

Le grand bond en avant de l'interférométrie

Avancées astrophysiques et perspectives

IAP

18 février 2005

Guy Perrin

Observatoire de Paris / LESIA

Plan

- ✓ Principe et intérêt de l'interférométrie
- ✓ Contributions en physique stellaire
- ✓ L'interférométrie à l'ère des grands télescopes
- ✓ Perspectives

Plan

- ✓ Principe et intérêt de l'interférométrie
- ✓ Contributions en physique stellaire
- ✓ L'interférométrie à l'ère des grands télescopes
- ✓ Perspectives

Débuts historiques

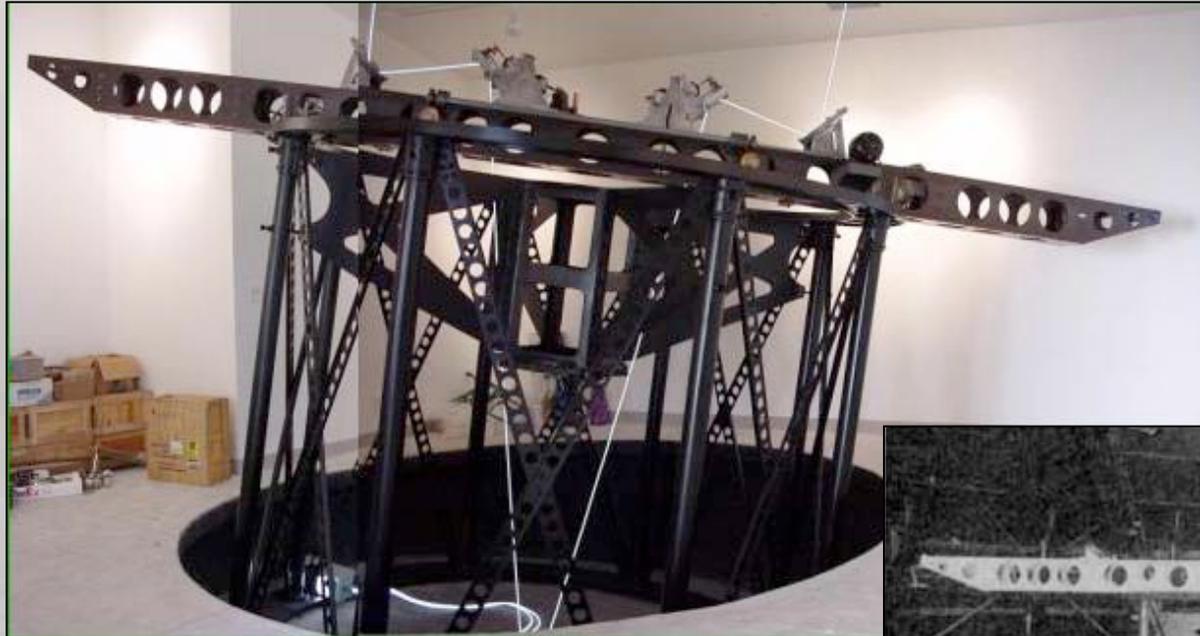
H. Fizeau a l'intuition en 1868 que les franges d'interférence contiennent une information sur la dimension angulaire des sources

A.A. Michelson formalise la théorie de l'interférométrie astronomique (1890) et mesure la taille des satellites de Jupiter par cette technique en 1891

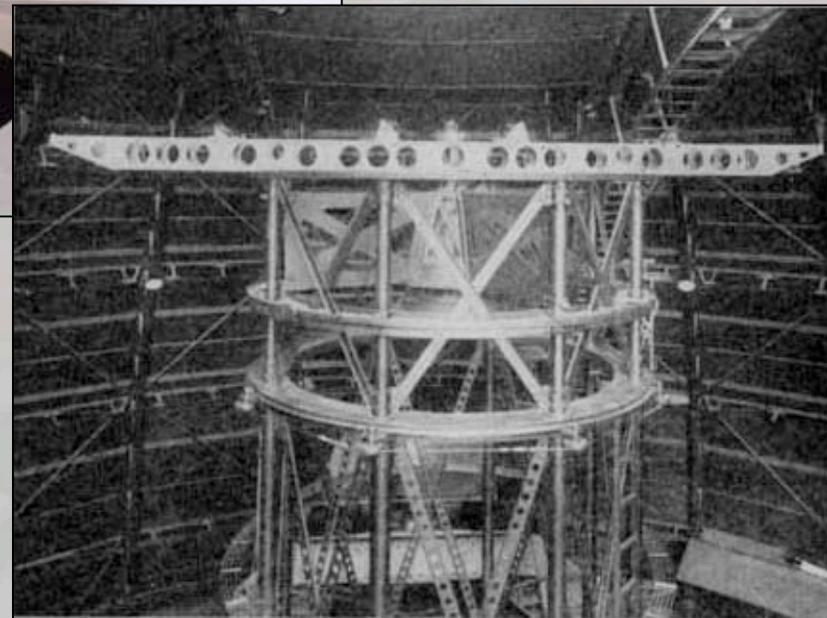
Suivent des orbites de binaires (Capella par exemple)

Le diamètre de Bételgeuse est mesuré par Michelson et Pease en 1921 au Mont Wilson

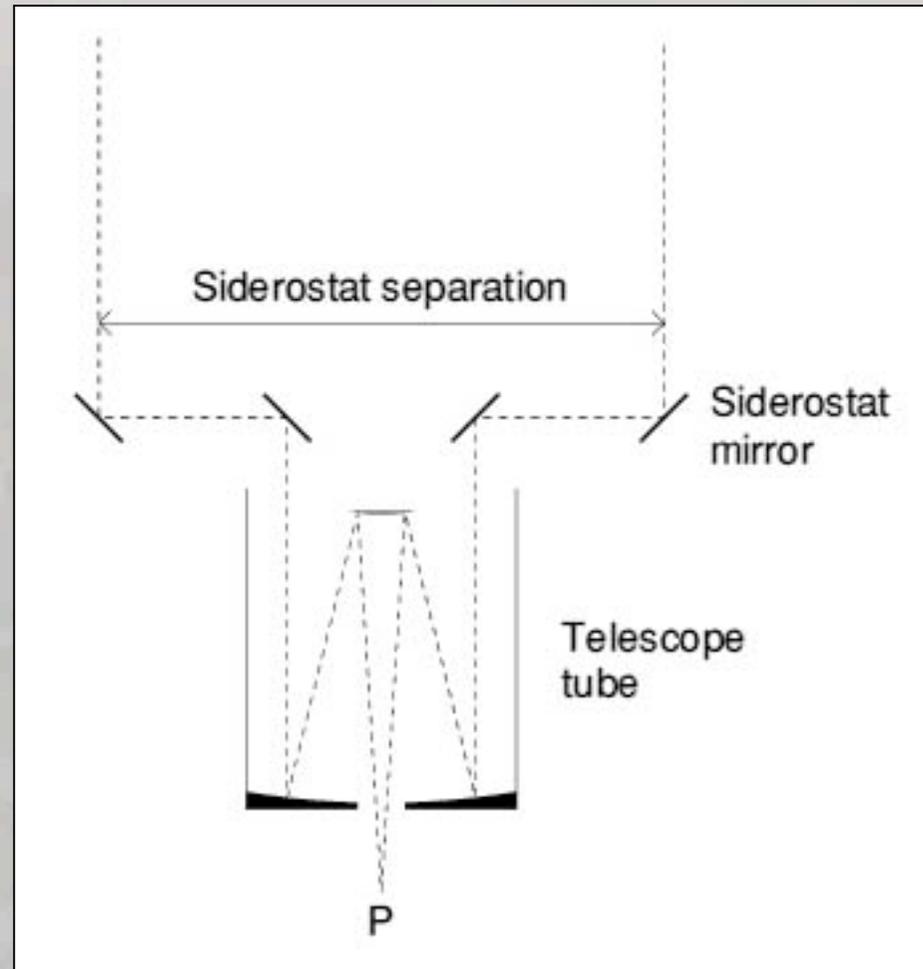
L'interféromètre de Michelson au Mont Wilson (1921)



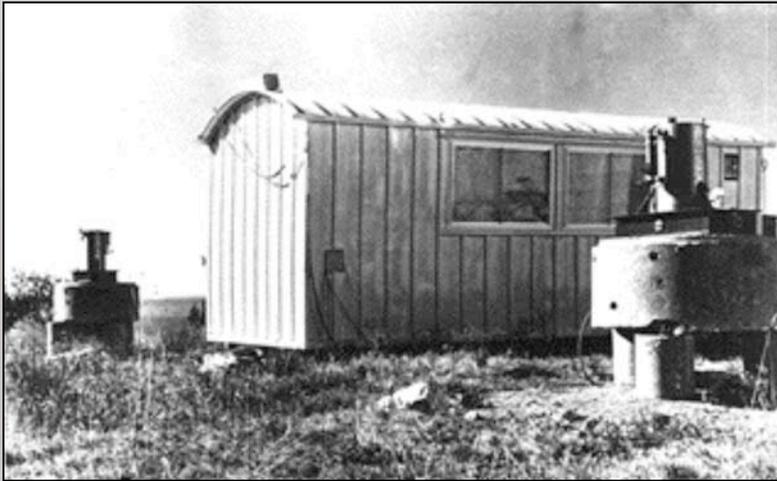
Partie supérieure du
téléscope de 100 pouces →
(téléscope = ligne à retard)



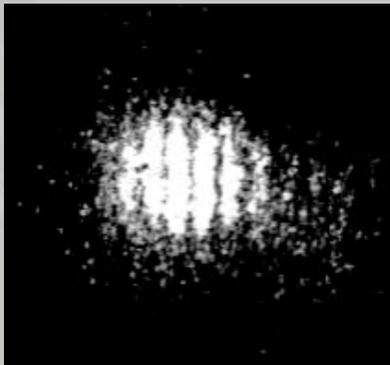
Principe de l'interféromètre de Michelson



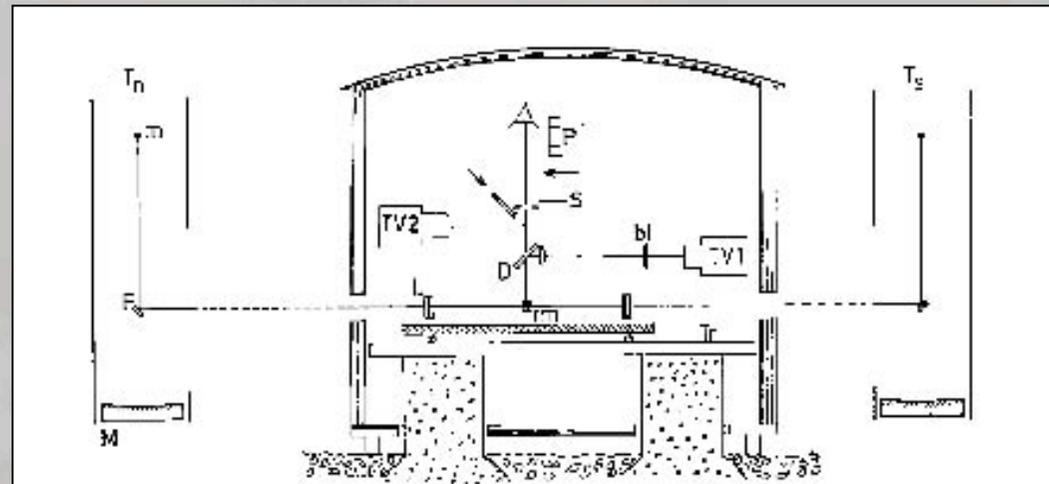
L'interféromètre à 2 télescopes (I2T) de Labeyrie (1974)

