

Chap.1 – Modèle ondulatoire scalaire de la lumière

1. Nature de la lumière

- 1.1. La lumière : une OEM
- 1.2. Amplitude résultante : théorème de superposition
- 1.3. Spectres en longueur d'onde

2. Processus d'émission de la lumière par les sources

- 2.1. Notion de train d'onde
- 2.2. Cohérence temporelle d'une source
- 2.3. Source étendue – Cohérence spatiale
- 2.4. Temps de réponse des photodétecteurs – Définition de l'éclairement

3. Chemin optique parcouru par une onde lumineuse

- 3.1. Evolution du retard de phase durant la propagation
- 3.2. Chemin optique
- 3.3. Surface d'onde – Théorème de Malus
- 3.4. (*Complément*) Condition de stigmatisme d'un système optique

1. Nature de la lumière

1.1. La lumière : une OEM

On appelle lumière une onde électromagnétique dans le domaine visible. En optique ondulatoire, on ne fera que très rarement mention de cette nature électromagnétique de la lumière.

On peut tout simplement considérer qu'une onde se propage, sans préciser la nature de cette onde. Lorsque les milieux rencontrés par la lumière sont insensibles au caractère vectoriel de l'OEM (sa polarisation), on peut modéliser la lumière par **une onde scalaire**.

On se restreint dans tous les chapitres suivants à la propagation des ondes dans les milieux transparents linéaires homogènes et isotropes. La lumière s'y propage à une vitesse :

$$v = \frac{c}{n}$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide.

Seules les ondes *progressives* nous intéressent, et l'on se restreint à l'étude des ondes *harmoniques*, que l'on qualifie plutôt de **monochromatiques** en optique.

Ecriture math d'une onde scalaire monochromatique

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

Remarques :

- Généralement, l'amplitude d'une onde décroît au cours de sa propagation (diffusion, absorption...). Ces considérations sont hors programme
- Le terme $\varphi(M)$ dépend du point M de l'espace où l'on considère l'onde. En raison de la présence d'un signe $(-)$, le terme $\varphi(M)$ se nomme **retard de phase**. Cette convention est plus pratique en optique.

- Une onde progressive monochromatique est doublement périodique. Rappelez les relations entre les grandeurs temporelle et spatiale : pulsation, fréquence, période.

On rappelle que les grandeurs temporelles sont indépendantes du milieu dans lequel se propage l'onde : elles sont *intrinsèques* à l'onde. Les grandeurs spatiales – elles – dépendent du milieu de propagation de la lumière.

- On se place dans un milieu d'indice n . Donner les relations entre les grandeurs spatiales définies dans le vide (k_0, λ_0, σ_0), et celles définies dans le milieu (k, λ, σ).

Par la suite, même dans un milieu d'indice n , on fera toujours apparaître la longueur d'onde dans le vide.

Si l'on parle de longueur d'onde sans plus de précisions, ce sera toujours celle dans le vide.

1.2. Amplitude résultante : théorème de superposition

Les équations de Maxwell sont linéaires, donc les OEM vérifient le théorème de superposition. Aussi, en optique, l'amplitude de l'onde totale $s_{tot}(M, t)$ en un point de l'espace est égale à la somme de toutes les ondes $s_i(M, t)$ qui s'y trouvent.

Théorème de superposition

$$s_{tot}(M, t) = \sum_i s_i(M, t)$$

1.3. Spectres en longueur d'onde

- Rappeler les différentes sortes de sources que l'on peut rencontrer en TP

On retiendra qu'*une source purement monochromatique n'existe pas*. Les raies d'une lampe spectrale ont une certaine largeur en fréquence, difficile à mettre en évidence avec les spectroscopes habituels, mais qui peut se manifester lors de l'étude des interférences.

- Montrer que la largeur relative en fréquence est égale en valeur absolue à celle en longueur d'onde.

Pour une lampe spectrale : $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \sim 10^{-3}$

Pour un laser : $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \sim 10^{-7}$

2. Processus d'émission de la lumière par les sources

2.1. Notion de train d'onde

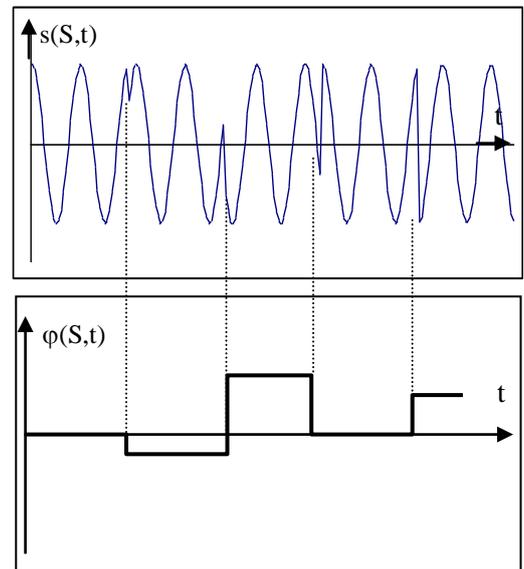
On considère une source *ponctuelle* monochromatique. Cette source n'émet pas une onde en continu, mais des « bouffées », des « paquets » d'onde. Un modèle simple est celui des *trains d'onde*.

