

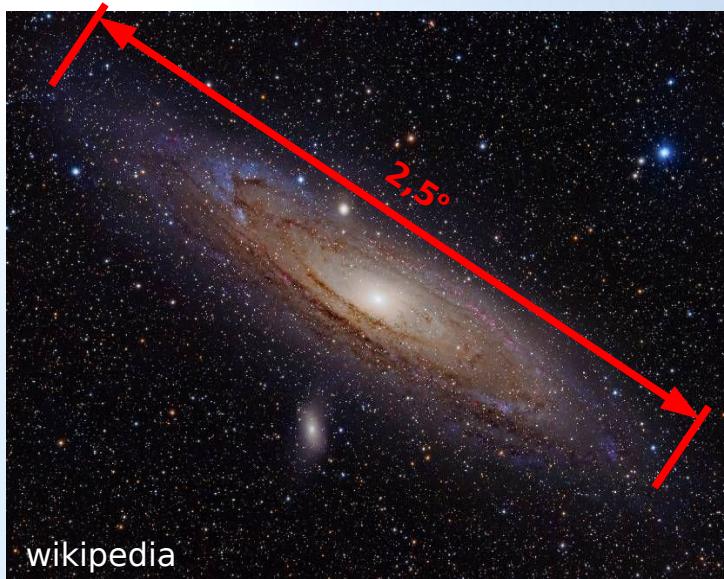
Interactions in massive binaries as seen by interferometry

Florentin Millour



What size ?

M31



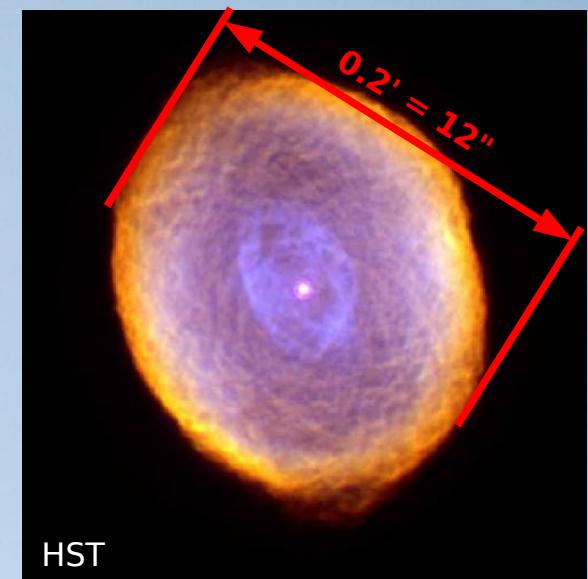
wikipedia

M75



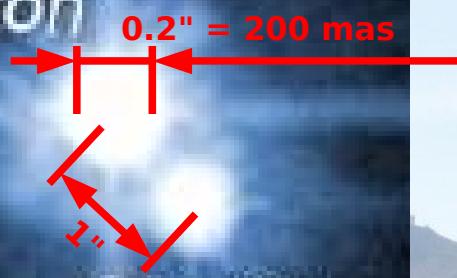
wikipedia

IC 418



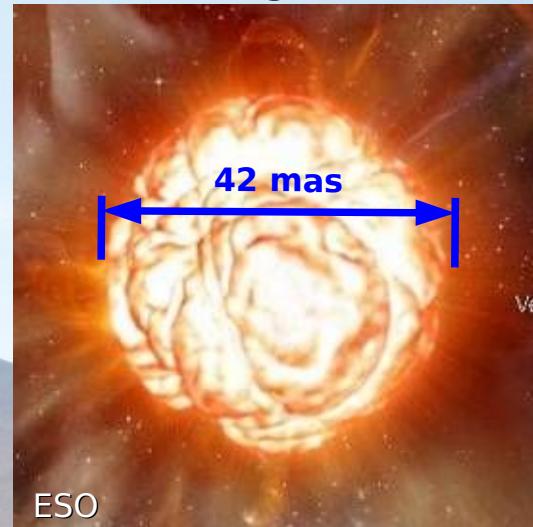
HST

Pluton



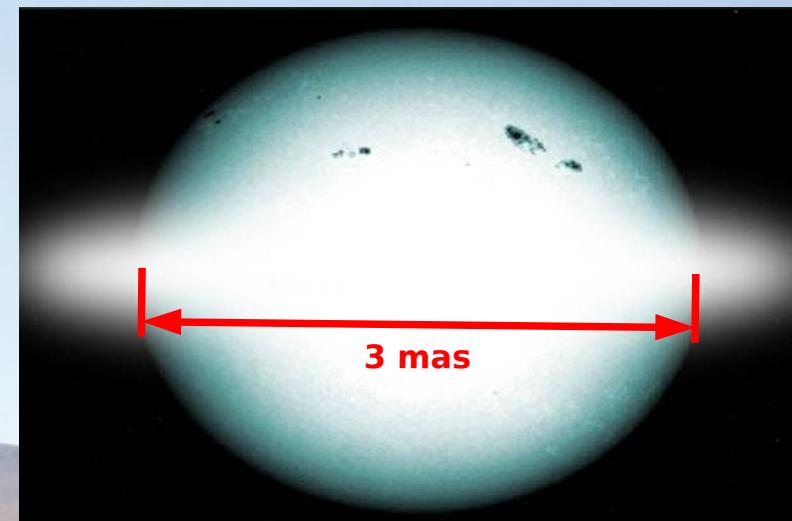
HST

Bételgeuse

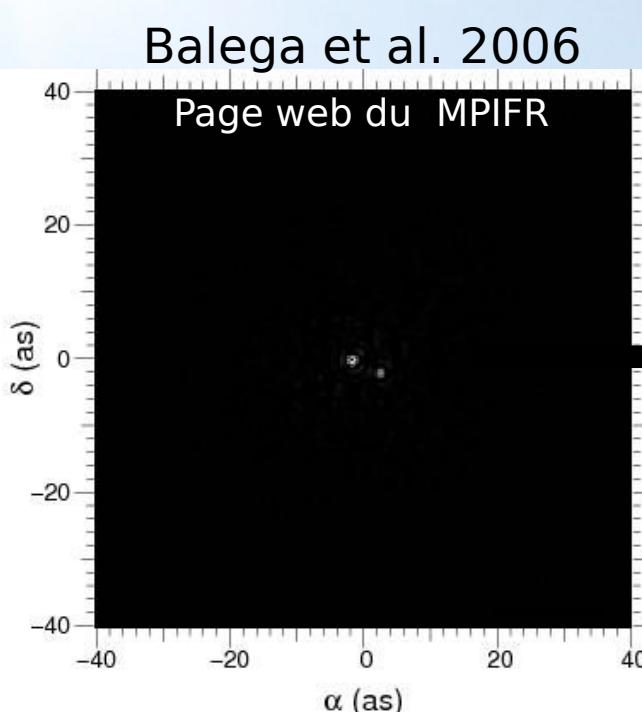


ESO

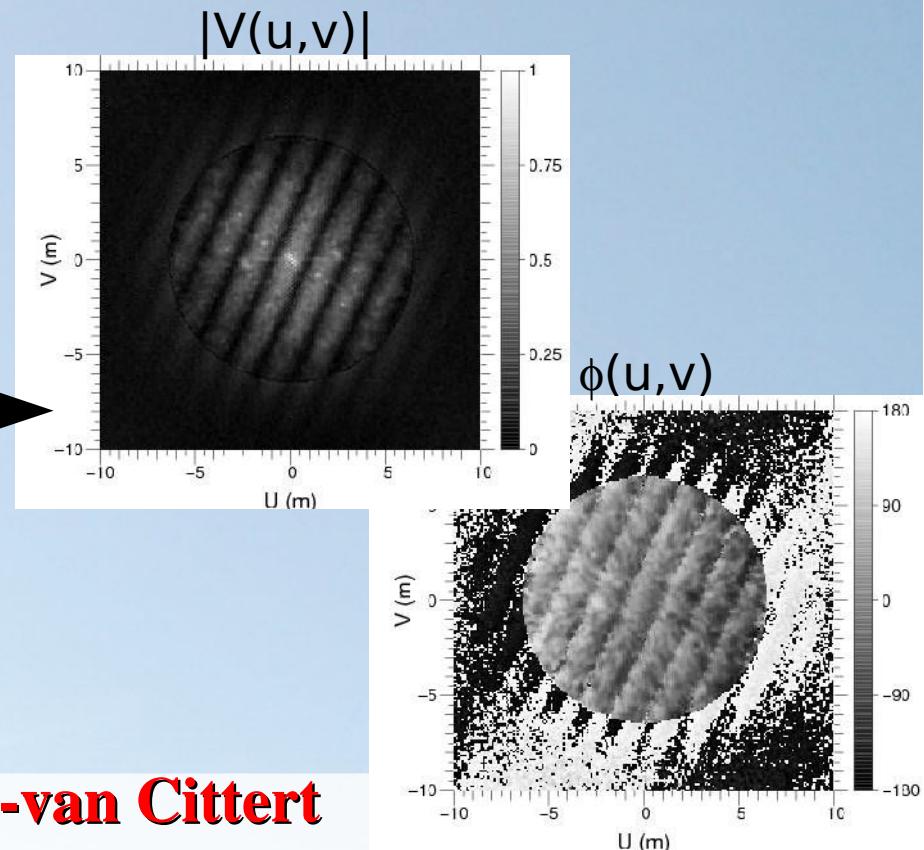
Achernar



Télescope mono-pupille



TF
(Transformée de Fourier)



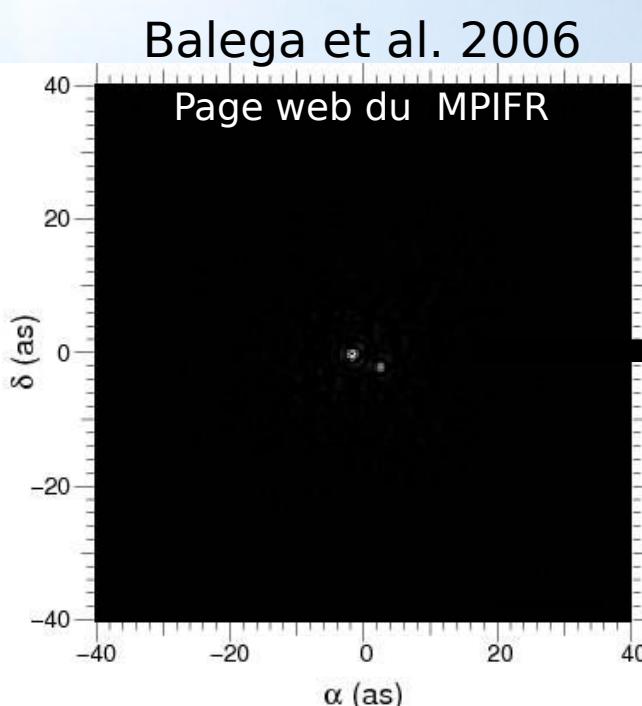
Théorème de Zernike-van Cittert

Image : $I(x,y) = O * PSF \xrightarrow{TF} \hat{I}(u,v) = \hat{O} \times \hat{PSF} = |V(u,v)|, \phi(u,v)$

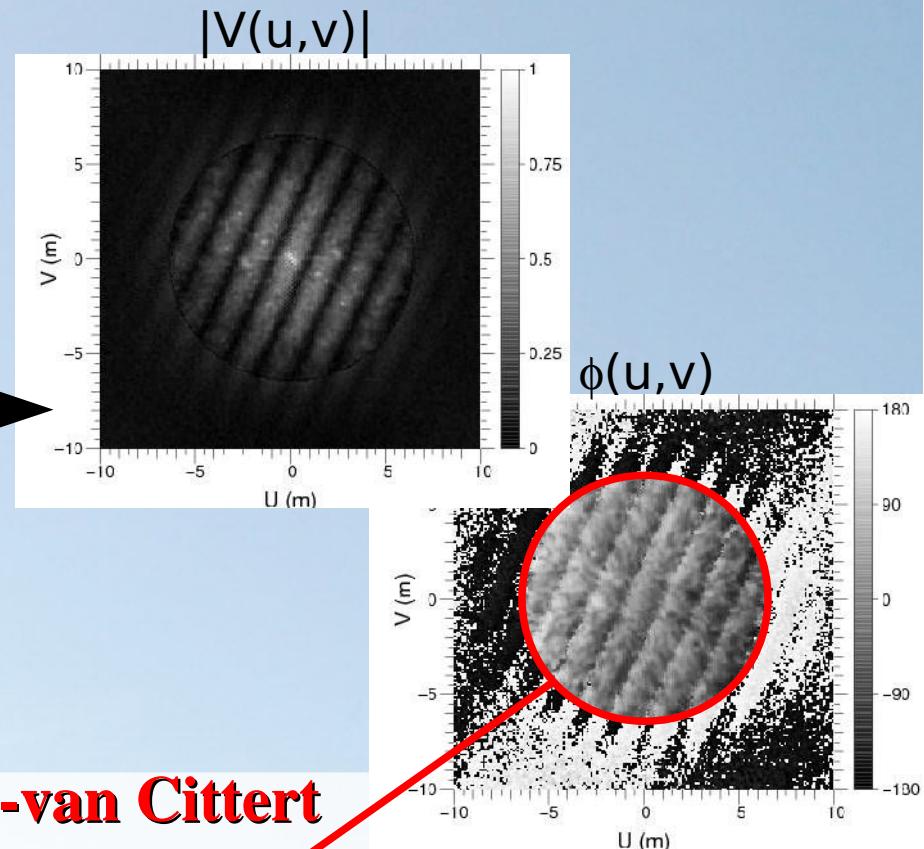
Fréquence de coupure D/λ

Visibilité

Télescope mono-pupille



TF
(Transformée de Fourier)



Théorème de Zernike-van Cittert

Image : $I(x,y) = O * PSF \xrightarrow{TF} \hat{I}(u,v) = \hat{O} \times \hat{PSF} = |V(u,v)|, \phi(u,v)$

Fréquence de coupure D/λ

Visibilité

Télescope mono-pupille (masquage de pupille)

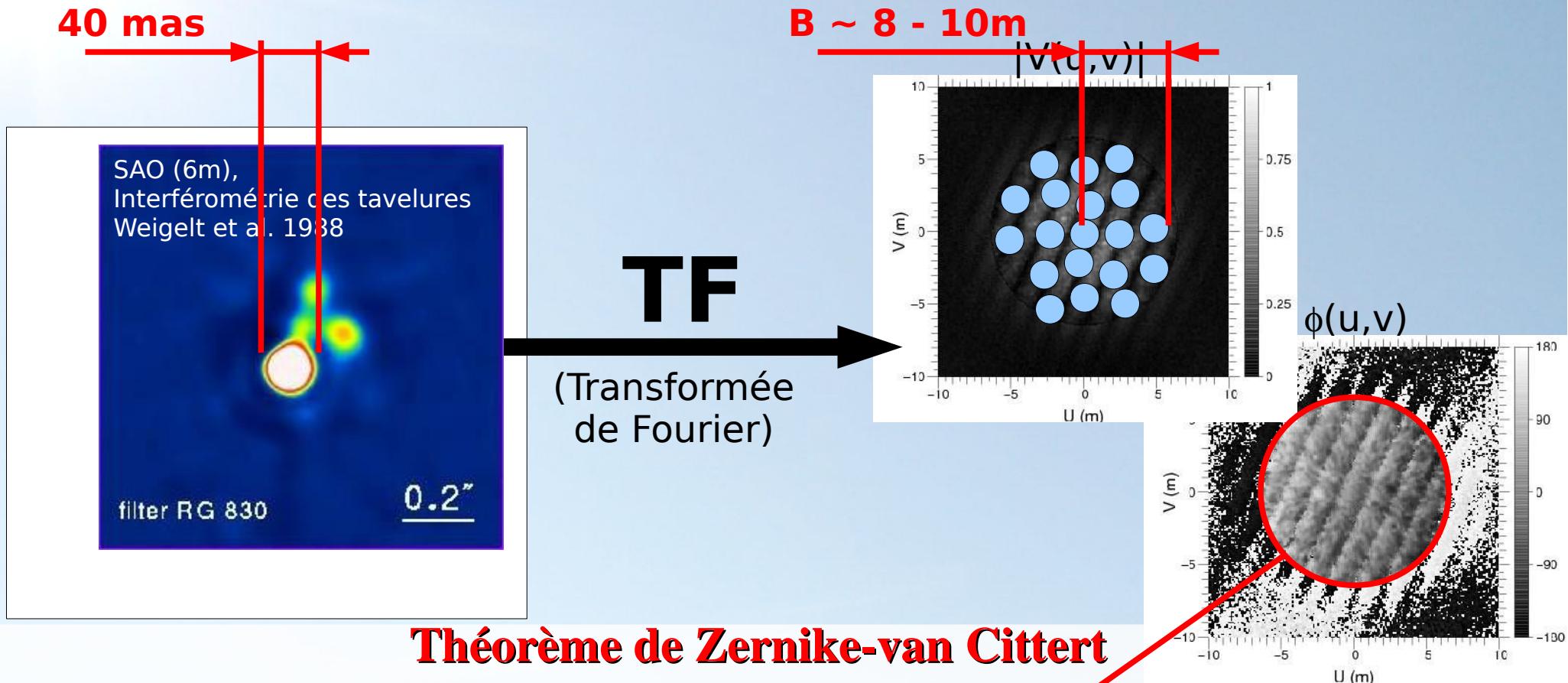
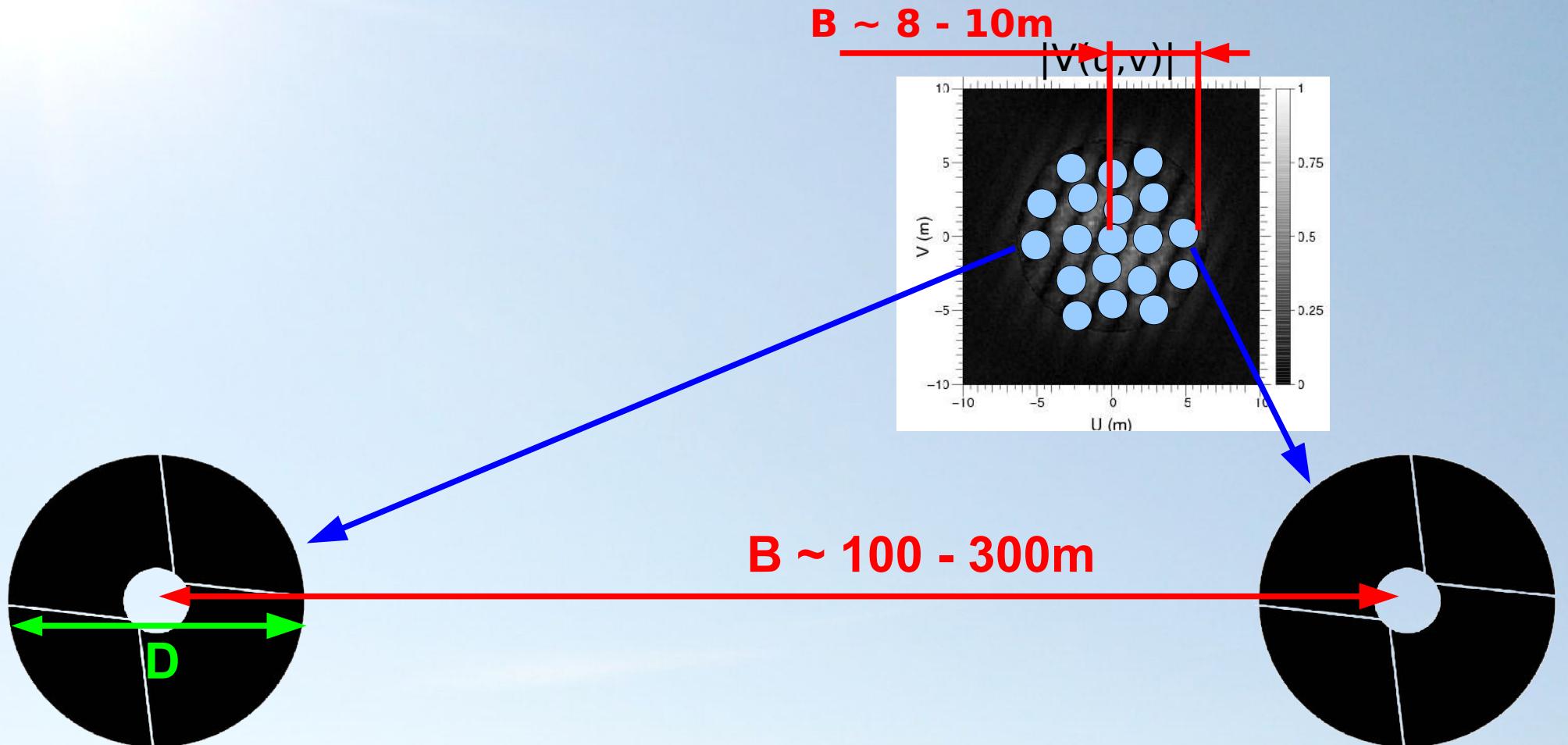


Image : $I(x,y) = O * PSF \xrightarrow{TF} \hat{I}(u,v) = \hat{O} \times \hat{PSF} = |V(u,v)|, \phi(u,v)$

Fréquence de coupure D/λ

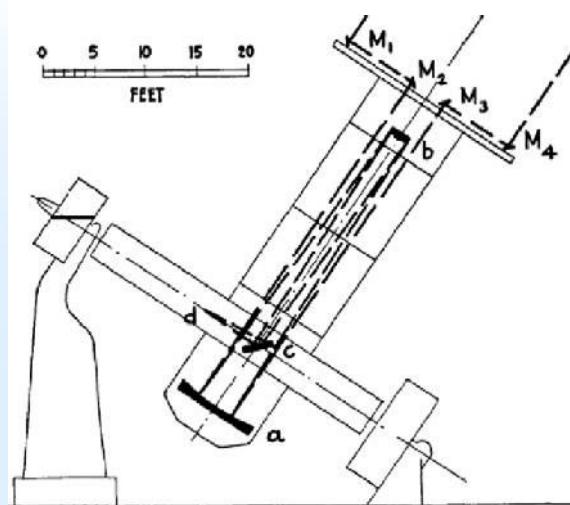
Visibilité

Masquage de pupille et interférométrie

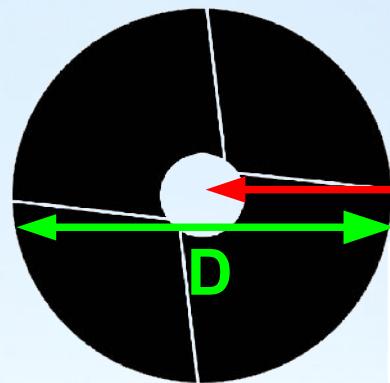


L'interférométrie à longue base dans l'optique/IR

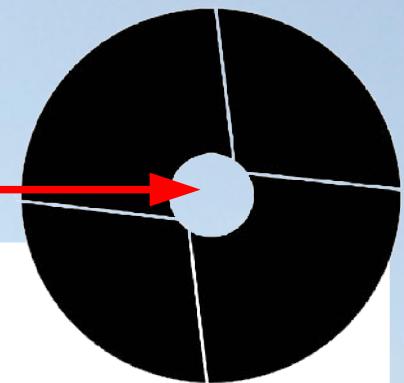
Michelson & Pease, 1921



Labeyrie, 1975



B



- Télescope mono-pupille : $0 < F_{ij} < \alpha D / \lambda$
- Interféromètre 2T : $F_{ij} = 0$ et B / λ
=> Seulement très peu de fréquences spatiales sont enregistrées par un interféromètre

VLTI

130 m

ATs

Labo focal

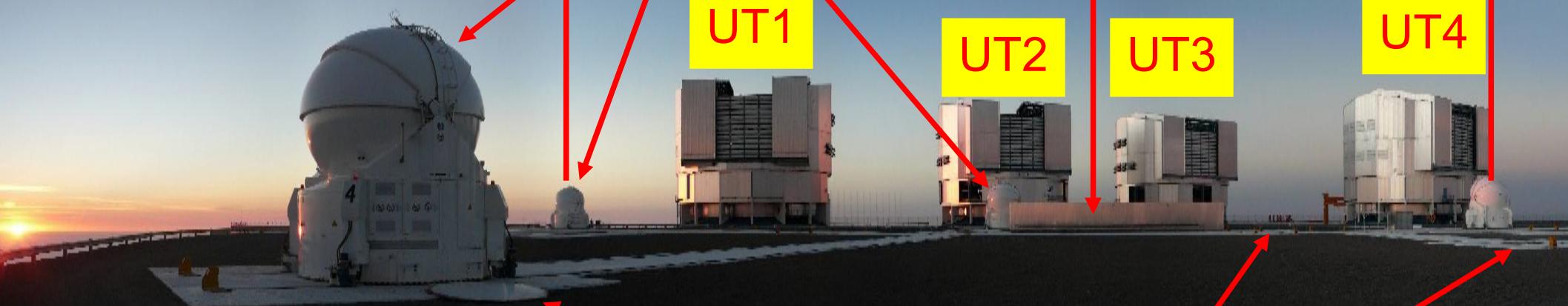
UT1

UT2

UT3

UT4

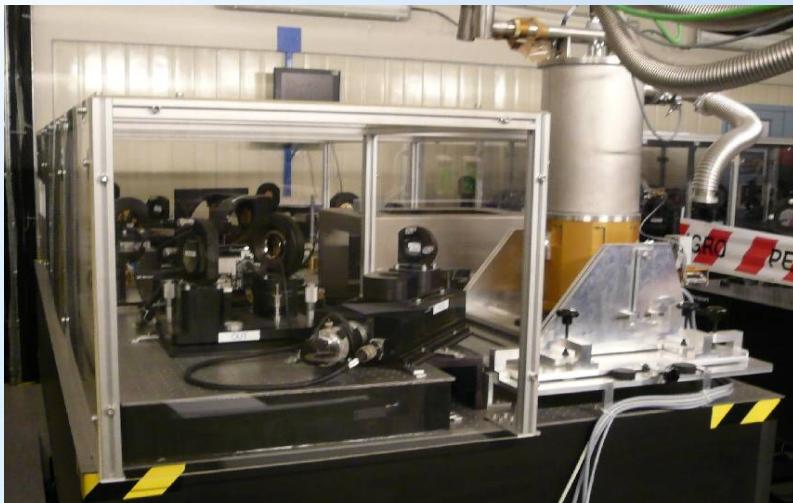
stations des AT



Recombinieurs

VINCI

- 2 télescopes
- Bande K ($2\mu\text{m}$)
- Large bande



MIDI

- 2 télescopes
- Bande N ($8-13\mu\text{m}$)
- Résolutions spectrales $R=30$ & 300

