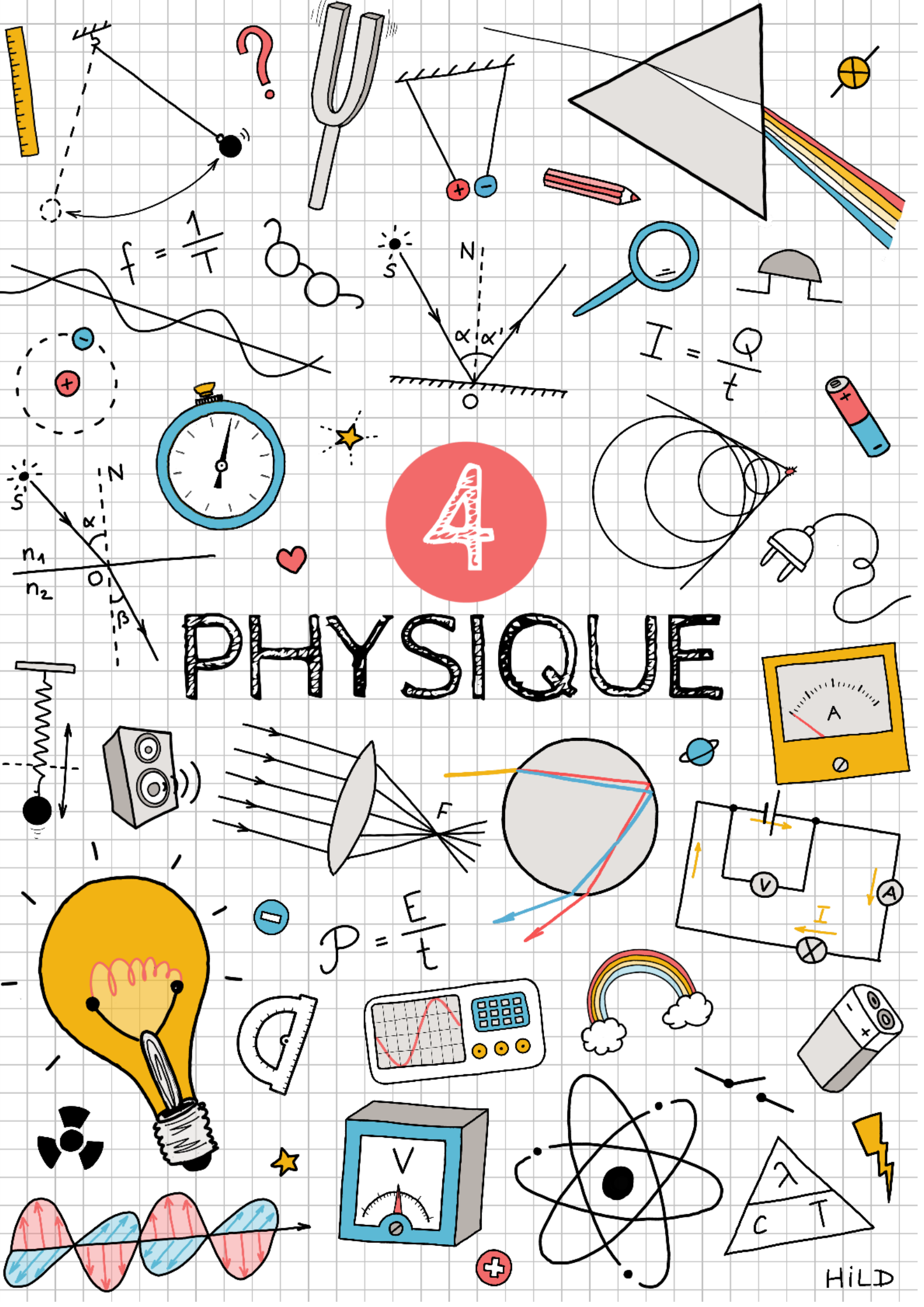

4
PHYSIQUE
$f = \frac{1}{T}$
$I = \frac{Q}{t}$
$\mathcal{P} = \frac{E}{t}$
S
N
O
α
α'
β
n_1
n_2
F
A
V
I
λ
c
T
HiLD

CNESC

Auteurs : Laurent Hild & Robert Droulans

Sommaire

Partie I - Ondes

1 Oscillations 1
2 Mouvement d'onde 3
3 Représentations d'ondes 4
4 Célérité 7
5 Types d'ondes 8
5.1 Les ondes sonores 8
5.2 Les ondes électromagnétiques 10
6 Réflexion 13
6.1 Réflexion d'ondes à la surface d'eau 13
6.2 Réflexion de la lumière 13
7 Réfraction 19
7.1 Réflexion et transmission 19
7.2 Réfraction d'ondes à la surface d'eau 19
7.3 Réfraction de la lumière 20
7.4 Phénomène naturel : la réfraction atmosphérique 21
8 Dispersion 24
8.1 Prisme 24
8.2 Arc-en-ciel (facultatif) 26
9 Réflexion totale 27
9.1 Réflexion totale interne d'ondes à la surface d'eau 27
9.2 Réflexion totale interne de la lumière 27
10 Lentilles 30
10.1 Types de lentilles 30
10.2 Caractéristiques d'une lentille 30
10.3 Formation d'images par une lentille convergente 31
11 Pour en savoir plus 34

Partie II - Électricité

12 La charge électrique 43
12.1 Comment électriser un corps ? 43
12.2 Mise en évidence de la charge électrique 43
12.3 Deux types de charge électrique 44
12.4 Principe de fonctionnement de l'électroscope 44
12.5 Où sont localisées les charges électriques ? 45
12.6 Interprétation microscopique de l'électrisation 45
12.7 Etude quantitative 47
12.8 Manifestations courantes 48
13 Énergie et tension électriques 49
13.1 La notion d'énergie 49
13.2 L'énergie électrique 49
13.3 La pile : une source d'énergie électrique 50
13.4 La tension électrique 50
14 Le courant électrique 52
14.1 Conducteurs et isolants 53
14.2 L'intensité du courant électrique 54
15 Circuits électriques 57
15.1 Générateurs et récepteurs 57
15.2 Montages électriques 58
15.3 Types de branchements 59
16 Transformations d'énergie et puissance électrique 62
17 Les effets du courant électrique 64
17.1 L'effet calorifique 64
17.2 L'effet magnétique 64
17.3 L'effet chimique 64
17.4 L'effet luminescent 65

Partie I

Ondes

Bien que les vagues en mer, les séismes, le son ou la lumière semblent être des phénomènes naturels très différents, ils partagent de nombreuses propriétés physiques qui peuvent être expliquées à l'aide du modèle des ondes.

1 Oscillations

Une oscillation est un mouvement (ou fluctuation) périodique autour d'un état d'équilibre. Les oscillations sont omniprésentes : dans les cordes d'un instrument de musique, le battement des ailes des insectes et des oiseaux, le battement du cœur, les vagues en mer, les ondes radio, le mouvement des électrons dans les fils électriques et même dans les étoiles.

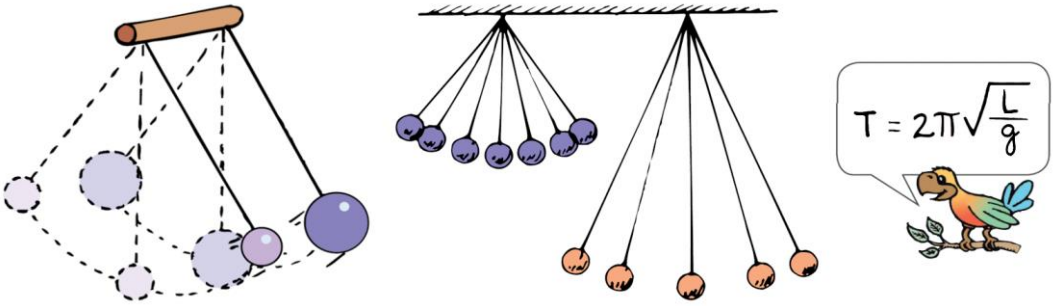
Les oscillations d'un pendule sont d'une telle régularité que les pendules sont depuis longtemps utilisés dans les horloges. Un pendule simple est constitué d'une masse accrochée à un fil (ou une tige) de masse négligeable.

La **période *T*** est la durée d'une oscillation complète, c'est-à-dire d'un mouvement de va-et-vient. Son unité SI est la seconde (s).

L'étude expérimentale, réalisée par Galilée[1], montre que la période d'un pendule simple :

1. ne dépend pas de l'amplitude, c'est-à-dire de l'angle maximal formé par le fil et la verticale
2. ne dépend pas de la masse accrochée au fil
3. augmente avec la longueur du fil

La période dépend également de l'intensité de la pesanteur g. Plus l'intensité de la pesanteur est petite, plus la période du pendule donné est grande.



La **fréquence *f*** est le nombre d'oscillations par unité de temps. Son unité SI est le hertz[2] (Hz).

Une oscillation par seconde correspond à une fréquence de 1 Hz. De grandes fréquences sont souvent exprimées en kilohertz (1 kHz = 1'000 Hz = 10^3 Hz), en mégahertz (1 MHz = 1'000'000 Hz = 10^6 Hz) ou en gigahertz (1 GHz = 1'000'000'000 Hz = 10^9 Hz).

Lorsqu'un pendule effectue deux oscillations par seconde (f = 2 Hz), la durée nécessaire pour effectuer une oscillation - sa période - vaut $\frac{1}{2}$ s. La fréquence et la période sont inverses l'une de l'autre :

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{ou, vice versa,} \quad T = \frac{1}{f}$$

Du sable coulant de la pointe d'un pendule simple trace une courbe sur un tapis roulant qui passe à une vitesse constante en dessous du pendule. Cette courbe, appelée **sinusoïde**, est une représentation des oscillations du pendule en fonction du temps.

[1] Mathématicien, physicien et astronome italien du 17e siècle
[2] En l'honneur de Heinrich Hertz, physicien allemand du 19e siècle, qui fut le premier à transmettre des ondes radio

As-tu compris ?

1. Quelle fréquence correspond aux périodes suivantes ?

   a. 0,10 s **b.** 5 s **c.** 1/60 s **d.** 1 ms

2. Quelle période correspond aux fréquences suivantes ?

   a. 0,20 Hz **b.** 4 Hz **c.** 80 Hz **d.** 1 Mhz

3. Un enfant sur une balançoire effectue deux allers-retours en 4 s.

   a. Calculer la période des oscillations.

   b. Calculer la fréquence des oscillations.

   c. Comment faudrait-il modifier la longueur de la balançoire pour augmenter sa fréquence ?

4. Des charges électriques dans une antenne d'une station radio FM vibrent à une fréquence de 100 MHz. Quelle est la période de ces vibrations ?

5. Un papa et son enfant se balancent sur des balançoires identiques.

   a. Laquelle des deux balançoires oscille avec une plus grande fréquence ? Justifier.

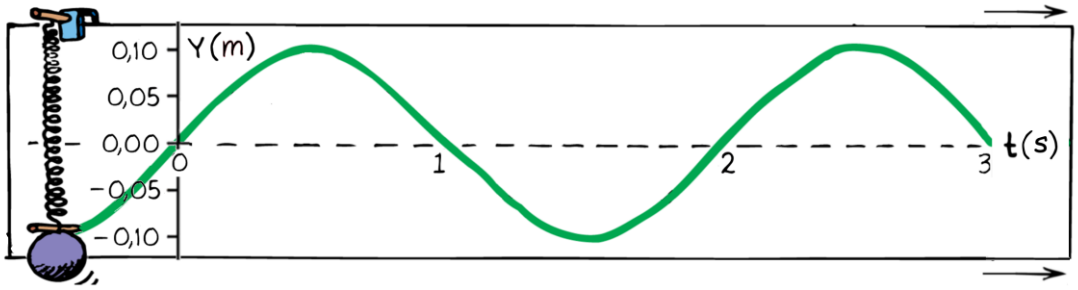
   b. Comment varie la fréquence des oscillations de l'enfant lorsqu'il se met debout sur la balançoire ? Justifier.

6. Une horloge à pendule est transférée d'une maison au bord de la Méditerranée dans une maison de vacances en haute montagne dans les Alpes. Sa fréquence est alors

   A. plus petite. B. plus grande. C. identique.

   Justifier.

7. La sinusoïde représente les oscillations d'un pendule élastique. L'axe t représente le temps (en secondes) et l'axe y représente l'écart (en mètres) de la boule par rapport à la position d'équilibre du pendule.



   a. Quelle est l'amplitude des oscillations du pendule, c'est-à-dire l'écart positif maximal de la boule par rapport à sa position d'équilibre.

   b. Quelle est la période des oscillations ?

   c. Calculer la fréquence des oscillations.

8. *Facultatif* : Un astronaute sur la Lune attache une petite boule en métal à un fil de 1 m de longueur. Elle laisse osciller le pendule et mesure une durée nécessaire de 75 s pour effectuer 15 oscillations. Comment peut-elle en déduire l'intensité de la pesanteur sur la Lune ?

2 Mouvement d'onde

La plupart des informations nous sont transmises sous forme d'ondes. Le son transporte de l'énergie à nos oreilles sous forme d'ondes. La lumière transporte de l'énergie à nos yeux sous forme d'ondes et les données qui atteignent nos smartphones se propagent également sous forme d'ondes.

Une **onde** est une oscillation qui se propage à travers l'espace.

- La source de toute onde est une oscillation.
- Une onde transporte de l'énergie, sans transport de matière.
- Chaque point d'onde reproduit l'oscillation de la source.

Exemples

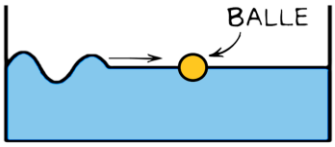
a. On peut créer une onde dans une corde tendue en agitant l'extrémité de la corde. L'onde se propage le long de la corde. Chaque point d'onde reproduit les oscillations de la main, sans être emporté par l'onde.

b. Lorsqu'une pierre tombe dans l'eau d'un étang, les oscillations de la surface d'eau se propagent à partir du point d'impact sous forme d'ondes circulaires. C'est l'énergie qui se propage, mais pas l'eau en soi. En effet, une feuille qui flotte sur la surface de l'eau oscille lors du passage de l'onde, sans être emportée.

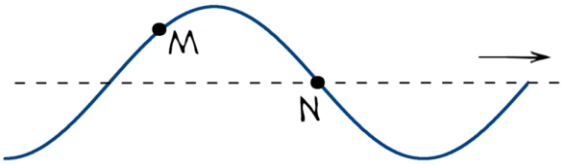
c. La « ola » est un mouvement d'onde observé dans les stades. Elle est déclenchée par des spectateurs qui se mettent debout, lèvent les bras, puis, une fois que leurs voisins ont imité le mouvement, reprennent leur position assise. Ce phénomène se transmet de proche en proche à travers la foule, mais c'est l'oscillation qui se propage, pas les spectateurs.

As-tu compris ?

9. Une balle flotte à la surface de l'eau dans une cuve. Laquelle des figures ci-dessous représente le mouvement de la balle lors du passage de l'onde ?



10. Une onde se propage le long d'une corde dans le sens indiqué sur la figure. M et N sont deux points d'onde.



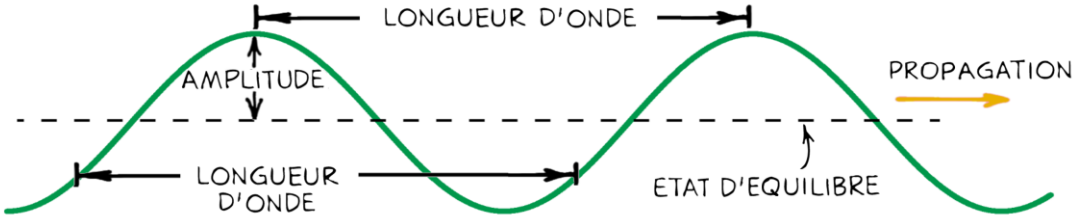
a. Le point M est en train de se déplacer vers

A. la gauche B. la droite C. le haut D. le bas

b. Et le point N ?

3 Représentations d'ondes

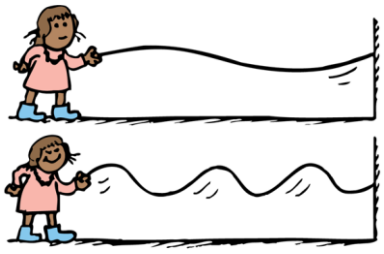
L'onde qui se propage dans une corde peut être représentée à un instant donné par une *sinusoïde***.** Les points les plus hauts de la sinusoïde sont appelés *crêtes*, les points les plus bas sont appelés *creux*.



- L'**amplitude *A*** de l'onde est l'écart maximal d'un point d'onde par rapport à l'état d'équilibre. L'unité SI de l'amplitude est le mètre (m).
- La **longueur d'onde** λ (« lambda ») est la distance après laquelle la forme de la sinusoïde se répète (par exemple la distance entre deux crêtes voisines). L'unité SI de la longueur d'onde est le mètre (m).
- La **fréquence *f*** de l'onde est égale à la fréquence des oscillations de la source. Son unité SI est le hertz (Hz).

Exemple

Lorsqu'une extrémité d'une corde tendue est agitée avec la main, une onde se propage le long de la corde. La fréquence de l'onde est égale à la fréquence de vibration de la main. Lorsque la fréquence de l'onde augmente, sa longueur d'onde diminue.



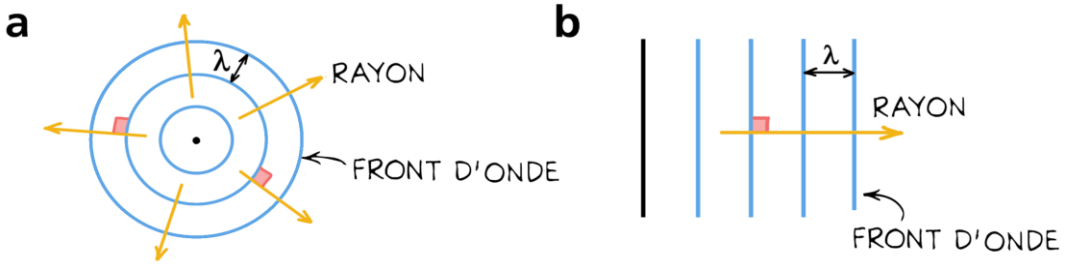
Une onde qui se propage en 2 dimensions (par exemple une onde ä la surface de l'eau) ou en 3 dimensions (par exemple une onde sonore) peut être représentée par des *fronts d'onde*.

Les **fronts d'onde** représentent le lieu des crêtes (ou des creux).

- Deux fronts d'onde consécutifs sont espacés d'une longueur d'onde λ.
- En chaque point, l'onde se propage perpendiculairement au front d'onde. La direction et le sens de propagation de l'onde sont représentés par une flèche, appelée rayon (« Strahl »).

Exemples

a. Onde circulaire, générée par une source ponctuelle.
b. Onde plane, générée par une source linéaire.

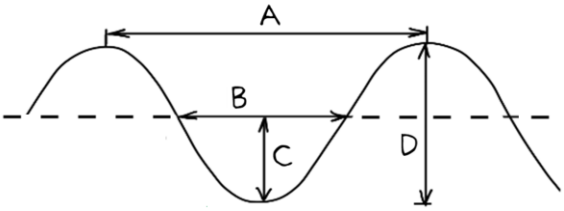


As-tu compris ?

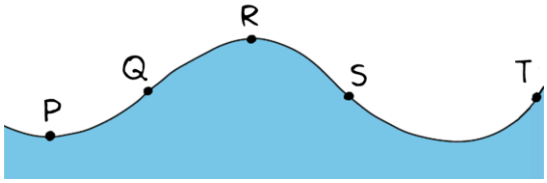
11. Quelle distance représente :

a. l'amplitude de l'onde illustrée ?

b. la longueur d'onde ?



12. Lesquels de ces points à la surface de l'eau sont distants d'une longueur d'onde ?



A. P et R

B. Q et T

C. Q et S

D. S et T

13. Une onde se propage le long d'une corde. Combien de longueurs d'onde se trouvent entre les points A et B ?

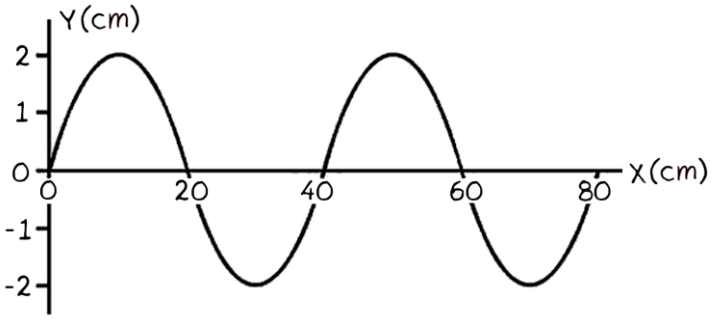
E. 2/3

F. 1

G. 1,5

H. 3

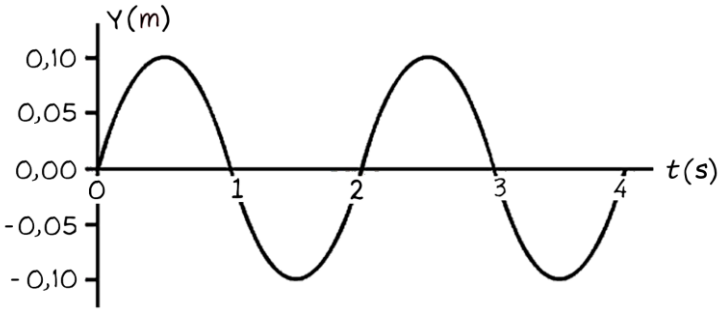
14. La sinusoïde ci-dessous représente une onde qui se propage dans une corde.



a. Combien vaut l'amplitude de l'onde ?

b. Combien vaut la longueur d'onde ?

15. La sinusoïde ci-dessous représente les oscillations d'un point d'onde.

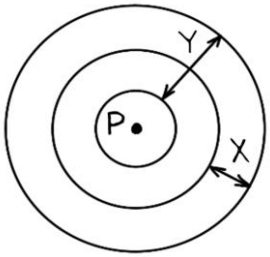


a. Combien vaut la période des oscillations du point d'onde ?

b. Calculer la fréquence de l'onde.

c. Combien vaut l'amplitude de l'onde ?

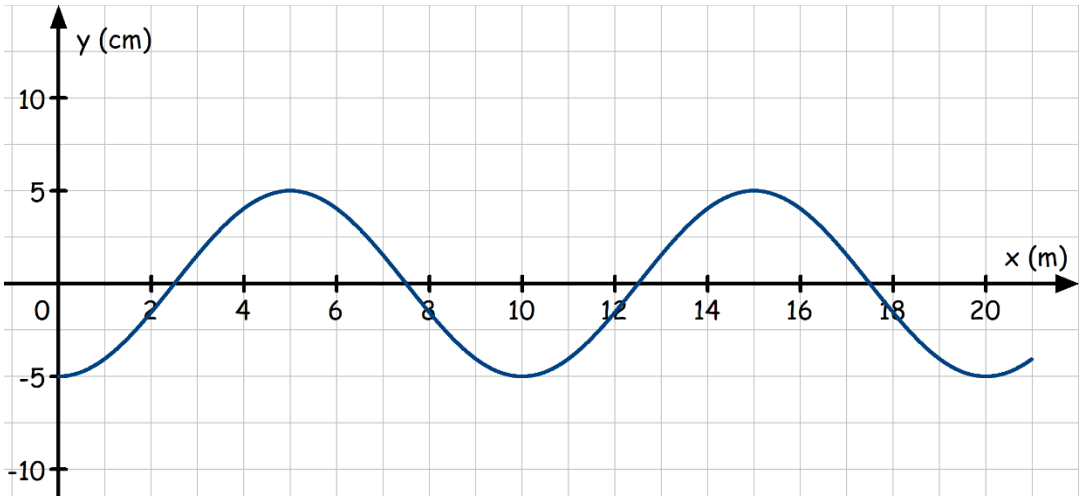
16. Une source ponctuelle en P crée une onde d'eau circulaire. La figure montre la surface de l'eau 1,5 secondes après le début des oscillations de la source. Lesquelles de ces affirmations suivantes sont correctes ?



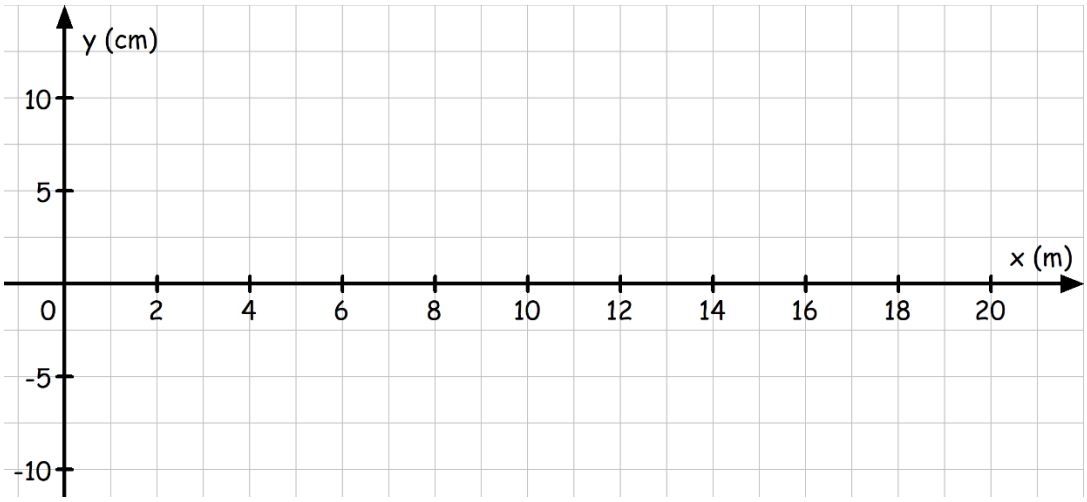
A. Chaque cercle représente un front d'onde.
B. La distance Y est la longueur d'onde.
C. La distance X est la longueur d'onde.
D. La fréquence de l'onde vaut 1 Hz.
E. La fréquence de l'onde vaut 2 Hz.

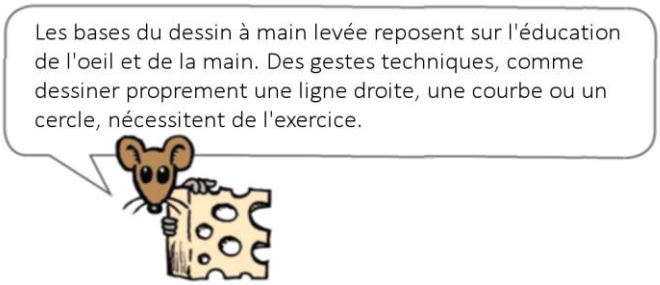
17. La sinusoïde ci-dessous représente une onde qui se propage dans une corde.

a. Déterminer l'amplitude de l'onde et la longueur d'onde.



b. Représenter la corde lorsqu'elle est parcourue par une onde d'amplitude 10 cm et de longueur d'onde 8 m, à l'instant où la source se trouve à l'état d'équilibre en se déplaçant vers le bas.





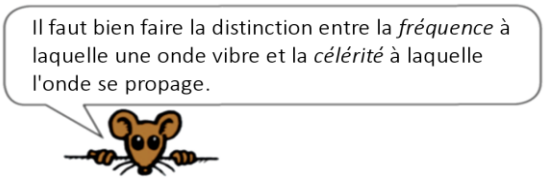
4 Célérité

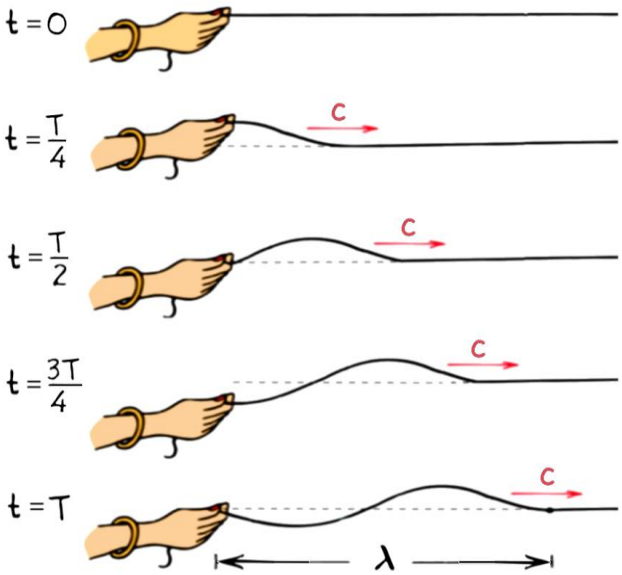
La **célérité** c d'une onde est sa vitesse de propagation. Elle dépend du milieu de propagation.

Pendant une période, l'onde se propage d'une longueur d'onde. Une vitesse étant la distance parcourue par unité de temps, on trouve :

$$\text{célérité}\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = \frac{\text{longueur d'onde (m)}}{\text{période (s)}}$$

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$





Exemples

a. La célérité des ondes qui se propagent dans une **corde** dépend de la tension de la corde.

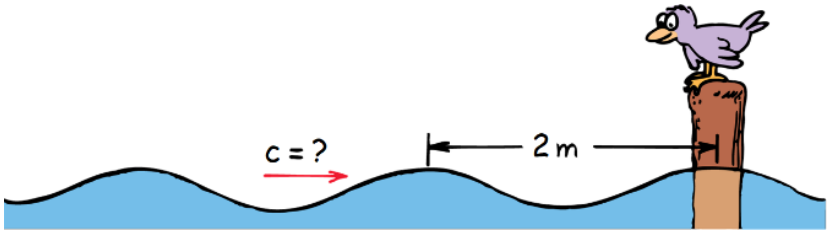
b. La célérité des ondes d'**eau** dépend de la profondeur de l'eau. Elle peut varier de quelques cm/s (dans une flaque d'eau) à quelques centaines de km/h (tsunami dans l'océan profond).

As-tu compris ?