Trains d'onde – Temps de cohérence τ_c

*Un train d'onde est une onde sinusoidale de durée finie.
La durée des trains d'onde émis par une source définit son temps de cohérence.*

*Le retard de phase à l'émission de chaque train d'onde est aléatoire.
Il n'y a pas de 'cohérence' entre les retards de phase de deux trains d'onde successifs.*

Cette représentation graphique de plusieurs trains d'onde successifs montre des trains d'onde « collés » les uns aux autres. Ce n'est pas une nécessité, le modèle des trains d'onde étant très simplifié, cela n'a pas d'importance pour la suite.



Lampe spectrale : $\tau_c \sim 10^{-11} \text{ s}$

Laser : $\tau_c \sim 10^{-7} \text{ s}$

Cela reste très grand devant la période d'une onde monochromatique visible $T \sim 10^{-14} \text{ s}$

2.2. Cohérence temporelle d'une source

Relation avec la largeur de la raie en fréquence

Le temps de cohérence d'une source est inversement proportionnel à la largeur de son spectre en fréquence :

$$\Delta\nu \times \tau_c \sim 1$$

Longueur de cohérence

C'est la longueur d'un train d'onde dans le vide :

$$L_c \stackrel{\text{def}}{=} c \times \tau_c$$

➤ Evaluer l'ordre de grandeur de la longueur de cohérence d'une source spectrale, puis d'un laser.

2.3. Source étendue – Cohérence spatiale

Les sources accessibles en TP ne sont pas ponctuelles, mais étendues dans l'espace. On peut les modéliser comme un ensemble de sources ponctuelles.

*Chaque point d'une source étendue est **une source incohérente avec ses voisines** : les retards de phase des trains d'onde émis par différents points de la source sont indépendants.*

On pourrait donc conclure qu'une source étendue est incohérente spatialement. Mais contrairement à la cohérence temporelle, la cohérence spatiale n'est pas intrinsèque à la source. Elle dépend du dispositif d'observation des ondes lumineuses (les dispositifs interférentiels pour nous). Pour comprendre cela qualitativement, il suffit de remarquer que deux points de la source regardés de très loin... semblent confondus. Une étoile nous apparaît ponctuelle depuis la Terre, mais elle ne l'est pas (cf. la taille du Soleil).

2.4. Temps de réponse des photodétecteurs – Définition de l'éclairement

L'éclairement est une grandeur très importante en optique puisqu'elle correspond à ce que l'on voit avec nos yeux, ou avec des capteurs électroniques (photodiode, capteurs CCD...). Pour revenir à l'électromagnétisme, l'éclairement est relié au vecteur de Poynting, donc au flux d'énergie qui pénètre dans notre œil (ou autre capteur). On rappelle que ce vecteur est proportionnel au carré du champ électrique dans le vide. Cette dépendance quadratique avec l'amplitude de l'onde étant générale, elle justifie que l'éclairement soit défini à partir du carré de l'onde lumineuse.

Mais ce n'est pas tout. Les capteurs optiques courants ont un temps de réponse très nettement supérieur à la durée d'un train d'onde (0,1 s pour l'œil, et 0,01 s pour un capteur CCD). Ces capteurs perçoivent donc l'énergie lumineuse intégrée sur un temps très nettement supérieur à la période de l'onde monochromatique. On peut montrer que cette intégrale est proportionnelle à la valeur moyenne de la puissance reçue sur une période.

Définition de l'éclairement

$$\varepsilon(M) \stackrel{\text{def}}{=} K \langle s^2 \rangle$$

avec K une constante de proportionnalité sans importance.
La moyenne temporelle est prise sur une période.

- Donner l'expression de l'éclairement en fonction de l'amplitude A d'une onde monochromatique.
- Ecrire en complexe cette onde monochromatique. Comment exprimer l'éclairement en fonction de $|\underline{s}|^2$, puis $\underline{s} \underline{s}^*$?

Remarque : On parle parfois **d'intensité** au lieu d'éclairement. Ce n'est pas exactement la même chose, mais les deux quantités étant proportionnelles, on ne fera pas de différence entre les deux.

Remarque (merci à Reda Bazaar) : Il existe maintenant des photodétecteurs femtoseconde ($1fs = 10^{-15}s$), il est alors possible de voir la lumière se propager petit à petit sur des distances de l'ordre du mm :

<https://www.youtube.com/watch?v=mfgsQX78hg8>

3. Chemin optique parcouru par une onde lumineuse

L'étude des phénomènes d'optique ondulatoire repose essentiellement sur notre capacité à connaître l'état de la phase de l'onde à chaque instant en chaque point de l'espace. Cela revient à connaître l'état du retard de phase en chaque point M de l'espace.

3.1. Evolution du retard de phase durant la propagation

Connaissant $\varphi(S)$ le retard de phase au niveau de la source, on peut exprimer le retard de phase $\varphi(M)$ en tout point M le long du trajet de l'onde, en fonction de la durée de propagation.