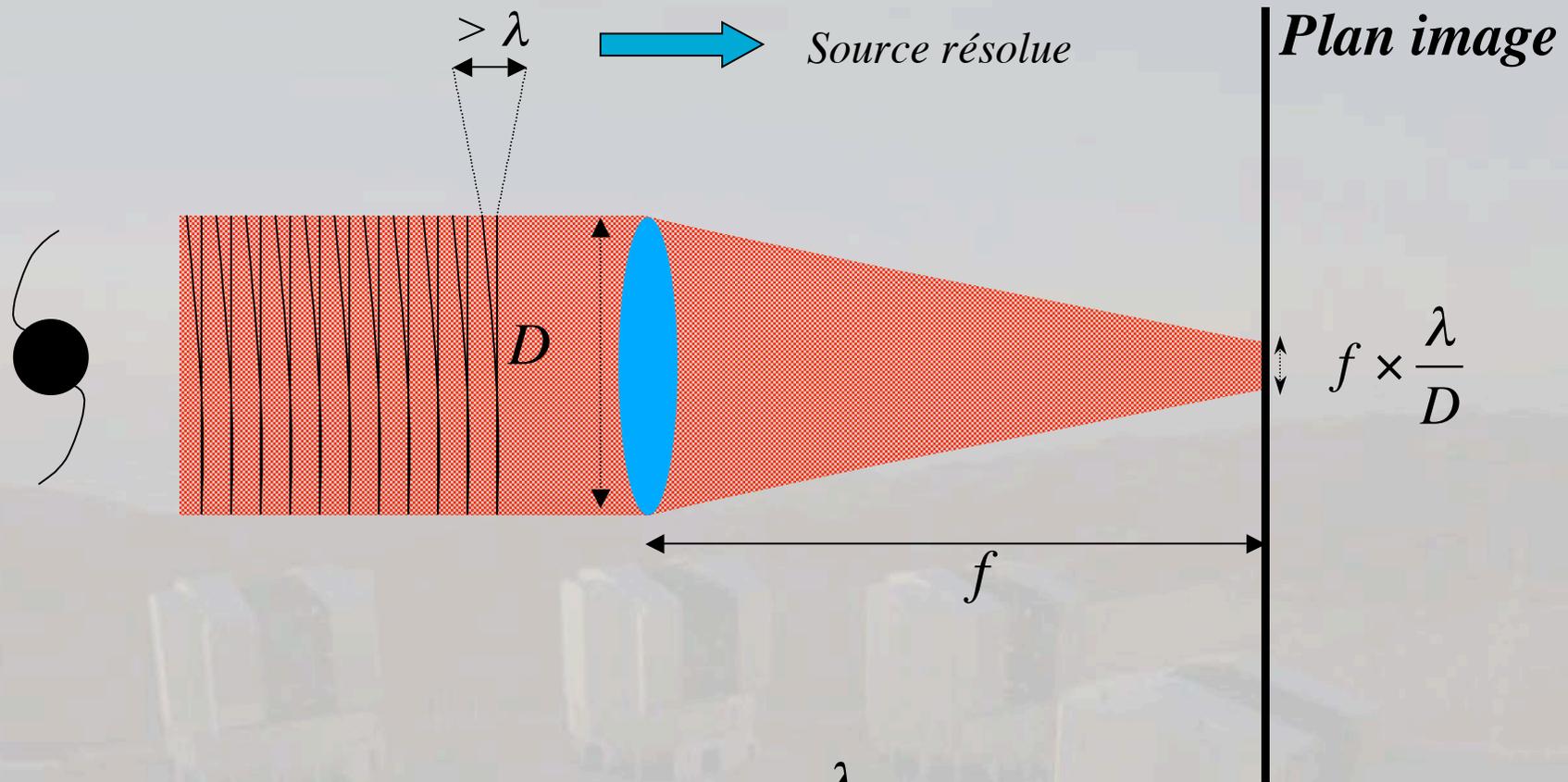


Ligne à retard manuelle sur rails
à vis micrométrique

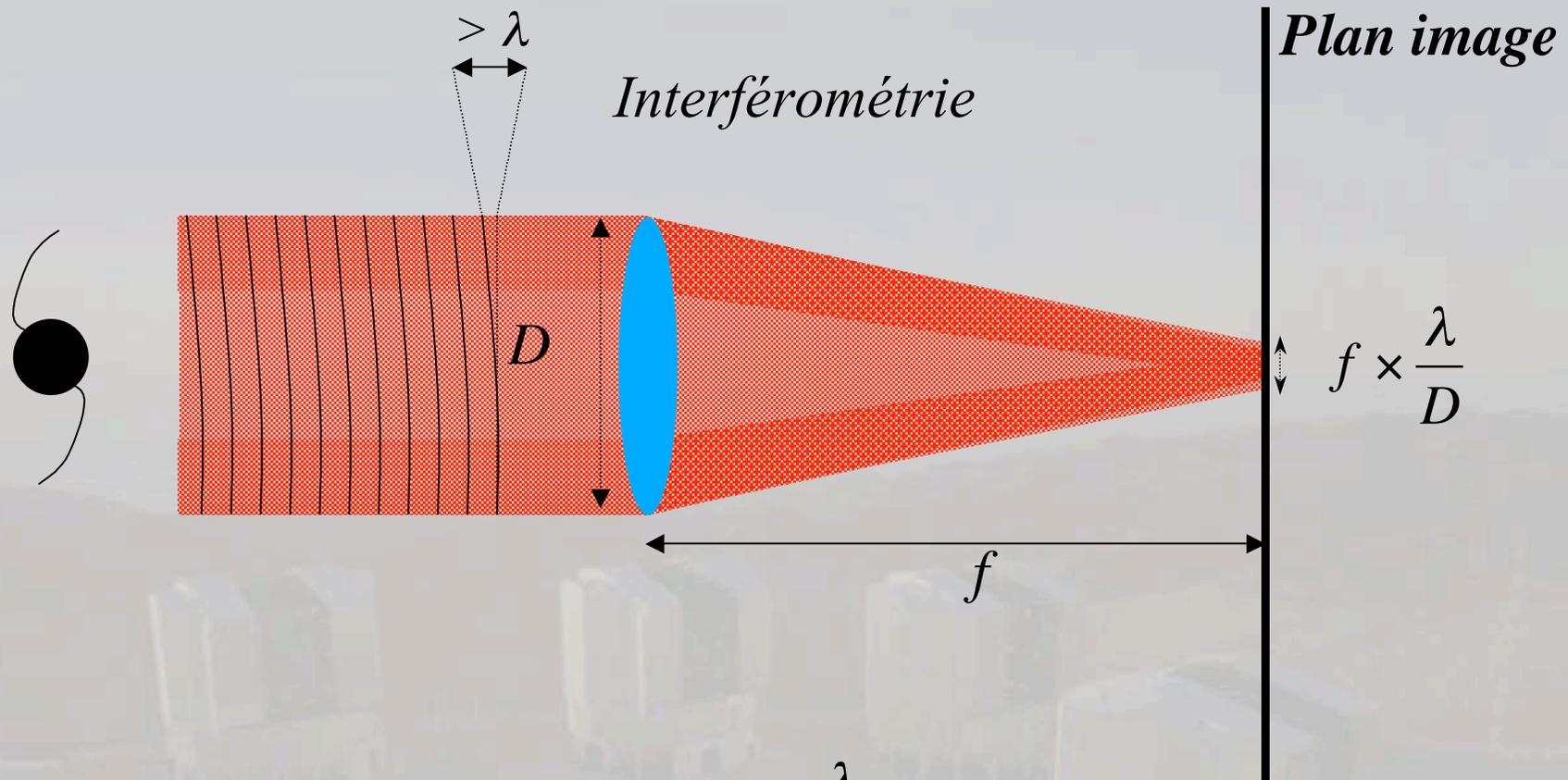


Franges sur Vega

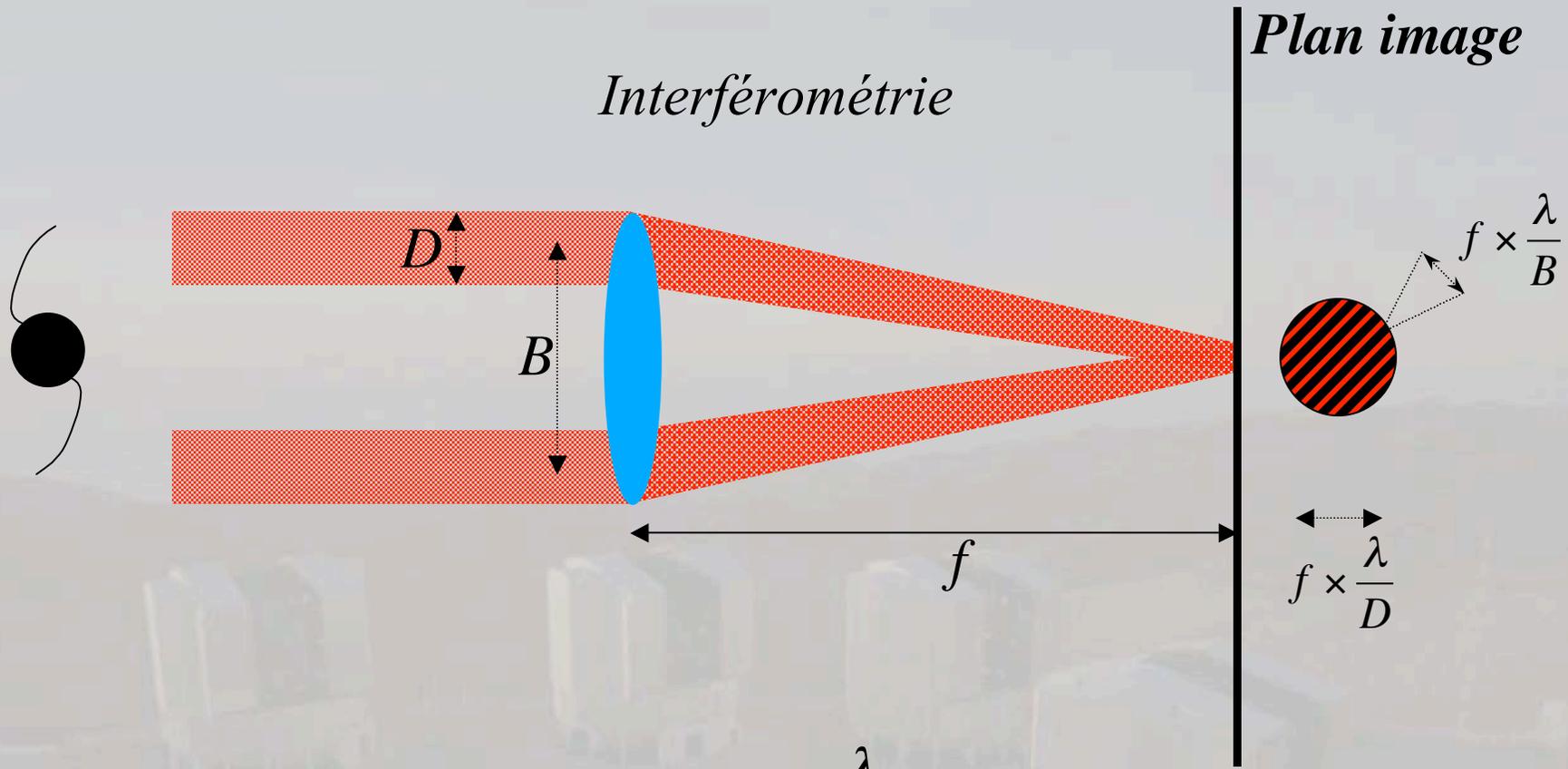




La résolution angulaire est limitée à : $\frac{\lambda}{D}$



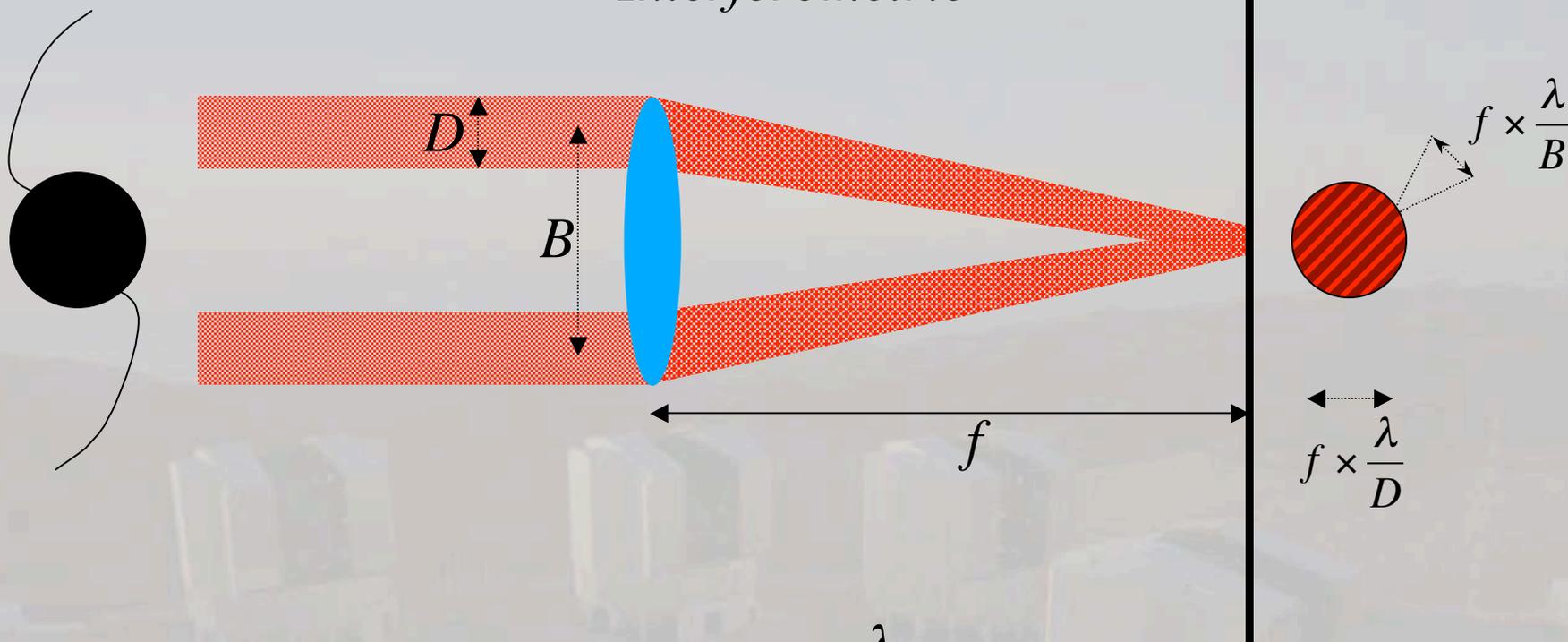
La résolution angulaire est limitée à : $\frac{\lambda}{D}$



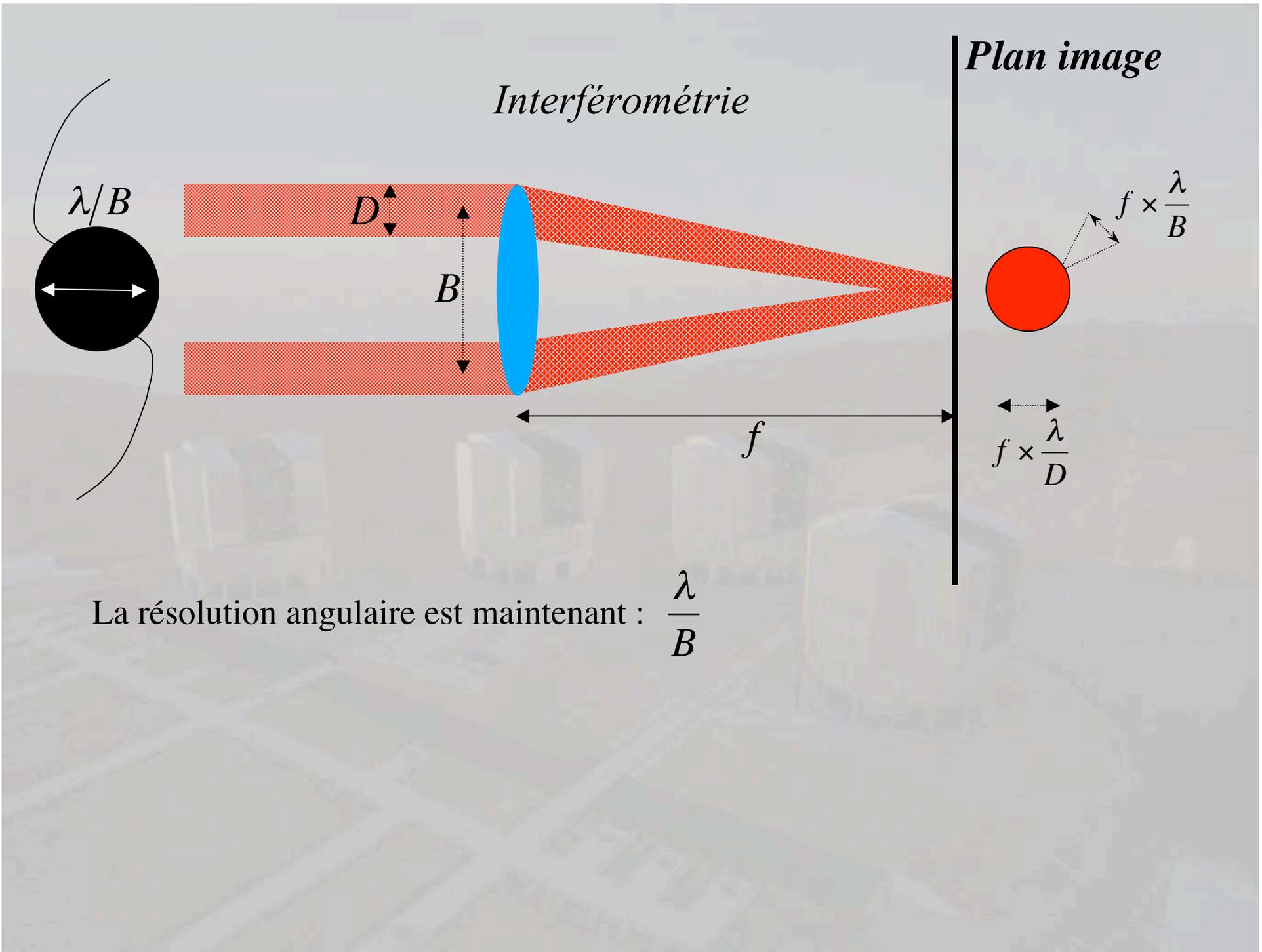
La résolution angulaire est maintenant : $\frac{\lambda}{B}$

Plan image

Interférométrie



La résolution angulaire est maintenant : $\frac{\lambda}{B}$



La résolution angulaire est maintenant : $\frac{\lambda}{B}$

Résolution angulaire

$$B = 200 \text{ m}$$

λ (μm)

0,5

1

2

10

θ (mas)

0,5

1

2

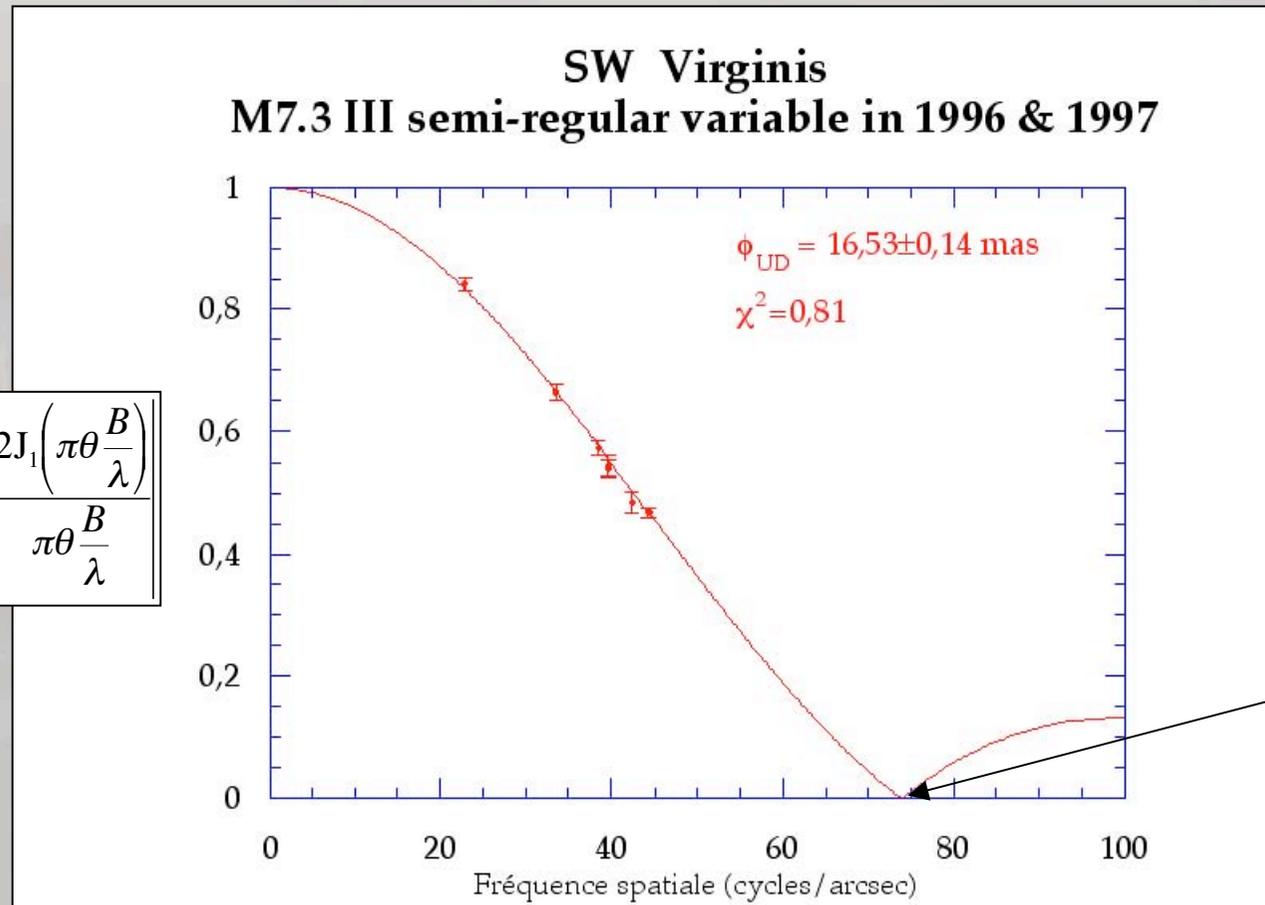
10

1 pc à 100 Mpc



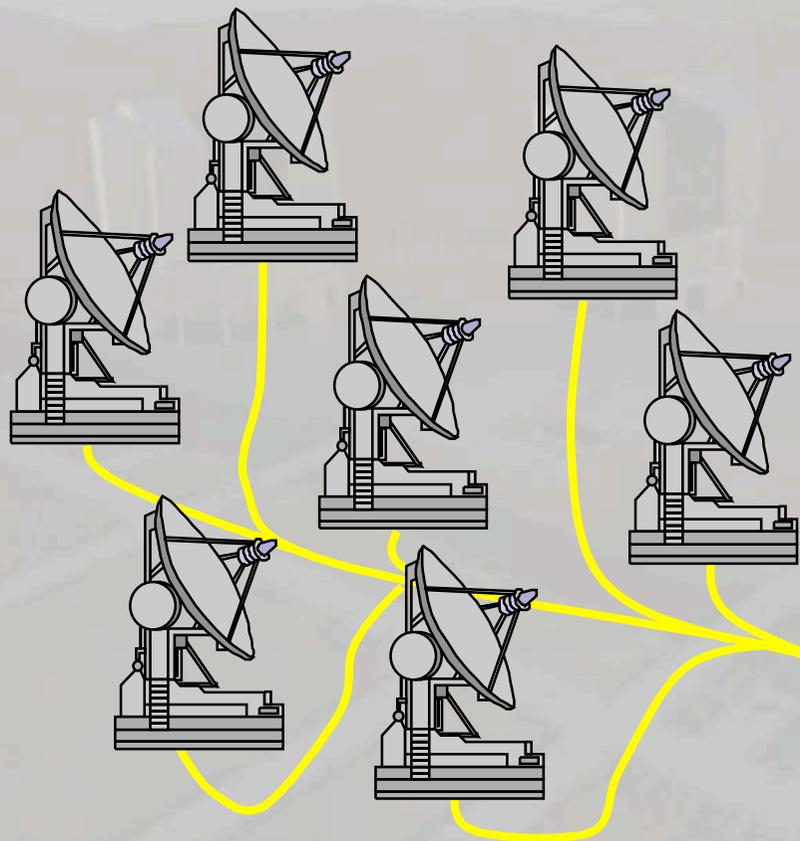
Mesure de diamètres stellaires

$$V_{DU}(B) = \frac{2J_1\left(\pi\theta\frac{B}{\lambda}\right)}{\pi\theta\frac{B}{\lambda}}$$

