

# LES ONDES

Une pierre tombant sur la surface d'un étang provoque des rides circulaires qui se propagent à la surface de l'eau: ce sont des ondes mécaniques. Un tremblement de terre engendre des ondes sismiques parfois dévastatrices.

Les vagues de houle qui se propagent à la surface de la mer accostent périodiquement le rivage. Leur période est en général inférieure à 30 secondes et, le long d'une côte rectiligne, elles sont régulièrement espacées.

La marée est un phénomène ondulatoire qui se propage à la surface des océans soumis à l'action gravitationnelle de la Lune et du Soleil.

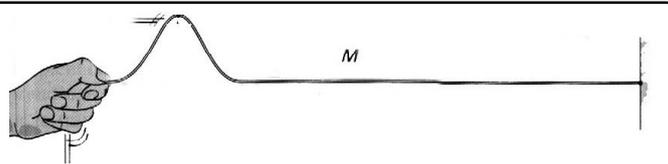
Qu'est-ce qu'une onde ?

## 1. PROPAGATION D'UNE PERTURBATION DANS UN MILIEU A UNE DIMENSION.

### 1.1. PROPAGATION D'UNE PERTURBATION TRANSVERSAL

#### Dispositif.

Attacher une extrémité d'une corde élastique à un support fixe.  
Tendre la corde et tenir l'autre extrémité à la main.  
Imposer une perturbation du côté de l'extrémité tenue à la main.  
Lâcher et observer l'aspect de la corde.



#### Observations.

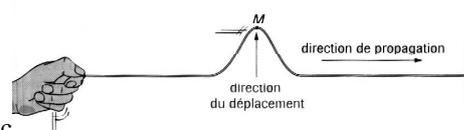
La perturbation se propage le long de la corde, d'une extrémité à l'autre.

#### Interprétation.

Une onde mécanique a été transmise le long de la corde: on parle d'onde progressive avec un transfert d'énergie mécanique.

Le milieu de propagation est la corde. On dit qu'il s'agit d'un milieu à une dimension ou milieu unidimensionnel. Ce milieu est élastique parce qu'il retrouve son état initial après avoir été temporairement déformé. La direction de propagation de l'onde est celle de la corde. Le point M se déplace perpendiculairement à la corde avant de retrouver son état d'équilibre: on dit que l'onde est transversale.

Un point de la corde se déplace perpendiculairement à l'axe horizontal avant de revenir à sa position d'équilibre: on dit qu'il n'y a pas de transport de matière.

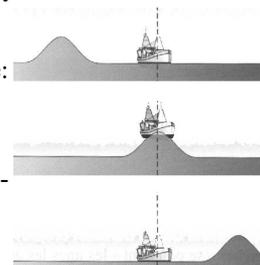


#### Définition.

Une onde est transversale lorsque le déplacement des points du milieu de propagation s'effectue perpendiculairement à sa direction de propagation.

#### Exemple.

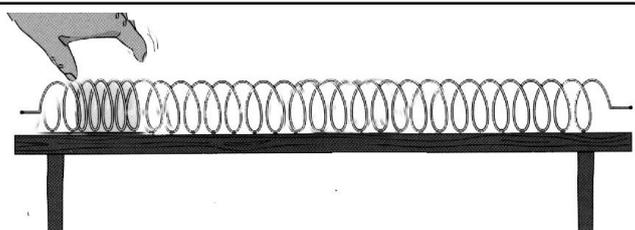
On observe une vague en coupe. Le bateau subit la perturbation et, finalement ne s'est pas déplacé par rapport à la surface de l'eau.



### 1.2. PROPAGATION D'UNE PERTURBATION LONGITUDINALE.

#### Dispositif.

Tendre un ressort sur une table horizontale.  
Avec la main, comprimer quelques spires à l'une des extrémités.  
Lâcher et observer l'aspect du ressort.



#### Observation.

La perturbation se propage le long du ressort, d'une extrémité à l'autre sans transport de matière. Localement les spires du ressort se déplacent au passage de la perturbation MAIS elles reprennent leurs positions initiales après le passage de l'onde.

#### Interprétation.

Une onde mécanique a été transmise le long du ressort: on dit qu'il y a un transfert d'énergie mécanique.

Le milieu de propagation est unidimensionnel, la direction de propagation est l'axe du ressort: on dit que l'onde est longitudinale.

