

# Very Large Telescope Interferometer: son état actuel, les premières franges, les développements futurs et ses objectifs scientifiques

**Françoise Delplancke**  
avec les contributions de:  
**Andreas Glindemann**  
**Bertrand Koehler**  
**Pierre Kervella**

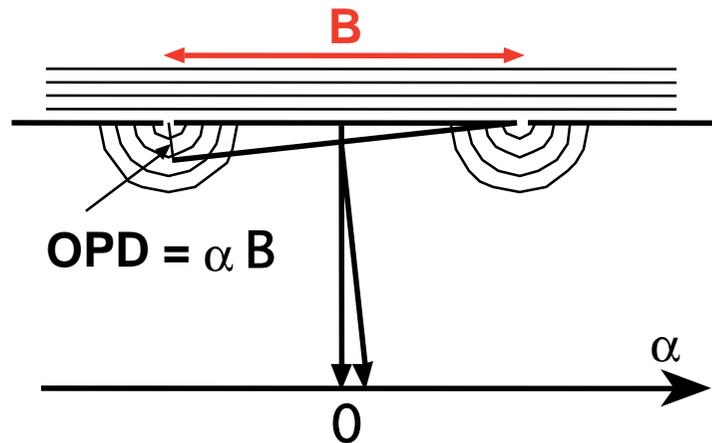
et toute l'équipe du VLTI et de Paranal



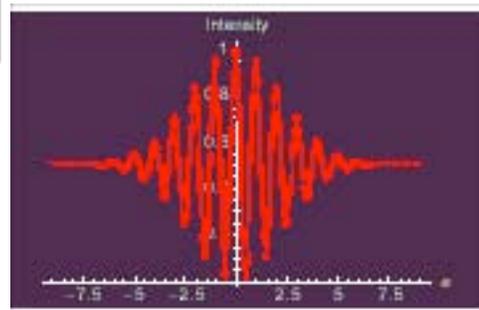
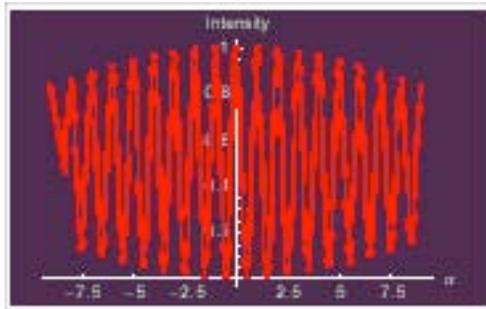
# Plan

- Principes de l'interférométrie et du VLTI:
  - interféromètre de Michelson
  - visibilité, plan u-v, imagerie, astrométrie
  - recombinaison optique
  - turbulence atmosphérique
- Structure du VLTI: éléments présents et futurs
- Premières franges
- Objectifs scientifiques

# Expérience de Young

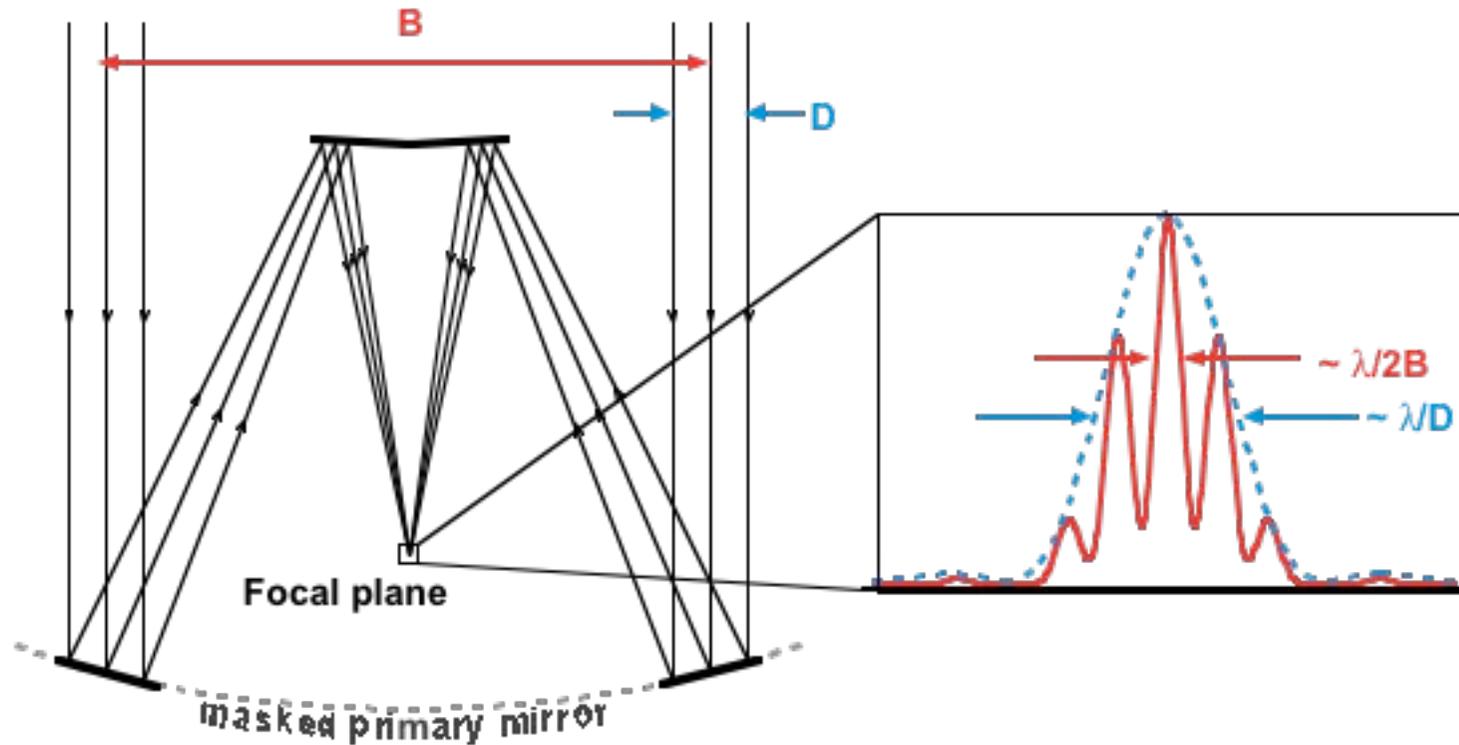


1er Min:  $OPD = \lambda/2 \Rightarrow \alpha_{\min} = \lambda/(2B)$



- Source à l'infini, à  $\alpha = 0$
- Intensité varie en  $\sim 1 + \cos$  en fonction de  $\alpha$ , période:  $\lambda/B$
- $OPD \Rightarrow$  longueur de cohérence  $\Rightarrow$  les franges disparaissent
- Source à un angle  $\alpha_0$   $\Rightarrow$  les franges se déplacent

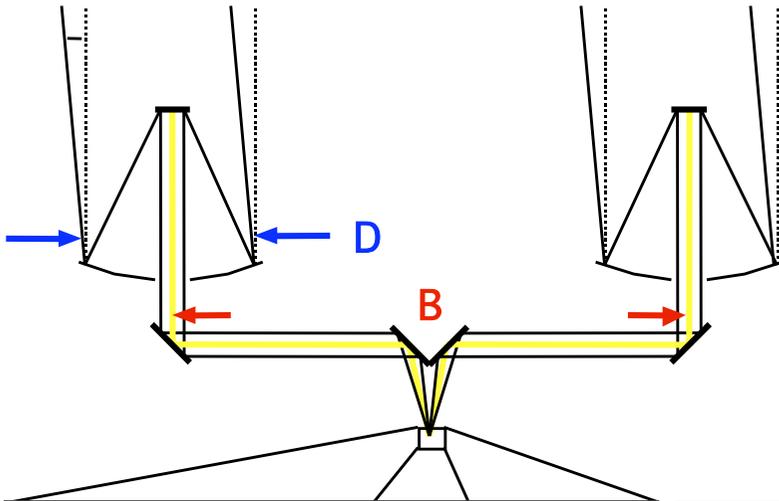
# Télescope masqué



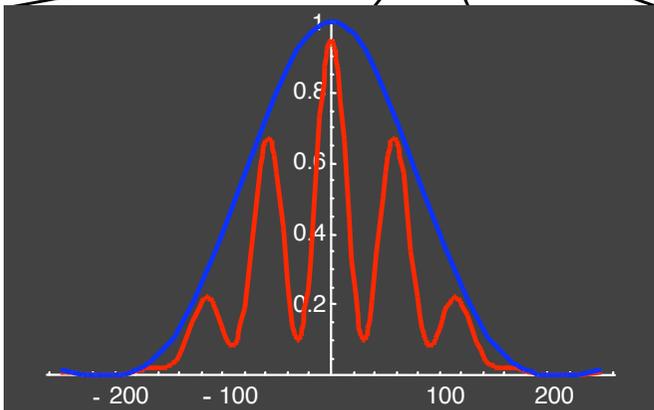
- Masque => sélection d'une "ligne de base" particulière.
- Image au foyer = superposition des franges de toutes les bases

