d'intensité  $I_1$  et  $I_2$ . Le solénoïde 1 possède 100 spires et a une longueur de 6 cm. Le solénoïde 2 possède 200 spires et a une longueur de 10 cm. Afin que le champ magnétique créé à l'intérieur des deux solénoïdes soit identique, il faut que  $\frac{I_1}{I_2}$  soit égal à :

- A.  $\frac{3}{10}$       B.  $\frac{5}{6}$       C. 1      D.  $\frac{6}{5}$       E.  $\frac{10}{3}$

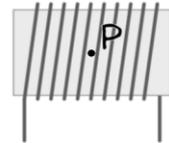
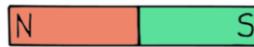
21. Une bobine, de longueur 20 cm et ayant 1000 spires, est traversée par un courant électrique d'intensité 100 mA. Quelle est l'intensité du champ magnétique à l'intérieur de la bobine ?

- A. 126 mT      B. 628 mT      C. 126  $\mu$ T      D. 628  $\mu$ T      E. 126 nT      F. 628 nT

22. Un solénoïde de longueur de 32 cm comporte 1400 spires. L'axe du solénoïde est perpendiculaire au méridien magnétique. On place en son centre une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical. Lorsque le solénoïde est parcouru par un courant électrique, l'aiguille est déviée d'un angle de  $42^\circ$ .

- Sachant que la composante horizontale du champ magnétique terrestre vaut  $20 \mu\text{T}$ , calculer l'intensité du courant en mA.
- Déterminer, en justifiant, l'angle dont l'aiguille va tourner si le sens du courant dans la bobine est brutalement inversé.

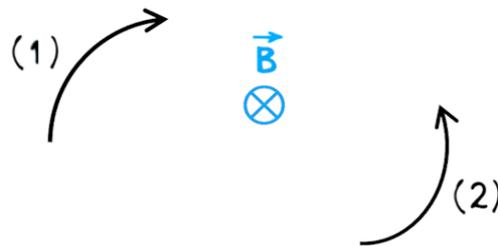
23. Un aimant droit crée en un point  $P$  à l'intérieur d'un solénoïde de 140 spires et de longueur 16 cm un champ magnétique de valeur  $2,5 \text{ mT}$ . Déterminer le sens et l'intensité du courant électrique qui va annuler le champ magnétique en  $P$ .



24. Lorsqu'un noyau de fer est introduit dans un électroaimant, le champ magnétique à l'intérieur de l'électroaimant est intensifié. Expliquer à l'aide du modèle microscopique.

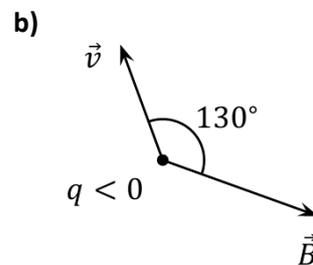
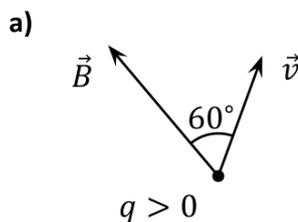
## Force de Lorentz

25. On observe les trajectoires suivantes pour des particules chargées dans un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme.



Déterminer le signe de la charge pour chacune des deux particules.

26. Déterminer dans les cas suivants la direction, le sens et la norme de la force de Lorentz, sachant que  $v = 20 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ ,  $B = 300 \text{ mT}$  et  $|q| = 2 e$  :



27. Vrai ou faux ? Motiver votre réponse.

- La trajectoire d'une particule chargée est toujours circulaire dans un champ magnétique uniforme.
- La force de Lorentz est toujours perpendiculaire au champ magnétique.
- L'accélération d'une particule chargée dans un champ magnétique est toujours nulle.
- Le travail de la force magnétique est toujours nul.
- Un électron et un proton se déplaçant avec la même vitesse  $\vec{v}$ , dans un champ magnétique constant, subissent une force de Lorentz de même intensité.

28. Comment doit se déplacer une particule chargée dans un champ magnétique uniforme, afin que l'intensité de la force magnétique soit maximale. Expliquer.

29. Un électron peut-il se déplacer sans être dévié dans une portion de l'espace où règne un champ magnétique  $\vec{B}$  ? Expliquer.

30. Une particule chargée se déplace dans un champ magnétique uniforme et subit une force magnétique  $\vec{F}_m$ . Laquelle des affirmations est fautive ?

- L'intensité de la force magnétique double si on double la charge de la particule.
- L'intensité de la force magnétique double si on double la vitesse de la particule.
- L'intensité de la force magnétique double si on double l'intensité du champ magnétique.
- L'intensité de la force magnétique double si on double l'angle entre le vecteur vitesse et le vecteur champ magnétique.

31. Une particule chargée positivement subit une force magnétique  $\vec{F}_m$  et est déviée dans un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme. Laquelle des affirmations est fautive ?
- La direction de  $\vec{F}_m$  ne change pas.
  - L'intensité de la force magnétique dépend de l'angle entre  $\vec{B}$  et  $\vec{v}$ .
  - La force magnétique  $\vec{F}_m$  est perpendiculaire au plan formé par  $\vec{B}$  et  $\vec{v}$ .
  - La force magnétique  $\vec{F}_m$  peut être colinéaire à  $\vec{v}$ .
  - Le mouvement de la particule chargée est uniforme.
32. On suppose placer un électron au repos à l'intérieur d'un champ magnétique uniforme. Laquelle des affirmations est correcte ?
- L'électron va rester au repos
  - L'électron va subir une force et aura un mouvement rectiligne uniformément accéléré
  - L'électron va se mettre en mouvement et aura ensuite un mouvement uniforme
  - Selon l'orientation du champ magnétique, l'électron va rester au repos ou va se mettre en mouvement
33. Un électron est dévié en passant dans une certaine portion de l'espace. Peut-on affirmer qu'il existe obligatoirement un champ magnétique  $\vec{B}$  dans cette portion de l'espace ? Expliquer.
34. Peut-on dévier un neutron à l'aide d'un champ magnétique ? Expliquer.
35. Peut-on accélérer un proton à partir du repos à l'aide d'un champ **a)** électrique ; **b)** magnétique ? Expliquer.
36. Un proton et un électron pénètrent avec la même vitesse  $\vec{v}$  dans un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  qui est perpendiculaire à  $\vec{v}$ . Laquelle des affirmations est correcte ?
- Aucune des particules ne subit de force magnétique
  - La force magnétique subie par le proton est plus grande que celle subie par l'électron
  - La force magnétique subie par le proton a même intensité que celle subie par l'électron
  - La force magnétique subie par le proton est plus petite que celle subie par l'électron
37. Une particule  $\alpha$  se déplace avec une vitesse  $v = 2,0 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  dans un champ magnétique d'intensité 200 mT et perpendiculaire au vecteur vitesse. Comparer la force magnétique et le poids subis par la particule  $\alpha$ . Conclure.
38. Un proton pénètre avec une vitesse  $\vec{v}$  d'intensité  $2,0 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  horizontalement dans une région de l'espace où règne un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme perpendiculaire à  $\vec{v}$ . Il subit alors une force  $\vec{F}$  d'intensité  $5,0 \cdot 10^{-14}$  N et est dévié vers le haut.
- Quel est la trajectoire du proton dans cette portion de l'espace.
  - Faites une figure de la situation et indiquez les vecteurs  $\vec{v}$  et  $\vec{F}_m$ , ainsi que la trajectoire du proton.
  - Déterminer les caractéristiques du champ magnétique  $\vec{B}$ .
  - Comment varie le rayon de la trajectoire du proton si on augmente l'intensité du champ magnétique ? Expliquer.

39. Un électron et un proton pénètrent avec la même vitesse  $\vec{v}$  dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$ .



- Vers où est dévié l'électron, respectivement le proton ? Expliquer.
  - Quelle est la trajectoire du mouvement de chacune des deux charges ?
  - Comparer l'intensité des forces subies par les deux charges. Expliquer.
  - Comparer l'accélération des particules chargées. Expliquer.
40. Un proton et une particule  $\alpha$  pénètrent avec la même vitesse  $\vec{v}$  dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$ .



- Vers où est dévié le proton, respectivement la particule  $\alpha$  ? Expliquer.
  - Quelle est la trajectoire du mouvement de chacune des deux charges ?
  - Comparer l'intensité des forces subies par les deux charges. Expliquer.
  - Comparer l'accélération des particules chargées. Expliquer.
41. Un électron et un proton pénètrent avec la même vitesse  $\vec{v}$  dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  de sorte que le vecteur vitesse soit colinéaire au vecteur champ magnétique.
- Vers où est dévié l'électron, respectivement le proton ? Expliquer.
  - Quelle est la trajectoire du mouvement de chacune des deux charges ?
  - Comparer l'intensité des forces subies par les deux charges. Expliquer.
42. Le travail de la force magnétique d'une particule chargée en mouvement dans un champ magnétique uniforme est :
- Toujours négatif
  - Toujours nul
  - Toujours positif
  - Peut être positif ou négatif suivant l'orientation du champ magnétique
43. Deux particules différentes positives de charges  $q_1$  et  $q_2$  se déplacent dans un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  dont les lignes de champ sont perpendiculaires aux deux vecteurs vitesse. Elles subissent alors une force magnétique identique. Laquelle des relations est correcte ?

