

Optique

Brève histoire de l'optique

Antiquité

Euclide, Ptolémée et d'autres : Propagation en ligne droite de la lumière, loi de la réflexion connues, loi de la réfraction non correcte mais essais de tables. Fabrication de miroirs concaves. Les lentilles n'existent pas.

XI^e

Alhazen énonce les lois de propagation rectiligne de réflexion de la lumière.

XVII^e siècle

Giambattista de la Porta (1535-1615) développe la première lunette (1580-1590)

Johannes Kepler (1571-1630) énonce la loi de la réflexion et une loi approchée de la réfraction en 1604, et énonce une première théorie correcte des lentilles en 1611.

Galilée (1564-1642) utilise de la lunette astronomique en 1610 par à des fins astronomiques.

Willebrord Snell (1580-1626) énonce la loi de la réfraction en 1620.

René Descartes (1596-1650) énonce la loi de la réfraction en 1637.

Pierre de Fermat (1601-1665) énonce le principe du moindre temps en 1662

Charles Huygens (1629-1695) écrit son *Traité de la lumière* en 1667 où il introduit l'hypothèse d'une nature ondulatoire de la lumière.

XVIII^e siècle

Isaac Newton (1642-1727) publie *Optiks* en 1704 où il attribue à la lumière une **nature corpusculaire**. Cette interprétation domine pendant un siècle, de 1700 à 1800.

XIX^e siècle

Thomas Young (1773-1829) découvre en 1802 les **interférences lumineuses** qu'il explique en attribuant à la lumière une **nature ondulatoire**.

Étienne Malus (1775-1812) découvre la polarisation de la lumière en 1808.

Augustin Fresnel (1788-1827) redécouvre les interférences et interprète correctement la diffraction en 1819. Il donne à l'optique sa forme actuelle.

James Maxwell (1831-1879) unifie l'optique aux phénomènes électromagnétiques.

XX^e siècle

Max Planck (1858-1947) étudie le rayonnement du corps noir.

Albert Einstein (1879-1955) interprète l'effet photoélectrique avec la notion de photon (**corpuscule**)
→ **dualité onde-corpuscule pour la lumière**.

D'après Histoire de la physique et des physiciens, Jean-Claude Boudenot.

Objectifs de la partie

- Introduire les outils de l'optique ondulatoire → chapitre n°O1
- Étudier la superposition de deux ondes lumineuses → chapitre n°O1
- Étudier les interférences par division du front d'onde : trous/fentes d'Young, réseau → chapitres n°O2 (trous d'Young) & O4 (réseau).
- Étudier les interférences par division d'amplitude : interféromètre de Michelson → chapitre n°O3



Optique

Chapitre n°O1 Ondes lumineuses – Superposition d'ondes lumineuses



Augustin Jean FRESNEL (1788 - 1827) est un ingénieur et physicien français. En 1815, il s'oppose à la théorie corpusculaire de la lumière de Newton en vigueur jusque-là, et par des expériences sur la diffraction de la lumière, pose les bases de sa théorie « vibratoire » de la lumière.

Fondateur de l'optique moderne, il proposa une explication de tous les phénomènes optiques, connus à son époque (Au début du XXe, le rayonnement du corps noir et l'effet photoélectrique remettront en cause la nature purement ondulatoire de la lumière), en particulier le phénomène d'interférences, dans le cadre du modèle de l'optique ondulatoire.

Ses travaux portent également sur la polarisation de la lumière : il montre ainsi que la lumière est une onde transversale et non longitudinale (comme le son), ainsi qu'on le croyait avant lui.

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=146330447>

Pré-requis

- PCSI : Optique géométrique
- PCSI : Propagation d'un signal – Interférences (trous d'Young)

Objectifs du chapitre

- introduire les outils de l'optique ondulatoire : modèle scalaire, chemin optique, théorème de Malus ;
- introduire le modèle d'émission des trains d'ondes lumineuses et les grandeurs d'intérêt d'un photorécepteur ;
- étudier la superposition de deux ondes et en déduire les conditions d'interférences lumineuses.

Plan du cours

I Modèle scalaire des ondes lumineuses	4
I.1 De l'opt géo à l'optique ondulatoire	4
I.2 Modèle scalaire – Vibration lumineuse	5
I.2.a) Modèle scalaire	5
I.2.b) Onde monochromatique	5
I.3 Propagation	6
I.3.a) Propagation	6
I.3.b) Retard de phase et chemin optique	6
I.4 Surfaces d'onde	7
I.4.a) Surfaces d'onde	7
I.4.b) Théorème de Malus	8
I.5 Effet d'une lentille mince	8

II Émetteur et récepteur des ondes lumineuses	9
II.1 Sources de lumières réelles	9
II.2 Modèle des trains d'ondes	10
II.3 Réception d'une onde lumineuse	11
II.3.a) Exemples de récepteurs	11
II.3.b) Intensité lumineuse	12
III Superposition de deux ondes lumineuses	12
III.1 Intensité résultante	12
III.2 Terme d'interférences	13
III.3 Formule de Fresnel	14
III.4 Figure d'interférence	14
III.4.a) Interférences constructives / destructives	14
III.4.b) Contraste des franges	15