18. La célérité d'une onde vaut 100 m/s et sa fréquence vaut 10 Hz. Calculer la longueur d'onde.

19. La célérité d'une onde vaut 60 m/s et sa longueur d'onde vaut 5 m. Calculer la fréquence.

20. L'oiseau perché sur le poteau mesure une durée de 8 s entre le passage de trois crêtes successives.

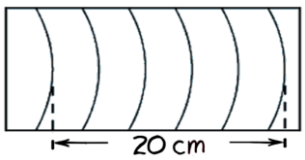


Déterminer :

a. la célérité de l'onde

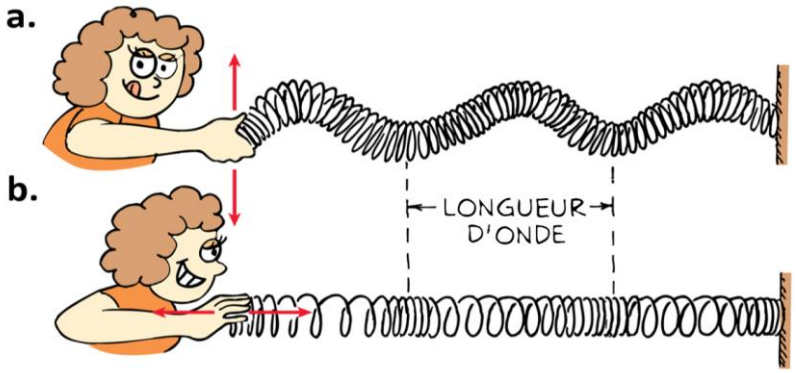
b. la période et la fréquence de l'onde

21. Une onde de fréquence 4 Hz se propage dans une cuve d'eau. Les fronts d'onde sont illustrés sur la figure. Calculer la célérité de l'onde.



5 Types d'ondes

Un ressort *Slinky* permet de créer deux types d'ondes :

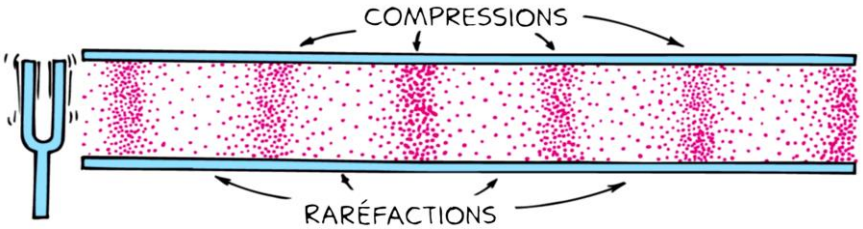


a. Une **onde transversale** est une onde dont la vibration est perpendiculaire à la propagation.
b. Une **onde longitudinale** est une onde dont la vibration est parallèle à la propagation.

Dans le cas de l'onde longitudinale, certaines parties du ressort sont comprimées. Entre deux *compressions* successives s'intercale une partie étirée, appelée *raréfaction*. La longueur d'onde est la distance entre deux compressions (respectivement deux raréfactions) successives.

5.1 Les ondes sonores

Les ondes sonores (ou ondes acoustiques) qui se propagent dans les fluides (liquides ou gaz) sont longitudinales[3]. Leur source est toujours une vibration rapide, comme les oscillations des branches d'un diapason :



- Lorsque la branche à droite s'approche du tube, une compression d'air entre dans le tube.
- Lorsque la branche s'éloigne ensuite du tube, une raréfaction d'air suit la compression.
- Puisque la fréquence des oscillations des branches est très haute, une série de compressions et de raréfactions, c'est-à-dire une onde sonore, se propage à travers le tube.

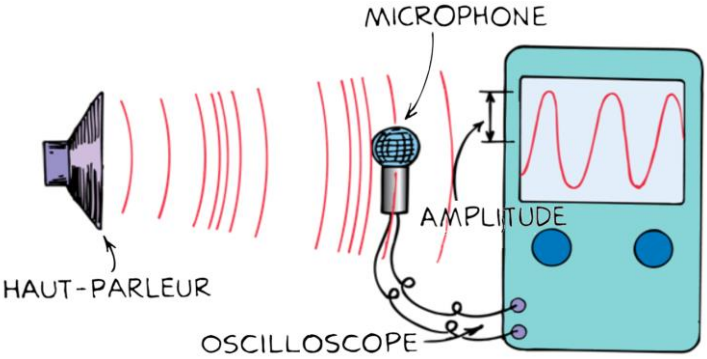
Dans le cas d'un piano ou d'une guitare, ce sont des cordes qui vibrent et qui transmettent ces vibrations aux molécules d'air. Dans une flûte, l'air vibre dans l'embouchure. Le son de notre voix résulte des oscillations des cordes vocales et le son émis par un haut-parleur est généré par les oscillations d'une membrane. Dans tous les cas, la fréquence des ondes sonores est identique à la fréquence des oscillations de la source. L'énergie de la source vibrante est transportée jusqu'à nos oreilles sous forme d'ondes longitudinales.

La transmission du son requiert un milieu élastique capable de propager des compressions. Les ondes sonores ne peuvent pas se propager à travers le vide. Ainsi, le son d'une sonnette ne s'entend pas à travers une cloche dont l'air a été évacué.

[3] Les ondes sonores qui se propagent dans les solides peuvent être longitudinales ou transversales.

En observant à distance une personne donnant des coups de marteau, on voit la frappe avant de l'entendre. De même, on entend le tonnerre un certain temps après la perception de la foudre et on voit l'explosion d'un feu d'artifice avant de l'entendre. Ces expériences montrent que le son est nettement plus lent que la lumière. La célérité du son dans l'air sec à 0°C vaut environ 340 m/s (1200 km/h), ce qui correspond à peu près à un millionième de la célérité de la lumière. La célérité du son dans un gaz augmente légèrement avec sa température. Elle dépend également de la masse des particules dont le gaz est constitué. Le son se transmet plus rapidement dans l'hélium, constitué d'atomes d'hélium de petite masse, que dans l'air, formé essentiellement de molécules plus lourdes (diazote, dioxygène). En général, les ondes sonores se propagent plus rapidement dans les liquides que dans les gaz, et encore plus rapidement dans les solides.

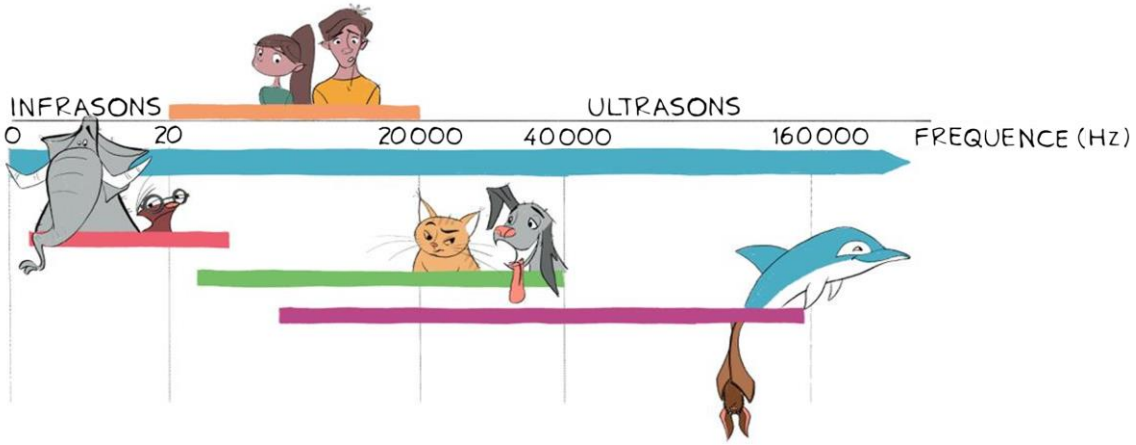
À part l'oreille, le détecteur sonore le plus courant est le microphone. Sa pièce principale est une membrane élastique que l'onde sonore met en vibration. Les vibrations mécaniques de la membrane sont transformées en vibrations électriques que l'on peut visualiser sur l'écran d'un **oscilloscope**.



En visualisant différents sons à l'aide d'un oscilloscope, on constate que :

- Plus la fréquence d'un son est haute, plus le son est aigu.
- Plus la fréquence d'un son est basse, plus le son est grave.

Un enfant perçoit des sons dont la fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 kHz = 20'000 Hz. C'est la **zone d'audibilité** d'un être humain. Avec l'âge, l'ouïe se dégrade, surtout à la limite supérieure des fréquences perçues. Dès la naissance, la limite supérieure d'audibilité diminue tous les dix ans à raison de 1 à 2 kHz. Des sons de fréquences inférieures à 20 Hz sont appelées *infrasons*. Des ondes sonores de fréquences supérieures à 20 kHz sont appelées *ultrasons*. Les chiens peuvent percevoir des ultrasons de fréquences jusqu'à 40 kHz. Les chauves-souris et les dauphins peuvent même émettre et entendre des ultrasons allant jusqu'au-delà de 100 kHz.

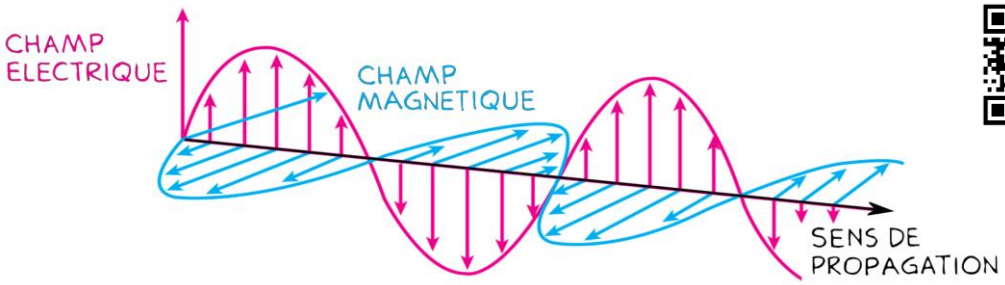


La perception de l'intensité du son est subjective. Le fait qu'un son soit perçu comme fort ou faible est lié à l'amplitude de l'onde sonore :

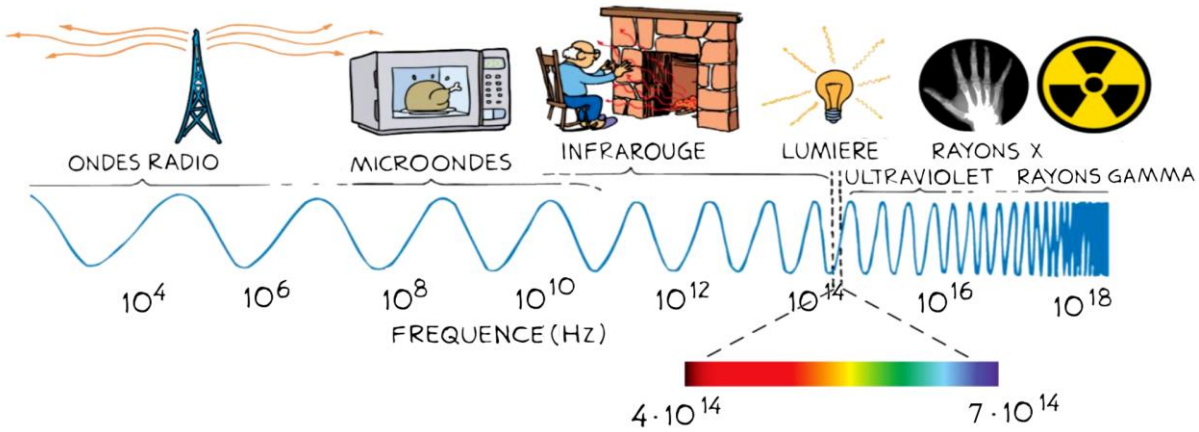
- Plus l'amplitude des vibrations de la source sonore est grande, plus le son émis est intense.
- Plus l'amplitude des vibrations de la source sonore est petite, plus le son émis est faible.

5.2 Les ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques sont créées par des oscillations incroyablement rapides de charges électriques. Les ondes émises par ces charges vibrantes sont constituées de champs électrique et magnétique oscillants. Les directions des deux champs sont perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde. Les ondes électromagnétiques sont donc des ondes transversales.



Selon la fréquence de l'onde électromagnétique, l'onde appartient à un certain domaine de la famille des ondes électromagnétiques :



- La couleur rouge correspond à la lumière visible de plus basse fréquence. Les ondes électromagnétiques de fréquences inférieures au rouge sont appelées ondes **infrarouges**. Par exemple, une lampe chauffante émet des ondes infrarouges.
- La couleur violette correspond à la lumière visible de plus haute fréquence. Les ondes électromagnétiques de fréquences supérieures au violet sont appelées ondes **ultraviolettes**. Elles sont notamment responsables des coups de soleil.

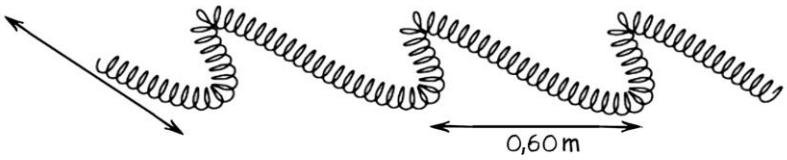
Aucun milieu n'est requis pour la propagation des ondes électromagnétiques, qui peuvent donc également se propager à travers le vide. Voilà pourquoi nous pouvons voir le Soleil, les étoiles et les galaxies. En effet, la lumière se propage à travers le vide de l'Univers.

Les ondes électromagnétiques se déplacent à la vitesse de la lumière, soit environ 300'000 km/s dans le vide. La lumière se propage moins vite dans le verre ou dans d'autres milieux transparents. Par exemple, la célérité de la lumière dans l'eau ne vaut que 75% de celle dans le vide ; dans le diamant elle ne vaut plus qu'environ 40% de celle dans le vide.

Milieu	Vitesse de la lumière
Vide	300 000 km/s
Air	300 000 km/s
Eau	225 000 km/s
Verre	200 000 km/s
Diamant	124 000 km/s

As-tu compris ?

22. La figure montre une partie d'un ressort Slinky, dont l'une des extrémités est agitée avec une fréquence de 2,5 Hz.

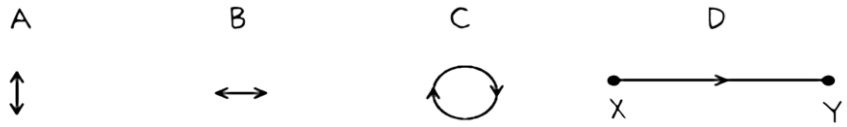


a. Quel type d'onde se propage dans le ressort ? Justifier.

b. Combien de temps faut-il à l'onde pour parcourir une distance de 3 m le long du ressort ?

A. 0,2 s B. 0,5 s C. 2 s D. 5 s

23. Une onde acoustique se propage du point X au point Y. Quelle figure représente le mouvement des molécules d'air entre X et Y lors du passage de l'onde ?



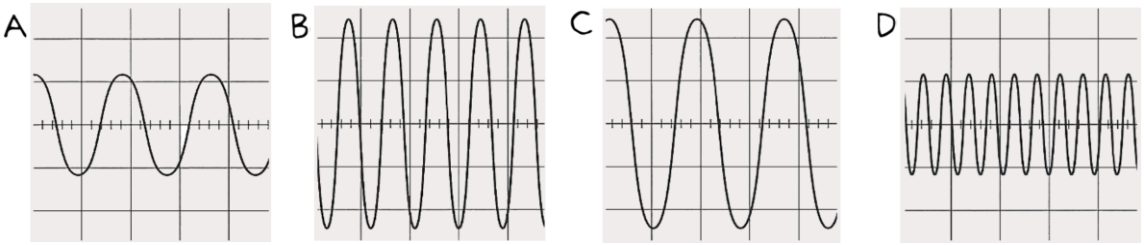
24. Laquelle des propositions donne correctement un exemple d'une onde transversale et d'une onde longitudinale ?

	onde transversale	**onde longitudinale**
A.	lumière	ondes d'eau
B.	ondes radio	son
C.	son	lumière
D.	ondes d'eau	ondes radio

25. Bien que les sons émis par une chauve-souris soient très intenses, un humain ne peut pas les entendre. Pourquoi ?

26. Citer un exemple (a) d'une onde qui est plus rapide dans l'air que dans l'eau et un exemple (b) d'une onde pour laquelle l'inverse est vrai.

27. Un oscilloscope connecté à un microphone est utilisé pour visualiser quatre sons différents émis par un haut-parleur.



a. Quel son a la même fréquence que A ?

b. Quel son a la même intensité que A ?

c. Quels sons sont plus aigus que A ?

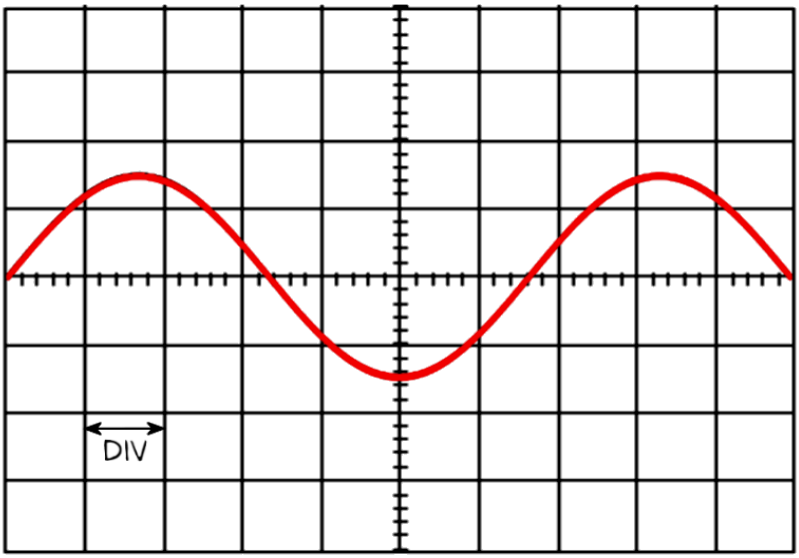
28. Un oscilloscope connecté à un microphone visualise le son émis par un haut-parleur.

a. Sur la figure, indiquer et annoter la distance entre deux crêtes.

b. Déterminer la fréquence de l'onde sonore sachant qu'une division horizontale sur l'oscillogramme correspond à 5 ms.

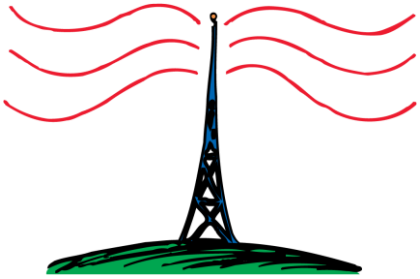
c. Calculer la longueur d'onde de l'onde sonore.

d. Représenter sur la figure un son de fréquence et d'intensité doubles.



29. Le son agaçant d'un moustique est créé par le battement de ses ailes à une fréquence de 680 Hz. Calculer la longueur d'onde du son émis par le moustique.

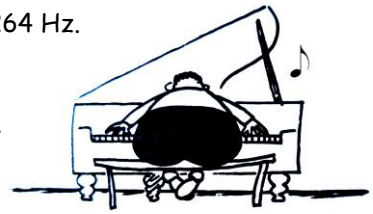
30. Calculer la longueur d'onde des ondes émises par une station radio de fréquence 100 MHz.



31. Un pianiste joue la note « do », dont la fréquence vaut 264 Hz.

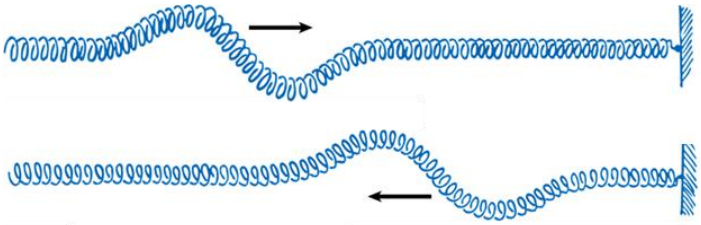
a. Calculer la période de vibration de cette note.

b. Calculer la longueur d'onde de l'onde sonore produite.



6 Réflexion

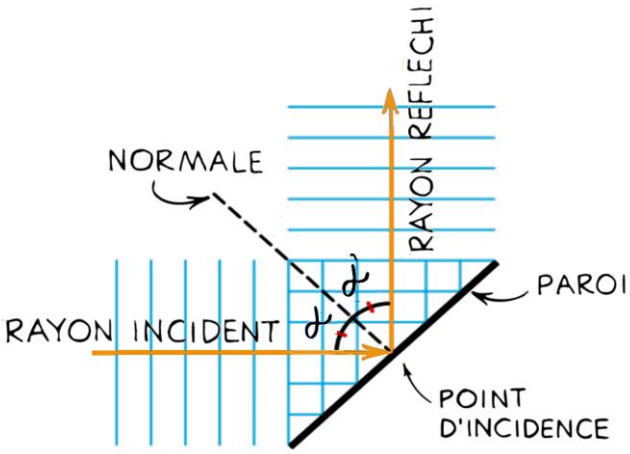
Une onde transversale se propage le long d'un ressort vers une extrémité fixe. L'onde incidente y est **réfléchie**. La célérité de l'onde et sa longueur d'onde restent inchangées après la réflexion.



6.1 Réflexion d'ondes à la surface d'eau

Dans une cuve à ondes, on peut observer la réflexion d'ondes planes par une paroi fixe. Le phénomène de la réflexion d'ondes peut être décrit en utilisant les rayons :

- La ligne perpendiculaire à la paroi et passant par le point d'incidence est appelée la **normale**.
- L'**angle d'incidence** α est l'ange entre le rayon incident et la normale.
- L'**angle de réflexion** α' est l'angle entre le rayon réfléchi et la normale.

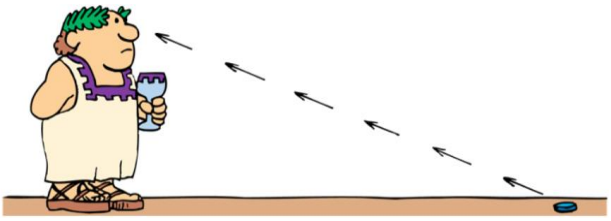


On constate que :

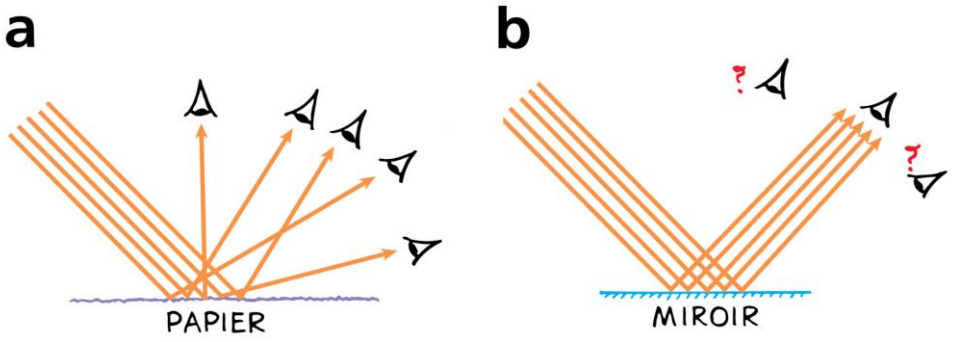
1. Lors de la réflexion, la longueur d'onde λ reste inchangée.
2. Si l'onde frappe la paroi sous un angle, la direction de propagation de l'onde change de façon symétrique par rapport à la normale. L'angle de réflexion est donc égal à l'angle d'incidence : $\alpha' = \alpha$

6.2 Réflexion de la lumière

Afin de voir un objet, il faut que la lumière émise par cet objet pénètre dans nos yeux.



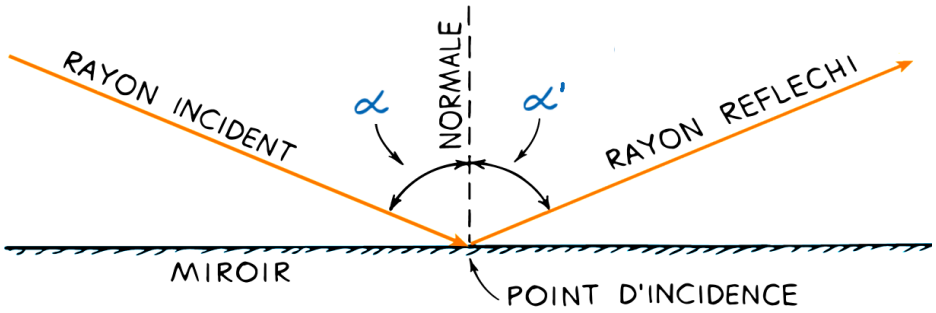
Or, la plupart des objets qui nous entourent n'émettent pas leur propre lumière. Ils sont visibles parce qu'ils réfléchissent la lumière d'une **source lumineuse**, telle que le Soleil, une lampe ou la flamme d'une bougie. La Lune et les planètes sont visibles parce qu'elles réfléchissent la lumière du Soleil.



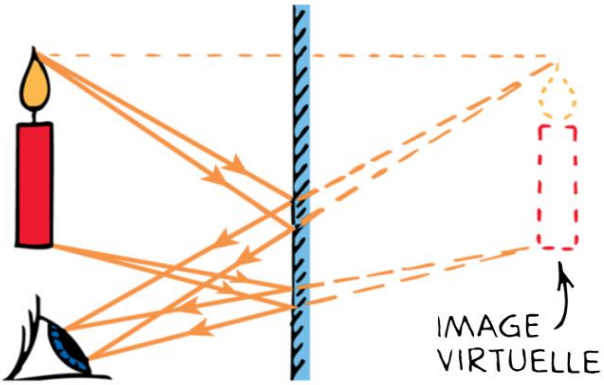
- Lorsqu'une feuille de papier est éclairée par un faisceau lumineux incident parallèle, elle peut être vue sous de nombreux angles différents. Sa surface rugueuse réfléchit les rayons de lumière dans des directions aléatoires. La réflexion est dite **diffuse**.[4]
- Un miroir éclairé par un faisceau lumineux incident parallèle le réfléchit dans une seule direction, car sa surface est très lisse. La réflexion est dite **spéculaire** (**régulière**). La lumière réfléchie n'arrive que dans l'œil d'un observateur placé à un angle particulier.

La réflexion spéculaire est gouvernée par les **lois de la réflexion de la lumière** :

1. Le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale se trouvent dans un même plan.
2. L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion : $\alpha' = \alpha$



Considérons une bougie placée devant un **miroir plan.** D'innombrables rayons de lumière issus de la bougie sont réfléchis par le miroir selon la loi de la réflexion. Pour un observateur qui regarde dans le miroir, ces rayons semblent provenir de derrière le miroir. L'observateur voit ainsi une **image virtuelle** de la bougie. Cette image virtuelle et l'objet sont symétriques par rapport au miroir.



[4] On voit la plupart des objets par réflexion diffuse. Par exemple, le papier de cette page paraît lisse. Or, sous le microscope, sa surface se révèle être rugueuse. Les rayons de lumière incidents sur le papier rencontrent des millions de minuscules surfaces orientées dans toutes les directions. La réflexion diffuse nous permet de lire cette page à partir de n'importe quelle position.

As-tu compris ?

32. Une onde sonore est réfléchie par un mur. Quelle propriété de l'onde peut être modifiée par la réflexion ?

A. sa direction de propagation

B. sa fréquence

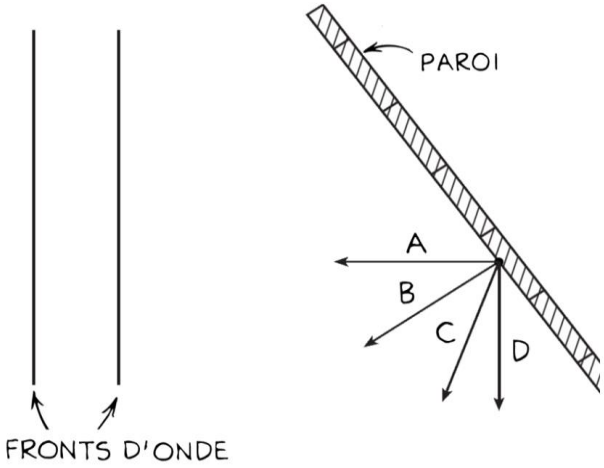
C. sa célérité

D. sa longueur d'onde

33. Dans une cuve à ondes, une onde plane se propage vers une paroi rigide.

a. Représenter le rayon incident.

b. Quel rayon correspond au rayon réfléchi par la paroi ?

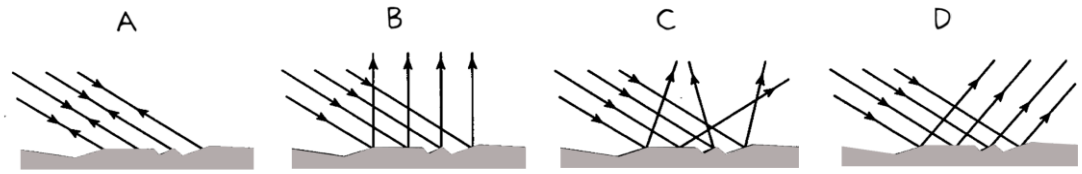


34. Un navire océanique détecte un sous-marin à l'aide d'un sonar qui émet des ondes sonores de fréquence $1{,}18 \cdot 10^3$ Hz vers le fond de l'océan. La célérité de l'ultrason émis vaut 1530 m/s dans l'eau de mer.

a. Calculer la longueur d'onde de l'onde sonore émise par le sonar.

b. En quelle profondeur le sous-marin se trouve-t-il, sachant que le délai de l'écho est de 2 s ?

35. Quelle figure représente une réflexion diffuse sur une surface rugueuse ?



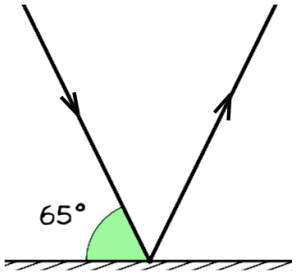
36. Un rayon de lumière est réfléchi par un miroir plan tel qu'illustré sur la figure. Que vaut l'angle de réflexion ?

A. 25°

B. 35°

C. 50°

D. 65°



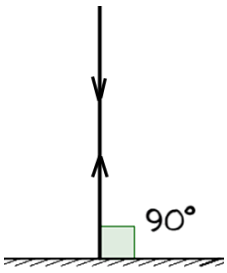
37. Lorsqu'un rayon frappe un miroir tel qu'illustré sur la figure, combien vaut l'angle de réflexion ?