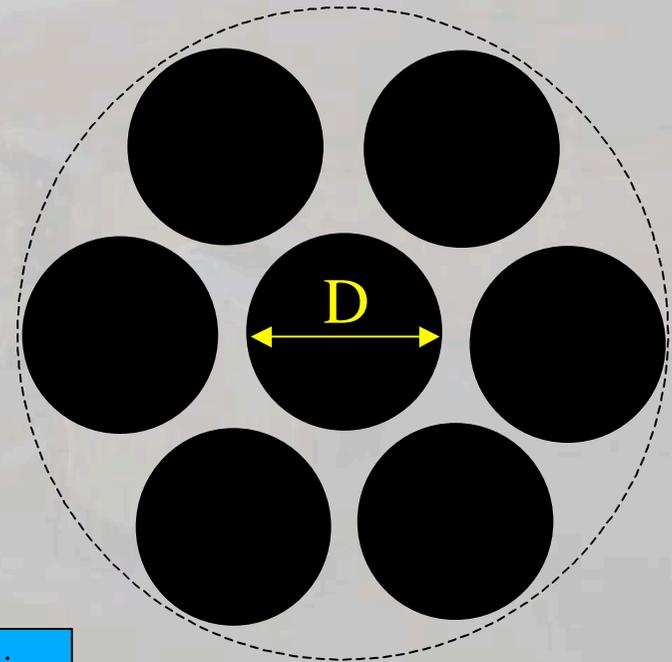


Principe de la synthèse d'ouverture

Nobel 1974, Ryle & Hewish

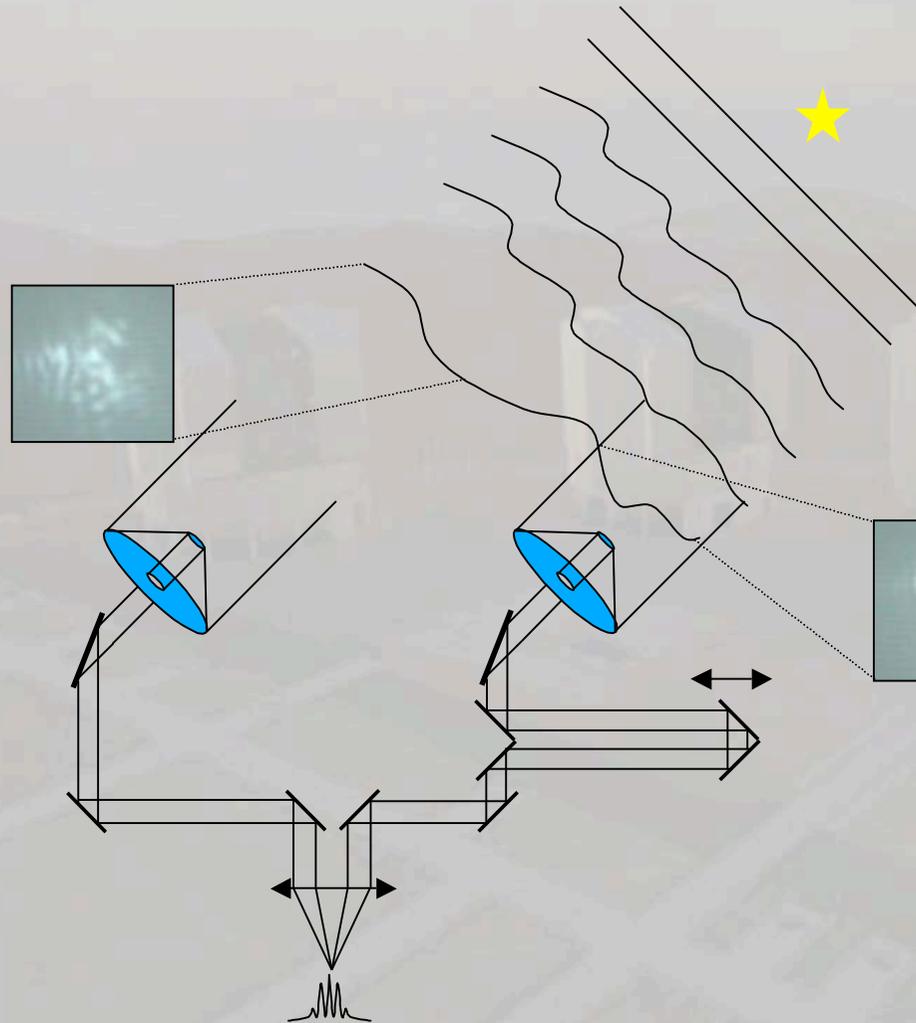


recombinaison
et
détection



pupille synthétisée

Turbulence atmosphérique et perte de cohérence spatiale



on perd 2 fois :

1. l'objet est, en apparence, plus étendu donc moins cohérent spatialement
2. l'objet est, en apparence, différent dans les deux voies → la corrélation n'est pas maximale

Image corrigée de la turbulence par optique adaptative

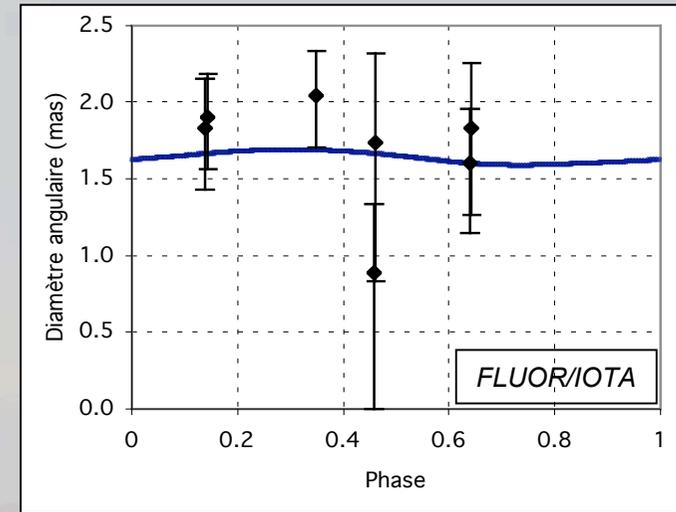


Plan

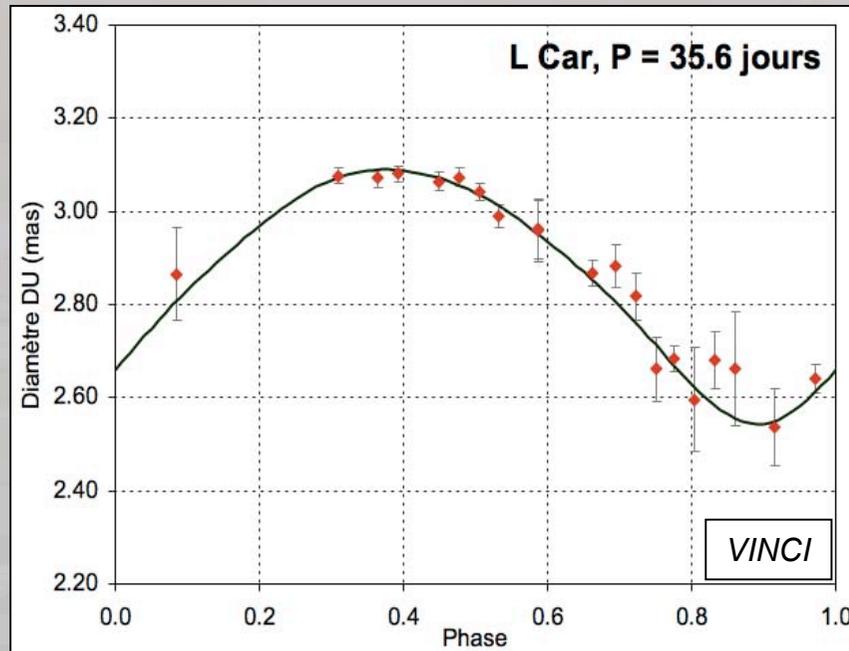
- ✓ Principe et intérêt de l'interférométrie
- ✓ Contributions en physique stellaire
- ✓ L'interférométrie à l'ère des grands télescopes
- ✓ Perspectives

Étoiles céphéides

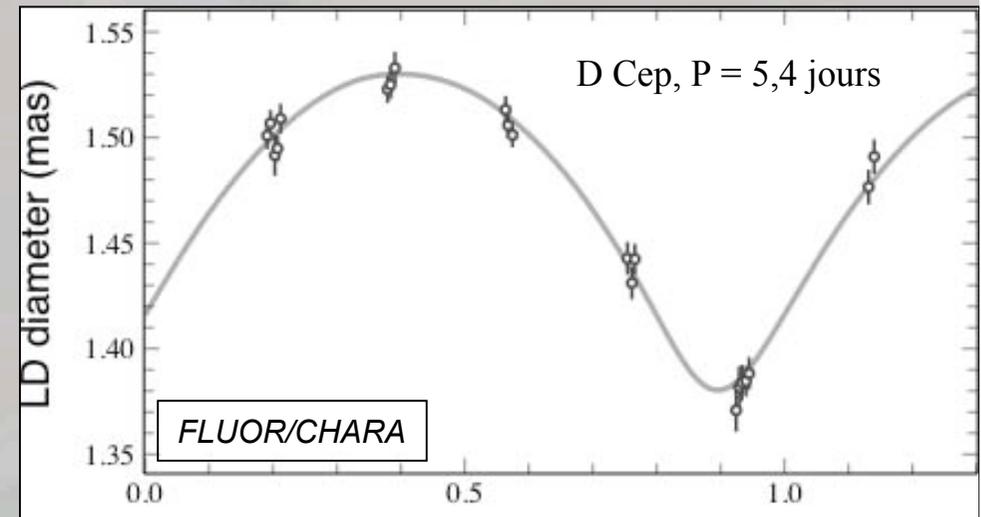
- Mesure directe de la distance par la **parallaxe de la pulsation**
- Étalonnage **indépendant** du **point zéro** de la relation Période-Luminosité



ξ Gem FLUOR: Kervella et al. 2001, *A&A*, **367**, 876

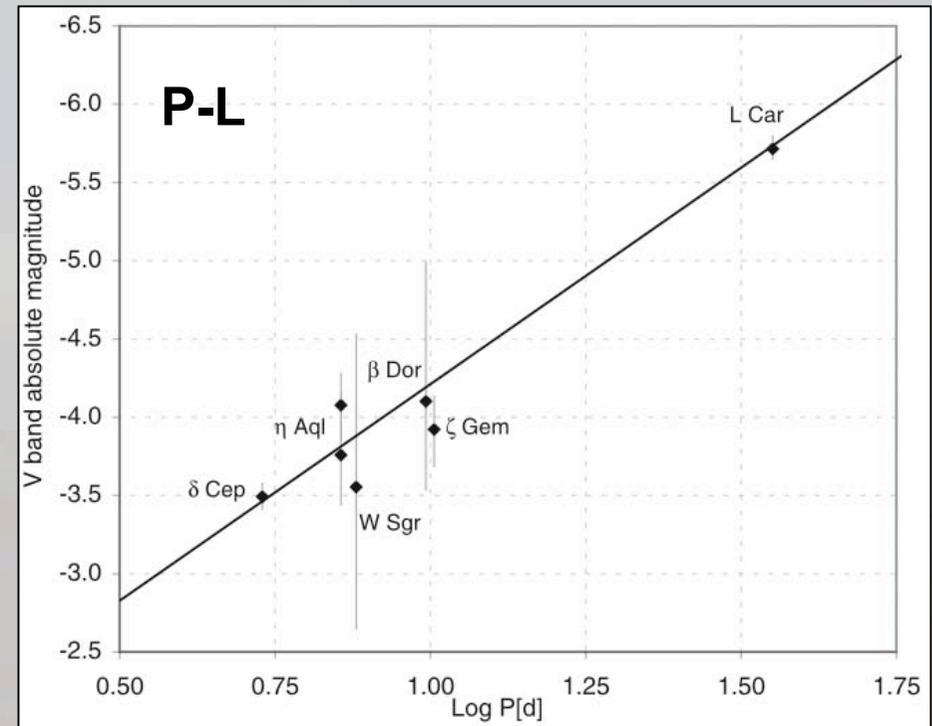
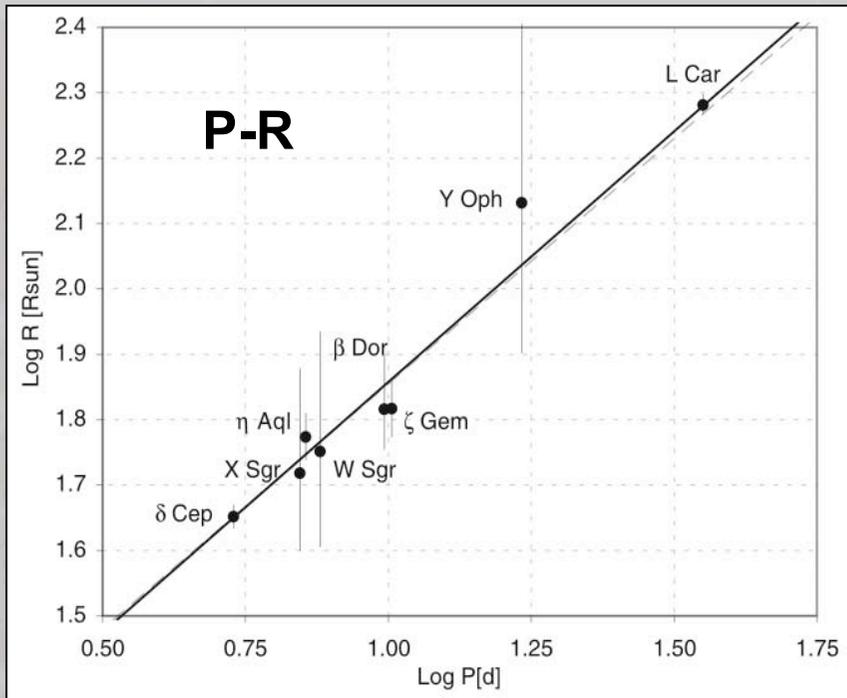


Kervella, Nardetto, Bersier et al. 2004, *A&A*, **416**, 941



Mérand et al. (2005)

- 7 Céphéides VINCI,
2 PTI, 3 NPOI, 1 GI2T
- Calibration des relations
 - Période-Luminosité
 - Période-Rayon
 - Brillance de Surface



