



## Bilan & Perspectives de la session

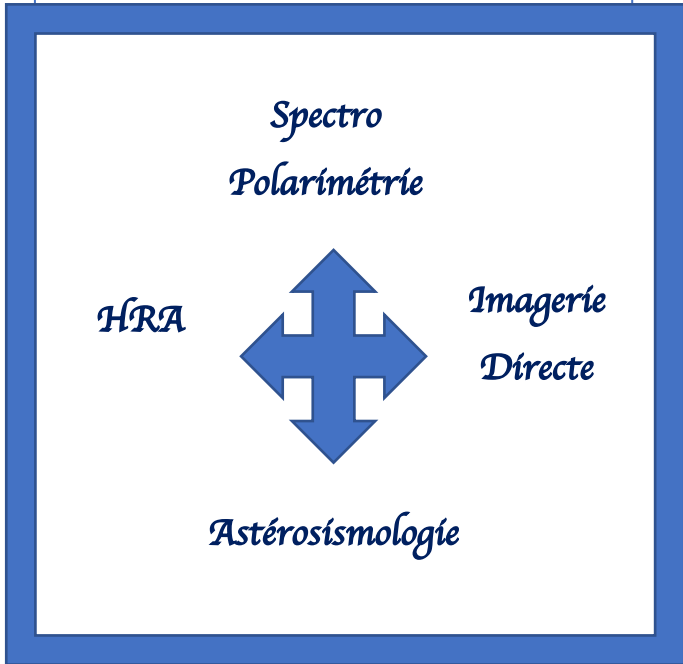
# Anatomie/Imagerie/Cartographie des surfaces et intérieurs stellaires et de leur environnement proche

N. Nardetto, E. Lagadec, J. Morin

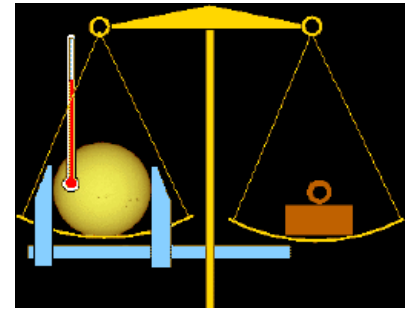


***Nouveau thème 2014-2018:** « zoom observationnel le plus précis possible en utilisant des **outils** où la communauté instrumentaliste française a un leadership reconnu, e.g. Haute Résolution Angulaire HRA, spectropolarimétrie, astérosismologie, imagerie directe. »*

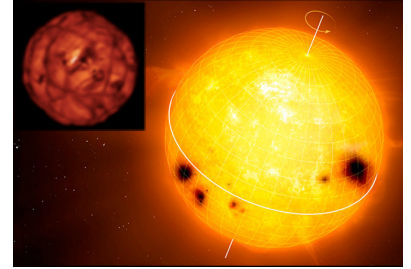
Anatomie/Imagerie/Cartographie  
des surfaces et intérieurs stellaires  
et de leur environnement proche



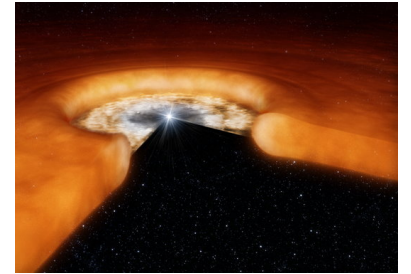
Structure et évolution  
stellaires  
(paramètres fondamentaux)



Champ magnétique et  
activités stellaires



Origines (disques des  
étoiles jeunes)



