

Optique

Master 2 Outils et Systèmes de l'Astronomie et de l'Espace

Cours 3

4 novembre 2025

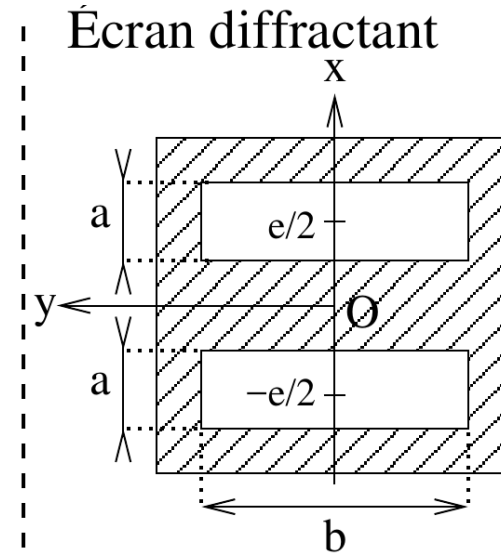
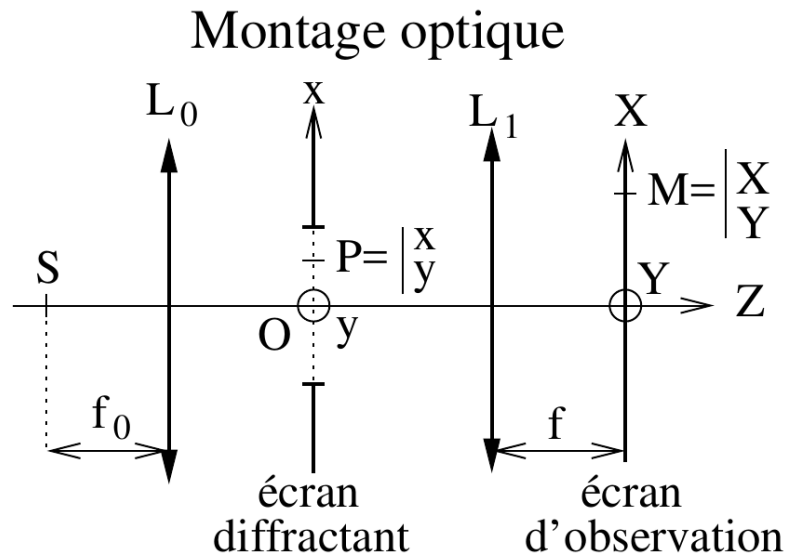
Raphaël Galicher

[raphael.galicher @ obspm.fr](mailto:raphael.galicher@obspm.fr)

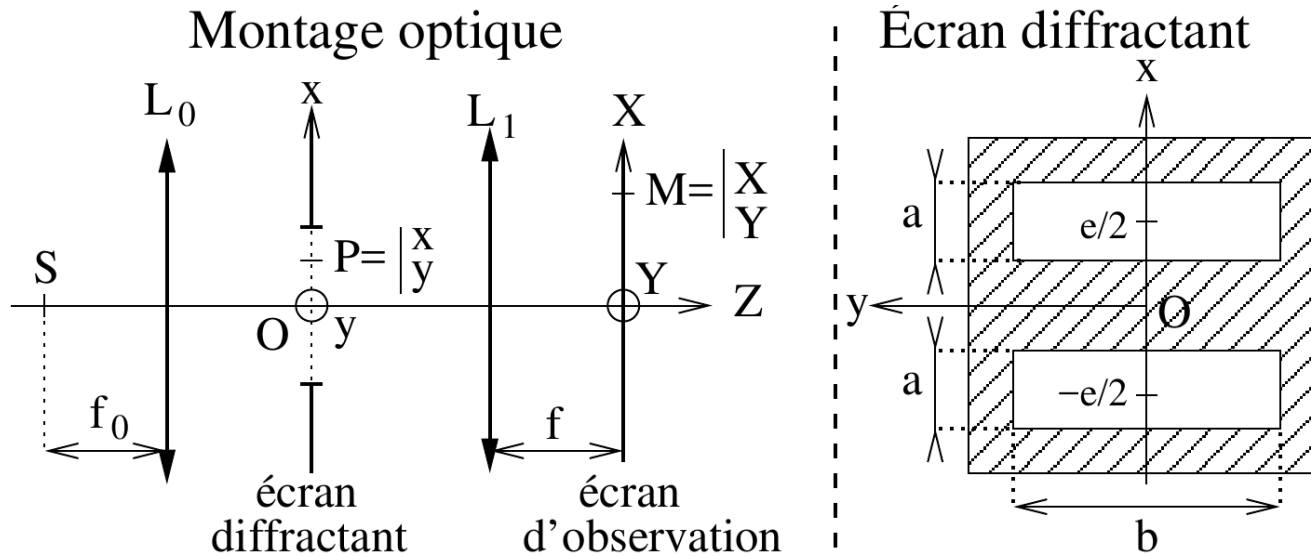
Plan

- Interférences lumineuses à deux ondes
 - ✓ Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »
 - ✓ Cas général
 - ✓ Localisation des franges
 - ✓ Séparation de faisceau : trous d'Young
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame à faces parallèles
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame d'épaisseur variable
 - ✓ Lumière polychromatique (doublet de raies spectrales et lumière blanche)
- Interférences lumineuses à N ondes : réseaux et spectroscopie
 - ✓ Réseau ligné plan
 - ✓ Utilisation en spectroscope
 - ✓ Pouvoir de résolution spectrale
 - ✓ Autres interféromètres à N ondes
- FTO et interféromètre
 - ✓ Résolution angulaire et couverture de l'espace des fréquences
 - ✓ Mesure d'un objet étendu
 - ✓ Exemples d'instruments en astronomie

Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »



Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »



$$I(X, Y) = \underbrace{I_0 \operatorname{sinc}^2\left(\frac{k_X f a}{2}\right) \operatorname{sinc}^2\left(\frac{k_Y f b}{2}\right)}_{\text{Diffraction par une ouverture unique}} \underbrace{2 [1 + \cos(k_X f e)]}_{\text{Interferences entre deux ouvertures}}$$

- Interférences lumineuses à deux ondes
 - ✓ Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »
 - ✓ Cas général
 - ✓ Localisation des franges
 - ✓ Séparation de faisceau : trous d'Young
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame à faces parallèles
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame d'épaisseur variable
 - ✓ Lumière polychromatique (doublet de raies spectrales et lumière blanche)
- Interférences lumineuses à N ondes : réseaux et spectroscopie
 - ✓ Réseau ligné plan
 - ✓ Utilisation en spectroscope
 - ✓ Pouvoir de résolution spectrale
 - ✓ Autres interféromètres à N ondes
- FTO et interféromètre
 - ✓ Résolution angulaire et couverture de l'espace des fréquences
 - ✓ Mesure d'un objet étendu
 - ✓ Exemples d'instruments en astronomie

Une seule fréquence \Leftrightarrow une seule longueur d'onde

Si les pulsations sont différentes, l'intensité totale I est la somme des intensités reçues de chaque source (I_1 et I_2).

$$\omega_1 \neq \omega_2 \Rightarrow I(M) = I_1(M) + I_2(M)$$

Si les pulsations sont identiques, il peut ^a y avoir interférence

$$\omega_1 = \omega_2 \Rightarrow I(M) = I_1 + I_2 + \underbrace{2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos [\phi_1(M) - \phi_2(M)] \rangle_T}_{\text{terme d'interférences}} \quad (56)$$

Dans ce cas, le terme d'interférences qui dépend de la position d'observation M module spatialement l'intensité.

a. Ce n'est pas une condition suffisante pour des ondes optiques ! Voir la suite.

Deux ondes lumineuses n'interfèrent que si elles sont de même fréquence

Une source unique

Champ électrique au niveau des sources S_1 et S_2

$\sim 1/\Delta v$

$\sim 1/\Delta v$

$\sim 1/\Delta v$

Source 1

$\Delta\phi_s(t)/\omega$

$\Delta\phi_s(t+1/\Delta v)/\omega$

$\Delta\phi_s(t+2/\Delta v)/\omega$

Source 2



$\sim 1/\Delta v$

$\sim 1/\Delta v$

$\sim 1/\Delta v$

Une source unique

Champ électrique au niveau des sources S_1 et S_2

$\sim 1/\Delta v$

$\sim 1/\Delta v$

$\sim 1/\Delta v$

Source 1

$\Delta\phi_S(t)/\omega$

$\Delta\phi_S(t+1/\Delta v)/\omega$

$\Delta\phi_S(t+2/\Delta v)/\omega$

Source 2



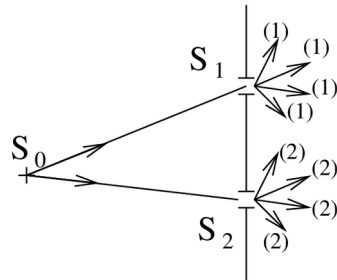
$\sim 1/\Delta v$

$\sim 1/\Delta v$

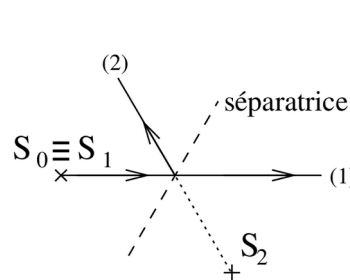
$\sim 1/\Delta v$

Les sources secondaires qui interfèrent sont issues d'une unique source

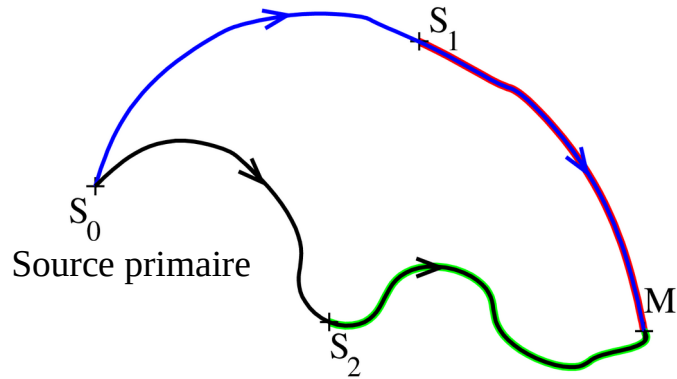
Séparation de faisceau



Séparation d'amplitude



Différence de marche optique



Le déphasage entre les ondes au point M est :

Différence de marche en M
entre les ondes reçues de S1 et S2

$$\Delta\phi(M) = \frac{2\pi \delta_{S_1 S_2}(M)}{\lambda} + \Delta\phi_S$$

Déphasage en M entre
les ondes reçues
de S1 et S2

Déphasage entre les
ondes émises par S1 et S2

Autre écriture :

$$\Delta\phi(M) = \frac{2\pi \delta_{tot}(M)}{\lambda}$$

avec $\delta_{tot}(M) = \ell_{SM}^{(1)} - \ell_{SM}^{(2)} = \delta_{S_1 S_2}(M) + \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi_S$

Chemin optique entre S et M en passant par S1

Chemin optique entre S et M en passant par S2

Deux sources de déphasage : avant et après les sources secondaires

Différence de marche inférieure à longueur de cohérence

Champ électrique en M $\sim 1/\Delta v$ $\sim 1/\Delta v$ $\sim 1/\Delta v$

Source 1

$\Delta\phi(M)/\omega$ $\Delta\phi(M)/\omega$ $\Delta\phi(M)/\omega$

Source 2



$\sim 1/\Delta v$ $\sim 1/\Delta v$ $\sim 1/\Delta v$

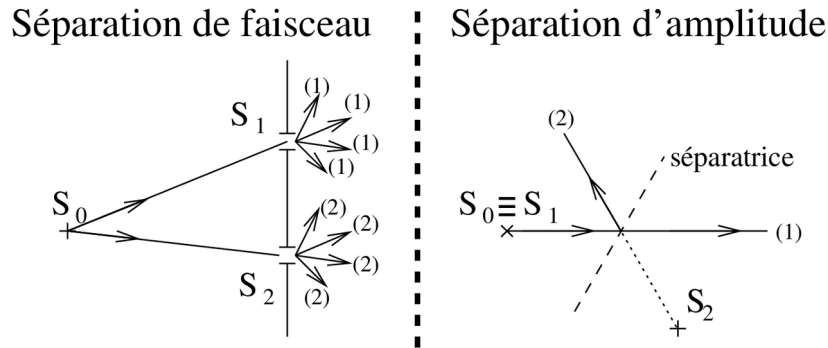
$$\Delta\phi(M)/\omega < 1/\Delta v \Rightarrow \delta_{\text{tot}} < l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$

Différence de marche totale $\delta_{\text{tot}} <$ longueur de cohérence de la source l_c

Cas général : conditions d'obtention d'interférences lumineuses

En optique, deux ondes interfèrent si :

- elles ont **même pulsation** → même longueur d'onde
- elles sont issues de la **même source**



- la différence de marche est **inférieure à la longueur de cohérence** de la source

$$\delta_{\text{tot}} < l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$$

Dans ce cas : $I(M) = I_1(M) + I_2(M) + 2\sqrt{I_1(M)I_2(M)} \cos\left(\frac{2\pi\delta_{\text{tot}}}{\lambda}\right)$

Sinon (pas d'interférences) : $I(M) = I_1(M) + I_2(M)$

Vocabulaire d'interférométriste

Champ d'interférences : ensemble des points où les interférences peuvent exister

Fringes d'interférences : ensemble continu des points de même intensité

$$\Delta\phi(M) = \frac{2\pi\delta(M)}{\lambda} + \Delta\phi_S = C^{te} \quad \text{avec} \quad C^{te} \in \mathbb{R}$$

Frangé brillante : franges d'intensité maximale

$$\Delta\phi(M) = \frac{2\pi\delta(M)}{\lambda} + \Delta\phi_S = 2p\pi, \quad \forall p \in \mathbb{Z}$$

Frangé sombre : franges d'intensité minimale

$$\Delta\phi(M) = \frac{2\pi\delta(M)}{\lambda} + \Delta\phi_S = (2m+1)\pi, \quad \forall m \in \mathbb{Z}$$

Frangé noire : frangé d'intensité nulle

Visibilité ou contraste

Contraste maximum

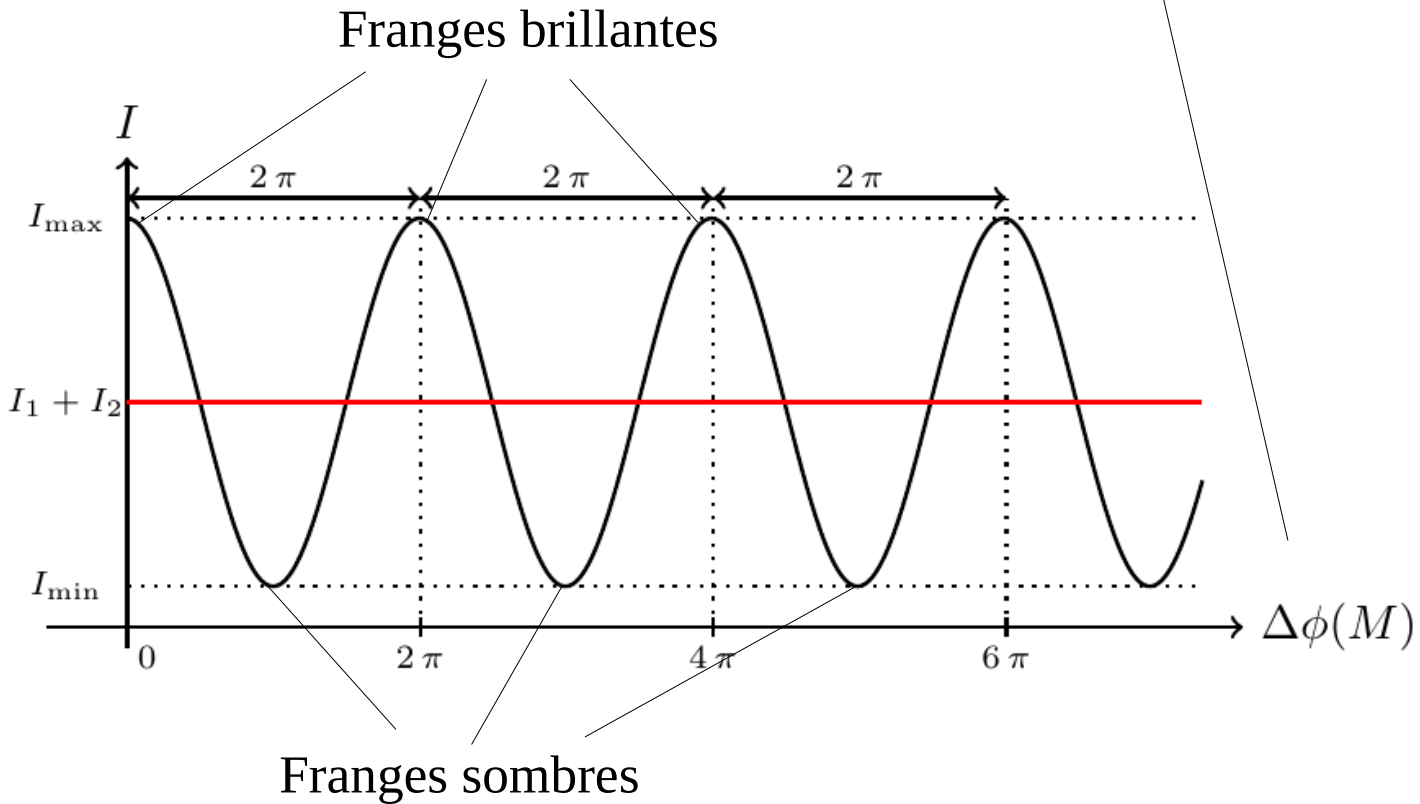
Franges sombres sont noires

Éclairement uniforme (on ne voit pas de frange) $\longrightarrow 0 \leq \mathcal{V} = \mathcal{C} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \leq 1$

Interfrange : distance entre deux franges de même intensité

Variations de l'intensité

$$I(M) = I_1(M) + I_2(M) + 2\sqrt{I_1(M)I_2(M)} \cos\left(\frac{2\pi\delta_{\text{tot}}}{\lambda}\right)$$



- Interférences lumineuses à deux ondes
 - ✓ Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »
 - ✓ Cas général
 - ✓ Localisation des franges
 - ✓ Séparation de faisceau : trous d'Young
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame à faces parallèles
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame d'épaisseur variable
 - ✓ Lumière polychromatique (doublet de raies spectrales et lumière blanche)
- Interférences lumineuses à N ondes : réseaux et spectroscopie
 - ✓ Réseau ligné plan
 - ✓ Utilisation en spectroscope
 - ✓ Pouvoir de résolution spectrale
 - ✓ Autres interféromètres à N ondes
- FTO et interféromètre
 - ✓ Résolution angulaire et couverture de l'espace des fréquences
 - ✓ Mesure d'un objet étendu
 - ✓ Exemples d'instruments en astronomie

Localisation des franges d'interférences

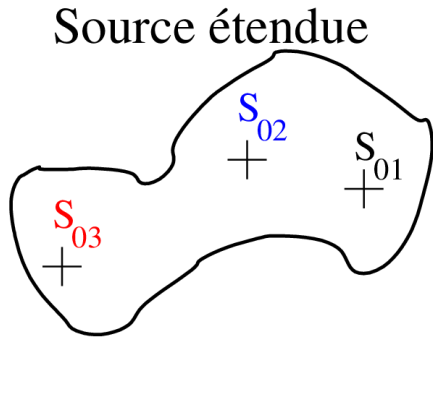
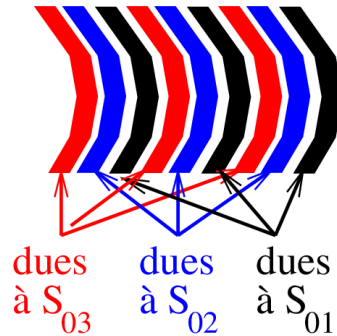


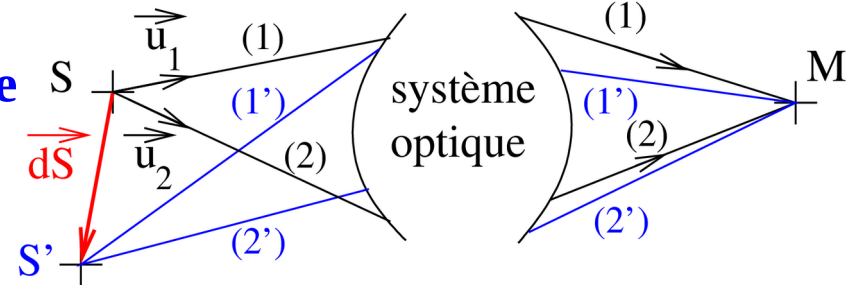
Figure d'interférences



1 point source → une figure d'interférences
 Cas général : brouillage des franges

Pour étendre la source sans brouiller les franges ($d\vec{S} \cdot (\vec{u}_1 - \vec{u}_2) = 0$):

