



Module d'Optique

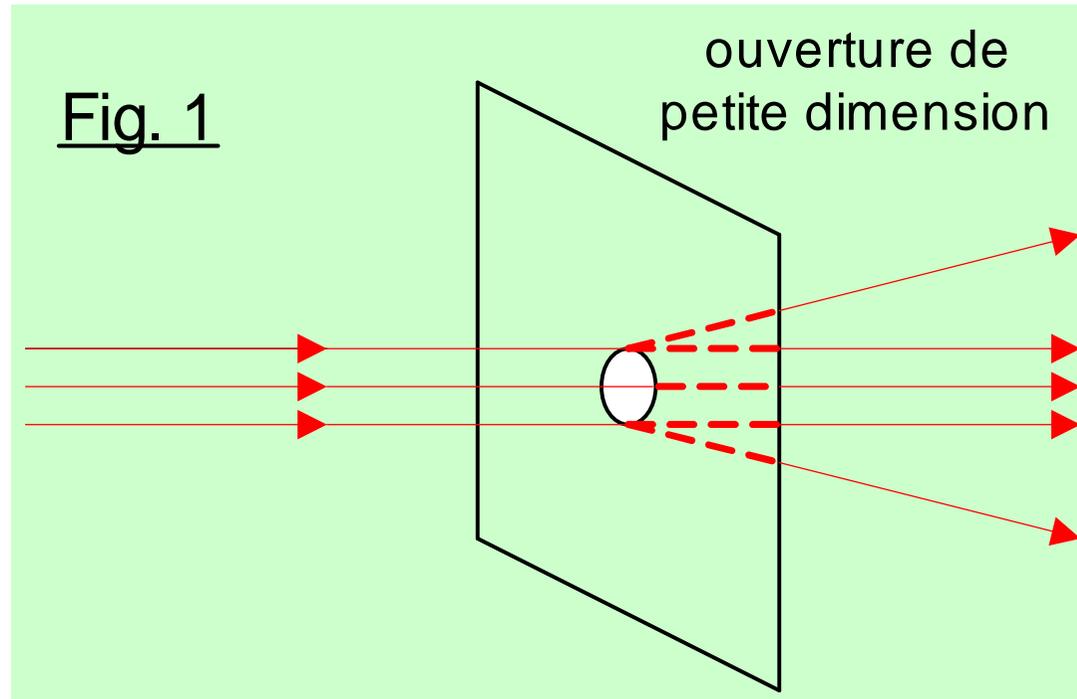
3^{ème} partie : Optique ondulatoire

© Fabrice Sincère (version 3.0)

<http://perso.orange.fr/fabrice.sincere>

Introduction : insuffisance de l'optique géométrique

- Expérience



- Observation

Les rayons lumineux sont déviés lors du passage par l'ouverture : c'est le phénomène de *diffraction*.

L'optique géométrique n'explique pas ce phénomène (propagation en ligne droite ...).

- Explication

Il faut considérer la lumière comme une onde lumineuse (onde EM).

L'*optique ondulatoire* explique les phénomènes d'interférence de la lumière (et en particulier la diffraction).

Chapitre 1

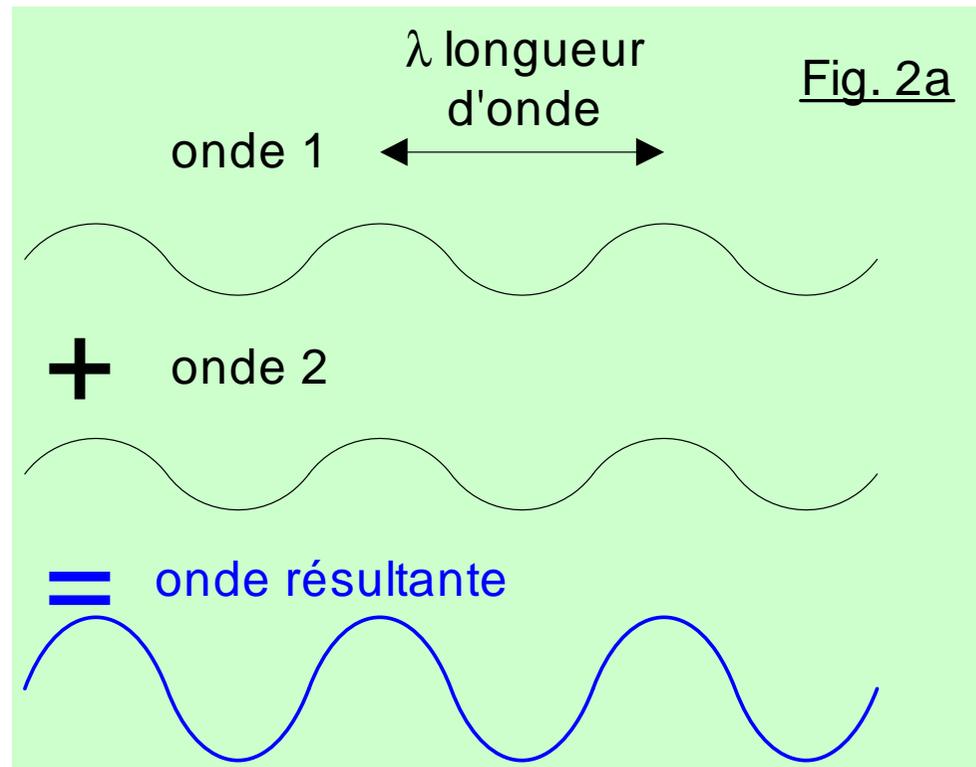
Interférence de la lumière

1-1- Notion d'interférence

Le phénomène d'interférence est commun à toutes les ondes.

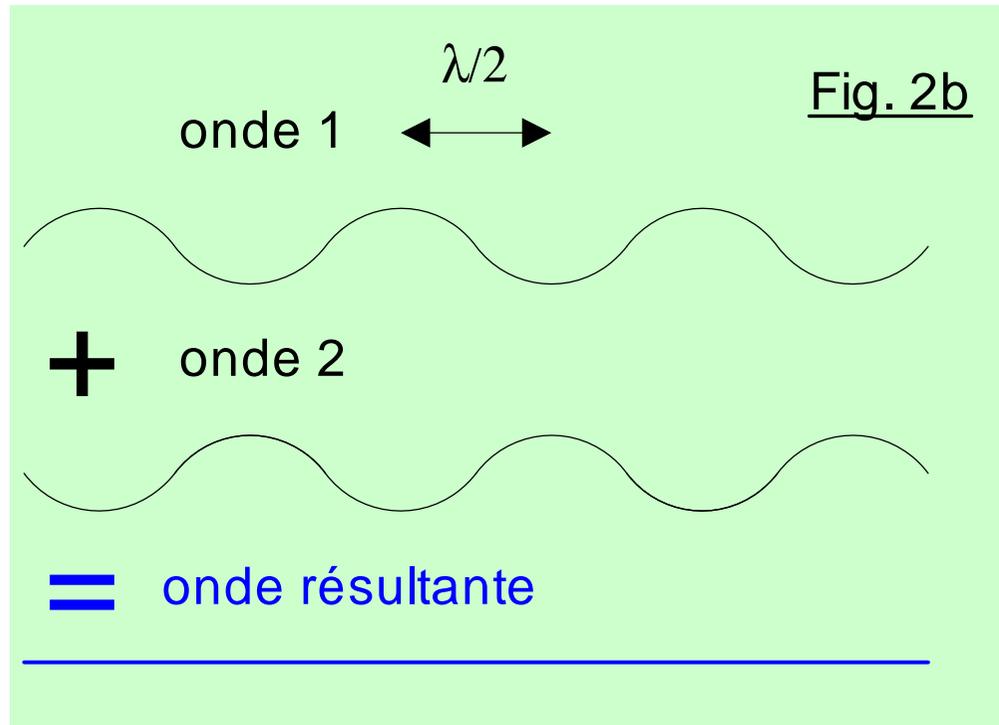
- Interférence de deux ondes progressives sinusoïdales de même fréquence (même longueur d'onde) en un point M de l'espace

- Interférence constructive :



L'amplitude de l'onde résultante est maximale (ventre) quand les deux ondes vibrent en phase.

- Interférence destructive



L'amplitude de l'onde résultante est minimale (noeud) quand les deux ondes vibrent en opposition de phase.

- Déphasage et longueur d'onde

ondes en opposition de phase

\Leftrightarrow décalage spatial de $\pm\lambda/2, \pm3\lambda/2, \pm5\lambda/2 \dots$

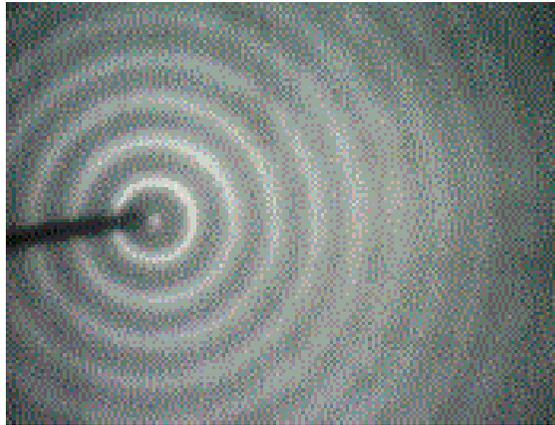
ondes en phase \Leftrightarrow décalage de $0, \pm\lambda, \pm2\lambda \dots$

- Exemple : interférence de deux ondes à la surface de l'eau

Soit deux vibreurs (S_1 et S_2) vibrant en phase (donc même fréquence).

Chaque vibreur crée une onde de surface de forme concentrique

(fig. 3) :



Les deux ondes interfèrent.

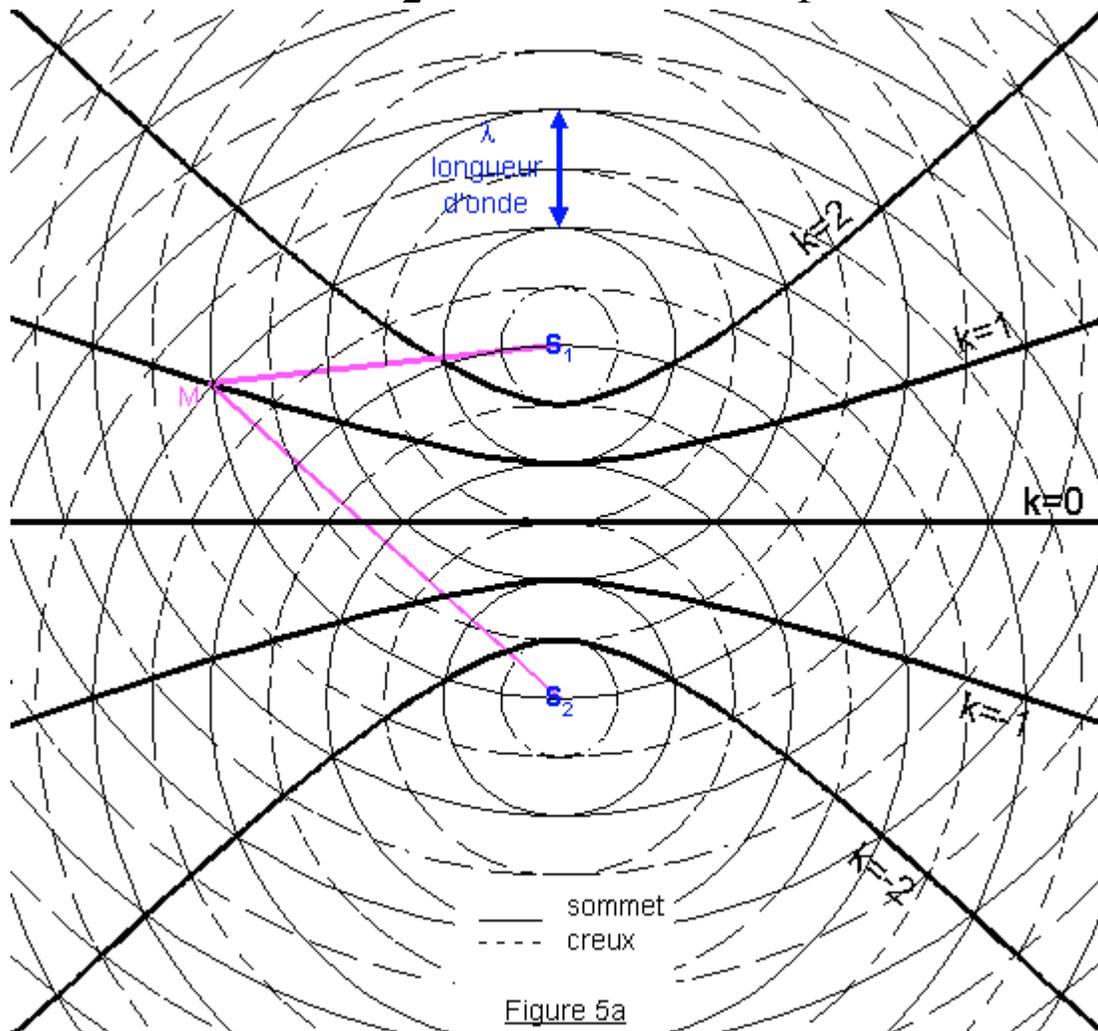
On observe des nœuds et des ventres (fig. 4) :