Programme officiel

Notions et contenus	Capacités exigibles
1.1. Modèle scalaire des ondes lumineuses	
Modèle de propagation dans l'approximation de l'optique géométrique.	
Vibration lumineuse.	Associer la grandeur scalaire de l'optique à une composante d'un champ électrique.
Chemin optique. Déphasage dû à la propagation.	Exprimer le retard de phase en un point en fonction de la durée de propagation ou du chemin optique.
Surfaces d'ondes. Théorème de Malus. Onde plane, onde sphérique; effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss.	Utiliser l'égalité des chemins optiques sur les rayons d'un point objet à son image. Associer une description de la formation des images en termes de rayons lumineux et en termes de surfaces d'onde.
Modèle d'émission.	
Largeur spectrale. Cohérence temporelle.	Classer différentes sources lumineuses (lampe spectrale basse pression, laser, source de lumière blanche ...) en fonction du temps de cohérence de leurs diverses radiations. Citer quelques ordres de grandeur des longueurs de cohérence temporelle associées à différentes sources. Relier, en ordre de grandeur, le temps de cohérence et la largeur spectrale de la radiation considérée.
Réception d'une onde lumineuse.	
Récepteurs. Intensité lumineuse.	Comparer le temps de réponse d'un récepteur usuel (œil, photodiode, capteur CCD) aux temps caractéristiques des vibrations lumineuses. Relier l'intensité lumineuse à la moyenne temporelle du carré de la grandeur scalaire de l'optique. Mettre en œuvre un capteur optique.
1.2. Superposition d'ondes lumineuses	
Superposition de deux ondes quasi-monochromatiques non synchrones ou incohérentes entre elles.	Justifier et utiliser l'additivité des intensités.
Superposition de deux ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles : formule de Fresnel.	Établir la formule de Fresnel. Identifier une situation de cohérence entre deux ondes et utiliser la formule de Fresnel.
Contraste.	Associer un bon contraste à des ondes d'intensités voisines.

Ai-je bien appris mon cours ?

- 1 – 😊 – 😞 – Définir « vibration lumineuse ».
- 2 – 😊 – 😞 – Définir « chemin optique ».
- 3 – 😊 – 😞 – Donner la relation entre le retard de phase et le chemin optique.
- 4 – 😊 – 😞 – Définir « surface d'onde », « onde sphérique » et « onde plane ».
- 5 – 😊 – 😞 – Énoncer le théorème de Malus.
- 6 – 😊 – 😞 – Comment sont les chemins optiques sur les rayons d'un point objet à un point image par une lentille ?
- 7 – 😊 – 😞 – Représenter les surfaces d'onde dans la situation : un point objet quelconque donne une image par une lentille.
- 8 – 😊 – 😞 – Représenter les surfaces d'onde dans la situation : un point objet au foyer principal objet.
- 9 – 😊 – 😞 – Représenter les surfaces d'onde dans la situation : un point objet donne un point image au foyer principal image.
- 10 – 😊 – 😞 – Présenter le modèle des trains d'ondes. Quel type d'ondes permet-il de décrire ?
- 11 – 😊 – 😞 – Comment les caractéristiques des trains d'ondes (période, durée) sont-elles reliées aux caractéristiques spectrales (= en fréquence) de la source qui les émet ?
- 12 – 😊 – 😞 – Citer les ordres de grandeur de temps de cohérence du LASER, des lampes spectrales, et des sources de lumière blanche.

- 13 – 😊 – 😞 – Établir la relation entre le temps de cohérence et la largeur de la radiation considérée.
- 14 – 😊 – 😞 – Citer les ordres de grandeur des temps de réponse des récepteurs : œil, photodiode, capteur CCD.
- 15 – 😊 – 😞 – Comment est définie l'intensité lumineuse ?
- 16 – 😊 – 😞 – Rappeler sans démonstration la formule de Fresnel et ses conditions d'applications (= critères de cohérence).
- 17 – 😊 – 😞 – Rappeler sous quelles conditions deux ondes sont cohérentes. Établir la formule de Fresnel dans ces hypothèses.
- 18 – 😊 – 😞 – Donner les conditions d'interférences constructives et destructives en termes de déphasage, d'ordre d'interférence et de différence de marche.
- 19 – 😊 – 😞 – Définir le contraste.
- 20 – 😊 – 😞 – Comment doivent être les intensités des ondes qui interfèrent pour obtenir une figure bien contrastée ?

FlashCards :

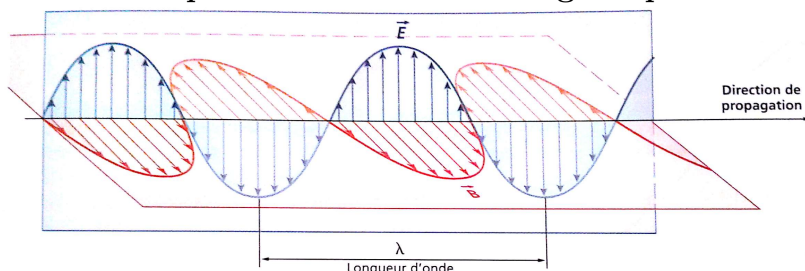


I Modèle scalaire des ondes lumineuses

La lumière est décrite de manière complète par deux modèles : le **modèle corpusculaire** (photon) et le **modèle ondulatoire** (cf partie sur les ondes électromagnétiques). On parle de dualité onde–corpuscule (cf PCSI introduction à la mécanique quantique). Ces deux modèles permettent d'expliquer l'ensemble des expériences réalisées jusqu'à maintenant avec la lumière.

Pour l'étude des **phénomènes d'interférences lumineuses**, conséquences de la **nature ondulatoire de la lumière**, on s'appuiera sur la **modélisation de la lumière par une onde électromagnétique**.

Le signal complet associé à une onde lumineuse est le champ électromagnétique c'est-à-dire l'ensemble des champs vectoriels $\vec{E}(M, t)$ et $\vec{B}(M, t)$. Dans le vide (ou l'air), l'onde est transversale : les champs $\vec{E}(M, t)$ et $\vec{B}(M, t)$ sont constamment perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde.



I.1 De l'optique géométrique à l'optique ondulatoire

L'**optique géométrique**, introduite dès l'Antiquité, simplifie l'étude de la propagation de l'onde lumineuse en la remplaçant par des **constructions géométriques**. La nature vectorielle de la lumière n'est donc pas prise en compte. Selon cette approche, on admet que l'on peut attribuer une direction de propagation décrite par un vecteur unitaire $\vec{u}(M)$ et une vitesse de propagation $v(M)$.