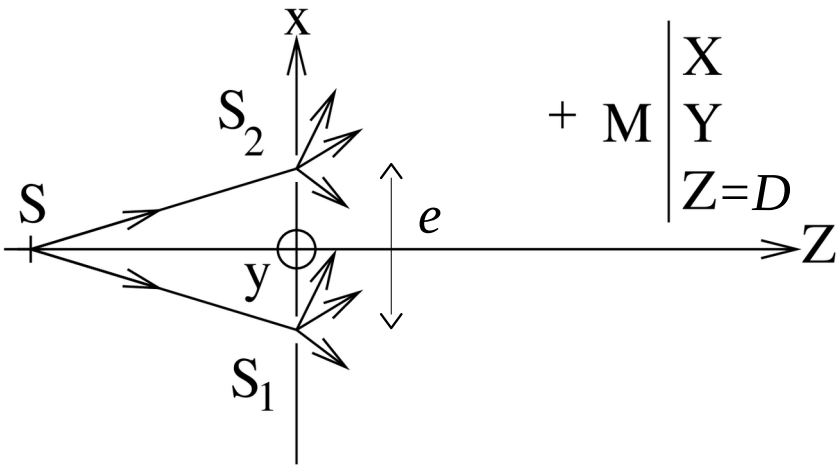
- Cas 1 : dispositif à **séparation de faisceau**
 → **fente source perpendiculaire à $\vec{u}_1 - \vec{u}_2$**
- Cas 2 : dispositif à **séparation d'amplitude**
 → $d\vec{S}$ quelconque mais **franges localisées**



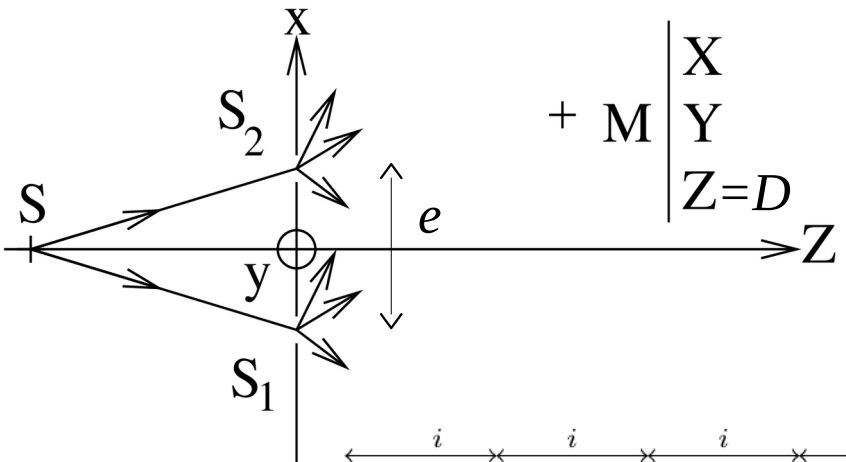
Plan

- Interférences lumineuses à deux ondes
 - ✓ Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »
 - ✓ Cas général
 - ✓ Localisation des franges
 - ✓ Séparation de faisceau : trous d'Young
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame à faces parallèles
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame d'épaisseur variable
 - ✓ Lumière polychromatique (doublet de raies spectrales et lumière blanche)
- Interférences lumineuses à N ondes : réseaux et spectroscopie
 - ✓ Réseau ligné plan
 - ✓ Utilisation en spectroscope
 - ✓ Pouvoir de résolution spectrale
 - ✓ Autres interféromètres à N ondes
- FTO et interféromètre
 - ✓ Résolution angulaire et couverture de l'espace des fréquences
 - ✓ Mesure d'un objet étendu
 - ✓ Exemples d'instruments en astronomie

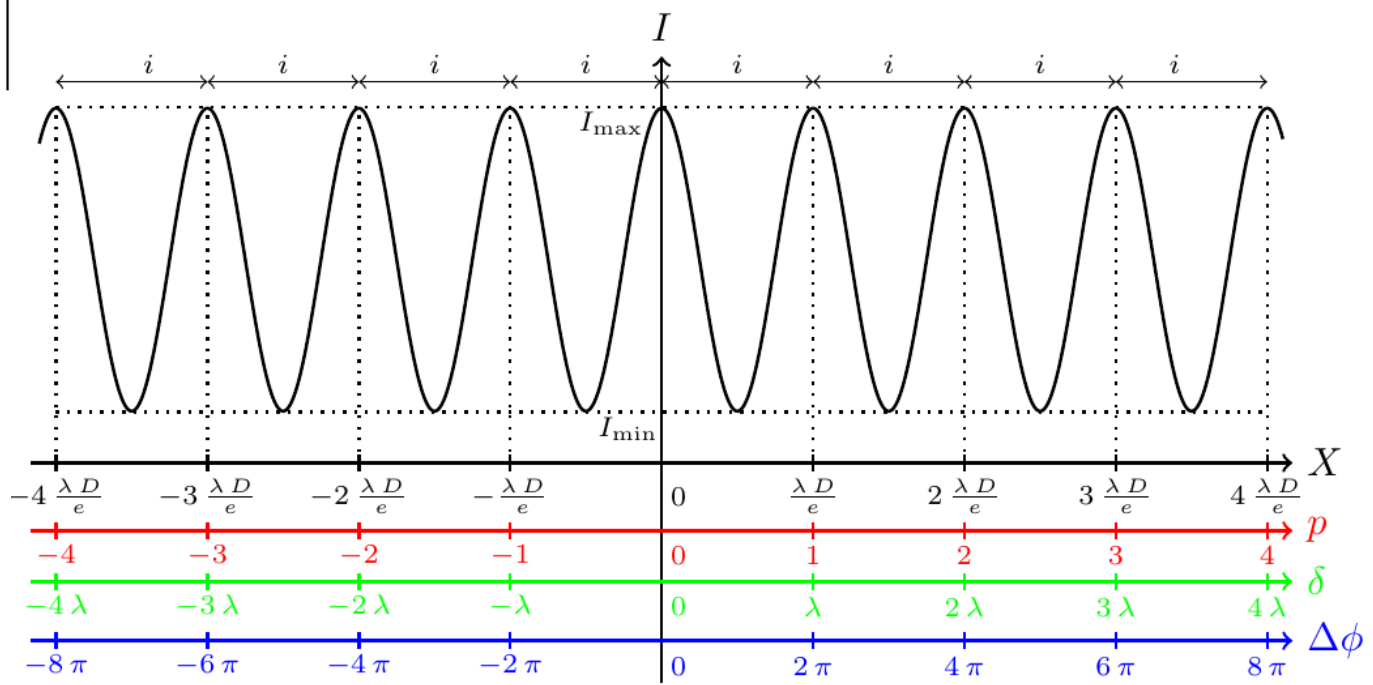
Trous d'Young à distance finie sans diffraction



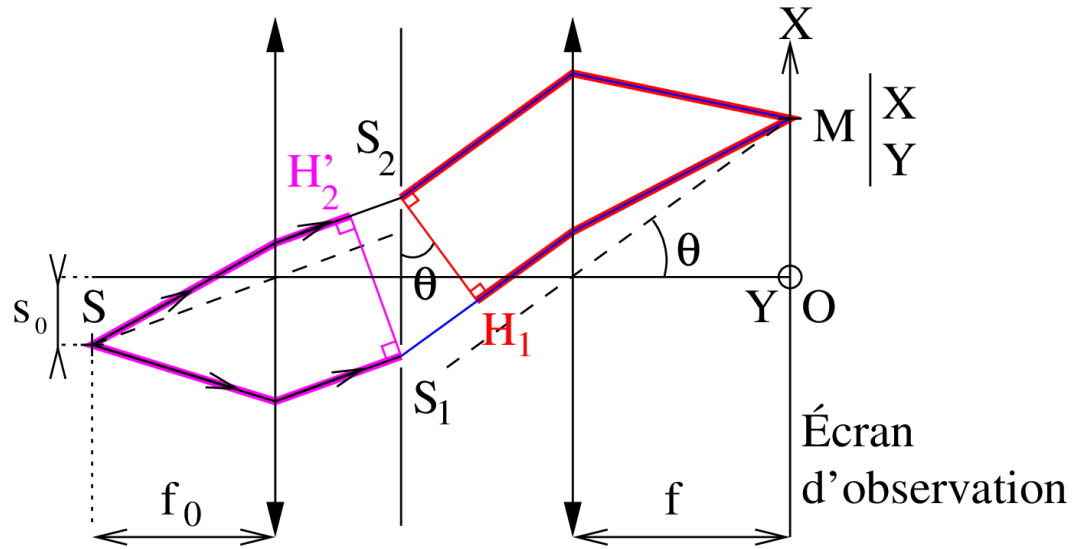
Trous d'Young à distance finie sans diffraction



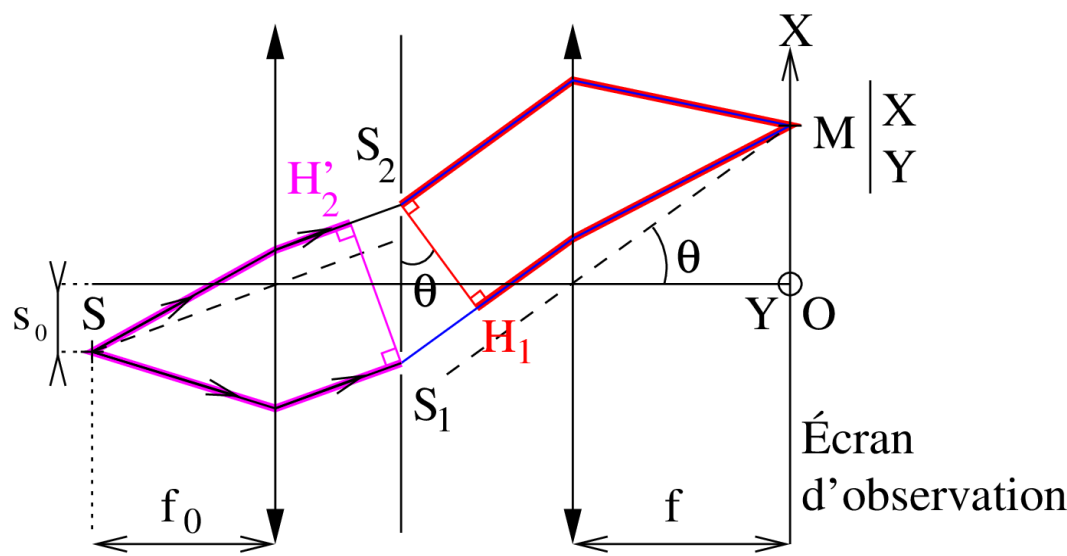
$$I(X, Y, D) = I_{01} + I_{02} + 2 \sqrt{I_{01} I_{02}} \cos\left(\frac{2\pi e X}{\lambda D}\right)$$



Trous d'Young en configuration « Fraunhofer »



Trous d'Young en configuration « Fraunhofer »



$$\delta_{\text{tot}} = (l_{SS_1} + l_{S_1M}) - (l_{SS_2} + l_{S_2M})$$

$$\delta_{\text{tot}} = (l_{SS_1} - l_{SS_2}) + (l_{S_1M} - l_{S_2M})$$

$$\delta_{\text{tot}} = l_{S_1H_1} - l_{H'_2S_2}$$

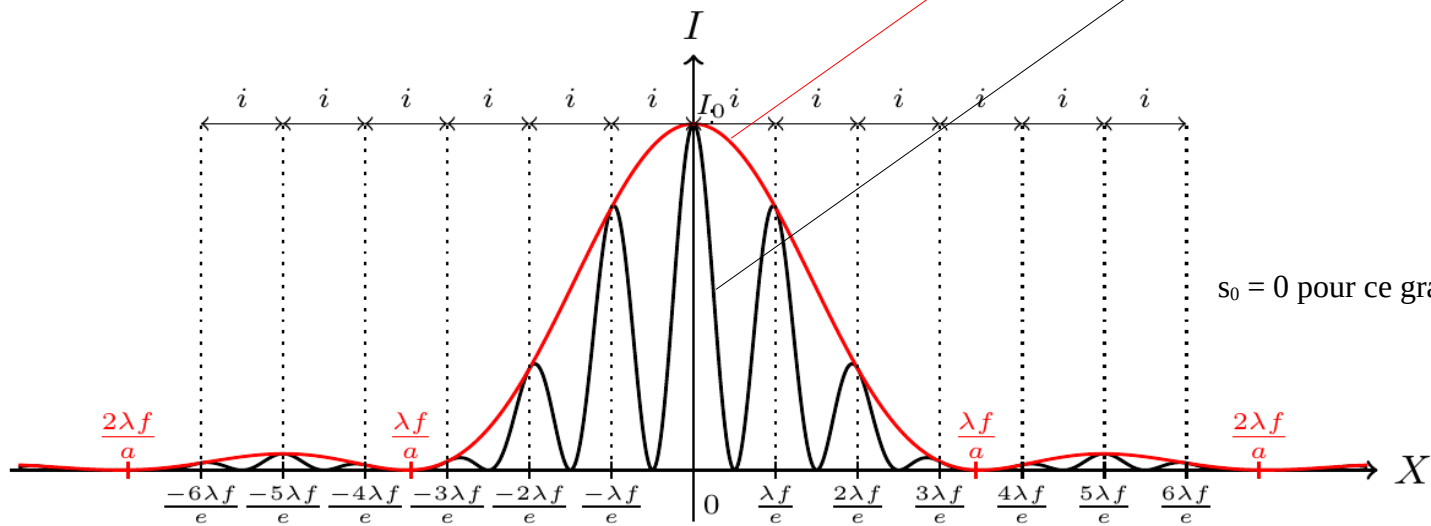
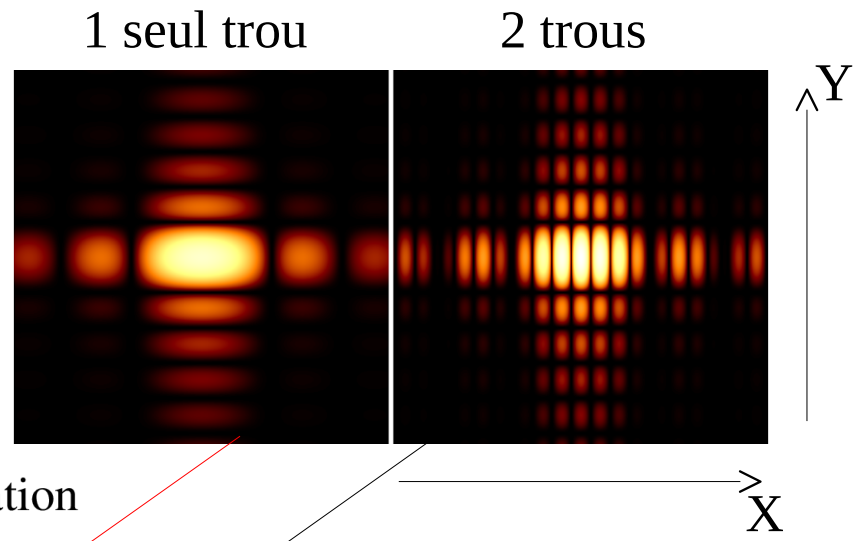
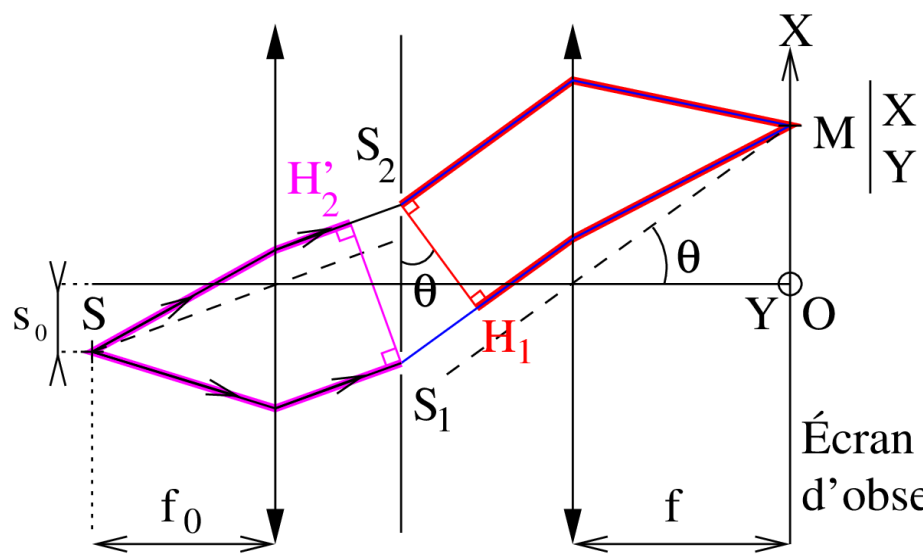
$$\delta_{\text{tot}} = e \left(\frac{X}{f} - \frac{s_0}{f_0} \right)$$

$$I(X, Y) = I_{01} + I_{02} + 2 \sqrt{I_{01} I_{02}} \cos \left[\frac{2\pi e}{\lambda} \left(\frac{X}{f} - \frac{s_0}{f_0} \right) \right]$$

Et avec la diffraction :

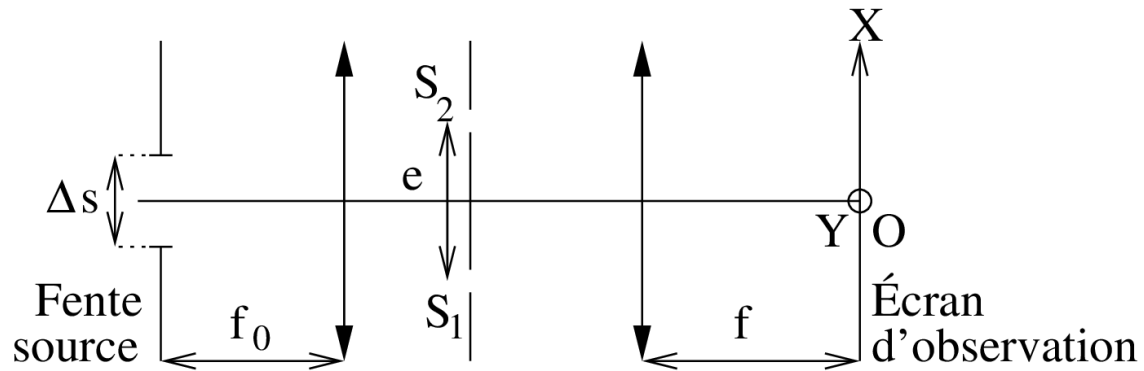
$$I(X, Y) = \underbrace{I_0 \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{\pi a}{\lambda f} [X - X_0] \right) \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{\pi b Y}{\lambda f} \right)}_{\text{Diffraction}} \underbrace{2 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi e}{\lambda f} [X - X_0] \right) \right]}_{\text{Interferences}}$$

Trous d'Young en configuration « Fraunhofer » en images

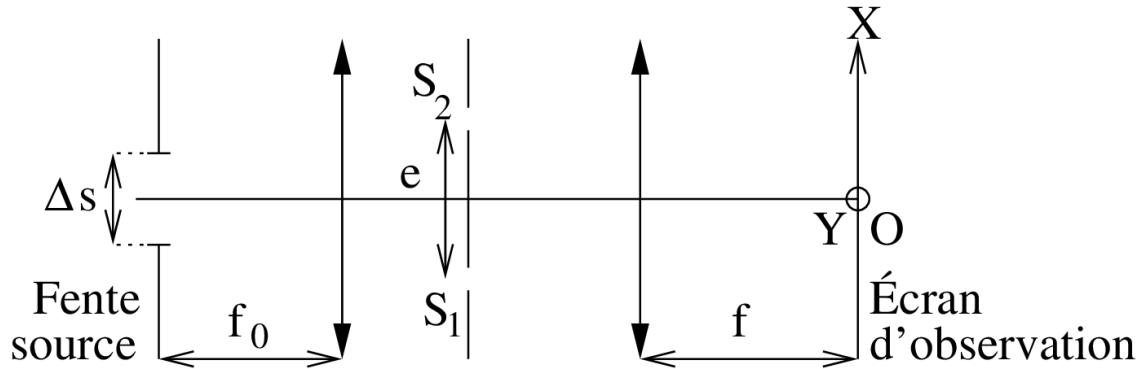


$s_0 = 0$ pour ce graphique

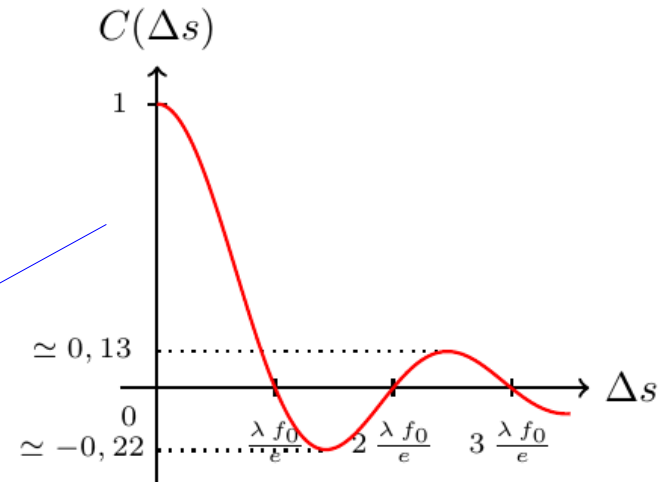
Trous d'Young en configuration « Fraunhofer » : fente source