- Zones d'interférence constructive (ventre)

Ondes en phase au point M

⇒ distance S_2M - distance S_1M = nombre entier de longueur d'onde



$$S_2M - S_1M = k\lambda$$

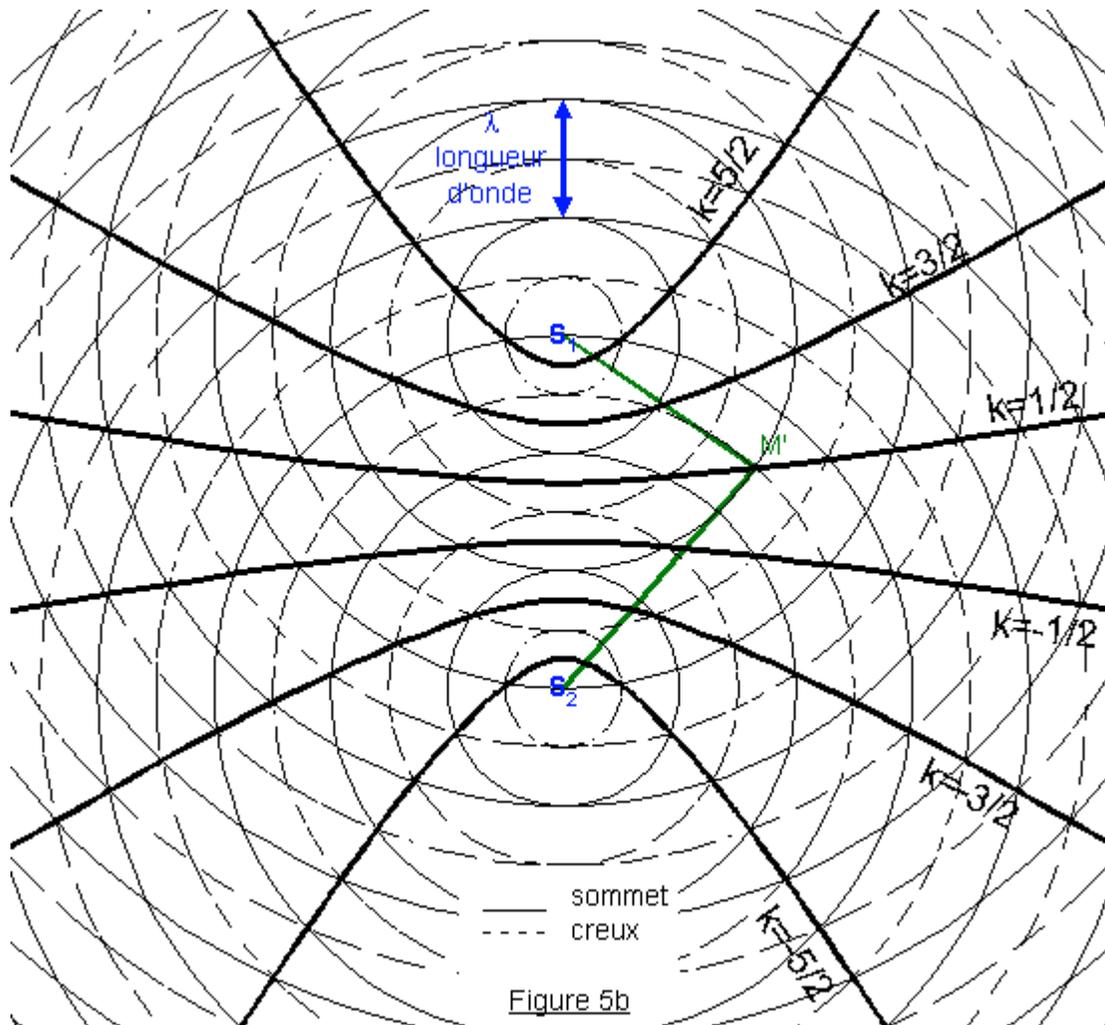
avec $k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$

k est *l'ordre d'interférence*

- Zones d'interférence destructive (noeud)

Ondes en opposition de phase au point M'

$\Rightarrow S_2M' - S_1M' = \text{nombre demi-entier de longueur d'onde}$



$$S_2M' - S_1M' = k\lambda$$

avec $k = \pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2 \dots$

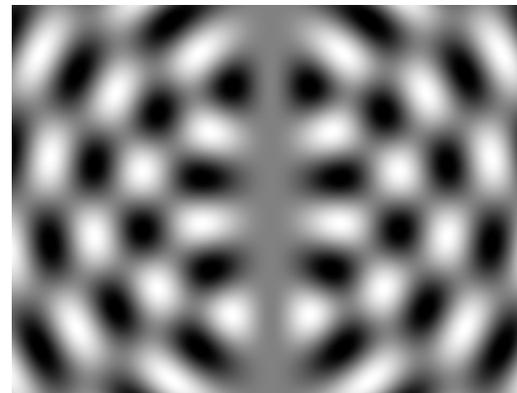
- Cas général

$$S_2M - S_1M = \left(k + \frac{\varphi}{2\pi} \right) \lambda$$

- φ : déphasage (en rad) entre les vibreurs
- k entier : ventre
- k demi-entier : nœud

- Exemple : vibreurs en opposition de phase ($\varphi = 180^\circ$)

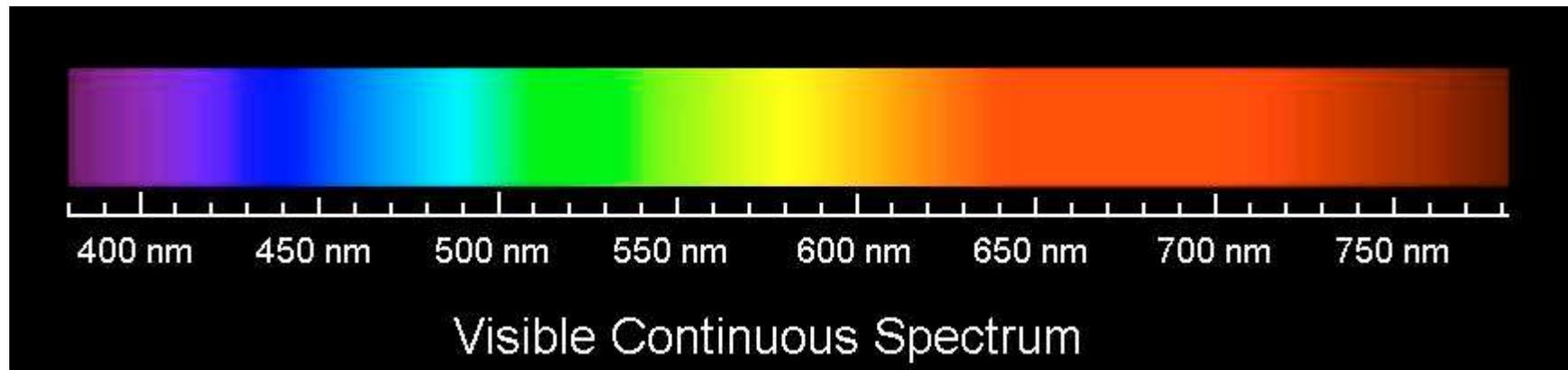
On retrouve la fig. 4 en permutant N et V.



1-2- Caractéristiques d'une onde lumineuse progressive

- fréquence f (couleur)
- célérité c
- longueur d'onde λ ($=c/f$)

$$\lambda = \lambda_0/n \quad (n \text{ indice de réfraction})$$



- amplitude de la vibration lumineuse E (en V/m)
- intensité lumineuse I (en W/m^2)

$$I \propto E^2$$

1-3- Conditions pour avoir interférence de 2 (ou plus) sources lumineuses

Les sources doivent être cohérentes (synchrones) entre elles

⇔ même fréquence (même longueur d 'onde)
et relation de phase (sources en phase par exemple)

On observe alors un phénomène d'interférence avec :

- zones d'interférences constructives (intensité lumineuse maximale)

$$E = E_1 + E_2$$

$$I > I_1 + I_2 \text{ (zone brillante)}$$

- zones d'interférences destructives (intensité lumineuse minimale)

$$E = |E_1 - E_2|$$

$$I < I_1 + I_2 \text{ (zone sombre)}$$

Cas particulier :

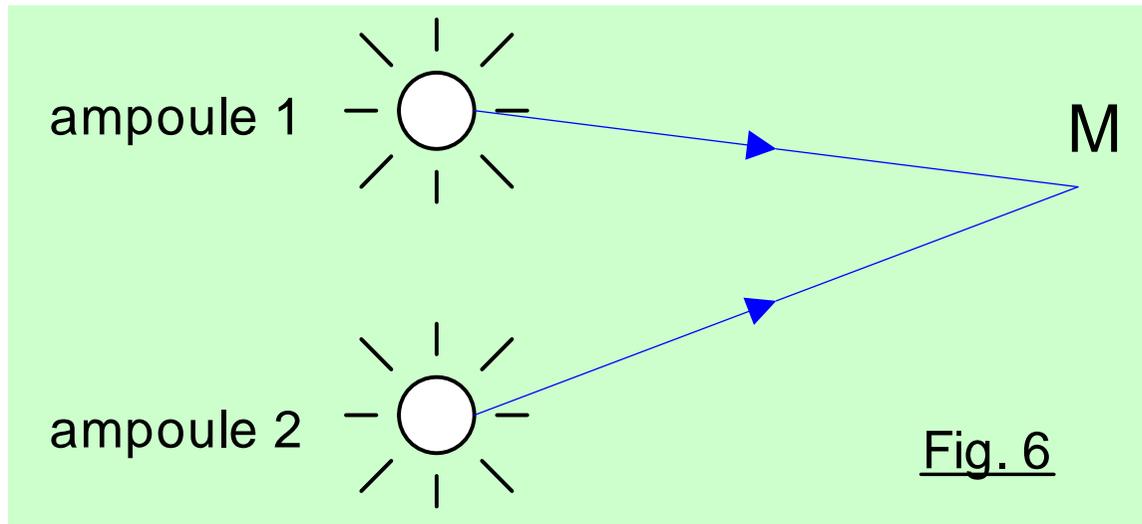
$$I = 0 \text{ (obscurité totale)}$$

Un point éclairé par 2 sources lumineuses est dans le noir !

Remarque : si les sources sont incohérentes (indépendantes entre elles), il n'y pas d'interférence et : $I = I_1 + I_2$

1-4- Sources lumineuses cohérentes et incohérentes

- Sources incohérentes : ampoules, tubes néon ...