Un **rayon lumineux** indique la **direction et le sens de propagation de l'énergie lumineuse**. L'indice optique d'un milieu (= indice de réfraction) est défini par $n = \frac{c}{v} > 1$ avec c la célérité de la lumière dans le vide ($c \approx 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Les constructions d'optique géométrique (image conjuguée à un objet) s'appuient sur les principes suivants :

1. Dans un Milieu Transparent, Linéaire, Homogène et Isotrope (MTLHI), la **lumière se propage rectilignement** c'est-à-dire que les rayons lumineux sont des droites orientées.
2. **Indépendance des rayons lumineux** : Les rayons se propagent de façon indépendante c'est-à-dire que les rayons lumineux qui se croisent n'interagissent pas entre eux.
3. **Principe de retour inverse de la lumière** : le trajet suivi par la lumière entre deux points situés sur le même rayon lumineux est indépendant du sens de propagation de la lumière.

I.2 Modèle scalaire – Vibration lumineuse

I.2.a) Modèle scalaire

♥ À retenir – Modèle scalaire

Le **modèle scalaire** consiste à décrire l'onde lumineuse par un champ scalaire $s(M, t)$ appelé **vibration lumineuse** scalaire qui correspond à une composante quelconque du champ électrique selon un axe perpendiculaire à la direction de propagation $\vec{u}$: $s(M, t) = \vec{E}(M, t) \cdot \vec{i}$ avec $\vec{i} \perp \vec{u}$

Rq : Lorsque Huygens, puis Fresnel, ont élaboré le modèle scalaire de la lumière, ils ignoraient la nature vectorielle du champ électromagnétique associé à la lumière. Ce modèle scalaire était donc pour eux un postulat à la base de l'optique.

I.2.b) Onde monochromatique – Vibration sinusoïdale

Les sources réelles sont des sources étendues spatialement non monochromatiques. Il est utile de **décomposer** ces sources pour se ramener à des sources plus élémentaires :

- Une **source spatialement étendue** peut être décomposée en un ensemble de sources ponctuelles émettant chacune une onde lumineuse de vibration $s_i(M, t)$. Alors la vibration instantanée totale de l'onde lumineuse s'écrit $s(M, t) = \sum_i s_i(M, t)$
- L'analyse de Fourier permet de décomposer la vibration émise par une source ponctuelle **non monochromatique** comme une somme infinie de vibrations sinusoïdales.

♥ À retenir – Vibration associée à une onde monochromatique

Une source ponctuelle monochromatique à la pulsation ω émet une onde lumineuse dont la vibration au point M à l'instant t s'écrit sous la forme :

$$s(M, t) = A(M) \cos(\omega t - \varphi_M)$$

- $\omega = 2\pi\nu$ est la pulsation, en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ et ν la fréquence en Hz ;
- $A(M)$ est l'amplitude de l'onde en M ;
- φ_M est le **retard de phase** au point M ($-\varphi_M$ est la phase à l'origine des temps, en rad).

On peut caractériser cette onde monochromatique par sa **longueur d'onde dans le vide**, notée λ_0^a :

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu} = \frac{2\pi c}{\omega}$$

La représentation complexe associée à cette vibration :

$$\underline{s}(M, t) = A(M) e^{i(\omega t - \varphi_M)}$$

^a. La longueur d'onde dépend du milieu dans lequel l'onde se propage : $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$

♥ À retenir – Longueur d'onde dans le vide et couleur

La fréquence ne dépend pas du milieu (linéaire) de propagation. Le visible s'étend de 400 nm à 800 nm.

Couleur	bleu	vert	jaune orangé	rouge
λ_0 (nm)	500	550	590	630
ν (Hz)	6×10^{14}	$5,5 \times 10^{14}$	$5,1 \times 10^{14}$	$4,8 \times 10^{14}$

I.3 Propagation

I.3.a) Propagation

Une source ponctuelle monochromatique située en S émet une onde lumineuse :

$$s(S, t) = A(S) \cos(\omega t - \varphi_S)$$

Cette onde met un certain temps τ_{SM} pour se propager jusqu'en M . En négligeant les phénomènes d'atténuation de l'amplitude de l'onde durant la propagation, $A(M) = A(S) \underset{\text{not}}{=} A$:

$$\begin{aligned} s(M, t) &= s(S, t - \tau_{SM}) \\ &= A \cos(\omega(t - \tau_{SM}) - \varphi_S) \\ &= A \cos(\omega t - (\varphi_S + \omega \tau_{SM})) \\ &= A \cos(\omega t - \varphi_M) \end{aligned}$$

I.3.b) Retard de phase et chemin optique

♥ À retenir – Retard de phase

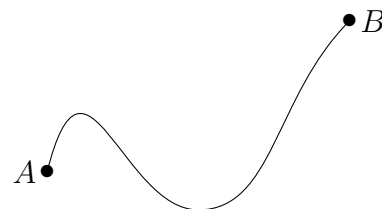
Entre S et M , l'onde subit un **retard de phase** :

$$\varphi_M = \varphi_S + \omega \tau_{SM}$$

où τ_{SM} est la durée de propagation entre S et M .

Dans un milieu d'indice optique $n(P)$, on note $\Gamma_{A \rightarrow B}$ la courbe décrite par le rayon lumineux entre A et B . Exprimons la durée τ_{AB} mise par la lumière pour aller d'un point A à un point B :

$$\begin{aligned} \tau_{AB} &= \int_{\Gamma_{A \rightarrow B}} \frac{d\ell_P}{v(P)} \\ &= \int_{\Gamma_{A \rightarrow B}} \frac{d\ell_P}{\frac{c}{n(P)}} \\ &= \frac{1}{c} \int_{\Gamma_{A \rightarrow B}} n(P) d\ell_P \end{aligned}$$



📖 Définition – Chemin optique

Le **chemin optique** entre A et B , selon la courbe $\Gamma_{A \rightarrow B}$, noté (AB) est défini par :

$$(AB) = \int_{\Gamma_{A \rightarrow B}} n(P) d\ell_P$$

Ainsi $\tau_{AB} = \frac{(AB)}{c} \Leftrightarrow (AB) = c\tau_{AB}$: c'est la distance que parcourrait la lumière dans le vide pendant la durée τ_{AB} .

Dans un milieu homogène, $n(P)$ a la même valeur partout, la lumière se propage en ligne droite, d'où

$$(AB) = n \cdot AB$$

où AB est la longueur du segment entre A et B .

