

# Introduction à l'Interférométrie

Optique physique

2005-2006



Denis Defrère

DEA en sciences

## Aperçu

### 1. Principe de l'interférence

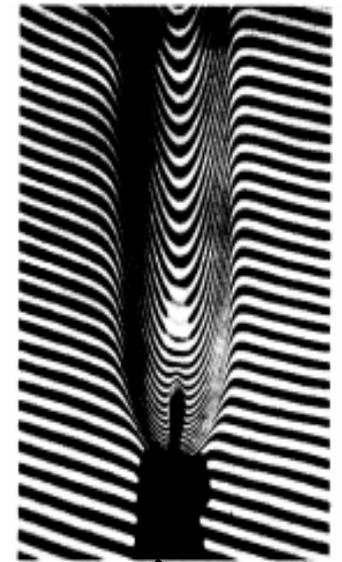
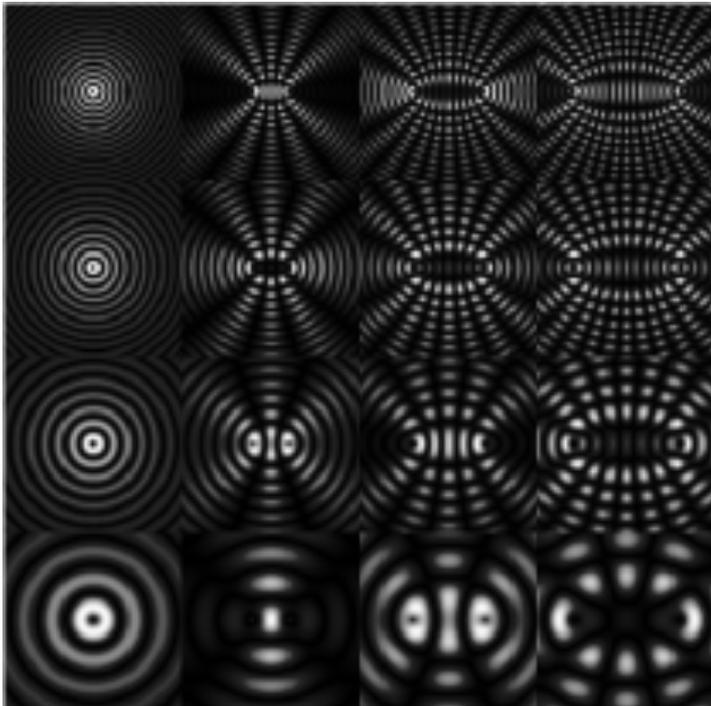
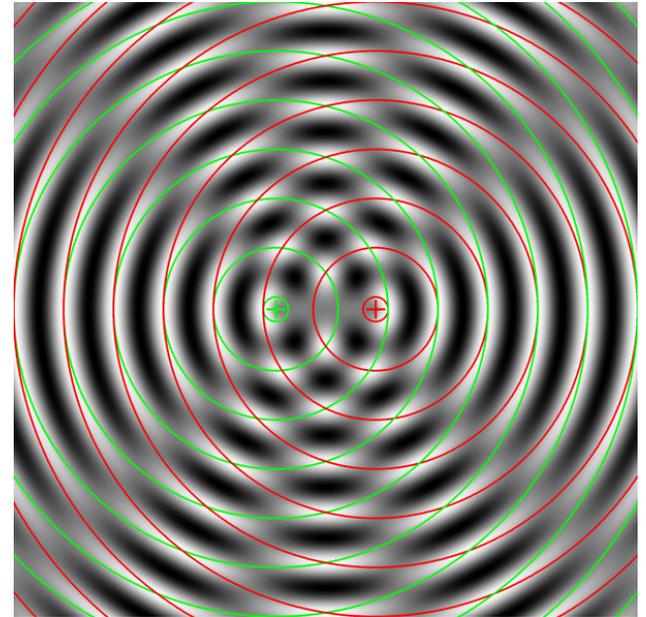
### 2. L'interférométrie

- ✓ Interférométrie à division de front d'onde
- ✓ Interférométrie à division d'amplitude
  - Interféromètre de Newton - mesure d'épaisseur
  - Interféromètre d'Haidinger - coatings antireflet
  - Interféromètre de Fizeau - mesure d'épaisseur
  - Interféromètre de Michelson - tester des surfaces

### 3. Application de l'interférométrie en astrophysique

- ✓ Détecter des ondes gravitationnelles avec LISA
- ✓ Détecter des exo planètes avec Darwin
- ✓ Les interféromètres au sol

# Principe de l'interférence



## Principe de l'interférence

- Cas simple : 2 ondes monochromatiques et polarisées linéairement

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1 &= E_1 e^{i\omega_1 t} \mathbf{e}_1 & \text{avec} & & E_1 &= A_1 e^{i\omega_1 t} \\ \mathbf{E}_2 &= E_2 e^{i\omega_2 t} \mathbf{e}_2 & & & E_2 &= A_2 e^{i\omega_2 t} \end{aligned}$$

- Superposition (équations de Maxwell linéaires) :  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$

- Intensité (moyenne du carré du module du champ électrique)

$$|\mathbf{E}|^2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* = |\mathbf{E}_1|^2 + |\mathbf{E}_2|^2 + 2 \operatorname{Re}\{\mathbf{E}_1^* \cdot \mathbf{E}_2\}$$

**TERME D'INTERFERENCE**

- Terme d'interférence :

$$2 \operatorname{Re}\{\mathbf{E}_1^* \cdot \mathbf{E}_2\} = 2(\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2) \operatorname{Re}\{E_1^* E_2 e^{i(\omega_2 - \omega_1)t}\}$$

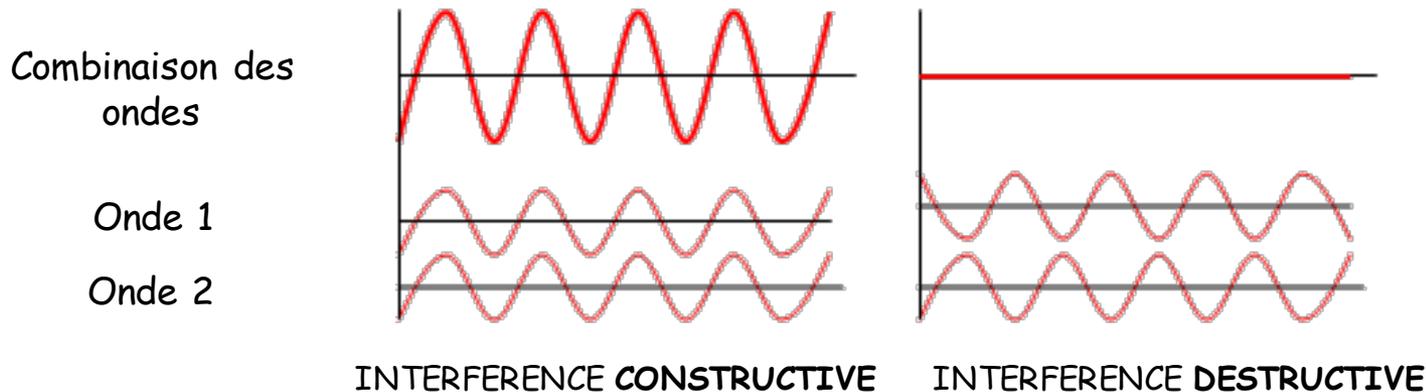
## Principe de l'interférence

$$2 \operatorname{Re}\{E_1^* E_2\} = 2(\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2) \operatorname{Re}\{e^{i(\omega_2 - \omega_1)t}\}$$

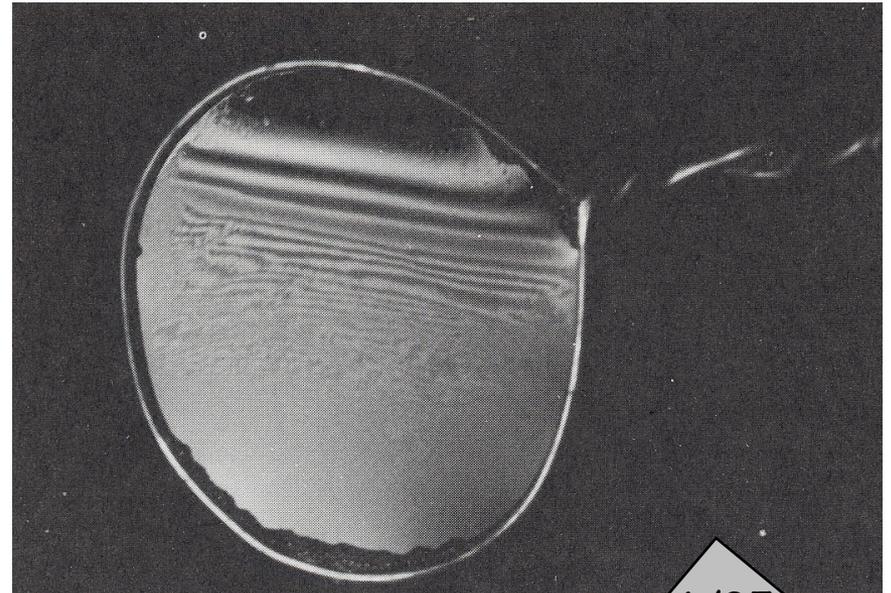
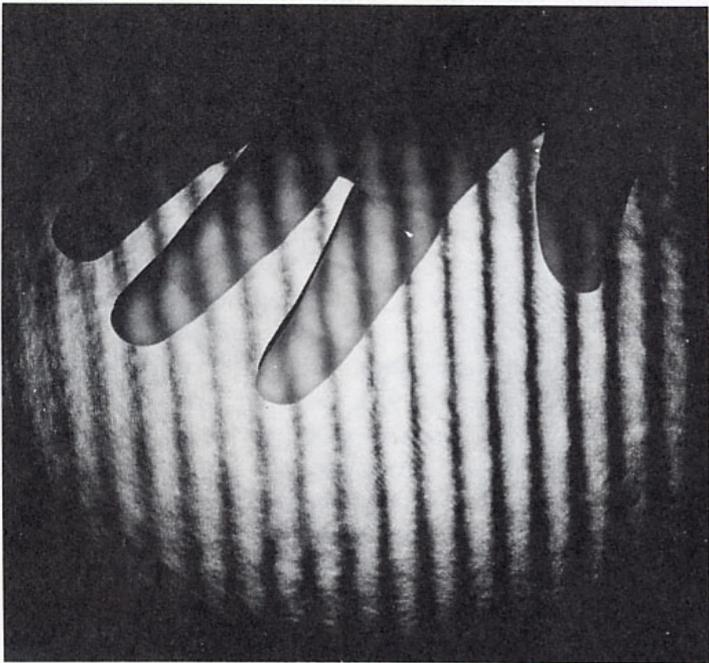
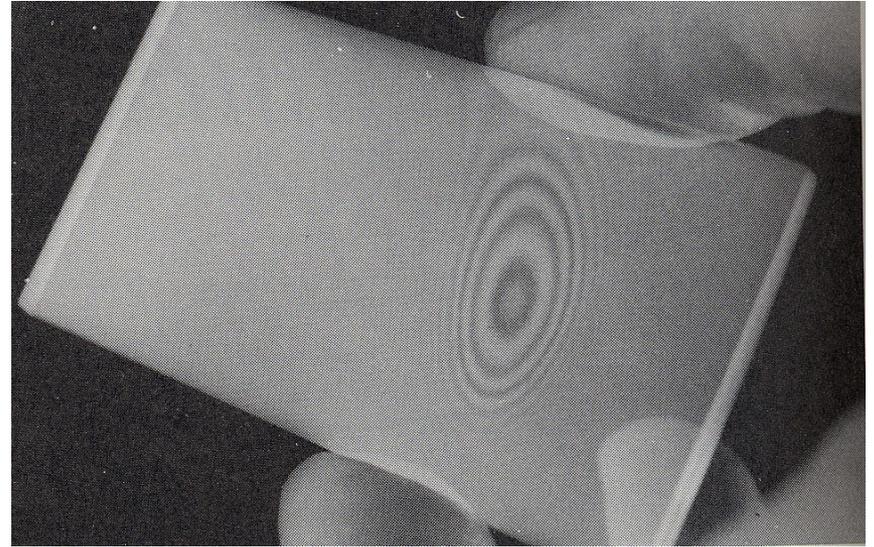
- Pas d'interférence si
  - ✓ Moyenne du terme d'interférence nulle, i.e. quand  $\omega_1$  différent de  $\omega_2$ .
  - ✓ Ondes polarisées orthogonalement :  $\mathbf{e}_1$  et  $\mathbf{e}_2$  orthogonaux.
- En prenant la moyenne, on obtient les intensités :

$$I = I_1 + I_2 + 2(\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2) \{I_1 I_2\}^{1/2} \cos \dots = 2 \dots 1$$

- Cas simple :



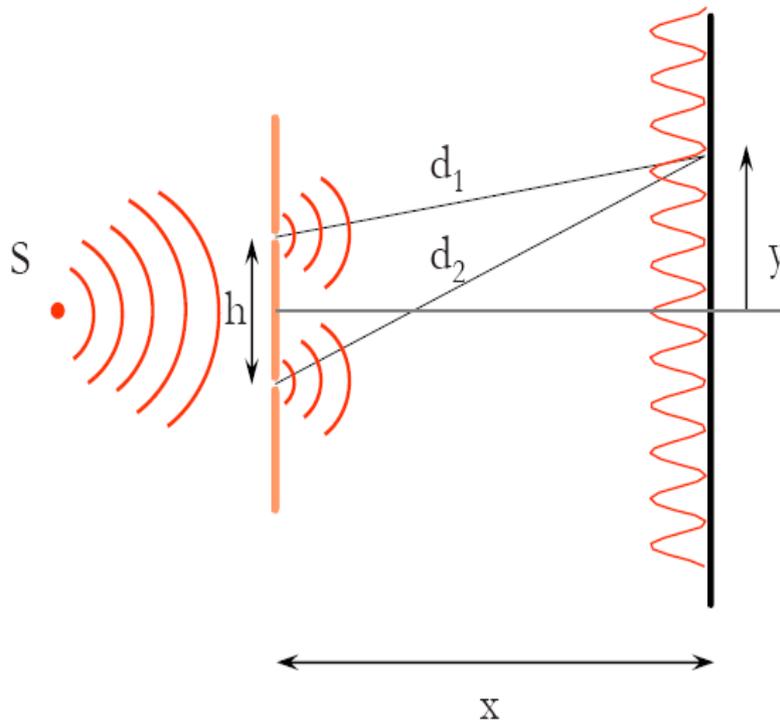
# L'interférométrie



# Interféromètres à division de front d'onde

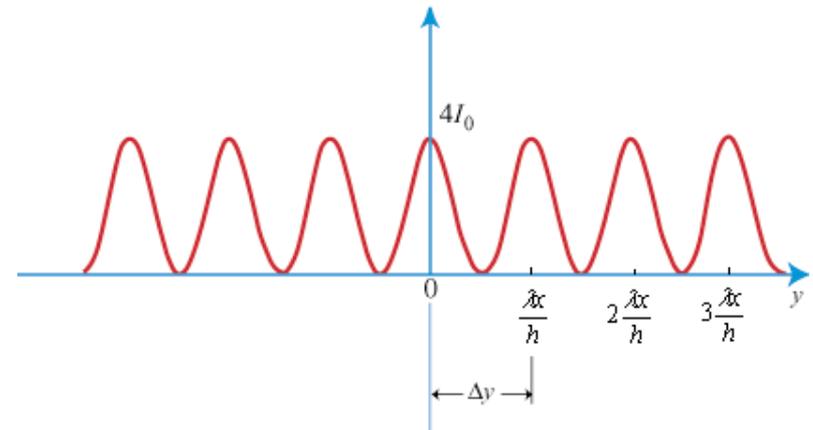
## Expérience de Young (1805)

