

# Haute résolution angulaire Intéférométrie optique

**Master 2 A&A : instruments et méthodes d'observations**

**25 octobre 2024**

**Raphaël Galicher**  
raphael.galicher @ obspm.fr

# Plan

## Interférences lumineuses

- Conditions

- Cohérence spatiale

- Cohérence temporelle

## Interférométrie optique en astronomie

- Intérêt

- Multi-télescopes avec recombinaison co-axiale

- Multi-télescopes avec recombinaison multi-axiale

## Interférométrie et turbulence

- Impact de la turbulence

- Méthodes passives et méthodes actives

  - Filtrage spatial avec fibre monomode ( $D \sim r_0$ )

  - Interférométrie de speckles ( $D > r_0$ )

## Synthèse d'ouverture

## Exemples d'interféromètres optiques

# Interférences lumineuses : conditions nécessaires

## Source naturelle

Émission d'ondes lumineuses par atomes est aléatoire et non corrélée en

- fréquence (largeur de raie)
- phase (émission spontanée)
- polarisation

=> **Une paquet d'onde n'interfère qu'avec lui-même !**

Interféromètre optique crée au moins deux sources fictives secondaires cohérentes à partir d'une source primaire (l'objet observé)

Condition supplémentaire 1 : si source primaire étendue, la visibilité des franges peut être faible => **cohérence spatiale**

Condition supplémentaire 2 : si source primaire spectralement large, visibilité des franges peut être faible => **cohérence temporelle**

## Interférences lumineuses

Conditions

Cohérence spatiale

Cohérence temporelle

## Interférométrie optique en astronomie

Intérêt

Multi-télescopes avec recombinaison co-axiale

Multi-télescopes avec recombinaison multi-axiale

## Interférométrie et turbulence

Impact de la turbulence

Méthodes passives et méthodes actives

Filtrage spatial avec fibre monomode ( $D \sim r_0$ )

Interférométrie de speckles ( $D > r_0$ )

## Synthèse d'ouverture

## Exemples d'interféromètres optiques

# Trous d'Young et source ponctuelle hors axe

- 1 source ponctuelle à l'infini hors axe inclinée de  $\alpha$
- 2 trous petits devant leur séparation  $B$   
(diffraction négligée ici)

Champs incidents sur les trous :

$$E(M_1) = E_0 \exp(i \vec{k}_s \cdot \vec{r}_1 - \omega t)$$

Vecteur d'onde

pulsation

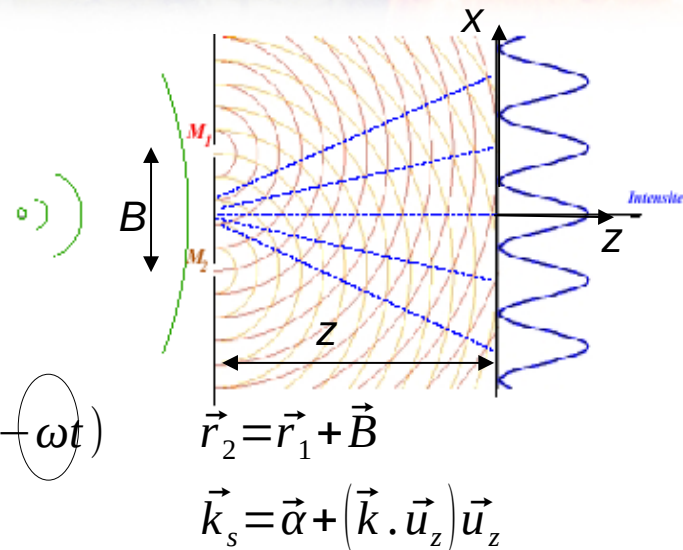
instant

Position du trou 1 par rapport à la source

$$E(M_2) = E_0 \exp(i \vec{k}_s \cdot \vec{r}_2 - \omega t)$$

amplitude

Position du trou 2 par rapport à la source



# Trous d'Young et source ponctuelle hors axe

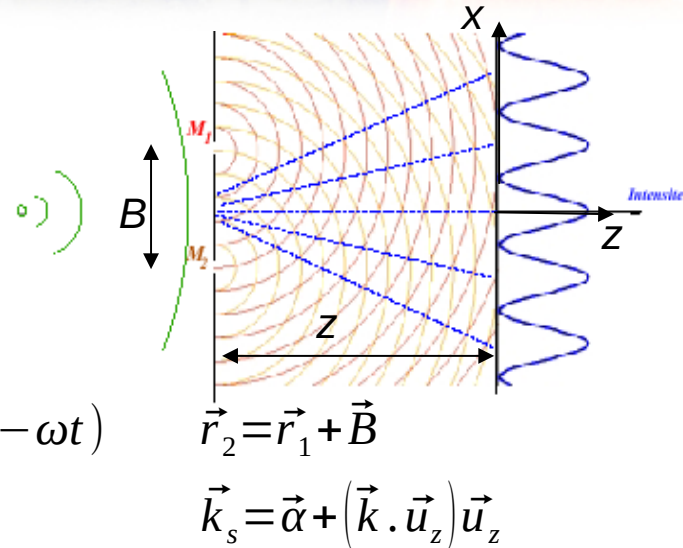
- 1 source ponctuelle à l'infini hors axe inclinée de  $\alpha$
- 2 trous petits devant leur séparation  $B$   
(diffraction négligée ici)

Champs incidents sur les trous :

$$E(M_1) = E_0 \exp(i \vec{k}_s \cdot \vec{r}_1 - \omega t) \quad E(M_2) = E_0 \exp(i \vec{k}_s \cdot \vec{r}_2 - \omega t)$$

Champs en M sur l'écran :

$$E(M) = \underbrace{E(M_1) \frac{\exp(i \vec{k} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_1))}{|\vec{r} - \vec{r}_1|}}_{E_1} + \underbrace{E(M_2) \frac{\exp(i \vec{k} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_2))}{|\vec{r} - \vec{r}_2|}}_{E_2}$$



# Trous d'Young et source ponctuelle hors axe

- 1 source ponctuelle à l'infini hors axe inclinée de  $\alpha$
- 2 trous petits devant leur séparation  $B$   
(diffraction négligée ici)

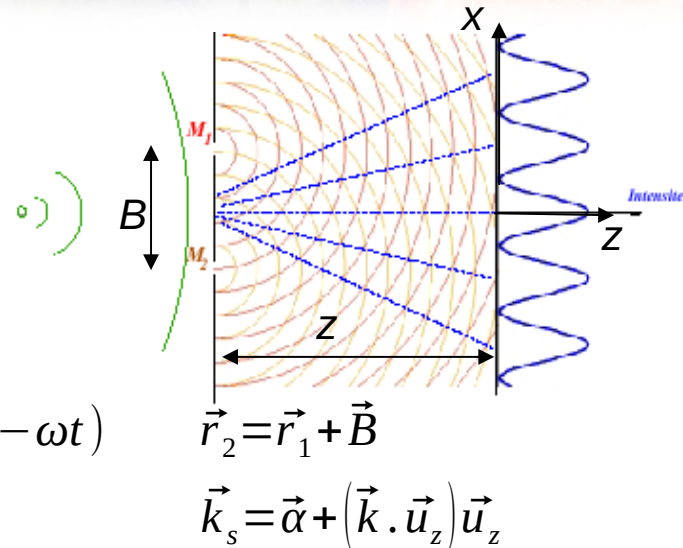
Champs incidents sur les trous :

$$E(M_1) = E_0 \exp(i \vec{k}_s \cdot \vec{r}_1 - \omega t) \quad E(M_2) = E_0 \exp(i \vec{k}_s \cdot \vec{r}_2 - \omega t)$$

Champs en M sur l'écran :

$$E(M) = \underbrace{E(M_1) \frac{\exp(i \vec{k} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_1))}{|\vec{r} - \vec{r}_1|}}_{E_1} + \underbrace{E(M_2) \frac{\exp(i \vec{k} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_2))}{|\vec{r} - \vec{r}_2|}}_{E_2}$$

$$I_{\vec{\alpha}}(M) = \langle \Re(E_1)^2 \rangle + \langle \Re(E_2)^2 \rangle + 2 \Re(\langle E_1 E_2^* \rangle)$$



# Trous d'Young et source ponctuelle hors axe

- 1 source ponctuelle à l'infini hors axe inclinée de  $\alpha$
- 2 trous petits devant leur séparation  $B$  (diffraction négligée ici)

Champs incidents sur les trous :

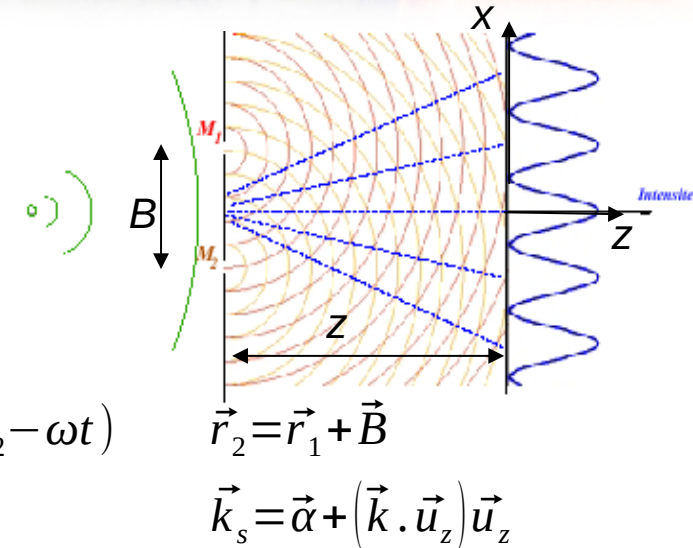
$$E(M_1) = E_0 \exp(i \vec{k}_s \cdot \vec{r}_1 - \omega t) \quad E(M_2) = E_0 \exp(i \vec{k}_s \cdot \vec{r}_2 - \omega t)$$

Champs en M sur l'écran :

$$E(M) = \underbrace{E(M_1)}_{E_1} \frac{\exp(i \vec{k} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_1))}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} + \underbrace{E(M_2)}_{E_2} \frac{\exp(i \vec{k} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_2))}{|\vec{r} - \vec{r}_2|}$$

$$I_{\vec{\alpha}}(M) = \langle \Re(E_1)^2 \rangle + \langle \Re(E_2)^2 \rangle + 2 \Re(\langle E_1 E_2^* \rangle)$$

$$I(x, \vec{B}) \simeq 2 I_0 \left[ 1 + \Re \left( \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \vec{\alpha} \cdot \vec{B} \right) \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x B}{z} \right) \right) \right]$$



Intensité totale  
reçue de la source  
25 octobre 2024

Décalage des franges

Modulation spatiale (=franges)

Raphaël Galicher

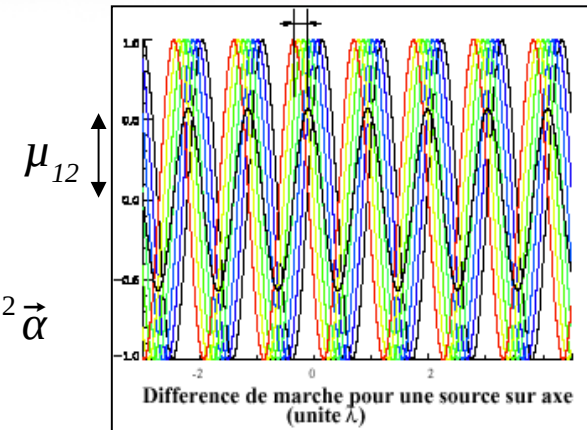
$$I_0 = \langle \Re(E_1)^2 \rangle = \langle \Re(E_2)^2 \rangle$$

# Trous d'Young et source étendue : cohérence spatiale

1 source étendue à l'infini = superposition de sources ponctuelles

Incohérence des sources => superposition des intensités

$$I(x, \vec{B}) \simeq \int_{source} 2I_0^{source}(\vec{\alpha}) \left[ 1 + \Re \left( \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \vec{\alpha} \cdot \vec{B} \right) \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x B}{z} \right) \right) \right] d^2 \vec{\alpha}$$



# Trous d'Young et source étendue : cohérence spatiale

1 source étendue à l'infini = superposition de sources ponctuelles

Incohérence des sources => superposition des intensités

$$I(x, \vec{B}) \simeq \int_{source} 2 I_0^{source}(\vec{\alpha}) \left[ 1 + \Re \left( \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \vec{\alpha} \cdot \vec{B} \right) \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x B}{z} \right) \right) \right] d^2 \vec{\alpha}$$

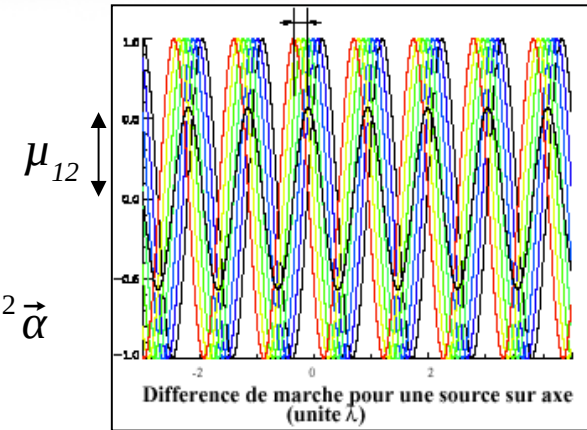
$$I(x, \vec{B}) \simeq \left( \int_{source} 2 I_0^{source}(\vec{\alpha}) d^2 \vec{\alpha} \right) \left[ 1 + \Re \left( \mu_{12}(\vec{B}) \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x B}{z} \right) \right) \right]$$

Intensité totale reçue de la source par les trous

Modulation spatiale (=franges)

$$\mu_{12}(\vec{B}) = \frac{\int_{source} I_0^{source}(\vec{\alpha}) \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \vec{\alpha} \cdot \vec{B} \right) d^2 \vec{\alpha}}{\int_{source} I_0^{source}(\vec{\alpha}) d^2 \vec{\alpha}}$$

Visibilité complexe des franges dépend de la source !



# Trous d'Young et source étendue : cohérence spatiale

1 source étendue à l'infini = superposition de sources ponctuelles

Incohérence des sources => superposition des intensités

$$I(x, \vec{B}) \simeq \int_{source} 2 I_0^{source}(\vec{\alpha}) \left[ 1 + \Re \left( \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \vec{\alpha} \cdot \vec{B} \right) \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x B}{z} \right) \right) \right] d^2 \vec{\alpha}$$

$$I(x, \vec{B}) \simeq \left( \int_{source} 2 I_0^{source}(\vec{\alpha}) d^2 \vec{\alpha} \right) \left[ 1 + \Re \left( \mu_{12}(\vec{B}) \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x B}{z} \right) \right) \right]$$

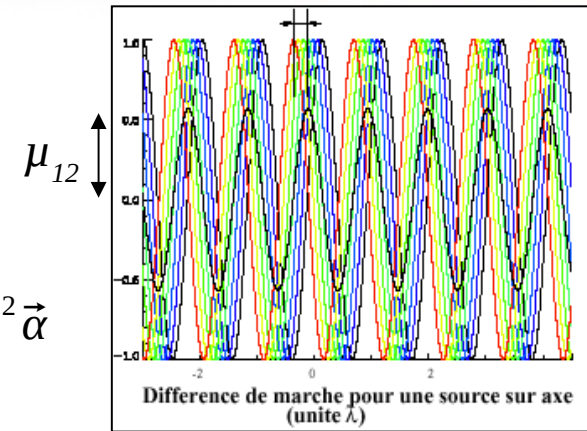
Intensité totale reçue de la source par les trous

Transformée de Fourier normalisée de la distribution spatiale d'intensité de la source (Théorème Zernike – Van Cittert)

Modulation spatiale (=franges)

$$\mu_{12}(\vec{B}) = \frac{\int_{source} I_0^{source}(\vec{\alpha}) \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \vec{\alpha} \cdot \vec{B} \right) d^2 \vec{\alpha}}{\int_{source} I_0^{source}(\vec{\alpha}) d^2 \vec{\alpha}}$$

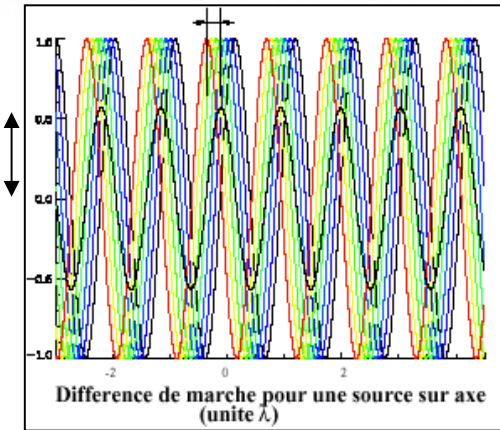
Visibilité complexe des franges dépend de la source !