Trous d'Young en configuration « Fraunhofer » : fente source



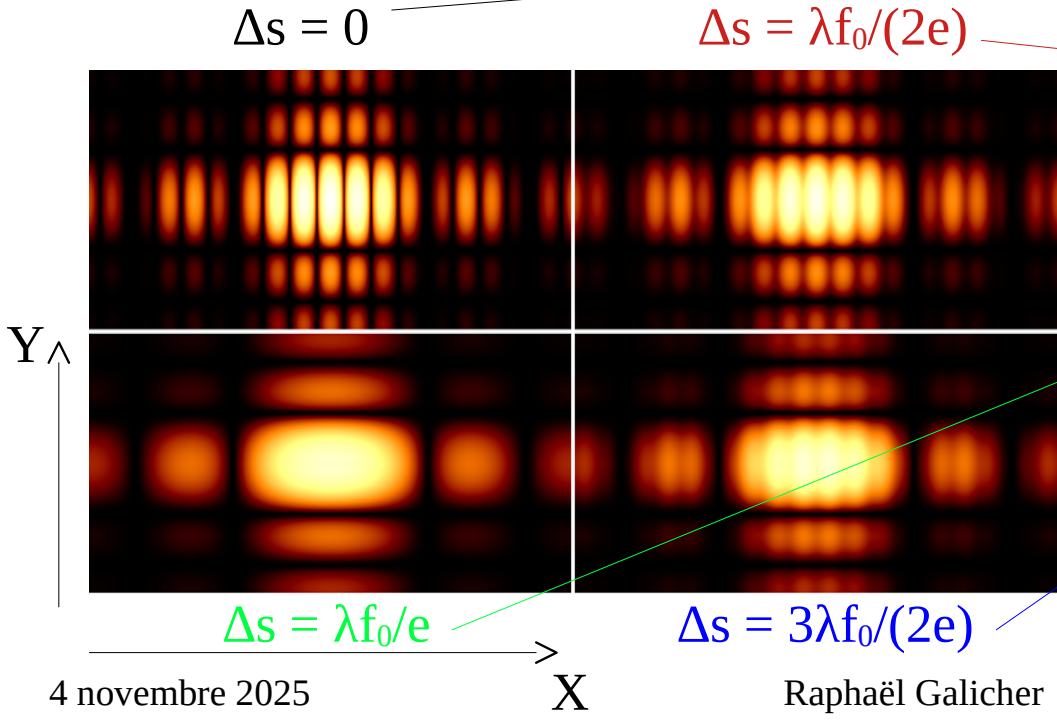
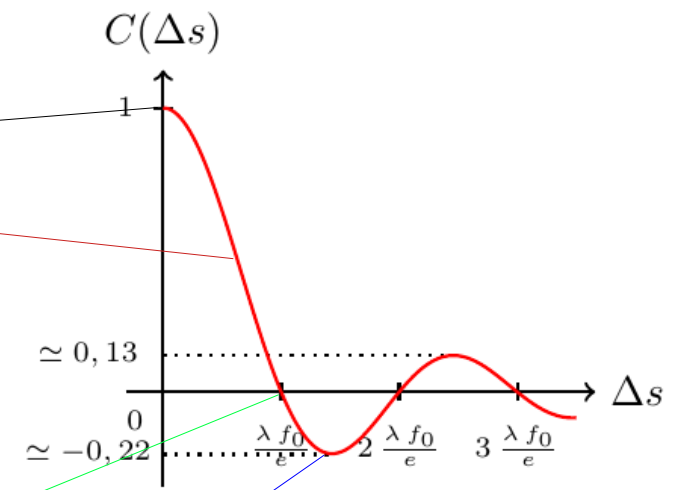
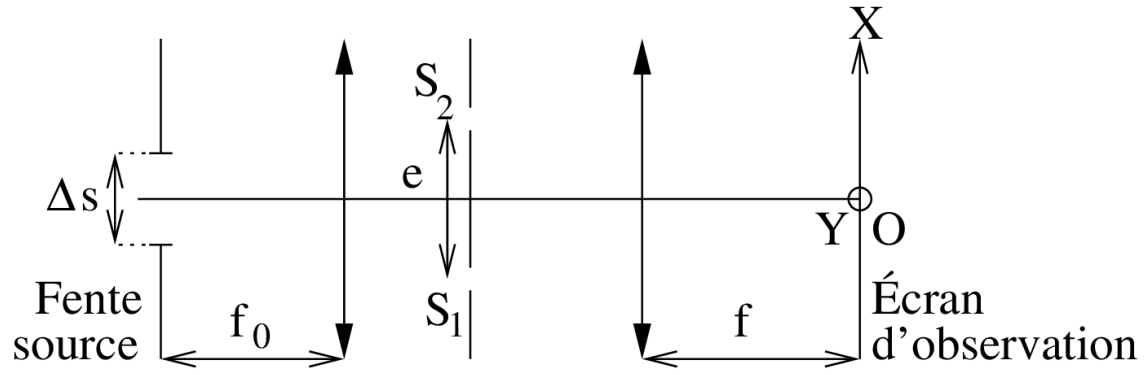
$$I_{\Delta s}(X, Y) = \int_{-\Delta s/2}^{\Delta s/2} 2 \frac{I_0}{\Delta s} \left(1 + \cos \left[\frac{2\pi e}{\lambda} \left(\frac{X}{f} - \frac{s}{f_0} \right) \right] \right) ds$$



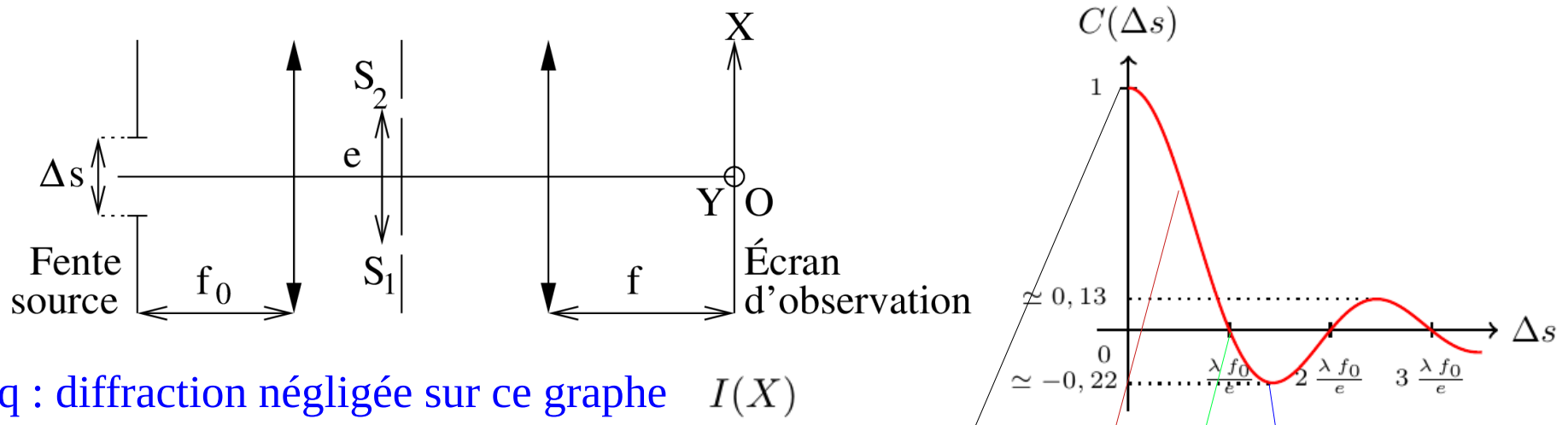
Contraste uniforme

$$I(X, Y) \simeq \underbrace{I_0 \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{\pi a X}{\lambda f} \right) \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{\pi b Y}{\lambda f} \right)}_{\text{Diffraction}} \underbrace{2 \left[1 + \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi e \Delta s}{\lambda f_0} \right] \cos \left(\frac{2\pi e X}{\lambda f} \right) \right]}_{\text{Interferences}}$$

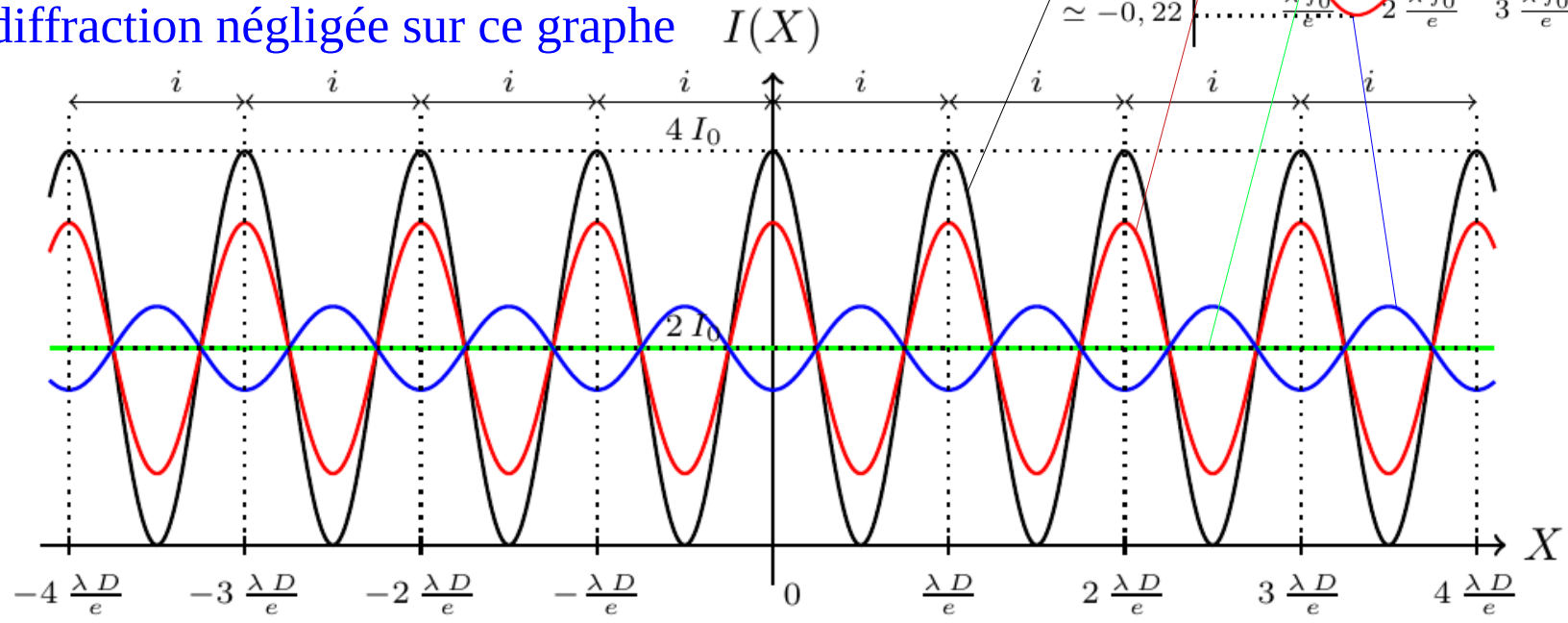
Trous d'Young en configuration « Fraunhofer » : fente source en images



Trous d'Young en configuration « Fraunhofer » : fente source en graphes



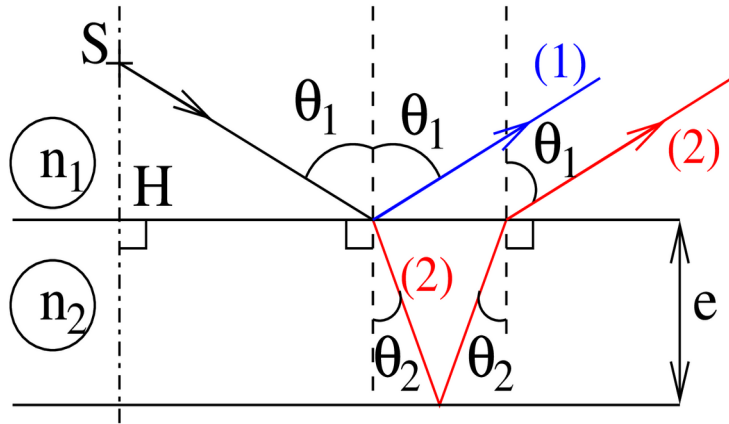
Rq : diffraction négligée sur ce graphe



Plan

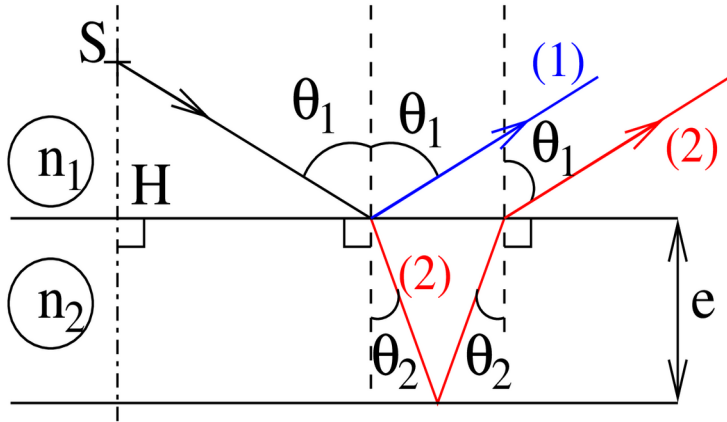
- Interférences lumineuses à deux ondes
 - ✓ Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »
 - ✓ Cas général
 - ✓ Localisation des franges
 - ✓ Séparation de faisceau : trous d'Young
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame à faces parallèles
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame d'épaisseur variable
 - ✓ Lumière polychromatique (doublet de raies spectrales et lumière blanche)
- Interférences lumineuses à N ondes : réseaux et spectroscopie
 - ✓ Réseau ligné plan
 - ✓ Utilisation en spectroscope
 - ✓ Pouvoir de résolution spectrale
 - ✓ Autres interféromètres à N ondes
- FTO et interféromètre
 - ✓ Résolution angulaire et couverture de l'espace des fréquences
 - ✓ Mesure d'un objet étendu
 - ✓ Exemples d'instruments en astronomie

Lame à faces parallèles : schémas



Une lame à faces parallèles d'indice n_2 sur laquelle arrive un rayon issu de la source S

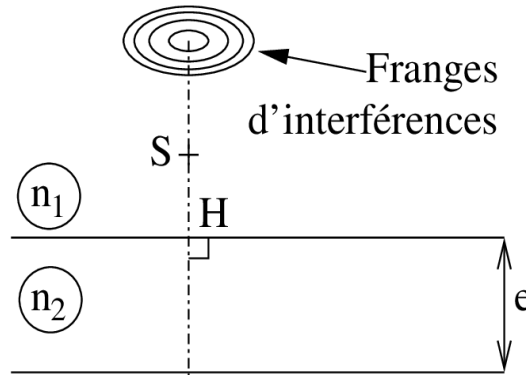
Lame à faces parallèles : schémas



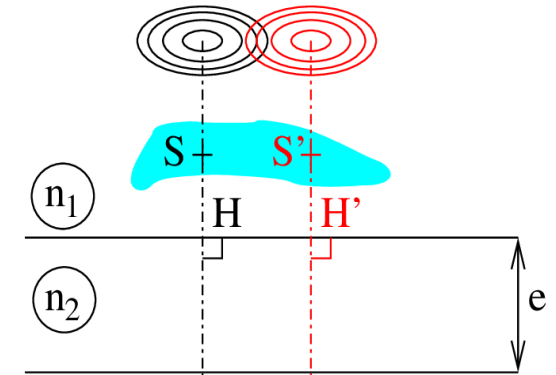
Une lame à faces parallèles d'indice n_2 sur laquelle arrive un rayon issu de la source S

Franges de Pohl =
Franges d'égal inclinaison
localisées à l'infini pour
une source étendue

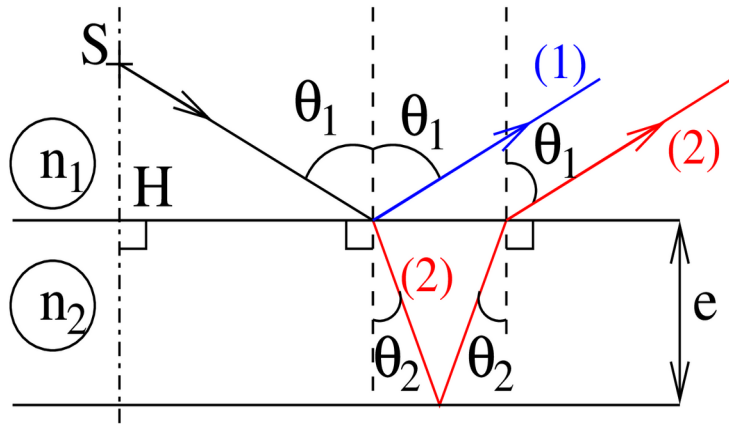
Source ponctuelle



Source étendue



Lame à faces parallèles : intensité



Une lame à faces parallèles d'indice n_2 sur laquelle arrive un rayon issu de la source S

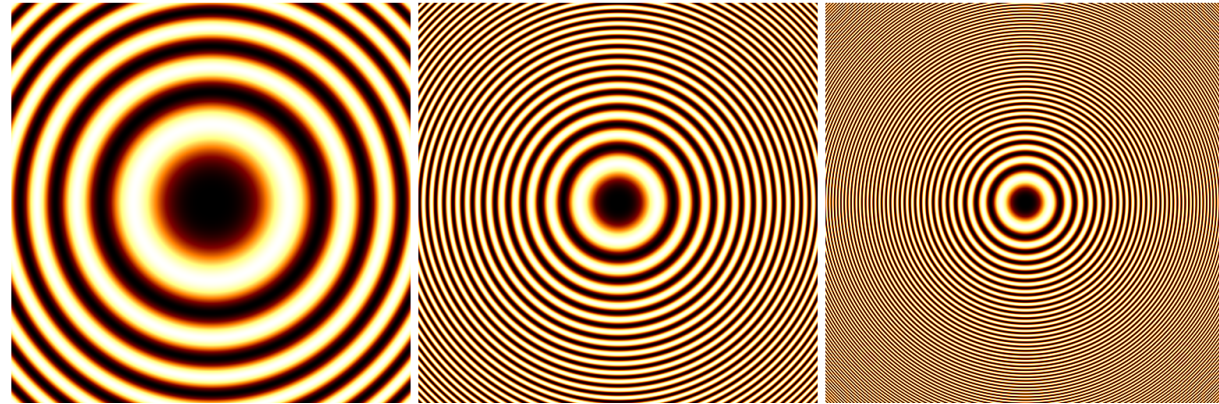
Déphasage dû aux réflexions

Intensité d'un des deux rayons

$$I(\theta_2) = 2I_1 \left[1 + \cos \left(\frac{4\pi n_2 e \cos \theta_2}{\lambda} + \pi \right) \right]$$

Déphasage dû aux chemins optiques parcourus

Lame à faces parallèles en images



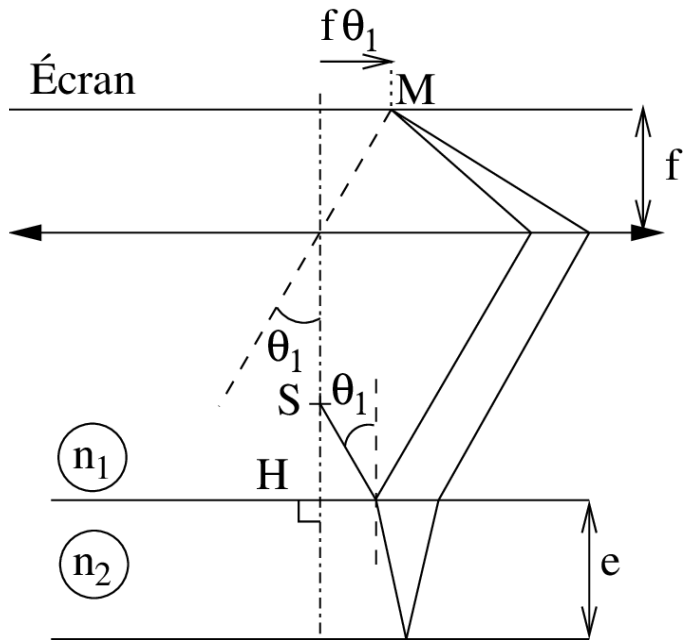
e_1

e_2

e_3

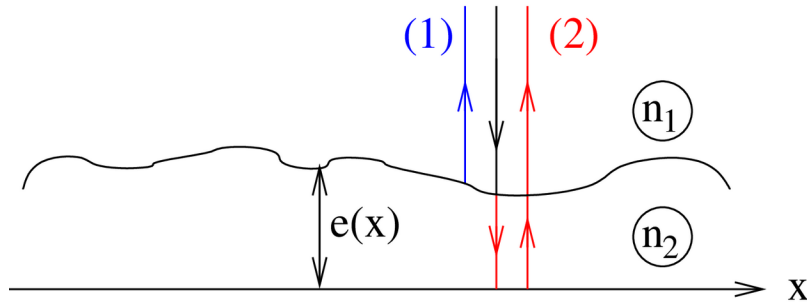
$$e_1 < e_2 < e_3$$

Plus e augmente, plus les anneaux sont resserés



- Interférences lumineuses à deux ondes
 - ✓ Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »
 - ✓ Cas général
 - ✓ Localisation des franges
 - ✓ Séparation de faisceau : trous d'Young
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame à faces parallèles
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame d'épaisseur variable
 - ✓ Lumière polychromatique (doublet de raies spectrales et lumière blanche)
- Interférences lumineuses à N ondes : réseaux et spectroscopie
 - ✓ Réseau ligné plan
 - ✓ Utilisation en spectroscopie
 - ✓ Pouvoir de résolution spectrale
 - ✓ Autres interféromètres à N ondes
- FTO et interféromètre
 - ✓ Résolution angulaire et couverture de l'espace des fréquences
 - ✓ Mesure d'un objet étendu
 - ✓ Exemples d'instruments en astronomie

