

# 1 Oscillateurs

Un oscillateur est tout système qui oscille, c'est-à-dire qui va et qui vient, qui est dans un mouvement d'aller-retour. Il peut s'agir d'un pendule, d'une balançoire, d'un ressort élastique, d'une corde vibrante (guitare, violon, ...), ...

## 1.1 Le pendule

Le pendule est un système qui convertit de l'énergie potentielle en énergie cinétique et vice-versa.

Arrivé à son point haut, il a son énergie potentielle au maximum, tandis que son énergie cinétique est nulle. A son point bas, son énergie potentielle est nulle et son énergie cinétique est maximum.

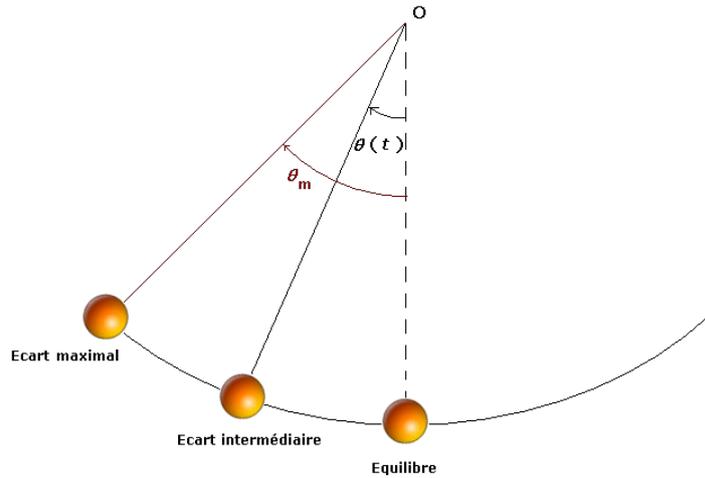


FIGURE 1 – Un pendule.

S'il l'on représente la hauteur du pendule en fonction du temps, on obtient un graphique qui est clairement une fonction sinusoïdale.

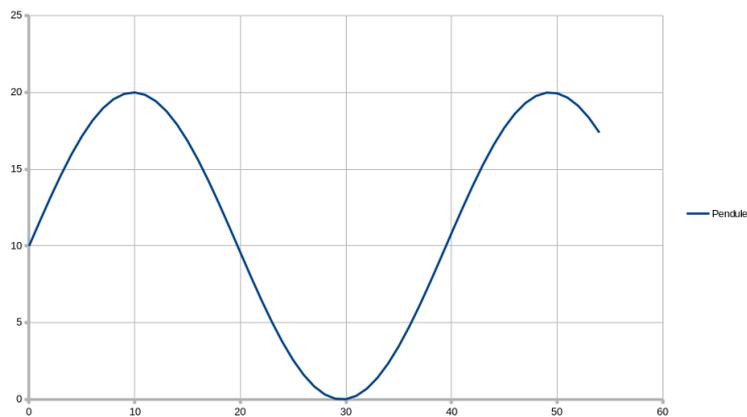


FIGURE 2 – Évolution de la hauteur avec le temps d'un pendule.

La période ( $T$ ) est le temps nécessaire à un oscillateur pour retourner à son état initial.

La fréquence ( $f$ ) est le nombre de cycle par seconde effectué par un oscillateur.

$$f = \frac{1}{T}$$

## 1.2 Atténuation

Tout oscillateur du fait des frottements (notamment avec l'air) va diminuer de mouvement avec le temps. On dit qu'il s'atténue. L'évolution de l'oscillation va donc devenir décroissante. Cependant, il faut bien remarquer que la période, et donc la fréquence, restera constante.

## 1.3 Amplification

Si par contre, chaque fois que le pendule atteint son point haut, on lui imprime une force opposée, on amplifiera son mouvement. Le pendule ira donc plus haut.

Si la force opposée est appliquée au point bas, le pendule sera freiné et finira par s'arrêter.

Cependant, il faut bien remarquer que, dans tous les cas, la période restera constante.

## 2 Le concept d'onde

Une onde pourrait être défini comme **un oscillateur en déplacement**. Il s'agit d'une variation locale d'un facteur quelconque.

Nous verrons 3 variations de facteur comme exemple d'ondes :

- la hauteur d'eau (la vague);
- la compression de la matière (ondes mécaniques, les sons);
- le champ électromagnétique (ondes électromagnétiques, la lumière).

### 2.1 Un caillou dans un plan d'eau

L'exemple le plus simple est l'effet de l'impact d'un caillou dans un plan d'eau. Lorsque que l'on effectue cette expérience, on observe des vagues qui partent de façon concentrique au point d'impact. Ces vagues sont des variations périodiques de la hauteur d'eau, c-à-d des ondes.

Il est important de remarquer que seul l'onde se déplace et non l'eau. Si un bouchon est posé à proximité, il monte et il descend, mais il ne se déplace pas dans le sens de déplacement de l'onde.

C'est une caractéristique importante de toutes les ondes, **elle transporte de l'énergie et non de la matière**.

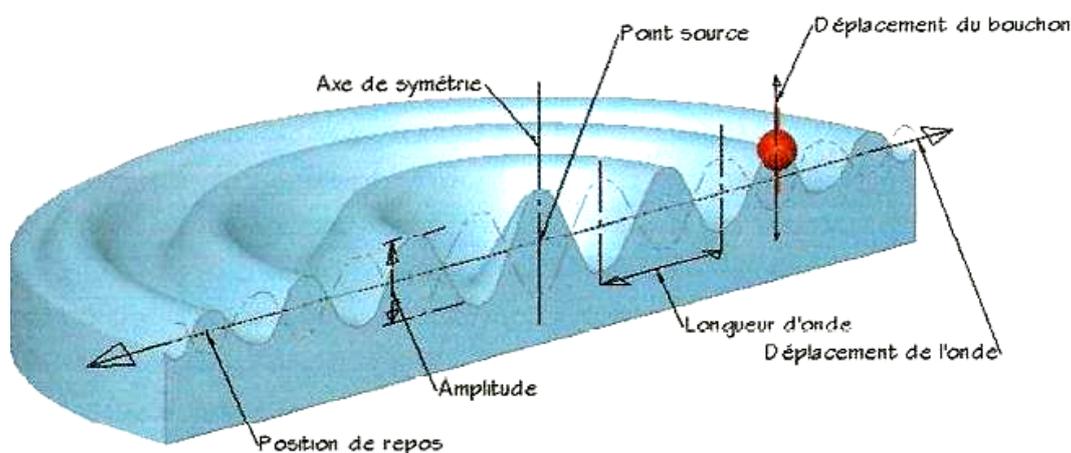


FIGURE 3 – L'onde de choc d'un caillou dans un plan d'eau.

### 2.2 Caractéristiques

La longueur d'onde est la distance entre les deux valeurs maximums d'une variation périodique.

La période est le temps nécessaire pour la propagation d'une onde sur la distance d'une longueur d'onde.

La vitesse de propagation d'une onde est donc le rapport entre la longueur d'onde sur sa période.

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

La fréquence d'une onde est le nombre de cycle (le nombre de maximum de « pics » atteint) par seconde. Elle correspond donc à l'inverse de la période.

$$T = \frac{1}{f}$$

La vitesse d'une onde correspond donc au produit de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) et de la fréquence ( $f$ ).

$$v = \lambda * f$$

L'amplitude est l'intensité du facteur de variation de l'onde.

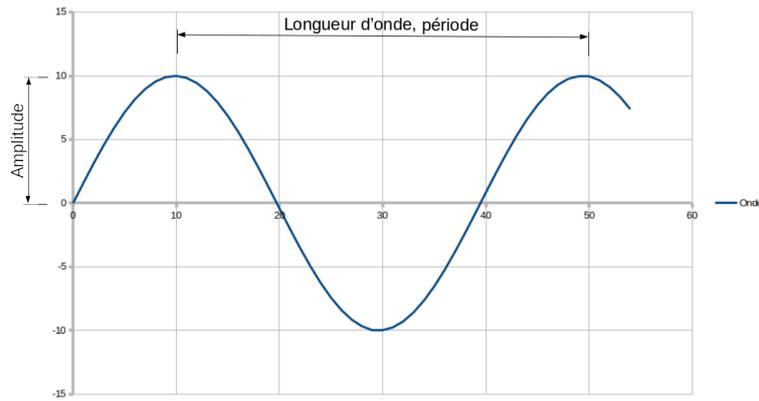


FIGURE 4 – Les caractéristiques d'une onde.