# Trous d'Young et source étendue : cohérence spatiale

1 source étendue à l'infini = superposition de sources ponctuelles

Incohérence des sources => superposition des intensités



$$I(x, \vec{B}) \simeq \int_{source} 2 I_0^{source}(\vec{\alpha}) \left[ 1 + \Re \left( \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \vec{\alpha} \cdot \vec{B} \right) \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x B}{z} \right) \right) \right] d^2 \vec{\alpha}$$

$$I(x, \vec{B}) \simeq \left( \int_{source} 2 I_0^{source}(\vec{\alpha}) d^2 \vec{\alpha} \right) \left[ 1 + \Re \left( \mu_{12}(\vec{B}) \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x B}{z} \right) \right) \right]$$

Modulation spatiale (=franges)

Transformée de Fourier normalisée de la distribution spatiale d'intensité de la source (Théorème Zernike – Van Cittert)

$$\mu_{12}(\vec{B}) = \frac{\int_{source} I_0^{source}(\vec{\alpha}) \exp \left( i \frac{2\pi}{\lambda} \vec{\alpha} \cdot \vec{B} \right) d^2 \vec{\alpha}}{\int_{source} I_0^{source}(\vec{\alpha}) d^2 \vec{\alpha}}$$

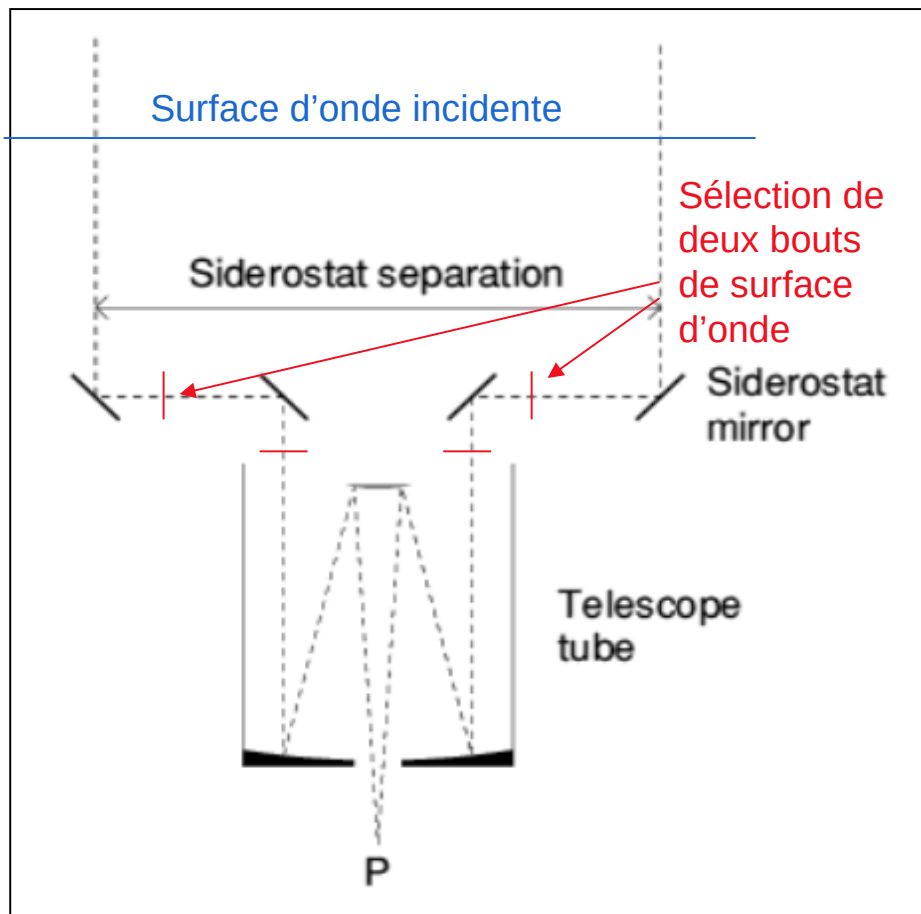
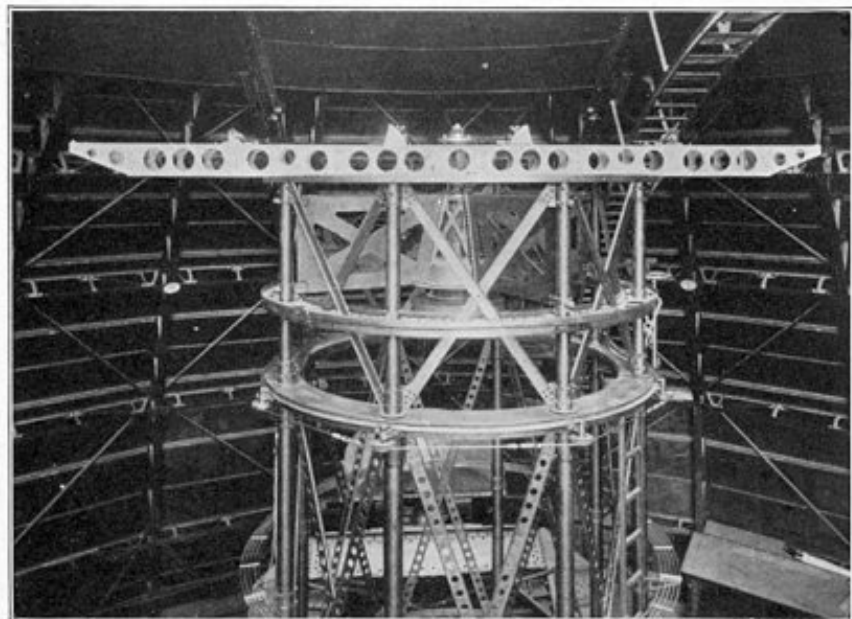
Visibilité complexe des franges dépend de la source !

Intensité totale reçue de la source par les trous

$$I(x, \vec{B}) \simeq 2 \left( \int_{source} I_0^{source}(\vec{\alpha}) d^2 \vec{\alpha} \right) \left[ 1 + |\mu_{12}(\vec{B})| \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x B}{z} + \Phi_{\mu_{12}}(\vec{B}) \right) \right]$$

# Interféromètre stellaire de Michelson

- 1/ Sélection de deux parties de la surface d'onde provenant d'une source
  - 2/ Recombinaison en configuration Fizeau (trous d'Young)
- 1ère mesure diamètre Bételgeuse en 1920



# Interféromètre stellaire de Michelson et source étendue

Observation d'un objet étendu  $O(\vec{\alpha}) = 2 I_0^{source}(\vec{\alpha})$

Spectre spatial de l'objet :  $\tilde{O}(\vec{f}) = \underbrace{TF[O]}_{\substack{\text{Transformée de Fourier de } O \text{ calculée en } \vec{f} \\ \text{Fréquence spatiale}}}$

$$\mu_{12}(\vec{B}) = \frac{\tilde{O}(\vec{B}/\lambda)}{\tilde{O}(\vec{0})}$$

Modulation spatiale (=franges)

Intensité dans la direction  $\vec{\eta}$  sur l'écran  
Hypothèse  $D_{tel} \rightarrow +\infty$

$$I(\vec{\eta}, \vec{B}) = \tilde{O}(\vec{0}) + \left| \tilde{O}\left(\frac{\vec{B}}{\lambda}\right) \right| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{\eta} \cdot \vec{B} + \Phi_{\tilde{O}}\left(\frac{\vec{B}}{\lambda}\right)\right)$$

# Interféromètre stellaire de Michelson et source étendue

Observation d'un objet étendu  $O(\vec{\alpha}) = 2 I_0^{source}(\vec{\alpha})$

Spectre spatial de l'objet :  $\tilde{O}(\vec{f}) = \underbrace{TF[O]}_{\text{Transformée de Fourier de } O \text{ calculée en } \vec{f}}(\vec{f}) = |\tilde{O}(\vec{f})| \exp(i\Phi_{\tilde{O}}(\vec{f}))$  Fréquence spatiale  $\vec{f}$

$$\mu_{12}(\vec{B}) = \frac{\tilde{O}(\vec{B}/\lambda)}{\tilde{O}(\vec{0})}$$

Modulation spatiale (=franges)

Intensité dans la direction  $\vec{\eta}$  sur l'écran  
Hypothèse  $D_{tel} \rightarrow +\infty$

$$I(\vec{\eta}, \vec{B}) = \tilde{O}(\vec{0}) + \left| \tilde{O}\left(\frac{\vec{B}}{\lambda}\right) \right| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{\eta} \cdot \vec{B} + \Phi_{\tilde{O}}\left(\frac{\vec{B}}{\lambda}\right)\right)$$

1) **Visibilité des franges** donne le **module du spectre spatial de l'objet** à la fréquence  $\frac{\vec{B}}{\lambda}$

$$V(\vec{B}) = \frac{|\tilde{O}(\vec{B}/\lambda)|}{|\tilde{O}(\vec{0})|}$$

Visibilité s'annule quand  $|\vec{B}|$  de l'ordre de la largeur de cohérence spatiale  $\frac{\lambda}{\alpha_0}$   
 $\alpha_0 =$  largeur angulaire de l'objet

2) **Position des franges** donne la **phase**  $\Phi_{\tilde{O}}\left(\frac{\vec{B}}{\lambda}\right)$  du spectre de l'objet

$$I(\vec{\eta}, \vec{B}) = \tilde{O}(\vec{0}) + \left| \tilde{O}\left(\frac{\vec{B}}{\lambda}\right) \right| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{\eta} \cdot \vec{B} + \Phi_{\tilde{O}}\left(\frac{\vec{B}}{\lambda}\right)\right)$$

- 1/ On mesure  $I$  pour plusieurs directions d'observations  $\vec{\eta}$  et/ou plusieurs bases  $\vec{B}$
- 2/ On ajuste un modèle d'objet aux données

Exemple : pour une étoile de diamètre angulaire fini  $\alpha_0$ ,  $V$  s'annule en  $B = 1,22 \frac{\lambda}{\alpha_0}$

# Diamètre de Bételgeuse : mesure de Michelson

Chant, C, 1921, The Journal of the Royal Astronomical Society of Canada  
« When [the mirrors] about 8-feet apart the fringes showed signs of change and when 10-feet apart they vanished. That is, the distance  $D$  was 10 feet or say 3000mm. The wavelength of the light was taken to be 0,000555mm. »

« The parallax of Betelgeuse is approximately  $0''.018$ . »

Quel est l'ordre de grandeur du diamètre angulaire de Bételgeuse et de son diamètre  $D_0$  ?

Pour une étoile de diamètre angulaire fini  $\alpha_0$ ,  $V$  s'annule en  $B = 1,22 \frac{\lambda}{\alpha_0}$

# Diamètre de Bételgeuse : mesure de Michelson

Chant, C, 1921, The Journal of the Royal Astronomical Society of Canada  
 « When [the mirrors] about 8-feet apart the fringes showed signs of change and when 10-feet apart they vanished. That is, the distance  $D$  was 10 feet or say 3000mm. The wavelength of the light was taken to be 0,000555mm. »

« The parallax of Betelgeuse is approximately 0".018. »

Quel est l'ordre de grandeur du diamètre angulaire de Bételgeuse et de son diamètre  $D_0$  ?

$$\alpha_0 = \frac{D_0}{d} \quad \text{avec } d \text{ la distance de l'étoile et} \quad d = \frac{1}{p} \quad \text{avec } d \text{ en pc}$$

$$\alpha_0 = 1,22 \frac{\lambda}{B} = 4,66 \cdot 10^{-2} ''$$

$$B = 3 \text{ m}$$

$$D_0 = 1,22 \frac{\lambda}{B p} = 2,59 \text{ ua} = 388 \cdot 10^6 \text{ km}$$

$$p = 0.018$$

# Plan

## Interférences lumineuses

Conditions

Cohérence spatiale

Cohérence temporelle

## Interférométrie optique en astronomie

Intérêt

Multi-télescopes avec recombinaison co-axiale

Multi-télescopes avec recombinaison multi-axiale

## Interférométrie et turbulence

Impact de la turbulence

Méthodes passives et méthodes actives

Filtrage spatial avec fibre monomode ( $D \sim r_0$ )

Interférométrie de speckles ( $D > r_0$ )

## Synthèse d'ouverture

## Exemples d'interféromètres optiques

1 source ponctuelle à l'infini sur axe optique

Interférences à deux ondes avec une différence de marche  $\delta$

Monochromatique : 
$$I(\delta, \lambda) \simeq 2 I_0^{source}(\lambda) + \Re \left( 2 I_0^{source}(\lambda) \exp \left( i \frac{2\pi \delta}{\lambda} \right) \right)$$

# Trous d'Young et source ponctuelle hors axe

1 source ponctuelle à l'infini sur axe optique

Interférences à deux ondes avec une différence de marche  $\delta$

Monochromatique : 
$$I(\delta, \lambda) \simeq 2 I_0^{source}(\lambda) + \Re \left( 2 I_0^{source}(\lambda) \exp \left( i \frac{2\pi \delta}{\lambda} \right) \right)$$

Polychromatique : 
$$I(\delta) \simeq \int_{\Delta\lambda} 2 I_0^{source}(\lambda) + \Re \left( 2 I_0^{source}(\lambda) \exp \left( i \frac{2\pi \delta}{\lambda} \right) \right) d\lambda$$

# Trous d'Young et source ponctuelle hors axe

1 source ponctuelle à l'infini sur axe optique

Interférences à deux ondes avec une différence de marche  $\delta$

Monochromatique : 
$$I(\delta, \lambda) \simeq 2 I_0^{source}(\lambda) + \Re \left( 2 I_0^{source}(\lambda) \exp \left( i \frac{2\pi \delta}{\lambda} \right) \right)$$

Polychromatique : 
$$I(\delta) \simeq \int_{\Delta\lambda} 2 I_0^{source}(\lambda) + \Re \left( 2 I_0^{source}(\lambda) \exp \left( i \frac{2\pi \delta}{\lambda} \right) \right) d\lambda$$

avec  $\sigma = 1/\lambda$  
$$I(\delta) \simeq \int_{\Delta\sigma} 2 I_0^{source}(\sigma) + \Re \left( 2 I_0^{source}(\sigma) \exp(i 2\pi \sigma \delta) \right) d\sigma$$

# Trous d'Young et source ponctuelle hors axe

1 source ponctuelle à l'infini sur axe optique

Interférences à deux ondes avec une différence de marche  $\delta$

Monochromatique : 
$$I(\delta, \lambda) \simeq 2 I_0^{source}(\lambda) + \Re \left( 2 I_0^{source}(\lambda) \exp \left( i \frac{2\pi \delta}{\lambda} \right) \right)$$

Polychromatique : 
$$I(\delta) \simeq \int_{\Delta\lambda} 2 I_0^{source}(\lambda) + \Re \left( 2 I_0^{source}(\lambda) \exp \left( i \frac{2\pi \delta}{\lambda} \right) \right) d\lambda$$

avec  $\sigma = 1/\lambda$  
$$I(\delta) \simeq \int_{\Delta\sigma} 2 I_0^{source}(\sigma) + \Re \left( 2 I_0^{source}(\sigma) \exp(i 2\pi \sigma \delta) \right) d\sigma$$

$$I(\delta) \simeq 2 \left( \int_{\Delta\sigma} I_0^{source}(\sigma) d\sigma \right) \left[ 1 + |\gamma_{12}(\delta)| \cos(\Phi_{\gamma_{12}}(\delta)) \right]$$

$$\gamma_{12}(\delta) = \frac{\int_{\Delta\sigma} I_0^{source}(\sigma) \exp(i 2\pi \sigma \delta) d\sigma}{\int_{\Delta\sigma} I_0^{source}(\sigma) d\sigma}$$

# Trous d'Young et source ponctuelle hors axe

1 source ponctuelle à l'infini sur axe optique

Interférences à deux ondes avec une différence de marche  $\delta$

Monochromatique : 
$$I(\delta, \lambda) \simeq 2 I_0^{source}(\lambda) + \Re \left( 2 I_0^{source}(\lambda) \exp \left( i \frac{2\pi \delta}{\lambda} \right) \right)$$

Polychromatique : 
$$I(\delta) \simeq \int_{\Delta\lambda} 2 I_0^{source}(\lambda) + \Re \left( 2 I_0^{source}(\lambda) \exp \left( i \frac{2\pi \delta}{\lambda} \right) \right) d\lambda$$

avec  $\sigma = 1/\lambda$  
$$I(\delta) \simeq \int_{\Delta\sigma} 2 I_0^{source}(\sigma) + \Re \left( 2 I_0^{source}(\sigma) \exp(i 2\pi \sigma \delta) \right) d\sigma$$

$$I(\delta) \simeq 2 \left( \int_{\Delta\sigma} I_0^{source}(\sigma) d\sigma \right) \left[ 1 + \gamma_{12}(\delta) \cos(\Phi_{\gamma_{12}}(\delta)) \right]$$

Modulation spatiale (= franges)

Intensité totale reçue de la source

Degré de cohérence mutuelle (ou temporelle) complexe

= Visibilité complexe des franges

$$\gamma_{12}(\delta) = \frac{\int_{\Delta\sigma} I_0^{source}(\sigma) \exp(i 2\pi \sigma \delta) d\sigma}{\int_{\Delta\sigma} I_0^{source}(\sigma) d\sigma}$$

Transformée de Fourier normalisée du spectre de la source

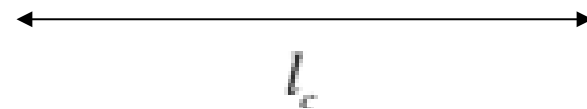
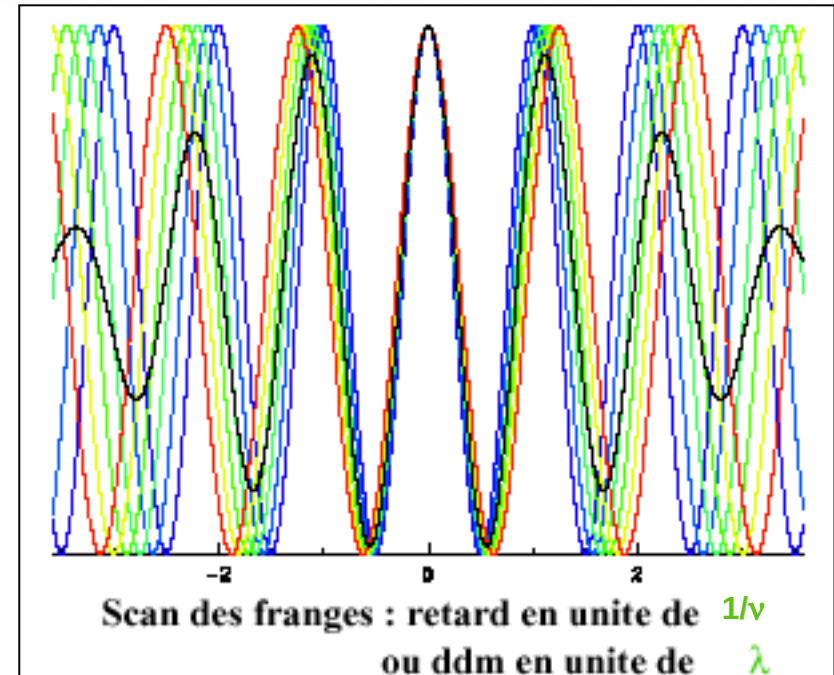
# Cohérence temporelle

$$I(\delta) \simeq 2 \left( \int_{\Delta\sigma} I_0^{source}(\sigma) d\sigma \right) \left[ 1 + |\gamma_{12}(\delta)| \cos(\Phi_{\gamma_{12}}(\delta)) \right]$$

Visibilité = 1 quand  $\delta = 0$  (**frange blanche**)

Visibilité  $\rightarrow 0$  quand  $\delta \geq l_c = \frac{1}{\Delta\sigma} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$

## Longueur de cohérence temporelle de la source



Calculer la longueur de cohérence de la lumière reçue d'une étoile de spectre plat, observée dans le visible ?

