

---

# COURS DE PHYSIQUE

---

Classes de 4C

2020 - 2021

CNESC

Auteurs : Laurent Hild & Robert Droulans

Illustrations : Paul G. Hewitt & Andrei Clontea

# Table des matières

## Partie I - Ondes

1	Oscillations .....	2
2	Mouvement d'onde.....	4
3	Représentation d'ondes .....	5
4	Types d'ondes.....	9
4.1	Les ondes sonores .....	9
4.2	Les ondes électromagnétiques.....	11
4.3	Les ondes sismiques .....	12
4.4	Les vagues en mer (facultatif) .....	12
5	La célérité .....	14
6	Réflexion d'ondes.....	19
6.1	Réflexion d'ondes à la surface de l'eau .....	19
6.2	Réflexion de la lumière.....	20
6.3	Réflexion du son .....	22
7	Réfraction d'ondes .....	27
7.1	Réfraction d'ondes à la surface de l'eau .....	27
7.2	Réfraction de la lumière .....	27
7.3	Réfraction du son .....	29
8	Dispersion.....	34
8.1	Prisme.....	34
8.2	Arc-en-ciel (facultatif).....	34
9	Réflexion totale .....	39
9.1	Angle critique .....	39
9.2	Réflexion totale dans le diamant.....	39
9.3	Fibres optiques.....	40
10	Lentilles .....	42
10.1	Types de lentilles .....	42
10.2	Caractéristiques d'une lentille.....	42
10.3	Formation d'images par les lentilles convergentes.....	42
10.4	Troubles de la vision.....	44
11	Effet Doppler (facultatif) .....	48
11.1	Ondes d'eau.....	48
11.2	Son.....	48
11.3	Lumière.....	48
11.4	Ondes radar.....	49
12	Onde d'étrave et onde de choc (facultatif).....	50

## Partie II - Électricité

1	La charge électrique .....	53
1.1	Comment électriser un corps ? .....	53
1.2	Mise en évidence de la charge électrique.....	53
1.3	Deux types de charge électrique.....	54
1.3.1	Interactions.....	54
1.4	Principe de fonctionnement de l'électroscope .....	54
1.5	Où sont localisées les charges électriques ? .....	55
1.5.1	Structure de la matière .....	55
1.5.2	Interprétation microscopique de l'électrisation .....	55
1.6	Etude quantitative.....	57
1.7	Conducteurs et isolants.....	58
1.8	Manifestations courantes .....	59
2	Composants électriques.....	60
2.1	La notion d'énergie.....	60
2.2	La pile : une source d'énergie électrique .....	60
2.3	Générateurs et récepteurs.....	61
3	Le courant électrique .....	62
3.1	Sens du courant électrique.....	63
4	Circuits électriques.....	64
4.1	Symboles standards.....	64
4.2	Types de branchements .....	65
4.2.1	Le montage en série .....	65
4.2.2	Le montage en parallèle .....	65
4.2.3	Le montage va-et-vient .....	66
4.2.4	Le court-circuit.....	66
5	Grandeurs électriques.....	69
5.1	La tension électrique .....	69
5.2	L'intensité du courant électrique .....	71
5.3	Énergie et puissance électriques.....	72

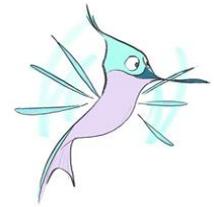
---

# Partie I - Ondes

---

# 1 Oscillations

Les oscillations présentent une importance considérable dans la vie quotidienne : on les retrouve dans les cordes en vibration d'un violon, le battement des ailes des insectes et des oiseaux, le battement du cœur, la formation des vagues, le mouvement des charges électriques dans une antenne, ... Un pendule simple est constitué d'une boule suspendue à un fil. Ses oscillations sont d'une telle régularité, que les pendules sont depuis longtemps utilisés dans les horloges.



- Une **oscillation** (ou vibration) est un mouvement de va-et-vient régulier autour d'une position d'équilibre.
- La **période  $T$**  est la durée d'un aller-retour, c'est-à-dire d'une oscillation. Son unité SI est la seconde (s).
- La **fréquence  $f$**  est le nombre d'oscillations par unité de temps. Son unité SI est le hertz<sup>1</sup> (Hz). Une oscillation par seconde correspond à une fréquence de 1 Hz.

De grandes fréquences sont souvent exprimées en

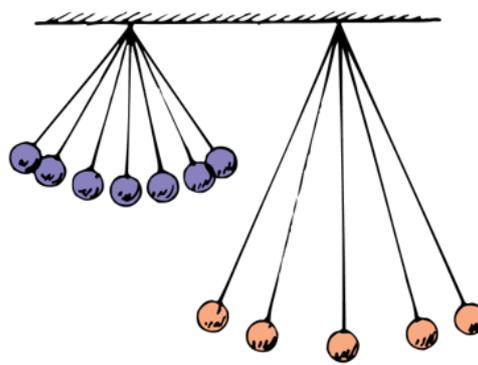
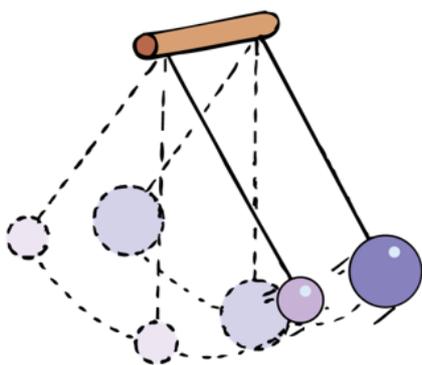
- kHz = 1'000 Hz =  $10^3$  Hz (kilohertz)
- MHz = 1'000'000 Hz =  $10^6$  Hz (mégahertz)
- GHz = 1'000'000'000 Hz =  $10^9$  Hz (gigahertz)



Si un pendule effectue 2 oscillations par seconde ( $f = 2$  Hz), alors la durée nécessaire pour effectuer une oscillation - sa période - vaut 1/2 s. Si la fréquence vaut 3 Hz, la période vaut 1/3 s. La fréquence et la période sont donc inverses l'une de l'autre :

$$\text{fréquence} = \frac{1}{\text{période}} \quad \text{ou, vice versa,} \quad \text{période} = \frac{1}{\text{fréquence}}$$

Le savant italien Galilée<sup>2</sup> observa que la période d'un pendule simple ne dépend ni de la longueur de l'arc de cercle décrit par la boule, ni de la masse de la boule, mais qu'elle augmente avec la longueur du pendule. En effet, lorsque la longueur du pendule quadruple, sa période double.



La période du pendule simple dépend également de l'intensité de la pesanteur  $g$ <sup>3</sup>. Plus l'intensité de la pesanteur est grande, plus la période d'un pendule simple donné est petite, donc plus sa fréquence est grande.

<sup>1</sup> En l'honneur de Heinrich Hertz, physicien allemand du 19<sup>e</sup> siècle qui fut le premier à transmettre des ondes radio.

<sup>2</sup> Mathématicien, physicien et astronome italien du 17<sup>e</sup> siècle à qui l'on doit de nombreuses découvertes.

<sup>3</sup> La formule de la période d'un pendule simple s'écrit :  $T = 2\pi\sqrt{L/g}$  où  $L$  est la longueur du pendule.

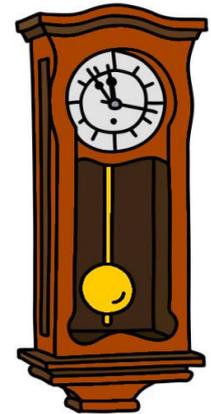
■ **As-tu compris ?**

1. Quelle fréquence correspond aux périodes suivantes ?

- a. 0,10 s
- b. 5 s
- c. 1/60 s

2. Quelle période correspond aux fréquences suivantes ?

- a. 0,20 Hz
- b. 4 Hz
- c. 80 Hz



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

- a. Quelle est la période des oscillations ?
- b. Quelle est la fréquence ?
- c. Comment faudrait-il modifier la longueur de la balançoire pour doubler 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. Laquelle des deux balançoires oscille avec une plus grande fréquence ? Justifier.

6. Une horloge pendule grand-père 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 la réponse.

7. *Facultatif* : Une 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.
- Les signaux qui atteignent nos radios et smartphones se propagent 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.

**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, alors que chaque point de la corde reproduit simplement la vibration de la source, sans être emporté par l'onde.



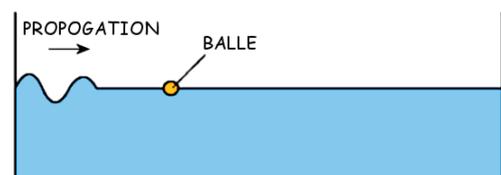
- b. Lorsqu'une pierre tombe dans l'eau d'un étang, les vibrations de la surface d'eau se propagent à partir du point d'impact sous forme d'ondes circulaires. C'est l'énergie de la vibration qui se propage, mais pas l'eau en soi. En effet, une feuille qui flotte sur la surface de l'eau oscille lors du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



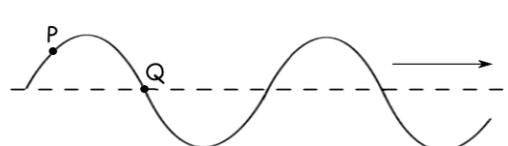
- c. La « ola » est un mouvement d'onde observé dans les stades. Elle est déclenchée par des spectateurs qui se mettent debout, lèvent les bras, puis, une fois que leurs voisins ont imité le mouvement, reprennent leur position assise. Cette « vibration » est propagée de proche en proche à travers toute la foule. C'est l'énergie qui se propage à travers le stade, pas les spectateurs.

### ■ As-tu compris ?

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



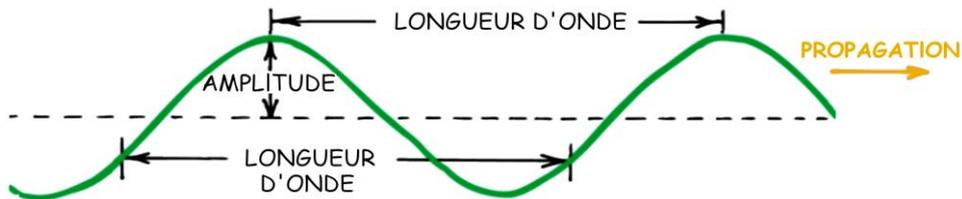
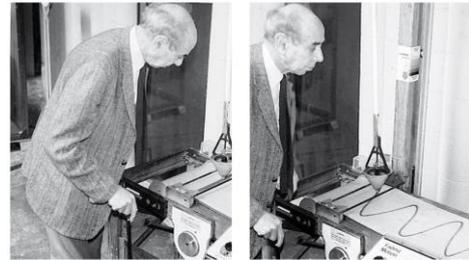
9. Une onde se propage le long d'une corde dans le sens indiqué. P et Q sont deux points de la corde. Quelle proposition est correcte ?



- a. Le point P est en train de se déplacer vers la gauche / la droite / le haut / le bas .  
 b. Le point Q est en train de se déplacer vers la gauche / la droite / le haut / le bas .

### 3 Représentation d'ondes

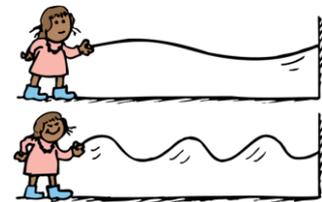
Sur la photo, le physicien américain Frank Oppenheimer montre comment du sable, coulant de la pointe d'un pendule simple, trace une ligne droite sur une surface stationnaire, mais une courbe sur un tapis roulant. Cette courbe, appelée **sinusoïde**, est une représentation d'une onde.



- La ligne pointillée représente l'état d'équilibre.
- Les points les plus hauts de la sinusoïde sont les **crêtes**, les points les plus bas sont les **creux**.
- L'**amplitude** de l'onde est l'écart maximal par rapport à l'état d'équilibre, donc la distance entre les crêtes et l'état d'équilibre. L'unité SI de l'amplitude est le mètre.
- La **longueur d'onde**  $\lambda$  (lettre grecque « lambda ») est la distance après laquelle la forme de l'onde se répète (par exemple la distance entre deux crêtes voisines). L'unité SI de la longueur d'onde est le mètre.
- La **fréquence**  $f$  de l'onde est égale à la fréquence de la source de vibration.

#### 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. En augmentant la fréquence de l'onde, on diminue sa longueur d'onde.

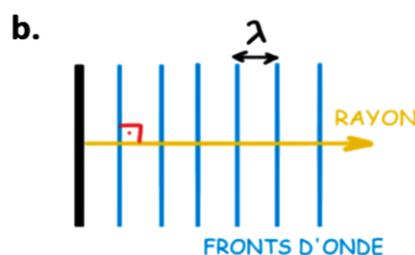
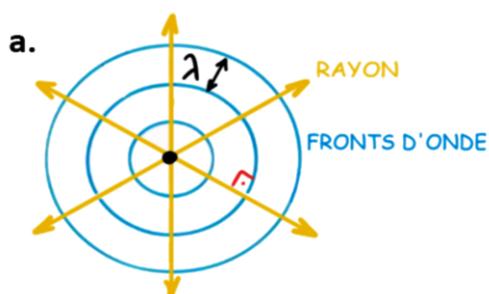


Une onde qui se propage en deux ou en trois dimensions est représentée par des lignes, appelées **fronts d'onde**. Les fronts d'onde représentent le lieu des crêtes (ou des creux).

- Deux fronts d'onde consécutifs sont espacés d'une longueur d'onde.
- 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 »).

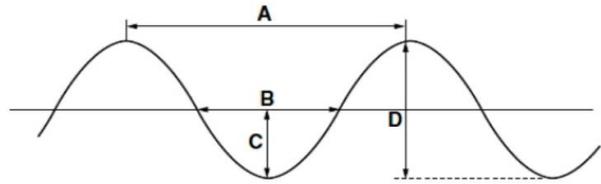
#### Exemples :

- Onde circulaire, générée par une source ponctuelle.
- Onde plane, générée par une source linéaire.

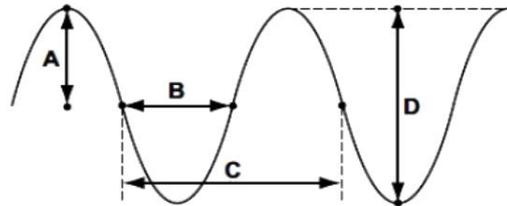


■ **As-tu compris ?**

10. Quelle distance représente l'amplitude de l'onde illustrée ?

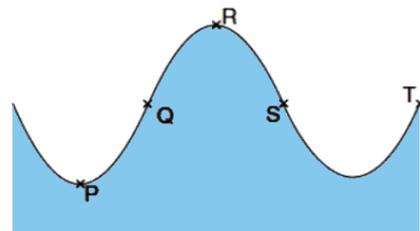


11. Quelle distance représente la longueur d'onde ?



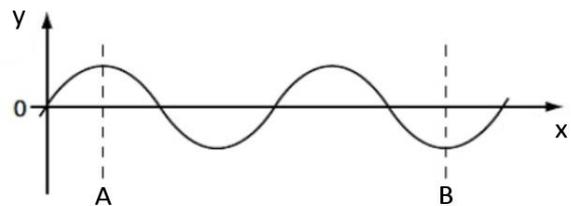
12. Lesquels de ces points à la surface de l'eau sont distants d'une longueur d'onde ?

- A. P et R
- B. Q et S
- C. Q et T
- D. S et T



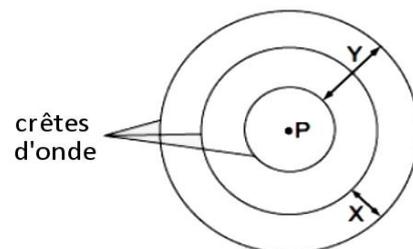
13. Une onde se propage le long d'un axe x. Combien de longueurs d'onde se trouvent entre les points A et B ?

- A. 2/3
- B. 1
- C. 1,5
- D. 3

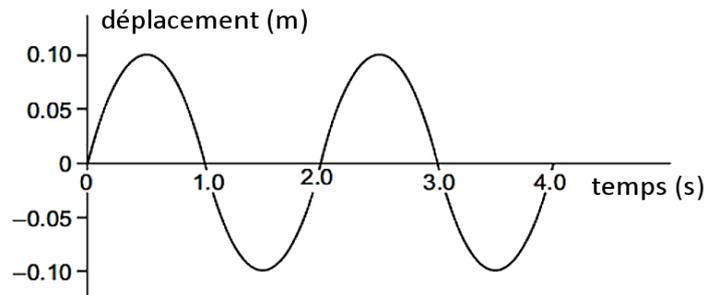


14. Des ondes d'eau circulaires sont issues d'un point P. En deux secondes, trois crêtes d'ondes sont produites à la surface de l'eau. Laquelle des affirmations suivantes est correcte ?

- a. La distance X est la longueur d'onde.
- b. La distance Y est la longueur d'onde.
- c. Chaque cercle représente un front d'onde.
- d. La fréquence de l'onde vaut 3 Hz.

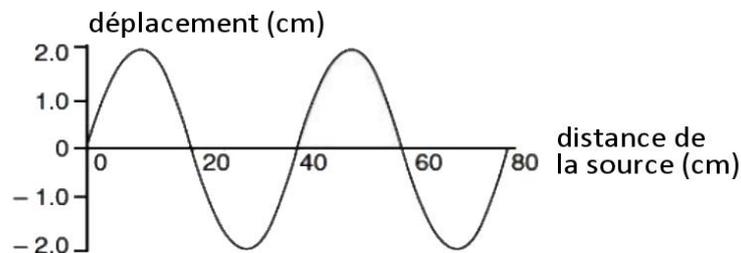


15. La sinusoïde suivante représente la position d'un point d'onde en fonction du temps.



- Combien vaut l'amplitude de l'onde ?
- Quelle est la fréquence de l'onde ?

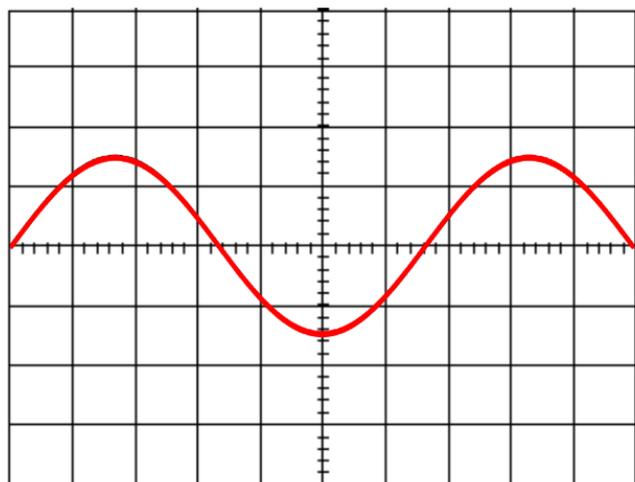
16. La sinusoïde suivante représente la position des points d'onde en fonction de leur distance de la source.



- Combien vaut l'amplitude de l'onde ?
- Combien vaut la longueur d'onde ?

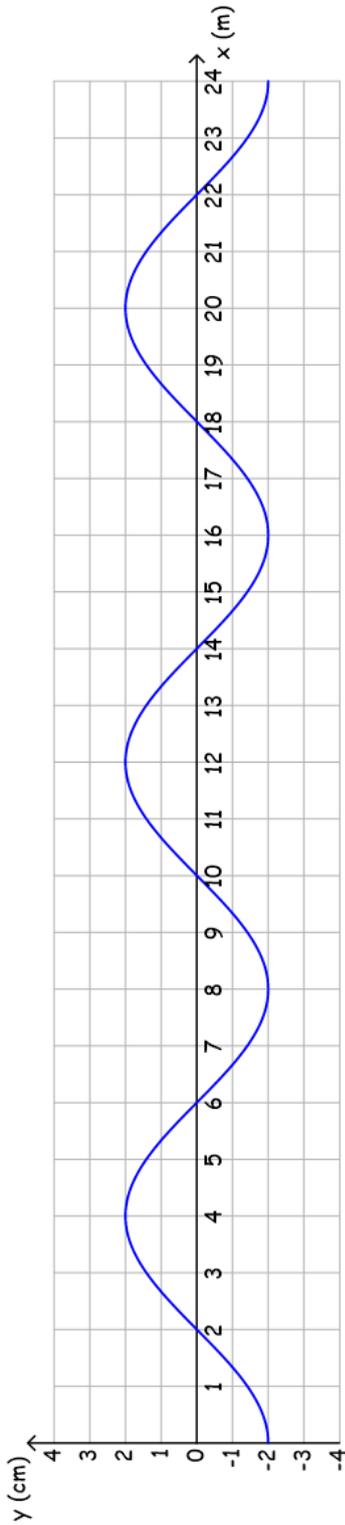
17. Un oscilloscope connecté à un microphone est utilisé pour visualiser le son émis par un haut-parleur. La figure montre l'oscillogramme.

- Sur la figure, indiquer et annoter la distance entre deux crêtes.
- Déterminer la fréquence de l'onde sonore sachant qu'une division horizontale sur l'oscillogramme correspond à 5 ms.
- Sur la figure, ajouter la sinusoïde d'un son de fréquence double et de même amplitude.

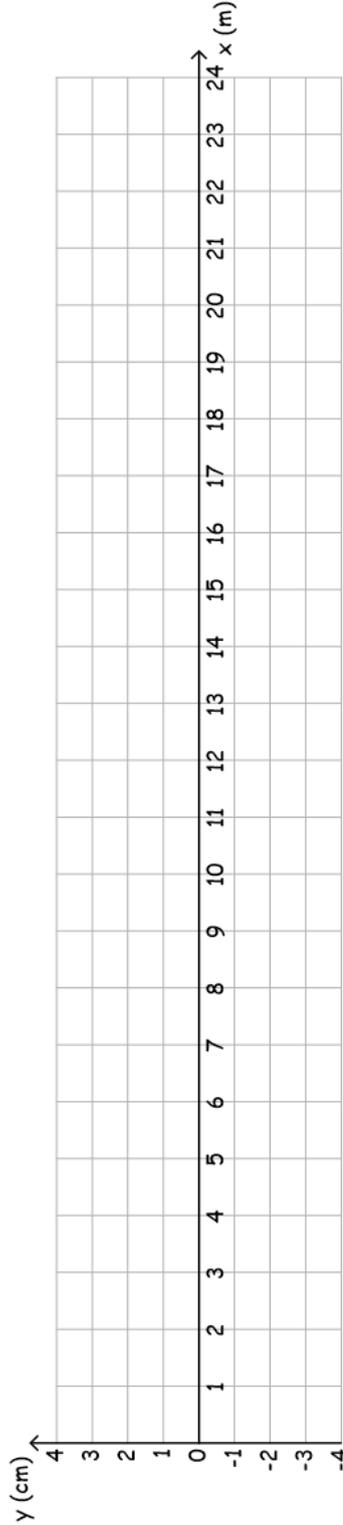


18. Le diagramme montre une « photo » d'une onde qui se propage dans une corde. L'axe x indique la distance d'un point de la corde à la source ; l'axe y représente l'écart par rapport à l'état d'équilibre.

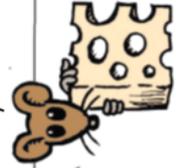
- Déterminer l'amplitude, la longueur d'onde, ainsi que l'écart entre la source et l'état d'équilibre.
- Représenter sur le 2e diagramme la corde lorsque l'amplitude de l'onde vaut 4 cm,  $\lambda = 12$  cm et la source se trouve à l'état d'équilibre.



Amplitude : ..... Longueur d'onde ..... Écart entre la source et l'état d'équilibre : .....



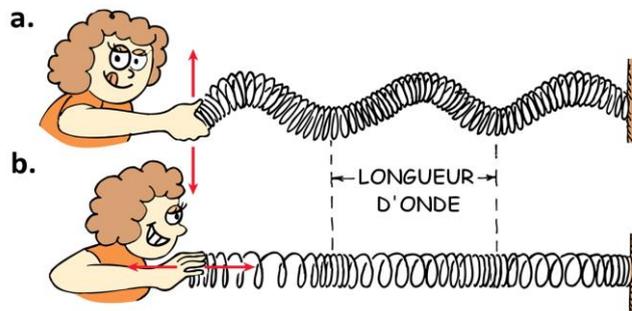
Les bases du dessin à main levée reposent sur l'éducation de l'œil et de la main. Des gestes techniques, comme dessiner proprement une ligne droite, une courbe ou un cercle, nécessitent de l'exercice.



## 4 Types d'ondes

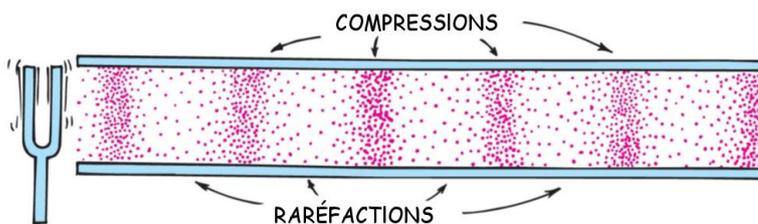
- Une **onde transversale** est une onde dont la vibration est perpendiculaire à la propagation.
- Une **onde longitudinale** est une onde dont la vibration est parallèle à la propagation.

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



### 4.1 Les ondes sonores

Les **ondes sonores** qui se propagent dans les liquides ou les gaz sont longitudinales. Dans les solides, elles peuvent être soit longitudinales, soit transversales. Leur source est toujours une vibration rapide, comme par exemple les vibrations 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 le diapason vibre très rapidement, 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 de la vibration des cordes vocales et le son émis par un haut-parleur est généré par les vibrations d'une membrane. Dans tous les cas, la fréquence des ondes sonores est identique à la fréquence de vibration de la source.

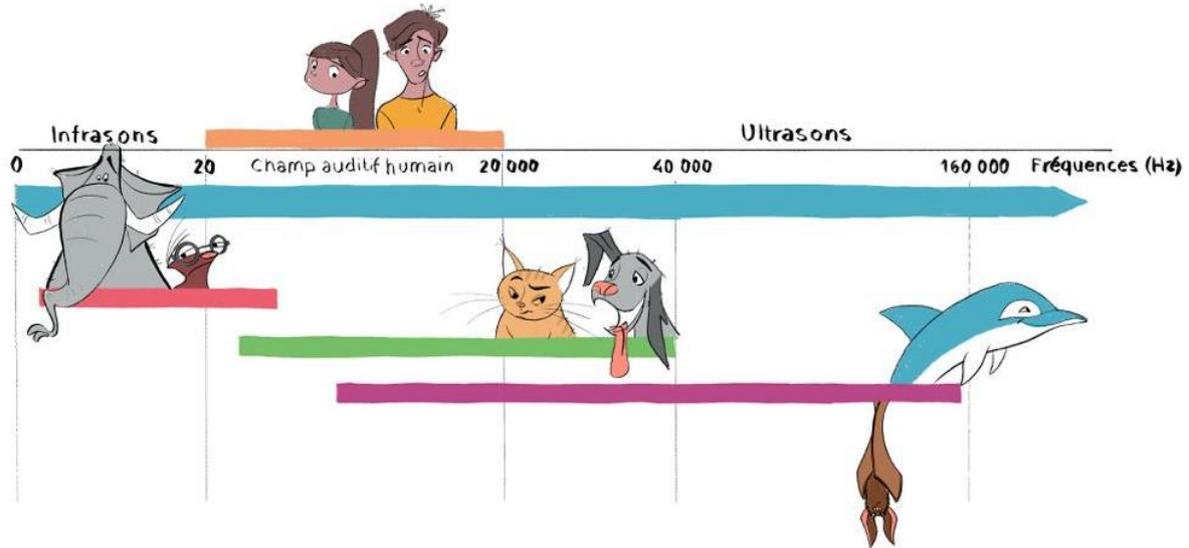
- Plus la fréquence de vibration est élevée, plus le son émis est aigu.
- Plus la fréquence de vibration est basse, plus le son émis est grave.