# Interféromètre stellaire de Michelson

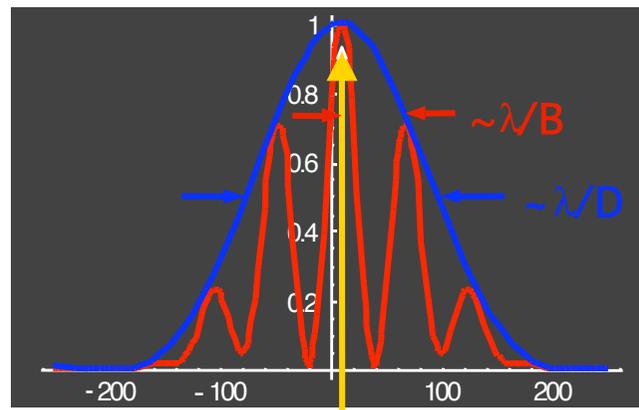
$\alpha_0/2$



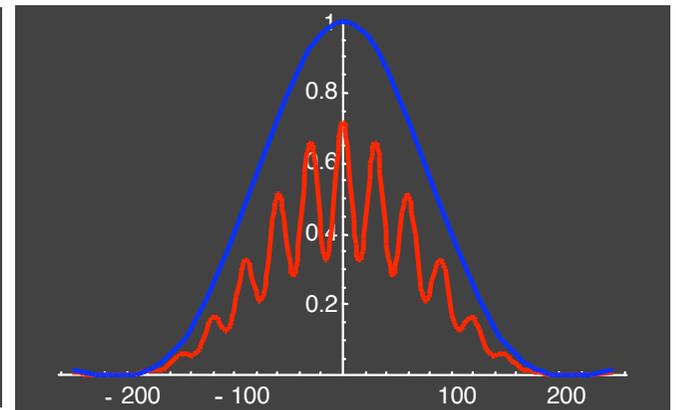
- Source de diamètre angulaire  $\alpha_0$
- Sommer les franges (intensité) entre  $\pm\alpha_0/2$
- => franges avec un contraste réduit (fonction de B et de  $\alpha_0$ )



$\alpha=0$



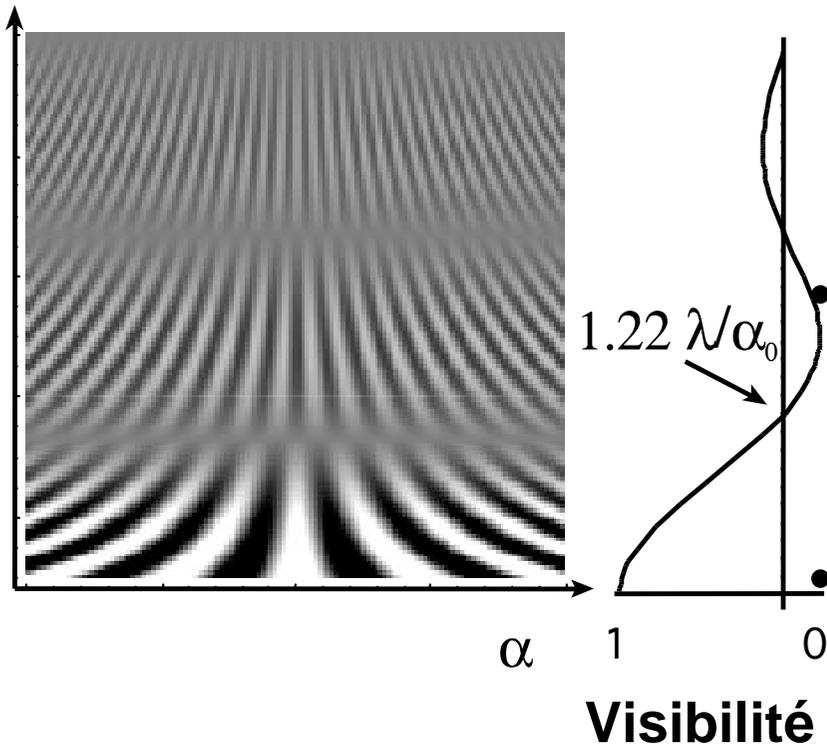
$\alpha=\alpha_0/2$



total

# Fonction de visibilité

Ligne de base [m]



- Les franges dépendent de  $B$ , de la forme de l'objet (distribution d'intensité) et de la longueur d'onde (spectre):

$$\text{Visibilité}(B/\lambda) = \mathcal{T}\mathcal{F}(I(\alpha))$$

- Objet = cercle uniforme =>

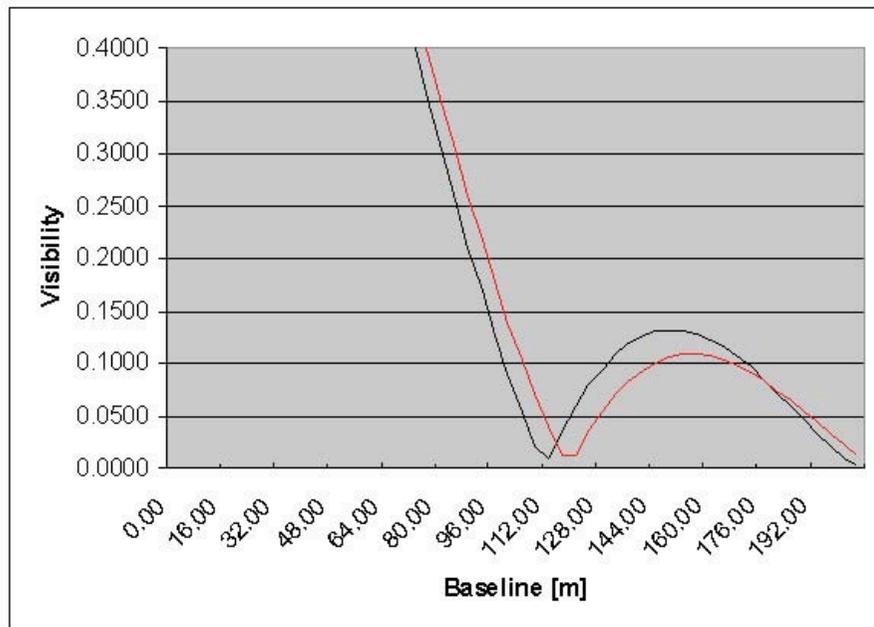
$$I(\alpha) = \text{Circ}(\alpha/\alpha_0)$$

$$\text{Vis}(B) = \text{Besinc}(\pi\alpha_0 B/\lambda)$$

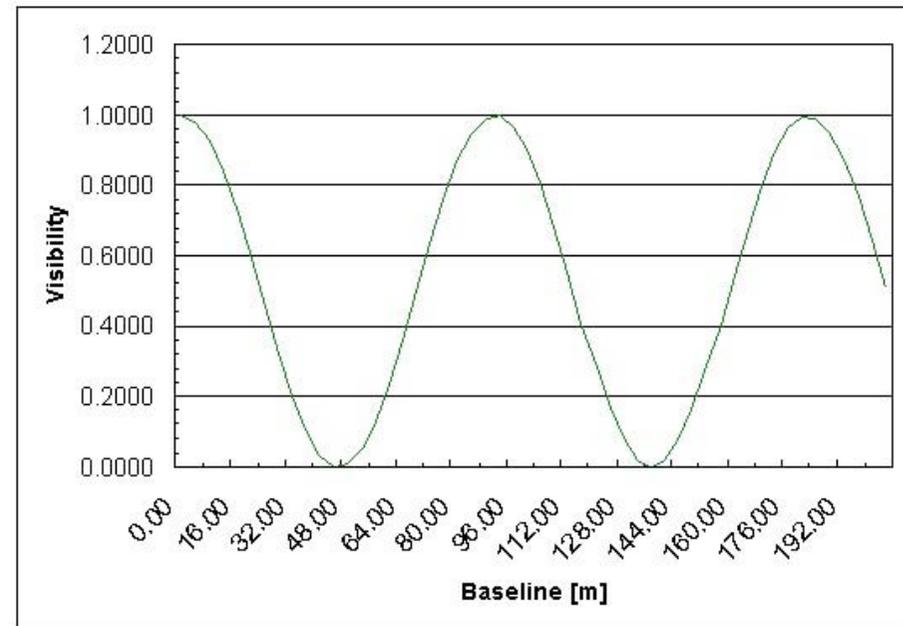
- Objet quelconque => visibilité complexe
  - module = contraste des franges
  - phase = position de la frange blanche (élément essentiel pour l'imagerie)