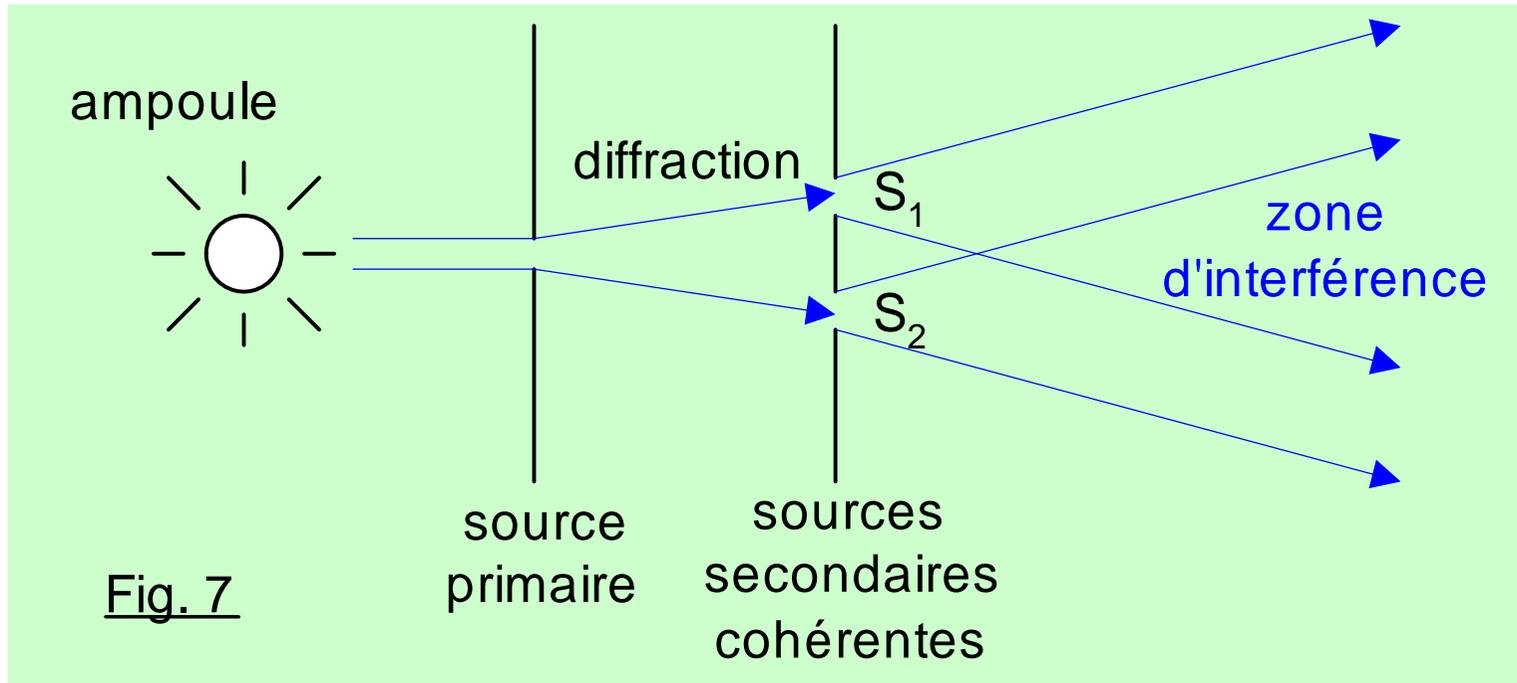
Déphasage aléatoire entre les 2 sources

⇒ pas d'interférence

⇒ $I = I_1 + I_2$

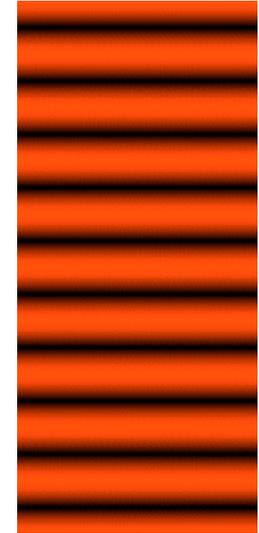
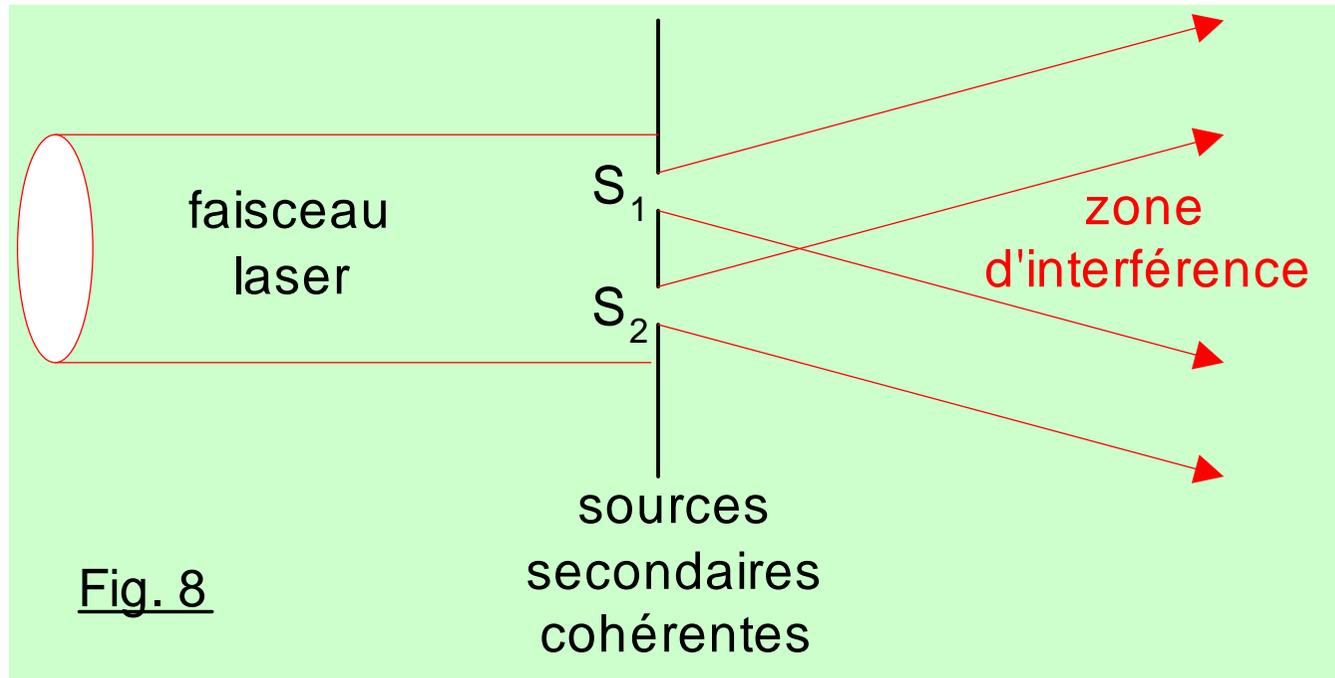
- Sources cohérentes

a)

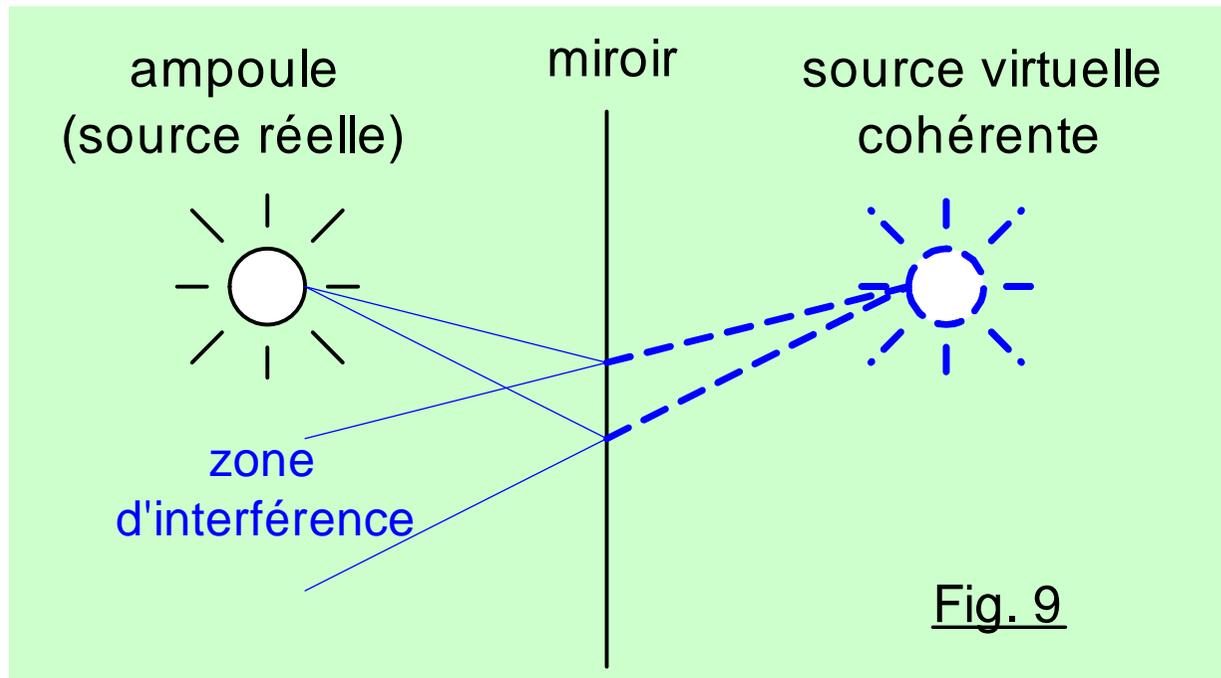


b) le LASER

La lumière est monochromatique et cohérente :



c) par réflexion



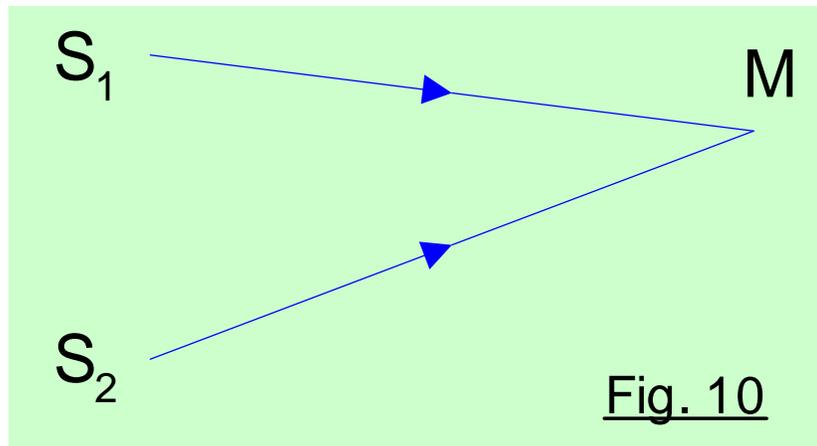
1-5- Chemin optique et différence de marche

- Chemin optique : $(AB) = n AB$

AB : distance (en m)

n : indice de réfraction

- Différence de marche δ : c'est la différence de chemin optique.



Différence de marche entre les deux rayons :

$$\delta(M) = (S_2M) - (S_1M) = n [S_2M - S_1M]$$

1-6- Différence de marche et interférence

Soit S_1 et S_2 deux sources lumineuses cohérentes, en phase.

- Interférence constructive si $\delta = k\lambda_0$ avec k entier
- Interférence destructive si $\delta = k\lambda_0$ avec k demi-entier

k : ordre d'interférence

λ_0 : longueur d'onde dans le vide

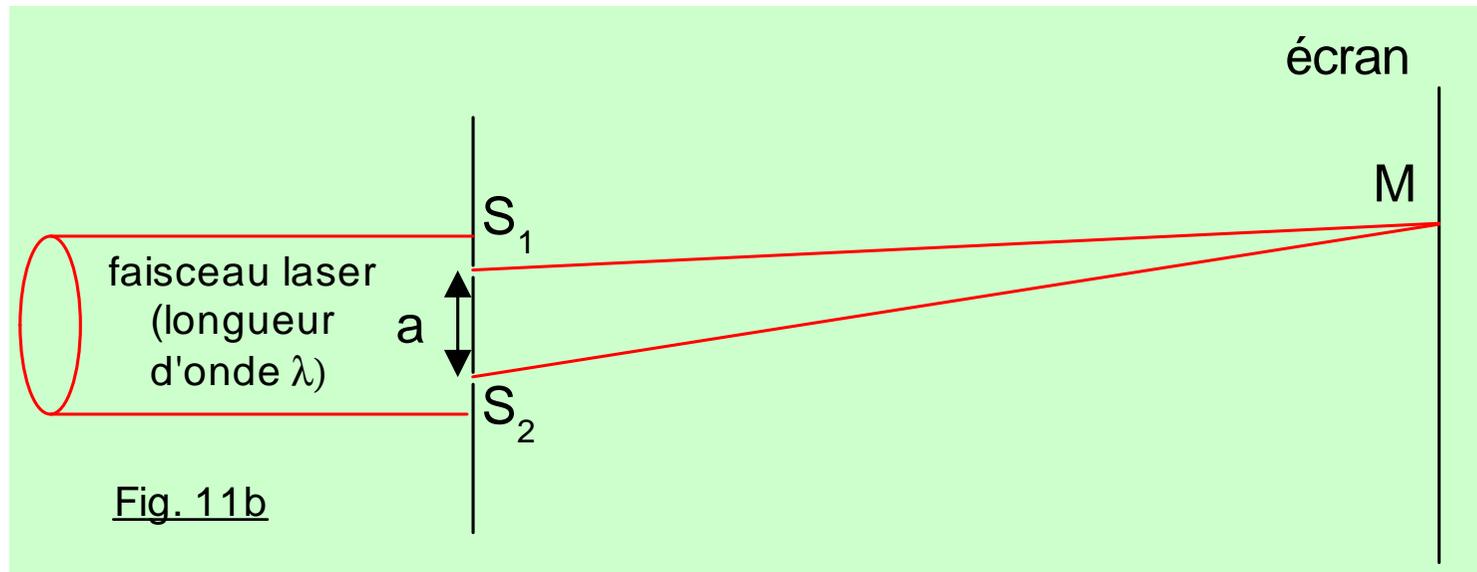
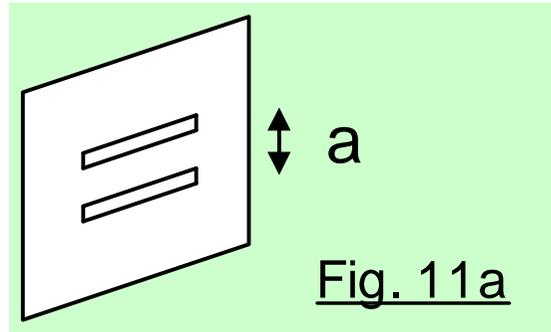
- Cas général