Lame d'épaisseur lentement variable



Une lame d'indice n_2

Hypothèse : incidence normale

Épaisseur varie lentement \Rightarrow localement à faces parallèles

$$I = 2 I_1 \left[1 - \cos \left(\frac{4 \pi n_2 e(x)}{\lambda} \right) \right]$$

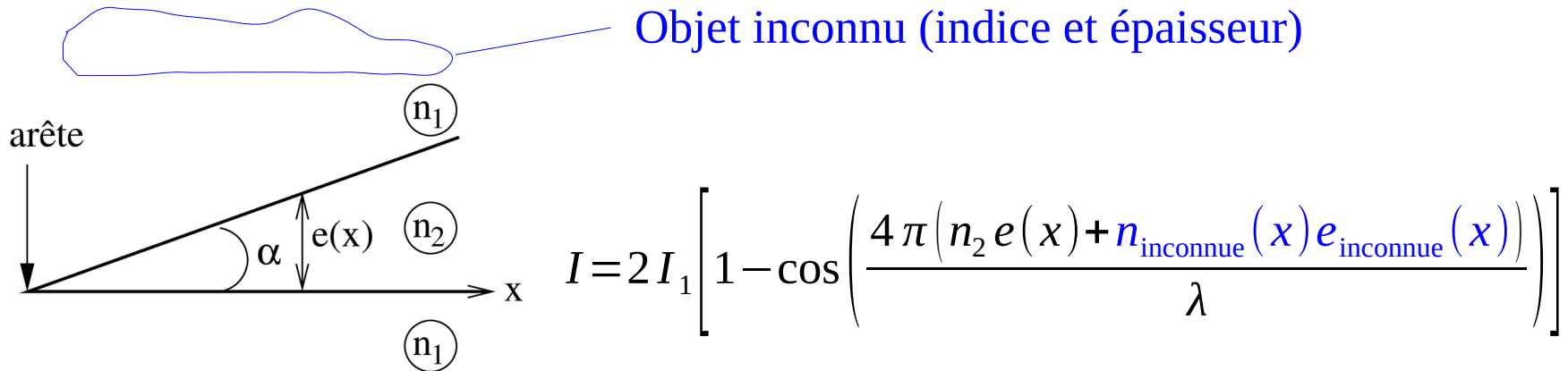
L'intensité ne dépend que de l'épaisseur \Rightarrow franges d'égale épaisseur

Franges localisées \sim sur la lame

Frangé noire pour $e = 0$



Lame d'épaisseur lentement variable : exemple d'utilisation

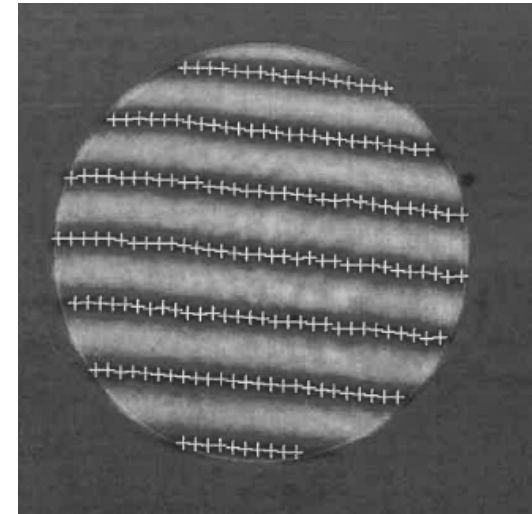


Exemple :

Mesure de la planéité d'un miroir plan

Non linéarité des franges \Leftrightarrow non planéité

Rq : ici miroir plan à $\lambda/50$



Plan

- Interférences lumineuses à deux ondes
 - ✓ Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »
 - ✓ Cas général
 - ✓ Localisation des franges
 - ✓ Séparation de faisceau : trous d'Young
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame à faces parallèles
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame d'épaisseur variable
 - ✓ Lumière polychromatique (doublet de raies spectrales et bande spectrale)
- Interférences lumineuses à N ondes : réseaux et spectroscopie
 - ✓ Réseau ligné plan
 - ✓ Utilisation en spectroscopie
 - ✓ Pouvoir de résolution spectrale
 - ✓ Autres interféromètres à N ondes
- FTO et interféromètre
 - ✓ Résolution angulaire et couverture de l'espace des fréquences
 - ✓ Mesure d'un objet étendu
 - ✓ Exemples d'instruments en astronomie

Doublet de raies spectrales

Monochromatique :

$$I_\nu(\delta) = 2 I_{0\nu} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\delta\nu}{c} \right) \right]$$

Deux raies de fréquences ν_1 et ν_2 avec $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 \ll \nu_0 = \frac{\nu_2 + \nu_1}{2}$ et $I_{0\nu_1} = I_{0\nu_2} = I_0$

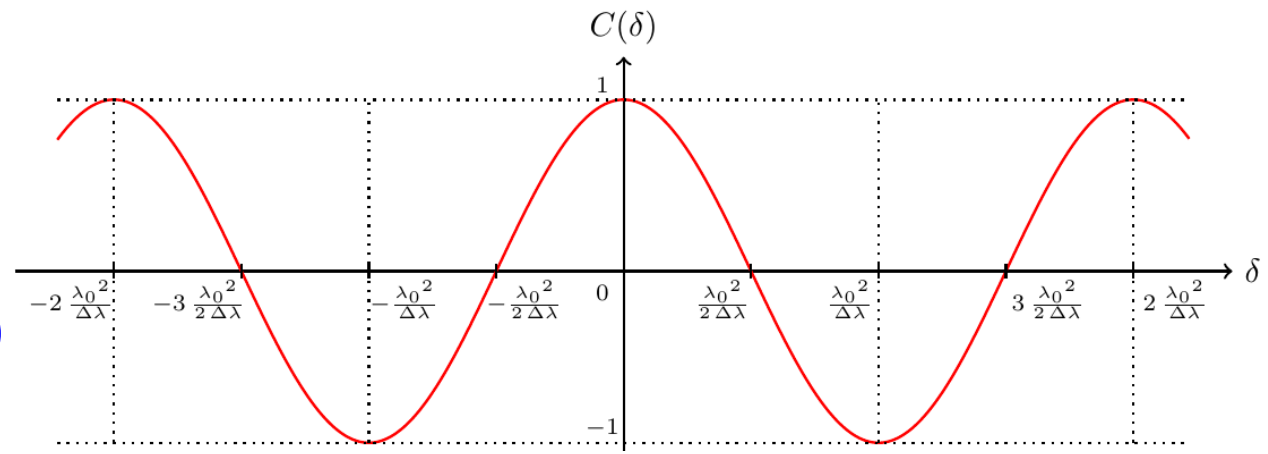
Doublet de raies spectrales

Monochromatique :
$$I_\nu(\delta) = 2 I_{0\nu} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\delta\nu}{c} \right) \right]$$

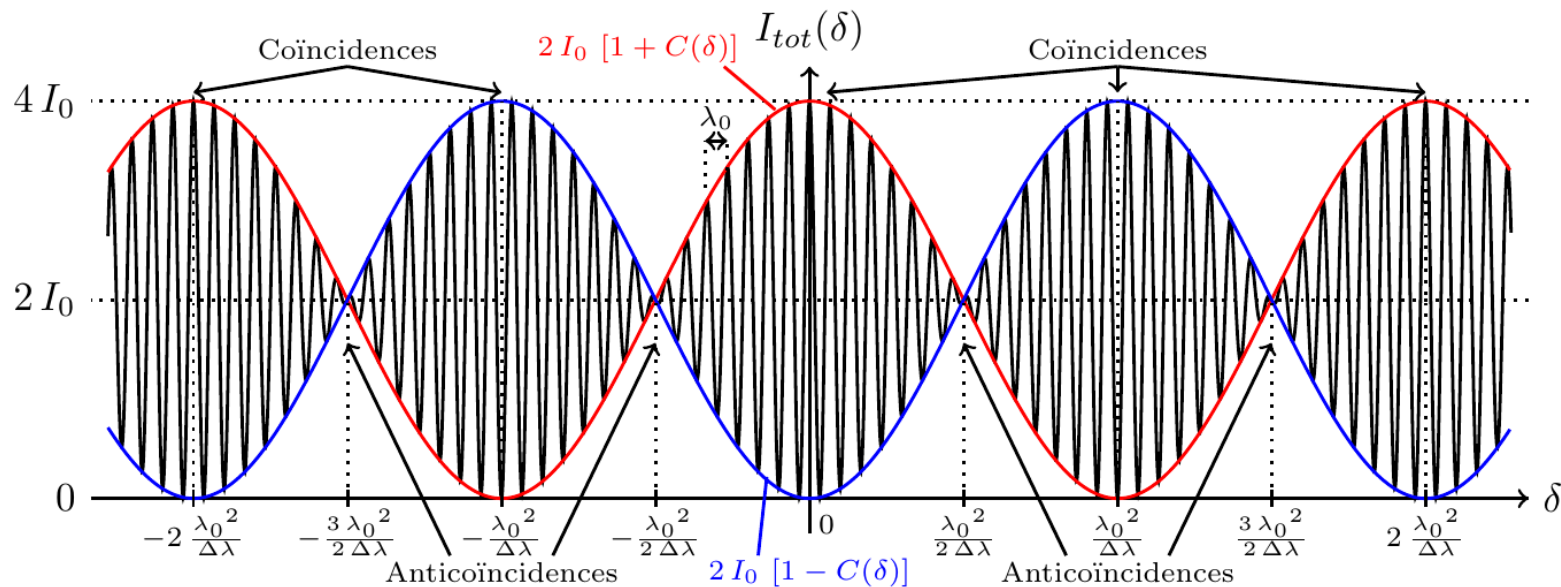
Deux raies de fréquences ν_1 et ν_2 avec $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 \ll \nu_0 = \frac{\nu_2 + \nu_1}{2}$ et $I_{0\nu_1} = I_{0\nu_2} = I_0$

$$I_{tot}(\delta) = 2 I_0 \left[\underbrace{1 + \cos \left(\pi \delta \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} \right)}_{\text{Contraste}} \cos \left(\frac{2\pi\delta}{\lambda_0} \right) \right]$$

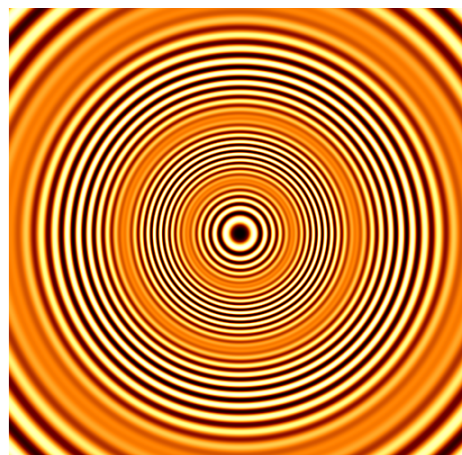
Le contraste C varie dans le champ d'interférences (i.e. avec δ)



Doublet de raies spectrales : coïncidences et anticoïncidences



Le contraste C varie dans le champ d'interférences (i.e. avec δ)



Exemple :
Lame à faces parallèles et doublet spectral

Bande spectrale (ou raie large) à spectre « carré »

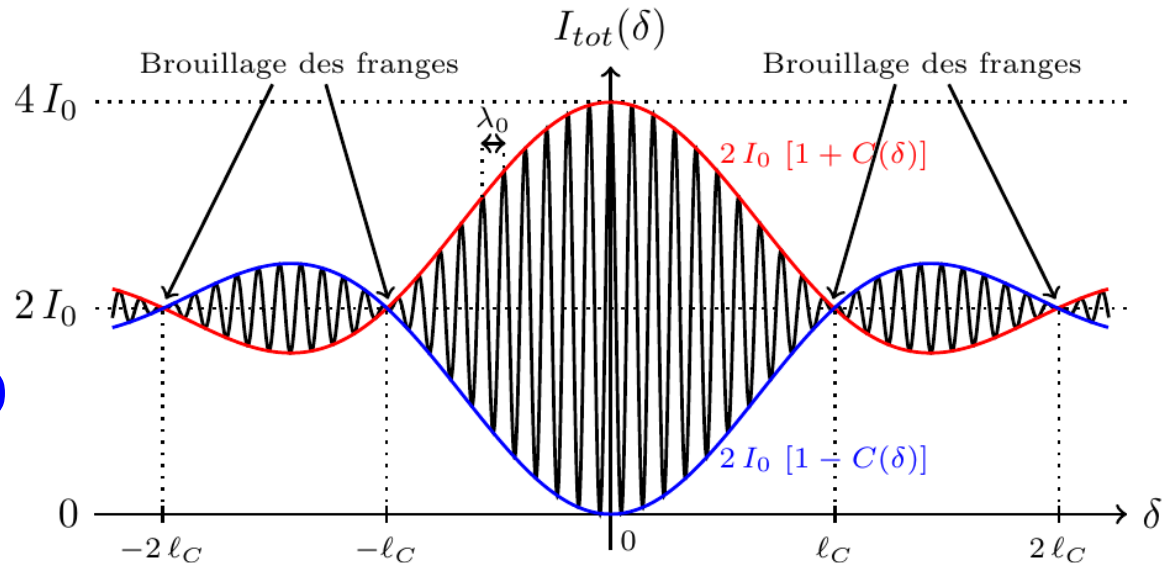
Spectre continu carré de largeur $\Delta\nu$ en fréquence avec $I_{0\nu} = \frac{I_0}{\Delta\nu}$

Bande spectrale (ou raie large) à spectre « carré »

Spectre continu carré de largeur $\Delta\nu$ en fréquence avec $I_{0\nu} = \frac{I_0}{\Delta\nu}$

$$I_{tot}(\delta) = 2 I_0 \left[\underbrace{1 + \text{sinc}\left(\frac{\pi \delta}{\ell_C}\right)}_{\text{Contraste}} \cos\left(\frac{2 \pi \delta}{\lambda_0}\right) \right] \quad \text{avec} \quad \ell_C = \frac{c}{\Delta\nu} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}$$

Le contraste C varie dans le champ d'interférences (i.e. avec δ)

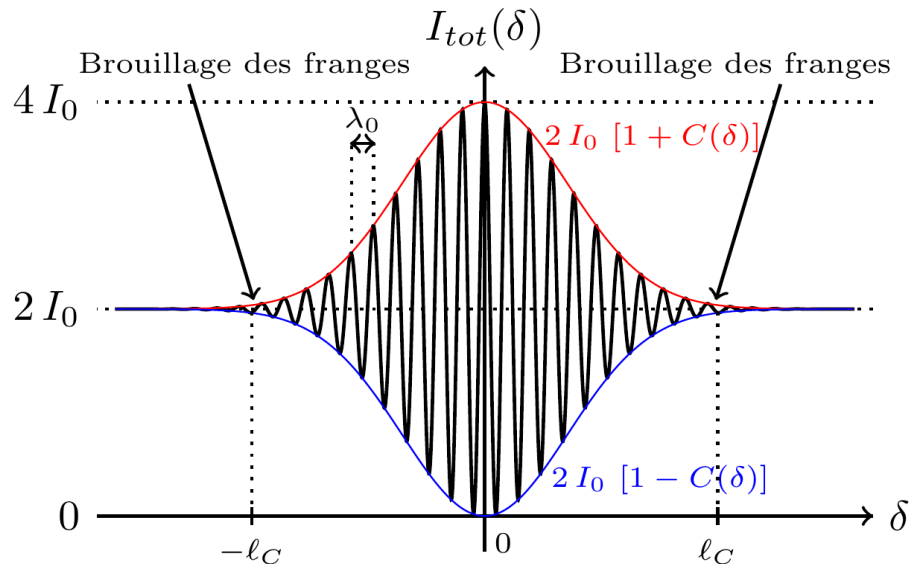


Bande spectrale (ou raie large) à spectre plus réaliste (1/2)

Spectre continu carré de largeur $\Delta\nu$ en fréquence avec $I_{0\nu} = \frac{I_0}{\Delta\nu}$

$$I_{tot}(\delta) = 2 I_0 \left[\underbrace{1 + \text{sinc}\left(\frac{\pi \delta}{\ell_C}\right)}_{\text{Contraste}} \cos\left(\frac{2 \pi \delta}{\lambda_0}\right) \right] \quad \text{avec} \quad \ell_C = \frac{c}{\Delta\nu} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}$$

Le contraste C varie dans le champ d'interférences (i.e. avec δ)



Bande spectrale (ou raie large) à spectre plus réaliste (2/2)

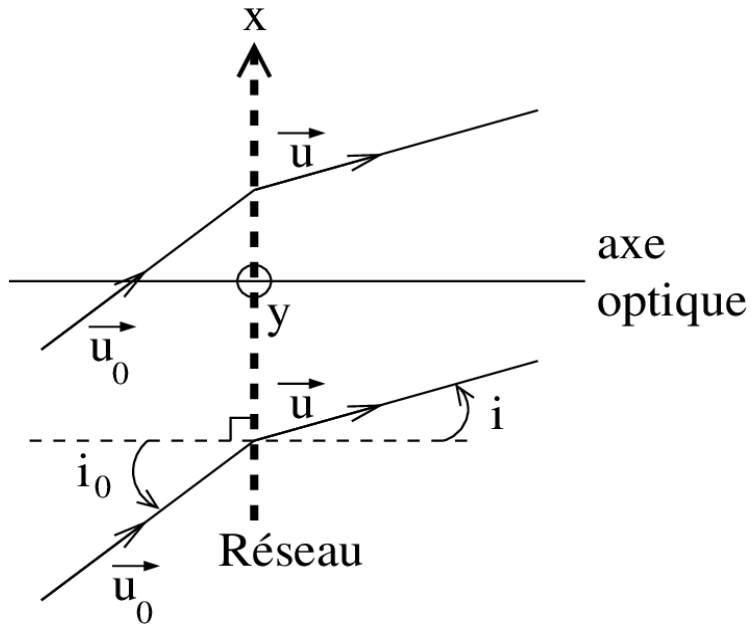
Spectre continu carré de largeur $\Delta\nu$ en fréquence avec $I_{0\nu} = \frac{I_0}{\Delta\nu}$

$$I_{tot}(\delta) = 2 I_0 \left[1 + \underbrace{\text{sinc}\left(\frac{\pi \delta}{\ell_C}\right)}_{\text{Contraste}} \cos\left(\frac{2 \pi \delta}{\lambda_0}\right) \right] \quad \text{avec} \quad \ell_C = \frac{c}{\Delta\nu} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}$$

Le contraste C varie
dans le champ
d'interférences (i.e. avec δ)

- Interférences lumineuses à deux ondes
 - ✓ Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »
 - ✓ Cas général
 - ✓ Localisation des franges
 - ✓ Séparation de faisceau : trous d'Young
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame à faces parallèles
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame d'épaisseur variable
 - ✓ Lumière polychromatique (doublet de raies spectrales et bande spectrale)
- Interférences lumineuses à N ondes : réseaux et spectroscopie
 - ✓ Réseau ligné plan
 - ✓ Utilisation en spectroscopie
 - ✓ Pouvoir de résolution spectrale
 - ✓ Autres interféromètres à N ondes
- FTO et interféromètre
 - ✓ Résolution angulaire et couverture de l'espace des fréquences
 - ✓ Mesure d'un objet étendu
 - ✓ Exemples d'instruments en astronomie

