

# Modèle scalaire des ondes lumineuses

En PTSI, la lumière et sa propagation étaient étudiées dans le cadre du modèle de l'optique géométrique : les rayons lumineux étaient, entre autres hypothèses, considérés comme indépendants les uns des autres.

Certains phénomènes ; comme les interférences, ne peuvent être expliqués avec ce modèle. On prend donc un modèle plus large : celui de l'optique ondulatoire.

On verra en fin d'année dans le thème électromagnétisme pourquoi la lumière (qui est composée du duo de champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ ) est une onde.

Dans ce thème OPTIQUE ONDULATOIRE on se limitera au modèle scalaire de l'onde lumineuse.



## Modèle scalaire de l'onde lumineuse

On décrit l'onde lumineuse par **un** champ **scalaire**  $s(M, t)$  appelé onde scalaire ou vibration scalaire ou grandeur lumineuse scalaire.

### Remarque

On peut considérer que  $s$  représente une des composantes de  $\vec{E}$  (à un facteur de proportionnalité près), mais concrètement,  $s$  est uniquement un intermédiaire de calcul sans signification physique.

## I - Modèle pour l'émission et la réception de la lumière

### I.A - Emission lumineuse : modèle des trains d'onde

#### I.A.1 - Rappel - Sources de lumière

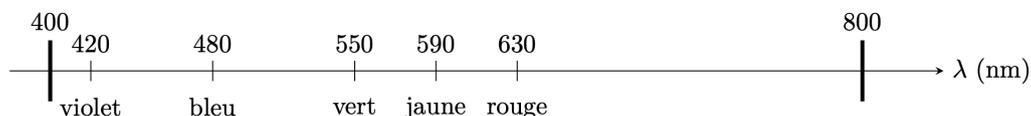
Une **source lumineuse** est un objet qui émet un rayonnement lumineux. On caractérise une source lumineuse par son **spectre** généralement représenté dans le domaine visible.

#### Domaine visible

##### Définition (Domaine visible)

La longueur d'onde **dans le vide** des ondes monochromatiques visibles est comprise entre 400 et 800 nm.

La fréquence associée  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  est comprise entre  $4 \cdot 10^{14}$  et  $7 \cdot 10^{14}$  Hz.



## Modèle de la source monochromatique

### Définition (Source monochromatique)

Une source **monochromatique** est une source émettant une onde lumineuse possédant une unique longueur d'onde. Son spectre ne présente donc qu'une raie infiniment fine.

### Remarque

C'est un modèle ! La source monochromatique n'existe pas dans la réalité.

## Faisceau LASER

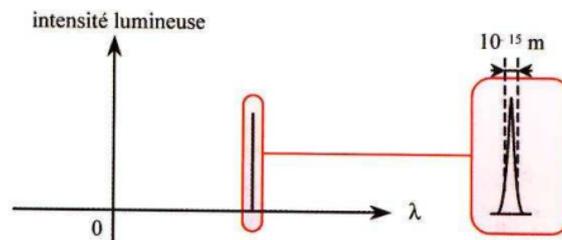
### Définition (Faisceau LASER)

Le spectre d'un faisceau LASER présente un **unique** pic très fin, qu'on appelle **raie spectrale**. On dit alors par abus de langage que cette source est « monochromatique ». Un LASER est caractérisé par la longueur d'onde moyenne de la lumière qu'il émet.

LASER utilisé au lycée : Hélium-Néon (He-Ne)  $\lambda \simeq 632,8 \text{ nm}$

### Allure du spectre

L'analyse du spectre montre qu'il n'y a qu'une seule raie spectrale. Cependant, une raie n'est jamais totalement infiniment fine (largeur de raie non nulle). Le LASER n'est donc pas vraiment monochromatique.

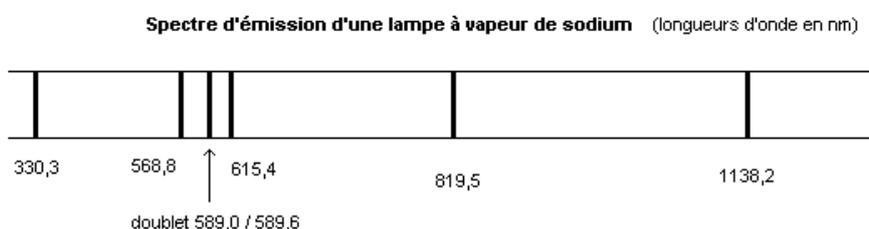


## Les lampes spectrales

### Définition (Lampe spectrale)

Une **lampe spectrale** est une ampoule contenant un élément sous forme de vapeur dans laquelle on provoque une décharge électrique entre deux électrodes. La lampe spectrale émet une série de longueurs d'onde caractéristique de l'élément qu'elle contient. Le spectre est discontinu (**discret**) et est constitué de pics fins appelés **raies spectrales** (ces raies sont un peu plus larges que celle du LASER). On qualifie cette source de lumière polychromatique.

