CHAPITRE 1 : MODELE SCALAIRE DES ONDES LUMINEUSES

Notions et contenus 2021	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.**

La lumière est une **onde** électromagnétique propageant des champs $\vec{E}$ *et* $\vec{B}$, dépendant du temps et du point M de l'espace atteint par cette onde, soit $\vec{E}(M,t)$ *et* $\vec{B}(M,t)$.
Les équations fondamentales de l'électromagnétisme - équations de Maxwell - qui régissent la variation des champs étant **linéaires**, ces champs obéissent au principe de **superposition**, et leurs composantes s'ajoutent scalairement ; on ne parlera dorénavant que des composantes susceptibles de s'additionner, qu'on notera s(M, t).
On ne considérera dans la suite que des milieux homogènes et isotropes, pour lesquels n = cte, n étant l'indice du milieu défini par :

$$n = c_0/c$$

$$c_0 = 299792458 \text{ m.s}^{-1}$$

est la célérité d'une onde ém dans le vide.
Dans les milieux homogènes et isotropes la lumière se propage en ligne droite.

1. Processus d'émission de la lumière par les sources :

1.1. Signal émis par une source monochromatique :

Un signal monochromatique émis par une source située en M_0 s'écrit :

$$s(M_0, t) = s_0.\cos(\omega t - \phi(M_0))$$

Sa pulsation ω est une constante, et $\phi(M_0)$ est une <u>constante</u> appelée phase à l'origine.

Un tel signal peut être réalisé en acoustique avec un GBF et un haut-parleur ; son spectre comporte une raie infiniment fine.

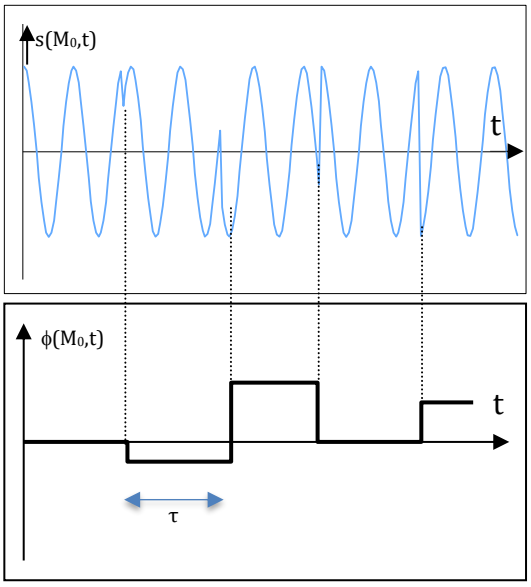
1.2. Signal émis par une source quasi-monochromatique :

Contrairement à l'émission d'un GBF, l'émission lumineuse est un phénomène complexe : la lumière est émise de manière discontinue, par « paquets » successifs appelés **trains d'onde**.
On peut modéliser l'émission d'une source quasi-monochromatique par une suite de portions de sinusoides de pulsation égale à la pulsation de la source, et dont la phase varie aléatoirement.

Le signal émis à t par une source S quasi-monochromatique s'écrit alors :

$$s(M_0, t) = s_0.\cos(\omega t - \phi(M_0,t))$$

où ω est la **pulsation** et $\phi(M_0,t)$ une fonction aléatoire du temps.
Pour des signaux optiques visibles, $\omega \sim 4.10^{15}\ s^{-1}$.



La valeur moyenne de $s(M_0,t)$ sur une durée grande devant T est nulle.

1.3. Largeur spectrale :

Définition : la durée moyenne d'un train d'onde est appelé **temps de cohérence** et noté τ (en s).

Définition : la longueur parcourue dans le vide pendant τ, soit

$$L_c = c_0.\tau,$$

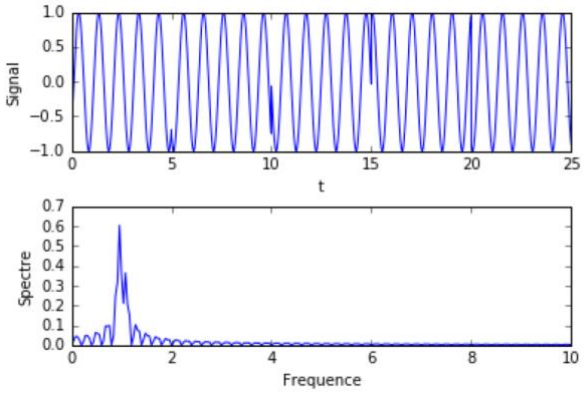
est la **longueur de cohérence** de la source (en m).

