



Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interférien-
tiels

Introduction à l'optique ondulatoire



Insuffisance du modèle géométrique

Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interféren-
tiels

Un faisceau laser éclaire un diaphragme de diamètre réglable derrière lequel on place un écran.



- ▶ Impossibilité d'isoler un rayon de lumière
- ▶ La diffraction, ne peut s'expliquer par le modèle de l'optique géométrique
- ▶ Nécessité d'un nouveau modèle : Modèle ondulatoire scalaire de la lumière



Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interféren-
tiels

1

Le modèle ondulatoire scalaire de la lumière



Postulat fondamental

Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interféren-
tiels

La lumière émise par une source de lumière S peut être décrite par un champ scalaire $a(M, t)$ appelé amplitude instantanée de la lumière.

Dans le cas d'une source étendue $a(M, t) = \sum_i a_i(M, t)$

Quelle est l'expression de $a(M, t)$?

D'après le théorème de superposition de Fourier, on peut choisir :

$$a(M, t) = A(M) \cos(\omega t \pm \Phi(M))$$

- ▶ $A(M)$: Amplitude en M
- ▶ ω : pulsation
- ▶ $\Phi(M)$: Phase de l'onde en M



Éclairement

Introduction à l'optique ondulatoire

Le modèle ondulatoire scalaire de la lumière

Propagation de la lumière

Interférences lumineuses

Dispositifs interférentiels

$\cos x \in [-1; +1]$ or il n'existe pas de « lumière négative »

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi c}{\lambda_0} \sim \frac{6 \times 3 \times 10^8}{6 \times 10^{-7}} = 3 \times 10^{15} \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$$

Variation bien trop rapide pour que l'œil puisse la détecter.

capteur	œil	photodiode
temps de réponse	0.1 s	1 μs

Nos yeux sont sensibles à une grandeur énergétique :

$$\xrightarrow{\mathcal{E}_{lum}} \text{oeil} \xrightarrow{\mathcal{E}_{elec}} \text{cerveau}$$

Définition : Éclairement



Lien avec le modèle de l'optique géométrique : Théorème de Malus

Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

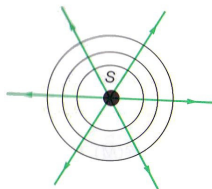
Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interféren-
tiels

Définition : Surface d'onde

On appelle « surface d'onde » l'ensemble des points équi-phasés atteints par l'onde au même instant



Théorème de Malus

Les rayons de lumière sont orthogonaux aux surfaces d'onde



Ondes sphériques

Introduction
à l'optique
ondulatoire

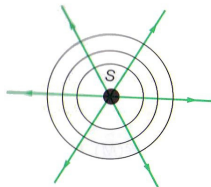
Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interféren-
tiels

Si une lumière monochromatique est issue d'une source ponctuelle,



on utilise alors le modèle de l'onde sphérique pour décrire la propagation de la lumière :

$$a(M, t) = \frac{A_0}{r} \cos(\omega t \pm \Phi(M))$$



Ondes planes

Introduction
à l'optique
ondulatoire

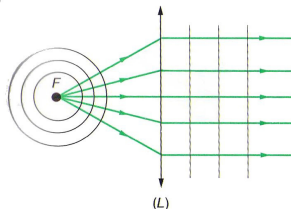
Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interféren-
tiels

Si la source est à l'infini,



on utilise alors le modèle de l'onde plane monochromatique (harmonique) (OPH) :

$$a(M, t) = A_0 \cos(\omega t \pm \Phi(M))$$

En pratique on obtient une onde plane en plaçant la source au niveau du plan focal objet d'une lentille convergente (comme le montre la figure précédente)



**Introduction
à l'optique
ondulatoire**

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

**Propagation
de la lumière**

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interféren-
tiels

2

Propagation de la lumière



Chemin optique

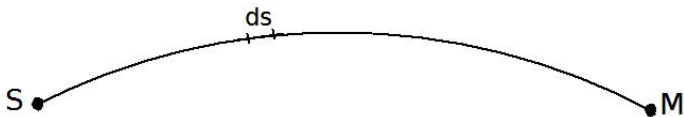
Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interféren-
tiels



Définition : Retard

Temps mis par l'onde pour parcourir \widehat{SM}

En notant s l'abscisse curviligne le long d'un rayon lumineux allant de S à M dans un milieu d'indice n , nous pouvons exprimer le retard τ_M :



$$\tau_M = \int_{t=0}^{t=\tau_M} dt = \int_S^M \frac{dt}{ds} ds = \int_S^M \frac{1}{v} ds = \frac{1}{c} \int_S^M n ds$$

Définition : chemin optique

$$(SM) = \int_S^M n ds = c\tau_M$$

Le chemin optique mesure donc en unité de longueur, le temps mis par la lumière pour aller du point S au point M .