## 2.3 Mode de propagation

### 2.3.1 Ondes longitudinales

Une onde longitudinale est une onde dont la perturbation du milieu se fait dans la même direction que sa propagation.

Les ondes sonores sont des ondes sphériques longitudinales. La grandeur qui varie est la pression, et l'air est le milieu perturbé.

Les ondes sismiques sont également sphériques et longitudinales. Elles sont créées par des séismes ou des explosions.

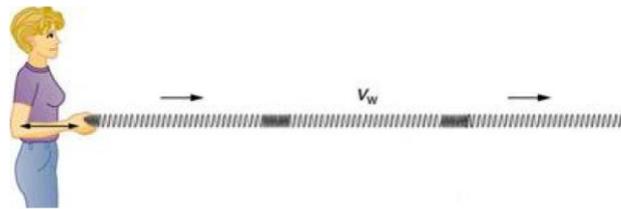


FIGURE 5 – Une onde longitudinale.

### 2.3.2 Ondes transversales

Une onde transversale est une onde dont la perturbation du milieu se fait dans l'une des directions orthogonales à celle de sa propagation.

Les vagues à la surface de l'eau sont des ondes transversales (dans 2 dimensions).

Les ondes électromagnétiques sont également des ondes transversales (dans trois dimensions).

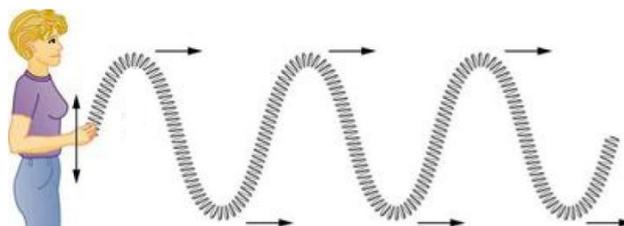


FIGURE 6 – Une onde transversale.

## 2.4 Effet Doppler-Fizeau

L'effet Doppler-Fizeau, abusivement parfois appelé simplement « effet Doppler » est le décalage de fréquence d'une onde (mécanique, acoustique, électromagnétique ou d'une autre nature) observée entre les mesures à l'émission et à la réception, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

Christian Doppler<sup>1</sup> l'a mis en évidence pour les ondes sonores, tandis que Hippolyte Fizeau<sup>2</sup> l'a mis en évidence pour la lumière.

L'effet Doppler se manifeste par exemple pour les ondes sonores dans la perception de la hauteur du son d'un moteur de voiture, ou de la sirène d'un véhicule d'urgence. Le son est différent selon que l'on se trouve à l'intérieur du véhicule (l'émetteur étant immobile par rapport au récepteur), ou que le véhicule se rapproche du récepteur (le son étant alors plus aigu) ou s'en éloigne (le son étant plus grave). Il faut cependant remarquer que la variation de la hauteur du son dans cet exemple est due à la position de l'observateur par rapport à la trajectoire du mobile.

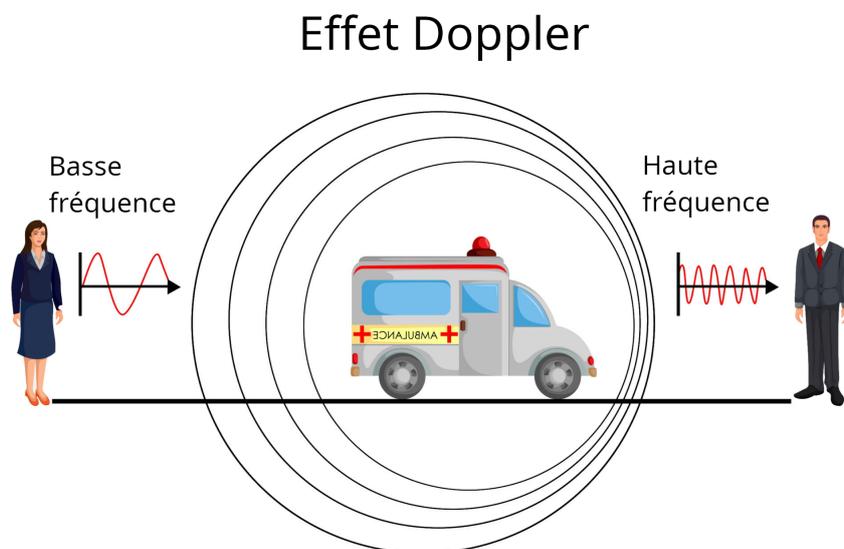


FIGURE 7 – L'effet Doppler.

Dans le cas du rayonnement électromagnétique, il apparaît que la lumière en provenance des galaxies distantes subit, en moyenne, un décalage vers le rouge proportionnel à leur distance. L'effet s'observe en moyenne : on observe des galaxies dont la lumière est plus ou moins décalée vers le rouge (ces galaxies s'éloignent donc de nous), mais aussi décalée vers le bleu, comme la galaxie d'Andromède (qui se rapproche donc de nous).

En appliquant l'hypothèse que cela provient d'un mouvement de la source, par effet Doppler-Fizeau, on en a déduit que, en moyenne, les sources s'éloignent de nous d'autant plus vite qu'elles sont déjà plus loin (ce qui n'exclut pas que certaines sources se rapprochent de nous, en raison des mouvements locaux).

1. Mathématicien et physicien autrichien 1803-1853

2. Physicien, astronome français, 1819-1896

## 2.5 Diffraction

La diffraction est le phénomène par lequel, lorsqu'une onde passe à travers une ouverture, celle-ci semble générer un nouveau front d'onde circulaire par rapport à cette ouverture.

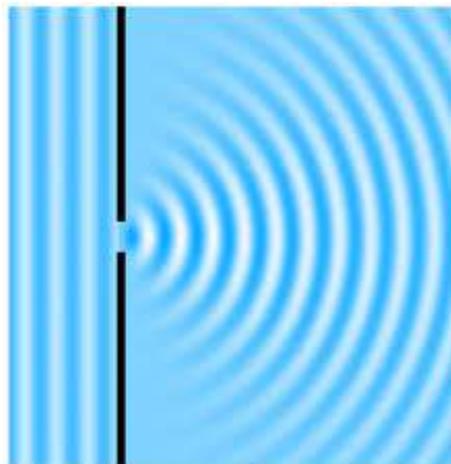


FIGURE 8 – La diffraction d'une onde.

## 2.6 Interférences, superposition d'ondes

Les interférences sont le résultat de la combinaison de 2 ondes.

Ces interférences sont influencées par :

- la concordance ou l'opposition de phase ;
- les fréquences, si les fréquences ont un multiplicateur commun, elles pourront s'amplifier ou s'atténuer ;
- les amplitudes.

### 2.6.1 Concordance de phase

Le diagramme 9 représente la superposition de 2 ondes qui n'ont pas la même période, mais qui pourtant s'amplifie. En effet, la période de l'onde 2 vaut deux fois la période de l'onde 1.

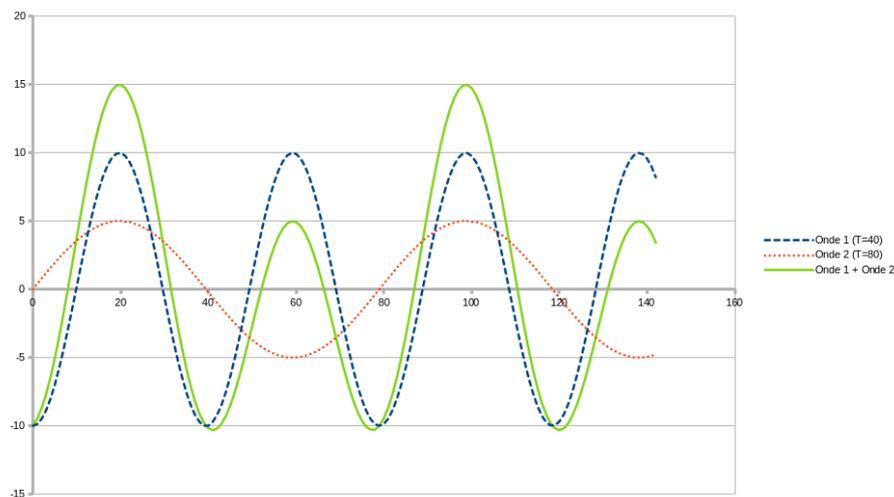


FIGURE 9 – 2 ondes générant une onde d'amplitude plus élevée.