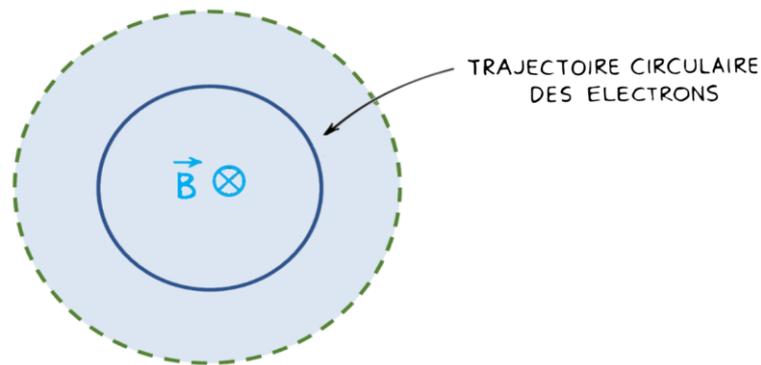
A.  $v_2 = \frac{q_1 v_1}{q_2}$

B.  $v_2 = \frac{q_2 v_1}{q_1}$

C.  $v_2 = \frac{q_1}{q_2 v_1}$

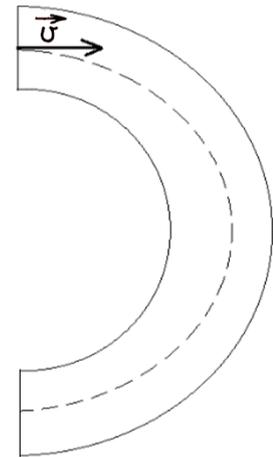
D.  $v_2 = \frac{q_2}{q_1 v_1}$

44. Les électrons d'un faisceau ont tous acquis la même vitesse sous l'effet d'une tension accélératrice  $U$ . Ils entrent alors dans une zone de champ magnétique uniforme tel qu'indiqué dans la figure ci-dessous.



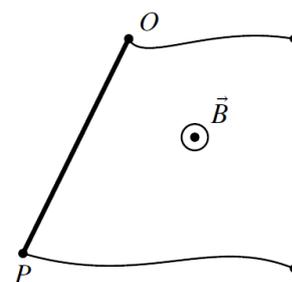
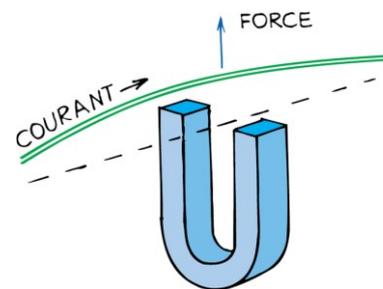
- Quel est le sens de rotation des électrons ? Expliquer.
  - Calculer l'intensité de la force subie par les électrons, si on suppose que l'intensité du champ magnétique vaut 10 mT et que la tension accélératrice vaut 100 V.
45. La figure ci-contre montre la partie semi-circulaire d'un spectromètre de masse dans lequel des cations issus d'atomes de fer rentrent avec une vitesse  $v$ . À l'aide d'un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$ , ils sont déviés afin de suivre la trajectoire indiquée en pointillée.

- Préciser la direction et le sens du champ magnétique  $\vec{B}$  dans la partie semi-circulaire.
- Sachant que l'intensité du champ magnétique vaut  $B = 2 \text{ mT}$ , que la vitesse des ions vaut  $v = 5 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  et que l'intensité de la force de Lorentz vaut  $F_m = 4,806 \cdot 10^{-17} \text{ N}$ , trouver la charge des ions ainsi que leur notation chimique.

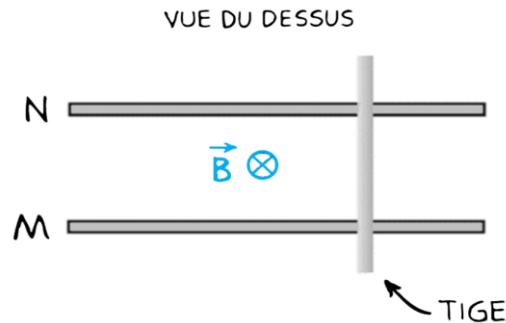


### Force de Laplace

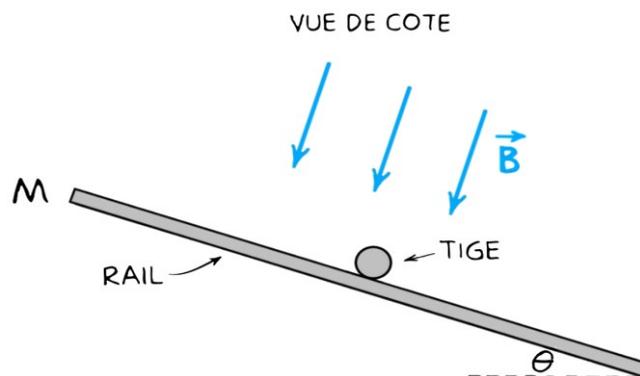
46. Considérer la figure ci-contre.
- Pourquoi le fil électrique subit une force ?
  - Indiquer sur le dessin le sens du champ magnétique de l'aimant.
  - Comment se serait déplacé le fil électrique si l'on avait inversé le sens du courant ou celui du champ magnétique ?
47. Un conducteur-pendule OP, pivotable en O, est plongé dans un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$ . Lorsqu'il est traversé par un courant électrique il s'incline par rapport à la verticale comme montré sur la figure ci-contre.
- Représenter sur une figure les forces qui agissent sur le conducteur.
  - Déterminer le sens du courant électrique.



48. Une tige en aluminium de longueur  $l = 20$  cm et de masse  $m = 60$  g repose sur deux rails conducteurs distants de  $MN = 15$  cm et disposés dans un plan horizontal. La tige peut se déplacer sans frottement le long de ces deux rails. Le dispositif est placé dans un champ magnétique uniforme d'intensité  $B = 0,3$  T. On branche un générateur de courant continu à ce dispositif : le pôle positif en N, le pôle négatif en M.



- Expliquer pourquoi le conducteur se met en mouvement et déterminer le sens de son déplacement. Représenter la force magnétique exercée sur la tige et calculer sa valeur si l'intensité du courant vaut 10 A.
  - Calculer l'accélération de la tige en aluminium.
  - Que se passe-t-il si on inverse le sens courant électrique ?
  - Que se passe-t-il si on inverse les pôles de l'aimant ?
49. On incline les deux rails et le champ magnétique de l'exercice précédent d'un angle  $\theta = 15^\circ$  par rapport au plan horizontal. La tige en aluminium reste immobile lorsqu'un courant d'intensité  $I$  la traverse.



- Énumérer et représenter les forces extérieures s'appliquant sur la tige, lorsque celle-ci reste immobile.
- Écrire la relation reliant les forces extérieures et calculer l'intensité de la force de Laplace.
- Calculer l'intensité du courant  $I$  traversant la tige et préciser son sens.
- On divise l'intensité du courant par deux.
  - Quel est alors le mouvement de la tige ? Expliquer.
  - Déterminer l'accélération de la tige.

## Révision

A. Les affirmations suivantes sont-elles vraies ou fausses ?

	Affirmation	Vrai	Faux
1	Le champ magnétique est une grandeur vectorielle.		
2	La direction du champ magnétique en un point de l'espace est tangente à la ligne de champ en ce point.		
3	Le champ magnétique $\vec{B}$ est constant dans l'entrefer d'un aimant en U.		
4	L'intensité du champ magnétique créé par un conducteur rectiligne traversé par un courant électrique diminue si la distance au conducteur diminue.		
5	L'intensité du champ magnétique $B$ à l'intérieur d'un solénoïde est proportionnelle à l'intensité du courant $I$ traversant le solénoïde.		
6	L'intensité du champ magnétique $B$ à l'intérieur d'un solénoïde augmente si on double le nombre de spires du solénoïde ainsi que sa longueur.		
7	Une aiguille aimantée se trouvant à proximité d'un fil conducteur subit une force dès qu'un courant circule à travers le fil.		
8	La force de Lorentz est toujours perpendiculaire au vecteur champ magnétique.		
9	La trajectoire d'une particule chargée est toujours circulaire, lorsqu'elle se déplace dans un champ magnétique uniforme.		
10	Le mouvement d'une particule chargée est toujours uniforme, lorsqu'elle se déplace dans un champ magnétique uniforme.		
11	Le travail de la force de Lorentz est toujours égal à zéro.		
12	Il est possible de dévier un neutron à l'aide d'un champ magnétique.		
13	Il est possible de mettre un proton en mouvement à l'aide d'un champ magnétique.		
14	Un fil rectiligne conducteur parcouru par un courant électrique est soumis à une force magnétique, s'il est placé dans un champ magnétique parallèle au sens du courant.		

- B. Un proton pénètre avec une vitesse  $\vec{v}$  dans un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  qui est perpendiculaire à  $\vec{v}$ . Les affirmations suivantes sont-elles vraies ou fausses ?

	Affirmation	Vrai	Faux
1	Le proton est dévié.		
2	La vitesse du proton augmente.		
3	Le proton subit une accélération $\vec{a}$ .		
4	La trajectoire du proton est circulaire.		
5	L'énergie cinétique du proton ne varie pas.		
6	La vitesse du proton augmente, si on augmente l'intensité du champ magnétique.		
7	La vitesse du proton varie, si on change la direction du champ magnétique.		
8	La force magnétique subie par le proton augmente, si on augmente l'intensité du champ magnétique.		
9	La force magnétique subie par le proton varie, si on change la direction du champ magnétique.		
10	L'intensité de l'accélération du proton double, si on double l'intensité du champ magnétique.		

- C. Les affirmations suivantes sont-elles valables pour un champ électrique, pour un champ magnétique ou pour les deux ?