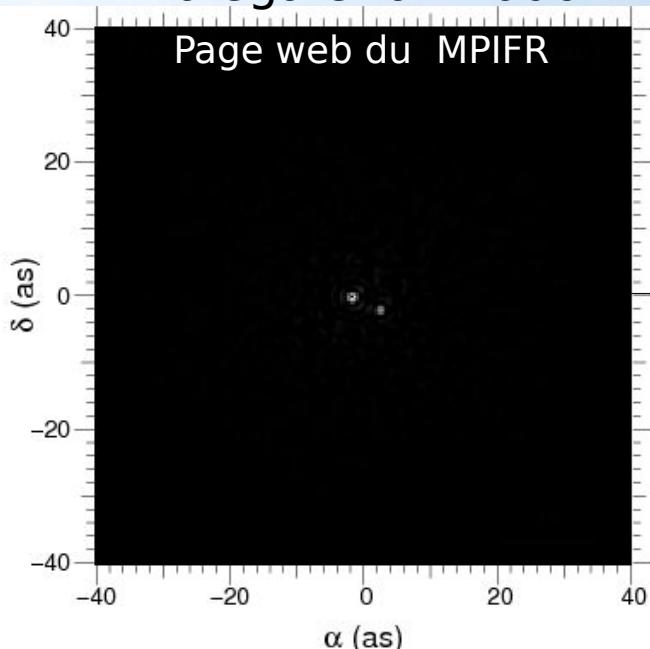


AMBER

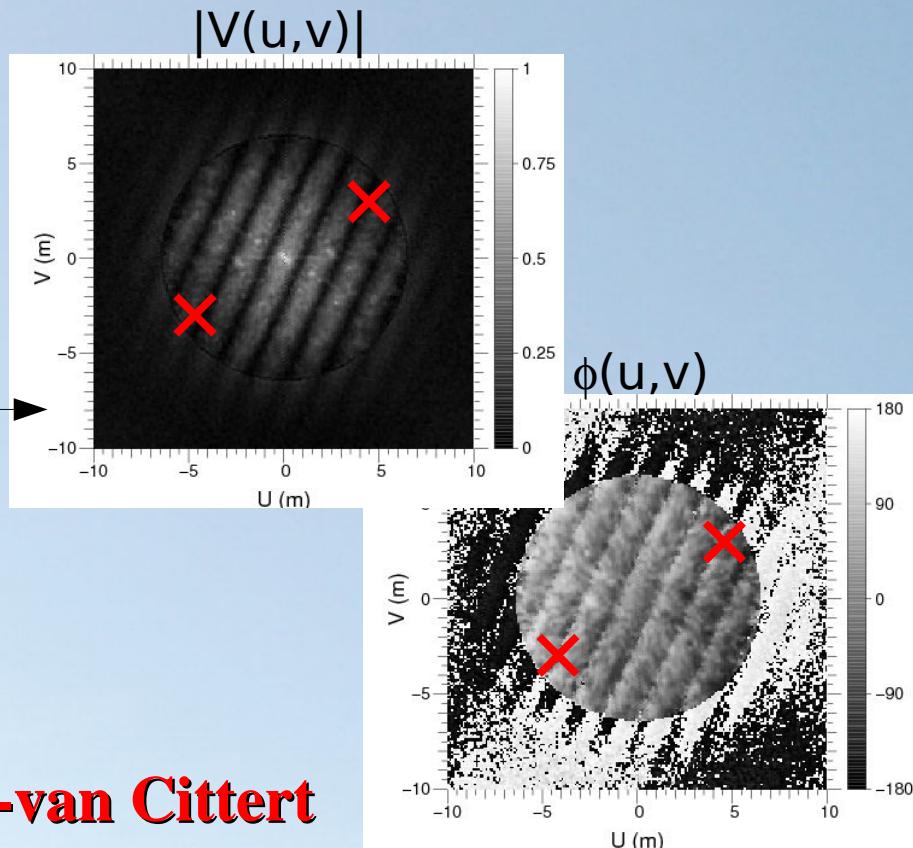
- 3 télescopes (capacités d'imagerie)
- Fibres optiques (calibration)
- J, H & K simultanés ($1-2\mu\text{m}$)
- Résolution spectrales $R=35, 1500$ & 12000

Quelle visibilité avec un interféromètre ?

Balega et al. 2006
Page web du MPIFR



TF

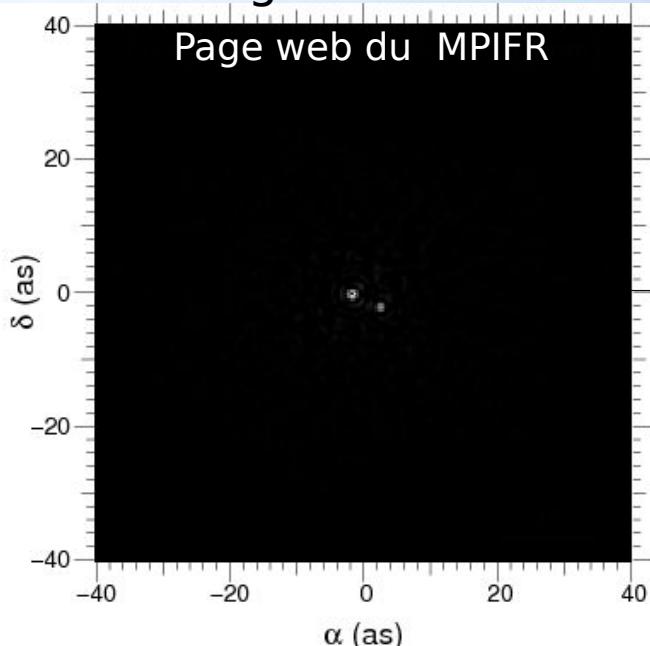


Théorème de Zernike-van Cittert

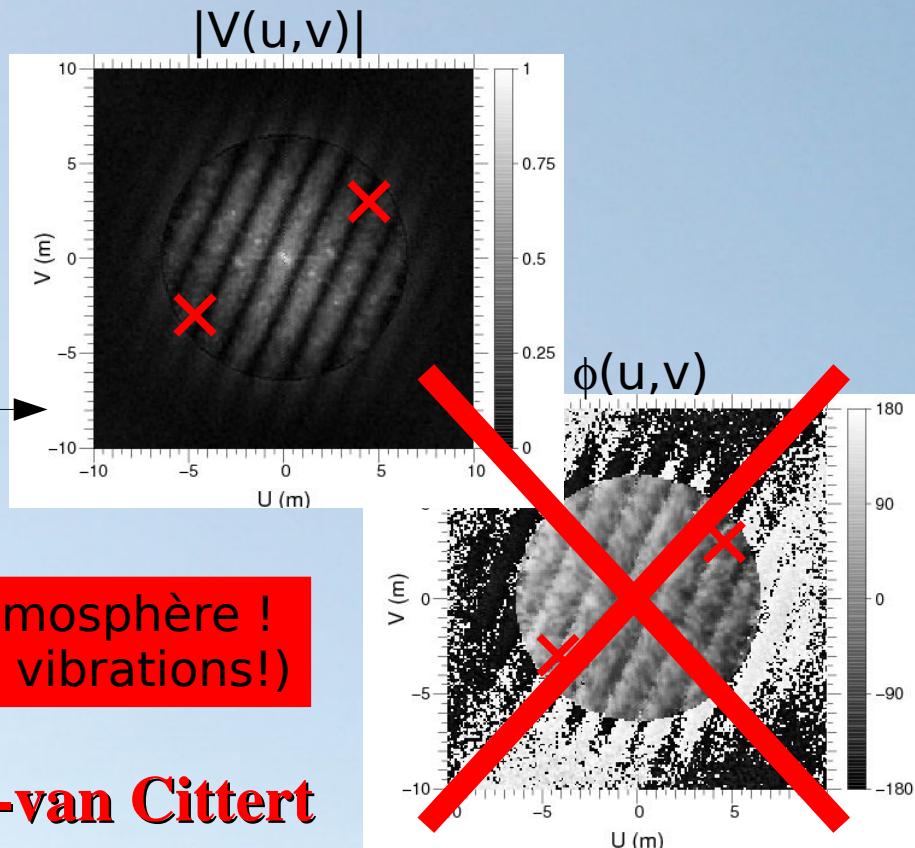
Image : $I(x,y) = O * PSF \xrightarrow{TF} |V(u,v)|, \phi(u,v)$
Fréquence de coupure D/λ

Quelle visibilité avec un interféromètre ?

Balega et al. 2006
Page web du MPIFR



TF



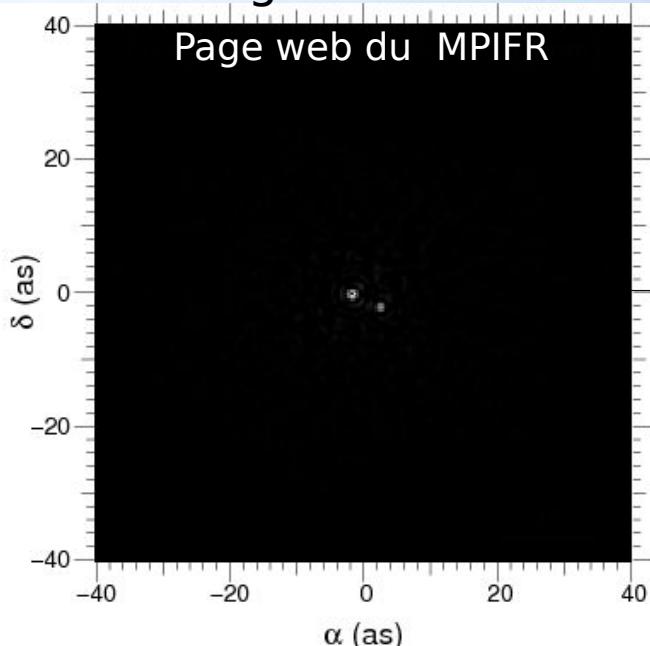
Atmosphère !
(et vibrations!)

Théorème de Zernike-van Cittert

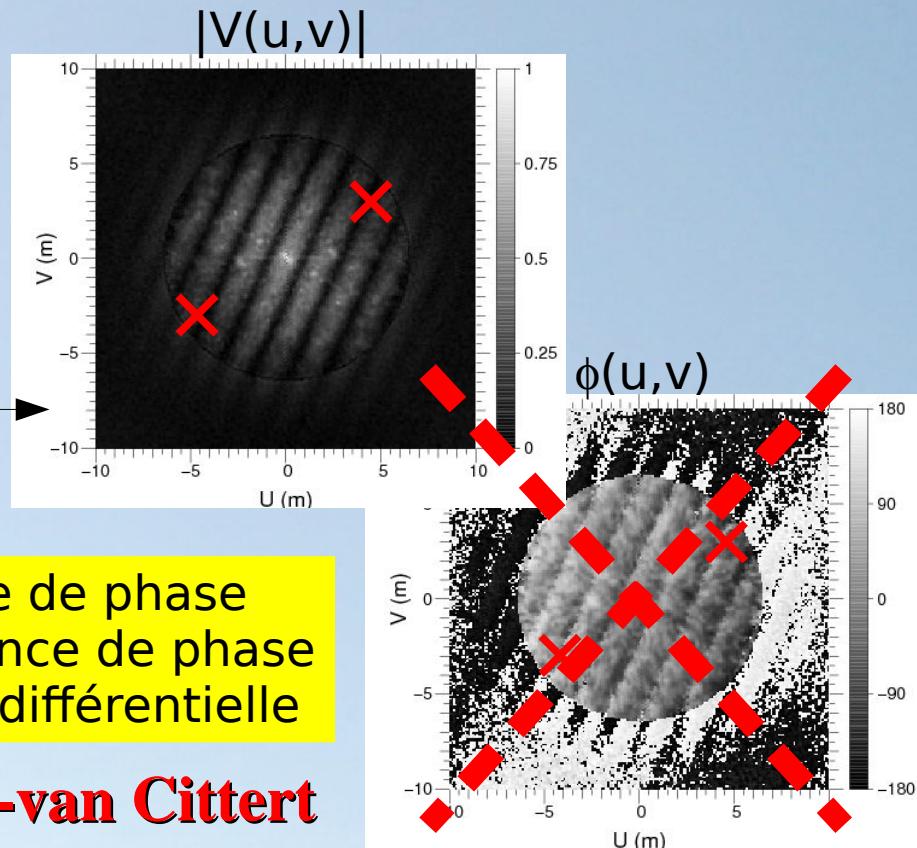
Image : $I(x,y) = O * PSF \xrightarrow{TF} |V(u,v)|, \phi(u,v)$
Fréquence de coupure D/λ

Quelle visibilité avec un interféromètre ?

Balega et al. 2006



TF



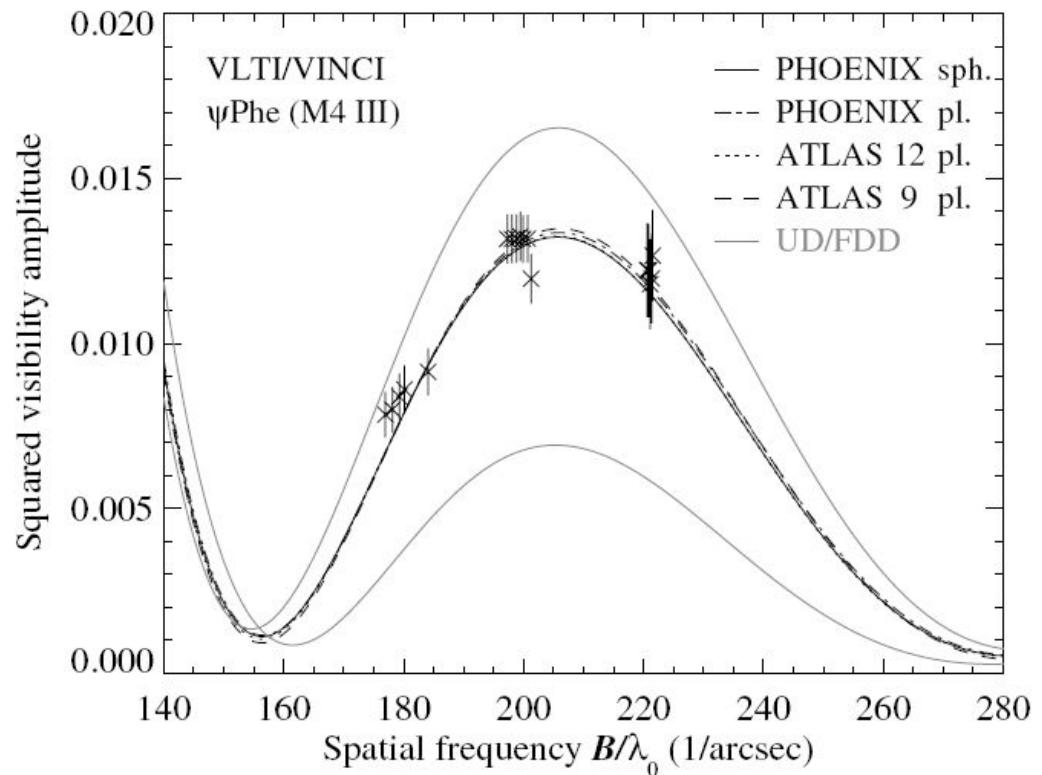
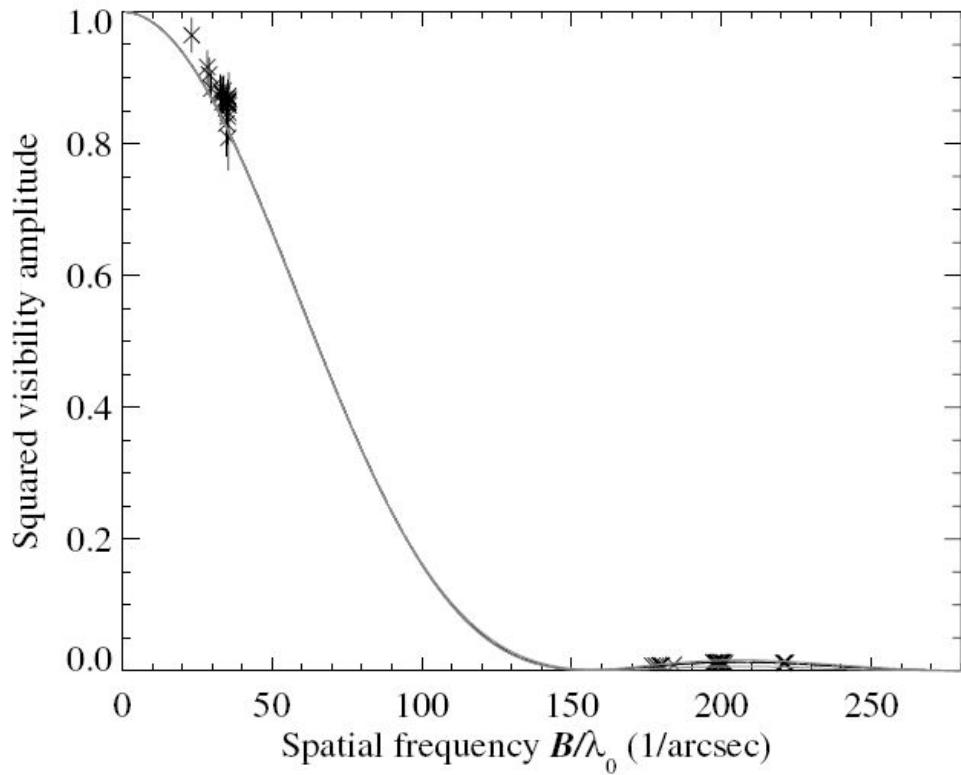
- Clôture de phase
- Référence de phase
- Phase différentielle

Théorème de Zernike-van Cittert

Image : $I(x,y) = O * PSF \xrightarrow{TF} |V(u,v)|, \phi(u,v)$

Fréquence de coupure D/λ

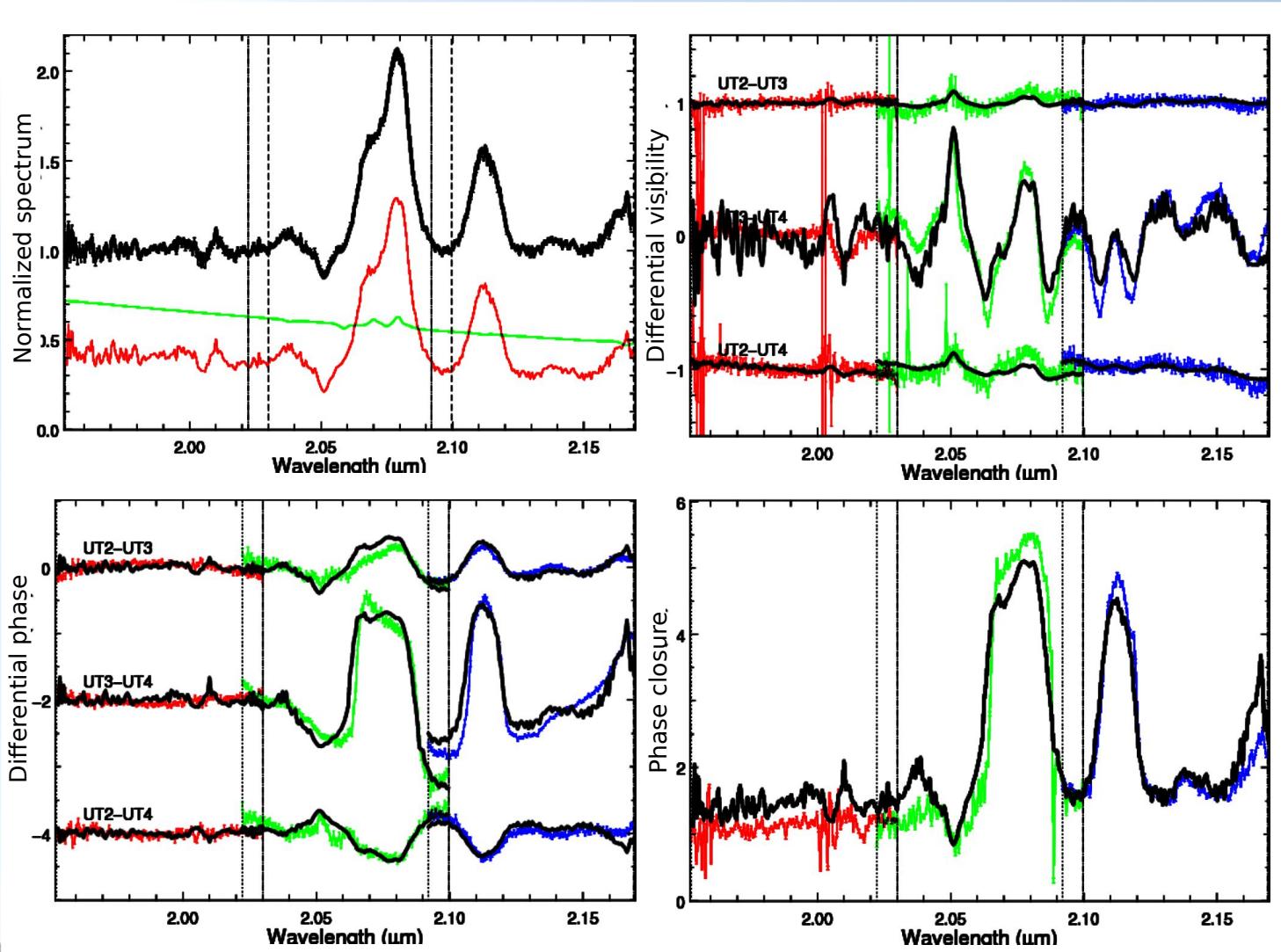
Interferometer measurement (example 1)



Wittkowski et al. 2003

- Comparison of ψ Phe VLTI/VINCI observations with uniform disk model (gray line)
- Second lobe points are the most constraining