♥ À retenir – Retard de phase et chemin optique

Une onde lumineuse se propageant de S à M subit un retard de phase dû à la propagation :

$$\varphi_M = \varphi_S + \omega\tau_{SM} = \varphi_S + \frac{2\pi c}{\lambda_0}\tau_{SM} = \varphi_S + \frac{2\pi}{\lambda_0}(SM)$$

Remarques –

Lors d'une **réflexion sur un milieu plus réfringent**, un déphasage de π doit être ajouté.
Aucun déphasage ne sera à ajouter si la réflexion se produit sur un milieu moins réfringent, ou lors d'une transmission.

I.4 Surfaces d'onde

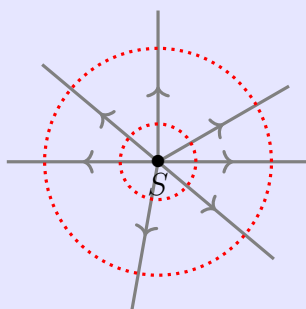
I.4.a) Surfaces d'onde

📖 Définition – Surface d'onde

On appelle **surface d'onde** une surface sur laquelle le **signal est uniforme** à tout instant c'est-à-dire que les points M formant la surface d'onde sont, à un instant t fixé, **dans un même état de vibration**.

📖 Définition – Onde sphérique

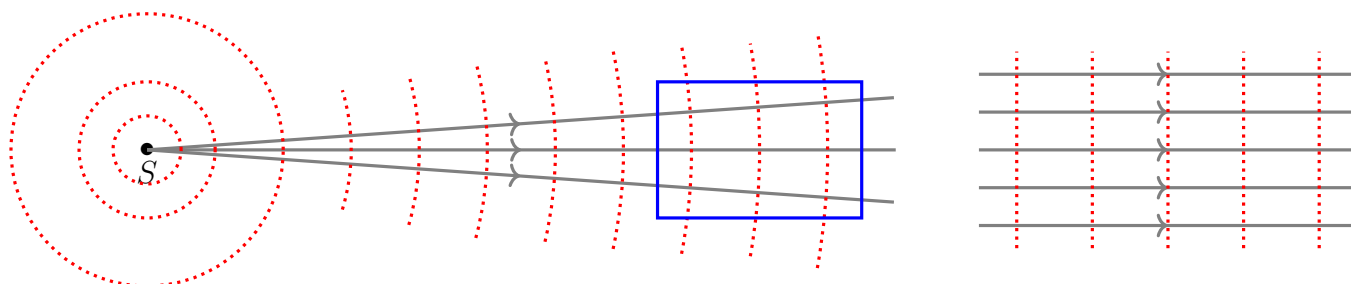
Une **onde sphérique** est une onde dont les surfaces d'onde sont des **sphères concentriques** de centre S , la source ponctuelle.



📖 Définition – Onde plane

Une **onde plane** est une onde dont les surfaces d'onde sont des **plans parallèles**.

Dans un milieu homogène, une source S ponctuelle émet une onde sphérique (cf figure de gauche), qui peut s'approximer par une onde plane à grande distance de la source.



♥ À retenir – Surface d'onde

Soit S une source ponctuelle, une **surface d'onde** correspond à l'ensemble des points M :

- atteints en même temps par la lumière issue de S ,
- $\Leftrightarrow$ tels que φ_M a la même valeur en tous points de la même surface d'onde (=surface équiphasé),
- $\Leftrightarrow$ tels que le chemin optique (SM) est le même en tous points de la même surface d'onde.

Conséquence : **Entre deux surfaces d'onde, le chemin optique est le même quel que soit le rayon lumineux suivi.**

I.4.b) Théorème de Malus

Pour les deux types d'onde précédents, on remarque que les surfaces d'onde sont orthogonales aux rayons lumineux. Le théorème de Malus affirme la généralisation de l'observation précédente.

♥ À retenir – Théorème de Malus (admis)

Les rayons lumineux de l'optique géométrique sont orthogonaux aux surfaces d'ondes.

Ce théorème fait le lien entre les modèles géométrique et ondulatoire de la lumière, il est donc important sur le plan conceptuel mais aussi dans la pratique des calculs.

⚠ Attention –

Ne pas confondre le théorème de Malus et la loi de Malus sur la polarisation (cf chapitre sur la propagation des ondes électromagnétiques dans le vide et TP).

I.5 Effet d'une lentille mince

📖 Définition – Stigmatisme rigoureux (rappel de PCSI)

Un système optique est dit rigoureusement stigmatique pour le couple de point (A, A') si tout rayon incident issu de A passe par A' après avoir traversé le système optique. Dans ce cas, les points A et A' sont dits **conjugués par le système optique**.

📖 Définition – Conditions de Gauss (rappel de PCSI)

Des rayons lumineux vérifient les conditions de Gauss (appelés **rayons paraxiaux**) lorsque

- ils sont peu inclinés par rapport à l'axe optique,
- leurs points d'intersection avec les différents dioptries restent proches de l'axe optique.

Dans l'approximation de Gauss, une lentille est un système optique stigmatique. On parle de **stigmatisme approché**.

🍃 Activité n°1 –

On considère une lentille mince $(\mathcal{L})$ éclairée dans les conditions de Gauss. On considère un couple de points conjugués (A, A') sur l'axe optique par la lentille $(\mathcal{L})$: A' est l'image de A par $(\mathcal{L})$.

Q1. Par un tracé géométrique, déterminer la position de l'image A' de A par la lentille.

Q2. En utilisant le théorème de Malus, dessiner les surfaces d'onde avant et après la lentille.

Q3. En déduire que cela implique que le chemin optique séparant A et A' est indépendant du rayon lumineux considéré.

⚠ Attention –

Les chemins optiques sont identiques. Sur le schéma, les distances parcourues semblent différentes, ce est dû à la modélisation de la lentille mince. En réalité, les rayons qui passent par le centre de la lentille parcourent une distance plus faible mais traversent une épaisseur de verre plus importante, ce qui ralentit la lumière.