Calibration Gieren et al. (1998)

$$M_V = -2,769 [0,073] (\text{Log P}-1) - 4,063 [0,034]$$

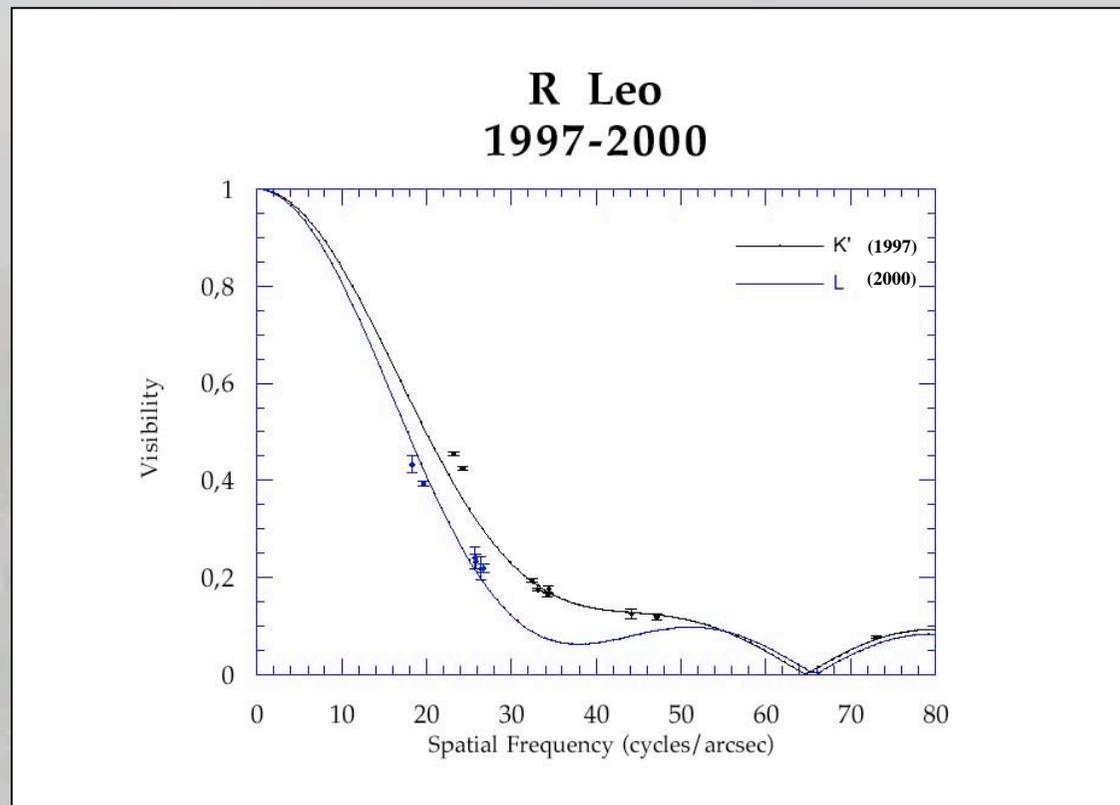
$$M_V = -2,769 [0,073] (\text{Log P}-1) - 4,209 [0,075]$$

Kervella, Bersier, Mourard et al. (II) 2004, *A&A*, **423**, 327
 Kervella, Bersier, Mourard et al. (III) 2004, *A&A*, **428**, 597

$$\log R \text{ (G98)} = 0,750 [0.024] \log P + 1,075 [0.007]$$

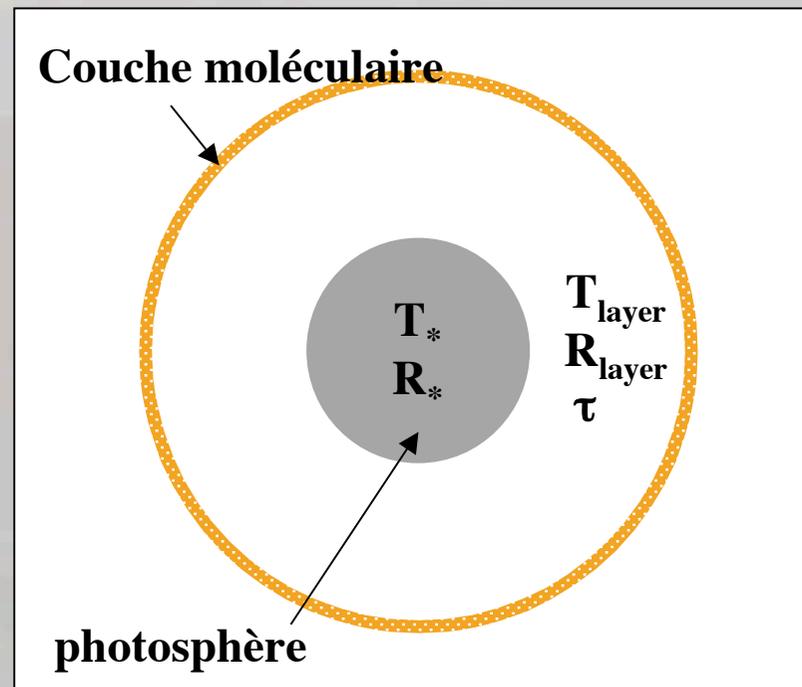
$$\log R \text{ (K04)} = 0,767 [0.009] \log P + 1,091 [0.011]$$

Étoiles de type Mira

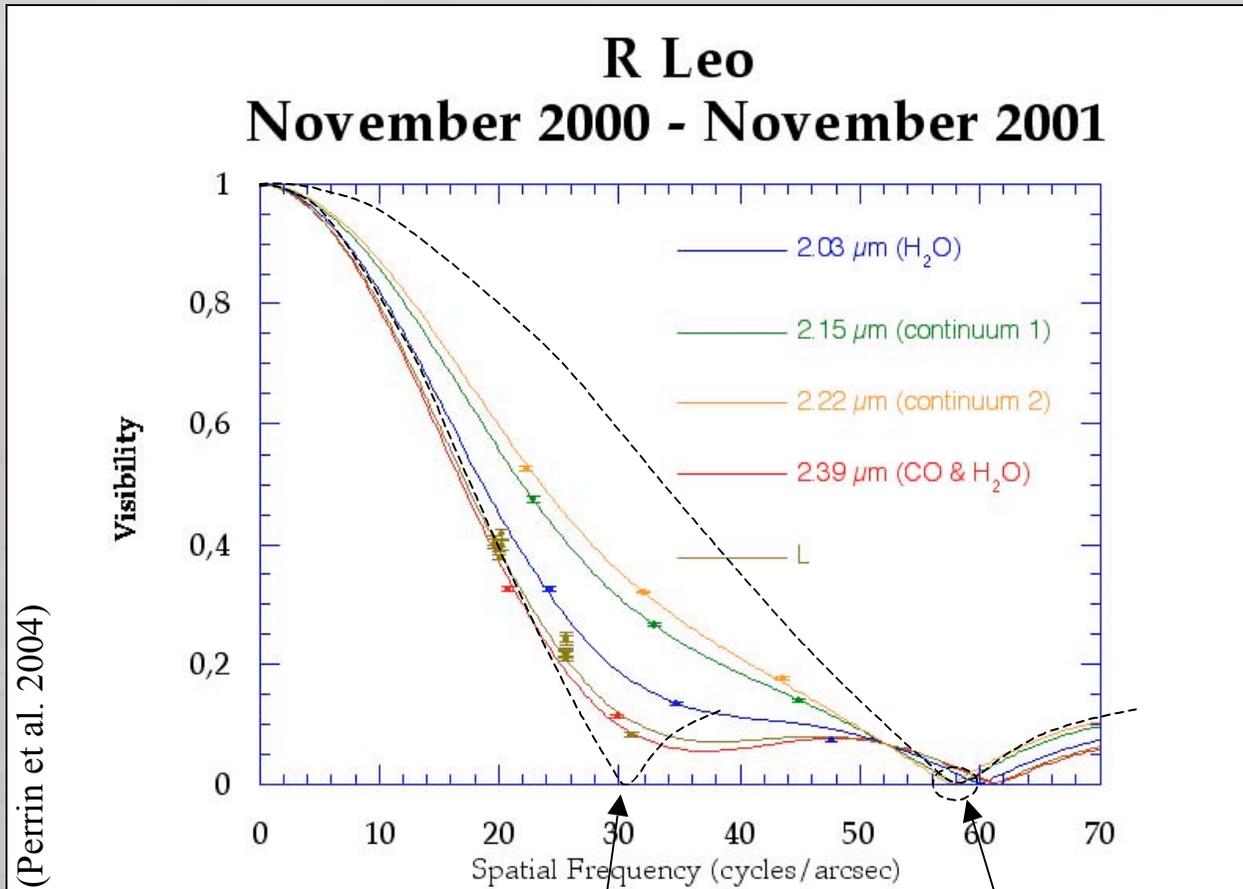


(Perrin et al. 1999)

Étoiles de type Mira



Étude dans les bandes moléculaires



$$\tau_{2.03\mu\text{m}} = 1.19 \pm 0.01$$

$$\tau_{2.15\mu\text{m}} = 0.51 \pm 0.01$$

$$\tau_{2.22\mu\text{m}} = 0.33 \pm 0.01$$

$$\tau_{2.39\mu\text{m}} = 1.37 \pm 0.01$$

$$\tau_L = 0.63 \pm 0.01$$

$R_* = 10.94 \pm 0.85 \text{ mas}$
 $T_* = 3856 \pm 119 \text{ K}$

$R_{\text{layer}} = 25.00 \pm 0.17 \text{ mas}$
 $T_{\text{layer}} = 1598 \pm 24 \text{ K}$