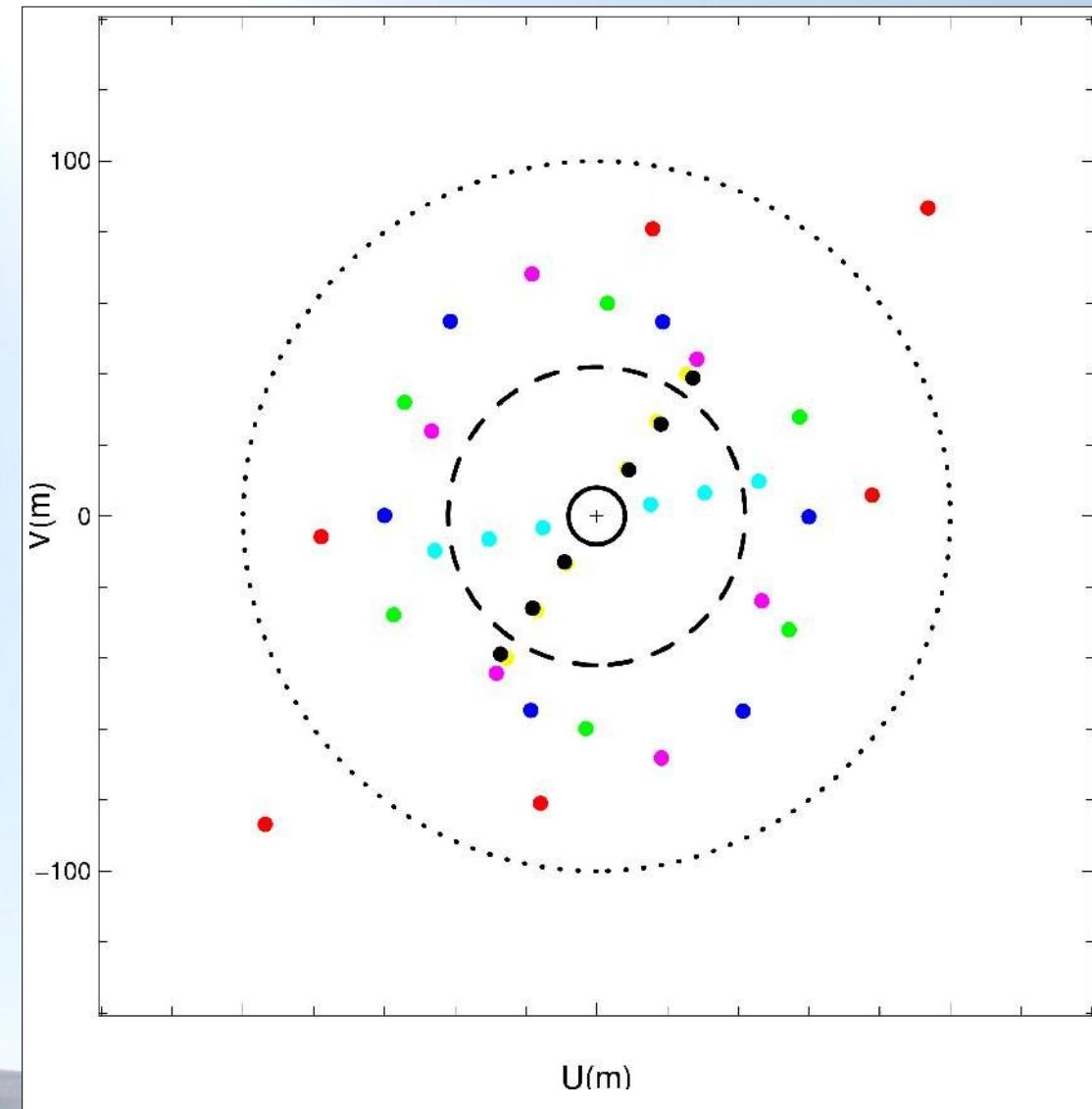
Interferometer measurement (example 2)



Spectrally varying flux ratio makes all observables change

γ^2 Vel, Millour et al. 2007

Des images avec l'interférométrie optique



- Cercle continu = **VLT aujourd'hui** (NACO ~ 1-2 heures)
- Cercle discontinu = **E-ELT** (42m). (?? h, opérationnel dans ?? ans)
- Cercle pointillé = **OWL** (100m). (Pas dans un futur proche)
- Points colorés = **AMBER aujourd'hui** (1.5 nuits)

Caractéristiques importantes:

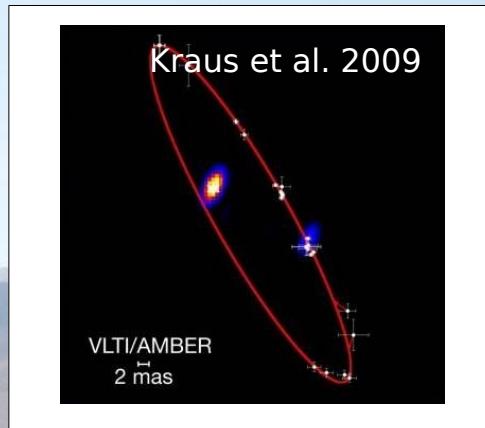
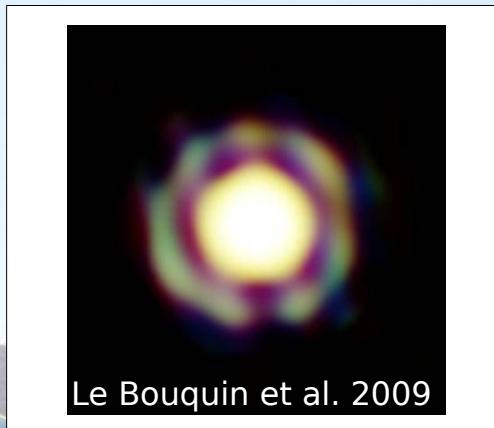
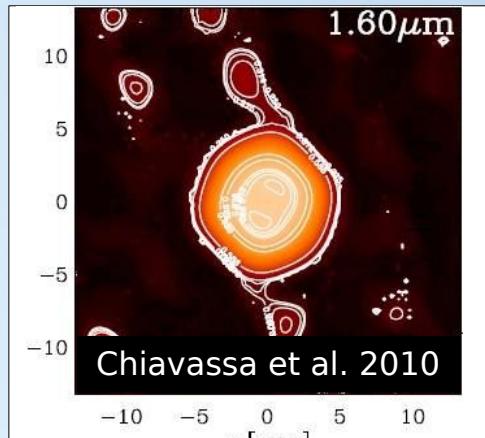
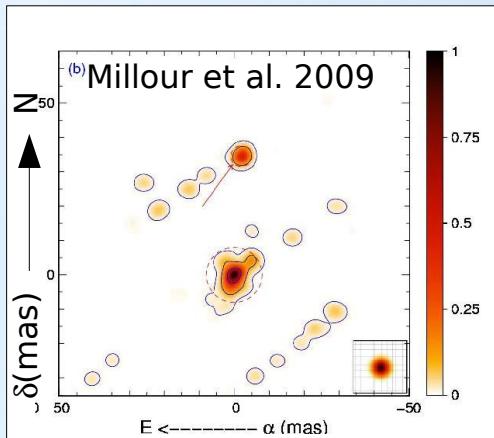
- Faible efficacité
- Faible magnitude limite
- Interférométrie à « phase déficiente »

Des images avec l'interférométrie optique

- **Visibilité quadratique (V^2)**

- Si $N_{tel} > 3$

Phase de clôture



- Si spectrographe
Spectre, Phase différentielle, Visibilité différentielle

- Si $N_{tel} > 3$ et spectrographe
Phase de clôture des phases différentielles

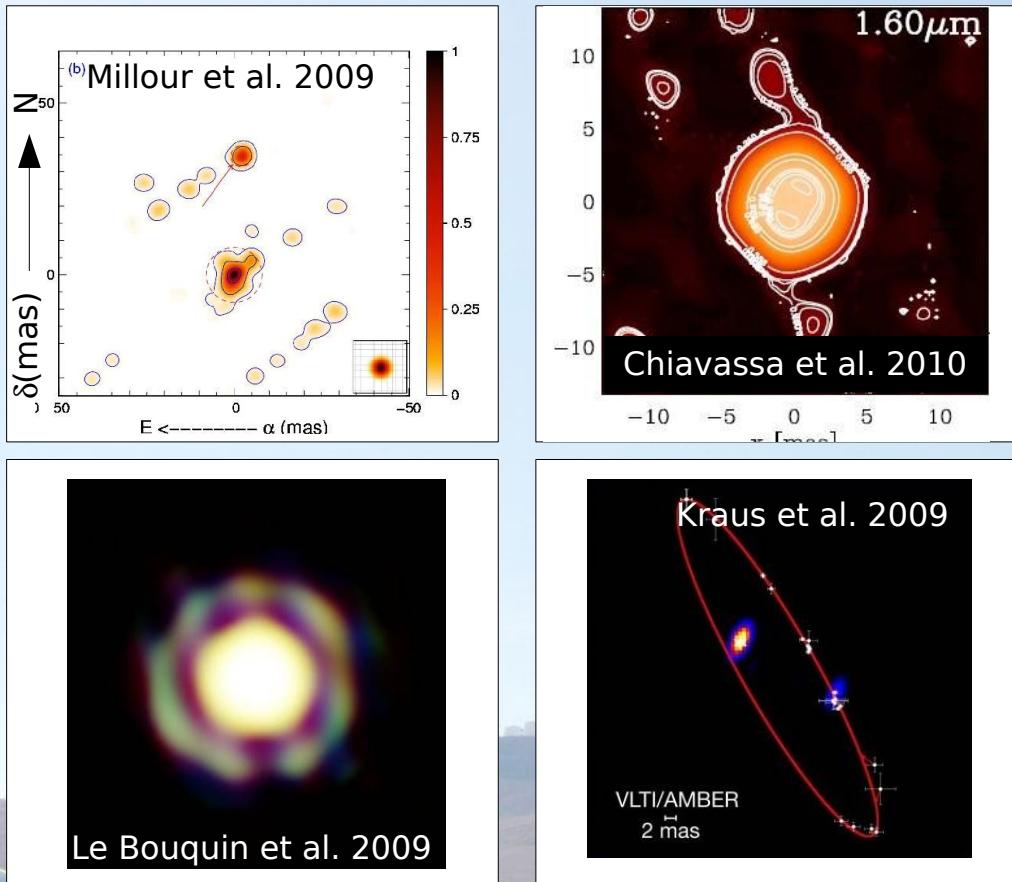
- Si $N_{tel} > 4$
Clôture d'amplitude

- Si plan UV bien rempli
Synthèse d'images

- Si beaucoup de télescopes, double champ
Images directes

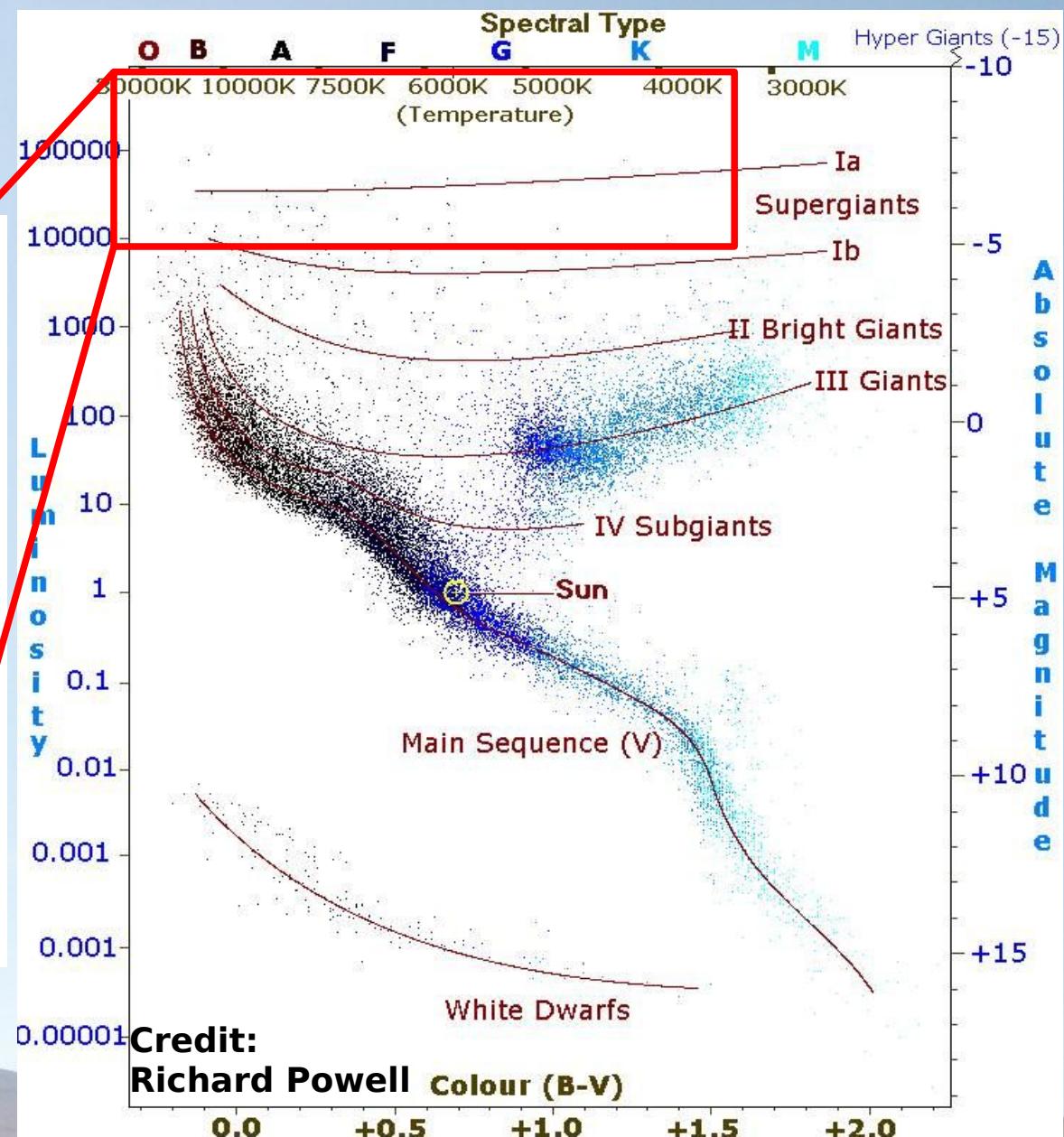
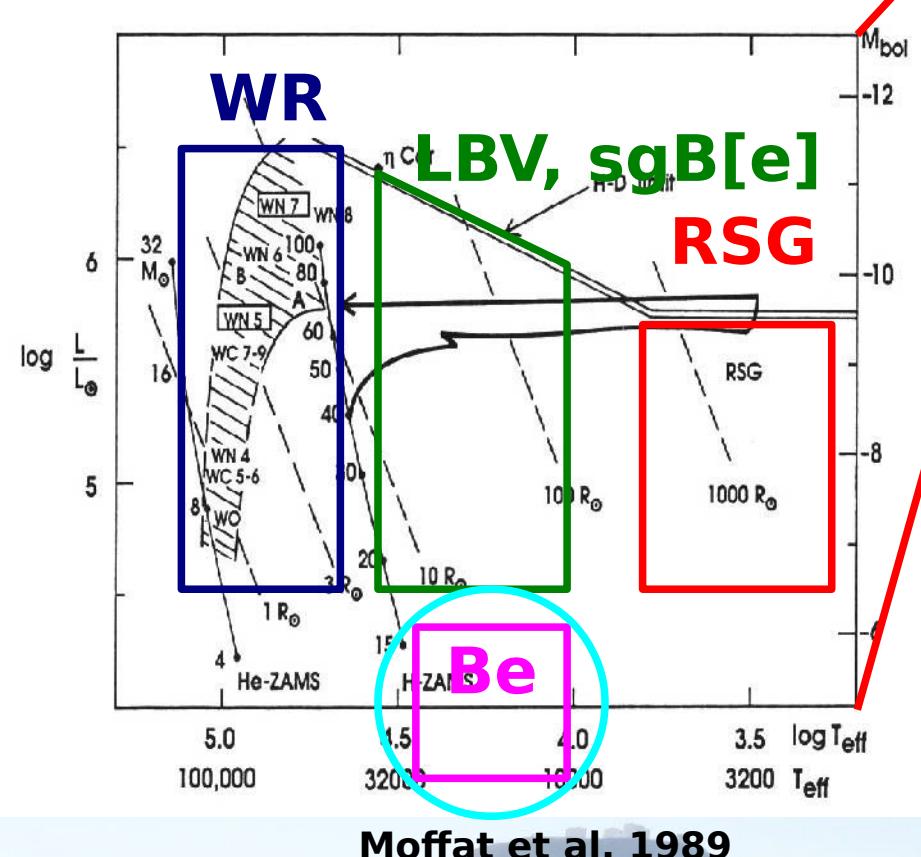
Des images avec l'interférométrie optique

- **Visibilité quadratique (V^2)**
- **$\text{Si } N_{\text{tel}} > 3$**
Phase de clôture



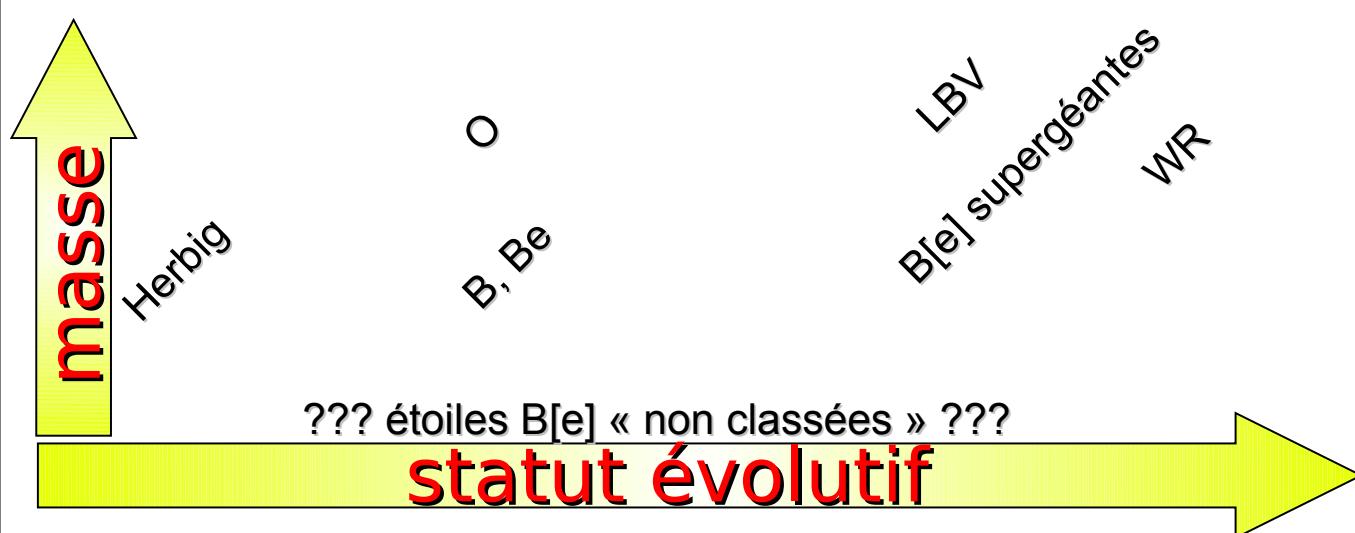
- **$\text{Si spectrographe Spectre, Phase différentielle, Visibilité différentielle}$**
- **$\text{Si } N_{\text{tel}} > 3$ et spectrographe**
Phase de clôture des phases différentielles
- **$\text{Si } N_{\text{tel}} > 4$**
Clôture d'amplitude
- **$\text{Si plan UV bien rempli}$**
Synthèse d'images
- **$\text{Si beaucoup de télescopes, double champ}$**
Images directes

Les étoiles massives



Pourquoi s'intéresser aux étoiles massives ?

- « Classification » par spectroscopie, nombreux stades évolutifs,
- Source d'ionisation du milieu interstellaire proche,
- Source d'énergie cinétique : formation stellaire induite,
- Progéniteurs de certaines supernovae,
- mécanismes de perte de masse,
- Influence sur les étoiles primordiales ?
- Formation de la poussière en milieu hostile ?



SN1987A et son progéniteur LBV

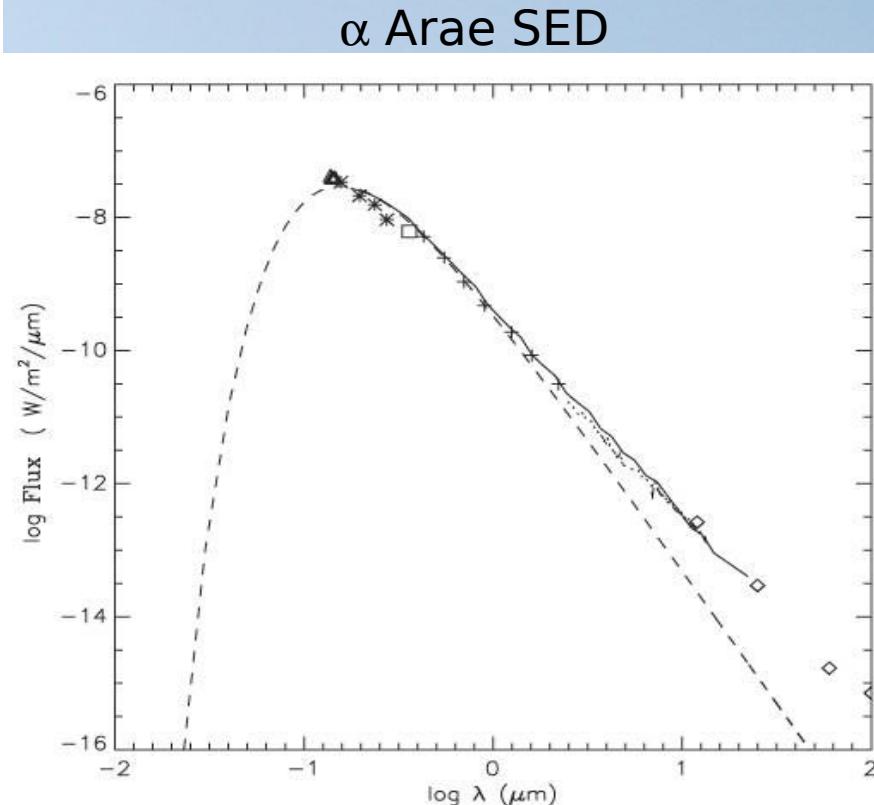
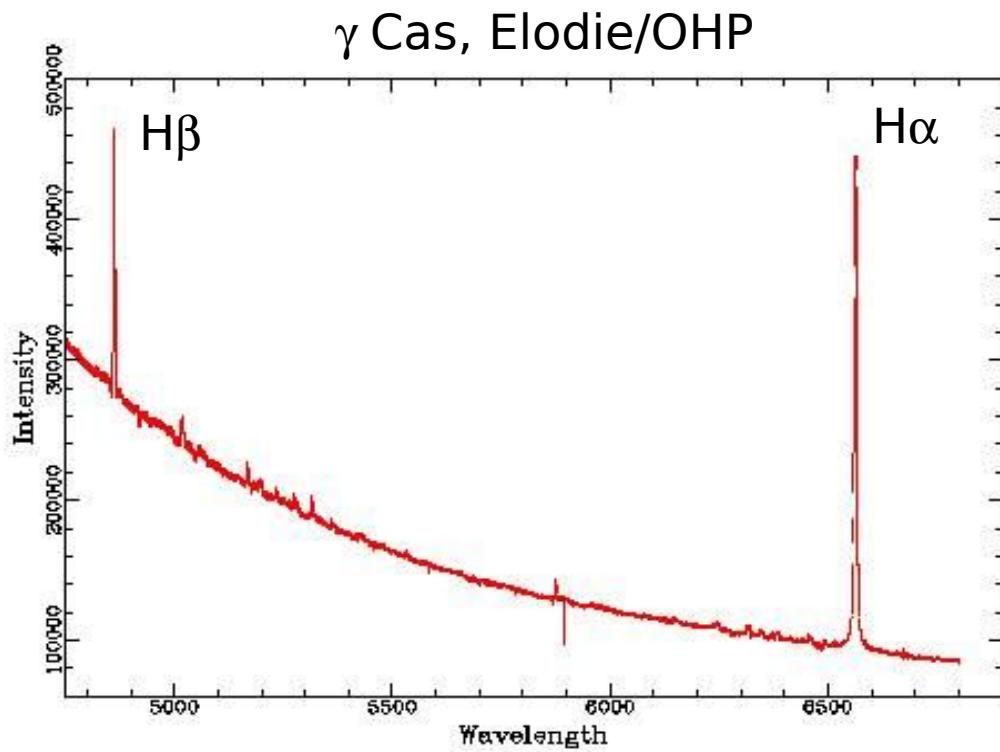


Interactions in massive stars binaries

- Relation with mass ejection ?
 - Be stars ?
 - B[e] stars ?
 - LBVs ?
- Relation with spectral type ?
 - Dusty WRs ?
- Eccentric vs rounded orbits ?
- Eruptive vs Periodic vs Permanent mass ejections ?

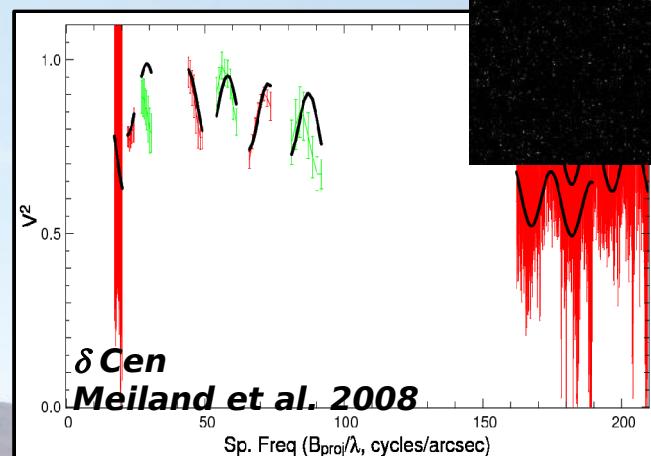
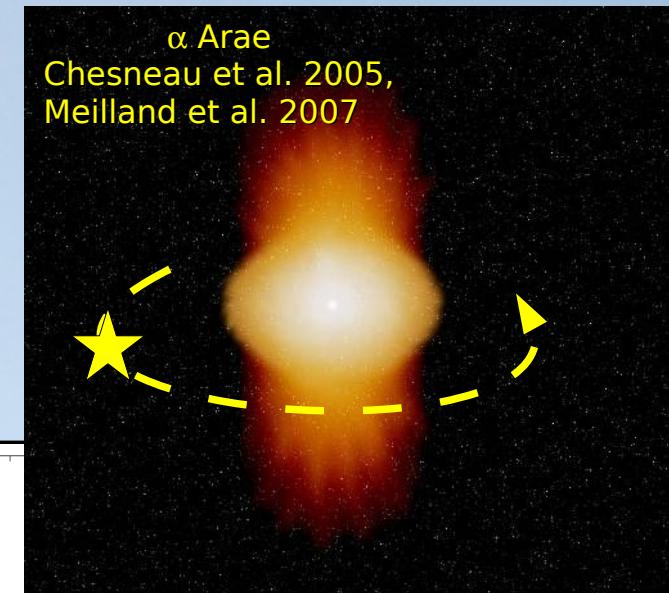
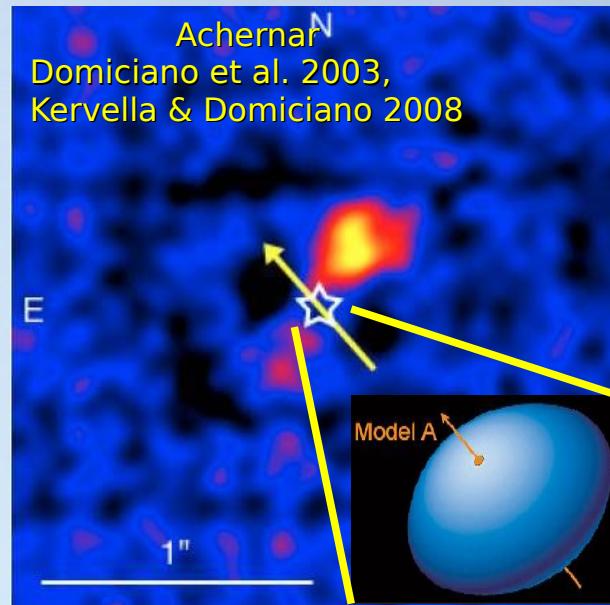
Étoiles Be ?