♥ À retenir – Stigmatisme et chemin optique

Le chemin optique entre deux points conjugués par un système optique stigmatique est indépendant du rayon lumineux considéré.

🌿 Activité n°2 – Image ou objet à l'infini

Nous considérons une source ponctuelle A située au foyer objet F d'une lentille convergente de distance focale image f' .

- Q1. Tracer des rayons lumineux issus de A . Où est située l'image ?
- Q2. En utilisant le théorème de Malus, tracer les surfaces d'onde en amont et en aval de la lentille.
- Q3. Refaire le schéma si A est dans le plan focal objet (mais pas confondu avec F).
- Q4. Refaire le schéma pour une source lumineuse se trouvant à l'infini.

♥ À retenir – Onde sphérique $\leftrightarrow$ Onde plane

- Il est possible d'obtenir une onde plane en plaçant une source ponctuelle dans le plan focal objet d'une lentille convergente.
- Une lentille convergente éclairée par une onde plane permet d'obtenir une onde sphérique dont la source ponctuelle se situe dans le plan focal image.

II Émetteur et récepteur des ondes lumineuses

II.1 Sources de lumières réelles

L'origine des photons qui composent les rayons lumineux se trouve au niveau microscopique au cours des transitions des électrons d'un atome d'un niveau de haute énergie vers un niveau de faible énergie. Ces électrons sont excités vers des niveaux de haute énergie par une source d'énergie extérieure (chaleur pour les lampes à incandescence, décharge électriques pour une lampe à vapeur de mercure ou de sodium...) et leur retour au niveau d'énergie fondamentale s'accompagne de l'émission spontanée d'un photon dont l'énergie vaut précisément la différence d'énergie entre les deux niveaux impliqués dans la transition.

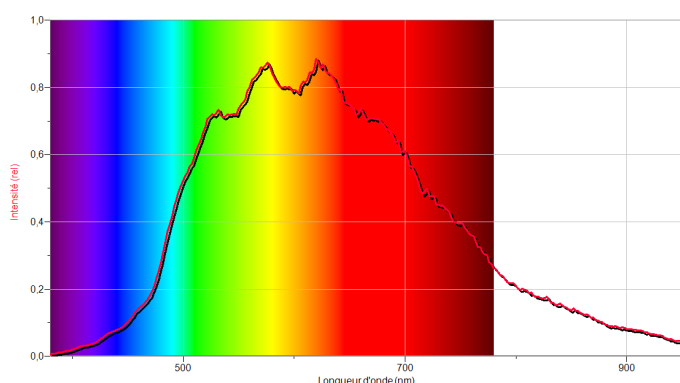


FIGURE 1 – Spectre d'une lampe à incandescence

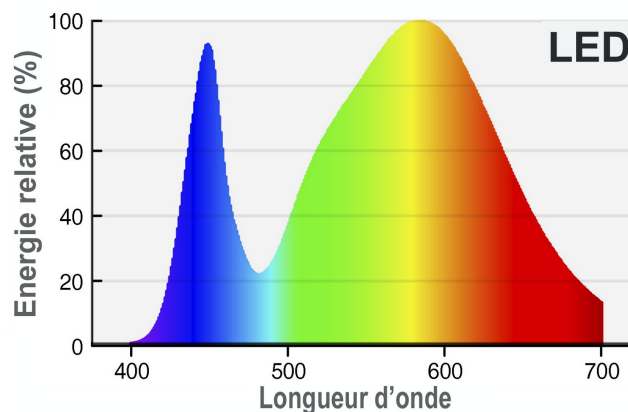


FIGURE 2 – Spectre d'une LED

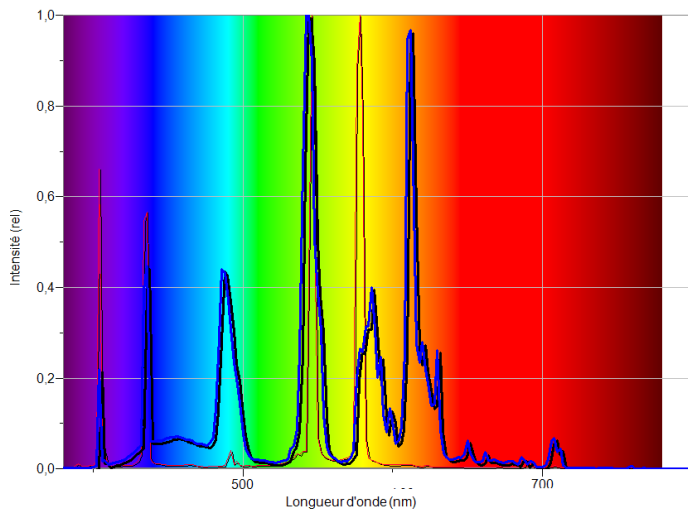


FIGURE 3 – Spectre d'une lampe à vapeur de mercure (trait épais), et d'un tube fluorescent

