

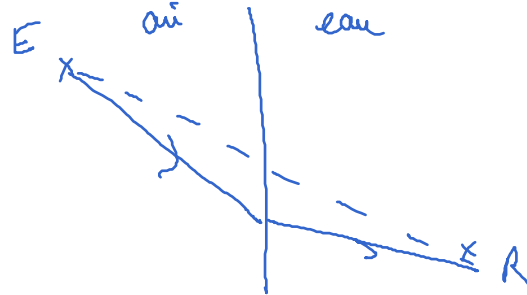
Chap OO1: introduction à l'optique ondulatoire

I. Optique géométrique ou optique ondulatoire

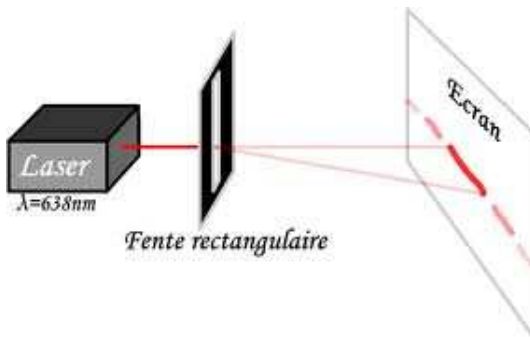
L'optique géométrique repose sur deux principes.

♥ Premier principe de l'optique géométrique: les rayons lumineux se propagent en ligne droite dans un milieu homogène.

Exemples:



Et pourtant lorsqu'un faisceau laser traverse un diaphragme...

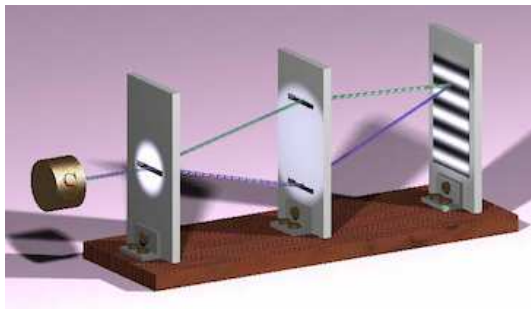


A la traversée d'une fente ou d'un trou, la lumière est diffractée de façon ondulatoire / à la direction de la lumière incidente. L'angle de diffraction est d'autant + grand que la fente ou le trou soit peu larges.

♥ Second principe de l'optique géométrique: les rayons lumineux se coupent indépendamment les uns des autres.

Exemple: dans une pièce j'allume deux lampes de même intensité, j'ai deux fois plus de lumière.

Et pourtant, lorsqu'un faisceau incident traverse deux diaphragmes...



Un point M sur l'écran est atteint par deux rayons qui ont suivi des chemins différents: les ondes interfèrent en M de façon constructive (franges brillantes) ou destructive (franges sombres).

♥ Conclusion : optique géométrique ou optique ondulatoire ?

C'est une histoire d'échelle : il y a deux longueurs à comparer pour savoir si les lois de l'optique géométrique s'appliquent ou ne s'appliquent pas:

- longueur d'onde λ lumière visible : $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$

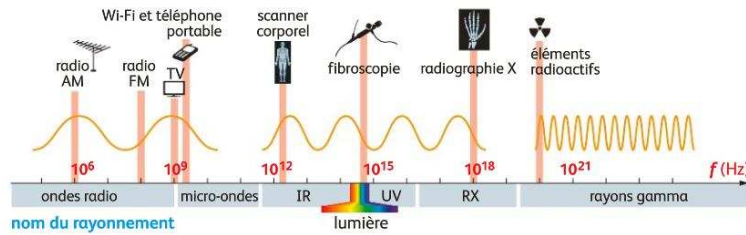
- taille caractéristique du système d (largeur d'une fente, diamètre d'un diaphragme, distance entre deux fentes...)

Pour $d \gg \lambda$: on peut négliger la nature ondulatoire de la lumière, la lumière suit les lois de l'optique géométrique (pas d'interf., pas de diffraction)

Pour d voisin de λ : on ne peut pas négliger la nature ondulatoire de la lumière, on observe des interférences et de la diffraction.

II. Approche ondulatoire de la lumière

La lumière est une onde électromagnétique (un champ électrique et un champ magnétique couplés qui transportent de l'énergie).



