

1 Le modèle ondulatoire de la lumière

A Le rayonnement et l'onde électromagnétique

> Les phénomènes de diffraction et d'interférence observés lors de la propagation d'énergie lumineuse au travers d'obstacle(s) ou d'orifice(s) sont les premiers phénomènes dont l'explication fait appel à la nature ondulatoire de la lumière (**doc. 1**). Initiée par Christian Huygens (1678), la théorie ondulatoire n'a cessé d'être améliorée (Thomas Young, 1802 ; Augustin Fresnel, 1815). En 1865, James Maxwell finalise le modèle et prédit l'existence et la célérité de l'onde électromagnétique.

Une onde électromagnétique (OEM) :

- est un phénomène vibratoire qui se propage dans le vide et de nombreux milieux (transparents ou non) ;
- est constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique oscillants, orthogonaux entre eux, et orthogonaux à la direction de propagation ;
- se propage dans le vide à la célérité $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

B Les caractéristiques d'une OEM

> Une onde électromagnétique monochromatique est caractérisée par :

- sa longueur d'onde, notée λ (lambda), qui correspond à sa période spatiale. Elle s'exprime en mètre (m) (**doc. 2**) ;
- sa fréquence, notée ν (nu) ou f , correspond à l'inverse de la période temporelle T . Elle s'exprime en hertz (Hz).

La longueur d'onde et la fréquence ν sont reliées dans le vide par l'expression : $\lambda = \frac{c}{\nu}$.

C Le spectre électromagnétique

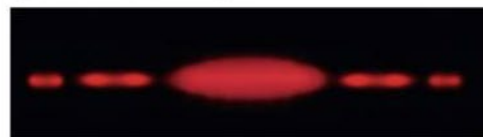
> Chaque être vivant s'approprie le monde dans lequel il vit à l'aide de ses sens, en particulier la vue. Cependant, l'être humain a pris conscience que les informations qu'il perçoit visuellement de son environnement peuvent être limitées.

> Le domaine visible ($400 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm}$) n'est qu'une infime partie des ondes électromagnétiques.

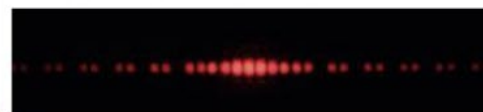
À l'aide de la longueur d'onde ou de la fréquence, on classe le spectre électromagnétique en sept sous-domaines principaux selon leur découverte ou leur utilisation. Dans l'ordre croissant des longueurs d'onde, on rencontre : les rayons γ , les rayons X, les ultraviolets, le visible, les infrarouges (proches et lointains), les micro-ondes et les ondes radio (voir **doc. 3** à la p. 366).

Doc. 1 Observations expérimentales

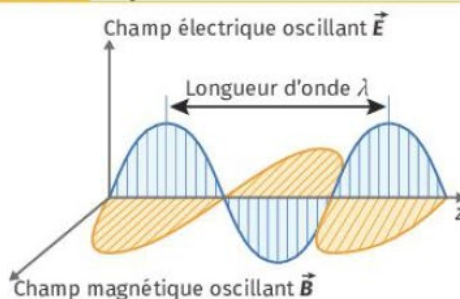
a) Figure de diffraction d'un faisceau laser par une fente simple.



b) Figure d'interférence d'un faisceau laser par une double fente.



Doc. 2 Représentation d'une OEM



Numérique

Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ? Retrouvez toutes les informations sur [LLS.fr/PC1P365](https://lls.fr/PC1P365).