- Étoiles de type spectral B, raies d'hydrogène et raies métalliques en émission
- Excès infrarouge (gaz)
- Étoiles en rotation rapide, disque de « décretion »



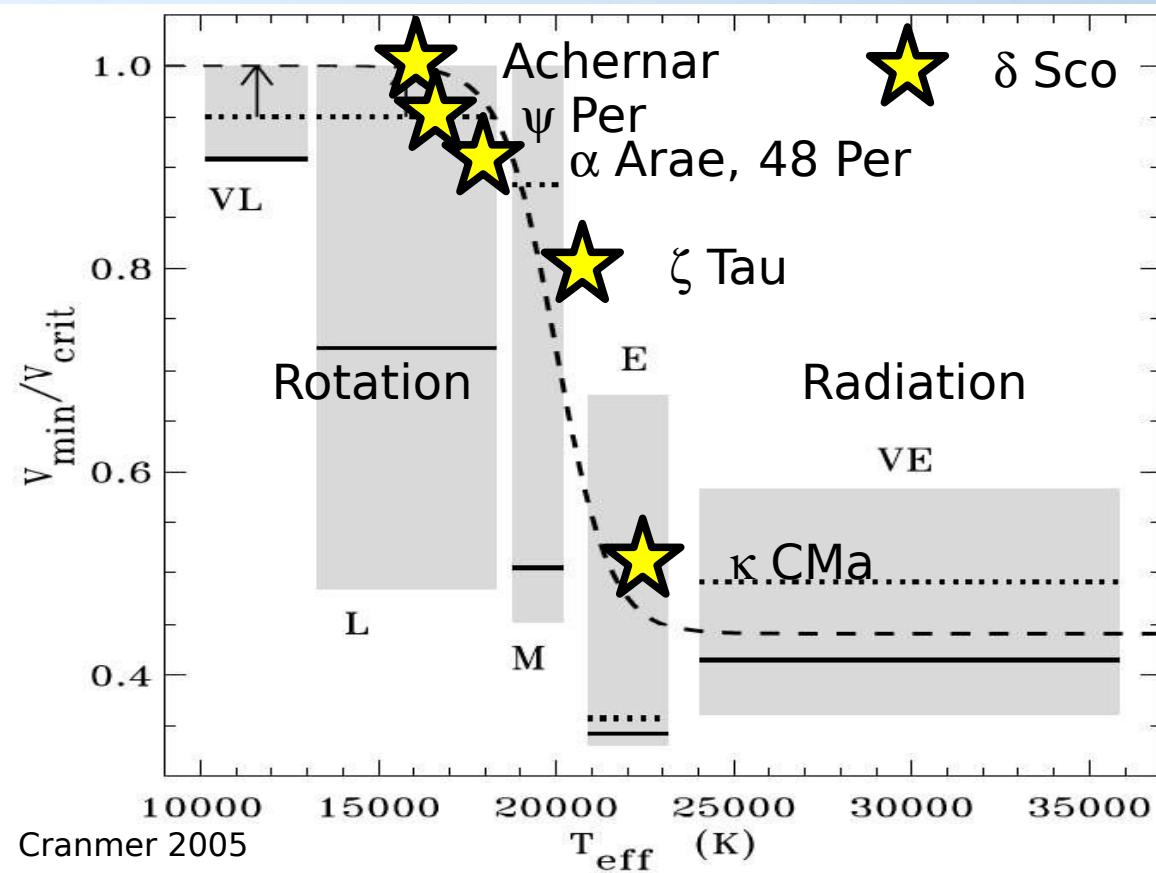
Be observées par spectro-interférométrie

- V_{crit}
 - α Arae, δ Sco, Achernar
- V_{erit}
 - κ Cma, ζ Tau
- Et aussi :
 - δ Cen, Ω Car, β Cmi
 - Compagnons ?



Is the « Be phenomenon » triggered by binaries ?

- All Be stars are high-speed rotators
 - Not all at critical rotation
 - Radiation pressure, often a companion star



- Meilland et al. Submitted
- Delaa et al. 2011
- Carciofi et al. 2009
- Kanaan et al. 2008
- Meilland et al. 2007a, b

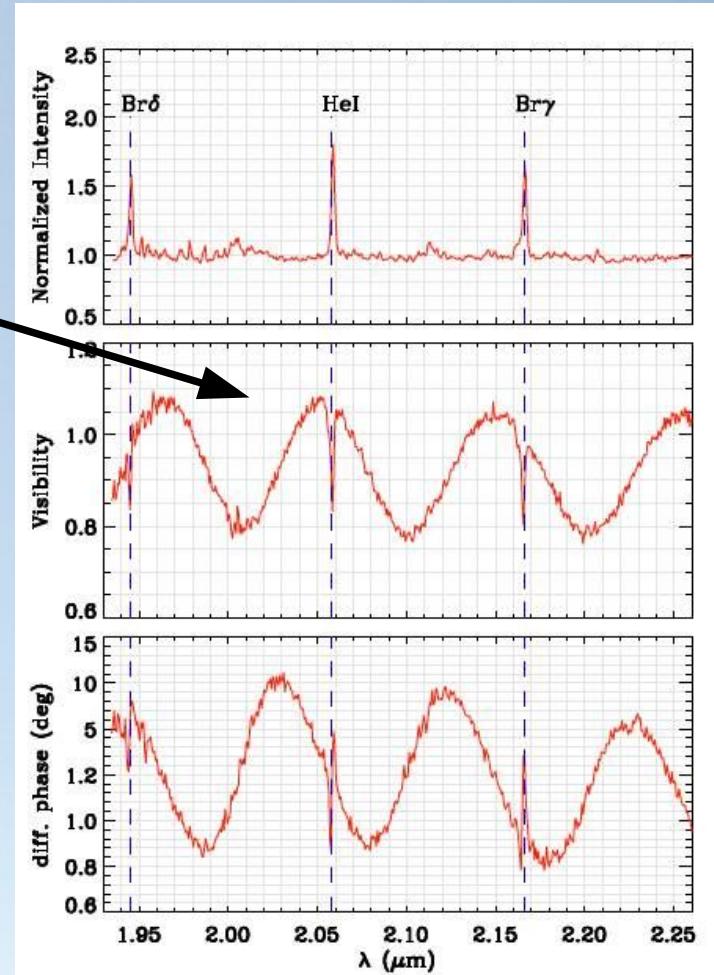
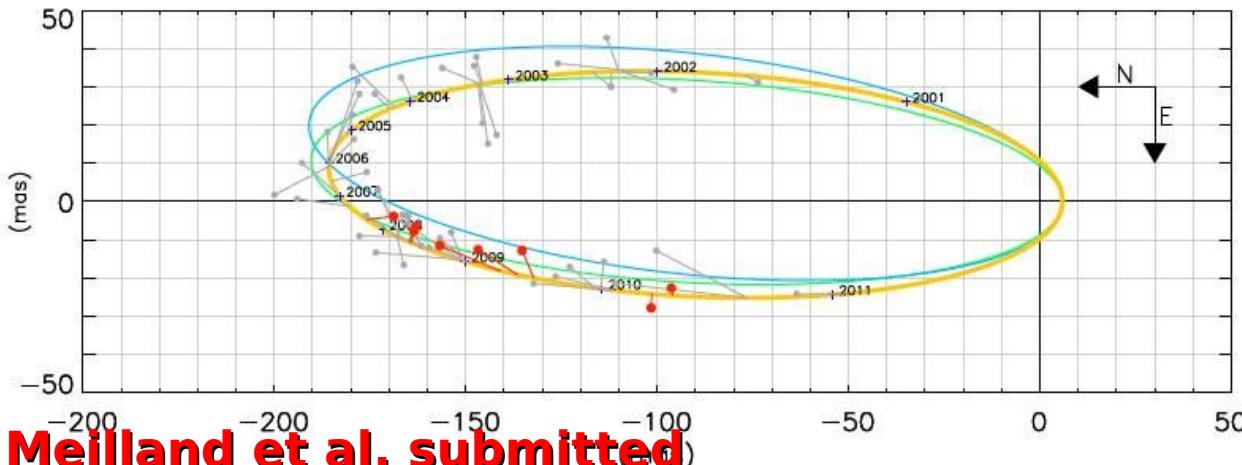


δ Sco

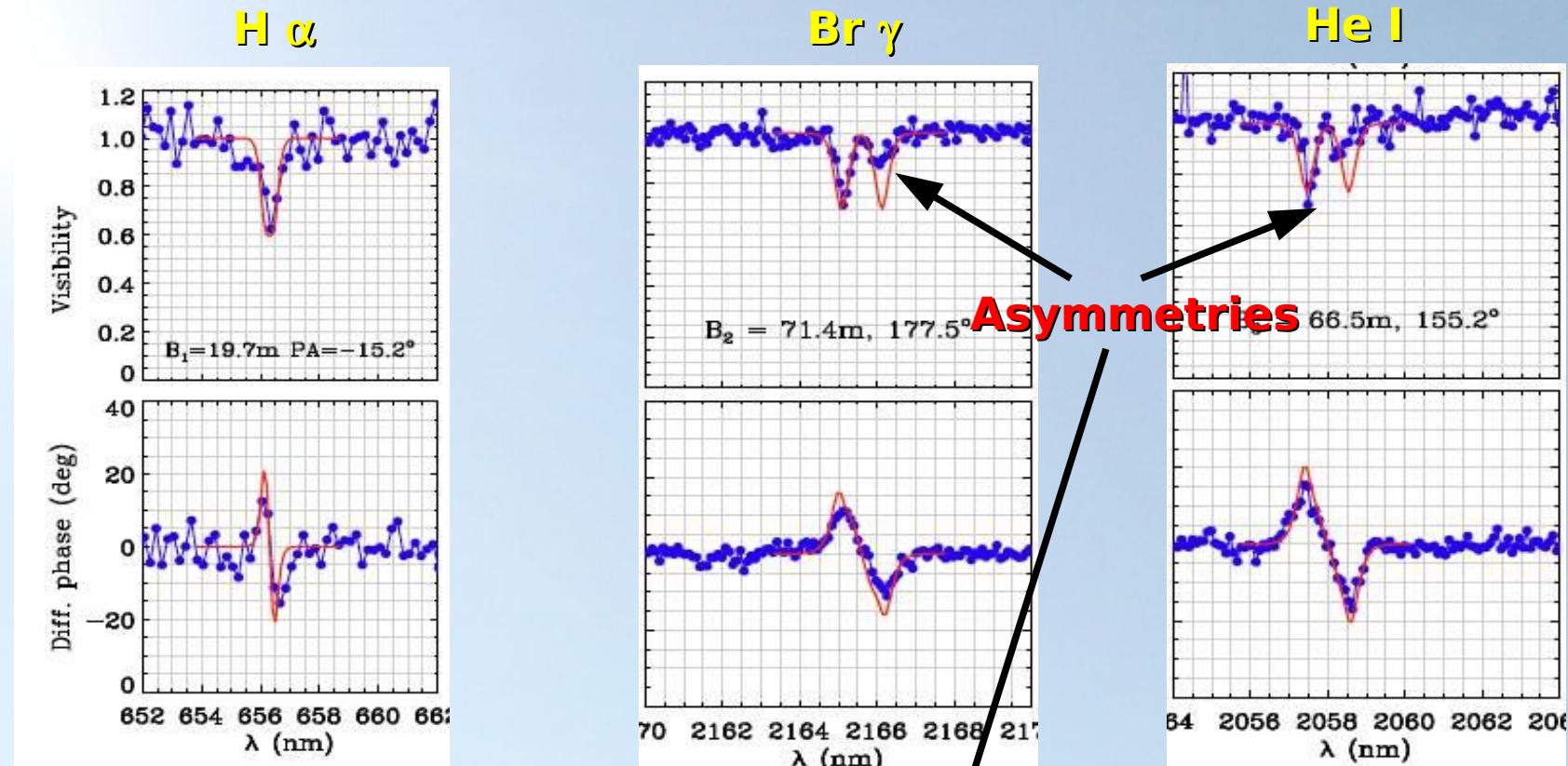
- Eccentric B-type binary until 2000
- Be ignition at periastron passage

AMBER resolves both the binary and the line emission!

New orbit solution: Change the period,
all other parameters remain the same
Periastron passage July 2011



δ Sco disk



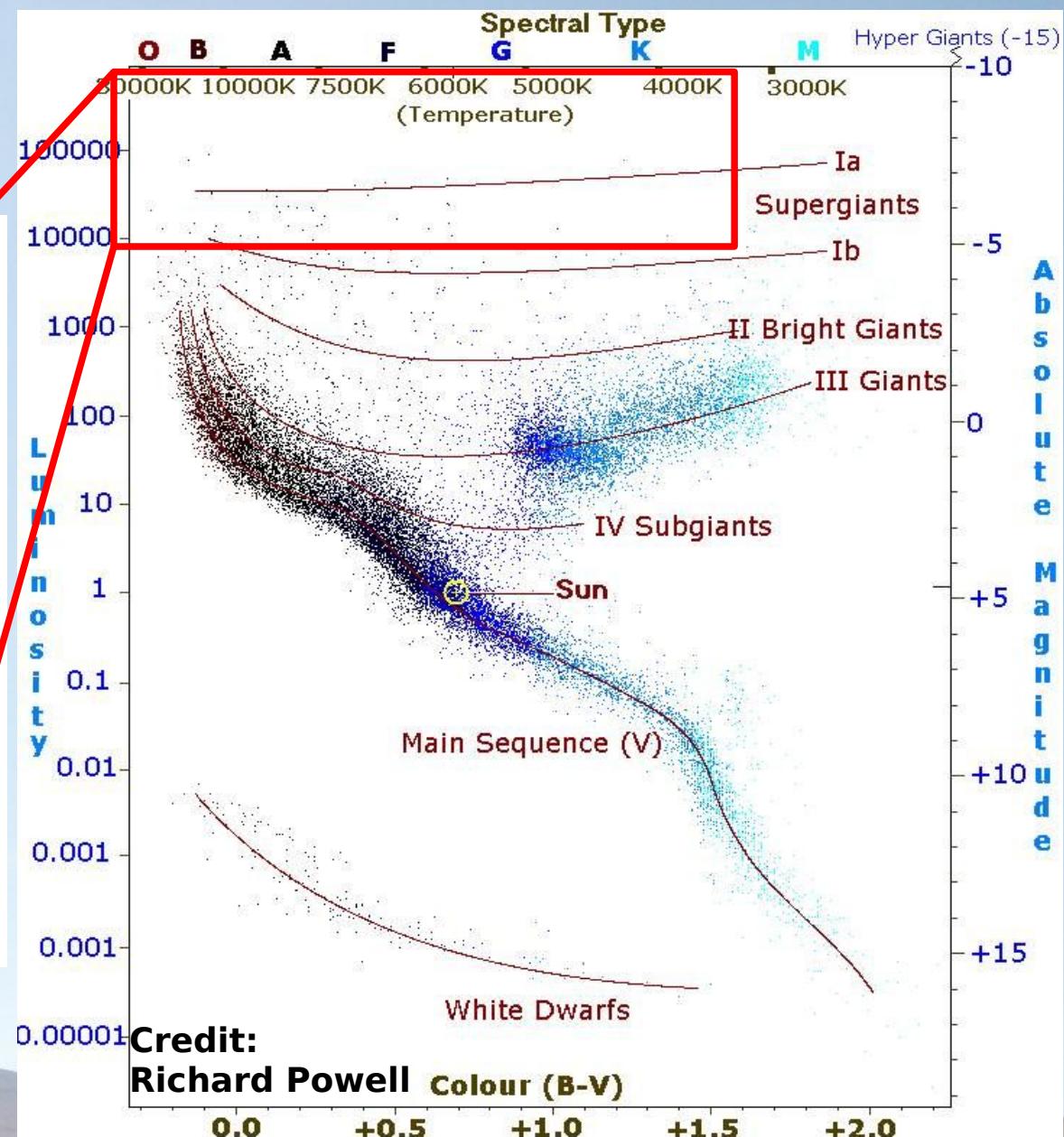
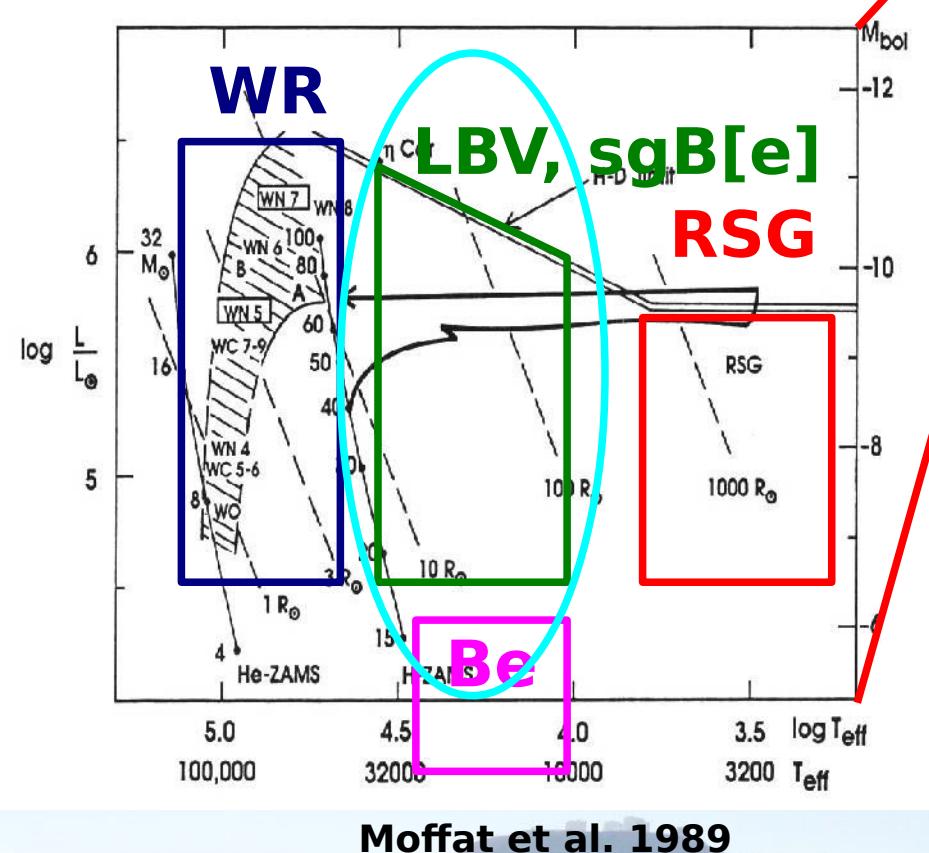
- Keplerian rotation
- Size $\text{H } \alpha > \text{Br } \gamma > \text{He I}$
- Tidal effects?
Induced disk oscillations?



Tidally-warped disk ?

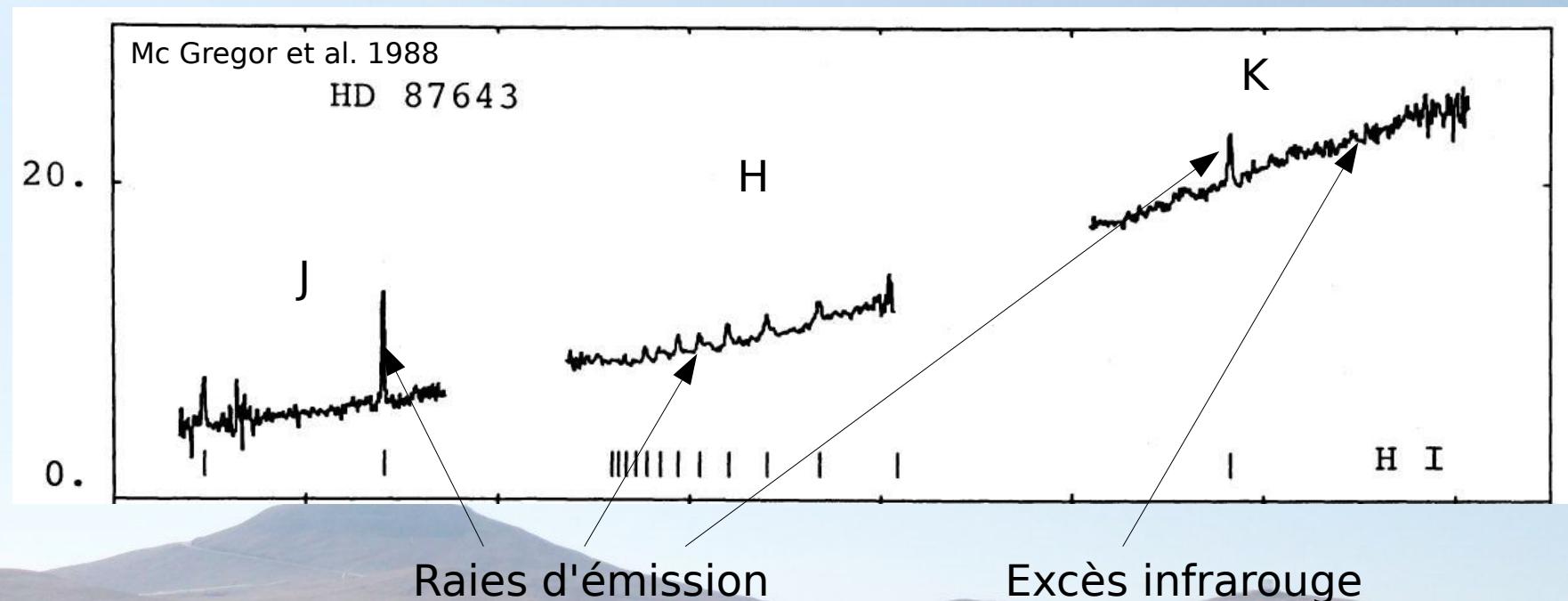
Meilland et al. submitted

Les étoiles massives

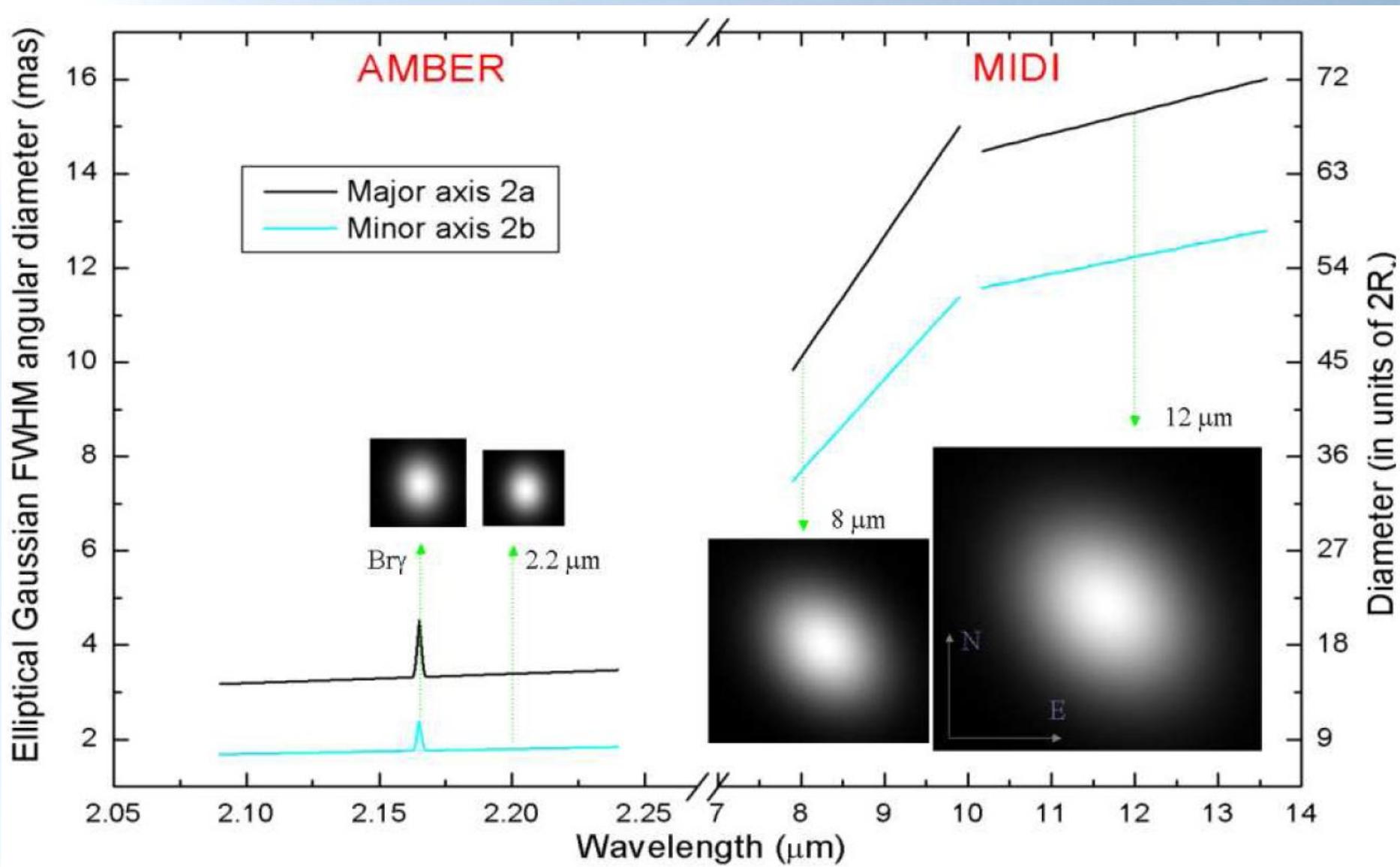


Étoiles B[e] ?