Réseau ligné



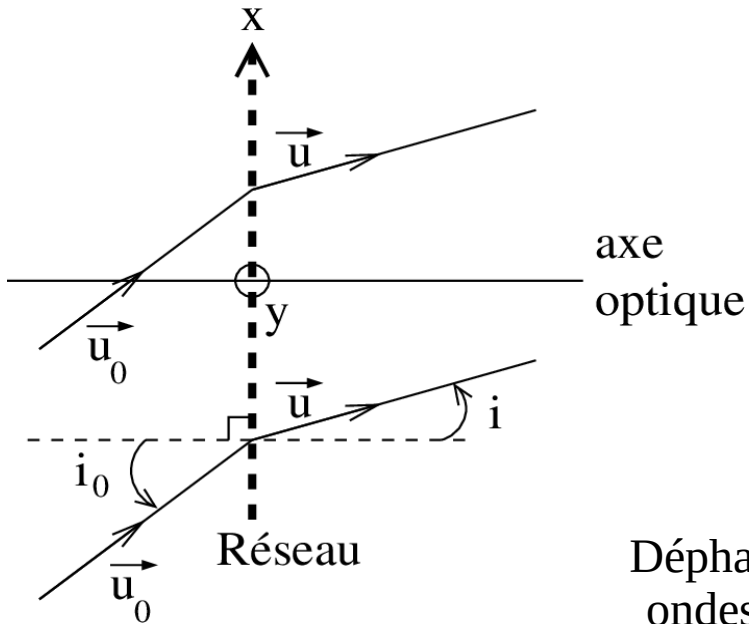
Réseau

Ensemble de N ouvertures

Réseau ligné

Ensemble de N fentes identiques, parallèles, coplanaires et équidistantes

Réseau ligné (sans diffraction)



Réseau

Ensemble de N ouvertures

Réseau ligné

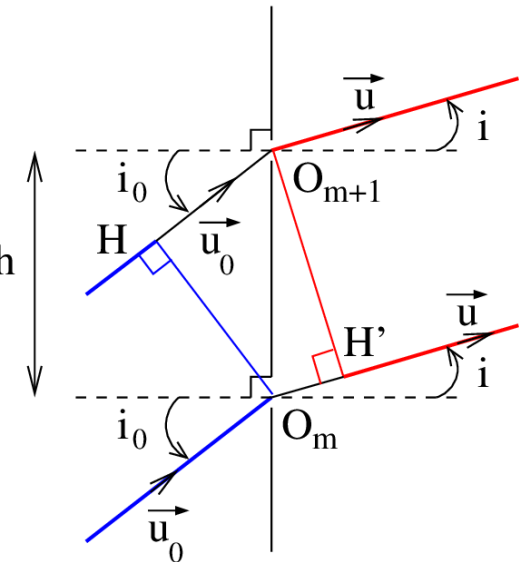
Ensemble de N fentes identiques, parallèles, coplanaires et équidistantes

Déphasage entre les ondes passant par deux fentes successives

Pas du réseau = h

$$\Delta\phi(i) = \frac{2\pi h}{\lambda} (\sin i_0 - \sin i)$$

$$I(i) = I_0 \frac{\sin^2 \left(\frac{N \Delta\phi(i)}{2} \right)}{\sin^2 \left(\frac{\Delta\phi(i)}{2} \right)}$$

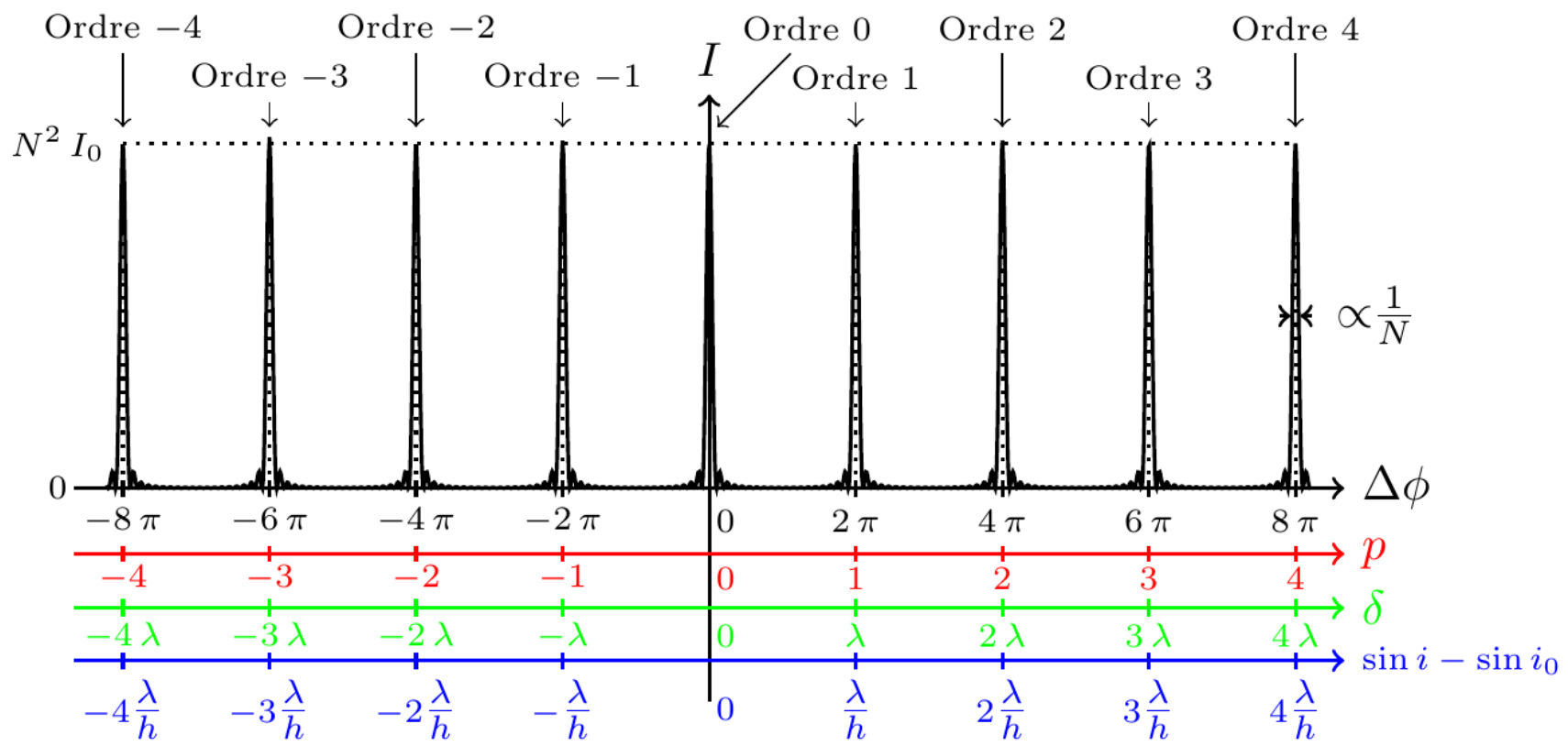


Réseau ligné (sans diffraction) : intensité

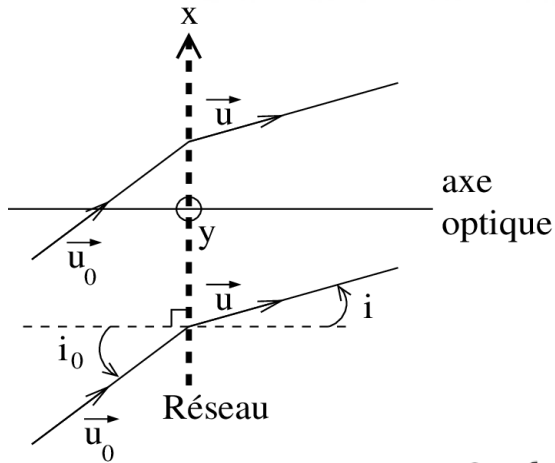
$$I(i) = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{N \Delta\phi(i)}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\Delta\phi(i)}{2}\right)}$$

Pics maximum de largeur $\sim \lambda/(Nh)$

Écart entre deux pics maximum λ/h



Réseau ligné avec diffraction



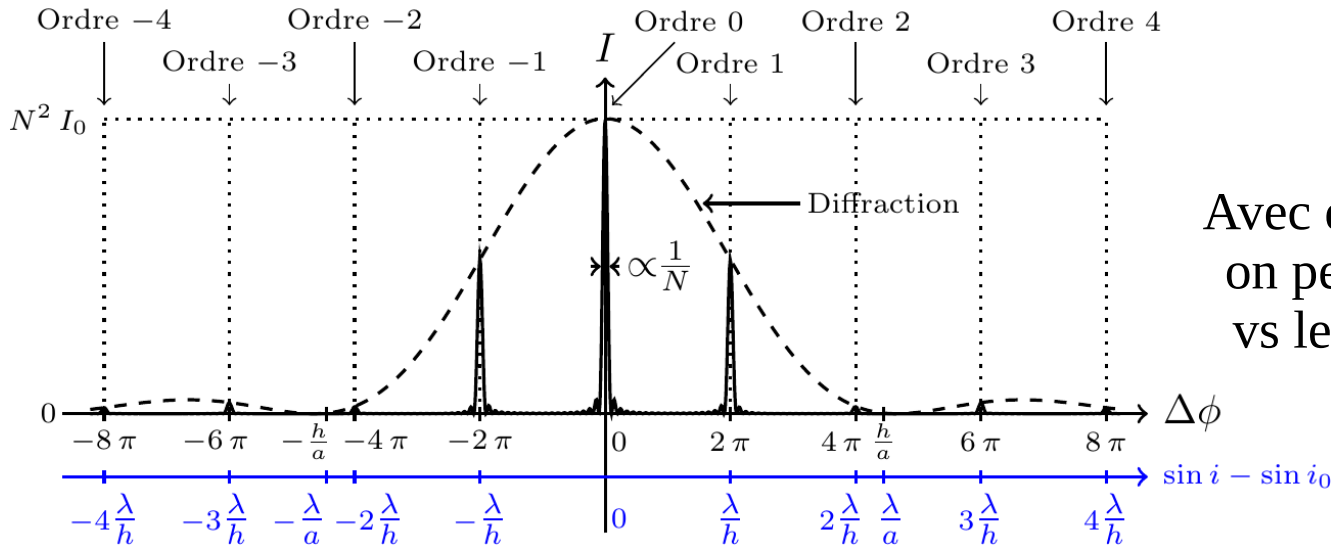
Réseau ligné

Ensemble de N fentes identiques, parallèles, coplanaires et équidistantes

Largeur d'une fente = a et pas du réseau = h

$$I(\Delta\phi) = \underbrace{I_0 \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\Delta\phi}{2} \frac{a}{h}\right)}_{\text{Diffraction}} \underbrace{\frac{\sin^2\left(\frac{N\Delta\phi}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right)}}_{\text{Interferences}}$$

$$\Delta\phi(i) = \frac{2\pi h}{\lambda} (\sin i_0 - \sin i)$$



Avec d'autres types de réseaux on peut décaler la diffraction vs les ordres d'interférences

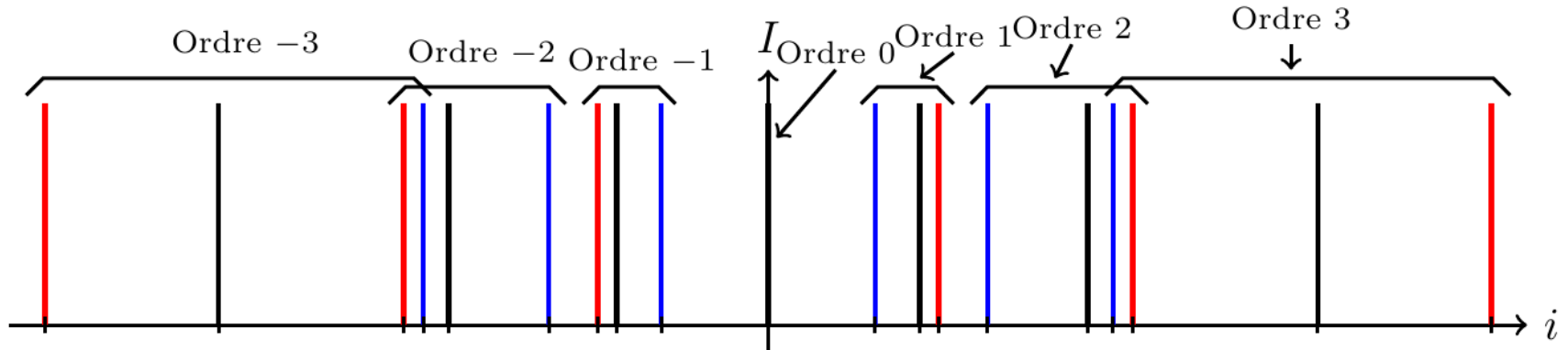
Plan

- Interférences lumineuses à deux ondes
 - ✓ Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »
 - ✓ Cas général
 - ✓ Localisation des franges
 - ✓ Séparation de faisceau : trous d'Young
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame à faces parallèles
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame d'épaisseur variable
 - ✓ Lumière polychromatique (doublet de raies spectrales et bande spectrale)
- Interférences lumineuses à N ondes : réseaux et spectroscopie
 - ✓ Réseau ligné plan
 - ✓ Utilisation en spectroscopie
 - ✓ Pouvoir de résolution spectrale
 - ✓ Autres interféromètres à N ondes
- FTO et interféromètre
 - ✓ Résolution angulaire et couverture de l'espace des fréquences
 - ✓ Mesure d'un objet étendu
 - ✓ Exemples d'instruments en astronomie

Spectroscopie avec un réseau ligné

$$\sin i_K = \sin i_0 + K \frac{\lambda}{h} \quad \text{avec} \quad K \in \mathbb{Z}$$

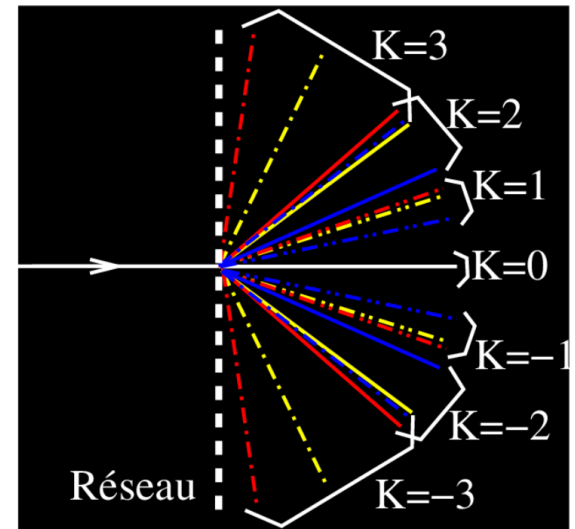
Ordre d'interférence



Angle de déviation dépend de λ

Déviation n'est pas linéaire → augmente avec l'ordre

Attention aux chevauchements



Plan

- Interférences lumineuses à deux ondes
 - ✓ Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »
 - ✓ Cas général
 - ✓ Localisation des franges
 - ✓ Séparation de faisceau : trous d'Young
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame à faces parallèles
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame d'épaisseur variable
 - ✓ Lumière polychromatique (doublet de raies spectrales et bande spectrale)
- Interférences lumineuses à N ondes : réseaux et spectroscopie
 - ✓ Réseau ligné plan
 - ✓ Utilisation en spectroscope
 - ✓ Pouvoir de résolution spectrale
 - ✓ Autres interféromètres à N ondes
- FTO et interféromètre
 - ✓ Résolution angulaire et couverture de l'espace des fréquences
 - ✓ Mesure d'un objet étendu
 - ✓ Exemples d'instruments en astronomie

Dispersion spectrale et résolution spectrale

$$\sin i_K = \sin i_0 + K \frac{\lambda}{h} \quad \text{avec} \quad K \in \mathbb{Z} \quad \begin{array}{l} \text{Ordre d'interférence} \\ \swarrow \end{array}$$

Dispersion spectrale :

$$\frac{di}{d\lambda} = \frac{K}{h \cos i}$$

Résolution spectrale :

$$\mathcal{R}_{\text{reseau}} = \left| \frac{\lambda}{\Delta\lambda_{\min}} \right| = N K$$

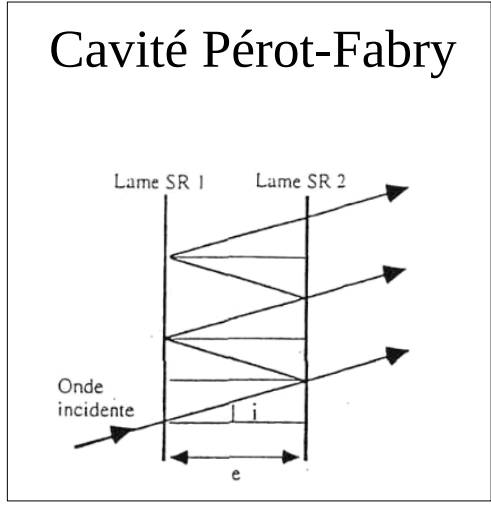
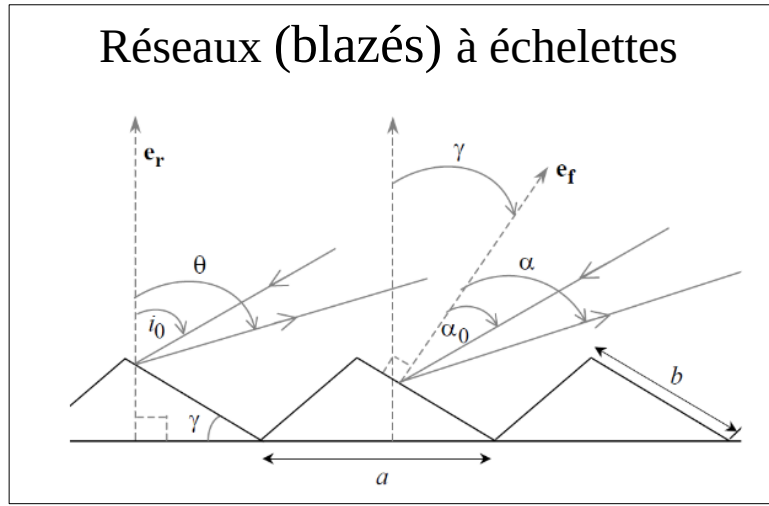
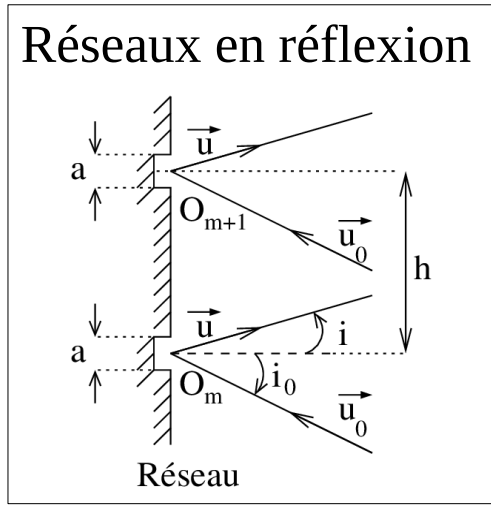
Définition générale

Cas du réseau ligné

Plan

- Interférences lumineuses à deux ondes
 - ✓ Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »
 - ✓ Cas général
 - ✓ Localisation des franges
 - ✓ Séparation de faisceau : trous d'Young
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame à faces parallèles
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame d'épaisseur variable
 - ✓ Lumière polychromatique (doublet de raies spectrales et bande spectrale)
- Interférences lumineuses à N ondes : réseaux et spectroscopie
 - ✓ Réseau ligné plan
 - ✓ Utilisation en spectroscope
 - ✓ Pouvoir de résolution spectrale
 - ✓ Autres interféromètres à N ondes
- FTO et interféromètre
 - ✓ Résolution angulaire et couverture de l'espace des fréquences
 - ✓ Mesure d'un objet étendu
 - ✓ Exemples d'instruments en astronomie

Autres interféromètres à N ondes




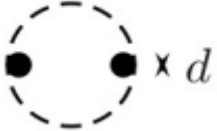
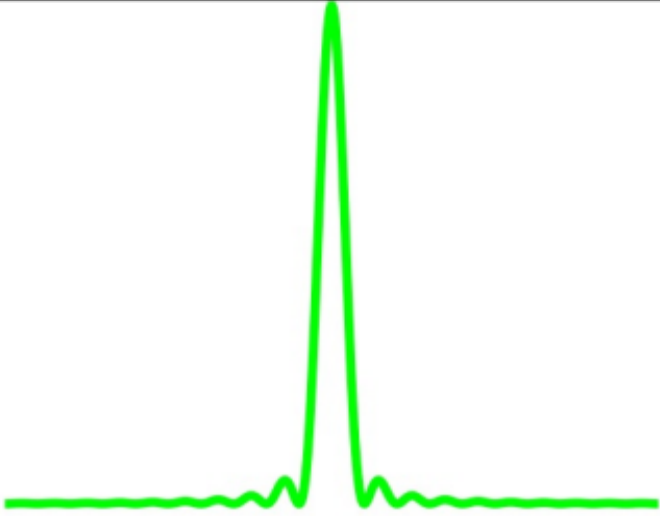
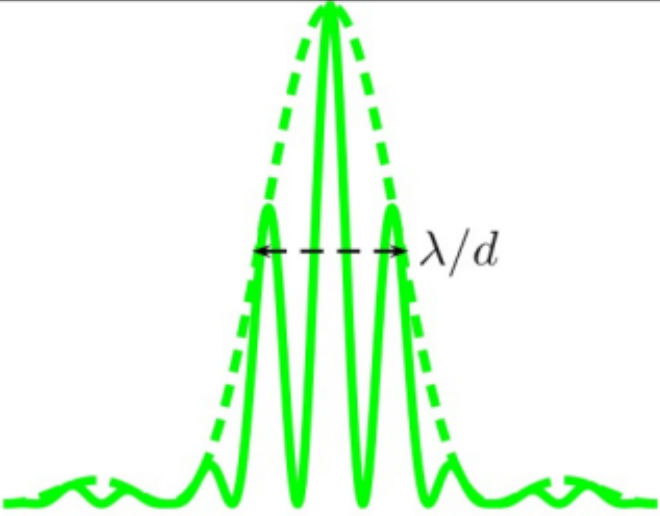
Et tous les dérivés !