$$\delta = \left(k + \frac{\varphi}{2\pi} \right) \lambda_0$$

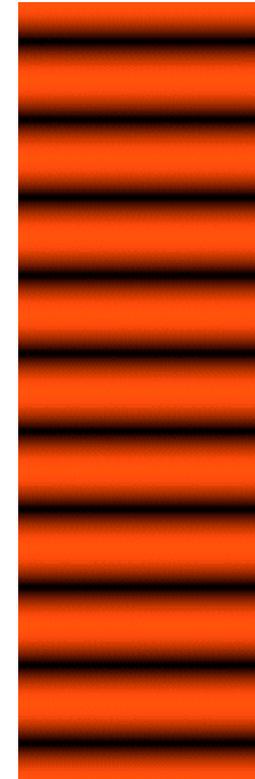
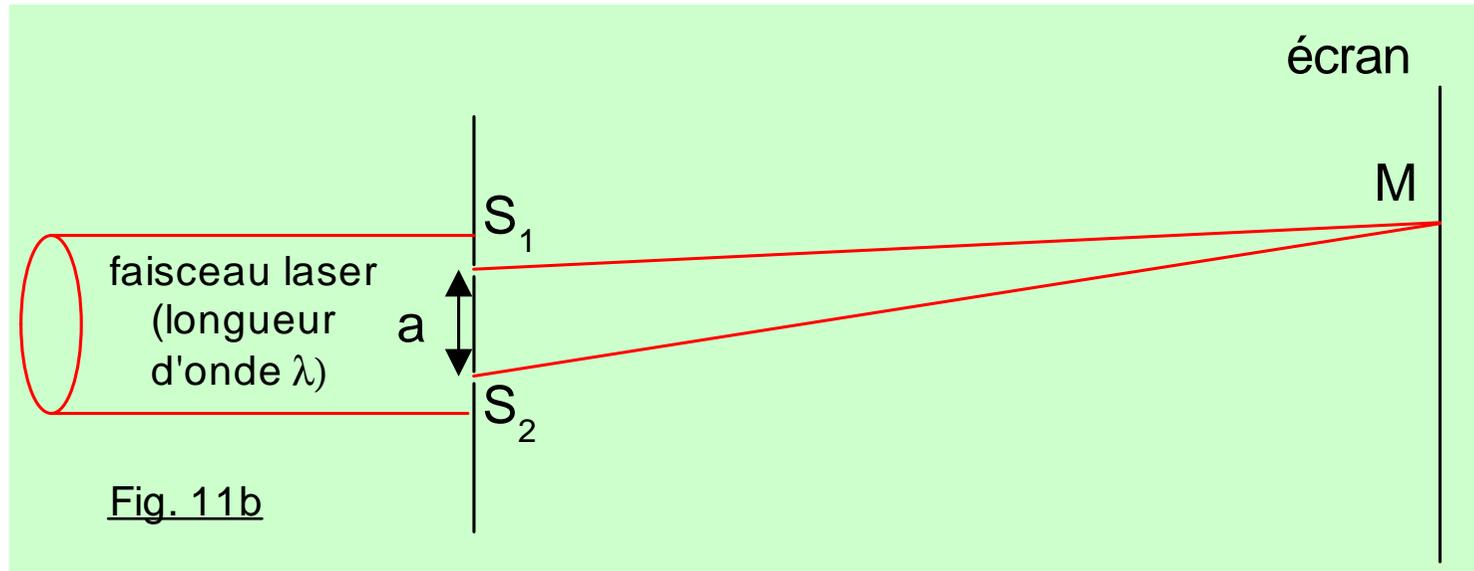
- φ : déphasage (en rad) entre les sources

1-7- Expérience d'Young

- Dispositif



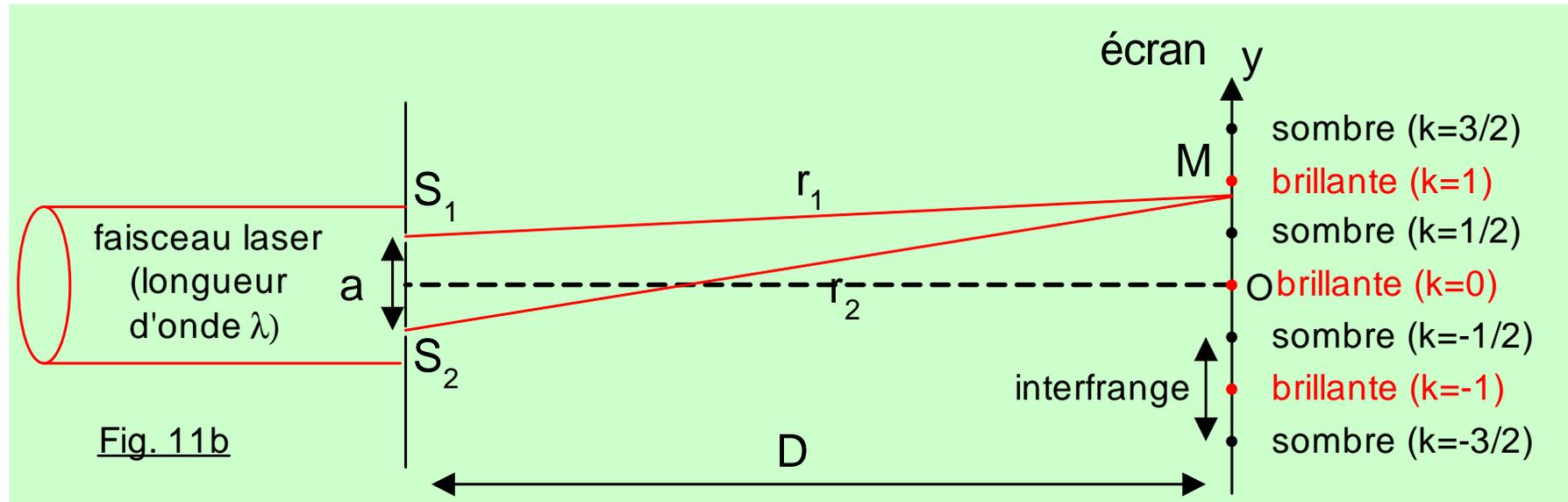
- Observation : fig. 11c



- Explication : phénomène d'interférence entre deux fentes
franges sombres : interférence destructive
franges brillantes : “ constructive

Différence de marche entre les deux rayons :

$$\delta(M) = n(r_2 - r_1)$$



Thm. de Pythagore : $r_2^2 = D^2 + \left(y + \frac{a}{2}\right)^2$

$$r_2 = D \sqrt{1 + \left(\frac{y + \frac{a}{2}}{D}\right)^2}$$

Mais : $\sqrt{1+\varepsilon} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{2}$

D'où : $r_2 \approx D + \frac{\left(y + \frac{a}{2}\right)^2}{2D}$

De même : $r_1 \approx D + \frac{\left(y - \frac{a}{2}\right)^2}{2D}$

Enfin : $\delta = n(r_2 - r_1) \approx n \frac{a}{D} y$ (1)

- Position des franges : $\delta = k\lambda_0$ (2)

$$(1)(2) \quad y = k \frac{\lambda_0 D}{na} = k \left(\frac{\lambda D}{a} \right)$$

k entier : frange brillante

k demi-entier : “ sombre

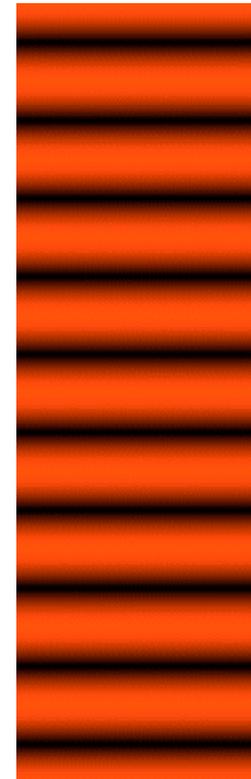
L'interfrange i (en m) est la distance entre deux franges brillantes successives :

$$i = \frac{\lambda D}{a}$$

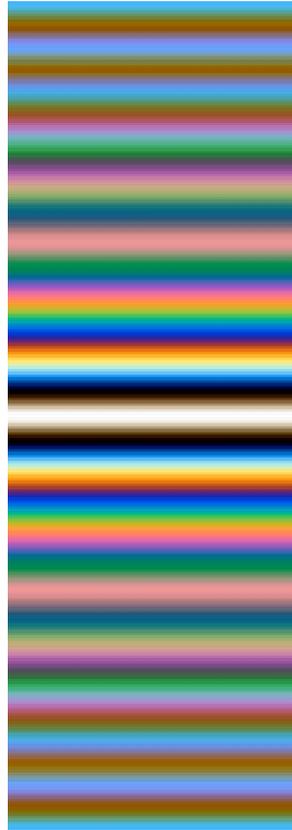
A.N. laser He-Ne : $\lambda_{\text{air}} = 0,6328 \mu\text{m}$ (rouge)

$a = 100 \mu\text{m}$ $D = 2 \text{ m}$

d'où l'interfrange : $i \approx 13 \text{ mm}$



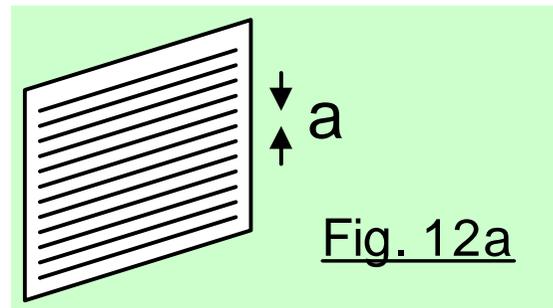
- Dispositif d'Young en lumière blanche



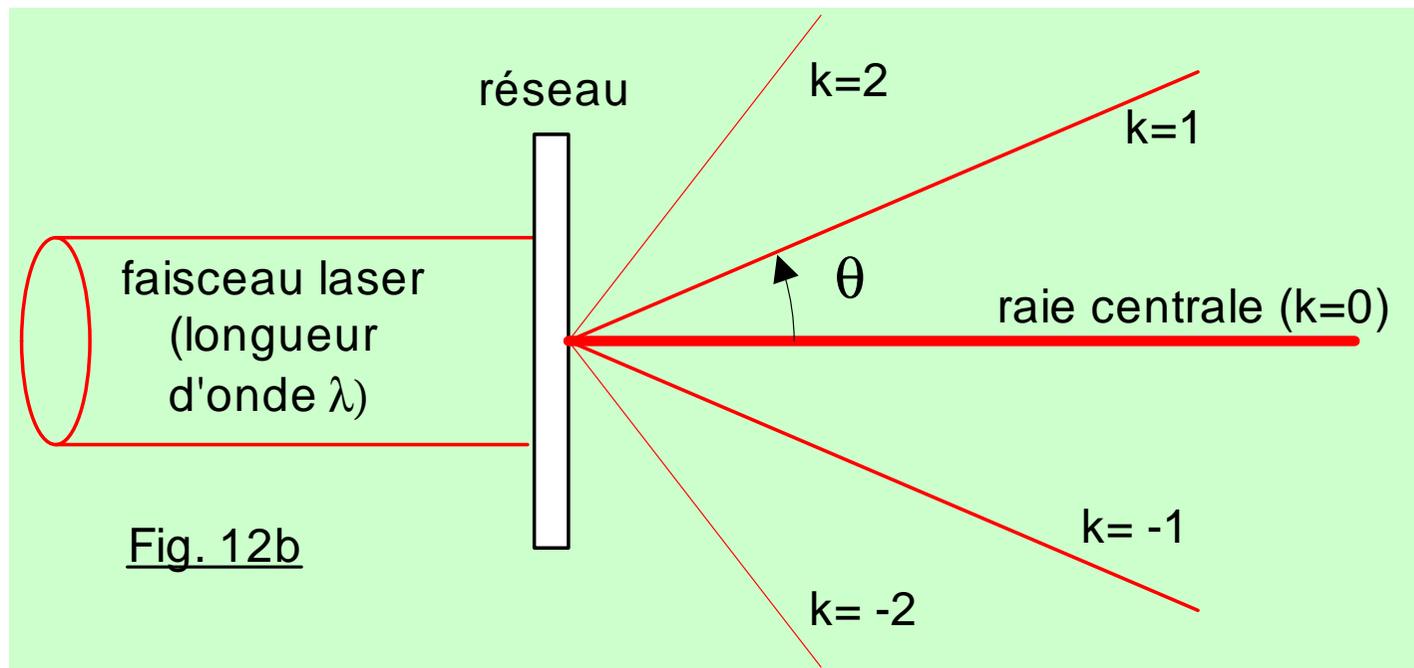
1-8- Réseau de diffraction

Un réseau est constitué de N fentes (ou traits).

Le *pas du réseau* (a) est la distance entre deux fentes :

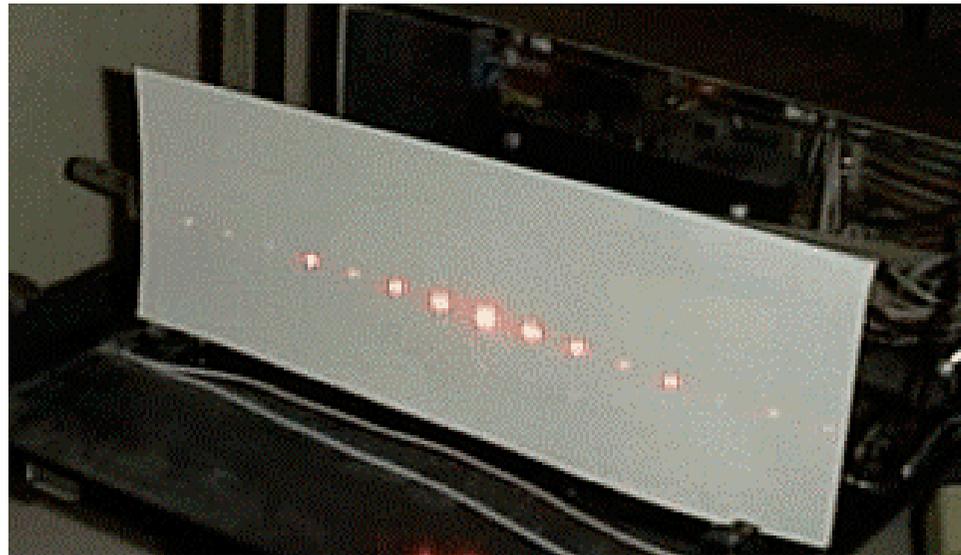


- Expérience



- Observation

Après passage à travers le réseau, on obtient des raies parfaitement distinctes et très brillantes.