*On rappelle qu'en optique, un **rayon lumineux** représente le **trajet suivi par l'onde lumineuse**.*

- Notons t_{SM} le temps de propagation de l'onde depuis S jusqu'en M . En notant que la phase de l'onde en M à l'instant t est égale à la phase que l'onde avait en S à l'instant $(t - t_{SM})$, exprimer $\varphi(M)$ en fonction de $\varphi(S)$ et du temps de propagation

Il suffit donc de connaître le temps de propagation pour connaître la phase en M à chaque instant en fonction de la phase en S à chaque instant. Mais mesurer des durées de propagation en optique est très difficile, car la vitesse de propagation est très grande. Il est plus simple de se ramener à des mesures de distances : c'est l'intérêt de la notion de *chemin optique*.

Remarque : On ne s'intéressera dans tout le cours qu'à l'évolution du retard de phase le long du trajet de l'onde. On notera que l'amplitude de l'onde évolue aussi. Elle a généralement tendance à diminuer à cause des phénomènes de diffusion et d'absorption.

3.2. Chemin optique

Définition du chemin optique

Une onde se propage entre deux points M et N dans un milieu d'indice n en un temps t_{MN} .

Le **chemin optique** (MN) entre M et N est la distance qu'aurait parcourue l'onde dans le vide pendant t_{MN} :

$$(MN) \stackrel{\text{def}}{=} c t_{MN}$$

Expression du chemin optique dans un milieu d'indice n

$$(MN) = n \times MN$$

- Démontrer ce résultat.
- Donner l'expression du chemin optique entre M et N , sachant qu'une lame de verre d'épaisseur e et d'indice n est interposée sur le trajet de l'onde.
- Généraliser l'expression dans le cas d'un milieu non homogène.

Relation entre retards de phase et chemin optique

$$\varphi(N) = \varphi(M) + \frac{2\pi}{\lambda_0} (MN)$$

- Démontrer cette expression.

Remarque : Une réflexion sur un miroir, ou sur un milieu plus réfringent entraîne un 'saut' du retard de phase égale à π .

Remarque : Si l'onde progressive est plane, $\varphi(N) = \varphi(M) + \vec{k} \cdot \overrightarrow{MN}$

3.3. Surface d'onde – Théorème de Malus

Définition d'une surface d'onde

Une surface d'onde est le lieu des points équi-phase.

Soit S une source ponctuelle qui émet une onde lumineuse. Une surface d'onde est donc le lieu des points M de même chemin optique depuis la source S : $(SM) = C t^e$

Théorème de Malus

(permet d'établir un lien avec l'Optique Géométrique)

Les rayons lumineux sont localement perpendiculaires aux surface d'onde.

Exemple d'une onde plane monochromatique :

- Dessiner (en 2D sur la feuille) plusieurs plans d'onde, correspondant à un maximum d'amplitude de l'onde.
- Quelle distance les sépare ?
- Dessiner différents rayons lumineux grâce au Théorème de Malus
- A quel type de faisceau correspond une onde plane ?

Exemple d'une onde sphérique monochromatique :

- Dessiner (en 2D sur la feuille) plusieurs surfaces d'onde, correspondant à un maximum d'amplitude de l'onde
- Quelle distance les sépare ?
- Dessiner différents rayons lumineux grâce au Théorème de Malus
- Quel type de source permet de créer une onde sphérique ?
- Avec quel dispositif simple peut-on en TP transformer une onde sphérique en onde plane ?

3.4. (Complément) Condition de stigmatisme d'un système optique

- Rappeler ce qu'est un système rigoureusement stigmatique pour deux points A et A'.
- En vous appuyant sur un schéma, montrer que le stigmatisme est vérifié lorsque les chemins optiques entre A et A' parcourus selon différents rayons lumineux sont tous égaux.

Notions clefs

Savoirs :

- Relations entre grandeurs périodiques spatiale et temporelle
- Ecriture math d'une onde monochromatique (retard de phase)
- Les différents types de source (différents types de spectre en longueur d'onde, ou fréquence)
- Cohérence temporelle d'une source ponctuelle : modèle des trains d'onde, temps de cohérence, longueur de cohérence, lien avec largeur de raie, retard de phase aléatoire d'un train d'onde à l'autre
- Source étendue : cohérence spatiale (dépend des conditions expérimentales)
- Définition de l'éclairement, influence du temps de réponse des photodétecteurs sur les observations

- Que représente un rayon lumineux ?
- Définition chemin optique + expression en fonction de l'indice et de la distance
- Relation entre $\varphi(M)$ et $\varphi(S)$ en fonction du chemin optique (MN)
- Définition d'une surface d'onde
- Théorème de Malus

Savoirs faire :

- Exprimer la longueur d'onde dans un milieu d'indice n en fonction de la longueur d'onde dans le vide
- Etablir la relation entre $\varphi(M)$ et $\varphi(S)$ en fonction de la durée de propagation
- Dessiner des surfaces d'onde et les rayons lumineux correspondant pour ondes plane et sphérique