# Exemples de fonctions de visibilité

Disque uniforme + effet de bord:  
(diamètre 5 milliarcsec)



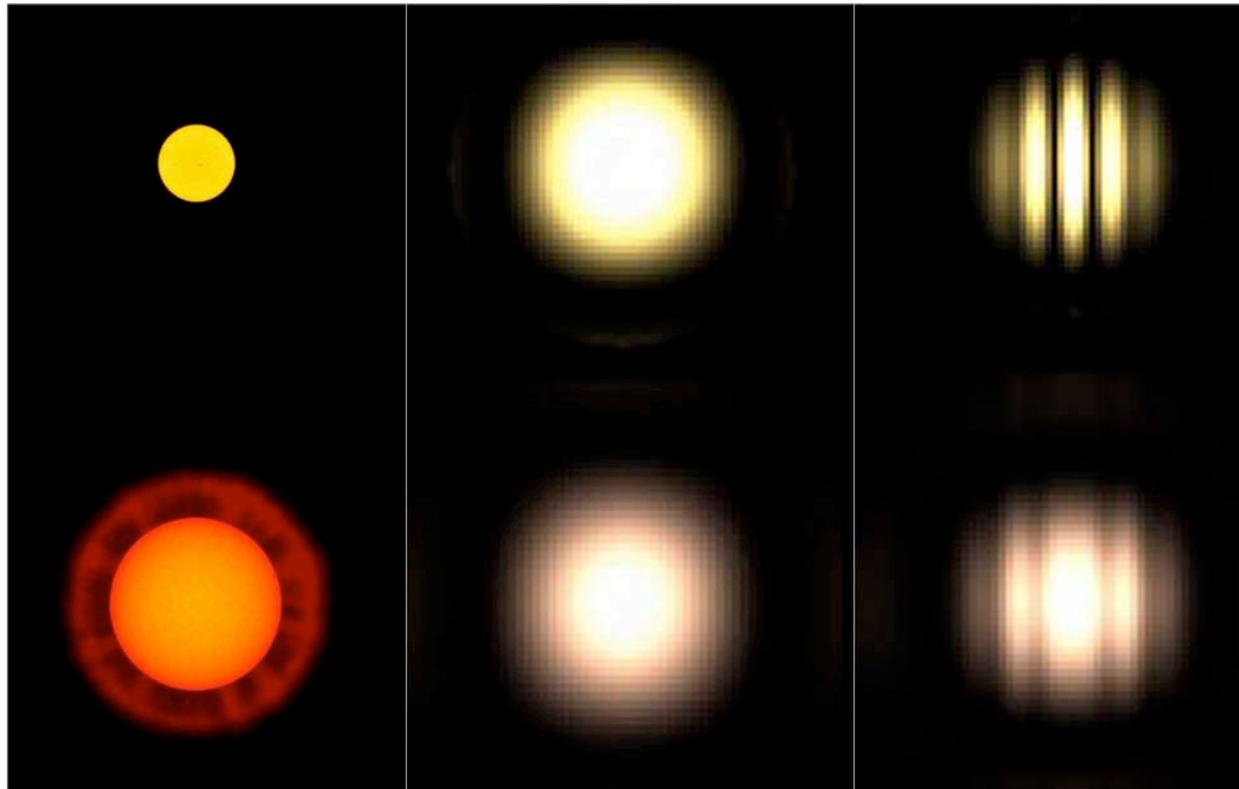
Etoile double:  
(séparation 5 milliarcsec)



Note: ne pas confondre  
cette fonction cos avec les  
franges

# Quel est l'avantage de l'imagerie interférométrique?

“Petite”  
étoile



“Grosse”  
étoile

Objets

Télescope simple

Franges

$$I_{\text{im}}(\alpha) \sim \mathcal{F}(D)$$

$$I_{\text{im}}(\alpha) \sim \mathcal{F}(B)$$

Résolution angulaire:  $\sim \lambda/D$

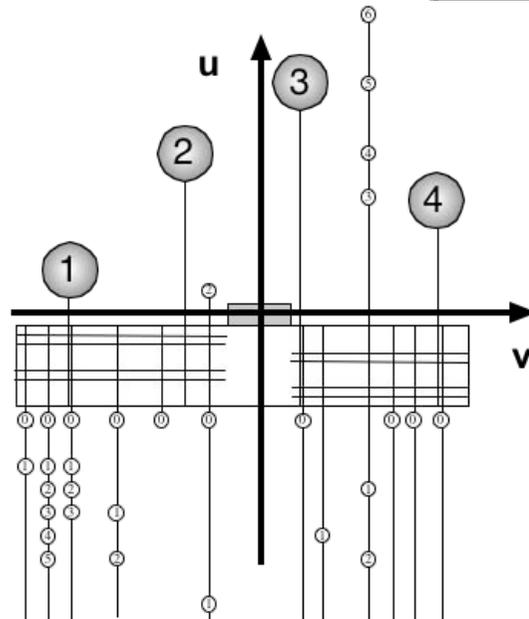
$\sim \lambda/B$

# Imagerie

- Intensité de l'image:  $I_{im}(\alpha) = \mathcal{TFI}(\Gamma(u_1 - u_2))$ ,  
avec  $u_1 - u_2 =$  vecteur de ligne de base et  $\Gamma =$  visibilité complexe
- Le remplissage du plan  $u-v$  détermine la régularité de l'image reconstruite

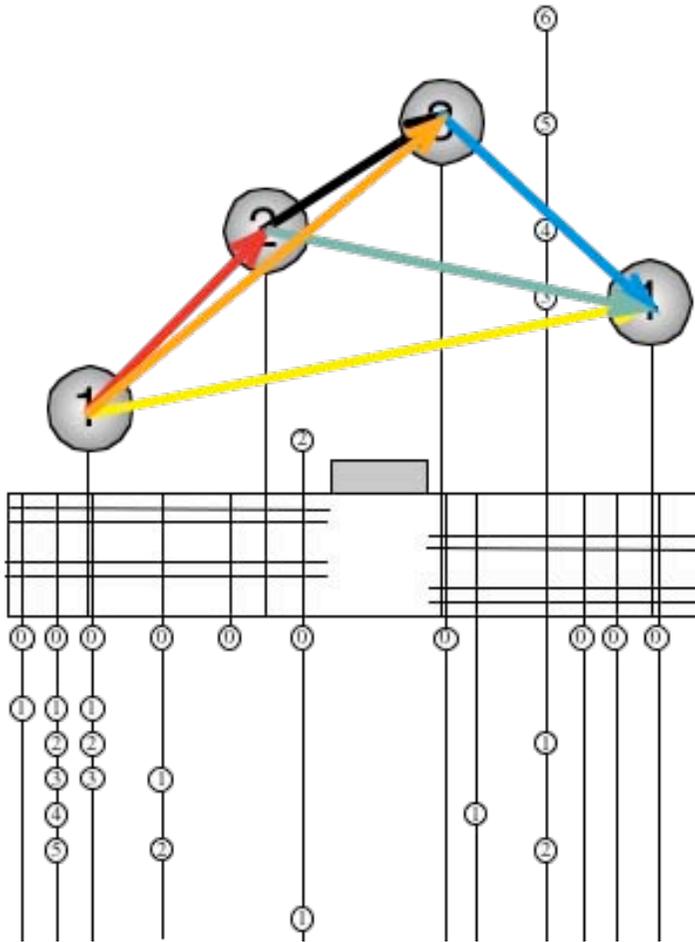
=> mesurer la visibilité et la phase pour de nombreux  $u_1 - u_2$