Environnements,  
atmosphères, vents,  
perte de masse

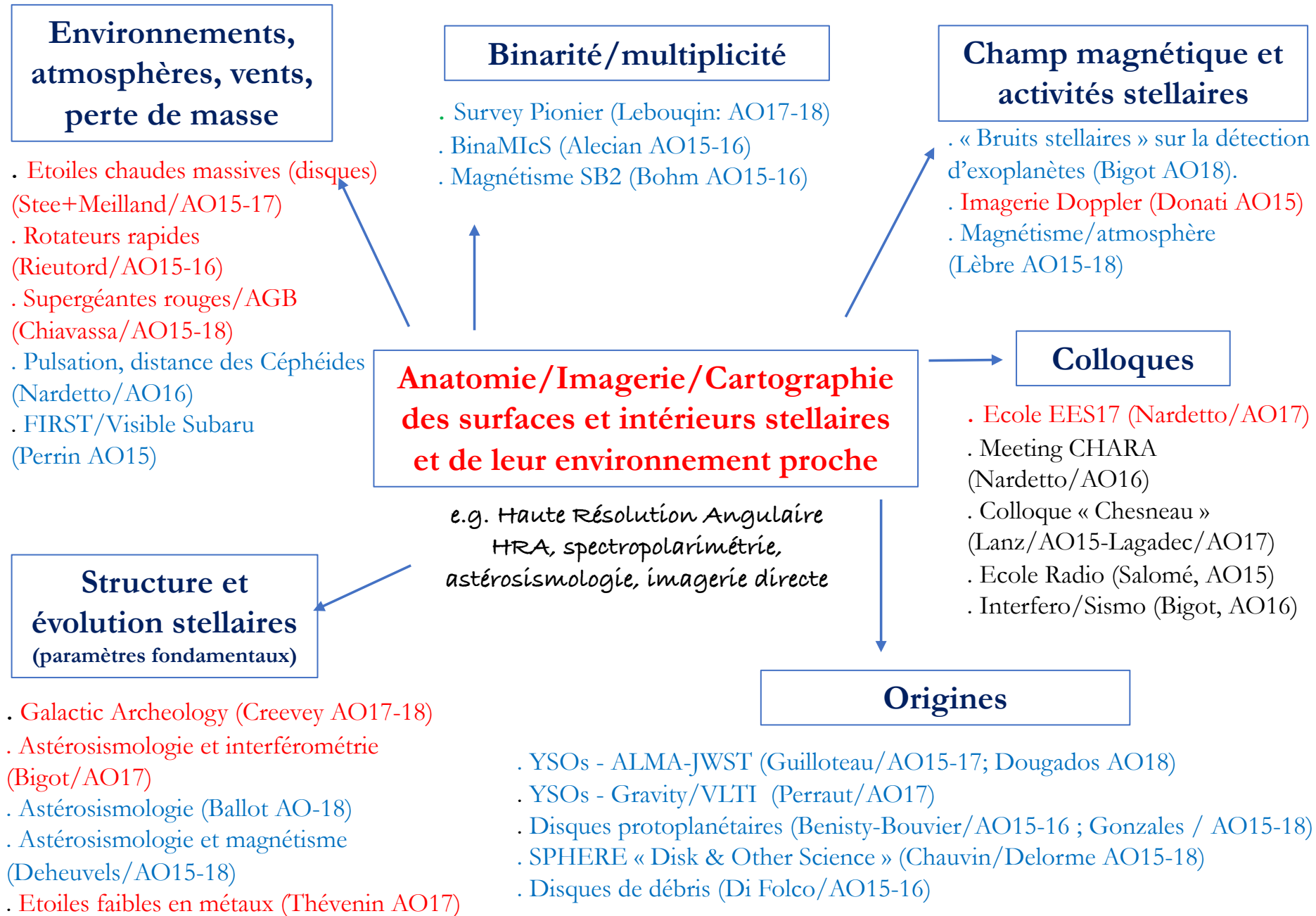


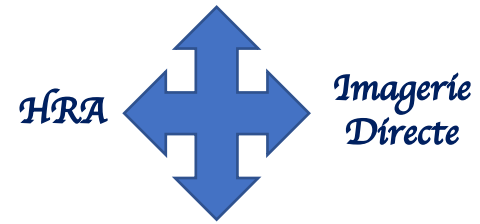
« Stars as Sun »  
« Stars in galaxies »

Binarité/multiplicité

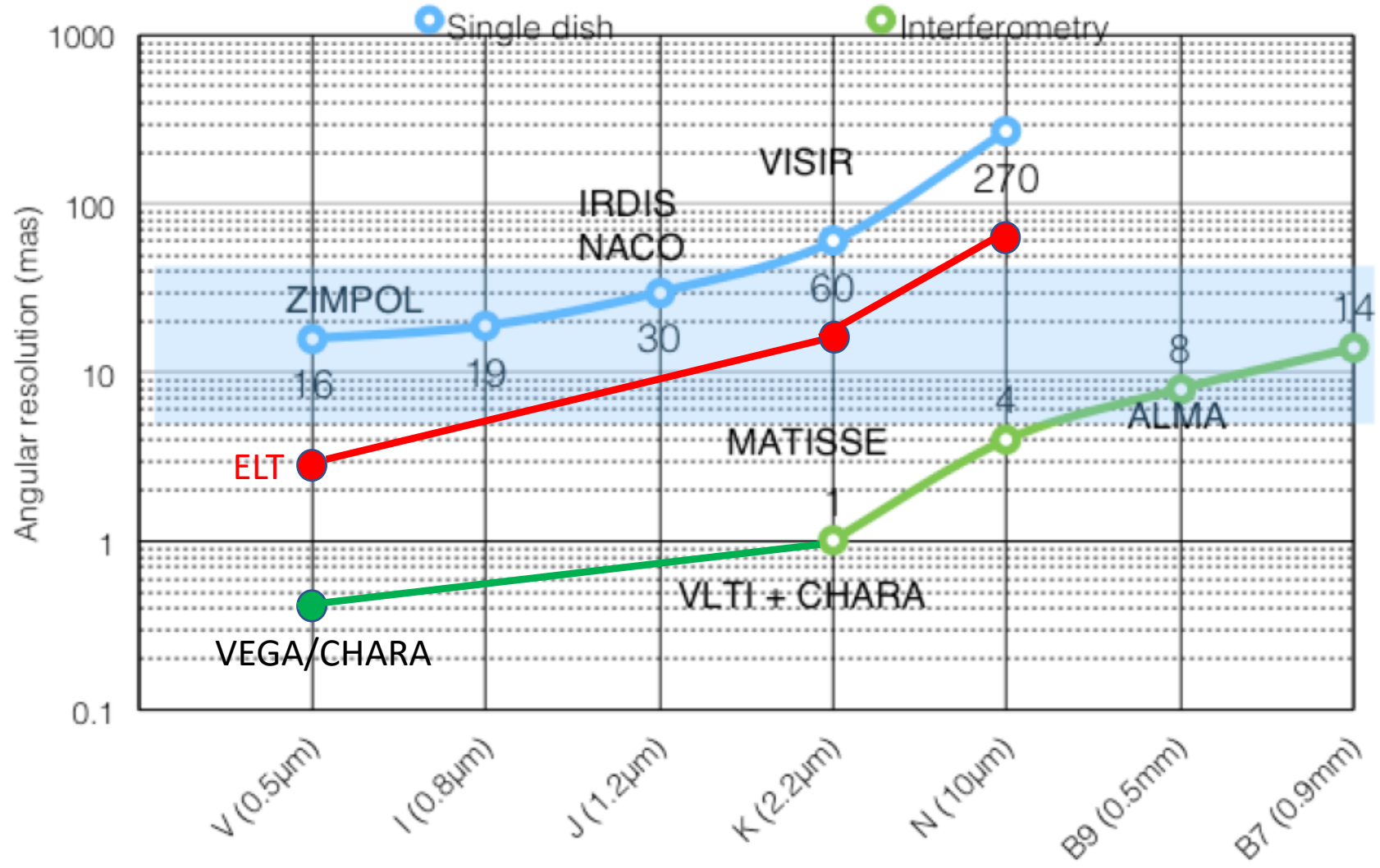


[En rouge, discuté ici; en bleu dans d'autres sessions]