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

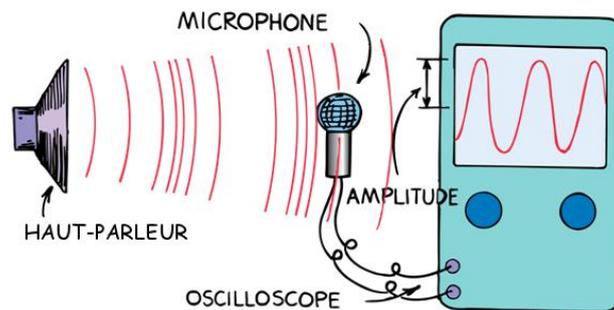


Un enfant perçoit des sons dont la fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 kHz = 20'000 Hz. C'est la **zone d'audibilité** d'un être humain. Avec l'âge, l'ouïe se dégrade, surtout à la limite supérieure des fréquences perçues. Dès la naissance, la limite supérieure d'audibilité diminue tous les dix 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 oreilles des humains ne perçoivent ni

des infrasons, ni des ultrasons. En revanche, les chiens peuvent percevoir des fréquences jusqu'à 40 kHz. Les chauves-souris et les dauphins peuvent même émettre et entendre des ultrasons d'une fréquence au-delà de 100 kHz.



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**.



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.

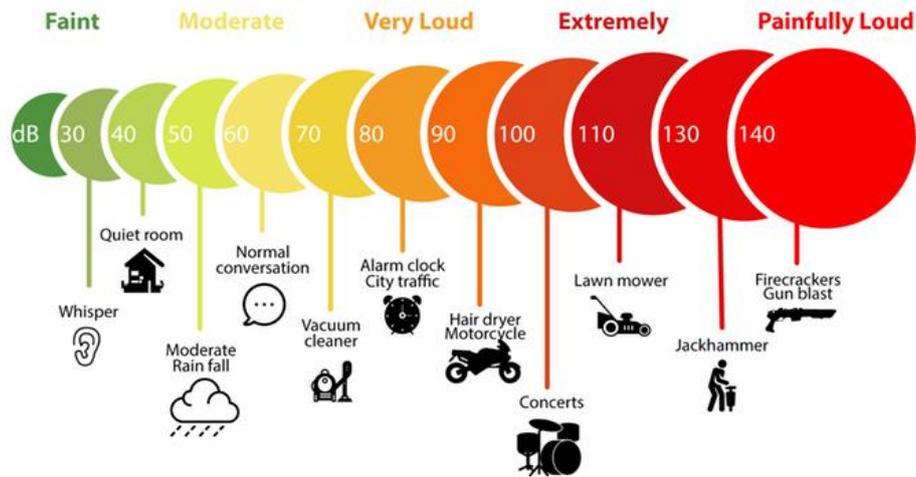
L'unité de l'intensité du son est le **décibel (dB)**<sup>4</sup>. En commençant à la limite de l'audition, chaque augmentation de 10 dB signifie que l'intensité du son augmente d'un facteur 10 :

- Un son de 10 dB est 10 fois plus intense qu'un son de 0 dB.
- Un son de 20 dB n'est pas deux fois, mais 10 fois plus intense qu'un son de 10 dB, ou 100 fois plus intense qu'un son de 0 dB.
- Un son de 60 dB est  $10^6$  (=1'000'000) fois plus intense qu'un son de 0 dB.

La perception de l'intensité du son est subjective.

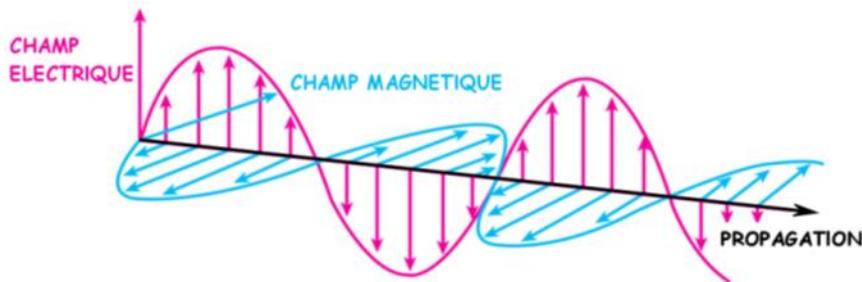
L'endommagement de l'ouïe commence à partir d'environ 85 dB. Cet endommagement dépend de la durée de l'exposition et des fréquences du son. Un éclat violent peut produire une vibration suffisamment intense pour provoquer une rupture de l'organe de Corti, le récepteur à l'intérieur de l'oreille. Malheureusement,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

<sup>4</sup> En l'honneur d'Alexander Graham Bell, physicien britannique du 19<sup>e</sup> siècle à qui l'on doit l'invention du téléphone.

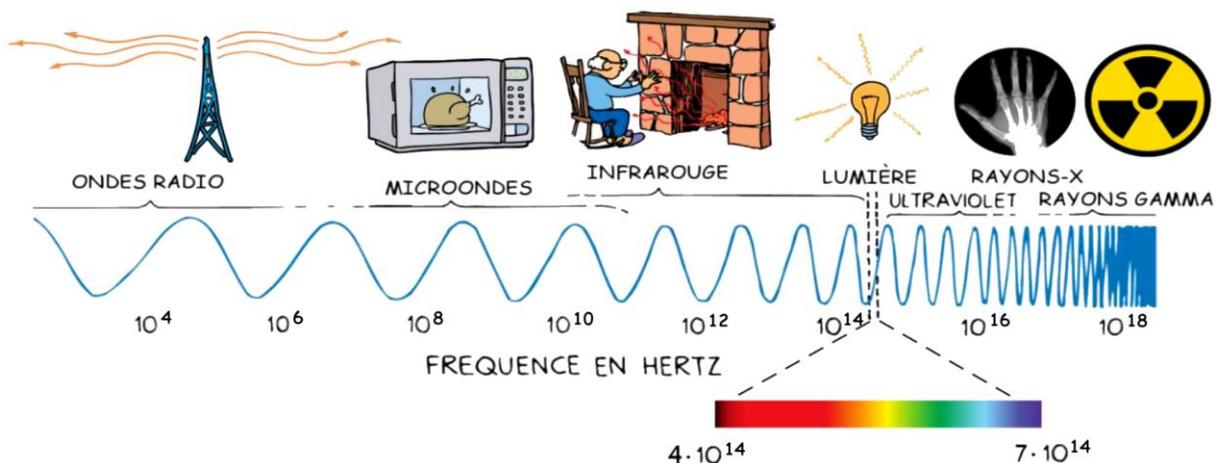


## 4.2 Les ondes électromagnétiques

Les **ondes électromagnétiques** sont créées par des oscillations incroyablement rapides de charges électriques. Ces ondes sont constituées de champs électrique et magnétique oscillants. Les deux champs sont perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde. Les ondes électromagnétiques sont donc ondes transversales. Aucun milieu n'est requis pour la propagation des ondes électromagnétiques ; elles peuvent aussi se propager à travers le vide.



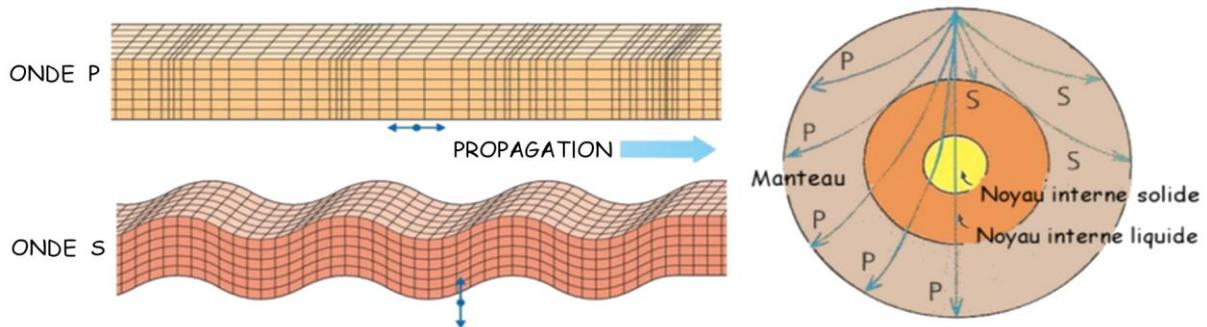
Selon la fréquence de l'onde électromagnétique, l'onde appartient à un certain domaine de la grande famille des ondes électromagnétiques :



- La couleur rouge correspond à la lumière visible de plus basse fréquence. Les ondes électromagnétiques de fréquences inférieures au rouge sont appelées **infrarouges**. Elles sont par exemple émises par les lampes chauffantes.
- La couleur violette correspond à la lumière visible de plus haute fréquence. Les ondes électromagnétiques de fréquences supérieures au violet sont appelées **ultraviolets**. Elles sont notamment responsables des coups de soleil.

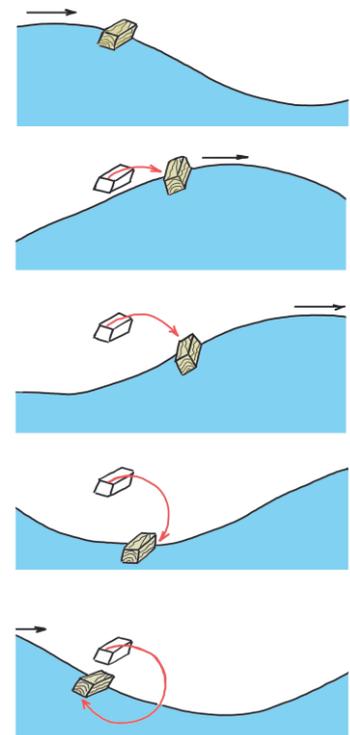
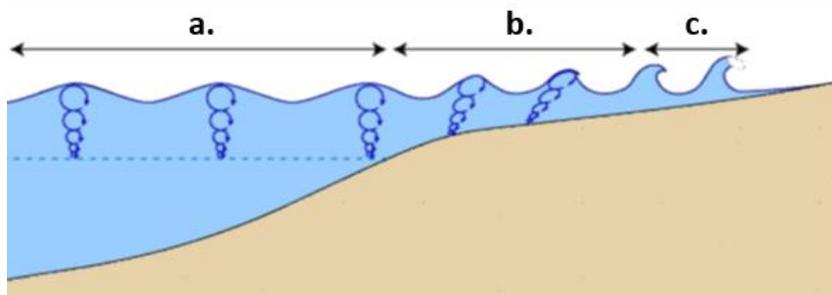
### 4.3 Les ondes sismiques

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 propagent 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 longitudinale (**ondes primaires P**) et du type transversale (**ondes secondaires S**). Les ondes P peuvent traverser les parties liquides et solides dans 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 de la Terre.



### 4.4 Les vagues en mer (facultatif)

Les **vagues** à la surface de la mer sont créées par l'action combinée des marées et du vent. Elles 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.

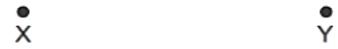


- Dans les eaux profondes, les particules d'eau à proximité de la surface se déplacent sur des cercles. Le diamètre des cercles diminue avec la profondeur de l'eau. En dessous d'une certaine profondeur (trait pointillé sur la figure), les particules d'eau ne sont plus influencées par les vagues.
- Lorsque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



■ **As-tu compris ?**

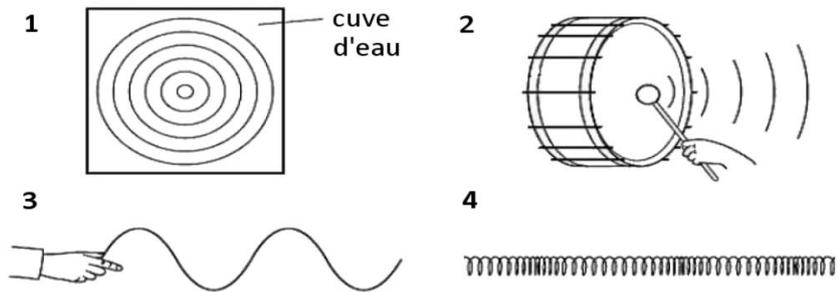
19. Une onde acoustique se propage du point X au point Y. Quelle figure représente le mouvement des molécules d'air entre X et Y lors du passage de l'onde ?



- A. B. C. D.

20. Quelle(s) figure(s) illustre(nt) des ondes longitudinales ?

- A. uniquement 1  
B. 1,2 et 4  
C. 2 et 3  
D. 2 et 4

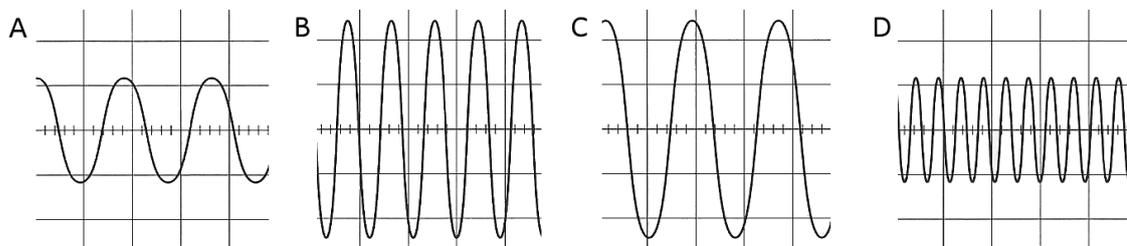


21. Laquelle des propositions donne correctement un exemple d'une onde transversale et d'une onde longitudinale ?

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

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

23. 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 ?

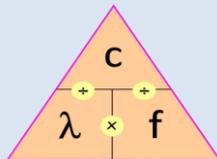
## 5 La célérité

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

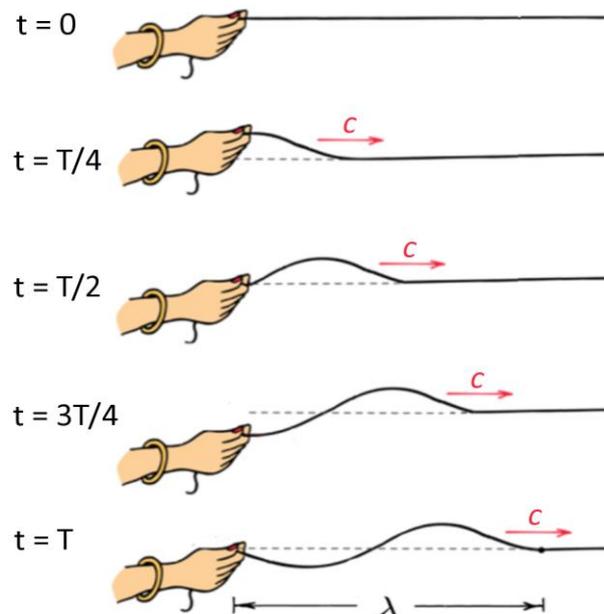
Lors d'une période, l'onde se propage d'une longueur d'onde. Ainsi :

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

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



Il faut bien faire la distinction entre la fréquence à laquelle une onde vibre et la célérité à laquelle elle se propage d'un endroit à un autre.



### Exemples :

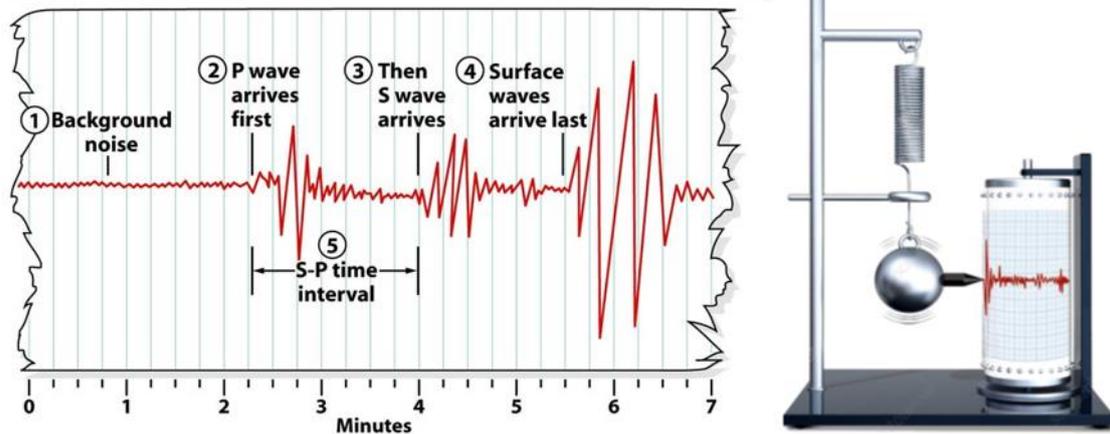
- La célérité des **ondes** qui se propagent **dans une corde** dépend de la tension de la corde.
- La célérité des **ondes d'eau** peut varier de quelques cm/s (dans une flaque d'eau) à quelques centaines de km/h (un tsunami dans l'océan profond).
- Les **ondes électromagnétiques** se déplacent à la 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.
- En général, les **ondes sonores** se propagent plus rapidement dans les liquides que dans les gaz et encore plus rapidement dans les solides.

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

En observant à distance une personne donnant des coups de marteau, le son de l'impact met un certain temps pour atteindre nos oreilles. 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 augmente légèrement avec la température de l'air. Dans un gaz, 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 le dioxygène ou le diazote, constitués de molécules plus lourdes.

La célérité du son dans les solides ne dépend pas de la masse volumique du matériau, mais de son élasticité. L'acier étant très élastique, le son s'y propage 15 fois plus rapidement que dans l'air, et près de 4 fois plus rapidement que dans l'eau.

e. 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 surfaces 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'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.



■ **As-tu compris ?**

**24. Compléter les cases**

Données et inconnue	Formule	Valeurs avec unités	Résultat avec unité
$c = 100 \text{ m/s}$ $f = 10 \text{ Hz}$ $\lambda = ?$			
$c = 100 \text{ m/s}$ $f = ?$ $\lambda = 6 \text{ m}$			
$c = ?$ $f = 70 \text{ Hz}$ $\lambda = 40 \text{ m}$			

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

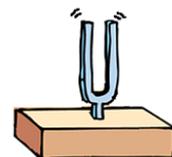


26. Calculer la longueur d'onde des ondes émises par une station radio de fréquence 100 MHz.



27. Une pierre qui tombe dans un étang produit à la surface d'eau une onde de fréquence 4 Hz et de 20 cm de longueur d'onde. Calculer la célérité de l'onde.

28. La longueur d'onde du son émis par un diapason vaut 17 cm. Calculer la fréquence du son.

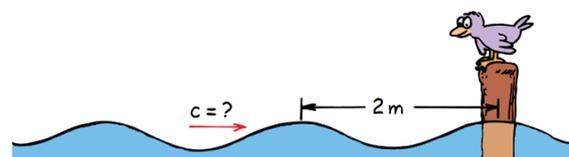


29. Un pianiste joue la note « do », dont la fréquence vaut 264 Hz.

- Calculer la période de vibration de cette note.
- Calculer la longueur d'onde de l'onde sonore produite.

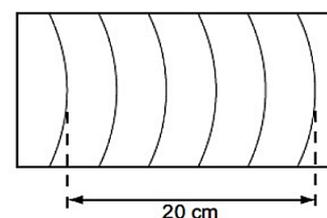
30. L'oiseau perché sur le poteau mesure une durée de 8 s entre le passage de trois crêtes successives de l'onde. Trouver :

- la fréquence de l'onde.
- la période de l'onde.
- la célérité de l'onde.



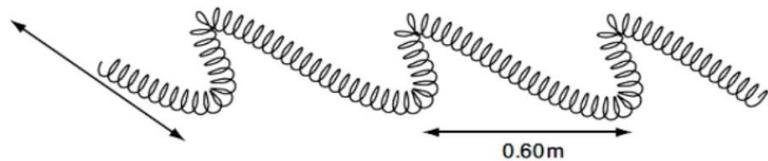
31. Une onde de fréquence 4 Hz se propage dans une cuve d'eau. Les fronts d'onde sont illustrés sur la figure. Combien vaut la célérité de l'onde ?

- 4 cm/s
- 16 cm/s
- 20 cm/s
- 32 cm/s

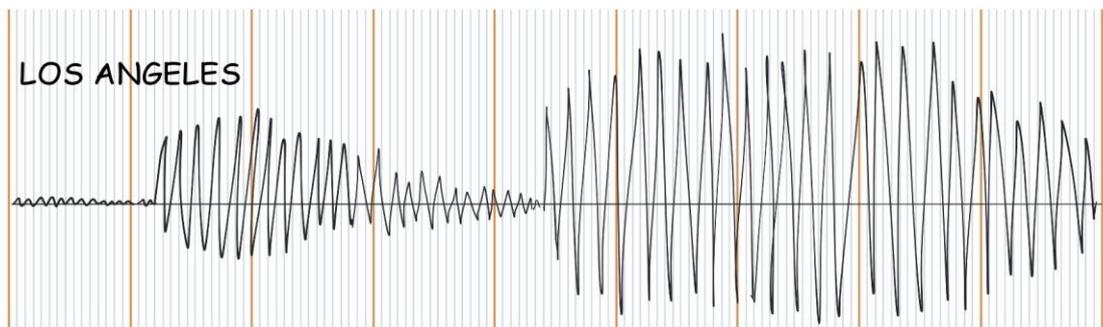


32. La figure montre une partie d'un Slinky, dont l'une des extrémités est agitée avec une fréquence de 2,5 Hz pour produire une onde transversale. Combien de temps faut-il à l'onde pour parcourir une distance de 3 m le long du Slinky ?

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



33. Un séisme a été détecté par des sismographes identiques situés à Los Angeles, Seattle et Salt Lake City. Voici les sismogrammes relevés :



09:36:00 09:36:15 09:36:30 09:36:45 09:37:00 09:37:15 09:37:30 09:37:45 09:38:00 09:38:15



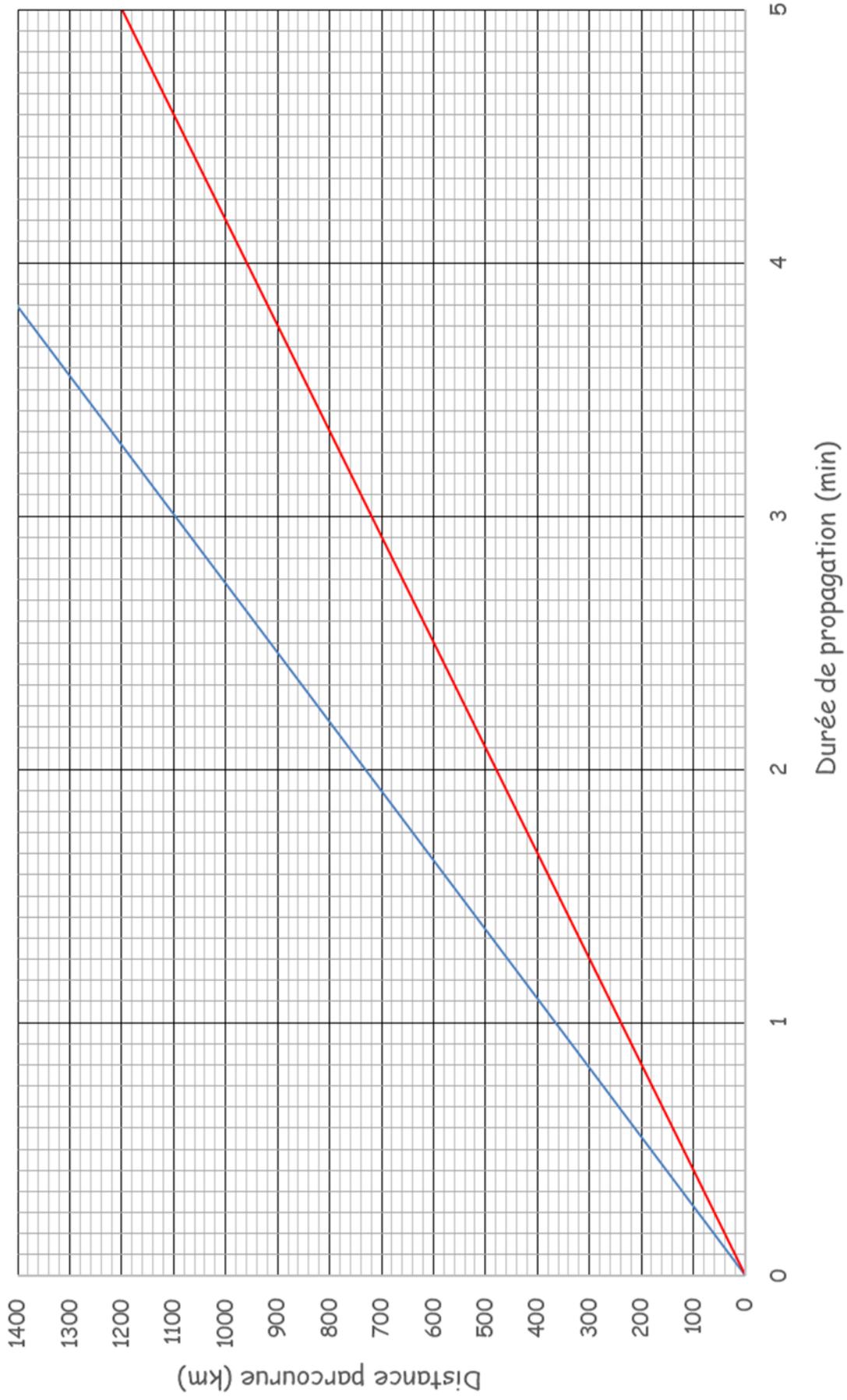
09:37:30 09:37:45 09:38:00 09:38:15 09:38:30 09:38:45 09:39:00 09:39:15 09:39:30 09:39:45



09:37:00 09:37:15 09:37:30 09:37:45 09:38:00 09:38:15 09:38:30 09:38:45 09:39:00 09:39:15

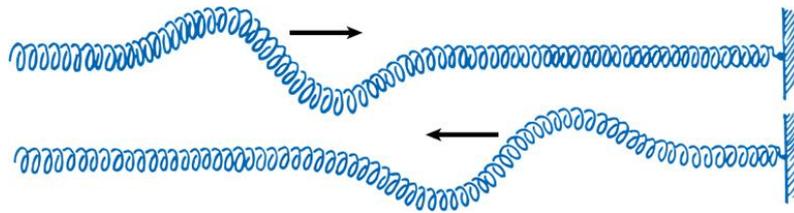
- a. Sur les trois sismogrammes, identifier et annoter les arrivées des ondes P et S.
- b. Quel sismographe se trouve le plus proche de l'épicentre ? Donner deux justifications.
- c. À l'aide du graphique de la page suivante, déterminer les célérités des ondes P et S en km/s.
- d. À l'aide du graphique, déterminer pour chacun des sismographes la distance entre le sismographe et l'épicentre.
- e. Localiser l'épicentre par triangulation sur le site : <https://www.iris.edu/app/triangulation>
- f. Quelle est la cause probable de ce séisme ?
- g. Déterminer l'heure approximative à laquelle le séisme a eu lieu.

Ondes P Ondes S

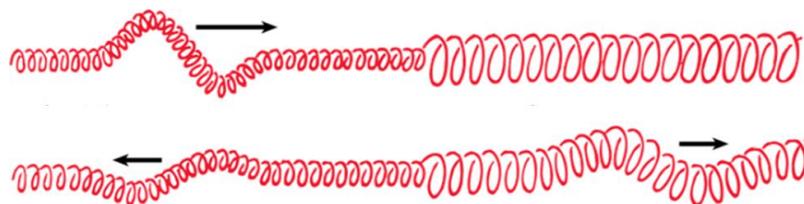


## 6 Réflexion d'ondes

Un signal transversal se propage le long d'un ressort fixé à un mur. Puisque le mur est un milieu très rigide en comparaison avec le ressort, l'onde incidente est **totale**ment réfléchi au mur.