$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{8 \cdot 10^{-7}} = 3,75 \cdot 10^{15} \text{ Hz} \quad \lambda = 800 \text{ nm} \quad \lambda = 600 \text{ nm}$$

La vitesse de propagation de la lumière est $v = \frac{c}{n}$

où c est la célérité de la lumière dans le vide $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

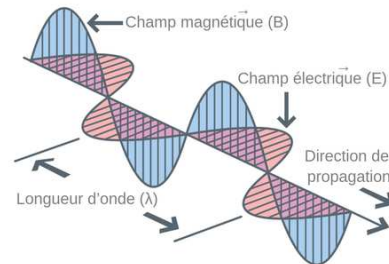
où n est l'indice du milieu ($n_{\text{eau}} = 1,33$ et $n_{\text{verre}} = 1,5 - 1,7$ dépend de la longueur d'onde selon la loi de Cauchy $n_{\text{verre}}(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$)

L'onde lumineuse est donc caractérisée par une période spatiale λ et une période temporelle f liée entre elles par $f = c/\lambda$

Lors d'un changement de milieu, la **fréquence est conservée**, la longueur d'onde est modifiée.

1. L'amplitude de l'onde lumineuse

La lumière est une onde dont la perturbation est le champ électromagnétique, ce qui signifie que cette onde est caractérisée en toute rigueur par le couple $(\vec{E}(M, t), \vec{B}(M, t))$.



Pour l'étude des interférences et de la diffraction, on utilise le modèle scalaire des ondes lumineuses. Ce modèle consiste à réduire l'onde à une seule des composantes du champ électrique, cette composante est une grandeur scalaire que l'on écrit: $s(M, t) = s_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{OM})$.

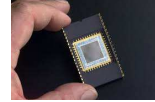
$\omega =$ pulsation temporelle $\omega = \frac{2\pi}{T}$ où T est la période temporelle

$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{u}$ où λ est la période spatiale
direction de propagation de l'onde

2. L'intensité lumineuse



Temps de réponse: 0,1 s



Temps de réponse: qqs ms

Les récepteurs (comme notre oeil, une caméra CCD,...) sont sensibles:

- Au carré de l'amplitude de l'onde : c'est l'intensité aussi appelée éclairement. L'intensité en M à l'instante t est: $I(M, t) = K s^2(M, t)$

- A l'intensité moyenne dans le temps. Les temps de réponse des récepteurs sont très grands devant la période d'une onde lumineuse (de l'ordre de 10^{-15} s). Donc les récepteurs n'ont pas le temps de suivre les oscillations de l'onde lumineuse, ils ne sont sensibles qu'à la valeur moyenne de l'onde lumineuse au cours du temps.

On note donc:

$s(M, t)$: l'amplitude de l'onde en M à l'instant t

$$I(M) = K \langle s^2(M, t) \rangle = K \int_0^T s^2(M, t) dt$$

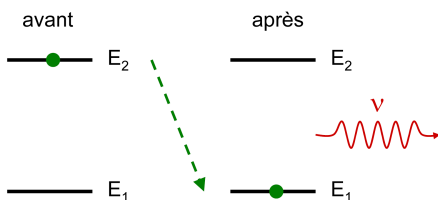
Remarque 1: on verra dans le cours d'électromagnétisme que le signal $s(M, t)$ est une composante du champ électrique transporté par l'onde et que l'intensité lumineuse est la valeur moyenne du vecteur de Poynting, son unité est le $W.m^{-2}$ (c'est la même unité que celle de l'intensité acoustique).

Remarque 2: $\langle \cos^2(\omega t + \phi) \rangle = \frac{1}{2}$

III. Les sources lumineuses

Pour comprendre les conditions d'obtentions d'interférences, il est important de comprendre les caractéristiques de la lumière émise par différents émetteurs tels que le laser, les lampes à vapeur de sodium, les lampes de lumière blanche.