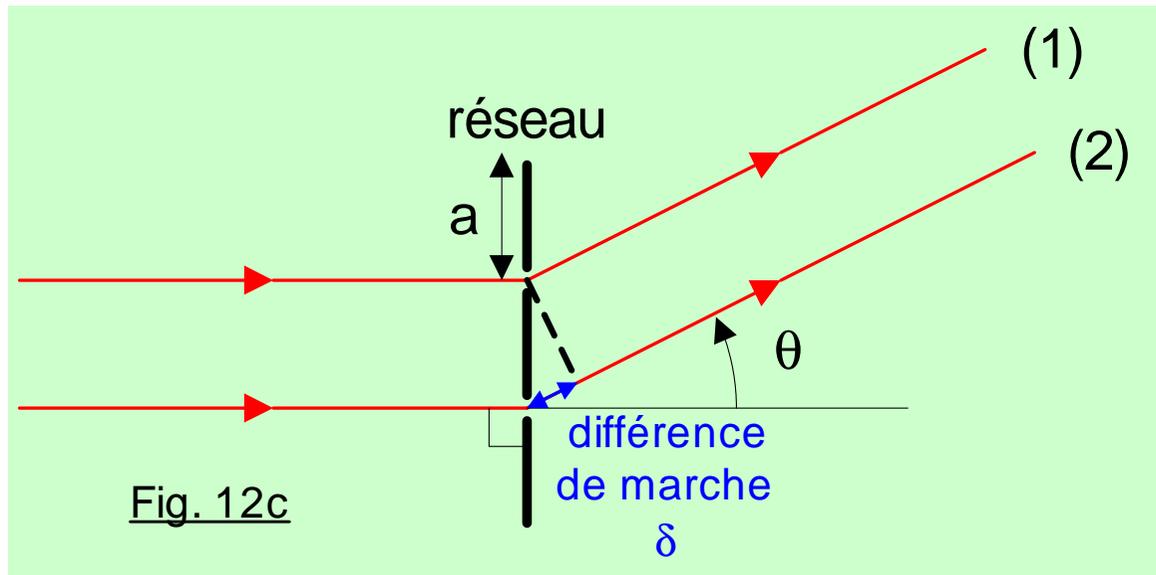


- Explication

Interférence entre les N sources lumineuses.

- Position des raies ?

Il y a interférence constructive dans la direction θ quand les rayons présentent une différence de marche $\delta = k\lambda_0$ avec k entier :



$$\delta = na \sin\theta$$

$$= k\lambda_0$$

Finalement :

$$\sin \theta_k = k \frac{\lambda}{a} \quad \text{avec } k \text{ entier}$$

A.N. laser : $\lambda_{\text{air}} = 0,6328 \mu\text{m}$ (rouge)

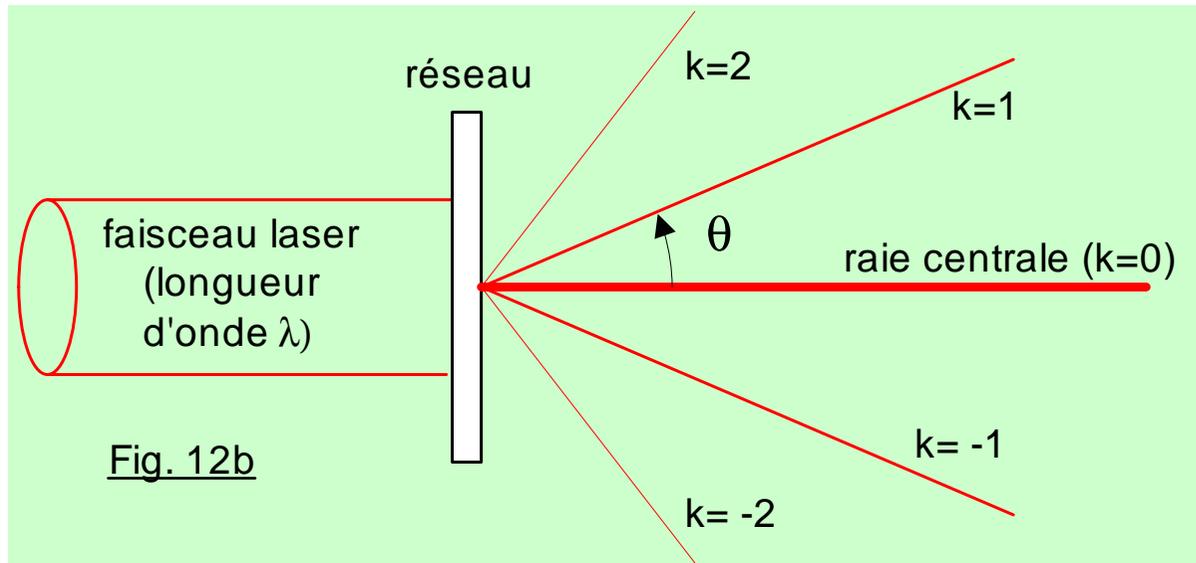
$a = 1,6 \mu\text{m}$ (625 traits par mm)

$k = 0$: $\theta_0 = 0$ (raie centrale)

$k = \pm 1$: $\theta_{\pm 1} = \pm 23^\circ$ (1^{er} ordre)

$k = \pm 2$: $\theta_{\pm 2} = \pm 52^\circ$ (2^{ème} ordre)

Pas de 3^{ème} ordre ...



- Remarque

La finesse et l'intensité des raies augmentent avec le nombre de fentes du réseau.

Le dispositif d'Young est un réseau à 2 fentes ($N = 2$) : les raies sont donc très larges.

fig. 11c
($N = 2$)

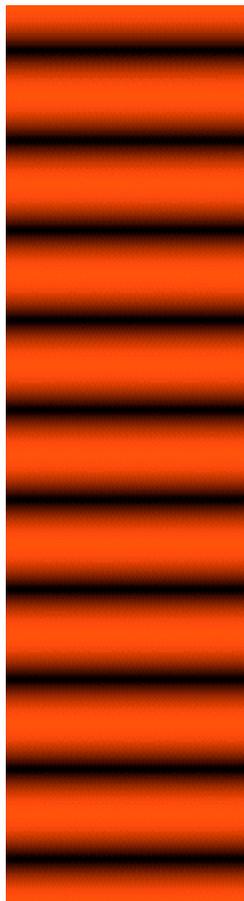


fig. 12d
($N = 10$)

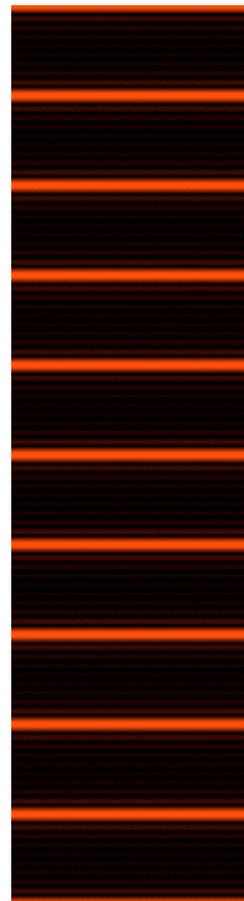
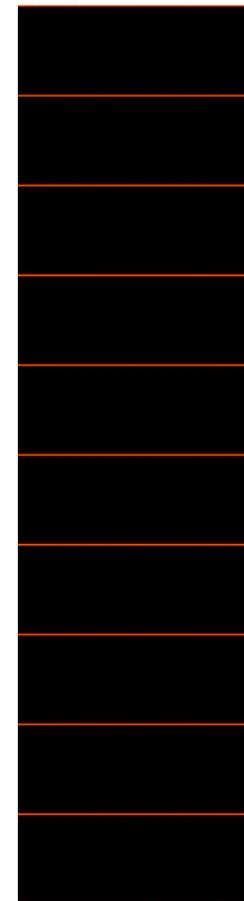
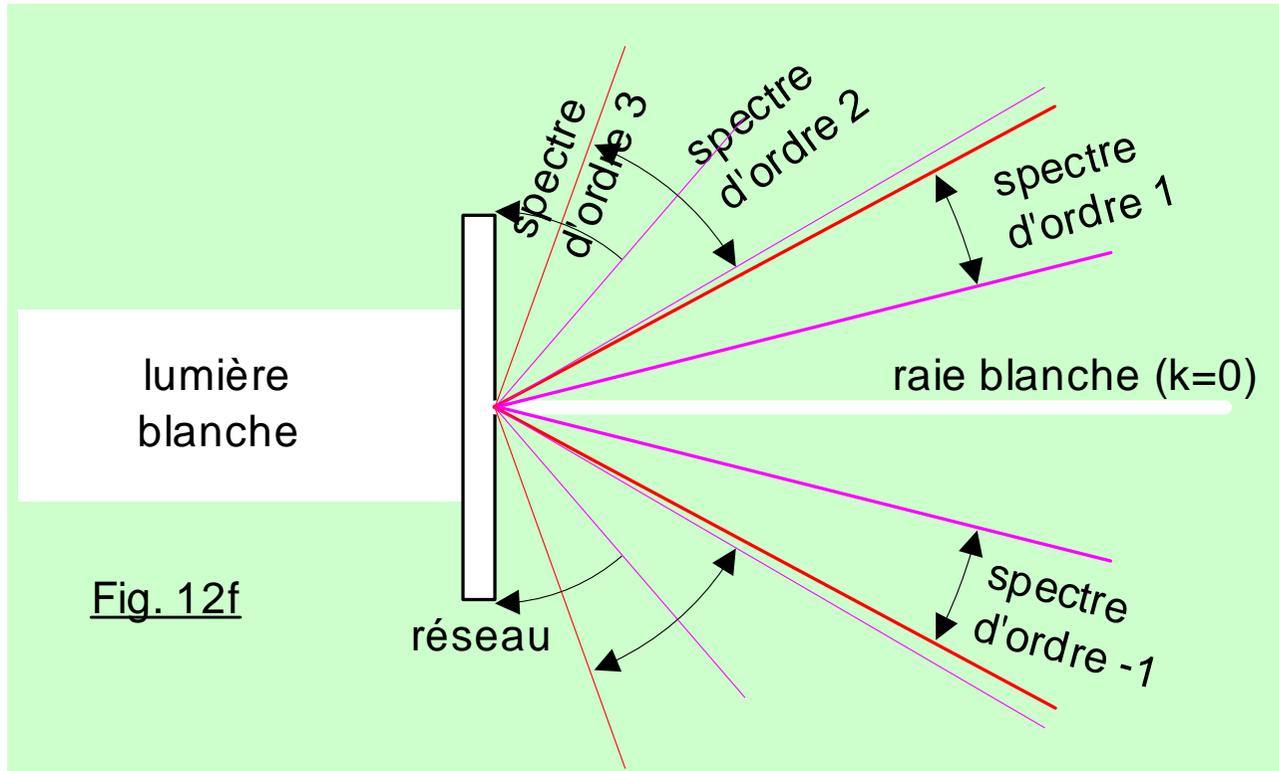


fig. 12e
($N = 100$)



- Décomposition de la lumière par un réseau

Eclairons le réseau avec de la lumière blanche :



Différence avec le prisme :

- ce n'est pas le même phénomène (interférence \neq dispersion)
- le rouge est plus dévié que le violet
- il y a plusieurs spectres

A.N.