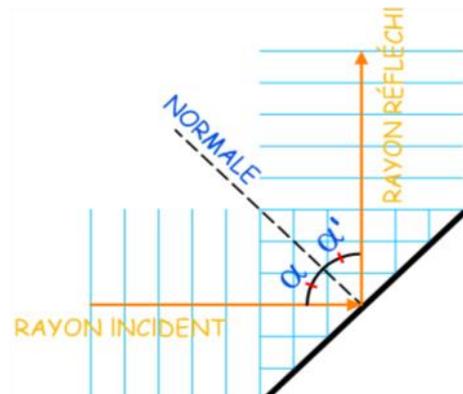
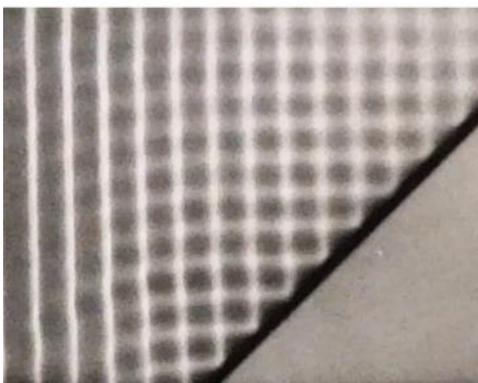


Si on fixe le ressort à un autre ressort, seule une partie de l'énergie de l'onde incidente est réfléchi au point de contact entre les deux ressorts, alors que le reste de l'énergie est transmis dans le deuxième ressort. On dit que l'onde incidente est **partiellement** réfléchi au point de contact.



### 6.1 Réflexion d'ondes à la surface de l'eau

Dans une cuve à ondes, on peut observer la réflexion d'ondes planes par une paroi. Lorsque l'incidence des fronts d'onde sur la paroi se fait sous un angle, la direction des fronts d'onde change, mais la longueur d'onde reste inchangée.



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 du rayon est appelée la **normale**.
- L'angle  $\alpha$  entre le rayon incident et la normale est l'**angle d'incidence**.
- L'angle  $\alpha'$  entre le rayon réfléchi et la normale est l'**angle de réflexion**.

Lorsqu'une onde atteint une séparation entre deux milieux, l'onde y est réfléchi vers le premier milieu, sans changement de fréquence. La réflexion de l'onde peut être totale ou partielle.

Loi de la réflexion :

**L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion :  $\alpha = \alpha'$**

## 6.2 Réflexion de la lumière

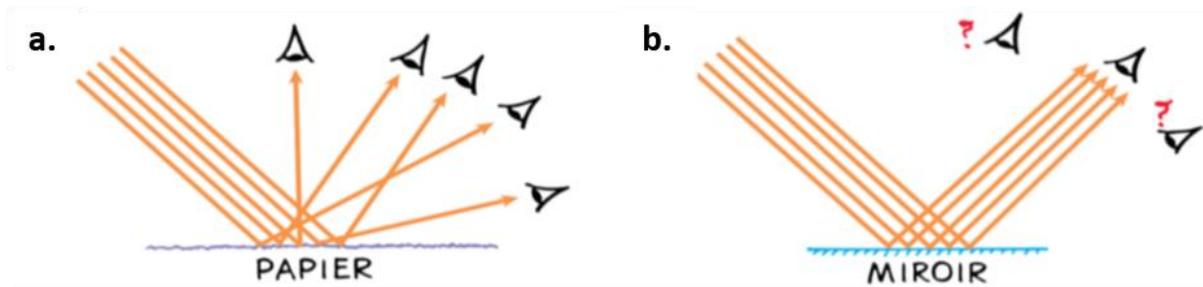
La plupart des objets qui nous entourent n'émettent pas leur propre lumière. Ils sont visibles parce qu'ils réfléchissent la lumière d'une **source lumineuse**, telle que le Soleil, une lampe ou la foudre. Par exemple, la Lune est visible parce qu'elle réfléchit la lumière du Soleil.



Lorsque la lumière rencontre la surface de séparation entre deux milieux, une partie de la lumière est réfléchi vers le milieu d'origine. L'autre partie de la lumière est transmise dans le nouveau milieu. La brillance des métaux vient du fait qu'ils réfléchissent quasi toutes les fréquences de la lumière visible. En revanche, le verre ou l'eau ne sont pas aussi réfléchissants pour les ondes lumineuses. Par exemple, lorsque la lumière tombe perpendiculairement sur une

surface d'eau, seulement 2% de l'énergie de la lumière incidente sont réfléchis, le reste est transmis dans l'eau.

- Si la surface de séparation présente des irrégularités, un faisceau lumineux parallèle est réfléchi dans des directions aléatoires. La réflexion est dite **diffuse**.
- Si la surface de séparation est polie et plane, un faisceau lumineux est réfléchi dans une direction déterminée : la réflexion est dite **spéculaire (régulière)**.

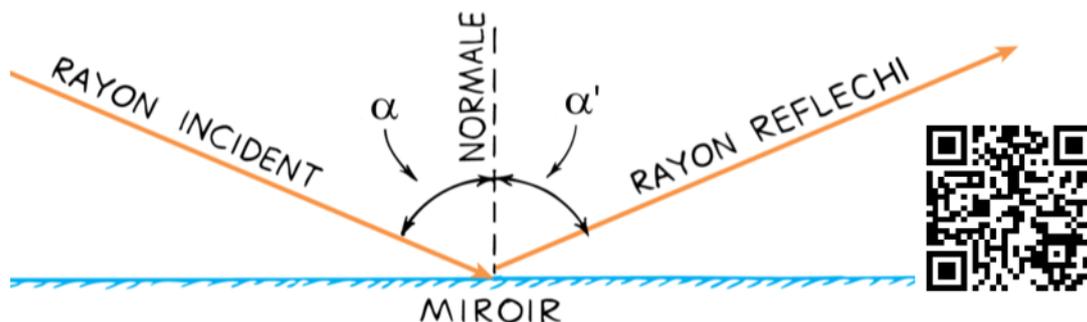


On voit la plupart des objets par réflexion diffuse. Par exemple, le papier de cette page paraît lisse, mais sous le microscope sa surface se révèle être rugueuse. Les rayons de lumière incidents sur le papier rencontrent des millions de minuscules surfaces planes orientées dans toutes les directions.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

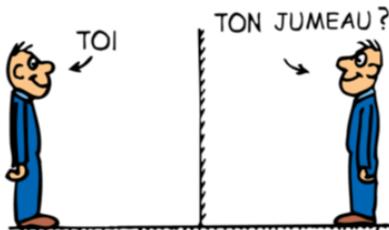
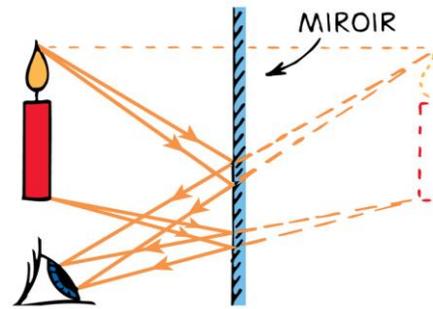


Dans le cas d'un miroir, la réflexion est spéculaire et gouvernée par la loi de la réflexion :

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 est la projection orthogonale de l'objet par rapport au miroir.

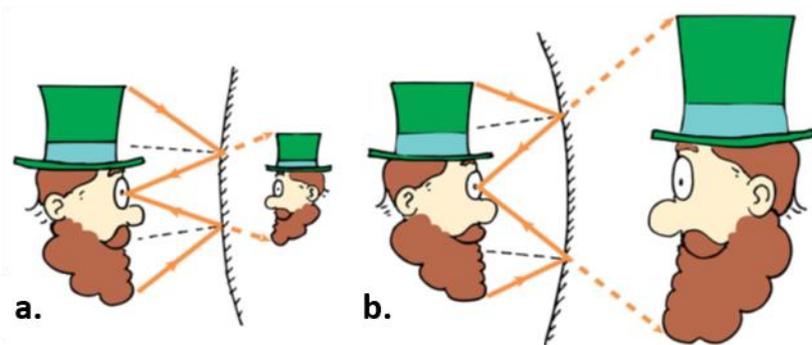


Le cerveau ne fait pas de distinction entre un objet et son image virtuelle. La lumière pénètre dans l'œil de manière identique comme s'il y avait vraiment un objet à l'endroit où on voit l'image.



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.

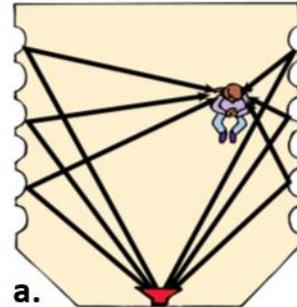
- a. L'image virtuelle formée par un miroir convexe (un miroir qui se courbe vers l'extérieur) est plus petite et plus proche du miroir que l'objet.
- b. L'image virtuelle formée par un miroir concave (un miroir qui se courbe vers l'intérieur) est plus grande et plus éloignée que l'objet.



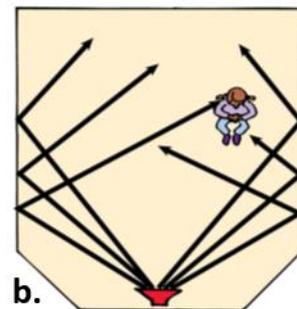
### 6.3 Réflexion du son

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 réfléchi est absorbée ou transmise.

- L'**acoustique** est la science du son. Elle étudie entre autres la réflexion du son par les surfaces. Lorsque les murs d'une salle sont trop réfléchissants, le son devient brouillé à cause des multiples échos, 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. Les murs de telles salles sont souvent conçus avec des rainures.

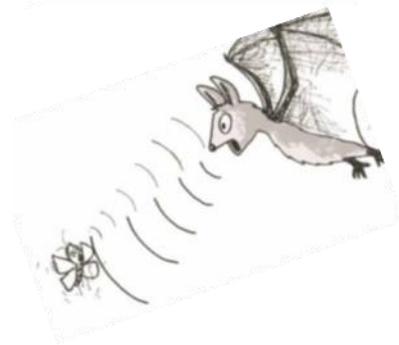


- a. Avec des murs rainurés, le son est réfléchi par un grand nombre de petites sections du mur vers un auditeur donné, ce qui entraîne une sensation agréable.
- b. Avec des murs plats, un son réfléchi intense provient d'une seule partie du mur vers l'auditeur.



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'écholocation, 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 le délai du temps entre l'émission du son et la réception de l'écho, l'émetteur peut localiser l'objet. L'écholocation est utilisée naturellement par des animaux tels que 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 minces contours du corps et 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.

■ **As-tu compris ?**

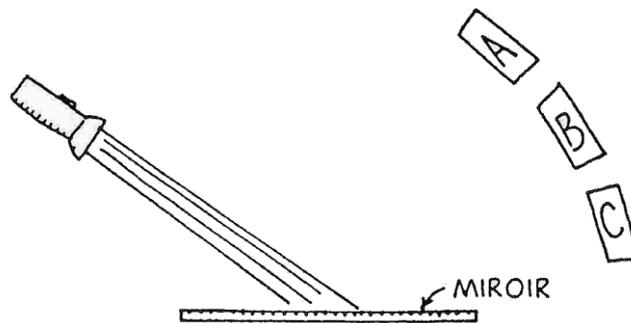
34. Une onde d'eau est réfléchiée par un mur. Quelle propriété de l'onde peut être modifiée par la réflexion ?

- A. la direction de propagation
- B. la fréquence
- C. la célérité
- D. la longueur d'onde

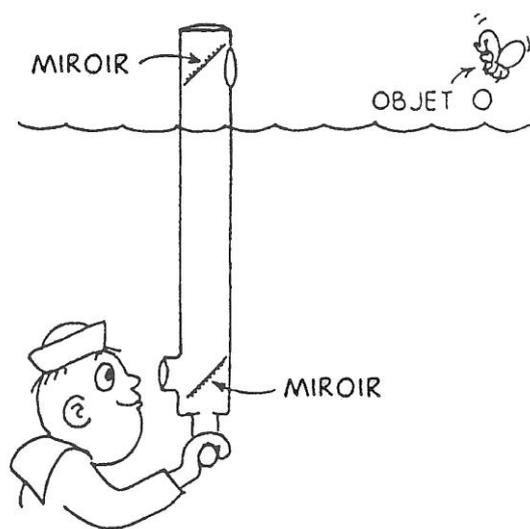
35. Pourquoi la lumière du Soleil apparaît-elle comme une colonne dans l'eau de mer ?  
Comment apparaîtrait la lumière réfléchiée si la surface de l'eau était lisse comme celle d'un lac lors d'une journée sans vent.



36. Déterminer laquelle des trois cartes est éclairée par le faisceau de lumière réfléchi par le miroir.

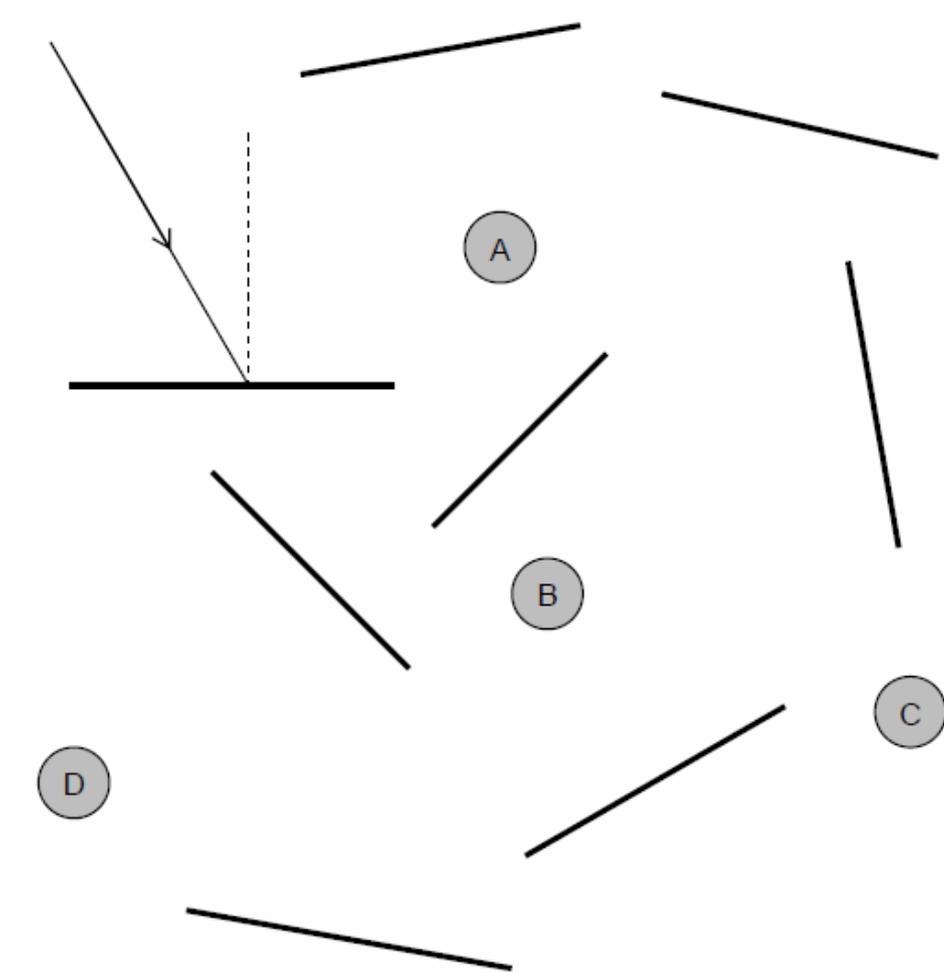


37. Un périscope contient une paire de miroirs. Dessiner le parcours du rayon lumineux depuis la tête de l'objet O jusque dans l'œil de l'observateur.

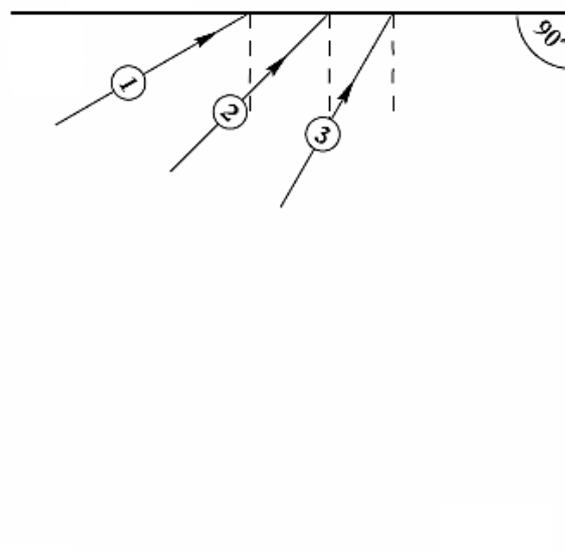


**38. Jeu de miroirs**

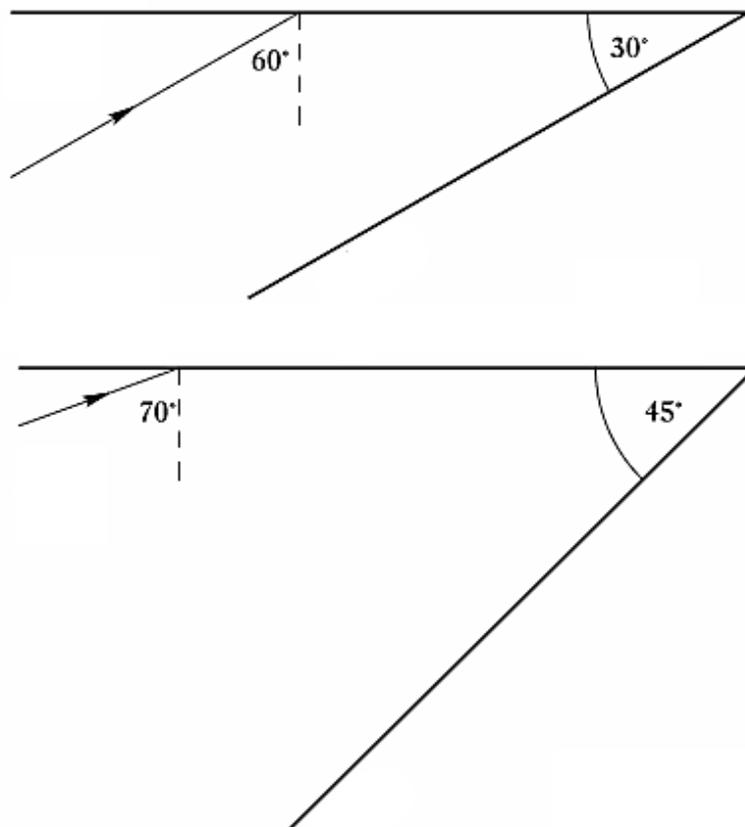
- a. Tracer soigneusement le parcours du rayon de lumière incident. Indiquer à chaque fois les valeurs des angles d'incidence et de réflexion.
- b. Quel point (A, B, C ou D) se trouve dans le chemin du rayon de lumière ?



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

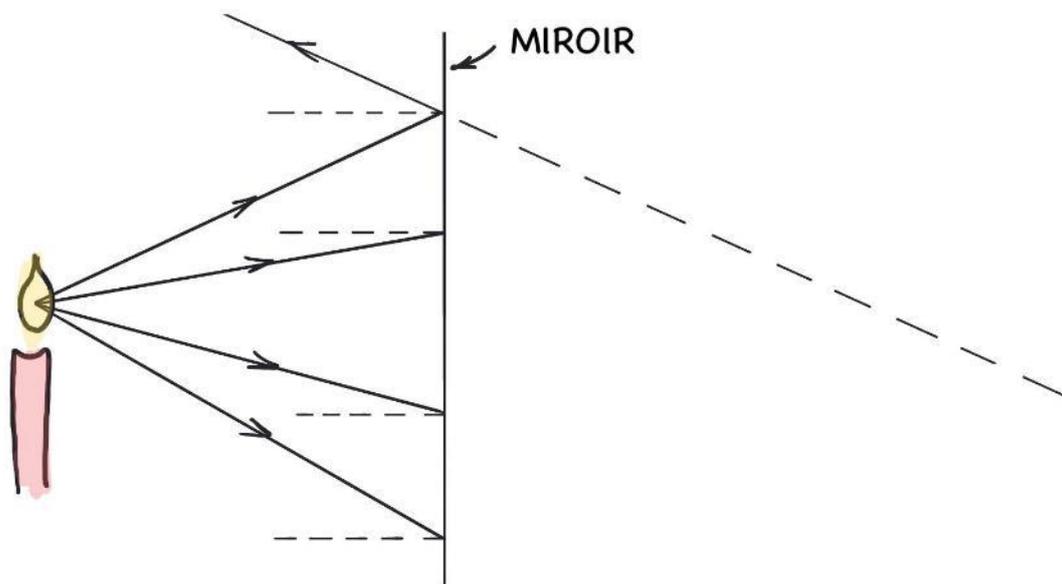


40. Tracer toutes les réflexions du rayon lumineux sur les miroirs plans inclinés.

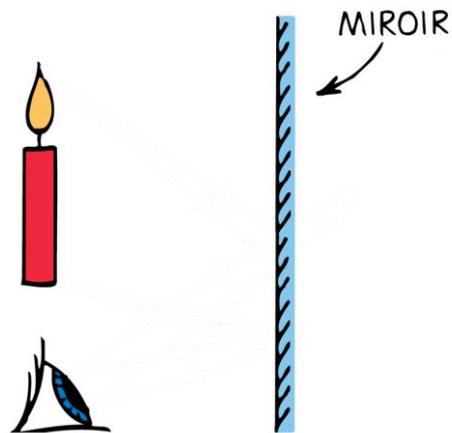


41. La figure indique le prolongement de l'un des rayons de lumière émis par la flamme de la bougie et réfléchi par le miroir.

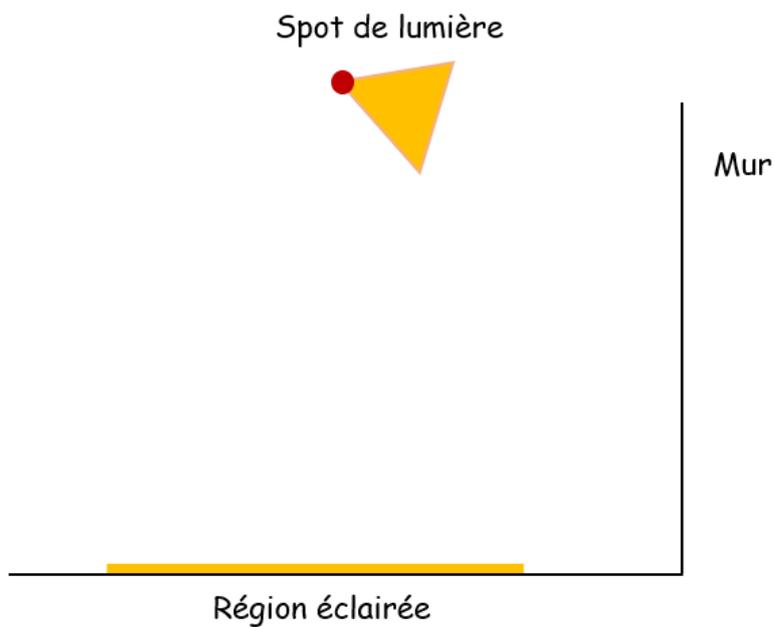
- Compléter la figure en traçant les autres rayons réfléchis, ainsi que leurs prolongements derrière le miroir.
- Localiser l'image de la flamme de la bougie. S'agit-il d'une image réelle ou virtuelle ?



42. Tracer le rayon lumineux issu de la pointe de la flamme qui pénètre dans l'œil après avoir subi une réflexion sur le miroir.

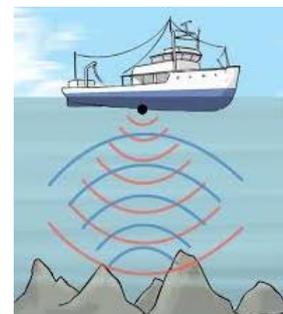


43. Un spot de lumière éclaire un miroir plan accroché au mur. Il en résulte une région éclairée sur le sol. Représenter le miroir plan sur la figure.



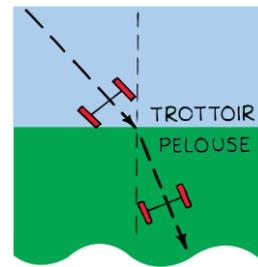
44. Un navire de sondage océanique surveille le fond de l'océan avec un sonar. La célérité de l'ultrason émis vers le fond de l'océan vaut  $1530 \text{ m/s}$  dans l'eau de mer.

- Quelle est la profondeur de l'eau si le délai de l'écho est de  $2 \text{ s}$  ?
- Quelle serait le délai de l'écho si l'eau était deux fois plus profonde ?



## 7 Réfraction d'ondes

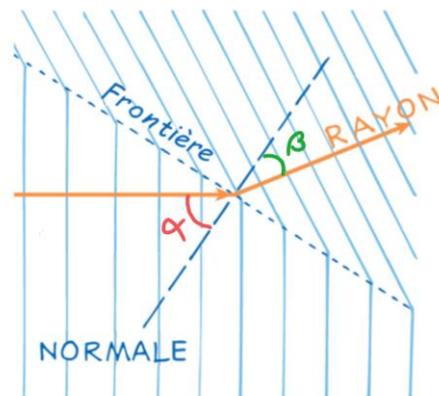
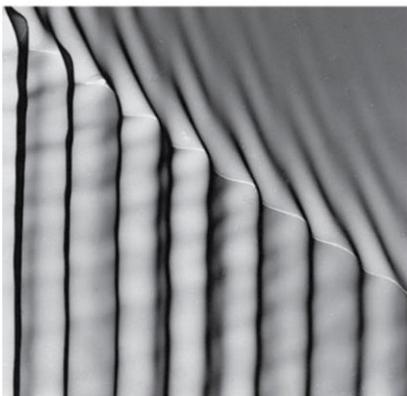
Un axe à deux roues roule sur un trottoir et s'approche d'une pelouse sous un certain angle. Puisque l'axe roule plus lentement sur la pelouse, sa trajectoire rectiligne subit une déviation à la frontière séparant les deux surfaces. En effet, la roue qui atteint en premier la pelouse est freinée. L'axe pivote et la trajectoire est pliée vers la normale. Lorsque les deux roues se trouvent sur la pelouse, l'axe poursuit une trajectoire rectiligne.



### 7.1 Réfraction d'ondes à la surface de l'eau

Des ondes d'eau se propagent plus rapidement dans de l'eau profonde que dans de l'eau peu profonde. À la frontière entre les deux profondeurs, l'onde incidente est partiellement réfléchie vers l'eau profonde et partiellement réfractée vers l'eau moins profonde.

- L'angle  $\alpha$  entre le rayon incident et la normale est l'**angle d'incidence**.
- L'angle  $\beta$  entre le rayon réfracté et la normale est l'**angle de réfraction**.



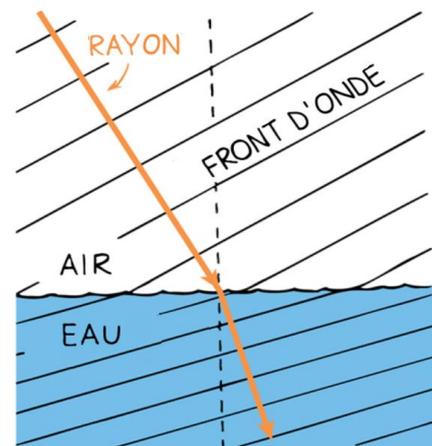
Lorsqu'une onde traverse une séparation entre deux milieux dans lesquels la célérité de l'onde est différente, son rayon (càd. sa direction de propagation) est dévié.

Ce phénomène s'appelle **réfraction** (« Brechung »).

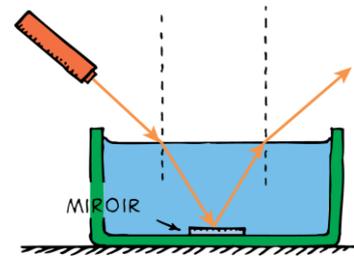
- Si l'onde passe dans un milieu dans lequel sa célérité est plus petite, le rayon se plie vers la normale.
- Si l'onde passe dans un milieu dans lequel sa célérité est plus grande, le rayon s'écarte de la normale.

### 7.2 Réfraction de la lumière

Rappelons que la célérité de la lumière dépend du milieu de propagation. Lorsque la lumière passe de l'air dans l'eau, une partie de l'énergie lumineuse est réfléchiée à la surface de l'eau, le reste est réfracté dans l'eau. Lorsque l'onde de lumière incidente frappe l'eau (voir figure), la partie gauche des fronts d'onde ralentit lors du passage dans l'eau, alors que la partie dans l'air continue à se propager à la célérité  $c = 300000 \text{ km/s}$ . Puisque le rayon reste perpendiculaire aux fronts d'onde, il se plie vers la normale. Inversement, si la lumière passe de l'eau dans l'air, le rayon réfracté s'écarte de la normale.