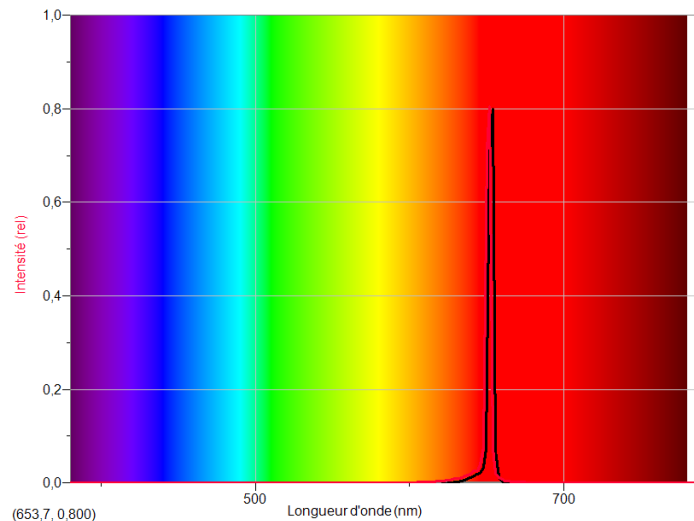


FIGURE 4 – Spectre d'un LASER

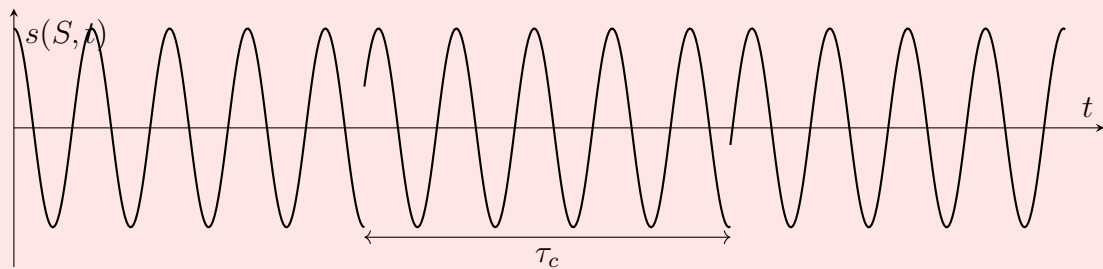
II.2 Modèle des trains d'ondes

D'un point de vue microscopique, l'émission de lumière est due à l'émission de photons par les entités de la source (lampe à filament, lampe spectrale, laser). **Aucune source lumineuse réelle ne peut émettre une onde pendant un temps infini. Une vibration sinusoïdale n'a donc aucune existence réelle, du fait de son extension temporelle infinie**

♥ À retenir – Trains d'ondes

Les sources réelles n'émettent pas en continu mais par **trains d'onde**.

À l'intérieur de **chaque train d'onde**, l'onde émise par la source S est représentée par une **sinusoïde de durée finie**, τ_c en moyenne, de longueur d'onde λ_0 correspondant à la longueur d'onde moyenne de la source. Le **retard de phase** $\varphi_{i,S}$ en S **varie aléatoirement d'un train d'onde au suivant**.



📖 Définition – Temps et longueur de cohérence

- La durée moyenne d'un train d'onde, notée τ_c , est appelée **temps de cohérence** de la source.
- La **longueur de cohérence temporelle** de la source est la longueur moyenne des trains d'ondes dans le vide notée $\ell_c = c \cdot \tau_c$.

♥ À retenir – Ordres de grandeur de temps de cohérence

- LASER : $\tau_c \sim 10^{-8}$ s ;
- lampe spectrale basse pression : $\tau_c \sim 10^{-11}$ s
- lampe à filament (source de lumière blanche) : $\tau_c \sim 10^{-15}$ s

♥ À retenir – Temps de cohérence et largeur spectrale

Le temps de cohérence d'une source lumineuse est relié à son spectre.

On note $\Delta\nu$ la largeur spectrale de la source en fréquence : $\Delta\nu = \nu_{\max} - \nu_{\min}$, $\Delta\lambda$ la largeur spectrale en longueur d'onde : $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$, et λ_{0m} la longueur d'onde moyenne du spectre.

$$\Delta\nu \sim \frac{1}{\tau_c} \quad \Delta\lambda \sim \frac{\lambda_{0m}^2}{c\tau_c}$$

Plus un train d'onde est court, plus le spectre est large.

🌿 Démonstration à maîtriser n°3 – Lien entre τ_c , $\Delta\lambda$, λ_{0m}

Montrer que $\Delta\lambda \sim \frac{\lambda_{0m}^2}{c\tau_c}$

🌿 Activité n°4 – Ordre de grandeur

Calculer τ_c et ℓ_c pour les sources suivantes :

	Lumière blanche	Raie spectrale	LASER
λ_0	600 nm	546,1 nm (raie verte Hg)	632,8 nm (He-Ne)
$\Delta\lambda$	400 nm	10 pm	1 pm

II.3 Réception d'une onde lumineuse

II.3.a) Exemples de récepteurs

- L'œil : la réception de la lumière est assurée par les cellules situées sur la rétine : les cônes et les bâtonnets. Ce sont des récepteurs photochimiques dont la conformation des molécules est modifiée lorsque des photons sont détectés. Cette modification de conformation est convertie en signal électrique qui se propage dans le nerf optique jusqu'au cerveau. Les cellules de l'œil délivrent un **signal électrique proportionnel à la puissance de l'onde lumineuse incidente**.
- Les photodiodes, capteurs CCD, ... exploitent l'effet photoélectrique dans les semi-conducteurs. Une onde lumineuse incidente a une probabilité non nulle de créer un courant électrique mesurable. Les photodiodes sont utilisées dans le domaine visible ou proche infrarouge et sont **sensibles à la puissance lumineuse incidente**.

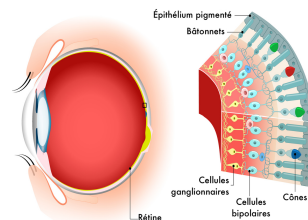


FIGURE 5 – Rétine

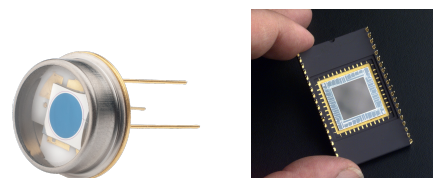


FIGURE 6 – Photodiode ; CCD

Le temps de réponse τ_R d'un capteur est la durée caractéristique des variations les plus rapides qu'il puisse transcrire.

♥ À retenir – Ordres de grandeur : Temps de réponse

Les temps de réponse des détecteurs de lumière sont :

- œil : $\tau_R \sim 0,1$ s
- capteur CCD (Charge Coupled Device) : $\tau_R \sim 1$ ms
- photodiode : $\tau_R \sim 1$ μ s

II.3.b) Intensité lumineuse

Les ondes lumineuses sont de période $T = \frac{1}{\nu} \approx 10^{-15}$ à 10^{-14} s $\ll \tau_R$, donc les capteurs précédents ne sont pas capables de suivre les variations instantanées du signal lumineux.

De plus, les capteurs précédents sont sensibles à la puissance incidente.