Ordres de grandeurs :

- Lampe blanche : $\tau \approx 10^{-14}$ s ; $L \approx 3$ µm
- lampe à vapeur métallique : $\tau \approx 10^{-11}$ s ; $L \approx 3$ mm ;
- Laser He-Ne du labo $\tau \approx 10^{-9}$ s ; $L \approx 30$ cm .

L'analyse fréquentielle d'un signal quasi-monochromatique montre que la largeur en fréquence $\Delta\nu$ est liée au temps de cohérence par la relation :

$$\Delta\nu.\tau \approx 1$$



Conséquence : seule une source infiniment cohérente ($\tau \to \infty$) serait strictement monochromatique ; la largeur spectrale en longueur d'onde d'une source est donc non nulle.

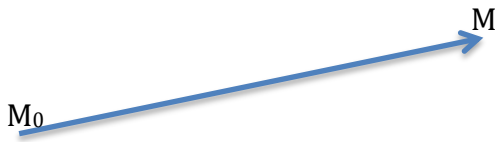
2. Propagation des ondes lumineuses :

Dans l'approximation de l'optique géométrique, la lumière se propage le long d'un rayon lumineux.

2.1.Signal reçu en un point M :

Un signal émis à t par une source M_0 monochromatique s'écrit :

$$s(M_0, t) = s_0.\cos(\omega t - \phi(M_0))$$



A cause de la propagation, en un point M de l'espace, le signal perçu à l'instant t a été émis à un instant <u>antérieur</u> t', avec $t' = t - t_P$.

Il s'écrit :

$$s(M, t) = s(M_0, t') = s_0.\cos(\omega(t-t_P) - \phi(M_0)) = s_0.\cos(\omega t - k.M_0M - \phi(M_0))$$

Un signal émis à t par une source M_0 quasi - monochromatique s'écrit :

$$s(M_0, t) = s_0.\cos(\omega t - \phi(M_0,t))$$

En un point M de l'espace, le signal perçu à l'instant t s'écrit :

$$s(M, t) = s(M_0, t') = s_0.\cos(\omega t - k.M_0M - \phi(M_0,t'))$$

L'onde progressive monochromatique (OPPM) présente donc une double périodicité :

- temporelle de période $T = 2\pi/\omega$;
- spatiale de période $\lambda = 2\pi/k$ (**longueur d'onde)**

Ces deux grandeurs sont liées par :

$$\lambda = c.T$$

2.2. Propagation dans un milieu d'indice n :

On convient en général d'indicer 0 les grandeurs relatives au vide, ainsi dans le vide :

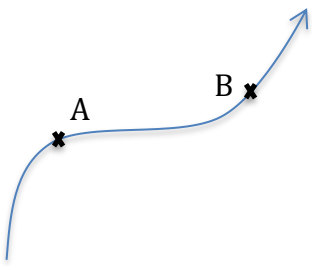
$$\lambda_0 = c_0.T$$

Lorsque l'on passe du vide à un milieu d'indice n, la pulsation (donc T) est inchangée, mais la célérité devient $c = c_0/n$.

On a donc :

$$\lambda = c_0\, T / n = \lambda_0 / n$$
$$k = n\, k_0.$$

2.3.Chemin optique :



Définition : le chemin optique d'un point A à un point B est défini par

$$L = (AB) = \int_A^B n.ds$$

calculé <u>le long d'un rayon lumineux</u> reliant A à B.

On a donc :

$$L = \int c_0.ds / c = c_0.t_{A->B}.$$

Le trajet optique mesure la durée mise par le signal pour aller de A à B (au facteur c près).

<u>Réécriture du signal :</u>

$$k.M_0M = n.\ 2\pi.M_0M\ \ / \lambda_0 = 2\pi\ (M_0M\ ) / \lambda_0.$$

où $\lambda_0 = c_0T$ est la longueur d'onde <u>dans le vide</u> de l'onde considérée.