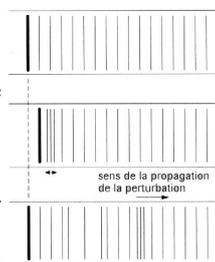
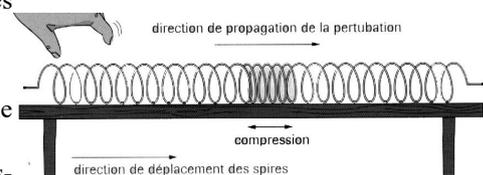
Une spire du ressort se déplace parallèlement à l'axe du ressort avant de revenir à sa position d'équilibre: on dit qu'il n'y a pas de transport de matière.

#### Définition.

Une onde mécanique est longitudinale lorsque le déplacement des points du milieu de propagation s'effectue parallèlement à sa direction de propagation.

#### Exemple.

Une onde sonore est une onde longitudinale: une couche d'air subit un petit déplacement qui se transmet progressivement aux couches voisines car les couches «se poussent» les unes des autres dans la direction de propagation. Ce déplacement des couches d'air s'accompagne d'une variation locale de la pression et une zone de compression de l'air se déplace dans le milieu. A cette compression succède une dilatation et c'est une zone de compression-dilatation qui se propage.



## 2. DEFINITIONS.

### 2.1. DEFINITION D'UNE ONDE MECANIQUE

Dans tous les exemples précédents, un point du milieu matériel atteint par la perturbation subit un déplacement et revient à sa position initiale. La perturbation se propage par transfert d'énergie mais sans transport de matière.

On appelle onde mécanique le phénomène de propagation d'une perturbation **dans un milieu matériel** sans transport de matière, mais avec transfert d'énergie.

Par exemple: le son est une onde mécanique, car les ondes sonores ont absolument besoin d'un milieu matériel (solide, liquide ou gaz) pour se propager. Le son est une vibration qui se propage dans l'air, dans les solides et les liquides MAIS ne se propage pas dans le vide.

**Remarque:** On utilise l'expression onde progressive pour bien marquer le fait que la perturbation progresse dans un milieu élastique.

Les ondes lumineuses ne sont pas des ondes mécaniques. Des ondes oui. Mais PAS mécaniques. Pourquoi ?

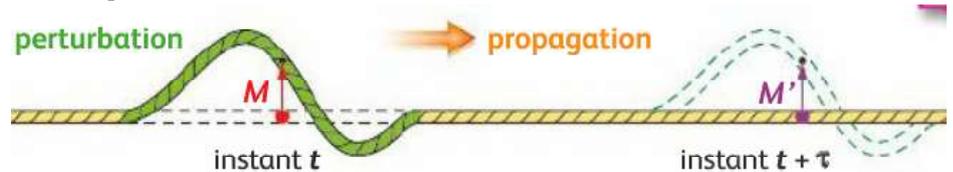
Car il y a bien propagation d'une onde lumineuse entre la source lumineuse et le récepteur MAIS il n'y a pas absolument besoin d'un milieu matériel pour que l'onde lumineuse se propage. Ainsi, comme pour l'exemple des ondes sonores qui sont des ondes mécaniques, la lumière se propage dans les milieux matériels comme l'air, les liquides et les solides MAIS la lumière peut aussi (contrairement aux ondes sonores) se propager dans le vide qui n'est pas un milieu matériel. On parle donc d'onde NON mécanique. On le visualise bien avec la lumière des étoiles qui parvient jusqu'à nous en traversant le vide intersidéral qui nous sépare d'elles.

### 2.2. CELERITE ET RETARD D'UNE ONDE.

La propagation d'une perturbation dans un milieu s'effectue avec une certaine «vitesse». Mais, puisque la propagation s'effectue sans transport de matière, on préfère utiliser le mot célérité.

La célérité  $c$  d'une onde entre deux points  $M$  et  $M'$  du milieu de propagation tel que le point  $M'$  soit atteint par la perturbation après une durée  $\tau$  du parcours est le rapport entre la distance  $MM'$  parcourue

par l'onde et le retard  $\tau$ .

$$c = \frac{MM'}{\tau}$$


Les célérités d'une onde le long d'une corde élastique ou à la surface de l'eau peuvent aller de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  à quelques dizaines de  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

#### Remarque.

Il convient de bien distinguer la célérité de l'onde, de la vitesse d'un point du milieu au passage de l'onde. On parle d'élongation la position d'un point du milieu atteint par une perturbation, par rapport à sa position au repos.