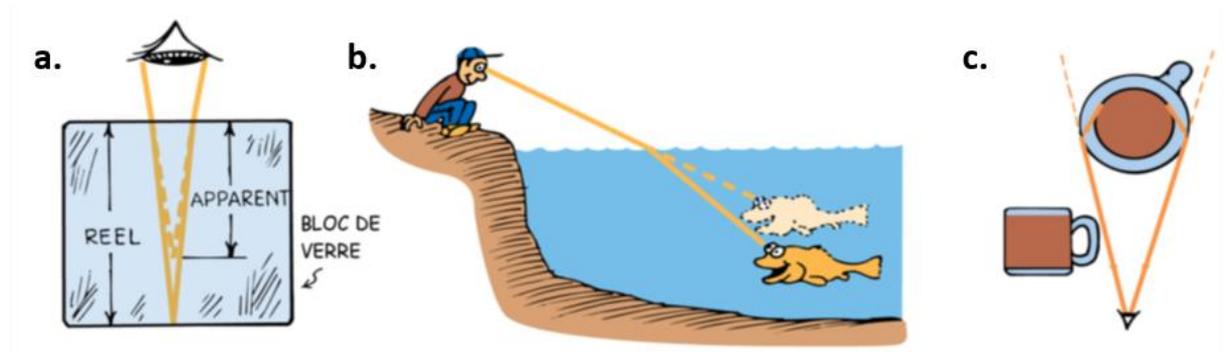


**Exemple :** Le faisceau laser se plie vers la normale lorsqu'il pénètre dans l'eau et s'écarte de la normale lorsqu'il quitte l'eau après la réflexion sur le miroir au fond du récipient.



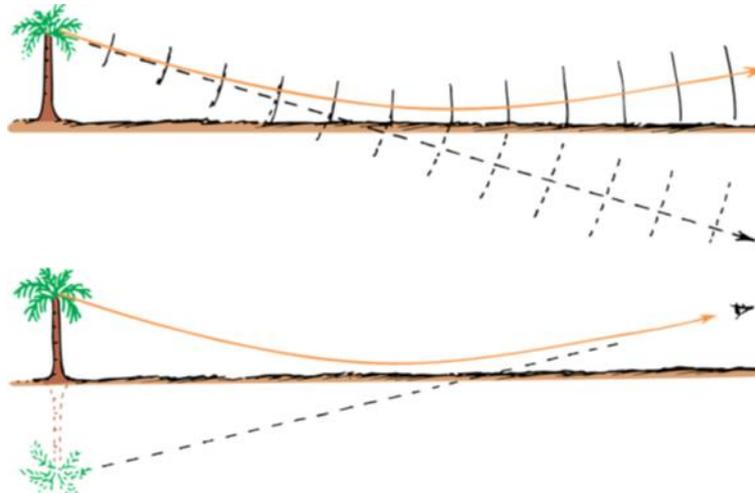
**Applications :**

- 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.
- c. Le verre plein semble contenir plus de liquide qu'il ne le fait réellement.

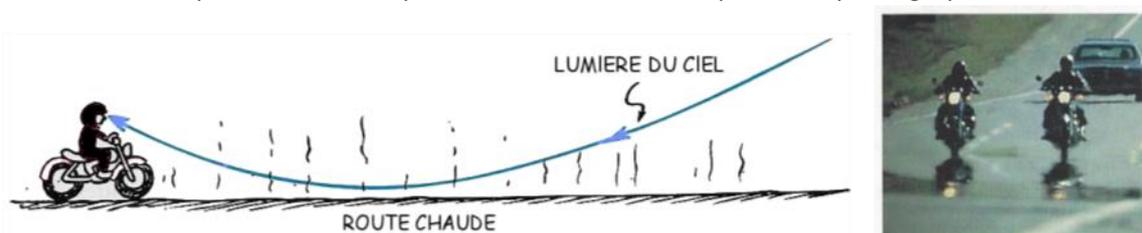


**Phénomènes naturels :**

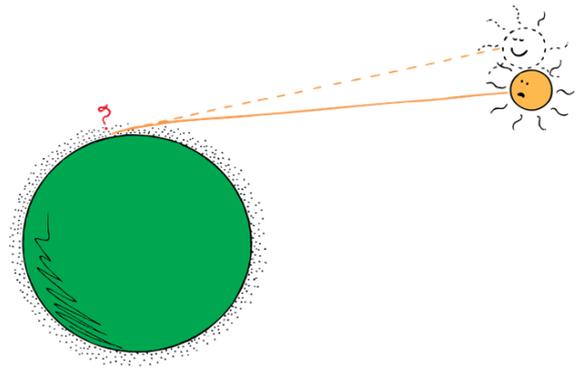
- Un **mirage** est causé par la réfraction de la lumière dans l'air. Lors de journées très chaudes, une couche d'air chaud est en contact avec le sol. Les fronts d'onde de la lumière se déplacent plus rapidement dans l'air chaud près du sol que dans l'air plus froid situé au-dessus. Une réfraction progressive 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 de la lumière réelle 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 plusieurs minutes après qu'il a réellement sombré en-dessous de l'horizon et qu'il fait déjà plus frais. 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. À cause de cette réfraction atmosphérique, nos journées sont environ 5 minutes plus longues. Lorsque le Soleil est proche de l'horizon, les rayons de son bord inférieur sont courbés davantage que ceux du bord supérieur. Ce phénomène réduit le diamètre vertical apparent, donnant au Soleil la forme d'une citrouille.



À cause de cette réfraction atmosphérique, nos journées sont environ 5 minutes plus longues.

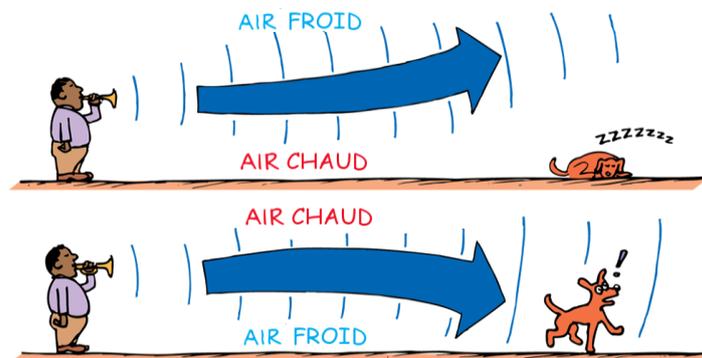
Lorsque le Soleil est proche de l'horizon, les rayons de son bord inférieur sont courbés davantage que ceux du bord supérieur. Ce phénomène réduit le diamètre vertical apparent, donnant au Soleil la forme d'une citrouille.



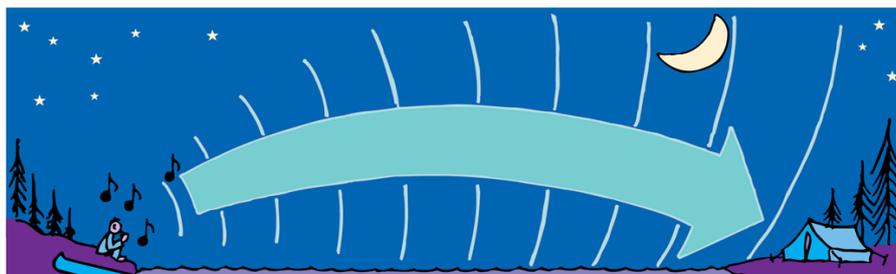
### 7.3 Réfraction du son

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.

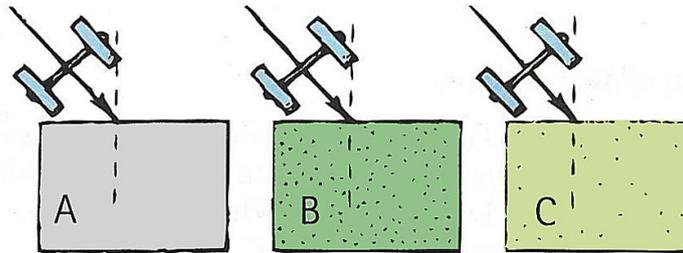


- En revanche, lorsque l'air près du sol est plus froid que l'air se trouvant au-dessus, la célérité du son près du sol est réduite, provoquant une déviation du son vers le bas. Le son peut alors être perçu sur des distances considérablement plus longues. La nuit, lorsque l'air est plus frais à la surface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



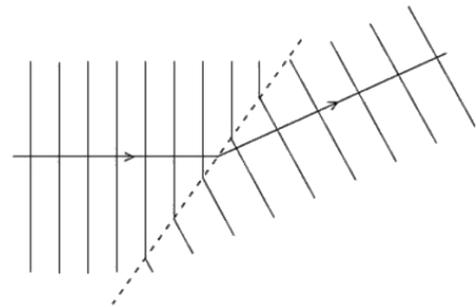
■ **As-tu compris ?**

45. Des haltères passent d'une surface lisse sur trois surfaces qui les freinent : A est du béton ; B est une pelouse et C est du gazon coupé très court (comme un terrain de golf). Ranger par ordre décroissant les surfaces selon la déviation que subissent les haltères à leurs bords.



46. La figure montre le passage d'une onde d'eau par une frontière séparant deux régions de profondeurs différentes.

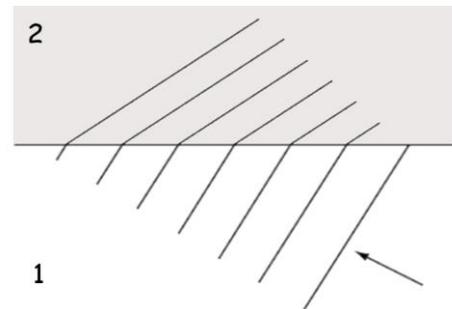
- a. Qu'est-ce qui provoque la réfraction de l'onde ?
- A. Un changement de fréquence de l'onde.
  - B. Un changement de la longueur d'onde.
  - C. Un changement de la célérité de l'onde.



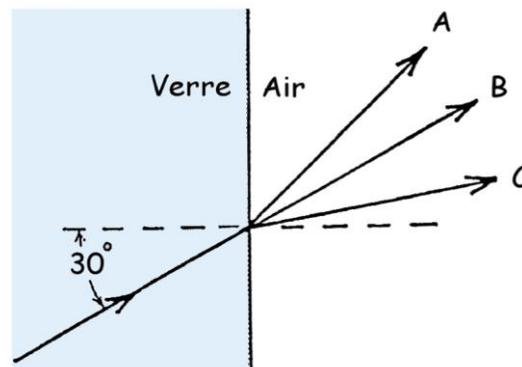
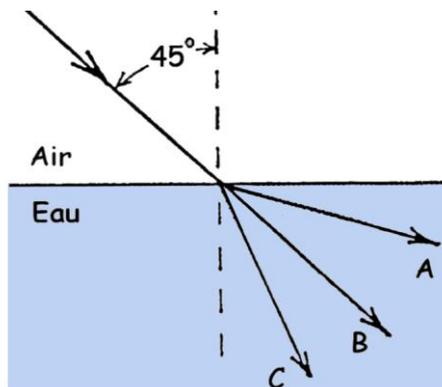
- b. Dans quelle région l'eau est-elle plus profonde, sachant que la célérité des ondes d'eau est plus grande dans l'eau profonde ? Justifier.

47. 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 ? Justifier.

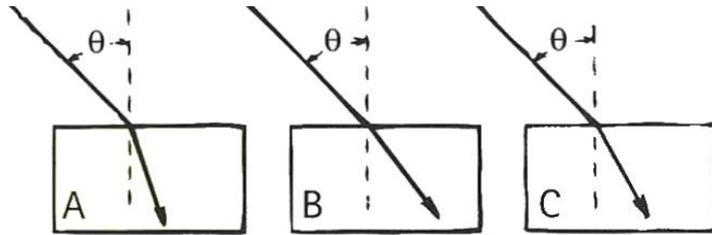
- A. Le milieu 1
- B. Le milieu 2
- C. La célérité est identique.



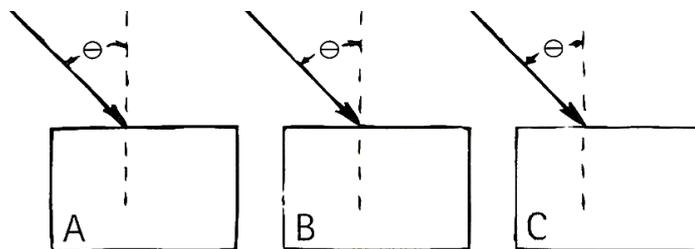
48. Lequel des rayons A, B ou C représente le rayon réfracté ?



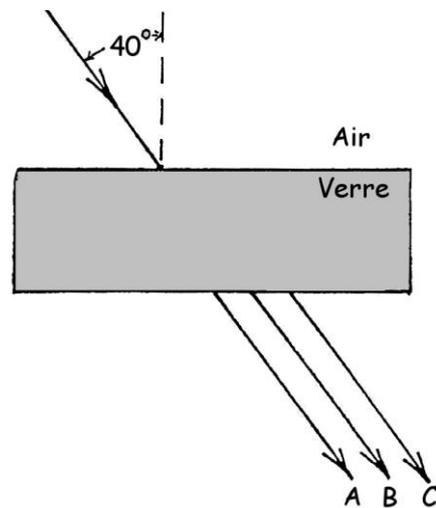
49. Des rayons de lumière passent de l'air dans trois milieux transparents différents sous un même angle d'incidence. Ranger par ordre décroissant les célérités de la lumière dans les trois milieux.



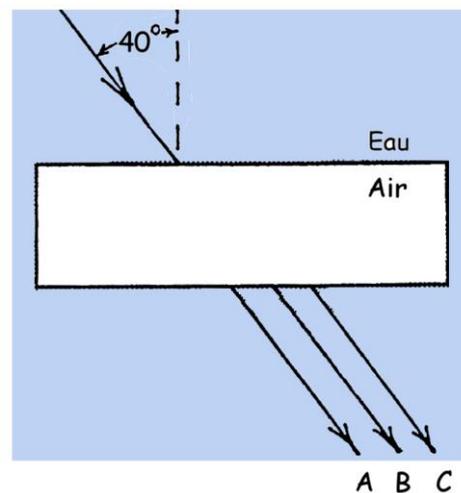
50. Des rayons lumineux identiques sont réfractés en passant de l'air dans trois milieux transparents : A est de l'eau, B est du verre et C est un diamant. Ranger par ordre décroissant les valeurs des angles de réfraction dans les milieux A, B et C.



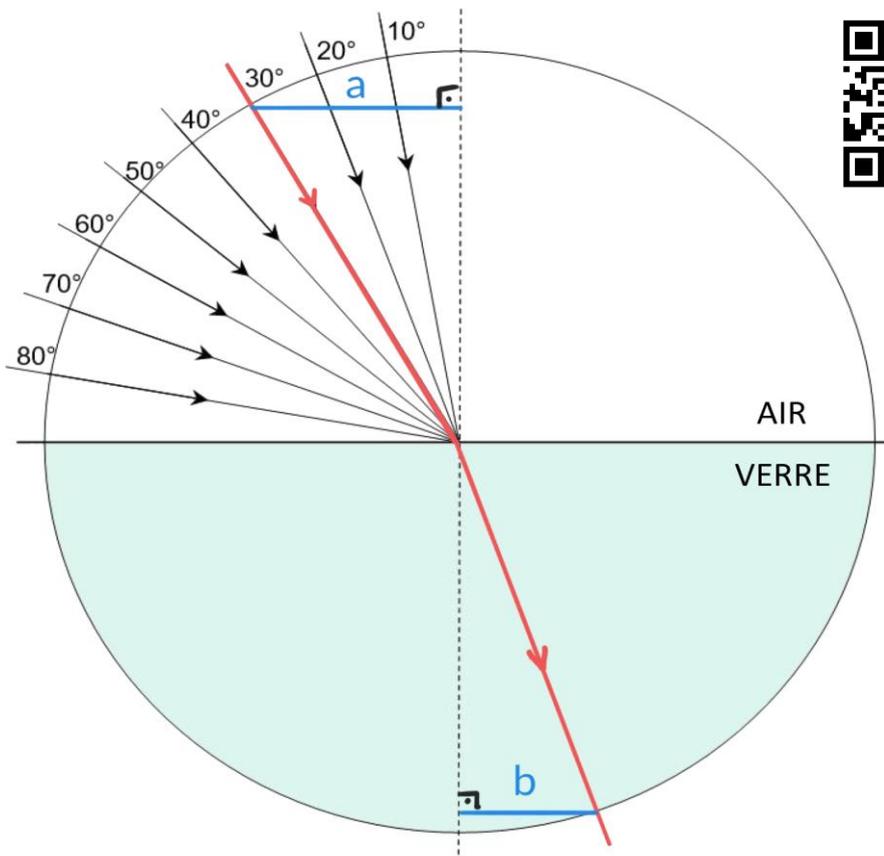
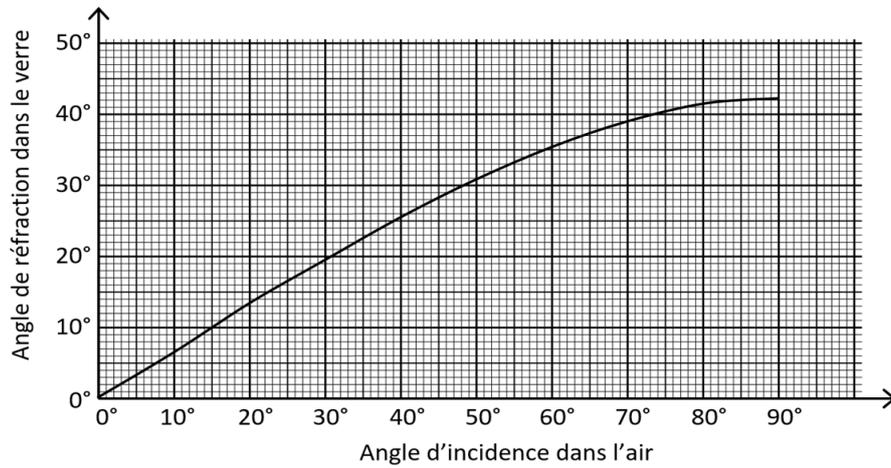
51. Un rayon lumineux passe de l'air dans un bloc de verre. Lequel des rayons A, B ou C est celui qui ressort dans l'air ? Dessiner le parcours du rayon lumineux dans le bloc de verre.



52. Un rayon lumineux 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 ? Dessiner le parcours du rayon lumineux dans le bloc d'air.



53. Angle de réfraction en fonction de l'angle d'incidence pour le passage de l'air dans le verre :



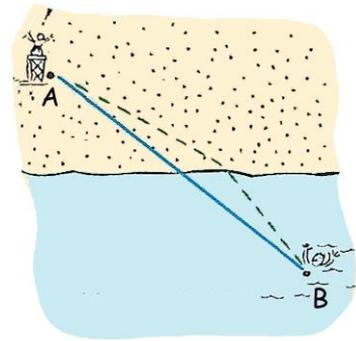
a. Dessiner le parcours des rayons de lumière représentés à travers le verre.

b. Remplir le tableau suivant :

Angle d'incidence	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
Angle de réfraction								
Distance a								
Distance b								
Rapport a/b								

c. Donner une conclusion.

54. *Facultatif* : Un maître-nageur aperçoit un baigneur en difficulté et veut le sauver aussi rapidement que possible. Sa vitesse de course dans le sable de la plage vaut 3 m/s et sa vitesse de nage vaut 2 m/s.



- L'un des chemins possibles est illustré sur le schéma de la feuille suivante. Calculer le temps mis par le maître-nageur pour atteindre le baigneur lorsqu'il choisit ce chemin.
- Dans le fichier Excel [Exercice du maître-nageur](#), déterminer le temps nécessaire pour d'autres chemins que l'on indique en pointillés sur le schéma.
- Le chemin le plus court - le chemin rectiligne [AB] - est-il le chemin le plus rapide ? Donner une explication.
- Représenter en rouge le chemin qui correspond (approximativement) au temps minimal.
- Vérifier si le chemin rouge est encore celui du moindre temps si la vitesse de course vaut 4,5 m/s et la vitesse de nage vaut 3 m/s ?

Et si la vitesse de course vaut 4 m/s et la vitesse de nage vaut 2 m/s ?

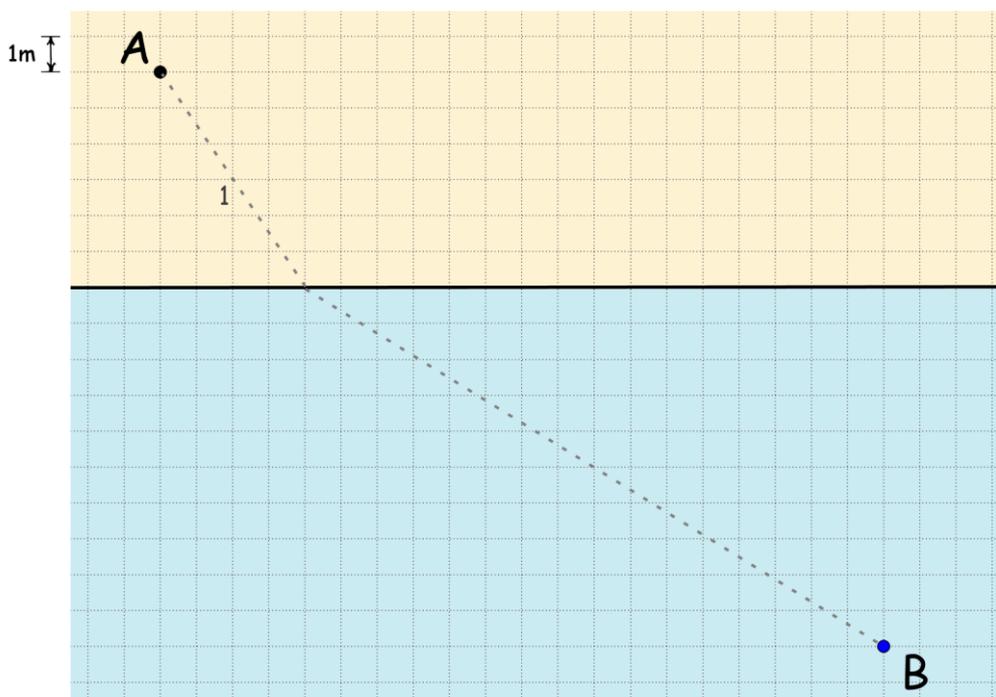
Quelle pourrait être la condition pour que le chemin rouge soit le chemin le plus rapide ?

Vérifier l'hypothèse !

- Le rapport des célérités de la lumière dans l'air et dans le verre vaut 1,5.

Poser un demi-disque en verre sur le schéma de la feuille suivante de sorte que la face plane (séparant l'air et le verre coïncide avec le bord de la mer. Cette fois, un rayon lumineux va se déplacer de A vers B en passant de l'air dans le verre. Orienter un laser de manière que son rayon lumineux passe par les points A et B. On peut observer que la lumière suit le chemin \_\_\_\_\_ ! Il s'agit du *principe de Fermat*, nommé d'après le célèbre mathématicien français du 17ème siècle :

La lumière prend toujours le chemin le plus \_\_\_\_\_.

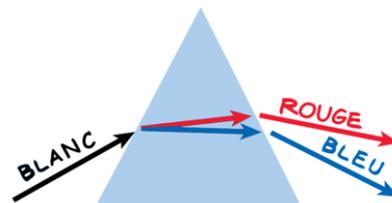


## 8 Dispersion

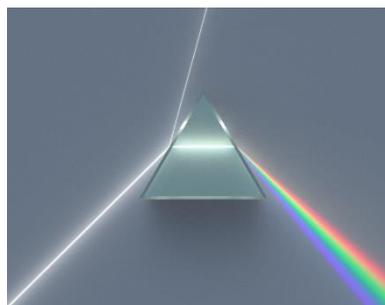
Dans un milieu transparent, la célérité de la lumière est inférieure à celle dans le vide. De combien dépend de la nature du milieu et de la fréquence de la lumière. Dans le verre ordinaire, la lumière violette se déplace environ 1% plus lentement que la lumière rouge. Par conséquent, différentes couleurs 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**, la séparation des différentes couleurs de lumière est perceptible. On peut observer une bande colorée appelée **spectre de la lumière blanche**.<sup>5</sup> Les couleurs de ce spectre sont les **couleurs spectrales**. À chaque couleur correspond une fréquence et une longueur d'onde spécifique.



Ce n'est pas le prisme qui colore la lumière, mais la lumière colorée est déjà présente dans la lumière blanche, qui est un mélange des lumières colorées. À la traversée du prisme, la lumière violette subit la plus grande déviation, la lumière rouge la plus petite. La superposition de toutes les couleurs du spectre redonne de la lumière blanche.



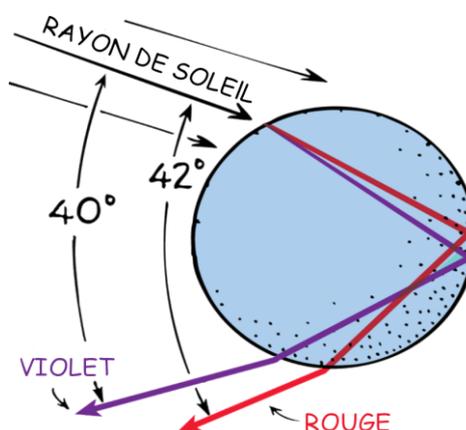
La décomposition d'une onde en un spectre de fréquences est appelée **dispersion**.

### 8.2 Arc-en-ciel (facultatif)

La manifestation la plus spectaculaire de la dispersion est l'**arc-en-ciel**. Pour pouvoir voir un arc-en-ciel, le Soleil doit briller dans une partie du ciel et des gouttes d'eau (nuage, pluie, jet d'eau d'un tuyau d'arrosage) doivent se trouver du côté opposé. Le Soleil dans le dos, on peut contempler le spectre de couleurs de l'arc-en-ciel.

En effet, les rayons du Soleil sont **réfractés** lors de l'entrée dans une goutte d'eau et se dispersent ainsi dans les différentes couleurs spectrales.

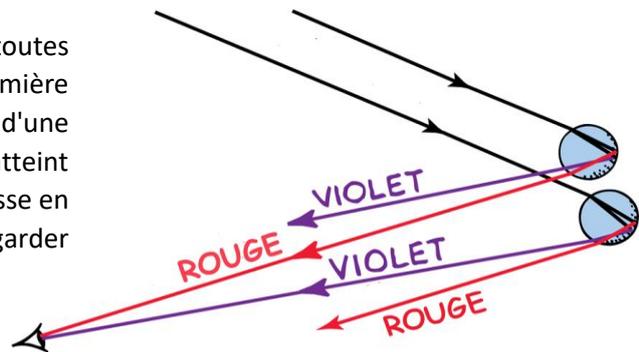
Une partie des rayons est **réfléchi**e à l'arrière de la goutte (le reste étant réfracté dans l'air), puis, lors de leur sortie à l'avant de la goutte, une deuxième réfraction accentue le phénomène de **dispersion**.



<sup>5</sup> Isaac Newton, physicien anglais du 17<sup>e</sup> 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. Son explication a fait ses preuves jusqu'à nos jours.