Expression de la phase - Retard de phase

Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interféren-
tiels

Si au point S et à l'instant t une OPH s'exprime
 $a(S, t) = A_0 \cos(\omega t - \phi(S))$ alors au point M ,

$$\begin{aligned} a(M, t) &= A(M) \cos(\omega(t - \tau_M) - \phi(S)) \\ &= A(M) \cos(\omega t - \omega\tau_M - \phi(S)) \\ &= A(M) \cos(\omega t - \phi(M)) \end{aligned}$$

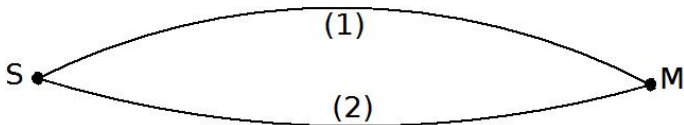
Avec :

$$\phi(M) = \omega\tau_M + \phi(S) = \frac{\omega}{c_0}(SM) + \phi(S) = \frac{2\pi(SM)}{\lambda_0} + \phi(S)$$



Différence de marche entre deux rayons issus d'une même source

On considère deux rayons issus même train d'onde. Ces deux rayons arrivent au point M par deux chemins optiques $(SM)_1$ et $(SM)_2$ différents.



- ▶ Le rayon 1 arrive en M avec une phase

$$\phi_1(M) = \phi(S) + \frac{2\pi(SM)_1}{\lambda_0}$$

- ▶ Le rayon 2 arrive en M avec une phase

$$\phi_2(M) = \phi(S) + \frac{2\pi(SM)_2}{\lambda_0}$$



Différence de marche entre deux rayons issus d'une même source

Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interfren-
tiels

Expression du déphasage

$$\Delta\phi_{2/1} = \frac{2\pi((SM)_2 - (SM)_1)}{\lambda_0} = \frac{2\pi\delta_{2/1}}{\lambda_0}$$

Avec $\delta_{2/1} = (SM)_2 - (SM)_1$ la différence de marche entre les deux rayons au point M .

Remarques :

- ▶ L'indice 2/1 est rarement précisé dans les notations.
- ▶ En fait c'est $|\Delta\phi|$ qui nous intéresse.
- ▶ Lors d'une réflexion sur une surface métallique ou une surface vitreuse plus réfringente ($n_2 > n_1$), un déphasage supplémentaire de π doit être rajouté entre le rayon incident et le rayon réfléchi (soit $\delta_{suppl} = \frac{\lambda_0}{2}$)



Notion de vecteur d'onde

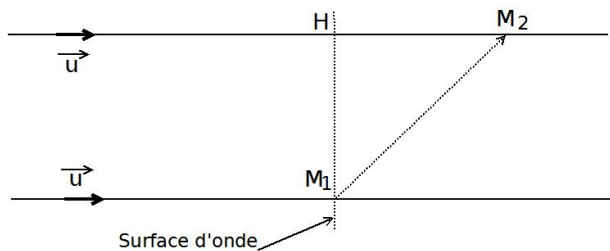
Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interfèrentiels



$$\Delta\Phi_{M_1 \rightarrow M_2} = \frac{2\pi[(SM_2) - (SM_1)]}{\lambda_0} = \frac{2\pi\delta_{2/1}}{\lambda_0}$$

$$\delta_{2/1} = (SH) + (HM_2) - (SM_1)$$

Par définition d'une surface d'onde, $(SH) = (SM_1)$ donc $\delta = (HM_2)$. On a donc :

$$\Delta\Phi_{M_1 \rightarrow M_2} = \frac{2\pi(HM_2)}{\lambda_0}$$



Autre façon d'écrire ce résultat :

$$HM_2 = \vec{u} \cdot \overrightarrow{M_1M_2}$$

$$\Delta\Phi_{M_1 \rightarrow M_2} = \frac{2\pi n}{\lambda_0} \vec{u} \cdot \overrightarrow{M_1M_2} = \vec{k} \cdot \overrightarrow{M_1M_2}$$