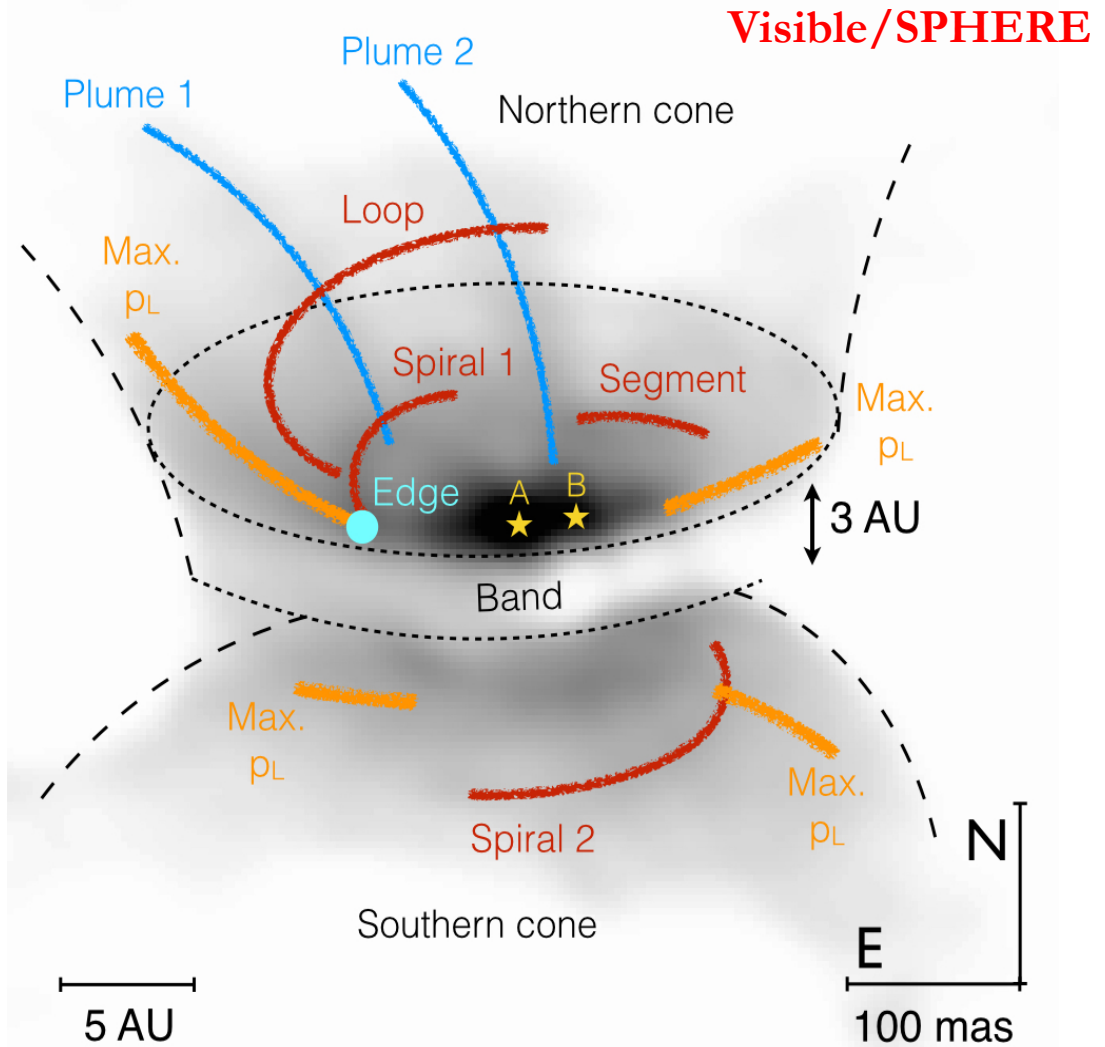
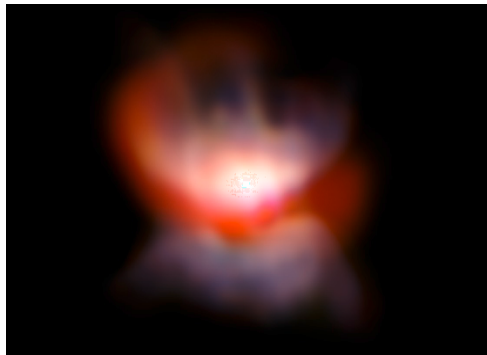