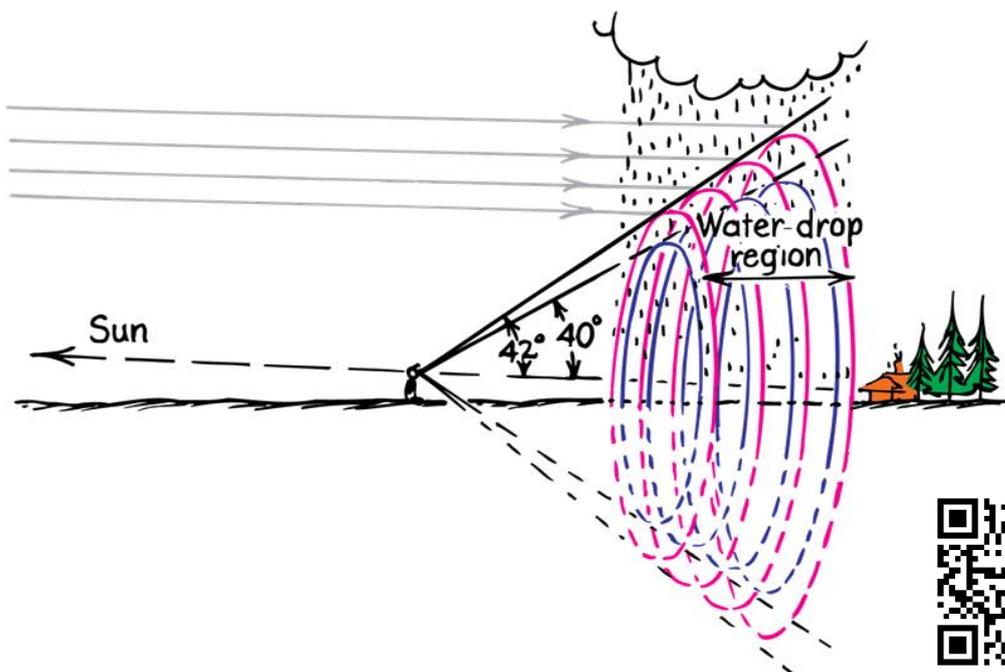
L'angle maximal entre les rayons incidents et émergents vaut  $42^\circ$  pour la lumière rouge et  $40^\circ$  pour la lumière violette. Il y a une forte concentration d'intensité lumineuse proche de l'angle de déviation maximal.

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.

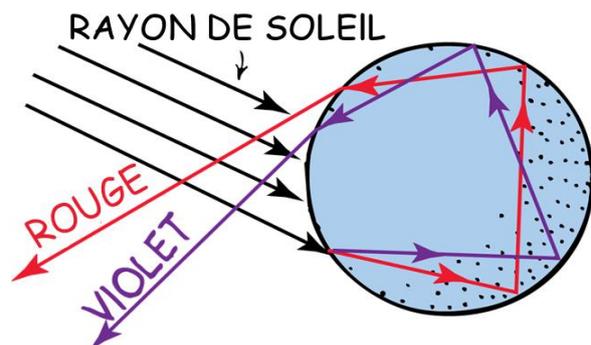


#### Conséquences :

- Les rayons de lumière colorée qui émergent de la goutte sont visibles pour un observateur s'ils forment avec la direction du soleil un angle de  $40^\circ$  à  $42^\circ$ . Toutes les gouttes que nous pouvons voir sous cet angle se trouvent sur un arc de cercle. C'est l'**arc-en-ciel primaire**.
- L'intérieur de l'arc-en-ciel forme un disque de lumière blanche, car un mélange de toutes les couleurs atteint l'œil sous des angles inférieurs à  $40^\circ$ .
- 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  $42^\circ$ .

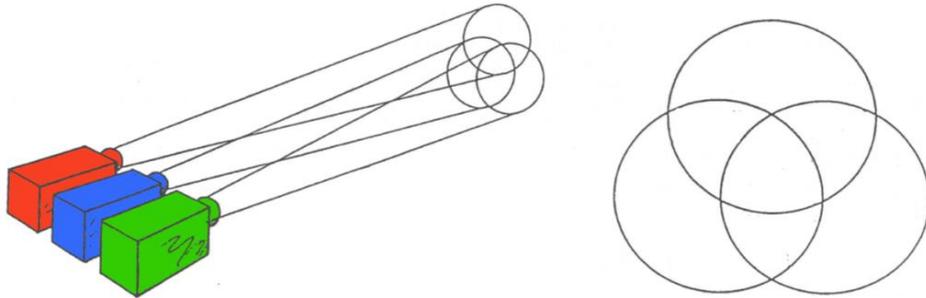


Parfois, un **arc-en-ciel secondaire**, avec des couleurs inversées, est visible autour de l'arc primaire. L'arc secondaire résulte d'une double réflexion à l'intérieur des gouttes d'eau. Les couleurs de l'arc secondaire sont beaucoup moins intenses.

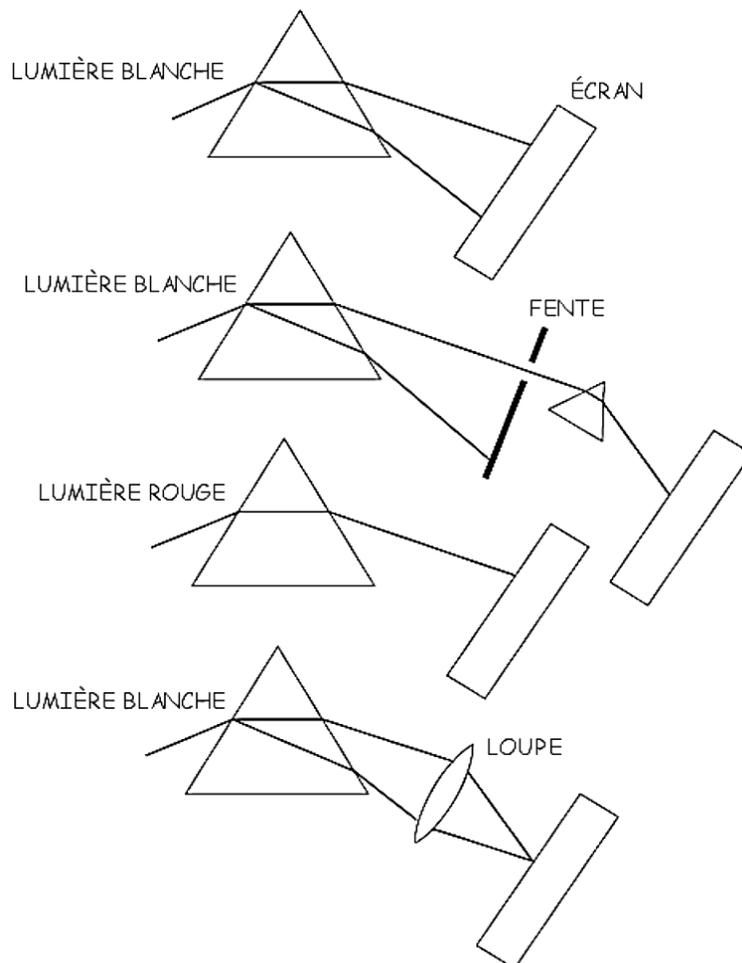


■ As-tu compris ?

55. Colorier les portions de disques avec les couleurs observées.



56. Dessiner avec des couleurs le spectre de lumière observé sur l'écran.



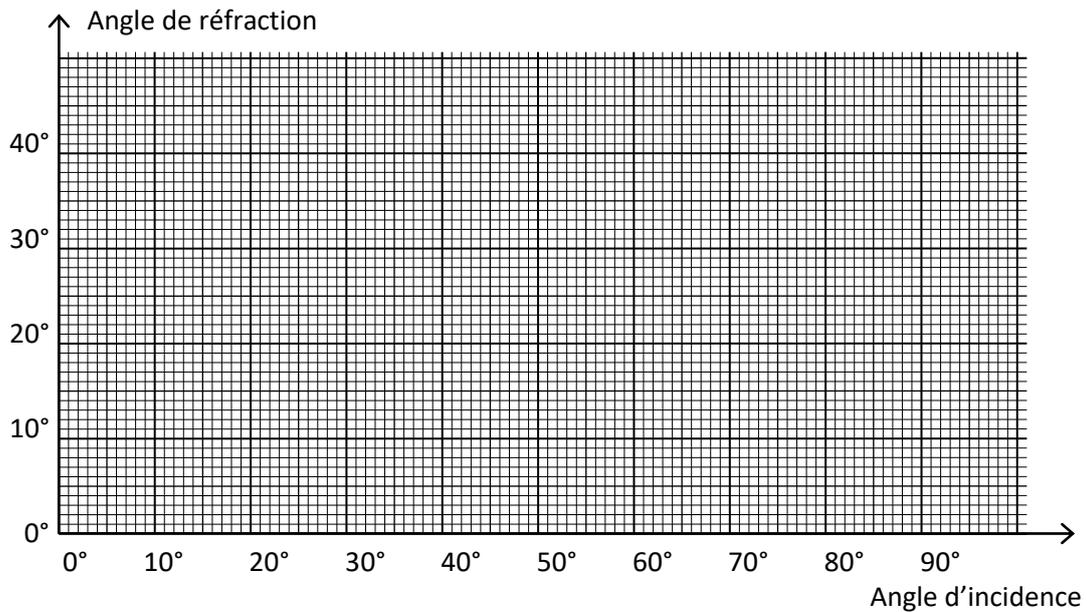
57. La lumière qui forme les couleurs de l'arc-en-ciel en passant par une goutte d'eau y subit

- A. une réflexion
- B. une dispersion
- C. une réfraction
- D. chacun de ces phénomènes

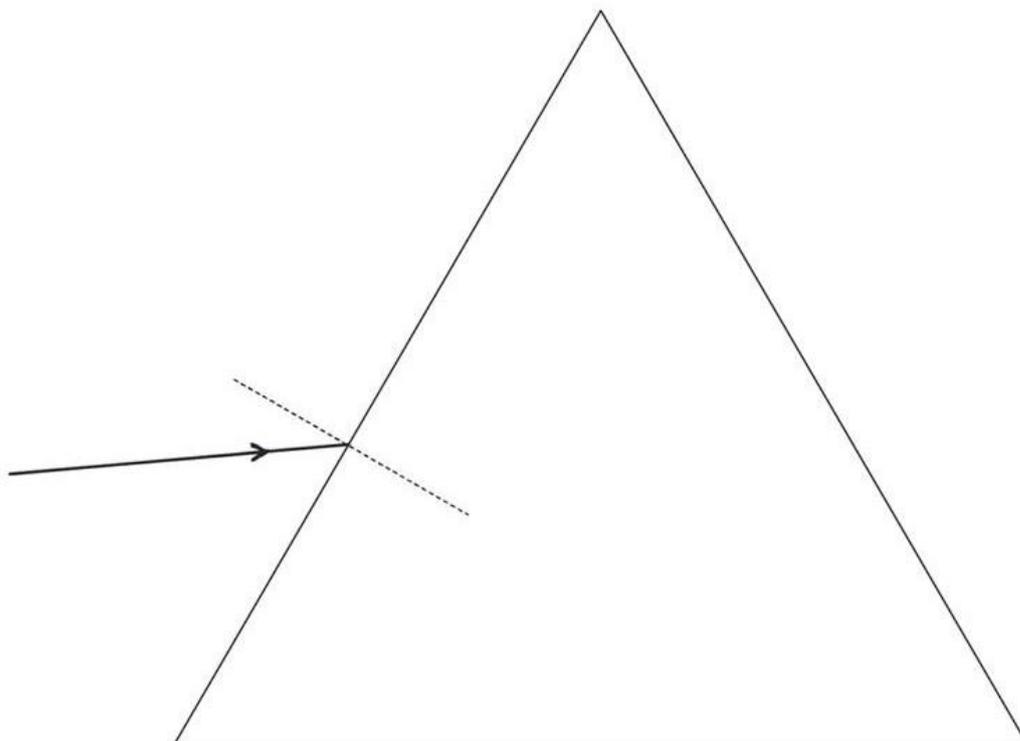
58. Angles de réfraction pour la lumière rouge et violette lors du passage de l'air dans le plexiglas :

Angle d'incidence	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	89°
Angle de réfraction	0°	7,0°	13,8°	20,4°	26,6°	32,3°	37,2°	41,0°	43,4°	44,2°
Angle de réfraction	0°	6,4°	12,6°	18,7°	24,3°	29,3°	33,6°	36,9°	39,0°	39,8°

- a. Représenter l'angle de réfraction en fonction de l'angle d'incidence pour la lumière rouge et la lumière violette dans le diagramme.



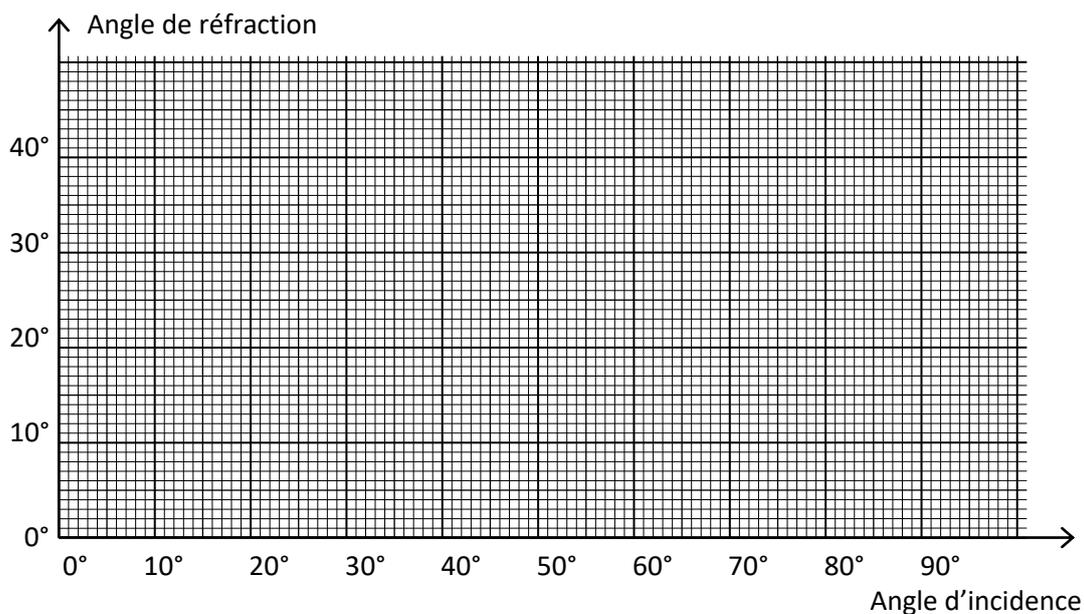
- b. Tracer le parcours des rayons de lumière rouge et violette à travers le prisme.



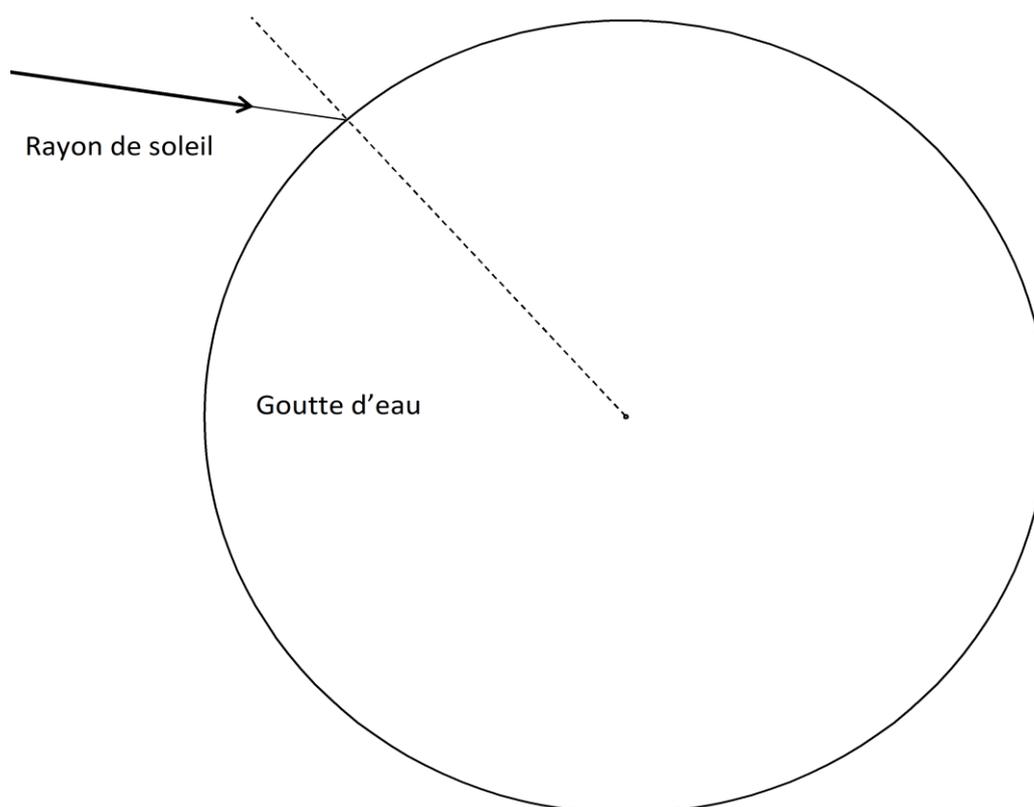
59. Angles de réfraction pour la lumière rouge et violette lors du passage de l'air dans l'eau :

Angle d'incidence	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	89°
Angle de réfraction	0°	7,7°	15,3°	22,7°	29,8°	36,3°	42,0°	46,6°	49,6°	50,6°
Angle de réfraction	0°	7,2°	14,4°	21,3°	27,8°	33,8°	39,0°	43,1°	45,7°	46,6°

- a. Représenter l'angle de réfraction en fonction de l'angle d'incidence pour la lumière rouge et la lumière violette dans le diagramme.



- b. Tracer le parcours des rayons de lumière rouge et violette à travers la goutte d'eau



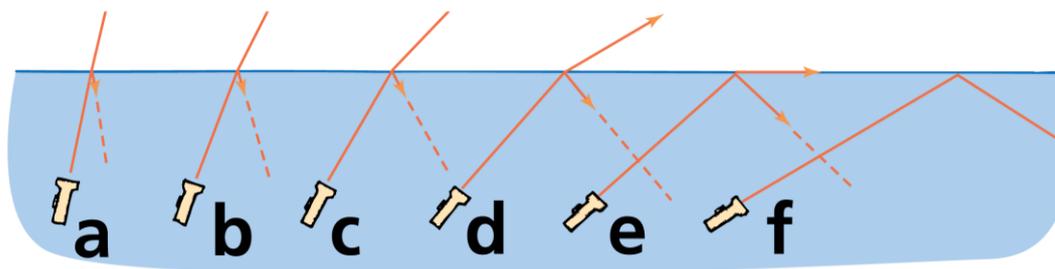
## 9 Réflexion totale

Une lampe étanche plongée 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.

### 9.1 Angle critique

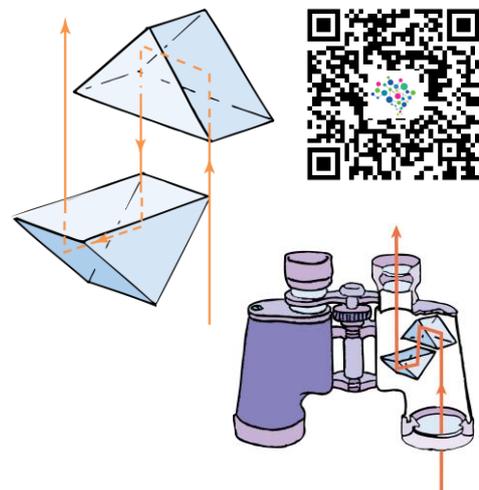
À partir d'un certain angle critique, le faisceau de lumière n'émerge plus du tout dans l'air. Au-delà de cet angle critique (qui vaut ici environ  $48^\circ$ ), le faisceau ne peut plus pénétrer dans l'air. Le faisceau subit une réflexion totale interne dans l'eau.

L'**angle critique de réflexion totale** est l'angle d'incidence pour lequel la lumière est réfractée à un angle de  $90^\circ$  par rapport à la normale.



- a - d** La lumière émise dans l'eau à des angles inférieurs à l'angle critique est partiellement réfractée et partiellement réfléchi à la surface.
- e** À l'angle critique, le faisceau émergent est parallèle à la surface.
- f** Au-delà de l'angle critique se produit une réflexion totale interne.

L'angle critique de réflexion totale pour le verre est d'environ  $43^\circ$ . Cela signifie qu'à l'intérieur du verre, les rayons de lumière qui tombent sous un angle d'incidence supérieur à  $43^\circ$  sur une surface 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  $45^\circ$  ( $>$  l'angle critique de  $43^\circ$ ) sur les faces latérales des prismes et y subit des réflexions totales.

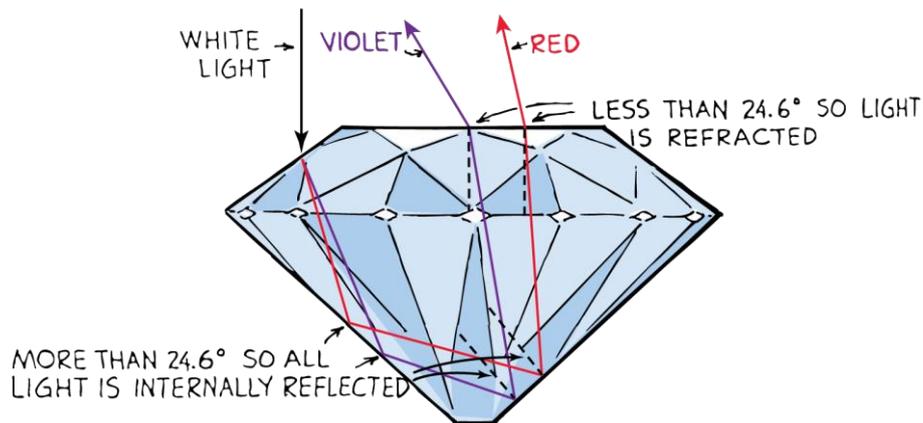


### 9.2 Réflexion totale dans le diamant

L'angle critique pour un diamant ne vaut que  $24,6^\circ$ . Tous les rayons lumineux qui tombent sous un angle d'incidence supérieur à  $24,6^\circ$  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.

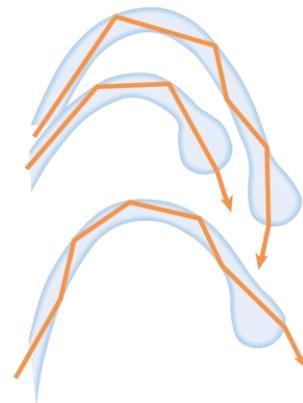
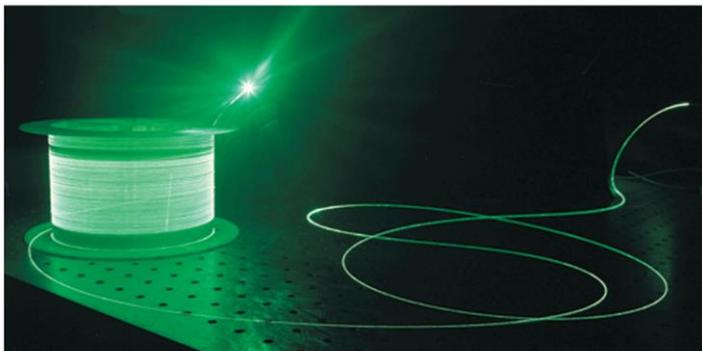
La brillance des diamants est due au phénomène de réflexion totale interne. En effet, dans un diamant taillé, la lumière qui pénètre sur une facette subit en général plusieurs réflexions totales à l'intérieur du diamant, sans perte d'intensité. Elle sort ensuite d'une autre facette dans une autre direction.

Un petit angle critique associé à une réfraction prononcée produit une grande dispersion et un large spectre de couleurs brillantes, typiques du diamant.



### 9.3 Fibres optiques

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 ligne droite.



#### Applications :

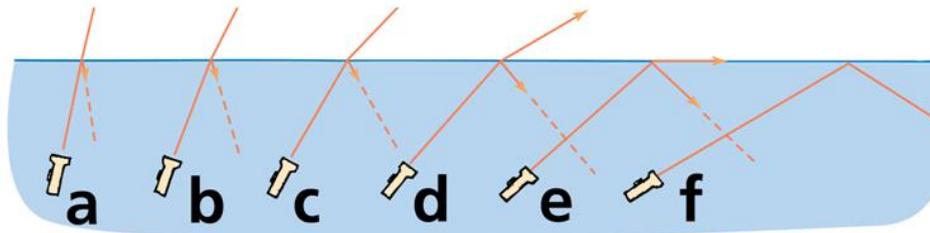
- Les fibres optiques sont utiles pour **éclairer des endroits inaccessibles**. Ainsi, les mécaniciens les utilisent pour regarder l'intérieur des moteurs et les médecins les utilisent dans l'*endoscope*, un appareil d'observation qui permet d'examiner les organes internes. Les fibres optiques peuvent 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 offrent une alternative pratique aux câbles en cuivre, plus épais 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 ?

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

- A. réfracté à un angle de  $90^\circ$  par rapport à la normale.
- B. réfléchi à un angle de  $90^\circ$  par rapport à la normale.
- C. totalement absorbé.

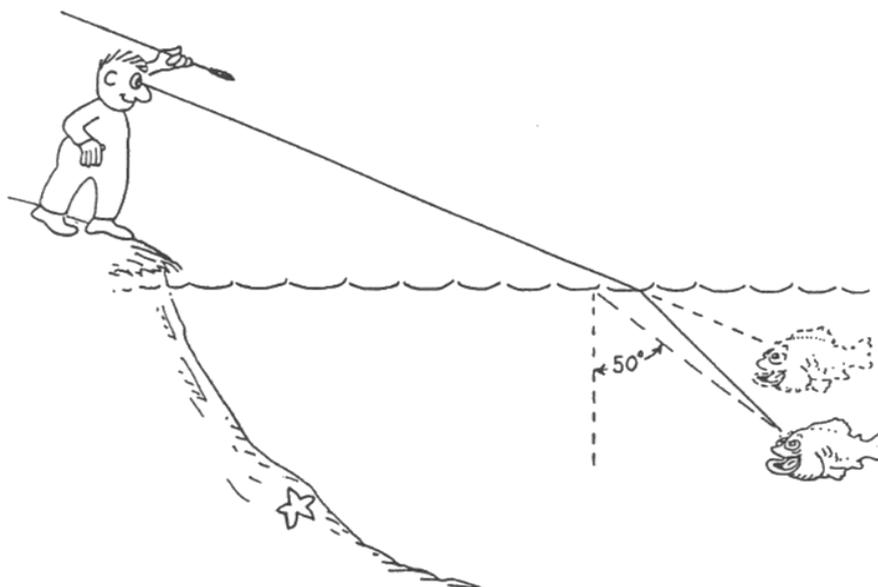
61. Indiquer sur la figure l'angle critique de réflexion totale interne dans l'eau.



62. La figure illustre pourquoi l'homme 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  $50^\circ$  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 les alentours à l'extérieur sous un angle de  $180^\circ$  (horizon à horizon). Lorsque le poisson se trouve sous l'eau, sa vision du monde extérieur est très différente. À cause de l'angle critique de réflexion totale pour le passage eau - air ( $48^\circ$ ), le poisson voit les alentours comprimés dans un angle de \_\_\_\_\_.

À vérifier la prochaine fois que tu te trouves dans une piscine 😊

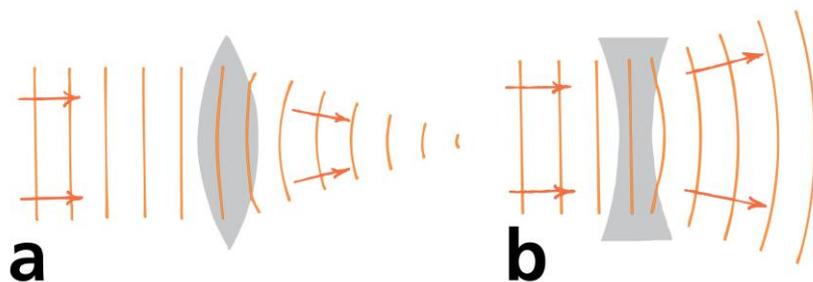


## 10 Lentilles

### 10.1 Types de lentilles

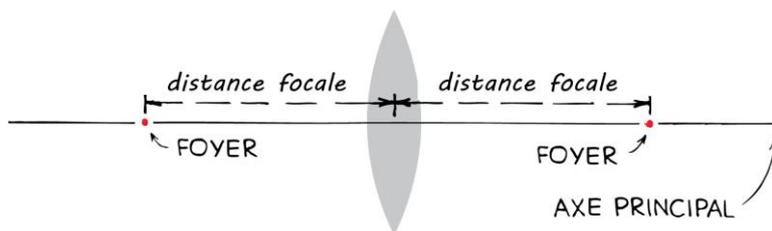
Une lentille est une pièce optique qui focalise ou disperse un faisceau lumineux par réfraction.