Définition : vecteur d'onde

$$\vec{k} = \frac{2\pi n}{\lambda_0} \vec{u} = \text{vecteur d'onde}$$

Généralisation pour exprimer la phase en M :

$$a(S, t) = A(S) \cos(\omega t - \Phi(S))$$

$$a(M, t) = A(M) \cos(\omega t - \Phi(S) - \vec{k} \cdot \overrightarrow{SM})$$



Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

**Interférences
lumineuses**

Dispositifs
interféren-
tiels

3

Interférences lumineuses



Mise en évidence

Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

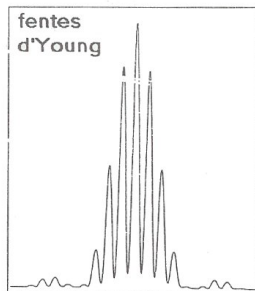
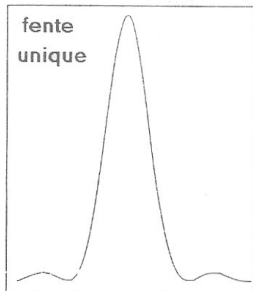
Interférences
lumineuses

Dispositifs
interférien-
tiels

On place une fente diffractante sur le trajet d'un faisceau laser,

- ▶ On observe un « étalement » de la lumière (le phénomène de diffraction).

On place maintenant deux fentes côte à côte.



- ▶ On obtient alors un phénomène d'interférences



Superposition de deux ondes planes : Relation de Fresnel

Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interféren-
tiels

On considère deux ondes planes a_1 et a_2 monochromatiques de pulsations ω_1 et ω_2 reçues en un point M de l'espace :

▶ $a_1(M, t) = A_1 \cos(\omega_1 t - \phi_1(M))$

▶ $a_2(M, t) = A_2 \cos(\omega_2 t - \phi_2(M))$

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



Introduction à l'optique ondulatoire	.....
Le modèle ondulatoire scalaire de la lumière	.....
Propagation de la lumière	.....
Interférences lumineuses	.....
Dispositifs interférien- tiels	.....



- Introduction à l'optique ondulatoire**
- Le modèle ondulatoire scalaire de la lumière
- Propagation de la lumière
- Interférences lumineuses**
- Dispositifs interférentiels

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



Introduction à l'optique ondulatoire	.....
Le modèle ondulatoire scalaire de la lumière	.....
Propagation de la lumière	.....
Interférences lumineuses	.....
Dispositifs interférentiels	.....



Utilisation des amplitudes complexes

Introduction
à l'optique
ondulatoire

.....
.....

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

.....
.....

Propagation
de la lumière

**Interférences
lumineuses**

.....
.....

Dispositifs
interféro-
métriques

.....
.....
.....
.....



Introduction à l'optique ondulatoire	.....
Le modèle ondulatoire scalaire de la lumière	.....
Propagation de la lumière	.....
Interférences lumineuses	.....
Dispositifs interféro- métriques	.....



Introduction à l'optique ondulatoire	.....
Le modèle ondulatoire scalaire de la lumière	.....
Propagation de la lumière	.....
Interférences lumineuses	.....
Dispositifs interférentiels	.....



Utilisation des vecteurs de Fresnel

- Introduction à l'optique ondulatoire
- Le modèle ondulatoire scalaire de la lumière
- Propagation de la lumière
- Interférences lumineuses**
- Dispositifs interférentiels

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



Introduction à l'optique ondulatoire	.....
Le modèle ondulatoire scalaire de la lumière	.....
Propagation de la lumière	.....
Interférences lumineuses	.....
Dispositifs interféro- entiels	.....



Critères de cohérence

- Introduction à l'optique ondulatoire
- Le modèle ondulatoire scalaire de la lumière
- Propagation de la lumière
- Interférences lumineuses
- Dispositifs interférentiels

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



Figure d'interférence

Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

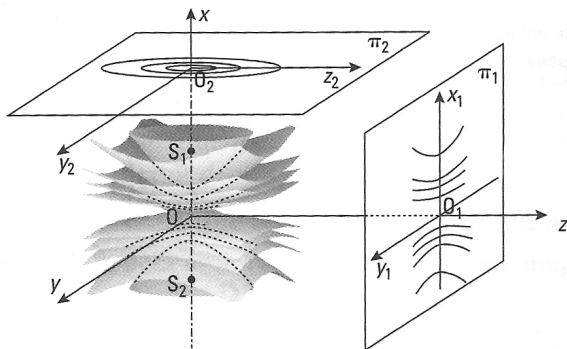
Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interfèrentiels

On considère deux points sources S_1 et S_2 émettant deux ondes lumineuses monochromatiques cohérentes entre-elles.