### 2.6.2 Opposition de phase

Le diagramme 10 représente la superposition de 2 ondes qui n'ont pas la même période, mais qui s'atténue. En effet, la période de l'onde 2 vaut deux fois la période de l'onde 1 et la phase de l'onde 2 est décalée d'un facteur  $\pi$  par rapport à l'onde 1.

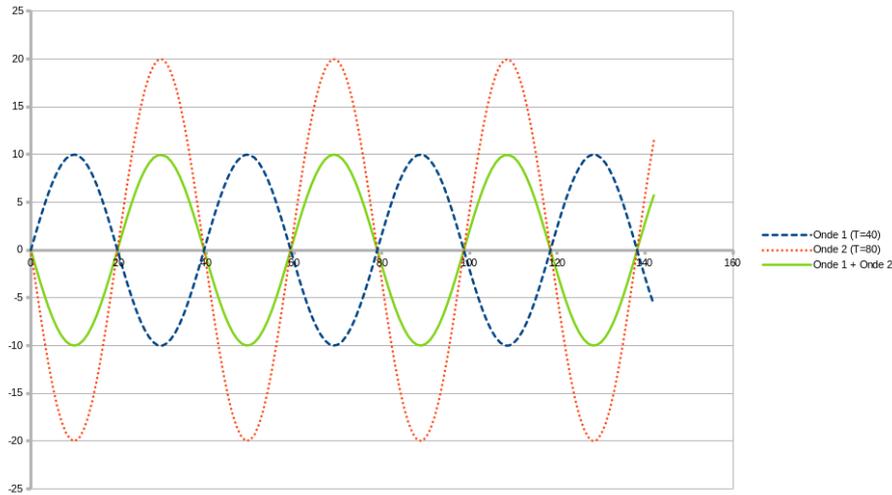


FIGURE 10 – 2 ondes générant une onde d'amplitude moins élevée.

Le diagramme 11 représente la superposition de 2 ondes qui ont exactement la même période et la même amplitude, et qui s'annulent. En effet, la phase de l'onde 2 est décalée d'un facteur  $\pi$  par rapport à l'onde 1.

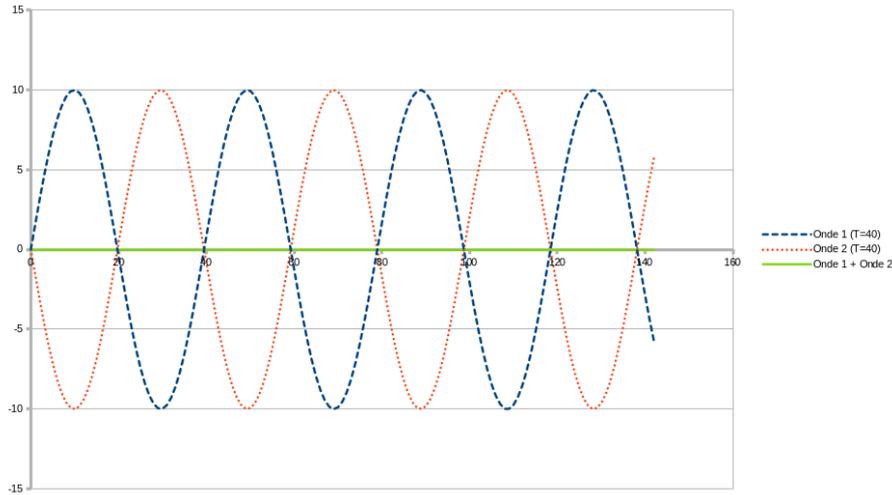


FIGURE 11 – 2 ondes s'annulant.

### 3 Les ondes mécaniques

#### 3.1 Caractéristiques

Les ondes mécaniques sont des ondes de compression de la matière. Il s'agit :

- des ondes sismiques : des ondes mécaniques se propageant dans la croûte terrestre ;
- des infra-sons : des ondes mécaniques se propageant dans l'air à une fréquence inférieure à 20 Hz ;
- des ondes sonores : des ondes mécaniques se propageant dans l'air perceptibles par l'oreille humaine à une fréquence entre à 20 Hz et 20.000 Hz ;
- des ultra-sons : des ondes mécaniques se propageant dans l'air à une fréquence supérieure à 20.000 Hz ;
- de sonars : des ondes mécaniques se propageant dans l'eau.

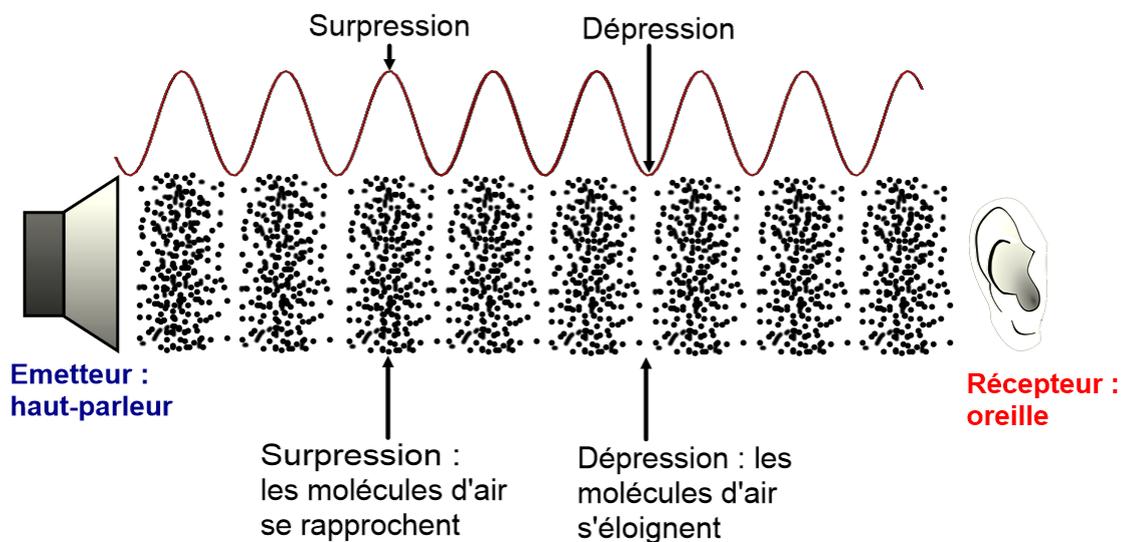


FIGURE 12 – Propagation d'une onde mécanique dans l'air(son).

#### 3.2 Milieu de propagation et vitesse

La vitesse de propagation d'une onde mécanique dépend de la matière dans laquelle elle se propage. Plus le milieu est dense (c-à-d que le rapport de la masse sur le volume est important), plus cette vitesse est élevée.

Dans l'air, cette vitesse est approximativement de 340 m/s (1224 km/h) suivant la température et la pression atmosphérique.

Dans l'eau, cette vitesse est approximativement de 1500 m/s (5400 km/h) suivant la température et la pression.

Dans les roches, cette vitesse varie entre 3000 m/s (10 800 km/h) et 6000 m/s (21 600 km/h) suivant le type de roche.

### 3.3 Intensité sonore

L'intensité sonore (ou puissance sonore) correspond à la quantité d'énergie liée à la compression de la matière par unité de temps.

#### 3.3.1 Décibel

Le décibel (dB) est un dixième de bel.<sup>3</sup>

Cette unité permet d'évaluer l'intensité d'une onde par rapport à une valeur de référence. Dans le cadre des ondes sonores, l'intensité sonore de référence correspond à un son perceptible par l'être humain d'une onde de 1000 Hz<sup>4</sup>.

$$\beta = 10 * \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Donc, chaque augmentation de 10 décibels multiplie l'intensité sonore par 10; chaque diminution de 10 décibels divise l'intensité sonore par 10.