- Une seule source :  $I_1 = I_2 = I_0$



$$I = 2I_0(1 + \cos \delta) = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

$$\delta = k(r_1 - r_2) = k \frac{yh}{x}$$



Ondes poly-chromatiques : Dispersion en fonction de  $\lambda$  (sauf pour  $y=0$ )

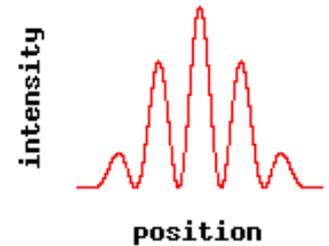
$$\leftarrow y_{\max} = \frac{n\lambda x}{h}$$

# Interféromètres à division de front d'onde

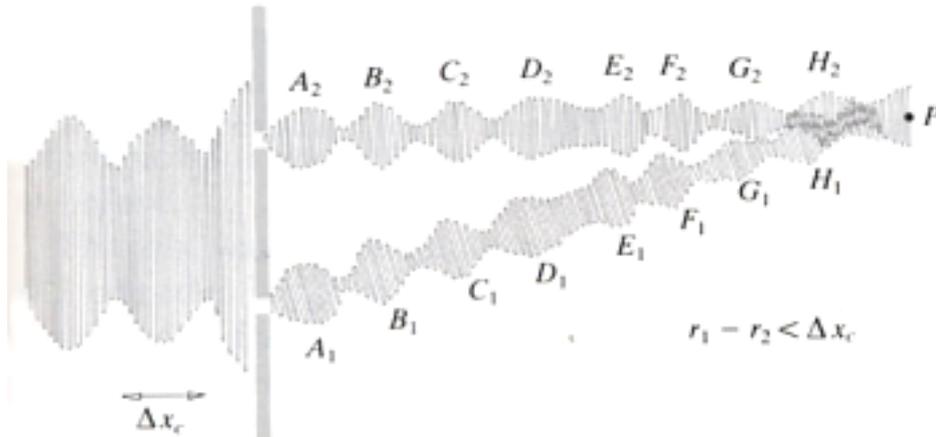
## Expérience de Young (suite)

- En pratique, longueur de cohérence de la source ( $\Delta x_c$ ) finie.

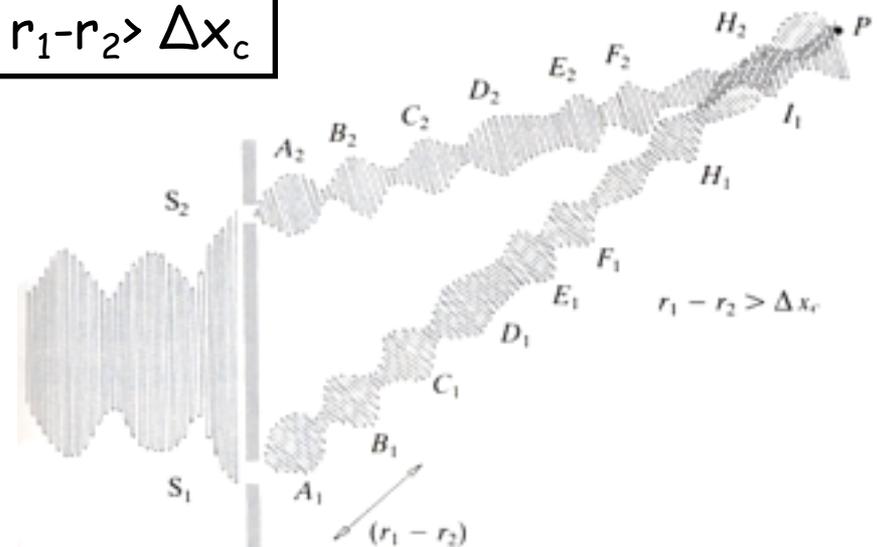
### Dégradation du contraste des franges



$$r_1 - r_2 < \Delta x_c$$

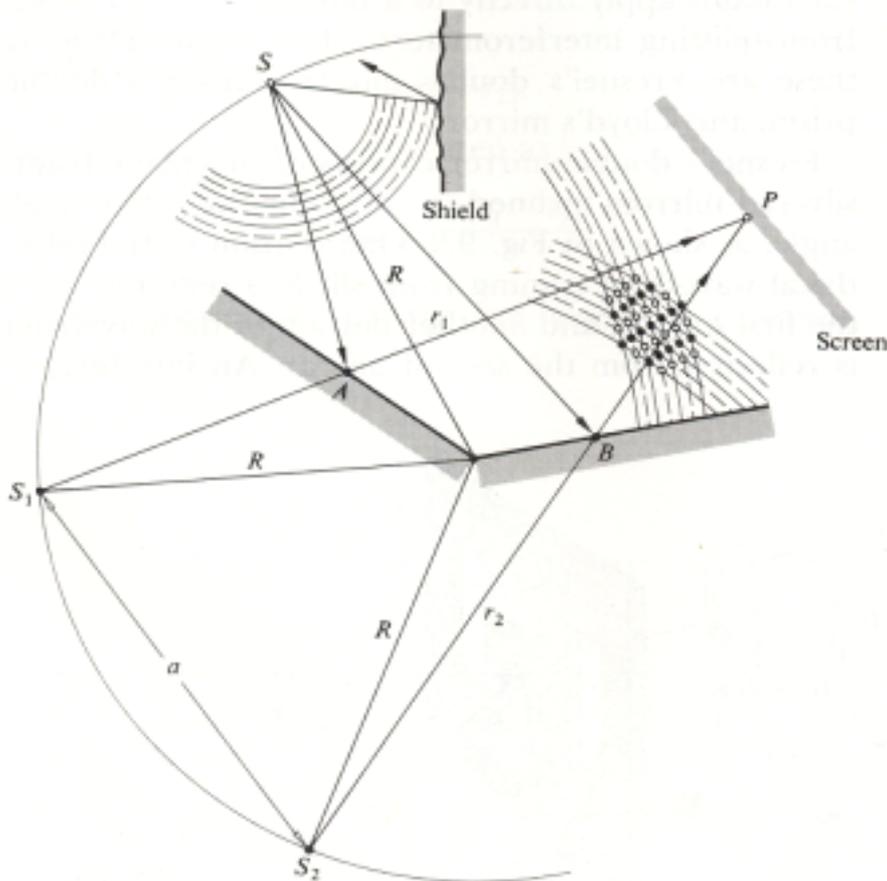


$$r_1 - r_2 > \Delta x_c$$

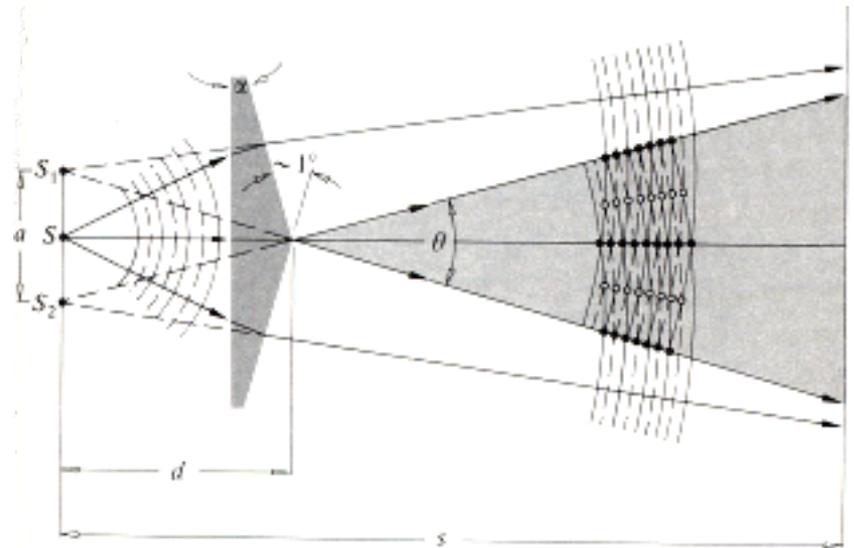


# Interféromètres à division de front d'onde

Double miroir de Fresnel



Double prisme de Fresnel



Analogue à l'expérience de Young.

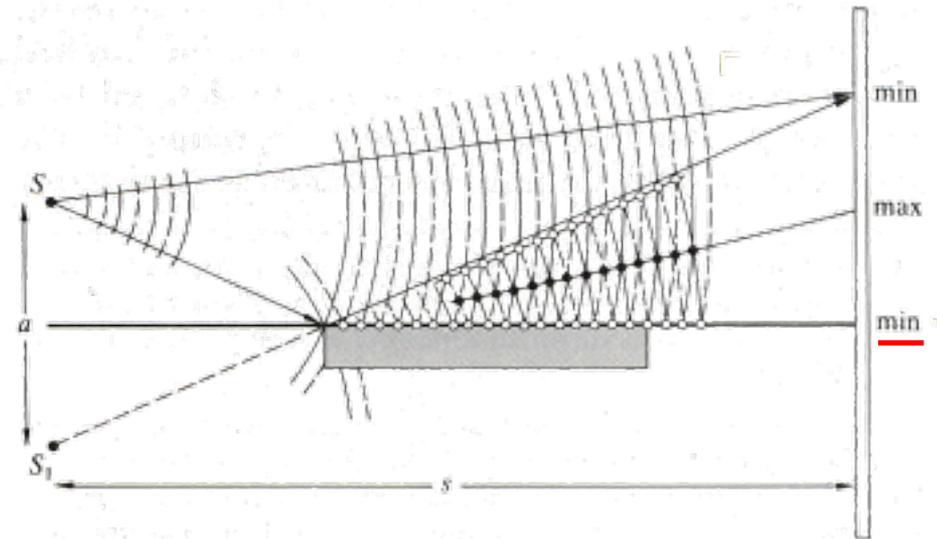
# Interféromètres à division de front d'onde

## Miroir de Llyod

- Ondes réfléchies :  $\Delta\text{phase} = 180^\circ$ .
- L'intensité  $I$  devient :

$$= k(r_1 - r_2) \pm \pi$$

$$I = 4I_0 \sin^2 \frac{hy}{x}$$



Les franges sont complémentaires de celles obtenues par l'expérience de Young.

# Interféromètres à division d'amplitude

## Film diélectrique

- Différence de chemin optique pour les 2 premiers rayons :

$$= n_f [(\overline{AB}) + (\overline{BC})] - n_1 (\overline{AD})$$

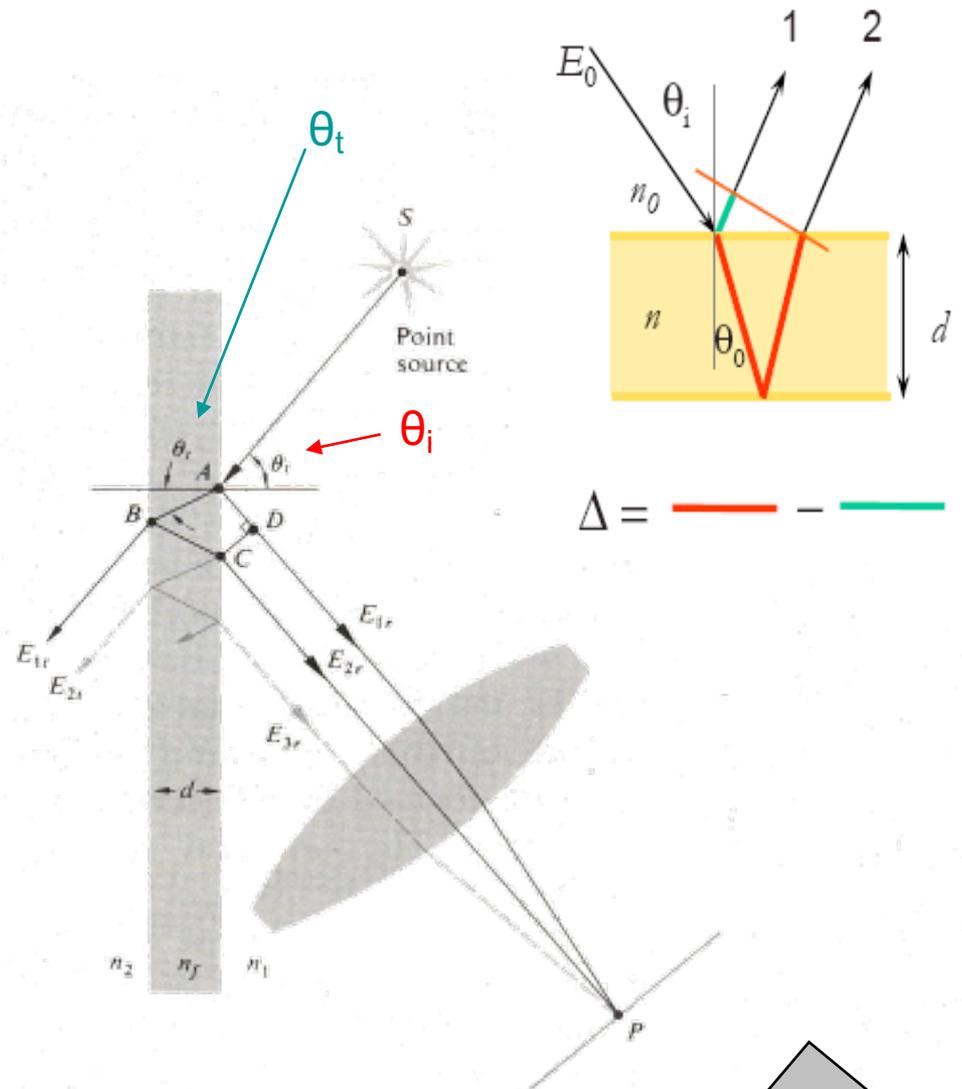
$$= 2n_f d \cos \theta_t$$

- Pour  $\theta_i < \theta_{\text{brewster}}$ , déphasage relatif de  $\pi$  :