- Étoiles de type spectral B, raies d'hydrogène en émission
- Raies interdites de Fe, O
- Excès infrarouge (poussière)



CPD-52 2874

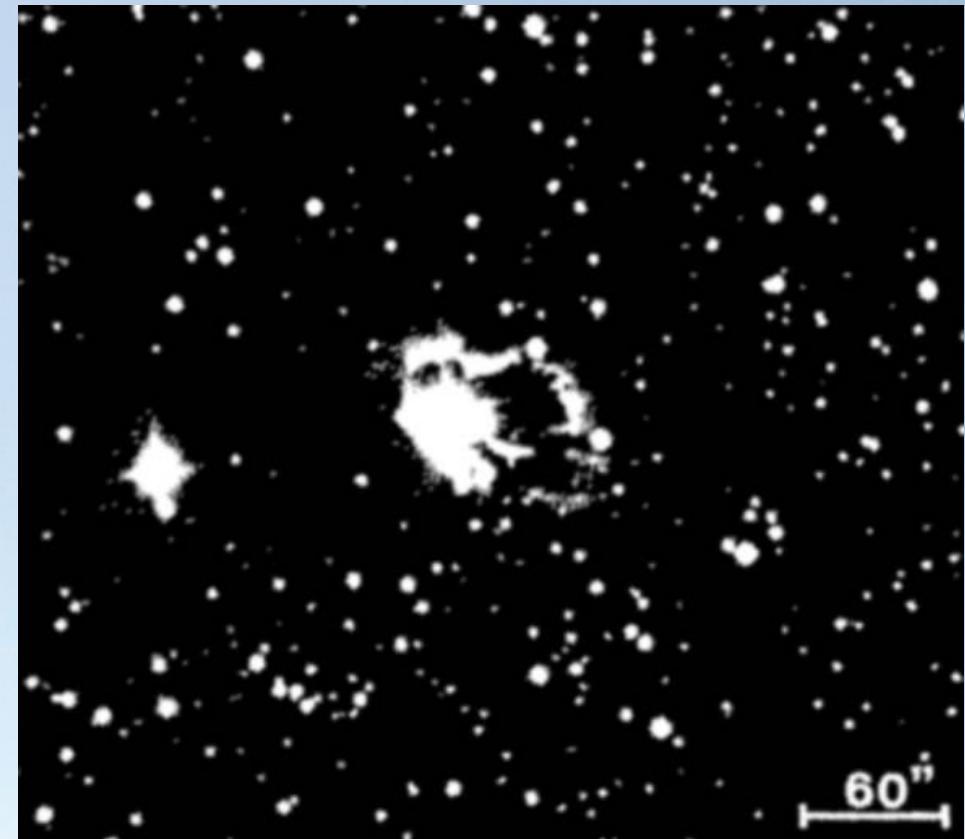


Dominiciano da Souza et al A&A 2007

HD87643

- Étoile B[e] non classée (Herbig ? Supergéante ?)
- Distance très mal connue
- Nébuleuse en réflexion
- Variabilité type Algol
- Variabilité séculaire

**Observations avec:
AMBER, NACO, MIDI,
FEROS, et WFI (!)**



Surdej et al., A&A, 1981

HD87643

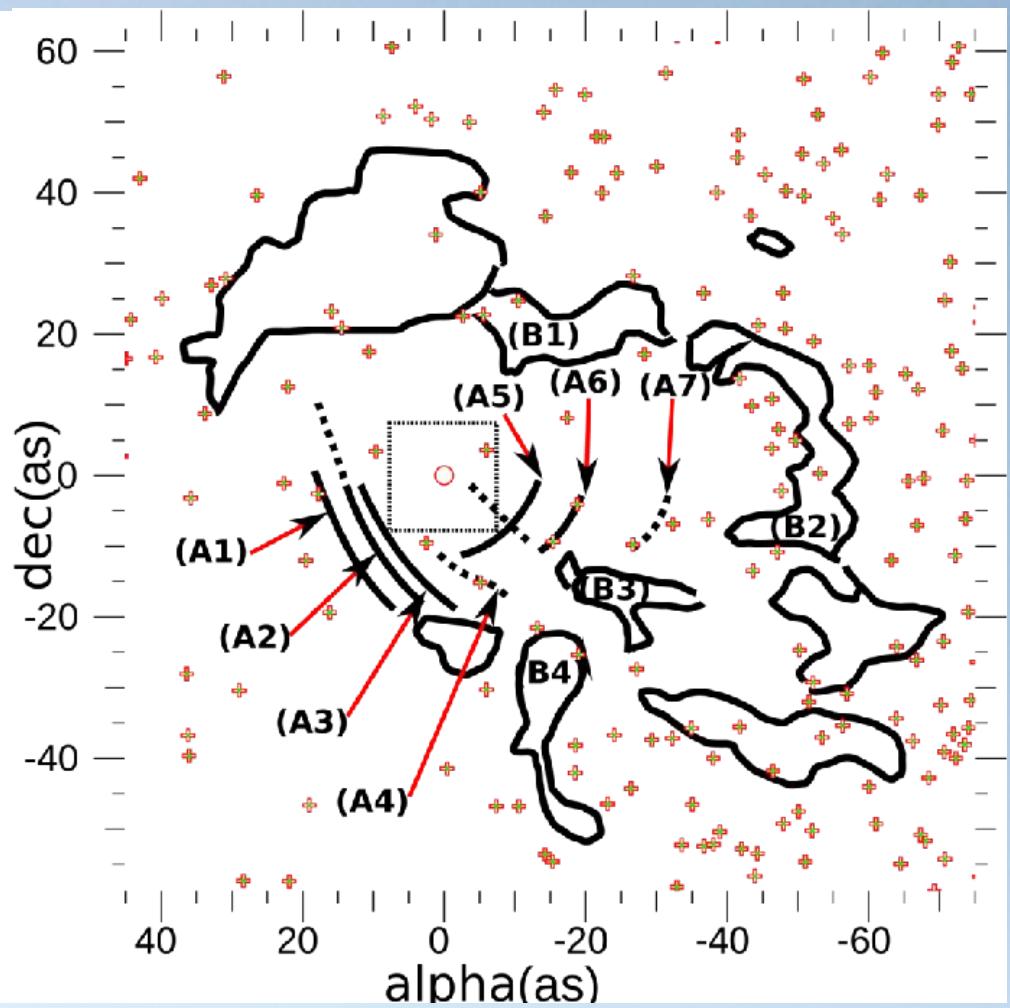
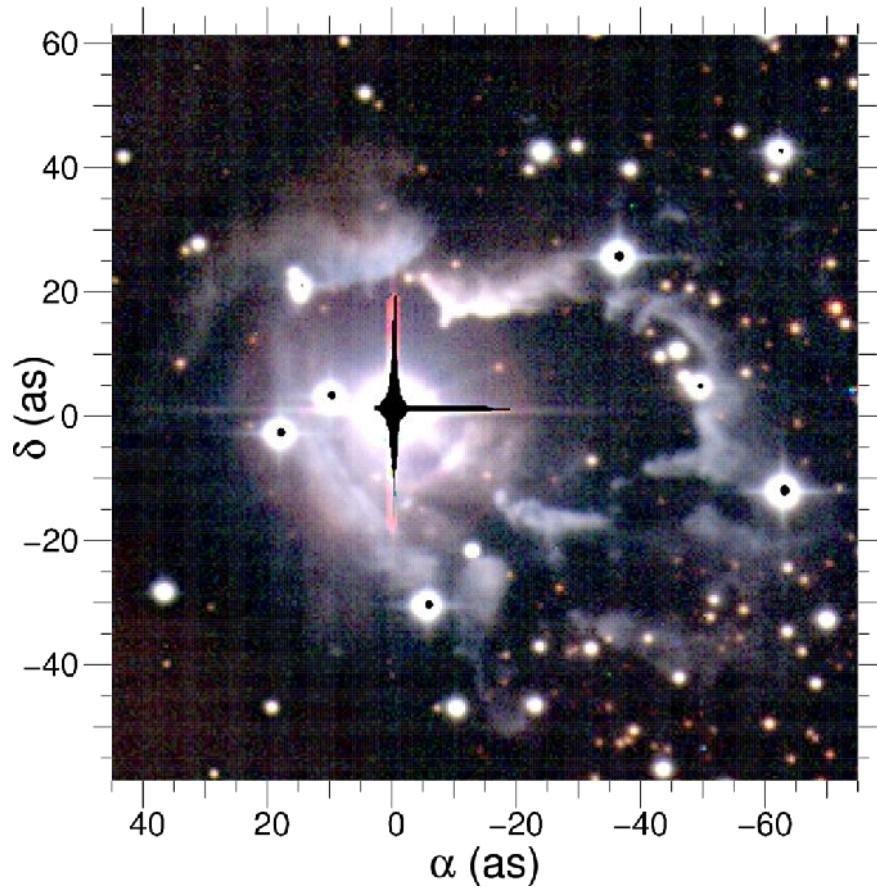
- Étoile B[e] non classée (Herbig ? Supergéante ?)
- Distance très mal connue
- Nébuleuse en réflexion
- Variabilité type Algol
- Variabilité séculaire

**Observations avec:
AMBER, NACO, MIDI,
FEROS, et WFI (!)**



WFI data

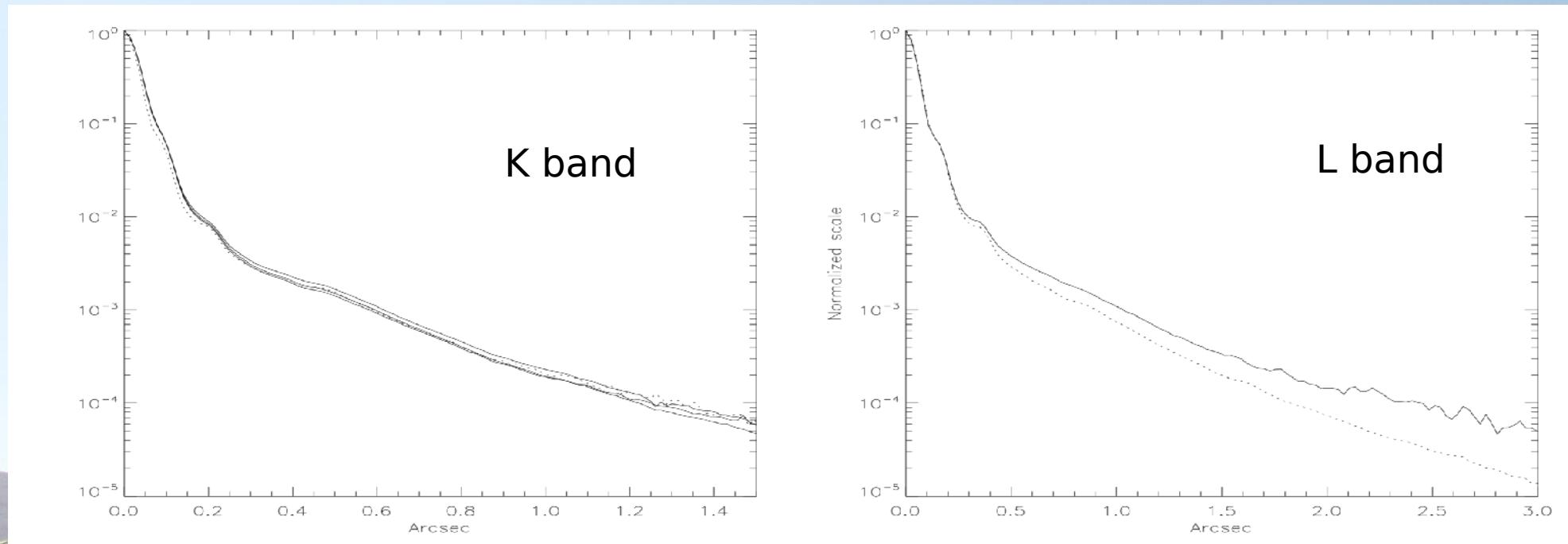
Image WFI



- Nébuleuse récente (~ 200 ans)
- Arcs périodiques témoins d'éjections passées (periodicité 7-20 ans)

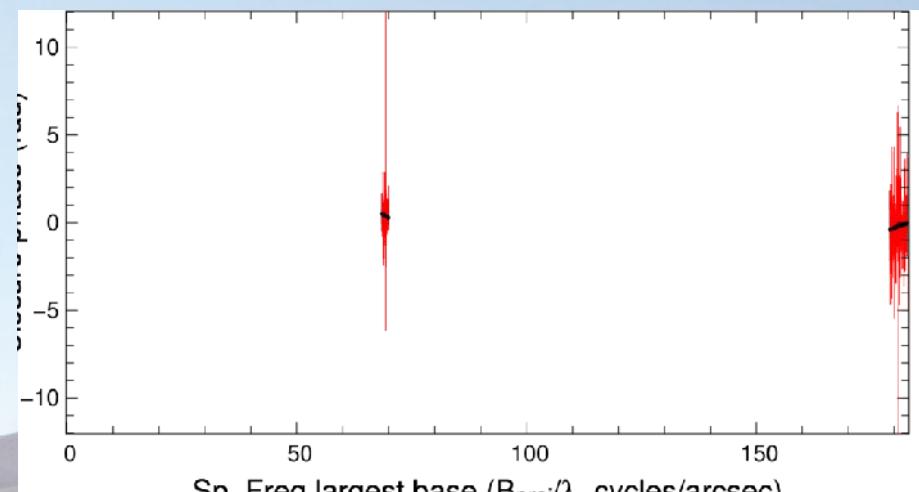
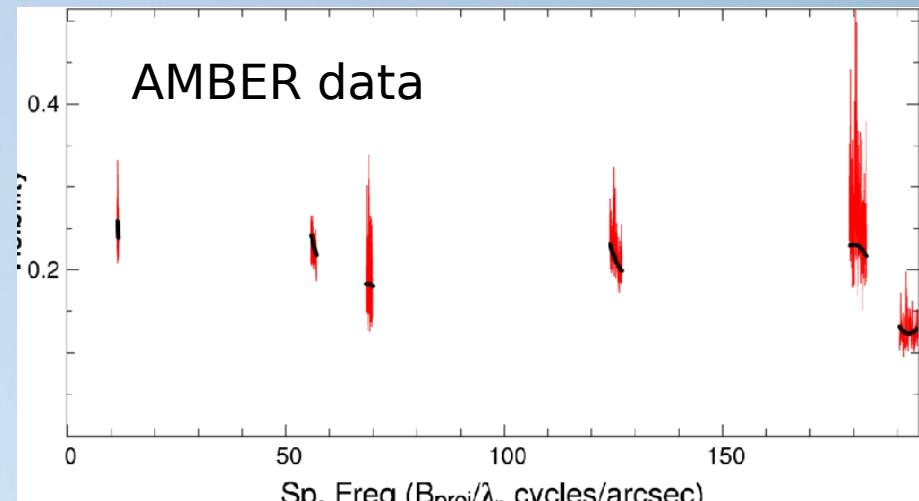
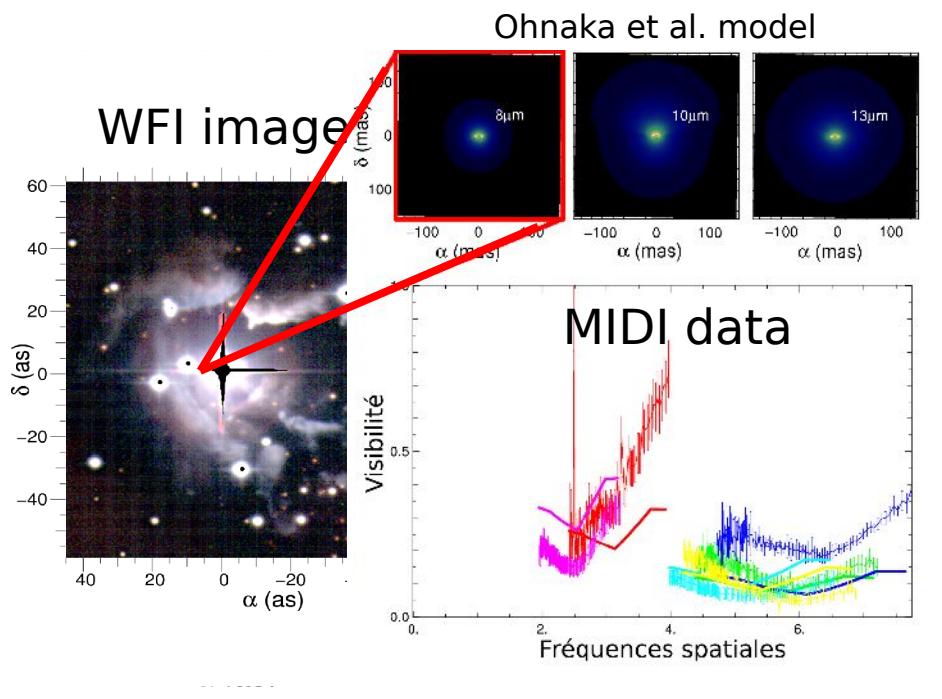
Images NACO

- L'objet est globalement non-résolu
- Bande K, PSF légèrement allongée N-S en bande K
- Faible flux étendu en bande L
=> Nébulosités de poussières compactes



MIDI/AMBER 2006

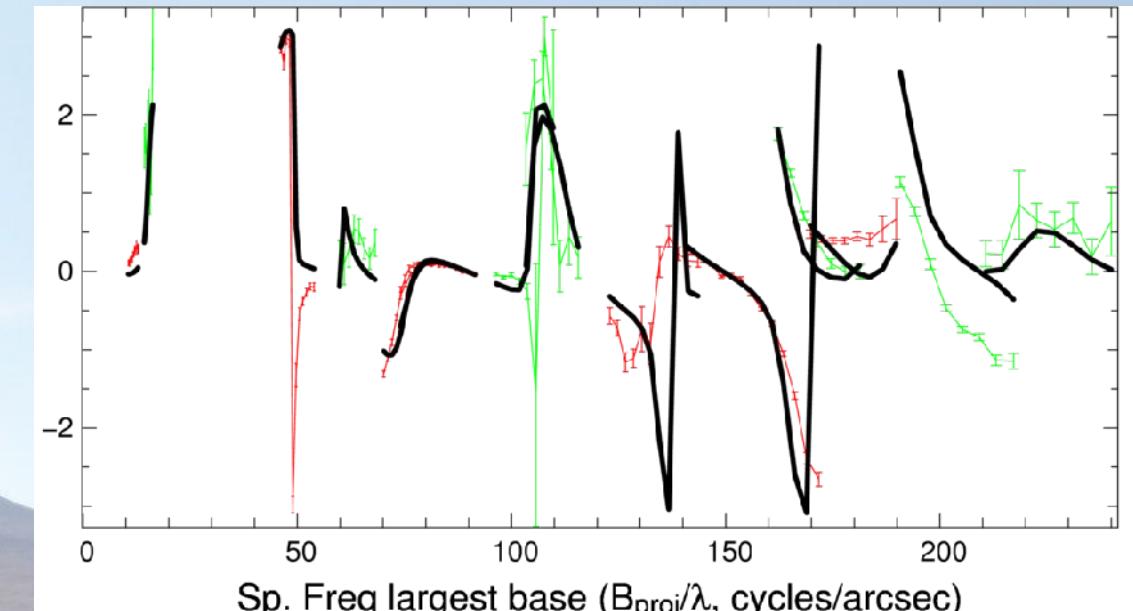
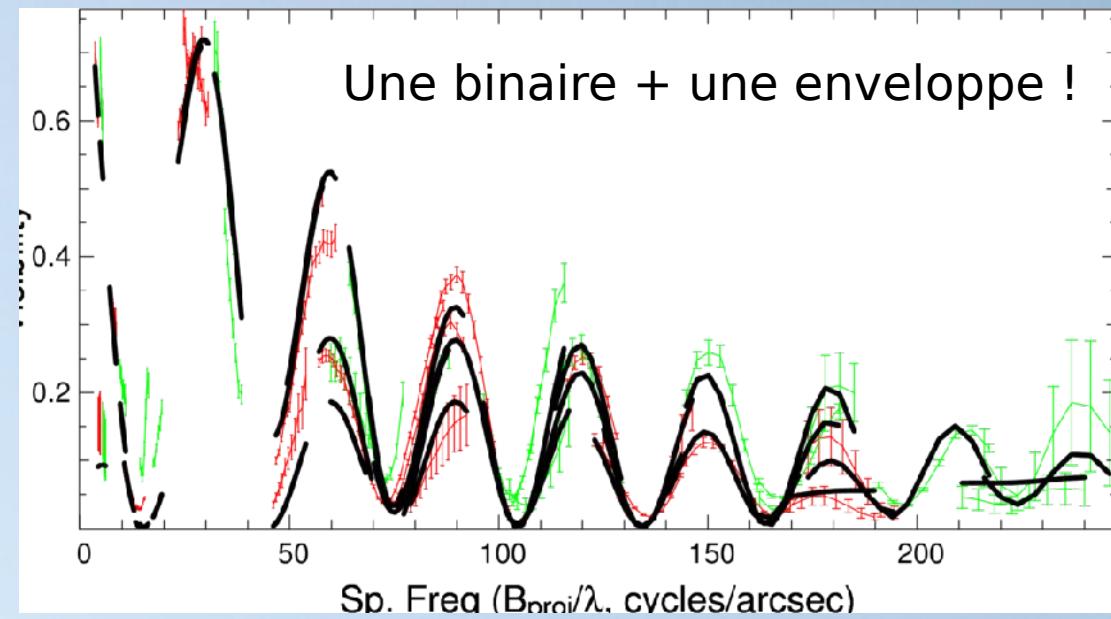
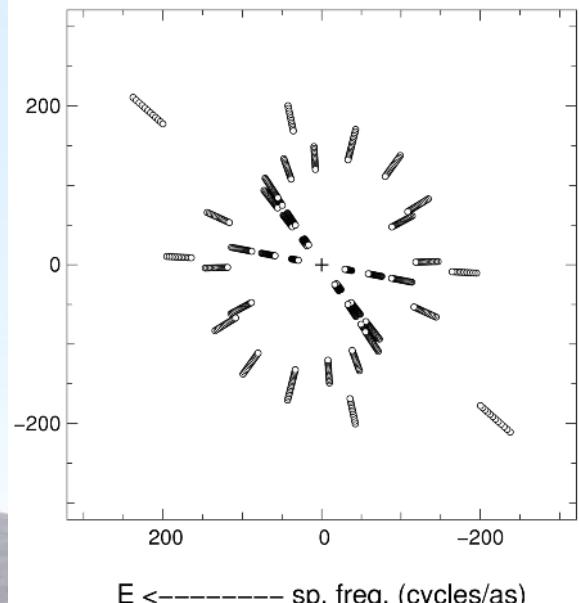
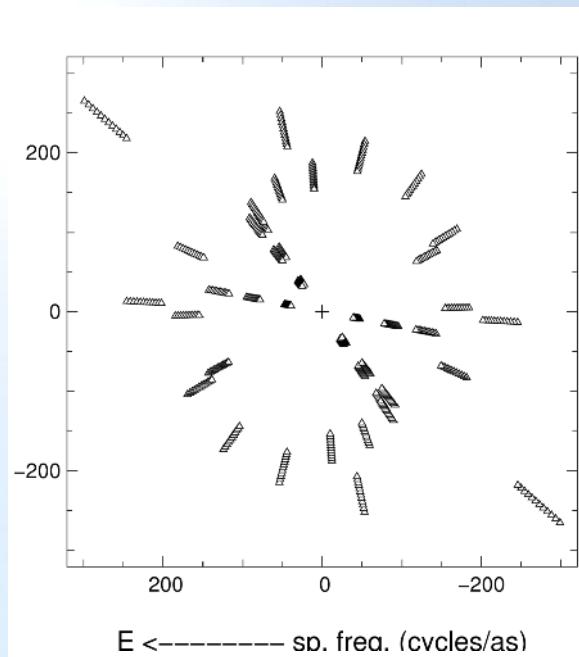
- Impossible d'expliquer les données MIDI par des modèles de transfert radiatif 2D axi-symétriques