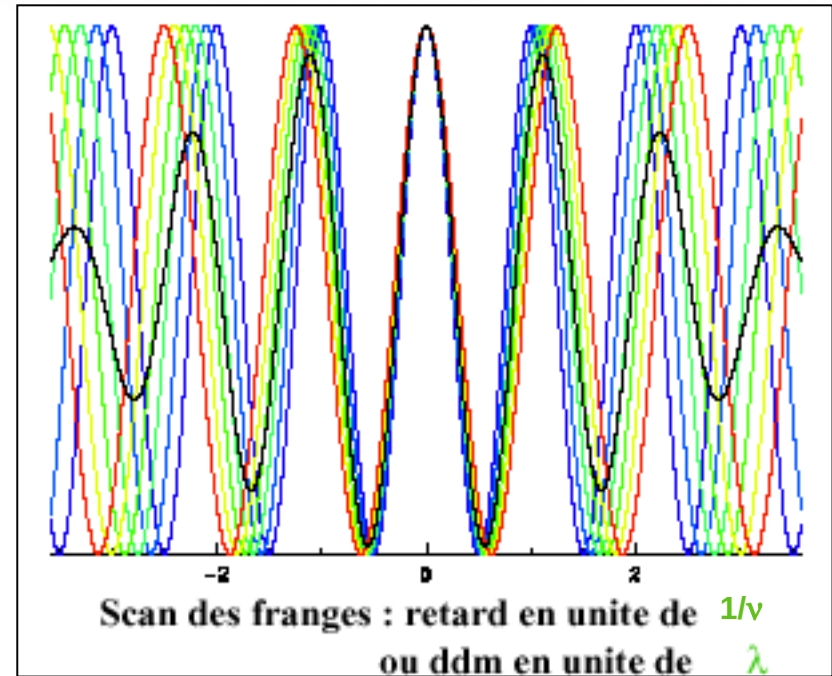
# Cohérence temporelle

$$I(\delta) \simeq 2 \left( \int_{\Delta\sigma} I_0^{source}(\sigma) d\sigma \right) \left[ 1 + |\gamma_{12}(\delta)| \cos(\Phi_{\gamma_{12}}(\delta)) \right]$$

Visibilité = 1 quand  $\delta = 0$  (**frange blanche**)

Visibilité  $\rightarrow 0$  quand  $\delta \geq l_c = \frac{1}{\Delta\sigma} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$

## Longueur de cohérence temporelle de la source



Calculer la longueur de cohérence de la lumière reçue d'une étoile de spectre plat, observée dans le visible ?

$$l_c = \frac{0,6^2}{0,4} = 0,9 \mu m \quad \rightarrow \text{contrôle de la différence de marche à } 1 \mu m \text{ près !}$$

Modulation spatiale

$$I(\delta) \simeq 2 \left( \int_{\Delta\sigma} I_0^{source}(\sigma) d\sigma \right) \left[ 1 + |\gamma_{12}(\delta)| \cos(\Phi_{\gamma_{12}}(\delta)) \right]$$

Degré de cohérence mutuelle  
(ou temporelle) complexe

## Spectrométrie par transformée de Fourier

1/ On mesure  $I$  pour plusieurs différences de marche  $\delta$

2/ La transformée de Fourier (par rapport à  $\delta$ ) de l'amplitude des variations de  $I$  fournit le spectre de la source observée

Exemples : détection de novae, supernovae et nébuleuses planétaires avec Sitelle/CFHT

## Cohérence spatiale

=> Distribution spatiale d'intensité de la source

$$\mu_{12}(\vec{B}) = \frac{\int_{source} I_0^{source}(\vec{\alpha}) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} \vec{\alpha} \cdot \vec{B}\right) d^2 \vec{\alpha}}{\int_{source} I_0^{source}(\vec{\alpha}) d^2 \vec{\alpha}}$$

## Cohérence temporelle

=> Spectre de la source

$$\gamma_{12}(\delta) = \frac{\int_{\Delta\sigma} I_0^{source}(\sigma) \exp(i 2\pi \sigma \delta) d\sigma}{\int_{\Delta\sigma} I_0^{source}(\sigma) d\sigma}$$

# Plan

## Interférences lumineuses

Conditions

Cohérence spatiale

Cohérence temporelle

## Interférométrie optique en astronomie

Intérêt

Multi-télescopes avec recombinaison co-axiale

Multi-télescopes avec recombinaison multi-axiale

## Interférométrie et turbulence

Impact de la turbulence

Méthodes passives et méthodes actives

Filtrage spatial avec fibre monomode ( $D \sim r_0$ )

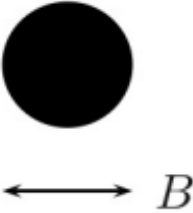
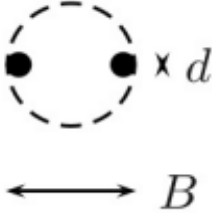
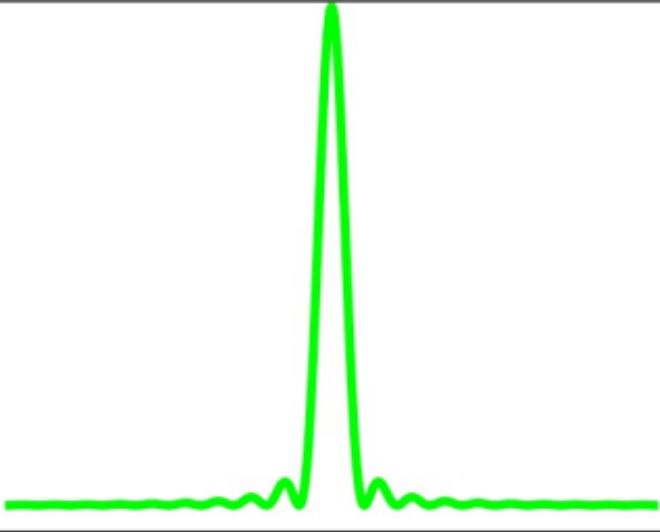
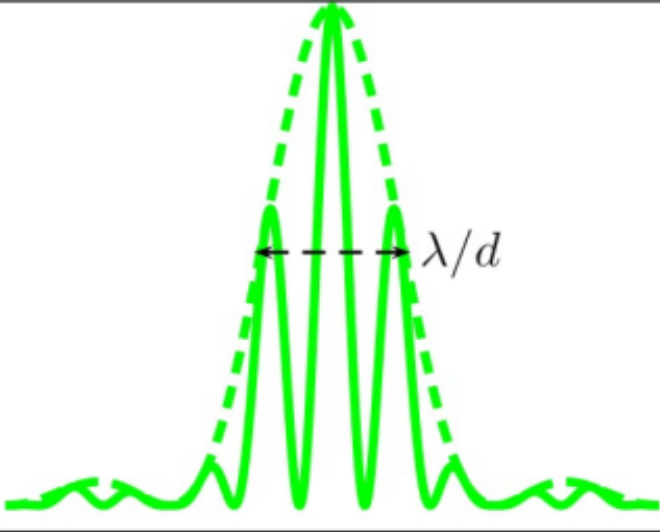
Interférométrie de speckles ( $D > r_0$ )

## Synthèse d'ouverture

## Exemples d'interféromètres optiques

# Interférométrie optique en haute résolution angulaire

Haute résolution angulaire avec de petits télescopes → cohérence spatiale

<p><b>Pupille</b></p>	<p>Monolithique </p>	<p>À 2 télescopes </p>
<p><b>Réponse impulsionnelle</b></p>		
<p><b>Résolution</b></p>	<p><math>\leftrightarrow \lambda/B</math></p>	<p><math>\leftrightarrow \lambda/B</math></p>

# Recombinaison multi-axiale

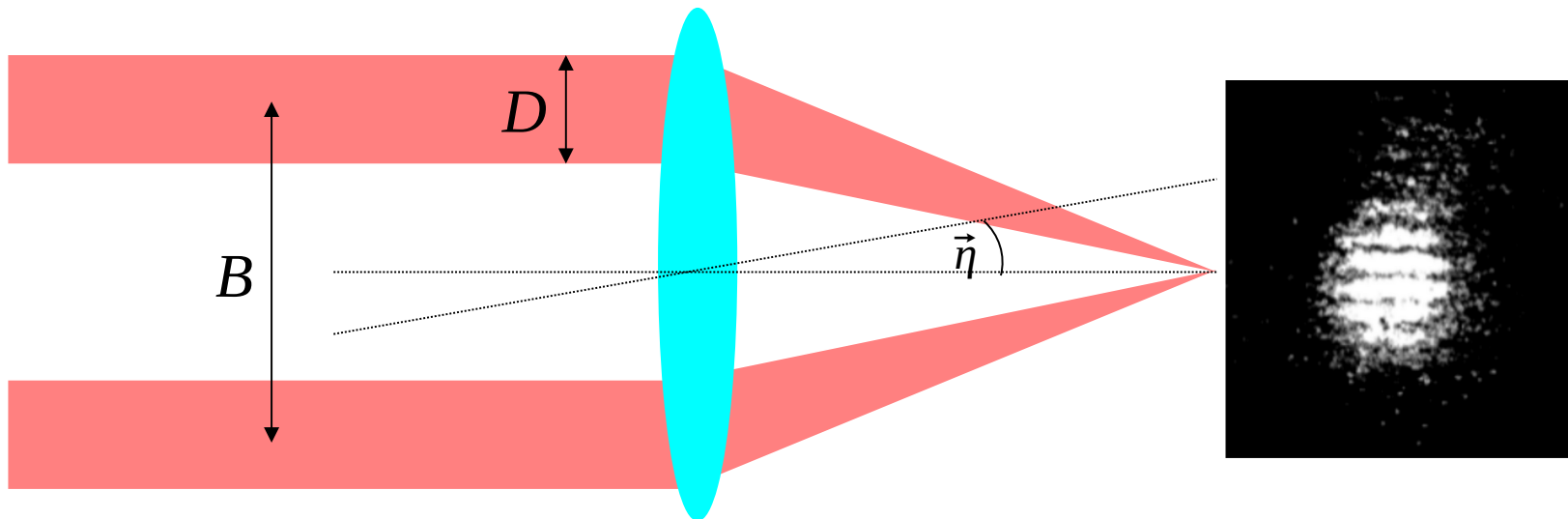
Interféromètre de type trous d'Young

Modulation spatiale de l'intensité

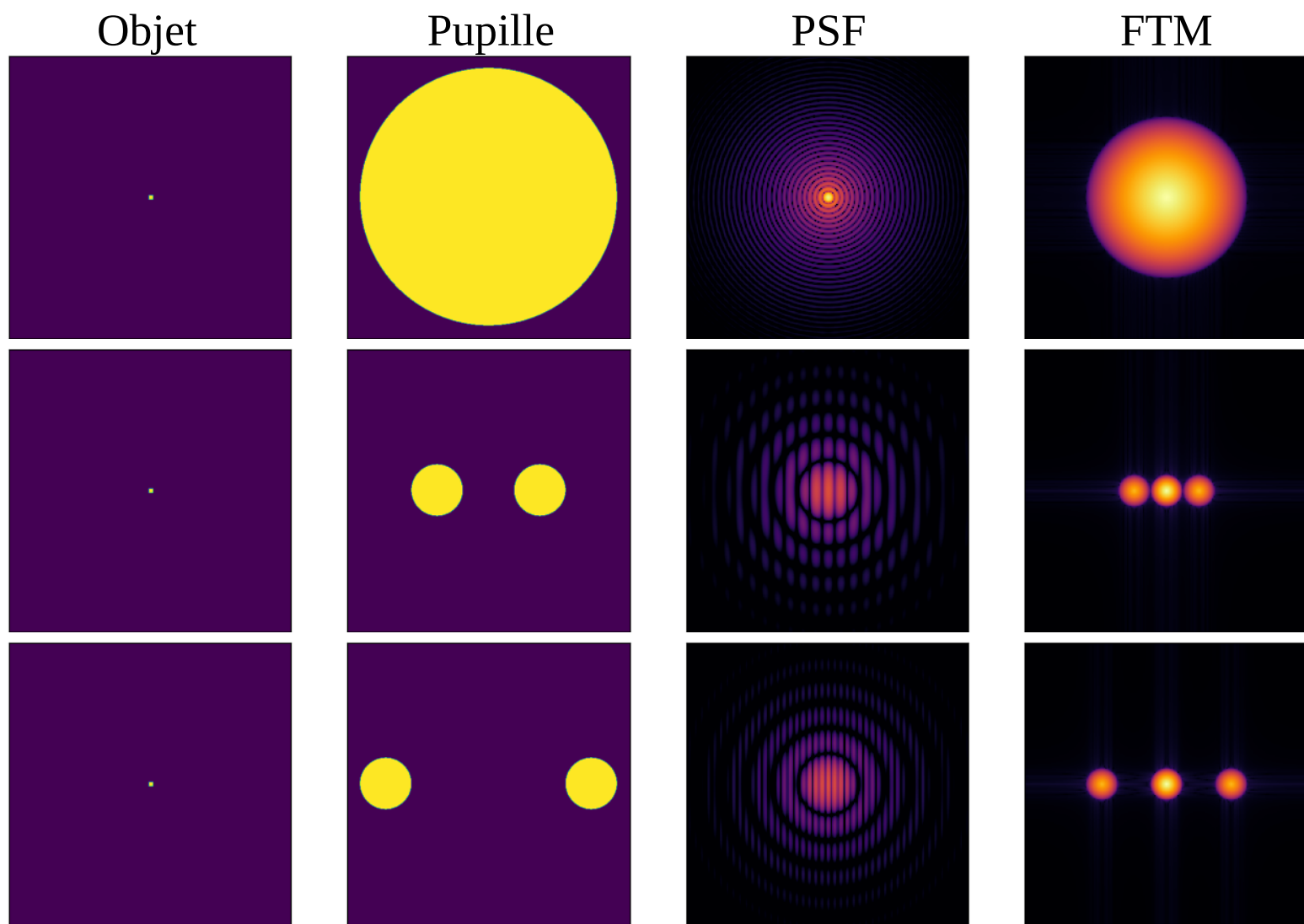
$$\delta = \vec{\eta} \cdot \vec{B} (+Cte)$$

Franges modulent la tache de diffraction d'une sous pupille

$$I(\vec{\eta}, \vec{B}) = 2 I_D(\vec{\eta}) \left[ 1 + V \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{\eta} \cdot \vec{B} + \Phi\right) \right] \quad \text{avec } I_D(\vec{\eta}) \text{ la diffraction par une sous-pupille}$$



# Pupille, PSF et FTO



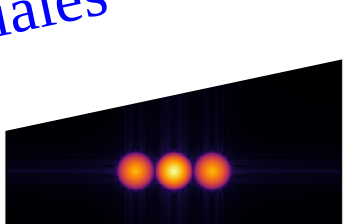
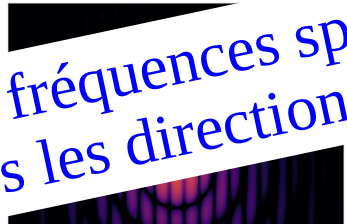
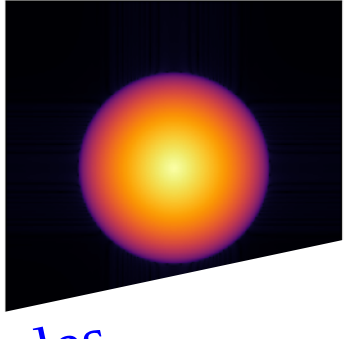
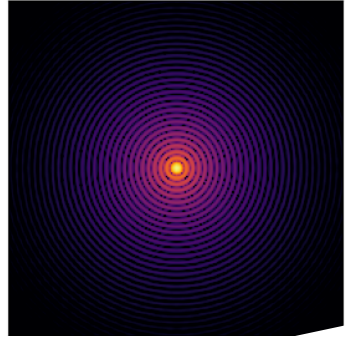
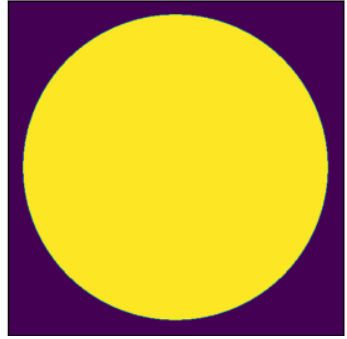
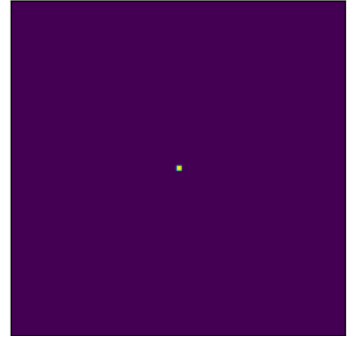
# Pupille, PSF et FTO

Objet

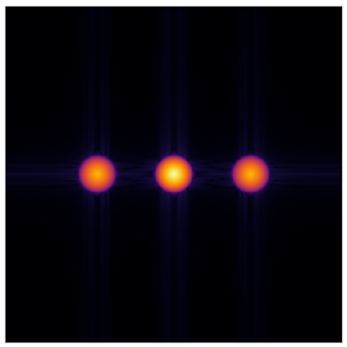
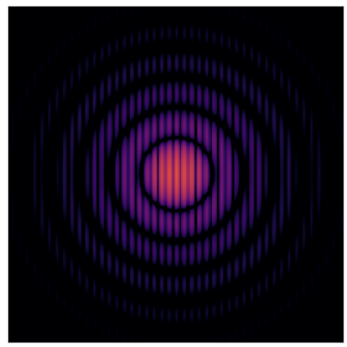
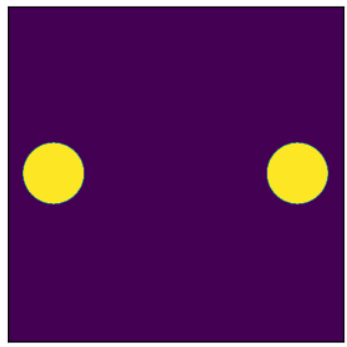
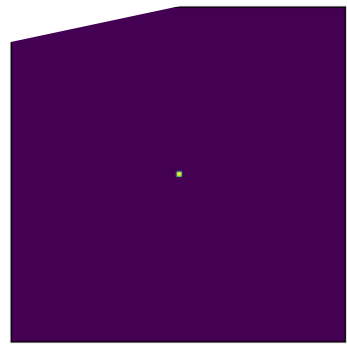
Pupille