Note: Ceci

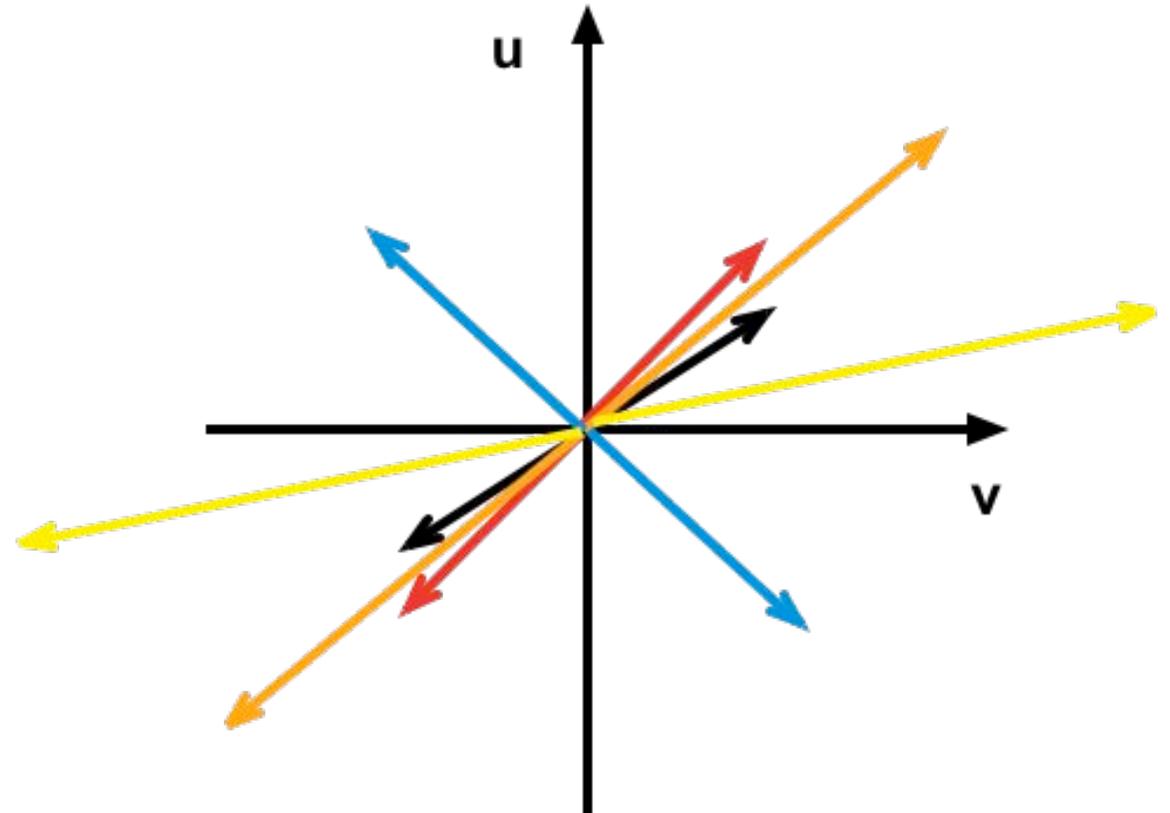


n'est PAS le plan  $u-v$ !

# Le plan u-v du VLTI

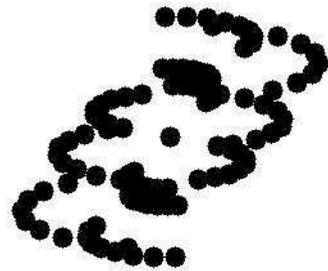


Ceci est le plan u-v:

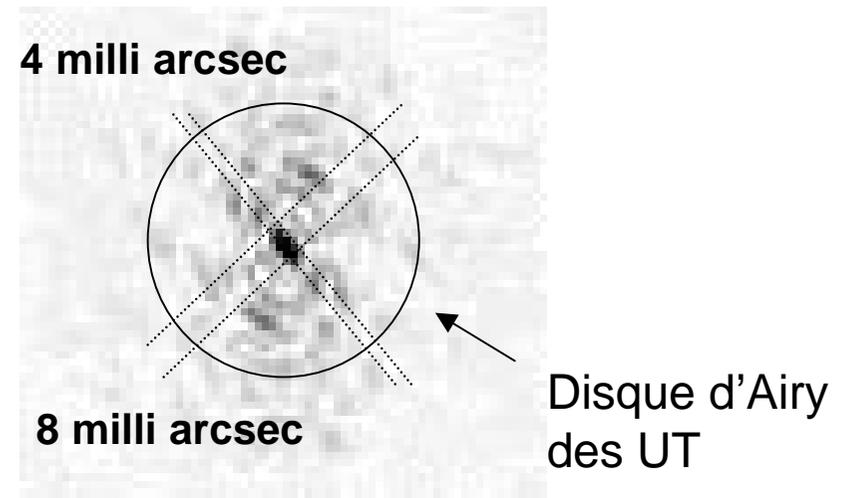


pour un objet au zénith. Sinon, la projection de la ligne de base doit être utilisée.

## Le plan uv avec les UTs



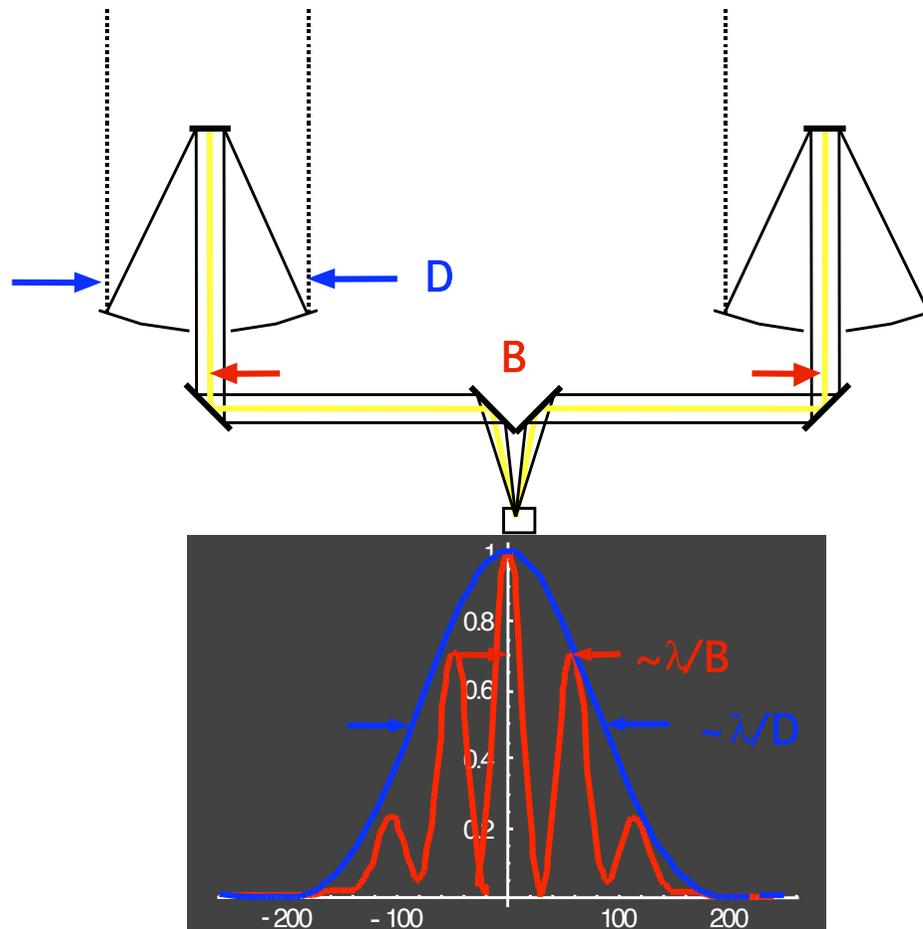
Couverture uv pour un objet à  $-15^\circ$  et 8h d'observation avec tous les UTs



PSF reconstruite par transformée de Fourier de la visibilité à  $\lambda = 2.2\mu\text{m}$  (bande K)