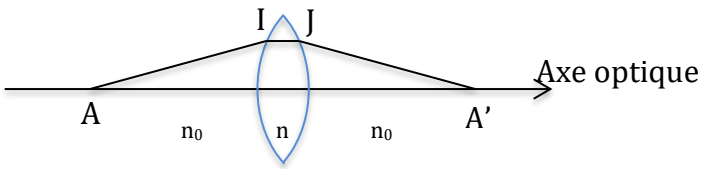
On peut donc écrire :

$$\mathbf{s(M, t) = s_0.cos(\ \omega t - 2\ \pi\ (M_0M)/\ \lambda_0 - \phi(\ M_0,t')\ ).}$$

<u>Calcul du chemin optique :</u>

Dans la plupart des cas la lumière traverse une suite de milieux homogènes et isotropes : les rayons lumineux sont des segments.

Exemple : lentille

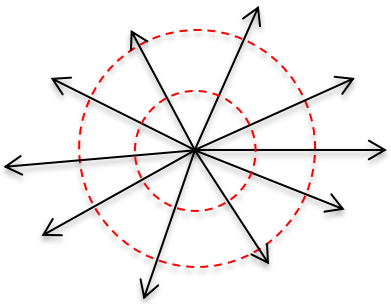


$$(AA') = (AI)+(IJ)+(JA') = n_0.AI + n.IJ + n_0JA'.$$

2.4. Surface d'onde :

Définition : Une surface d'onde est l'ensemble des points M tels que $(M_0M\ ) = cte$, M_0 étant un point source ; à t donné ces points sont dans un même état vibratoire.

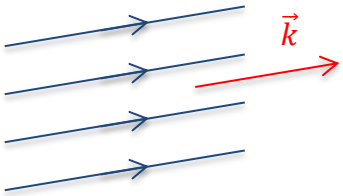
Exemples : pour une source ponctuelle M_0, les surfaces d'ondes sont des sphères centrées sur M_0.



Théorème de Malus (admis) : les rayons lumineux sont perpendiculaires aux surfaces d'onde.

2.5. Onde plane monochromatique ; vecteur d'onde :

Définition : une **onde plane** est une onde pour laquelle les surfaces d'onde sont des plans.
Une onde plane est donc composée de rayons parallèles orientés par un vecteur unitaire $\vec{u}$.



Définition : le vecteur d'onde $\vec{k}$ est un vecteur tangent au rayon lumineux et orienté dans le sens de la propagation.

Son module vaut par définition $k = 2\pi/\lambda$.

A t donné, tous les points M' tels que $\vec{k}.\overrightarrow{MM'}$ = cte sont dans le même état vibratoire ; ces points appartiennent à un même plan d'onde.

2.6. Onde sphérique :

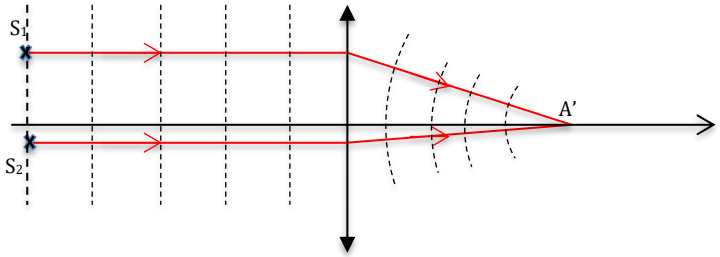
Définition : une **onde sphérique** est une onde pour laquelle les surfaces d'onde sont des sphères.

Une onde sphérique est donc composée de rayons divergents à partir d'un point source M_0 ou convergents vers un point M_0.

Son expression sera vue dans le cours d'acoustique.

2.7 . Effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss :

Une lentille mince permet de transformer une onde sphérique en onde plane, et réciproquement.

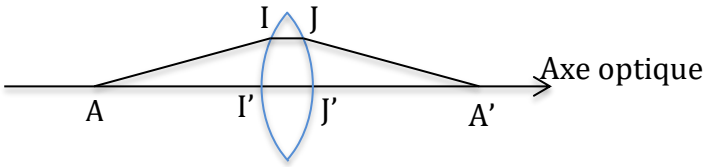


2.8. Condition nécessaire et suffisante de stigmatisme :

Définition : un système optique est rigoureusement stigmatique pour un couple de points A et A' si tout rayon passant par A avant traversée du système passe par A' après traversée du système.
Les points A et A' sont dits conjugués.