	Affirmation	Champ $\vec{E}$	Champ $\vec{B}$
1	On peut accélérer un proton à partir du repos.		
2	On peut dévier une particule chargée en mouvement.		
3	L'intensité de la force subie par un proton dépend de la direction du champ.		
4	On peut accélérer linéairement un électron.		
5	La force subie par un électron est de sens opposé à celle subie par un proton.		
6	L'intensité de la force subie par un électron dépend de sa vitesse.		
7	L'énergie cinétique d'une particule chargée reste constante.		
8	La force subie par un neutron est nulle.		

## Crédits Photos

- © Henri Weyer – **p.0** (page titre)
- © MarcelClemens / Shutterstock.com (153723227) – **p.1** (magnétite, 1<sup>ère</sup> photo)
- © Wikimedia Commons / domaine public) – **p.1** (boussole, 2<sup>e</sup> photo)
- © LMWH/ Shutterstock.com (1415005892) – **p.1** (aimants néodyme, 3<sup>e</sup> photo)
- © imagedb.com/ Shutterstock.com (155677004) – **p.4** (champ magnétique aimant droit)
- © Wikimedia Commons / Frank Eugene Austen (1916) – **p.5** (champ magnétique aimant en U ; domaine public)
- © Richard Megna / FUNDAMENTAL PHOTOGRAPHS, NYC – **p.11** (champs magnétiques)
- © Denis Belitsky / Shutterstock.com (1579360606) – **p.17** (aurore polaire)
- © Wikimedia Commons / Ulfbastel – **p.22** (rotor réel ; domaine public)
- © Akifyeva S / Shutterstock.com (1659663457) – **p.24** (IRM)
- © Wikimedia Commons / Caulobacter subvibrioides – **p.25** (magnetospirillum ; sous licence CC BY-SA 3.0)

## Crédits Illustrations

- © Peter Hermes Furian / Shutterstock.com (1933879130) – **p.6** (nord magnétique)
- © Wikimedia Commons / Ansgar Hellwig – **p.11** (bobines de Helmholtz ; sous licence CC BY-SA 2.0)

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours. Les illustrations de Paul G. HEWITT ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

- © HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson
- © HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson
- © EPSTEIN Lewis C., HEWITT, Paul G., *Thinking Physics* – 1981, Insight Press

# 8.

## Induction électromagnétique



© Henri Weyer



## Sommaire

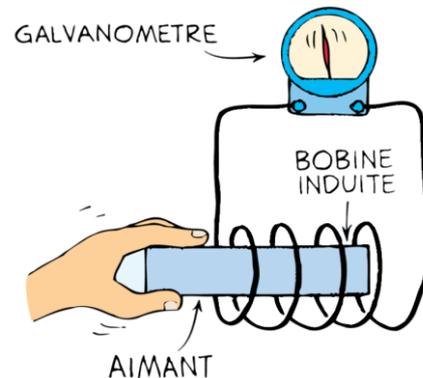
1	Expérience de Faraday .....	1
2	Cause du phénomène d'induction électromagnétique.....	2
2.1	Définition du flux magnétique.....	2
2.2	Expression du flux magnétique dans le cas d'un champ magnétique uniforme .....	2
2.3	Interprétation de Faraday .....	3
3	Loi de Lenz.....	3
4	Loi de Faraday .....	4
5	Applications techniques .....	5
5.1	L'alternateur .....	5
5.2	Le transformateur .....	7
5.2.1	Principe de fonctionnement.....	7
5.2.2	Loi du transformateur .....	8
5.2.3	Conservation de l'énergie .....	8
5.2.4	Transmission de puissance électrique.....	9
6	Pour en savoir plus .....	10
7	Exercices.....	12



# 1 Expérience de Faraday

L'expérience d'Oersted avait montré que tout courant électrique crée un champ magnétique. En 1831, deux physiciens, Michael Faraday en Angleterre et Joseph Henry aux Etats-Unis, découvrirent indépendamment qu'un champ magnétique peut également créer un courant électrique. Leur découverte allait changer le monde en permettant d'alimenter les habitations en électricité.

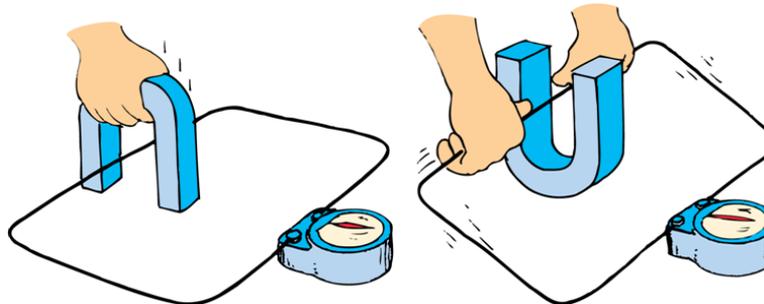
Considérons un circuit fermé constitué d'une bobine connectée à un galvanomètre, sans source de tension. Lorsqu'un aimant est plongé à l'intérieur de la bobine, on peut observer une impulsion de courant électrique dans le circuit. Dès que l'aimant s'immobilise à l'intérieur de la bobine, le courant électrique s'annule. En retirant l'aimant de la bobine, on observe de nouveau une impulsion de courant électrique, mais cette fois dans le sens inverse.



Conclusion :

Toute variation du champ magnétique à travers un circuit y provoque l'apparition d'une **f.é.m. induite  $e$** . Ce phénomène est appelé **induction électromagnétique**. Si le circuit est fermé, la f.é.m. induite y fait circuler un **courant induit  $i$** .

On peut donc générer une tension électrique sans pile ou autre source de tension, simplement en variant le champ magnétique à l'intérieur d'une spire :



La f.é.m. induite apparaît dès qu'il y a un mouvement relatif entre l'**induit** (la spire) et l'**inducteur** (l'aimant). Que l'aimant soit inséré dans la spire ou que le fil de la spire soit inséré entre les branches de l'aimant est sans importance. Les observations sont les mêmes pour le même mouvement relatif. Sans mouvement relatif, le courant induit s'annule.

## ■ As-tu-compris ?

1. Faraday a découvert qu'une f.é.m. induite est produite par...
  - A. un champ magnétique
  - B. un champ magnétique variable
  - C. un champ électrique
  - D. un champ électrique variable
2. Quelle est la relation entre la fréquence de la f.é.m. induite dans une bobine et la fréquence à laquelle un aimant est plongé et ressorti de la bobine.

## 2 Cause du phénomène d'induction électromagnétique

### 2.1 Définition du flux magnétique

Faraday a découvert que du courant induit circule dans l'induit dès que le nombre de lignes de champ magnétique à travers la surface délimitée par le circuit induit varie. Afin de caractériser ce nombre, Faraday introduit une nouvelle grandeur physique, le *flux magnétique*.

Le **flux magnétique**  $\Phi$  à travers une surface est une mesure du nombre de lignes de champ magnétique qui la traversent.

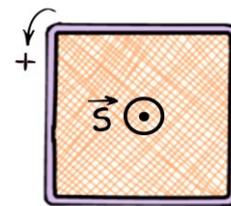
### 2.2 Expression du flux magnétique dans le cas d'un champ magnétique uniforme

Le flux magnétique est proportionnel

- à l'intensité  $B$  du champ magnétique uniforme ;
- à la surface délimitée  $S$  par le circuit.

Puisque le flux magnétique dépend également de l'orientation du circuit par rapport à  $\vec{B}$ , on introduit le **vecteur surface**  $\vec{S}$ , dont les caractéristiques sont les suivantes :

1. *Origine* : le centre de la surface
2. *Direction* : perpendiculaire à la surface
3. *Sens* : On choisit un sens arbitraire positif sur le circuit.  
Le sens de  $\vec{S}$  est donné par la règle de la main droite.
4. *Norme* :  $S = \text{aire de la surface (en m}^2\text{)}$

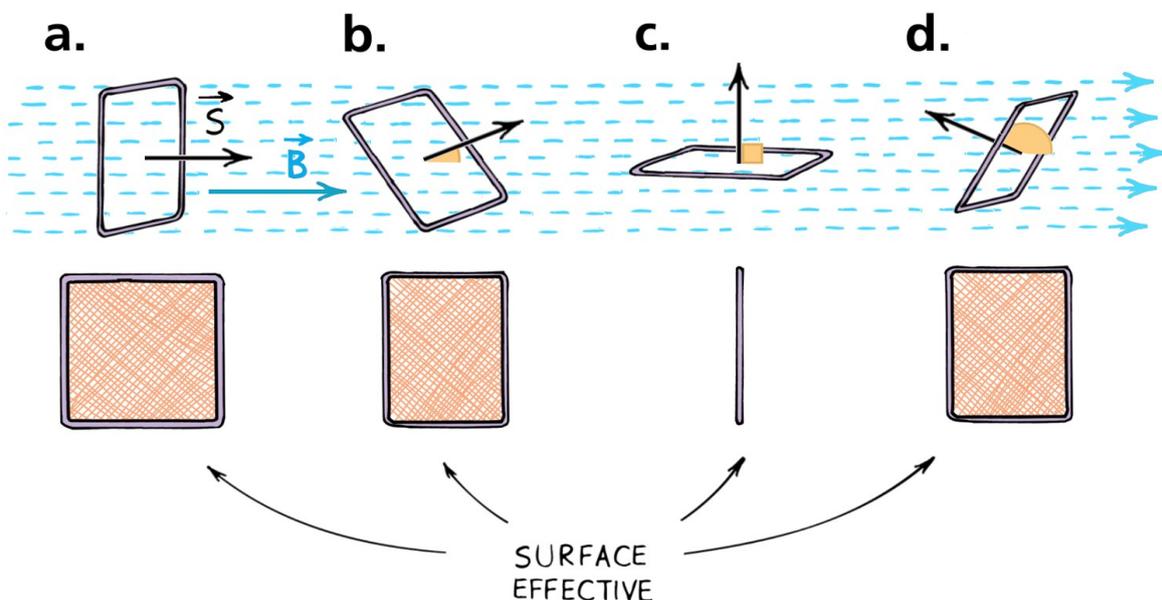


Soit  $\alpha$  est l'angle formé par le vecteur champ magnétique  $\vec{B}$  et le vecteur surface  $\vec{S}$ . Alors l'expression du flux magnétique à travers la surface s'écrit :