A. 0°

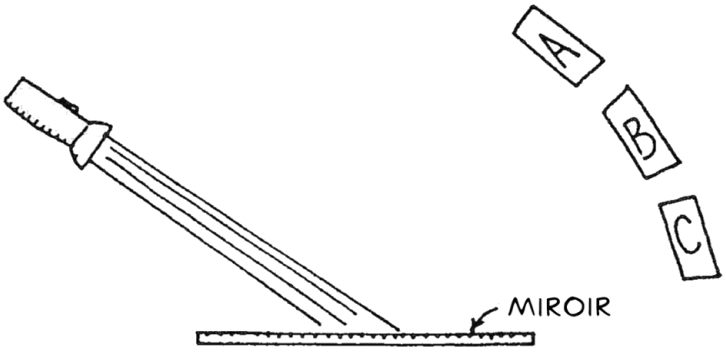
B. 30°

C. 45°

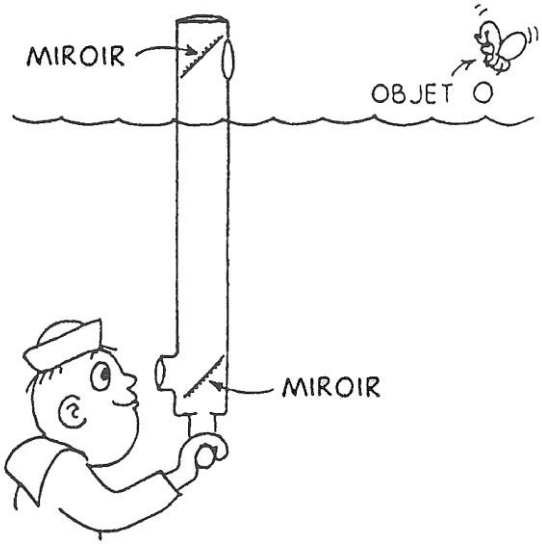
D. 90°



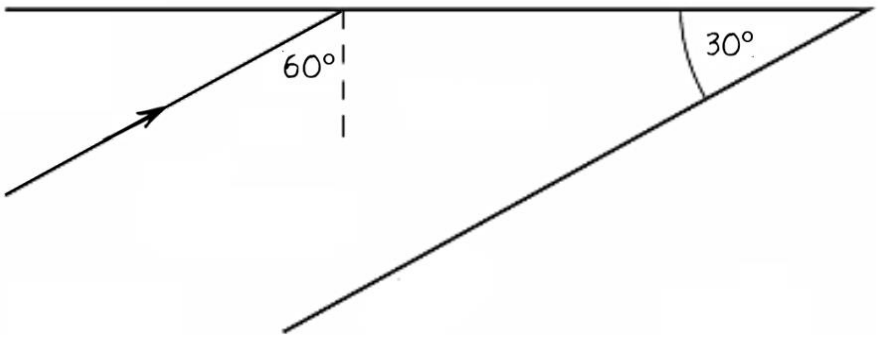
38. Un miroir est illuminé par un faisceau lumineux d'une lampe de poche. Déterminer laquelle des trois cartes est éclairée par le faisceau réfléchi par le miroir.



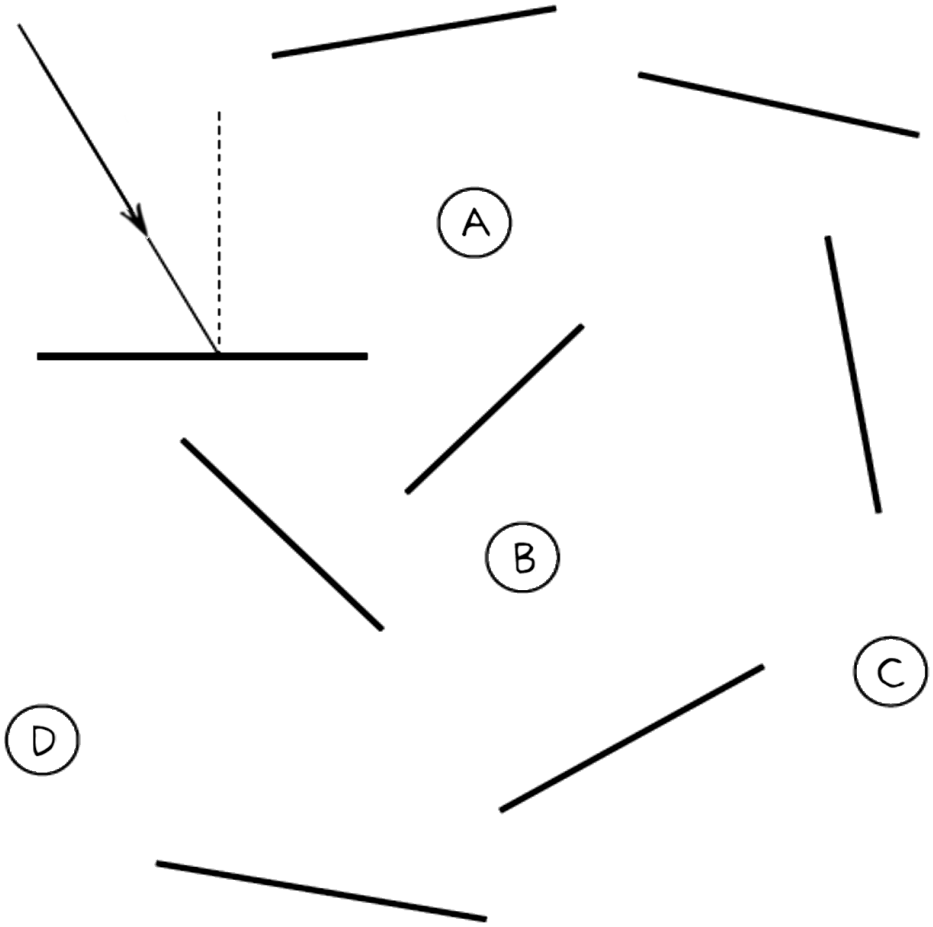
39. Un périscope contient une paire de miroirs. Dessiner le parcours du rayon lumineux depuis la tête de l'objet O jusque dans l'œil de l'observateur.



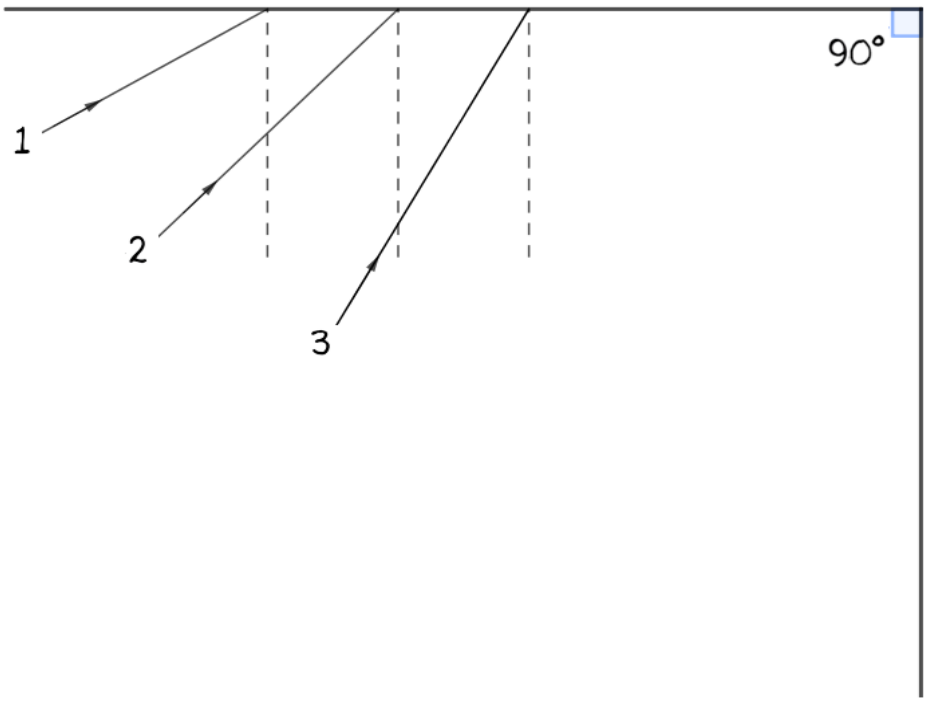
40. Tracer toutes les réflexions du rayon lumineux par les miroirs plans inclinés.



41. Tracer le parcours du rayon de lumière à travers le jeu de miroirs. Quel point (A, B, C ou D) se trouve sur le chemin du rayon de lumière ?



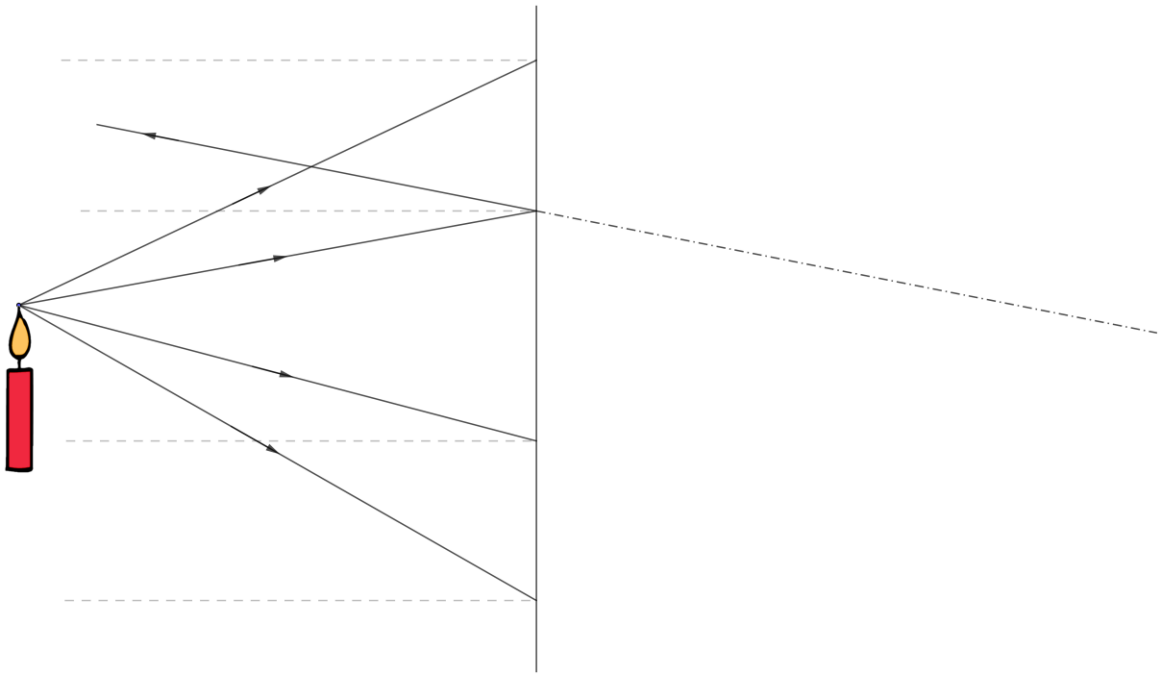
42. Deux miroirs plans sont disposés perpendiculairement. Construire le trajet des trois rayons incidents. Quelle est la particularité des rayons réfléchis ?



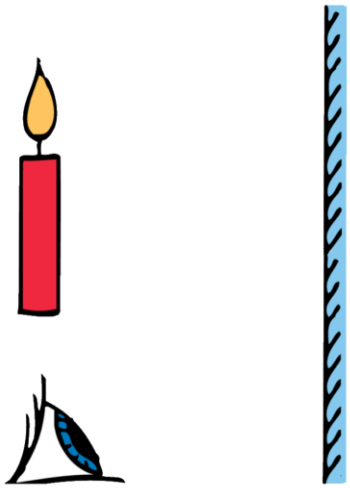
43. La figure indique le prolongement de l'un des rayons de lumière réfléchis par le miroir.

a. Tracer les autres rayons réfléchis, ainsi que leurs prolongements derrière le miroir.

b. Localiser l'image de la flamme de la bougie. S'agit-il d'une image réelle ou virtuelle ?



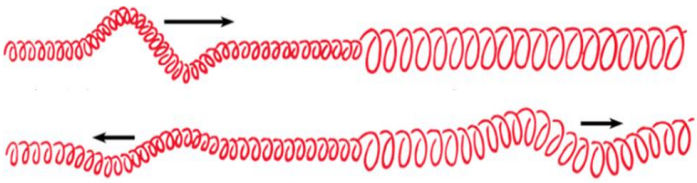
44. Tracer le rayon lumineux issu de la pointe de la flamme qui pénètre au centre de la pupille de l'œil, après avoir subi une réflexion sur le miroir.



7 Réfraction

7.1 Réflexion et transmission

Une onde transversale se propage le long d'un ressort 1 relié à un ressort 2. Au point de séparation entre les deux ressorts, l'onde incidente est **partiellement réfléchie**, sans changement de longueur d'onde et partiellement **transmise** dans le ressort 2.



Lors de la transmission, la fréquence de l'onde reste identique à la fréquence de vibration de la source. D'après la relation $\lambda = \frac{c}{f}$:

- Si $c_2 > c_1$, la longueur d'onde augmente lors de la transmission : $\lambda_2 > \lambda_1$
- Si $c_2 < c_1$, la longueur d'onde diminue lors de la transmission : $\lambda_2 < \lambda_1$

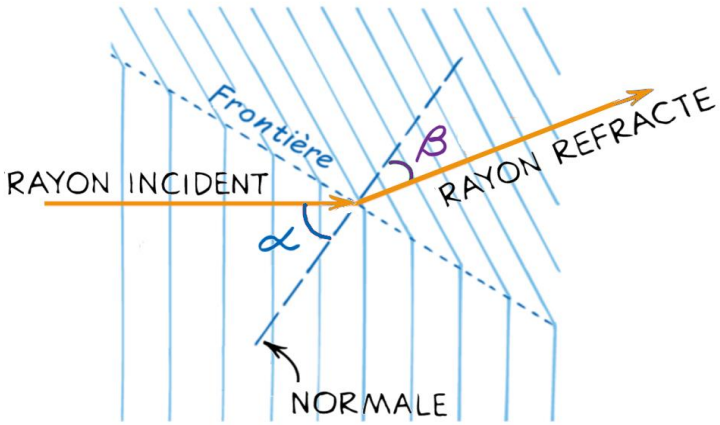
7.2 Réfraction d'ondes à la surface d'eau

Dans une cuve à ondes, on peut observer le comportement d'ondes planes lorsqu'elles franchissent une ligne de séparation entre deux zones à profondeurs différentes. Rappelons que la célérité des ondes augmente avec la profondeur de l'eau.

Observations :

1. À la ligne de séparation, l'onde incidente est partiellement réfléchie et partiellement transmise.
2. Si l'onde passe dans l'eau moins profonde ($c_2 < c_1$), la longueur d'onde diminue ($\lambda_2 < \lambda_1$).
   Si l'onde passe dans l'eau plus profonde ($c_2 > c_1$), la longueur d'onde augmente ($\lambda_2 > \lambda_1$).
3. Si l'onde incidente franchit la ligne de séparation de manière oblique, le rayon de l'onde est dévié. Ce phénomène est appelé **réfraction** (« Brechung »).

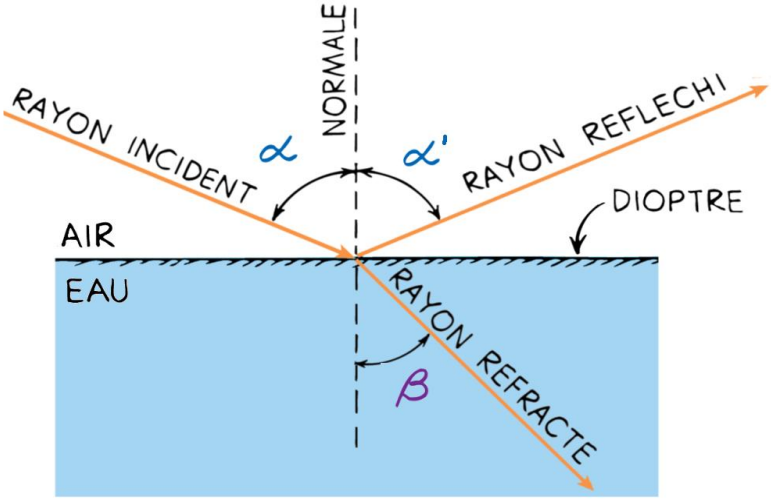
- Le rayon de l'onde réfractée est appelé **rayon réfracté**.
- L'**angle d'incidence α** est l'angle entre le rayon incident et la normale.
- L'**angle de réfraction β** est l'angle entre le rayon réfracté et la normale.



4. Si l'onde passe dans l'eau moins profonde ($c_2 < c_1$), le rayon de l'onde se rapproche de la normale.
   Si l'onde passe dans l'eau plus profonde ($c_2 > c_1$), le rayon de l'onde s'écarte de la normale.

7.3 Réfraction de la lumière

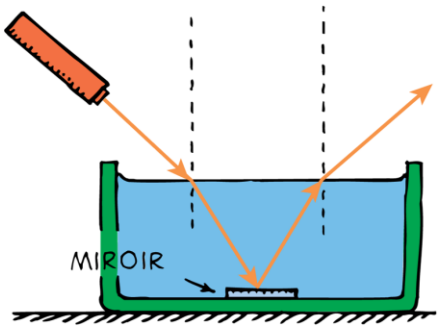
Lorsque la lumière tombe sur une surface de séparation entre deux milieux transparents (dioptre), la lumière y est partiellement réfléchie et partiellement réfractée. Rappelons que la célérité de la lumière est plus grande dans l'air que dans le verre. Lorsque la lumière passe de l'air dans le verre, la lumière est partiellement réfléchie à la surface de séparation entre les deux milieux (selon la loi de la réflexion) et partiellement réfractée dans le verre, de manière que le rayon réfracté s'approche de la normale. En revanche, lorsque la lumière passe du verre dans l'air, le rayon réfracté s'écarte de la normale.



- Si $c_2 < c_1$, le rayon réfracté s'approche de la normale ($\alpha > \beta$).
- Si $c_2 > c_1$, le rayon réfracté s'écarte de la normale ($\alpha < \beta$).
- Si le rayon incident est parallèle à la normale ($\alpha = 0°$), le rayon n'est pas dévié ($\beta = 0°$).

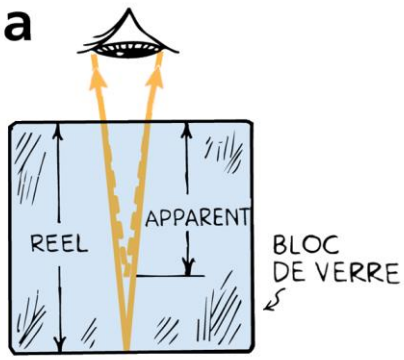
Exemple

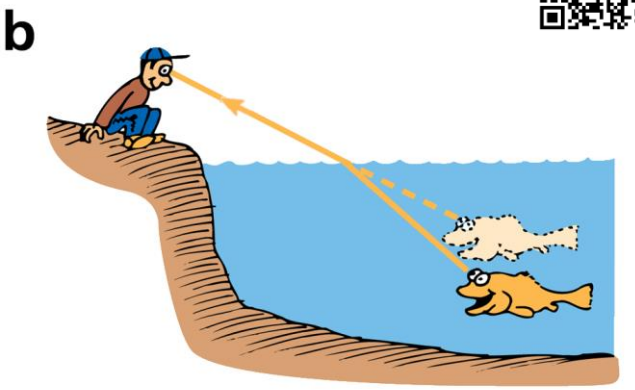
L'expérience illustrée ci-contre montre comment un faisceau laser se rapproche de la normale lorsqu'il passe de l'air dans l'eau et s'écarte de la normale lorsqu'il repasse dans l'air après la réflexion sur le miroir au fond du récipient.



Applications

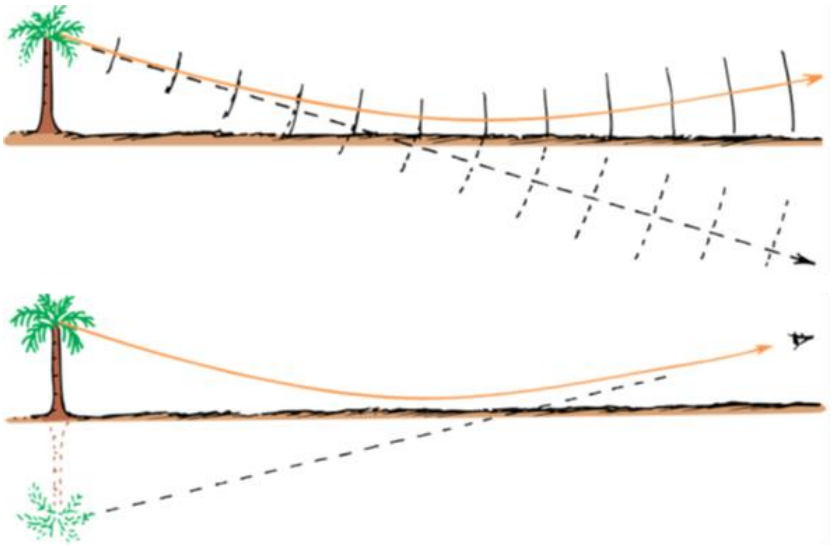
a. La profondeur apparente du bloc de verre est inférieure à la profondeur réelle.
b. Le poisson semble être plus proche de la surface qu'il ne l'est réellement.



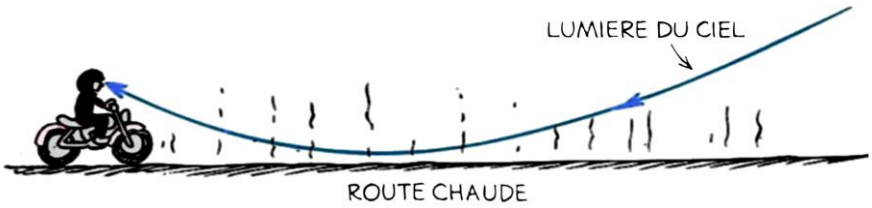


7.4 Phénomène naturel : la réfraction atmosphérique

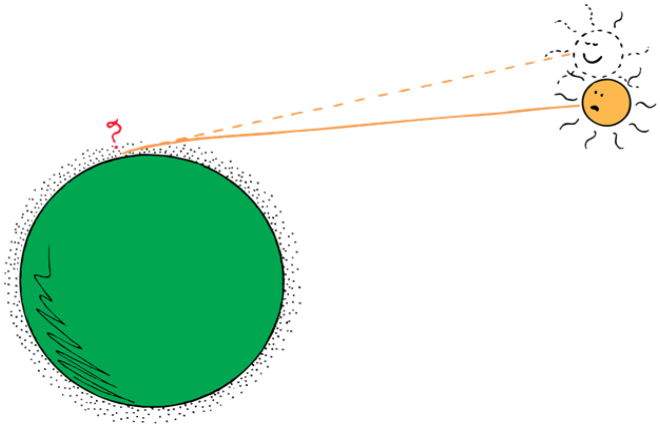
- Un **mirage** est causé par la réfraction de la lumière dans des couches d'air de températures différentes. Les fronts d'onde de la lumière se déplacent plus rapidement dans l'air chaud près du sol que dans l'air plus froid situé au-dessus. Une réfraction progressive fait dévier les rayons de lumière vers le haut.



- Un automobiliste peut être confronté à une situation similaire. Une route très chaude semble être mouillée et le ciel semble y être réfléchi. Or, en réalité, la lumière du ciel est réfractée à travers une couche d'air chaud. L'eau que nous voyons est en réalité le ciel. Un mirage n'est pas une illusion de l'esprit : il est formé par des ondes de lumière réelles et peut être photographié.

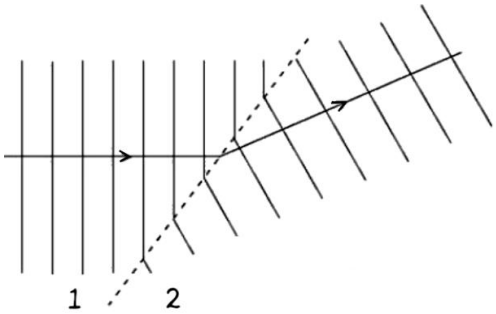


- La célérité de la lumière dans l'air n'est que de 0,03% inférieure à celle dans le vide, mais il existe des situations où la **réfraction atmosphérique** devient perceptible. Ainsi, lorsqu'on regarde le coucher du Soleil, on peut voir le Soleil encore un peu après qu'il a réellement sombré en-dessous de l'horizon. Puisque la masse volumique de l'atmosphère change progressivement, les rayons solaires sont réfractés progressivement et suivent ainsi une trajectoire incurvée. Le même phénomène a lieu au lever du Soleil. Grâce à cette réfraction atmosphérique, nos journées sont environ 5 minutes plus longues.



As-tu compris ?

45. La figure montre le passage d'une onde d'eau par une surface de séparation entre deux zones de profondeurs différentes.



a. Qu'est-ce qui provoque la réfraction de l'onde ?

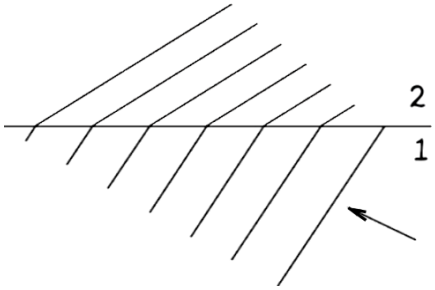
A. Un changement de fréquence de l'onde

B. Un changement de la longueur d'onde

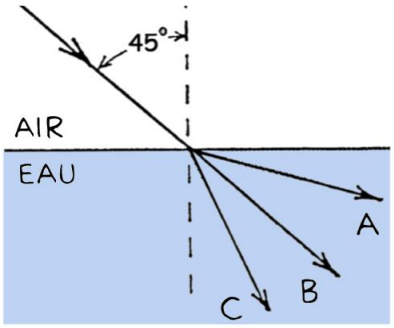
C. Un changement de la célérité de l'onde

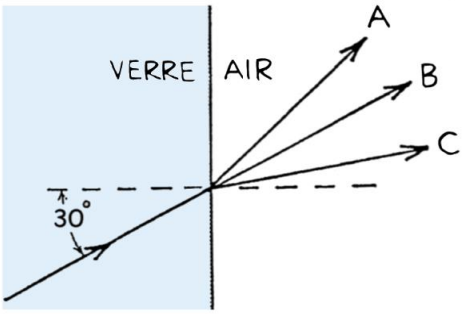
b. Dans quelle zone l'eau est-elle plus profonde ? Donner deux justifications.

46. Une onde de lumière est réfractée lors du passage d'un milieu transparent dans un autre. Dans quel milieu la célérité de la lumière est-elle plus grande ? Donner deux justifications.

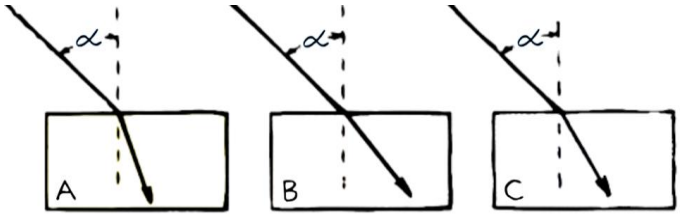


47. Lequel des rayons de lumière représente le rayon réfracté ?

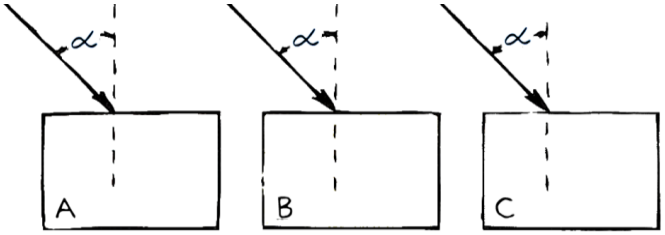




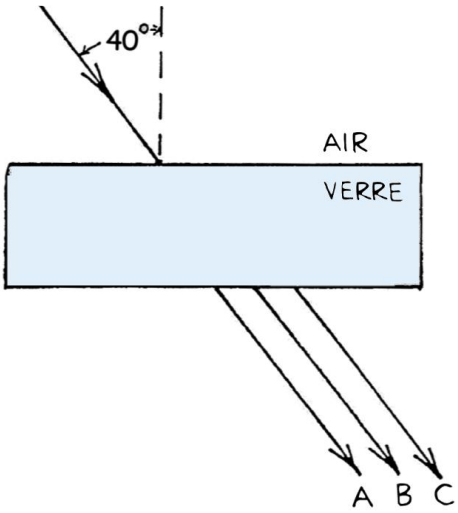
48. Des rayons de lumière passent de l'air dans trois milieux transparents différents sous un même angle d'incidence. Ranger par ordre décroissant les célérités de la lumière dans les trois milieux.



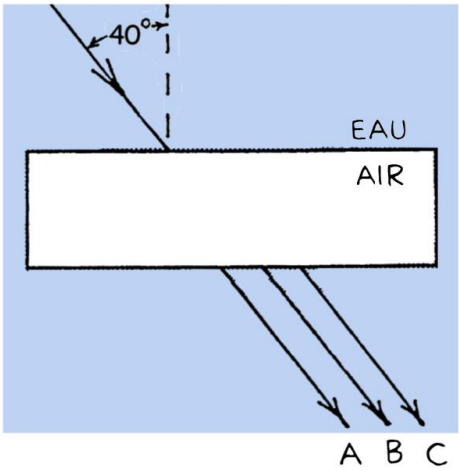
49. Des rayons de lumière identiques sont réfractés en passant de l'air dans trois milieux transparents : A est de l'eau, B du verre et C un diamant. Ranger par ordre décroissant les valeurs des angles de réfraction dans les milieux A, B et C.



50. Un rayon de lumière passe de l'air dans un bloc de verre. Lequel des rayons A, B ou C est celui qui ressort dans l'air ? Représenter le parcours du rayon de lumière dans le bloc de verre.