#### Propriétés

Des expériences élaborées confirment que la célérité dépend:

- **du type d'ondes:** Dans l'eau, les ondes de surface bidimensionnelles et transversales ne se propagent pas à la même vitesse que les ondes acoustiques longitudinales et tridimensionnelles se propageant dans tout le volume du liquide.
- **du milieu de propagation:** Tant que l'amplitude du signal reste faible, la célérité est indépendante de la forme et de l'amplitude du signal. La célérité est caractéristique du milieu qui est dit alors linéaire.



Par exemple, la célérité du son dans l'air, à  $15^\circ\text{C}$  et sous la pression de  $1,0 \text{ bar}$  est voisine de  $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Cette célérité est:

- est différente dans un autre milieu de propagation (voir tableau)
- dans l'air augmente lorsque la température croît. Ainsi dans l'air à  $0^\circ\text{C}$ , la célérité du son est de  $331 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

matériau	air	hélium	hydrogène	eau	glycérine	cuivre	brique	bois	acier	aluminium	granit
célérité (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	340	970	1 230	1 500	2 000	3 600	3 700	3 800	5 000	5 100	6 000

- Autre exemple, la célérité d'une onde le long d'une corde dépend de la masse linéique et de la tension de la corde.
- **Une valeur de célérité à connaître:** La célérité de la lumière dans le vide est une valeur qui ne sera pas donnée dans les énoncés de bac. Il faut la connaître:  $c = 300\,000 \text{ km/s}$ . Cela signifie que la lumière parcourt  $300\,000 \text{ km}$  (à peu près la distance Terre-Lune) en une seconde. C'est une célérité infranchissable. Malgré son caractère énorme, il faut malgré tout  $8 \text{ min}$  et  $19 \text{ secondes}$ , pour que la lumière issue du Soleil parvienne jusqu'à nous.

### 3. ONDE PROGRESSIVE PERIODIQUE LE LONG D'UNE CORDE.

On rappelle la période  $T$  d'un phénomène est la durée qui sépare la répétition à l'identique de ce phénomène.

**Exemples:**

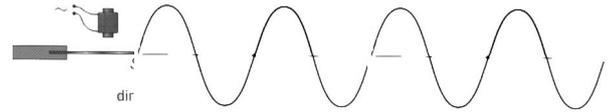
- La Terre a une période de rotation sur elle-même de 24 h.
- J'ai cours de physique tous les Jeudis matins donc à une période temporelle d'une semaine.
- Papa Noel revient me voir à une période temporelle d'un an.

Dans le cas d'une oscillation, la période  $T$  est la durée d'une oscillation complète.

On déduit de la période  $T$ , la fréquence  $f$  par la relation  $f = \frac{1}{T}$ . Elle est numériquement égale au nombre d'oscillations complètes effectuées en 1,0 s. L'unité est le Hertz (Hz).

**Dispositif.**

La source est un vibreur. Un vibreur est constitué d'une lame dont l'une des extrémités est et dont l'autre est placée devant un électroaimant alimenté en courant alternatif.



Lorsque l'électroaimant fonctionne, l'extrémité S de la lame vibre; elle effectue des oscillations périodiques autour de sa position d'équilibre.

On attache l'extrémité S de la lame à une corde élastique et on fait vibrer le point S.

Les points de la corde ont un mouvement trop rapide; on peut étudier ce mouvement en utilisant un stroboscope. Cet appareil délivre des éclairs très brefs séparés par une durée constante et réglable; il permet d'immobiliser un phénomène vibratoire ou de le ralentir.