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B S \cos \alpha$$

L'unité SI du flux magnétique :  $[\Phi] = 1\text{T} \cdot 1\text{m}^2 = 1\text{T} \cdot \text{m}^2 = 1 \text{ weber} = 1 \text{ Wb}$

Considérons le flux magnétique à travers un cadre qui est orienté de différentes manières à l'intérieur d'un champ magnétique uniforme :



- a.  $\alpha = 0^\circ : \Phi = B S \cos 0^\circ = B S 1 = B S = \Phi_{max}$
- b.  $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ : \Phi = B S \cos \alpha > 0$
- c.  $\alpha = 90^\circ : \Phi = B S \cos 90^\circ = B S 0 = 0$
- d.  $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ : \Phi = B S \cos \alpha < 0$

Si le circuit est constitué de  $N$  spires, chacune de vecteur surface  $\vec{S}$ , les lignes de champ traversent une surface  $N$  fois plus grande, de sorte que :

$$\Phi = N \vec{B} \cdot \vec{S} = N B S \cos \alpha$$

### 2.3 Interprétation de Faraday

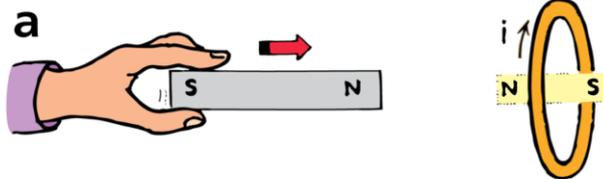
De manière générale, Faraday a formulé la cause du phénomène de l'induction électromagnétique de la manière suivante :

Toute *variation* du flux magnétique à travers un circuit fermé y induit un courant.

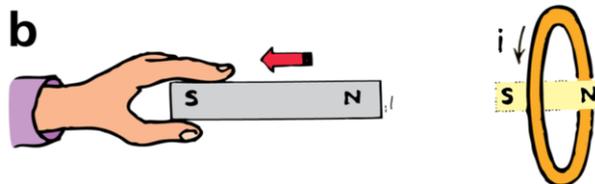
## 3 Loi de Lenz

Le courant induit a un sens tel qu'il s'oppose à la variation du flux magnétique.

- a. Si l'aimant est plongé dans la spire, le courant induit crée un flux magnétique induit qui s'oppose à l'augmentation du flux dans la spire.



- b. Si l'aimant est retiré de la spire, le courant induit crée un flux magnétique induit qui s'oppose à la diminution du flux magnétique dans la spire.

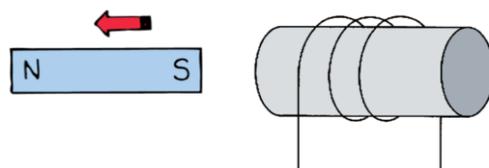


- c. Lorsqu'on plonge un aimant dans une bobine, la bobine induite est parcourue par un courant induit et devient ainsi un électroaimant. D'après la loi de Lenz, cet électroaimant repousse l'aimant. Il faut donc effectuer un travail pour plonger l'aimant dans la bobine. En vertu du principe de la conservation de l'énergie, ce travail fourni est un mode de transformation d'énergie mécanique en énergie électrique dans le circuit induit. La loi de Lenz est donc une conséquence du principe de la conservation de l'énergie.



### ■ As-tu-compris ?

- 3. Indiquer, en justifiant, le sens du courant induit dans la bobine. Quel est l'effet du noyau de fer qui se trouve dans la bobine ?

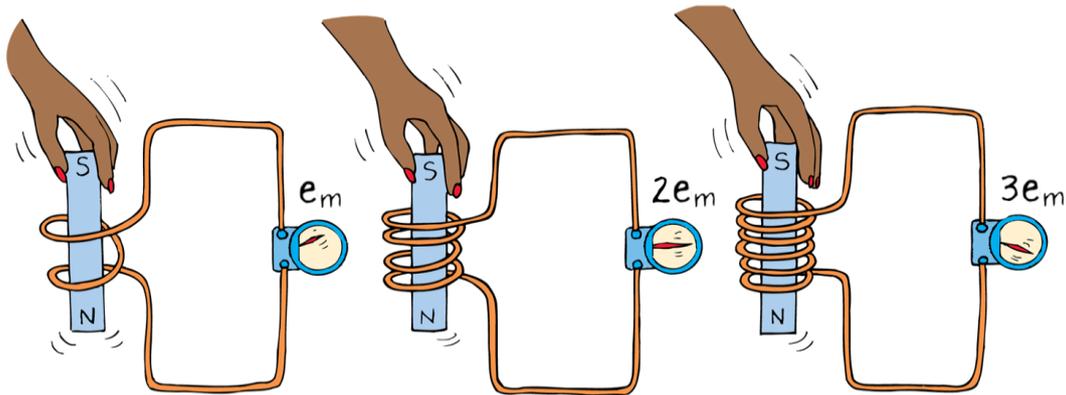


## 4 Loi de Faraday

La **f.é.m. induite moyenne**  $e_m$  dans un circuit est l'opposé de la variation du flux magnétique par unité de temps :

$$e_m = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Lorsqu'un aimant est plongé de manière identique dans une bobine avec deux fois plus de spires (mais de même vecteur surface), la f.é.m. induite moyenne est deux fois plus grande. Si l'aimant est plongé dans une bobine avec trois fois plus de spires, la f.é.m. induite est trois fois plus grande.



### Remarques

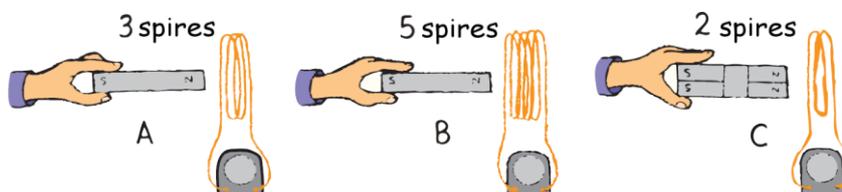
- La f.é.m. induite moyenne est proportionnelle au taux de variation temporelle du flux magnétique. La constante de proportionnalité dépend des unités utilisées. Dans le système international (SI), on a convenu qu'elle vaut 1, de sorte que  $1 \text{ V} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{s}}$ .
- Le signe négatif dans la loi de Faraday signifie que le sens de la f.é.m. induite est tel que le courant induit s'oppose à la variation du flux magnétique (loi de Lenz).
- On obtient la **f.é.m. induite instantanée**  $e$  par passage à la limite ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) :

$$e = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} e_m = - \frac{d\Phi}{dt}$$

- L'intensité du courant induit  $i$  ne dépend pas uniquement de la f.é.m. induite  $e$ , mais également de la résistance  $R$  du circuit induit suivant la relation  $i = \frac{e}{R}$ . Par exemple, on peut plonger de manière identique un aimant dans une spire en verre et une spire en cuivre de même surface. La f.é.m. induite est identique dans les deux cas. En revanche, le courant induit dans la spire en verre est nul à cause de la très grande résistance du verre.

### ■ As-tu-compris ?

4. Trois aimants sont introduits de manière identique dans les bobines illustrées ci-dessous. Ranger par ordre croissant les tensions induites dans les bobines.

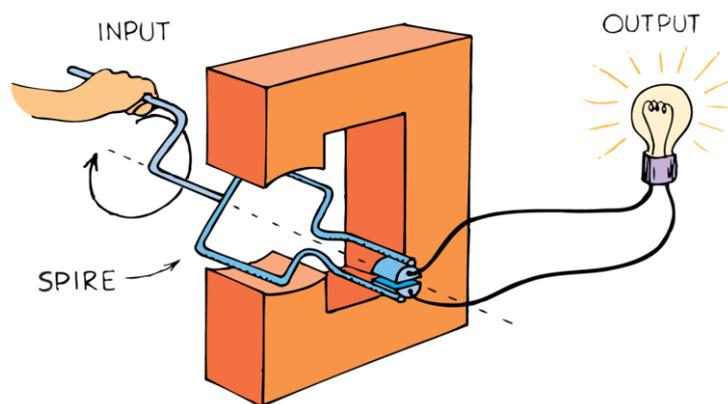


## 5 Applications techniques

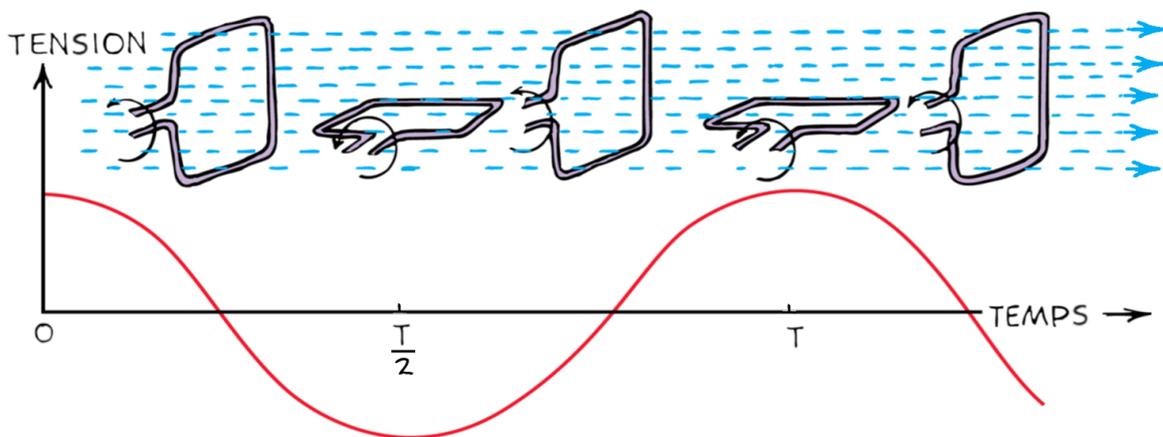
### 5.1 L'alternateur

Lorsqu'on approche et retire un aimant d'une spire de manière répétitive, le sens du courant induit dans la spire alterne. La fréquence de la tension alternative induite dans la spire est égale à la fréquence du mouvement de va-et-vient de l'aimant.