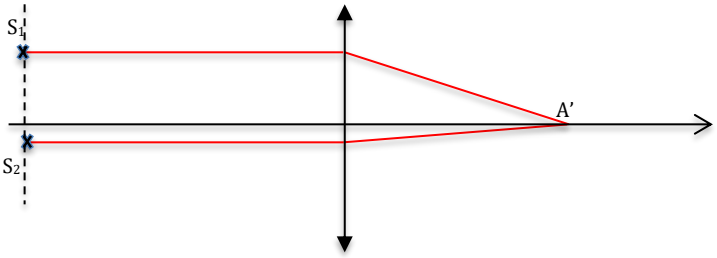
On admettra la **propriété suivante** : un système est stigmatique pour le couple de points (A, A') si le chemin optique (AA') est constant, quel que soit le rayon lumineux suivi.

Exemple : lentille mince : (AIJA') = (AI'J'A')

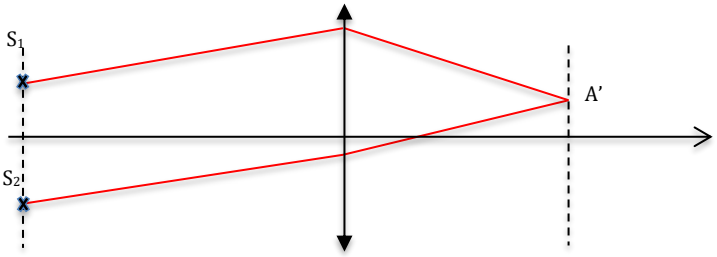


Conséquences :

$(S_1A') = (S_2A')$



$(S_1A') < (S_2A')$

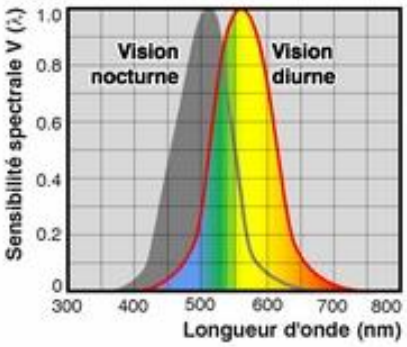


3. Réception des ondes lumineuses ; intensité (ou éclairement) :

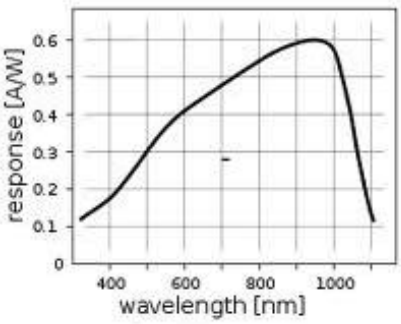
3.1. Récepteurs :

Les récepteurs les plus courants sont l'œil, la photodiode et le capteur CCD.
Leurs caractéristiques principales sont leur temps de réponse Tr et leur sensibilité spectrale.

Œil : $T_r \approx 50$ ms ; photodiodes : rapides 15 ps à 1 ns, labo 1 µs , capteur CCD 0,01 s.



Œil



Photodiode

Soit une vibration monochromatique :

$$s(M,t) = s_0.\cos(\omega t - \phi(M,t)) .$$

Les récepteurs courants (œil, photodiode..) ne sont pas sensibles à s(M,t), mais à son carré.

De plus, ces récepteurs courants, ayant des temps de réponse très grands devant la période de la vibration lumineuse, ne seront sensibles qu'à la **moyenne temporelle** de s^2, moyennée sur une période T_r du récepteur .

3.2. Intensité :

Définition: L'intensité est $I(M) = \frac{1}{T_r} \grave{O} s^2(M,t).dt$

On a par exemple pour la vibration s(M,t) précédente :

$$I(M) = s_0^2/2.$$

Notation complexe : $\underline{s}(M, t) = s_0.\exp j(\omega t - \phi(M))$ avec $s(M, t) = \mathrm{Re}[\underline{s}(M, t)]$.

On a alors :

$$I(M) = \langle \underline{s}.\underline{s}^* \rangle / 2.$$

Remarque : l'intensité ne dépend jamais du temps !!