### Allure du spectre



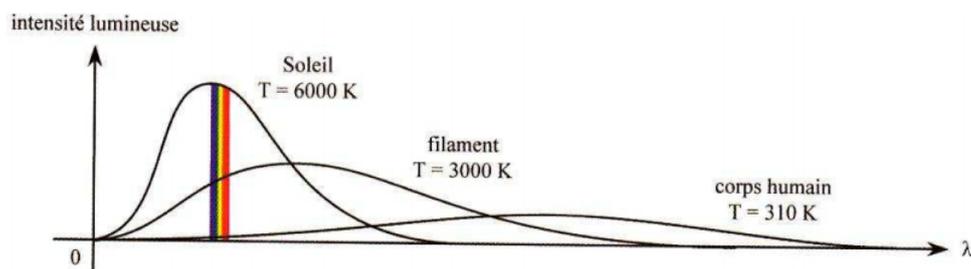
## Les sources de lumière blanche

### Définition (Lumière blanche)

Une **lumière blanche** est une lumière dont le spectre est **continu** et contient toutes les longueurs d'onde du domaine visible. C'est une source de lumière polychromatique.

*Ex : Le Soleil, lampe à incandescence ordinaire (filament de tungstène porté à 2800 K), lampe quartz iode (filament de tungstène porte à 3200 K environ dans un gaz halogène (diode) (lampe utilisée en TP)).*

### Allure du spectre



## I.A.2 - Temps et longueur de cohérence



### Modèle des trains d'onde

#### Remarque

C'est un modèle ! Par ailleurs très simpliste.

L'idée sous-jacente est que la lumière est émise pendant un temps fini par un électron se désexcitant.

Intérêt de ce modèle : pouvoir considérer l'onde comme purement monochromatique pendant  $\tau_c$ .

**Définition (Longueur de cohérence)**

**Ordres de grandeurs**

**I.A.3 - Lien avec la largeur spectrale**

**Relation entre le temps de cohérence et la largeur spectrale**

**Remarque**

On voit bien que plus l'onde émise est proche d'une onde purement sinusoïdale (ie purement monochromatique), plus elle sera modélisée par des trains d'onde de grand temps de cohérence, ce qui est cohérent avec la relation entre le temps de cohérence et la largeur spectrale.

**Démonstration - Passage du lien avec la largeur fréquentielle à la largeur en longueur d'onde**



**Application**

La raie verte du mercure a une longueur d'onde  $\lambda_0 = 546 \text{ nm}$  et une largeur  $\Delta\lambda = 2.10^{-2} \text{ nm}$  dans une lampe haute pression.  
Déterminer  $\tau_c$  et le nombre de périodes par train d'onde.

## I.B - Réception : caractéristiques des capteurs

### Ordres de grandeur

Les capteurs optiques ont un temps de réponse (ou d'intégration) qui est la durée caractéristique des variations les plus rapides qu'il puisse transcrire.



Mais alors que voit-on exactement ?

### Définition (Eclaircissement)



**Application**

Calculer  $\mathcal{E}(M)$  pour une onde purement monochromatique.

## II - Propagation des ondes lumineuses

### II.A - Surfaces d'onde et rayon lumineux

#### Définition (Surface d'onde)

#### Vocabulaire

Si les surfaces d'onde sont des sphères, l'onde est dite **sphérique**.

Si les surfaces d'onde sont des plans parallèles, l'onde est dite **plane**.

#### Exemple

**Rappel** : le rayon lumineux = ligne le long de laquelle la lumière se propage.

Attention : c'est un modèle !