1. Notion de train d'onde

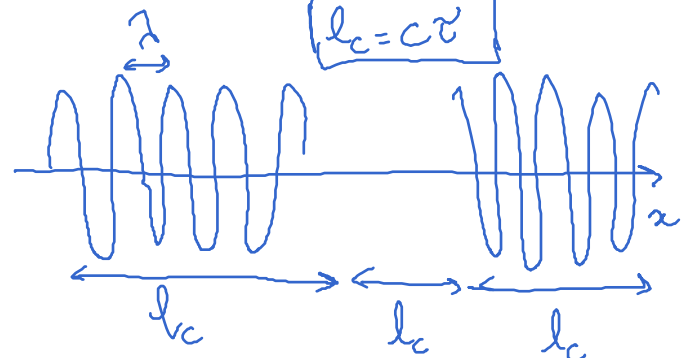
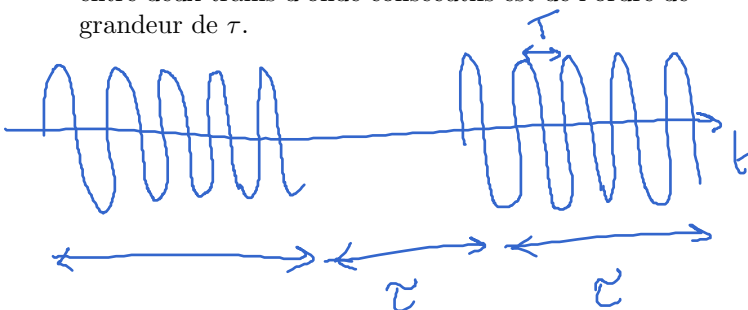


L'élection de l'atome passe du niveau excité E_2 au niveau de plus basse énergie E_1 en émettant un photon de fréquence $\nu = f = \frac{E}{h} = \frac{E_2 - E_1}{h}$

L'atome émet des trains d'onde de fréquence centrale ν pendant un temps moyen τ . L'intervalle de temps entre deux trains d'onde consécutifs est de l'ordre de grandeur de τ .

l_c = longueur de cohérence : longueur moyenne d'un train d'onde

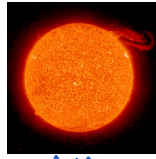
$$l_c = c\tau$$



2. Temps et longueur de cohérence d'une source

La durée d'émission d'un train d'onde notée τ et la longueur d'un train d'onde appelé longueur de cohérence et noté l_c , dépendent de l'émetteur:

$$\lambda_{\text{avg}} \approx 6 \times 10^{-7} \text{ m}$$



lampe à incandescence

$$\tau \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ s}$$

$$l_c = 3 \cdot 10^8 \times 2 \cdot 10^{-15} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m} \approx \lambda$$

le train d'onde comprend qq oscillations

$$l_c \approx 1 \mu\text{m}$$

lampe à vapeur de sodium

$$\tau \approx 10^{-12} \text{ s}$$

$$l_c = 3 \cdot 10^8 \times 10^{-12} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m} \approx 500 \lambda$$

le train d'onde comprend qq centaines d'oscillations

$$l_c \approx 1 \text{ mm}$$

laser

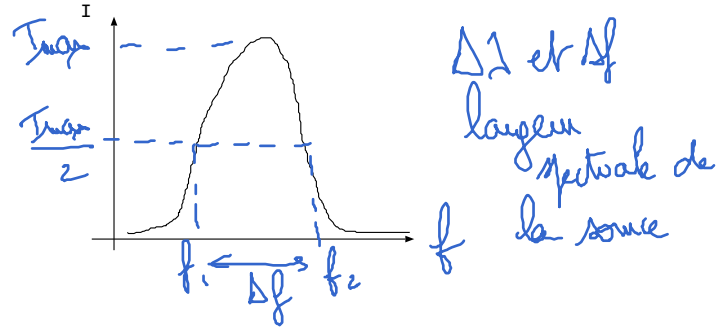
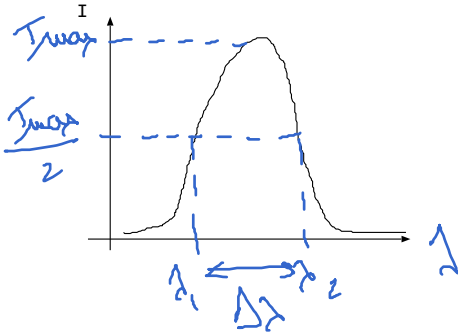
$$\tau \approx 10^{-9} \text{ s}$$