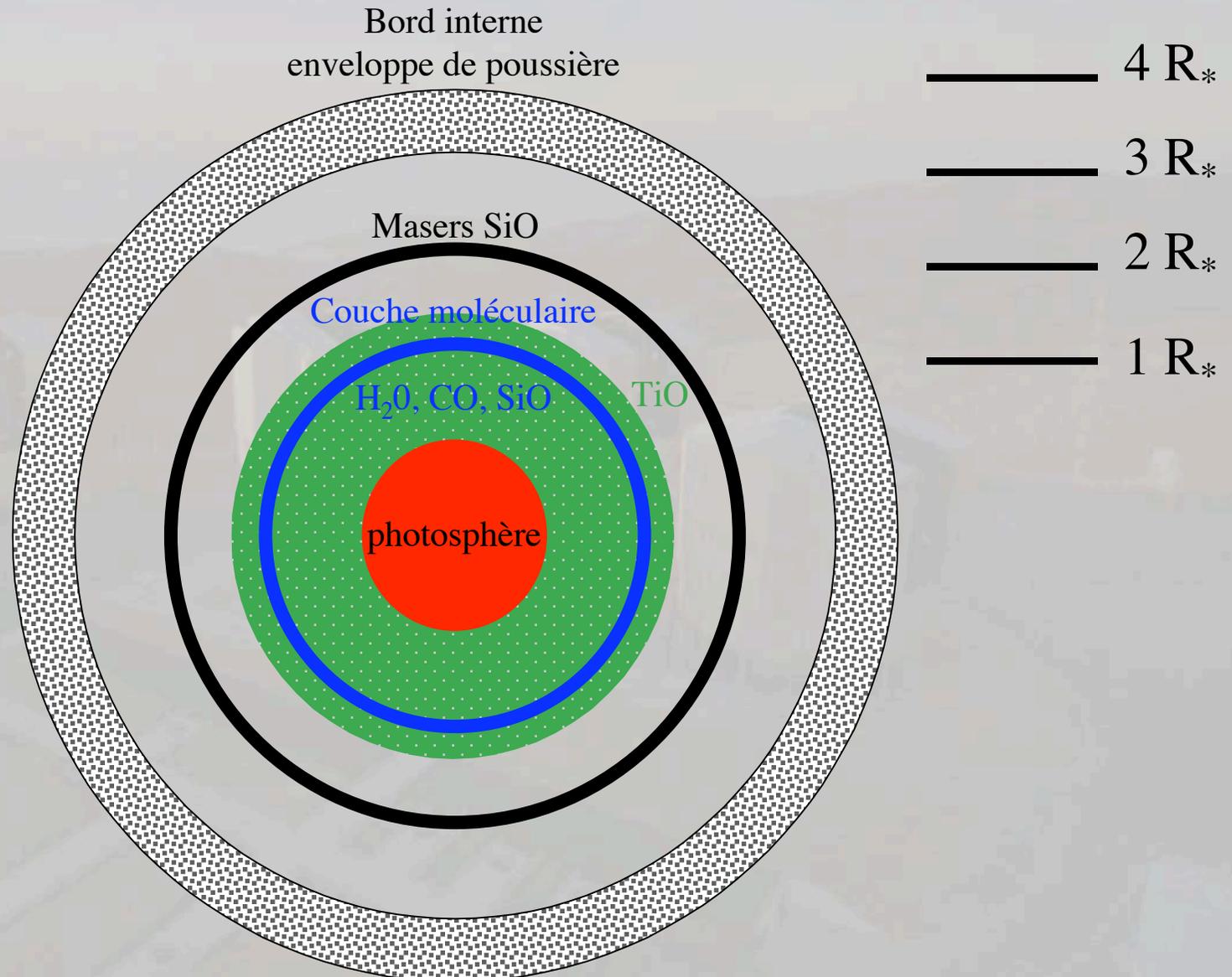
Phase K: 0.79
Phase L: 0.64

Type: M0-M1

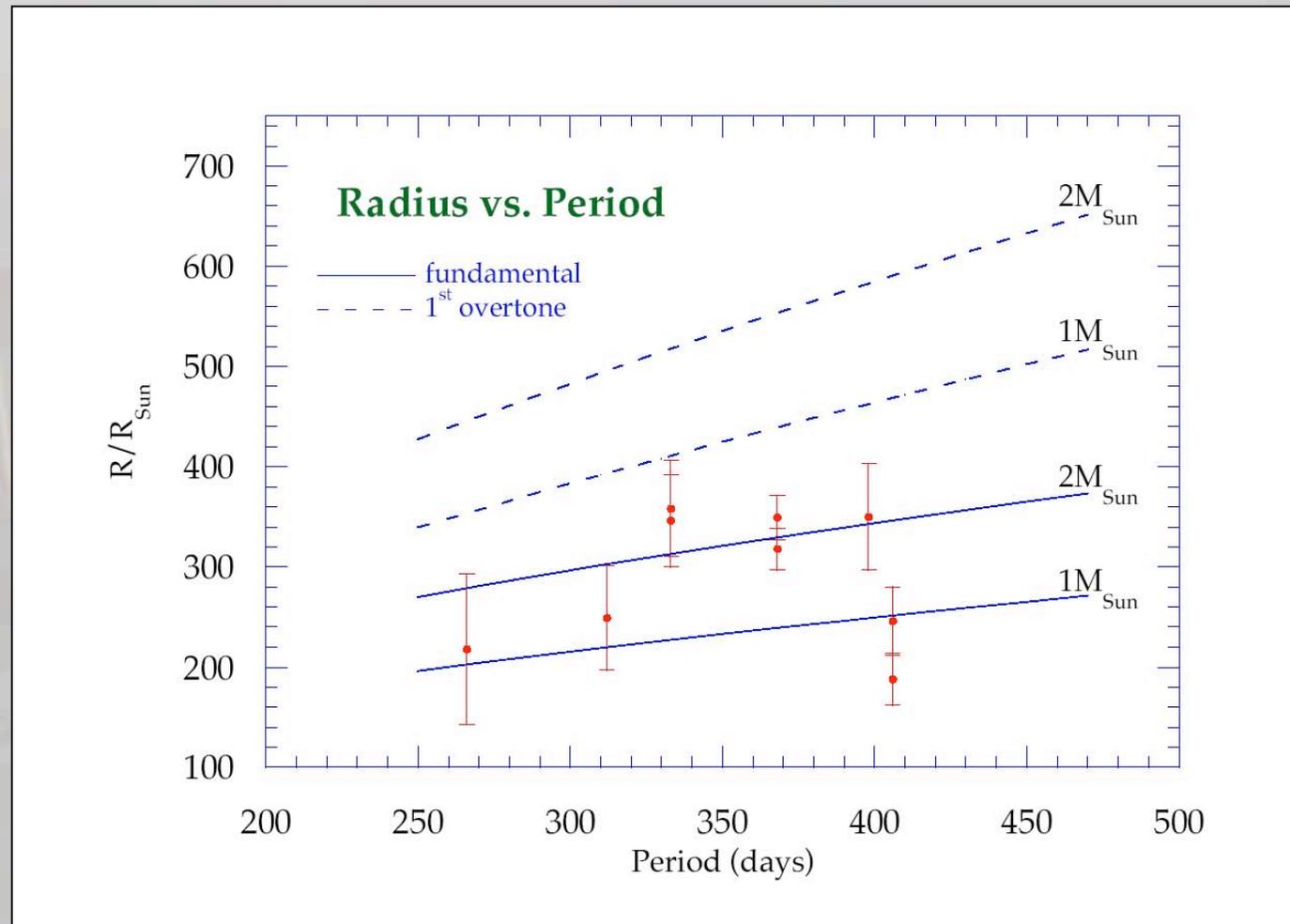
Diamètre couche moléculaire

Diamètre photosphérique

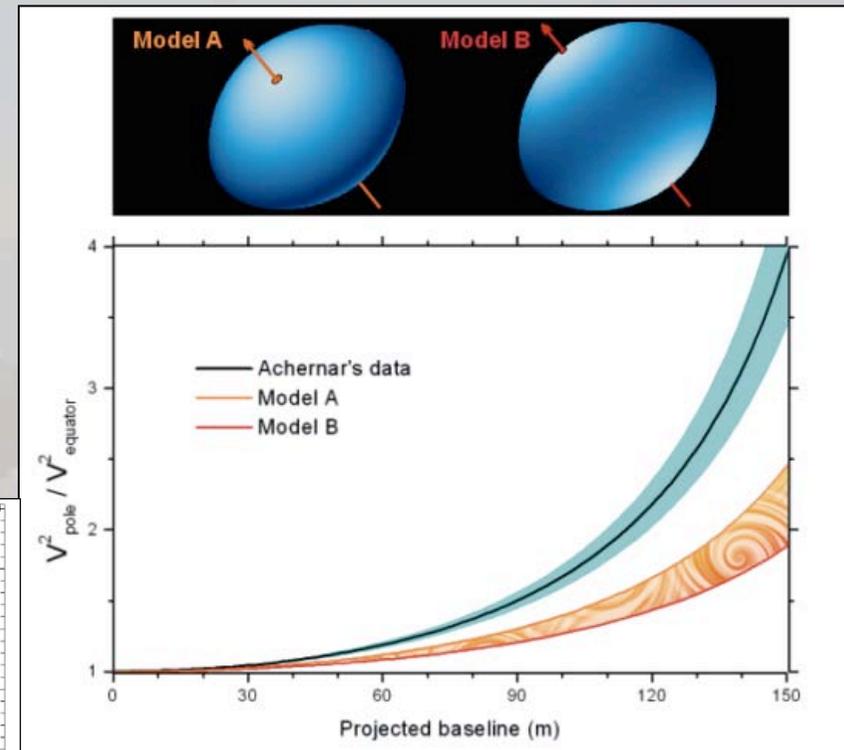
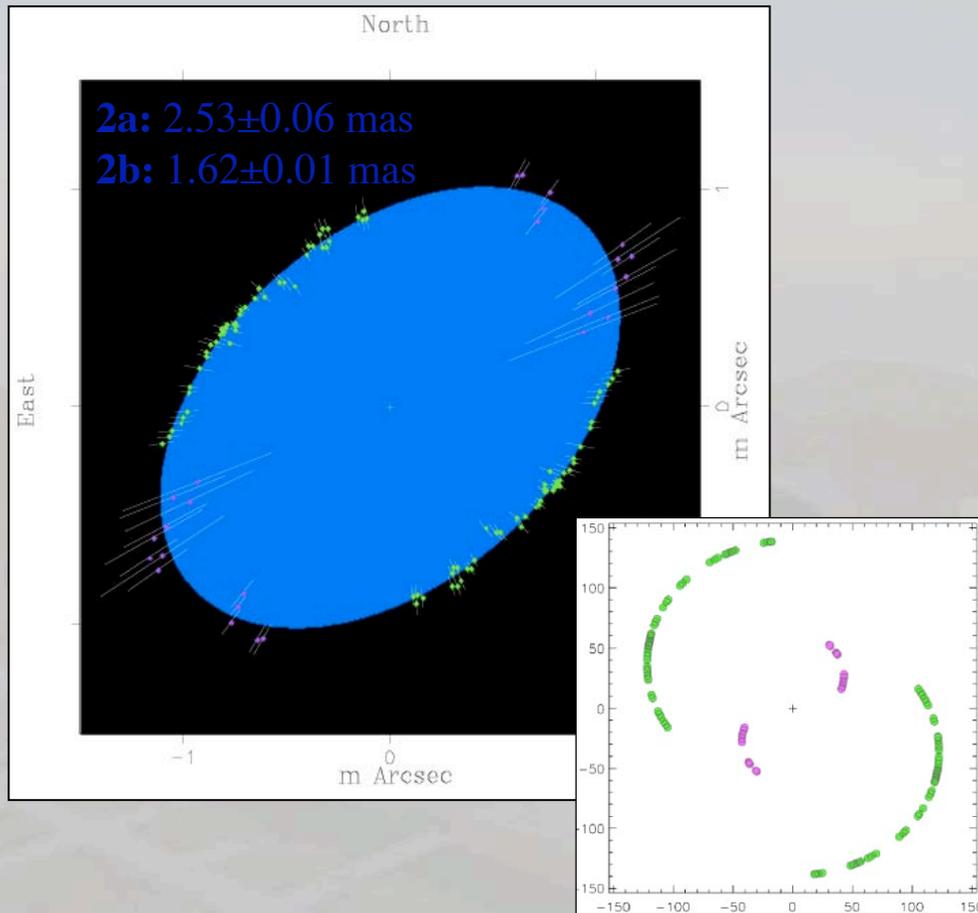
Vision des étoiles de type Mira



Rayons et mode de pulsation



Achernar avec VINCI: un rotateur *très* rapide !



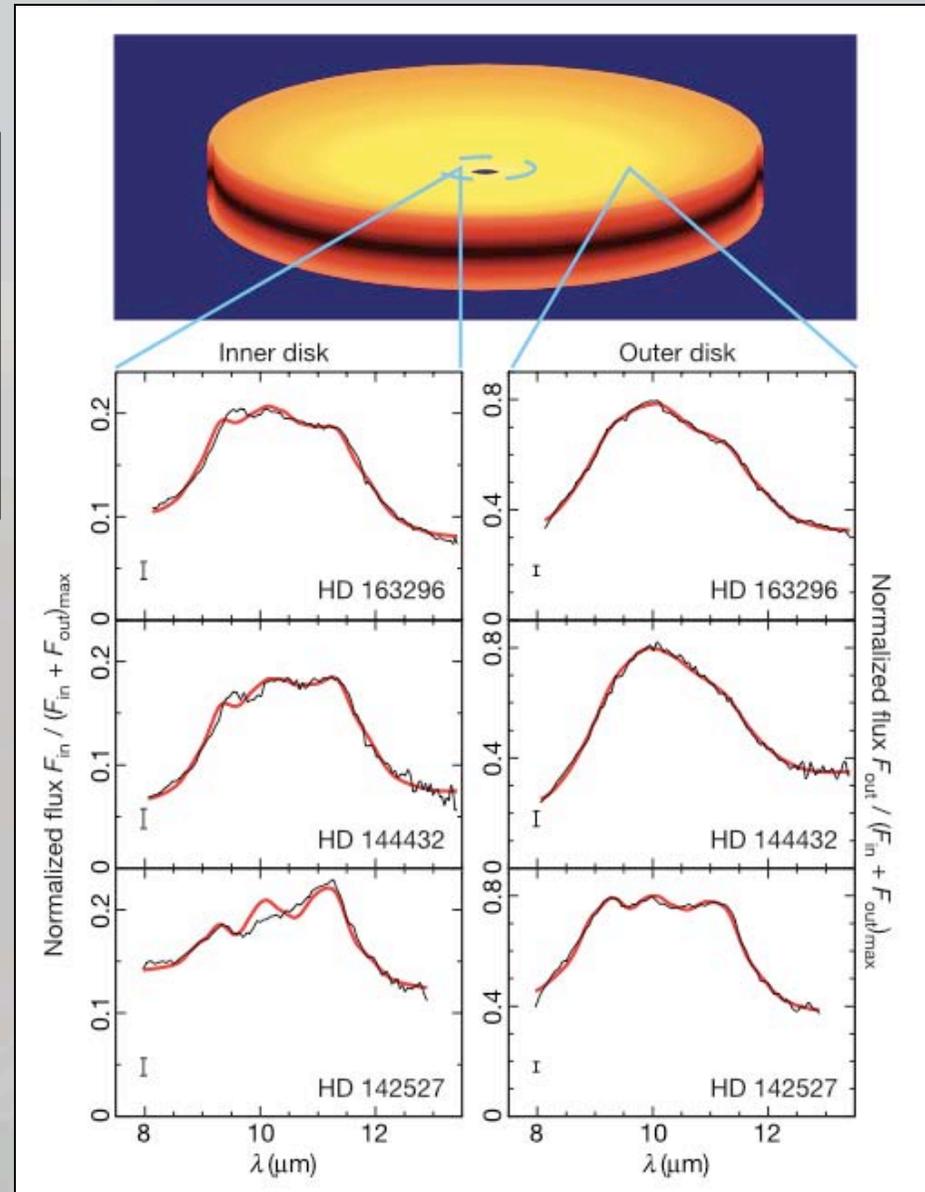
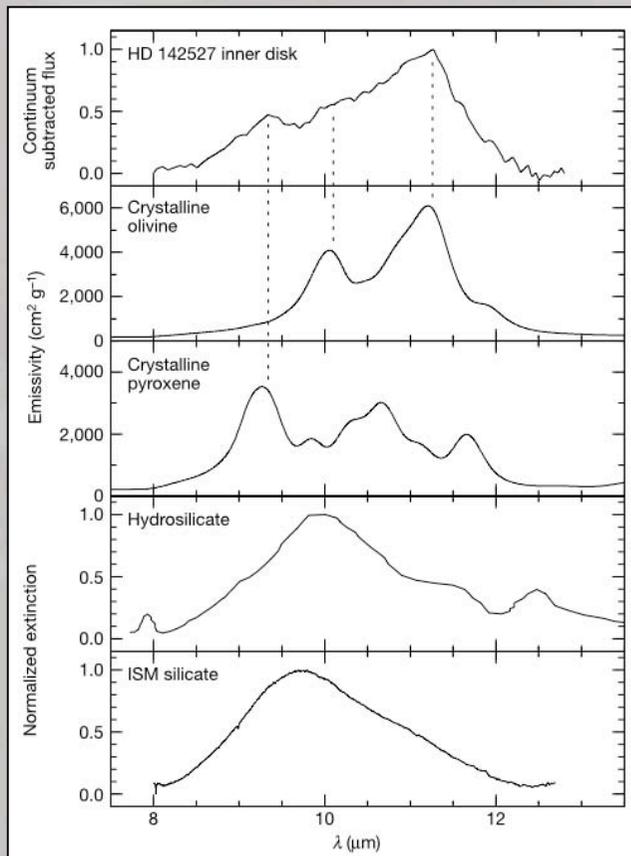
Domiciano, et al., *A&A*, **407**, L47 (2003)

Aplatissement: 1.56 ± 0.05 !!

Altair: 1.14 ± 0.03 (210 km/s, Van Belle et al. 2002)

Les briques des planètes terrestres observées avec MIDI

- 3 étoiles Ae de Herbig observées
- Résolution : 1 à 2 u.a.
- Spectroscopie résolue spatialement des disques en IR moyen
- Variation de la composition avec la distance à l'étoile
- Présence de silicates cristallisés, apparus avant la formation des planètes



Van Boekel et al. *Nature*, **452**, 479 (2004)

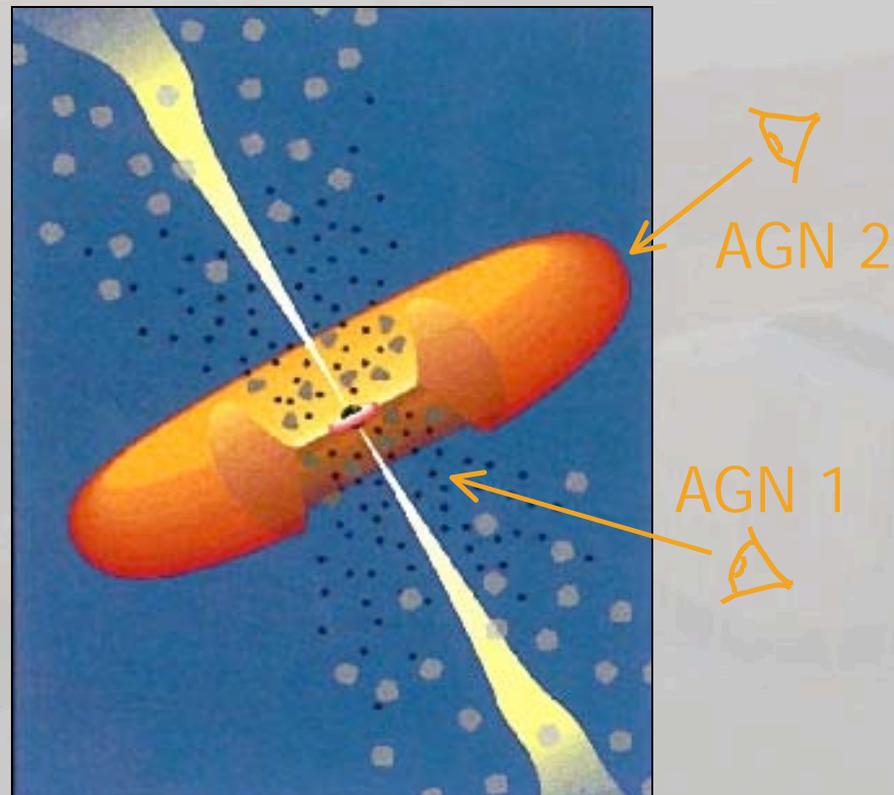
Thèmes de physique stellaire étudiés par interférométrie

- étoiles de la séquence principale : diamètres, brillance de surface (T_{eff}), masses
- étoiles de faible masse : diamètre, relation M-R
- disques des étoiles Herbig Ae/Be
- disques de débris (type Véra)
- rotateurs rapides
- étoiles géantes et supergéantes : assombrissement centre-bord, échelle de T_{eff}
- échelle de distance des céphéides
- nature des étoiles pulsantes de type Mira
- environnement des étoiles évoluées (poussières, molécules)
- taches à la surface des supergéantes
- masse des systèmes binaires
- ...

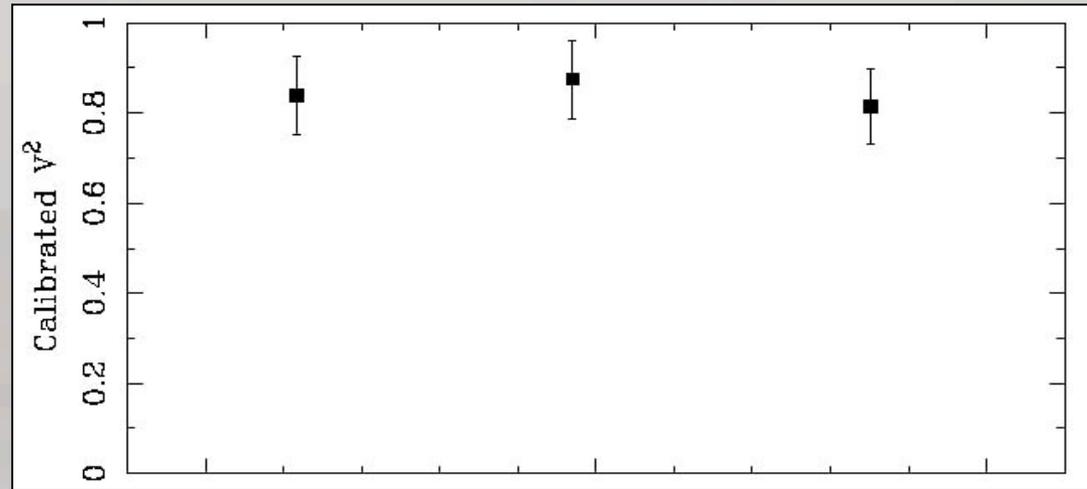
Plan

- ✓ Principe et intérêt de l'interférométrie
- ✓ Contributions en physique stellaire
- ✓ L'interférométrie à l'ère des grands télescopes
- ✓ Perspectives

Noyaux actifs de galaxies le modèle unifié



1^{ères} mesures interférométriques d'un AGN au Keck

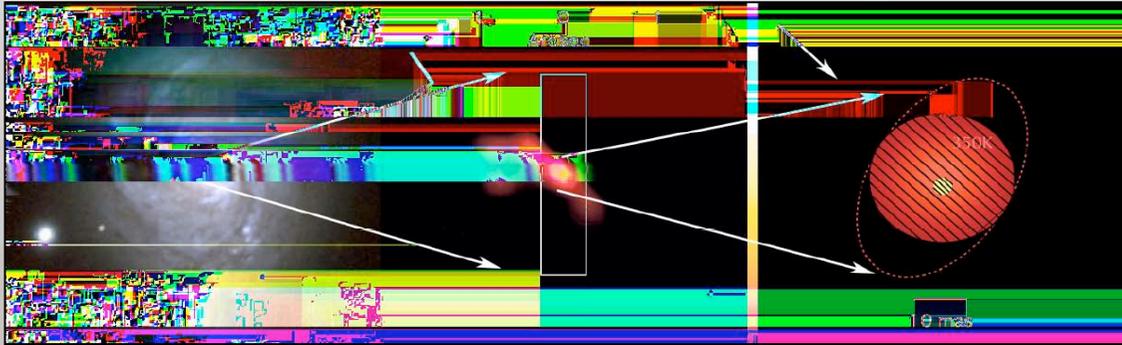


NGC 4151 avec Keck
(Swain et al. 2003)

NGC 4151 (Seyfert 1) @ $2.2 \mu\text{m}$ avec Keck : le cœur compact n'est pas résolu (résolution = 5 mas)

Observation non ou peu perturbée par le tore selon le modèle unifié

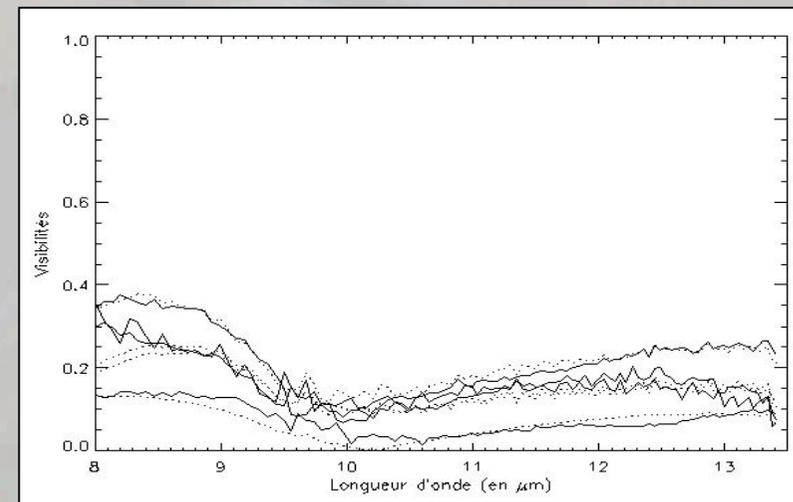
1^{ères} mesures interférométriques d'un AGN au VLTI