# Un besoin de haute résolution spatiale: **Synergie** Interférométrie - Imagerie



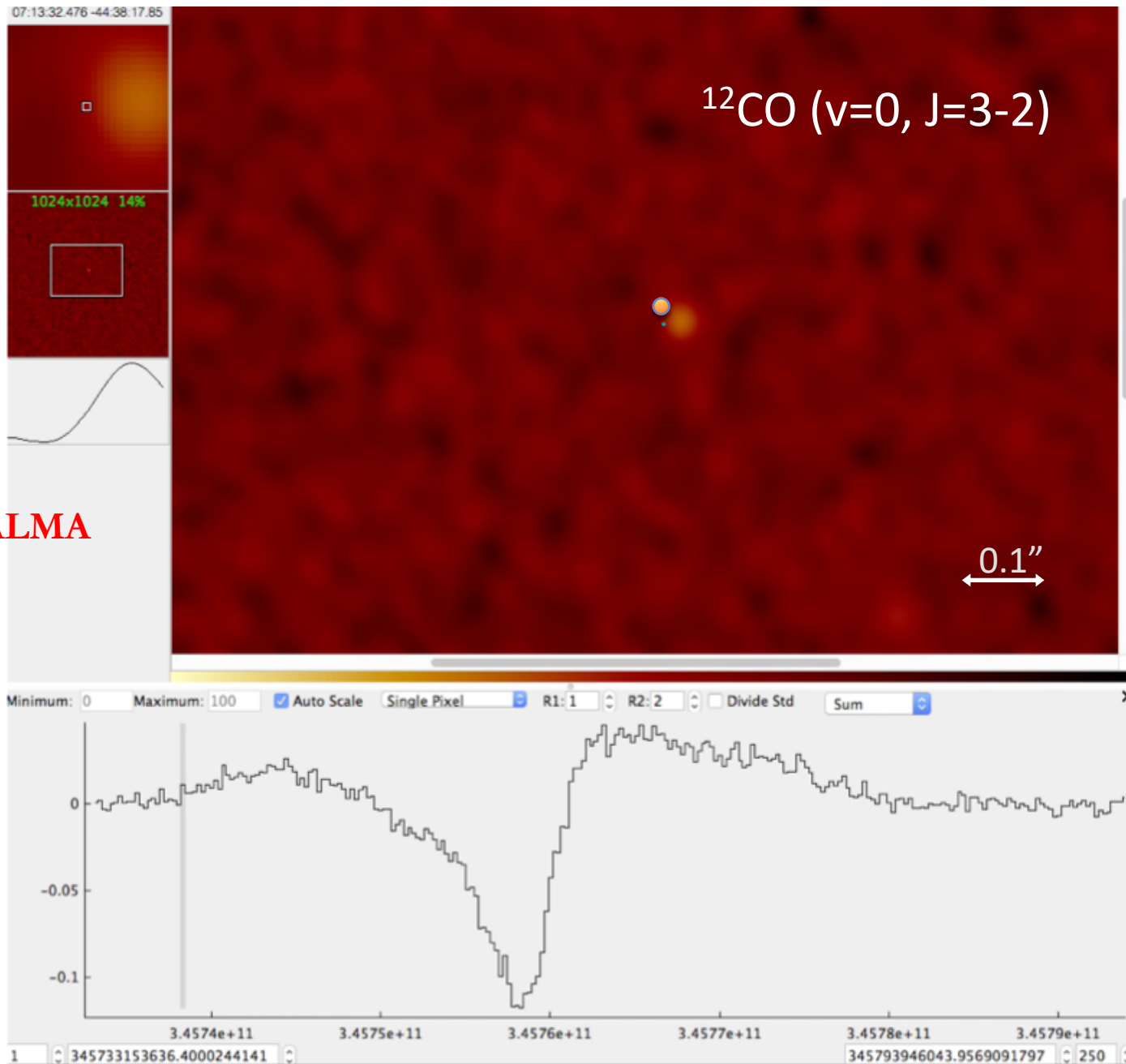


# Exemple sur les AGBs: L'imagerie directe permet de comprendre la géométrie de l'environnement.

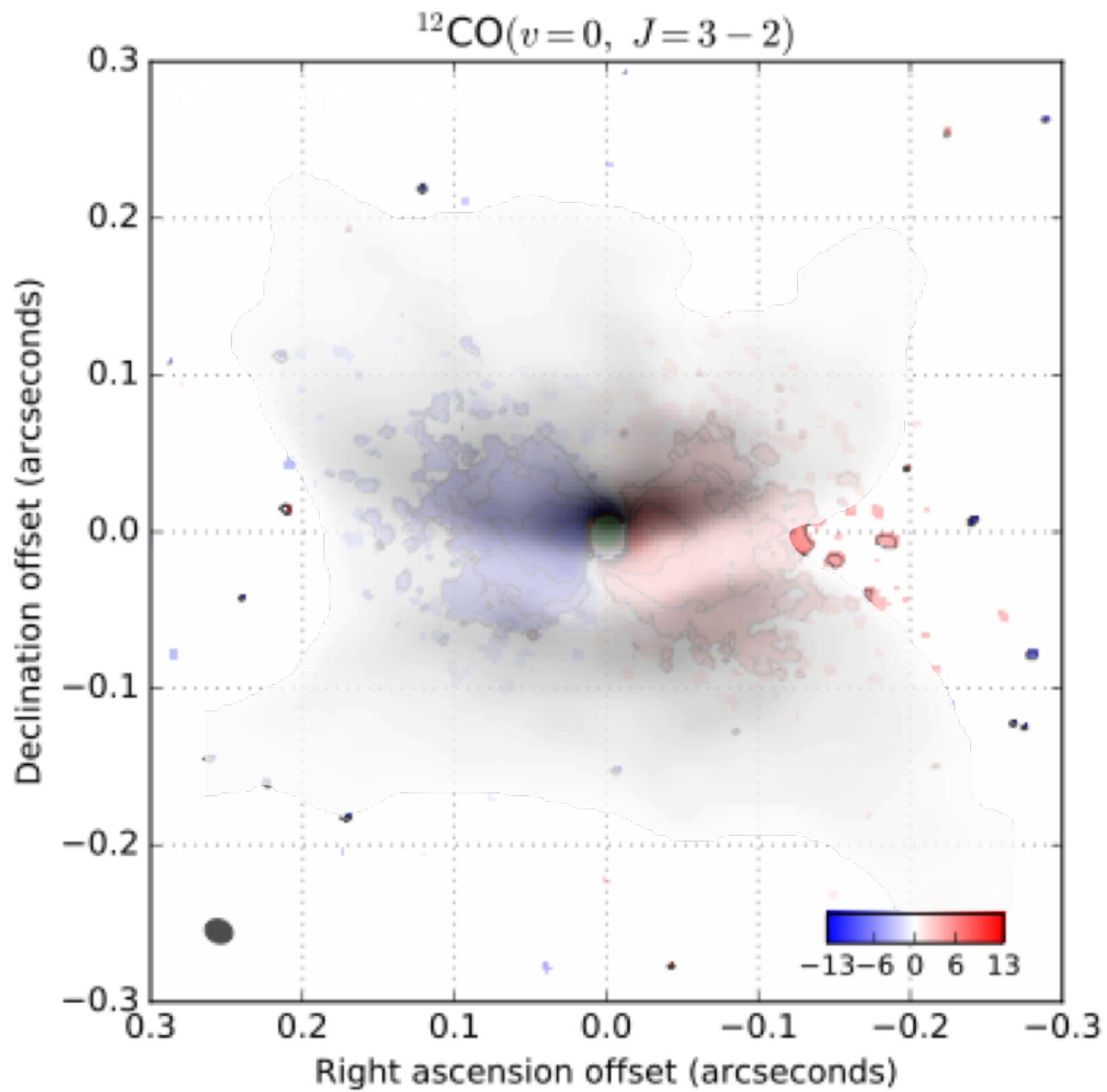


L2 Pup (AGB proche à 64 pc) avec SPHERE ZIMPOL [Kervella+15]

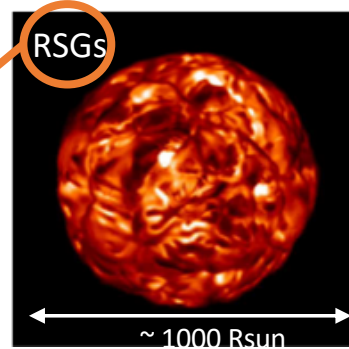
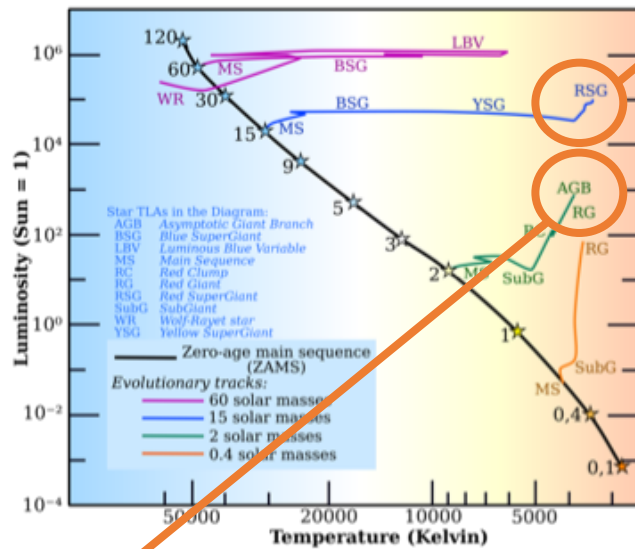
# L2 Pup (AGB proche à 64 pc) avec ALMA [Kervella+16]



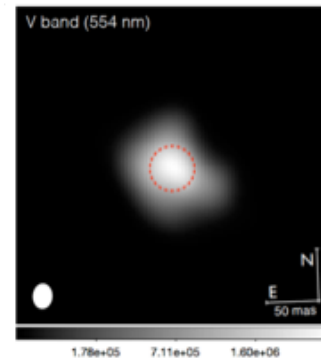