PSF

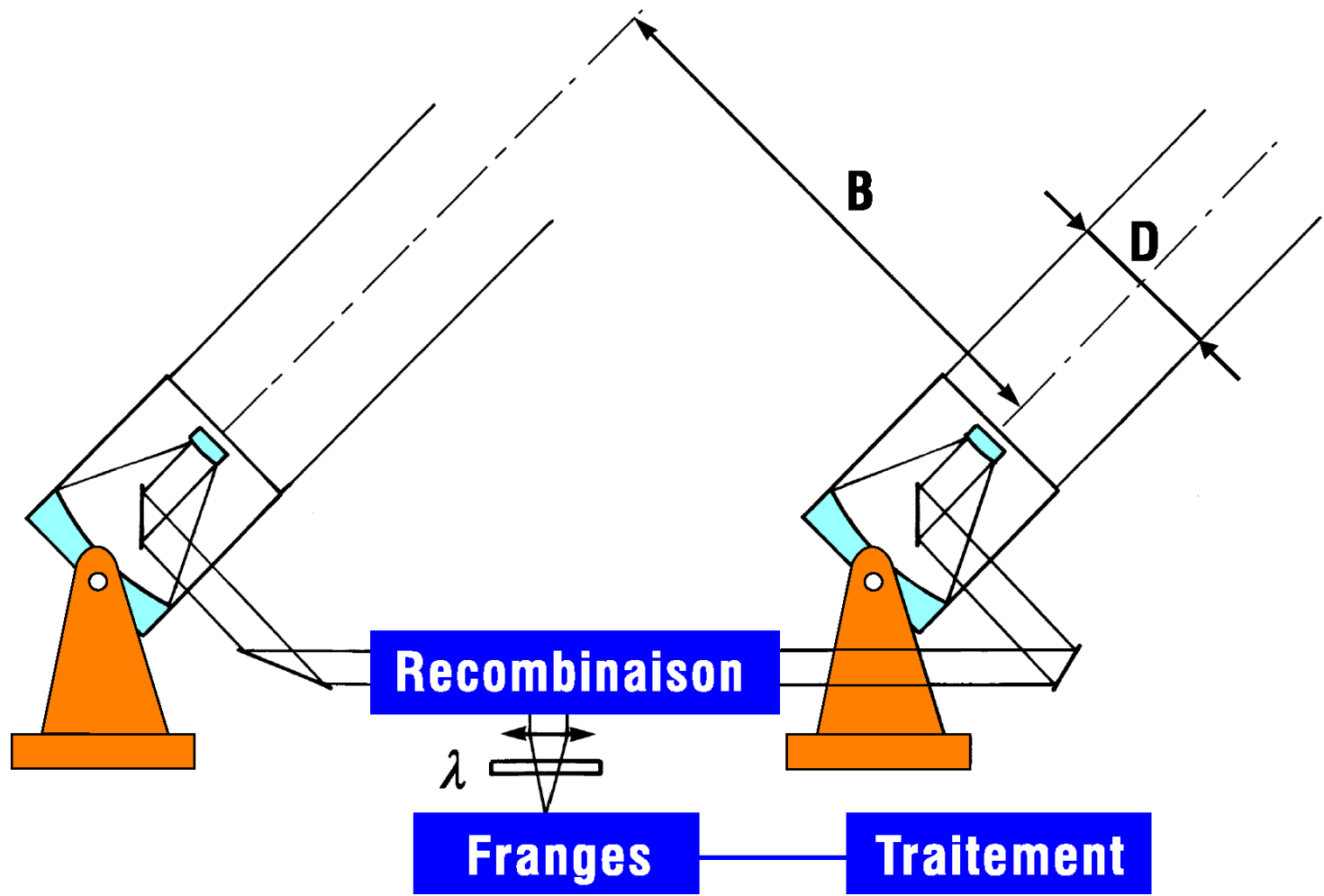
FTM



Informations sur certaines fréquences spatiales  
Mais pas dans toutes les directions



# Interférométrie optique multi-télescopes (Labeyrie 1974)



# Recombinaison co-axiale

Interféromètre de type Mach-Zender

Modulation temporelle de l'intensité

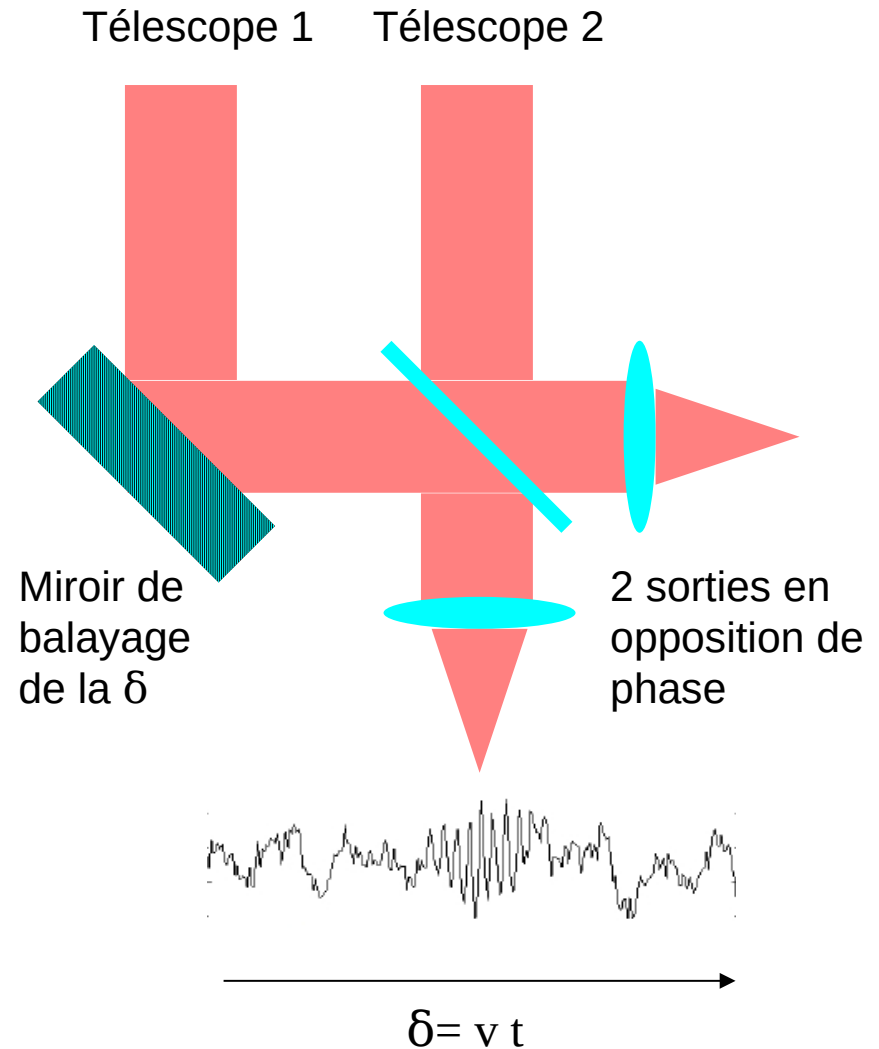
Intensité sur l'axe sur un mono-détecteur en fonction du temps en faisant varier  $\delta$

$\delta = v t$  avec  $v =$  vitesse de balayage

$$I(t) = 2 I_0 [1 \pm \cos(2 \pi \sigma v t)]$$

(déphasage de  $\pi$  entre les deux sorties)

Ici : recombinaison des télescopes par paire



# Plan

## Interférences lumineuses

Conditions

Cohérence spatiale

Cohérence temporelle

## Interférométrie optique en astronomie

Intérêt

Multi-télescopes avec recombinaison co-axiale

Multi-télescopes avec recombinaison multi-axiale

## Interférométrie et turbulence

Impact de la turbulence

Méthodes passives et méthodes actives

Filtrage spatial avec fibre monomode ( $D \sim r_0$ )

Interférométrie de speckles ( $D > r_0$ )

## Synthèse d'ouverture

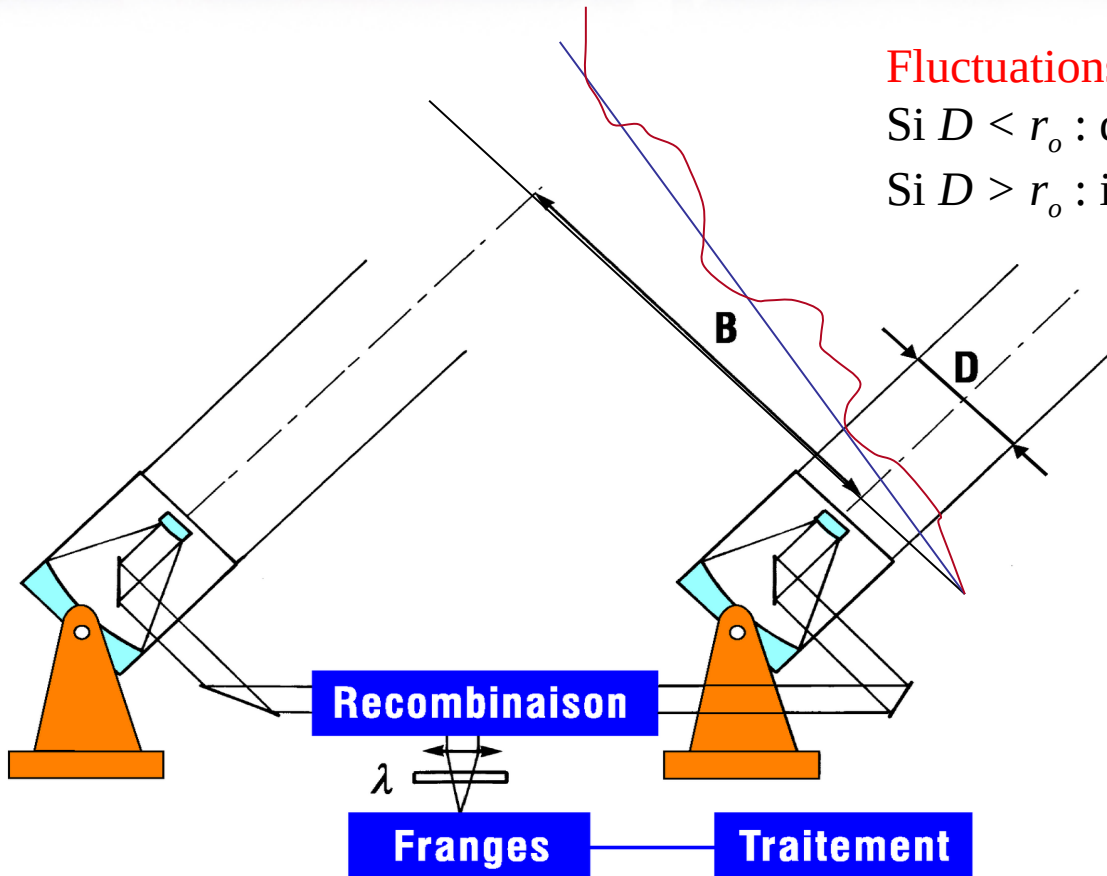
## Exemples d'interféromètres optiques

# Interférométrie optique et turbulence atmosphérique

Fluctuations de la surface d'onde :

Si  $D < r_o$  : déphasage (piston) + basculement

Si  $D > r_o$  : idem + hautes fréquences spatiales



Temps de pose infini  
 À l'ordre 0 :  
 → Franges brouillées !

Temps de pose instantané

$$I(\vec{\eta}, \vec{B}, t) = 2 I_{turb}(\vec{\eta}, t) \left[ 1 + V \cos \left( \frac{2\pi \delta(\vec{\eta}, \vec{B})}{\lambda} + \Phi_{turb}(\vec{\eta}, \vec{B}, t) \right) \right] \Rightarrow I(\vec{\eta}, \vec{B}) = \langle I(\vec{\eta}, \vec{B}, t) \rangle_t = 2 I_{turb}(\vec{\eta})$$

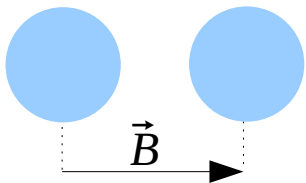
# Fonction de transfert de l'interféromètre

Hypothèse : pas de piston variable entre les deux télescopes de même pupille  $P(\vec{\rho})$

Télescope 1 : phase =  $\Phi_1$       Télescope 2 : phase =  $\Phi_2$

Pupille de l'interféromètre :  $\overbrace{P(\vec{\rho}) \exp(i\Phi_1(\vec{\rho}, t))} + \overbrace{P(\vec{\rho} + \vec{B}) \exp(i\Phi_2(\vec{\rho} + \vec{B}, t))}$

Pupille



# Fonction de transfert de l'interféromètre

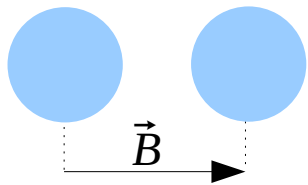
Hypothèse : pas de piston variable entre les deux télescopes de même pupille  $P(\vec{\rho})$

Télescope 1 : phase =  $\Phi_1$       Télescope 2 : phase =  $\Phi_2$

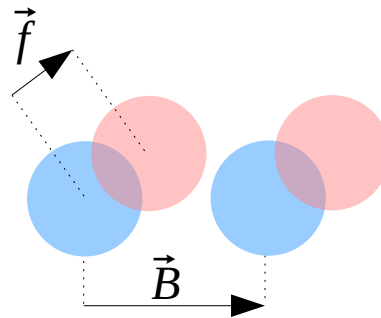
Pupille de l'interféromètre :  $\overbrace{P(\vec{\rho}) \exp(i\Phi_1(\vec{\rho}, t))} + \overbrace{P(\vec{\rho} + \vec{B}) \exp(i\Phi_2(\vec{\rho} + \vec{B}, t))}$

**Fonction de transfert de l'interféromètre** = autocorrélation du champ pupillaire

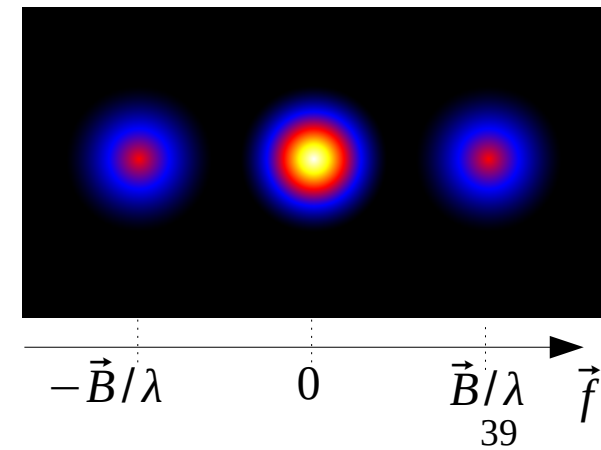
Pupille



Calcul de l'autocorrélation



Autocorrélation



# Fonction de transfert de l'interféromètre

Hypothèse : pas de piston variable entre les deux télescopes de même pupille  $P(\vec{\rho})$

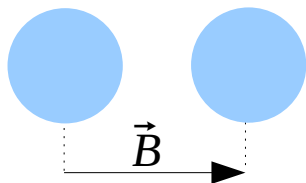
Télescope 1 : phase =  $\Phi_1$       Télescope 2 : phase =  $\Phi_2$

Pupille de l'interféromètre :  $\overbrace{P(\vec{\rho}) \exp(i\Phi_1(\vec{\rho}, t))} + \overbrace{P(\vec{\rho} + \vec{B}) \exp(i\Phi_2(\vec{\rho} + \vec{B}, t))}$

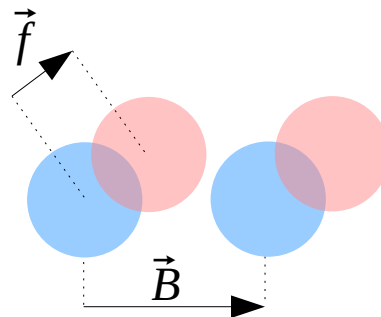
**Fonction de transfert de l'interféromètre** = autocorrélation du champ pupillaire

$$\tilde{S}(\vec{f}, t) = \frac{1}{S} \iint_{\mathbb{R}^2} \left[ P(\vec{\rho}) \exp(i\Phi_1(\vec{\rho}, t)) + P(\vec{\rho} + \vec{B}) \exp(i\Phi_2(\vec{\rho} + \vec{B}, t)) \right] \left[ P(\vec{\rho} + \lambda \vec{f}) \exp(-i\Phi_1(\vec{\rho} + \lambda \vec{f}, t)) + P(\vec{\rho} + \vec{B} + \lambda \vec{f}) \exp(-i\Phi_2(\vec{\rho} + \vec{B} + \lambda \vec{f}, t)) \right] d^2 \vec{\rho}$$

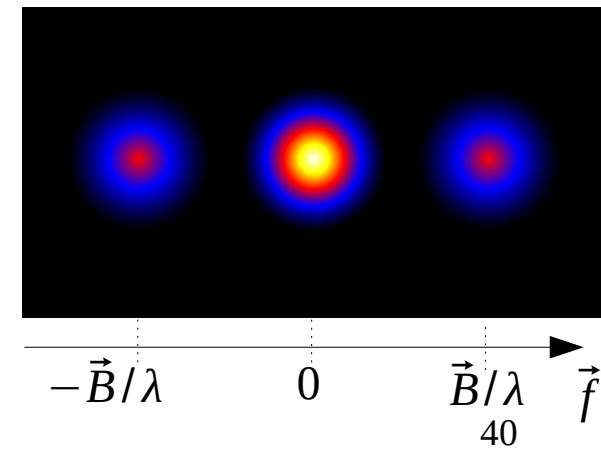
Pupille



Calcul de l'autocorrélation



Autocorrélation



# Fonction de transfert de l'interféromètre

Hypothèse : pas de piston variable entre les deux télescopes de même pupille  $P(\vec{\rho})$

Télescope 1 : phase =  $\Phi_1$       Télescope 2 : phase =  $\Phi_2$

Pupille de l'interféromètre :  $\overbrace{P(\vec{\rho}) \exp(i\Phi_1(\vec{\rho}, t))} + \overbrace{P(\vec{\rho} + \vec{B}) \exp(i\Phi_2(\vec{\rho} + \vec{B}, t))}$

**Fonction de transfert de l'interféromètre** = autocorrélation du champ pupillaire

$$\tilde{S}(\vec{f}, t) = \frac{1}{S} \iint_{\mathbb{R}^2} \left[ P(\vec{\rho}) \exp(i\Phi_1(\vec{\rho}, t)) + P(\vec{\rho} + \vec{B}) \exp(i\Phi_2(\vec{\rho} + \vec{B}, t)) \right] \left[ P(\vec{\rho} + \lambda \vec{f}) \exp(-i\Phi_1(\vec{\rho} + \lambda \vec{f}, t)) + P(\vec{\rho} + \vec{B} + \lambda \vec{f}) \exp(-i\Phi_2(\vec{\rho} + \vec{B} + \lambda \vec{f}, t)) \right] d^2 \vec{\rho}$$