Ainsi, le signal délivré par tout capteur optique est proportionnel à l'énergie accumulée sur la surface du capteur pendant une durée de l'ordre de τ_R , autrement dit à la puissance moyenne reçue pendant τ_R .

Définition – Intensité lumineuse (ou éclairement)

L'intensité lumineuse $I(M)$ ou éclairement $\mathcal{E}(M)$ est la puissance surfacique moyenne reçue en un point M .

Le signal délivré par un photorécepteur placé en M est proportionnel à l'intensité lumineuse en ce point :

$$I(M) = \mathcal{E}(M) = K \langle s^2(M, t) \rangle_{\tau_R}$$

avec K une constante positive USI de $I(M)$ ou $\mathcal{E}(M)$: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

Remarques –

Dans le cours d'électromagnétisme nous ferons le lien entre l'intensité lumineuse et le vecteur de Poynting lui-même relié aux champs électrique et magnétique.

$$I(M) = \langle \vec{\Pi}(M, t) \cdot \vec{u} \rangle_{\tau_R} = \frac{1}{\mu_0 c} \langle E^2(M, t) \rangle_{\tau_R}$$

À retenir – Pour une onde plane lumineuse monochromatique

Nous pouvons aussi utiliser la représentation complexe $\underline{s}$ de la vibration scalaire :

$$I(M, t) = K \langle s^2(M, t) \rangle_{\tau_R} = K \cdot \frac{1}{2} \Re(\underline{s}(M, t) \times \underline{s}(M, t)^*) = \frac{K}{2} |\underline{s}(M, t)|^2$$

Activité n°5 –

Exprimer l'intensité lumineuse d'une onde monochromatique à l'aide de son amplitude.

III Superposition de deux ondes lumineuses

III.1 Superposition de deux ondes quasi-monochromatiques – Intensité résultante

On considère **deux sources** S_1 et S_2 **ponctuelles quasi-monochromatiques** dans un milieu homogène.

Ces deux ondes se superposent dans tout l'espace, et on s'intéresse à l'intensité lumineuse résultante en un point M de l'espace. En M :

- $s_1(M, t) = A_1 \cos(\omega_1 t - \varphi_1(M)) = A_1 \cos\left(\omega_1 t - \varphi_{S_1}(t) - \frac{2\pi}{\lambda_1}(S_1 M)\right)$, où $\varphi_{S_1}(t)$ est la phase à l'origine (en S_1) du train d'onde qui atteint M en t (c'est une fonction aléatoire du temps).
- $s_2(M, t) = A_2 \cos(\omega_2 t - \varphi_2(M)) = A_2 \cos\left(\omega_2 t - \varphi_{S_2}(t) - \frac{2\pi}{\lambda_2}(S_2 M)\right)$, où $\varphi_{S_2}(t)$ est la phase à l'origine (en S_2) du train d'onde qui atteint M en t (c'est une fonction aléatoire du temps).

🍷 Démonstration à maîtriser n°6 –

Exprimer l'intensité résultante en M sous la forme

$$I(M) = I_1(M) + I_2(M) + \text{terme d'interférences}$$

où on identifiera le terme d'interférences.

♥ À retenir – Interférences

Il y a **interférence** entre deux ondes lorsque l'intensité lumineuse issue de la superposition de ces deux ondes n'est pas égale à la somme des intensités de chaque onde individuelle : $I(M) \neq I_1(M) + I_2(M)$.

III.2 Terme d'interférences – Conditions d'interférences / de cohérence

On cherche à déterminer les conditions qui permettent au terme d'interférences $\langle 2s_1(M, t)s_2(M, t) \rangle_{\tau_R}$ de ne pas être nul.

🍷 Démonstration à maîtriser n°7 – Terme d'interférences non nul ?

- Q1. En utilisant la formule de trigonométrie $\cos(a)\cos(b) = \frac{1}{2}(\cos(a+b) - \cos(a-b))$, exprimer le terme d'interférences sous la forme de la somme de deux cosinus.
- Q2. À quelle condition sur ω_1 et ω_2 ce terme n'est pas nul ?
- Q3. En utilisant le modèle des trains d'onde, quelle autres condition doit être vérifiée pour que le terme d'interférences ne soit pas nul ?
- Q4. En déduire l'expression de $I(M)$ dans ce cas.

📖 Définition – Ondes cohérentes

- Deux ondes sont **cohérentes** si :
 - elles sont de **même fréquence** (=synchrones),
 - et qu'elles proviennent du même train d'onde, ce qui impose qu'elles soient **issues de la même source physique** S et aient **suivi deux chemins différents** pour atteindre le point M d'observation notés (1) et (2).
- Si ces critères ne sont pas vérifiés, les ondes sont **incohérentes**.

♥ À retenir – Superposition de deux ondes incohérentes

L'intensité résultante de la superposition de deux ondes incohérentes est la somme des intensités dues à chaque onde,

$$I(M) = I_1(M) + I_2(M) \quad (1)$$

Pour respecter les conditions d'interférences lumineuses, on utilise une source unique associée à un diviseur d'onde. La division d'onde peut-être réalisée de deux façons :

- Par division du front d'onde** : on isole spatialement deux parties d'une onde provenant d'une même source S . On fait ainsi interférer deux rayons différents issus d'une même source.
Exemple : Trous d'Young (cf PCSI, Chapitre n°02 et TP)
- Par division d'amplitude** : un même rayon est séparé en deux parties, par exemple grâce à l'utilisation d'une lame semi-réfléchissante. On fait ainsi interférer chaque rayon émis par la source avec lui-même.
Exemple : Interféromètre de Michelson (cf Chapitre n°03 et TP)

III.3 Formule de Fresnel

♥ À retenir – Formule de Fresnel

Lorsque des ondes quasi-monochromatiques et cohérentes entre elles provenant de S se superposent en M , l'intensité s'écrit :

$$I(M) = I_1(M) + I_2(M) + 2\sqrt{I_1(M)I_2(M)} \cos(\Delta\varphi(M)) \quad (2)$$