$$= k \pm \frac{4 n_f}{0} d \cos \theta_t \pm$$

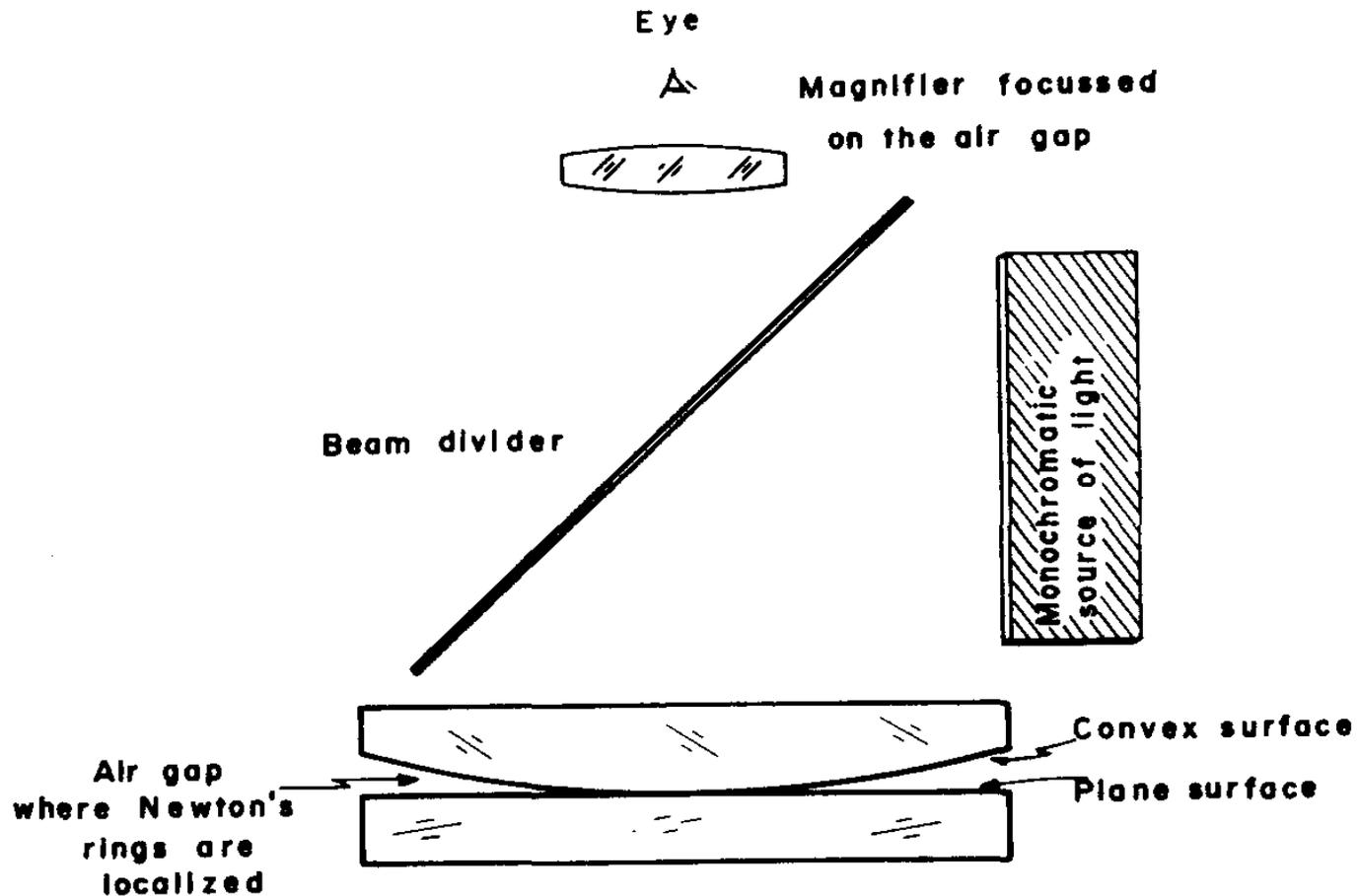
- MAXIMA :**

$$d \cos \theta_t = (2m + 1) \frac{\lambda}{4}$$



## Interféromètres à division d'amplitude

**Interféromètre de Newton** = tout arrangement de 2 surfaces en contact illuminé par de la lumière monochromatique.



# Interféromètres à division d'amplitude

## Interféromètre de Newton : exemple simple

- Hauteur de la tranche d'air à la distance  $x$  vaut  $\alpha x$  avec  $\alpha$  l'angle entre les surfaces.

- Différence de chemin optique =  $2\alpha x$ .

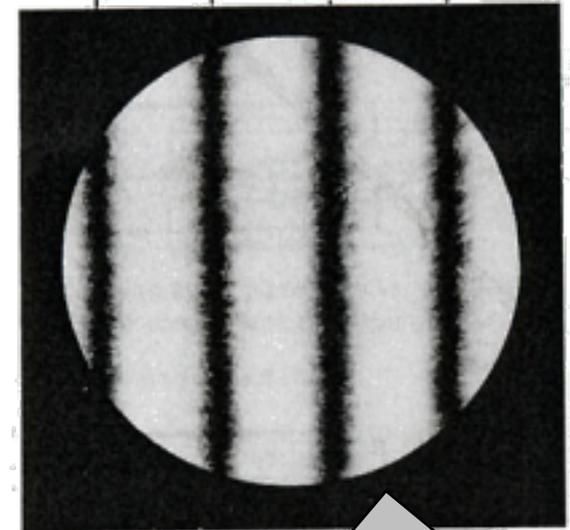
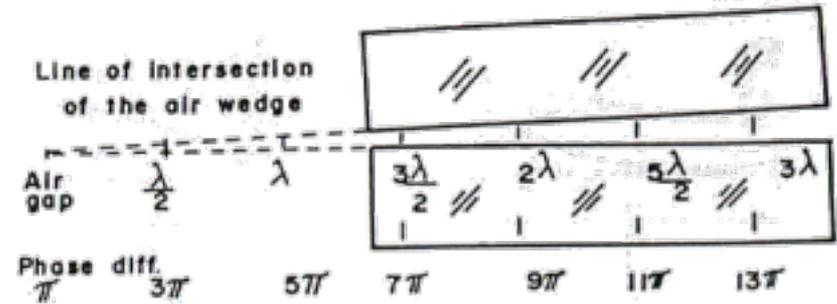
- Déphasage de  $\pi$  lors de la réflexion sur la surface du dessous.

- Donc, franges sombres sont représentées par (avec  $n$  entier positif) :

$$2x = n$$

- Distance entre les franges :

$$x = \lambda / 2$$



# Interféromètres à division d'amplitude

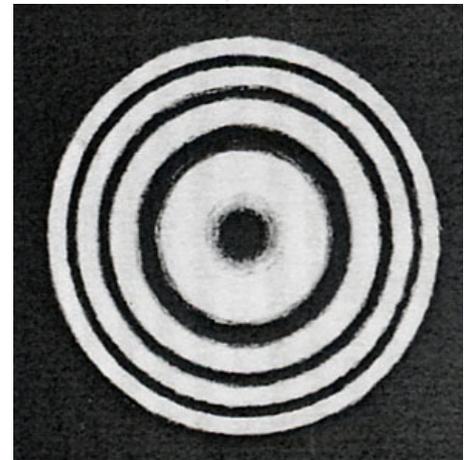
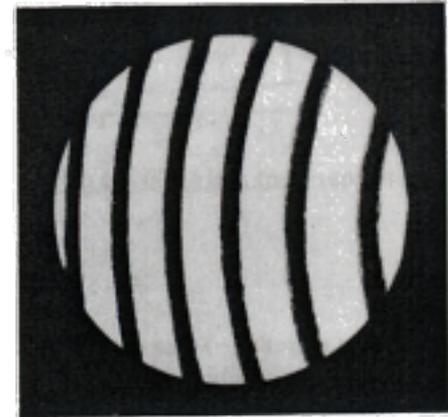
## Interféromètre de Newton : application

- Permet d'examiner la courbure d'une surface.
- Mettre en contact une surface plate avec une surface que l'on veut tester.
- Si surface test non plate, présence d'une tranche d'air et **apparition de franges spécifiques**.
- Si  $R$  est le rayon de courbure de la surface test, les franges sombres sont représentées par

$$\frac{x^2}{R} = n$$

- Distance de la  $n$ -ième frange à partir du centre :

$$x_n = \sqrt{nR}$$



# Interféromètres à division d'amplitude

## Anneaux d'Haidinger ou franges d'égale inclinaison

- lame d'épaisseur constante éclairée par une source étendue.
- Répartition d'intensité donnée par

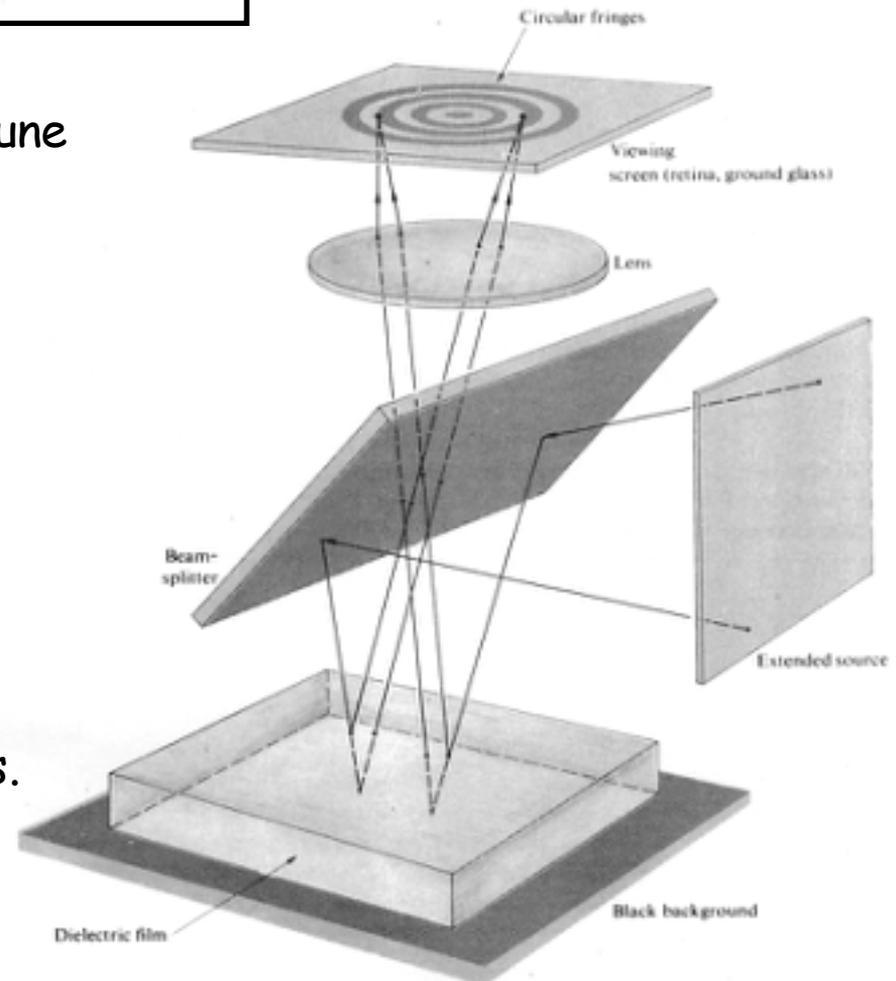
$$I = I_1 + I_2 + 2(e_1 e_2) \{I_1 I_2\}^{1/2} \cos$$

avec

$$= \frac{4 n_f}{0} d \cos \theta_t \pm$$

- Applications

- ✓ Traitement antireflet des surfaces.
- ✓ Mesure des indices.



# Applications aux films multicouches

## Coatings antireflection

- Coefficient de réflexion donné par\* :

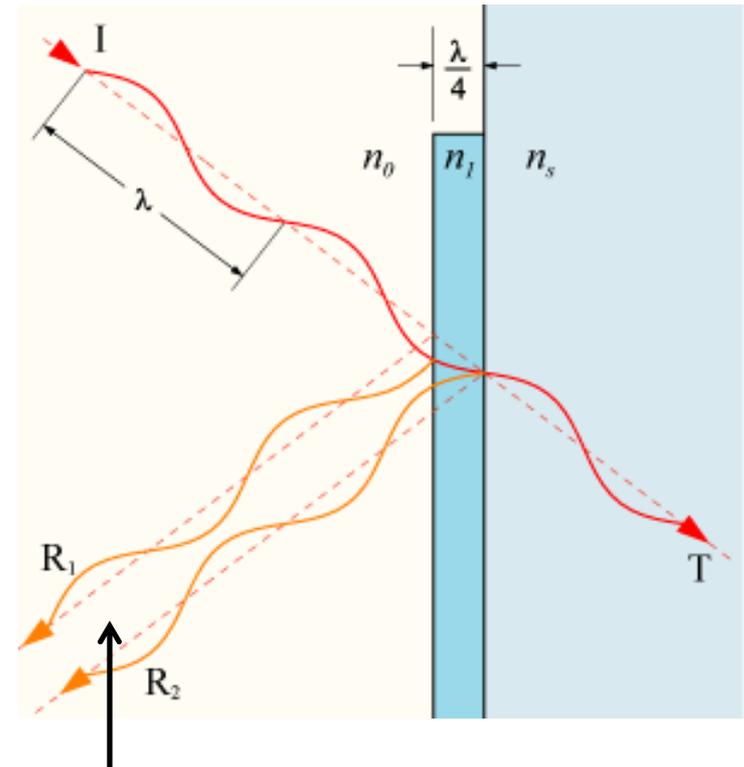
$$R = \frac{n_1(n_0 - n_s)^2 \cos^2 k_0 h + (n_0 n_s - n_1^2)^2 \sin^2 k_0 h}{n_1(n_0 + n_s)^2 \cos^2 k_0 h + (n_0 n_s + n_1^2)^2 \sin^2 k_0 h}$$

avec  $h$  l'épaisseur optique du coating.

- Si  $h = \lambda_0/4$  alors  $R$  devient :

$$R = \frac{(n_0 n_s - n_1^2)^2}{(n_0 n_s + n_1^2)^2}$$

- $R$  devient nul pour  $n_1 = \sqrt{n_0 n_s}$
- Exemple : pour  $n_0 \approx 1.0$  (air) et  $n_s \approx 1.5$  (verre), l'indice optimal est  $n_1 \approx 1.225$ .



Interférence destructive entre  $R_1$  et  $R_2$

\* Coefficient pour une incidence normale mais représentatif dans de nombreux cas.