#### 3.3.2 Risques sonores

Le tableau ci-dessous reprend les valeurs en décibels de différents environnements.

<i>Décibel</i>	<i>Environnement</i>	<i>Risque</i>
130	Avion à réaction au décollage	Douleurs
120	Voiture de course	Douleurs
110	Discothèque	Dangers
100	Moto de course	Dangers
90	Aboiements	
80	Auto à fort trafic	
70	Salle de classe	
60	Auto en trafic faible	
50	Restaurant tranquille	
40	Conversation normale	
30	Résidence tranquille	
20	Studio d'enregistrement	
10	Laboratoire d'acoustique	

FIGURE 13 – Décibels et dangers

En réalité, l'oreille humaine ne développe pas la même sensibilité à toutes les fréquences, comme on peut l'observer dans le graphique ci-dessous représentant la zone d'audibilité moyenne de l'oreille humaine (entre 0 et 30 ans). Ainsi, nous n'entendons que très peu les sons de basse fréquence, et sous les 20 Hz (infrasons), les sons sont carrément inaudibles. La même chose se produit pour les sons de haute fréquence : leur perception diminue dès 4 kHz et au-delà de 20 kHz (ultrasons), ils sont également inaudibles. Le maximum de sensibilité se situe entre 2 kHz et 4 kHz.

Avec l'âge et les comportements à risque, la zone d'audibilité tend à se réduire, surtout dans les hautes fréquences. Les conséquences d'une exposition à des sons ou des bruits trop intenses vont d'une simple fatigue auditive se traduisant par une légère baisse de l'audition, à une sensation d'oreille ouatée ou à des acouphènes (sifflements, bourdonnements dans les oreilles en absence de sources auditives) éventuellement permanents, pour aboutir à la surdité aux fréquences élevés, puis aux basses fréquences. Des campagnes de sensibilisation sont régulièrement menées auprès du public des festivals, des concerts ou de tout événement festif et musical. Que ce soit pour ses loisirs ou sur le lieu de

3. en l'honneur de Alexander Bell, phonéticien écossais, à l'origine du développement du télégraphe aux États-Unis à la fin du XIXème siècle

4. L'intensité de référence correspond à  $10^{-12}W/m^2$ .

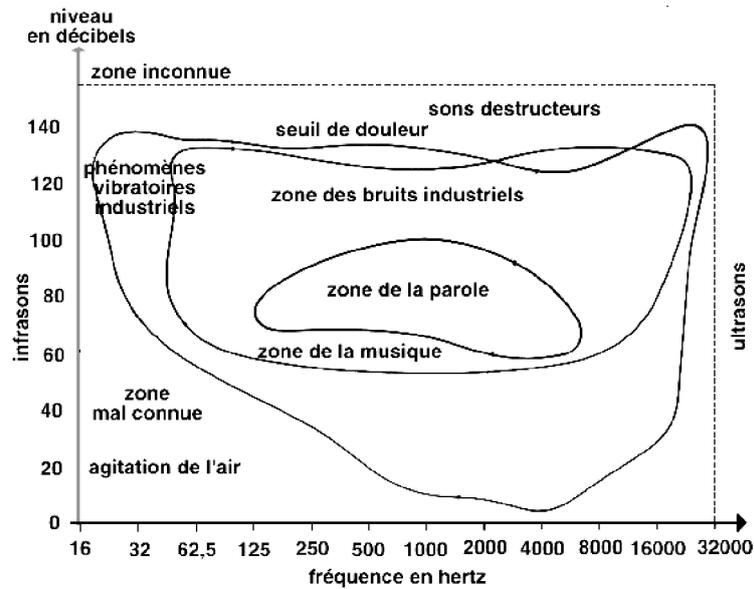


FIGURE 14 – Rapport entre décibels et fréquence.

travail, toute personne exposée trop longtemps à une intensité sonore élevée court le risque d'altérer durablement ses capacités auditives.

Certaines normes européennes fixent des plafonds d'intensités pour les écouteurs (100 dB) et pour les discothèques ou les concerts (105 dB), mais il faut également limiter les durées d'exposition. Si l'exposition à des intensités de moins 80 dB est considérée sans danger, l'usage d'écouteurs devrait être limitée à une heure par jour à 89 dB, à 30 minutes à 92 dB, à 15 minutes à 95 dB, à 5 minutes à 100 dB de manière à ne pas produire de troubles irréversibles. Les expositions à des intensités sonores élevées doivent être brèves et entrecoupées de temps de repos.

### 3.4 Applications technologiques

#### 3.4.1 Musique : résonance, harmoniques et amplification

Les instruments de musique émettent dans une plage de fréquences qui leur est propre (cfr. figure 15). Les notes de musique sont catalogués en octave. On peut donc descendre une note d'un octave (la même note avec un son plus grave) ou monter d'un octave (la même note avec un son plus aigu). Le « La » peut donc avoir les fréquences suivantes : 25, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz, 800 Hz, 1.600 Hz, 3.200 Hz, 6.400 Hz ou 12.800 Hz. On constate bien qu'un changement d'octave consiste à une multiplication par deux ou une division par deux d'une fréquence initiale.

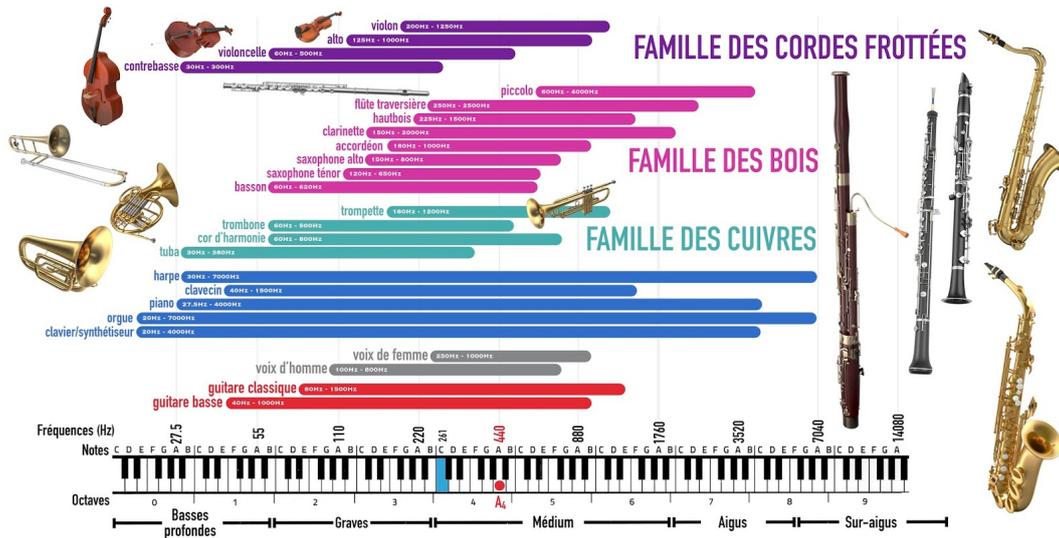


FIGURE 15 – Fréquences de différents instruments.

#### 3.4.2 Sonars

Les sonars sont des appareils de détection sous-marins. Ils émettent des ultrasons qui vont ricocher sur les fonds et tout autre objet présent. L'onde réfléchiée par l'objet est détectée et permet de déterminer la distance de l'objet. Les sonars peuvent permettre de déterminer le profil du fond sous-marin (écho-sondeur), la présence de bancs de poissons (pour les pêcheurs) ou la présence de sous-marin (pour les militaires).

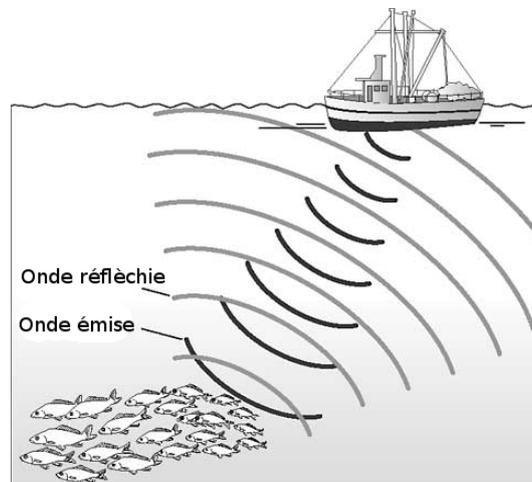


FIGURE 16 – Détection des bancs de poissons grâce au sonar.