On peut induire une tension dans la spire en la tournant dans un champ magnétique stationnaire. Un tel dispositif est appelé **générateur de courant alternatif** ou simplement **alternateur** (à induit mobile). Le dispositif est identique à celui d'un moteur électrique, mais les rôles d'*input* et d'*output* sont inversés. Dans un moteur électrique, l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique. Dans un alternateur, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique.



Considérons le cycle d'induction lors d'un tour de rotation de la spire dans un champ magnétique uniforme :



- Lorsque le vecteur surface de la spire est parallèle aux lignes de champ magnétique, le flux magnétique à travers la spire est maximal (en valeur absolue). Le taux de variation instantanée du flux magnétique (et donc la f.é.m. induite) est en revanche nulle dans cette position.
- Lorsque le vecteur surface est perpendiculaire aux lignes de champ, le flux magnétique est nul. Le taux de variation instantanée du flux magnétique est en revanche maximale (en valeur absolue) dans cette position.
- Une rotation uniforme de la spire fait augmenter et diminuer la f.é.m. induite aux bornes de la spire de manière sinusoïdale. La f.é.m. induite dans l'alternateur est une tension alternative.

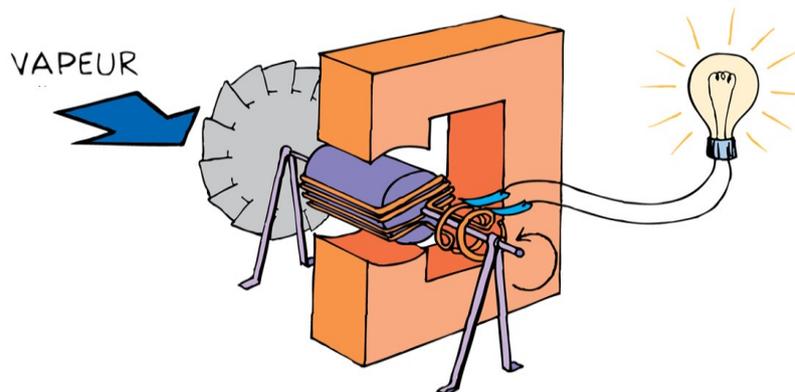
Le courant induit dans l'alternateur est du courant alternatif (AC « *alternating current* »). Le courant du secteur passe par 50 cycles par seconde – il a une fréquence de 50 Hz.

Les générateurs industriels utilisés dans les centrales électriques sont plus complexes. D'énormes bobines constituées d'un très grand nombre de spires enveloppent un noyau de fer (rotor). Ils tournent dans un champ magnétique très intense créé par de puissants électroaimants.

Dans les alternateurs à induit fixe, le rotor est un électroaimant qui est constitué de plusieurs bobines inductrices et le stator est un électroaimant fixe qui est constitué de plusieurs bobines dans lesquels sont induits une tension.

<https://www.tecnipass.com/cours-electricite-courant.triphase-intro.puissance.tri>

Le rotor de l'alternateur est connecté à une **turbine**. L'énergie cinétique du vent ou de l'eau peut être utilisée pour faire tourner la turbine. La plupart des générateurs industriels sont entretenus par de la vapeur d'eau. Un combustible fossile ou nucléaire est utilisé comme source d'énergie pour chauffer de l'eau et créer de la vapeur qui fait tourner la turbine. Une partie de l'énergie de la source est donc transformée en énergie mécanique de la turbine. Le générateur transforme la plupart de cette énergie en énergie électrique.



Un alternateur et un moteur électrique sont des machines réversibles : en échangeant les rôles d'input et d'output, un alternateur peut fonctionner en tant que moteur électrique et vice-versa.

Cette réversibilité est par exemple utilisée par une voiture électrique :

- Lorsque de la puissance est requise pour accélérer la voiture ou monter une colline, le dispositif tire du courant d'une batterie et agit en tant que moteur. De l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique et le rotor tourne.
- En freinant ou en descendant une colline, les roues exercent un moment de force sur le rotor et le font tourner. Le dispositif agit en tant que générateur et recharge la batterie. De l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique.

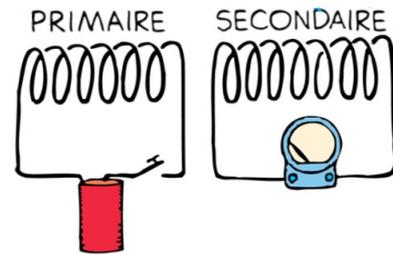
#### ■ As-tu compris ?

5. Quelles sont la principale similitude et la principale différence entre un moteur électrique et un alternateur ?
6. Pourquoi un alternateur est-il plus difficile à tourner lorsqu'il est connecté à un récepteur ?
7. Est-ce que la f.é.m. induite dans la bobine de l'alternateur est augmentée si l'alternateur tourne plus rapidement ? Justifier.

## 5.2 Le transformateur

### 5.2.1 Principe de fonctionnement

On sait que de l'énergie électrique peut être transportée par un courant électrique à travers un câble. Or, elle peut également être transportée d'un circuit électrique vers un autre, sans aucun contact entre les deux. Un tel dispositif est illustré ci-contre. Le circuit connecté à la source de tension est appelé *primaire* (*input*); le circuit connecté au galvanomètre est appelé *secondaire* (*output*).



#### Observations :

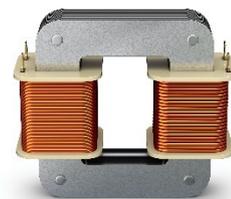
Si l'interrupteur dans le primaire est fermé, une impulsion de courant est mesurée dans le secondaire. Si l'interrupteur est à nouveau ouvert, une nouvelle impulsion de courant circule dans le secondaire, cette fois dans le sens inverse.

#### Explications :

Un champ magnétique intense est créé dans l'axe de la bobine primaire lorsque l'interrupteur est fermé. La bobine primaire subit donc une forte et rapide augmentation du flux magnétique. Or, comme les deux bobines sont face à face, la bobine secondaire subit également une forte variation du flux magnétique et, d'après la loi de Faraday, une tension y est induite. Cette f.é.m. induite est de courte durée, car dès que le courant et le champ magnétique du primaire atteignent leurs valeurs finales (et ne varient plus), la f.é.m. induite dans le secondaire s'annule. Lorsque l'interrupteur est à nouveau ouvert, le courant dans le primaire tombe à zéro. Le flux magnétique dans la bobine secondaire diminue, induisant de nouveau une tension.

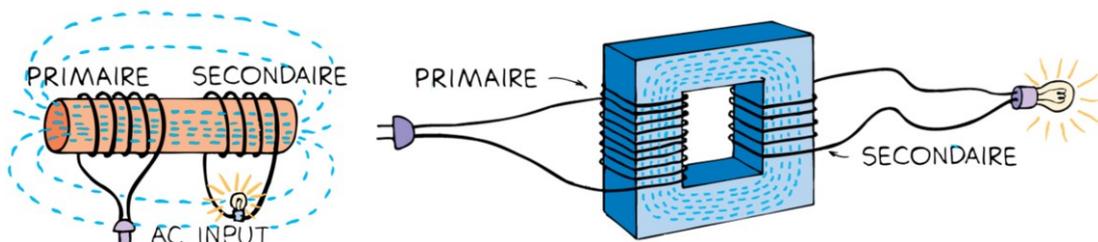
#### Améliorations pratiques :

- Lorsqu'on relie les bobines avec un **noyau de fer**, le champ magnétique dans la bobine primaire est intensifié par l'alignement des domaines magnétiques dans le fer. Outre cette intensification, le fer canalise le champ jusqu'à l'intérieur de la bobine secondaire. La variation du flux magnétique y est plus importante et les impulsions de courant induit sont plus intenses. Si le noyau de fer forme une boucle, alors toutes les lignes de champ magnétique restent canalisées dans le noyau de fer.