- Une **lentille convergente** est plus épaisse au milieu. Les fronts d'onde sont plus retardés par le centre de la lentille. Des rayons incidents parallèles convergent en un point derrière la lentille.
- Une **lentille divergente** est plus mince au milieu. Les fronts d'onde sont plus retardés sur les bords de la lentille. Des rayons incidents parallèles divergent de sorte que les rayons émergents semblent provenir d'un point situé devant la lentille.



Pour les deux types de lentilles, la déviation maximale des rayons a lieu aux bords de la lentille. En revanche, aucune déviation n'a lieu au centre de la lentille.

### 10.2 Caractéristiques d'une lentille

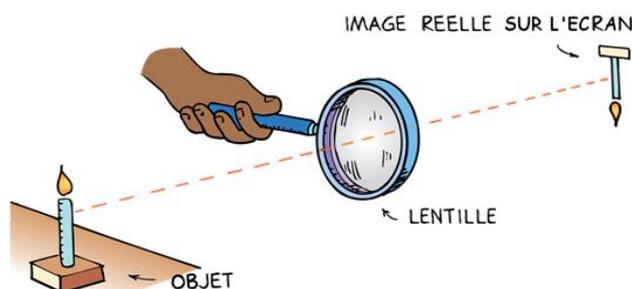


Le **foyer** d'une lentille est le point auquel un faisceau de lumière incident, parallèle à l'axe principal, converge. Comme chaque lentille a deux faces, chaque lentille a deux foyers.

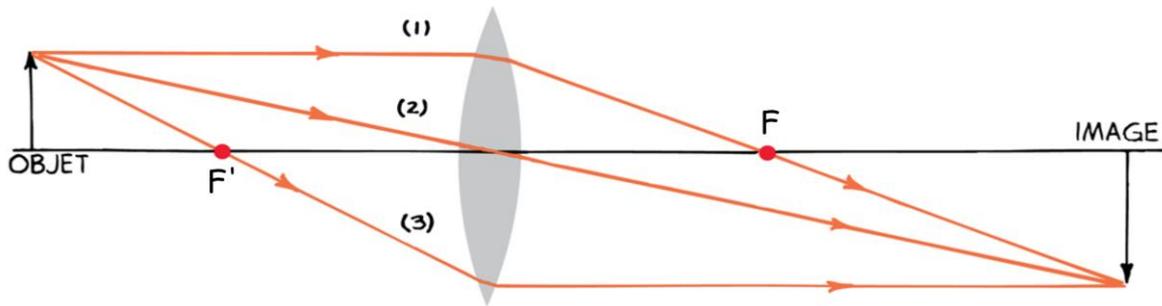
La **distance focale f** d'une lentille, qu'elle soit convergente ou divergente, est la distance entre le centre de la lentille et l'un ou l'autre des foyers.

### 10.3 Formation d'images par les lentilles convergentes

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, 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.



Pour la construction d'un diagramme de rayons, on trace les trois **rayons principaux** :

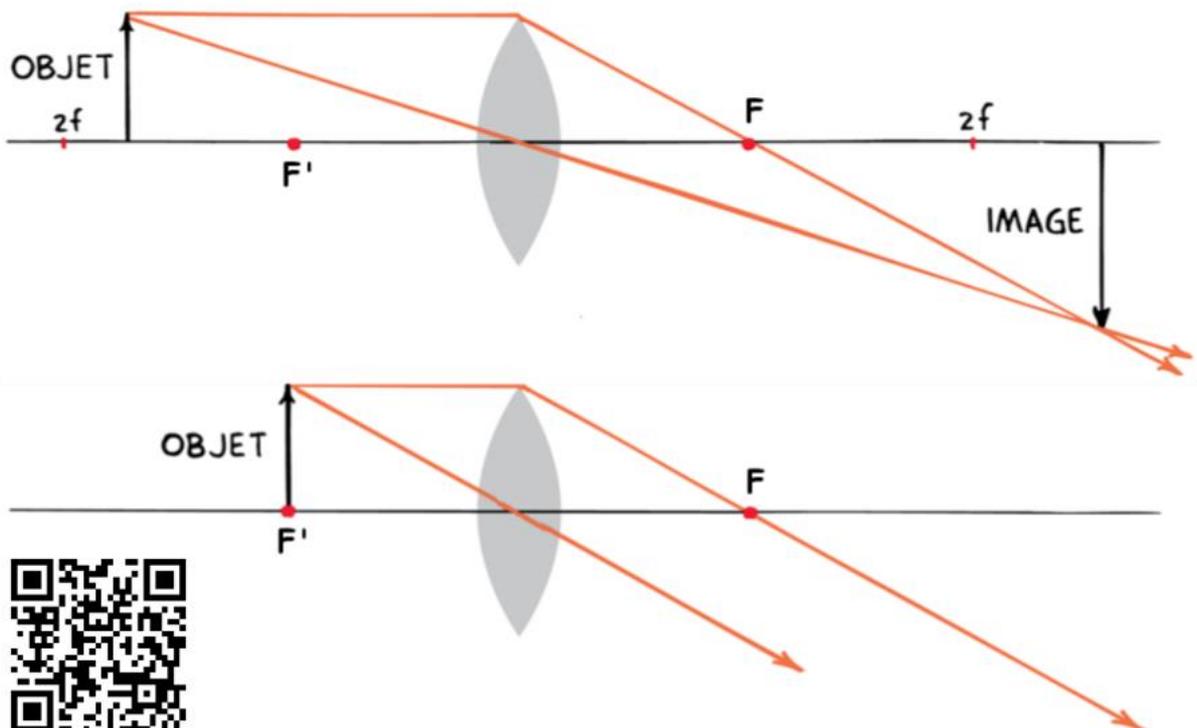
- (1) Un rayon parallèle à l'axe principal est réfracté par la lentille et passe par le foyer F.
- (2) Un rayon qui passe par le centre de la lentille la traverse sans déviation.
- (3) Un rayon qui passe par le foyer  $F'$  émerge de la lentille parallèlement à l'axe principal.

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

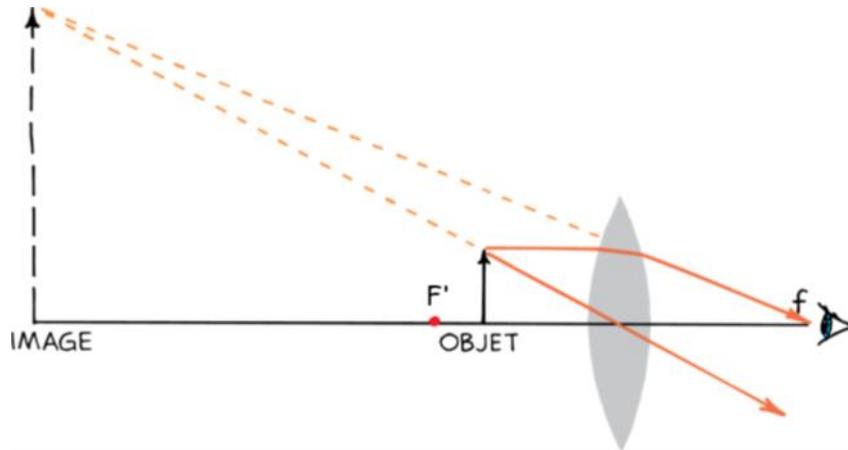
Lorsqu'un objet, initialement situé très loin d'une lentille convergente (on dit : objet à l'infini), est rapproché du foyer  $F'$  le long de l'axe principal, la taille et l'emplacement de l'image changent :

- Si l'objet est très éloigné de la lentille (on dit : objet à l'infini), l'image se forme au foyer F.
- Si l'objet est loin, l'image est proche du foyer F (mais légèrement au-delà).
- Si l'objet est proche du foyer  $F'$ , l'image est loin de la lentille.
- Si l'objet est au foyer, l'image se forme à l'infini.

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



Une **loupe** est une lentille convergente qui permet d'observer une image plus grande d'un objet et donc de distinguer plus de détails. En tenant la loupe proche de l'objet, on peut voir une image agrandie de l'objet.



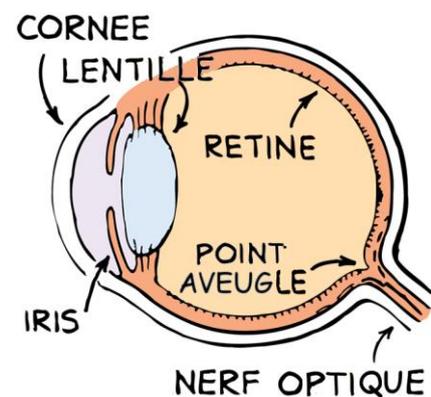
**Explication :**

Si la distance entre la lentille et l'objet est inférieure à la distance focale, les rayons divergent lorsqu'ils émergent de la lentille. Ces rayons de lumière semblent provenir d'un point situé devant la lentille (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. L'image est donc une **image virtuelle**.

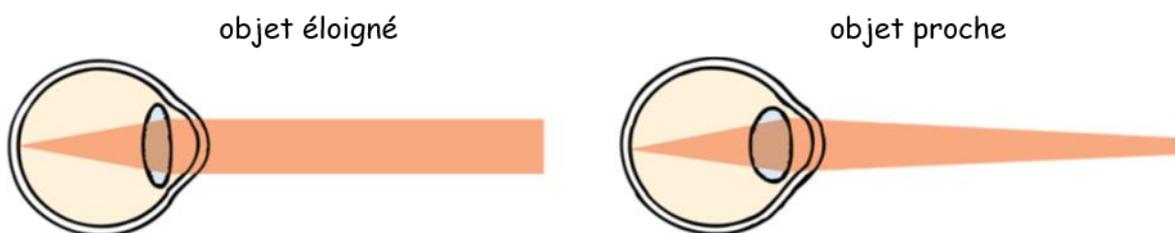
L'image virtuelle formée par la loupe est agrandie et droite (non renversée). L'objet et l'image se trouvent du même côté de la lentille.

**10.4 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 entre la lumière. Elle traverse ensuite le cristallin et se concentre sur une couche de tissu à l'arrière de l'œil, la rétine. Au point aveugle, les nerfs transportant toutes 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.



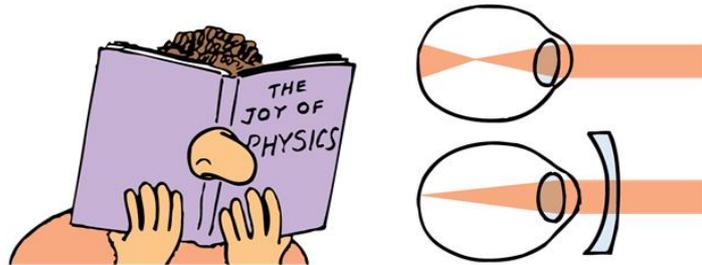
Pour que la vision soit nette, il faut que la lentille de l'œil forme l'image du champ de vue sur la rétine. En contractant ou en relâchant les muscles ciliaires, l'œil peut modifier la courbure de la lentille et donc varier sa distance focale. Ce processus est appelé **accommodation**.



Avec une vision normale, l'œil peut s'adapter pour voir clairement les objets depuis l'infini (le point éloigné) jusqu'à 25 cm (le point proche). Malheureusement, certains défauts visuels 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 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. Le globe oculaire est 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.



#### c. Astigmatisme

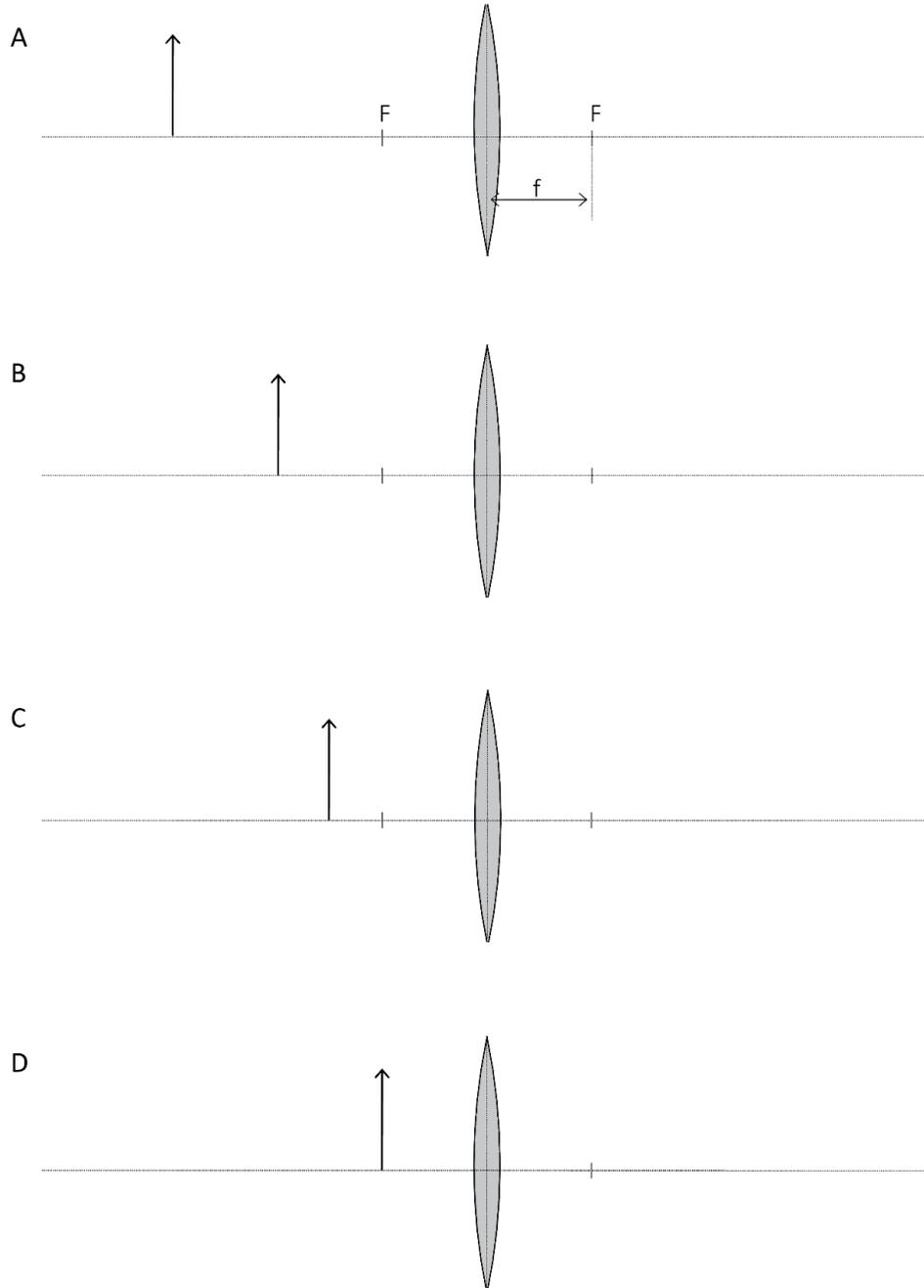
L'astigmatisme de l'œil est un trouble de vision qui se produit lorsque la cornée est plus incurvée dans un sens que dans l'autre. En raison de ce défaut, l'œil ne forme pas d'images nettes. Pour corriger l'astigmatisme, un verre correcteur cylindrique qui a plus de courbure dans un sens que dans un autre est placé devant l'œil.

#### Méthodes pour corriger la vision :

- Les lentilles de contact constituent une alternative courante au port de lunettes.
- Une autre option est la technique du *LASIK* (*Laser-Assisted In-Situ Keratomileusis*), une procédure de remodelage de la cornée à l'aide d'impulsions laser.
- Dans la technique du *IntraLase*, des lentilles sont implantées dans l'œil.

■ **As-tu compris ?**

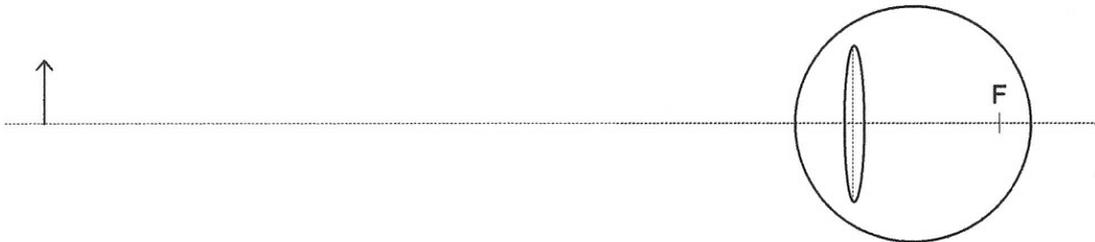
63. Construire l'image de l'objet par la lentille convergente pour chaque cas.



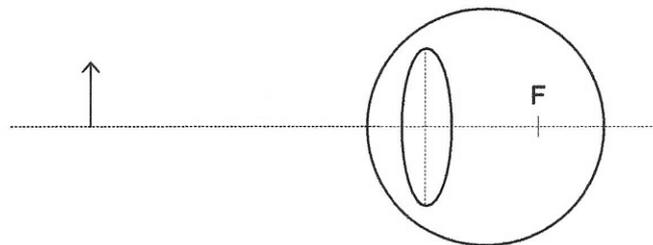
64. En considérant les figures de l'exercice précédent, déterminer à quelle distance d'une lentille convergente il faut placer un objet pour que l'image formée soit
- à l'infini
  - aussi proche que possible de la lentille
  - droite (non renversée)
  - de la même taille que l'objet
  - renversée et agrandie.

65. Construire les images de l'objet

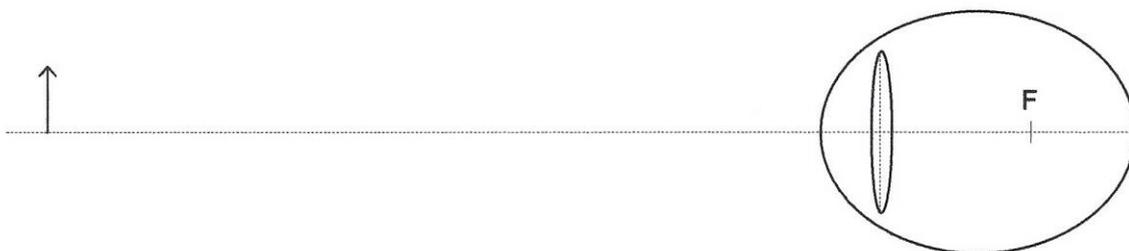
- a. Personne à vision normale regardant un objet éloigné (muscles ciliaires relâchés).



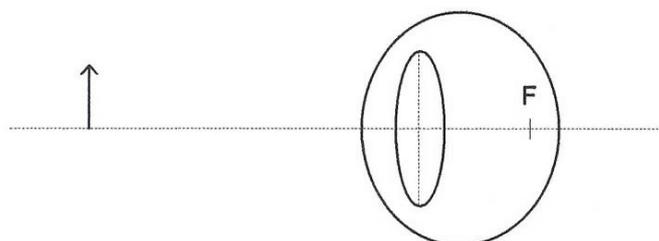
- b. Personne à vision normale regardant un objet proche (muscles ciliaires contractés).



- c. Personne myope regardant un objet éloigné.



- d. Personne hypermétrope regardant un objet proche.



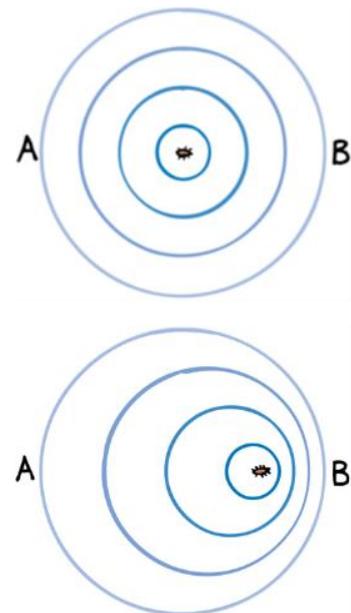
## 11 Effet Doppler (facultatif)

### 11.1 Ondes d'eau

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 en toutes 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).
- En revanche, 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**<sup>6</sup>. Plus la vitesse relative entre la source et l'observateur est grande, plus l'effet Doppler est prononcé.

### 11.2 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 élevée.
- Lorsque la sirène s'éloigne, le son perçu est plus grave parce que les fronts d'onde sonores arrivent à une fréquence plus basse.

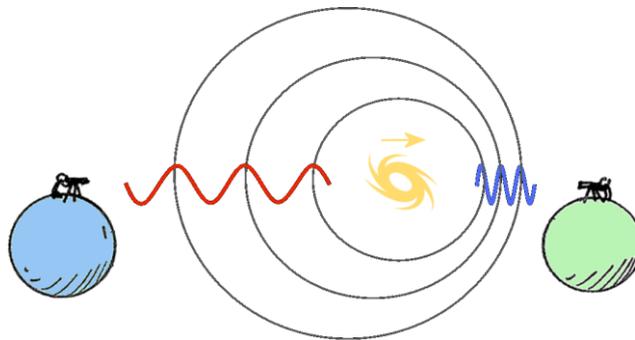


### 11.3 Lumière

- 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.

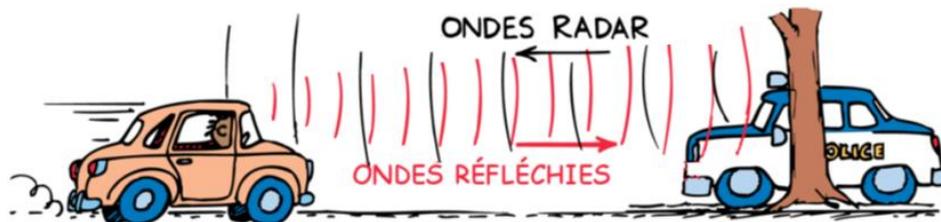
<sup>6</sup> En l'honneur de Christian Doppler, physicien autrichien du 19<sup>e</sup> siècle qui fut le premier à décrire ce phénomène.

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 »).



#### 11.4 Ondes radar

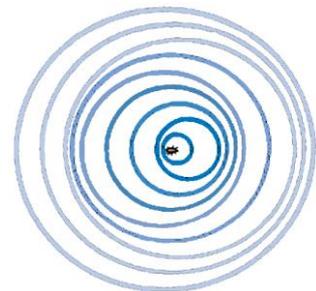
L'effet Doppler pour les ondes radar est utilisé pour mesurer la vitesse des voitures. Les ondes radar sont des ondes électromagnétiques qui se propagent à la vitesse de la lumière et sont réfléchies par les voitures en mouvement. Un ordinateur encastré dans le système du radar mesure la différence entre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



#### ■ As-tu compris ?

66. Considérer le motif des fronts d'onde créés par l'insecte qui sautille sur la surface d'eau. Que peut-on en déduire sur le mouvement de l'insecte ?

- A. L'insecte se déplace toujours vers la gauche.
- B. L'insecte se déplace toujours vers la droite.
- C. L'insecte fait des sauts vers l'avant et vers l'arrière.
- D. L'insecte sautille sur une trajectoire circulaire.

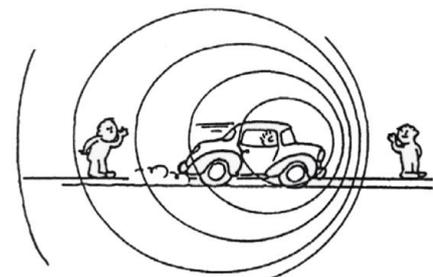


67. Lorsqu'une voiture se rapproche, le son perçu de son klaxon est

- A. plus grave
- B. plus aigu
- C. identique

68. Lorsqu'une voiture s'éloigne, le son perçu de son klaxon est

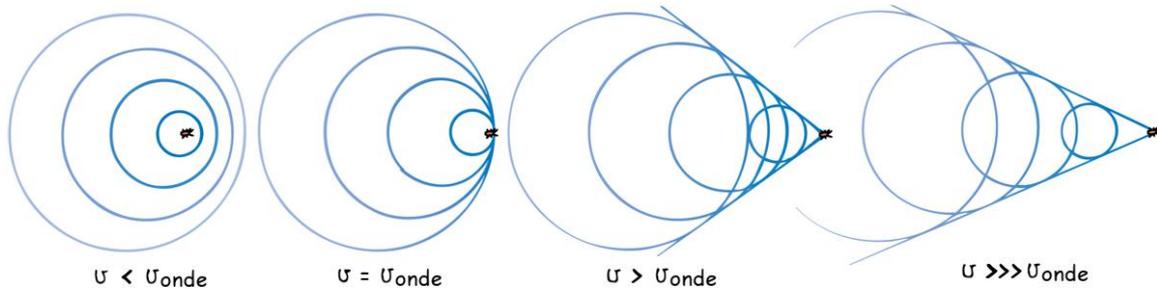
- A. plus grave
- B. plus aigu
- C. identique



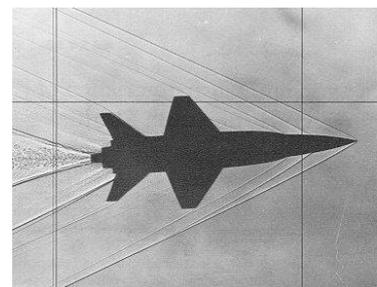
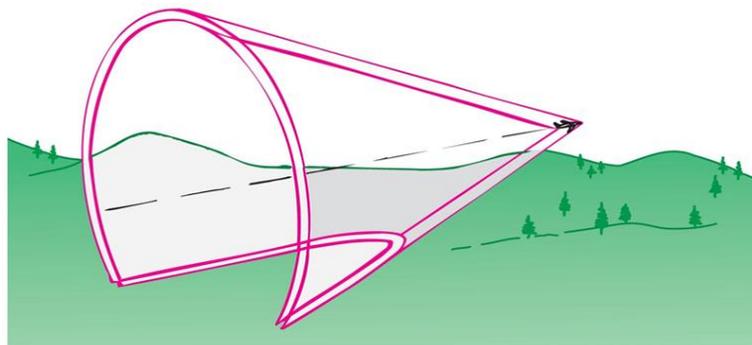
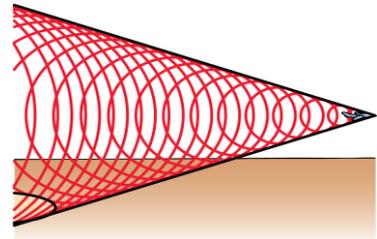
## 12 Onde d'étrave et onde de choc (facultatif)

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, appelé **onde d'étrave**, trainée derrière l'insecte.

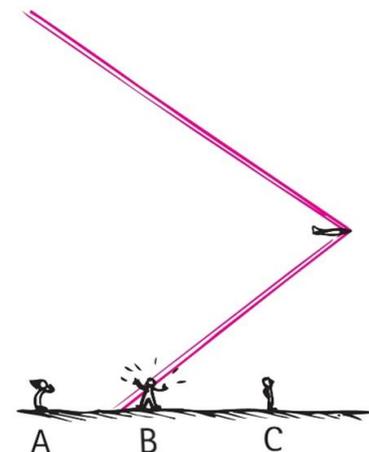


Lorsqu'un avion vole plus vite que le son, on dit qu'il est **supersonique**. Un avion supersonique génère une **onde de choc** sonore trois-dimensionnelle, qui consiste en des fronts d'onde sphériques qui s'entassent aux bords et forment un cône d'air comprimé qui s'étend jusqu'au sol.



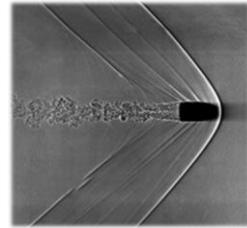
Le tonnerre perçu lorsque le bord de l'onde de choc sonore atteint l'oreille est appelé **boom sonique**. On n'entend pas de boom sonique lorsqu'un avion vole moins vite que la célérité du son car les fronts d'onde sonores atteignent l'oreille successivement et sont perçues comme un son continu. Lorsque 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 passée A, mais n'a pas encore atteint la personne C.