Lumière blanche : $0,4 \mu\text{m}$ (violet) $< \lambda_0 < 0,76 \mu\text{m}$ (rouge)

$$\sin \theta_k = k \frac{\lambda}{a} \quad \text{avec } k \text{ entier}$$

Spectre d'ordre 0 : $\theta_0 = 0^\circ$ (raie blanche)

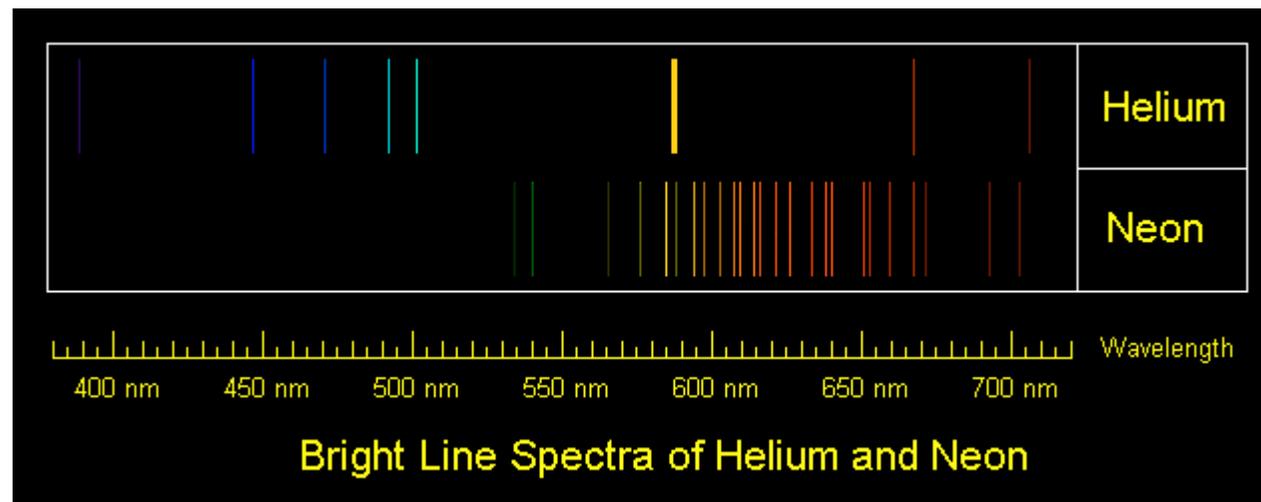
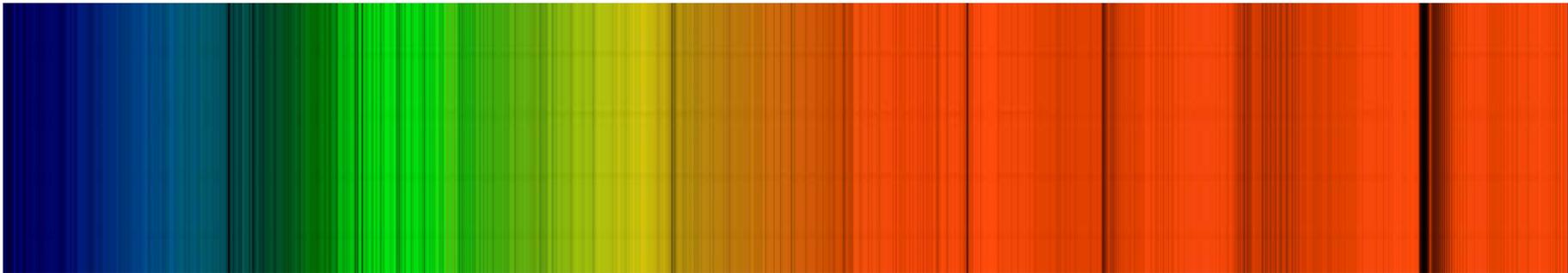
Ordre 1 : 14° (violet) $< \theta < 28^\circ$ (rouge)

Ordre 2 : 30° (violet) $< \theta < 72^\circ$ (rouge)

Ordre 3 : 49° (violet) $< \theta$

Le spectre d'ordre 3 est incomplet et il chevauche le spectre d'ordre 2 (brouillage).

- Applications du réseau : analyse spectrale de la lumière
 - spectrométrie (mesure de longueur d'onde)
 - spectroscopie (ex. spectre du Soleil)



- spectrocolorimétrie (mesure de la couleur d'une pomme)
- analyse spectrochimique

- Pouvoir de résolution d'un réseau

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

On montre que : **R = kN**

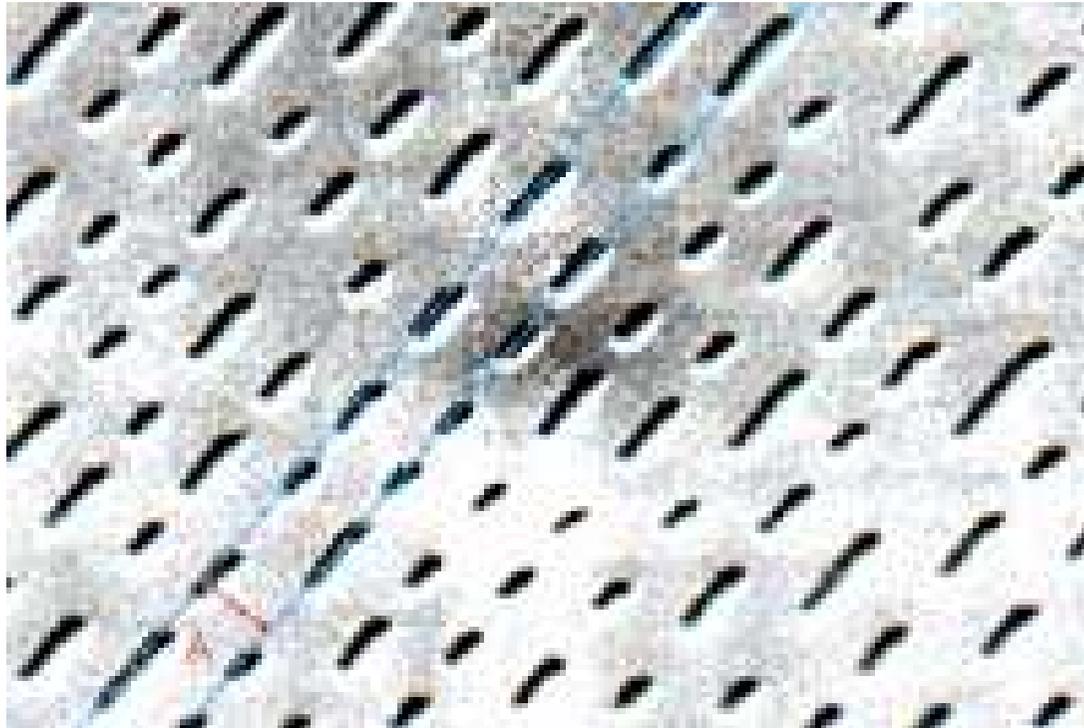
A.N. réseau 625 traits / mm ; largeur 40 mm

$$N = 625 \times 40 = 25\ 000$$

$$\text{Pour } k = 2 : R = 50\ 000$$

$$\text{Pour } \lambda = 632,8 \text{ nm} : \Delta\lambda = 0,01 \text{ nm}$$

- Remarques :
 - le pouvoir de résolution d'un réseau est meilleur que celui d'un prisme
 - la surface d'un CD se comporte comme un réseau par réflexion (pas d'env. $1,6 \mu\text{m}$)

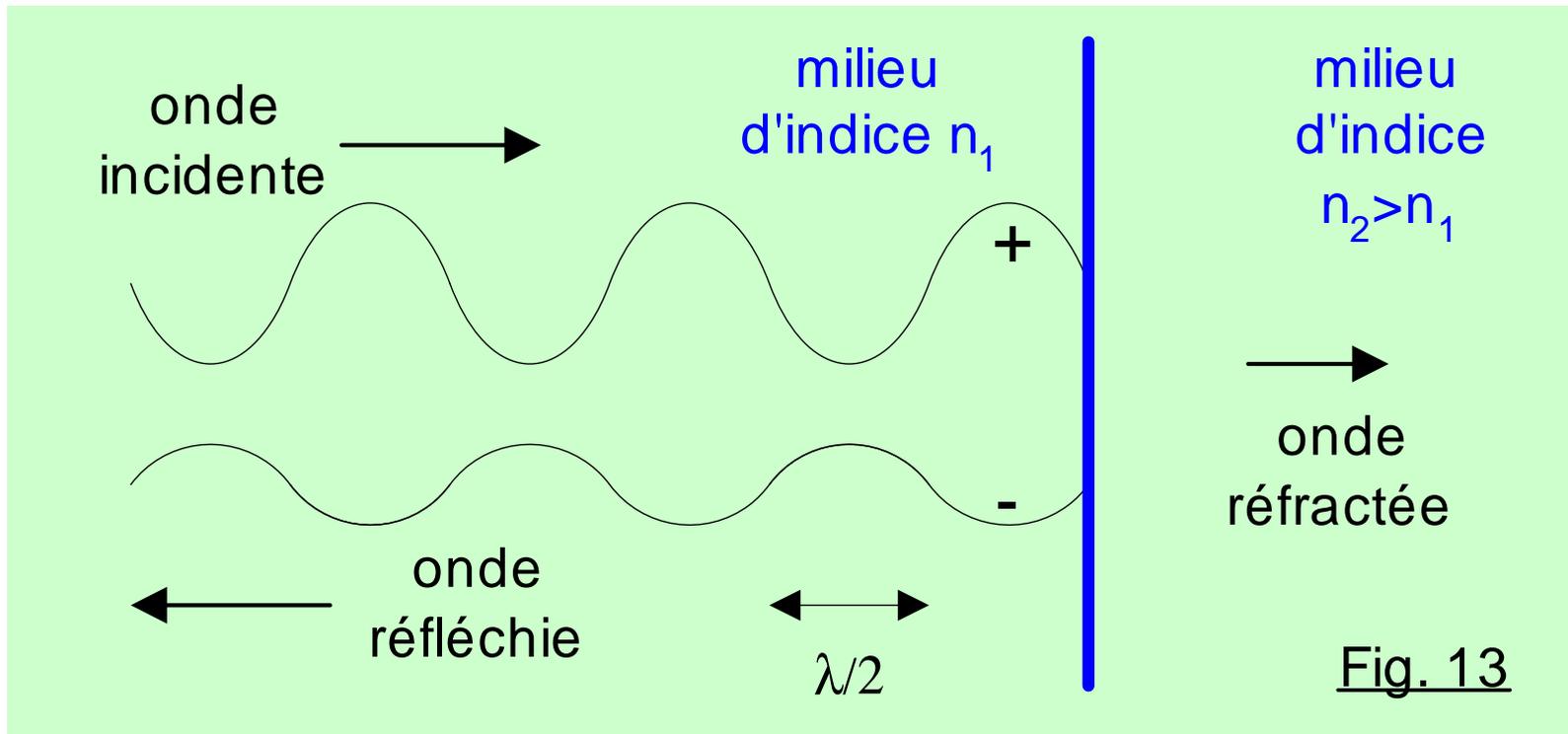


1-9- Interférences dans les lames minces

- Introduction : différence de marche introduite par un changement de milieu
 - Passage de la lumière dans un milieu
 - moins réfringent ($n_2 < n_1$) : réflexion sans changement de signe
 - plus réfringent ($n_2 > n_1$) : réflexion *avec* changement de signe

Dans tous les cas, la réfraction se fait sans changement de signe.

- Conséquence sur la différence de marche

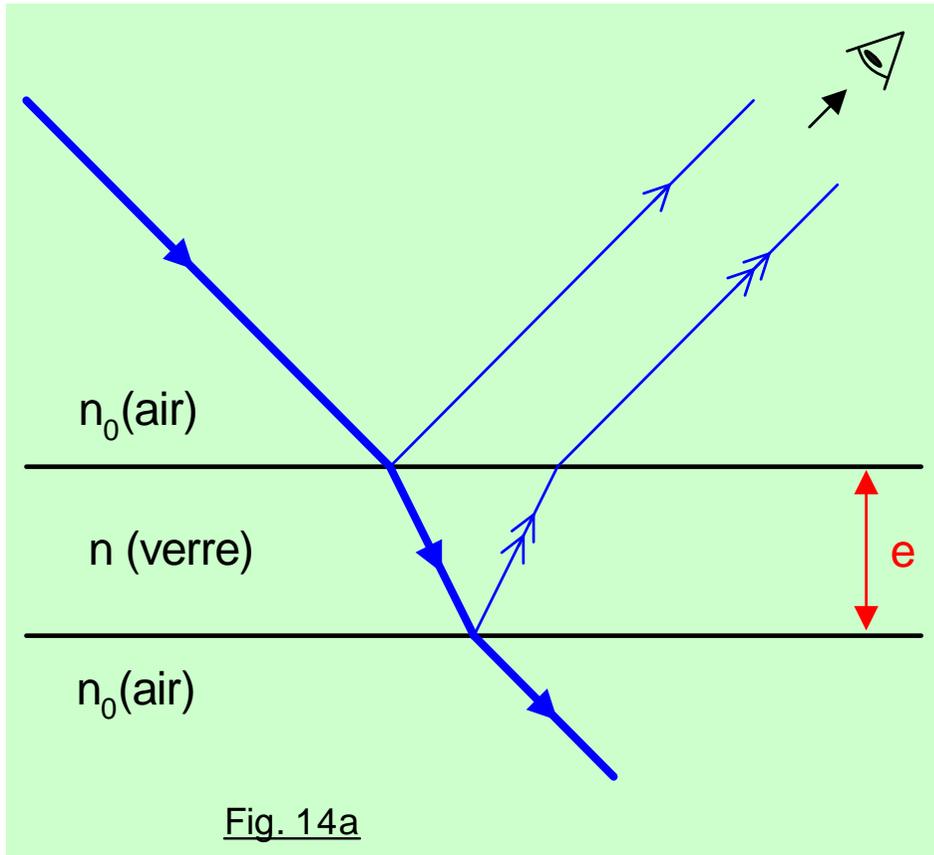


Changement de signe

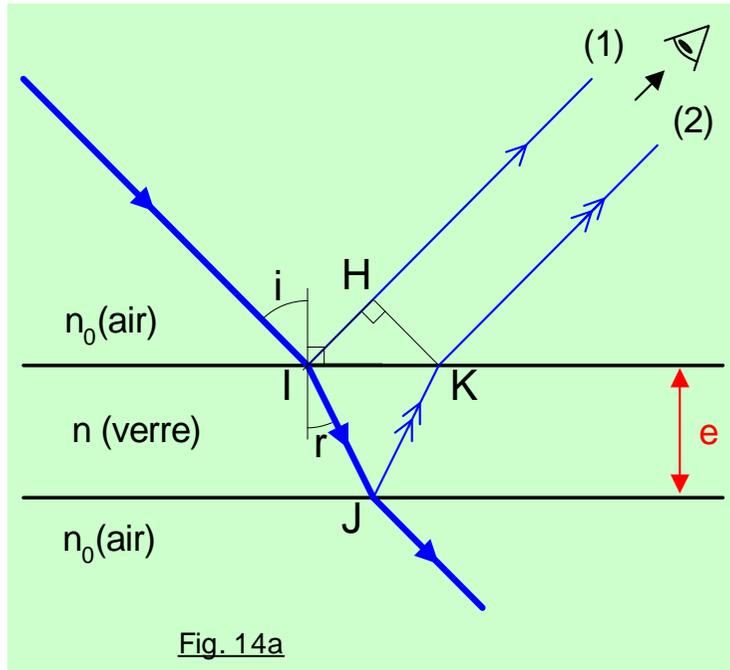
⇒ opposition de phase

⇒ introduction d'une différence de marche $\delta = \lambda_0/2$

- **Lame mince à faces parallèles**



épaisseur \ll mm



- Différence de marche entre les rayons (1) et (2)