Les points M de même éclairement vérifient : $S_1M - S_2M = cte$





Introduction à l'optique ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

**Interférences
lumineuses**

Dispositifs
interféren-
tiels

On observe alors des franges d'interférence sur un écran :

- ▶ Franges circulaires si le plan de l'écran est \perp à S_1S_2
- ▶ Franges quasi-rectilignes si le plan de l'écran est $//$ à S_1S_2



Ordre d'interférence

Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interféren-
tiels

Définition

Si en un point M on observe un éclairement **maximal**
 \Rightarrow les interférences sont « constructives » $\Rightarrow p \in \mathbb{Z}$

Si en un point M on observe un éclairement **minimal**
 \Rightarrow les interférences sont « destructives » $\Rightarrow p$ est « demi-entier »

Si en un point M on observe un éclairement **quelconque**
 $\Rightarrow p$ est un réel quelconque



Contraste

Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

**Interférences
lumineuses**

Dispositifs
interféro-
métriques

Définition

.....

.....

.....

.....

.....

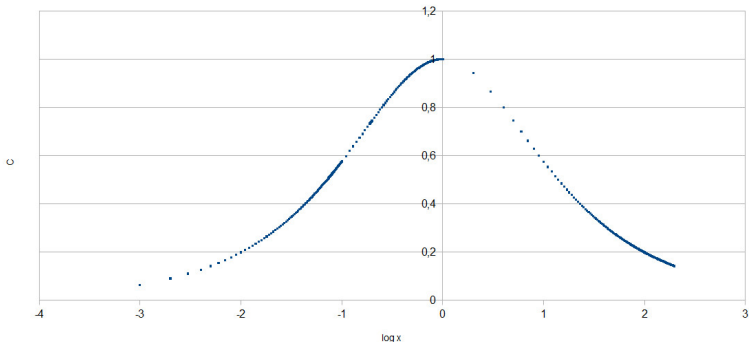
.....



Introduction à l'optique ondulatoire	.....
Le modèle ondulatoire scalaire de la lumière	.....
Propagation de la lumière	.....
Interférences lumineuses	.....
Dispositifs interférentiels	.....



Contraste en fonction de $\log(x)$

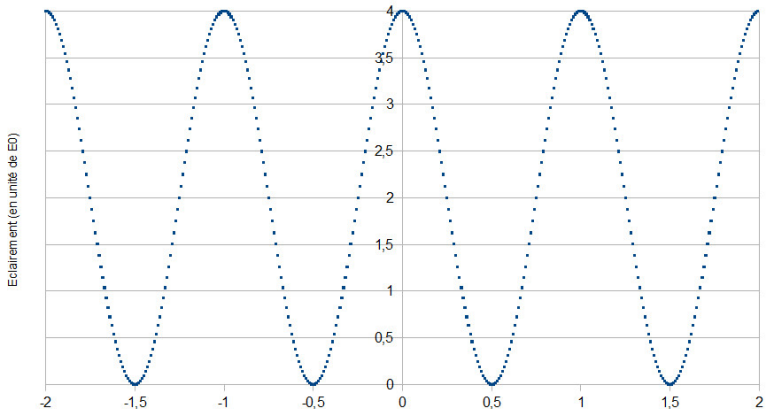


Les franges sont d'autant mieux marquées que $C \rightarrow 1$ c'est à dire $\epsilon_2 \rightarrow \epsilon_1$.



Éclairement dans le cas où $C = 1$ en fonction de l'ordre d'interférence p

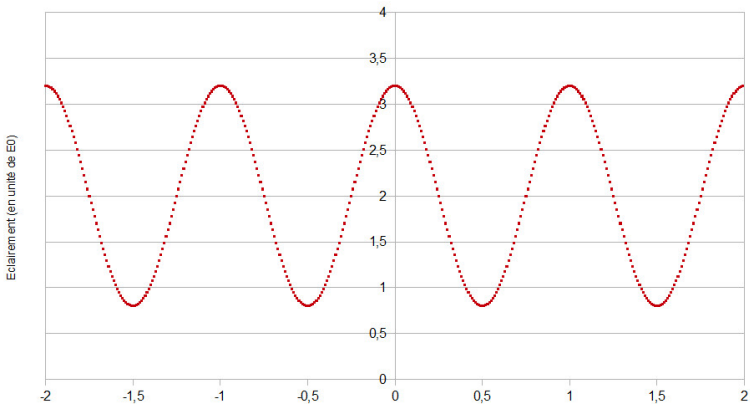
Si $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_0$ alors $C = 1$ et $\epsilon_{max} = 4\epsilon_0$