Plan

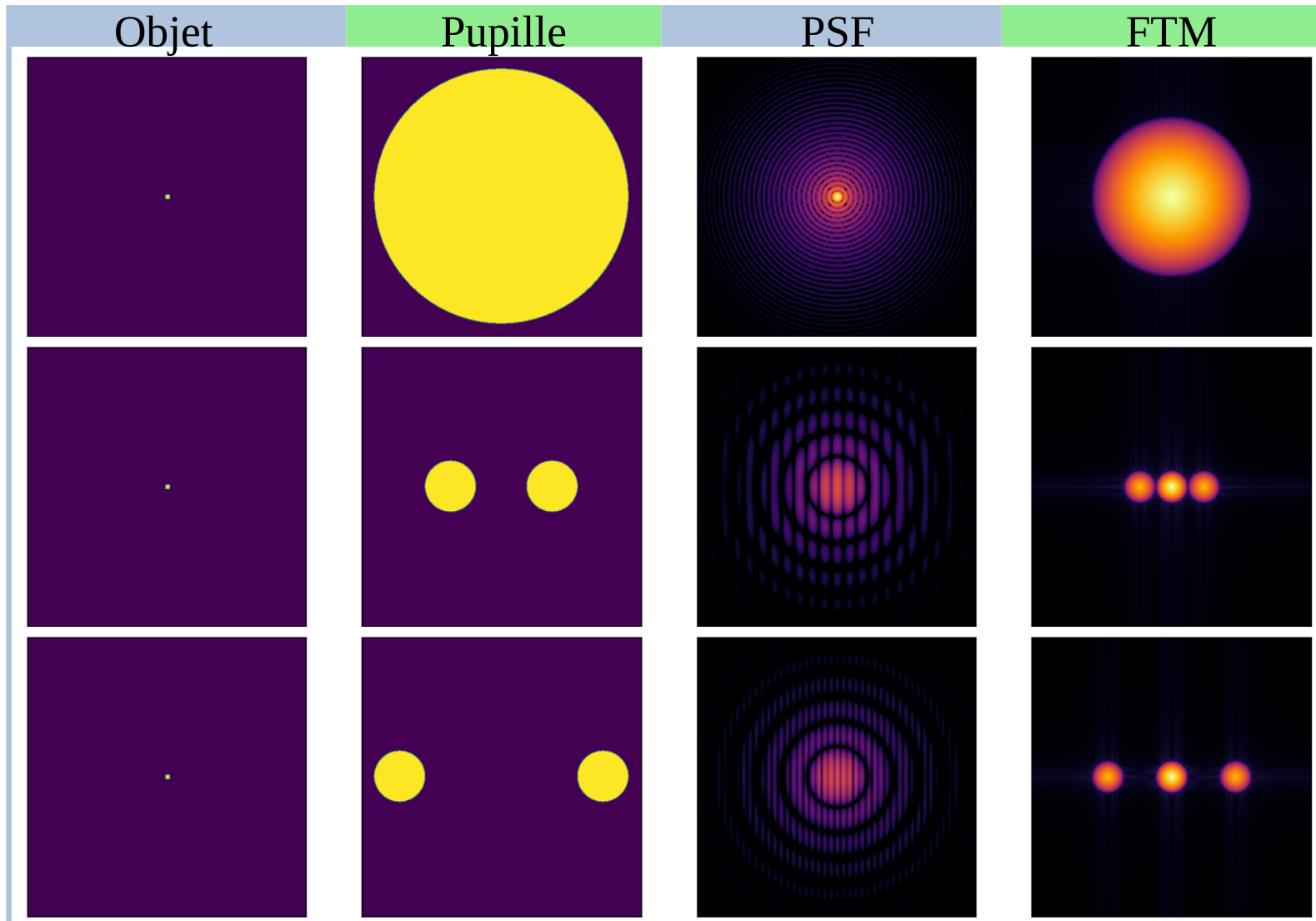
- Interférences lumineuses à deux ondes
 - ✓ Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »
 - ✓ Cas général
 - ✓ Localisation des franges
 - ✓ Séparation de faisceau : trous d'Young
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame à faces parallèles
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame d'épaisseur variable
 - ✓ Lumière polychromatique (doublet de raies spectrales et bande spectrale)
- Interférences lumineuses à N ondes : réseaux et spectroscopie
 - ✓ Réseau ligné plan
 - ✓ Utilisation en spectroscope
 - ✓ Pouvoir de résolution spectrale
 - ✓ Autres interféromètres à N ondes
- FTO et interféromètre astronomie
 - ✓ Résolution angulaire et couverture de l'espace des fréquences
 - ✓ Mesure d'un objet étendu
 - ✓ Exemples d'instruments en astronomie

Interférométrie optique en haute résolution angulaire

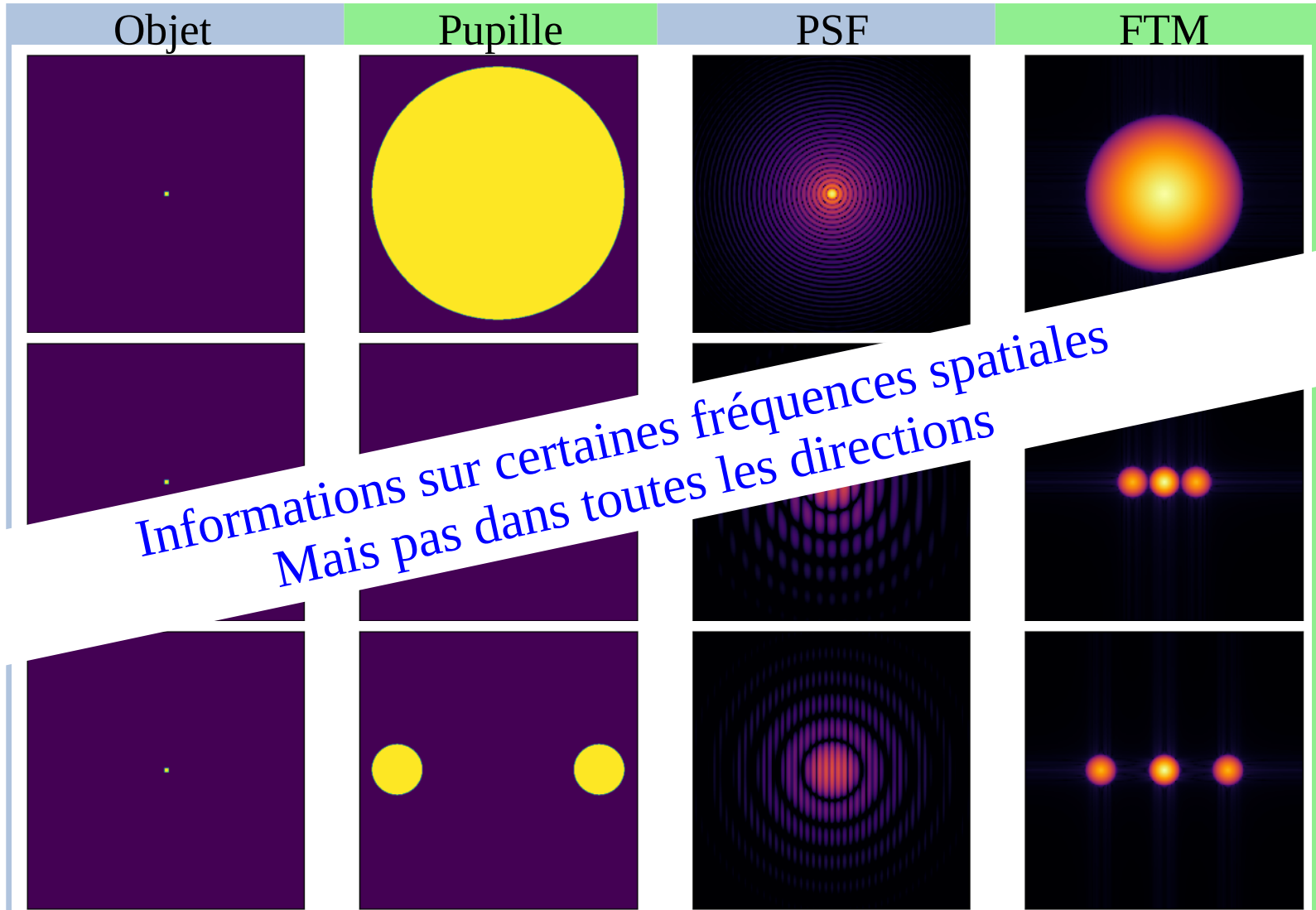
Haute résolution angulaire avec de petits télescopes

<p>Pupille</p>	<p>Monolithique </p> <p>$\longleftrightarrow B$</p>	<p>À 2 télescopes </p> <p>$\longleftrightarrow B$</p>
<p>Réponse impulsionnelle</p>		 <p>λ/d</p>
<p>Résolution</p>	<p>$\longleftrightarrow \lambda/B$</p>	<p>$\longleftrightarrow \lambda/B$</p>

Pupille, PSF et FTO



Pupille, PSF et FTO



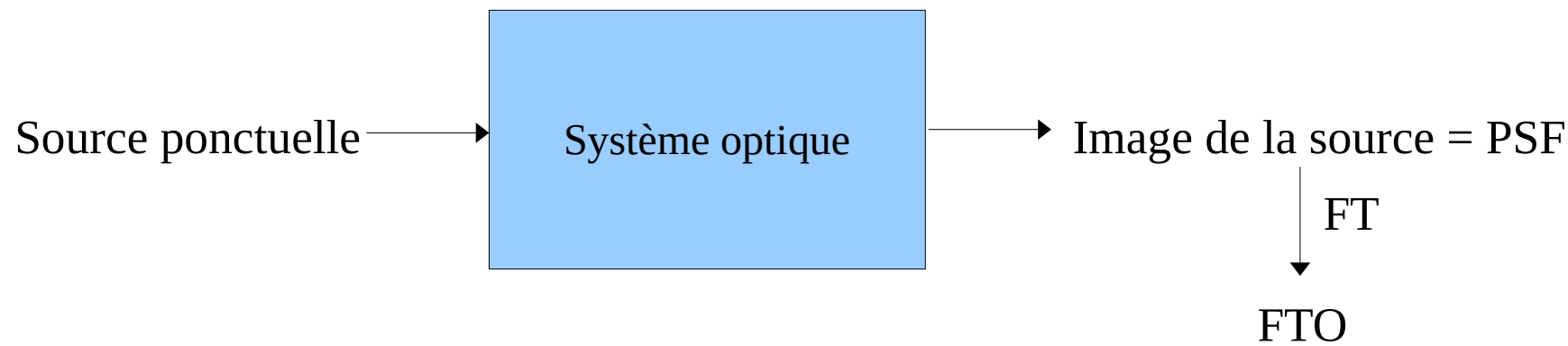
Informations sur certaines fréquences spatiales
Mais pas dans toutes les directions

Plan

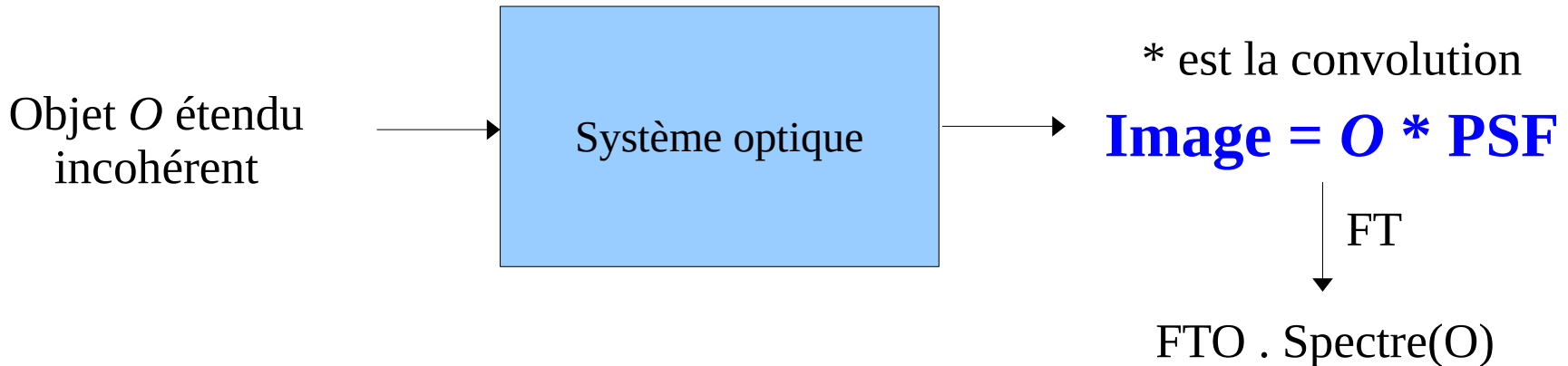
- Interférences lumineuses à deux ondes
 - ✓ Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »
 - ✓ Cas général
 - ✓ Localisation des franges
 - ✓ Séparation de faisceau : trous d'Young
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame à faces parallèles
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame d'épaisseur variable
 - ✓ Lumière polychromatique (doublet de raies spectrales et bande spectrale)
- Interférences lumineuses à N ondes : réseaux et spectroscopie
 - ✓ Réseau ligné plan
 - ✓ Utilisation en spectroscope
 - ✓ Pouvoir de résolution spectrale
 - ✓ Autres interféromètres à N ondes
- FTO et interféromètre
 - ✓ Résolution angulaire et couverture de l'espace des fréquences
 - ✓ Mesure d'un objet étendu
 - ✓ Exemples d'instruments en astronomie

Rappel : l'image d'un objet étendu

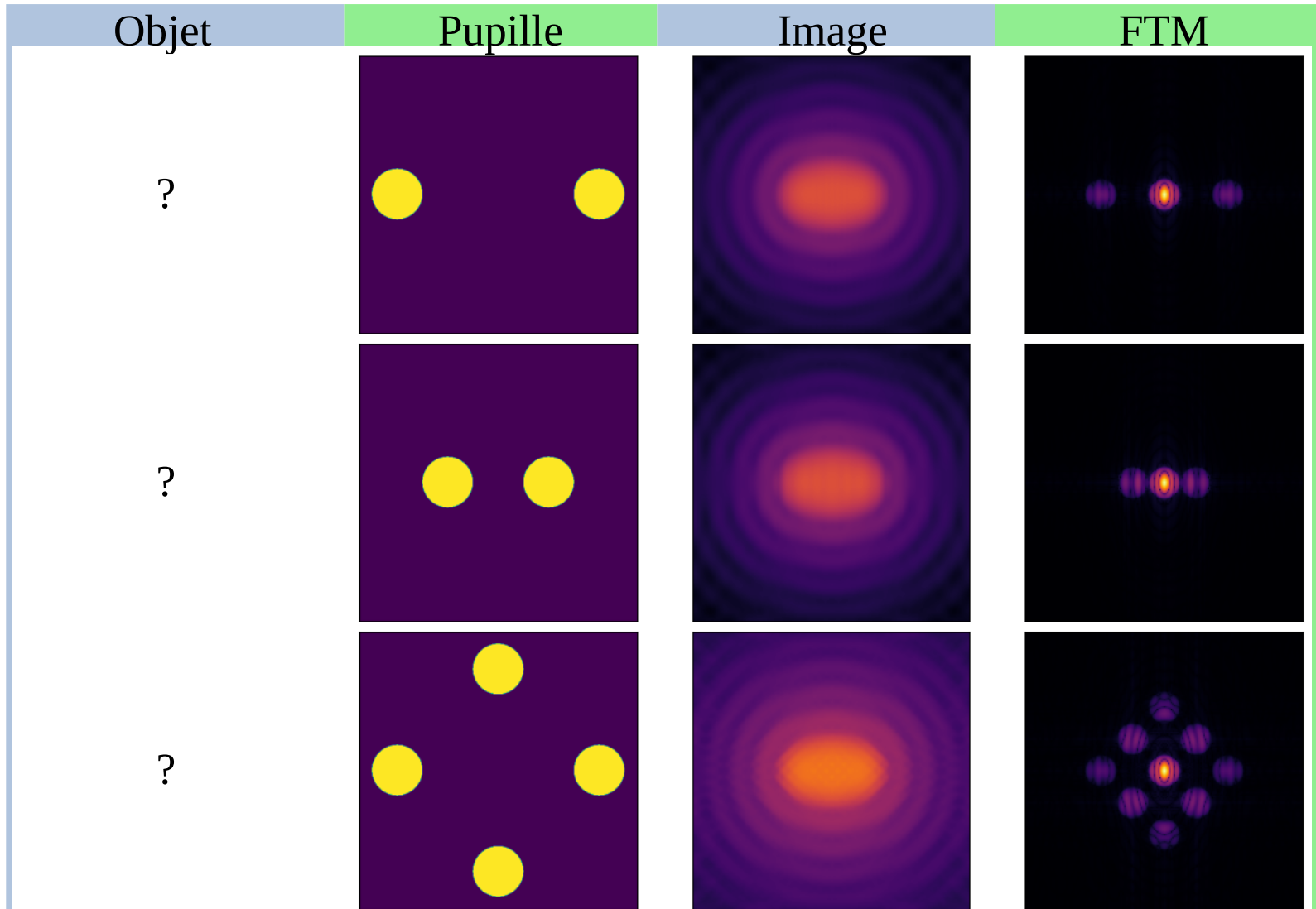
PSF ou FEP = $| FT [P] |^2$ = réponse impulsionnelle d'un système optique



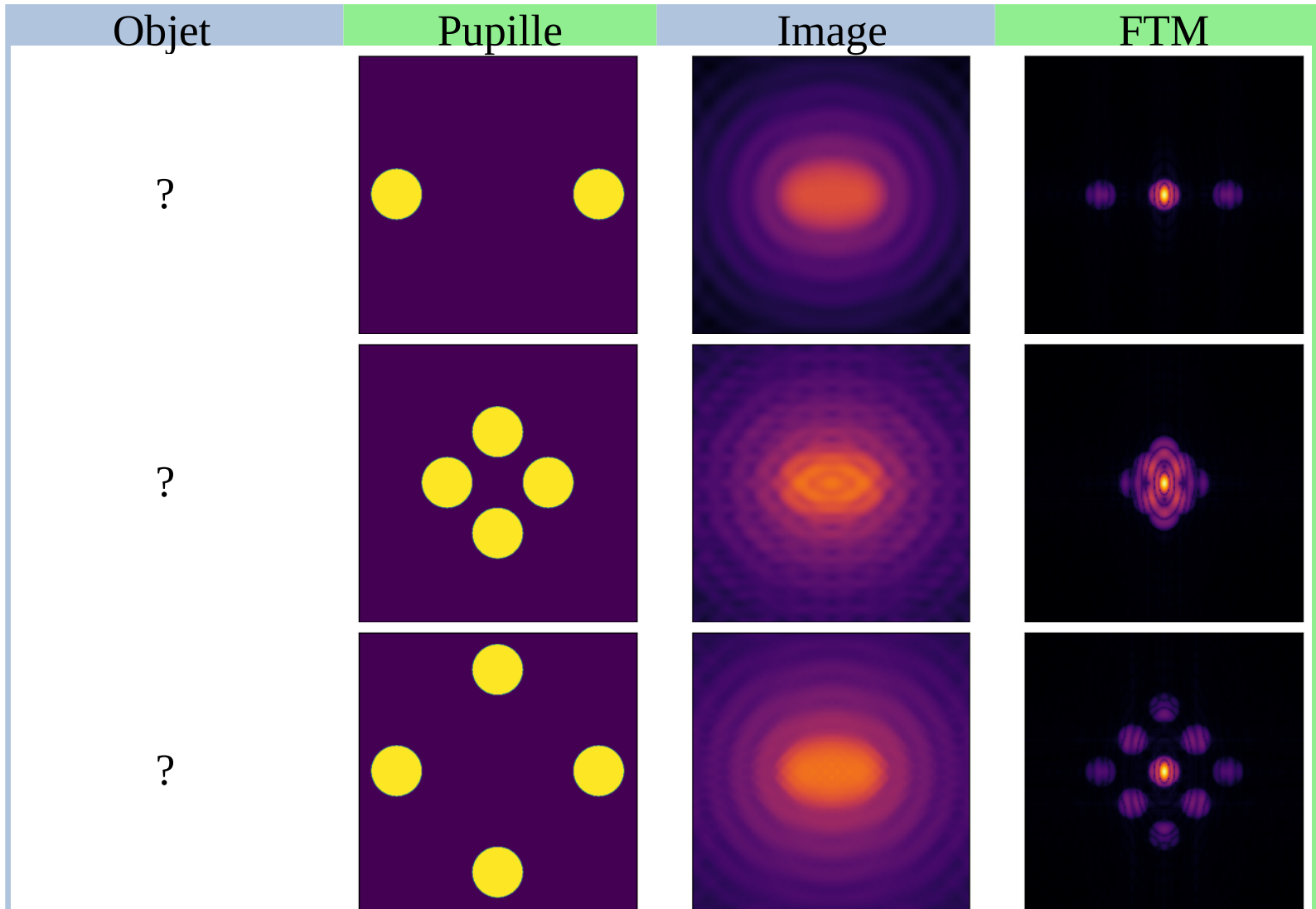
Si la PSF est la même dans tout le champ d'observation