$$\delta = (IJK) - (IH)$$

$$+ \lambda_0/2 \text{ (car réflexion avec changement de signe en I)}$$

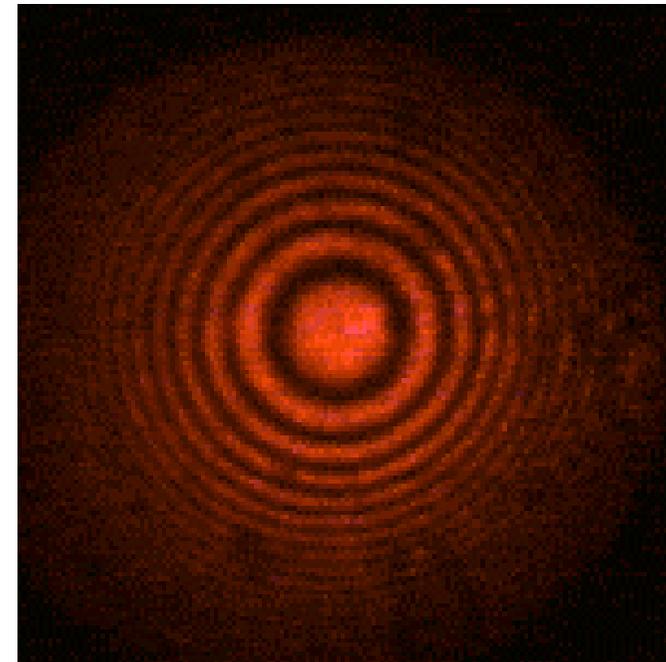
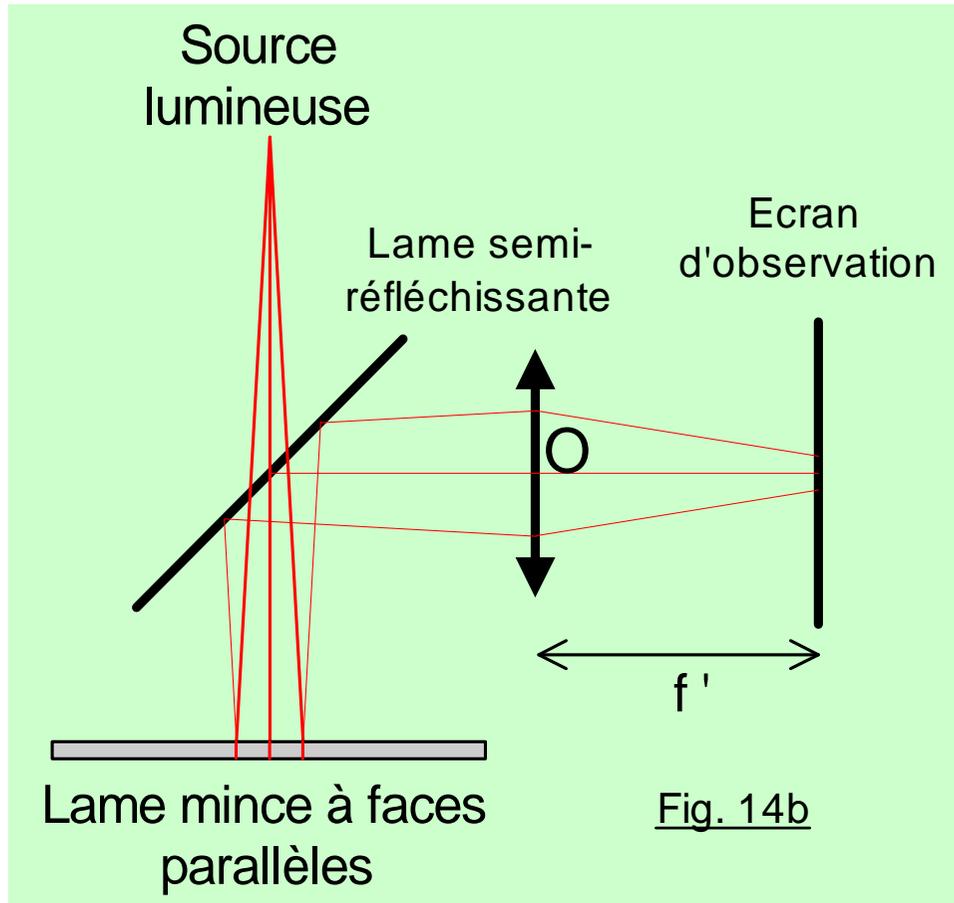
$$= nIJK - n_0IH + \lambda_0/2$$

$$\dots \quad \delta = 2en \cos r + \lambda_0/2$$

Interférence constructive quand : $\delta = k\lambda_0$ avec k entier

- expérimentalement :

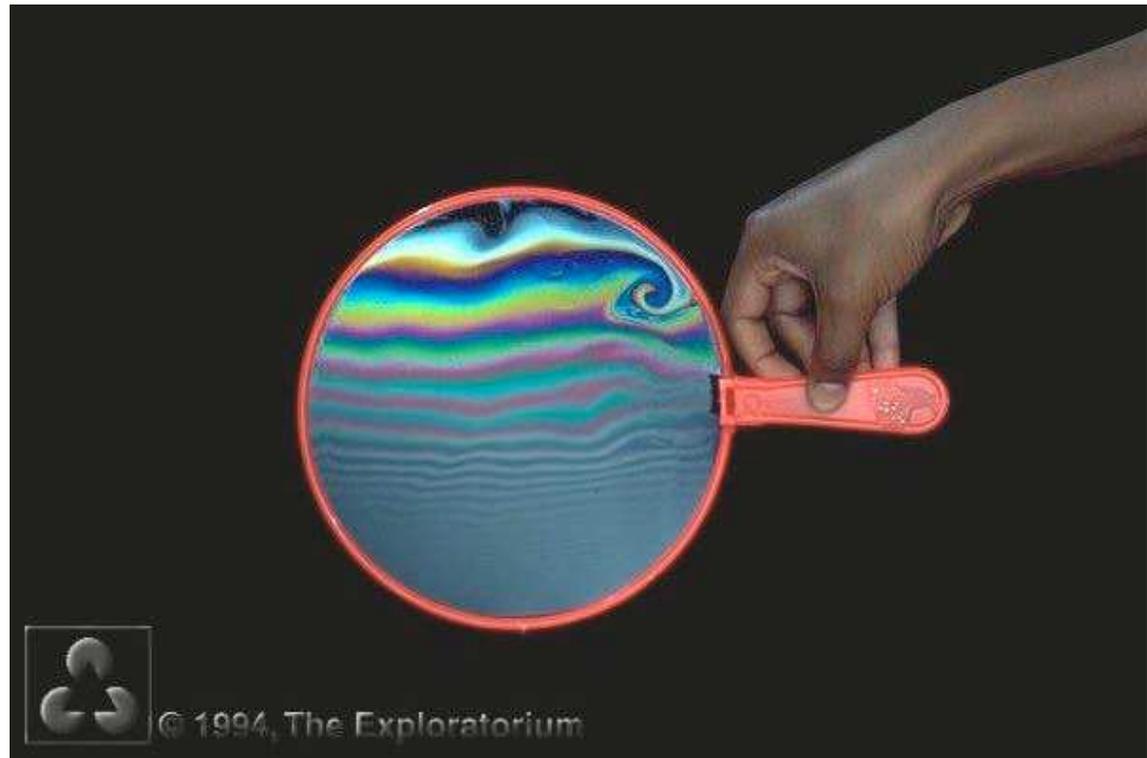
source lumineuse : laser rouge



- Remarques

Ceci explique les couleurs de :

- tache d'huile à la surface de l'eau
- coquillage, ailes de papillon
- bulle de savon ...

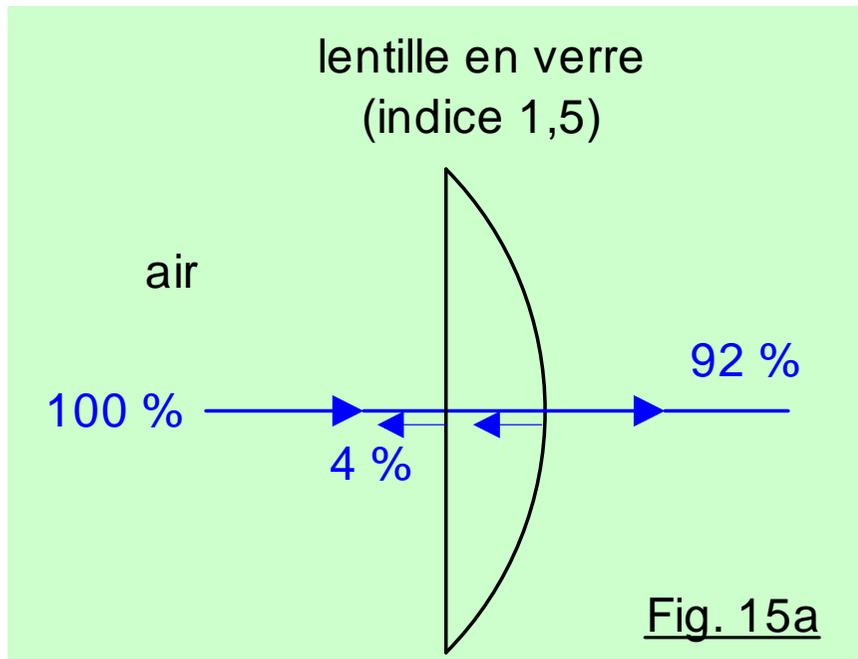


- Application des lames minces : couche anti-reflet

Lors d'un changement de milieu, il y a réflexion et donc :

- perte d'énergie lumineuse
- formation d'une image parasite

- Exemples :



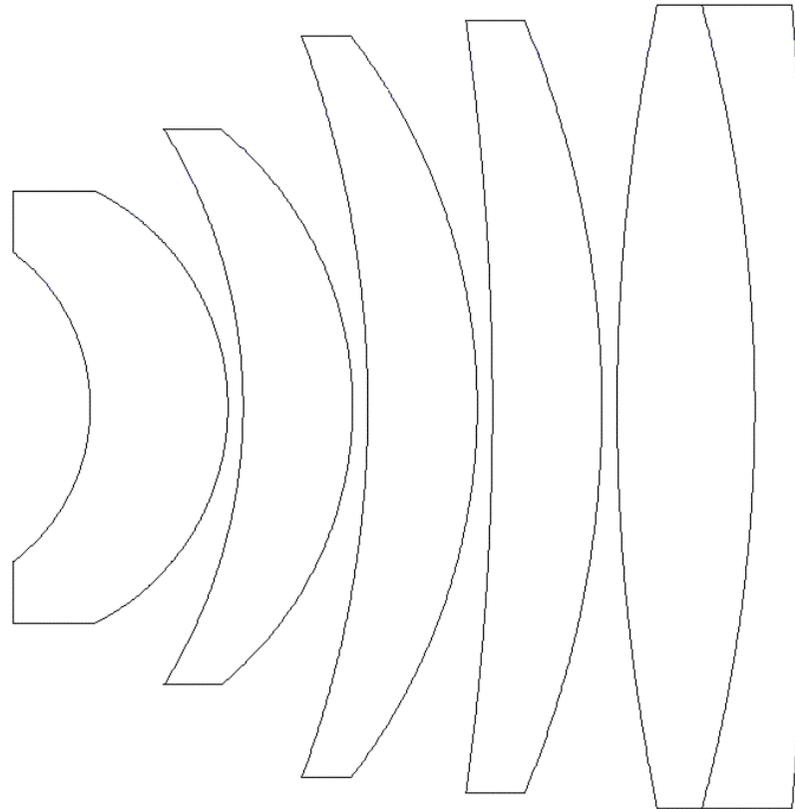
Loi de Fresnel : $R = 4 \%$

$T = 96 \%$ (pour une face)