# Franges spatiales (AMBER)

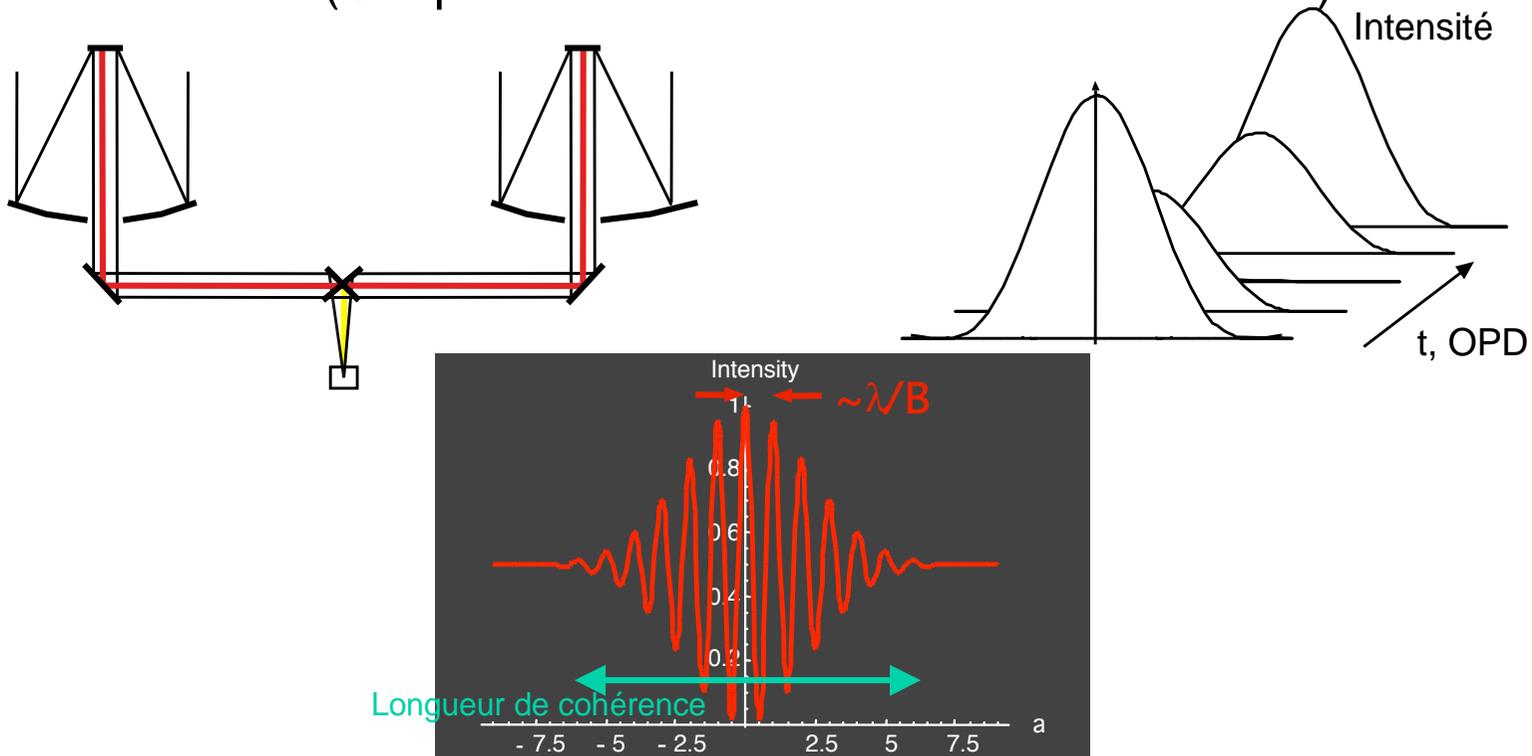
- Michelson => combinaison multi-axiale => franges spatiales enveloppées par un disque d'Airy



# Franges temporelles (VINCI, FINITO)

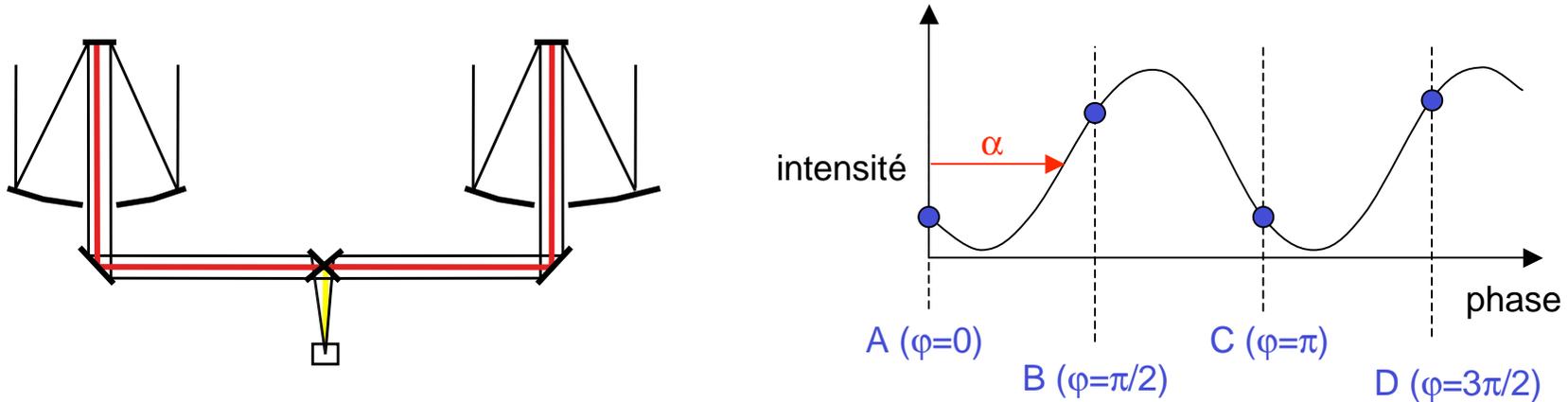
- Combinaison co-axiale => tache d'Airy uniforme (intensité = fonction de l'OPD)
- avec modulation temporelle de l'OPD => intensité variant au cours du temps =>

franges temporelles enveloppées dans  
la transformée de Fourier du spectre de l'étoile  
(Cf spectromètre à transformée de Fourier)



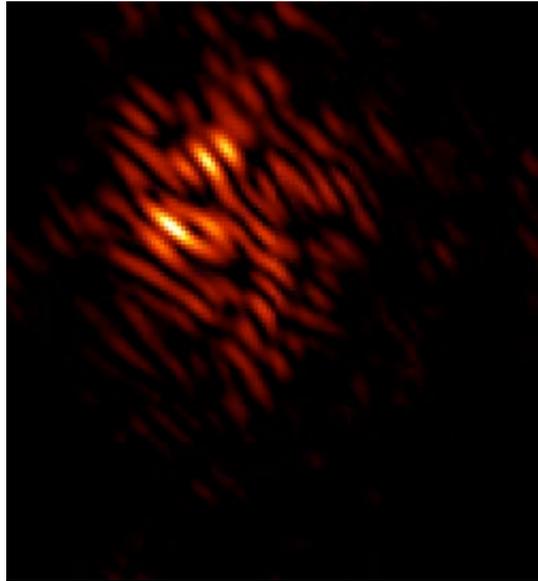
## Franges discrètes (ABCD) (MIDI, PRIMA)

- Combinaison co-axiale => tache d'Airy uniforme
- Sauts discrets de phase ( $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ )



- 4 pixels de détection => A, B, C, D => fit d'une courbe:  
$$1 + |V| \cdot \cos(\alpha + \varphi)$$
  
=> visibilité ( $|V|$ ) et phase ( $\alpha$ )
- + dispersion chromatique (éventuellement)

# Turbulence atmosphérique - qualité d'image



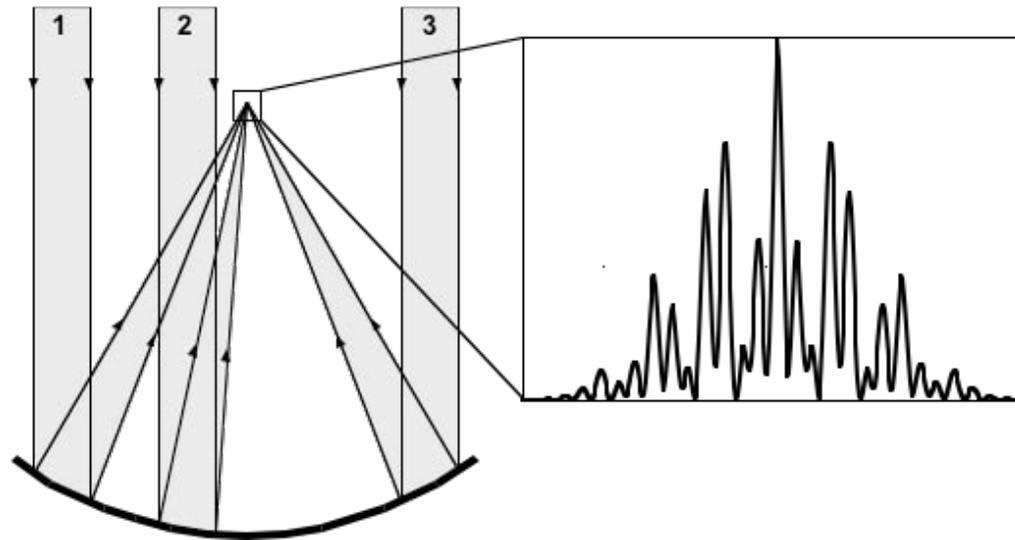
Franges spatiales pour  
2 UTs à  $2.2 \mu\text{m}$   
avec un seeing de  $0.5''$

- **But:** Mesurer le contraste et la position des franges malgré les tavelures et leur variation rapide au cours du temps
- **Nécessite:**
  - petite taille de pixel (1- 10 milli arcsec) + court temps d'intégration ( $\sim 10$  msec) ou
  - filtrage spatial et / ou
  - optique adaptative
- **Note:** La résolution angulaire ne dépend que de la longueur de la base. Toute amélioration de la qualité d'image n'affecte que la sensibilité.