$$l_c = 3 \cdot 10^8 \times 10^{-9} = 0,3 \text{ m} \approx 10^6 \lambda$$

le train d'onde comprend qq millions d'oscillations

$$l_c \approx 1 \text{ m}$$

3. Notion de spectre et grandeurs caractéristiques d'un émetteur

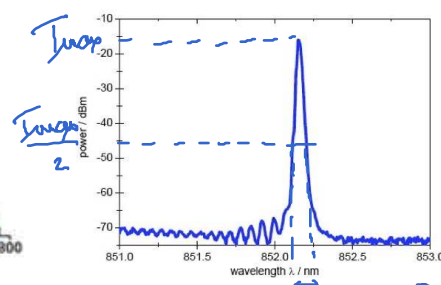
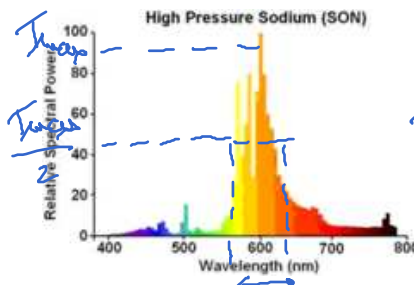
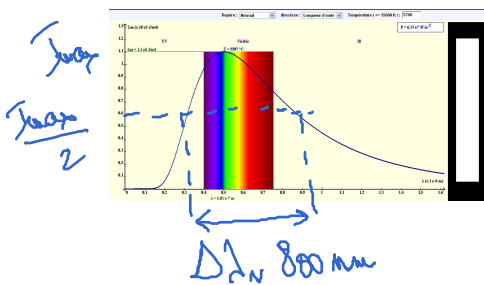


Relation entre f_0 et λ_0 :

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0}$$

f_0 : fréquence centrale et λ_0 longueur d'onde centrale émise

Relation entre τ et Δf :



Plus la longueur de cohérence l_c est grande et plus la largeur spectrale est faible

on traduit par:

$$\tau = \frac{1}{\Delta f}$$

τ : durée moyenne d'un train d'onde

Δf : largeur spectrale

$$f \in [f - \frac{\Delta f}{2}, f + \frac{\Delta f}{2}]$$

Relation entre Δf et $\Delta \lambda$:

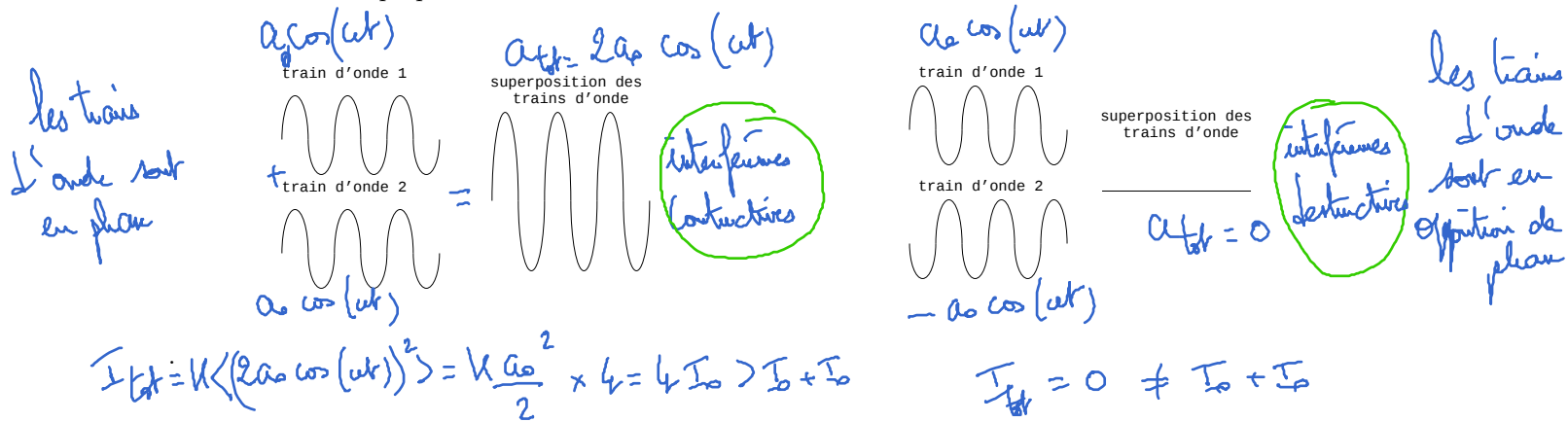
$$f = \frac{c}{\lambda} \quad \frac{df}{d\lambda} = -\frac{c}{\lambda^2} = -\frac{f}{\lambda} \quad \text{d'où} \quad \frac{\Delta f}{\Delta \lambda} = \frac{f}{\lambda} \quad \Delta f \text{ et } \Delta \lambda > 0$$

$$\text{soit } \left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta f}{f_0} \right|$$