### 3.4.3 Échographie

L'échographie est une technique d'imagerie médicale utilisant aussi les ultrasons. D'une façon analogue aux sonars, elle permet de donner une image des corps mous (muscles, vaisseaux sanguins, sac amniotique, ...). Son utilisation la plus fréquente se fait en diagnostic prénatal vers le 3ème et 6ème mois de grossesse. Une sonde est placée sur le ventre de la mère. Un gel permet la bonne transmission des ultrasons envoyés et réfléchis sur le fœtus.

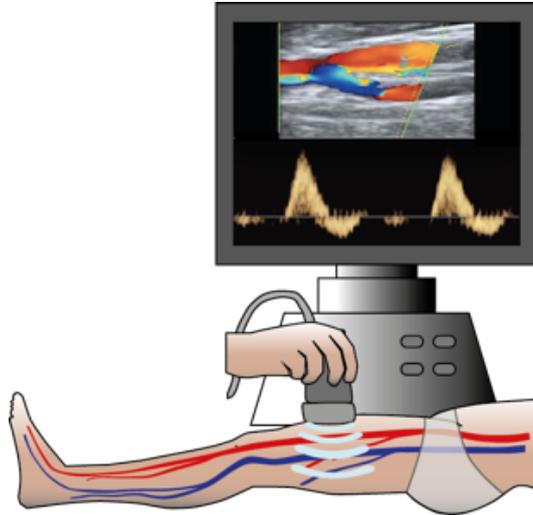


FIGURE 17 – Echo-doppler en contexte médical.

### 3.4.4 Techniques sismiques

Les ondes sismiques sont des ondes mécaniques se transmettant à travers la roche suite aux chocs de rupture de la croûte terrestre. L'étude de la sismologie a permis de grandes évolutions. D'une part, cette étude a permis une meilleure prévision des tremblements de terre et des éruptions volcaniques. D'autre part, grâce à des ondes sismiques parfois provoquées (explosions), les différentes couches de la Terre (croûte terrestre, manteau, noyau) ont pu être localisée et analysée en terme de densité.

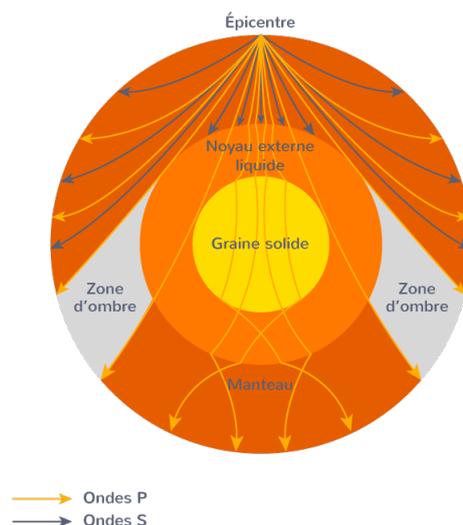


FIGURE 18 – Les ondes sismiques suite à un tremblement de terre

## 4 Les ondes électromagnétiques

### 4.1 Le caractère corpusculaire de la lumière

Les expériences de réflexion et de réfraction montre bien que la lumière se déplace en ligne droite. La réflexion est la déviation d'un rayon lumineux sur une surface réfléchissante. La réfraction est la déviation d'un rayon lumineux lorsque qu'il change de milieu (de l'air dans l'eau, par exemple).

On pourrait donc penser que la lumière se comporte comme un corps qui « rebondit » sur les surfaces (réflexion) ou dont la direction est modifiée en changeant de milieu (réfraction). On appelle cette particule, un **photon**.

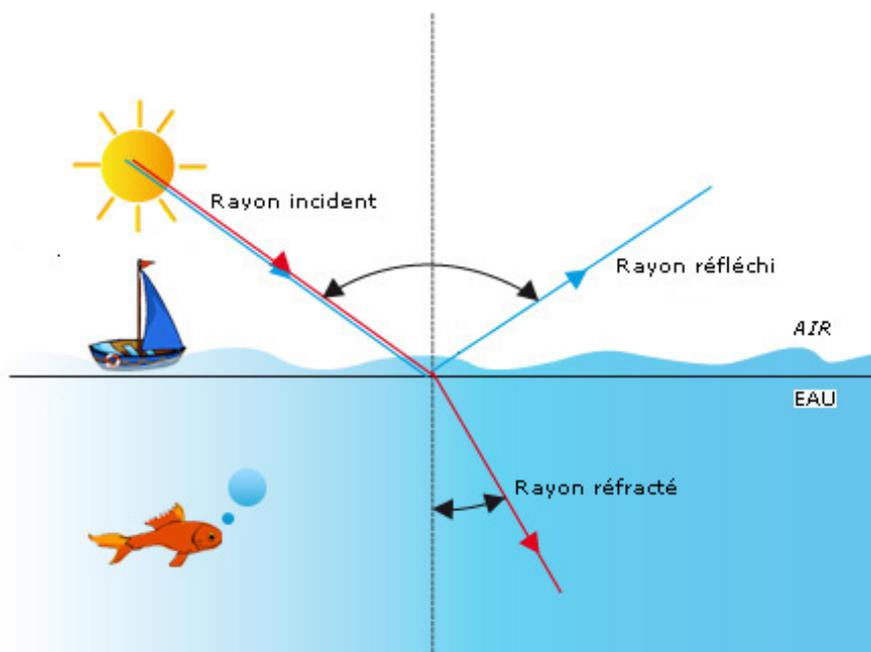


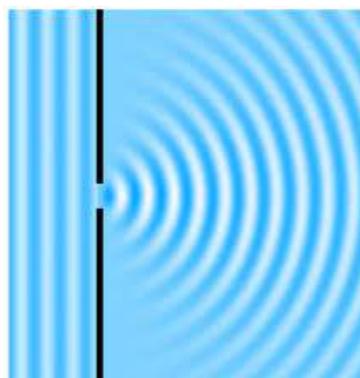
FIGURE 19 – Réflexion et réfraction de la lumière.

### 4.2 Le caractère ondulatoire de la lumière

Lorsque qu'une onde passe par un passage dont la distance est plus petite ou proche de la longueur d'onde, on peut observer que le passage se comporte comme un générateur d'une nouvelle onde de même longueur. C'est le phénomène de **diffraction**.



(a) Photo de vagues générant une diffraction.



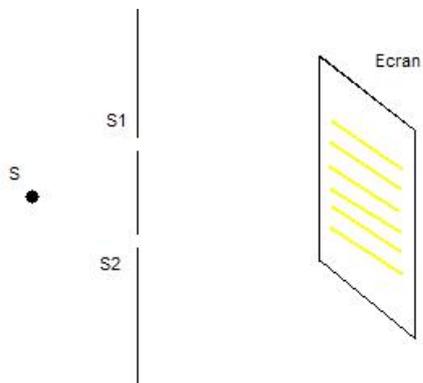
(b) Modélisation de la diffraction.

FIGURE 20 – La diffraction.

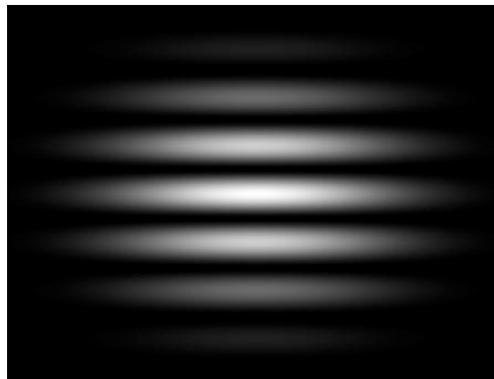
Dans l'expérience des fente de Young<sup>5</sup>, un rayon lumineux traverse deux petites fentes et un écran est disposé à une certaine distance.

Si le rayon lumineux était constitué uniquement de photons, on devrait s'attendre à voir deux points lumineux sur l'écran.

Ce n'est pas ce qui est observé. L'observation montre une série de franges lumineuses intenses au milieu et de moins en moins lumineux sur les bords.



(a) Dispositif des fentes de Young.



(b) Photographie de l'écran d'un dispositif des fentes de Young.