0.9 mm ALMA



# L'interférométrie permet de contraindre la granulation des géantes, AGB et supergéantes rouges !



Simulation 3D  
 Betelgeuse  
 [Chiavassa+11]  
 [Freytag+17]

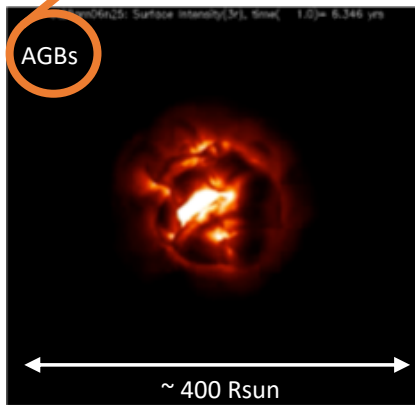


SPHERE/ZIMPOL  
 Betelgeuse (SGR)  
 [Kervella+16]

Antares SGR  
 Pionier/VLTI  
 [Montarges+17]

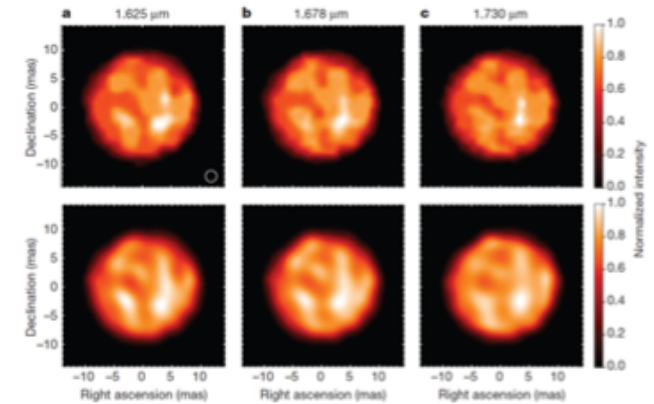
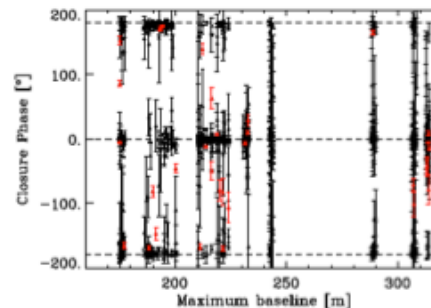
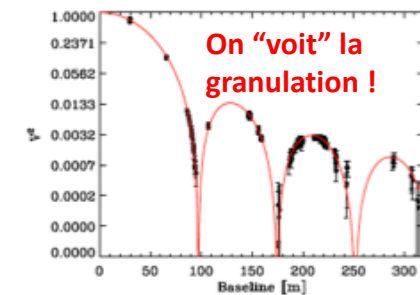
SGR  
 Spectro-polarimétrie  
 [Aurière+16]