### Autres exemples :

L'image montre une balle supersonique. L'onde de choc principale est clairement visible, prenant naissance à la pointe de la balle. Les autres ondes de choc, moins importantes, sont générées par les rayures de la balle. Derrière la balle se trouve une région où se forment de fortes turbulences lorsque l'air afflue pour remplir le vide partiel derrière la balle.



<https://www.youtube.com/watch?v=BPwdIEgLn5Q>

L'éclat d'un fouet est un boom sonique généré par la fine extrémité du fouet qui dépasse la célérité du son pour un bref instant.

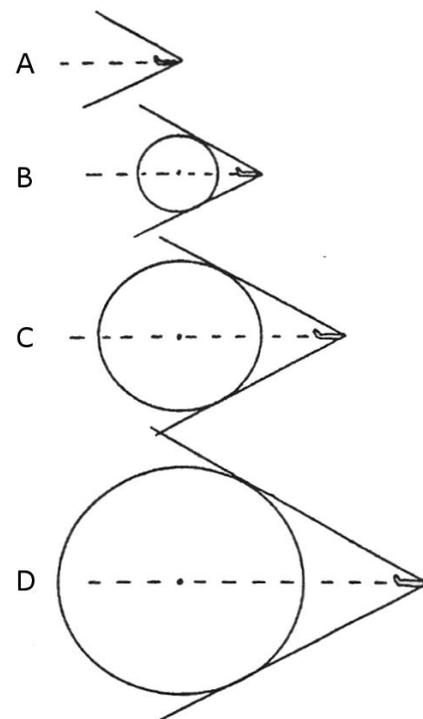


[https://www.youtube.com/watch?v=AnaASTBn\\_K4](https://www.youtube.com/watch?v=AnaASTBn_K4)

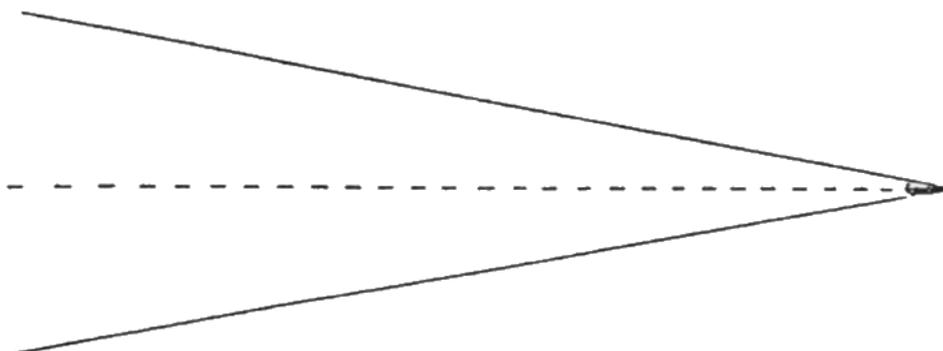
### ■ As-tu compris ?

69. L'onde de choc créée par un avion supersonique résulte de la superposition des ondes sonores sphériques émises par l'avion. La figure ci-contre montre, à des intervalles de temps réguliers, l'évolution d'un de ces fronts d'onde sphériques, émise par l'avion à la position A.

- Comment peut-on voir sur les figures que l'avion est supersonique ?
- La vitesse de cet avion vaut environ \_\_\_\_\_ fois la célérité du son.
- Si la vitesse de l'avion était plus grande, l'angle du cône de l'onde de choc serait
  - plus aigu
  - identique
  - plus obtus.



- Représenter un front d'onde sphérique quelconque émis à un instant antérieur par l'avion ci-dessous. La vitesse de cet avion supersonique vaut environ \_\_\_\_\_ fois la vitesse du son.



---

## Partie II - Électricité

---

# 1 La charge électrique

## 1.1 Comment électriser un corps ?

En enlevant ton pullover par temps sec, tu as peut-être remarqué un léger grésillement (« leichtes Knistern »). Ce bruit est caractéristique du fait que tes cheveux et ton pull se sont électrisés.

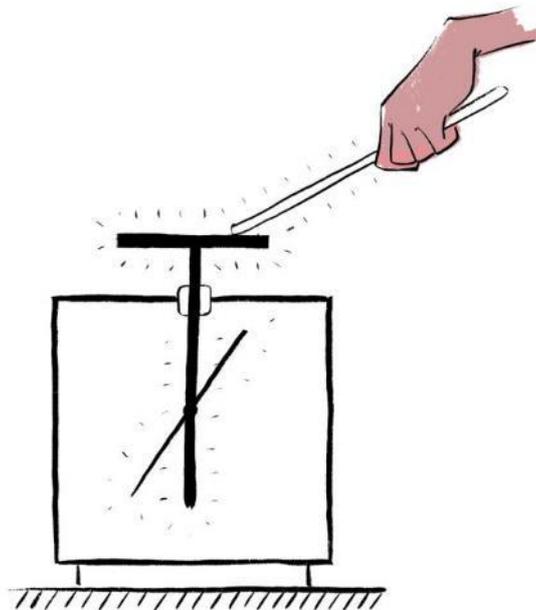


Lorsqu'on frotte un bâton en plastique avec une fourrure, on observe que le bâton peut attirer des objets légers, comme des petits morceaux de papier ou un filet d'eau qui coule du robinet.

Par frottement, un objet peut devenir électriquement chargé. On dit que l'objet porte une charge électrique.

## 1.2 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.

### 1.3 Deux types de charge électrique

En frottant deux bâtons différents (p.ex. en plastique et en verre) avec des tissus différents (p.ex. 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 (position neutre). 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 opposées.

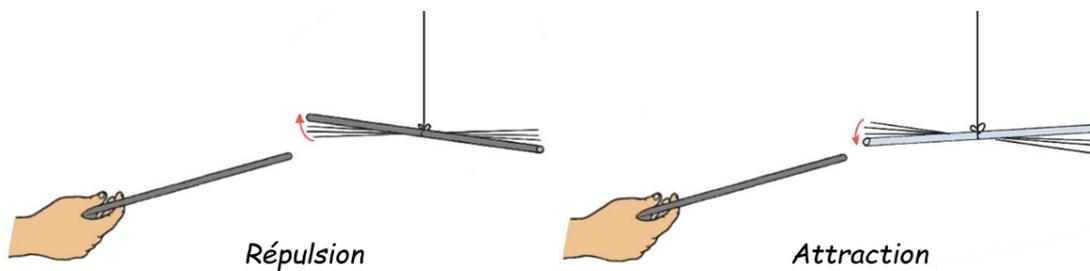


Il existe deux types de charges électriques dans la nature : Benjamin Franklin les a nommées **charges positives (+)** et **charges négatives (-)**.



#### 1.3.1 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.



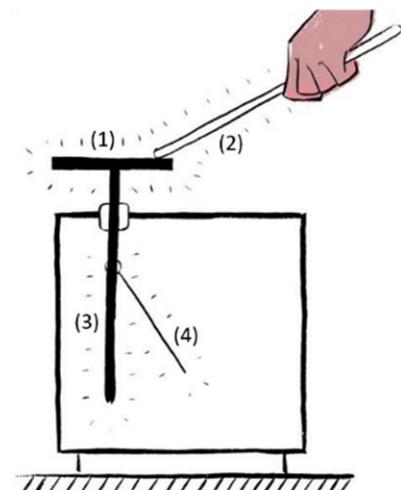
Des charges de même signe se repoussent.  
Des charges de signe opposé s'attirent.



#### 1.4 Principe de fonctionnement de l'électroscope

- Lorsqu'on touche la partie supérieure d'un électroscope (1) 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.



## 1.5 Où sont localisées les charges électriques ?

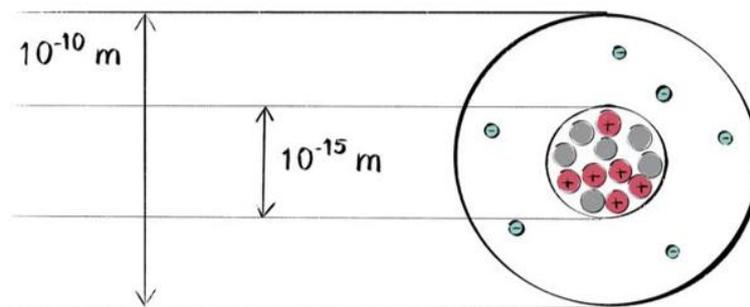
### 1.5.1 Structure de la matière

Tout corps est constitué d'atomes. Chaque atome est formé d'un noyau atomique entouré de son cortège électronique (cf. Cours de Chimie).

Le noyau atomique contient :

- des protons, particules chargées positivement
- des neutrons, particules électriquement neutres

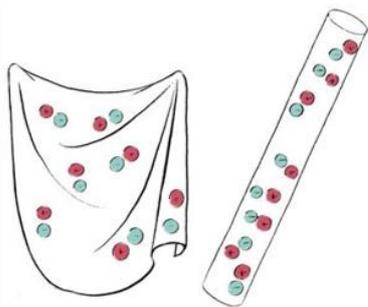
Les électrons sont chargés négativement et sont en mouvement autour du noyau. La masse de l'électron est environ deux mille fois plus petite que celle du proton ou du neutron, dont les masses sont approximativement égales. A l'état normal, l'atome est électriquement neutre : il possède autant de protons dans le noyau que d'électrons qui tournent autour.



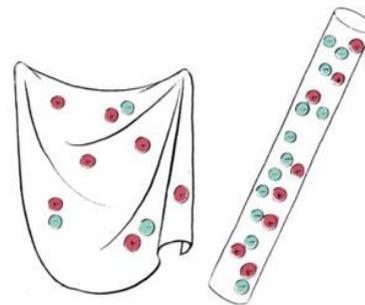
*Modèle d'un atome de carbone*

### 1.5.2 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 (déficit 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 ?**

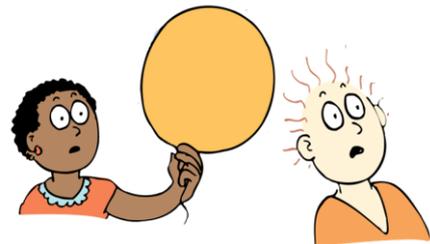
1. Quelle(s) observation(s) indiquent qu'il existe deux types de charge électrique dans la nature ?
2. A quoi sert un électroscope ? Permet-il d'indiquer le type de charge électrique (+ ou -) porté par un objet ?

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 le transfert de charge électrique qui a lieu. Faire une figure représentant la répartition des charges sur les corps au début puis à la fin du phénomène.

## 1.6 Etude quantitative

La charge électrique est une caractéristique fondamentale des particules élémentaires.  
Les particules qui portent une charge électrique sont sensibles aux forces électromagnétiques.

La charge électrique est **mesurable** : on peut exprimer sa valeur à l'aide d'un nombre et d'une unité<sup>7</sup>  
L'unité SI de la charge électrique est le **coulomb**<sup>8</sup> (symbole : **C**). Les symboles usuels pour dénoter une charge électrique dans une formule sont  $Q$  ou  $q$ .

**Exemples :** charge électrique macroscopique :  $Q = 2,5 \text{ C}$   
charge électrique microscopique :  $q = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

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 :

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

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

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

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

$$|Q| = N \cdot e \quad \text{avec} \quad N : \text{nombre entier}$$

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 résiduelle soit égale à  $1 \text{ C}$ .

*Solution :*

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

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

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

$$\text{On a :} \quad Q = N \cdot e \quad \Rightarrow \quad N = \frac{Q}{e}$$

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

*Conclusion : Une charge de  $1 \text{ C}$  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. En raison de leur mobilité, les électrons sont responsables à eux seuls de la grande majorité des phénomènes électriques. On comprend aussitôt pourquoi les termes *électron* et *électricité* ont la même racine étymologique.

<sup>7</sup> Autrement dit : la charge est une grandeur physique.

<sup>8</sup> En l'honneur de Charles Augustin de Coulomb, physicien français du 18<sup>e</sup> siècle et fondateur de l'électrostatique.

## 1.7 Conducteurs et isolants

Selon leurs propriétés électriques, les matériaux<sup>9</sup> se répartissent en deux groupes : les conducteurs et les isolants.

Dans un **isolant électrique**, les charges ne peuvent pas se déplacer à travers le corps.  
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.

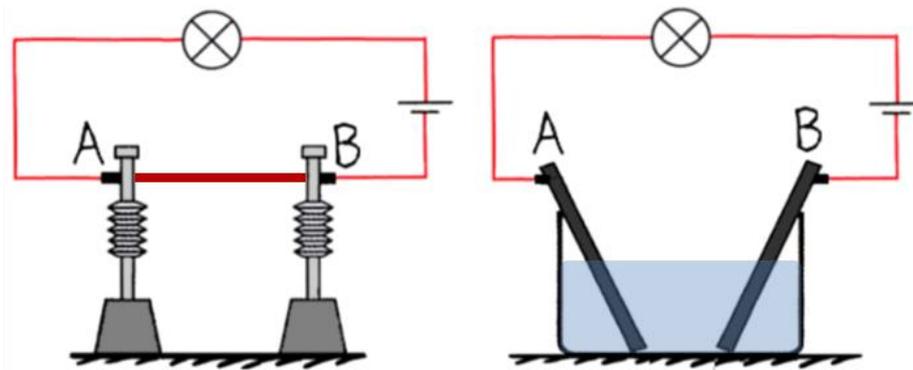
Dans un **conducteur électrique**, les charges se répartissent de manière uniforme dans le corps.  
Un matériau conducteur permet le passage du courant électrique.

**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 capables de se déplacer d'un atome à l'autre. Ceci est le cas notamment pour les métaux.

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 chargés.



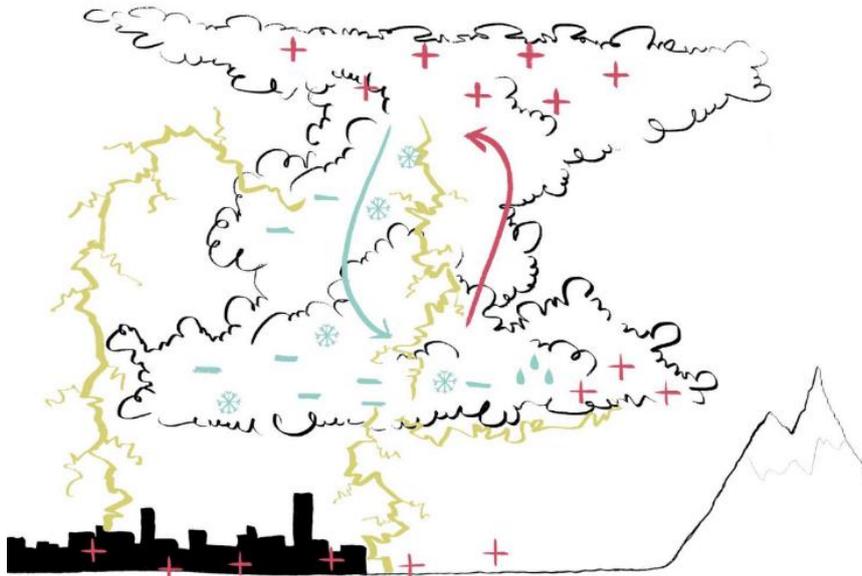
Test de conductivité pour un corps solide (gauche) ou un liquide (droite).

<sup>9</sup> Attention à ne pas confondre les termes : matériaux (« Stoffe »), métaux (« Metalle ») et matériel (« Material », « Ausrüstung »).

## 1.8 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 est relativement 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.



### ■ As-tu compris ?

8. « Tous les liquides sont des conducteurs électriques. » Vrai ou faux ? Justifier !
9. Quel métal conduit mieux l'électricité : le fer ou le cuivre ? Décrire une expérience qui permet de vérifier si ta réponse est exacte.
10. Préciser le type et la quantité de charge électrique portée par les protons, neutrons, électrons.
11. Pourquoi dit-on que la charge électrique est quantifiée ? Expliquer !
12. Combien de protons et d'électrons se trouvent dans un ion  $\text{Ca}^{2+}$  ? Quelle est la valeur de la charge de l'ion en unité SI ?
13. D'un point de vue microscopique, quelle est la différence fondamentale entre les conducteurs et les isolants. Expliquer !

## 2 Composants électriques

### 2.1 La notion d'énergie

L'**énergie** est l'ingrédient fondamental dont tout système a besoin pour fonctionner. Autrement dit : sans énergie, il ne se passe rien !

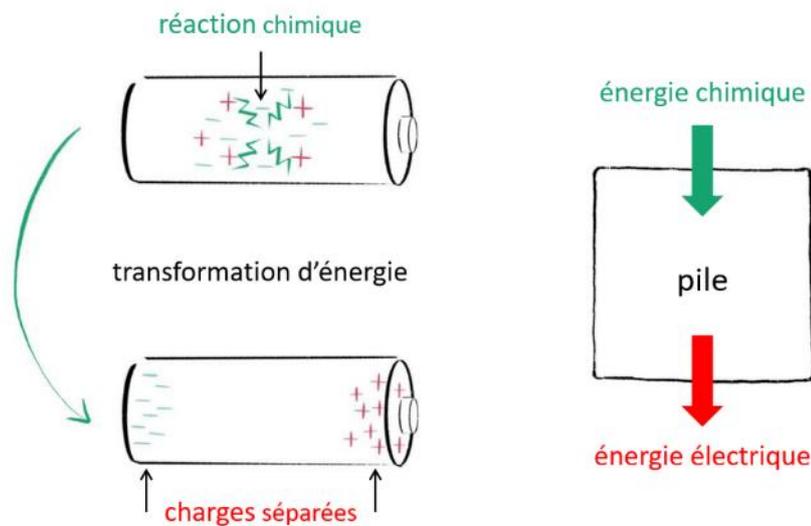
L'énergie est une grandeur physique. Son unité SI est le **joule**<sup>10</sup> (J).

En particulier, il faut de l'énergie pour produire du mouvement, de la chaleur, du rayonnement, de l'électricité. Les réactions chimiques sont possibles grâce à l'énergie des réactifs et/ou du milieu réactionnel.

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'une forme à une autre, mais qu'elle ne peut ni être créée, ni être détruite.

### 2.2 La pile : une source d'énergie électrique

A l'intérieur d'une pile, une réaction chimique provoque que des électrons sont transférés d'un endroit à un autre. Il en résulte une séparation des charges : 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.



Pour séparer les charges, on a besoin d'énergie. Cette énergie est contenue dans les substances chimiques qui forment la pile. Une fois les charges séparées, on retrouve cette énergie sous forme électrique. Au bilan, une pile est donc un dispositif qui transforme de l'énergie chimique en énergie électrique.

#### Un peu d'histoire :

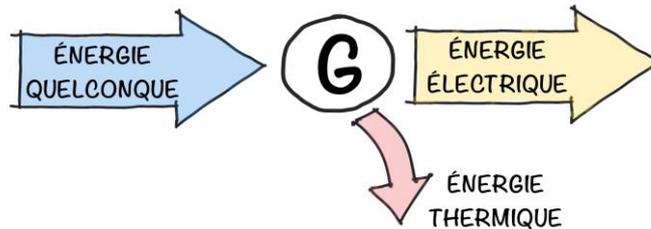
La première pile fut inventée par Alessandro Volta au début du 19<sup>e</sup> siècle. Il s'agissait d'un système constitué d'un « empilement » de disques métalliques séparés par des couches de feutre imbibés d'acide ; d'où le nom de l'invention.

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

## 2.3 Générateurs et récepteurs

Principalement, on distingue entre deux types de composants électriques (« elektrische Bauteile ») : les générateurs et les récepteurs.

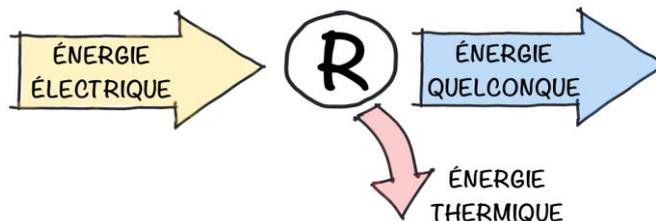
Les **générateurs** (ou sources d'électricité) sont des composants qui transforment une forme d'énergie quelconque en énergie électrique.



**Exemples :**

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

Les **récepteurs** sont des composants 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 (chaleur) et en énergie lumineuse (lumière).
- Un moteur électrique transforme de l'énergie électrique en énergie cinétique.

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. En mode recharge, l'accumulateur est un récepteur : il reçoit de l'énergie électrique d'une prise domestique (« Steckdose ») et la stocke sous forme d'énergie chimique.



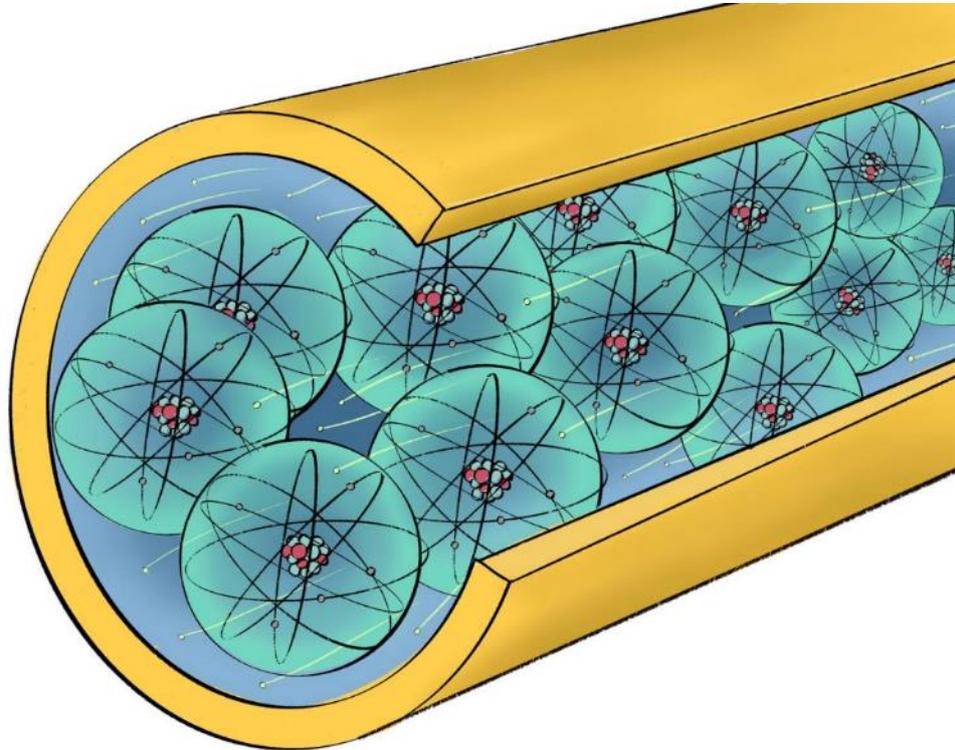
La plupart des composants électriques sont des **dipôles** : ils possèdent deux connections, appelées bornes ou pôles, qui permettent de les intégrer dans un circuit électrique. On distingue entre le pôle positif (+) et le pôle négatif (- ou COM).

Pour certains composants, la polarité ne joue aucun rôle, c'est-à-dire qu'on peut les brancher dans les deux sens dans un circuit sans en modifier le comportement. Ceci est le cas pour les lampes à incandescence par exemple (« Glühlampen »).

Pour d'autres composants (p.ex. pour un moteur électrique), il faut faire attention à la polarité afin de garantir le bon fonctionnement du circuit (voire éviter la destruction du composant). Dans ces cas, le pôle (+) du générateur doit être relié à la borne (+) du récepteur.

### 3 Le courant électrique

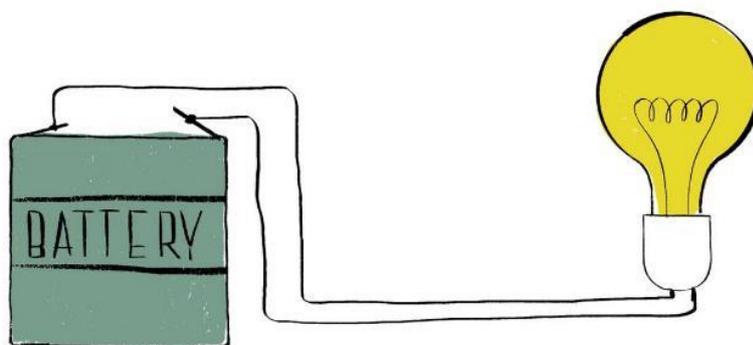
Dans les métaux, les électrons des couches atomiques externes sont très peu liés aux noyaux atomiques. Par conséquent, ces électrons peuvent se déplacer librement dans tout le volume du métal. On les appelle des **électrons libres**.



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.

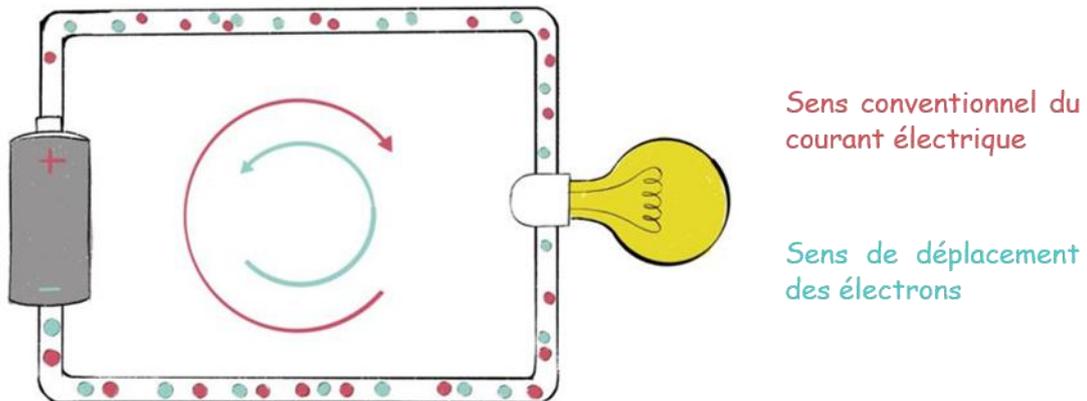
Pour obtenir un courant électrique, il suffit de relier les pôles d'un générateur (p.ex. une pile) à un récepteur (p.ex. une lampe) à l'aide de fils conducteurs (câbles de connexion). En effet, les électrons libres sont alors mis en mouvement puisqu'ils sont repoussés par le pôle « - » et attirés par le pôle « + » de la source. Ainsi, nous venons de réaliser notre premier circuit électrique.



Il faut que le circuit soit fermé pour que le courant électrique puisse circuler. Dès qu'on ouvre le circuit à n'importe quel endroit, le flux de charge s'arrête immédiatement.

### 3.1 Sens du courant électrique

Par convention<sup>11</sup>, le courant électrique circule du pôle « + » vers le pôle « - » de la source d'électricité. En raison de leur charge négative, les électrons se déplacent en sens inverse, c.à.d. du pôle « - » vers le pôle « + » de la source d'électricité. Les protons ne se déplacent jamais.



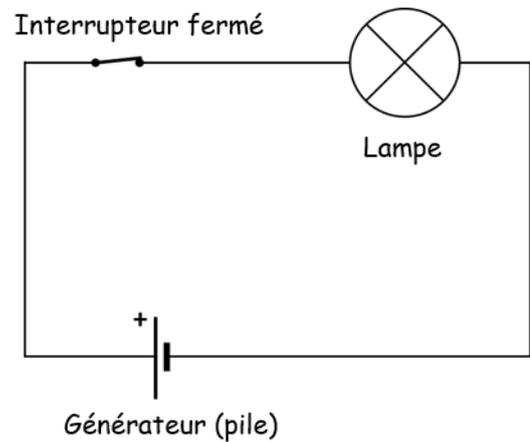
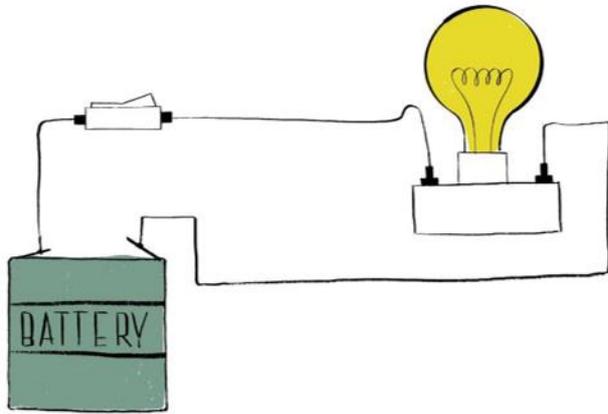
#### ■ As-tu compris ?