51. Un rayon de lumière passe de l'eau dans un bloc d'air (entouré d'une très mince membrane en plastique). Lequel des rayons A, B ou C est celui qui ressort dans l'eau ? Représenter le parcours du rayon de lumière dans le bloc d'air.



52. La simulation Geogebra (code QR) donne l'angle de réfraction en fonction de l'angle d'incidence pour le passage d'un milieu 1 vers un milieu 2 :

a. Fixer le rapport des célérités de la lumière pour le passage air → verre.

b. Remplir le tableau :

α	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
β								
a (cm)								
b (cm)								
a/b								

c. Est-ce que les angles d'incidence et de réfraction sont proportionnels ? Justifier.

d. Comparer le rapport a/b avec le rapport des célérités de la lumière dans les deux milieux.

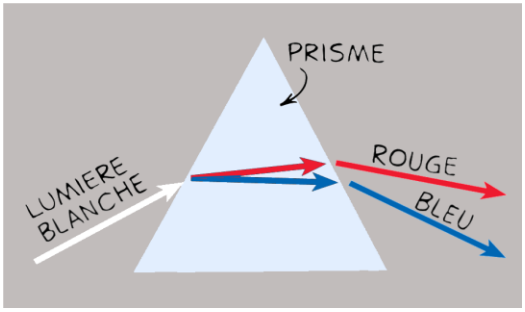
e. En déduire l'angle de réfraction pour un angle d'incidence de 45° lorsque la lumière passe de l'air dans l'eau. Vérifier le résultat à l'aide de la simulation.

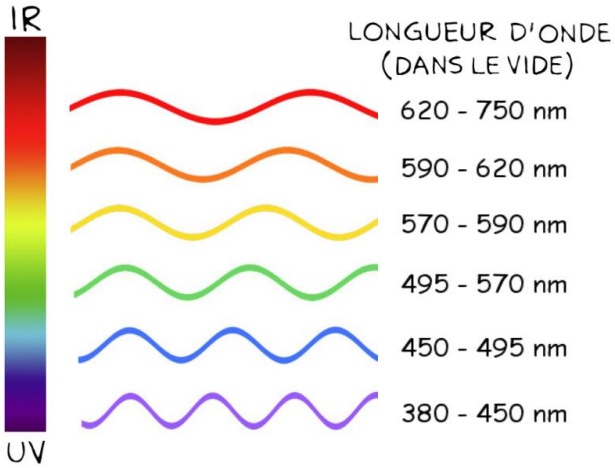
8 Dispersion

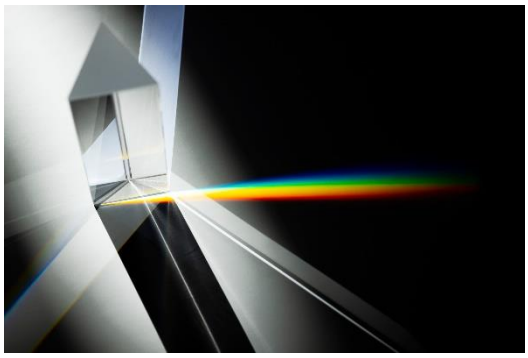
Dans un milieu transparent, la célérité de la lumière est inférieure à celle dans le vide. De combien, cela dépend à la fois de la nature du milieu (verre, eau, diamant, …), et de la fréquence de la lumière (c'est-à-dire de la couleur). Dans le verre ordinaire, la lumière violette se déplace environ 1% plus lentement que la lumière rouge. Par conséquent, différentes couleurs de lumière sont réfractées de façon légèrement différente.

8.1 Prisme

Lorsque la lumière blanche est réfractée deux fois dans le même sens, comme dans un prisme, on peut observer une bande colorée, appelée le **spectre de la lumière blanche**.[5] Les couleurs de ce spectre sont les **couleurs spectrales**. À chaque couleur spectrale correspond une fréquence (et une longueur d'onde dans le vide) spécifique.

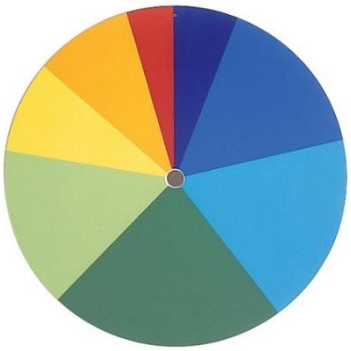






La décomposition d'une onde en un spectre de fréquences est appelée **dispersion**. Pour la lumière, la dispersion est la décomposition de la lumière blanche en ses couleurs spectrales.

Ce n'est pas le prisme qui colore la lumière, mais la lumière blanche est un mélange de toutes les couleurs spectrales. Inversement, la superposition de toutes les couleurs spectrales redonne de la lumière blanche. Le disque de Newton est composé de secteurs aux couleurs spectrales. En faisant tournant le disque rapidement, il paraît blanc.



Lorsqu'on fait passer une couleur spectrale dans un second prisme, elle ne se décompose plus. Il existe cependant d'autres couleurs de lumière (p. ex. magenta) qui ne font pas partie du spectre de lumière blanche. Celles-ci sont obtenues par combinaison de différentes couleurs spectrales.

Le **noir** est une absence de lumière. Les objets paraissent noirs lorsqu'ils absorbent toutes les couleurs du spectre de lumière.

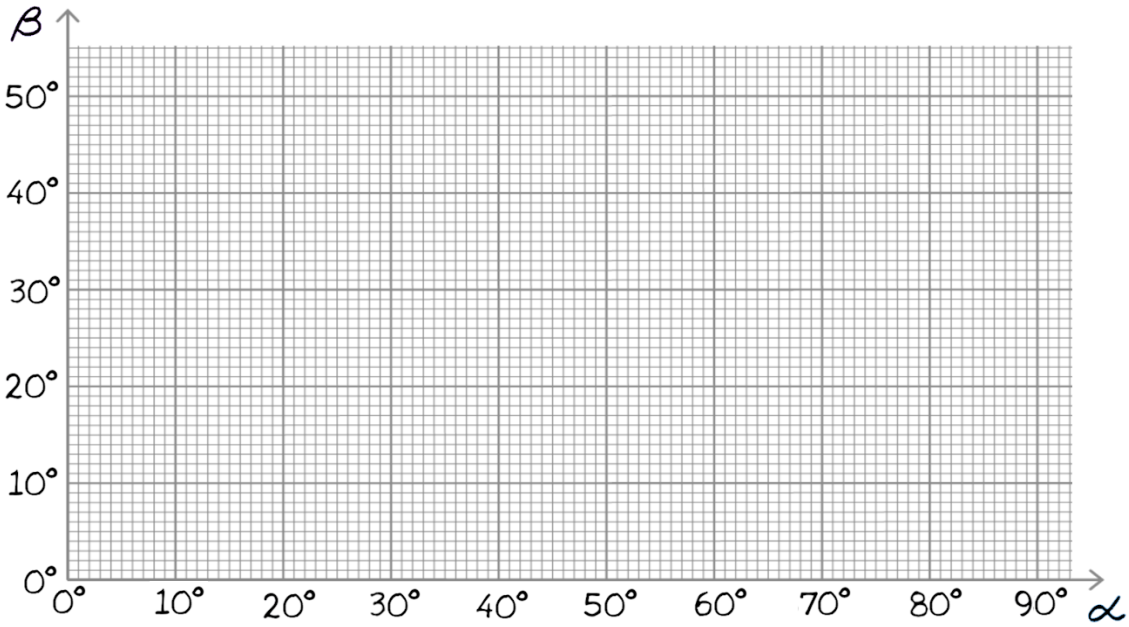
[5] Isaac Newton, célèbre physicien anglais du 17e siècle, fut le premier à analyser de façon systématique l'origine des couleurs du spectre obtenu en tenant un prisme de verre dans la lumière du Soleil.

As-tu compris ?

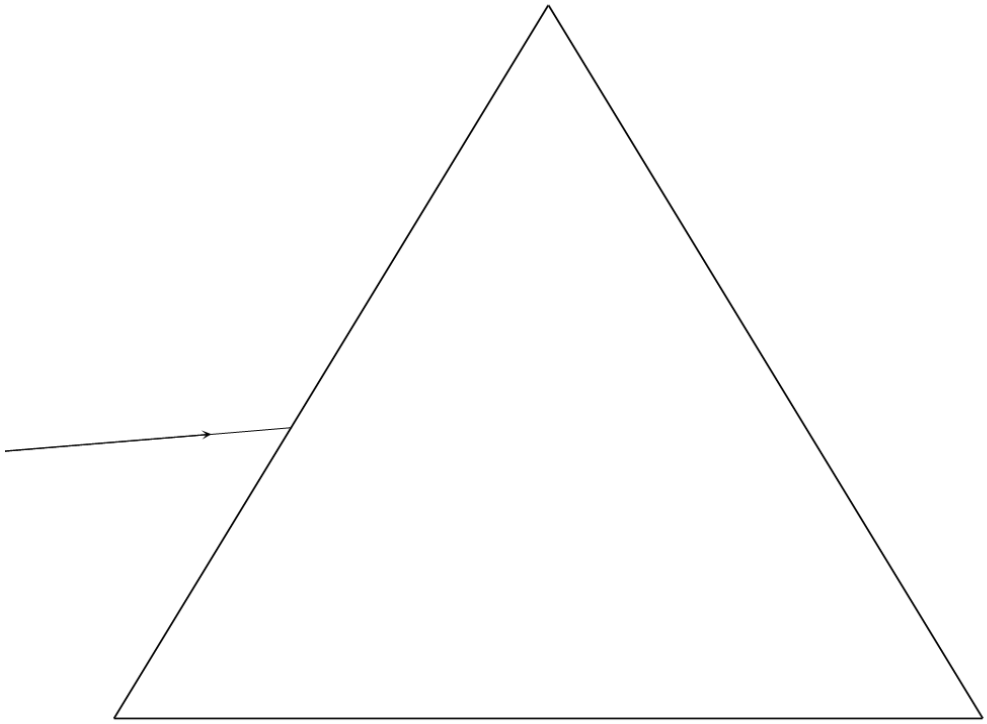
53. Angles de réfraction pour la lumière rouge et violette lors du passage de l'air dans le plexiglas :

α	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	89°
β rouge	0°	7,0°	13,8°	20,4°	26,6°	32,3°	37,2°	41,0°	43,4°	44,2°
β violet	0°	6,4°	12,6°	18,7°	24,3°	29,3°	33,6°	36,9°	39,0°	39,8°

a. Représenter les mesures pour la lumière rouge et la lumière violette dans le diagramme.

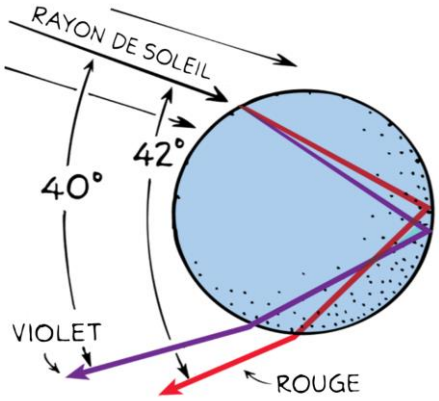


a. Tracer le parcours des rayons de lumière rouge et violette jusqu'à leur sortie du prisme.

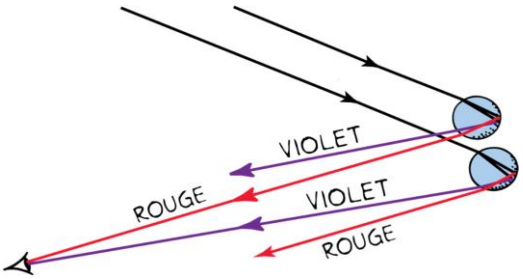


8.2 Arc-en-ciel (facultatif)

Une manifestation spectaculaire de la dispersion est l'arc-en-ciel. Le Soleil brillant dans le dos et des gouttes d'eau (nuage, pluie, jet d'eau) se trouvant en face, on peut contempler le spectre de la lumière blanche sous forme d'un arc de cercle.



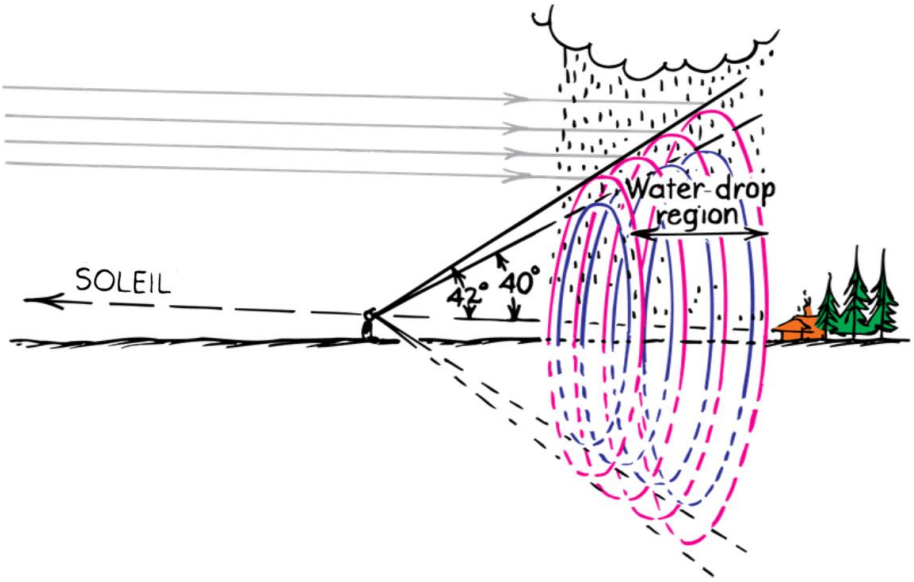
Lors de l'entrée dans une goutte d'eau, les rayons de Soleil sont *réfractés* et se dispersent dans les différentes couleurs spectrales. Une partie des rayons est *réfléchie* à l'arrière de la goutte (le reste étant réfracté dans l'air), puis, en ressortant à l'avant de la goutte, une deuxième réfraction accentue la *dispersion*. L'angle maximal entre les rayons incidents et émergeants vaut 42° pour la lumière rouge et 40° pour la lumière violette. Il y a une forte concentration d'intensité lumineuse proche de cet angle maximal de déviation.



Bien que chaque goutte disperse un spectre de toutes les couleurs, un observateur ne peut voir la lumière intense que d'une seule couleur provenant d'une goutte donnée. En effet, si la lumière violette atteint l'œil, la lumière rouge de cette même goutte passe en dessous. Pour voir la lumière rouge, il faut regarder une goutte située légèrement au-dessus.

Conséquences

- Les rayons de lumière colorée qui émergent de la goutte atteignent l'œil d'un observateur s'ils forment avec la direction du Soleil un angle de 40 à 42°. Toutes les gouttes que nous pouvons voir sous ces angles se trouvent sur une bande en forme d'un arc de cercle. C'est l'arc-en-ciel primaire.[6]
- L'intérieur de l'arc-en-ciel forme un disque de lumière blanche, car un mélange de toutes les couleurs atteint l'œil de l'observateur sous des angles inférieurs à 40°.
- Le ciel apparaît plus sombre en dehors de l'arc-en-ciel car aucune lumière, ayant subi une seule réflexion à l'intérieur de la goutte, n'émerge de la goutte à des angles supérieurs à 42°.



[6] Parfois un arc-en-ciel secondaire est visible environ 10° au-dessus de l'arc primaire. L'arc secondaire résulte d'une double réflexion à l'intérieur des gouttes d'eau. Les couleurs de l'arc secondaire sont moins intenses et l'ordre des couleurs est inversé.

9 Réflexion totale

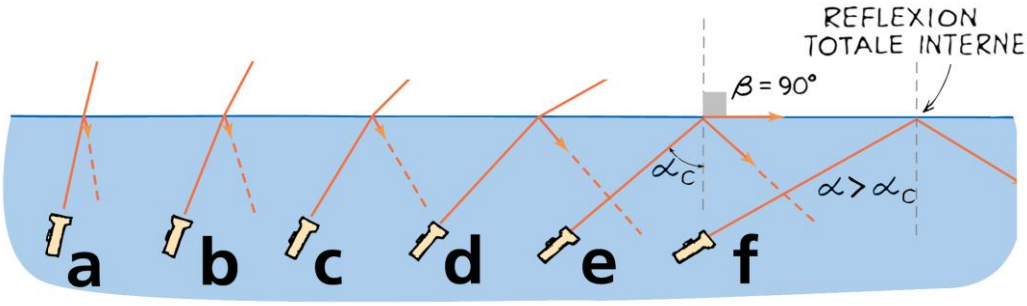
9.1 Réflexion totale interne d'ondes à la surface d'eau

Lors du passage d'une onde plane entre l'eau peu profonde (milieu 1) et l'eau profonde (milieu 2, dans lequel la célérité est plus grande), l'onde est partiellement réfléchie et partiellement réfractée en s'écartant de la normale. En augmentant peu à peu l'angle d'incidence, on peut observer qu'à partir d'un certain angle critique, l'onde incidente n'est plus du tout réfractée dans le milieu 2, mais est totalement réfléchie dans le milieu 1. Ce phénomène est appelé **réflexion totale interne**.

Dans le cas d'une transmission d'une onde vers un milieu dans lequel sa célérité est plus grande, il existe un **angle critique α_c.** C'est l'angle d'incidence pour lequel l'angle de réfraction vaut 90°. Si $\alpha > \alpha_c$, l'onde n'est plus du tout réfractée à la surface de séparation des deux milieux, mais elle est totalement réfléchie vers le premier milieu.

9.2 Réflexion totale interne de la lumière

Une lampe étanche immergée dans l'eau brille vers le haut. En inclinant peu à peu la lampe, on constate que l'intensité de la lumière réfractée (émergeant de l'eau) diminue, alors que l'intensité de la lumière réfléchie dans l'eau augmente. Au-delà de l'angle critique (qui vaut environ 48° pour le passage eau → air), le faisceau n'est plus réfracté à la surface de séparation, mais y subit une **réflexion totale interne** dans l'eau.

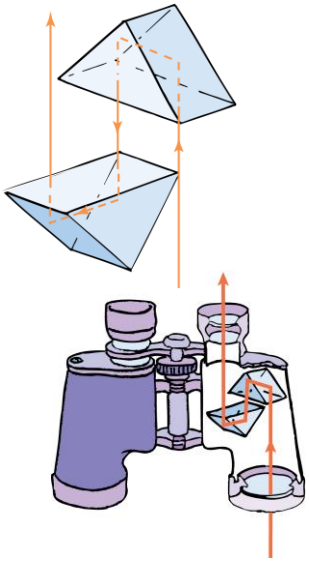


a - d La lumière qui frappe la surface de séparation à des angles d'incidence inférieurs à l'angle critique est partiellement réfractée et partiellement réfléchie dans l'eau.

e À l'angle critique α_c, le faisceau réfracté est parallèle la surface de séparation.

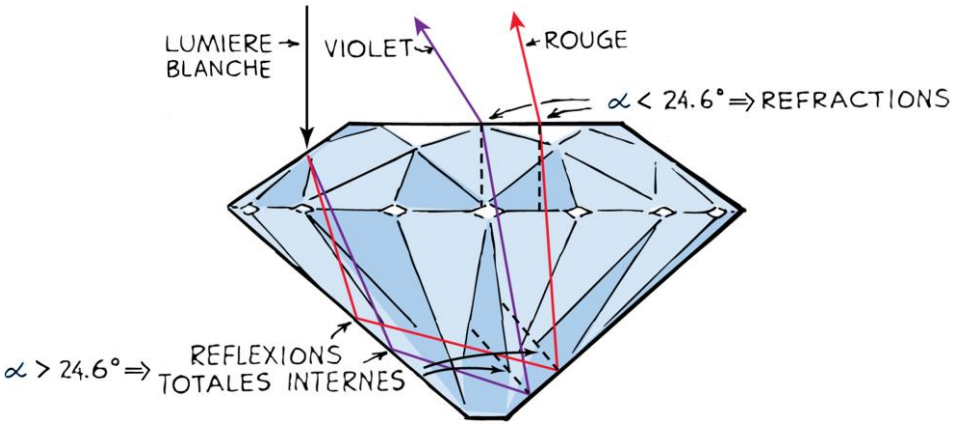
f Pour des angles d'incidence au-delà de l'angle critique il y a une réflexion totale interne.

Exemples

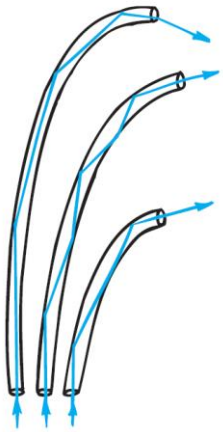


- L'angle critique pour le passage verre → air est d'environ 43°. Cela signifie qu'à l'intérieur du verre, les rayons de lumière qui tombent sous un angle d'incidence supérieur à 43° sur le dioptre verre-air sont totalement réfléchis à l'intérieur du verre. La réflexion totale interne est comme son nom l'indique : totale - 100%. Les miroirs ne réfléchissent que 90 à 95% de la lumière incidente, donc des prismes sont utilisés à la place des miroirs dans de nombreux **instruments optiques**. Le système optique d'une paire de jumelles est constitué de deux prismes servant à inverser l'image et à la rectifier de gauche à droite. Le rayon tombe sous un angle d'incidence de 45° (> l'angle critique de 43°) sur les faces latérales des prismes et y subit des réflexions totales internes.

- L'angle critique pour un **diamant** ne vaut que 24,6°. Tous les rayons lumineux qui, en venant de l'intérieur, tombent sous un angle d'incidence supérieur à 24,6° sur une surface d'un diamant sont donc piégés à l'intérieur du diamant par réflexion totale interne. Un angle critique aussi petit signifie que la lumière a plus de chances de rester piégée dans un diamant que de pouvoir y échapper.
  La brillance des diamants est due au phénomène de réflexion totale interne. En effet, dans un diamant taillé, la lumière qui pénètre sur une facette subit en général plusieurs réflexions totales à l'intérieur du diamant, sans perte d'intensité. Elle sort ensuite d'une autre facette dans une autre direction. Un petit angle critique associé à une réfraction prononcée produisent une grande dispersion et un large spectre de couleurs brillantes, typiques du diamant.

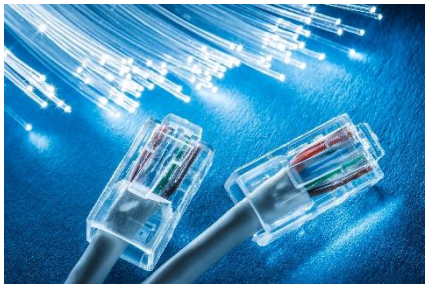


- Une **fibre optique** (« Glasfaser »), aussi appelée *guide de lumière*, est une fibre de verre très mince qui conduit la lumière d'un endroit à un autre par une série de réflexions totales internes. Même si les fibres sont courbées, la lumière les traverse pratiquement sans perte - chose étonnante, si l'on sait que la lumière se déplace en général en ligne droite.



  Les fibres optiques sont utiles pour **éclairer des endroits inaccessibles**. Ainsi, les mécaniciens les utilisent pour regarder l'intérieur des moteurs et les médecins les utilisent dans l'*endoscope*, un appareil d'observation qui permet d'examiner les organes internes. Les fibres optiques peuvent être suffisamment minces pour serpenter à travers les vaisseaux sanguins ou à travers des canaux très étroits dans le corps, tels que l'urètre.

  Les câbles réseau à fibres optiques sont importants en **communication**, car ils ont de nombreux avantages par rapport aux câbles en cuivre, plus lourds et coûteux. Le débit informatique est plus grand dans les hautes fréquences de la lumière visible que dans les basses fréquences du courant électrique. De plus, contrairement à l'électricité, la lumière est indifférente à la température et aux fluctuations de champs magnétiques environnants ; le signal est donc plus clair. Autre avantage, les messages lumineux sont beaucoup moins susceptibles d'être interceptés par des écoutes clandestines.



As-tu compris ?

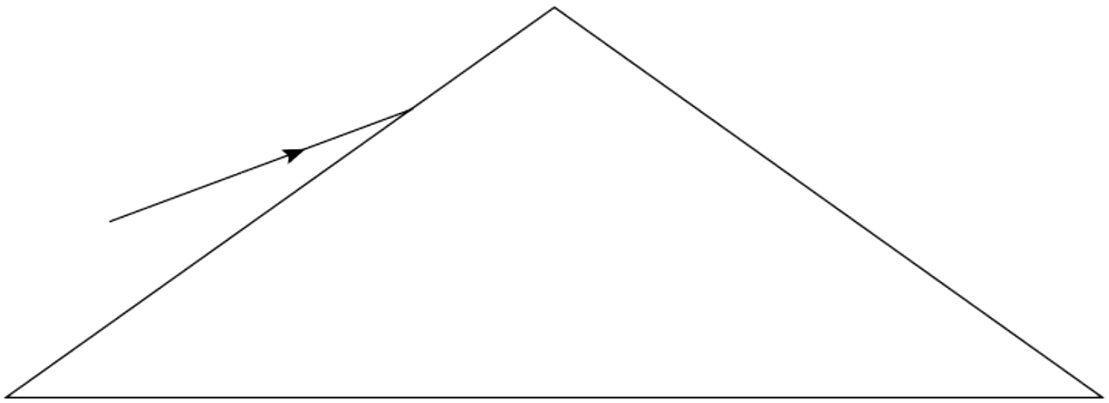
54. L'angle critique de réflexion totale est l'angle d'incidence d'une lumière qui est

D. réfracté à un angle de 90° par rapport à la normale.

E. réfléchi à un angle de 90° par rapport à la normale.

F. totalement absorbé.

55. Tracer le parcours du rayon laser rouge à travers le prisme en plexiglas (jusqu'à sa première sortie du prisme). Consulter le diagramme de l'exercice 53 pour les angles de réfractions (s'ils existent).

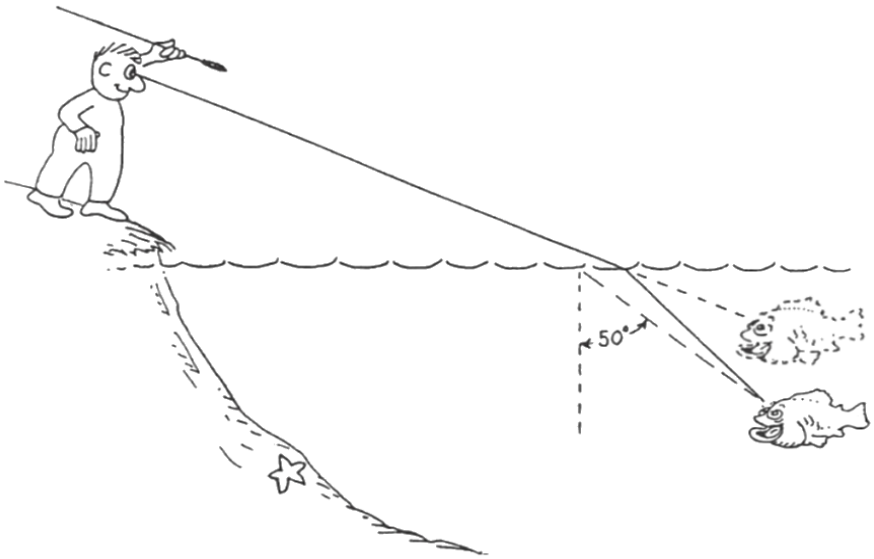


56. L'homme sur la figure voit le poisson plus proche de la surface d'eau qu'il ne l'est en réalité.

a. Tracer le rayon lumineux qui pénètre dans l'œil du poisson lorsque celui-ci regarde vers le haut sous un angle de 50° par rapport à la verticale. Que voit le poisson ?

b. Pour voir l'homme, le poisson devrait-il regarder plus haut ou plus bas ?

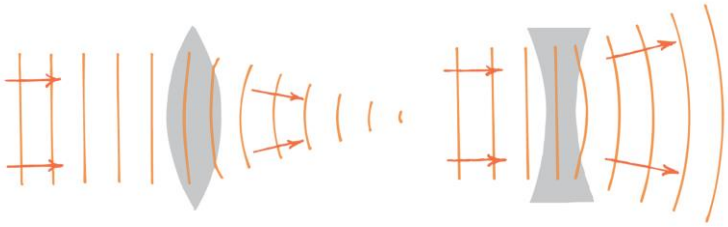
c. Si les yeux du poisson se trouvaient juste au-dessus de l'eau, il pourrait voir le monde extérieur sous un angle de 180° (horizon à horizon). Lorsque le poisson se trouve sous l'eau, à cause de l'angle critique de réflexion totale pour le passage eau - air (48°), le poisson voit le monde extérieur comprimé dans un angle de _____.



10 Lentilles

10.1 Types de lentilles

Une lentille est une pièce qui, par sa forme, fait converger ou diverger une onde par réfraction. Il existe deux types de lentilles :



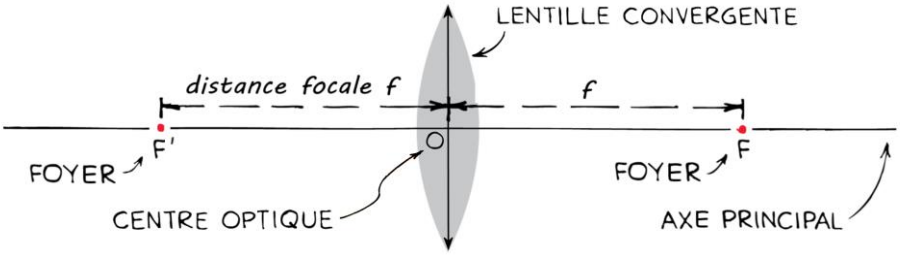
- Si la lentille est plus épaisse au milieu, les fronts d'onde sont retardés davantage au centre de la lentille et les rayons convergent derrière la lentille. C'est une lentille *convergente*.
- Si la lentille est plus mince au milieu, les fronts d'onde sont retardés davantage aux bords de la lentille et les rayons divergent derrière la lentille. C'est une lentille *divergente*.