SGR: *Pionier/VLTI*  
 + Spectro-polarimétrie  
 [Montarges+18]



Simulation 3D

$\beta$  Oph K2III avec  
 MIRC/CHARA  
 [Chiavassa+17]



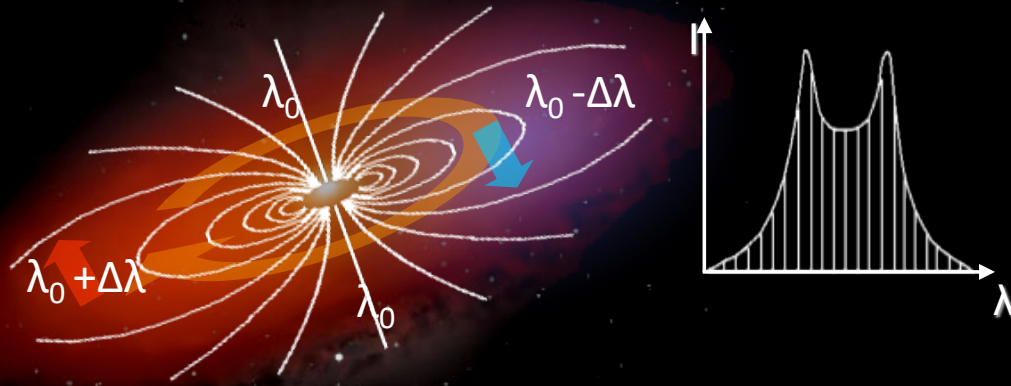
$\pi^1$  Gruis (RG)  
 Pionier/VLTI  
 [Paladini+18]

# Besoin de résolution spatiale et spectrale. Exemple sur une B[e]

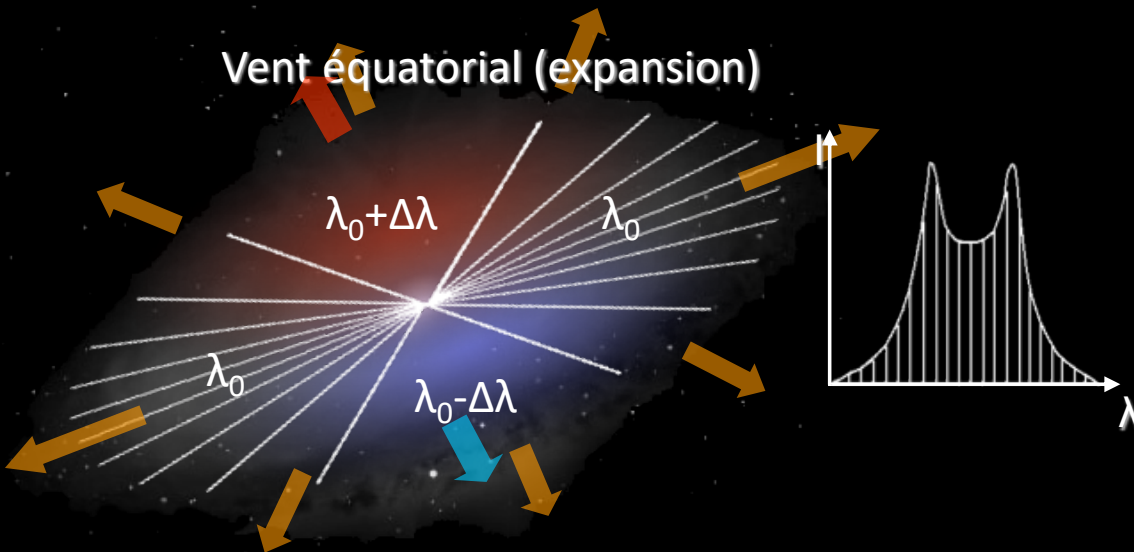


## Spectroscopie

### Disque équatorial en rotation



### Vent équatorial (expansion)



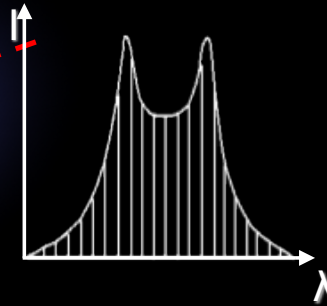
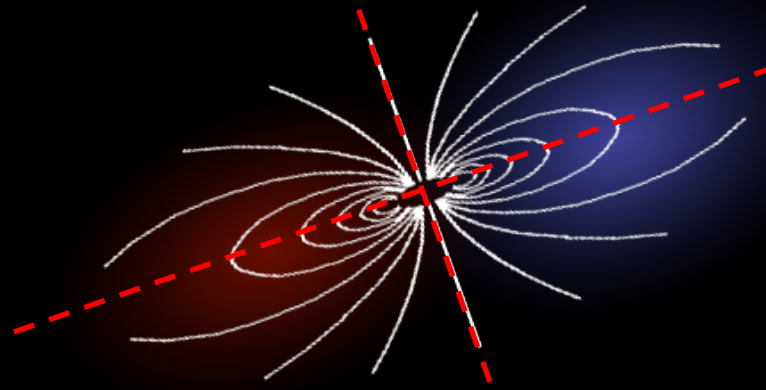