# Turbulence atmosphérique - Piston

- Piston non corrigé (non mesuré) par l'optique adaptative  
=> temps d'exposition limité à environ 10 msec (dépend de  $\lambda$ )
- Solution:  
Etoile brillante pour suivre les franges et les stabiliser  
Intégration des franges sur l'objet scientifique
- Concept similaire à l'optique adaptative  
**Un interféromètre ne peut pas observer des objets faibles sans suiveur de franges !**
- Le piston perturbe aussi la phase (les franges dansent)  
=> problème pour l'imagerie et l'astrométrie =>
  - clôture de phase ou
  - référence de phase

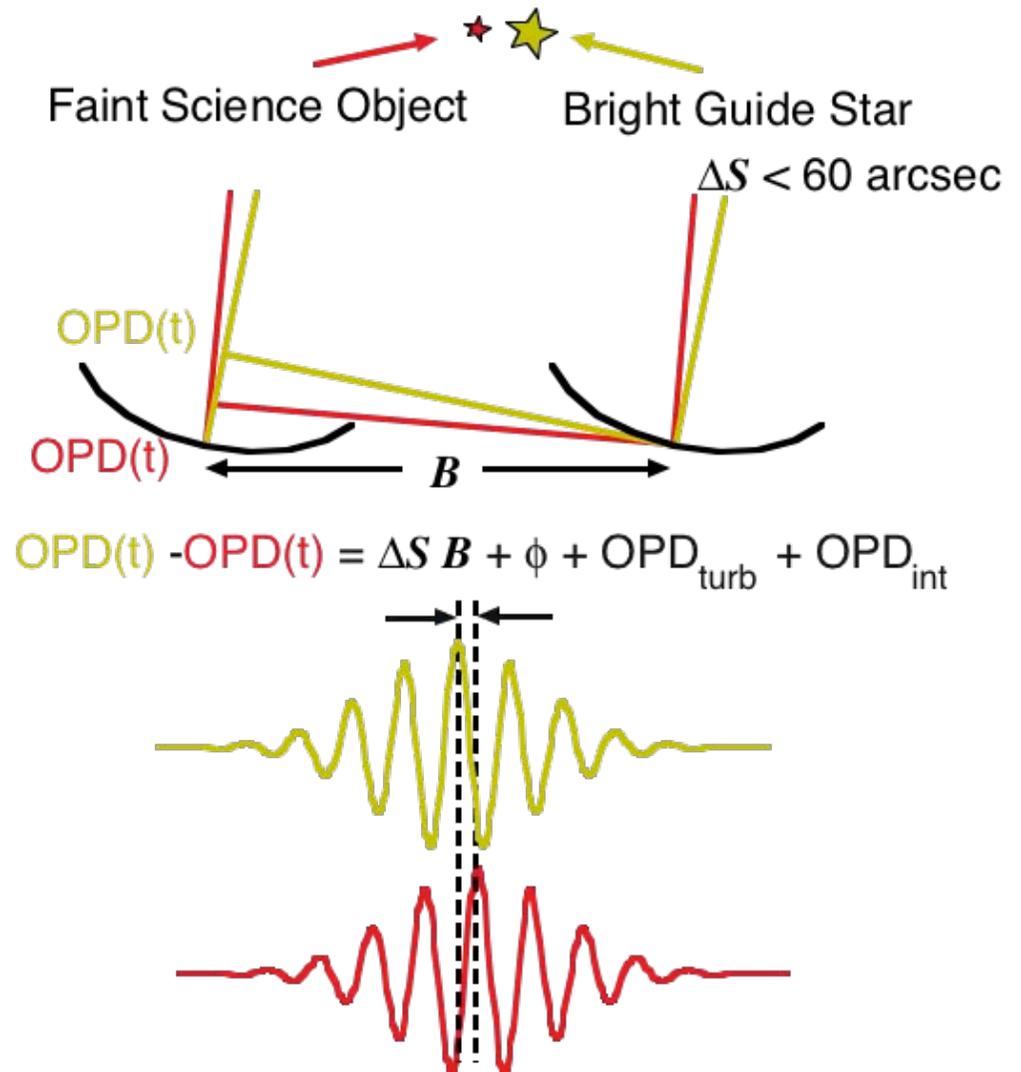
## Clôture de phase (AMBER)



- Trois lignes de base ( $B'_{12}$ ,  $B'_{23}$ ,  $B'_{13}$ ) produisent 3 fréquences spatiales différentes dans les franges => séparation des fréquences individuelles dans l'espace de Fourier
- La somme des 3 phases (3 lignes de base) est indépendante de la turbulence atmosphérique.
- Répétition sur un grand nombre de bases => phases individuelles

# Référence de phase - PRIMA

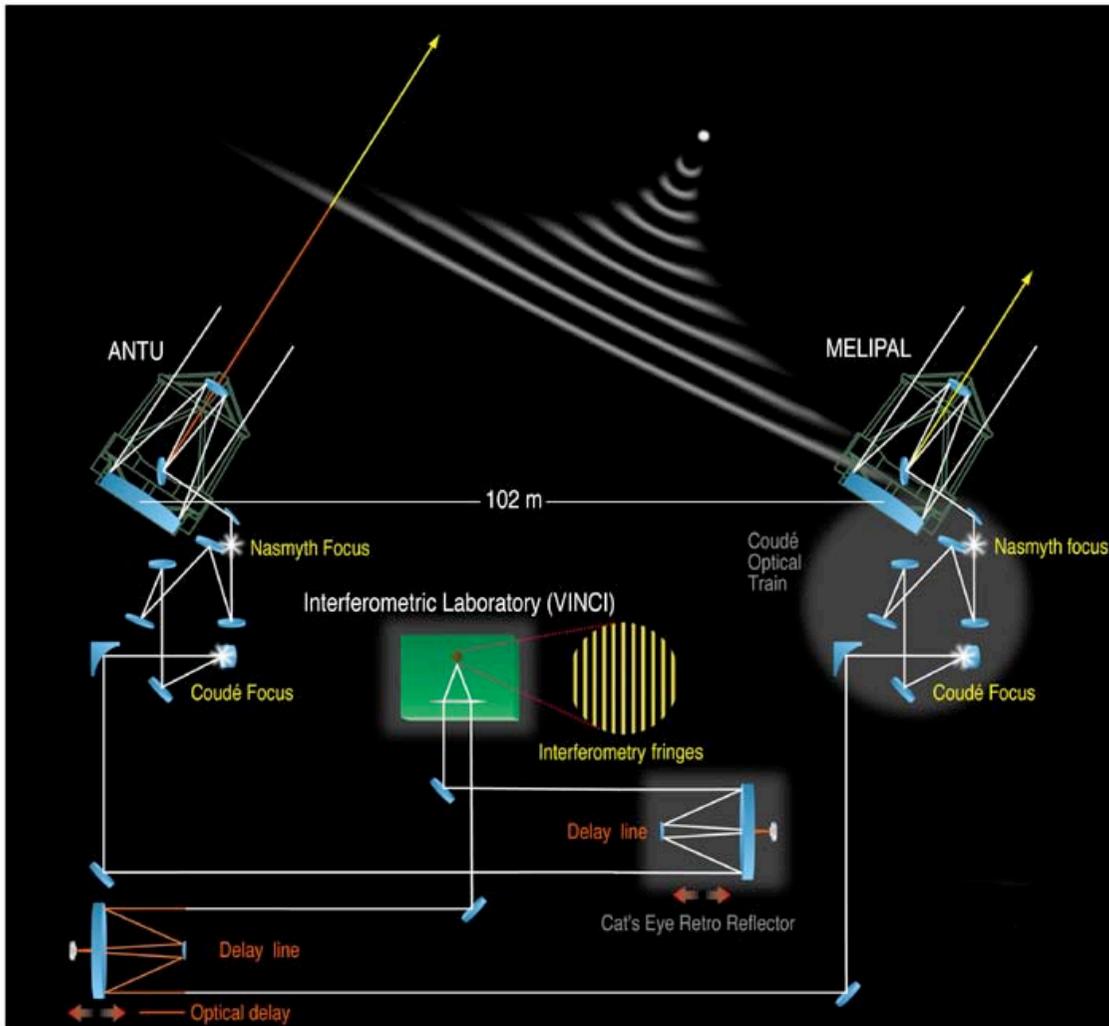
- Prélever 2 étoiles dans un champ de 2 arcmin
  - étoile brillante de référence
  - objet scientifique faible
- $OPD_{int}$  mesuré avec une métrologie laser
- $OPD_{turb}$  moyenné sur un temps long
- $\Delta S B + \phi$  mesuré par les instruments interférométriques
- $\Delta S \Rightarrow$  astrométrie,
- $\phi \Rightarrow$  imagerie