Fonction de transfert du télescope

Fonction de structure de la turbulence

En longue pose, les **3 termes** de  $\langle \tilde{S}(\vec{f}) \rangle_t$

- Autour de  $\vec{f} = \vec{0}$   $\frac{1}{2} \tilde{t}(\vec{f}) \left[ \exp\left(-\frac{1}{2} D_{\Phi_1}(\lambda \vec{f})\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} D_{\Phi_2}(\lambda \vec{f})\right) \right]$
- Autour de  $\vec{f} = -\vec{B}/\lambda$   $\frac{1}{2S} \iint_{\mathbb{R}^2} \langle \exp(i(\Phi_1(\vec{\rho}, t) - \Phi_2(\vec{\rho} + \vec{B} + \lambda \vec{f}, t))) \rangle P(\vec{\rho}) P^*(\vec{\rho} + \vec{B} + \lambda \vec{f}) d^2 \vec{\rho}$
- Autour de  $\vec{f} = \vec{B}/\lambda$   $\frac{1}{2S} \iint_{\mathbb{R}^2} \langle \exp(i(\Phi_2(\vec{\rho} + \vec{B}, t) - \Phi_1(\vec{\rho} + \lambda \vec{f}, t))) \rangle P(\vec{\rho} + \vec{B}) P^*(\vec{\rho} + \lambda \vec{f}) d^2 \vec{\rho}$

# Perte de visibilité (hors piston)

Si  $B > r_0$ , on suppose  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  indépendantes et gaussiennes

$\sigma_\Phi^2$  = variance spatiale de  $\Phi$  sur la pupille de chaque télescope

$$\tilde{S}(\vec{f}) = \tilde{t}(\vec{f}) \exp\left(-\frac{1}{2} D_\Phi(\lambda \vec{f})\right) + \frac{1}{2} \exp(-\sigma_\Phi^2) \left[ \tilde{t}(\vec{f} - \vec{B}/\lambda) + \tilde{t}(\vec{f} + \vec{B}/\lambda) \right]$$

FTO de l'interféromètre

Pic autour de  $\vec{f} = \vec{0}$

Pic autour de  $\vec{f} = \vec{B}/\lambda$

Pic autour de  $\vec{f} = -\vec{B}/\lambda$

Visibilité est multipliée par un terme  $\leq 1$ , l'énergie cohérente => perte de visibilité

$\sigma_\Phi^2$  fixée par la performance de l'OA (si OA) ou par la turbulence

si  $\sigma_\Phi^2$  est grand  $E_C = \exp(-\sigma_\Phi^2) < SR$

# Perte de visibilité due au piston

S'il existe un piston différentiel de variance  $\sigma_{piston}^2$

Perte de visibilité supplémentaire de  $\exp\left(-\frac{\sigma_{piston}^2}{2}\right)$

Les aberrations différentielles possibles entre les bras de l'interféromètre :

- Piston = différence de marche
- Retard de phase entre les deux polarisations  $s$  et  $p$
- Rotation des plans de polarisation
- Chromatisme du piston => dispersion et perte de visibilité

→ **minimiser tous ces termes dès la conception**

→ **étalonnages indispensables sur des sources quasi-ponctuelles  
(pour obtenir la FTO de l'interféromètre)**

# Plan

## Interférences lumineuses

Conditions

Cohérence spatiale

Cohérence temporelle

## Interférométrie optique en astronomie

Intérêt

Multi-télescopes avec recombinaison co-axiale

Multi-télescopes avec recombinaison multi-axiale

## Interférométrie et turbulence

Impact de la turbulence

Méthodes passives et méthodes actives

Filtrage spatial avec fibre monomode ( $D \sim r_0$ )

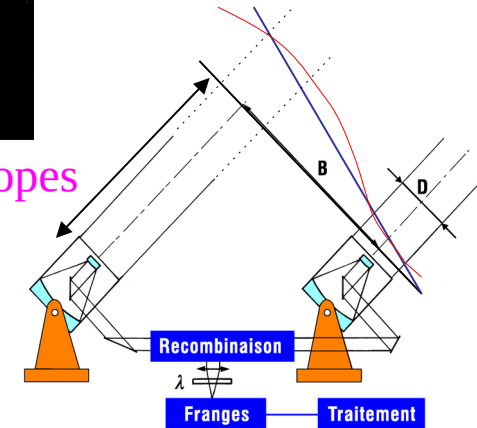
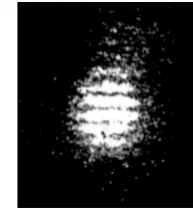
Interférométrie de speckles ( $D > r_0$ )

## Synthèse d'ouverture

## Exemples d'interféromètres optiques

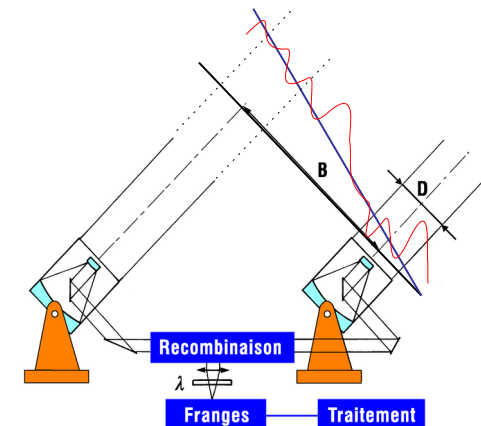
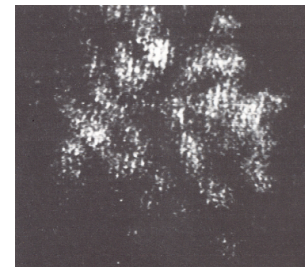
# Interférométrie optique : méthodes **passives** et **actives**

- Petits télescopes ( $D < r_o$ )
  - figer les franges en courte pose puis post-traitement
  - ou corriger en temps réel le piston différentiel entre les télescopes (augmentation possible du temps de pose)
  - Souvent corriger aussi les basculements de l'onde



- Télescopes tels que  $D \sim r_o$ 
  - en plus, filtrage spatial (par fibre monomode)
- Grands télescopes ( $D > r_o$ )

- interférométrie de speckles (Labeyrie)
- ou correction des hauts ordres par OA incluant le basculement (sans piston) et éventuellement le filtrage spatial
- enfin corriger le piston différentiel en temps réel (référence de phase)



# Filtrage spatial avec fibres monomodes

Pour télescopes  $D \sim r_0$

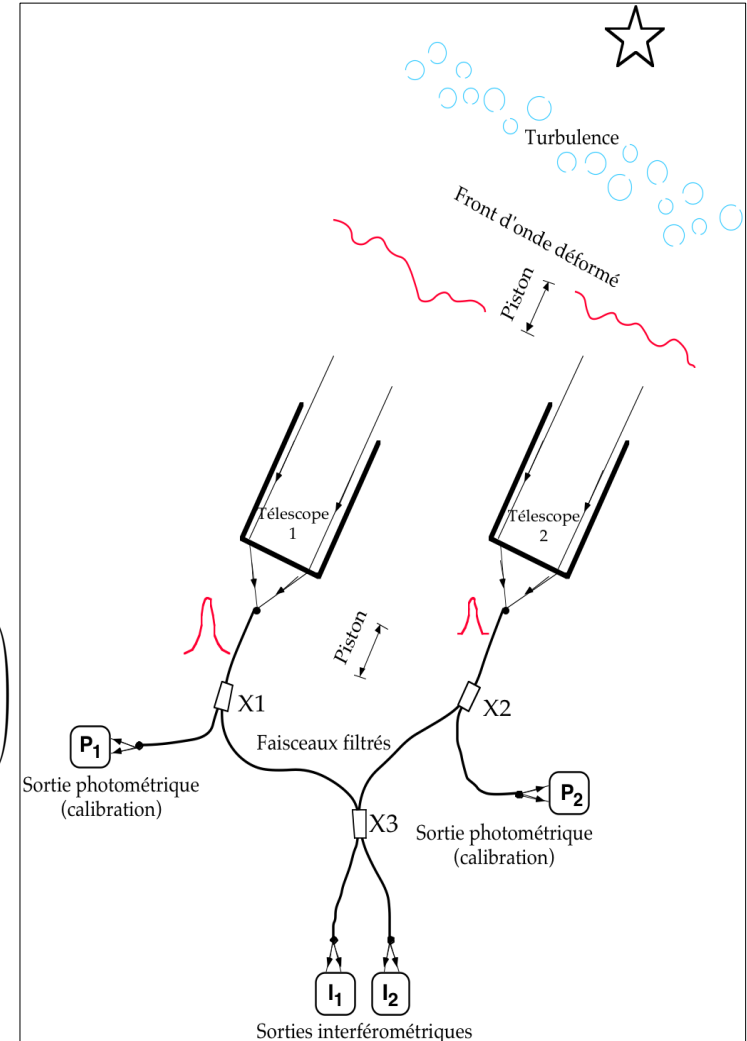
1 / **Injection** de chaque faisceau dans une fibre monomode

2/ propagation → il ne reste que le piston

3/ recombinaison avec coupleur fibré ou en optique intégrée (type co-axial)

$$I(\vec{\eta}, \vec{B}, t) = \tilde{O}(\vec{0}) + \left| \tilde{O}\left(\frac{\vec{B}}{\lambda}\right) \right| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \vec{\eta} \cdot \vec{B} + \Phi_{\tilde{O}}\left(\frac{\vec{B}}{\lambda}\right) + \Phi_{atm}(t)\right)$$

4/ **Figer les franges en courte pose et combiner les images**



# Plan

## Interférences lumineuses

Conditions

Cohérence spatiale

Cohérence temporelle

## Interférométrie optique en astronomie

Intérêt

Multi-télescopes avec recombinaison co-axiale

Multi-télescopes avec recombinaison multi-axiale

## Interférométrie et turbulence

Impact de la turbulence

Méthodes passives et méthodes actives

Filtrage spatial avec fibre monomode ( $D \sim r_0$ )

Interférométrie de speckles ( $D > r_0$ )

## Synthèse d'ouverture

## Exemples d'interféromètres optiques

Pour télescopes  $D > r_0$

Image = champs de tavelures (=speckles)

1/ courtes poses pour « geler la turbulence » (i.e les tavelures)

$$I(\vec{\eta}, \vec{B}, t)$$

2/ Module carré de la transformée de Fourier de chaque image

$$|\tilde{I}(\vec{u}, \vec{B}, t)|^2$$

3/ Moyenne temporelle des modules carrés

→ spectre de puissance moyen  $SP$

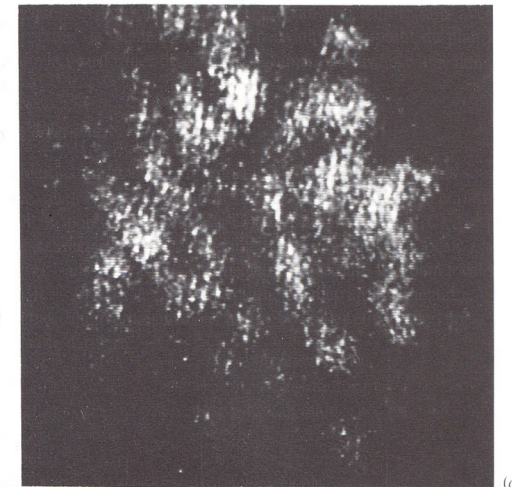
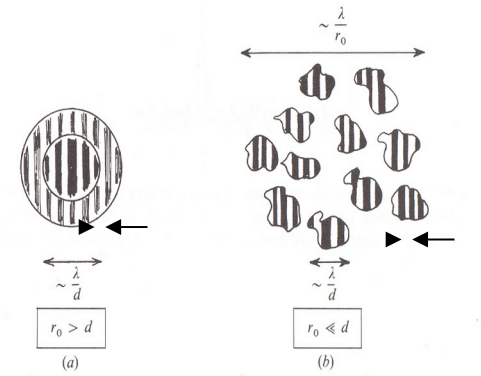
$$SP(\vec{f}) = \langle |\tilde{I}(\vec{f}, \vec{B}, t)|^2 \rangle_t = |\tilde{O}(\vec{f})|^2 \langle |S(\vec{f}, \vec{B}, t)|^2 \rangle_t$$

Spectre de puissance de l'objet

Spectre de puissance moyen de l'interféromètre  
Pour une turbulence donnée  
Étalonné en observant étoile simple

Raphaël Galicher

25 octobre 2024



6-26 Aspects du plan focal interférométrique. (a) Cohérence parfaite des fronts d'onde sur les deux pupilles. L'interférence se produit dans l'image d'Airy donnée par une pupille unique. (b) Cohérence des fronts d'onde sur chaque pupille, limitée par la turbulence atmosphérique (paramètre de Fried  $r_0$ ) : les franges sont présentes dans chaque tavelure, avec une phase aléatoire. (c) Figure d'interférence obtenue entre deux pupilles du Multi Mirror Telescope, distantes de 4.6 m centre-à-centre.  $\lambda = 600$  nm. Pose = 1/60 s. (Cliché dû à l'amabilité de E. K. Hege et J. Beckers.) Noter la présence des tavelures contenant des franges.

# Plan

## Interférences lumineuses

Conditions

Cohérence spatiale

Cohérence temporelle

## Interférométrie optique en astronomie

Intérêt

Multi-télescopes avec recombinaison co-axiale

Multi-télescopes avec recombinaison multi-axiale

## Interférométrie et turbulence

Impact de la turbulence

Méthodes passives et méthodes actives

Filtrage spatial avec fibre monomode ( $D \sim r_0$ )

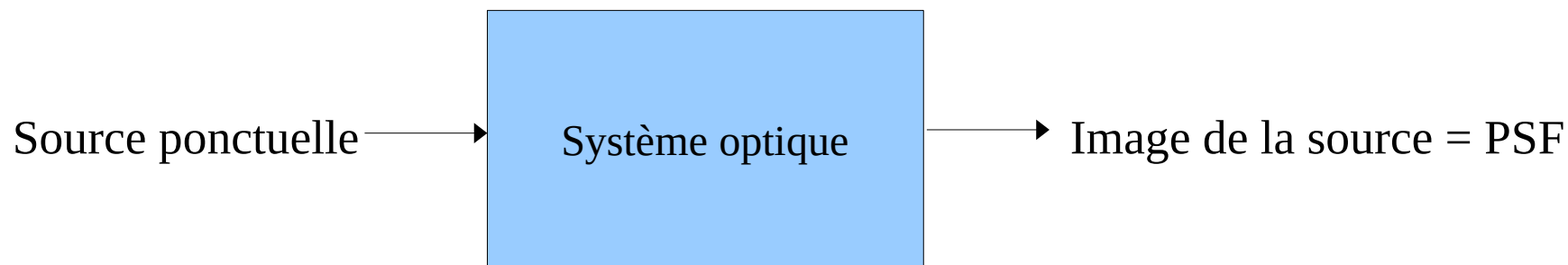
Interférométrie de speckles ( $D > r_0$ )

## Synthèse d'ouverture

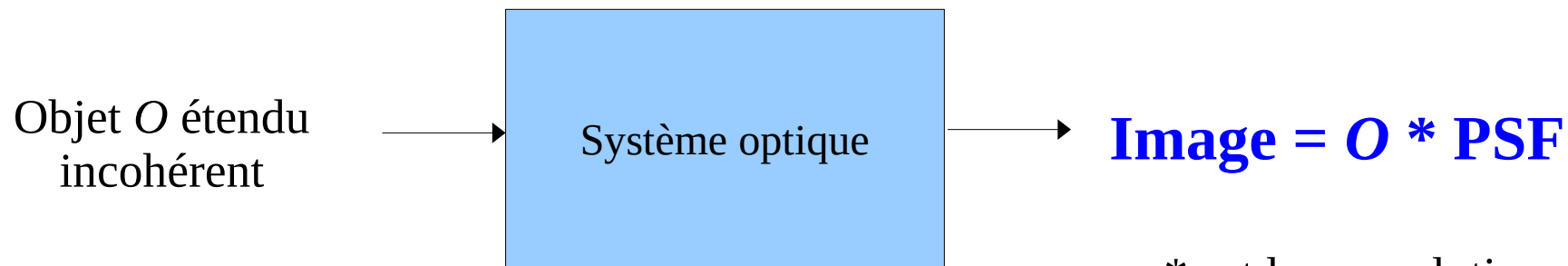
## Exemples d'interféromètres optiques

# L'image d'un objet étendu

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



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



\* est la convolution

# Choix des bases (1/3)

Config 1

Configuration des télescopes

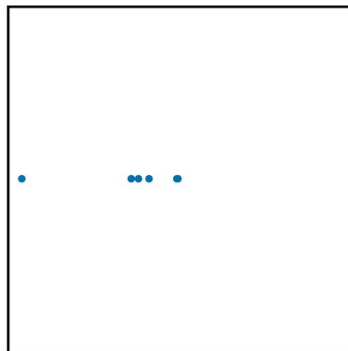
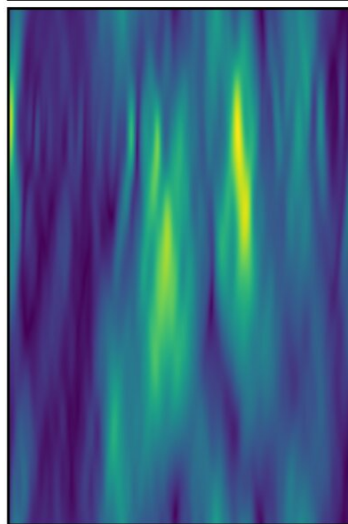
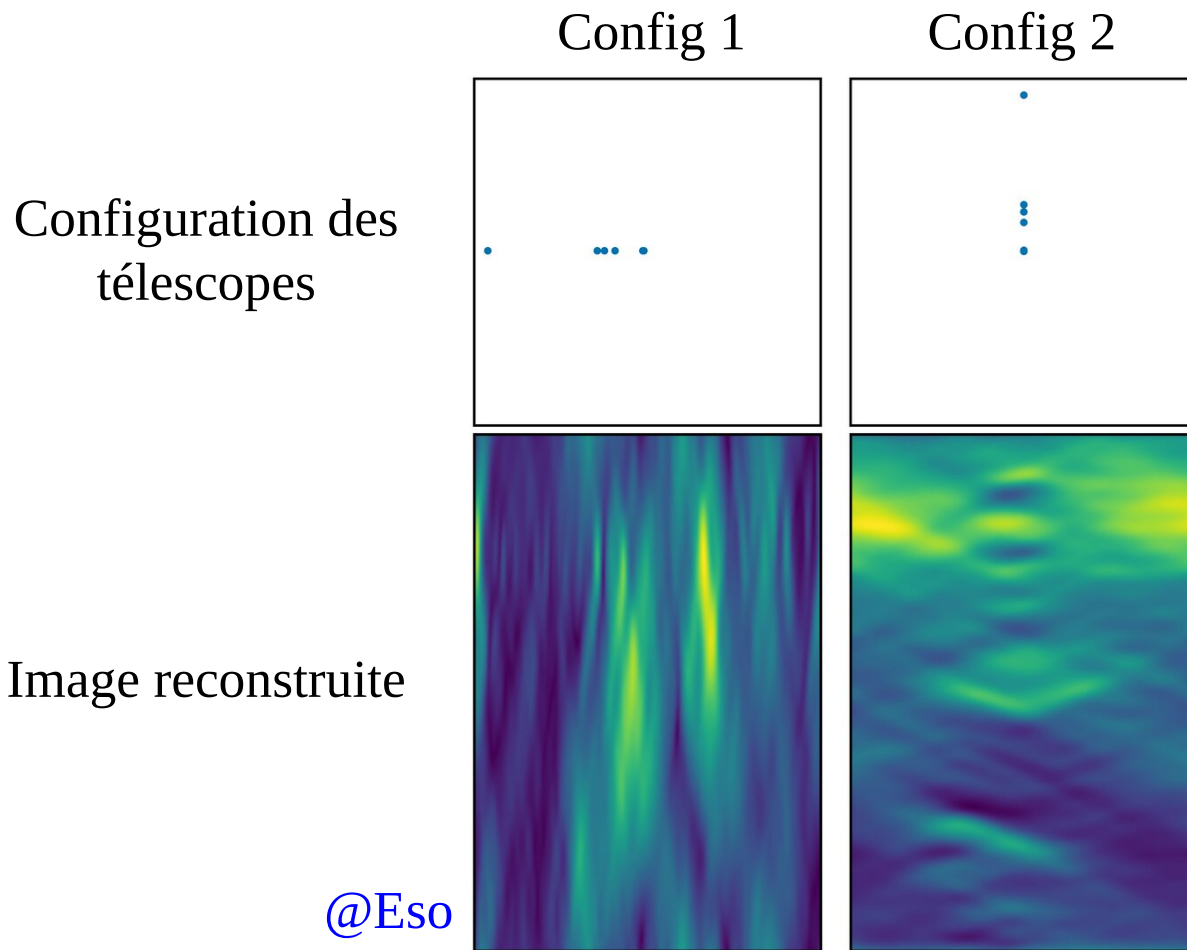