# Interféromètres à division d'amplitude

## Franges de Fizeau ou franges d'égal épaisseur

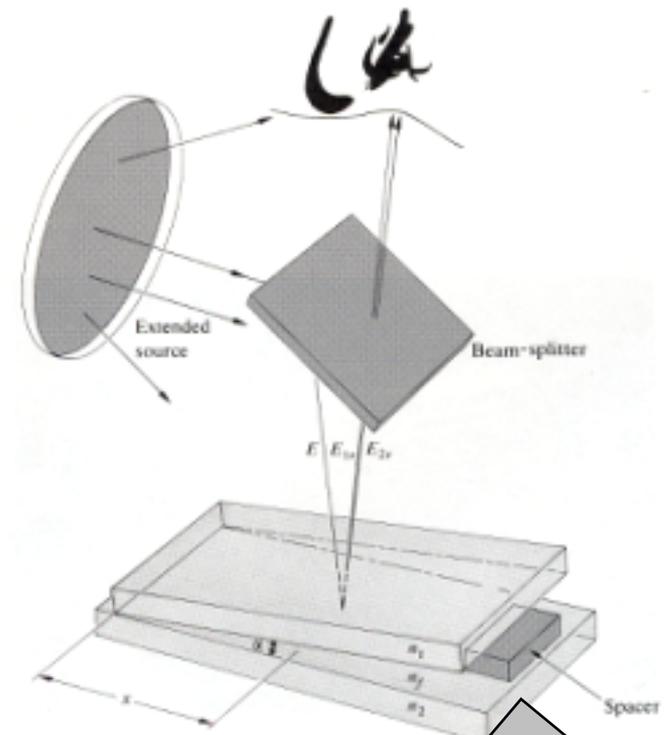
- Paramètre dominant : épaisseur optique ( $n_f \cdot d$ ) plutôt que  $\theta_i$ .
- Chaque frange est le lieu des points pour lesquels l'épaisseur optique est la même.
- Utilité : **permet d'examiner des surfaces.**
- Pour des films non uniformes, les franges sont appelées « **franges de Fizeau** ».
- Maxima d'interférence pour (cf. slide 10) :

$$d \cos \theta_t = (2m + 1) \frac{\lambda}{4}$$

- Pour  $\theta_i$  petit et avec  $d = x \alpha$ , on a

$$x_m = \left( \frac{m + 1/2}{2} \right) \lambda$$

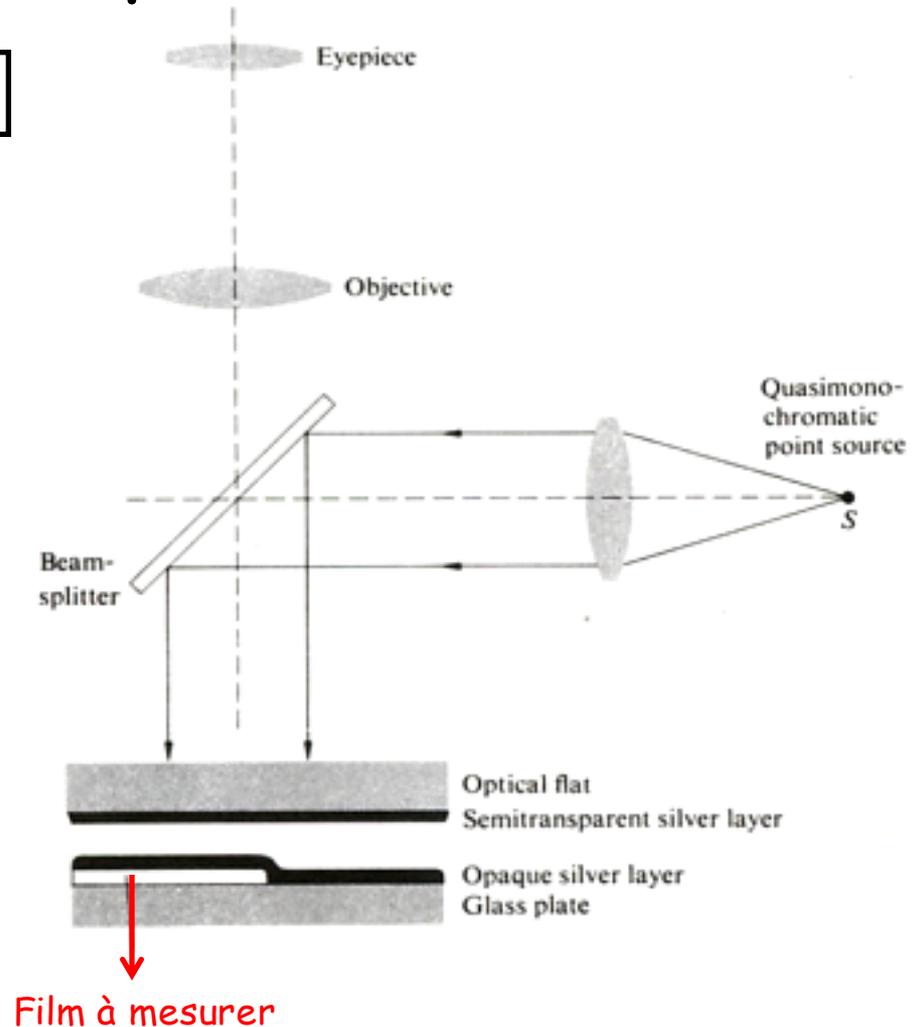
$$x = \lambda / 2$$



## Interféromètres à division d'amplitude

Franges de Fizeau : mesure d'épaisseur

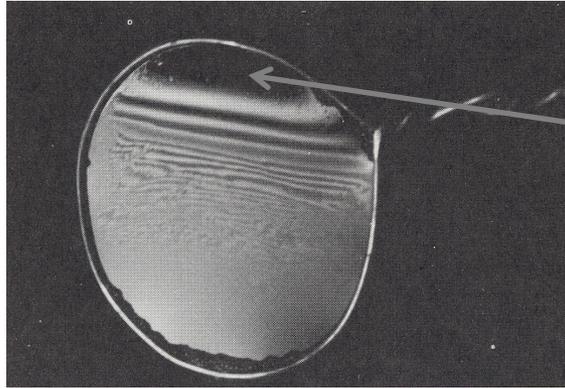
- Le film à mesurer est recouvert d'une couche opaque d'argent d'une épaisseur typique de 70 nm.
- Combiné à la couche d'argent opposée, cela permet de former des franges de Fizeau.
- Permet de mesurer des épaisseurs allant jusqu'à 2nm.



# Interféromètres à division d'amplitude

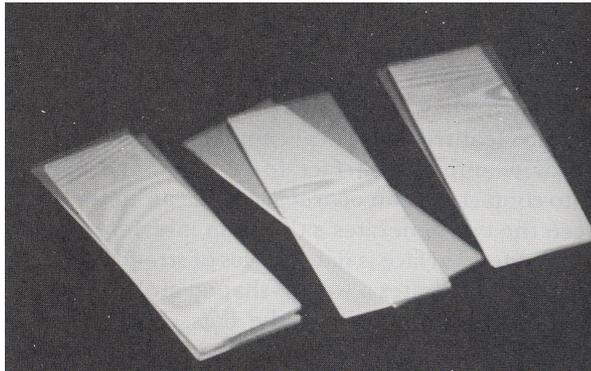
## Franges d'égale épaisseur : exemples

- Film de savon tenu verticalement

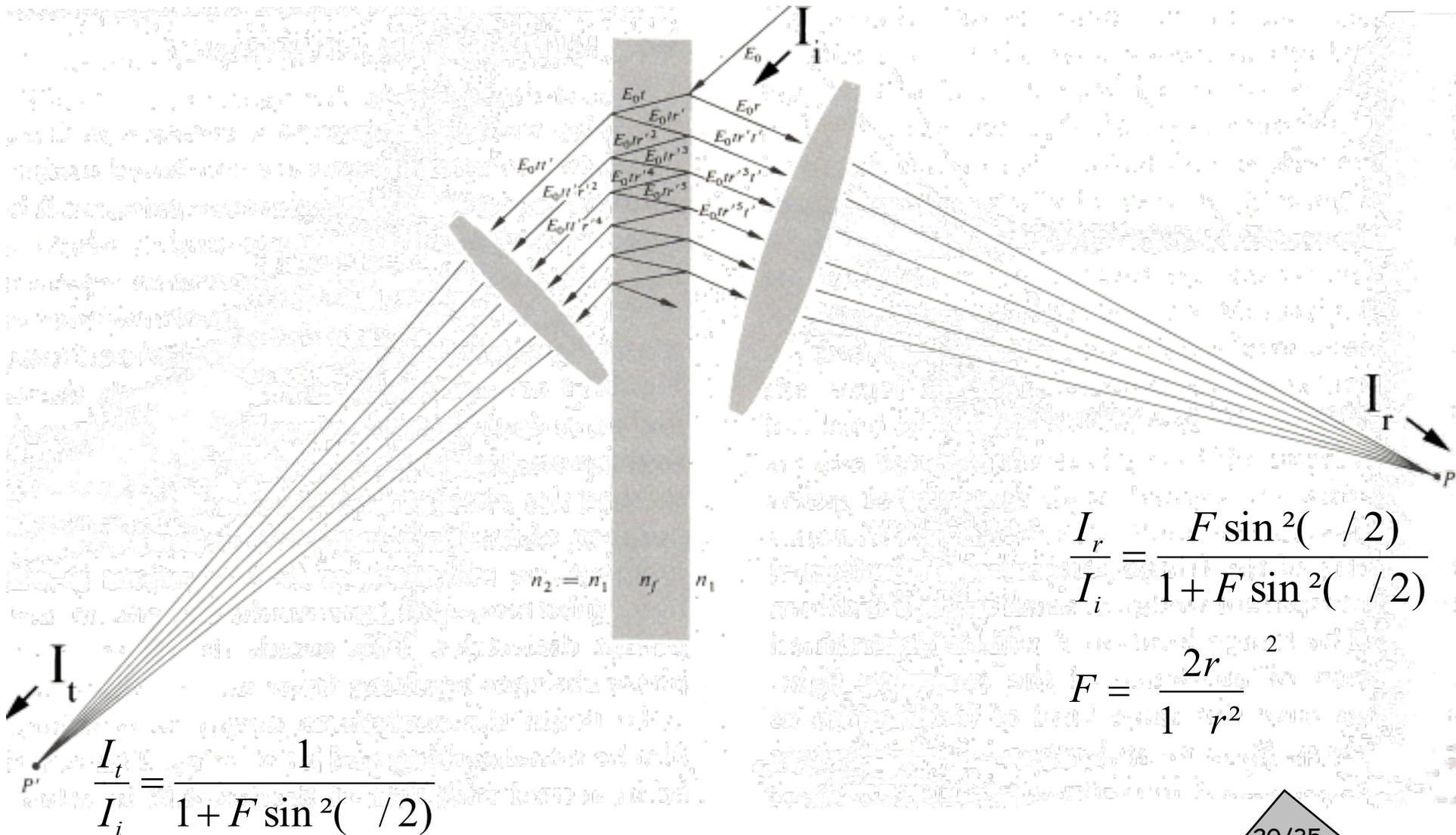


Région sombre du dessus car épaisseur inférieure à  $\lambda_f/4$ .

- Film d'air entre 2 plaques de microscope.



## Interférence de plusieurs rayons



## Interférence de plusieurs rayons

- Rapports des intensités réfléchi et transmise par rapport à l'incidente :

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{F \sin^2(\delta/2)}{1 + F \sin^2(\delta/2)} \quad \frac{I_t}{I_i} = \frac{1}{1 + F \sin^2(\delta/2)}$$

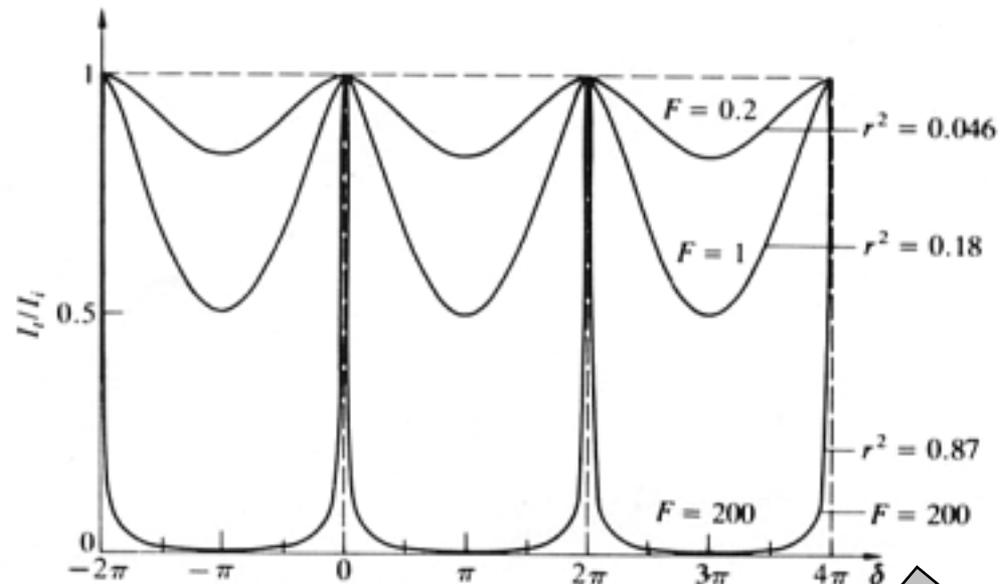
avec •  $\delta$  l'écart en phase provenant de la différence de chemin optique entre rayons adjacents.