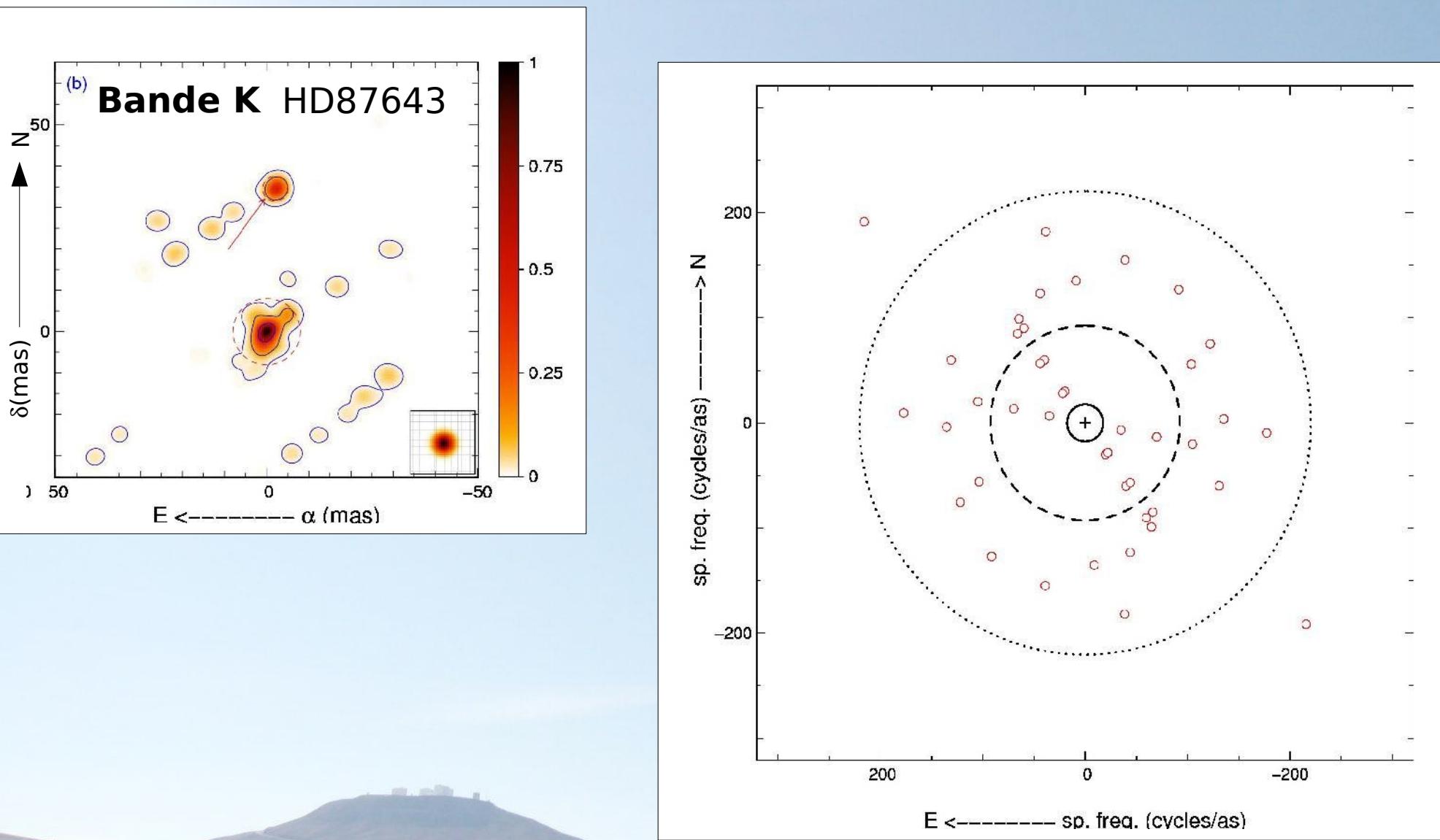
Données AMBER difficiles voire impossibles à comprendre avec les données MIDI



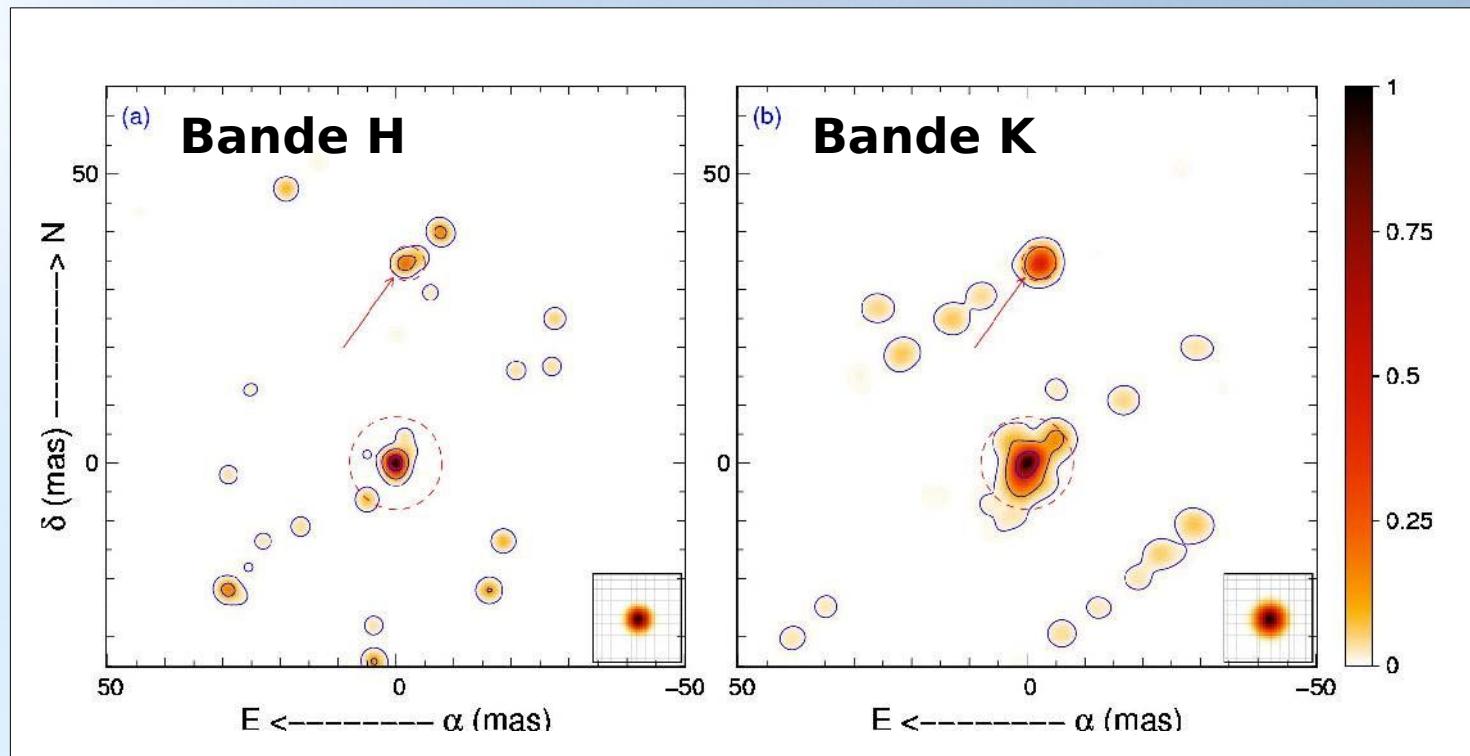
AMBER 2008



Synthèse d'ouverture



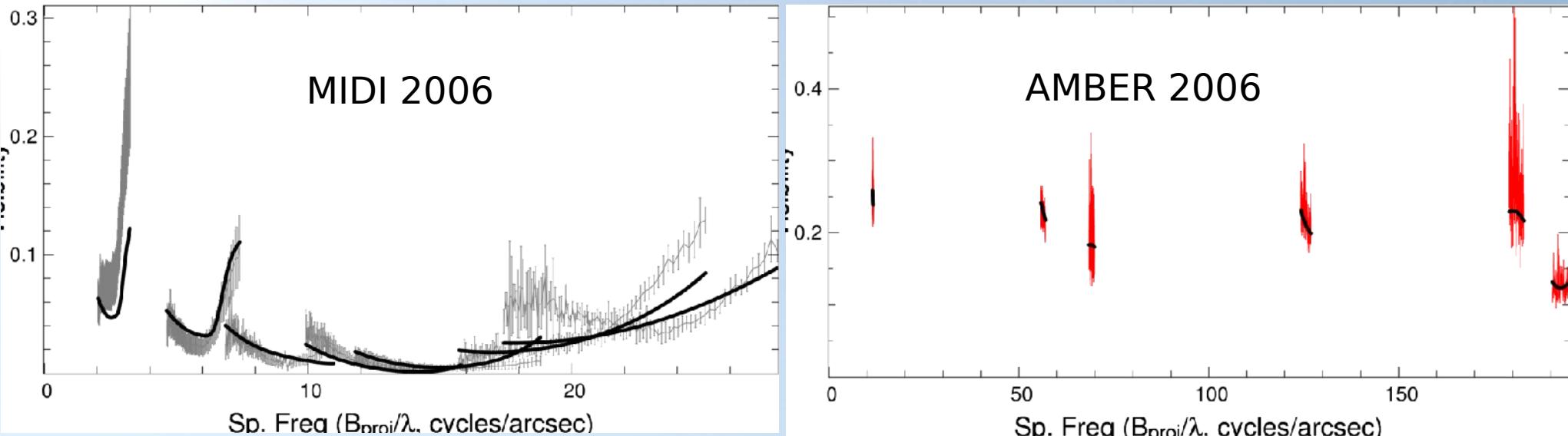
Synthèse d'ouverture



3 composantes:

- Étoile résolues au Sud
- Étoile non-résolue au Nord
- Flux sur toute la surface de l'image
(artefacts de reconstruction)

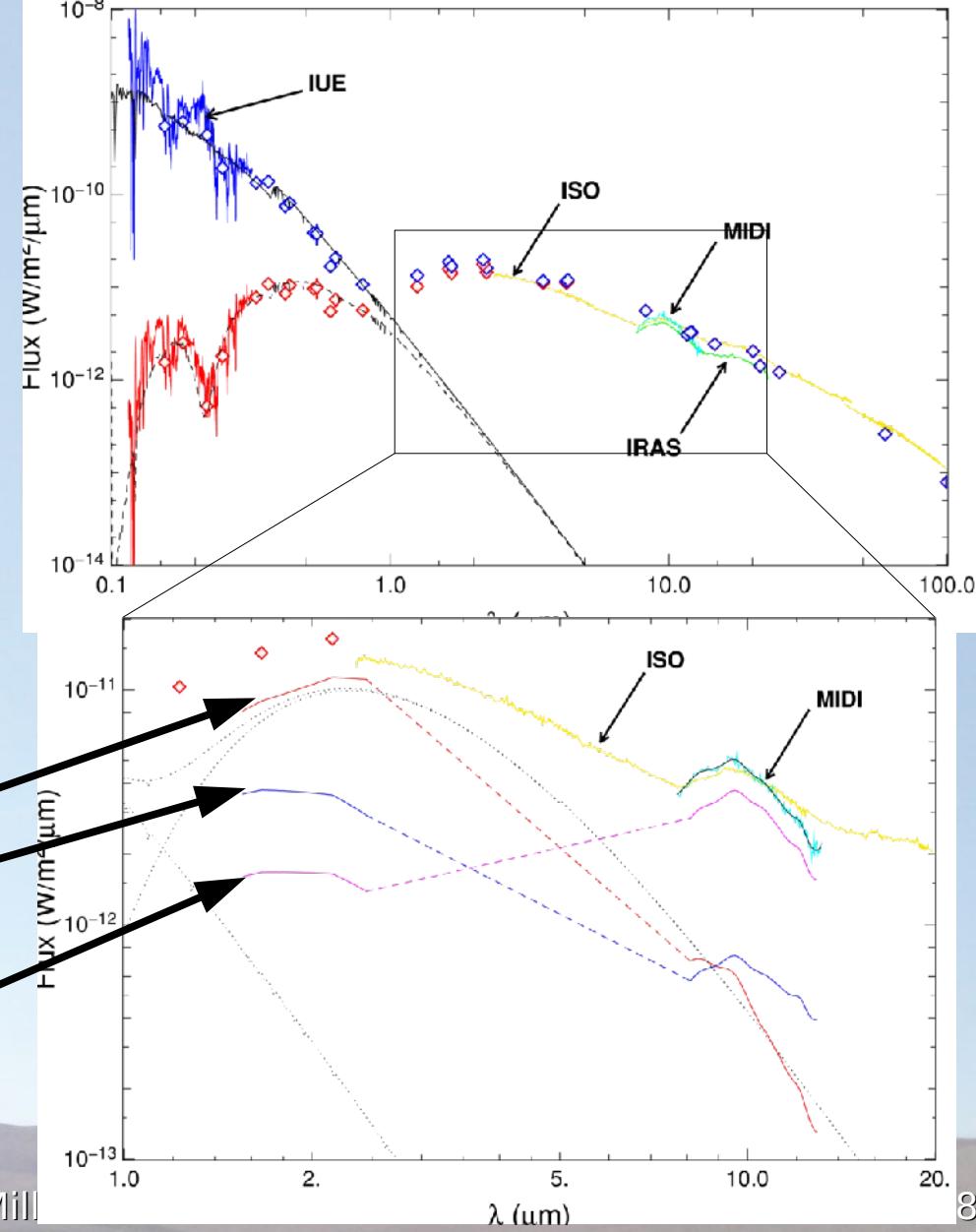
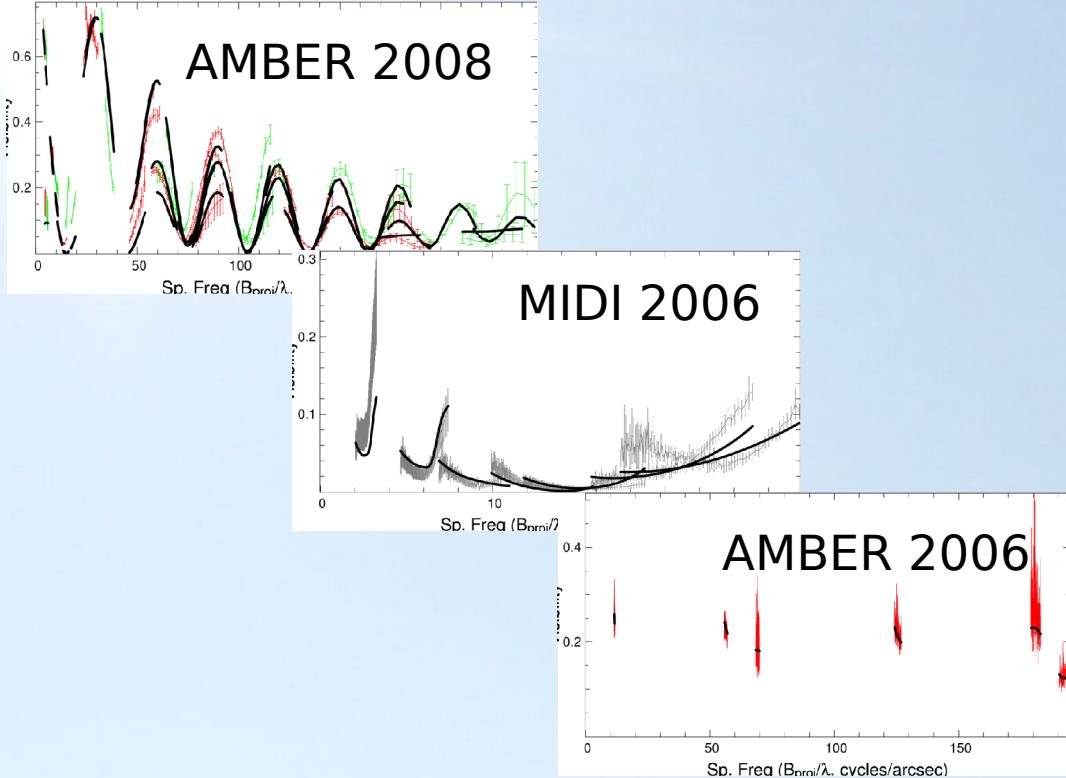
Et les données de 2006 ?



- Compatibles avec une binaire + un fond continu
- Opportunité de mesurer directement les flux des différentes composantes, bandes H-K-N



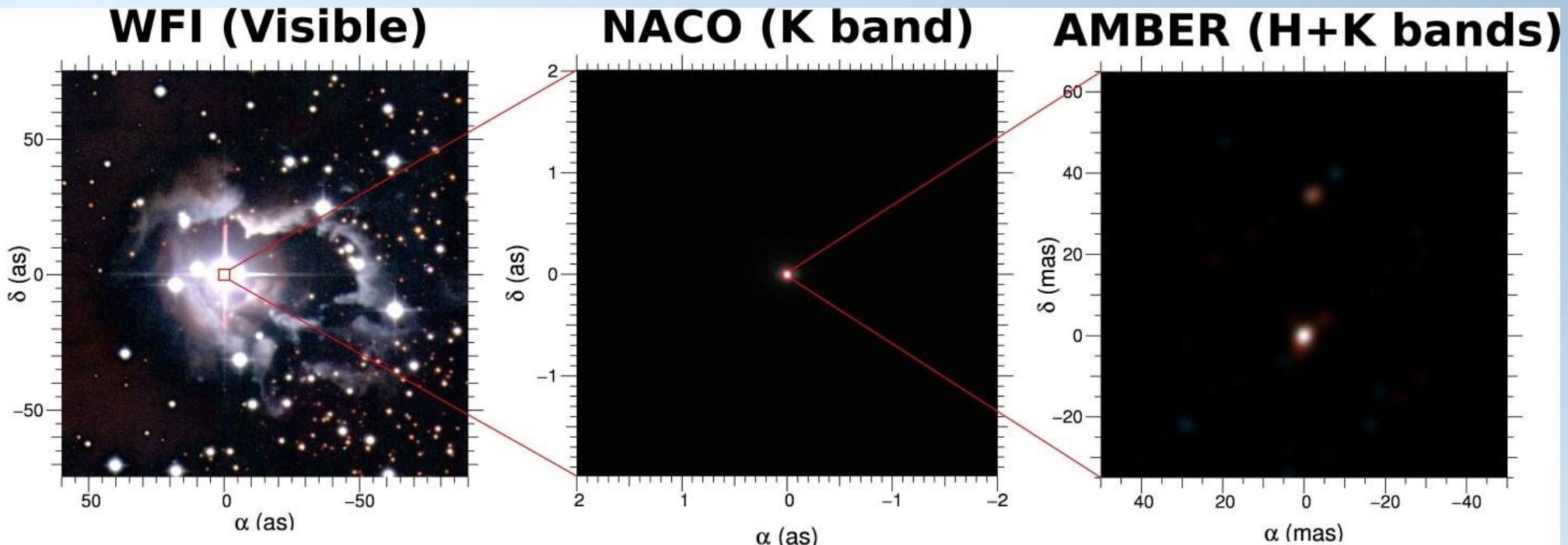
Une étoile binaire avec des enveloppes de poussières



- Étoile résolue au Sud
- Étoile au Nord
- Enveloppe étendue

Résumé

- HD87643 est une **étoile binaire** !
- Distance de **~1 kpc** (probablement pas 3 kpc) !
- **Poussières** ... partout dans le système, mais pas à grande échelle ($>0.5''$) ?
- **Primaire de type B avec un disque de poussière** (étoile B[e] ???)
- **Secondaire pas encore comprise** (étoile froide ? naine blanche ? T Tauri ?)

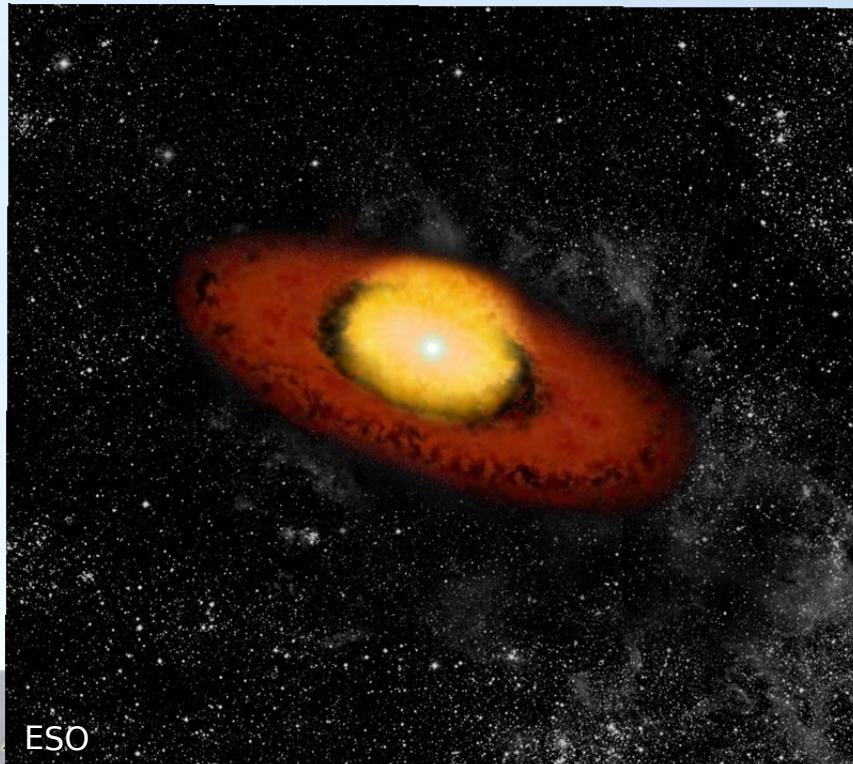


Millour et al. (A&A, 2009)

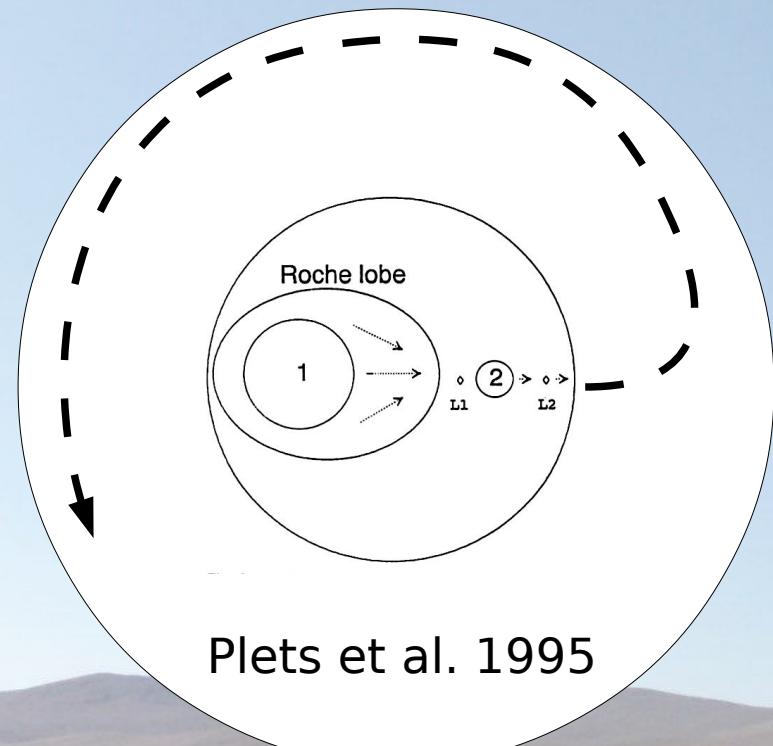
06/04/2011 : Florentin Millour, Ecole "From Solar to Stellar environments", 39