Image reconstruite



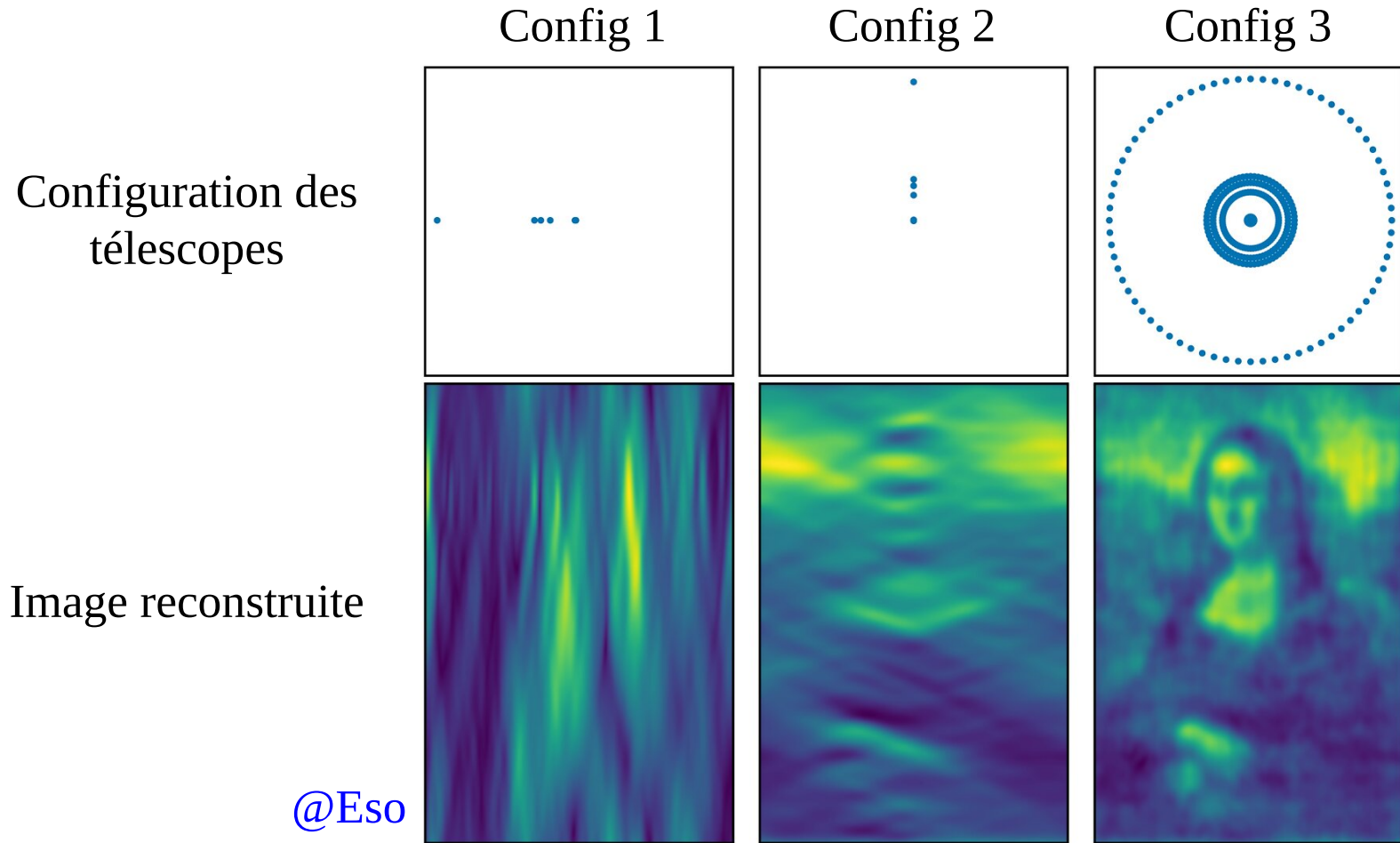
@Eso

# Choix des bases (2/3)



# Choix des bases (3/3)

**Se souvenir de ce qu'est capable de mesurer l'instrument !**



# Objet étendu observé par interférométrie optique (1/2)

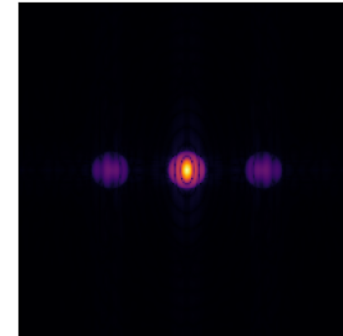
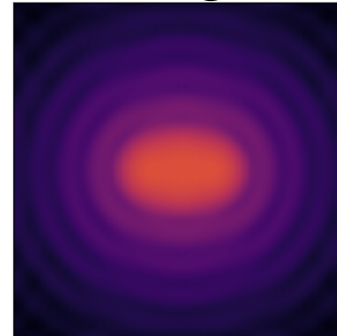
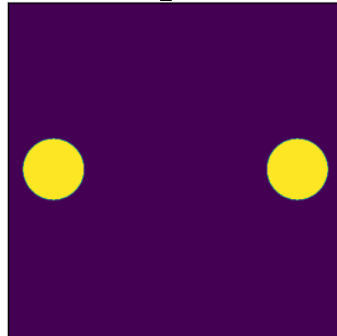
Objet

Pupille

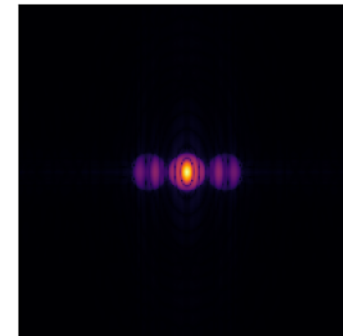
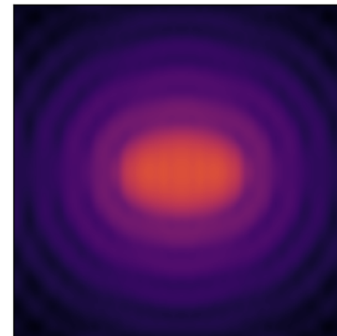
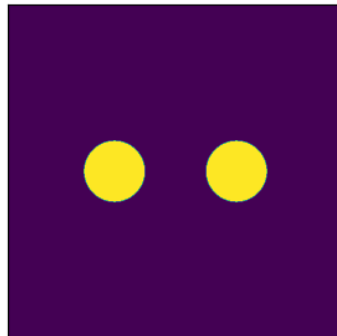
Image

FTM

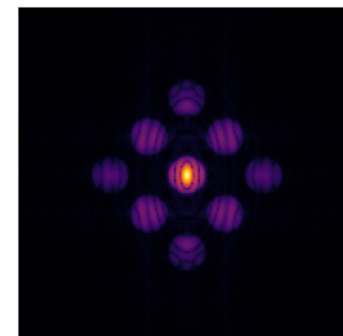
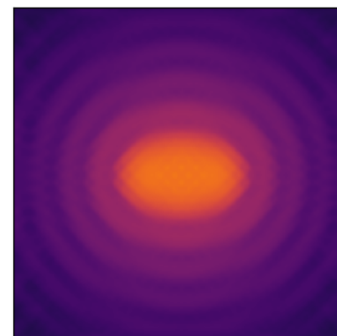
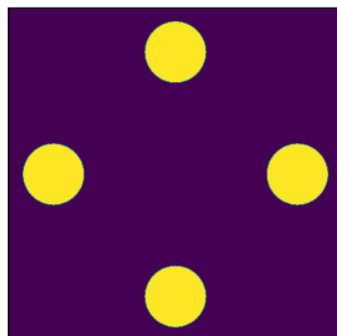
?



?



?



# Objet étendu observé par interférométrie optique (2/2)

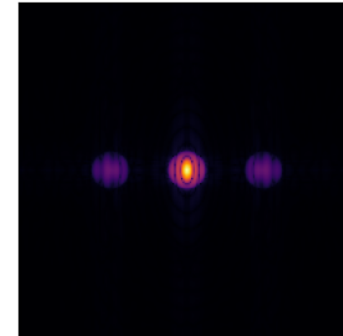
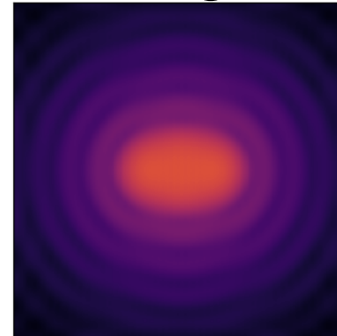
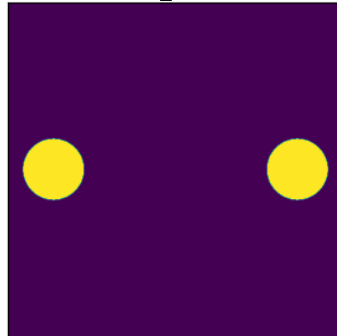
Objet

Pupille

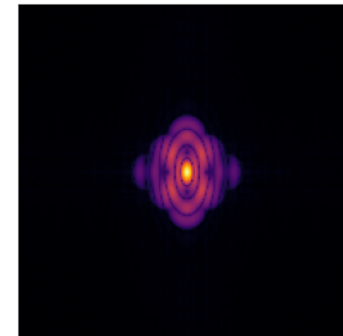
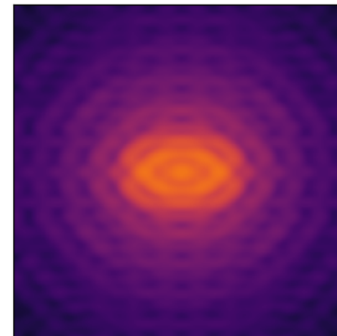
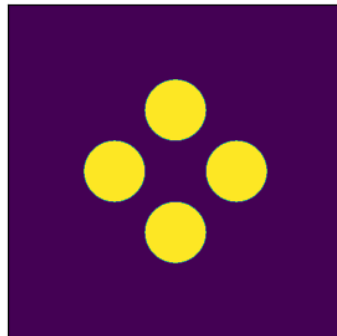
Image

FTM

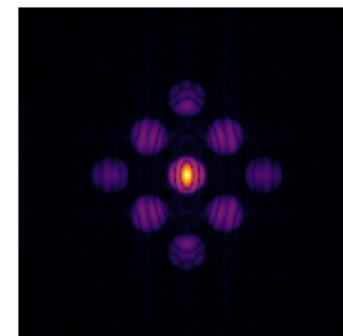
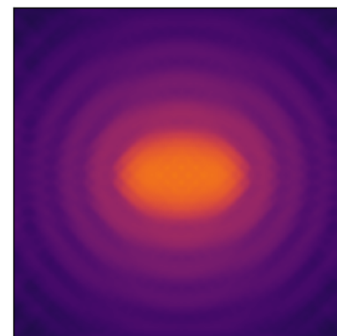
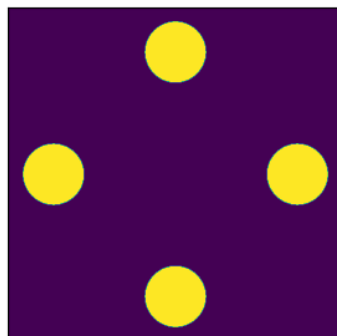
?



?



?



# Objet étendu observé par interférométrie optique (2/2)

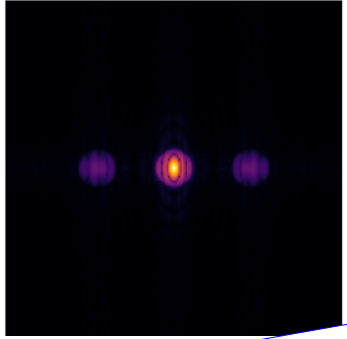
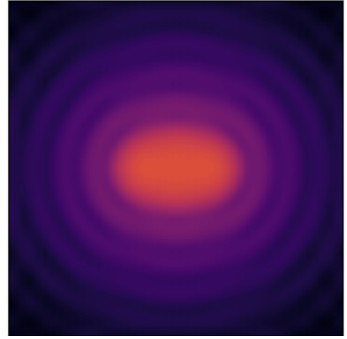
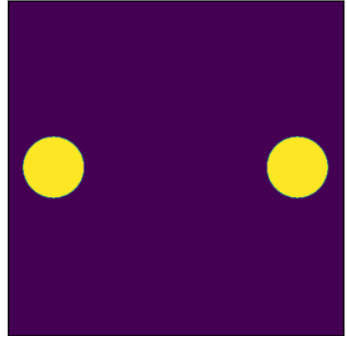
Objet

Pupille

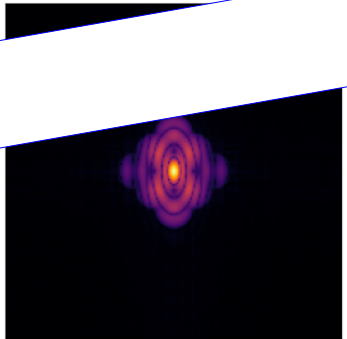
Image

FTM

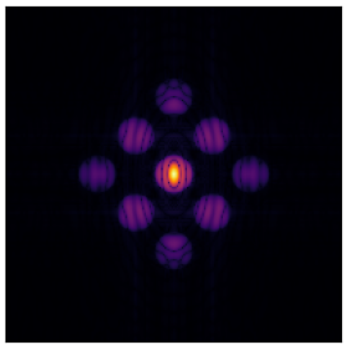
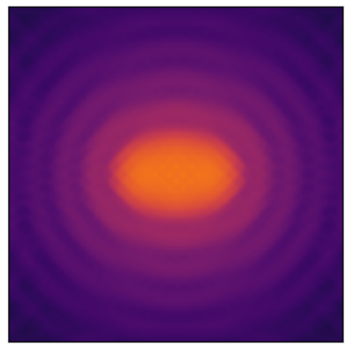
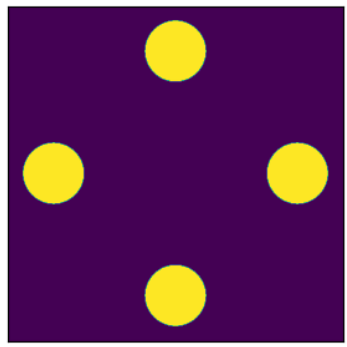
?



?



?