Objet étendu observé par interférométrie optique (1/2)



Objet étendu observé par interférométrie optique (2/2)

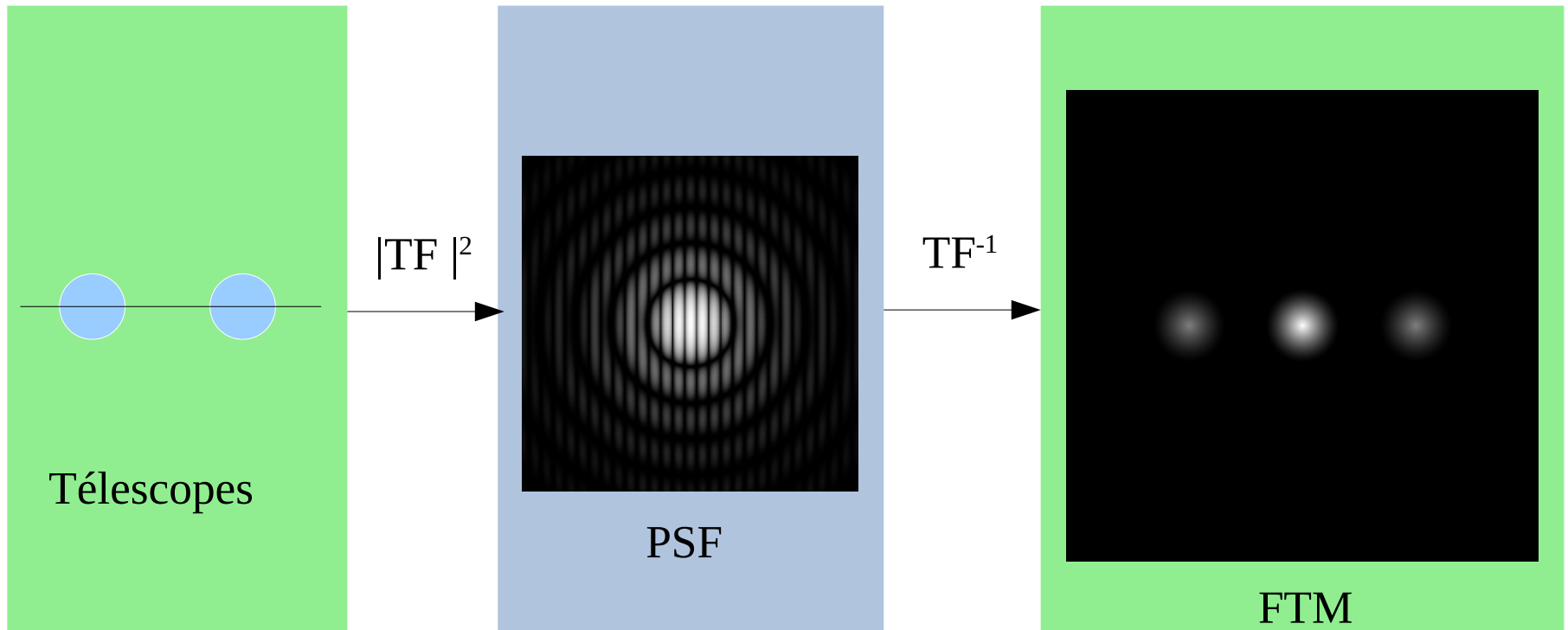


Idée : faire tourner la base de l'interféromètre

2 télescopes

Base fixe

Objet ponctuel et à l'infini

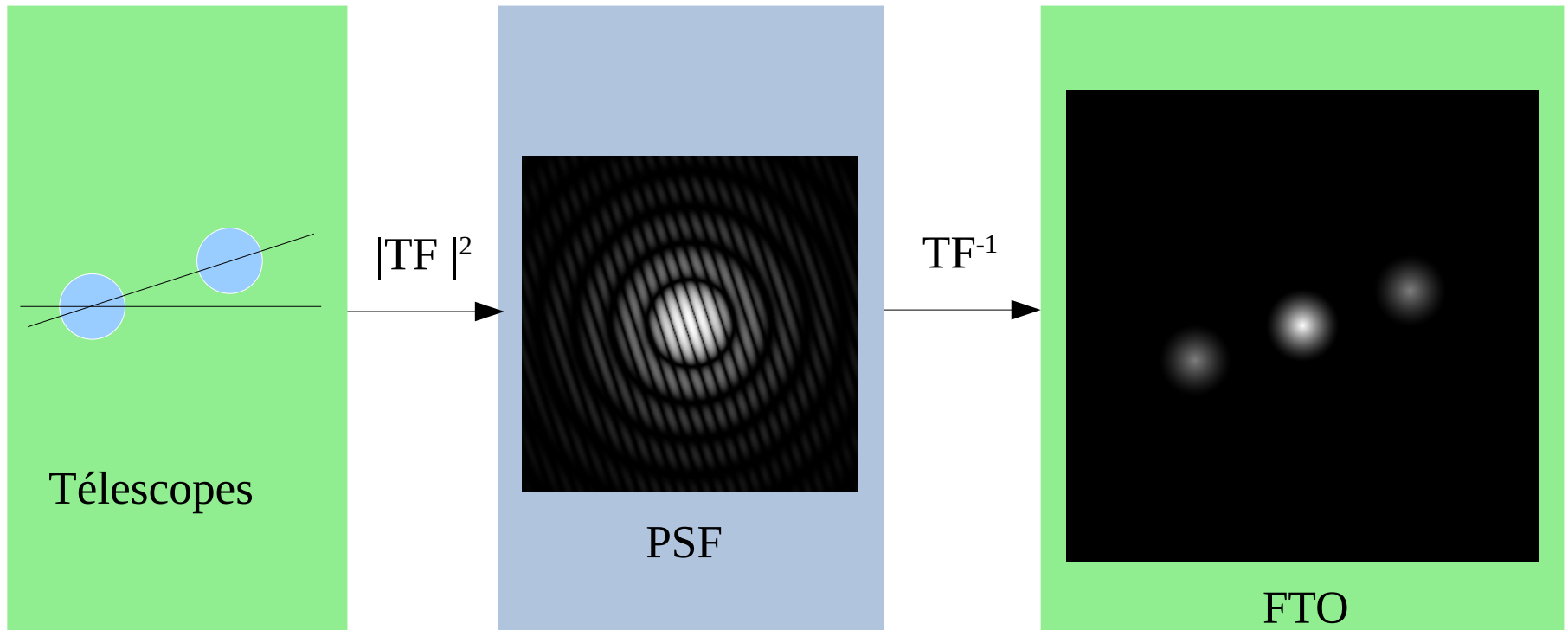


Idée : faire tourner la base de l'interféromètre

2 télescopes

Base fixe

Objet ponctuel et à l'infini

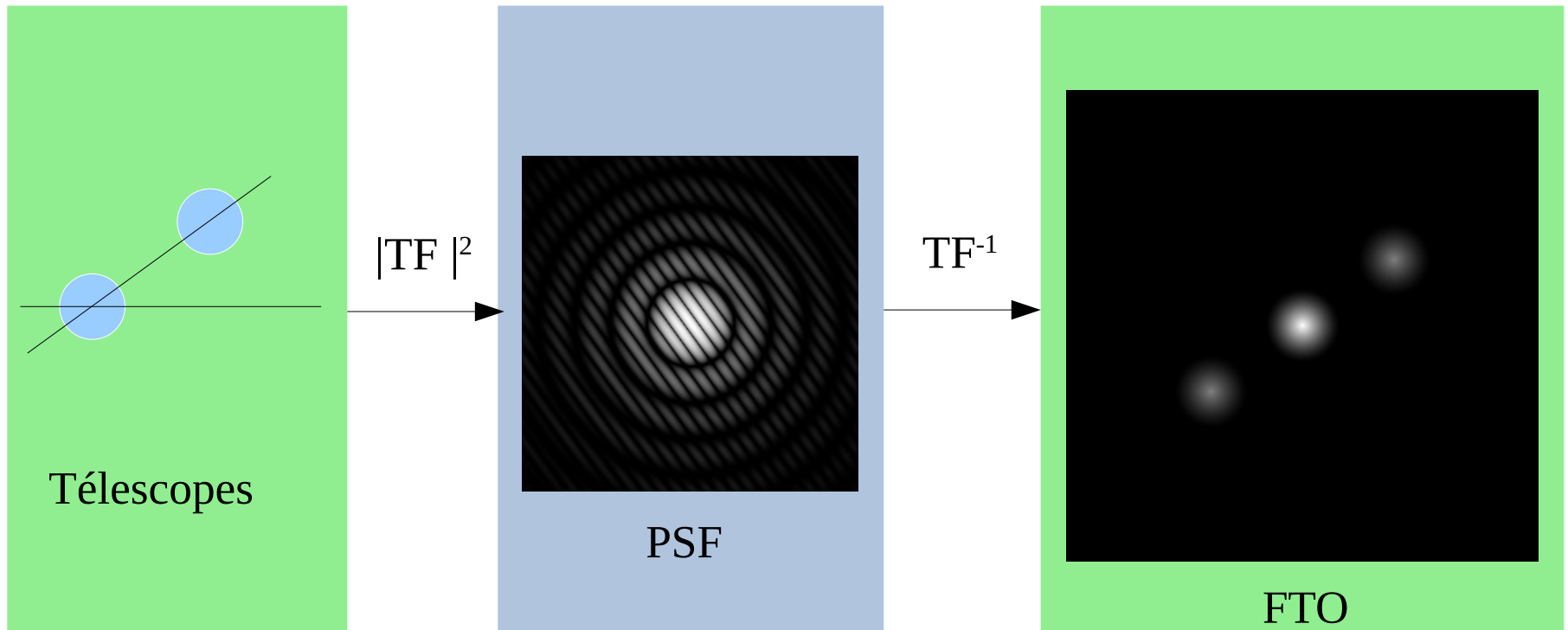


Idée : faire tourner la base de l'interféromètre

2 télescopes

Base fixe

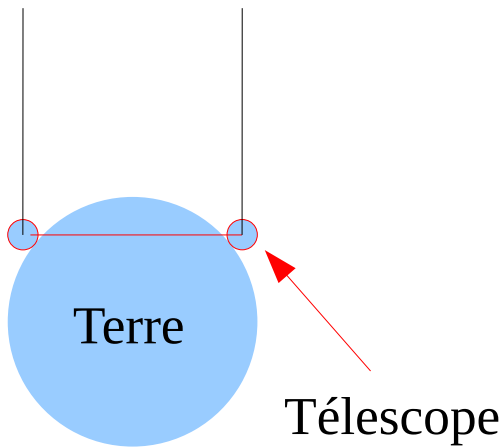
Objet ponctuel et à l'infini



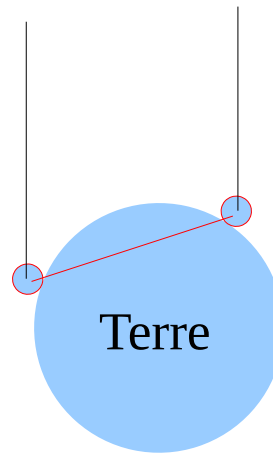
Rotation de la Terre

Rotation Terre → balayage des fréquences spatiales (plan u,v)

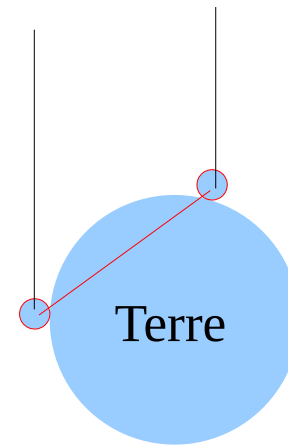
Direction d'observation



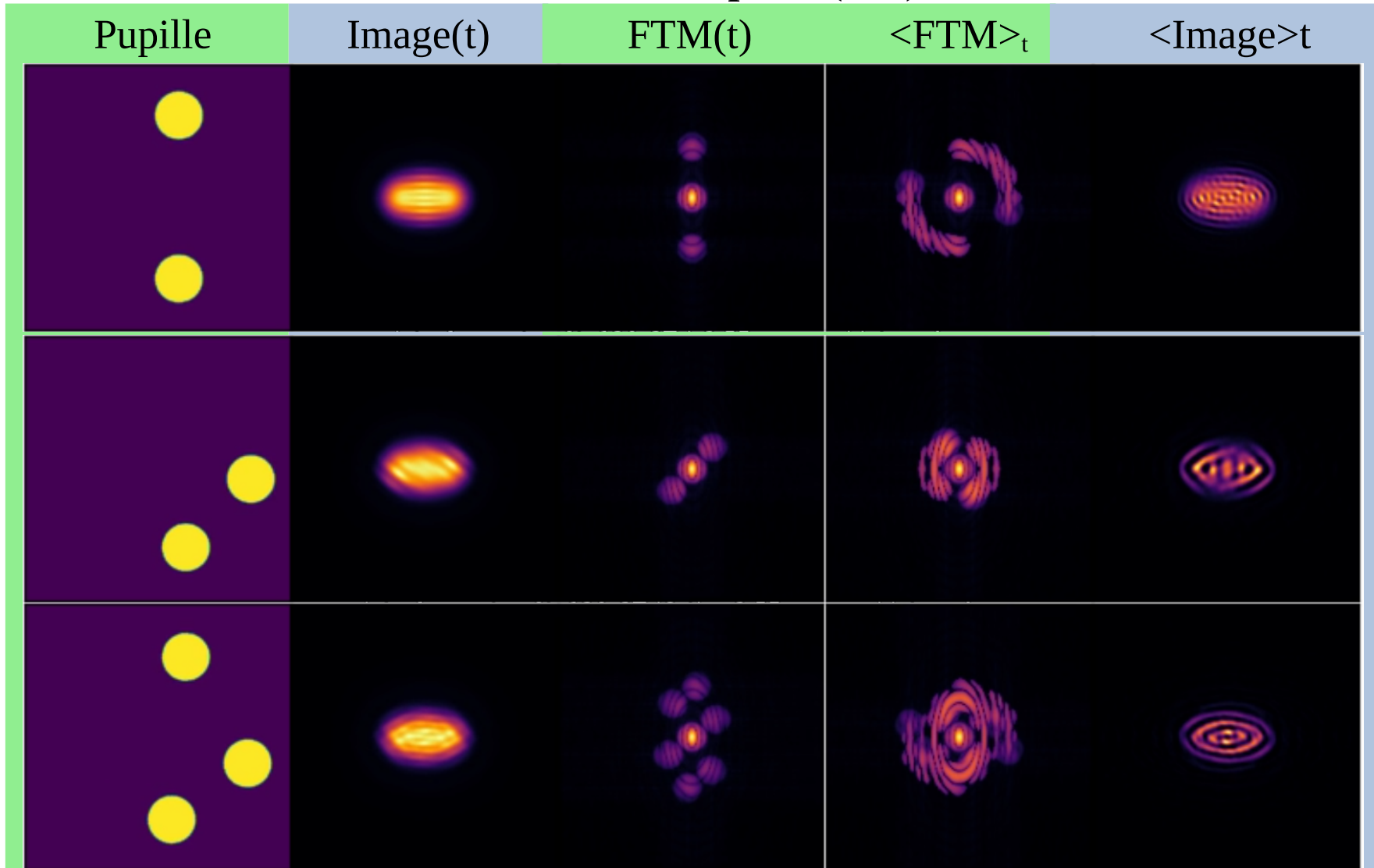
Direction d'observation



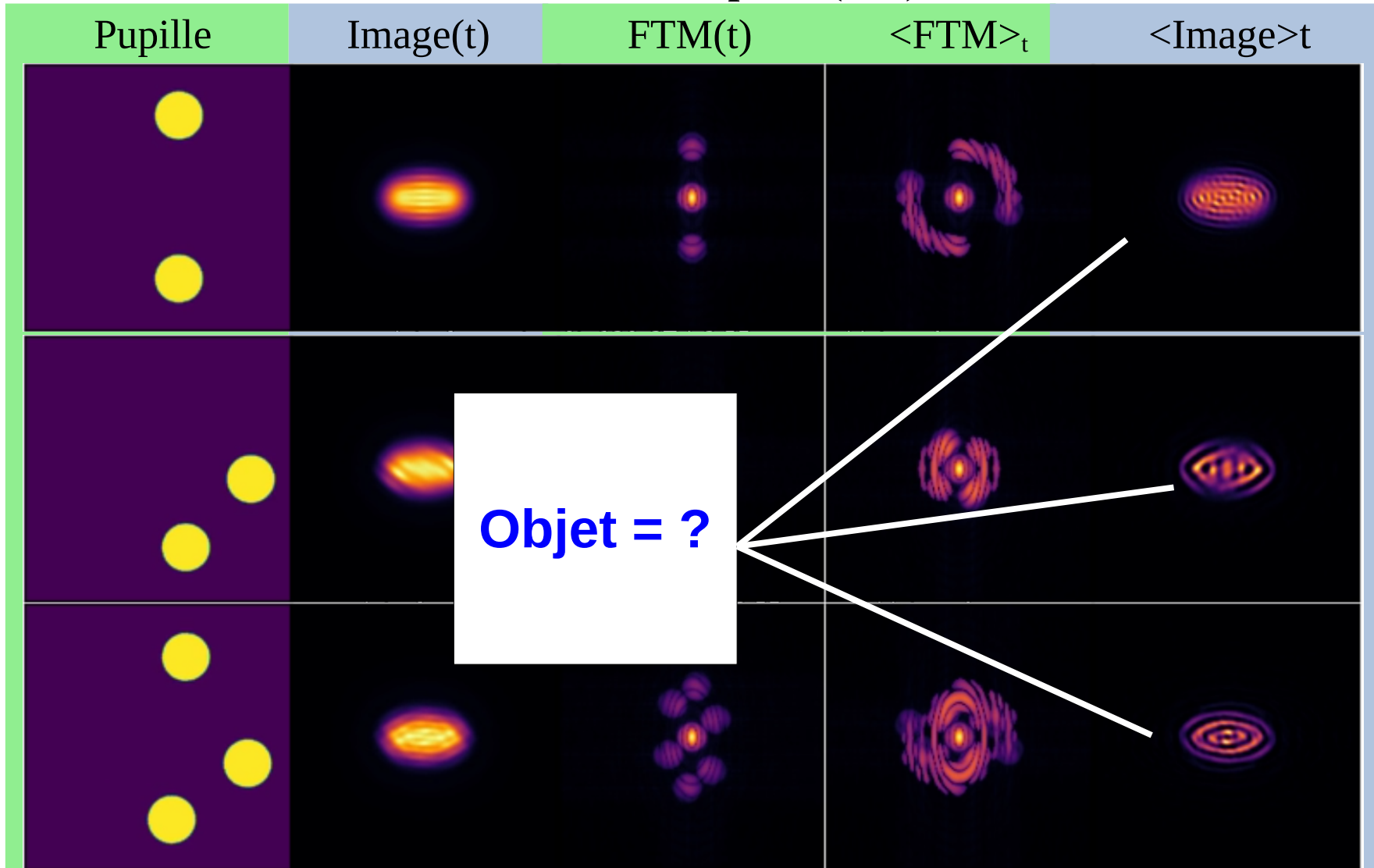
Direction d'observation



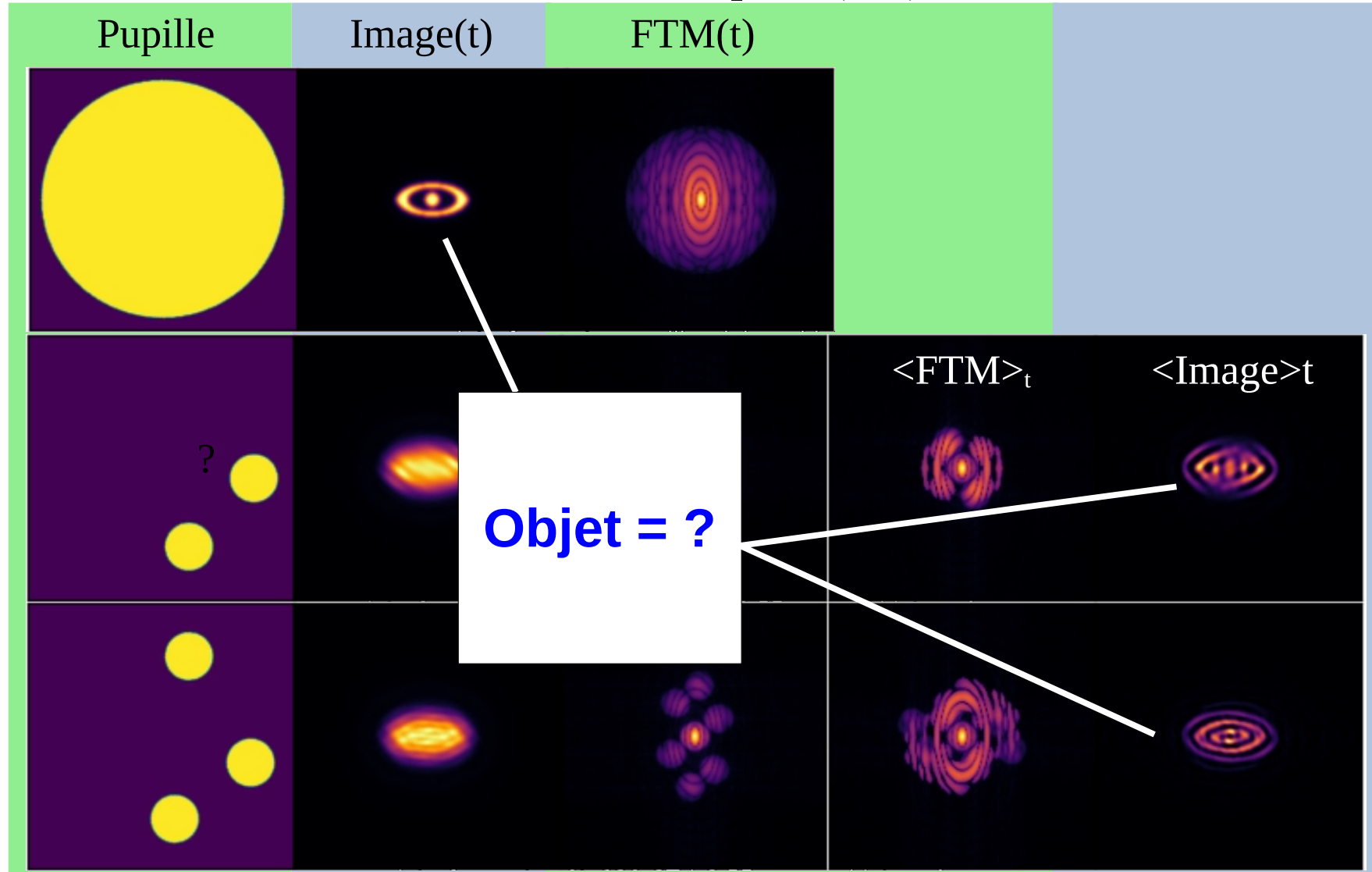
Couverture du plan (u,v)