# Besoin de résolution spatiale & spectrale. Exemple d'une B[e]

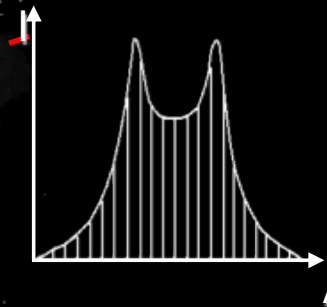
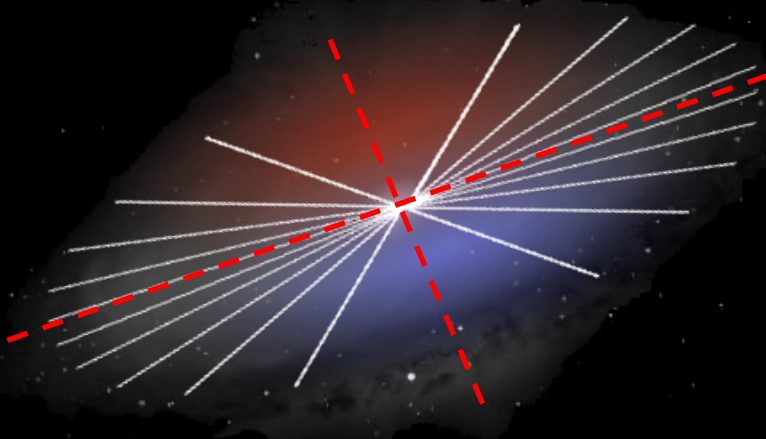
## Spectroscopie

## Spectro-Interférométrie

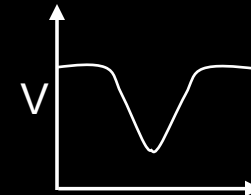
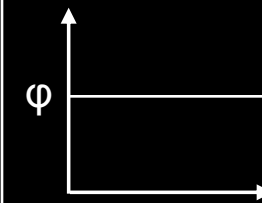
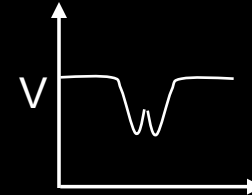
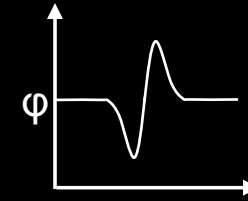
Disque équatorial en rotation



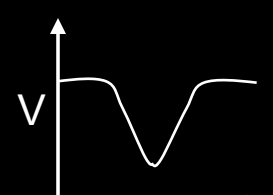
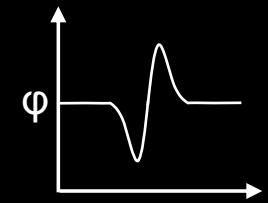
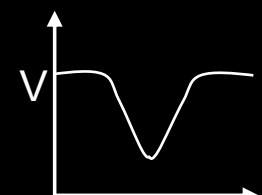
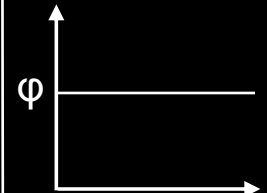
Vent équatorial (expansion)



Le long du grand axe



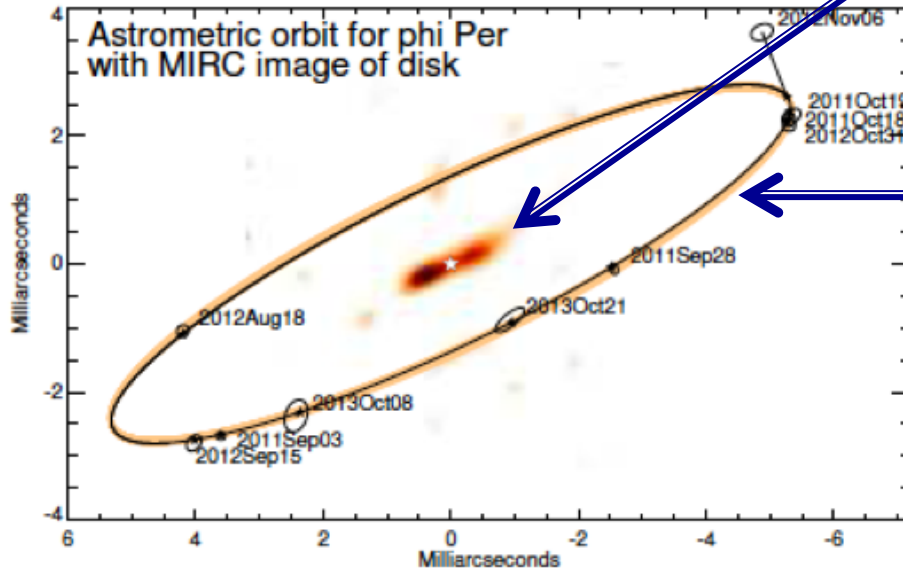
Le long du petit axe





# Observations spectro-interférométriques VEGA/CHARA de $\phi$ Per

Observations MIRC (bande K  $2.2\mu\text{m}$ )