- F est le facteur de finesse donné par :

$$F = \frac{2r}{1 - r^2}$$

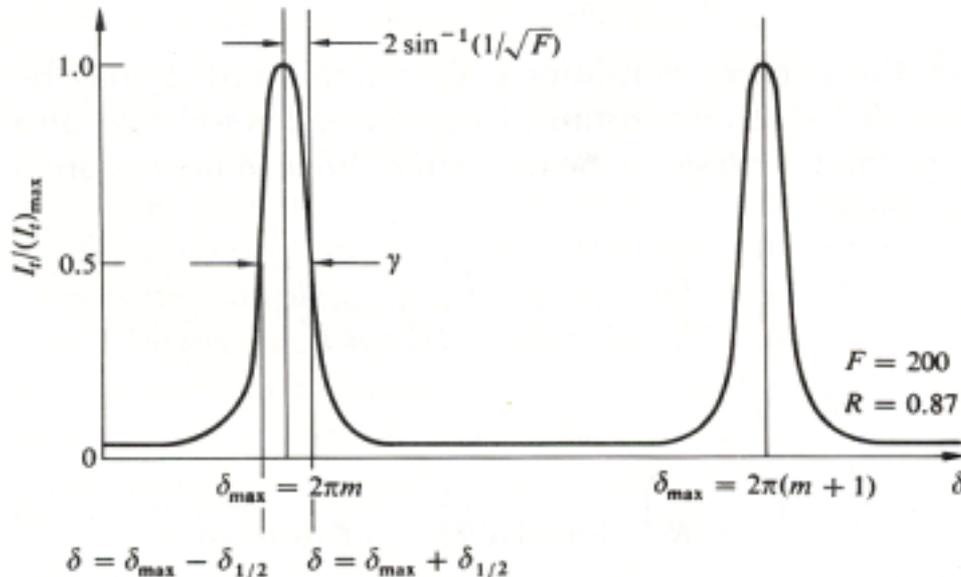
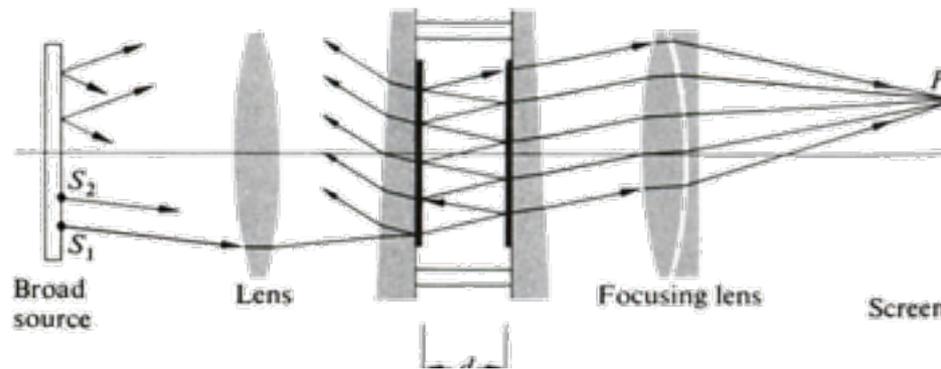
Fonction d'Airy

$$A(\delta) = \frac{1}{1 + F \sin^2(\delta/2)}$$



# Interférence de plusieurs rayons

## Interféromètre de Fabry-Perot



- Largeur des franges à mi-hauteur donnée par  $\gamma$  avec :

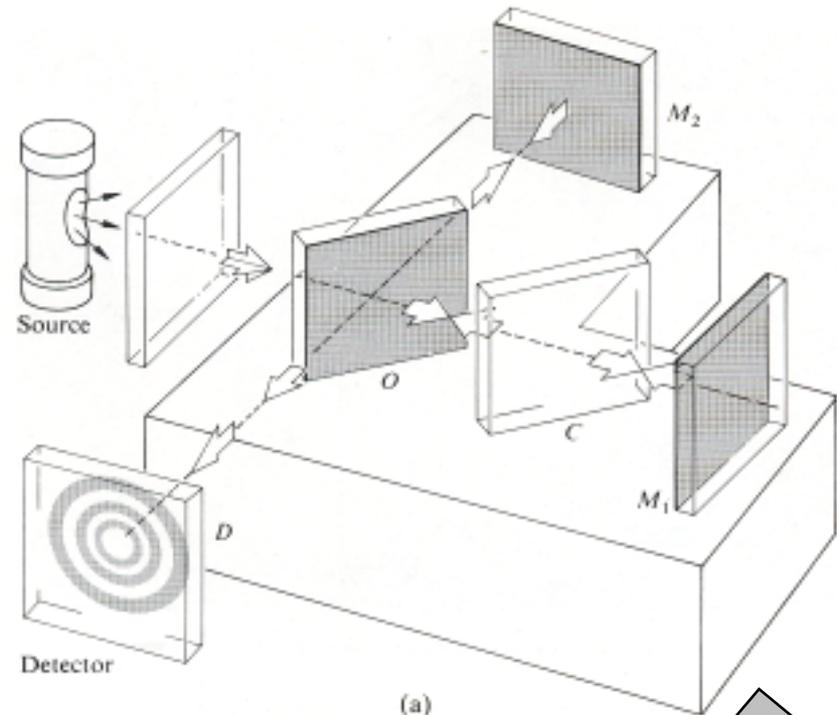
$$\gamma_{1/2} = 2 \sin^{-1}(1/\sqrt{F})$$

$$F = \frac{2r}{1 - r^2}$$

# Interféromètres à division d'amplitude

## Interféromètres avec miroirs

- Le rayon incident est séparé en 2 au séparateur de rayons  $O$ .
- Les 2 rayons sont réfléchis aux miroirs finaux  $M_1$  et  $M_2$ .
- Les rayons réfléchis se recombinent en  $O$  et des franges apparaissent en  $D$ .
- Ajout d'un compensateur :
  - ✓ Permet d'adapter les chemins optiques.
  - ✓ Minimise les effets de la dispersion.

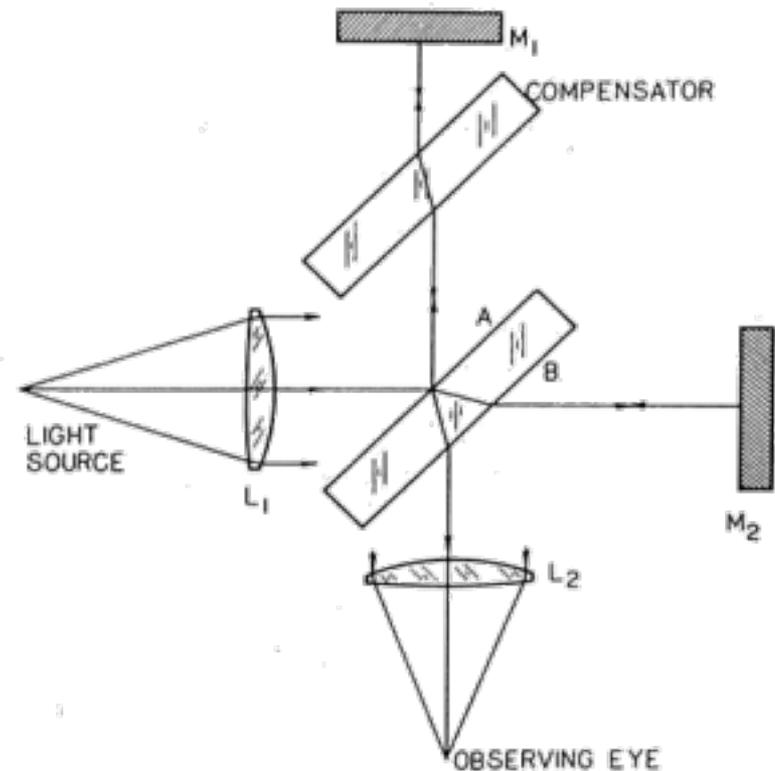
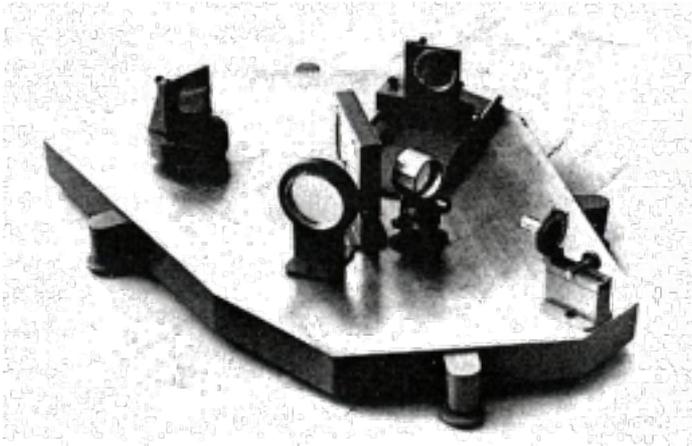


**INTERFEROMETRE DE MICHELSON**

## Interféromètres à division d'amplitude

Interféromètre de Twyman-Green = modification de l'interféromètre de Michelson pour tester des composants optiques.

- Choix du coating important pour :
  - ✓ Coefficient de réflexion de la face A approprié.
  - ✓ Face B ne réfléchit pas la lumière.
- Si composants parfaits, la différence de phase entre les rayons recombinaés est constante sur tout le champs de vue : **pas de franges**.

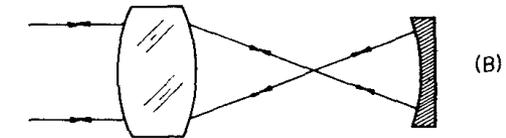
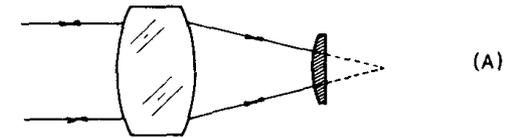


# Interféromètres à division d'amplitude

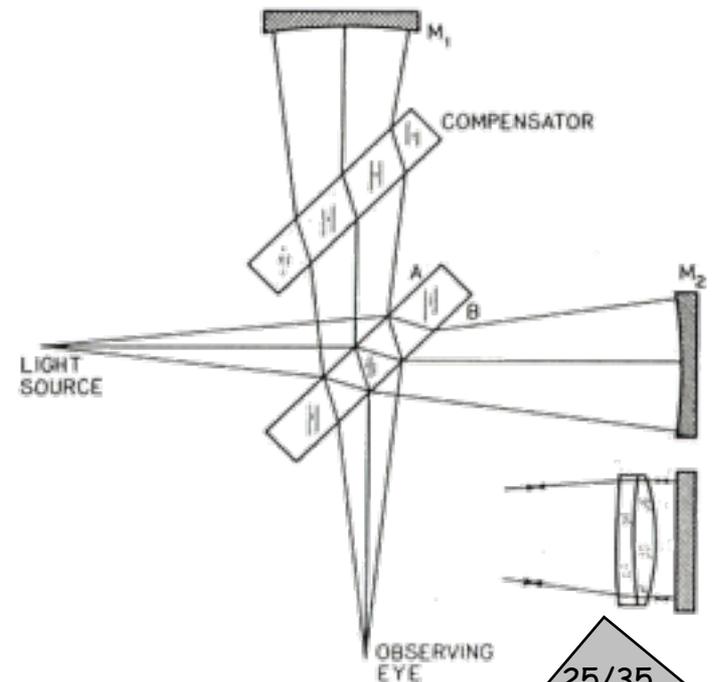
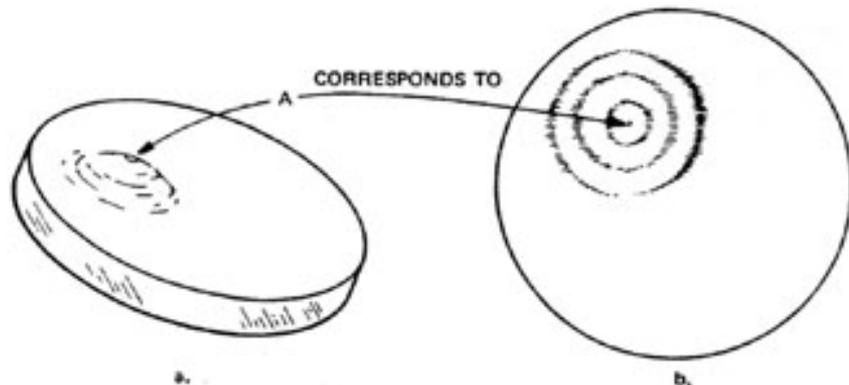
## Interféromètre de Twyman-Green

- Permet de tester des lentilles

- ✓ un des miroirs de l'interféromètre est remplacé par :
- ✓ le foyer de la lentille coïncide avec le centre de courbure du miroir (pour avoir la réflexion des rayons selon la même direction).
- ✓ **apparition de franges** si aberration.



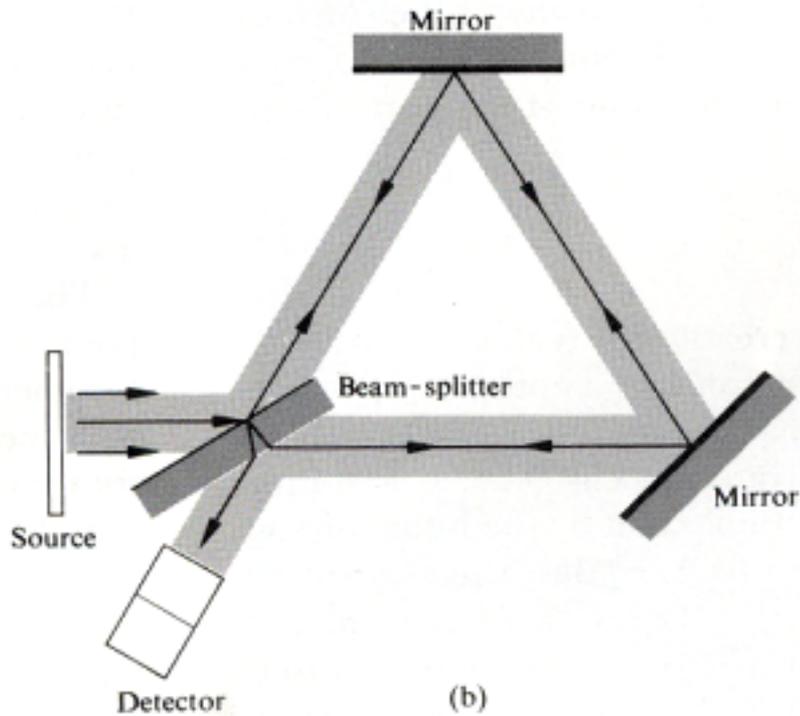
- Permet de tester des miroirs



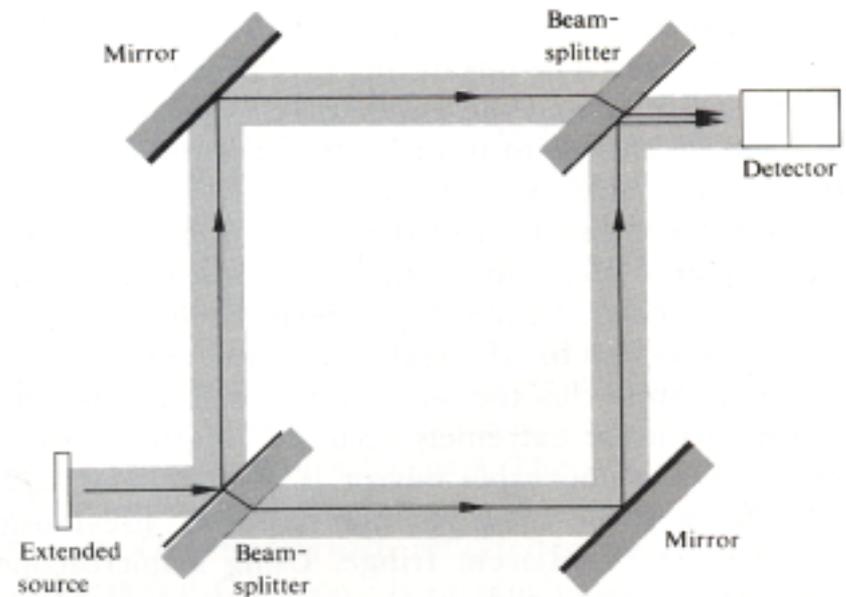
# Interféromètres à division d'amplitude

## Interféromètres avec miroirs

- Autres exemples



**INTERFEROMETRE SAGNAC**



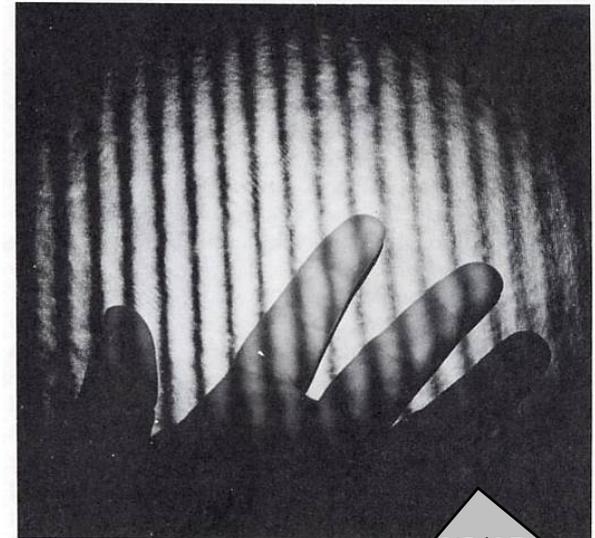
**Figure 9.27** The Mach-Zehnder interferometer.