Éclairement dans le cas où $C < 1$ en fonction de l'ordre d'interférence p

Si $\epsilon_1 \neq \epsilon_2$ alors $C < 1$





Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

**Dispositifs
interféren-
tiels**

4

Dispositifs interférentiels



Émission de lumière par une source

Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interféren-
tiels

Pour que deux ondes monochromatiques interfèrent entre-elles il faut qu'elles :

- ▶ aient même pulsation ;
- ▶ soient en relation de phase constante.

Cette seconde condition justifie l'utilisation de dispositifs diviseurs d'ondes.

En effet, chaque point source d'une source primaire de lumière quelle qu'elle soit (laser, lampe à vapeur métallique ou lampe à incandescence) n'émet pas la lumière en continu, mais par salves appelées « trains d'ondes ».



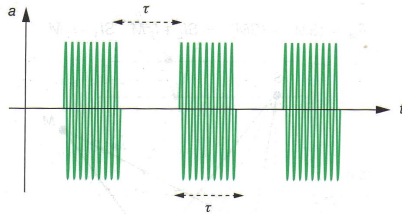
Introduction à l'optique ondulatoire

Le modèle ondulatoire scalaire de la lumière

Propagation de la lumière

Interférences lumineuses

Dispositifs interférentiels



La longueur moyenne d'un train d'onde (l_c) est appelée « La longueur de cohérence de la source. »

On a alors

$$l_c = \tau_c c$$

où τ_c est la durée moyenne de l'émission d'un train d'onde.

Ces grandeurs caractérisent la « cohérence temporelle » de la source



Lumières polychromatiques

- Introduction à l'optique ondulatoire
- Le modèle ondulatoire scalaire de la lumière
- Propagation de la lumière
- Interférences lumineuses
- Dispositifs interférentiels

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interféren-
tiels

	Lumière blanche	Lumière vapeur Hg (HP)	Lumière vapeur Hg (BP)	Laser He- Ne stabi- lisé
$\lambda_{0,m}$ (nm)	575	546	546	632,8
$\Delta\lambda_0$ (nm)	350	1	1×10^{-3}	1×10^{-8}
$\Delta\nu$ (Hz)	3×10^{14}	1×10^{12}	1×10^9	1×10^4
τ_c (s)	3×10^{-15}	1×10^{-12}	1×10^{-10}	1×10^{-4}
ℓ_c (m)	1×10^{-6}	3×10^{-4}	3×10^{-4}	30×10^3



La phase de chaque train d'onde est aléatoire. On n'observe donc généralement pas d'interférence lumineuse lorsque deux ondes proviennent de deux sources différentes, même si elles ont la même pulsation.

Énoncé opérationnel des critères de cohérence :

Deux ondes peuvent interférer entre-elles si elles proviennent du même train d'onde (elle doivent donc être issues du même point source).

Problème de cohérence spatiale

Deux points sources différents d'une même lampe (source étendue) se comportent comme deux sources indépendantes c'est à dire incohérentes entre-elles. Pour observer des interférences lumineuses on doit donc utiliser des dispositifs diviseurs d'onde.



Les différents dispositifs interférentiels

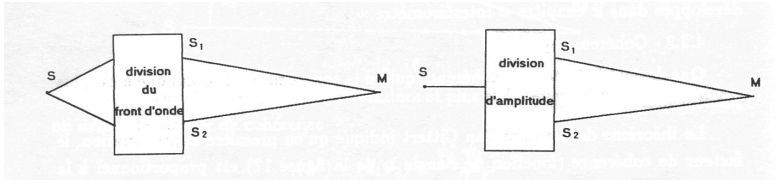
Introduction
à l'optique
ondulatoire

Le modèle
ondulatoire
scalaire de la
lumière

Propagation
de la lumière

Interférences
lumineuses

Dispositifs
interférien-
tiels



Exemples de dispositifs à division du front d'onde :

- ▶ Fentes d'Young
- ▶ Miroirs de Fresnel
- ▶ Miroir de Lloyd

Exemple de dispositif à division d'amplitude d'onde :

- ▶ Interféromètre de Michelson

Avantages de ces dispositifs : Possibilité de travailler en source étendue (plus de lumière) et expériences plus lumineuses.