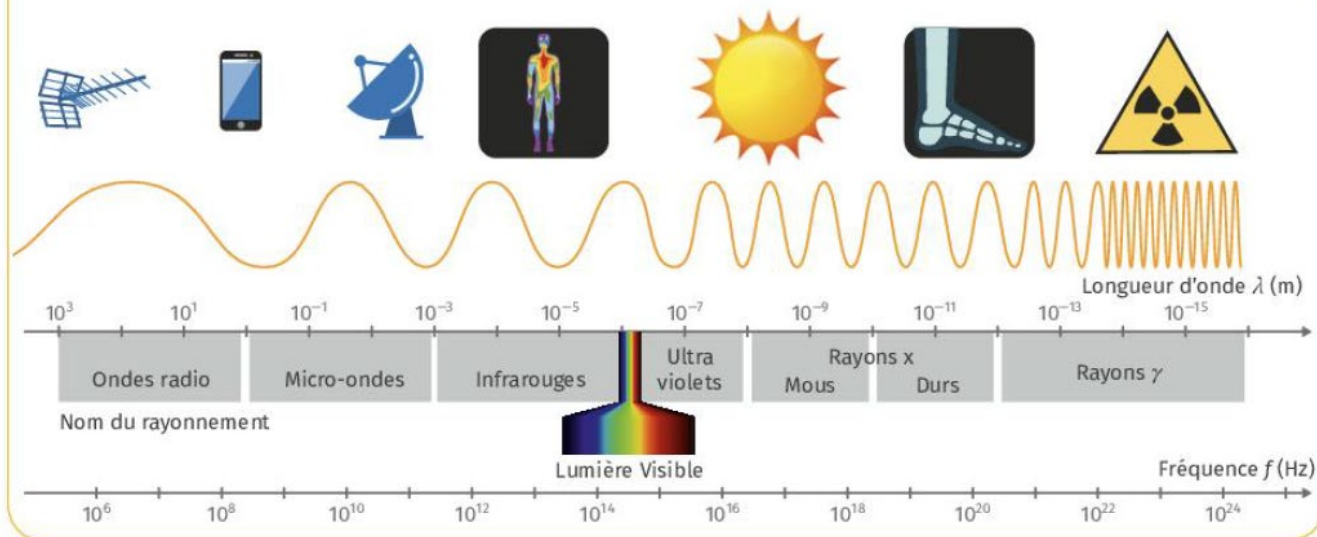
Vocabulaire

- **Fréquence** : nombre de périodes ou de vibrations par seconde.
- **Longueur d'onde** : distance λ parcourue par l'onde pendant la durée d'une période T .

Éviter les erreurs

- ➔ La fréquence ne dépend pas du milieu de propagation contrairement à la longueur d'onde.
- ➔ Aucun objet matériel connu ne peut se déplacer plus rapidement que la lumière.

Doc. 3 Le spectre électromagnétique simplifié



2 Le modèle particulaire de la lumière

A L'imperfection du modèle ondulatoire

➤ Bien que les lois de l'électromagnétisme formulées par Maxwell au cours du XIX^e siècle expliquent de nombreuses observations expérimentales, elles ne permettent pas d'interpréter le rayonnement émis par des corps chauffés et l'effet photoélectrique.

Le modèle ondulatoire explique la propagation de la lumière (OEM) et la formation des images mais est inopérant pour expliquer les interactions d'énergies avec la matière.

B Le photon et son énergie

➤ Afin de modéliser les interactions entre la matière et le rayonnement en coïncidence avec l'observation d'un corps noir, Planck propose en 1900 de quantifier l'énergie de l'onde à l'aide d'un paquet d'énergie indivisible : le quantum. Tout échange d'énergie avec la matière est un multiple entier de ce minimum d'énergie : la théorie des quanta est née.

- Pour expliquer l'effet photoélectrique, Einstein associe en 1905 cette idée de quantum à une structure particulaire de la lumière, le photon.
- Chaque rayonnement est par conséquent constitué d'un nombre entier de photons possédant chacun une énergie minimale égale au quantum d'énergie $E_{\text{photon}} = h \cdot \nu$.
 E_{photon} s'exprime en joule (J) et la fréquence ν en hertz (Hz).
 h est la constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s.
- Le photon est une particule de masse et de charge électrique nulles se déplaçant, dans le vide, à la vitesse de la lumière.

Remarque : L'énergie d'un photon est d'autant plus grande que sa fréquence est élevée (et que sa longueur d'onde est faible).

Pas de malentendu



- Les modèles ondulatoire et particulaire de la lumière modélisent les différentes manifestations de l'interaction de cette dernière avec son environnement.
- L'existence simultanée des deux modèles, à première vue contradictoires, illustre la dualité onde-corpuscule de la lumière.