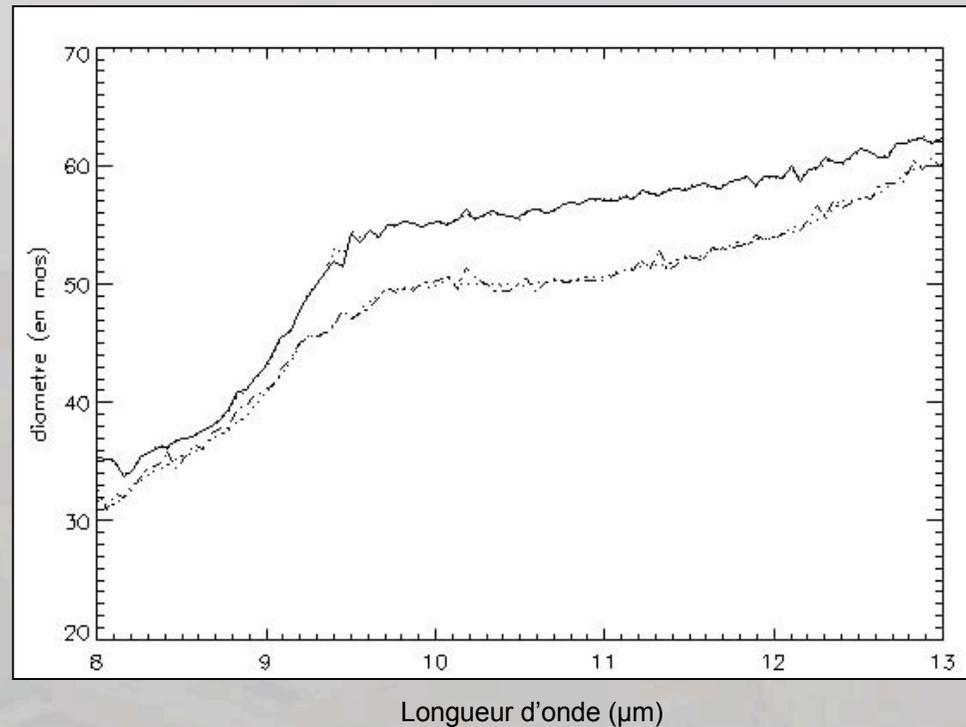
(Jaffe et al. 2004)

NGC 1068 (Seyfert 2) @ 8-13 μm sur le
VLTI/MIDI :

L'objet est clairement résolu



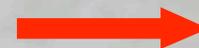
Première analyse des données



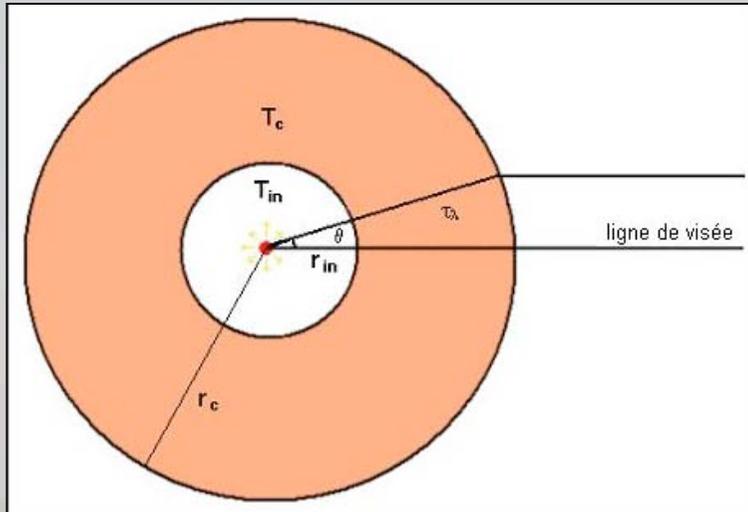
Thèse Anne Poncelet
(Obs. Paris)

Comparaison de l'objet avec un disque uniforme de taille dépendant de λ

Le diamètre augmente de 30 à 60 mas entre 8 et 13 μm



Modèle à deux composantes



4 paramètres : T_{in} , r_{in} , T_c , r_c
et $\tau(\lambda)$

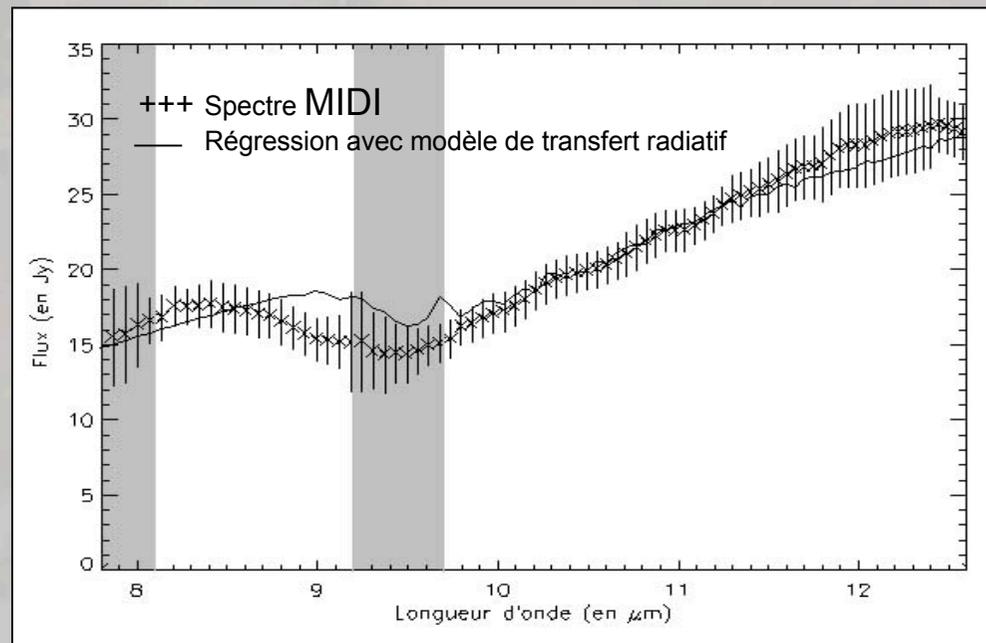
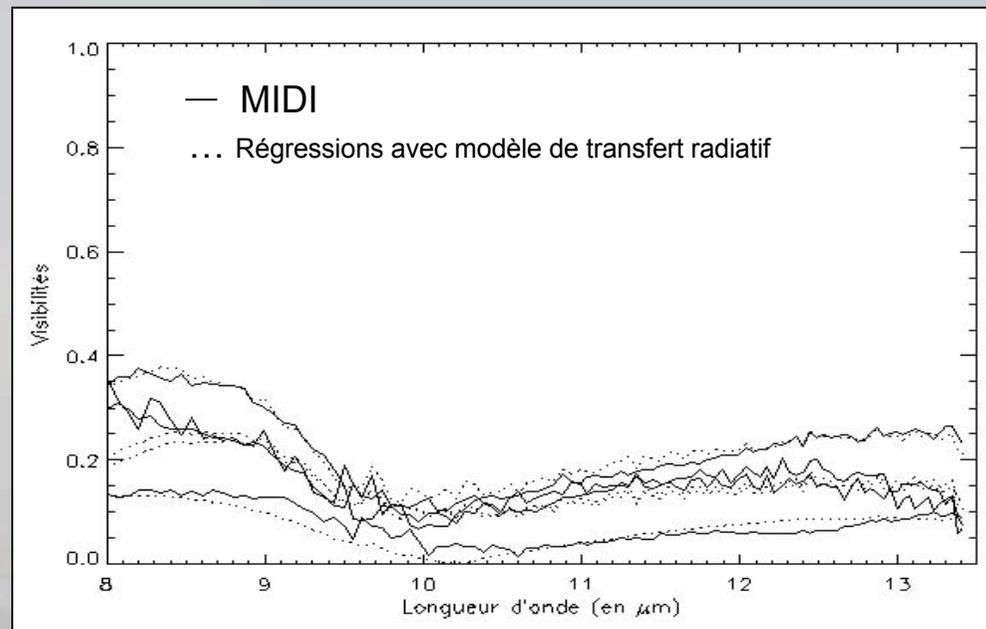
$\varnothing_{interne} \approx 35 \text{ mas } (\sim 2.4 \text{ pc})$

$\varnothing_{couche} \approx 82 \text{ mas } (\sim 5.7 \text{ pc})$

$T_{interne} \approx 370 \text{ K}$

$T_{couche} \approx 233 \text{ K}$

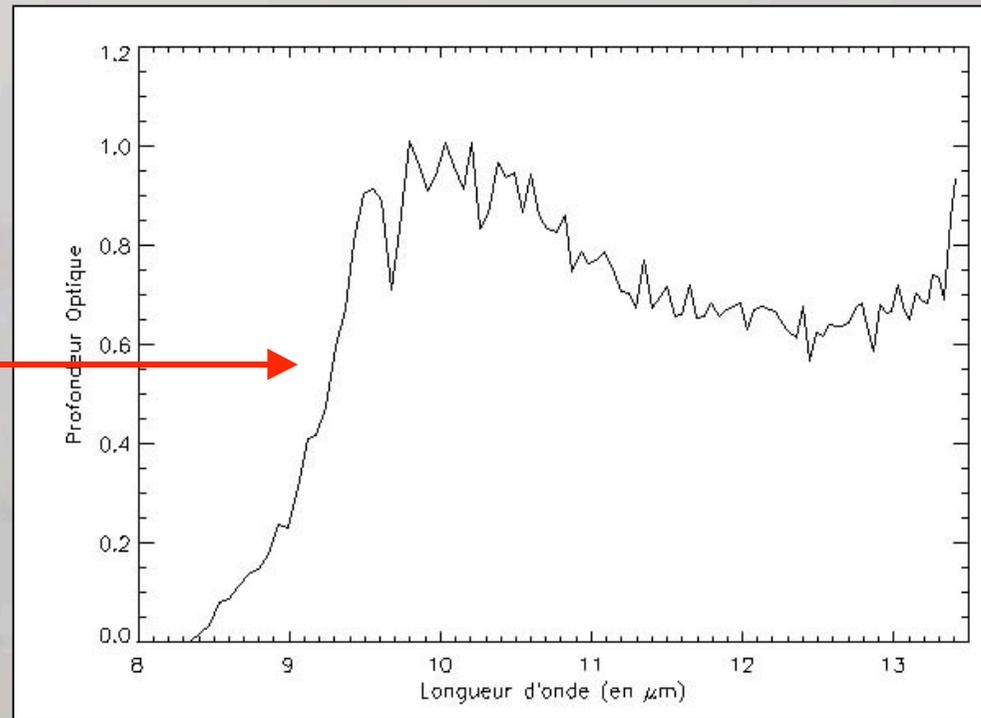
$T \ll T_{sublimation}$ des poussières
(graphites et silicates)



Profondeur optique

Signature des silicates
(9.7 μm)

Modélisation fine de la
poussière en cours



La couche peut donc être identifiée au tore de poussière du modèle unifié

Plan

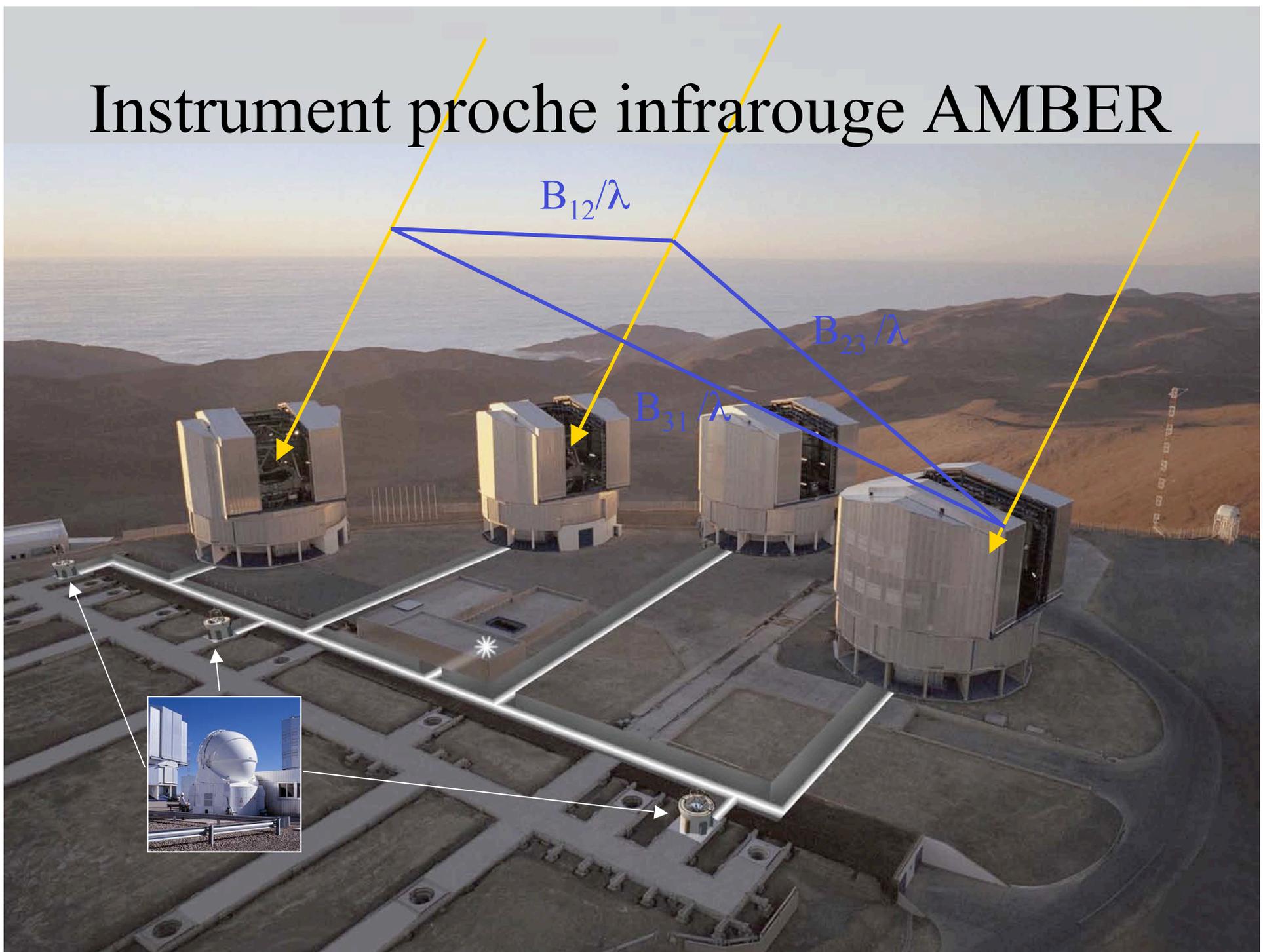
- ✓ Principe et intérêt de l'interférométrie
- ✓ Contributions en physique stellaire
- ✓ L'interférométrie à l'ère des grands télescopes
- ✓ Perspectives