**Observation 1.**

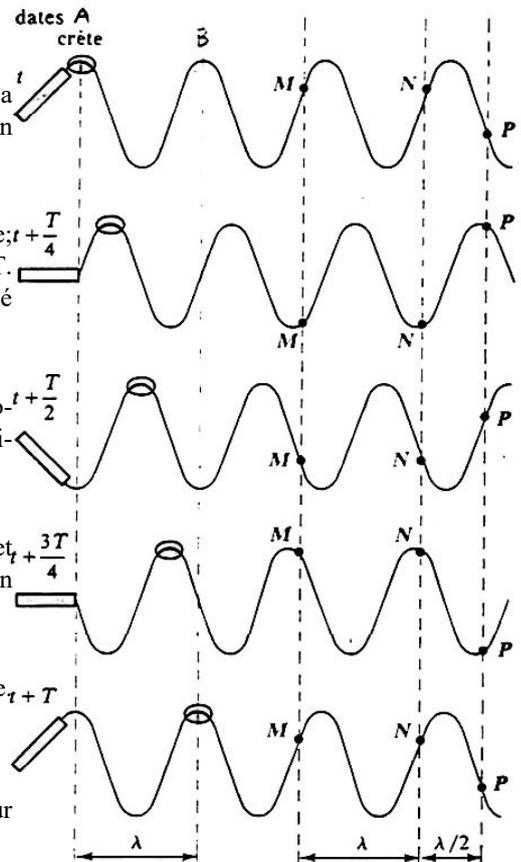
Il est possible d'observer, en éclairage stroboscopique, l'ensemble des points de la corde immobiles. Et l'aspect de la corde est celui d'une sinusoïde.

**Interprétation 1.**

Lorsqu'on observe la corde immobile, tous ses points effectuent, entre deux éclairs consécutifs, une ou plusieurs oscillations complètes et ils apparaissent toujours dans la même position. En conséquence, tous les points de la corde vibrent avec la même fréquence que la source.

**Figure ci-contre.**

Le point A suit le mouvement de la lame vibrante. A l'instant  $t$ , le point A se trouve sur la crête. Au fil du temps, le point A suit le mouvement de la lame et retrouve une position sur la crête à l'instant  $t + T$ .  $T$  est la période temporelle.



**Définition 1.**

On peut dire également qu'il apparaît une première périodicité: la périodicité temporelle; la source et les points atteints par l'onde vibrent avec la même période  $T$ . La durée qui sépare l'arrivée de deux perturbations successives en un point est appelé période temporelle  $T$ .

**Observation 2.**

En utilisant l'éclairage stroboscopique fournissant un mouvement au ralenti, on observe que certains points ont exactement le même mouvement: ils passent à leur position d'équilibre ou à leur écartement maximal aux mêmes instants.

**Interprétation 2.**

On dit qu'ils vibrent en phase. Ils sont régulièrement répartis sur la corde; on note  $\lambda$  et on appelle longueur d'onde la distance séparant deux points consécutifs vibrant en phase.

**Figure ci-contre.**

Les points M et N ont exactement le même mouvement... On parle de période spatiale.

**Définition 2.**

On peut dire également qu'il apparaît une seconde périodicité: la périodicité spatiale. C'est la distance qui sépare deux perturbations successives. On l'appelle longueur d'onde et on la note  $\lambda$ . Elle s'exprime en mètre.

**Relation fondamentale.**

La relation qui relie les deux périodes d'une onde est la célérité:  $c = \frac{\lambda}{T}$

On peut donc définir la longueur d'onde  $\lambda$  (en mètre) comme la distance parcourue par l'onde durant une période  $T$  (en seconde).

Après avoir étudié de manière générale la notion d'onde, nous allons nous intéresser à deux familles d'onde: les ondes lumineuses et les ondes sonores.

#### 4. ONDE SONORE

Le son perçu par l'oreille humaine est une onde. Une série de compression et dilatation de l'air de proche en proche permet la transmission de l'onde sonore jusqu'à l'oreille humaine, qui est un capteur très sensible aux vibrations.

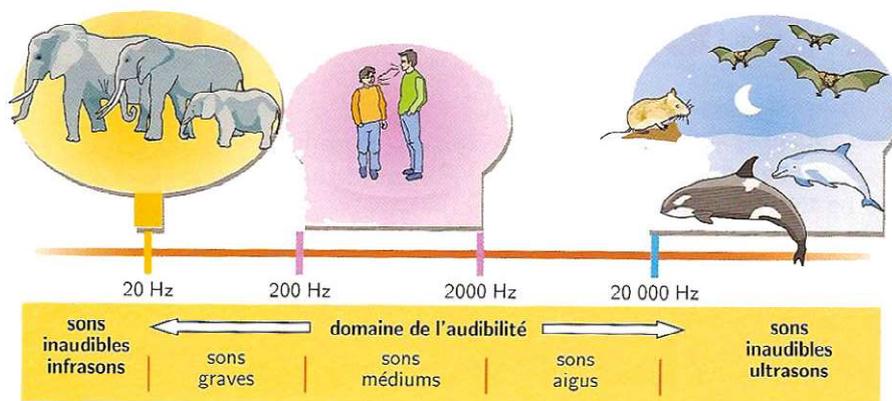
De plus on parle d'une onde:

- mécanique (le son ne se propage pas dans le vide)
- longitudinale (la compression et dilatation des tranches d'air se fait parallèlement à l'axe de propagation de l'onde sonore).

L'oreille humaine ne peut entendre un son, même suffisamment fort, que si la fréquence de celui-ci est comprise entre deux valeurs délimitant le domaine des fréquences sons audibles: l'oreille humaine perçoit les sons des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz environ.

- Les sons de fréquence inférieure à 20 Hz sont appelées infrasons;
- Les sons de fréquence supérieure à 20 kHz sont appelées ultrasons.

A noter que ces fréquences dépendent des personnes (certaines oreilles sont «plus» entraînées que d'autres, certaines sont abîmées suite à des expositions à des bruits intenses ...) mais aussi de la fréquence du son.



La célérité des ondes sonores dépend du milieu traversé. On doit retenir en terminale:

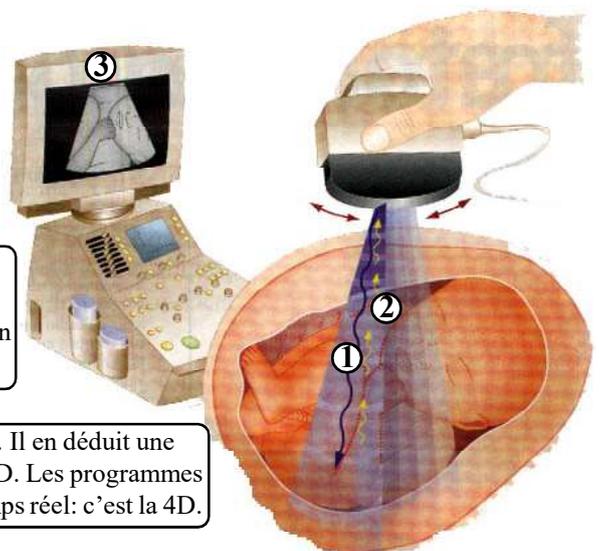
- onde sonore se propage dans l'air à environ 340 m/s.
- cette célérité augmente en fonction de la densité du milieu. Ainsi une onde sonore se propage plus vite dans solide que dans un liquide que dans un gaz. En effet, un milieu solide est plus compact et dense qu'un milieu gazeux.

Une des applications des ondes ultrasonores est l'échographie:

**1** La sonde envoie un faisceau d'ultrasons à travers le ventre de la mère. Le balayage du faisceau est latéral pour obtenir une image en 2D. Latéral et transversal pour une image volumique en 3D.

**2** Les ultrasons émis se réfléchissent différemment selon les tissus traversés. La sonde devient réceptrice et enregistre l'écho renvoyé. La distance des points est calculé en fonction du temps mis entre l'émission et la réception.

**3** Le logiciel de traitement de l'image assemble les points obtenus. Il en déduit une image en coupe pour l'échographie en 2D et en volume pour la 3D. Les programmes les plus performants traitent l'information 3D quasiment en temps réel: c'est la 4D.



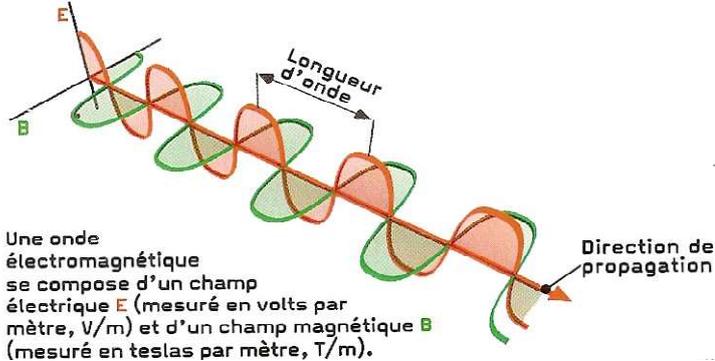
## 5. ONDE LUMINEUSE

Le rayonnement est un phénomène physique qui peut être décrit:

- de manière **particulaire** par la propagation de photons.
- OU de manière **ondulatoire** par la propagation d'une onde électromagnétique.