#### Théorème de Malus

*(admis)*



### Application - SF 1 - Tracer des surfaces d'onde

## II.B - Chemin optique

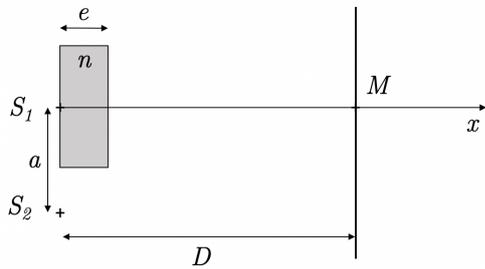
Rappel - indice optique

Définition (Chemin optique)



**Application - SF2 - Exprimer un chemin optique**

Exprimer les chemins optiques  $(S_1M)$  et  $(S_2M)$  sur le schéma ci-après :



## II.C - Propagation d'une onde monochromatique

**Rappel - onde monochromatique**

Lien entre la phase et le chemin optique \*\*\*

**Démonstration**

Conséquence : propriété des surfaces d'onde \*\*\*

Démonstration

## II.D - Chemin optique et système stigmatique

**Rappel - Système stigmatique**

Un système est **rigoureusement stigmatique** s'il donne une image ponctuelle de tout objet ponctuel.

Une lentille mince est considérée stigmatique si on se place dans les conditions de Gauss (= rayons peu inclinés et au voisinage de l'axe optique).

Propriété

Démonstration

## III - Supperposition de deux ondes

### III.A - Formule de Fresnel et critère de cohérence

#### Formule de Fresnel - conditions d'interférence

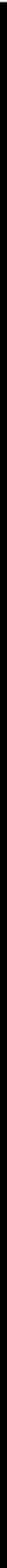
#### Remarque

#### Corrolaire

Les éclairagements de deux sources non cohérentes se somment.

Si deux sources sont cohérentes, leurs éclairagements ne somment pas.

#### Démonstration



**Remarque**

Cette démonstration est longue et lourde, elle sera donc rarement demandée. Généralement, on demandera de donner les critères de cohérence (sans démonstration) puis de démontrer la formule de Fresnel si ces critères sont vérifiés :

**On suppose dès le début que les ondes sont cohérentes (donc synchrones et de même phase initiale :  $\varphi(S_1) = \varphi(S_2)$ )**

$$s_1(M, t) = A_1 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}(S_1M) + \varphi(S_1)\right) \quad \text{et} \quad s_2(M, t) = A_2 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}(S_2M) + \varphi(S_2)\right)$$

On a alors

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= K \langle (s_1 + s_2)^2 \rangle = K \langle s_1^2 + s_2^2 + 2s_1s_2 \rangle \\ &= K \langle \langle s_1^2 \rangle + \langle s_2^2 \rangle + 2\langle s_1s_2 \rangle \rangle \\ &= \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + 2KA_1A_2 \left\langle \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}(S_1M) + \varphi(S_1)\right) \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}(S_2M) + \varphi(S_2)\right) \right\rangle \\ &= \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + KA_1A_2 \left\langle \cos\left(2\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}(S_1M) + \varphi(S_1) - \frac{2\pi}{\lambda}(S_2M) + \varphi(S_2)\right) + \right. \\ &\quad \left. \cos\left(-\frac{2\pi}{\lambda}(S_1M) + \varphi(S_1) + \frac{2\pi}{\lambda}(S_2M) - \varphi(S_2)\right) \right\rangle \end{aligned}$$

On a par ailleurs  $KA_1A_2 = 2\sqrt{\mathcal{E}_1\mathcal{E}_2}$ ,  $\varphi(S_1) = \varphi(S_2)$  et  $\langle \cos(2\omega t + cste) \rangle = 0$ , donc

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + 2\sqrt{\mathcal{E}_1\mathcal{E}_2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(S_2M) - (S_1M)\right)$$

### III.B - Différence de marche

**Définition (Différence de marche)**

**Formule de Fresnel exprimée avec la différence de marche**

**Corollaire - critère de cohérence sur la différence de marche**

## Illustration

### Remarque

La longueur de cohérence en lumière blanche est de l'ordre de  $1 \mu\text{m}$  et de  $1 \text{ cm}$  pour une lampe spectrale. Ce ne sera donc pas évident de voir des interférences avec ces sources.

## III.C - Interférences constructives et destructives

### Définition (Ordre d'interférence)

On appelle **ordre d'interférence**

$$p(M) = \frac{\Delta\Phi(M)}{2\pi}$$

### Définition (Interférences constructives et destructives)

Les interférences en  $M$  sont **constructives** si l'éclairement  $y$  est maximal

Les interférences en  $M$  sont **destructives** si l'éclairement  $y$  est minimal

### Définition (Contraste)