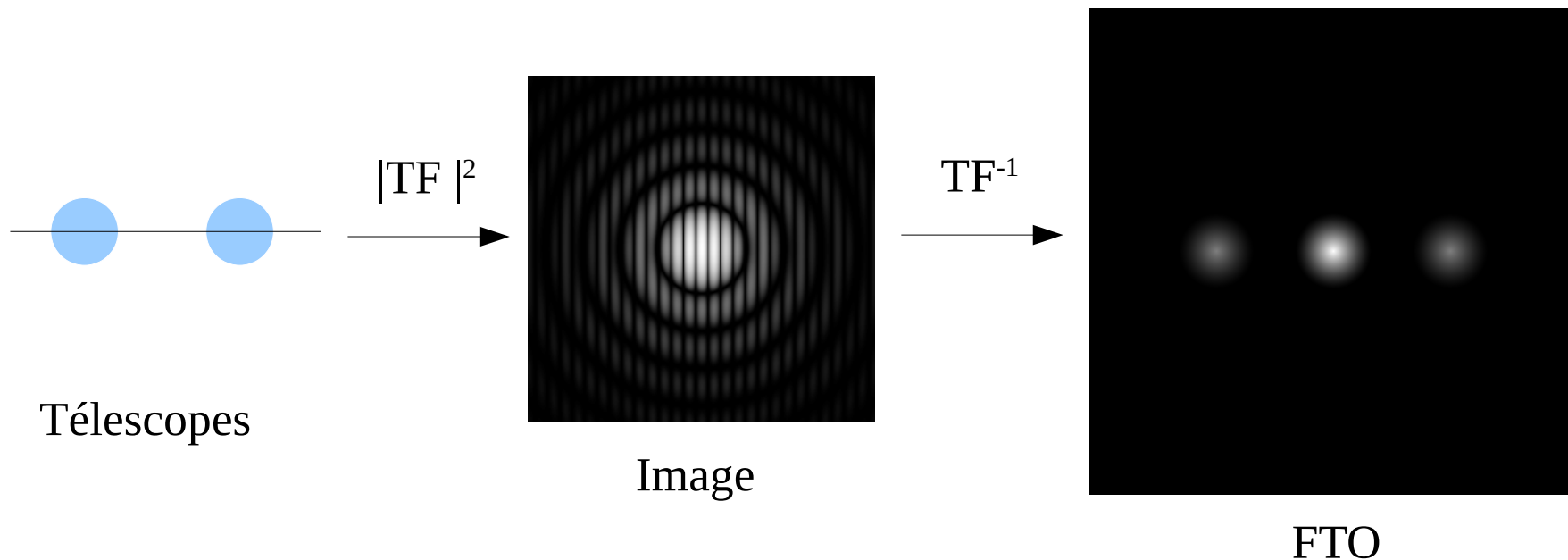
**Bien choisir la configuration**

# Deux télescopes : images et FTO (1/3)

2 télescopes

Base fixe

Objet ponctuel et à l'infini

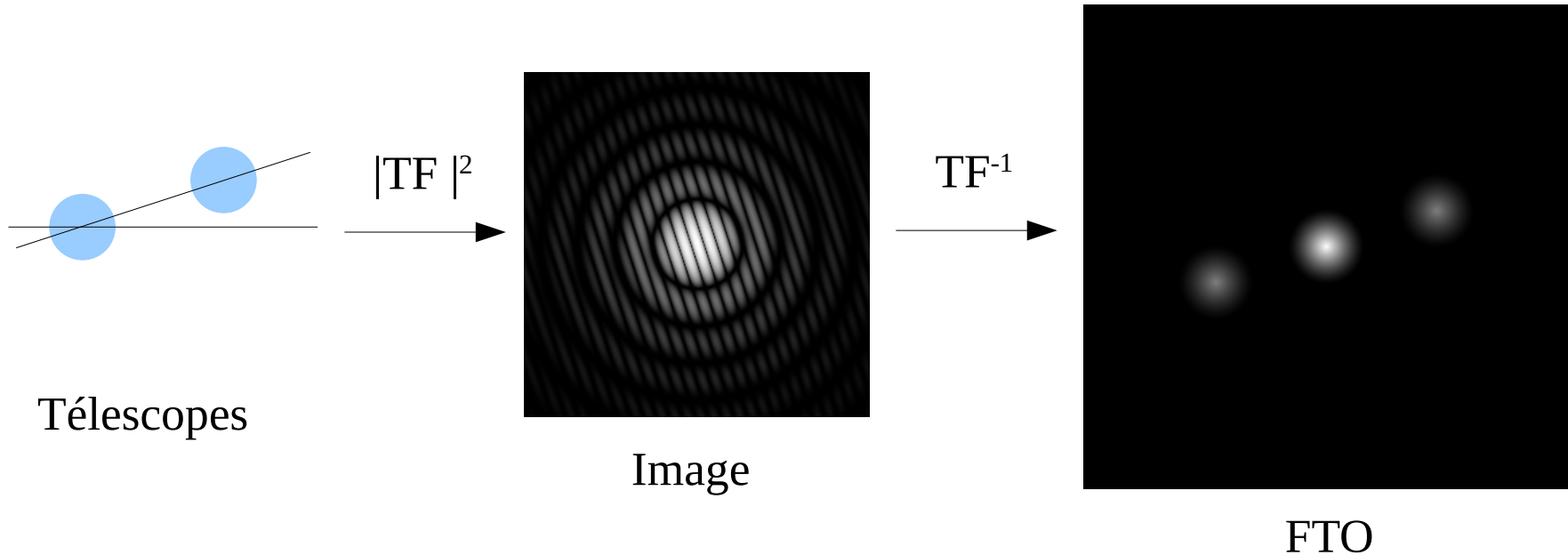


# Deux télescopes : images et FTO (2/3)

2 télescopes

Base fixe

Objet ponctuel et à l'infini

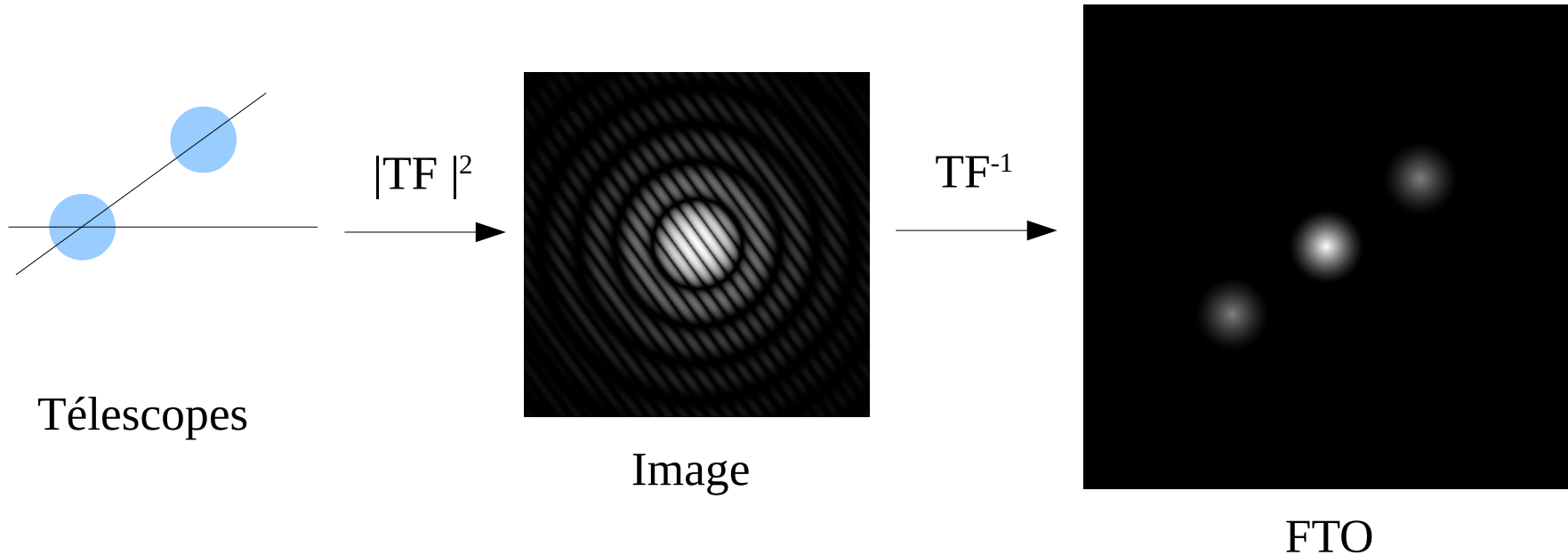


# Deux télescopes : images et FTO (3/3)

2 télescopes

Base fixe

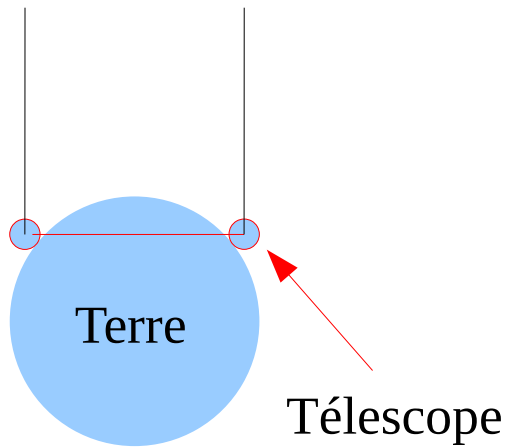
Objet ponctuel et à l'infini



# Rotation diurne de la Terre

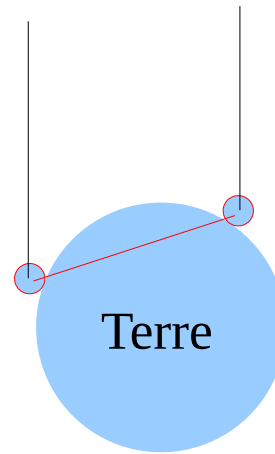
## Rotation Terre → balayage des fréquences spatiales (plan u,v)

Direction d'observation



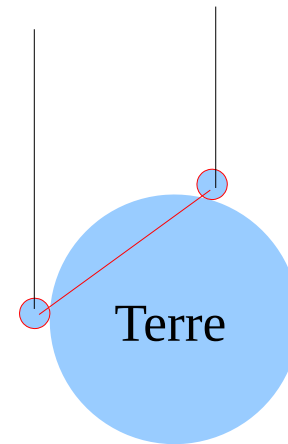
$t_0$

Direction d'observation



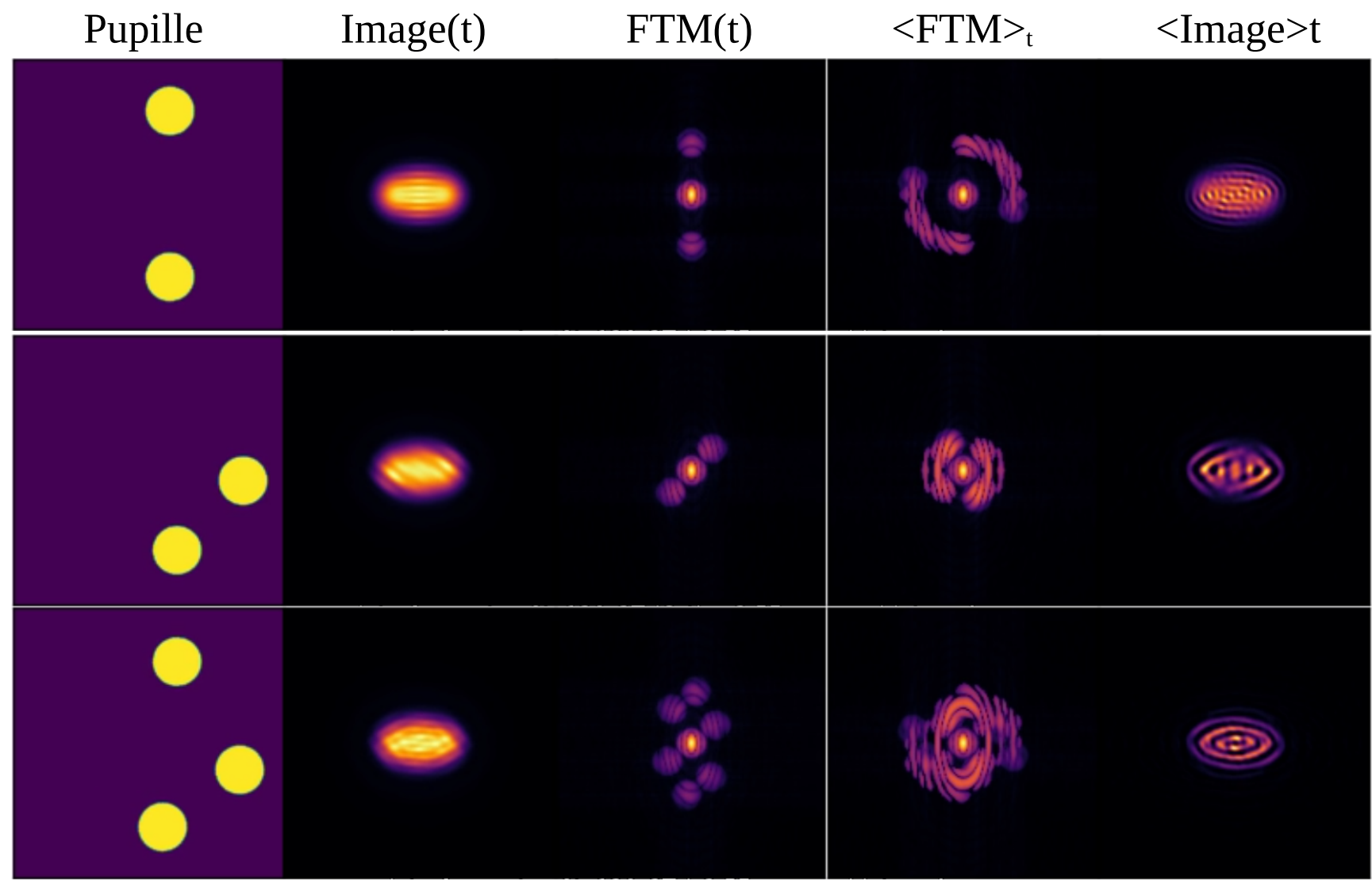
$t_0 + 1h$

Direction d'observation



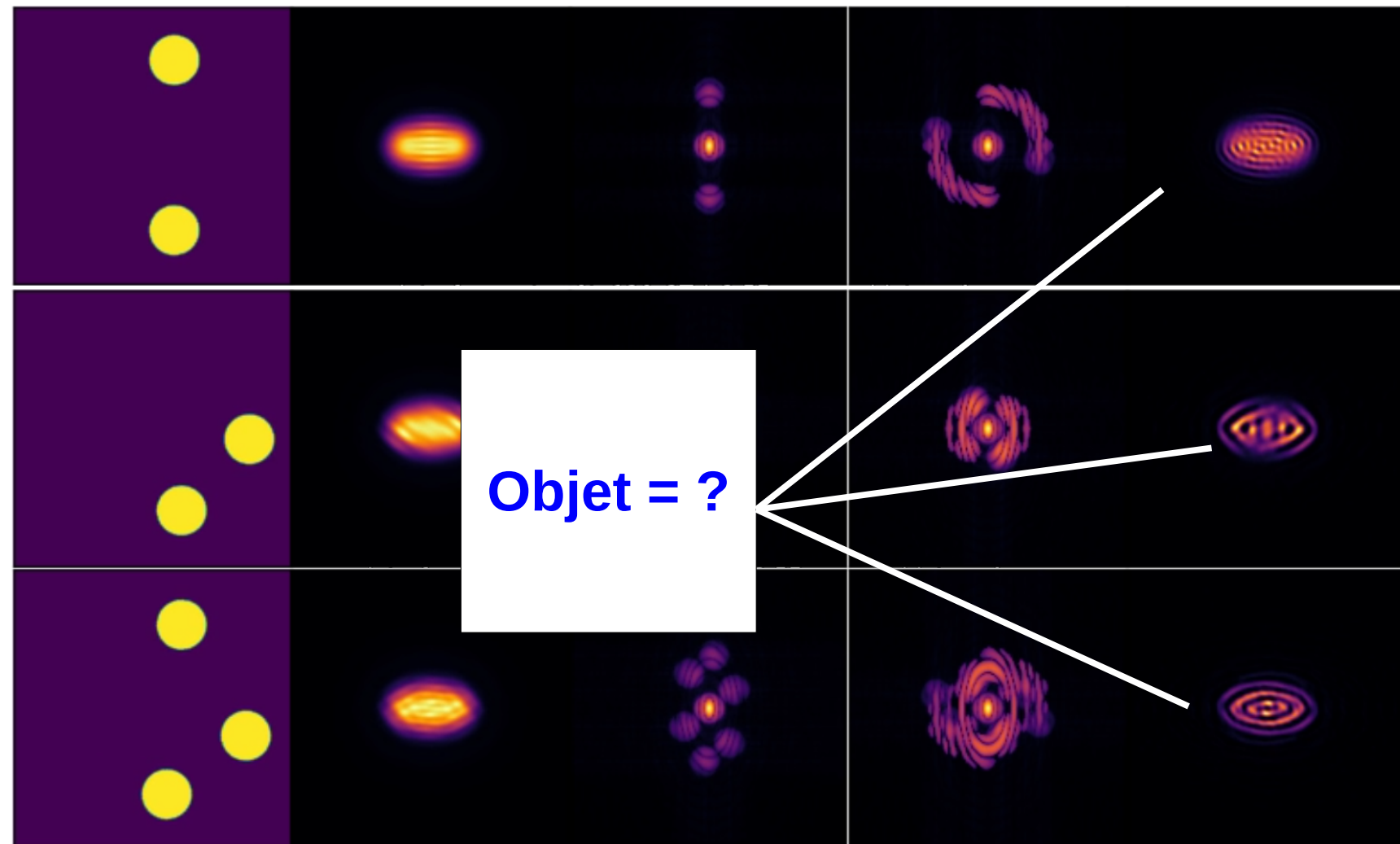
$t_0 + 2h$

# Couverture du plan (u,v)



# Couverture du plan (u,v)

Pupille      Image(t)      FTM(t)       $\langle \text{FTM} \rangle_t$        $\langle \text{Image} \rangle_t$

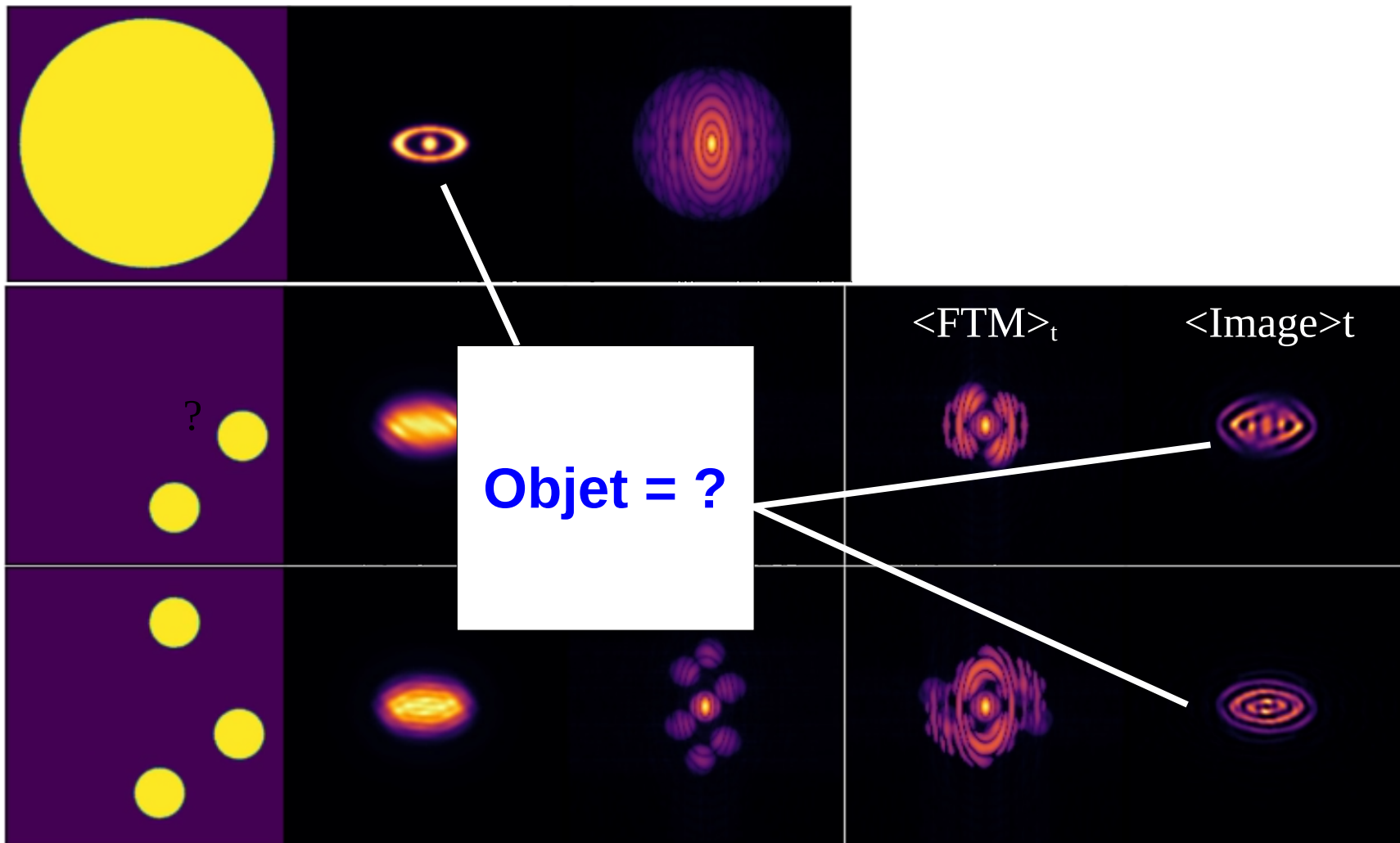


# Couverture du plan (u,v)

Pupille

Image(t)