# Composants d'un interféromètre

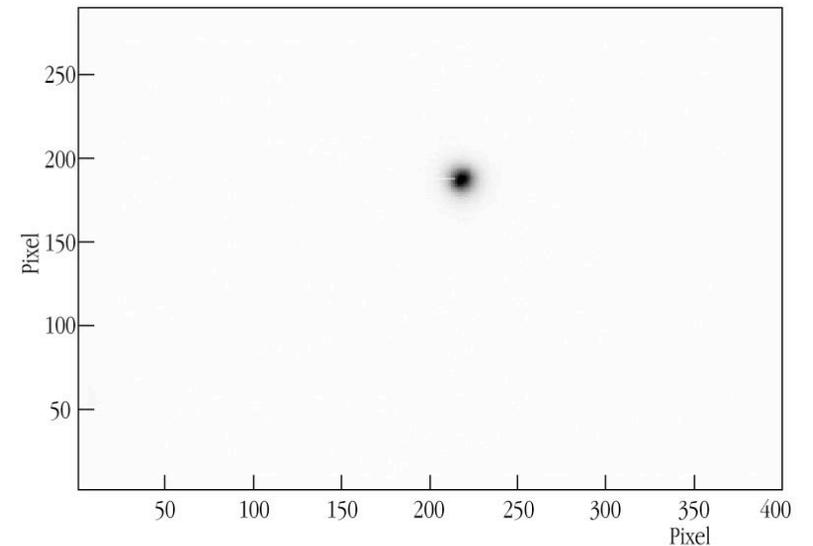
- Télescopes
- Optiques de relai et de transfert
- Optique adaptative
- Lignes à retard
- Instruments:
  - VINCI (+ Leonardo),
  - MIDI,
  - AMBER,
  - FINITO (suiveur de franges),
  - PRIMA (suiveur de franges hors axe + référence de phase)
- Système de contrôle
- Outils de préparation d'observations et de traitement des données

# Schéma optique général



The VLT Interferometer with ANTU and MELIPAL

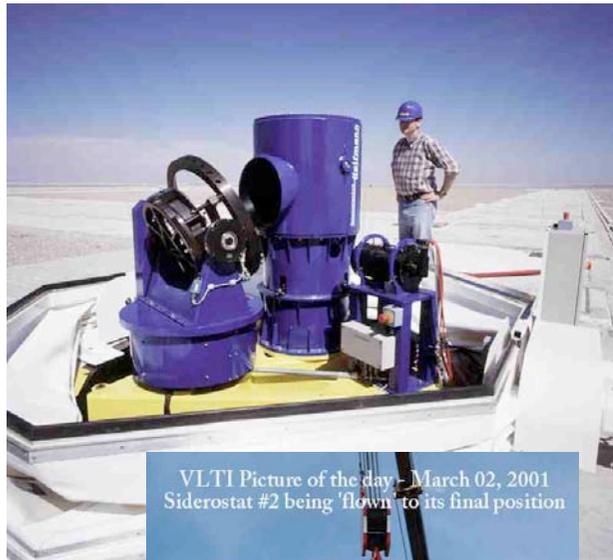
- 25 miroirs, 28 réflexions entre le ciel et l'instrument
- jusqu'à 200m de base et 350m de chemin optique
- => haute qualité optique + complète automatisation



"Joint" Stellar Light from ANTU and MELIPAL at VLT Focus  
(FWHM = 0.45 arcsec)

# Télescopes

Sidérostats (2)  
simples et stables  
pour tests



VLTI Picture of the day - March 02, 2001  
Siderostat #2 being 'flown' to its final position

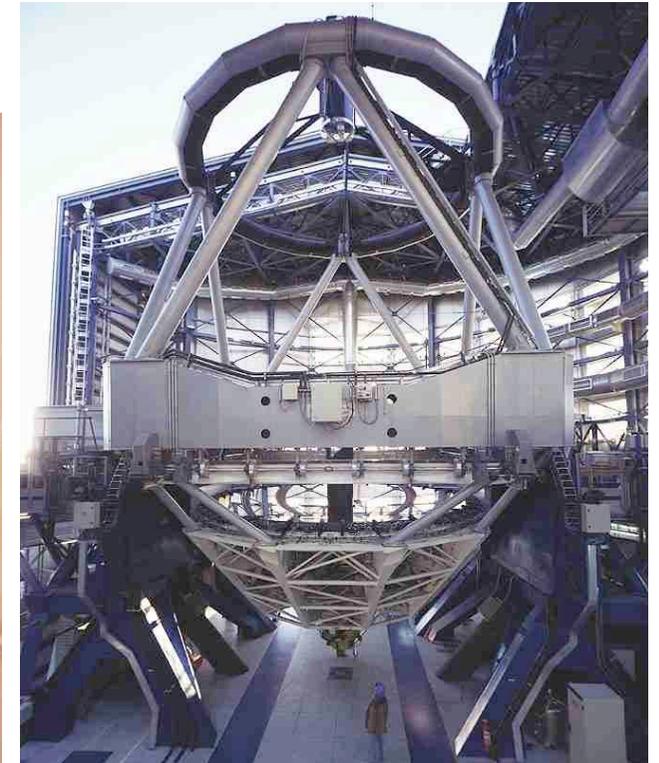
ESO PR Photo 10/01 (18 March 2001)



Télescopes auxiliaires (3)  
à utiliser en permanence  
"mini-VLT", relocalisables  
2 fin-2002, 1 mi-2003