Instrument proche infrarouge AMBER

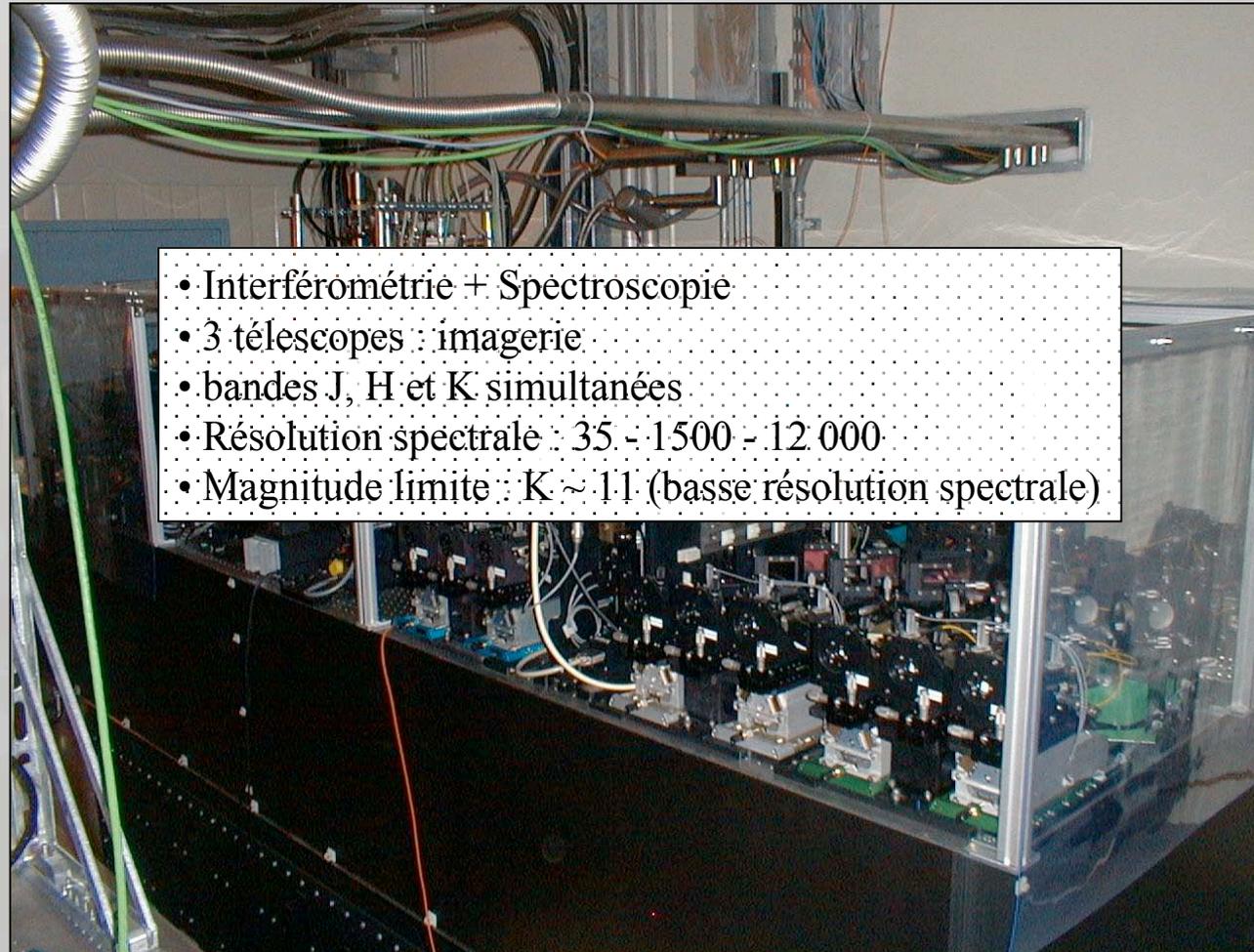
B_{12}/λ

B_{23}/λ

B_{31}/λ

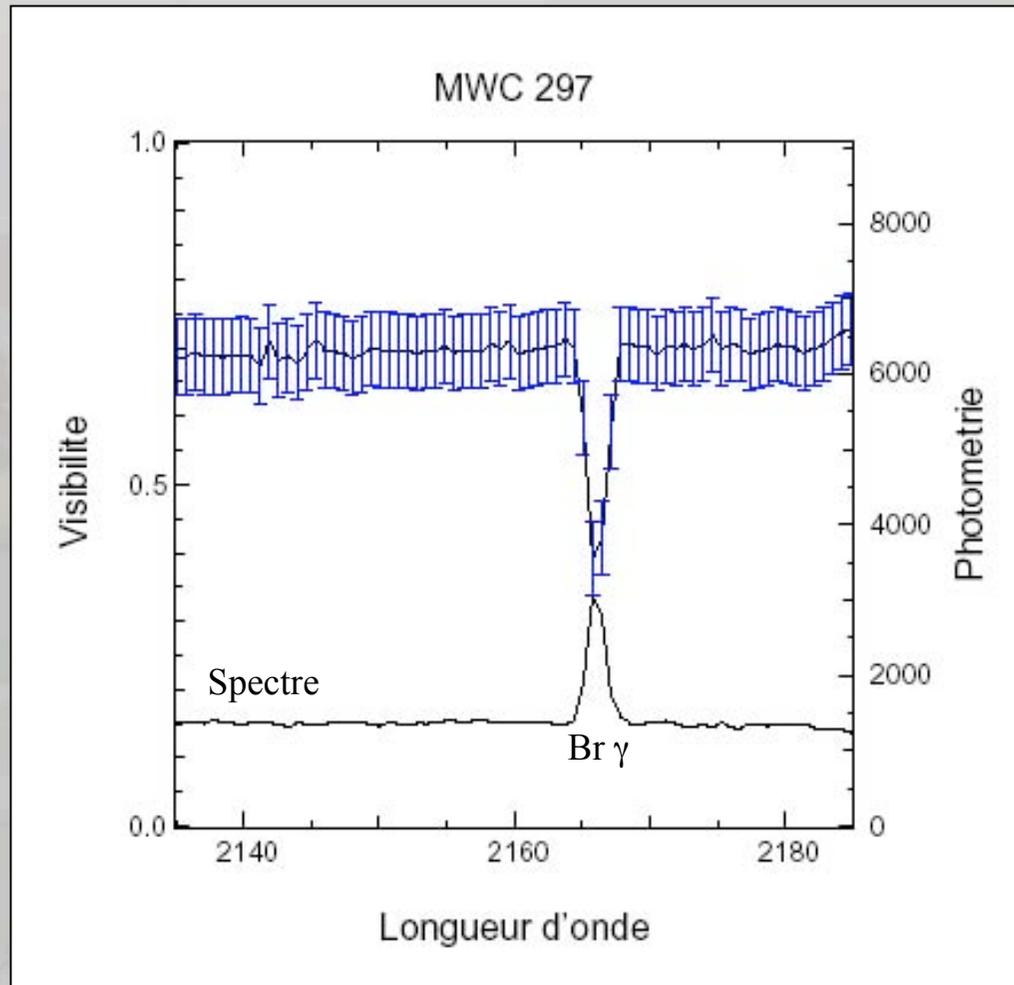


Instrument proche infrarouge AMBER

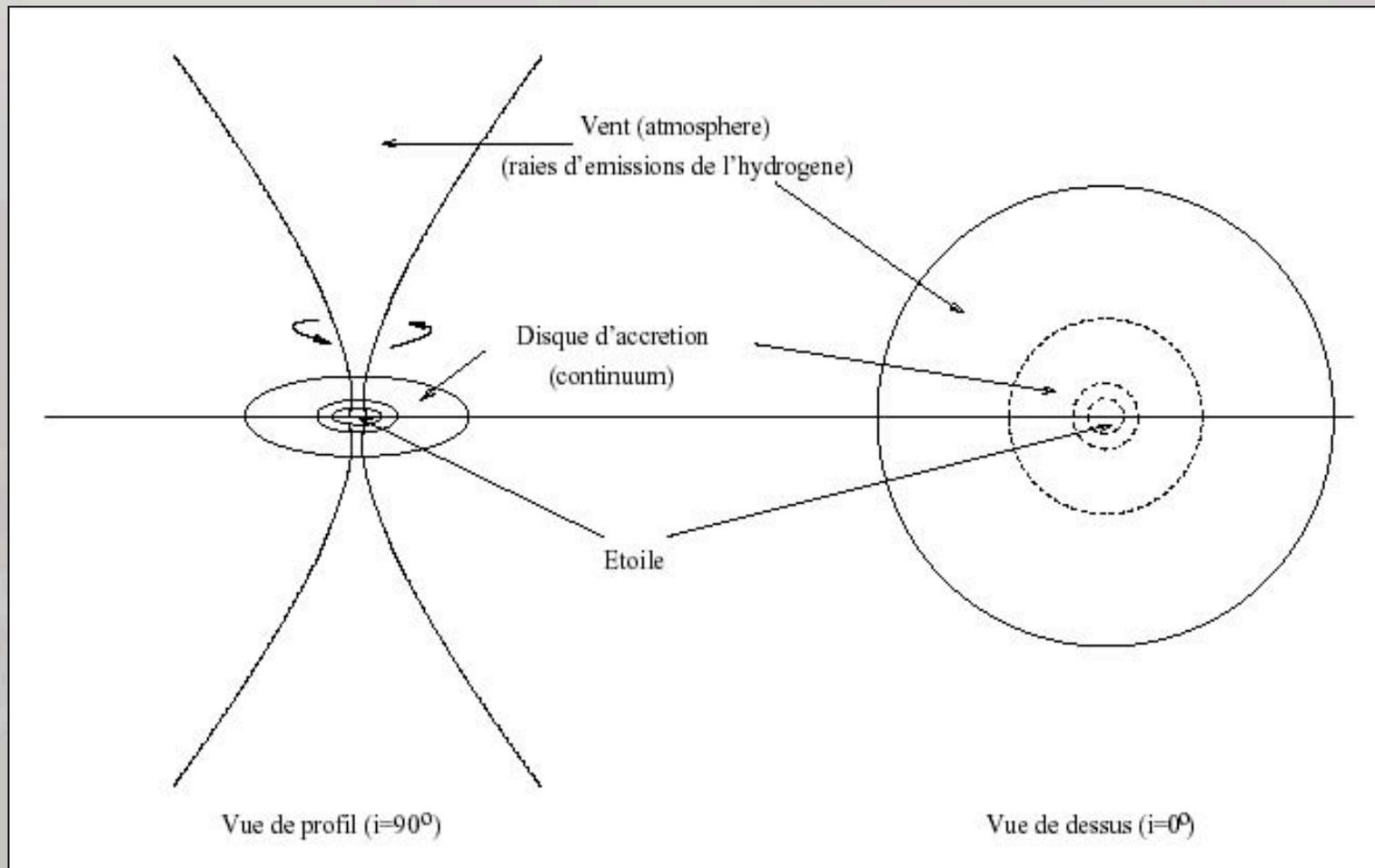


- Interférométrie + Spectroscopie
- 3 télescopes : imagerie
- bandes J, H et K simultanées
- Résolution spectrale : 35 - 1500 - 12 000
- Magnitude limite : K \sim 11 (basse résolution spectrale)

Observation spectralement résolue avec AMBER (R = 1500)



Observation spectralement résolue avec AMBER ($R = 1500$)

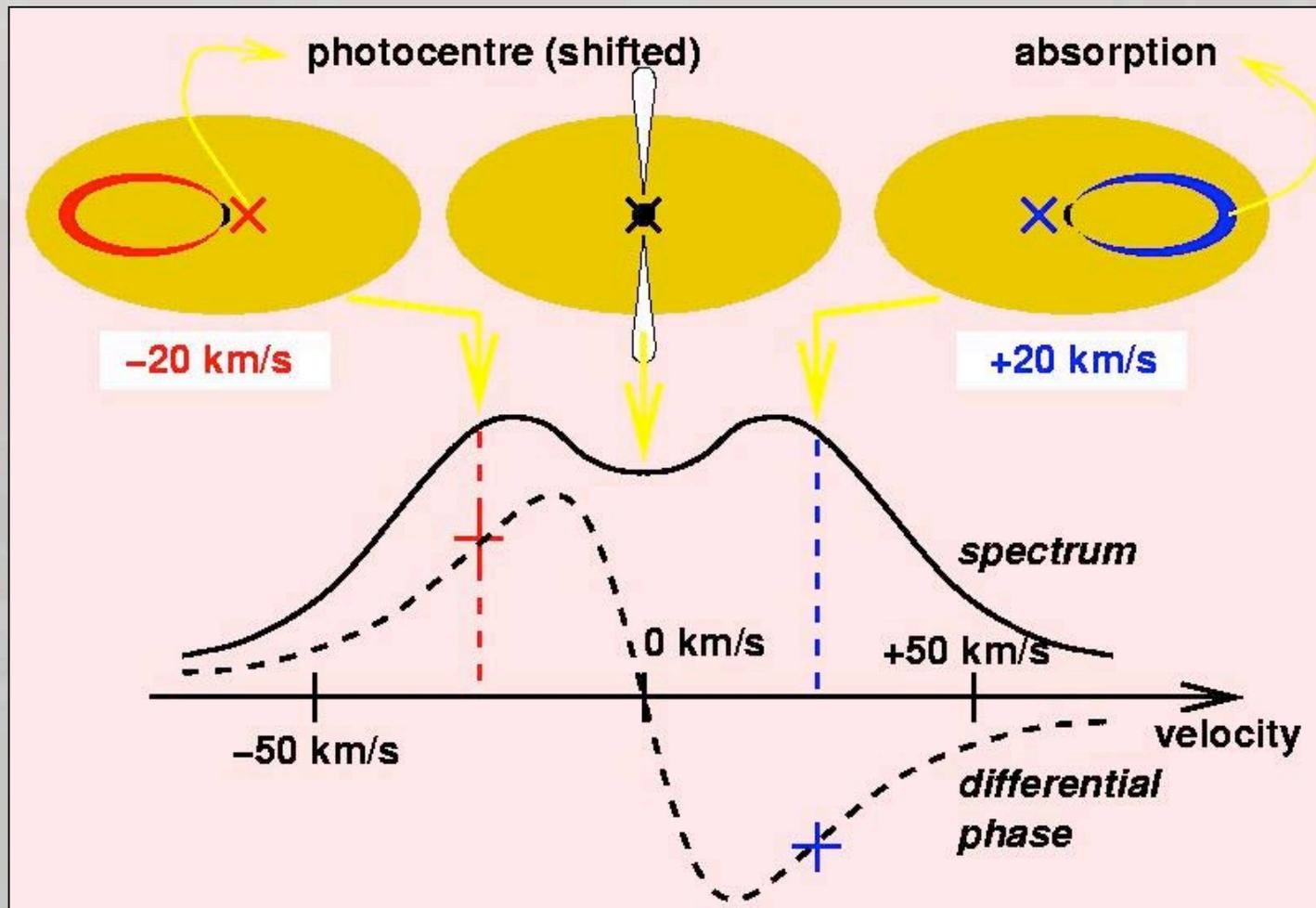


Rotation Képlérienne des disques d'objets jeunes

- Quelle est la nature des mouvements de matière autour de l'étoile jeune ?
 - chute libre ?
 - rotation Képlérienne ?
 - écart à la rotation képlérienne ?
- Outre la physique du disque, la rotation est une mesure de la masse dynamique de l'objet central

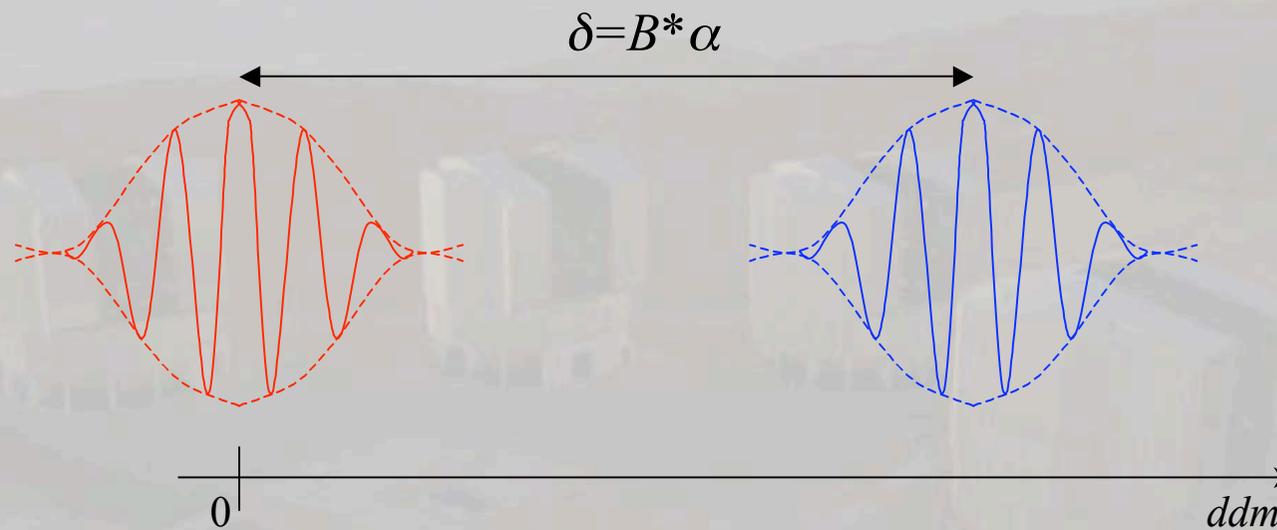
Méthode interférométrique ET spectrale

Rotation Képlérienne des disques d'objets jeunes



Phase et imagerie

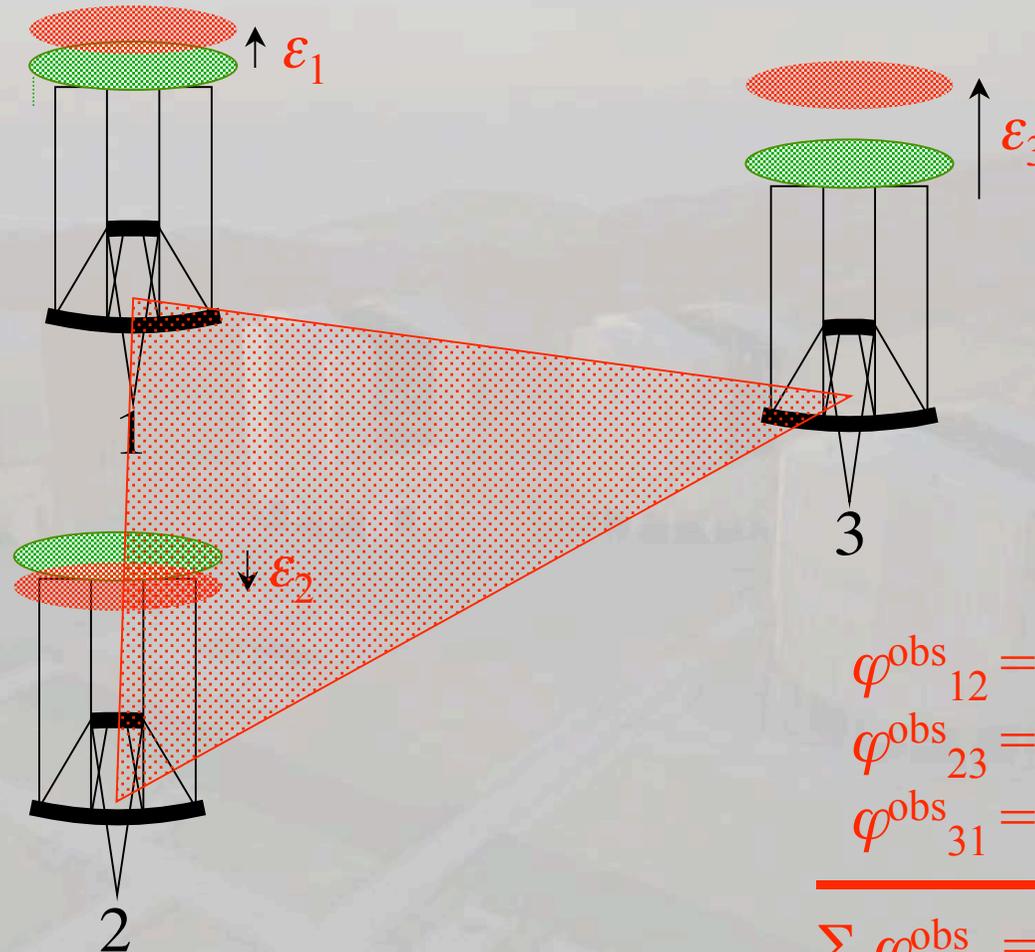
Deux points sources de séparation angulaire α