FIGURE 21 – Les fentes de Young.

Young a interprété son expérience en affirmant que la lumière est une onde. En effet, si c'est le cas, suivant la distance de l'écran, on devrait observer des amplifications de l'intensité lumineuse (par cumulation des deux « pics » d'ondes) ou des absences de lumière (par annulation d'un « pic » par un « creux »). Or, c'est bien ce que l'on observe.

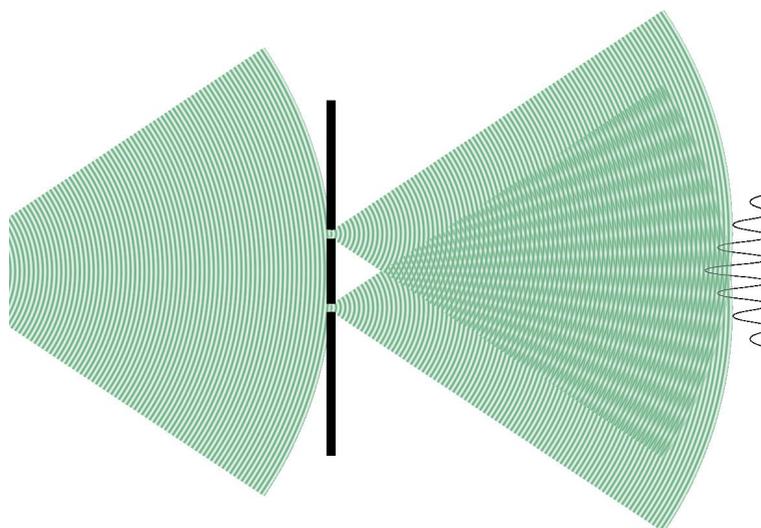


FIGURE 22 – Interprétation de l'expérience des fentes Young par les ondes.

5. Thomas Young, physicien, médecin et égyptologue anglais, première expérience en 1801.

### 4.3 Dualité Onde-Corpuscule

Jusqu'au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle, deux écoles se disputai. L'une disait que la lumière était composé de corpuscules (photons). L'autre que la lumière était composé d'une onde.

Actuellement, on considère que tout rayonnement électromagnétique, est composée de particules (les photons, des particules proches des électrons) portées par une onde électromagnétique. En effet, les équations de physique peuvent s'écrire soit comme soit une onde, soit comme une particule, en donnant les mêmes résultats.

La lumière est donc bien composée d'une onde électromagnétique et de photons, et une onde électromagnétique est une variation périodique du champ électromagnétique.

### 4.4 Énergie du photon

#### 4.4.1 Relation de Planck

L'équation suivante donne l'énergie produite par un photon à une fréquence précise.

$$E = h \times f$$

où :

- E est l'énergie (en Joules) ;
- h est la constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34} J.s$ ) ;
- f est la fréquence (en Hz).

On constate donc bien que l'énergie est directement proportionnel à la fréquence.

Cette énergie peut être :

- transmise au matériau pour générer une onde électromagnétique (LED) ;
- absorbée par le matériau pour générer un courant électrique (panneau photovoltaïque).

#### 4.4.2 Effet photoélectrique

En physique, l'effet photoélectrique désigne en premier lieu l'émission d'électrons par un matériau sous l'action de la lumière. Par extension, il regroupe l'ensemble des phénomènes électriques dans un matériau sous l'effet de la lumière. On distingue alors deux effets : l'éjection d'électrons hors du matériau (émission photoélectrique) et la modification de la conductivité de ce matériau (effet photovoltaïque lorsqu'il est en œuvre au sein d'une cellule photovoltaïque).

Lorsque l'effet photoélectrique se manifeste, toute l'énergie du photon incident se transmet à l'électron. Une quantité d'énergie minimale est nécessaire pour extraire l'électron de l'atome, l'énergie excédentaire est transmise à l'électron sous forme d'énergie cinétique. Une absorption partielle est caractérisée par la diffusion Compton.

Cet effet a été difficile à expliquer, car l'émission d'électrons ne dépend pas de l'intensité du flux lumineux, mais uniquement de la fréquence de la lumière, quelle que soit son intensité. C'est l'explication du phénomène par Albert Einstein en 1905 (pour laquelle Einstein a eu le prix Nobel) qui à mené à l'hypothèse que la lumière est constituée de quanta d'énergie, appelés photons, et à l'élaboration de la mécanique quantique.

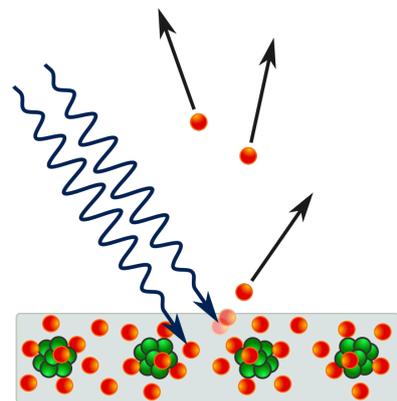


FIGURE 23 – L'effet photoélectrique.

### 4.4.3 Corps noir et température de couleur

Un corps noir est un objet idéal qui absorbe parfaitement toute l'énergie électromagnétique (toute la lumière quelle que soit sa longueur d'onde) qu'il reçoit. Cette absorption se traduit par une agitation thermique qui provoque l'émission d'un rayonnement thermique, dit rayonnement du corps noir.

La loi de Planck décrit le spectre de ce rayonnement, qui dépend uniquement de la température de l'objet.

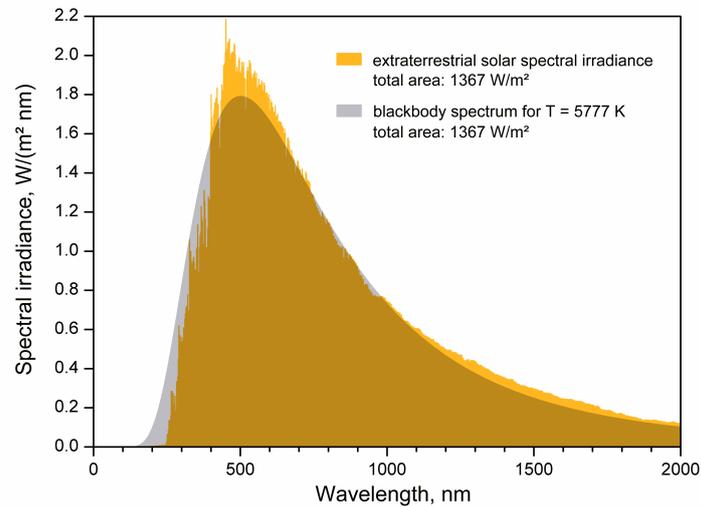


FIGURE 24 – Comparaison de l'émission du Soleil et d'un corps noir à la même température.

Cette température détermine donc uniquement la répartition et l'intensité des ondes électromagnétiques. Cette température est une information fournie lors de l'achat d'ampoule.

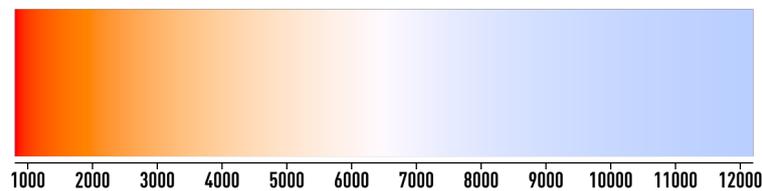


FIGURE 25 – Différentes températures de corps noir et leur couleur associée.