**INTERFEROMETRE DE MACH-ZEHNDER**

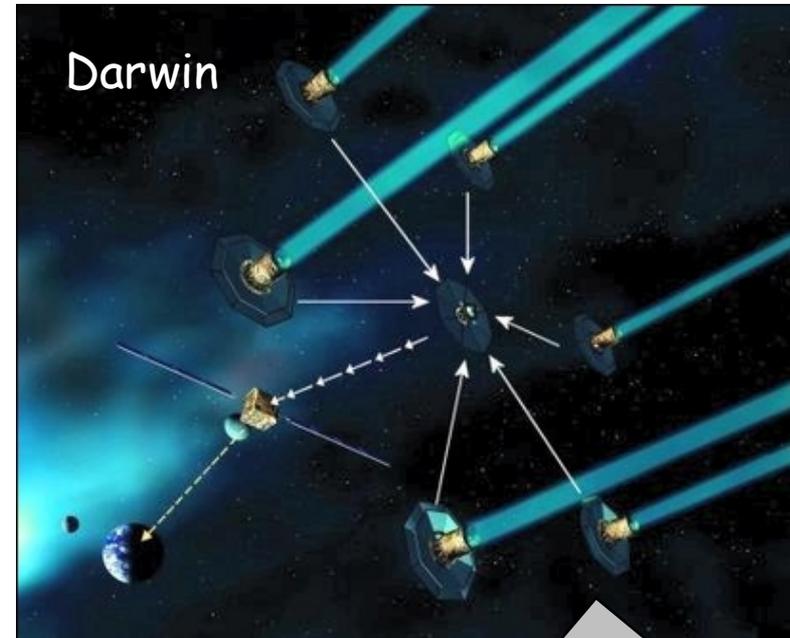
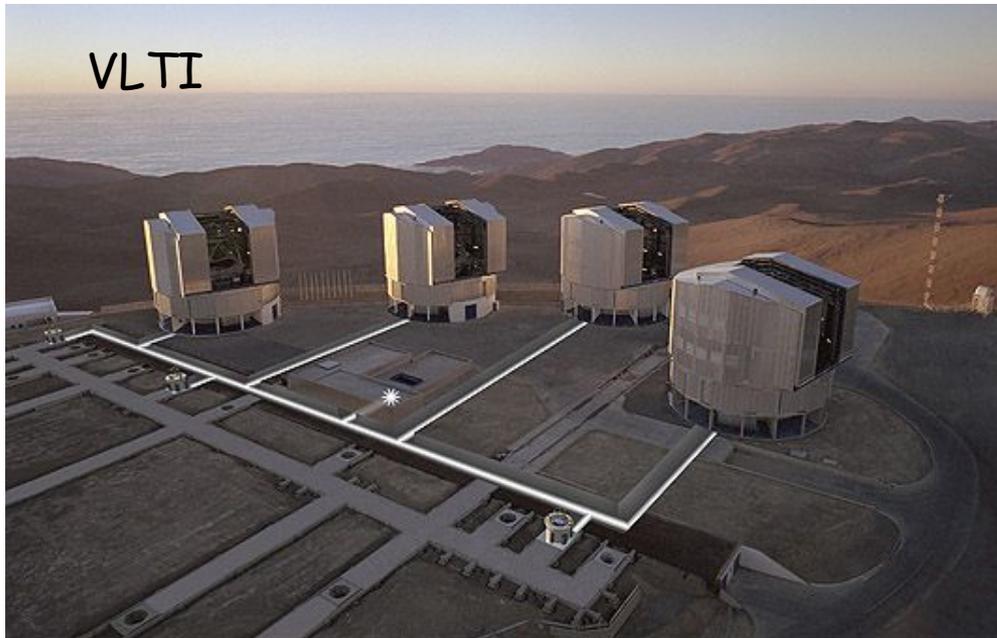
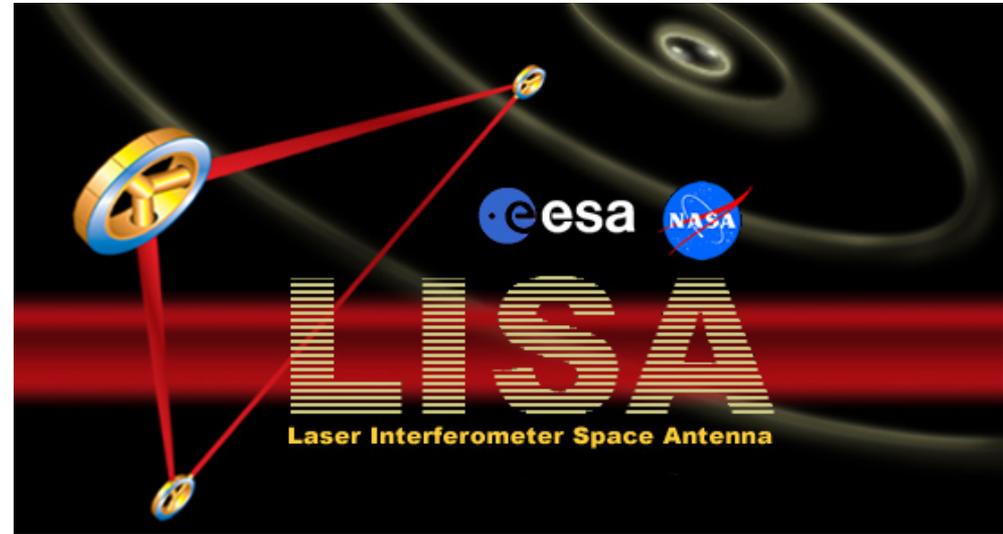
## Types et localisation des franges

- Types de franges
  1. Réelles ou virtuelles : **Réelles** si les franges peuvent être vues sur un écran sans système de focalisation additionnel. Les rayons convergent.
  2. Localisées ou non localisées :
    - Les franges **non localisées** sont réelles et existent partout dans l'espace considéré (expérience de Young par exemple).
    - Les franges localisées sont observables seulement sur une surface particulière.

Franges de Michelson réelles



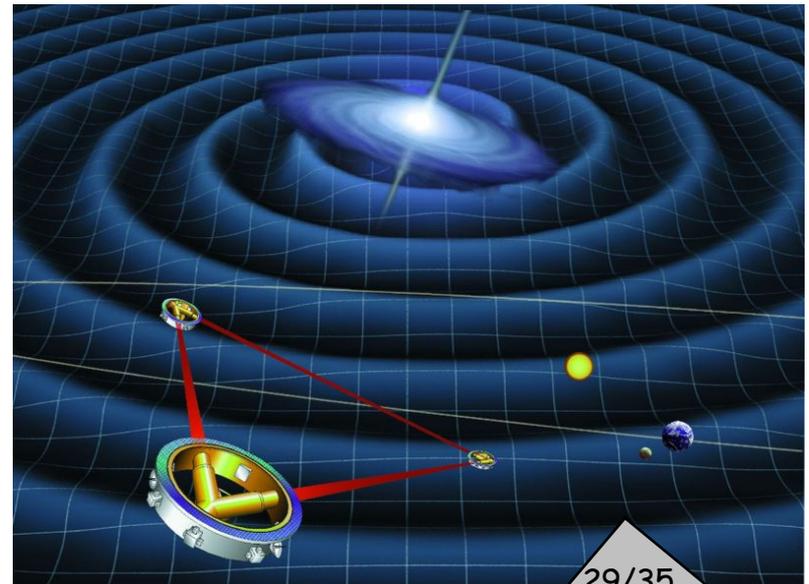
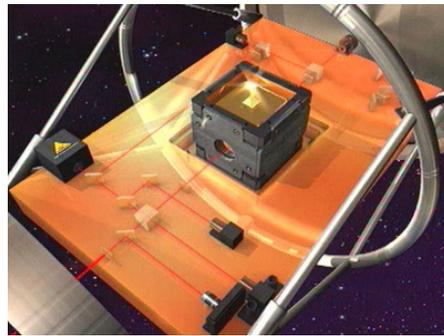
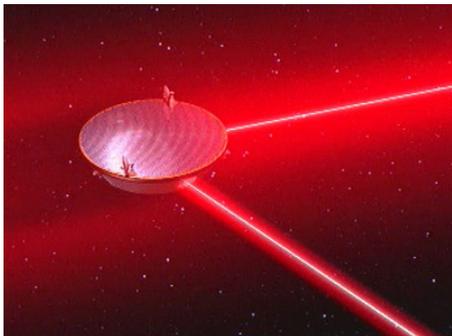
# Applications de interférométrie en astrophysique



# The Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

## Description

- 3 télescopes formant un triangle équilatéral (5 millions de km de coté).
- Analogue à un **interféromètre de Michelson** (+ 1 bras supp. pour la redondance).
- Objectif : détecter les ondes gravitationnelles (prédiction de la relativité générale).
- Ondes gravitationnelles induisent un changement de la longueur des bras de LISA de l'ordre du pico mètre.
- Système de détection **heterodyne** (le signal reçu à un télescope est mélangé avec le signal propre du télescope).



# The Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

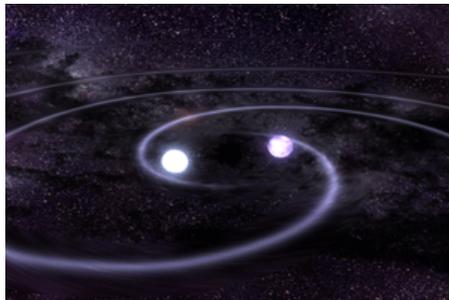
## Mode de fonctionnement (1/2)

- 2 mécanismes modulent la différence de chemin optique entre les faisceaux lasers de deux bras distincts :
  - ✓ le mouvement orbital (période de l'ordre d'un an et jusqu'à 100000 km).
  - ✓ les ondes gravitationnelles (LISA optimisé pour les fréquences de  $10^{-4}$  à 1 Hz).



Étude dans le domaine fréquentiel

- Les faisceaux de deux bras distincts interfèrent et :
  - ✓ La fréquence de modulation donne la fréquence des ondes gravitationnelles.
  - ✓ L' intensité de modulation indique l'amplitude des ondes gravitationnelles.



Informations sur la source des ondes gravitationnelles.

# The Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

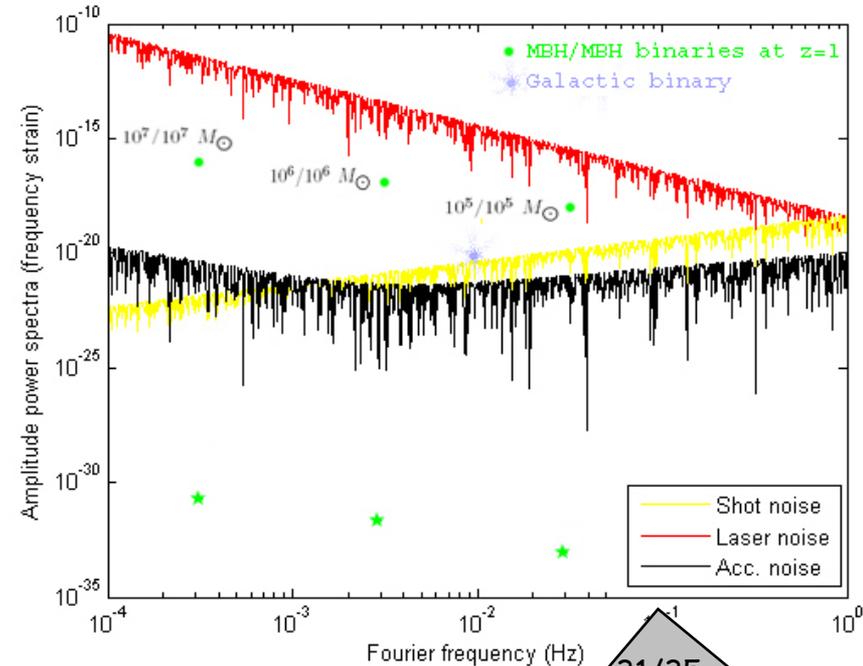
## Mode de fonctionnement (2/2)

- Fréquence des lasers stabilisée par l'utilisation de cavités de Fabry Perot.
- En pratique, la longueur des cavités varie ( $\Delta T$ ) et produit une instabilité de la fréquence (donc de la phase) des lasers.
- Cette variation de phase imite une variation de longueur des bras et **masque l'impact des ondes gravitationnelles**.



### • Remède :

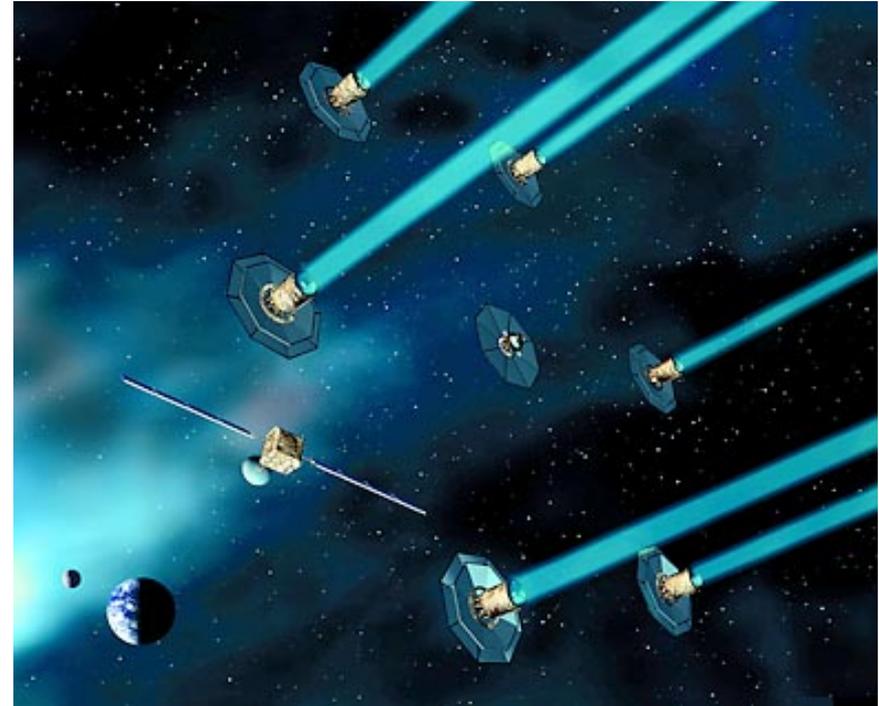
- ✓ Faisceau de bras voisins émis par le même laser (donc même instabilité).
- ✓ Au retour des faisceaux, les soustraire pour annuler l'instabilité.