La différence de marche (ou la phase) donne la position relative des sources dans le champ

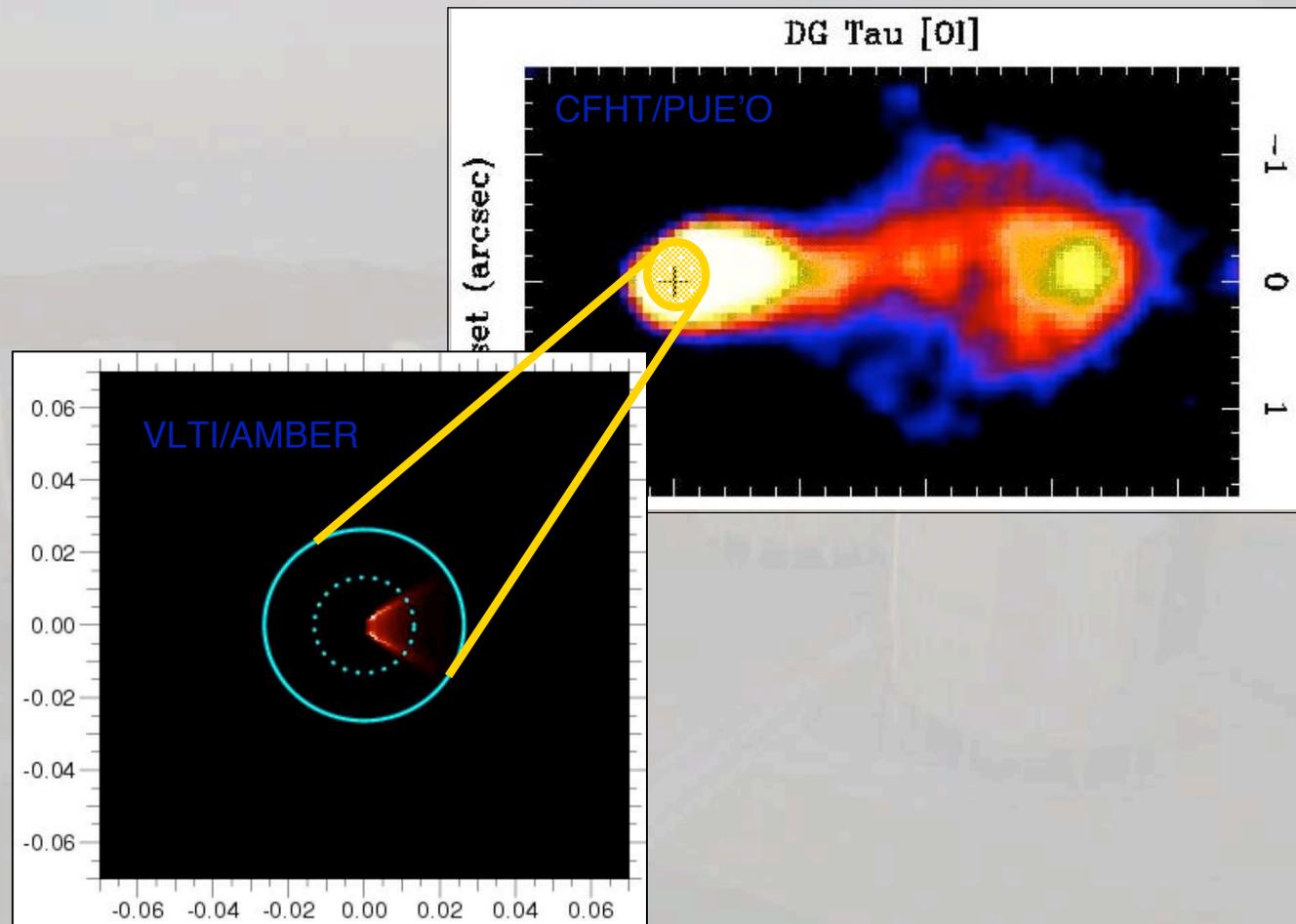
Il faut mesurer la phase pour obtenir des images

Principe de la clôture de phase



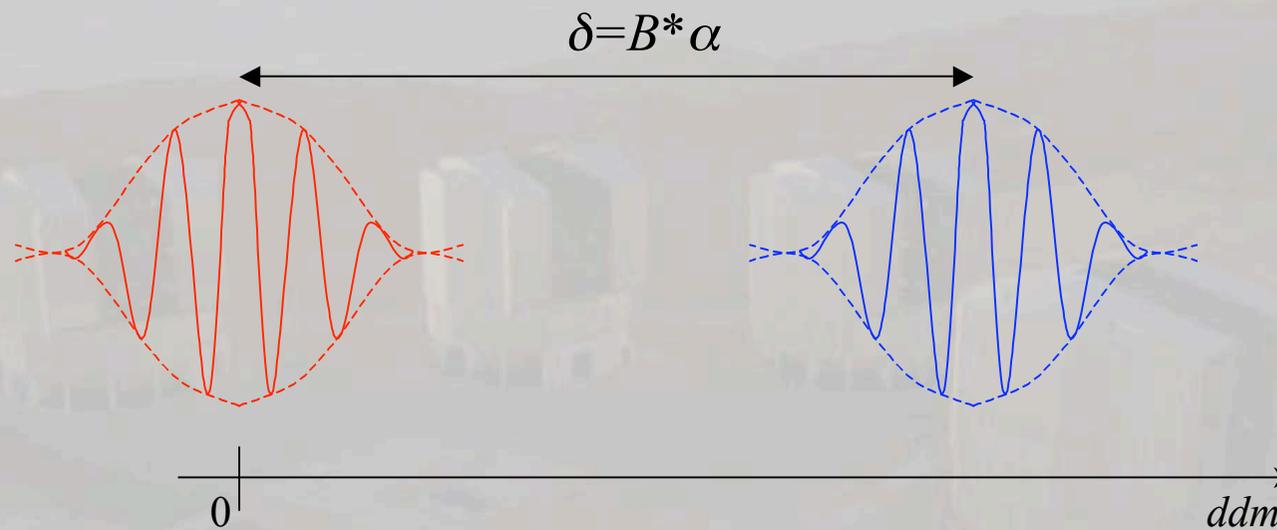
Et il faut 3 télescopes pour mesurer les phases des visibilités

Les jets des étoiles jeunes avec AMBER



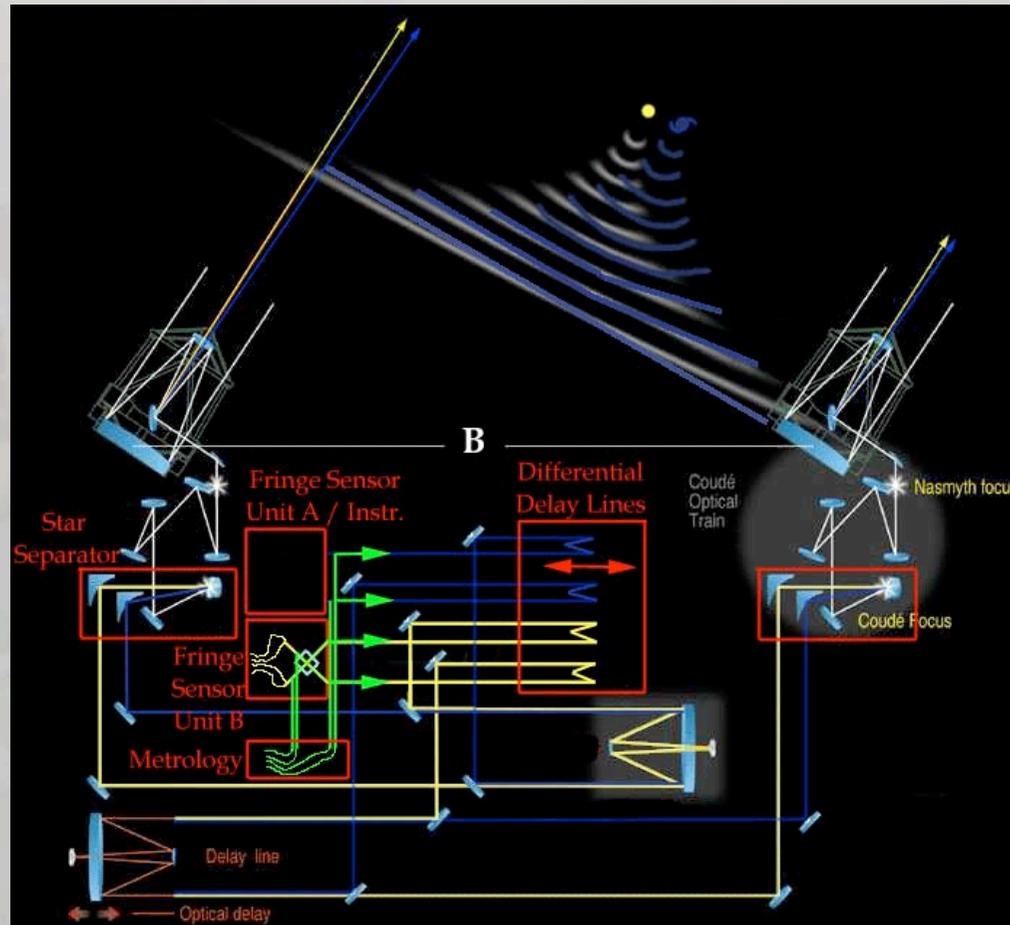
Phase et astrométrie

Deux points sources de séparation angulaire α

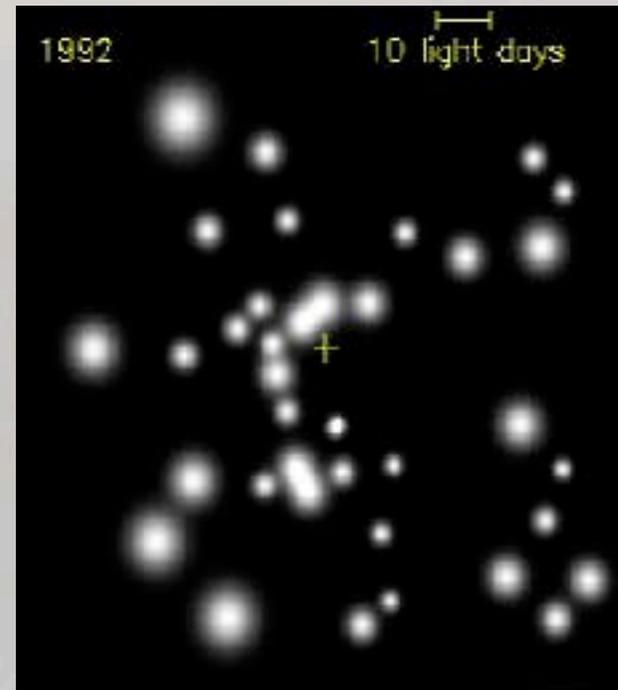
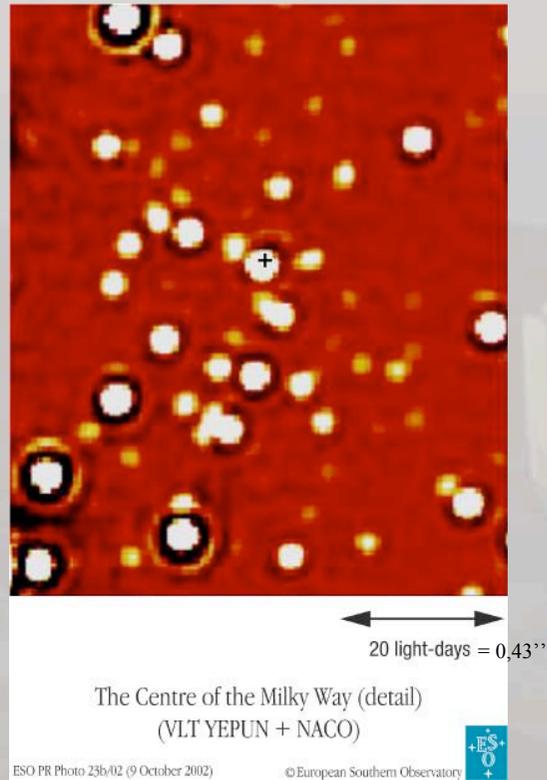


La différence de marche (ou la phase) donne une mesure astrométrique précise :
50 μas sur le VLTI (précision de 50 nm sur la position du paquet de franges)

Imagerie par référence de phase : PRIMA



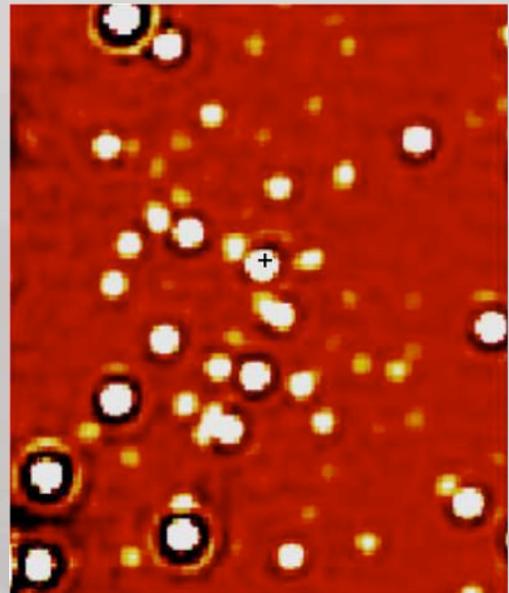
Étude du centre galactique



Mesure de la masse du trou noir :

$$2,7 \times 10^6 M_{\text{sol}}$$

Étude du centre galactique

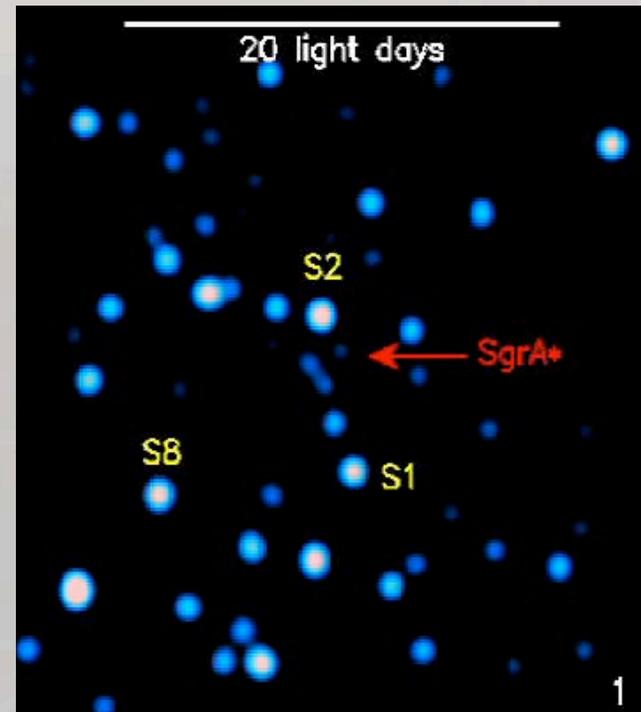


20 light-days = 0,43''

The Centre of the Milky Way (detail)
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 23b/02 (9 October 2002)

© European Southern Observatory



Mesure de la masse du trou noir :

$$2,7 \times 10^6 M_{\text{sol}}$$

'OHANA au Mauna Kea

UKIRT
4 m

Gemini
8 m

CFHT
3,60 m

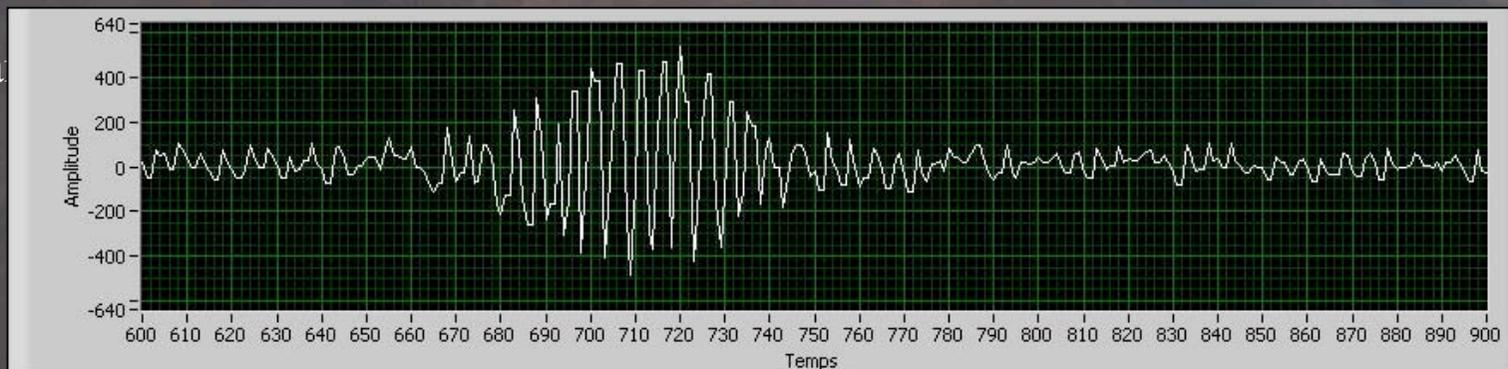
Subaru
8 m

Keck I&II
10 m

IRTF
3 m -> 6,50m

- Plus grand site astronomique de qualité du monde

- 7 gra



Investissez (à) Paranal !