FTM(t)



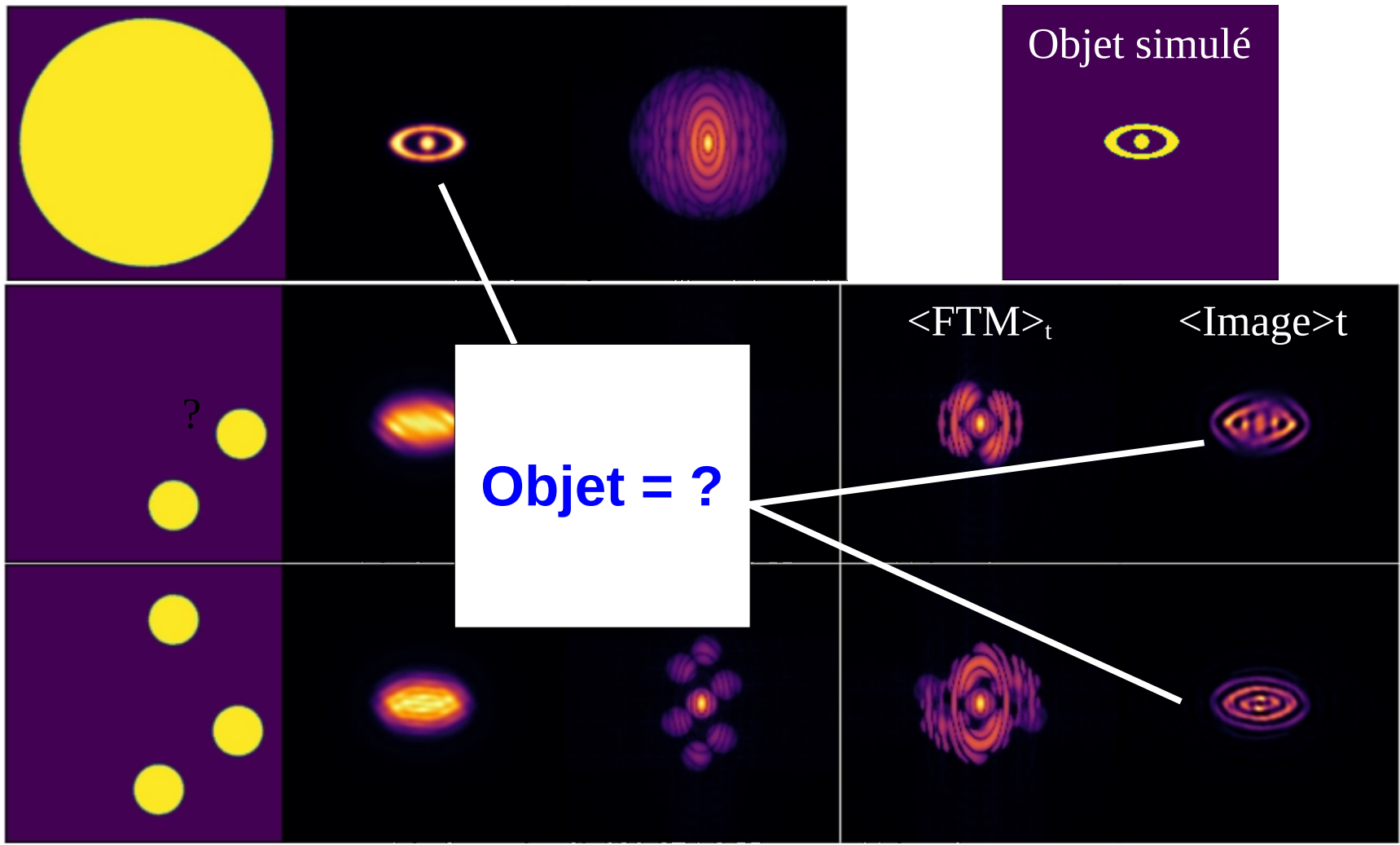
# Couverture du plan (u,v)

Pupille

Image(t)

FTM(t)

Objet simulé



**Objet = ?**

# Conclusions sur l'interférométrie optique

- Accès à des **fréquences spatiales non mesurables par un élément de l'interféromètre**  
Résolution d'un télescope  $\lambda/D$  avec  $D$  le diamètre d'un télescope  
Résolution de l'interféromètre  $\lambda/B$  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

Conditions

Cohérence spatiale

Cohérence temporelle

## Interférométrie optique en astronomie

Intérêt

Multi-télescopes avec recombinaison co-axiale

Multi-télescopes avec recombinaison multi-axiale

## Interférométrie et turbulence

Impact de la turbulence

Méthodes passives et méthodes actives

Filtrage spatial avec fibre monomode ( $D \sim r_0$ )

Interférométrie de speckles ( $D > r_0$ )

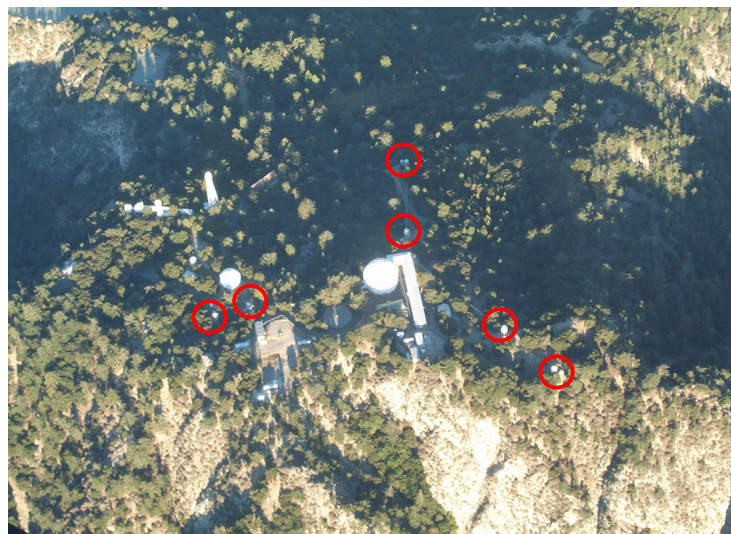
## Synthèse d'ouverture

## Exemples d'interféromètres optiques

# 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  $200\text{m}$



## Chara (Mont Wilson)

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

# 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 / VLTI : 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  $\mu\text{m}$ )

## Resolution angulaire

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

**Précision des mesures astrométriques** : 10 à 100  $\mu\text{as}$

# Gravity / VLT : comment ?

## Trois sources observées

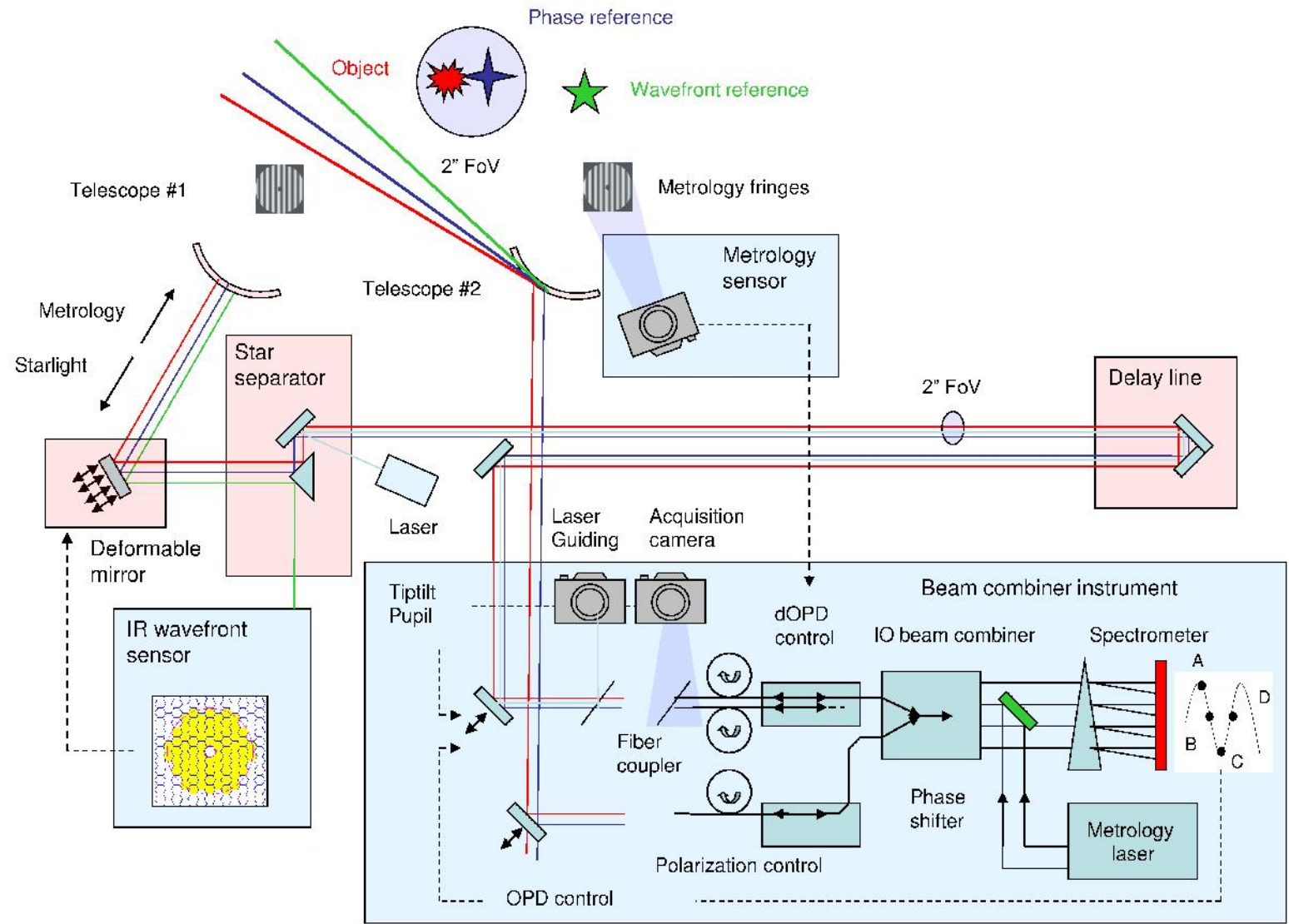
- Source astrophysique
- Étoile de référence pour le fringe tracking
- Étoile pour les optiques adaptatives (une OA par télescope)

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



Pour chaque canal spectral :

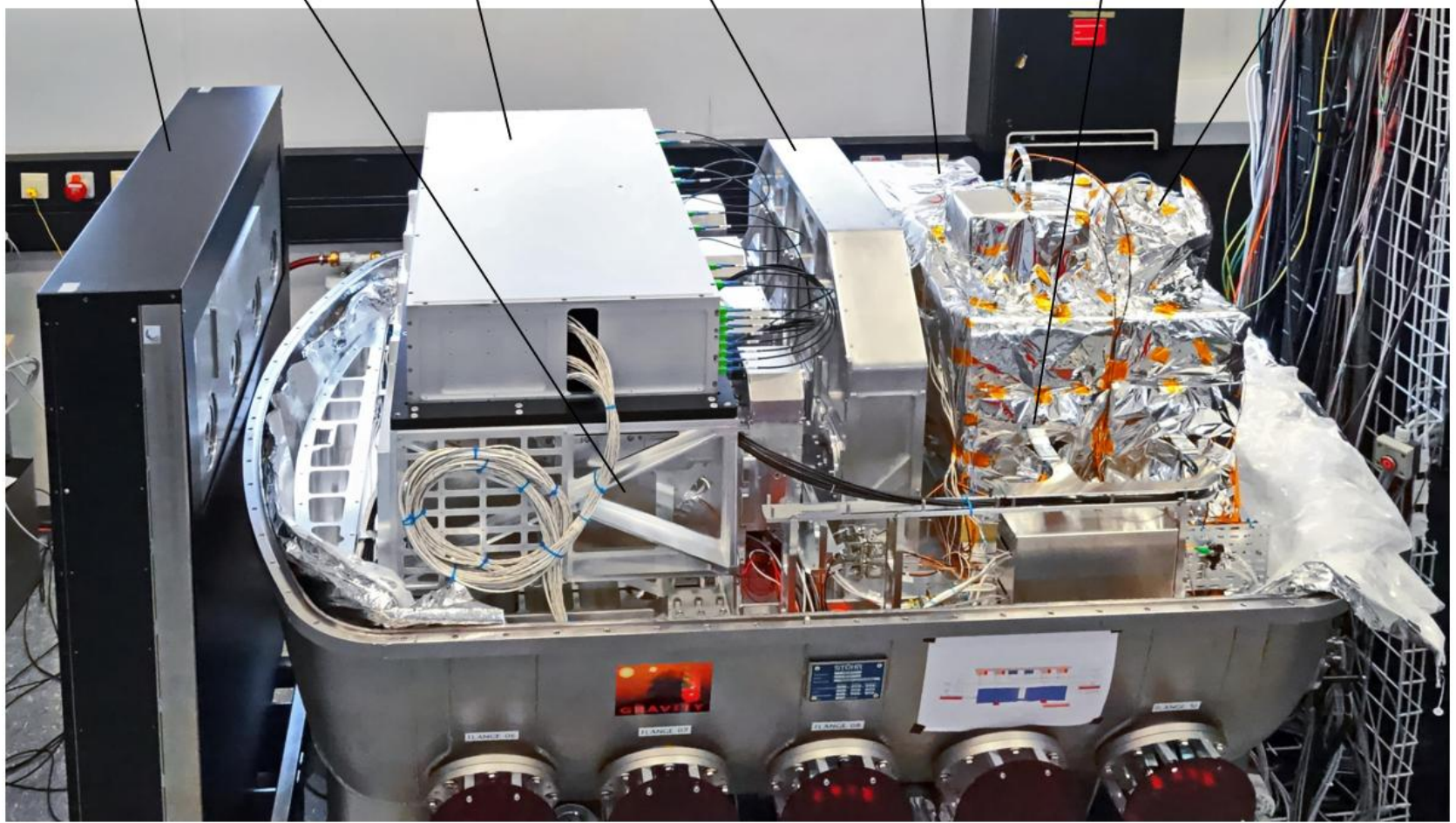
- Visibilité de l'étoile de référence
- Visibilité de l'objet astrophysique
- Phase entre la référence et l'objet astrophysique

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

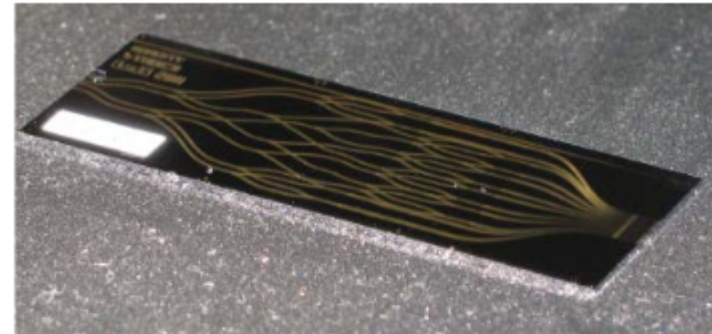
# Gravity / VLT photo

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

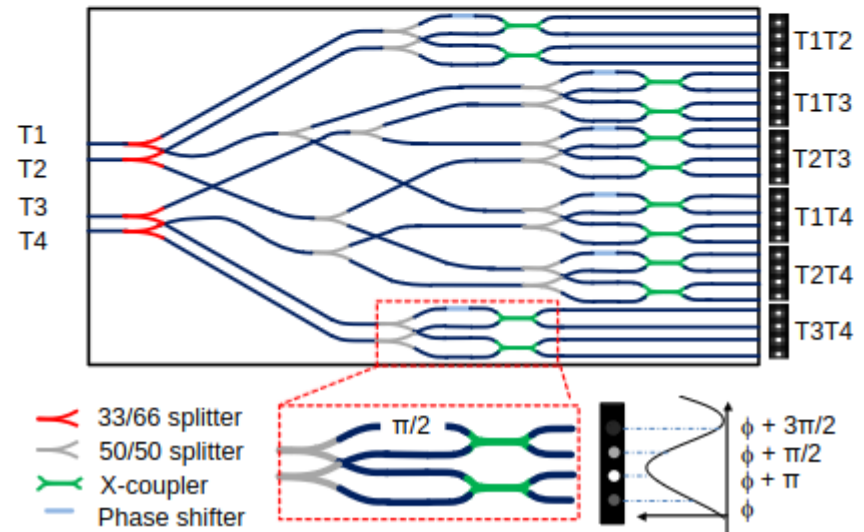


# Gravity / VLT : recombinaison de faisceau

Recombinaison avec de l'optique intégrée



Faisceaux arrivant des 4 télescopes



# 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 2