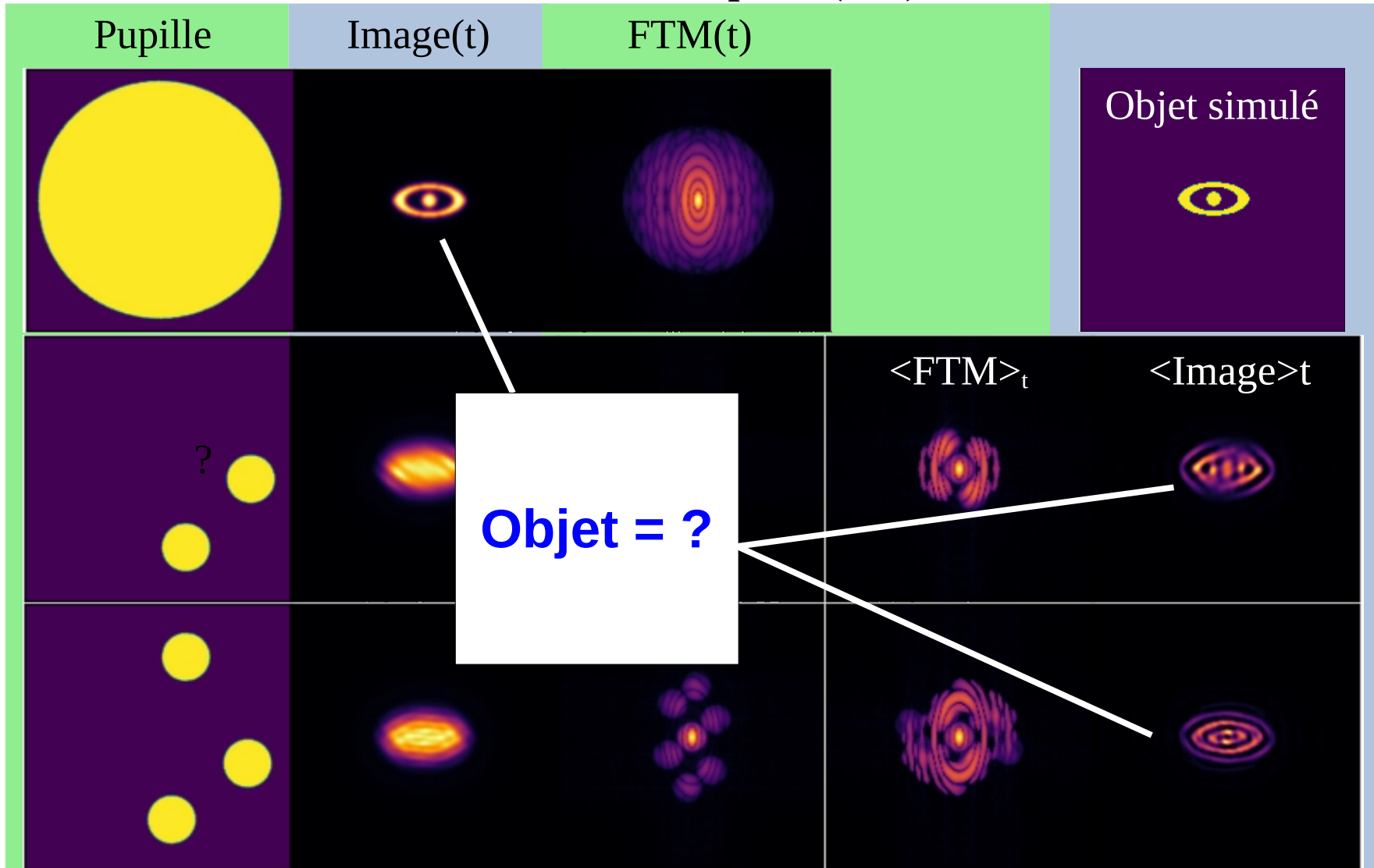
Couverture du plan (u,v)



Couverture du plan (u,v)



Couverture du plan (u,v)



Conclusions sur l'interférométrie optique

- Accès à des **fréquences spatiales non mesurables par un élément de l'interféromètre**
Résolution d'un télescope λ/D avec D le diamètre d'un télescope
Résolution de l'interféromètre λ/B avec B la base
- Utilisation de la rotation de la Terre pour couvrir le plan (u,v) (fréquences spatiales)
- **Impact de la configuration de l'interféromètre**
→ choix de la configuration en fonction des objectifs scientifiques !
- **On ne mesure pas toutes les fréquences spatiales !**
→ attention aux sur-interprétations !
- **Gros travail d'instrumentation !**
 - Optique adaptative
 - Lignes à retard
 - Optique intégrée
 - Travail en optique, mécanique, real time computing, etc

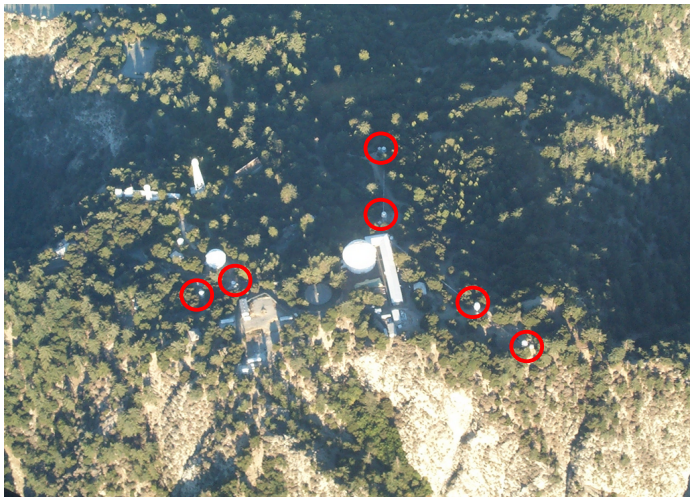
Plan

- Interférences lumineuses à deux ondes
 - ✓ Cas particulier des trous d'Young « traité en diffraction »
 - ✓ Cas général
 - ✓ Localisation des franges
 - ✓ Séparation de faisceau : trous d'Young
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame à faces parallèles
 - ✓ Séparation d'amplitude : lame d'épaisseur variable
 - ✓ Lumière polychromatique (doublet de raies spectrales et bande spectrale)
- Interférences lumineuses à N ondes : réseaux et spectroscopie
 - ✓ Réseau ligné plan
 - ✓ Utilisation en spectroscope
 - ✓ Pouvoir de résolution spectrale
 - ✓ Autres interféromètres à N ondes
- FTO et interféromètre
 - ✓ Résolution angulaire et couverture de l'espace des fréquences
 - ✓ Mesure d'un objet étendu
 - ✓ Exemples d'instruments en astronomie

Exemples d'interféromètres optiques

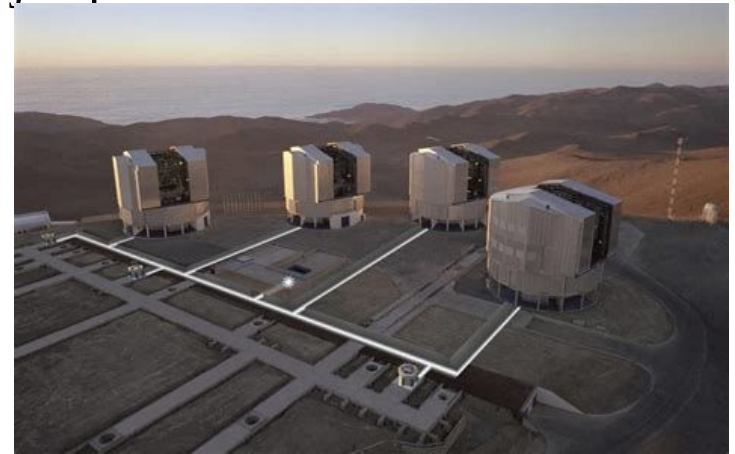
Keck I et II (Hawaii)

2 télescopes $D=10\text{m}$
 $B=85\text{m}$



Very Large Telescope (Chili)

4 télescopes $D=8\text{m}$
4 télescopes $D'=1,8\text{m}$
 B jusqu'à 200m



Chara (Mont Wilson)

6 télescopes $D=1\text{m}$
 B jusqu'à 330m

Les interféromètres en service au VLT

Pionier

UT et AT

$\lambda = 1,5 \text{ à } 2,4 \mu\text{m}$

Planet-forming star environment

Résolution angulaire = 2,5 milliarcsec

Résolution spectrale = low

[Vidéo de présentation](#)

Matisse

UT et AT

$\lambda = 3,2 \text{ à } 13 \mu\text{m}$

Massive stars, AGN, exoplanets

Résolution angulaire = 5 à 10 milliarcsec

Résolution spectrale = 30 à 5000

[Vidéo de présentation](#)

Gravity

UT with AO

$\lambda = 2,0 \text{ à } 2,4 \mu\text{m}$ (K-band)

Galactic center, AGN, exoplanets, etc

Résolution angulaire = 3 milliarcsec

Résolution spectrale = 22, 300, 4500

[Vidéo de présentation](#)

Gravity / VLT : objectifs scientifiques

- **Horizon des événements au centre de la Voie Lactée**

Et aussi :

- AGN
- Disques circumstellaires et jets autour d'étoiles jeunes
- Caractérisation d'exoplanètes

Déplacement de S2 autour du centre galactique



Mesure de la masse et de la distance du trou noir à 0,3% près !

Gravity / VLT : en quelques mots

Combine 4 faisceaux :

- 4 télescopes UT $D=8\text{m}$
- ou 4 télescopes AT $D'=1,8\text{m}$

Base jusqu'à 200m

Bande K (2,0 à 2,4 μm)

Resolution angulaire

- 4mas à 50mas avec les UT
- 2mas à 140mas avec les AT

Précision des mesures astrométriques : 10 à 100 μas

Gravity / VLT : comment ?

Trois sources observées

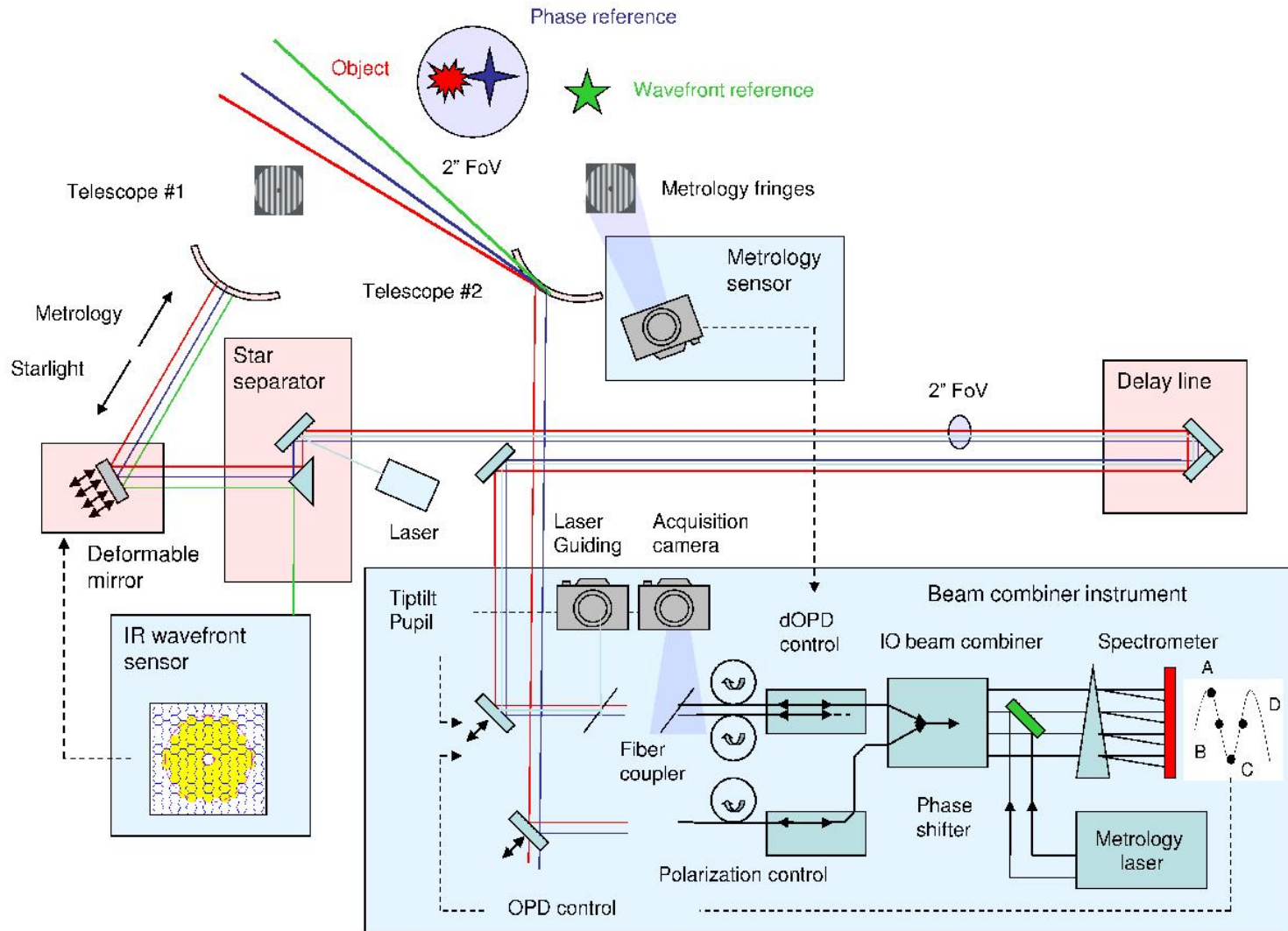
- Source astrophysique
- Étoile de référence pour la stabilisation des franges
- Étoile pour les optiques adaptatives (une OA par télescope)

Deux combinaisons de faisceaux :

- Une pour le fringe tracking
- Une pour l'objet astrophysique

Plusieurs lasers de métrologie pour stabiliser le système dont certains sur les araignées des télescopes

Gravity / VLT : schéma



Gravity / VLT : données

Pour chaque canal spectral :

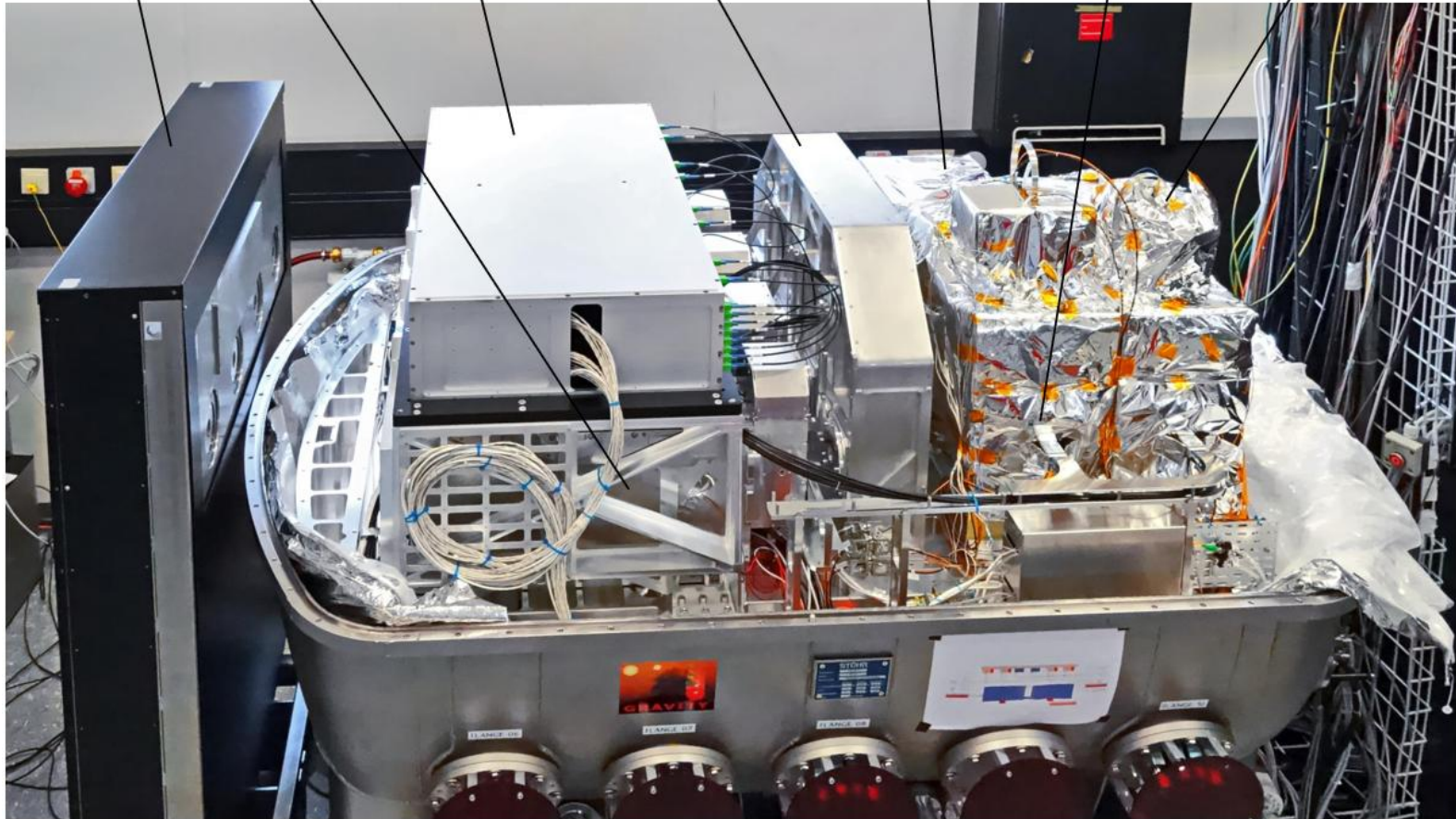
- Visibilité de l'étoile de référence
- Visibilité de l'objet astrophysique
- Phase entre la référence et l'objet astrophysique

Ce qu'on en déduit :

- **Image interférométrique** à partir des visibilités et des clôtures de phase (6 bases instantanées);
- **Astrométrie** à partir des phases différentielles

Gravity / VLT : photo

Calibration unit Fiber control unit Spectrometer Metrology injection
Fiber coupler Acquisition camera Integrated optics



Gravity + en quelques mots

- Nouvelles optiques adaptatives
- Étoiles laser (2025)
- 30 % du ciel accessible
- Sensibilité x100
- Résolution angulaire x15



Besoin de monde !

Fin du cours 3