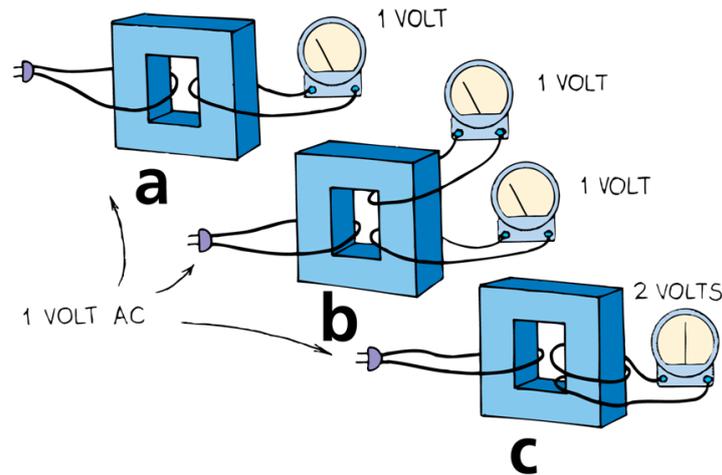
- Au lieu de fermer et d'ouvrir l'interrupteur de manière répétitive, il est plus pratique d'utiliser une source de **tension alternative** dans le primaire. Le courant alternatif (AC) crée un champ magnétique dont le sens et l'intensité varient en permanence. La fréquence des variations du flux magnétique est égale à la fréquence du courant alternatif induit.

Comme nous l'allons voir, l'amplitude de la tension peut être modifiée du primaire au secondaire. Voilà pourquoi ce dispositif est appelé **transformateur**.



### 5.2.2 Loi du transformateur

- Si la bobine primaire et la bobine secondaire ont le même nombre de spires, les tensions alternatives efficaces<sup>1</sup> aux bornes des deux bobines sont identiques (figure a).
- Si le nombre de spires dans la bobine secondaire est plus grand que le nombre de spires dans la bobine primaire ( $N_2 > N_1$ ), alors la tension alternative efficace induite aux bornes de la bobine secondaire est plus grande que tension alternative efficace induite aux bornes de la bobine primaire ( $U_2 > U_1$ ). C'est un **transformateur élévateur**. (figures b et c).
- Si  $N_2 < N_1$ , alors  $U_2 < U_1$ . C'est un **transformateur réducteur**.



La relation entre les tensions efficaces primaire et secondaire et le nombre respectif de spires s'écrit :

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2}$$

Le rapport du nombre de spires dans la bobine primaire et la bobine secondaire détermine de facteur de multiplication de la tension.

### 5.2.3 Conservation de l'énergie

Il pourrait sembler qu'un transformateur permet de produire de l'énergie électrique. Or, un transformateur ne fait que transférer l'énergie électrique du primaire au secondaire et le principe de la conservation de l'énergie reste évidemment valable.

Si on néglige les pertes par effet Joule (transformateur idéal), alors la puissance électrique reçue du primaire est égale à la puissance électrique fournie par le secondaire :

Puissance électrique primaire = Puissance électrique secondaire

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

- Si la tension secondaire est plus grande que la tension primaire (transformateur élévateur), le courant induit secondaire sera moins intense que le courant primaire.
- Inversement, si la tension secondaire est plus petite que la tension primaire (transformateur réducteur), le courant induit secondaire sera plus intense que le courant primaire.

<sup>1</sup> Dans la section 6.2 du chapitre « Pour en savoir plus », on explique la notion de tension efficace.

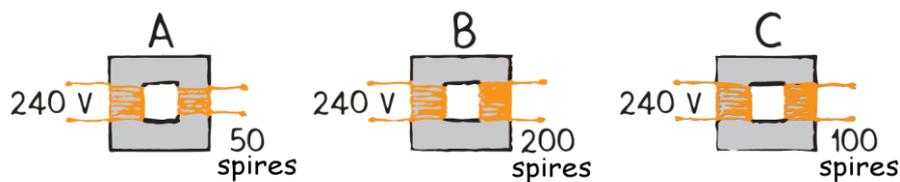
### 5.2.4 Transmission de puissance électrique

La simplicité pratique pour élever ou réduire la tension électrique à l'aide d'un transformateur est la raison principale pour laquelle le réseau électrique fonctionne avec du courant alternatif (AC) plutôt qu'avec du courant continu (DC « *direct current* »). La puissance électrique est transmise sur de grandes distances par des lignes sous haute tension, mais à travers lesquelles circule un courant de faible intensité. Ceci permet de réduire les pertes d'énergie par effet Joule. La puissance électrique est ensuite réduite en plusieurs étapes pour finalement devenir 230 V aux bornes des prises domestiques. À chaque étape, l'énergie est transférée d'un circuit électrique à un autre par induction électromagnétique.



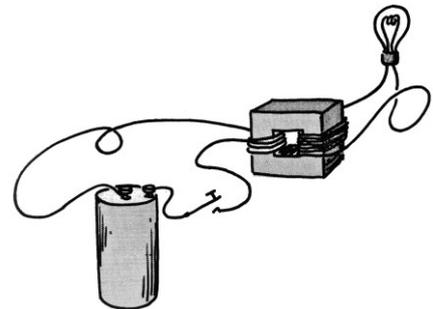
#### ■ As-tu compris ?

9. Chacun des transformateurs est alimenté par une puissance électrique de 100 W, et tous ont 100 spires dans le primaire. Le nombre de spires dans le secondaire varie comme indiqué.



Ranger par ordre décroissant :

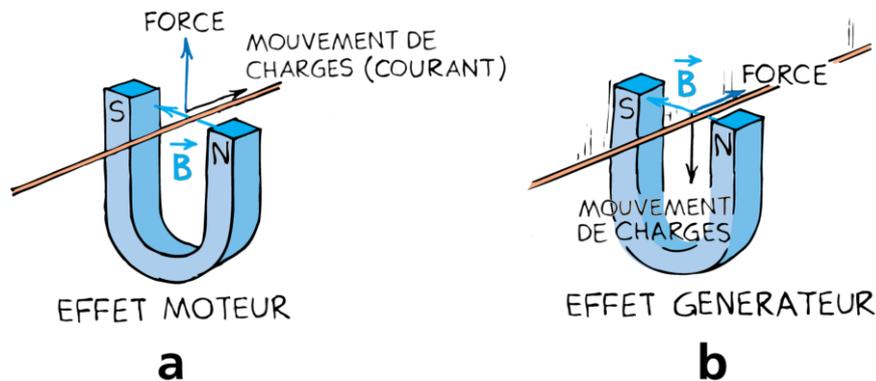
- Les tensions induites dans les secondaires.
  - Les intensités de courant dans les secondaires.
  - Les puissances électriques fournies par les secondaires.
10. Une lampe est connectée à une pile via un transformateur. L'interrupteur est d'abord fermé, puis ouvert peu de temps après. Laquelle des affirmations suivantes est correcte ? Justifier.
- La lampe brille pendant que l'interrupteur est fermé.
  - La lampe ne brille pas du tout.
  - La lampe ne brille que brièvement lorsque l'interrupteur est fermé.
  - La lampe ne brille que brièvement lorsque l'interrupteur est ouvert.
  - La lampe brille brièvement lorsque l'interrupteur est fermé et lorsque l'interrupteur est ouvert.



## 6 Pour en savoir plus

### Effet moteur et effet générateur

La réversibilité d'un moteur électrique et d'un alternateur s'explique par le fait qu'un moteur électrique et un alternateur fonctionnent selon le même principe, à savoir que des charges en mouvement subissent une force de Lorentz, orientée perpendiculairement à leur mouvement et au champ magnétique qu'ils traversent.



- Un courant électrique circule dans un câble qui traverse un champ magnétique. Les charges en mouvement subissent une force de Lorentz vers le haut. Puisque les charges ne peuvent pas quitter le câble, ils entraînent le câble entier vers le haut. C'est l'**effet moteur**.
- Un câble est introduit dans un champ magnétique. Les charges dans le câble subissent une force de Lorentz perpendiculaire à leur mouvement, c'est-à-dire le long du câble. Ce déplacement orienté des charges dans le câble est un courant électrique. C'est l'**effet générateur**.

### Courant alternatif et valeurs efficaces

Une source de tension continue (par exemple une pile) crée un courant continu (DC). Le mouvement des électrons libres est orienté tout le temps dans le même sens à travers le circuit électrique. Même si le courant n'est pas constant, tant qu'il circule dans le même sens, le courant est DC.

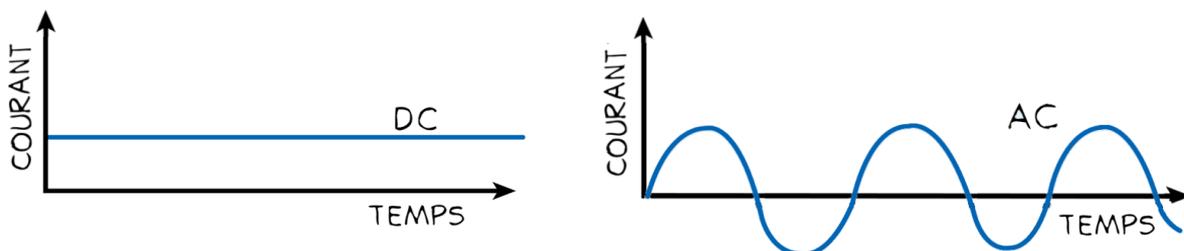
Une source de tension alternative (par exemple un alternateur) crée à ses bornes une tension alternative sinusoïdale

$$u = u_{max} \sin(2\pi f t)$$

qui crée à travers une résistance ohmique  $R$  un courant alternatif (AC) sinusoïdal

$$i = \frac{u}{R} = i_{max} \sin(2\pi f t)$$

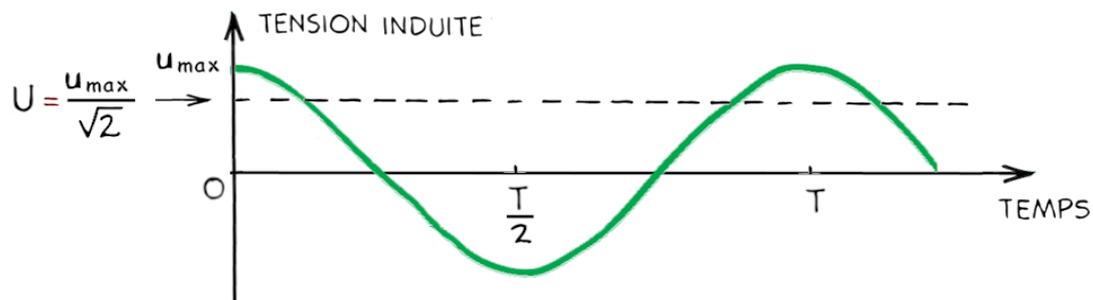
Les électrons libres effectuent des oscillations autour d'une position moyenne relativement fixe.