HD62623

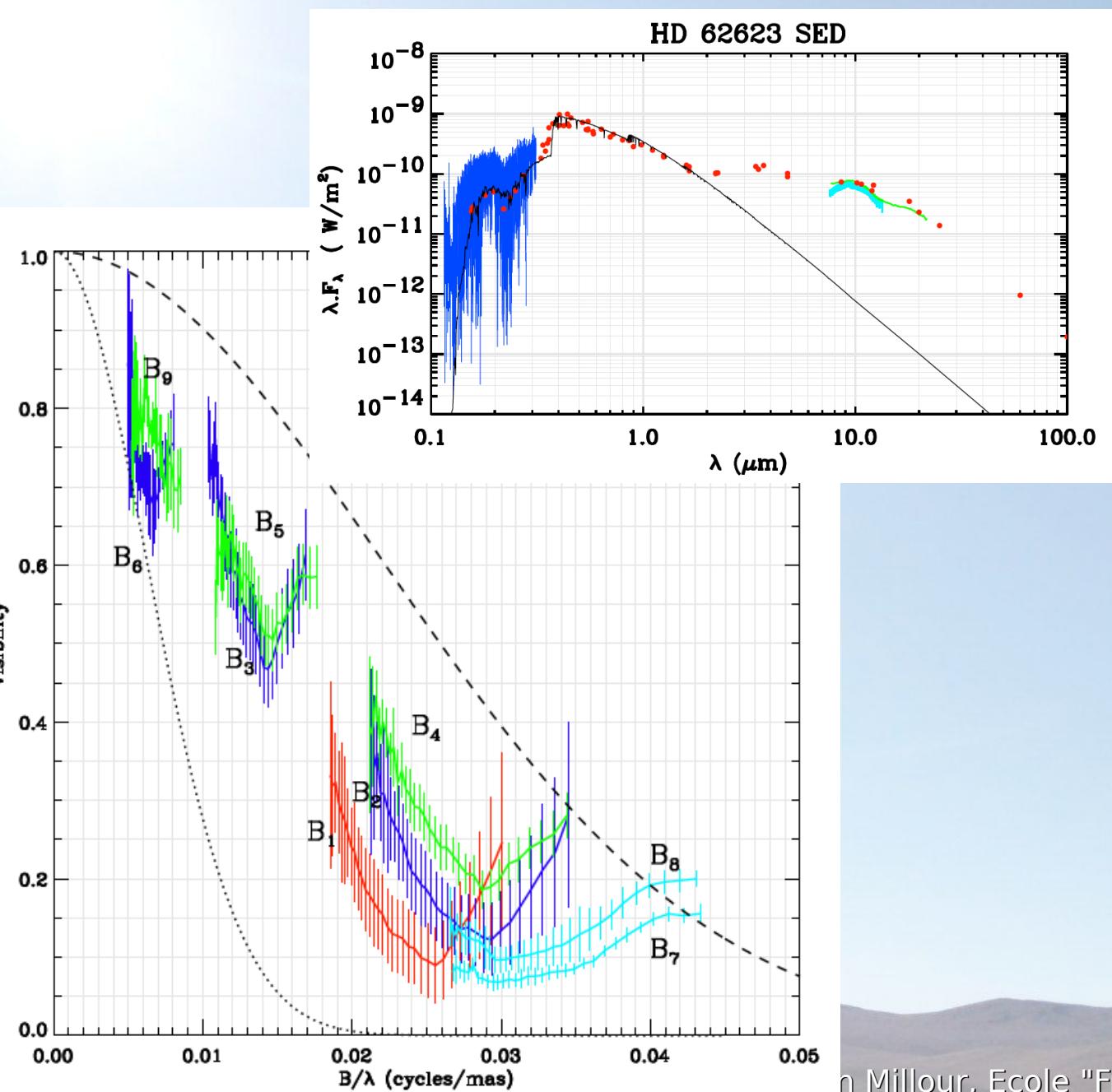
- One of the only A[e] supergiant star
- Gaz and dust disks
- Companion possible (Plets et al. 1995)



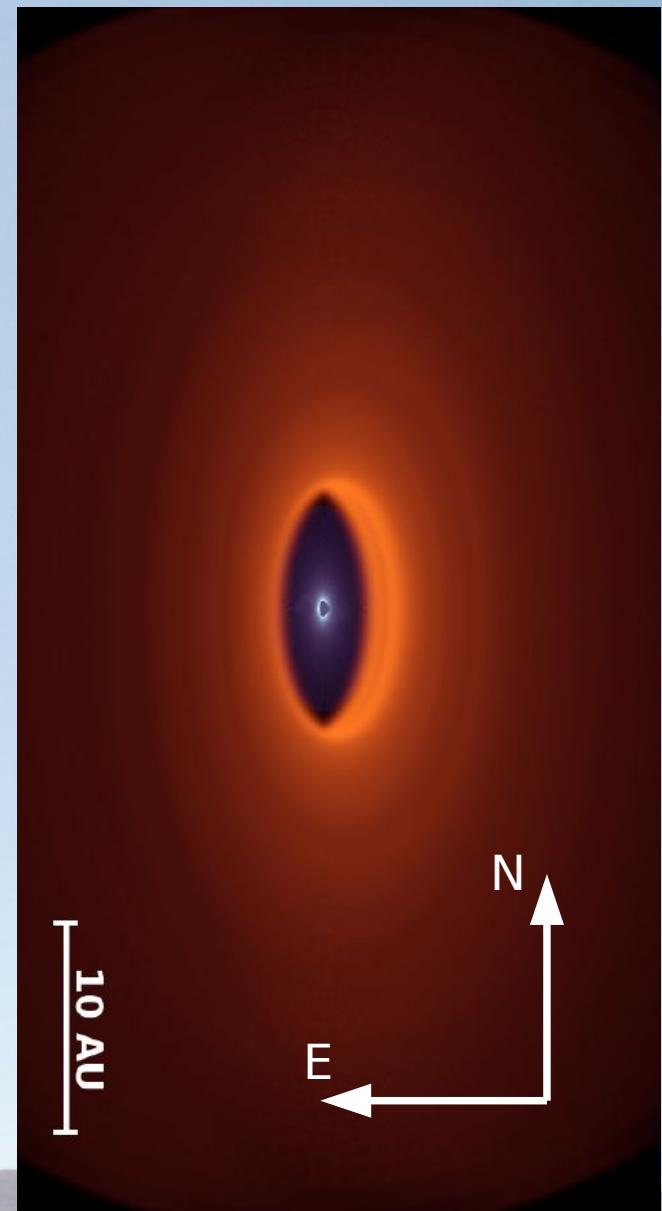
ESO
Observatoire
de la CÔTE d'AZUR



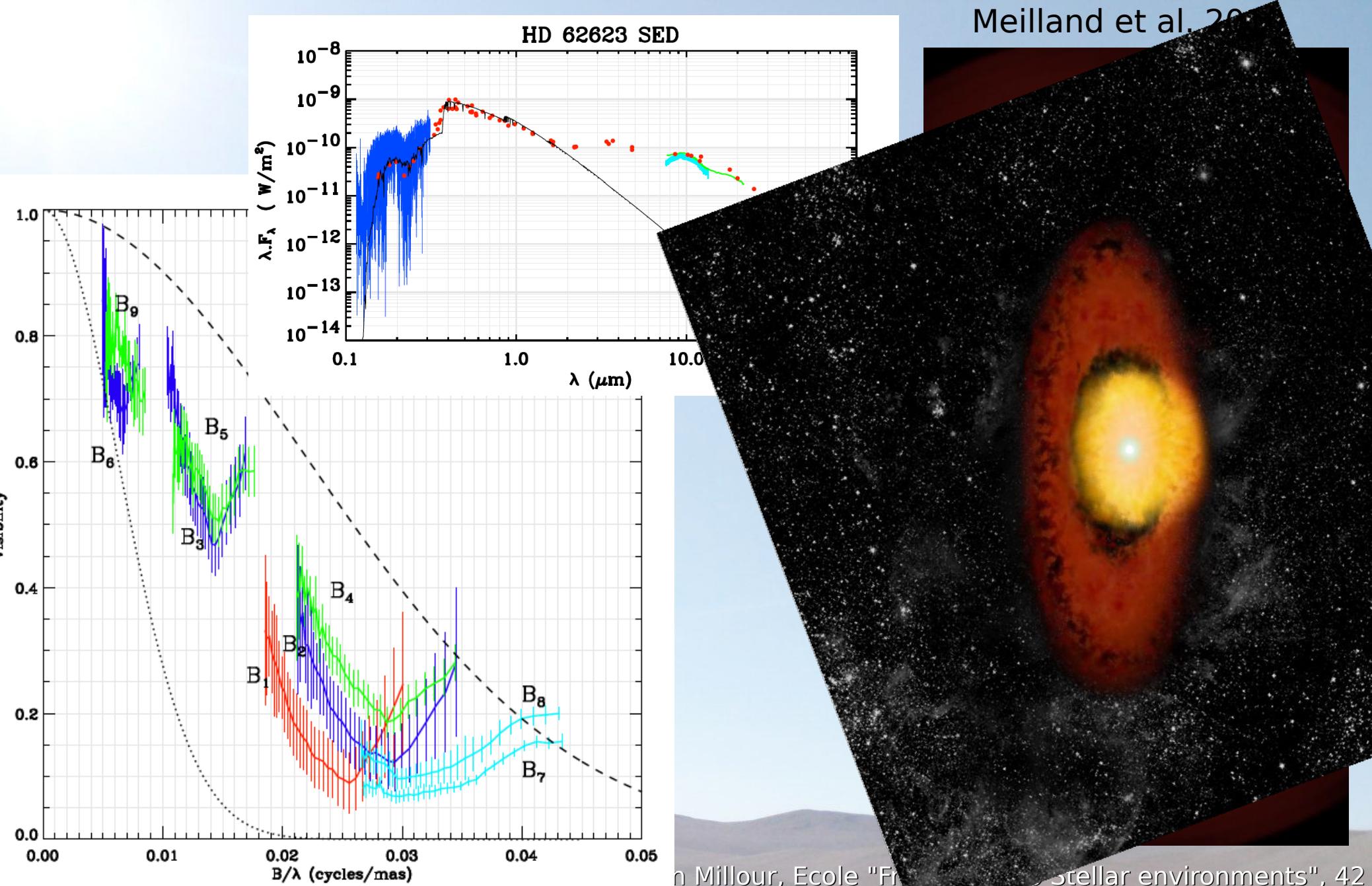
MIDI observations



Meilland et al. 2010

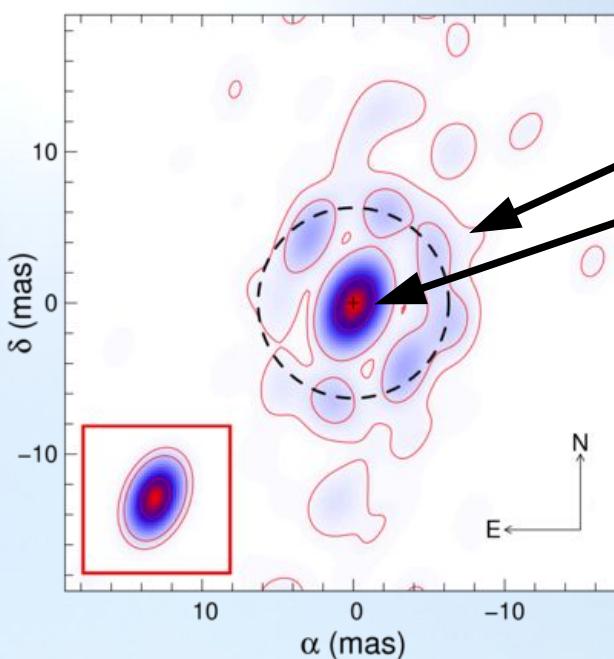


MIDI observations

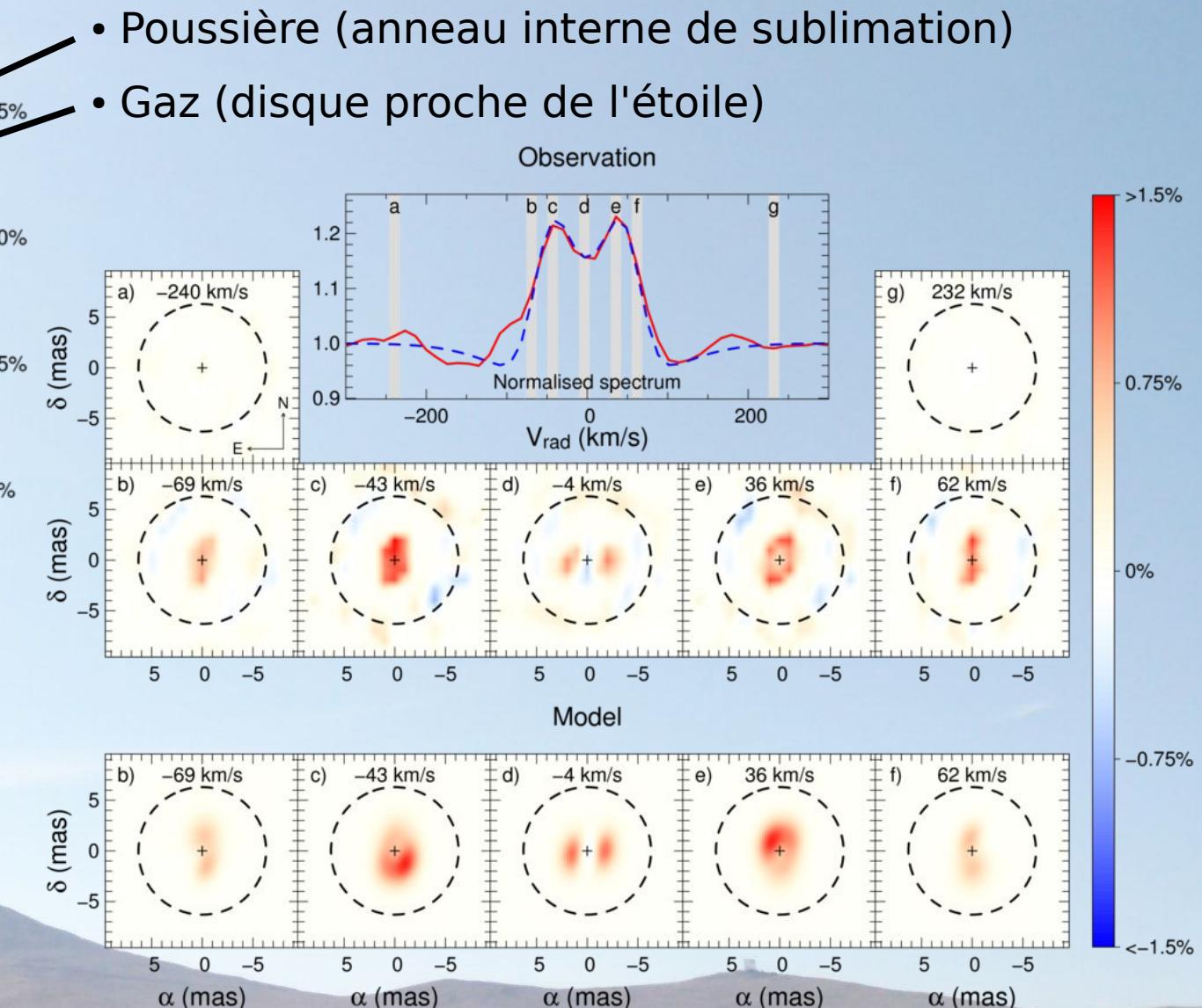


AMBER observations

3 Pup : étoile supergéante A[e]



Détection des disques de poussières et de gaz



La phase différentielle

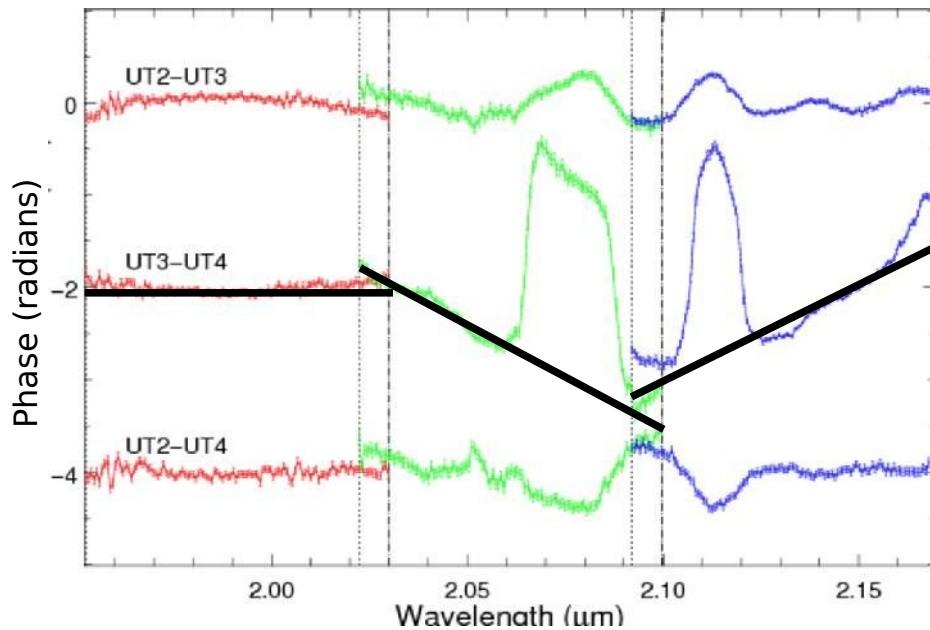
Principe

- Phase à 2 télescopes en fonction de λ
- Informations de la phase perdues :
 - Constante
 - Pente

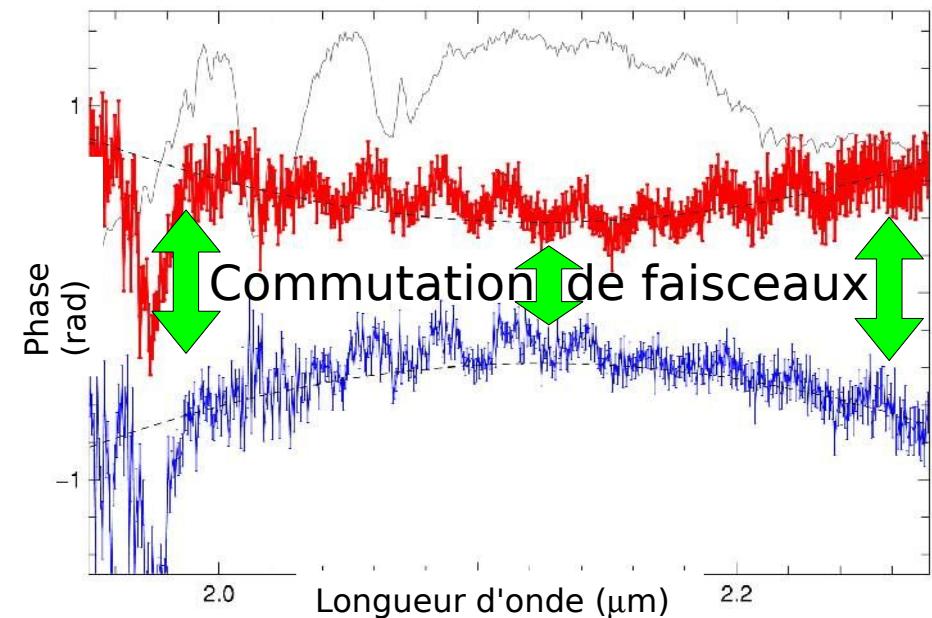
Précision 10^{-2} radians ($6\mu\text{as}$) effets dominants

- Dispersion chromatique de l'air
- Problèmes instrumentaux
(stabilité, dichroiques, polariseurs)

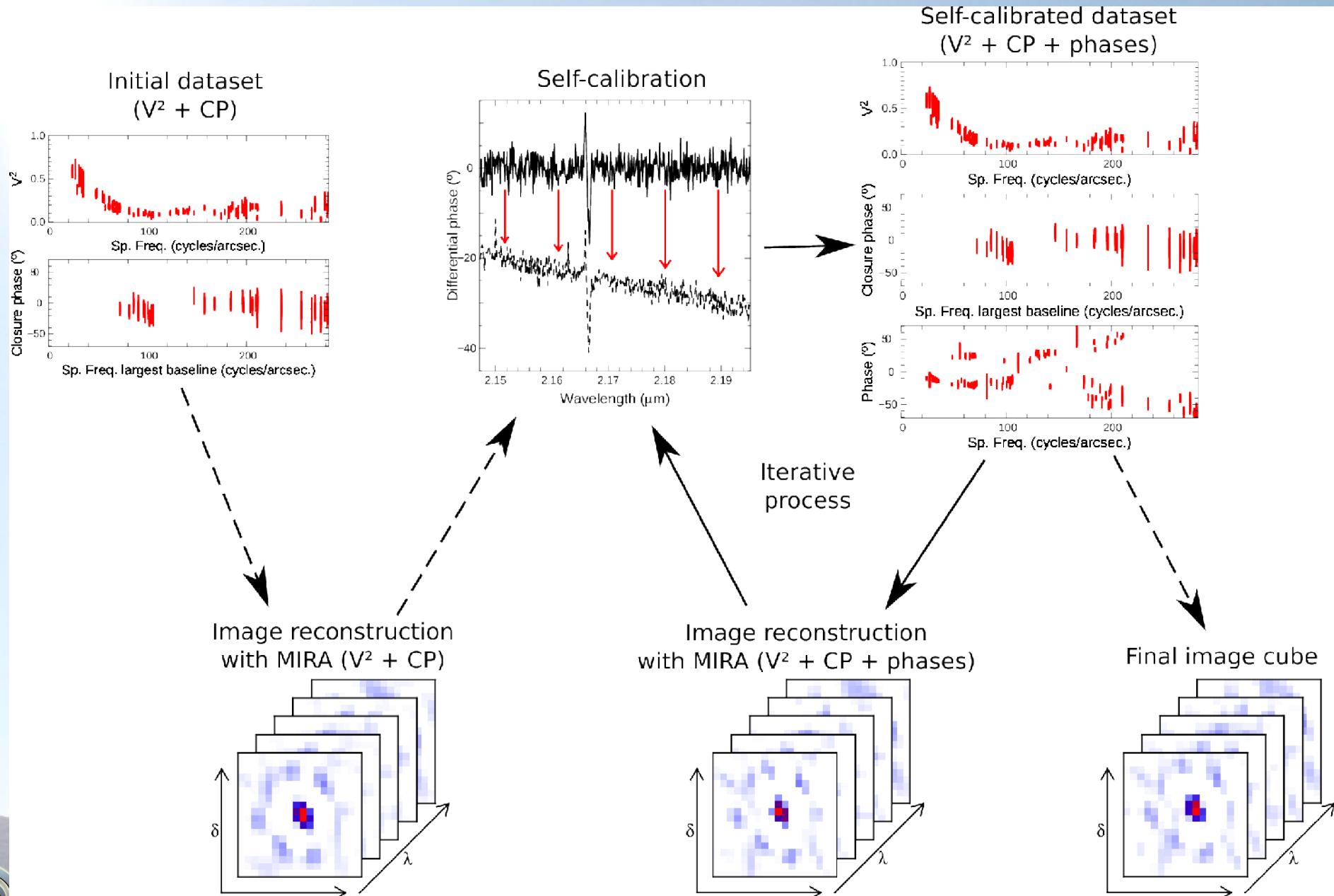
γ^2 Velorum (Millour et al. 2007)



Rapport sur les phases d'AMBER (2007)

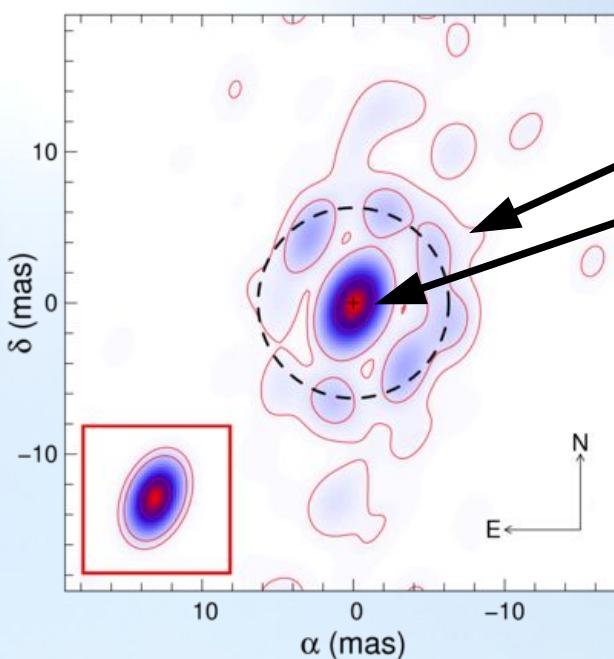


Inclure la phase différentielle dans la reconstruction d'images : l'auto-calibration