UT (4)  
sensibilité



# Optiques de relai et de transfert (1)

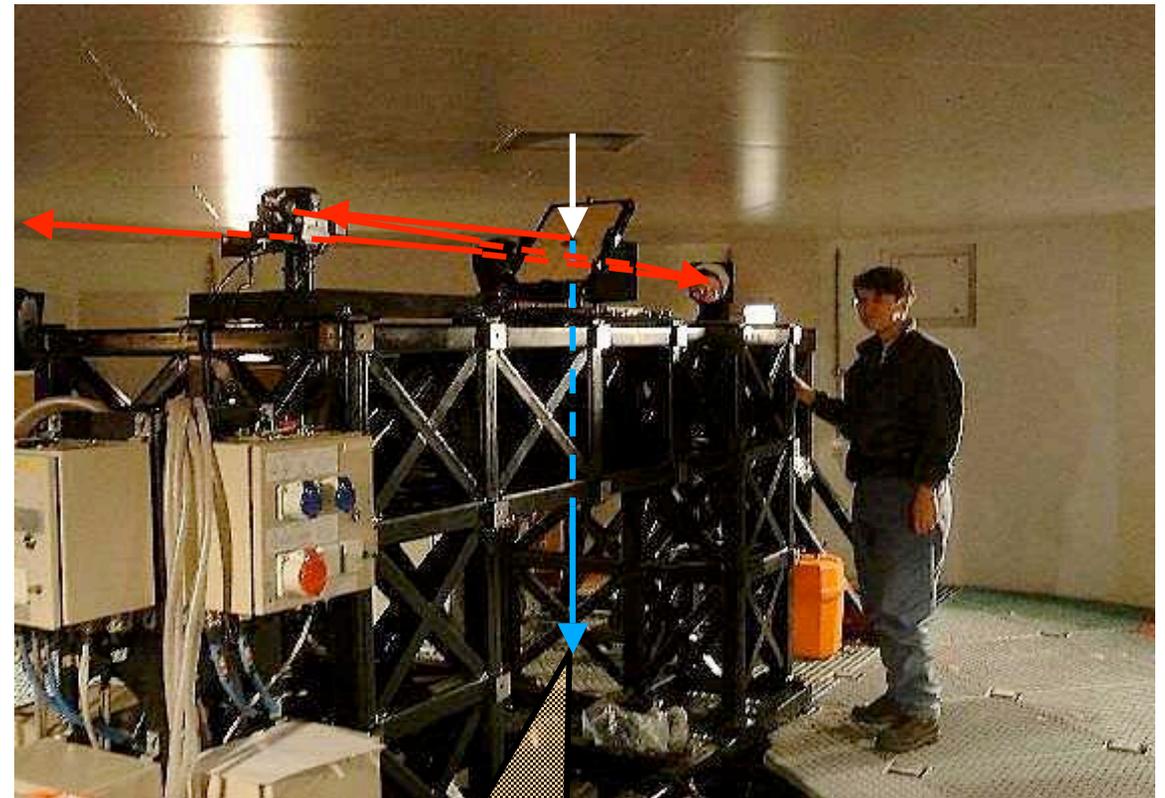
Train Coudé

(2 équipés, 2 autres mi-2002)



Relai Coudé

(2 équipés, 2 autres mi-2002)



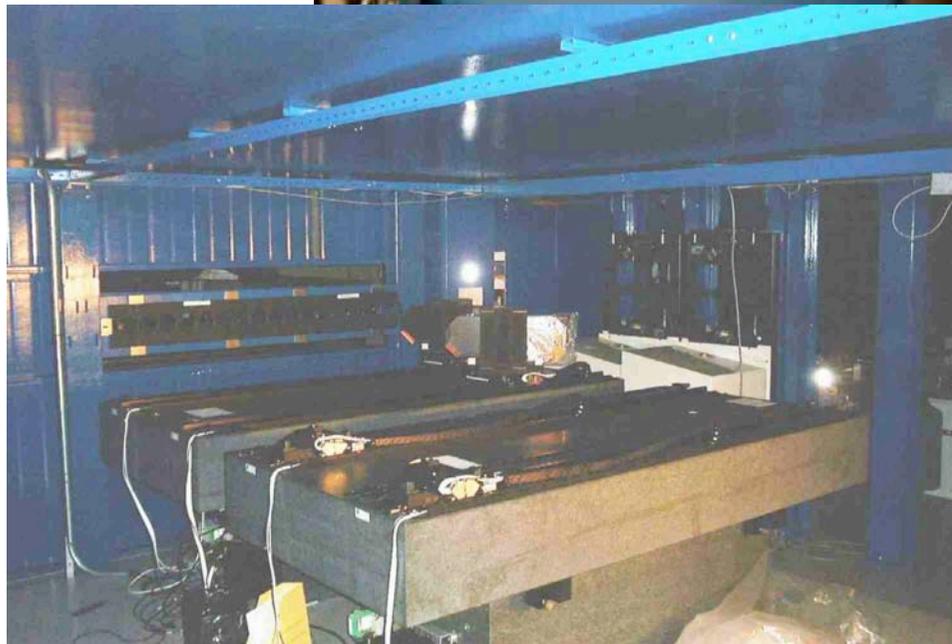
Location for STRAP/ MACAO  
Wave Front Sensor

# Optique de relai et transfert (2)

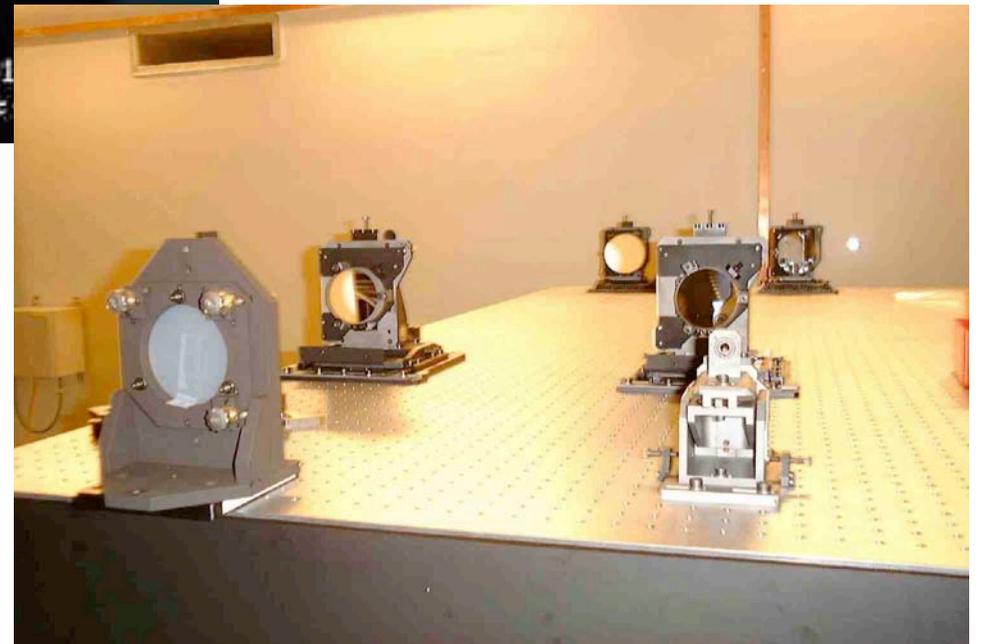
M12



M16

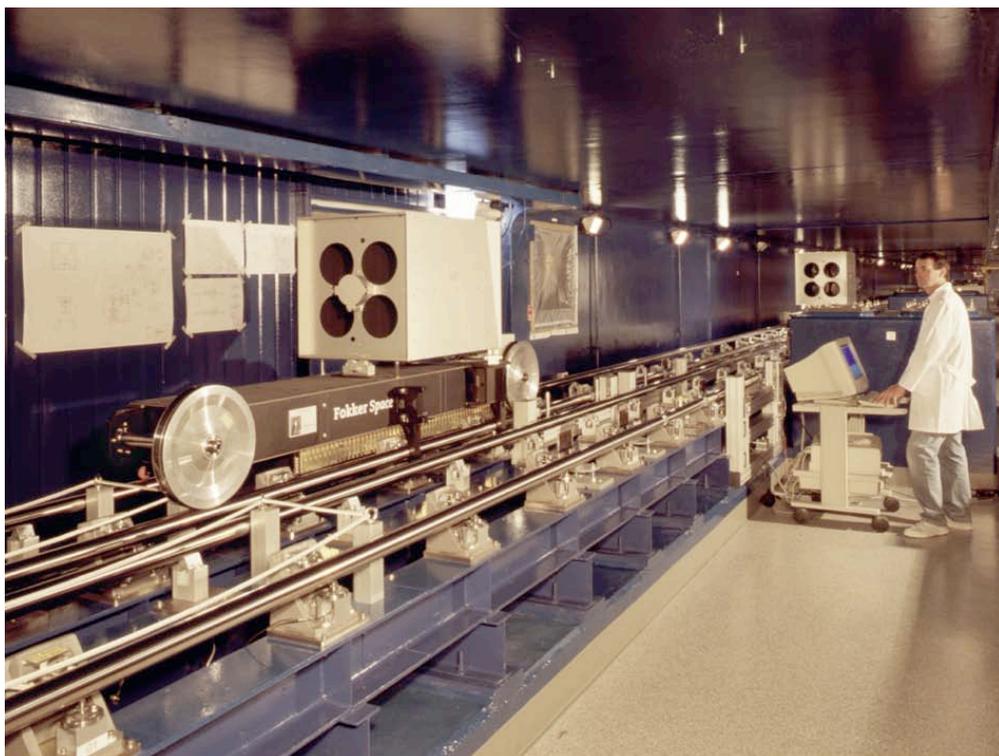


Compresseurs de faisceaux



# Lignes à retard

- Font patienter les photons d'un bras de l'interféromètre
- Compensent la rotation terrestre
- Vitesse maximale de 5 mm/s avec une précision de 15 nm sur plus de 60 m.
- Utilisées pour la recherche des franges (sur  $\sim 500 \mu\text{m}$ )
- 3 installées + 3 autres (2003)



Delay Line Carriage in VLTI Tunnel

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

© European Southern Observatory



VLTI Delay Lines in the Interferometric Tunnel

ESO PR Photo 26a/00 (11 October 2000)

© European Southern Observatory