Une lentille optique peut également être interprétée comme un grand nombre de portions de prismes qui font dévier des rayons incidents parallèles. La déviation la plus importante se produit au niveau des prismes les plus externes, car l'angle entre les faces du prisme est maximal. Aucune déviation ne se produit dans le prisme central, car ses faces sont parallèles.

a. Une **lentille convergente** fait converger des rayons incidents parallèles en un point derrière la lentille.

b. Une **lentille divergente** fait diverger des rayons incidents parallèles de sorte que les rayons émergeants semblent provenir d'un point situé devant la lentille.

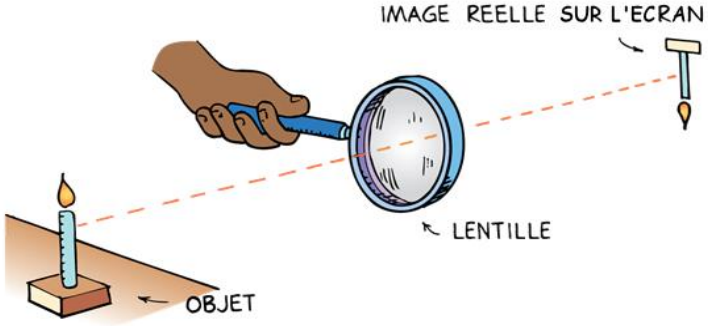
10.2 Caractéristiques d'une lentille



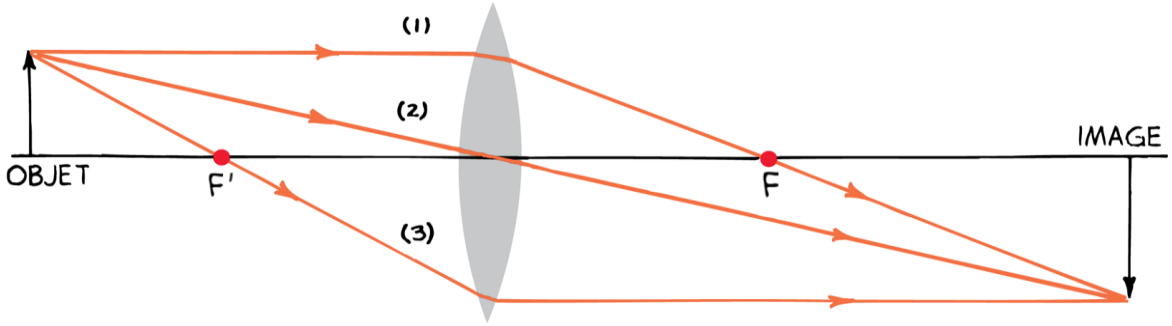
- Le **foyer** F (resp. F') d'une lentille est le point auquel un faisceau de lumière incident, parallèle à l'axe principal, converge. Comme chaque lentille a deux faces, chaque lentille a deux foyers.
- La **distance focale** f est la distance entre le centre optique et l'un ou l'autre foyer.

10.3 Formation d'images par une lentille convergente

Lorsqu'un objet se trouve au-delà de la distance focale d'une lentille convergente, la lumière émise par l'objet converge derrière la lentille et forme ainsi une **image réelle** de l'objet, c'est-à-dire une image qui peut être recueillie sur un écran. L'image réelle formée par une lentille convergente est renversée.



Un **diagramme de rayons** est pratique pour déterminer la taille et l'emplacement d'une image. Une flèche est utilisée pour représenter l'objet. Par simplicité, l'objet est placé directement sur l'axe principal et l'on utilise le sommet de la flèche comme point objet dont on cherche à construire l'image.



Chaque point de l'objet émet des rayons lumineux dans toutes les directions. Parmi ces rayons, on utilise **trois rayons principaux** pour la construction d'un diagramme de rayons :

(1) Un rayon parallèle à l'axe principal est dévié par la lentille et passe par le foyer F.
(2) Un rayon qui passe par le centre de la lentille la traverse sans déviation.
(3) Un rayon qui passe par le foyer F' émerge de la lentille parallèlement à l'axe principal.

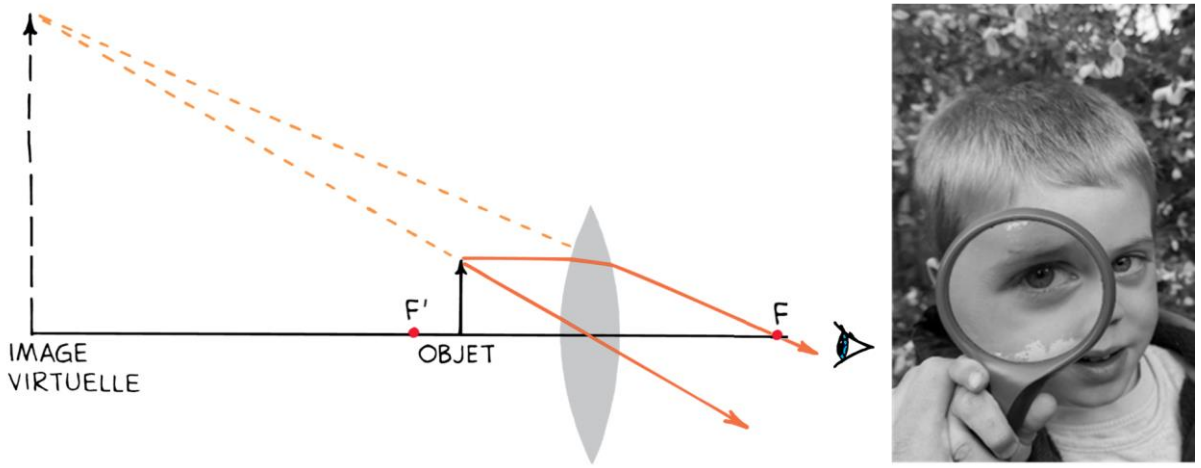
L'image est située à l'intersection des rayons issus de la lentille. Deux des trois rayons principaux suffisent pour déterminer la taille et l'emplacement de l'image.

Lorsqu'un objet, initialement situé très loin d'une lentille convergente (on dit : objet à l'infini), est rapproché du foyer F' le long de l'axe principal, la taille et l'emplacement de l'image changent :

- Si l'objet est à l'infini, l'image se forme au foyer F.
- Si l'objet est loin (p. ex. caméra), l'image est proche du foyer F, mais légèrement au-delà.
- Si l'objet est proche du foyer F' (p. ex. projecteur), l'image est loin de la lentille.
- Si l'objet est au foyer F', l'image se forme à l'infini.

Dans tous ces cas, l'objet et l'image se trouvent des deux côtés de la lentille. L'image est réelle et renversée.

Si la distance entre la lentille convergente et l'objet est inférieure à la distance focale f, la lentille agit comme une **loupe**. Dans ce cas, les rayons émergeant de la lentille divergent et semblent provenir d'un point situé devant la lentille (c'est-à-dire du côté de l'objet). L'emplacement de l'image est déterminé en prolongeant les rayons émergents en arrière jusqu'au point où ils convergent. Si un écran y est placé, aucune image n'y apparaît, car aucune lumière n'y converge réellement. Cependant, en regardant l'objet à travers la loupe, on voit une **image virtuelle** qui est droite (non renversée) et agrandie, ce qui permet de distinguer plus de détails. L'objet et l'image virtuelle se trouvent du même côté de la lentille.



As-tu compris ?

57. Construire l'image de l'objet par la lentille convergente pour les cas A à E de la page suivante.

Déterminer à quelle distance p d'une lentille convergente il faut placer un objet pour que l'image formée soit :

a. à l'infini. L'image est-elle alors réduite ou agrandie par rapport à l'objet ?

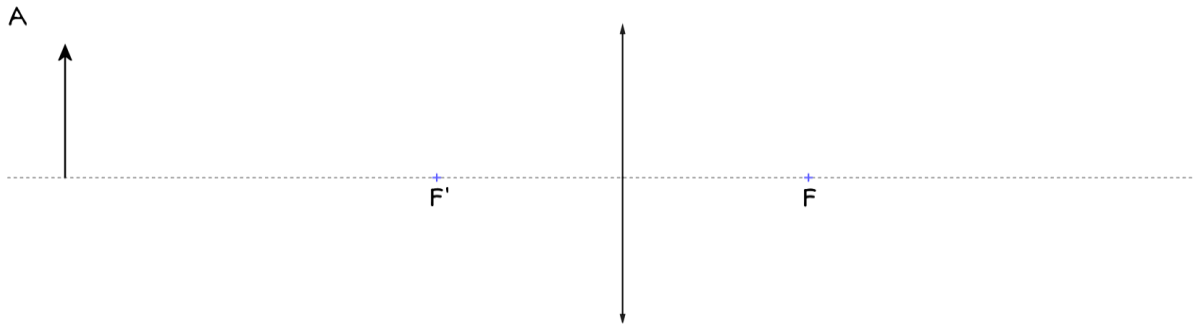
b. aussi proche que possible de la lentille. Quelle est alors cette distance minimale entre la lentille et l'image ? L'image est-elle alors réduite ou agrandie par rapport à l'objet ?

c. de la même taille que l'objet.

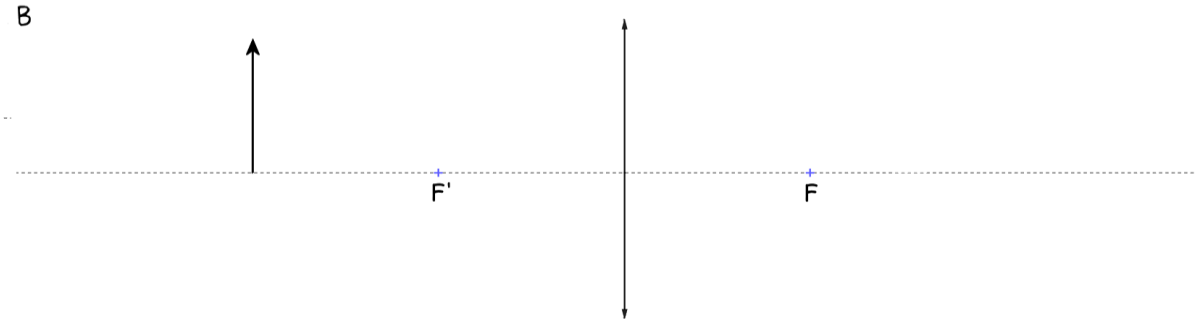
d. renversée et agrandie.

e. droite (non renversée). S'agit-il d'une image réelle ou virtuelle ? L'image est-elle alors réduite ou agrandie par rapport à l'objet ?

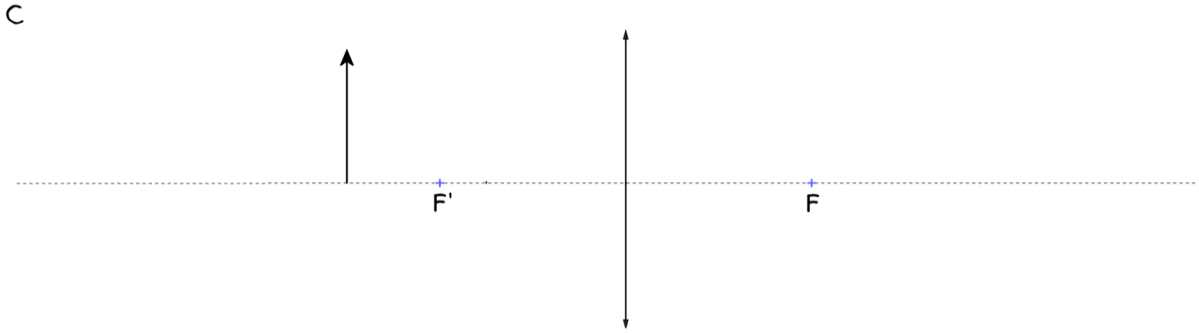
A



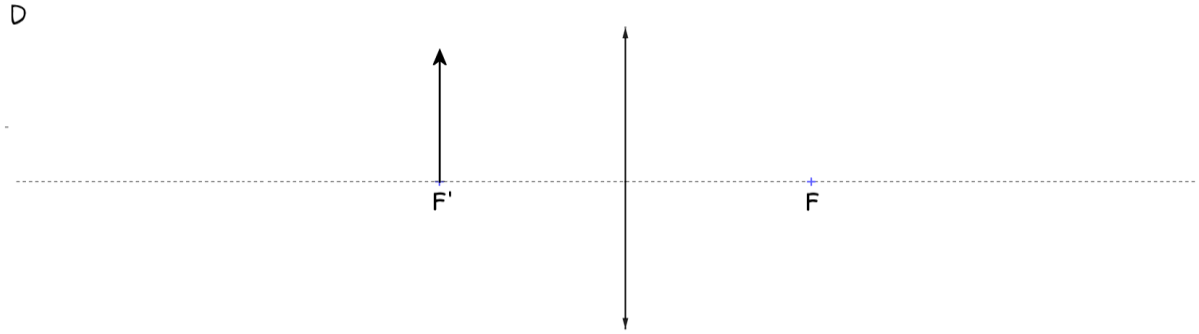
B



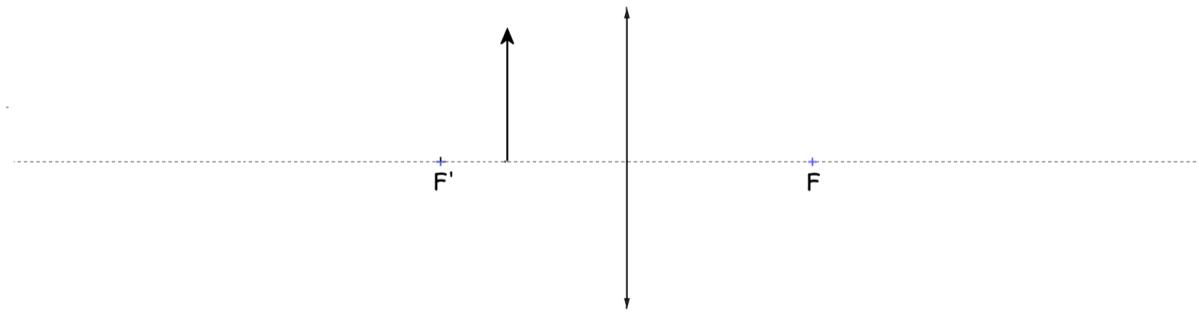
C



D



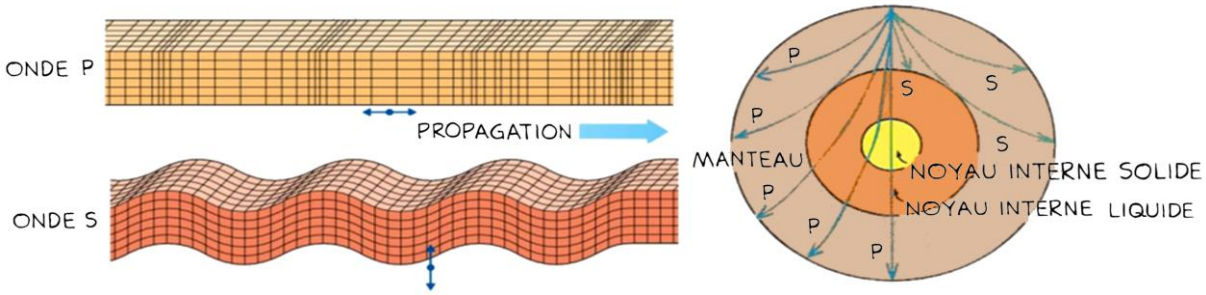
E



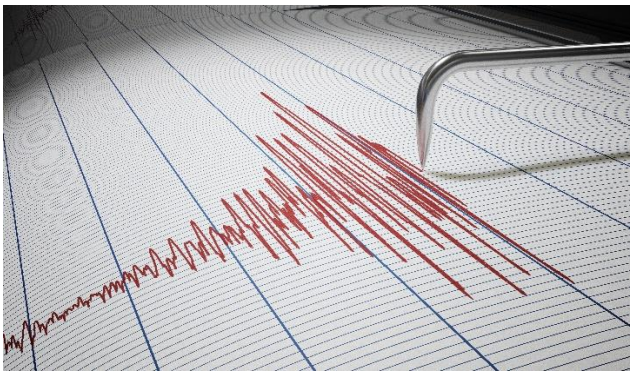
11 Pour en savoir plus

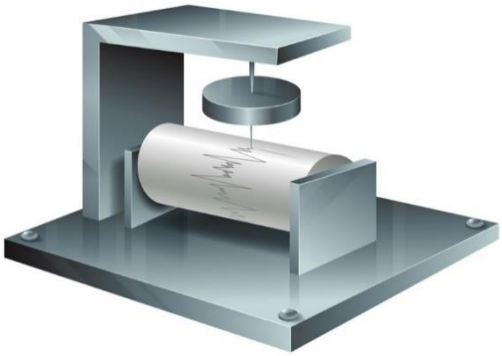
Les ondes sismiques

Un séisme est le relâchement des tensions aux bords des plaques tectoniques à la surface de la Terre, entraînant une propagation d'énergie sous forme d'**ondes sismiques**. Les ondes sismiques qui se propageant à l'intérieur de la Terre à partir de l'épicentre (l'emplacement à la surface en dessous duquel le séisme a eu lieu) sont du type longitudinal (**ondes primaires P**) et du type transversal (**ondes secondaires S**). Les ondes P peuvent traverser les couches liquides et solides de la Terre, alors que les ondes S ne peuvent pas traverser la matière liquide. L'étude de ces ondes sismiques donne des informations sur la structure interne de la Terre.



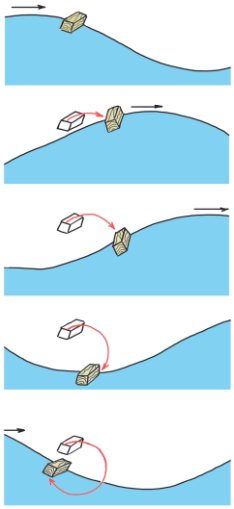
Les **ondes sismiques** se propagent très rapidement, avec des célérités de l'ordre de plusieurs kilomètres par seconde. Les ondes P se propagent à une célérité plus grande que les ondes S et sont donc les premières à être enregistrées sur les sismogrammes. Les ondes P sont responsables du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un tremblement de terre. Les ondes de surface sont les dernières à être enregistrées et sont les plus destructives. Un **sismographe** peut enregistrer les ondes sismiques générées par un tremblement de Terre qui a lieu à des milliers de kilomètres. Il est sensible à des mouvements inférieurs au centième de millimètre.





La durée entre les arrivées des ondes P et des ondes S permet aux scientifiques de déterminer l'endroit de l'épicentre du séisme. Plus l'intervalle de temps entre les arrivées des ondes P et des ondes S est grand, plus l'épicentre est éloigné. Pour trouver son emplacement exact, on a besoin de sismographes à trois endroits différents. Sur le globe, on peut dessiner un cercle autour de chaque sismographe pour montrer à quelle distance de ce sismographe se trouve l'épicentre. Le point d'intersection des trois cercles correspond à l'épicentre (triangulation).

Les vagues en mer

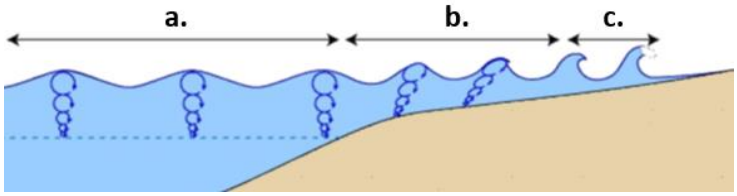


Les **vagues en mer** sont à la fois transversales et longitudinales. Lors du passage d'une vague, un morceau de bois qui flotte à la surface de l'eau décrit un mouvement circulaire autour d'une position moyenne fixe, sans être emporté par la vague.

a. Dans les eaux profondes, les particules d'eau à proximité de la surface se déplacent sur des cercles. Le diamètre des cercles diminue avec la profondeur de l'eau. En dessous d'une certaine profondeur limite (trait pointillé sur la figure), les particules d'eau ne sont plus influencées par les vagues.

b. Lorsque la profondeur de l'eau devient inférieure à cette profondeur limite, les vagues deviennent pointues. À cause du contact avec le fond marin, la partie profonde de la vague est freinée et dépassée par la partie en surface.

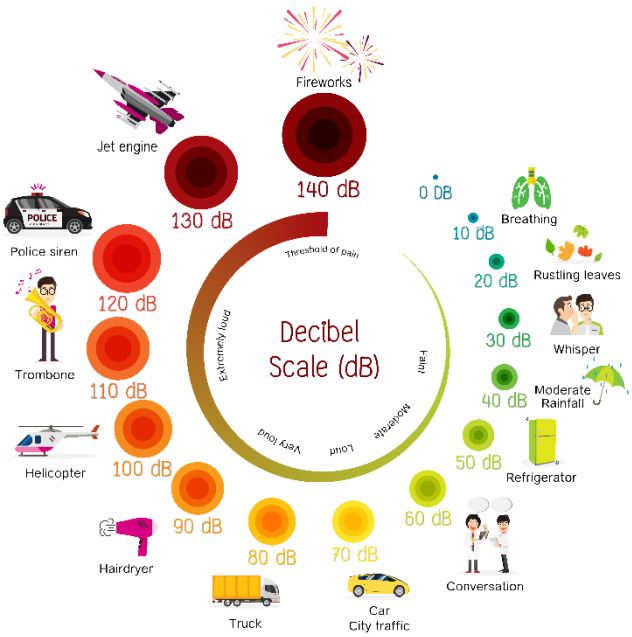
c. En s'approchant de la plage, la vague se brise : la crête de l'onde finit par déborder et retombe vers l'avant. Ces vagues déferlantes sont typiques de la côte atlantique et font le plaisir des surfeurs.



Le décibel

L'unité de l'intensité du son est le **décibel** (**dB**). En commençant à la limite de l'audition (0 dB), chaque augmentation de 10 dB signifie que l'intensité du son augmente d'un facteur 10 :

- Un son de 10 dB est 10 fois plus intense qu'un son de 0 dB.
- Un son de 20 dB est 10 fois plus intense qu'un son de 10 dB (100 fois plus intense que 0 dB).
- Un son de 60 dB est 10^6 fois plus intense qu'un son de 0 dB.



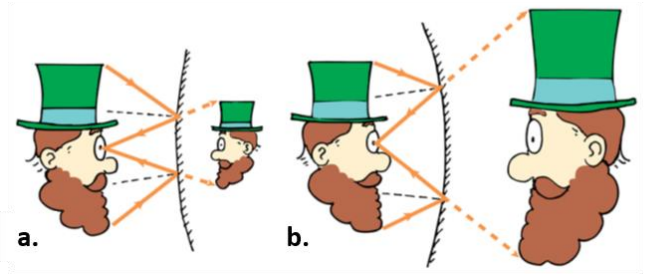
L'endommagement de l'ouïe commence à partir d'environ 85 dB. Cet endommagement dépend de la durée de l'exposition et des fréquences du son. Un éclat violent peut produire une vibration suffisamment intense pour provoquer une rupture de l'organe de Corti, le récepteur à l'intérieur de l'oreille. Malheureusement, les cellules sensorielles de l'oreille ne se régénèrent pas.

Miroirs courbes

La loi de la réflexion s'applique également aux **miroirs courbes**. Cependant, la taille de l'image n'est plus égale à la taille de l'objet. De même, la distance entre le miroir et l'image ne correspond plus à la distance entre l'objet et le miroir.

a. L'image virtuelle formée par un miroir convexe (un miroir qui se courbe vers l'extérieur) est plus petite et plus proche du miroir que l'objet.

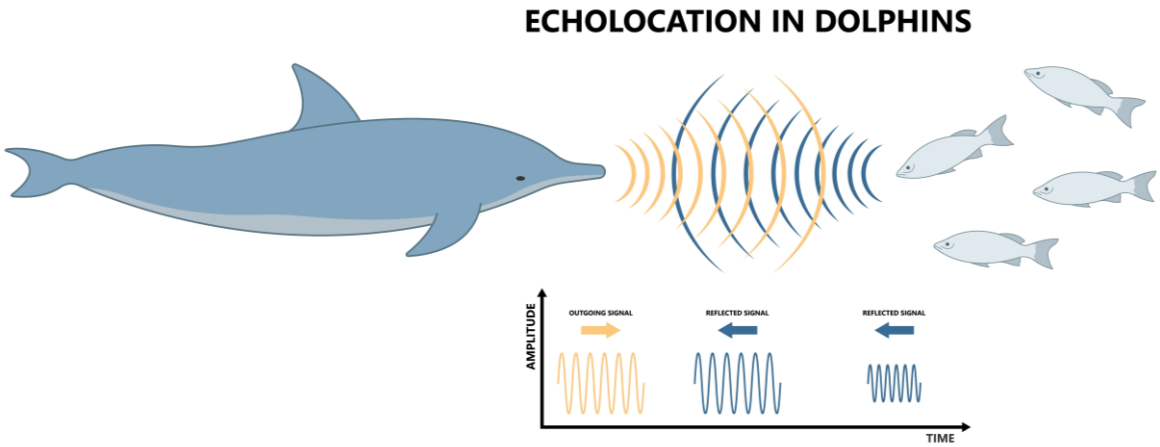
b. L'image virtuelle formée par un miroir concave (un miroir qui se courbe vers l'intérieur) est plus grande et plus éloignée que l'objet.



Réflexion du son

Les ondes sonores sont également réfléchies selon la loi de la réflexion. Un son réfléchi est appelé **écho**.

- Une surface rigide et lisse réfléchit davantage les ondes sonores qu'une surface molle et irrégulière. L'énergie sonore non réfléchie est absorbée ou transmise. Lorsque les murs d'une salle sont trop réfléchissants, le son devient brouillé à cause des échos multiples, appelés **réverbérations**. Lorsque les murs sont trop absorbants, le niveau sonore est plus faible et la salle semble terne et sans vie. Dans la conception d'un auditoire ou d'une salle de concert, un équilibre entre réverbération et absorption est souhaité. Des panneaux réfléchissants, orientés de sorte à réfléchir le son vers les spectateurs, sont placés derrière et au-dessus de la scène.
- Le **sonar** (*SOund Navigation And Ranging*) est une technique d'écholocalisation, utilisée par exemple par les navires. Le principe consiste à émettre un groupe d'ondes sonores dans la direction d'un objet et de détecter ensuite leurs échos. En connaissant la célérité du son dans le milieu ainsi que l'intervalle de temps entre l'émission du son et la réception de l'écho, l'émetteur peut localiser l'objet. L'écholocalisation est utilisée de façon naturelle par certains animaux comme les chauves-souris ou les dauphins.

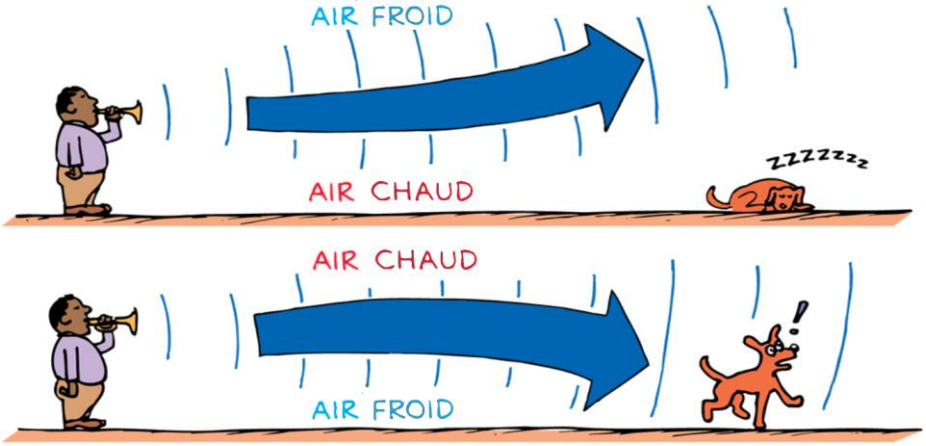


- En médecine, la réflexion des ultrasons est utilisée dans l'**échographie**, une technique de visualisation inoffensive des parties internes du corps. L'ultrason qui pénètre dans le corps est réfléchi plus fortement de l'extérieur d'un organe que de son intérieur. Ainsi, une image du contour de l'organe est obtenue. La peau, les muscles et la graisse sont presque transparents pour les ultrasons, mais les os sont clairement apparents. Lors d'une grossesse par exemple, l'échographie permet de visualiser le fœtus sur un écran et d'analyser son développement.

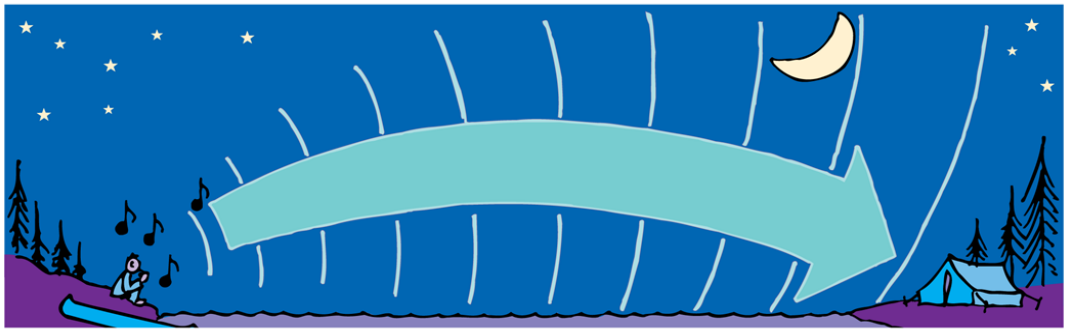
Réfraction du son

La réfraction du son se produit par vents irréguliers ou lorsque le son se propage à travers des couches d'air de températures différentes.

- Par temps chaud, l'air près du sol peut être sensiblement plus chaud que l'air se trouvant au-dessus. La célérité du son est alors plus grande près du sol. La réfraction progressive des ondes sonores a tendance à les éloigner du sol chaud, ce qui entraîne que le son se transmet moins bien.



- En revanche, lorsque l'air près du sol est plus froid que l'air se trouvant au-dessus, la célérité du son près du sol est réduite, provoquant une déviation du son vers le bas. Le son peut alors être perçu sur des distances considérablement plus longues. La nuit, lorsque l'air est plus frais à la surface d'un lac, le son est réfracté vers le sol et peut être transmis remarquablement bien.