## Darwin : à la recherche d'exo-planètes

### Description

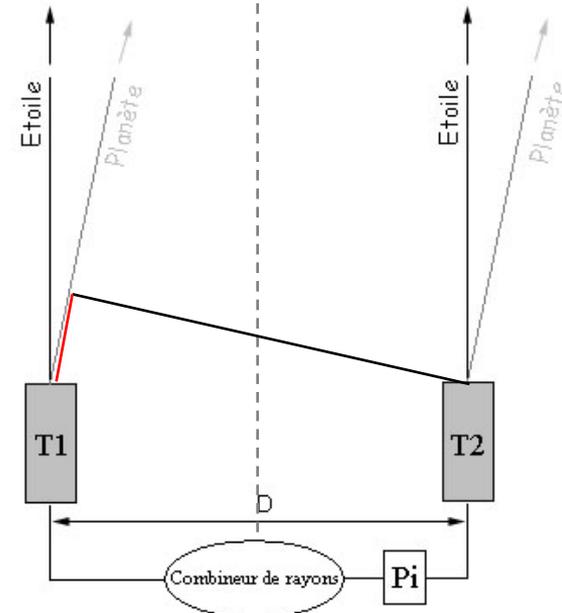
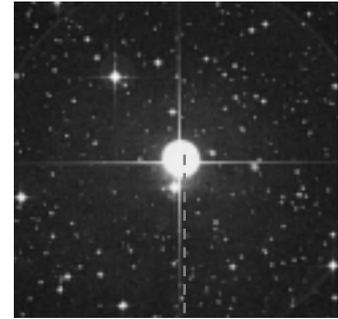
- Projet d'interféromètre spatial de l'ESA (lancement prévu au-delà 2015).
- Comporte plusieurs télescopes en orbite à 1.5 millions de km de la Terre.
- Objectifs de la mission
  - ✓ Détecter et analyser des planètes de type Terre.
  - ✓ Détecter l'atmosphère de ces planètes et rechercher des bio signatures.
- Détection difficile !
  - ✓ Contraste important étoile/planète ( $10^7$  dans l'infra rouge et  $10^{10}$  dans le visible).
  - ✓ Faible séparation angulaire (0.1" pour un système Terre-Soleil situé à 10 pc).



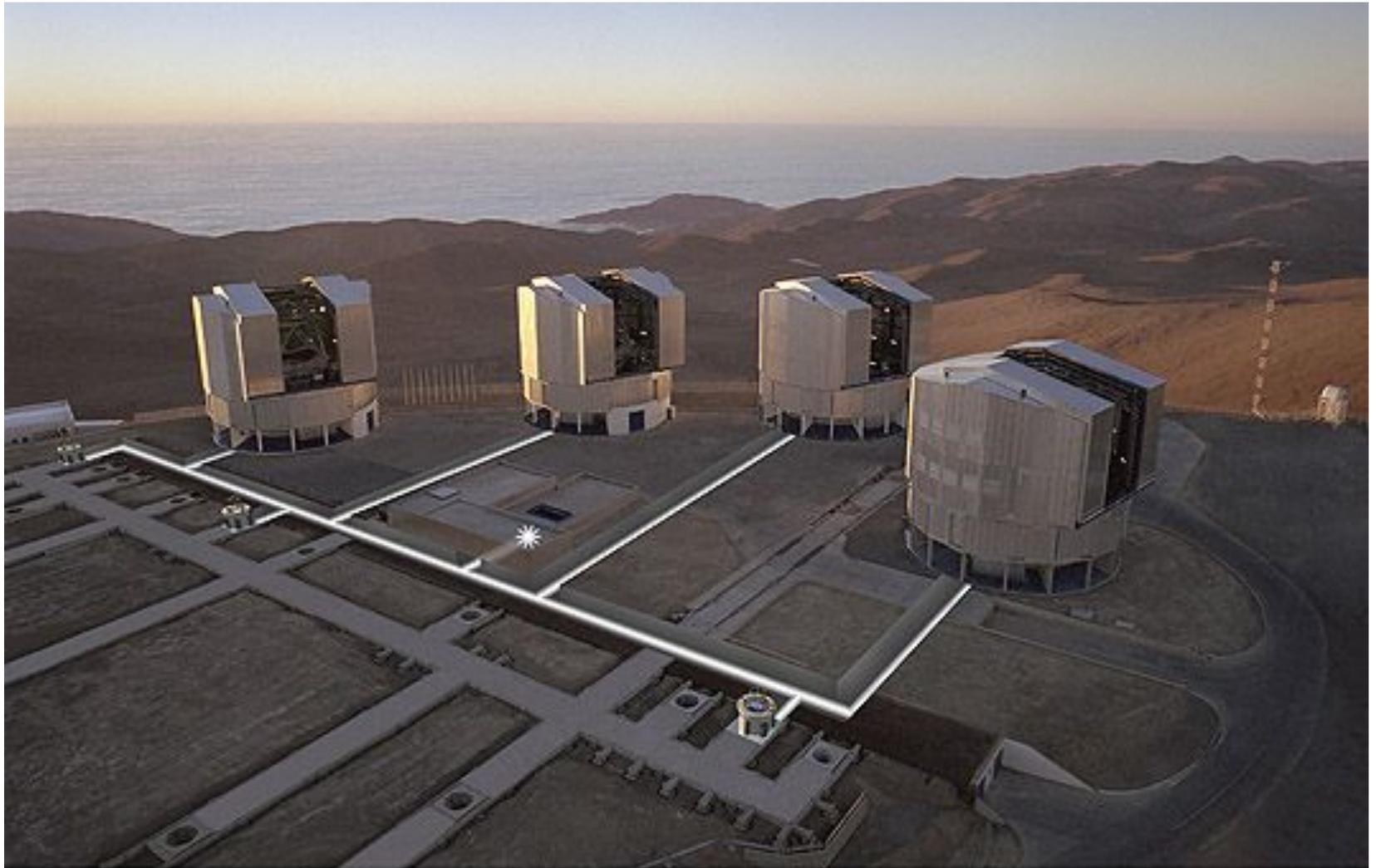
# Darwin : à la recherche d'exo-planètes

## Mode de fonctionnement

- Aligner l'interféromètre de manière à avoir l'étoile sur l'axe optique.
- Les rayons en provenance de l'étoile arrivent avec la même phase sur chaque télescope.
- Décaler achromatiquement de  $\pi$  un des rayons de manière à faire disparaître la lumière de l'étoile (interférence destructive).
- Les rayons en provenance d'une planète n'arrivent pas en phase aux télescopes et n'interfèrent pas destructivement (cf. — ).



# The Very Large Telescope Interferometer (VLTI)



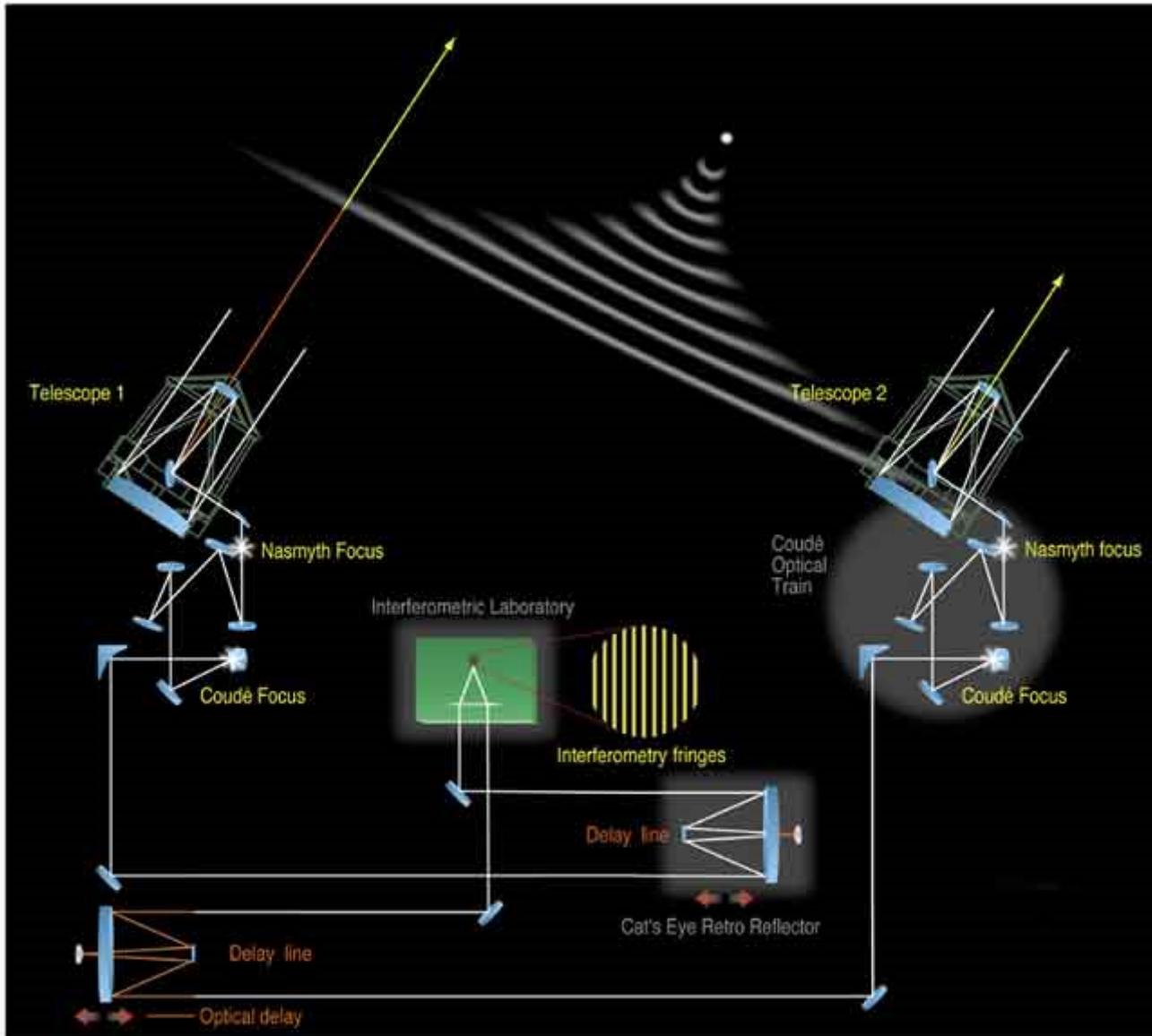
nom	localisation	N	B m	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )
Grand interféromètre à 2 Télescopes (GI2T)	Côte d'Azur France	2	70	0.40–0.80 > 1.2
<i>Infrared Spatial Interferometer (ISI)</i>	Mont Wilson, USA	3	30	10
<i>Cambridge Optical Aperture Synthesis Telescope (COAST)</i>	Cambridge, Royaume-Uni	5	65	0.40–0.95 1.2–1.8
<i>Sydney University Stellar Interferometer (SUSI)</i>	Narrabri, Australie	2	640	0.40–0.9
<i>Infrared Optical Telescope Array (IOTA)</i>	Mont Hopkins, USA	3	38	1.2–2.2
<i>Navy Prototype Optical Interferometer (NPOI)</i>	Anderson Mesa, USA	6	435	0.45–0.85
<i>Palomar Testbed Interferometer (PTI)</i>	Mont Palomar, USA	2	110	1.5–2.4
<i>Mitaka optical-Infrared Array (MIRA-I)</i>	Tokyo, Japon	2	4	0.8
<i>Center for High Angular Resolution Astronomy Array (CHARA-Array)</i>	Mont Wilson, USA	6	350	0.45–2.4
<i>Keck Interferometer (KI)</i>	Mauna Kea, USA	2	140	2.2–10
<i>Very Large Telescope Interferometer (VLTI)</i>	Cerro Paranal, Chili	3	200	1.2–13
<i>Large Binocular Telescope (LBT)</i>	Mont Graham, USA	2	23	0.4–400

*Interféromètres optiques à longue base en service en 2005. Sont donnés le nom, la localisation, le nombre de télescopes N, la ligne de base maximale B et la longueur d'onde  $\lambda$ .*

## Applications courantes

- En radio (phénomène de "fading").
- Interférences quantiques
  - ✓ Dualité onde particule :  $\lambda = \frac{h}{p}$  avec  $p$ , la quantité de mouvement de la particule.
  - ✓ Interférences observées avec des électrons, des neutrons, des molécules...
- Holographie

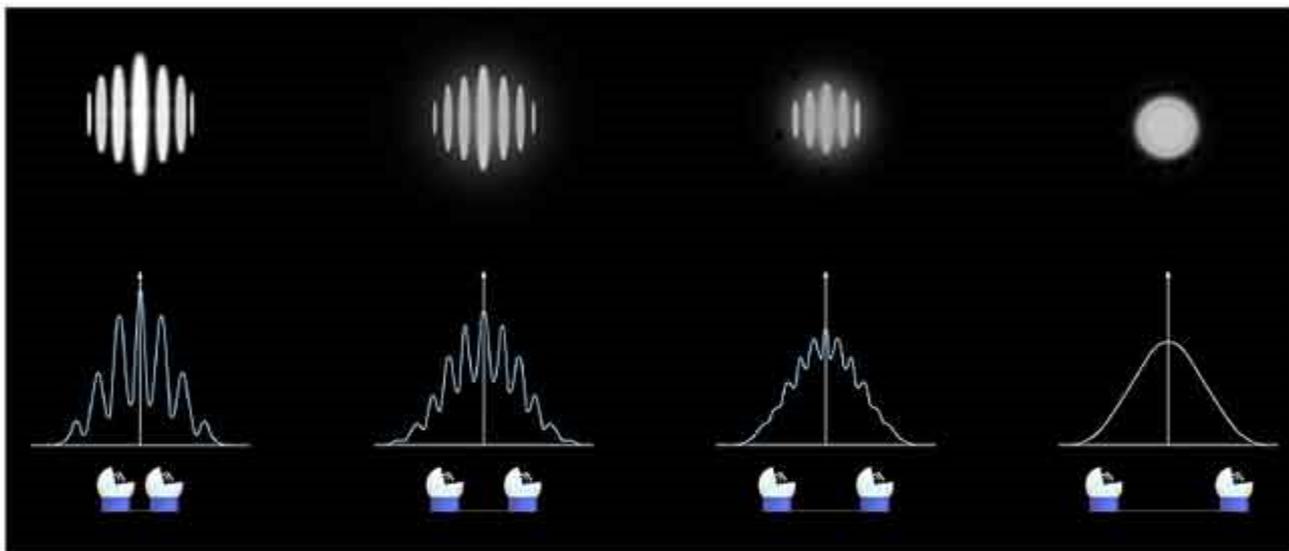




Overview of the VLT Interferometer







Interferometric Fringes at Different Telescope Baselines  
(Simulation)