Doc. 4 L'effet photoélectrique

Il s'agit de l'émission d'un courant électrique par un métal en présence de lumière. La vitesse des électrons arrachés ne dépend pas du flux lumineux mais uniquement de la longueur d'onde.

Vocabulaire

- **Corpuscule** : synonyme de particule.
- **Radiation** : déplacement de photons.
- **Quantum** : mot latin signifiant la plus petite quantité d'énergie indivisible transportée par une radiation. Le centime est à la monnaie ce que le quantum est à la quantité d'énergie d'un atome.
- **Photon** : particule élémentaire qui transporte le quantum d'énergie lumineuse.

Application

Calculer l'énergie du photon le plus énergétique du domaine visible.

Corrigé :

- Avec un domaine visible compris entre 400 nm et 800 nm, la radiation la plus énergétique est celle de plus courte longueur d'onde, soit 400 nm (à la limite de l'UV).
- On peut déterminer successivement la fréquence de la radiation $\nu = \frac{c}{\lambda}$ puis l'énergie E égale à $E = h \cdot \nu$ soit directement $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$.
- Numériquement $E = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{400 \times 10^{-9}}$ donc $E = 4,97 \times 10^{-19}$ J soit $E = 3,11$ eV.

3 La quantification des niveaux d'énergie d'un atome

A Le diagramme d'énergie d'un atome

➤ Chaque atome possède une structure électronique de couches et sous-couches (1s, 2s, 2p, etc.) sur lesquelles se répartissent tous les électrons. Ces couches existent même si elles ne sont pas occupées. Chaque sous-couche associée à une orbite possède sa propre énergie, qui est d'autant plus faible qu'elle est proche du noyau.

On utilise un diagramme énergétique pour représenter les différents niveaux d'énergie intrinsèques à l'atome.

Chaque niveau d'énergie est modélisé par une ligne horizontale. On reporte leur valeur d'énergie sur un axe vertical, le plus souvent exprimé en électron-volt (eV).

L'énergie de l'atome correspond à la somme des énergies de chaque électron. À chaque niveau correspond un état.

➤ On distingue deux types d'états : l'état fondamental, souvent noté E_1 , et les états supérieurs, dits excités. L'état ionisé étant l'état (limite) pour lequel l'électron a quitté l'atome (**doc. 5**). L'état ionisé correspond au niveau d'énergie $E_\infty = 0$ eV, tous les autres niveaux ont une énergie négative.

D'après Niels Bohr (1913), l'atome n'est stable que pour certaines valeurs d'énergie discrètes bien définies. Son énergie est quantifiée.

B L'émission et l'absorption d'un photon

➤ Lors d'une transition entre deux niveaux d'énergie, notés E_n et E_m :

- l'énergie d'un atome augmente ou diminue, respectivement en absorbant ou en émettant un photon ;
- l'énergie échangée $|\Delta E|$ (absorbée/émise) par l'atome possède exactement une valeur égale à la différence des niveaux d'énergie $|\Delta E_{\text{atome}}| = |E_n - E_m|$;
- la variation d'énergie de l'atome est égale à l'énergie d'un photon.

Données

- $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s ; • $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}$ J ;
- $c = 3,00 \times 10^8$ m·s⁻¹.

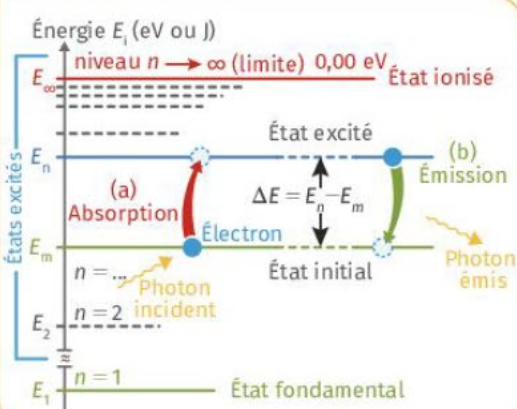
Éviter les erreurs

- L'énergie d'un photon est toujours positive : $E_{\text{photon}} > 0$.
- L'unité légale de l'énergie est le joule. Cependant, les énergies échangées lors des interactions entre la lumière et la matière sont si faibles qu'on utilise le plus souvent l'électron-volt (eV) : $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}$ J.