14. D'où vient l'énergie électrique que fournit une pile ? Expliquer !
15. Au lieu d'une pile, on peut utiliser un générateur dynamoélectrique (une « dynamo ») ou des cellules photovoltaïques pour alimenter un circuit électrique.
  - a. Quel est le point commun de ces dispositifs ?
  - b. En quoi sont-ils différents ?
16. L'accumulateur d'un smartphone, est-ce un générateur ou un récepteur électrique ? Expliquer !
17. Expliquer la notion de courant électrique.
18. « Un courant électrique est nécessairement formé par des électrons. » Vrai ou Faux ? Expliquer !
19. « Dans un métal, le sens conventionnel du courant électrique correspond au sens de déplacement des électrons libres. » Vrai ou Faux ?

<sup>11</sup> Le sens (positif) du courant électrique a été fixé par la communauté scientifique.

## 4 Circuits électriques

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



### 4.1 Symboles standards

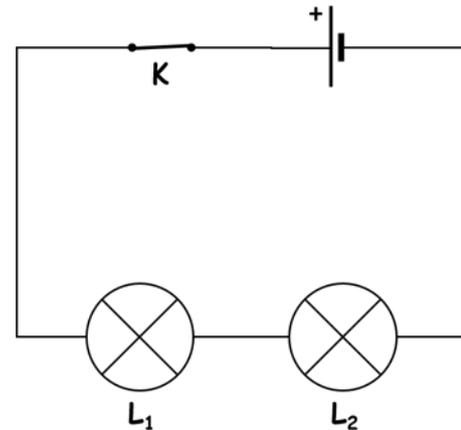
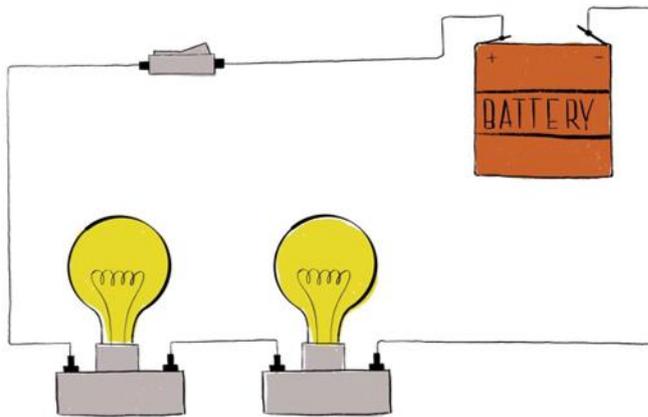
Générateurs		Pile
		Dynamo
Interrupteurs		Interrupteur ouvert
		Interrupteur fermé
		Interrupteur va-et-vient
Récepteurs		Lampe
		Moteur
		Sonnette

## 4.2 Types de branchements

### 4.2.1 Le montage en série

Lorsque des composants sont branchés l'un à la suite de l'autre, de sorte que le courant électrique prend le même chemin pour les traverser, on parle d'un branchement en série. Un circuit où tous les composants sont branchés en série est appelé un **circuit série**.

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



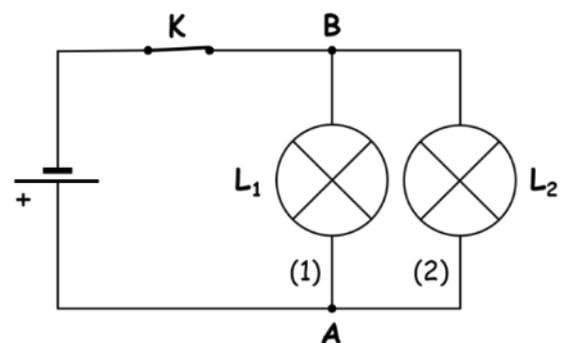
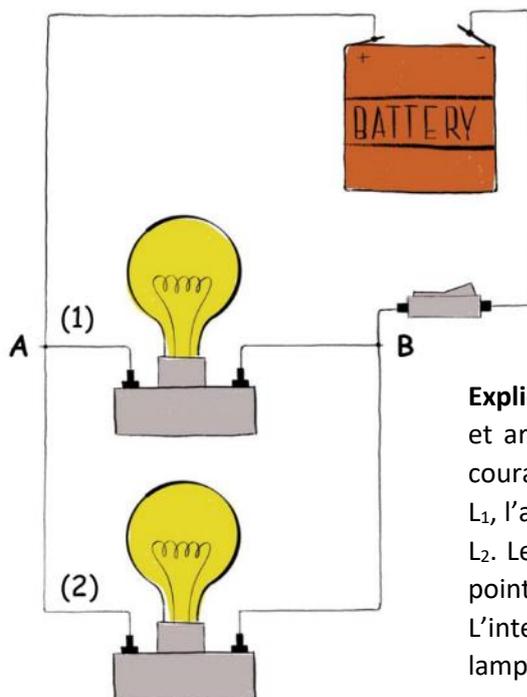
UN SCHÉMA DE MONTAGE EST DESSINÉ AVEC UN CRAYON !  
LES CABLES ELECTRIQUES SONT REPRÉSENTÉS PAR DES SEGMENTS DROITS ET PERPENDICULAIRES !



### 4.2.2 Le montage en parallèle

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

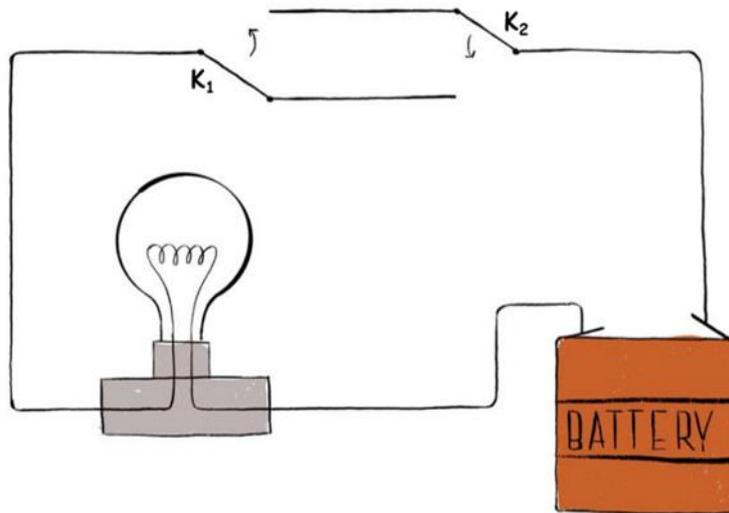
**Exemple :** Circuit où les deux lampes sont branchées en parallèle



**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) et alimente la lampe  $L_1$ , l'autre partie parcourt la branche (2) et fait 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 permet d'allumer ou d'éteindre les deux lampes simultanément.

#### 4.2.3 Le montage va-et-vient

Il s'agit d'un montage électrique qui permet d'allumer ou d'éteindre 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.

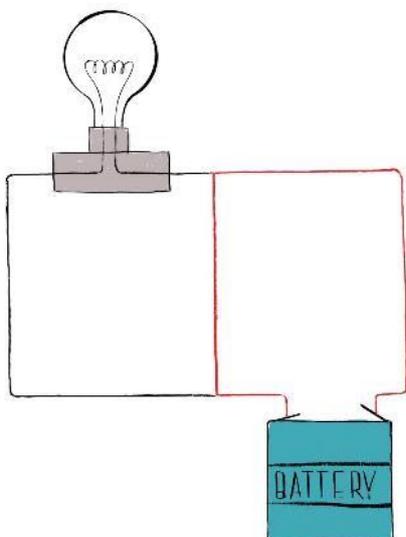


La lampe peut être allumée/éteinte à partir de deux interrupteurs indépendants  $K_1$  et  $K_2$

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 »).

#### 4.2.4 Le court-circuit

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



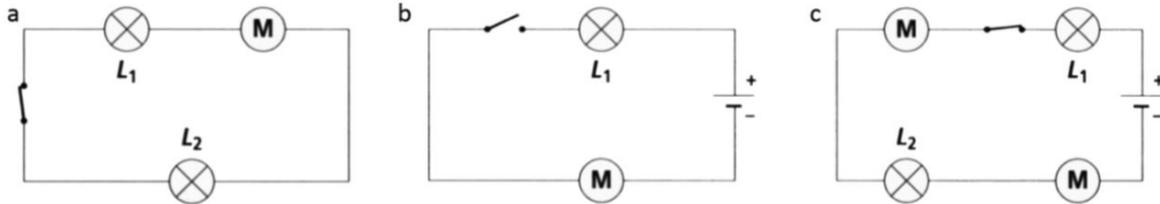
**Exemple :** Dans le montage ci-contre, nous avons un court-circuit. On dit aussi que la lampe électrique est court-circuitée.

**Explication :** Un câble a une résistance électrique très faible (comparée à la résistance d'une lampe ou d'un moteur par exemple). 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 est très intense.

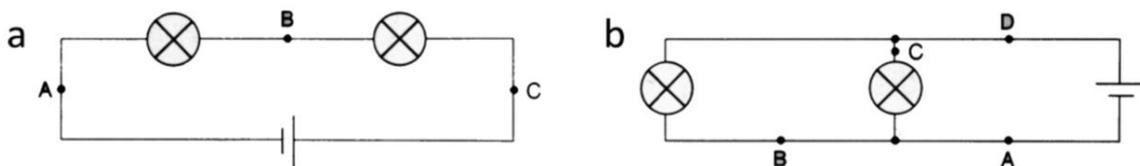
**Conséquence :** Toute l'énergie fournie par le générateur est transformée en chaleur dans les fils électriques : ils risquent de fondre ce qui peut provoquer un incendie (« Brandgefahr ») !

■ **As-tu compris ?**

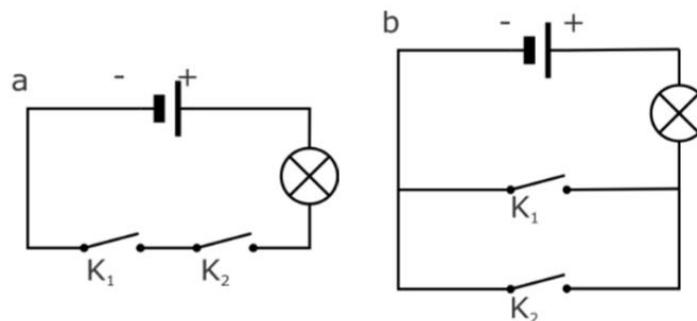
20. Pour les schémas suivants, déterminer si les lampes s'allument et/ou si le moteur tourne. Justifier les réponses.



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



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



23. Tracer le schéma d'un circuit électrique qui contient deux lampes pouvant être allumées et éteintes séparément.

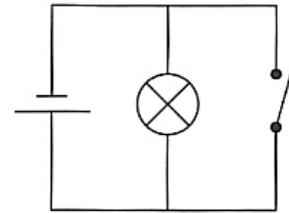
24. La sonnette d'un appartement est commandée par deux interrupteurs : l'un fixé près de la porte de l'immeuble et l'autre fixé près de la porte d'appartement. Faire un schéma du montage et expliquer le fonctionnement du circuit.

25. Une machine à laver ne doit fonctionner que si la porte d'accès au tambour est fermée et si l'interrupteur de mise en marche est sur la position « ON ». Faire un schéma du montage et expliquer le fonctionnement du circuit.

26. Quand est-ce qu'on parle d'un court-circuit ? Pourquoi est-ce dangereux ?

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

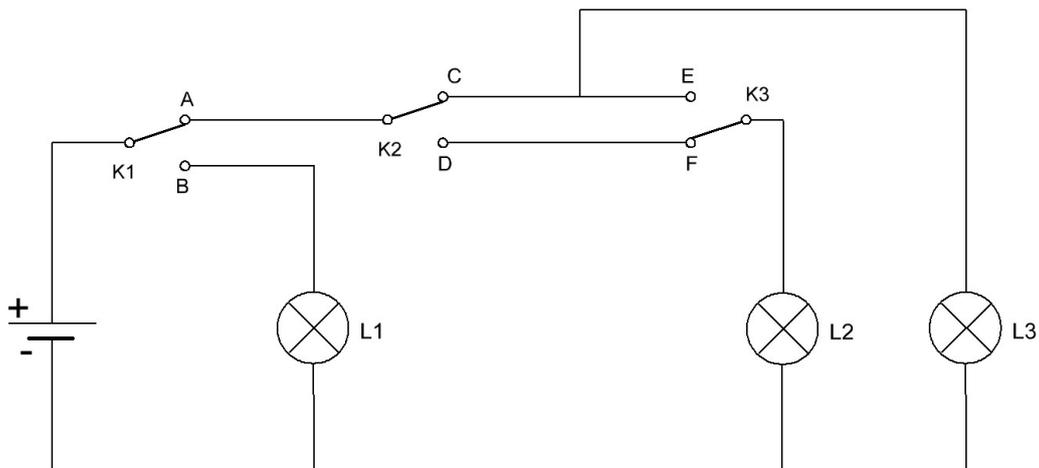
- A. La lampe brille si l'interrupteur est ouvert.
- B. La lampe brille si l'interrupteur est fermé.
- C. La lampe brille dans les deux cas.
- D. La lampe reste éteinte dans les deux cas.



28. Trois lampes identiques sont branchées dans un circuit électrique. 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.

29. Quels sont les positions des différents interrupteurs du schéma ci-dessous pour que :

- a. la lampe L1 brille seule ?
- b. la lampe L2 brille seule ?
- c. la lampe L3 brille seule ?
- d. les lampes L1 et L3 brillent seules ?



## 5 Grandeurs électriques

### 5.1 La tension électrique

Dans un circuit électrique fermé, les électrons libres sont poussés à travers le circuit par le générateur (p.ex. par une pile). Sur différentes piles on peut lire différentes inscriptions, p.ex. 1,5 V ou 9 V. Ces nombres, exprimés en **volt**<sup>12</sup> (**V**), indiquent la tension électrique aux bornes de la pile et nous renseignent sur l'énergie électrique que reçoit une charge de 1 C lorsqu'elle traverse la source.

On imagine facilement que 2 C reçoivent une énergie deux fois plus grande, 3 C une énergie trois fois plus grande et ainsi de suite.

L'énergie électrique  $E_{el}$  fournie par la pile augmente donc avec la quantité de charge  $Q$  « pompée » à travers le circuit, mais le rapport

$$\frac{E_{el}}{Q}$$

reste constant<sup>13</sup>. Ce rapport joue un rôle fondamental : on l'appelle la tension électrique  $U$  et sa valeur caractérise la pile en tant que source d'électricité.

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.

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

Pour illustrer cette définition, remarquons les choses suivantes :

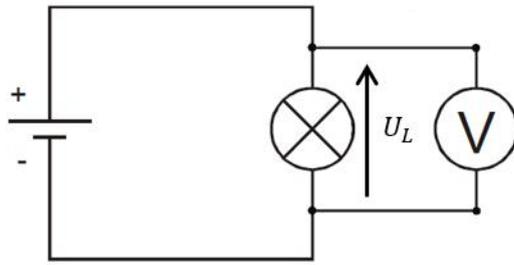
- La tension entre les pôles de la pile apparaît suite à la séparation de charge qui intervient dans la pile. Sans séparation de charge, pas de tension entre les pôles.
- La tension électrique est toujours évaluée entre deux points ; sinon, elle est nulle. En effet, il n'est pas possible que des charges soient séparées au même point.
- Lorsqu'on relie les pôles de la pile par un conducteur, les charges préalablement séparées peuvent se déplacer. La tension est donc la cause du courant électrique.
- Réciproquement, une tension électrique peut exister entre deux points sans qu'il n'y ait un courant électrique qui circule. Il suffit que ces points soient chargés de façon différente et séparés par un isolant.

#### Mesure :

Malgré son caractère quelque peu abstrait, la tension électrique est une grandeur très pratique. En effet, alors qu'il est difficile (voire impossible) de mesurer l'énergie électrique  $E_{el}$  ou la quantité de charge  $Q$  transportées par les électrons, il suffit de brancher un **voltmètre** entre deux points pour y mesurer la tension électrique  $U$ .

<sup>12</sup> En l'honneur d'Alessandro Volta, physicien italien du 19<sup>e</sup> siècle à qui l'on doit la première pile électrique.

<sup>13</sup> Ce qui revient à dire que l'énergie électrique est proportionnelle à la quantité de charge déplacée :  $E_{el} \sim Q$ . En particulier, chaque électron reçoit la même quantité d'énergie électrique par une pile.



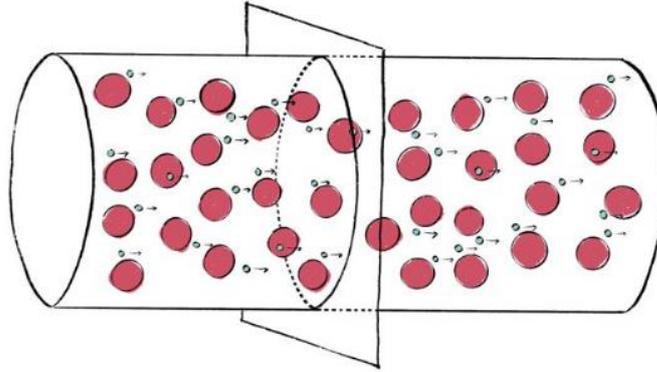
Le voltmètre, branché en parallèle, mesure ici la tension  $U_L$  aux bornes de la lampe.

■ **As-tu compris?**

30. Expliquer la notion de tension électrique. Expliciter le lien entre tension, charge et énergie à l'aide des unités SI.
31. Une pile alimente le moteur électrique d'un ventilateur. Comment faut-il brancher le voltmètre pour mesurer la tension aux bornes de la pile ? Faire un schéma du montage.
32. Faire une phrase correcte à l'aide des termes : « courant électrique » ; « tension » ; « cause ».
33. Mesurer la tension en un seul point du circuit n'a pas de sens. Pourquoi ?
34. Que vaut l'énergie électrique d'un électron libre qui se situe au niveau du pôle « - » d'une pile de 1,5 V. De quel facteur cette énergie augmente-t-elle lorsqu'il s'agit d'une pile de 9 V ?
35. Une petite lampe est alimentée par une pile. On mesure une tension de 6 V aux bornes de la lampe.
  - a. Faire un schéma du montage en précisant la façon dont on a branché le voltmètre.
  - b. Peut-on parler d'une séparation de charge entre les bornes de cette lampe ? Justifier.
  - c. « La tension nous renseigne sur l'énergie que perdent les électrons lorsqu'ils traversent la lampe. » Vrai ou Faux ? Justifier.
36. En traversant un moteur électrique, un électron a perdu une quantité d'énergie de  $3,2 \cdot 10^{-18}$  J. Déterminer la tension aux bornes du moteur. Que s'est-il passé avec cette quantité d'énergie ?
37. On charge un accumulateur de smartphone sous une tension de 10 V en lui fournissant une énergie totale de 1,5 J.
  - a. Déterminer la charge totale de l'accumulateur si 66,7% de cette énergie sont réutilisables sous forme électrique (on parle d'un rendement de 66,7%).
  - b. Que s'est-il passé avec le reste de cette énergie (33,3%) ? Justifier.

## 5.2 L'intensité du courant électrique

L'intensité du courant électrique (« Stromstärke »), mesurée en **ampère**<sup>14</sup> (**A**), indique si le flux de charge électrique est fort ou faible. Lorsque la quantité de charge électrique  $Q$  qui traverse une section droite (« Querschnitt ») du circuit pendant une durée  $t$  est grande, alors l'intensité du courant est grande (forte intensité). 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 petite (faible intensité).

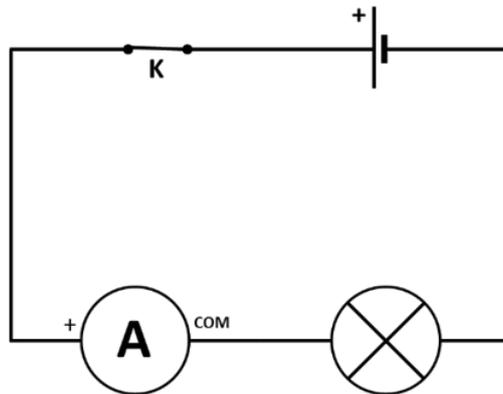


L'**intensité** du courant électrique est égale à la charge électrique transportée à travers une section droite du conducteur par unité de temps.

$$\text{intensité (A)} = \frac{\text{charge (C)}}{\text{temps (s)}}$$

$$\text{Formule : } I = \frac{Q}{t}$$

**Mesure** : L'intensité du courant est mesurée à l'aide d'un **ampèremètre**. Pour cela, il faut faire passer le courant à travers l'appareil ; ce dernier doit donc être branché en série.



*L'ampèremètre est branché en série. Il mesure l'intensité du courant  $I$  dans la lampe.*

### Unité alternative pour la charge électrique :

La quantité de charge totale que peut séparer un accumulateur pleinement chargé est souvent indiquée en mAh. Par définition, on a la conversion suivante :

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

L'avantage de cette unité est qu'on peut en déduire facilement le nombre d'heures (càd. le temps) pendant lequel l'accumulateur peut débiter un courant d'une intensité donnée (p.ex. 100 mA).

<sup>14</sup> En l'honneur de André-Marie Ampère, physicien français du 19<sup>e</sup> siècle et pionnier de l'électromagnétisme.

## ■ As-tu compris ?

38. Expliquer la notion d'intensité du courant. Expliciter le lien entre charge, intensité et temps à l'aide des unités SI.
39. On veut construire un circuit électrique dans lequel un moteur et une lampe électrique sont branchés en parallèle à une pile.
  - a. Faire le schéma du circuit électrique.
  - b. Où doit-on placer l'ampèremètre pour mesurer l'intensité du courant : (A) à travers le moteur (B) à travers la lampe (C) à travers la pile ?
40. Ton grand frère dit qu'il faut brancher l'ampèremètre avant le moteur parce que sinon, la mesure est faussée, étant donné que le moteur consomme le courant électrique. A-t-il raison ? Expliquer.
41. Que vaut l'intensité du courant lorsqu'une charge de 590 mC traverse la section d'un circuit électrique en 2 secondes ? Quelle charge traverse alors la section en une minute ?
42. L'accumulateur d'un téléphone portable porte l'indication « 1000 mAh ». En communication, 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. Combien d'heures peut-on téléphoner avec le téléphone lorsque l'accumulateur est pleinement chargé ?
43. Une batterie industrielle a une capacité de charge de 150 Ah. La batterie permet d'alimenter un moteur électrique pendant 10 h. Déterminer l'intensité du courant dans le moteur.
44. Un accumulateur de tablette numérique porte l'indication « 3200 mAh ». Lors d'une utilisation multimédia (écran lumineux), la tablette a besoin d'un courant électrique de 600 mA. Quelle est l'autonomie de la tablette ?

### 5.3 Énergie et puissance électriques

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 cheminent cette énergie vers le moteur (courant électrique) qui la transforme en énergie cinétique (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 toutefois plus puissante qu'une autre qui ne fournit que 5 J en 1 s.

La puissance électrique de la pile, mesurée en **watt**<sup>15</sup> (**W**) apparaît donc comme le rapport entre l'énergie et le temps : elle nous renseigne sur la vitesse des transformations énergétiques qui ont lieu dans la pile.

---

<sup>15</sup> En l'honneur de James Watt, physicien britannique du 18<sup>e</sup> siècle à qui l'on doit le développement de la machine à vapeur.

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

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

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

### Puissance électrique en fonction de $U$ et $I$ :

Les définitions de  $U$  et  $I$  donnent :

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

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

$$P_{el} = \frac{E_{el}}{t} = \frac{U \cdot Q}{t} = \frac{U \cdot I \cdot t}{t} = U \cdot I \qquad \Rightarrow \quad \boxed{P_{el} = U \cdot I}$$

### Unité alternative pour l'énergie électrique :

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

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

## Tarifs naturstrom

Valables à partir du 1<sup>er</sup> septembre 2018

### Conditions tarifaires pour les clients résidentiels basse tension sans enregistrement de la puissance

#### Tarifs intégrés **mono** résidentiels (100% énergie renouvelable)

naturstrom	Prime mensuelle <sup>1)</sup>	Remise mensuelle		Prime mensuelle avec remise	Frais d'utilisation réseau	Prix de l'énergie électrique		Prix intégré	
		Domiciliation	e.connect			€/kWh	€/kWh		
Réseau	€/mois	€/mois	€/mois	€/mois	€/kWh	€/kWh	€/kWh	€/kWh	
Creos <sup>2)</sup>	4,00	-1,00	-1,50	1,50	0,05010	+	0,05446	=	0,10456
Mersch/Esch-sur-Alzette	4,00	-1,00	-0,50	2,50	0,05010	+	0,05446	=	0,10456

#### Tarifs intégrés **double** résidentiels (100% énergie renouvelable)

naturstrom	Prime mensuelle <sup>1)</sup>	Remise mensuelle		Prime mensuelle avec remise	Frais d'utilisation réseau	Prix de l'énergie électrique		Prix intégré			
		Domiciliation	e.connect			Jour <sup>3)</sup>	Nuit <sup>3)</sup>	Jour <sup>3)</sup>	Nuit <sup>3)</sup>		
Réseau	€/mois	€/mois	€/mois	€/mois	€/kWh	€/kWh	€/kWh	€/kWh	€/kWh		
Creos <sup>2)</sup>	4,00	-1,00	-1,50	1,50	0,05010	+	0,05706	0,04476	=	0,10716	0,09486
Mersch/Esch-sur-Alzette	4,00	-1,00	-0,50	2,50	0,05010	+	0,05706	0,04476	=	0,10716	0,09486

1) N'inclut pas la redevance mensuelle fixe pour l'accès au réseau basse tension (voir fiche redevance mensuelle fixe pour l'accès réseau en verso de page)

2) Hors réseau Steinfort

3) Période de jour: 6h00 à 22h00, période de nuit: 22h00 à 6h00

■ **As-tu compris ?**

45. Expliquer la notion de puissance électrique. Expliciter le lien entre puissance, énergie et temps à l'aide des unités SI.
46. Etablir la relation  $P_{el} = U \cdot I$  à partir des définitions de la tension et de l'intensité du courant. Expliciter le lien entre puissance, tension et intensité du courant à l'aide des unités SI.
47. La centrale nucléaire de Cattenom comprend 4 réacteurs dont chacun a 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.
48. La consommation électrique d'un ménage s'élève en moyenne à 300 kWh par mois.
- Evaluer les frais annuels pour ce ménage sachant que le prix de l'électricité est de 0,12 €/kWh.
  - Estimer le nombre de ménages qui peuvent être alimentés par la centrale de Cattenom.
49. Une pile de 4,5 V alimente une petite lampe qui porte l'inscription (4,5 V ; 1 W).
- Décrire toutes les transformations d'énergie qui ont lieu.
  - Que vaut la tension aux bornes de la lampe ? Justifier !
  - Que vaut l'intensité du courant dans la lampe ? Et dans la pile ?
  - Combien d'énergie électrique est consommée par la lampe en 5 minutes ?
  - Combien d'électrons ont traversé la lampe pendant ce temps ?
50. Le moteur des nouvelles locomotives électriques de la CFL fonctionne sous 15 kV et affiche 3MW de puissance électrique à plein régime.
- Déterminer l'intensité du courant qui alimente le moteur à plein régime.
  - Quelle quantité de charge électrique traverse le moteur pendant une heure ?
  - Evaluer la quantité d'énergie électrique nécessaire pour un trajet Luxembourg - Paris qui dure environ 4 h.
  - Une fois arrivé à Paris, sous quelle forme retrouve-t-on l'énergie électrique reçue par le moteur ?