ESO PR Photo 10e/01 (18 March 2001)

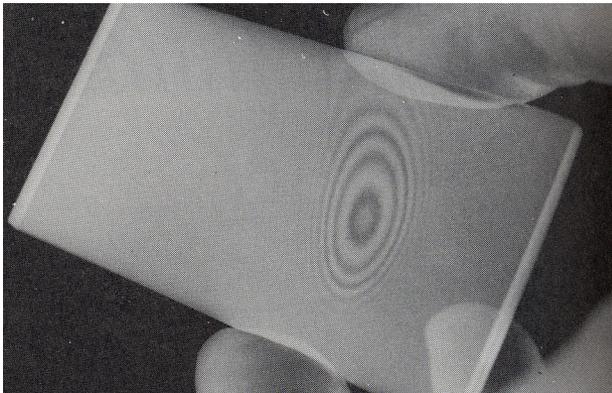
© European Southern Observatory



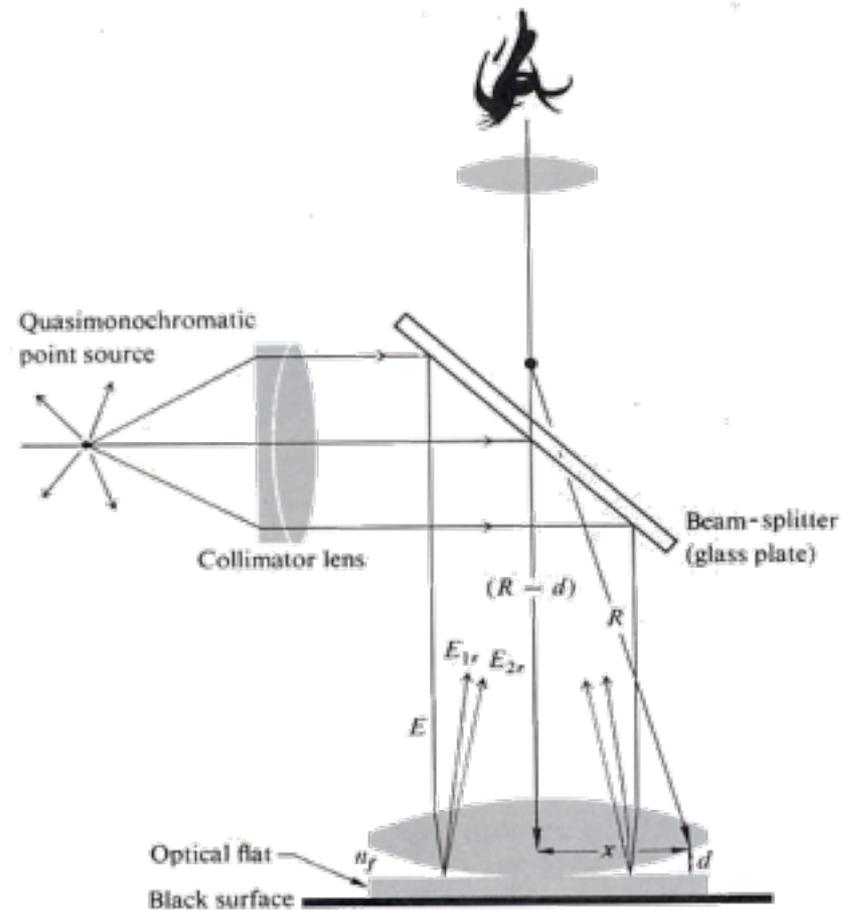
# Interféromètres à division d'amplitude

Franges d'égale épaisseur : anneaux de Newton

- complémentarité avec Haidinger refaire!!

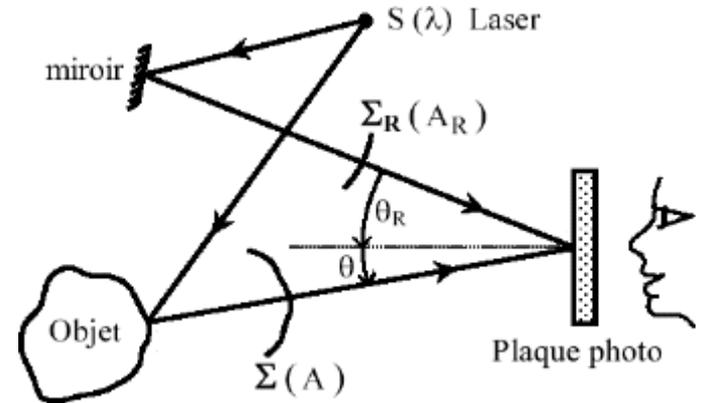


anneaux de Newton



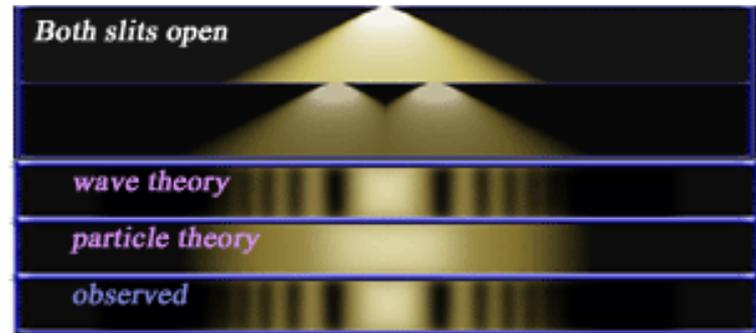
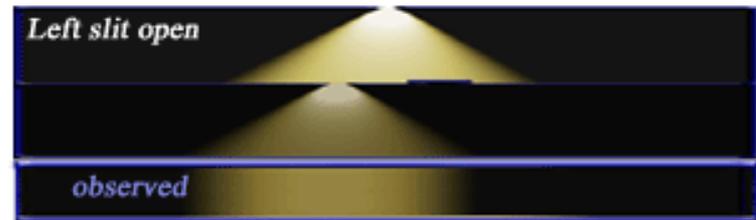
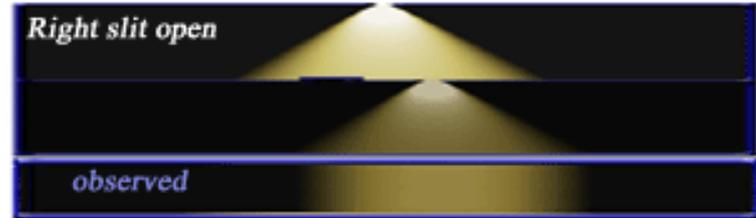
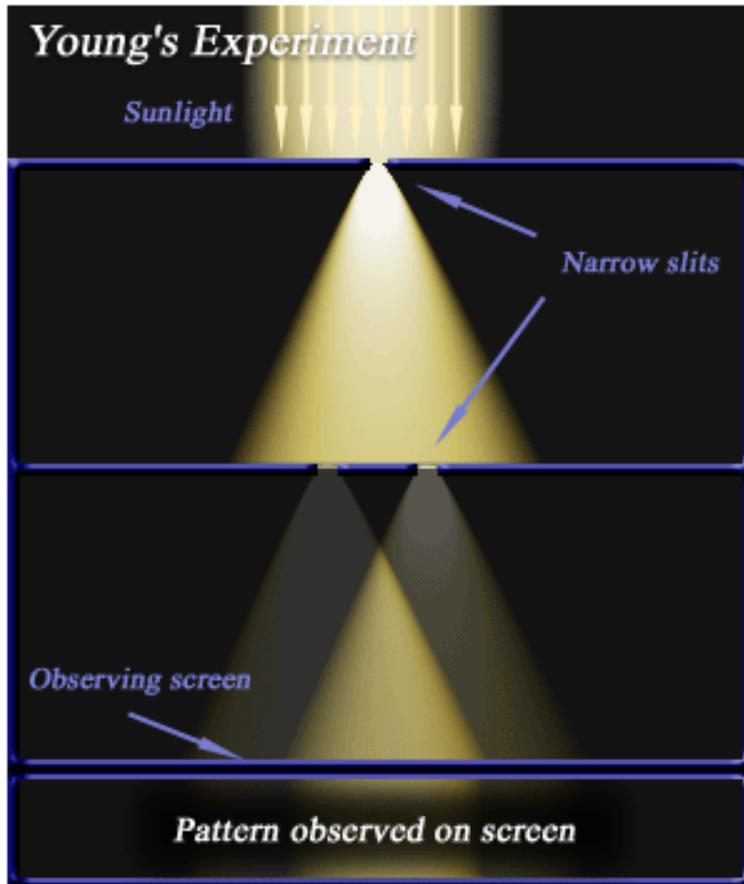
# Holographie

1. Une source cohérente est utilisée pour interférer avec le rayonnement diffracté par un « objet ».
2. Cette interférence est enregistrée pour donner un hologramme.
3. Enregistrement de la phase pour pouvoir restituer la profondeur.



# Interféromètres à division de front d'onde

## Expérience de Young (suite 1)



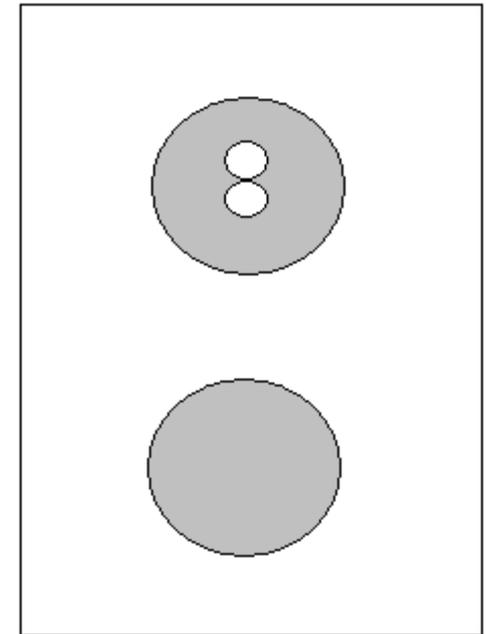
## Une expérience simple

- Faire 2 petits trous d'environ 0.5 mm de diamètre écartés d'environ 1 mm dans une feuille d'Aluminium et regarder au travers le filament d'une ampoule.
- Il apparaît le disque d'Airy dû à chacune des ouvertures criblé d'une série de franges d'interférence.
- Pour rappel, les maxima se trouvent en (cf. slide) :

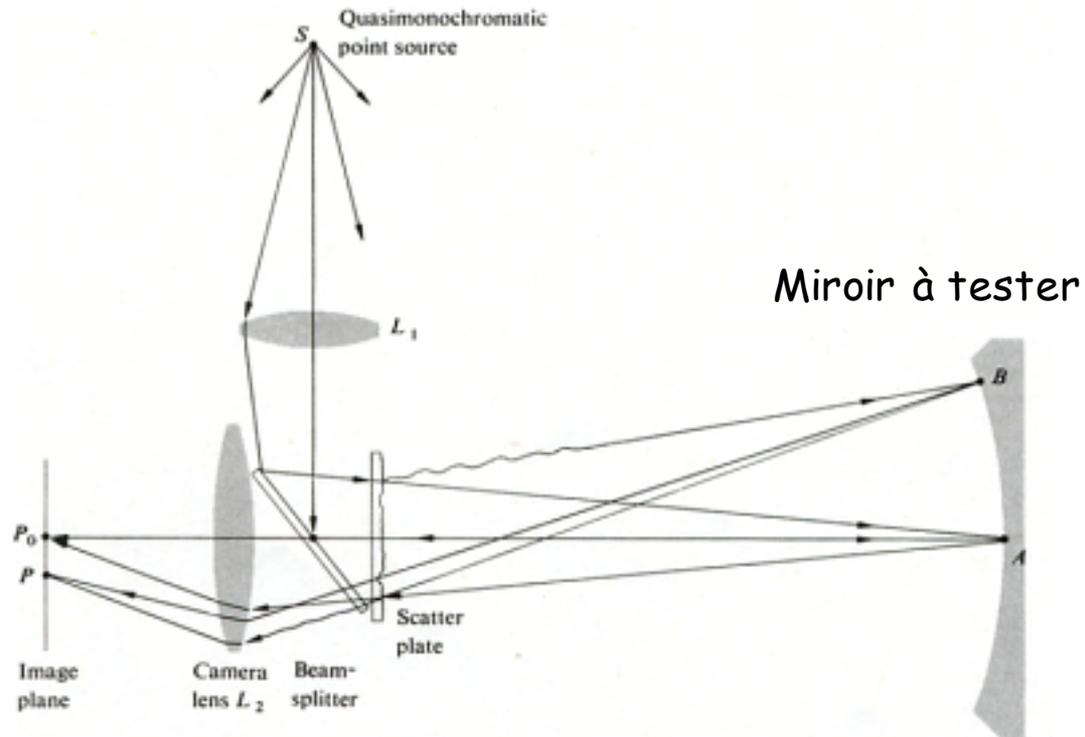
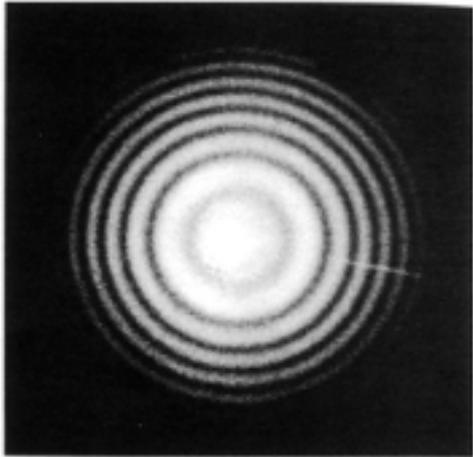
$$y_{\max} = \frac{n\lambda x}{h}$$

- En déplaçant ce petit interféromètre (ou en écartant les ouvertures), il est possible de mesurer la valeur du diamètre angulaire du filament.
- Il y aura brouillage total des franges lorsque le diamètre angulaire de la source ( $\varphi$ ) correspondra à :

$$= \frac{\lambda}{2h}$$



## Tester des surfaces



- Interférence sur le plan image car chaque point reçoit des rayons qui ont suivi 2 chemins différents.
  - ✓ Les rayons en provenance de A.
  - ✓ Les rayons en provenance d'un certain point B qui réfléchit la lumière diffusée.
- Une analyse des franges permet de détecter toute anomalie à la surface du miroir.