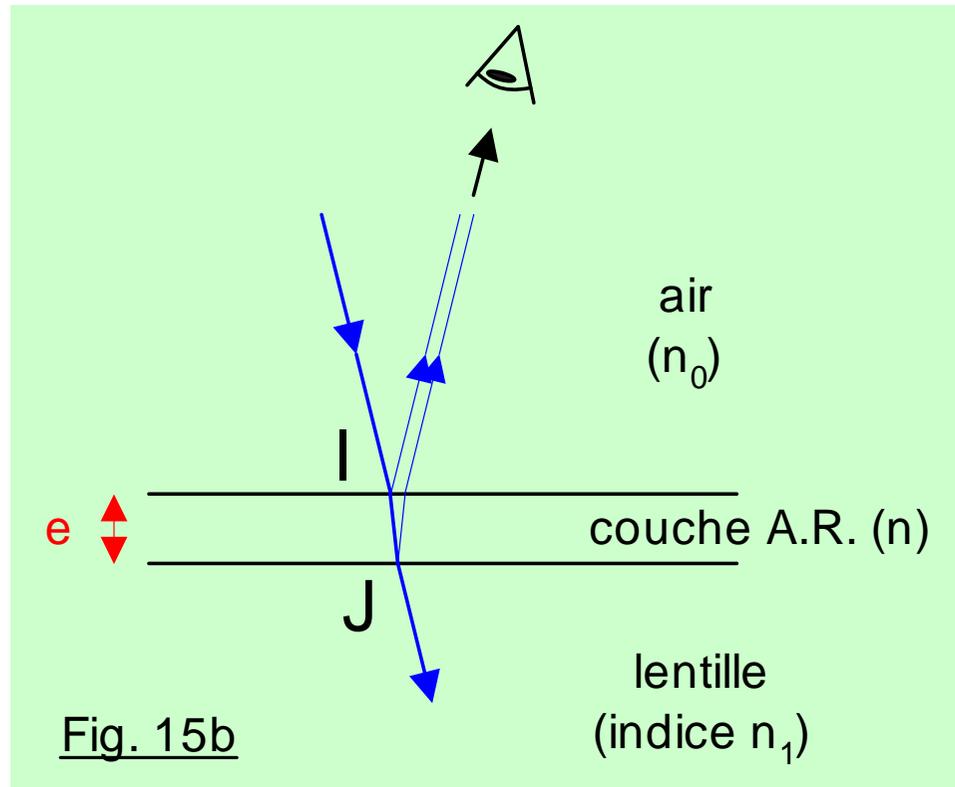
Au total : $T^2 = 92 \%$

8 % de pertes.

- Pour un système de 6 lentilles : $T^{12} = 61 \%$ (39 % de pertes)



On peut, dans une certaine mesure, limiter la réflexion par interférence :



- Différence de marche entre les 2 rayons réfléchis (sous incidence normale) :

$$\delta = 2(IJ)$$

+ $\lambda_0/2$ (changement de signe en I car $n > n_0$)

- $\lambda_0/2$ (changement de signe en J car $n_1 > n$)

$$\delta = 2ne$$

Pour limiter la réflexion il faut interférence *destructive* :

$$\delta = k\lambda_0 \text{ avec } k \text{ demi-entier}$$

On choisit l'épaisseur la plus faible : $k = 1/2$

$$e = \frac{\lambda_0}{4n} = \frac{\lambda}{4}$$

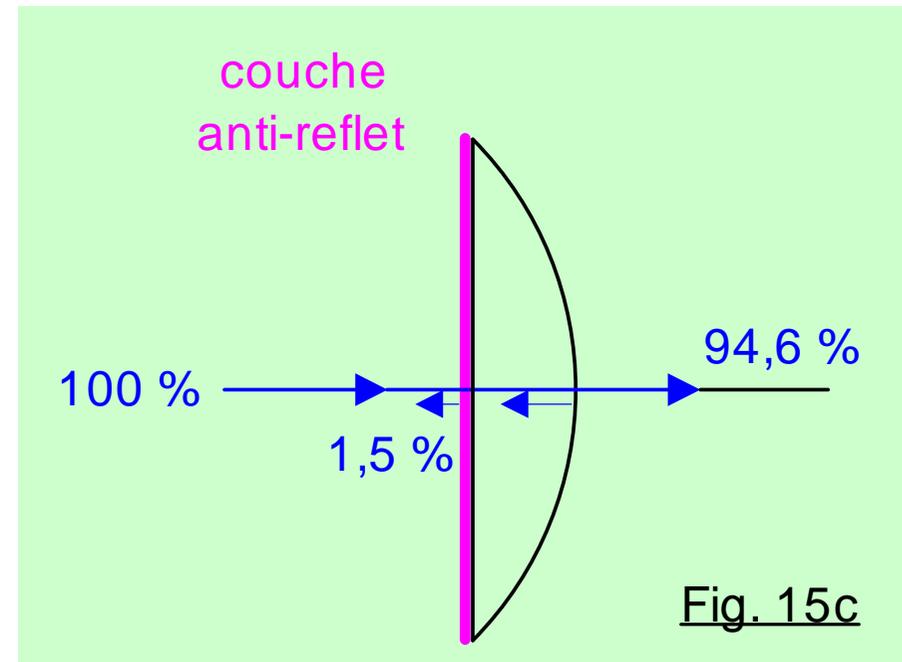
A.N. $n = 1,38$ (MgF_2)

$\lambda_0 = 0,55 \mu\text{m}$ (longueur d'onde moyenne du spectre visible)

d'où : $e = 0,10 \mu\text{m}$

- Traitement anti-reflet d'une lentille

Le coeff. de réflexion chute de
4 % à 1,5 % :

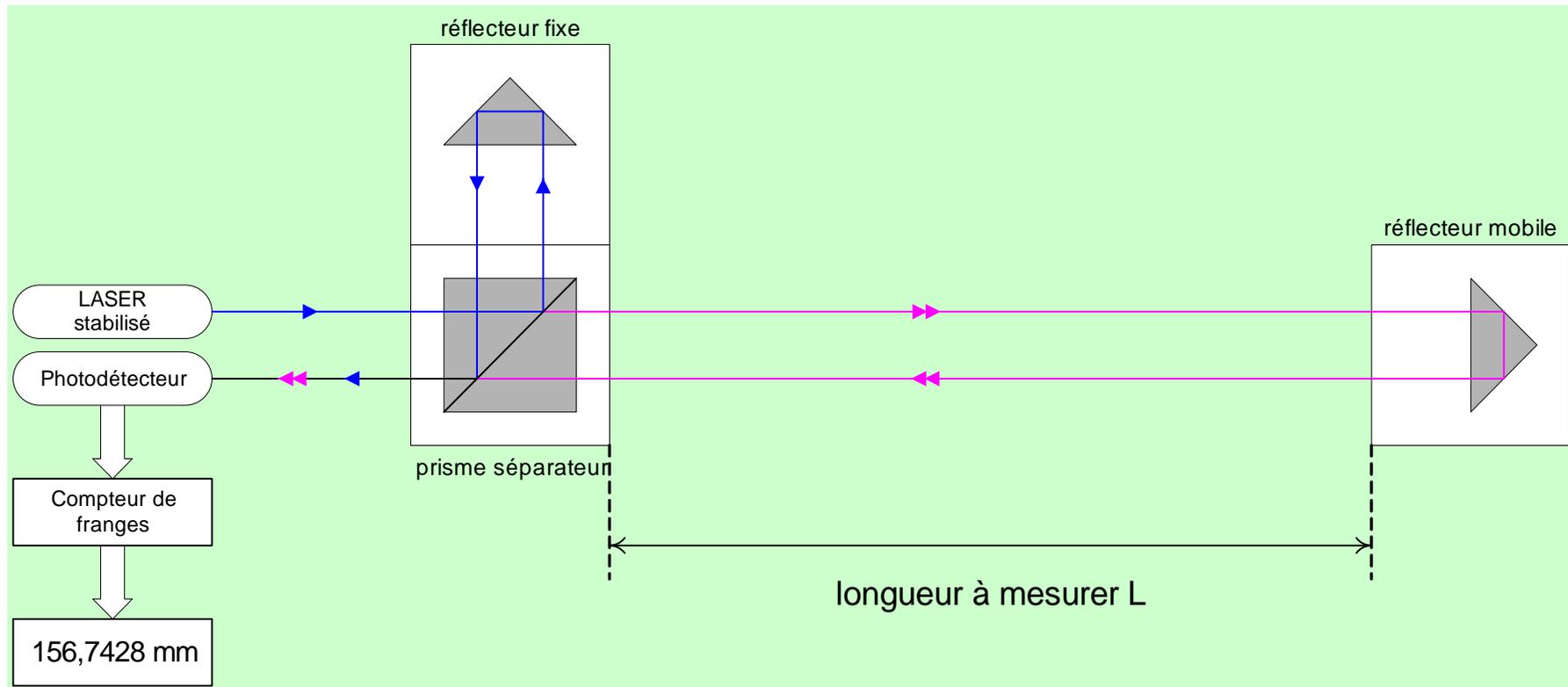


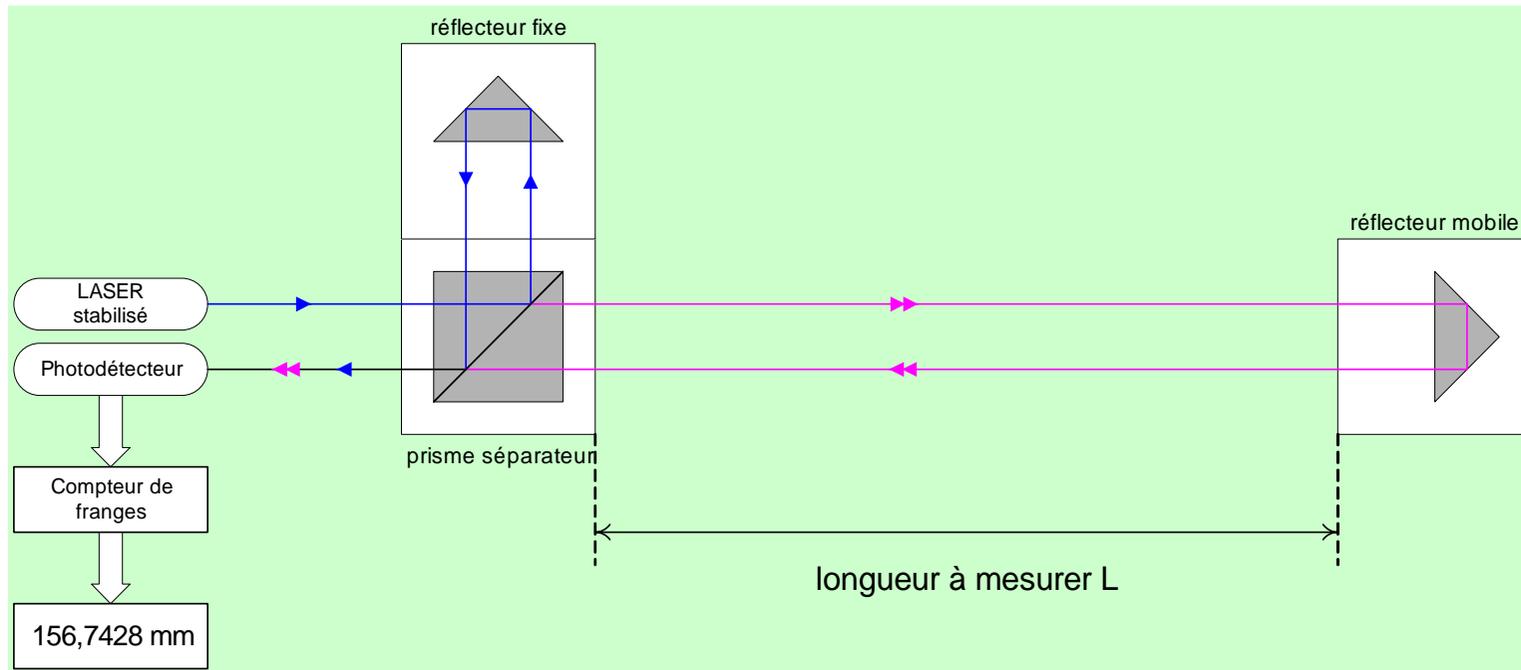
- Remarque :

Pour augmenter la réflexion, il faut calculer l'épaisseur pour avoir interférence *constructive* (application dans les miroirs de qualité).

1-10- Interférométrie en métrologie dimensionnelle

Les mesures de longueur les plus précises se font actuellement avec des interféromètres (de type Michelson) :





- Principe

Le déplacement du réflecteur mobile se traduit par une différence de marche : $\delta = 2nL$

Deux franges brillantes successives correspondent à un déplacement de $\lambda/2$ ($\delta = \lambda_0$)

Le comptage du nombre de franges Δk donne donc le déplacement total : $L = \Delta k \cdot \lambda/2$

- Incertitude de mesure

Laser He-Ne stabilisé en fréquence (avec du méthane) :

- incertitude relative sur la longueur d'onde :

10^{-9} dans le vide

en pratique : 10^{-7} (dans l'air)

Finalement, l'incertitude relative totale est de l'ordre de 10^{-6}
(soit 1 μm pour 1 m).

- Applications
 - en métrologie dimensionnelle (étalonnage de cales étalons, MMT, machines-outils)
 - mesure de vibrations ...