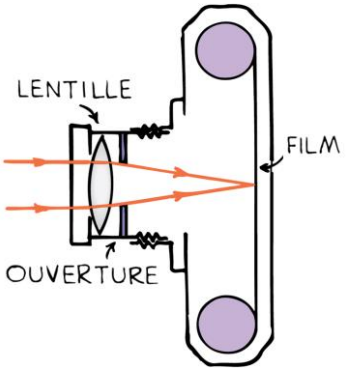
Instruments optiques

Les premières lunettes ont probablement été inventées en Italie à la fin des années 1200. La lunette astronomique n'a été inventée que 300 ans plus tard. Aujourd'hui, les lentilles sont utilisées dans de nombreux instruments optiques.

a. Caméra

Une caméra se compose d'un objectif et d'un film photographique (ou d'un capteur photographique CCD) montés dans un boîtier étanche à la lumière. La lentille de l'objectif forme une image réelle et inversée sur le film ou le capteur. En pratique, la plupart des objectifs sont formés de plusieurs lentilles et éventuellement de miroirs.

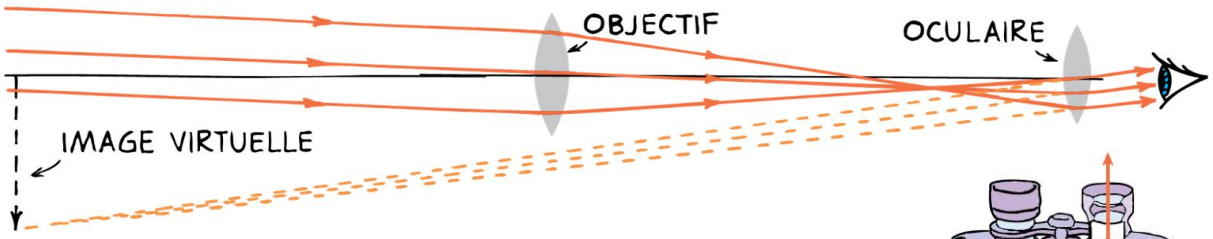
La quantité de lumière qui parvient au film est régulée par un obturateur et un diaphragme. L'obturateur contrôle la durée d'exposition du film à la lumière. Le diaphragme contrôle l'ouverture par laquelle la lumière passe pour atteindre le film. La variation de la taille de l'ouverture fait varier la quantité de lumière qui atteint le film.



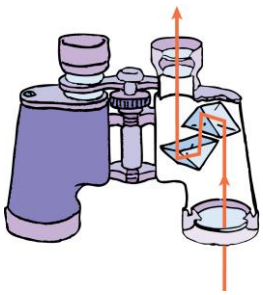
b. Lunette astronomique

Une lunette astronomique utilise une lentille convergente (objectif) qui forme une image réelle et inversée d'un objet très éloigné. Une deuxième lentille, appelée oculaire et utilisée comme loupe, est positionnée de manière que l'image produite par la première lentille soit à moins d'une distance focale de l'oculaire. L'oculaire forme alors une image virtuelle agrandie de l'image réelle.

(L'image virtuelle est montrée proche sur la figure ; elle est en fait située à l'infini.)

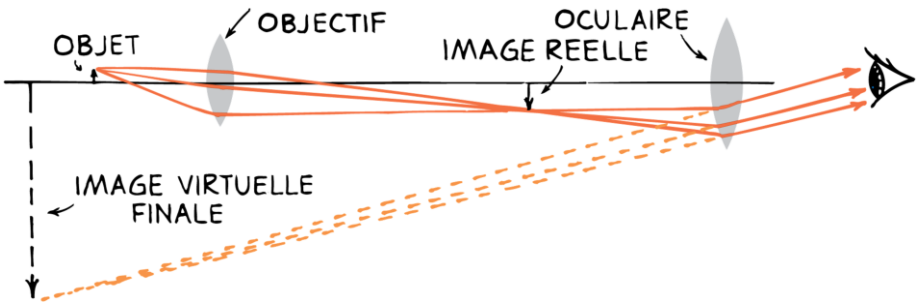


Une paire de ces télescopes côte à côte constitue une paire de jumelles. Chaque côté d'une paire de jumelles utilise une paire de prismes qui retourne l'image à l'endroit.



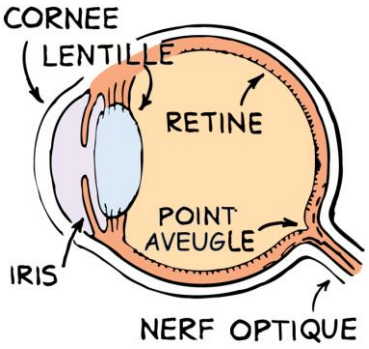
c. Microscope

Un microscope utilise deux lentilles convergentes de courte distance focale. L'objectif produit une image réelle d'un objet proche. L'image est plus éloignée de l'objectif que l'objet, elle est donc agrandie. L'oculaire forme une image virtuelle de la première image, encore agrandie.

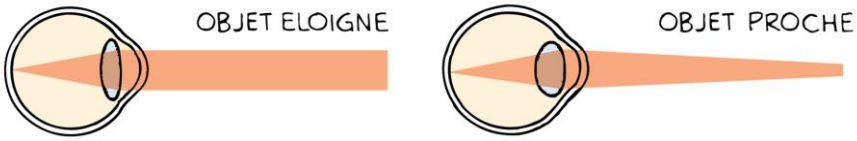


Troubles de la vision

La lumière pénètre dans l'œil humain à travers un revêtement transparent, la cornée. La quantité de lumière qui entre est régulée par l'iris, la partie colorée de l'œil qui entoure la pupille. La pupille est l'ouverture par laquelle la lumière entre dans l'œil. Ensuite, la lumière traverse le cristallin et finit par se concentrer sur une couche de tissu à l'arrière de l'œil, la rétine. Au point aveugle, les nerfs transportant les informations de la vision au cerveau quittent l'œil en un faisceau étroit - le nerf optique. Le point aveugle est donc une petite portion de la rétine qui est dépourvue de photorécepteurs, d'où le nom.



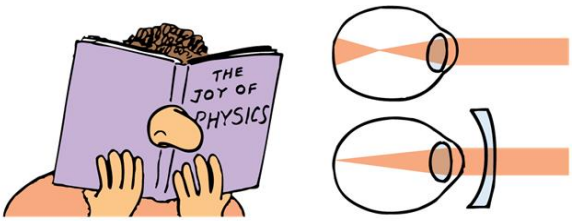
Pour que la vision soit nette, il faut que la lentille de l'œil forme l'image du champ de vue sur la rétine. En contractant ou en relâchant les muscles ciliaires, l'œil peut modifier la courbure de la lentille et donc varier sa distance focale. Ce processus est appelé **accommodation**.



Avec une vision normale, l'œil peut s'adapter pour voir clairement les objets depuis l'infini (on parle du point éloigné) jusqu'à une distance d'environ 25 cm (le point proche). Malheureusement, les défauts visuels suivants sont relativement fréquents.

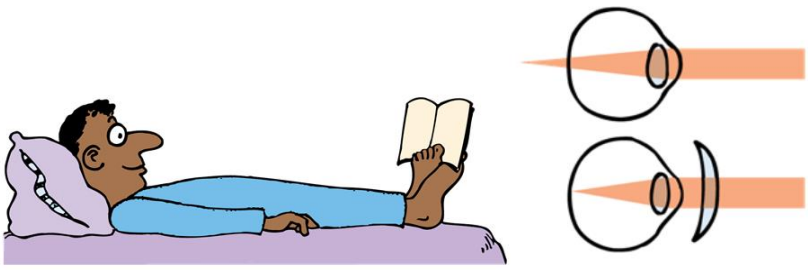
a. Myopie (« Kurzsichtigkeit »)

Une personne myope peut voir clairement les objets proches, mais ne voit pas clairement les objets éloignés. L'image des objets éloignés se forme trop près de la lentille (càd. devant la rétine), car généralement le globe oculaire est trop long. Pour corriger la myopie, un verre correcteur divergent est placé devant l'œil qui diverge les rayons des objets éloignés afin qu'ils se concentrent sur la rétine.



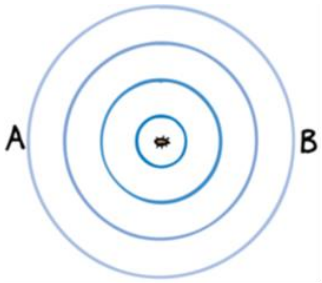
b. Hypermétropie (« Weitsichtigkeit »)

Une personne hypermétrope a du mal à focaliser des objets à proximité et doit les tenir à plus de 25 cm. Dans ce cas, le globe oculaire est généralement trop court et l'image de l'objet se forme derrière la rétine. Pour corriger l'hypermétropie, un verre correcteur convergent est placé devant l'œil qui fait suffisamment converger les rayons pour les focaliser sur la rétine plutôt que derrière la rétine.

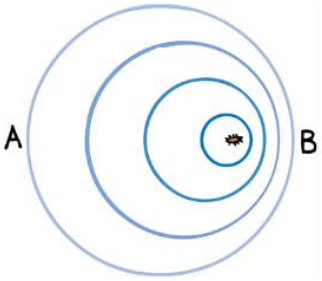


Effet Doppler

Considérons un insecte qui sautille sur place au milieu d'une flaque d'eau. Comme la vitesse de propagation de l'onde émise est la même dans toutes les directions, les fronts d'onde forment des cercles concentriques. Si l'insecte sautille dans l'eau à une fréquence constante, la longueur d'onde est constante et la fréquence de l'onde est identique à celle des sauts de l'insecte.



Supposons désormais que l'insecte sautille avec la même fréquence, mais en se déplaçant simultanément sur la surface d'eau à une vitesse plus petite que la célérité de l'onde émise. Dans ce cas, les cercles des fronts d'onde émis ne sont plus concentriques.



- Les fronts d'onde passent à une fréquence plus grande pour un observateur dont l'insecte s'approche (B).
- Les fronts d'onde passent à une fréquence plus petite pour un observateur dont l'insecte s'éloigne (A).

Le changement de la fréquence perçue d'une onde due au mouvement de la source (ou de l'observateur) est appelé **effet Doppler**[7]. Plus la vitesse relative entre la source et l'observateur est grande, plus l'effet Doppler est prononcé.

a. Son

L'effet Doppler cause le changement de la tonalité d'une sirène qui nous dépasse :

- Lorsqu'une sirène s'approche, le son perçu est plus aigu parce que les fronts d'onde sonores arrivent à une fréquence plus haute.
- Lorsque la sirène s'éloigne, le son perçu est plus grave parce que les fronts d'onde sonores arrivent à une fréquence plus basse.

b. Lumière

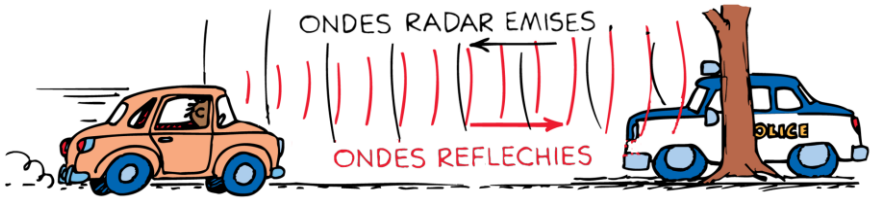
- Lorsqu'une source de lumière s'approche, la fréquence de la lumière observée est légèrement plus grande que celle de la lumière émise. L'augmentation de la fréquence s'appelle un décalage vers le bleu (***blueshift***), car elle se manifeste par un changement de couleur vers l'extrémité bleue du spectre de lumière.
- Lorsque la source de lumière s'éloigne, on observe une diminution de la fréquence de la lumière reçue, appelée décalage vers le rouge (***redshift***), dû au changement de couleur vers l'extrémité rouge du spectre de lumière.

Les galaxies lointaines montrent toutes un décalage vers le rouge dans leur lumière. Cette observation témoigne de l'expansion de l'Univers. Une mesure du *redshift* permet aux astronomes de calculer la vitesse de récession des galaxies (« Fluchtgeschwindigkeit »).

[7] En l'honneur de Christian Doppler, physicien autrichien du 19e siècle qui fut le premier à décrire ce phénomène.

c. Ondes radar

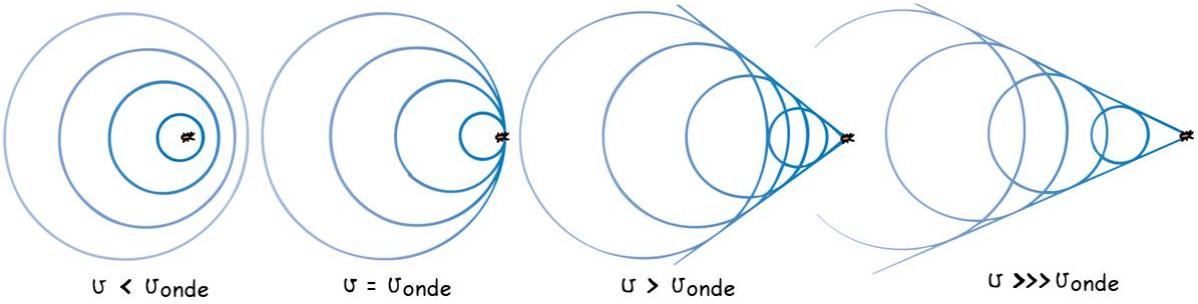
L'effet Doppler pour les ondes radar est utilisé pour mesurer la vitesse des voitures. Les ondes radar sont des ondes radio qui se propagent à la célérité de la lumière et sont réfléchies par les voitures en mouvement. L'ordinateur du système mesure la différence entre la fréquence des ondes émises et la fréquence des ondes réfléchies pour calculer la vitesse de la voiture.

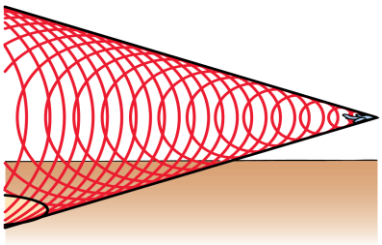


Onde d'étrave et onde de choc

Comment évolue le motif des fronts d'onde créés par un insecte qui sautille vers l'avant de plus en plus vite ?

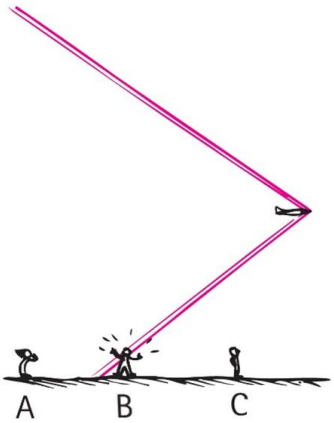
- Si l'insecte se déplace à la même vitesse que l'onde qu'il génère, les fronts d'onde s'entassent devant l'insecte.
- Si l'insecte nage plus vite que l'onde qu'il génère, il dépasse les fronts d'onde qu'il génère. Les fronts d'onde s'entassent aux bords et créent un motif sous forme de V, trainé derrière l'insecte. On parle de la formation d'une **onde d'étrave**





Lorsqu'un avion vole plus vite que le son, on dit qu'il est **supersonique**. Un avion supersonique génère une **onde de choc** sonore tridimensionnelle, qui consiste en des fronts d'onde sphériques qui s'entassent aux bords et forment un cône d'air comprimé qui s'étend jusqu'au sol.

Le tonnerre perçu lorsque le bord de l'onde de choc sonore atteint l'oreille est appelé **boom sonique**. On n'entend pas de boom sonique lorsqu'un avion vole moins vite que la célérité du son car les fronts d'onde sonores atteignent l'oreille successivement et sont perçues comme un son continu. Lorsque l'avion vole plus vite que la vitesse du son, les fronts d'onde s'entassent aux bords et rencontrent l'oreille en un seul éclat.



Le boom sonique n'est pas créé au moment où l'avion dépasse la célérité du son. L'onde de choc et le boom sonique résultant sont trainés continuellement derrière un avion supersonique. Ainsi, sur la figure ci-contre, l'onde de choc est en train de frapper B ; elle a déjà passé A, mais n'a pas encore atteint la personne C.

Partie II.

Électricité

Le domaine de l'électricité regroupe l'ensemble des phénomènes physiques associés à la présence et au mouvement de charges électriques. Le mot électricité vient du grec *elektron*, ce qui signifie ambre (« Bernstein »). En effet, cette matière a la propriété d'attirer des objets légers après avoir été frottée – ce qui témoigne de la présence de charges électriques.

12 La charge électrique

12.1 Comment électriser un corps ?

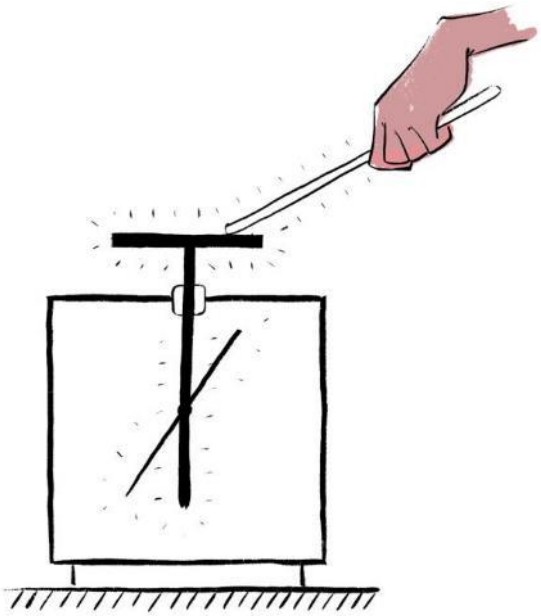
Lorsqu'on enlève son pullover, on entend parfois un léger grésillement (« leichtes Knistern »). Ce bruit est caractéristique du fait que les cheveux et le pull se sont électrisés par frottement.

Lorsqu'on frotte un bâton en plastique avec une fourrure, on observe que le bâton peut attirer des objets légers, comme des petits morceaux de papier ou un filet d'eau qui coule du robinet.

Par frottement, certains objets peuvent devenir électriquement chargés. Ces objets portent alors une **charge électrique**. En touchant la Terre avec un objet chargé, l'objet se décharge.

12.2 Mise en évidence de la charge électrique

Voici un électroscope. Lorsqu'on touche sa partie supérieure avec un bâton frotté, on observe que l'aiguille de l'appareil dévie de la verticale.



Un **électroscope** est un appareil qui permet d'indiquer si un corps est chargé.

L'angle de déviation de l'aiguille nous renseigne sur l'ordre de grandeur de la charge électrique.

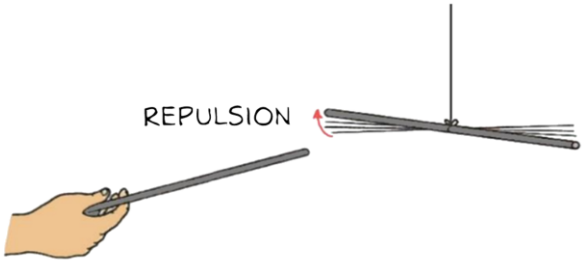
12.3 Deux types de charge électrique

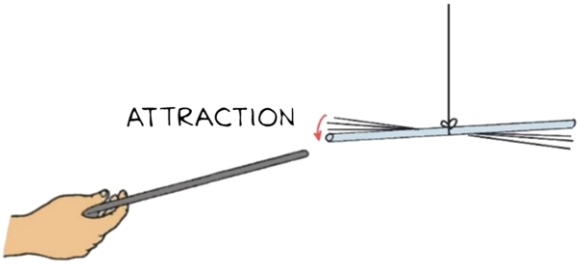
En frottant deux bâtons différents (p.ex. en plastique et en verre) avec des tissus différents (p.ex. avec une fourrure et un chiffon synthétique) puis en touchant l'électroscope à tour de rôle avec les deux bâtons, on observe d'abord que l'aiguille dévie, puis, après le deuxième contact, l'aiguille revient dans sa position initiale. Ainsi, en ajoutant les charges des deux corps, l'électroscope s'est déchargé. On en déduit que le verre et le plastique portent des **charges de signe opposé**.

Il existe deux types de charges électriques : les **charges positives** (+) et les **charges négatives** (–). Des charges de même valeur absolue mais de signe opposé se neutralisent mutuellement.

Interactions

L'existence de deux types de charge électrique est confirmée par les deux types d'interaction électrique qu'on observe entre des corps chargés.

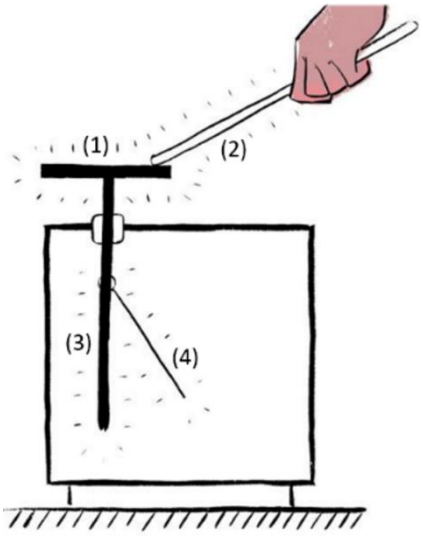




Des charges de même signe se repoussent.
Des charges de signe opposé s'attirent.

12.4 Principe de fonctionnement de l'électroscope

- Lorsqu'on touche le plateau (1) d'un électroscope avec un corps chargé (2), la charge se répartit sur la tige métallique fixe (3) et sur l'aiguille métallique mobile (4).
- L'aiguille porte alors une charge électrique de même signe que la tige : elle est repoussée.
- La déviation de l'aiguille est d'autant plus grande que la charge déposée est grande.



L'électroscope ne permet pas de déterminer le type de charge électrique (+ ou –) portée par un corps. En effet, l'aiguille dévie de la même manière dans les deux cas.

12.5 Où sont localisées les charges électriques ?

Structure de la matière

Tout corps est constitué d'atomes. Chaque atome est formé d'un noyau atomique entouré de son nuage électronique (cf. cours de chimie).

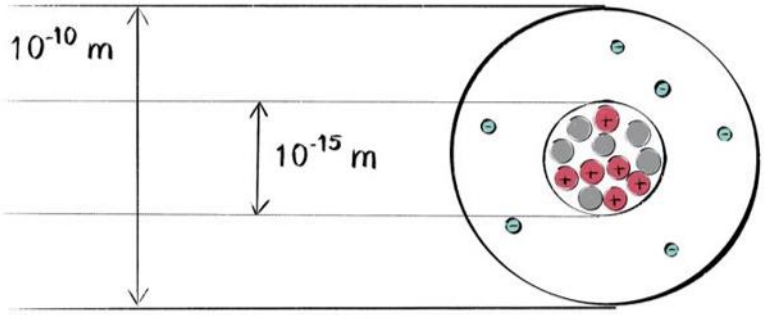
Le noyau atomique contient :

- des **protons** : particules qui portent une charge électrique positive. Symbole : p^+
- des **neutrons** : particules sans charge électrique. Symbole : n^0

Le nuage électronique, dont le diamètre est environ 50˙000 fois plus grand que celui du noyau, définit le volume de l'atome. Il s'agit d'une région essentiellement vide, hormis qu'elle contient :

- des **électrons** : particules qui portent une charge électrique négative. Symbole : e^-

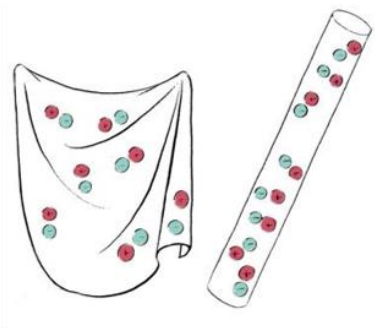
La masse des électrons est environ deux mille fois plus petite que celle des protons et des neutrons. Dans son état naturel, l'atome est électriquement neutre : il possède autant de protons dans le noyau que d'électrons dans le nuage électronique.



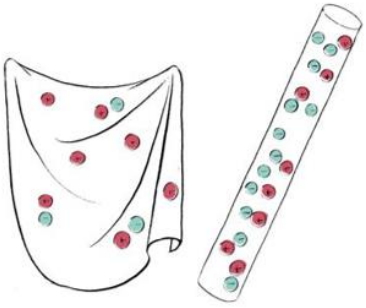
Modèle d'un atome de carbone

12.6 Interprétation microscopique de l'électrisation

Par frottement, on agit sur les atomes situés à la surface des corps. Les électrons les moins liés peuvent être extraits de l'un des corps et transférés à l'autre.



Avant frottement :
les corps sont électriquement neutres



Après frottement :
le bâton est chargé négativement et la fourrure est chargée positivement

Remarques

- Seulement des électrons peuvent être échangés. Les protons et neutrons sont confinés dans les noyaux atomiques et ne sont jamais transférés d'un corps à un autre.
- Par frottement, les matières plastiques ont tendance à gagner des électrons (charge résiduelle négative) alors que les matières vitreuses (verre, plexiglas, …) ont tendance à en perdre (charge résiduelle positive).

On retient

- Des électrons peuvent être transférés d'un corps à un autre.
- Un corps chargé négativement est un corps qui possède plus d'électrons que de protons (excès d'électrons).
- Un corps chargé positivement est un corps qui possède moins d'électrons que de protons (défaut d'électrons).

Conservation de la charge : Lors du transfert d'électrons, rien ne se crée, rien ne se perd.
La charge électrique totale est conservée.

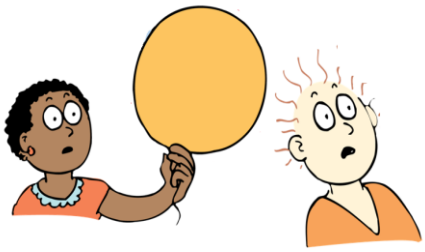
As-tu compris ?

1. Quelle(s) observation(s) indiquent qu'il existe deux types de charge électrique dans la nature ?

2. A quoi sert un électroscope ? Permet-il d'indiquer le type de charge électrique (+ ou –) porté par un objet ?

3. Lorsque tu brosses tes cheveux avec un peigne en plastique, des électrons sont transférés de tes cheveux au peigne. Tes cheveux sont alors chargés _____ et ton peigne est chargé _____.

4. Un ballon en plastique est frotté contre tes cheveux. Le ballon se charge négativement.



a. Que se passe-t-il lors de ce phénomène au niveau microscopique ?

b. Que peut-on dire au sujet de la charge électrique portée par tes cheveux ? Quelle loi physique permet de répondre à cette question ?

5. Pourquoi les deux amoureux sont-ils frappés par une étincelle ?

6. Pourquoi n'est-il pas possible de transférer des protons d'un corps à un autre ?

7. On touche un électroscope neutre avec un bâton en verre chargé positivement. Expliquer ce que l'on observe en précisant ce qui se passe au niveau microscopique. Faire une figure représentant la répartition des charges avant et après le contact entre les deux corps.

12.7 Etude quantitative

La charge électrique est une caractéristique fondamentale des particules élémentaires qui les rend sensibles aux forces électromagnétiques.

La charge électrique est une grandeur physique, càd. une quantité mesurable. L'unité SI de la charge électrique est le **coulomb**[8] (symbole : **C**).

Les symboles usuels pour dénoter une charge électrique dans une formule sont Q ou q.

Exemples : charge électrique macroscopique : $Q = 2{,}5\ \mathrm{C}$

charge électrique microscopique : $q = 3{,}2 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$

En valeur absolue, la plus petite charge électrique qui existe dans la nature est la charge portée par les protons et les électrons : on l'appelle la **charge élémentaire** et sa valeur est donnée par :

Charge élémentaire : $e \cong 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$

La charge (positive) d'un proton vaut : $q_{\text{proton}} = +e \cong 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$

La charge (négative) d'un électron vaut : $q_{\text{électron}} = -e \cong -1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$

Les protons et les électrons ne peuvent pas être coupés en morceaux. Il en résulte que toute charge électrique Q est, en valeur absolue, un multiple entier de la charge élémentaire e :

$$|Q| = N \cdot e \qquad \text{avec} \qquad N : \text{nombre entier } (N \in \mathbb{N})$$

Pour cette raison, on dit que la charge électrique est une grandeur **quantifiée**.

Exercice résolu

Déterminer le nombre d'électrons qu'on doit arracher à un corps pour que sa charge électrique soit égale à 1 C.

Solution :

charge électrique du corps : $Q = 1\ \mathrm{C} > 0$ *(charge positive)*

charge du proton (charge élémentaire) : $e \cong 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$

nombre de protons en trop (par rapport aux électrons) : $N = ?$

On a : $Q = N \cdot e \implies N = \frac{Q}{e}$

Nombre d'électrons arrachés (= nombre de protons en trop) : $N = \frac{Q}{e} = \frac{1\ \mathrm{C}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}} = 6{,}25 \cdot 10^{18}$

Conclusion : Une charge de 1 C correspond à plus de six milliards de milliards d'électrons transférés !

Synthèse

L'étude de l'électricité revient à étudier le comportement des charges électriques au sein de la matière. La grande majorité des phénomènes électriques se résume à un transfert ou un mouvement d'électrons. On comprend aussitôt pourquoi les termes *électron* et *électricité* ont la même racine étymologique[9].

---

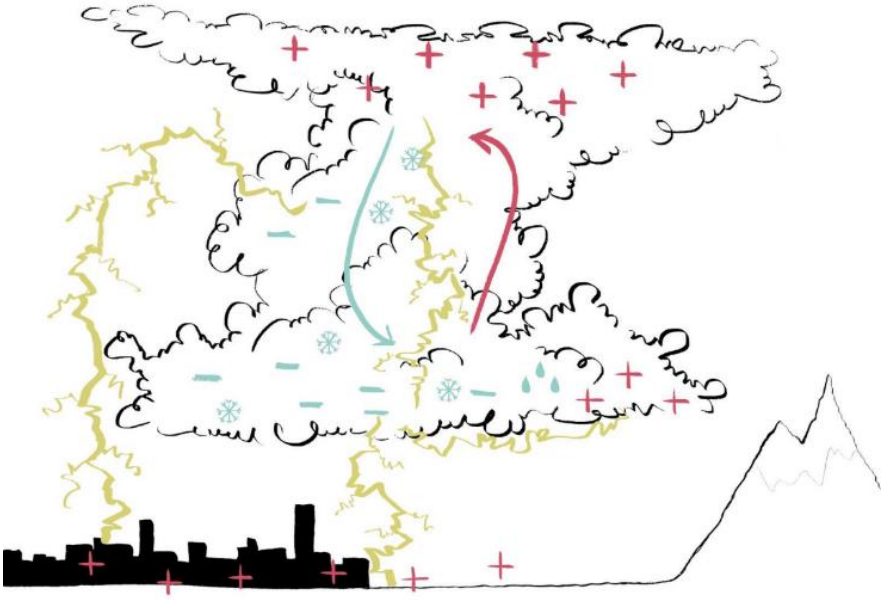
[8] En l'honneur de Charles Augustin de Coulomb, physicien français du 18e siècle et père fondateur de l'électrostatique.