Éviter les erreurs

- Attention à la conversion entre le joule (J) et l'électron-volt (eV).

Doc. 5 Niveaux d'énergie d'un atome



Vocabulaire

- **Transition** : passage d'un électron d'un niveau d'énergie à un autre. Elle est représentée par une flèche.
- **État fondamental** : état stable de plus faible énergie de l'atome.

Éviter les erreurs

- Lors d'une transition, un photon ne peut être absorbé ou émis par l'atome que si : $E_{\text{photon}} = |\Delta E_{\text{atome}}|$.
- Une variation $\Delta E < 0$ correspond à l'émission d'un photon, $\Delta E > 0$ une absorption d'un photon.

Principales notions

Modèle ondulatoire

Une onde électromagnétique (OEM) est caractérisée par :

- sa longueur d'onde λ (période spatiale) ;
- sa fréquence ν (inverse de la période temporelle T).

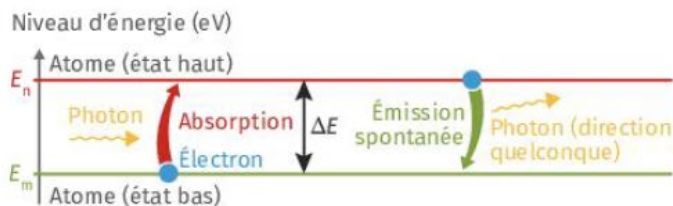
Le spectre électromagnétique peut être divisé en plusieurs domaines. Dans l'ordre croissant des longueurs d'onde, il s'étale du rayonnement γ aux ondes radio.

Le domaine de la lumière visible ne couvre qu'un espace très restreint du spectre des ondes électromagnétiques : $400 \text{ nm} < \lambda_{\text{visible}} < 800 \text{ nm}$.

Pour les autres domaines du spectre des OEM, voir **doc. 3** p. 366.

Modèle particulaire

L'énergie de la lumière est véhiculée par les photons. L'énergie d'un photon est proportionnelle à la fréquence de la radiation associée. Les niveaux d'énergie d'un atome ne possèdent que des valeurs discrètes : ils sont quantifiés.



L'interaction lumière-matière s'effectue suivant des échanges d'énergie quantifiés, proportionnels à la quantité élémentaire (quantum) que possède un photon.

Les éléments essentiels de la modélisation

Modèle ondulatoire

Relation entre la longueur d'onde et la fréquence

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Fréquence ν en hertz (Hz) ← ν ← Célérité de la lumière (vide) $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$
 Longueur d'onde λ en mètre (m) ← λ

Modèle particulaire

Constante de Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

$$E = h \cdot \nu$$

Énergie d'un photon : E en joule (J) → Énergie E en joule (J) → Fréquence ν en hertz (Hz)
 $\checkmark 1 \text{ électron-volt} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$

$$\text{Énergie d'un photon : } E = h \cdot \nu$$

$$\text{Énergie de l'atome : } |\Delta E| = |E_p - E_m|$$

Échange d'énergie matière-rayonnement

$$|\Delta E| = |E_p - E_m| = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Énergie E en joule (J) ← $|\Delta E|$
 Célérité de la lumière (vide) $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
 Constante de Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ← h
 Longueur d'onde λ en mètre (m) ← λ

Les limites de la modélisation

Il existe deux modèles de description de la lumière : ondulatoire et particulaire. Suivant la situation, on utilise l'un ou l'autre. Il s'agit de la dualité onde-particule.

Le modèle ondulatoire permet d'expliquer :

- la propagation des ondes (seconde) ;
- les phénomènes de réfraction et réflexion de la lumière, les phénomènes de diffraction et d'interférence.

Mais il ne permet pas d'expliquer :

- les interactions de faible énergie avec la matière au niveau atomique, comme l'effet photoélectrique.

Le modèle particulaire ne permet pas d'expliquer :

- la propagation des ondes (seconde) ;
- les phénomènes de réfraction et réflexion de la lumière, les phénomènes de diffraction et d'interférences.

Mais il permet d'expliquer :

- les interactions de faible énergie avec la matière au niveau atomique, comme l'effet photoélectrique.