## 4.5 Spectre électro-magnétique

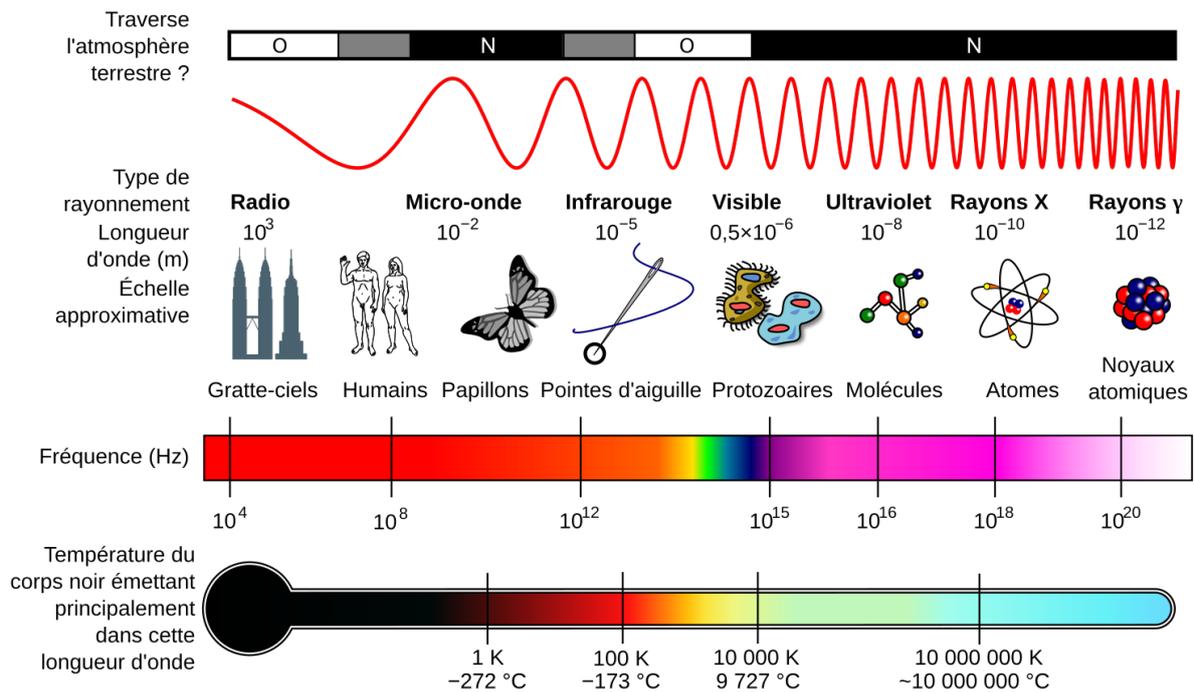


FIGURE 26 – Le spectre électromagnétique.

### 4.5.1 Les ondes radios

Nous définirons les ondes radios, de façon restrictive comme les ondes dont la longueur d'onde est supérieure à un mètre. Certains incluent les micro-ondes dans les ondes radios.

Elles ont une longueur d'onde entre 100 000 km et 30 cm (1 GHz).

Elles sont utilisées dans de nombreux domaines : dans les télécommunications :

- radiodiffusion : FM (fréquence modulée), DAB ;
- télédiffusion : DVB (diffusion par satellite géostationnaire) ;
- communication maritimes et aériennes ;
- communication satellites ;

dans la télédétection :

- radionavigations maritime et aérienne ;
- radioastronomie ;

### 4.5.2 Les ondes pénétrantes : les micro-ondes, l'infra-rouge et le visible

Lorsque la longueur d'onde est inférieure à 30 cm, on considère que ce type d'onde peut commencer à traverser la matière.

**Les micro-ondes** Les micro-ondes sont des ondes électromagnétiques entre un 1 GHz et 300 GHz (1 mm).

C'est dans cette bande que se trouvent la majorité de modes de communication actuelles (WiFi, GSM 4G/5G, ...), ainsi que la télédétection (radar).

**Infrarouge (IR)** L'infra-rouge s'étend entre 1 mm et 700 nm. Il est fortement utilisé pour l'étude de l'environnement (météorologie) ou la radioastronomie.

**Le visible** Le visible s'étend entre 700 nm (rouge) et 400 nm (bleu). Si une longueur d'onde correspond à une couleur. L'inverse n'est pas nécessairement vrai. Il n'y a pas de longueur d'onde rose, brune ou blanche dans le spectre du visible. Ces couleurs sont des combinaisons de plusieurs longueurs que notre cerveau interprète comme telle ou telle couleur.

De plus généralement, les objets en eux-même n'émettent pas de lumière. Ils ne font qu'absorber certaines longueurs d'ondes et réfléchissent les autres. C'est sur base d'une lumière blanche qu'ils ont une couleur propre.

### 4.5.3 Les ondes ionisantes : ultraviolet, rayons X et rayons gammas

Lorsque la longueur d'onde est inférieure à 300 nanomètres, l'énergie est suffisante pour fragmenter une molécule et produire des ions. C'est la cause principale de la toxicité de ce type d'onde qui peuvent produire des tumeurs par mutation de l'ADN.

**Ultraviolet (UV)** Les ultraviolets s'étendent entre 400 nm (rouge) et 100 nm (bleu).

**Rayons X** Les rayons X s'étendent entre 10 nm (rouge) et 5 pm (bleu). Ils sont utilisés en imagerie médicale ou dans les scanners de douane.

**Rayons gammas** Les rayons gammas ( $\gamma$ ) ont une longueur d'onde inférieure à 5 picomètre. Il sont produits par réaction nucléaire et sont extrêmement toxiques.

## 4.6 Applications technologiques

### 4.6.1 Conversion énergétique

**Diode et LED** Si on soumet certains matériaux à une tension électrique précise, ils réémettront des photons. C'est un effet photoélectrique « inversé ». Les photons réémis le sont à une fréquence précise. On dit alors que la lumière est « monochromatique ».

Une diode électroluminescente (abrégé en DEL en français, ou LED, de l'anglais : light-emitting diode) est un dispositif opto-électronique fait de matériau semi-conducteur, capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Une diode électroluminescente ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens et produit un rayonnement monochromatique ou polychromatique non cohérent par conversion d'énergie électrique lorsqu'un courant la traverse.

**Panneau photovoltaïque** Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance électrique obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et elle dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie électrique).

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium et plus rarement d'autres semi-conducteurs : sélénure de cuivre-indium ( $\text{CuIn}(\text{Se})_2$ , ou CIS), sélénure de

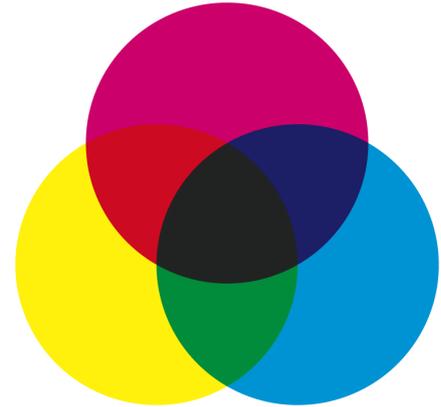


FIGURE 27 – Les couleurs fondamentales en physique.

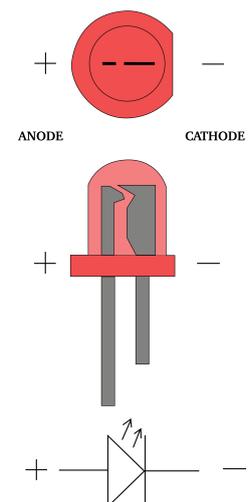


FIGURE 28 – Diode électroluminescente.

cuivre, d'indium et de gallium ( $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$ , aussi appelé CIGS), tellurure de cadmium ( $\text{CdTe}$ ), etc. Elles se présentent généralement sous forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules photovoltaïques ou panneaux solaires photovoltaïques, en fonction de la puissance recherchée.

**Four à micro-ondes** Selon la légende, en 1946, l'ingénieur américain Percy Spencer, alors qu'il dirigeait chez Raytheon une usine de magnétrons pour radars, avait ressenti de la chaleur dans la poche de sa blouse alors qu'il passait à proximité d'un magnétron en activité. Plongeant la main dans la poche, il aurait découvert qu'une barre de chocolat y avait fondu. Il en aurait déduit que les micro-ondes pouvaient faire cuire ou réchauffer des aliments.