[9] Le mot grec *elektron* signifie ambre (« Bernstein »). En effet, après avoir été frottée, cette matière présente un excès d'électrons.

12.8 Manifestations courantes

Dans la vie de tous les jours, on rencontre souvent des phénomènes d'électrisation. Voici quelques exemples :

- En roulant en voiture, les vêtements frottent contre le revêtement du siège. Une séparation de charges peut avoir lieu. En descendant de la voiture puis en touchant la carrosserie neutre, l'excès de charge porté par le corps humain est transféré en une fraction de seconde vers la carrosserie. Ce transfert de charges représente un courant électrique de très faible durée que l'on ressent sous forme d'un léger choc électrique. Puisque la quantité de charge échangée reste faible, un tel choc n'est pas dangereux.
- En se coiffant avec un peigne, les cheveux (secs) sont souvent électrisés. Le peigne (en plastique) arrache des électrons aux cheveux qui se repoussent alors mutuellement en raison de leur charge positive.
- Lors des orages, certaines parties des nuages acquièrent une forte charge électrique en raison de la circulation des masses d'air (frottement) de températures différentes. Au-delà d'une certaine limite, le système se décharge par un courant électrique d'une intensité colossale : la foudre. Dans des conditions extrêmes, l'air (qui est un isolant) peut devenir un conducteur électrique (cf. paragraphe 14.1).



As-tu compris ?

8. Préciser le type et la quantité de charge électrique portée par les protons, neutrons, électrons.

9. Pourquoi dit-on que la charge électrique est quantifiée ? Expliquer !

10. Combien de protons et d'électrons se trouvent dans un ion Ca^{2+} ? Quelle est la valeur de la charge électrique de l'ion en unité SI ?

11. Un ballon initialement neutre est frotté contre tes cheveux. Après le frottement, la charge électrique du ballon vaut Q = – 0,032 mC. Calculer le nombre de particules transférées.

12. (**) Un corps contient $8 \cdot 10^{18}$ protons. Combien d'électrons contient-il si sa charge électrique vaut 6,4 mC ?

13 Énergie et tension électriques

13.1 La notion d'énergie

L'énergie désigne la capacité de provoquer un changement. Autrement dit : sans énergie, il ne se passe rien !

L'énergie est une grandeur physique. Son unité SI est le **joule**[10] (**J**).

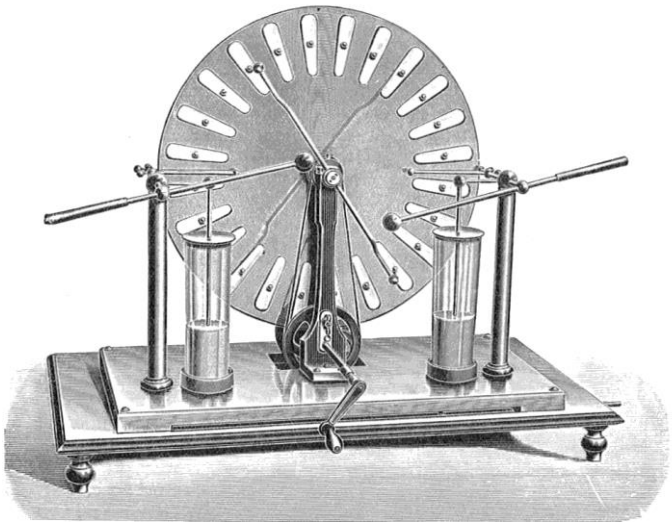
L'énergie est indispensable à toute sorte de développement. En particulier, il faut de l'énergie pour mettre quelque chose en mouvement, pour chauffer un corps ou pour produire de la lumière. Les réactions chimiques sont possibles grâce à l'énergie des réactifs et/ou du milieu réactionnel. La vie a pu se développer sur Terre grâce à l'énergie rayonnée par le Soleil.

Dans la nature, il existe un principe fondamental, à savoir celui de la **conservation de l'énergie**. En effet, *toutes* les observations de *tous* les phénomènes naturels montrent que l'énergie peut passer d'un corps à un autre et/ou d'une forme à une autre, mais qu'elle ne peut ni être créée, ni être détruite.

Exemple : Soulever une pierre de 1 kg d'une hauteur de 1 m nécessite une énergie d'environ 10 J. L'énergie investie pour soulever la pierre n'a pas disparu : elle est stockée par la pierre et peut de nouveau être transférée lorsque la pierre retombe sur Terre.

13.2 L'énergie électrique

En actionnant la manivelle de la machine de Wimshurst, on provoque une séparation de charges électriques : le bras gauche de la machine se charge positivement (manque d'électrons) et le bras droit négativement (excès d'électrons). Au bilan, l'énergie du mouvement de la manivelle et du disque est transformée en énergie électrique (séparation des charges). En effet, une fois les charges séparées, la machine possède la capacité de créer un changement à son tour, puisqu'elle peut se décharger de manière spectaculaire en produisant un petit éclair.

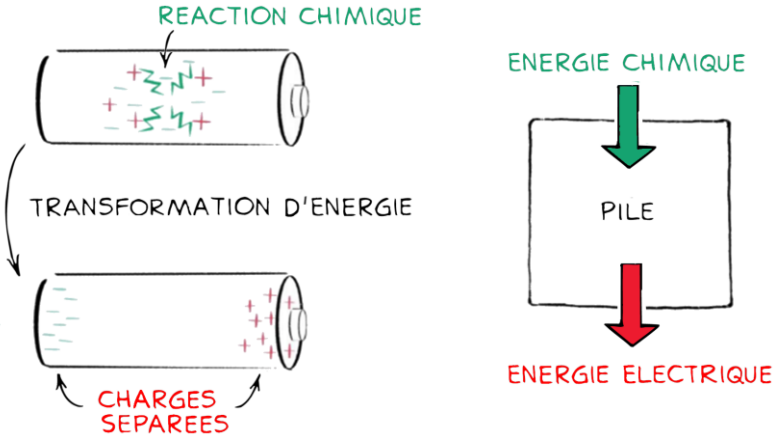


L'énergie électrique est la forme d'énergie liée à aux charges électriques. Elle se manifeste lors de la séparation et lors du mouvement de charges électriques.

[10] En l'honneur de James Prescott Joule, physicien britannique du 19e siècle et auteur d'importants travaux sur la conservation de l'énergie.

13.3 La pile : une source d'énergie électrique

A l'intérieur d'une pile, une réaction chimique provoque que des électrons sont déplacés d'un endroit à un autre. Il en résulte une séparation de charges électriques : le pôle « + » perd des électrons et présente un excès de charge positive alors que le pôle « – » gagne ces électrons et présente un excès de charge négative[11].



L'énergie nécessaire pour séparer les charges est contenue dans les composés chimiques qui forment la pile. Une fois les charges séparées, on retrouve cette énergie sous forme électrique. Au bilan, une **pile** est un **dispositif qui transforme de l'énergie chimique en énergie électrique**.

Un peu d'histoire

La première pile fut inventée par Alessandro Volta autour de l'an 1800. Il s'agissait d'un système constitué d'un « empilement » de disques métalliques séparés par des couches de feutre imbibés d'eau salée ; d'où le nom de l'invention.

13.4 La tension électrique

Sur différentes piles on peut lire différentes inscriptions, p.ex. 1,5 V ou 9 V. Ces nombres, exprimés en **volt**[12] (**V**), indiquent la **tension électrique** entre les pôles de la pile.

La **tension électrique** entre deux points (p.ex. entre les pôles d'une pile) est égale à l'énergie électrique fournie/reçue entre ces points par unité de charge électrique.

$$\text{tension électrique (en V)} = \frac{\text{énergie électrique (en J)}}{\text{charge électrique (en C)}} \qquad \text{Formule : } \boldsymbol{U = \frac{E_{el}}{Q}}$$

Concrètement, lorsqu'il existe une tension de $U = 9\ \text{V}$ entre les pôles d'une pile, cela signifie qu'une charge de $Q = 1\ \text{C}$ reçoit une énergie électrique de $E_{el} = Q \cdot U = 1\ \text{C} \cdot 9\ \text{V} = 9\ \text{J}$ en étant séparée par la pile.

Or, une fois séparées, les charges électriques ont tendance à vouloir retrouver un état de neutralité électrique. Plus la tension entre les pôles d'une pile est grande, plus les charges séparées possèdent de l'énergie qu'elles peuvent transférer en se déplaçant. Par conséquent, la valeur de la tension entre les pôles d'une pile caractérise cette pile en tant que **source d'énergie électrique**.

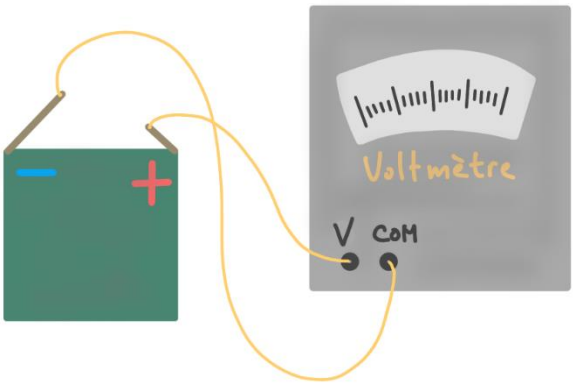
Remarques

[11] Cette image est quelque peu simplifiée, mais elle décrit bien le rôle d'une pile en première approximation.
[12] En l'honneur d'Alessandro Volta, physicien italien du 19e siècle à qui l'on doit la première pile électrique.

- La tension électrique entre deux points exprime en quelque sorte une **différence de pression électrique** entre ces points. Plus la tension est grande, plus forte sera la tendance des charges électriques à vouloir retrouver un état plus équilibré.
- La tension électrique en un seul point est toujours nulle. En effet, il ne peut y avoir de différence au même point.
- La tension joue un rôle extrêmement important en électricité parce qu'elle nous renseigne sur l'énergie que des charges électriques peuvent acquérir ou libérer entre deux points.

Mesure de la tension électrique

Malgré son caractère quelque peu abstrait, la tension électrique est une grandeur très pratique. En effet, s'il est difficile (voire impossible) de mesurer l'énergie électrique E_{el} ou la quantité de charge Q, il suffit de brancher un **voltmètre** pour mesurer la tension électrique U entre les pôles d'une pile.

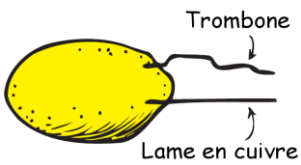


As-tu compris?

13. Quel est le point commun entre la machine de Wimshurst et une pile ? En quoi sont-ils différents ? Argumenter à l'aide des transformations d'énergie mises en jeu.

14. Une pile de 9 V neuve peut fournir une énergie électrique totale de 19440 J. Que vaut la quantité de charge totale que cette pile peut séparer ?

15. Pour construire une pile « citron », il suffit de planter une lame en cuivre (pôle positif) et une lame en zinc (pôle négatif) dans un citron bien juteux.



a. Construire une telle pile et mesurer la tension électrique entre ses pôles à l'aide d'un voltmètre. Faire un schéma du montage.

b. Que peut-on conclure sur la répartition des charges électriques au niveau des pôles ?

16. La tension électrique entre les pôles d'une pile AA vaut 1,5 V.

a. Expliquer la signification physique de cette phrase en utilisant la définition.

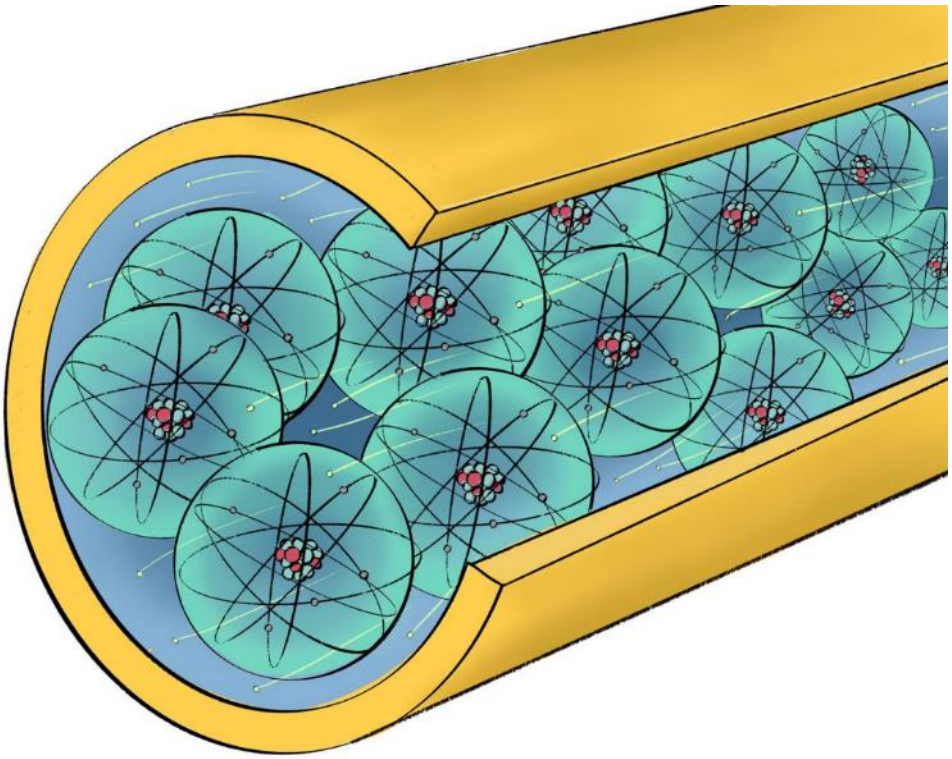
b. Quelle énergie est nécessaire pour séparer une charge électrique de 300 mC ?

c. D'où provient cette énergie ?

d. Comment varie la tension électrique entre les pôles de cette pile lorsqu'elle sépare une charge électrique de 600 mC ?

14 Le courant électrique

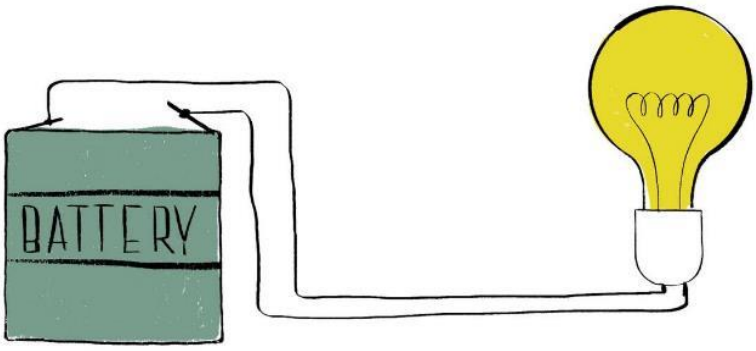
Dans les métaux, les électrons des couches atomiques externes sont très peu liés aux noyaux atomiques. Par conséquent, ces électrons peuvent se déplacer facilement dans tout le volume du métal. On les appelle des **électrons libres**.



Lorsqu'on relie les pôles d'une pile par un fil métallique, les électrons libres sont mis en mouvement : ils sont repoussés par le pôle – et attirés par le pôle + de la pile. Il se produit un courant électrique.

Lorsque les électrons libres se déplacent de manière collective à travers un fil métallique, on dit que le fil est parcouru par un **courant électrique**.
De manière générale, un courant électrique est un flux de charges électriques.

Or, relier les pôles d'une pile par un fil métallique est dangereux. La pile se décharge rapidement et le courant peut devenir très intense. On parle d'un court-circuit.



En faisant passer le courant par une petite lampe, on obtient un circuit électrique utile : l'énergie électrique fournie par la pile est transportée par les électrons libres vers la lampe où elle est transformée en chaleur (énergie thermique) et lumière (énergie rayonnée).

14.1 Conducteurs et isolants

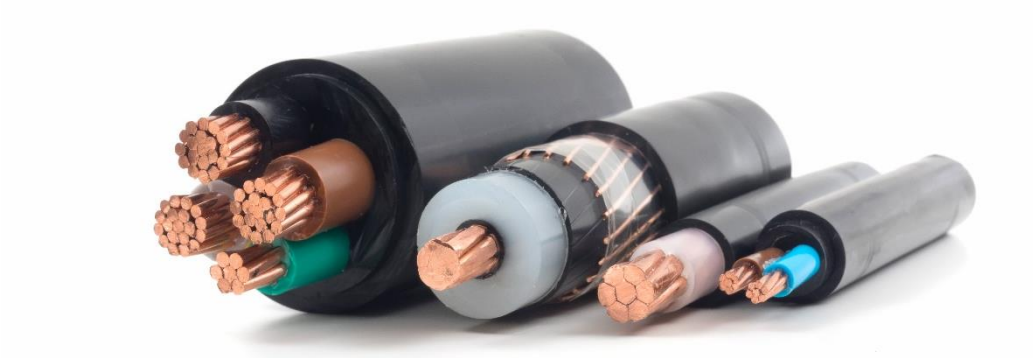
Selon leurs propriétés électriques, les matériaux[13] se répartissent en deux groupes : les conducteurs et les isolants.

Dans un **isolant électrique**, les charges ne peuvent pas se déplacer. Un matériau isolant empêche le passage du courant électrique.

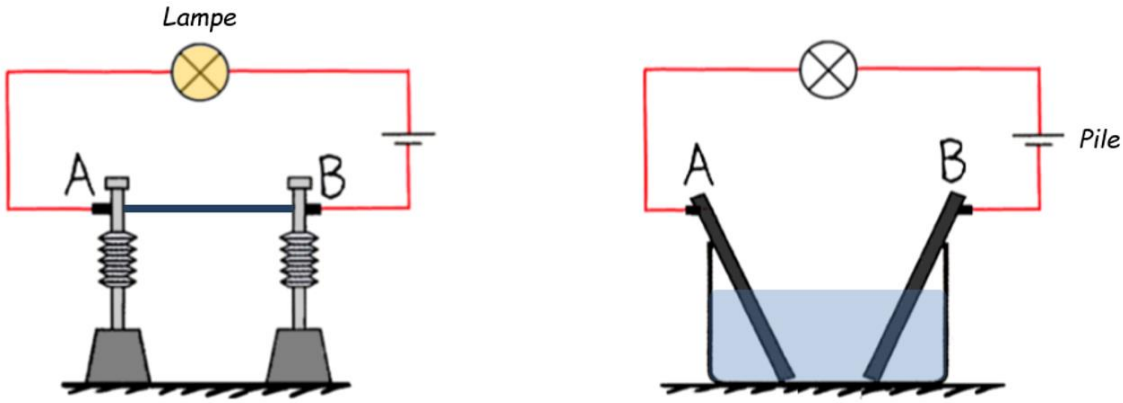
Exemples d'isolants : le verre, les matières plastiques, le bois, la porcelaine, l'eau distillée, l'huile, le pétrole, l'essence, le diamant, l'air et les gaz en général.

Dans un **conducteur électrique**, il existe des charges électriques mobiles. Un matériau conducteur permet le passage du courant électrique.

Exemples de conducteurs : les métaux (cuivre, fer, argent, or, aluminium etc.), le carbone (graphite, charbon), l'eau salée/minéralisée, les acides et bases dilués, les objets mouillés d'eau minéralisée.



Rappelons que dans les corps solides, seulement les électrons sont susceptibles de se déplacer. Les protons sont confinés dans le noyau atomique et les atomes eux-mêmes ont une position fixe dans la structure microscopique du corps. Par conséquent, les corps solides sont conducteurs sous condition qu'ils renferment des **électrons libres**, c'est-à-dire des électrons peu liés aux noyaux et capables de se déplacer d'un atome à l'autre. Ceci est le cas notamment pour les métaux.



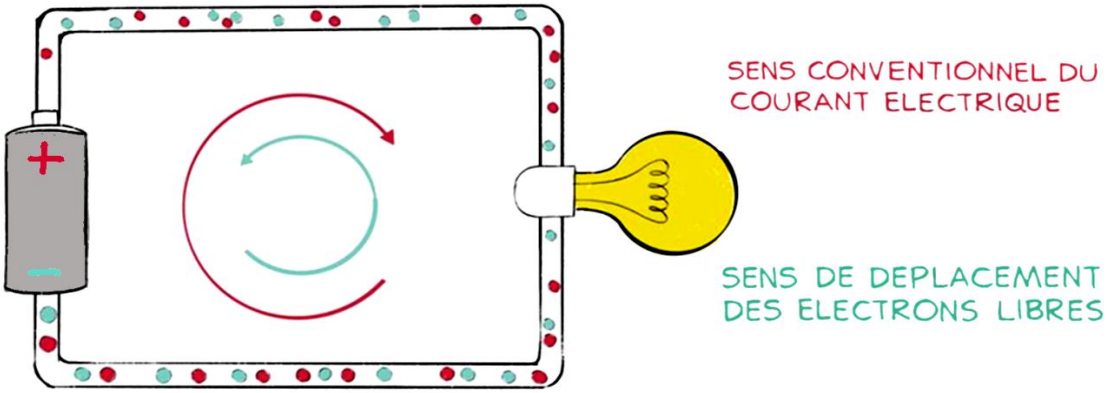
Test de conductivité : la lampe s'allume si le solide (gauche) / liquide (droite) est conducteur.

Dans les liquides, en revanche, les atomes et/ou molécules sont mobiles. Par conséquent, les liquides sont conducteurs dès qu'ils contiennent des ions, c'est-à-dire des atomes/molécules chargés. L'eau minérale est conductrice en raison de sa composition ionique (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}, …).

[13] Ne pas confondre les termes : matériaux (« Stoffe »), métaux (« Metalle ») et matériel (« Material », « Ausrüstung »).

Sens du courant électrique

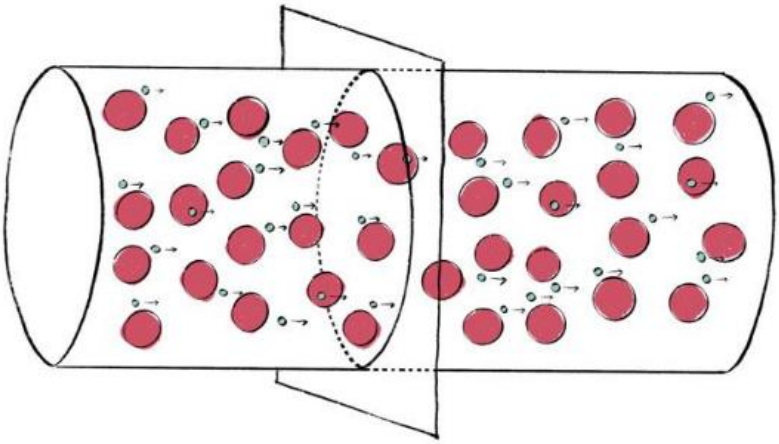
Par convention[14], il a été fixé que le courant électrique circule du pôle + vers le pôle – de la source d'énergie électrique. Raisonner sur un flux de charges positives s'avère en effet plus simple.



Rappelons toutefois que dans les métaux, les électrons libres se déplacent en sens inverse du sens conventionnel. Les protons fortement confinés dans les noyaux atomiques ne se déplacent jamais au sein de la matière.

14.2 L'intensité du courant électrique

L'intensité du courant électrique (« Stromstärke »), mesurée en **ampère**[15] (**A**), indique si le flux de charge électrique est fort ou faible. Lorsque la quantité de charge électrique Q qui traverse une section du circuit (« Querschnitt ») pendant une durée t est grande, alors l'intensité du courant est grande. En revanche, lorsque pendant le même temps t, seulement une petite quantité de charge Q a traversé la section, alors l'intensité du courant est faible.



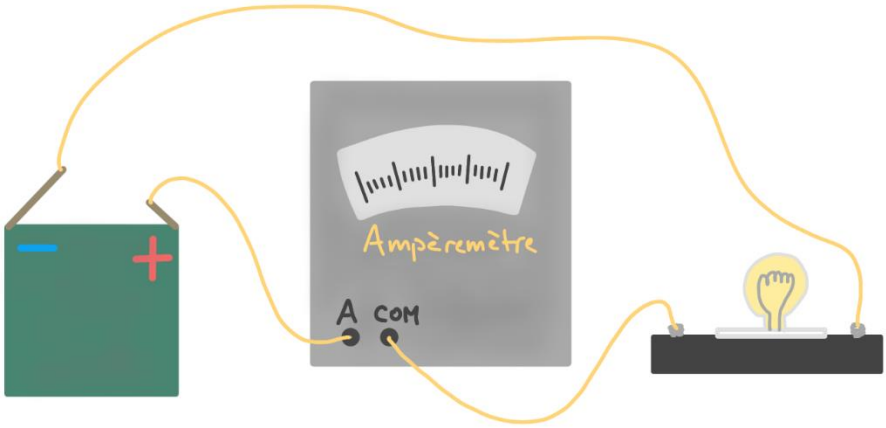
L'**intensité** du courant électrique est égale à la charge électrique transportée à travers une section du conducteur par unité de temps.

$$\text{intensité du courant (en A)} = \frac{\text{charge électrique (en C)}}{\text{intervalle de temps (en s)}} \qquad \text{Formule : } \boldsymbol{I = \frac{Q}{t}}$$

[14] Le sens (positif) du courant électrique a été fixé ainsi par la communauté scientifique.
[15] En l'honneur de André-Marie Ampère, physicien français du 19e siècle et pionnier de l'électromagnétisme.

Mesure de l'intensité du courant électrique

Pour mesurer l'intensité du courant dans un circuit, il suffit d'y intégrer un **ampèremètre**.



Unité alternative pour la charge électrique

La quantité de charge totale que peut séparer une pile est généralement indiquée en mAh. Par définition, on a la conversion suivante :

$$1\ \mathrm{mAh} = 1\ \mathrm{mA} \cdot 1\ \mathrm{h} = 0{,}001\ \mathrm{A} \cdot 3600\ \mathrm{s} = 3{,}6\ \mathrm{A} \cdot \mathrm{s} = 3{,}6\ \mathrm{C}$$

L'avantage de cette unité est qu'on peut en déduire facilement le temps (en heures) pendant lequel la pile peut débiter un courant d'une intensité donnée (p.ex. $100\ \mathrm{mA}$).

As-tu compris ?

17. Expliquer la notion de courant électrique.

18. Faire une phrase correcte à l'aide des termes : « courant électrique » ; « tension électrique » ; « cause ».

19. « Il peut y avoir une tension électrique entre deux points sans qu'il n'y ait de courant électrique qui circule entre ces points. » Vrai ou faux ? Justifier !

20. « Tous les liquides sont des conducteurs électriques. » Vrai ou faux ? Justifier !

21. Quel métal conduit mieux le courant électrique, le fer ou le cuivre ? Décrire une expérience qui permet de vérifier si ta réponse est correcte.

22. D'un point de vue microscopique, quelle est la différence fondamentale entre les conducteurs et les isolants ? Expliquer !

23. Lorsque la tension électrique entre les pôles de la machine de Wimshurst dépasse une valeur critique (environ 30 kV pour un écart de 1 cm), on observe une décharge électrique à travers l'air. Pourtant, on dit que l'air est un isolant électrique. Expliquer !

24. « Le sens conventionnel du courant électrique correspond au sens de déplacement des électrons libres dans les métaux. » Vrai ou Faux ? Expliquer brièvement.

25. Que vaut l'intensité du courant électrique lorsqu'une charge de 590 mC traverse la section d'un conducteur en 2 secondes ? En supposant cette intensité constante, quelle charge électrique traverse la section du conducteur en une minute ?

26. Lors d'un orage, la foudre présente une intensité de 100 kA pendant une durée de 0,5 ms. Déterminer la quantité de charge correspondante.

27. On mesure une intensité du courant de 500 mA dans un conducteur métallique. Combien d'électrons traversent la section de ce conducteur par minute ?

28. L'accumulateur (pile rechargeable) d'un téléphone portable porte l'indication « 1000 mAh ». Lorsque l'écran est réglé sur une luminosité moyenne, le téléphone est alimenté par un courant électrique d'une intensité de 200 mA.

a. Montrer que le « mAh » est une unité pour exprimer la charge électrique et exprimer la valeur indiquée sur l'accumulateur en unité SI.

b. Quelle est l'autonomie du téléphone lorsqu'on l'utilise en luminosité moyenne ?

29. Une pile industrielle a une capacité de charge de 150 Ah. La pile permet d'alimenter un moteur électrique pendant 10 h. Déterminer l'intensité du courant électrique dans le moteur.

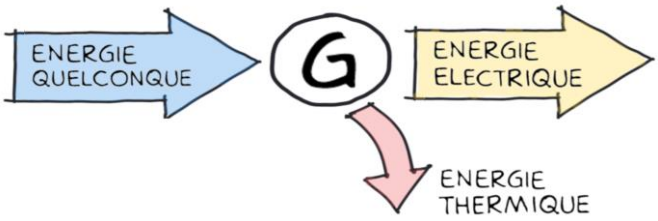
30. Un accumulateur de tablette numérique porte l'indication « 3250 mAh ». Lors d'une utilisation multimédia (écran lumineux), la tablette a besoin d'un courant électrique de 500 mA. Quelle est l'autonomie de la tablette ?

15 Circuits électriques

15.1 Générateurs et récepteurs

Principalement, on distingue entre deux types d'appareils électriques : les générateurs et les récepteurs.

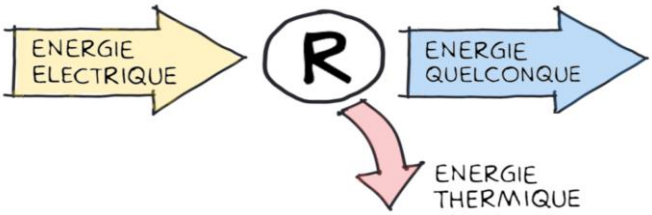
Les **générateurs** (ou sources d'énergie électrique) sont des appareils qui transforment une forme d'énergie quelconque en énergie électrique.