En définissant la **tension efficace**  $U = \frac{u_{max}}{\sqrt{2}}$  et l'**intensité de courant efficace**  $I = \frac{i_{max}}{\sqrt{2}}$ , la puissance consommée par la résistance s'écrit  $P_{\acute{e}l} = U I$ .

Une tension alternative de valeur efficace  $U$  et un courant alternatif de valeur efficace  $I$  transforment la même puissance électrique qu'une tension continue de valeur  $U$  et un courant continu de valeur  $I$ . Dans les deux cas, on a :  $P_{\acute{e}l} = U I$ .

En courant alternatif, un voltmètre et un ampèremètre indiquent toujours des valeurs efficaces.



La tension aux bornes des prises domestiques en Europe est une tension alternative de valeur maximale aux alentours de 325 V, soit une valeur efficace égale à  $U = \frac{325 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 230 \text{ V}$ .

Le sens du courant électrique dans les câbles alterne avec une fréquence de 50 Hz, c'est-à-dire que les électrons libres changent de sens de circulation toutes les 1/100 secondes.

Aux États-Unis, la tension aux bornes des prises domestiques est une tension alternative de valeur efficace égale à 120 V. Le sens du courant électrique dans les câbles vibre avec une fréquence de 60 Hz, c'est-à-dire que les électrons libres changent de sens de circulation toutes les 1/120 secondes.

Le courant qui sort des prises de la maison est AC. Le courant dans un dispositif qui fonctionne avec une batterie, tel qu'un ordinateur ou téléphone portable, est DC. Avec un convertisseur AC/DC, on peut faire fonctionner un tel dispositif en le branchant aux prises AC.

## 7 Exercices

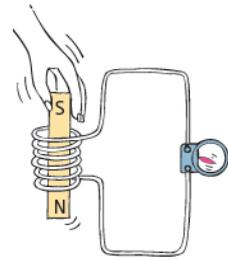
### Induction

1. Quel est la dimension de l'unité du flux magnétique ?
  - A.  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$
  - B.  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ A} \cdot \text{m}$
  - C.  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$
  - D.  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}$
  - E.  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ A} \cdot \text{T}$
2. Si on laisse tomber un aimant dans un long tuyau vertical en cuivre, il tombe plus lentement qu'un objet non magnétique. Expliquer. Pourquoi l'expérience ne fonctionne pas si on utilise un tuyau en verre ?
3. Les têtes de lecture (« pickups ») d'une guitare électrique consistent en des bobines enroulées autour d'aimants permanents. Les aimants magnétisent les cordes en acier de la guitare. Quand les cordes vibrent, une tension est induite dans les bobines. La tension est ensuite accrue par un amplificateur et du son est produit par un haut-parleur. Pourquoi une guitare électrique ne fonctionne-t-elle pas avec des cordes en nylon ?
4. À l'aéroport, avant de pouvoir monter dans l'avion, les passagers doivent passer à travers une porte de sécurité. Celle-ci consiste en une grande bobine traversée par un champ magnétique alternatif de faible intensité. Que se passe-t-il si un passager dispose d'un petit objet en fer (tel qu'un couteau) qui fait varier le flux magnétique à travers la bobine ?
5. Lorsqu'un véhicule roule au-dessus d'une bobine encastrée sous la route, le champ magnétique à travers la bobine varie. Pourquoi ? Peux-tu donner une application pratique de ce dispositif dans le réglage du trafic ?
6. Si tu places un anneau métallique dans une région où règne un champ magnétique qui alterne rapidement, l'anneau va devenir chaud au toucher. Pourquoi ? En donner une application pratique.
7. Un fil est enroulé en une seule spire fermée et un aimant est plongé dans la spire. Une tension est induite et un courant induit circule dans le fil. Un second fil, deux fois plus long, est déformé en deux spires. L'aimant est plongé de manière identique dans les spires. La f.é.m. induite vaut le double, mais le courant induit reste identique à celui dans la spire individuelle. Pourquoi ?
8. On introduit un aimant droit à l'intérieur d'une bobine reliée à un voltmètre. Laquelle des affirmations est fausse ?
  - A. La valeur de la f.é.m. induite dépend de l'aimant utilisé.
  - B. La valeur de la f.é.m. induite dépend de la nature du pôle introduit dans la bobine.
  - C. La valeur de la f.é.m. induite dépend de la vitesse avec laquelle l'aimant est introduit dans la bobine.
  - D. La valeur de la f.é.m. induite dépend du nombre de spires de la bobine.

9. On déplace un aimant vers l'intérieur d'une bobine, puis on laisse l'aimant au repos à l'intérieur de la bobine, puis on retire de nouveau l'aimant hors de la bobine. Un ampèremètre est en outre reliée à la bobine.

Lesquelles des affirmations sont correctes ?

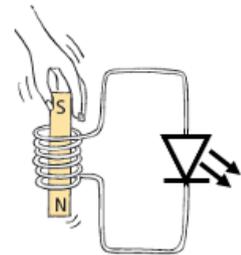
- A. On a un courant induit quand on déplace l'aimant vers la bobine.
- B. On a un courant induit quand l'aimant est au repos à l'intérieur de la bobine.
- C. On a un courant induit quand on éloigne l'aimant de la bobine.
- D. On a un courant induit lors des deux mouvements.
- E. On a un courant induit pendant tout le temps.



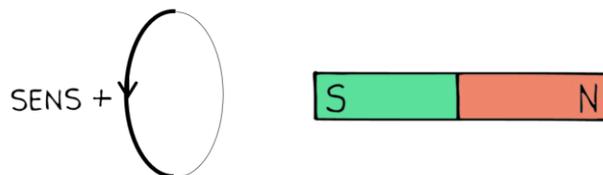
10. On déplace un aimant vers l'intérieur d'une bobine, puis on laisse l'aimant au repos à l'intérieur de la bobine, puis on retire de nouveau l'aimant hors de la bobine. Une LED est en outre reliée à la bobine.

Lesquelles des affirmations sont correctes ?

- A. La LED brille quand on déplace l'aimant vers la bobine.
- B. La LED brille quand l'aimant est au repos à l'intérieur de la bobine.
- C. La LED brille quand on éloigne l'aimant de la bobine.
- D. La LED brille lors des deux mouvements.
- E. La LED brille tout le temps.

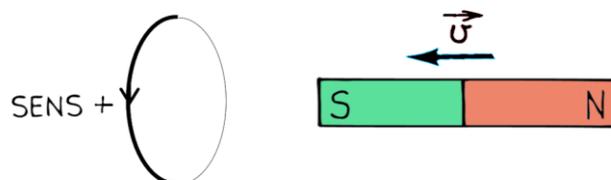


11. L'aimant représenté est au repos à proximité d'une spire conductrice. Laquelle des affirmations est correcte ?



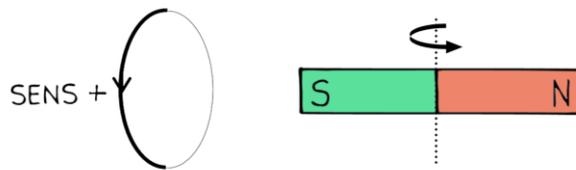
- A. Il n'apparaît aucun courant induit dans la spire.
- B. Il apparaît un courant induit dans la spire qui circule dans le sens positif.
- C. Il apparaît un courant induit dans la spire qui circule dans le sens négatif.
- D. Il apparaît un courant induit qui change continuellement de sens.

12. On approche l'aimant de la spire. Laquelle des affirmations est correcte ?



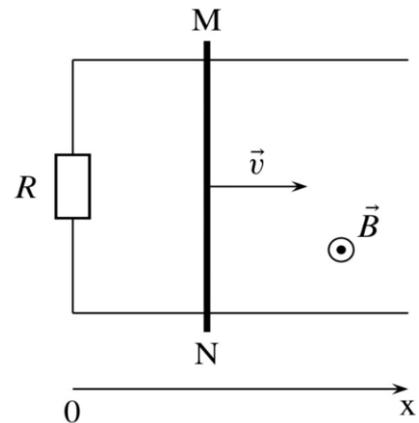
- A. Il n'apparaît aucun courant induit dans la spire.
- B. Il apparaît un courant induit dans la spire qui circule dans le sens positif.
- C. Il apparaît un courant induit dans la spire qui circule dans le sens négatif.
- D. Il apparaît un courant induit qui change continuellement de sens pendant le mouvement de l'aimant.