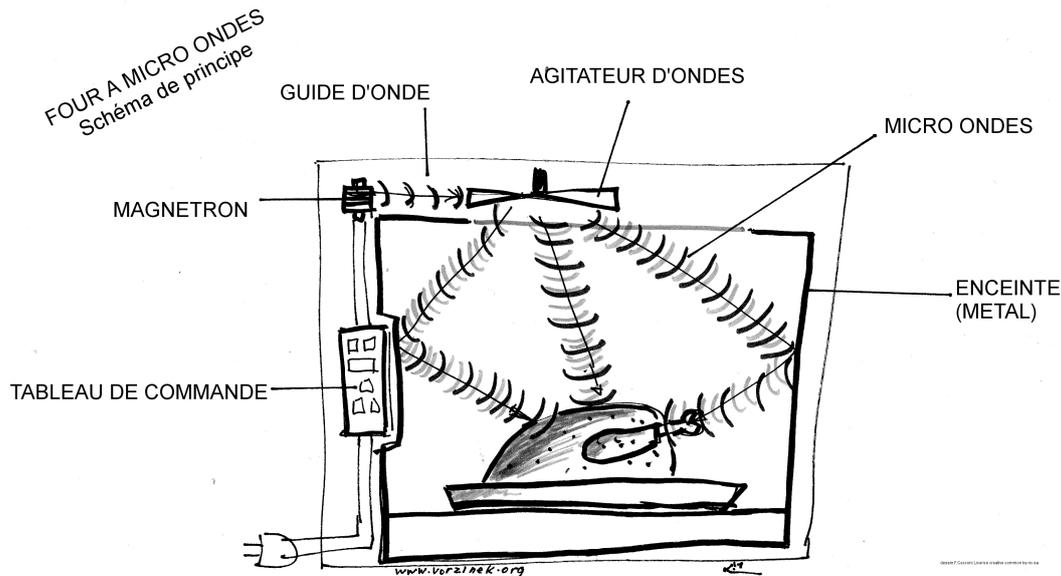


FIGURE 29 – Fonctionnement d'un four à micro-ondes.

Le four à micro-ondes agitent les molécules d'eau par résonance. L'agitation moléculaires de l'eau se transmet alors aux autres molécules de l'aliment. Sa fréquence est entre 2,4 et 2,5 GHz.

#### 4.6.2 Transmission d'informations

**Wifi** Le Wifi est une norme utilisant une bande dans les 2,4 GHz, 5 et 6 GHz pour transmettre des données informatiques au sein d'un réseau local.

**GSM(2G)/UMTS (3G)/LTE(4 et 5G)** Un réseau de téléphonie mobile est un réseau téléphonique qui permet l'utilisation simultanée de millions de téléphones sans fil, immobiles ou en mouvement, y compris lors de déplacements à grande vitesse et sur une grande distance.

Pour atteindre cet objectif, toutes les technologies d'accès radio doivent résoudre un même problème : partager et répartir aussi efficacement que possible une bande de fréquences hertzienne unique entre de très nombreux utilisateurs. Pour cela, diverses techniques de multiplexage sont utilisées pour la cohabitation et la séparation des utilisateurs et des cellules radio : le multiplexage temporel, le multiplexage en fréquence et le multiplexage par codes, ou le plus souvent une combinaison de ces techniques.

Un réseau de téléphonie mobile a une structure « cellulaire » qui permet de réutiliser de nombreuses fois les mêmes fréquences ; il permet aussi à ses utilisateurs en mouvement de changer de cellule (handover) sans coupure des communications en cours. Dans un même pays, aux heures d'affluence, plusieurs centaines de milliers, voire plusieurs millions d'appareils sont en service répartis (dans le cas du GSM) sur seulement 500 canaux disponibles.

Les fréquences utilisées en téléphonie utilisent des bandes autour des 700 MHz, 800 MHz, 900MHz, 1800 MHz, 2100 MHz et 2600 MHz.

**Radio : FM, DAB** La fréquence modulée (**FM**) est une transmission analogique d'un son (radios) dans une bande autour des 100 MHz. Le **DAB** (Digital Audio Broadcasting) utilise une bande proche de 200 MHz pour la diffusion d'audio numérique.

#### 4.6.3 Analyse des êtres vivants et notamment de l'être humain

**Rayon X** Les rayons X sont utilisés en radiographie médicale pour l'analyse des parties denses (os et tendons).

**IRM** L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est une technique d'imagerie médicale permettant d'obtenir des vues en deux ou en trois dimensions de l'intérieur du corps de façon non invasive avec une résolution en contraste relativement élevée.

L'IRM repose sur le principe de la résonance magnétique nucléaire (RMN)<sup>2</sup> qui utilise les propriétés quantiques des noyaux atomiques pour la spectroscopie en analyse chimique. L'IRM nécessite un champ magnétique puissant et stable produit par un aimant supraconducteur qui crée une magnétisation des tissus par alignement des moments magnétiques de spin.

#### 4.6.4 Analyse de l'environnement

**Images satellites** Des images satellites de la Terre sont prises actuellement en continu dans le domaine visible et infrarouge pour :

- la météorologie ;
- la détection de polluants ;
- l'activité photosynthétique ;
- ....

**Précipitation et ondes radar** Le radar (acronyme issu de l'anglais radio detection and ranging) est un système qui utilise les ondes électromagnétiques pour détecter la présence et déterminer la position ainsi que la vitesse d'objets tels que les avions, les bateaux, ou la pluie. Les ondes envoyées par l'émetteur sont réfléchies par la cible, et les signaux de retour (appelés écho radar ou écho-radar) sont captés et analysés par le récepteur, souvent situé au même endroit que l'émetteur. La distance est obtenue grâce au temps aller/retour du signal, la direction grâce à la position angulaire de l'antenne où le signal de retour a été capté et la vitesse avec le décalage de fréquence du signal de retour généré selon l'effet Doppler. Il existe également différentes informations trouvées par le rapport entre les retours captés selon des plans de polarisation orthogonaux. Les micro-ondes (entre 2 et 60 GHz) sont utilisées actuellement en mode « echo-doppler » pour l'analyse en temps réel des précipitations.

**Astronomie** Une large partie du spectre électromagnétiques est utilisés pour la télédétection d'objets célestes tant au sein du système solaire qu'à l'extérieur, soit :

- les ondes radios à longues longueur d'ondes
- l'infra-rouge ;
- le visible ;
- l'ultraviolet ;
- les rayons X et  $\gamma$ .

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Oscillateurs</b>	<b>1</b>
1.1	Le pendule . . . . .	1
1.2	Atténuation . . . . .	2
1.3	Amplification . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Le concept d'onde</b>	<b>3</b>
2.1	Un caillou dans un plan d'eau . . . . .	3
2.2	Caractéristiques . . . . .	3
2.3	Mode de propagation . . . . .	4
2.3.1	Ondes longitudinales . . . . .	4
2.3.2	Ondes transversales . . . . .	4
2.4	Effet Doppler-Fizeau . . . . .	5
2.5	Diffraction . . . . .	6
2.6	Interférences, superposition d'ondes . . . . .	6
2.6.1	Concordance de phase . . . . .	6
2.6.2	Opposition de phase . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Les ondes mécaniques</b>	<b>8</b>
3.1	Caractéristiques . . . . .	8
3.2	Milieu de propagation et vitesse . . . . .	8
3.3	Intensité sonore . . . . .	9
3.3.1	Décibel . . . . .	9
3.3.2	Risques sonores . . . . .	9
3.4	Applications technologiques . . . . .	11
3.4.1	Musique : résonance, harmoniques et amplification . . . . .	11
3.4.2	Sonars . . . . .	11
3.4.3	Échographie . . . . .	12
3.4.4	Techniques sismiques . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Les ondes électromagnétiques</b>	<b>13</b>
4.1	Le caractère corpusculaire de la lumière . . . . .	13
4.2	Le caractère ondulatoire de la lumière . . . . .	13
4.3	Dualité Onde-Corpuscule . . . . .	15
4.4	Énergie du photon . . . . .	15
4.4.1	Relation de Planck . . . . .	15
4.4.2	Effet photoélectrique . . . . .	15
4.4.3	Corps noir et température de couleur . . . . .	16
4.5	Spectre électro-magnétique . . . . .	17
4.5.1	Les ondes radios . . . . .	17
4.5.2	Les ondes pénétrantes : les micro-ondes, l'infra-rouge et le visible . . . . .	17
4.5.3	Les ondes ionisantes : ultraviolet, rayons X et rayons gammas . . . . .	18
4.6	Applications technologiques . . . . .	18
4.6.1	Conversion énergétique . . . . .	18
4.6.2	Transmission d'informations . . . . .	19
4.6.3	Analyse des êtres vivants et notamment de l'être humain . . . . .	20
4.6.4	Analyse de l'environnement . . . . .	20