Exemples

- Une dynamo transforme de l'énergie de mouvement en énergie électrique.
- Une cellule photoélectrique transforme de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Les **récepteurs** sont des appareils qui transforment l'énergie électrique en une autre forme d'énergie.



Exemples

- Une lampe électrique traditionnelle (lampe à incandescence) transforme de l'énergie électrique en énergie thermique (haute température du filament) ⟹ émission d'énergie rayonnée (lumière).
- Un moteur électrique transforme de l'énergie électrique en énergie de mouvement.

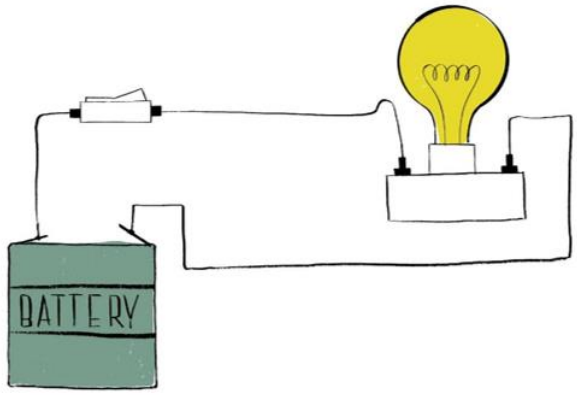
L'accumulateur (d'un smartphone ou d'un PC portable) est un composant qui joue les deux rôles. Lors d'une utilisation sans fil, l'accumulateur est un générateur : à partir de l'énergie chimique de ses constituants, il fournit l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de l'appareil principal. En mode recharge, l'accumulateur est un récepteur : il reçoit de l'énergie électrique d'une prise domestique et la stocke sous forme d'énergie chimique.

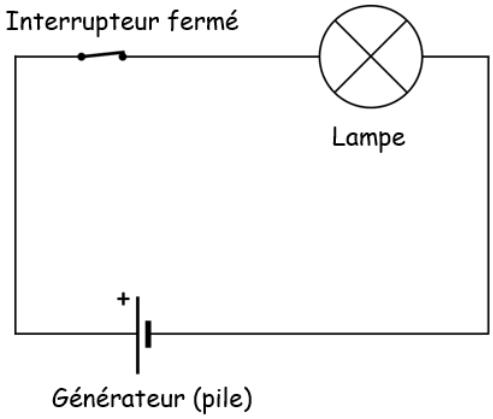
Les générateurs et les récepteurs sont des **dipôles** : ils possèdent deux connections qui permettent de les intégrer dans un circuit électrique. On distingue entre les pôles positif (**+**) et négatif (**–**) pour un générateur respectivement entre les bornes d'entrée (**+**) et de sortie (COM) pour un récepteur.

Pour certains récepteurs, la polarité ne joue aucun rôle : on peut les brancher dans les deux sens sans en modifier le fonctionnement. Ceci est le cas pour les lampes à incandescence par exemple. Pour d'autres appareils (p.ex. pour un moteur électrique), il faut faire attention à la polarité afin de garantir le bon fonctionnement (voire éviter la destruction) de l'appareil. Dans ces cas, le pôle **+** du générateur doit être relié à la borne marquée **+** du récepteur.

15.2 Montages électriques

Voici un circuit qui contient trois composants : un générateur (ici une pile), une lampe à incandescence et un interrupteur (« Schalter »). Pour des raisons de simplicité, on utilise des symboles standardisés pour représenter le montage (schéma de droite).

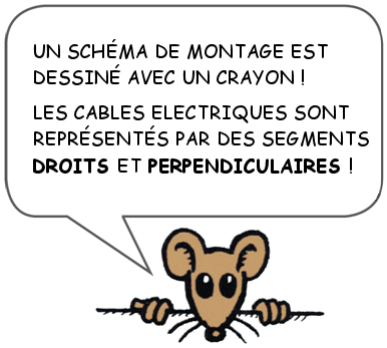




Symboles standards

Générateurs	+	Pile
	+ G	Dynamo
Interrupteurs	K	Interrupteur ouvert
	K	Interrupteur fermé
	S	Interrupteur va-et-vient
Récepteurs		Lampe
	M	Moteur
		Sonnette
Instruments de mesure	V	Voltmètre
	A	Ampèremètre

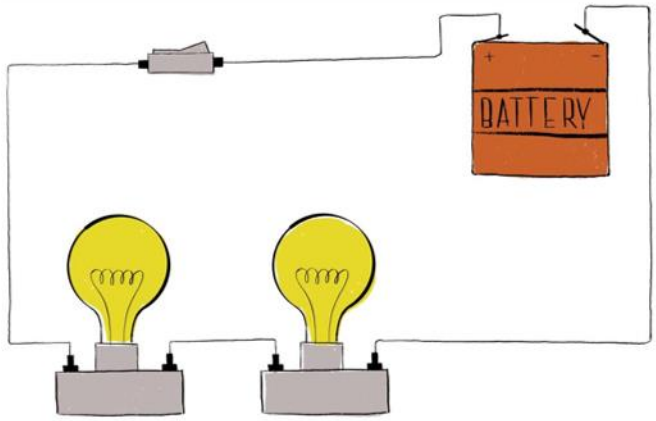
15.3 Types de branchements

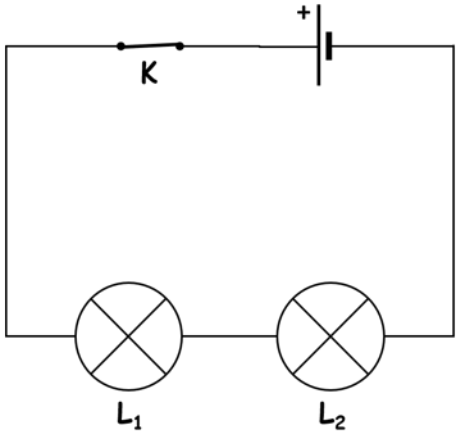


Le montage en série

Lorsque des appareils sont branchés de sorte que le courant électrique les traverse sur un même chemin, on parle d'un branchement en série. Un circuit où tous les éléments sont branchés en série est appelé un **circuit série**.

Exemple : Circuit où une pile, un interrupteur et deux lampes à incandescence sont branchés en série.

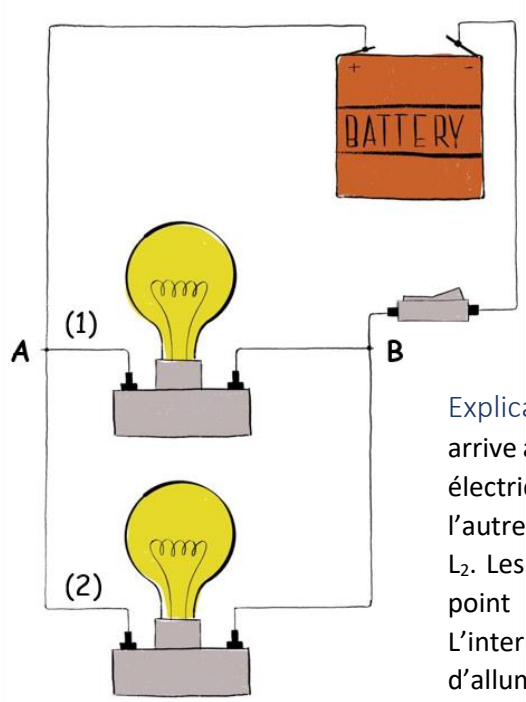


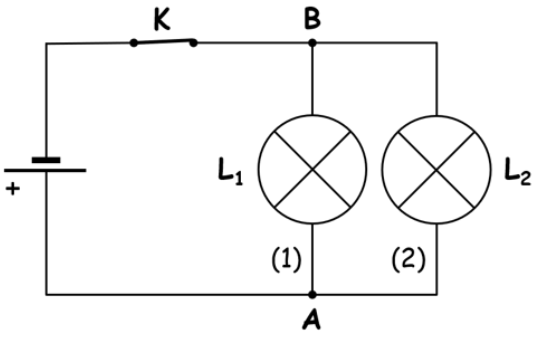


Le montage en parallèle

Lorsque le courant électrique se divise pour alimenter les appareils, on parle d'un branchement en parallèle. Un circuit où tous les composants sont branchés en parallèle est appelé un **circuit parallèle**.

Exemple : Circuit où les deux lampes à incandescence sont branchées en parallèle.

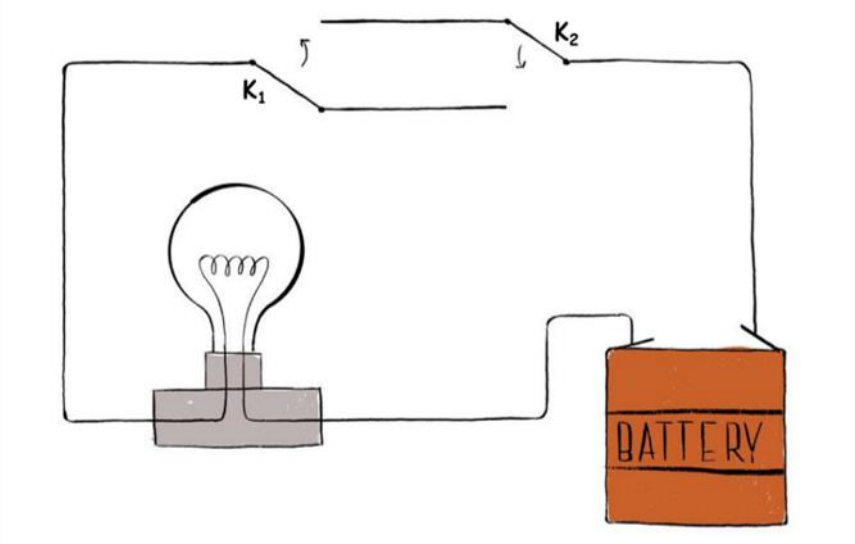




Explication : Le courant électrique quitte le pôle + de la pile et arrive au point A, où il se divise en deux. Une partie du courant électrique parcourt la branche (1) pour alimenter la lampe L_1, l'autre partie parcourt la branche (2) pour faire briller la lampe L_2. Les deux parties du courant se rejoignent de nouveau au point B. Les points A et B sont appelés des **nœuds**. L'interrupteur K branché en série avec la pile permet d'allumer/éteindre les deux lampes simultanément.

Le montage va-et-vient

Il s'agit d'un montage électrique qui permet de commander une lampe (ou tout autre appareil électrique) à partir de deux interrupteurs de façon indépendante. Les interrupteurs se trouvent à des endroits différents dans la maison (en bas et en haut d'un escalier par exemple) et chaque interrupteur permet de changer l'état de la lampe (allumé/éteint) indépendamment de la position de l'autre interrupteur.

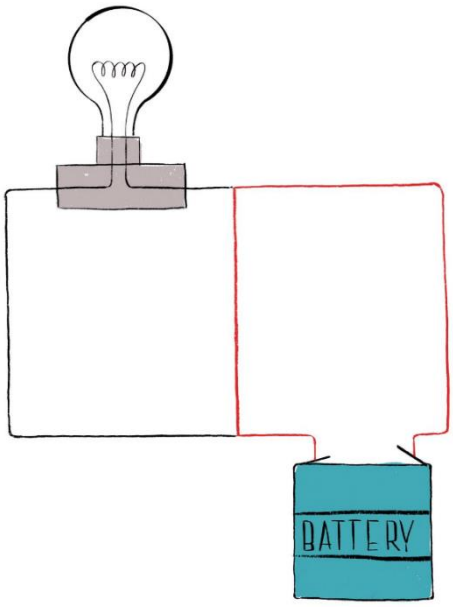


La lampe peut être allumée/éteinte à partir de deux interrupteurs indépendants K_1 et K_2

Pour réaliser un tel montage, on utilise des interrupteurs spéciaux, appelés **interrupteurs va-et-vient** (cf. schéma ci-dessus). La fonction de ces interrupteurs ressemble à celle des aiguillages de chemin de fer (« Eisenbahnweichen »).

Le court-circuit

On parle d'un court-circuit lorsque le courant électrique peut passer du pôle + au pôle – de la source d'énergie électrique sans passer par un récepteur (c.à.d. sans passer par un appareil qui transforme l'énergie électrique de façon utile).



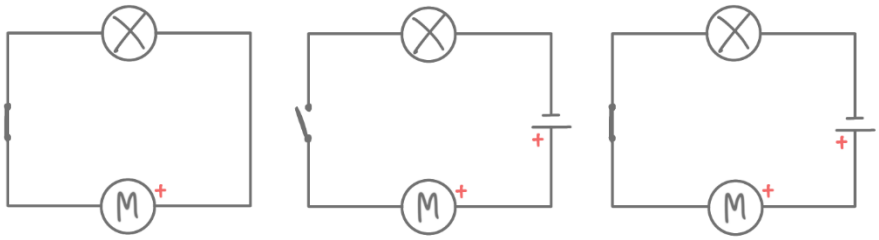
Exemple : Dans le montage ci-contre, nous avons un court-circuit. On dit aussi que la lampe électrique est court-circuitée.

Explication : Un simple fil électrique présente très peu de résistance au passage du courant (comparée à une lampe ou un moteur électrique). Comme le courant électrique choisit de préférence le chemin le plus « facile », c'est-à-dire le chemin de plus faible résistance, la lampe reste éteinte ici. En revanche, dans la partie du circuit indiquée en rouge, le courant devient très intense.

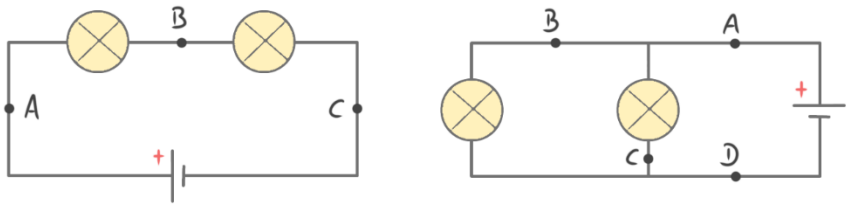
Conséquence : Toute l'énergie fournie par le générateur est transformée en chaleur dans les fils électriques : ils risquent de fondre ce qui peut provoquer un incendie (« Brandgefahr ») !

As-tu compris ?

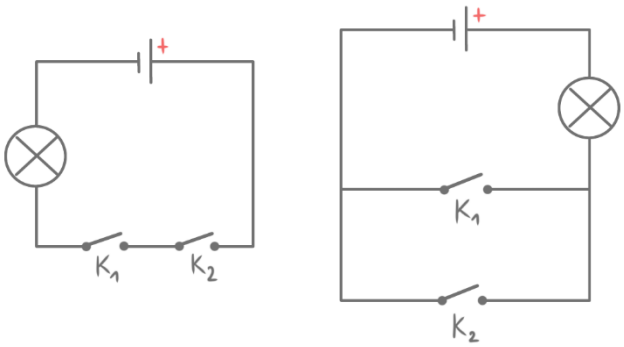
31. Pour les schémas suivants, déterminer si la lampe s'allume et/ou si le moteur tourne. Justifier les réponses.



32. À quels endroits des circuits suivants peut-on introduire un interrupteur pour allumer ou éteindre les deux lampes simultanément ? Justifier les réponses.



33. Pour les circuits suivants, déterminer les positions (ouvert/fermé) des interrupteurs qui permettent d'allumer la lampe.

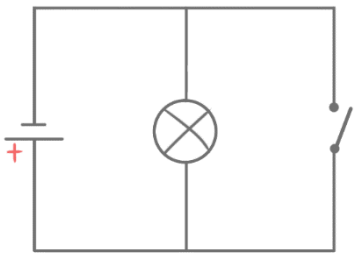


34. Trois lampes identiques sont branchées à une pile. Lorsqu'on dévisse la lampe A, alors les lampes B et C continuent à briller. Par contre, lorsqu'on dévisse B, alors seulement A continue à briller. Faire un schéma du montage et préciser le sens du courant électrique.

35. La sonnette d'un appartement est commandée par deux interrupteurs : l'un fixé près de la porte de l'immeuble et l'autre fixé près de la porte d'appartement. Faire un schéma du montage et expliquer le fonctionnement du circuit.

36. On considère le circuit électrique illustré ci-contre. Quelle réponse est correcte ? Justifier !

A. La lampe brille si l'interrupteur est ouvert.
B. La lampe brille si l'interrupteur est fermé.
C. La lampe brille dans les deux cas.
D. La lampe reste éteinte dans les deux cas.



37. Pourquoi un court-circuit est-il dangereux ? Expliquer !

16 Transformations d'énergie et puissance électrique

Considérons un circuit série où une pile alimente un ventilateur électrique. La pile fournit de l'énergie électrique aux porteurs de charge (électrons) ; les électrons transportent cette énergie vers le moteur (courant électrique) qui la transforme en énergie de mouvement (rotation de l'hélice → courant d'air).

Au final, tous les circuits électriques ont ceci en commun : ils servent à transporter de l'énergie d'un endroit à un autre afin d'y répondre à un besoin.

Lorsque le courant circule, l'énergie est transformée de façon continue au cours du temps. Si une pile fournit 10 J d'énergie électrique en 1 seconde, elle fournit 20 J en 2 s, 30 J en 3 s et ainsi de suite. Cette pile est plus puissante qu'une autre qui ne fournit que 5 J en 1 s, 10 J en 2 s, 15 J en 3 s etc.

La puissance électrique de la pile, mesurée en **watt**[16] (**W**) correspond au rapport entre l'énergie échangée et le temps : elle nous renseigne sur la vitesse des transformations énergétiques qui ont lieu dans la pile.

La **puissance électrique** d'un dipôle est égale à l'énergie électrique fournie/reçue par unité de temps :

$$\text{puissance électrique (en W)} = \frac{\text{énergie électrique (en J)}}{\text{temps (en s)}} \qquad \text{Formule : } \boldsymbol{P_{\text{el}} = \frac{E_{\text{el}}}{t}}$$

Exemple : Un grille-pain qui porte l'inscription « 500 W » transforme chaque seconde 500 J d'énergie électrique en énergie thermique. Griller une tranche de pain ($t \cong 1$ min) nécessite donc une énergie électrique de $E_{\text{el}} = P_{\text{el}} \cdot t \cong 500\ \text{W} \cdot 60\ \text{s} \cong 30'000\ \text{J} = 30\ \text{kJ}$.

Puissance électrique en fonction de *U* et *I*

Les définitions de la tension U et de l'intensité I donnent :

$$U = \frac{E_{\text{el}}}{Q} \iff E_{\text{el}} = U \cdot Q \qquad\qquad I = \frac{Q}{t}$$

En remplaçant ces expressions dans la définition de P_{el} on obtient :

$$P_{\text{el}} = \frac{E_{\text{el}}}{t} = \frac{U \cdot Q}{t} = U \cdot \frac{Q}{t} = U \cdot I \qquad \text{donc} \qquad \boldsymbol{P_{\text{el}} = U \cdot I}$$

Unité alternative pour l'énergie électrique

Le joule étant une unité relativement faible pour l'énergie électrique, on exprime la consommation énergétique des ménages en kilowattheure (kWh). La conversion découle de la définition :

$$1\ \text{kWh} = 1\ \text{kW} \cdot 1\ \text{h} = 1000\ \text{W} \cdot 3600\ \text{s} = 3'600'000\ \text{J} = 3{,}6\ \text{MJ}$$

Application : Lorsqu'un chauffage électrique de 2,3 kW de puissance électrique fonctionne pendant 3 h, il transforme 6,9 kWh d'énergie électrique en énergie thermique. Sachant qu'en Europe la tension domestique vaut $U = 230$ V, l'intensité du courant électrique qui circule dans l'appareil vaut :

$$I = \frac{P_{\text{el}}}{U} = \frac{2300\ \text{W}}{230\ \text{V}} = 10\ \text{A}$$

[16] En l'honneur de James Watt, physicien britannique du 18e siècle à qui l'on doit le développement de la machine à vapeur.

As-tu compris ?

38. Une perceuse électrique transforme une puissance électrique de 200 W. Expliquer la signification physique de cette phrase.

39. Etablir la relation $P_{el} = U \cdot I$ à partir des définitions de la tension électrique et de l'intensité du courant électrique. Expliciter le lien entre puissance, tension et intensité du courant électrique à l'aide des unités SI.

40. La centrale nucléaire de Cattenom comprend 4 réacteurs dont chacun fournit une puissance électrique de 1300 MW. Evaluer la production annuelle d'énergie électrique sachant qu'un réacteur nucléaire tourne 24h/24 et 7j/7. Donner le résultat en unité SI et en TWh.

41. La consommation électrique d'un ménage s'élève en moyenne à 400 kWh par mois.

a. Evaluer les frais annuels pour un ménage typique sachant que le prix de l'électricité est de 0,12 €/kWh.

b. Estimer le nombre de ménages qui peuvent être alimentés par la centrale de Cattenom.

42. Une pile de 4,5 V alimente une petite lampe à incandescence qui porte l'inscription (4,5 V ; 1 W).

a. Décrire les transformations d'énergie qui ont lieu dans ce circuit.

b. Que vaut l'intensité du courant électrique dans la lampe ? Et dans la pile ?

c. Combien d'énergie électrique est transformée par la lampe en 5 minutes ?

d. Quelle quantité de charge électrique a traversé la lampe pendant ce temps ?

43. Un accumulateur alimente le moteur électrique d'une voiture télécommandée.

a. Décrire les transformations d'énergie qui ont lieu dans ce circuit.

Un technicien mesure la tension aux bornes de la pile et l'intensité du courant dans le moteur.

b. Faire un schéma du montage en indiquant les instruments de mesure.

Le voltmètre indique 9V et le moteur porte l'inscription (9V ; 1W). Le technicien est satisfait.

c. Que vaut l'indication de l'ampèremètre ?

L'accumulateur porte l'indication « 2000 mAh ».

d. Pendant combien de temps peut-on faire rouler la voiture lorsque l'accumulateur est pleinement chargée ?

e. Combien d'électrons ont traversé le moteur de la voiture pendant ce temps ?

44. Le moteur des locomotives électriques de la CFL fonctionne sous 15 kV et affiche 3MW de puissance électrique à plein régime.

a. Déterminer l'intensité du courant qui alimente le moteur à plein régime.

b. Quelle quantité de charge électrique traverse le moteur pendant une heure ?

c. Evaluer la quantité d'énergie électrique nécessaire pour un trajet Luxembourg – Paris qui dure environ 4 h.

d. Une fois arrivé à Paris, sous quelle forme retrouve-t-on l'énergie électrique reçue par le moteur ?

17 Les effets du courant électrique

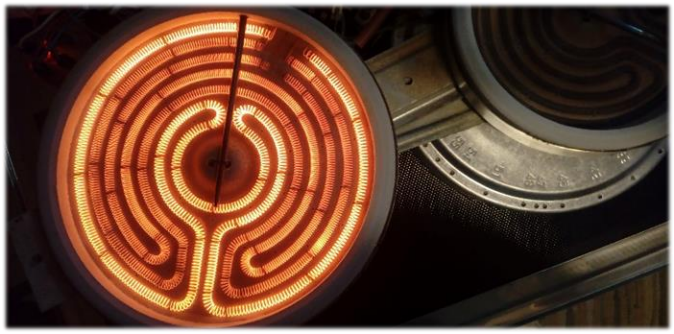
Lorsqu'un courant électrique circule à travers un récepteur, cela se manifeste par quatre effets différents qui, outre leur caractère parfois spectaculaire, sont à l'origine de nombreuses applications.

17.1 L'effet calorifique

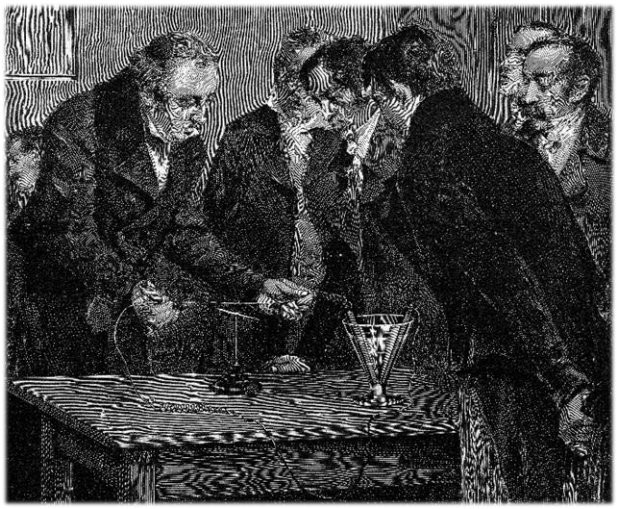
Exemple d'expérience : On fait passer un courant électrique dans un fil métallique de faible diamètre.

Observation : À mesure qu'on augmente l'intensité du courant dans le circuit, le fil devient incandescent et finit par fondre.

Effet calorifique : Le courant électrique provoque l'échauffement de la plupart des conducteurs qu'il traverse. On parle également de **l'effet Joule**.



17.2 L'effet magnétique

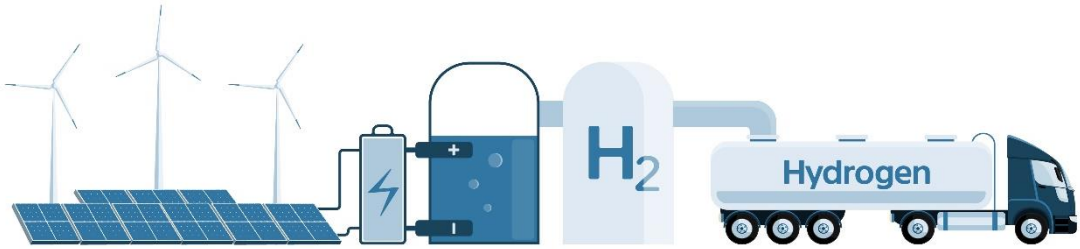


Expérience : Une aiguille aimantée est placée à proximité d'un fil conducteur reliée à une source d'énergie électrique[17].

Observation : L'aiguille aimantée dévie lorsque le fil conducteur est parcouru par un courant électrique.

Effet magnétique : Lorsqu'un courant électrique traverse un conducteur, le conducteur se comporte comme un aimant. L'intensité de l'effet magnétique augmente avec l'intensité du courant électrique.

17.3 L'effet chimique



Exemple d'expérience : On place une lame en cuivre et une lame en graphite dans un bain de sulfate de cuivre. La lame en cuivre (l'anode) est reliée au pôle positif d'une source d'énergie électrique ; la lame en graphite (la cathode) est reliée au pôle négatif.

[17]C'est grâce à cette expérience que le physicien danois Hans Christian Oersted a découvert le lien entre l'électricité et le magnétisme en 1820.

Observation : Des bulles de gaz se dégagent des lames. Après quelque temps, on observe un dépôt de cuivre sur la cathode.

Effet chimique : La circulation d'un courant électrique peut provoquer des réactions chimiques, notamment dans les liquides.

17.4 L'effet luminescent

Exemple d'expérience : Une diode électroluminescente (LED : « light-emitting diode ») émet de la lumière lorsqu'elle est parcourue par un courant électrique. En touchant la diode, on constate qu'elle ne s'échauffe pas.

Effet luminescent : Lorsque certains matériaux sont parcourus par un courant électrique, ils émettent de la lumière sans que leur température augmente.

Crédits photos

© Nos SeaStar / Shutterstock.com (1143817739) – **p.0** *(titre ondes)*

© Atlantist Studio / Shutterstock.com (2086243213) – **p.24** *(prisme)*

© Laurent HILD – **p.24** *(disque de Newton)*

© Valentyn Volkov / Shutterstock.com (1086304745) – **p.28** *(fibres optiques)*

© Laurent HILD – **p.32** *(loupe) ;* **p.36** *(miroir courbe)*

© vchal / Shutterstock.com (1054874555) – **p.34** *(sismographe, photo de gauche)*

© BlueRingMedia / Shutterstock.com (143998843) – **p.34** *(sismographe, photo de droite)*

© trgrowth / Shutterstock.com (717565057) – **p.35** *(echelle décibel)*

© Pepermpron / Shutterstock.com (2156778643) – **p.36** *(sonar dauphins)*

© GagliardiPhotography / Shutterstock.com (140548642) – **p.37** *(échographie)*

© muratart / Shutterstock.com (324664109) – **p.41** *(titre électricité)*

© Ezequiel Nieva / Shutterstock.com (1904402542) – **p.48** *(énergie)*

© Wikimedia Commons (« Public Domain » ou droits d'auteur expirés) – **p.48** *(machine de Wimshurst)*

© nokkaew / Shutterstock.com (637142545) – **p.52** *(câbles)*

© John D Sirlin / Shutterstock.com (729220678) – **p.55** *(orage)*

© Grandomart / Shutterstock.com (1719635515) – **p.63** *(plaque électrique)*

© Morphart Creation / Shutterstock.com (1309484716) – **p.63** *(experience d'Oersted)*

© Scharfsinn / Shutterstock.com (1949819509) – **p.63** *(effet chimique)*

© Krasowit / Shutterstock.com (131553944) – **p.64** *(diodes électroluminescentes)*

Crédits illustrations

© Andrei CLONTEA - **p.1** *(colibri)* ; **p.9** *(zones d'audibilité)* ; **p.42** *(filet d'eau ; électroscope)* ; **p.43** *(boules chargées ; électroscope)* ; **p.44** *(toutes)* ; **p.47** *(orage)* ; **p.49** *(pile)* ; **p.51** *(toutes)* ; **p.53** *(toutes)* ; **p.57** *(circuit électrique)* ; **p.58** *(toutes)* ; **p.59** *(toutes)*

© Robert DROULANS - **p.50** *(voltmètre)* ; **p54** *(ampèremètre)* ; **p.57** *(symboles électriques)* ; **p.60** *(circuits électriques)*

© Laurent HILD - **p.52** *(test de conductivité)* ; **p.56** *(générateur-récepteur) ;*

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT, auteur de toutes les autres illustrations de ce cours. Les illustrations ont été adaptées et/ou annotées par Laurent HILD, avec l'autorisation 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