IV. Conditions d'obtention des interférences

1. Condition 1: des sources synchrones

Les interférences lumineuses sont créées par deux trains d'onde qui se rencontrent en M . Etudions les deux cas extrêmes de superposition d'onde:



Lorsque le déphasage entre les deux ondes ne correspond ni à une phase nulle, ni à une opposition de phase, la superposition des ondes donne une frange grise.

$$0 < I_{\text{tot}} < 4I_0$$

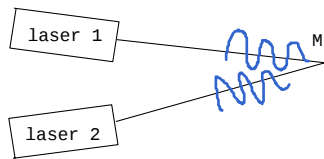
Condition 1: il faut superposer des ondes de fréquences identiques: on parle d'ondes synchrones.

2. Condition 2: une source principale monochromatique

En un point M , au cours du temps, se succèdent une infinité de trains d'ondes. En présence d'interférences, le point M garde toujours la même intensité au cours du temps (brillant, sombre, gris...). Cela veut dire qu'à tout instant, les deux trains d'onde qui se superposent en M , ont toujours le même déphasage.

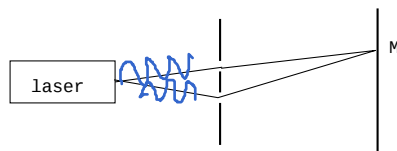
On vient d'apprendre qu'il faut deux ondes synchrones pour faire des interférences. Il existe deux façons d'obtenir des sources synchrones. Ces deux façons permettent-elles d'obtenir des interférences?

Sources différentes de même fréquence:



les trains d'ondes émis par les deux lasers peuvent être synchrones (m_1, m_2) mais ils sont déphasés de façon aléatoire au cours du temps à leur émission et donc à leur rencontre en M : on ne peut pas faire d'interférences avec des sources synchrones et $\neq$

Une seule source monochromatique et un dispositif d'optique qui donne naissance à deux ondes qui suivent des chemins différents:



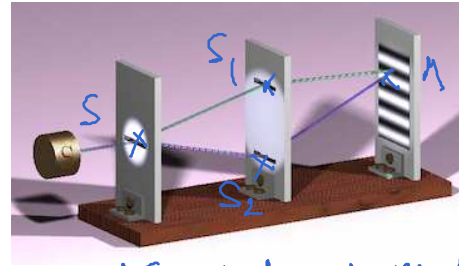
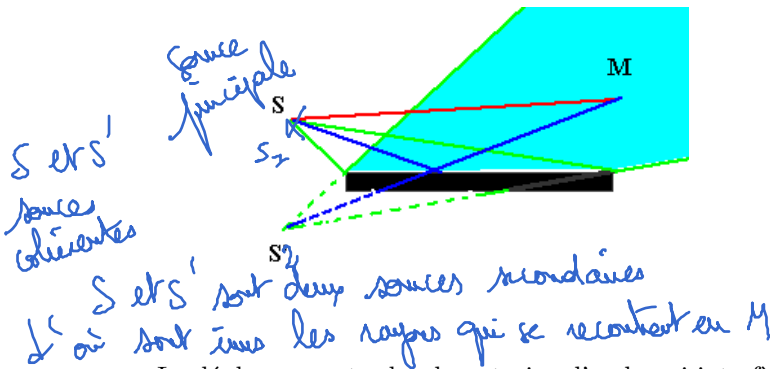
Condition 2:

à l'émission le train d'onde se sépare en 2 trains d'onde synchrones (m_1, m_2) et en phase. Ensuite les trains d'onde se déphasent l'un / à l'autre, ce déphasage n'est dû qu'à la $\neq$ de chemin emprunté: en M le déphasage est connu, il y a des interférences

les sources sont synchrones et cohérentes: elles viennent de la même source principale monochromatique qui donne 2 sources secondaires par un dispositif d'optique

3. Condition 3: condition sur la différence de marche

On vient d'apprendre que pour réaliser des interférences, il faut une source principale monochromatique qui donne par un dispositif d'optique, deux sources secondaires.