Dans le cas (très fréquent) où les deux ondes qui interfèrent en M sont de même intensité, notée I_0 :

$$I(M) = 2I_0(1 + \cos(\Delta\varphi(M))) \quad (3)$$

♥ À retenir – Grandeurs associées au déphasage

On associe au déphasage $\Delta\varphi(M) = \varphi_2(M) - \varphi_1(M)$, les deux grandeurs suivantes :

- La différence de marche entre S et M est la différence de chemin optique entre deux trajets possibles pour la lumière entre S et M : $\delta(M) = (SM)_2 - (SM)_1$
- L'ordre d'interférence en M est le rapport : $p(M) = \frac{\delta(M)}{\lambda_0}$

$$\Delta\varphi(M) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta(M) = 2\pi p(M)$$

✍ Démonstration à maîtriser n°8 – Formule de Fresnel

On considère deux ondes cohérentes en M $s_1(M, t) = A_1 \cos(\omega t - \varphi_1(M))$ et $s_2(M, t) = A_2 \cos(\omega t - \varphi_2(M))$, avec $\varphi_i(M) = \varphi_0 - \frac{2\pi}{\lambda_0}(SM)_i$.

- Q1. Établir l'expression de l'intensité totale en M , en fonction de I_1 , I_2 , et $\delta(M) = (SM)_2 - (SM)_1$ la différence marche entre les deux ondes en M .
- Q2. 2^e méthode. En utilisant la représentation complexe, établir à nouveau cette relation.
- Q3. Que devient cette relation si $I_1 = I_2 \equiv I_0$?

III.4 Figure d'interférence

III.4.a) Interférences constructives / destructives

D'après la formule de Fresnel, l'intensité lumineuse dépend de la position du point M : cette variation d'intensité correspond aux différentes franges de la figure d'interférences.

📖 Définition – Interférences constructives / destructives

- Les interférences en un point M sont dites **constructives** si l'intensité y est maximale.
- Les interférences en un point M sont dites **destructives** si l'intensité y est minimale.

✍ Démonstration à maîtriser n°9 –

- Q1. Établir la condition d'interférence constructive en M .
- Q2. Établir la condition d'interférence destructive en M .

♥ À retenir – Conditions d'interférences constructives / destructives

	Déphasage	Différence de marche	Ordre d'interférence
Interférences constructives	$\Delta\varphi(M) = 2m\pi, m \in \mathbb{Z}$	$\delta(M) = m\lambda_0, m \in \mathbb{Z}$	$p(M) = m, m \in \mathbb{Z}$
Interférences destructives	$\Delta\varphi(M) = (2m + 1)\pi, m \in \mathbb{Z}$	$\delta(M) = (2m + 1)\frac{\lambda_0}{2}, m \in \mathbb{Z}$	$p(M) = m + \frac{1}{2}, m \in \mathbb{Z}$

III.4.b) Contraste des franges

📖 Définition – Contraste

On définit le contraste C (ou visibilité) d'une figure d'interférences :

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \in [0, 1]$$

$C = 0$: intensité uniforme ; $C = 1$: si $I_{\min} = 0$.

🧪 Démonstration à maîtriser n°10 – Expression du contraste

Q1. Exprimer le contraste en fonction de I_1 et I_2 .

Q2. Que vaut-il si $I_1 = I_2$?

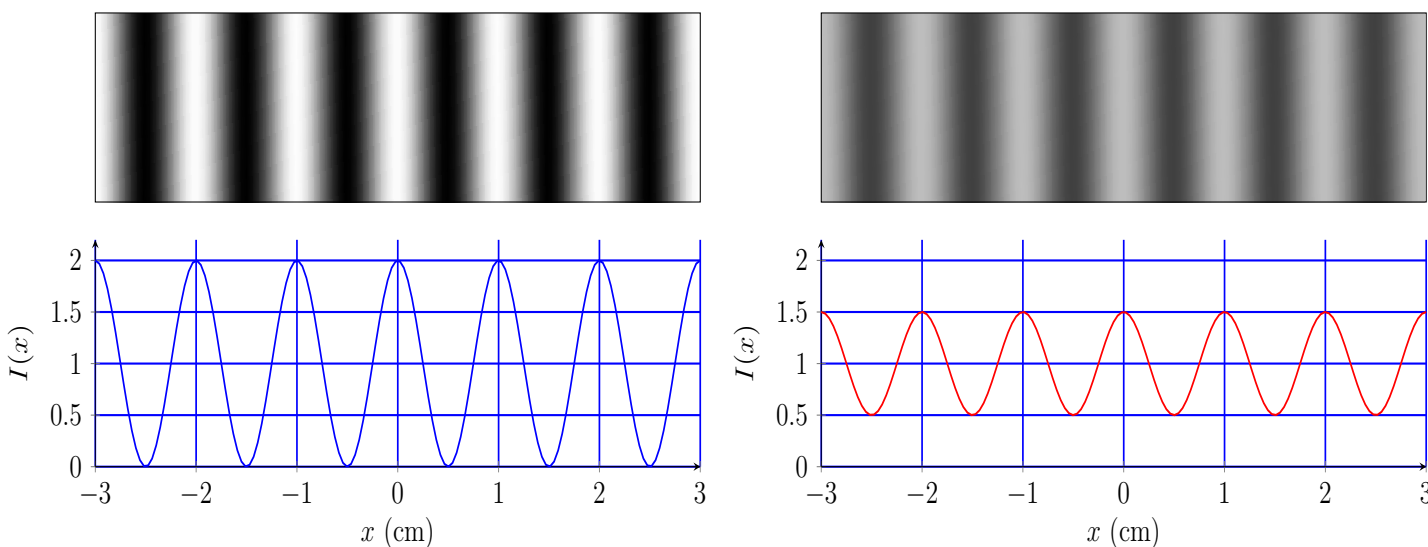


FIGURE 7 – Effet du contraste. À gauche : $C = 1$. À droite : $C = 0,5$

♥ À retenir –

Pour obtenir une figure d'interférences bien contrastée, il faut faire interférer des ondes lumineuses d'intensités voisins.

Remarque : Posons $x = \frac{I_2}{I_1}$, alors $C = \frac{2\sqrt{x}}{1+x}$