13. L'aimant effectue un mouvement circulaire uniforme à proximité de la spire. Laquelle des affirmations est correcte ?

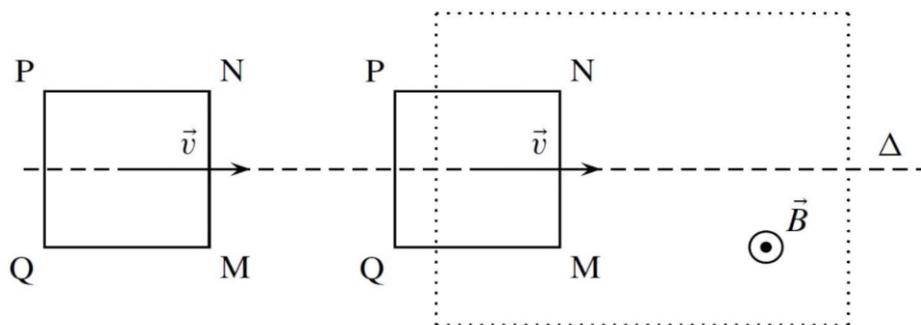


- A. Il n'apparaît aucun courant induit dans la spire.  
 B. Il apparaît un courant induit dans la spire qui circule dans le sens positif.  
 C. Il apparaît un courant induit dans la spire qui circule dans le sens négatif.  
 D. Il apparaît un courant induit qui change continuellement de sens pendant le mouvement de l'aimant.
14. On retire en 0,18 s une boucle de fil circulaire, mesurant 70 mm de diamètre, hors d'un champ magnétique uniforme d'intensité 0,25 T et perpendiculaire au plan de la boucle. Calculer la f.é.m. induite moyenne.

15. Sur deux rails conducteurs parallèles horizontaux reliés par un conducteur ohmique de résistance  $R = 2,5 \Omega$  se déplace une barre de cuivre MN de longueur  $\ell = 25 \text{ cm}$  et animée d'une vitesse constante  $v = 2,5 \text{ m/s}$  parallèle aux rails. L'ensemble est placé dans un champ magnétique  $\vec{B}$ , vertical et dirigé vers le haut. Ce champ magnétique est supposé uniforme d'intensité  $B = 40 \text{ mT}$  entre les rails, et nul partout ailleurs.



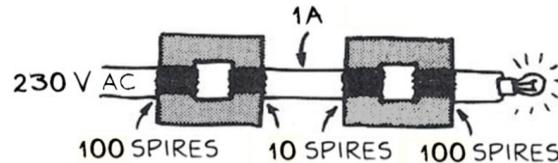
- a. Calculer le flux magnétique à travers le circuit à l'instant où l'abscisse de la barre MN vaut 10 cm.  
 b. Calculer la f.é.m. induite.  
 c. Calculer l'intensité du courant induit et préciser son sens (en justifiant).
16. Une spire plane a la forme d'un carré de côté  $a = 40 \text{ cm}$ . Elle est entraînée à la vitesse constante  $v = 4 \text{ m/s}$  parallèlement à l'axe  $\Delta$ . Elle passe d'une zone où le champ magnétique est nul dans une zone où règne un champ magnétique uniforme d'intensité  $B = 0,5 \text{ T}$  perpendiculaire au plan de la spire. La résistance totale de la spire est de  $2 \Omega$ . On pose  $t = 0$  lorsque le segment MN entre dans le champ  $\vec{B}$ .



- a. Donner en fonction du temps la f.é.m. induite.  
 b. En déduire le sens et l'intensité du courant induit dans la spire.

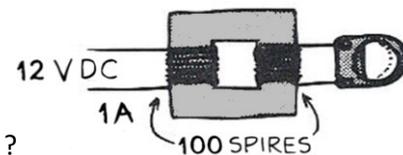
## Transformateur

17. Quelle est la différence entre un transformateur élévateur et un transformateur réducteur ?
18. Si la tension dans le secondaire vaut le double de la tension dans le primaire, que peux-tu dire du rapport entre le courant dans le primaire et le courant dans le secondaire ?
19. La bobine primaire d'un transformateur reçoit une puissance électrique de 100 W. Quelle puissance électrique est fournie par la bobine secondaire (le transformateur étant idéal) ?
20. Dans le circuit illustré, quelle tension règne aux bornes de la lampe et quelle intensité de courant la traverse ?



21. Considérer le transformateur ci-contre.

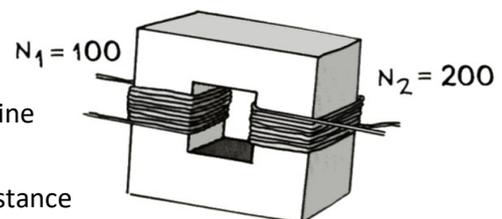
- a. Quelle tension règne aux bornes de l'ampèremètre et quelle intensité de courant mesure-t-il ?
- b. Quelle est la réponse si la tension primaire vaut 12 V AC ?



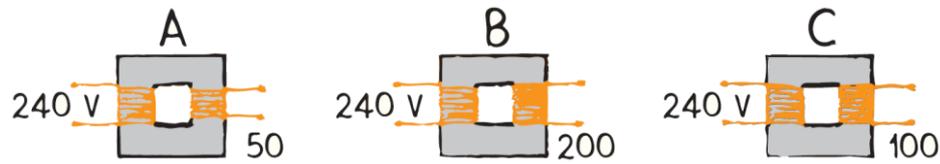
22. Un transformateur idéal a 50 spires dans le primaire et 250 spires dans le secondaire. Le primaire est connecté à 12 V AC.
  - a. Quelle est la f.é.m. induite dans le secondaire ?
  - b. Montrer que lorsqu'un appareil de résistance  $10 \Omega$  est connecté au secondaire, il est parcouru par un courant de 6 A.
  - c. Quelle puissance électrique est fournie au primaire ?
23. Un train électrique miniature requiert 6 V pour fonctionner correctement. Si la bobine primaire de son transformateur a 240 spires, combien de spires la bobine secondaire doit-elle avoir si le primaire est connecté à une prise de 240 V ?
24. Un tube néon nécessite une tension d'allumage de 12000 V. Quel devrait être le rapport entre le nombre de spires des bobines primaire et secondaire si le transformateur d'un tube néon est connecté à 240 V ?

25. Une tension alternative de 100 V est appliquée à la bobine primaire de 100 spires d'un transformateur supposé idéal.

- a. Quelle tension efficace est induite dans la bobine secondaire de 200 spires ?
- b. Si le secondaire est connecté à une lampe de résistance  $50 \Omega$ , quelle est l'intensité du courant alternatif dans le secondaire ?
- c. Quelle est la puissance dans le secondaire ?
- d. Quelle est la puissance dans le primaire ?
- e. Quelle est l'intensité du courant alternatif fournie au primaire ?
- f. Le transformateur élève la tension mais réduit le courant. D'après la loi d'Ohm, une tension plus grande produit un courant plus grand. Y a-t-il une contradiction ?



26. On a un transformateur dont le circuit primaire a une puissance de 100 W et est constitué par une bobine de 100 spires. Le nombre de spires de la bobine du circuit secondaire est indiqué dans chaque figure. Indiquer à chaque fois l'affirmation qui est correcte.



- a. La tension secondaire ...
- est maximale dans le cas A
  - est maximale dans le cas B
  - est maximale dans le cas C
  - est identique dans les 3 cas
  - ne peut être déterminé dans aucun des cas
- b. L'intensité de courant dans le circuit secondaire ...
- est maximale dans le cas A
  - est maximale dans le cas B
  - est maximale dans le cas C
  - est identique dans les 3 cas
  - ne peut être déterminé dans aucun des cas
- c. La puissance électrique fournie par le secondaire ...
- est maximale dans le cas A
  - est maximale dans le cas B
  - est maximale dans le cas C
  - est identique dans les 3 cas
  - ne peut être déterminé dans aucun des cas
27. Une puissance électrique de 100 kW est fournie à un quartier d'une ville par une paire de lignes électriques entre lesquelles règne une tension alternative de 12000 V.
- Quelle est l'intensité du courant dans les lignes.
  - Chacune des deux lignes a une résistance électrique de  $10 \Omega$ . Quelle est la différence de potentiel entre les deux extrémités d'une ligne ? (Attention, cette tension n'est pas celle entre les deux câbles).
  - Quelle puissance est dissipée sous forme d'énergie thermique par effet Joule dans les deux lignes ? Comparer cette puissance avec la puissance électrique fournie au quartier.

## Révision

Répondre par vrai ou faux.

	<b>Affirmation</b>	<b>Vrai</b>	<b>Faux</b>
1	La formule permettant de calculer le flux magnétique à travers une spire s'écrit $\phi = B S$ .		
2	La variation du flux magnétique par unité de temps s'exprime en V.		
3	Le phénomène d'induction se manifeste toujours sous forme d'un courant électrique.		
4	Il peut avoir apparition d'un courant induit, lorsque le flux magnétique reste constant.		
5	Le courant induit s'oppose à la variation de flux qui lui donne naissance.		
6	La f.é.m. induite est d'autant plus grande que la variation du flux magnétique est grande.		
7	La f.é.m. induite est d'autant plus grande que la variation du flux magnétique est rapide.		
8	Un alternateur produit un courant alternatif sinusoïdal.		
9	On peut abaisser une tension à l'aide d'un transformateur.		
10	On peut produire de l'énergie électrique à l'aide d'un transformateur.		

## Crédits Photos

© Henri Weyer – **p.0** (page titre)

© mipan / Shutterstock.com (250766437) – **p.7** (transformateur)

© bit mechanic / Shutterstock.com (1466569919) – **p.9** (transformateur)

© Boris Bulychev / Shutterstock.com (2152399885) – **p.12** (pickup guitare)

## Crédits Illustrations

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours.

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours. Les illustrations de Paul G. HEWITT ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

© HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson

© HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson

© EPSTEIN Lewis C., HEWITT, Paul G., *Thinking Physics – 1981*, Insight Press