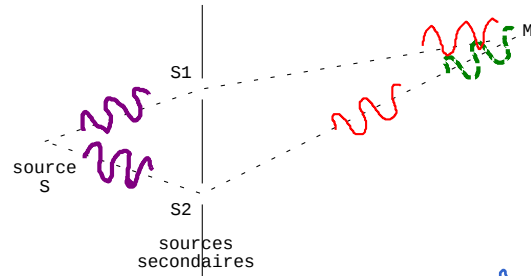
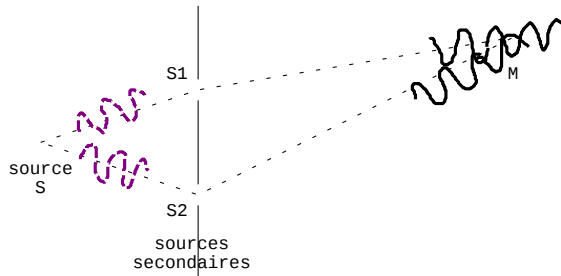


S_1 et S_2 sont deux sources secondaires d'où sortent les rayons qui se rencontrent en M

Le déphasage entre les deux trains d'onde qui interfèrent dépend de la différence de marche définie par:

$$\delta_{2/1}(M) = (SS_2M) - (SS_1M)$$

Peut-on faire des interférences dans n'importe quelle condition avec un tel dispositif?



ici la différence de marche entre les 2 chemins est + petite que la longueur d'un train d'onde: $\delta(M) < l_c$
le déphasage entre les trains d'onde est petit

ici la différence de marche est + grande que la longueur d'un train d'onde: $\delta(M) > l_c$. Les trains d'onde qui se rencontrent en M ne peuvent pas interférer

Condition 3: $\delta_{2/1}(M) < l_c$

V. Conclusion: sources cohérentes

1. Deux sources cohérentes

Pour observer des interférences, il faut vérifier les conditions suivantes:

- Une seule source principale S monochromatique (une seule longueur d'onde, une seule fréquence, une seule période)
- Au moins deux sources secondaires S_1 et S_2 images de S (obtenues par un dispositif d'optique géométrique par division du front d'onde ou par division d'amplitude)
- La différence de marche $\delta_{2/1}(M) = (SS_2M) - (SS_1M)$ doit être inférieure à la longueur de cohérence l_c de la source : condition pour que les trains d'onde émis par le même atome se rencontrent.

On parle dans ce cas de **sources cohérentes**.

Les dispositifs d'optique géométrique par division du front d'onde ou par division d'amplitude sont:



2. Intensité lumineuse en présence de deux sources cohérentes

Lorsque deux sources d'intensité I_1 et I_2 sont cohérentes et qu'elles se superposent en M . L'intensité en M se trouve en écrivant:

$$a(M, t) = a_1(M, t) + a_2(M, t)$$

on somme les amplitudes des ondes qui arrivent en M

$$I(M) = k \langle a(M, t)^2 \rangle$$

$$= \underbrace{k \langle a_1^2(M, t) \rangle}_{I_1} + \underbrace{k \langle a_2^2(M, t) \rangle}_{I_2} + \underbrace{2k \langle a_1(M, t) a_2(M, t) \rangle}_{\text{terme d'interférence qui dépend de } M \text{ et donc de } \delta\phi(M)}$$

Remarque: Lorsque deux sources d'intensité I_1 et I_2 ne sont pas cohérentes et qu'elles se superposent en M . L'intensité en M s'écrit:

$$I(M) = I_1 + I_2$$

on somme les intensités

VI. Du concret...

Les applications des interférences sont par exemple:

- En astronomie : mesures de la taille d'objets ou de la distance qui sépare deux objets lointains
- En spectrométrie : obtention de spectres de sources lumineuses
- En optique : détection de défauts de surfaces en verre pour les corriger

Du point de vue historique, on peut citer l'expérience de Michelson et Morley réalisée en 1887 : ces physiciens ont montré que vitesse de la lumière est isotrope et indépendante du référentiel.