Nous vivons en permanence dans un bain d'ondes, sans même nous en apercevoir. Si les ondes électromagnétiques font à tel point partie de tous les aspects de notre quotidien, c'est parce qu'elles transportent la lumière, la chaleur, et, d'une façon générale, l'énergie sous toutes ses formes.

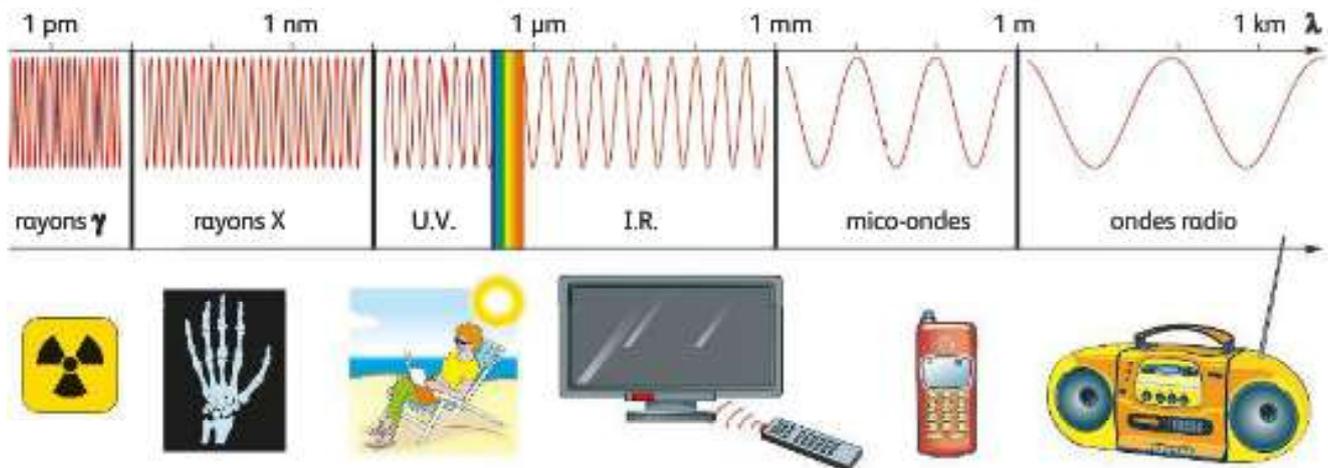
Qu'entendons-nous par onde électromagnétique ? Difficile en terminale. Ce n'est pas la propagation d'une perturbation comme défini dans le début du cours.



C'est une vibration dans l'espace, comme une vague sur la mer. Mais qu'est-ce qui vibre ? Et bien, un champ magnétique et un champ électrique perpendiculaires l'une à l'autre. C'est par l'intermédiaire du champ électrique que les ondes interagissent avec la matière. C'est lui qui génère le courant électrique dans l'antenne d'une radio, ou qui excite les cellules de la vision de l'œil, etc ... Voilà pourquoi, lorsqu'on parle des ondes, on considère essentiellement le champ électrique.

Le spectre des ondes électromagnétiques est composé d'une infinité de radiations. Chaque radiation est caractérisée par sa longueur d'onde  $\lambda$  ou par sa fréquence  $\nu$ .

Le spectre des ondes électromagnétiques est découpé arbitrairement en divers domaines, des rayons gamma aux ondes radio.



Quelques valeurs à retenir en terminale:

- domaine visible par l'œil humain est compris pour des longueurs d'onde entre 400 nm et 800 nm
- ce domaine visible s'étend du violet ( $\lambda = 400\text{nm}$ ) au rouge ( $\lambda = 800\text{nm}$ ) en passant par tout le spectre de l'arc en ciel.
- dans le vide les ondes lumineuses se propagent à la célérité  $c = 300\,000\text{ km/s}$  (valeur souvent utile dans les exercices de bac MAIS non données par l'énoncé !).