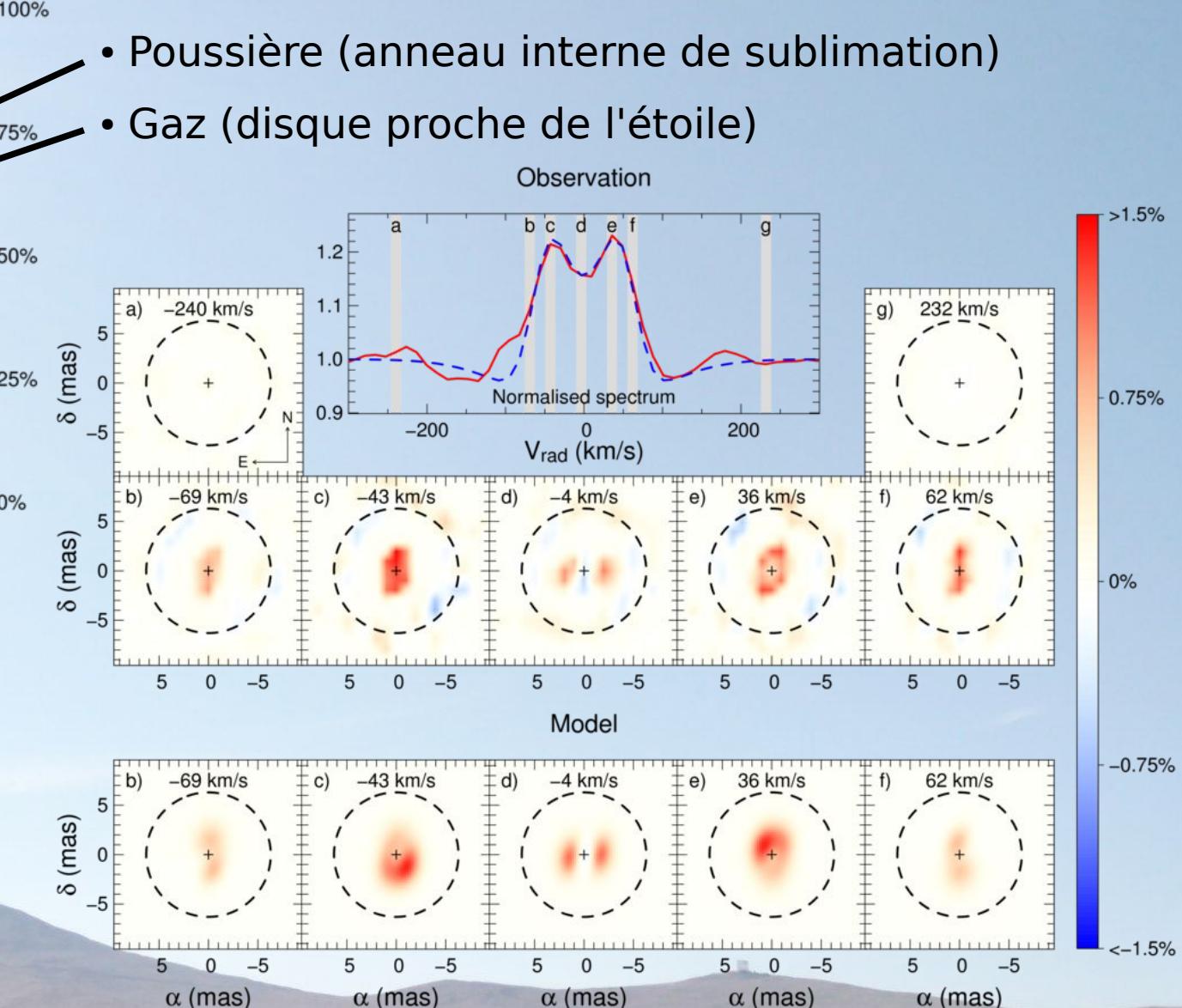


Images chromatiques

3 Pup : étoile supergéante A[e]

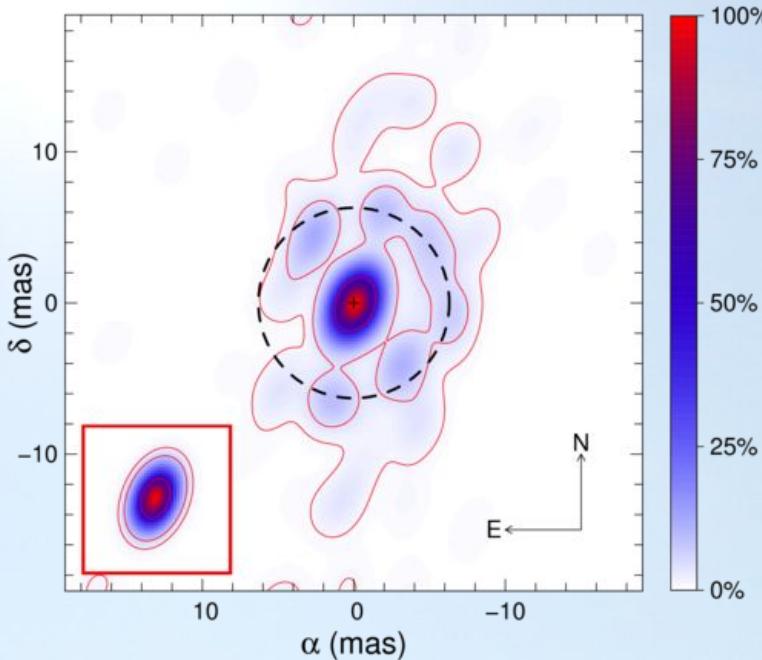


Détection des disques
de poussières et de gaz

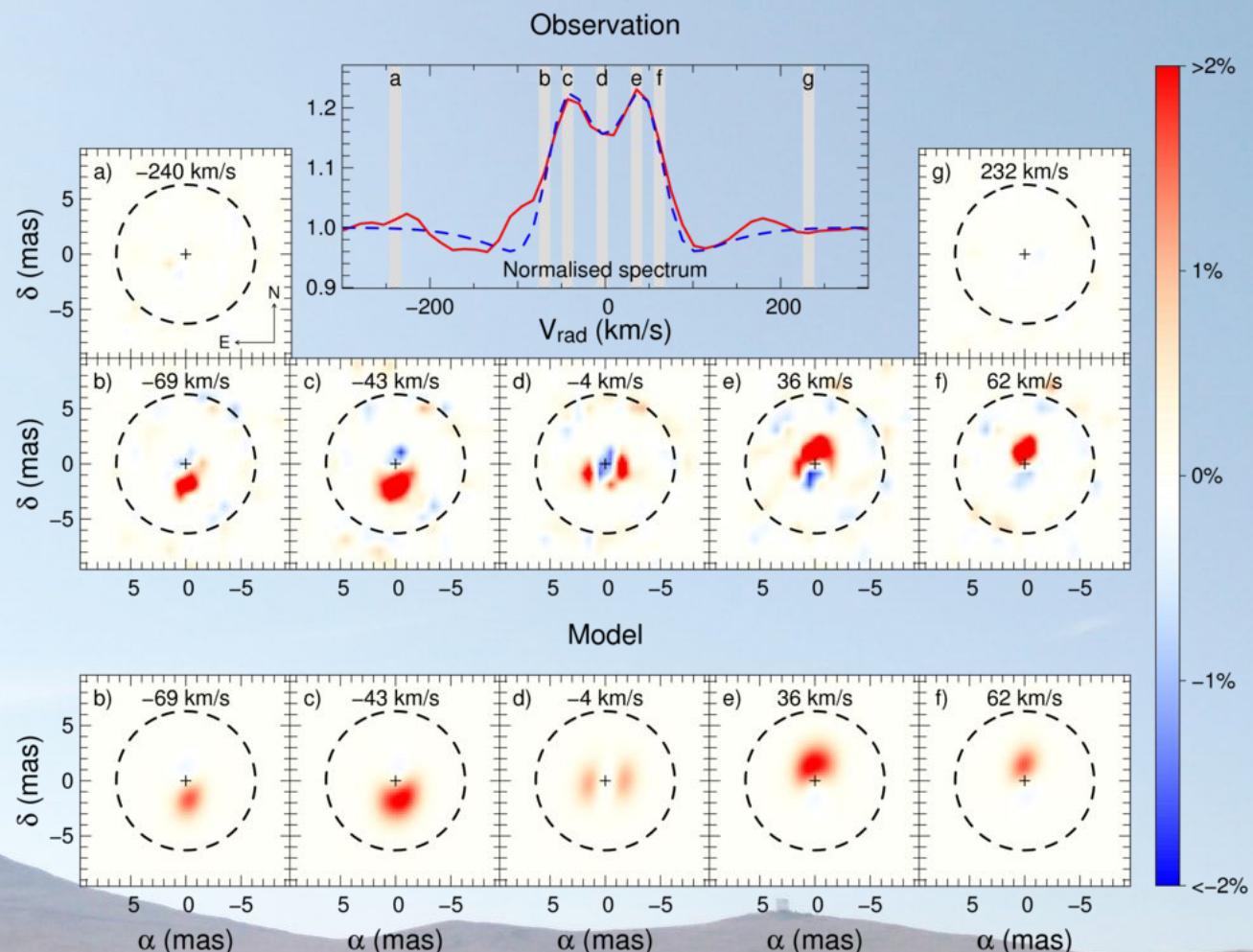


Images chromatiques

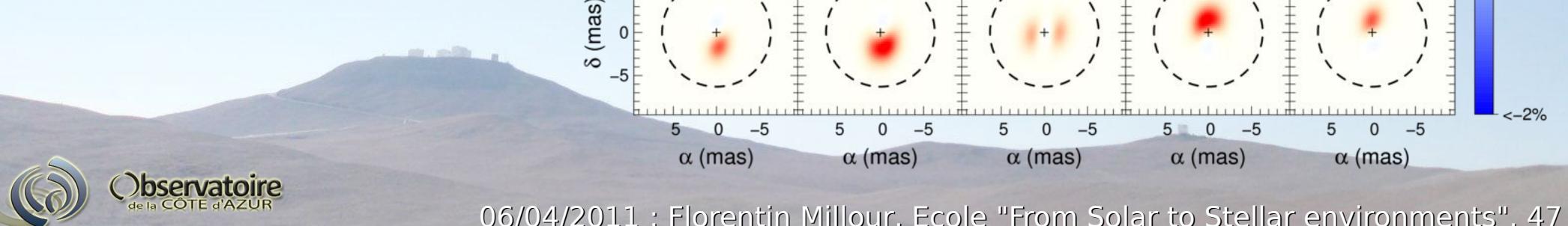
3 Pup : étoile supergéante A[e]



"self-calibration" : phases différentielles
dans la reconstruction d'images



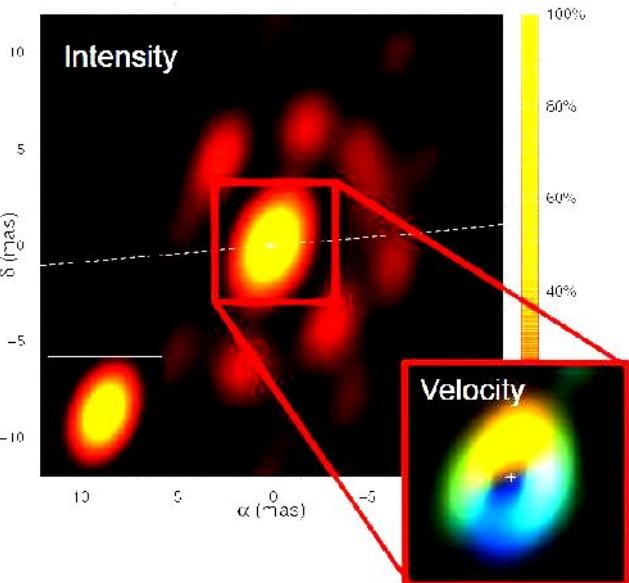
Cinématique des disques
de poussières et de gaz



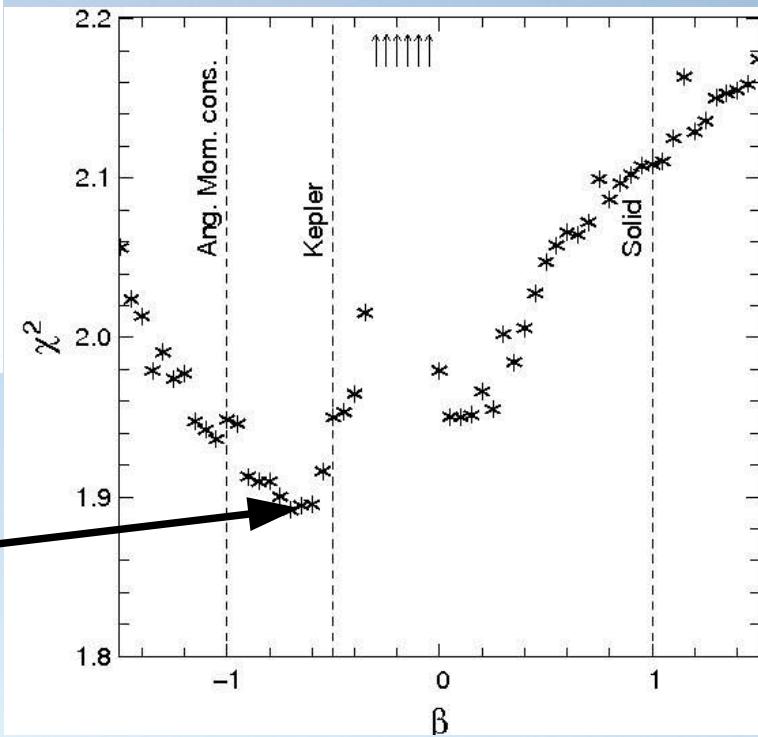
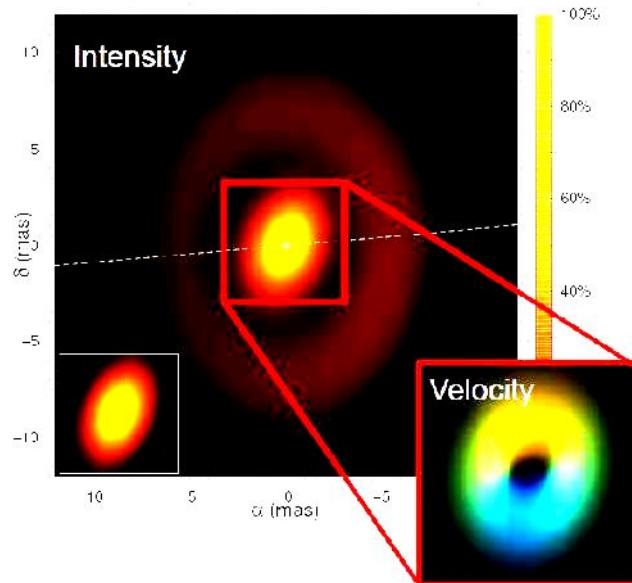
Images chromatiques

3 Pup : étoile supergéante A[e]

OBSERVATION



MODEL



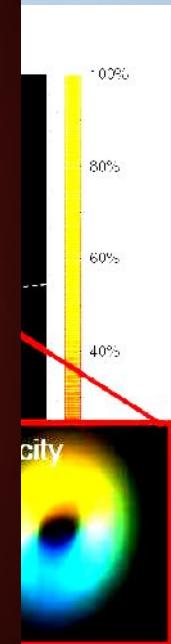
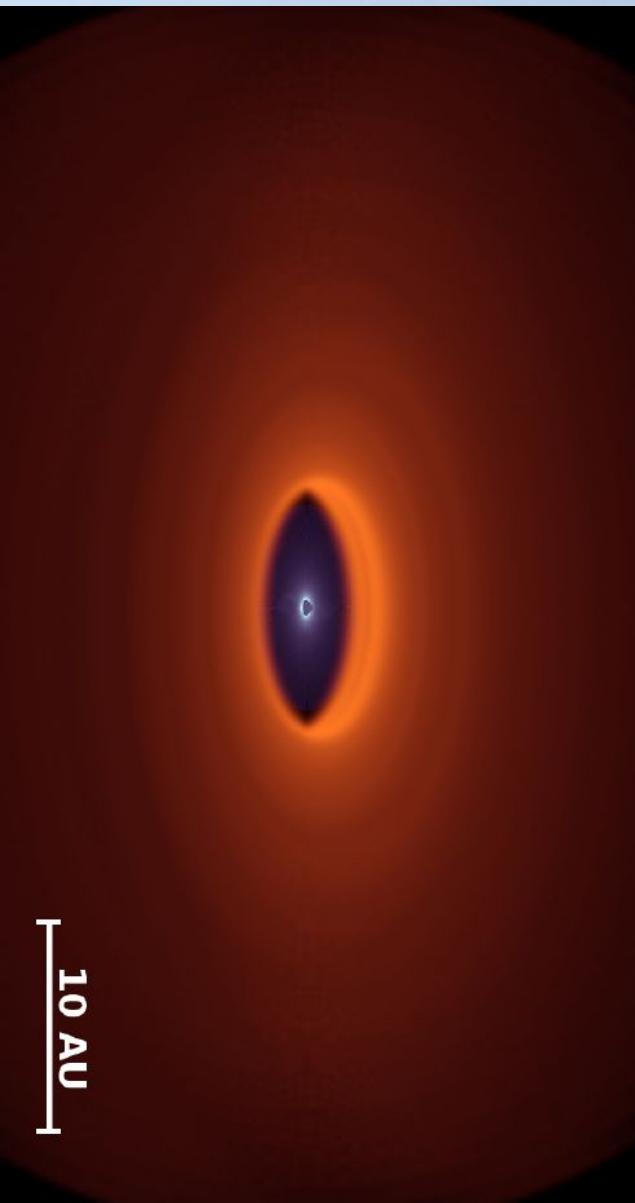
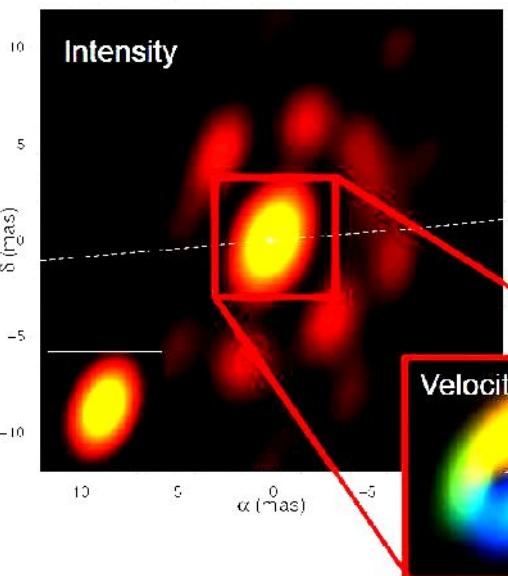
Rotation Keplerienne du disque
Seule solution pour expliquer
cela : Système double !

Millour et al. 2011 A&A

Communiqué de presse fin Janvier

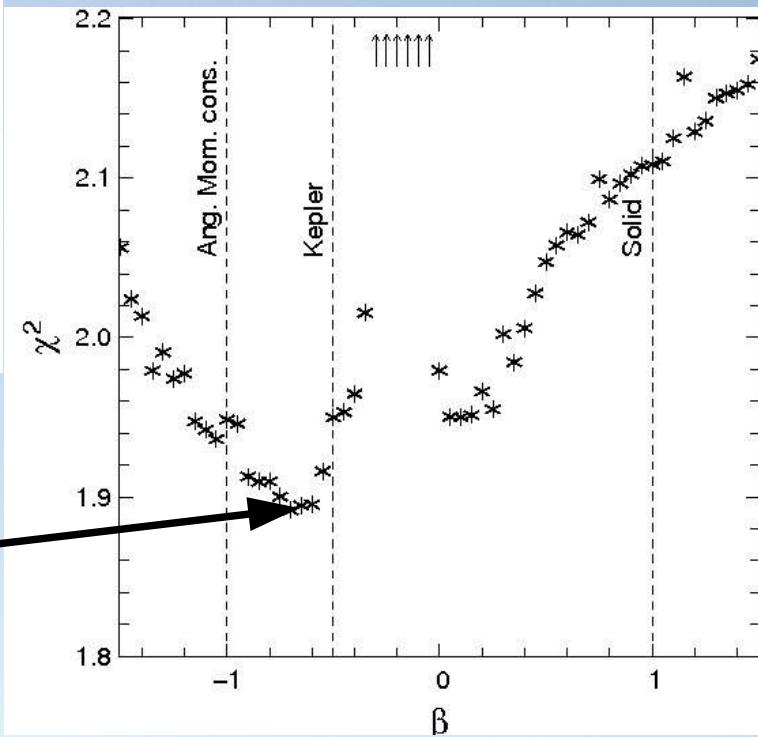
Imageries géante A[e]

OBSERVATION



Rotation Kepler
Seule solution pour expliquer
cela : Système double !

Millour et al. 2011 A&A



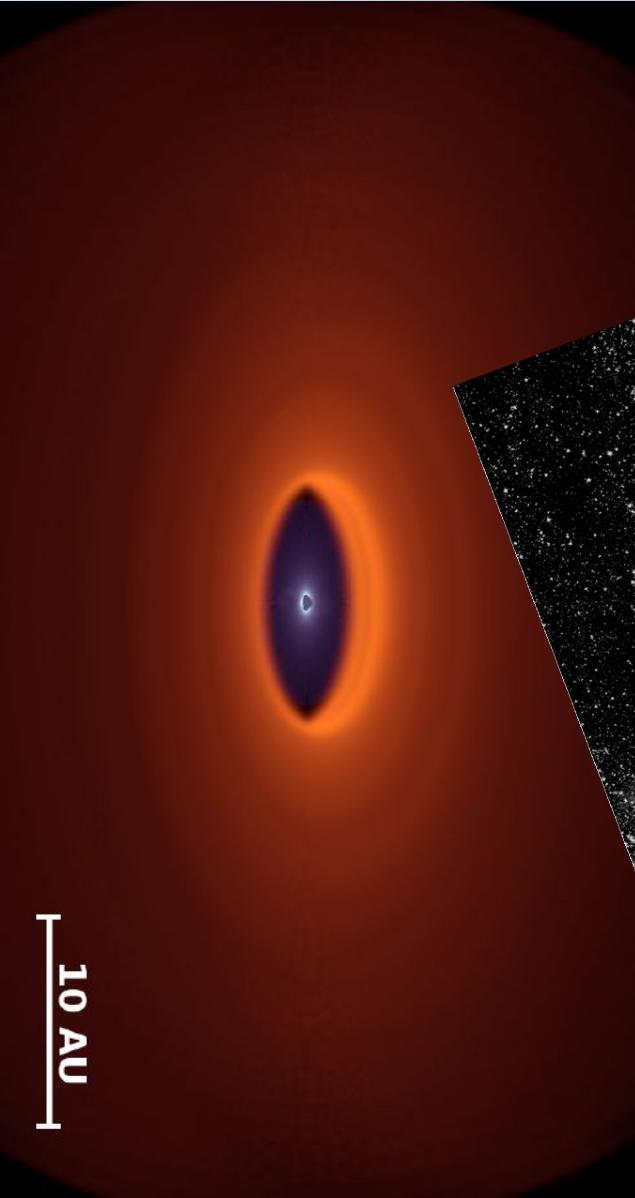
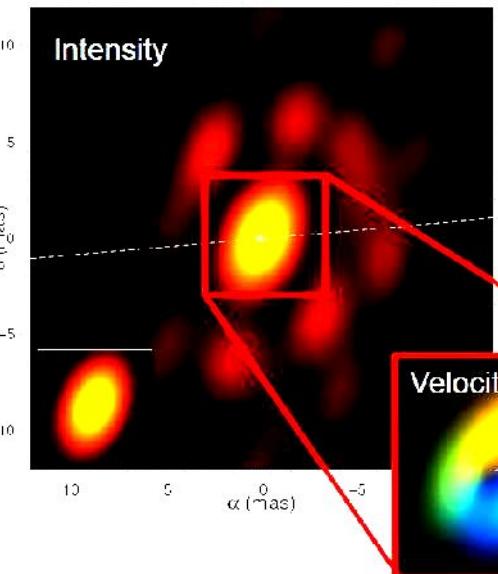
Communiqué de presse fin Janvier

06/04/2011 : Florentin Millour, Ecole "From Solar to Stellar environments", 49

Imageries

géante Al

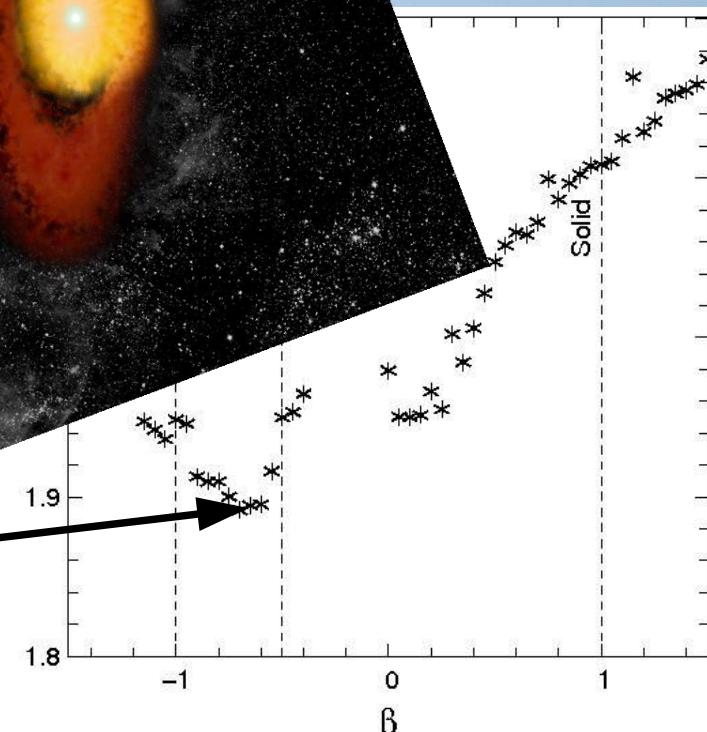
OBSERVATION



matiques

Rotation Kep
Seule solution pour expliquer
cela : Système double !

Millour et al. 2011 A&A



Communiqué de presse ESO

06/04/2011 : Florentin Millour, Ecole "From Solar to Stellar environments", 50

**Merci
Thanks**