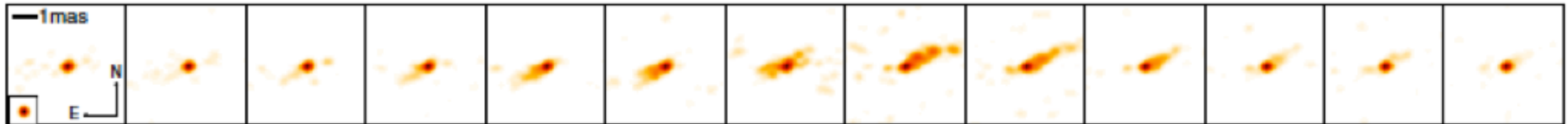


$\phi$  Per étoile Be + disque en rotation

Compagnon: sous géante de type O

$$R = 250 \frac{\lambda [\mu\text{m}]}{B [m]}$$

Observations VEGA (bande V, raie  $H\alpha$ )

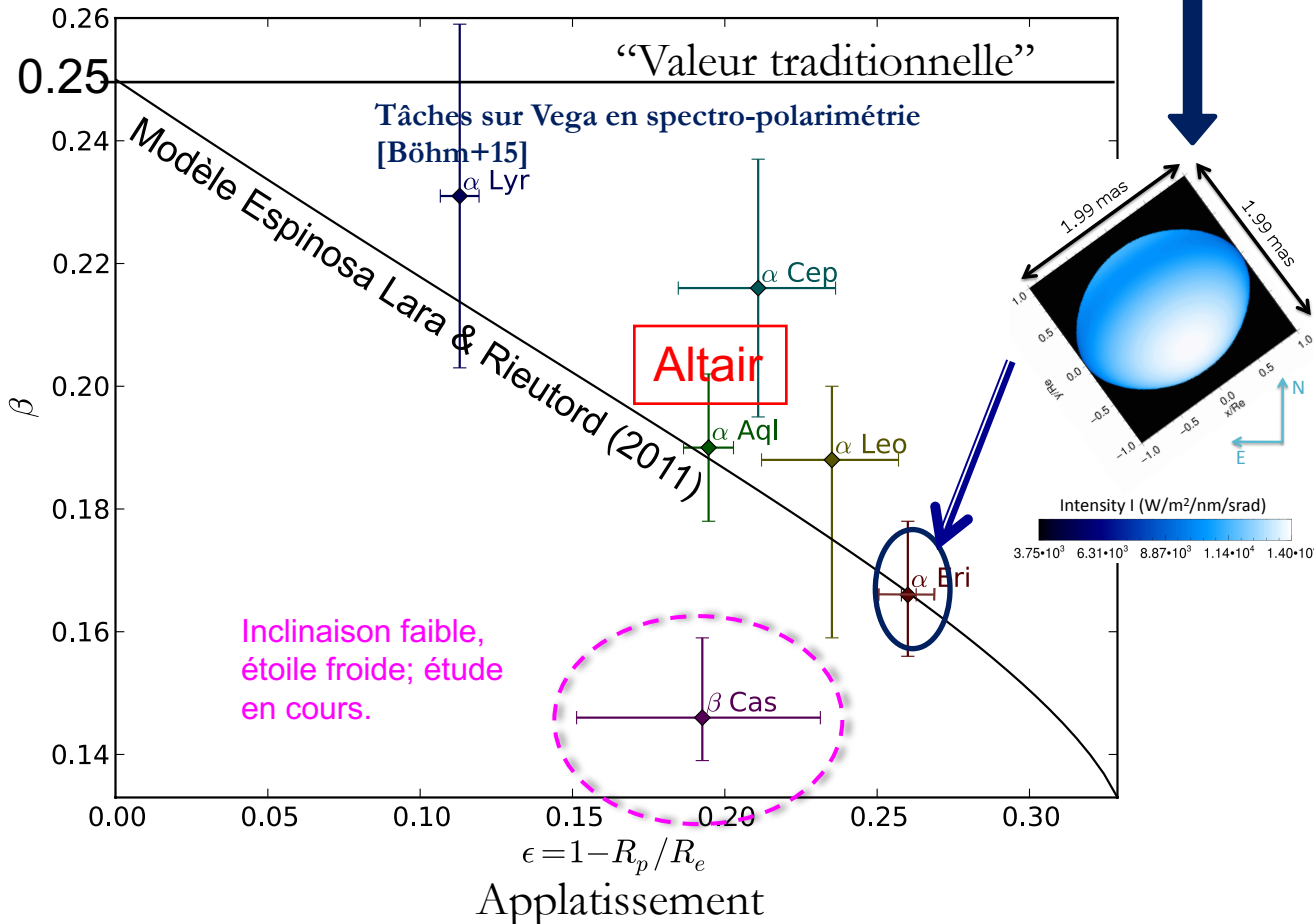


$\phi$  Per B1.5V avec VEGA/CHARA [Mourard+15]

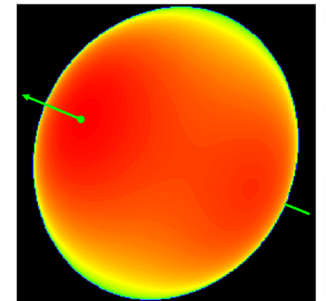
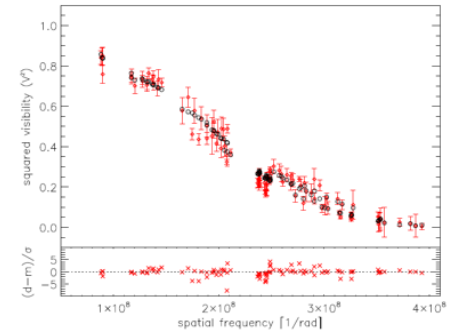
# L'assombrissement gravitationnel sur des Bn (paramètre $\beta$ )

Archenar (Be) avec Pionier  
(modèle CHARRON)  
[Domiciano+14]

ANR M. Rieutord: ESRR (Evolution Stellaire en Rotation Rapide)



$\delta$  Per B5III (Be) avec VEGA/CHARA [Challouf+15]

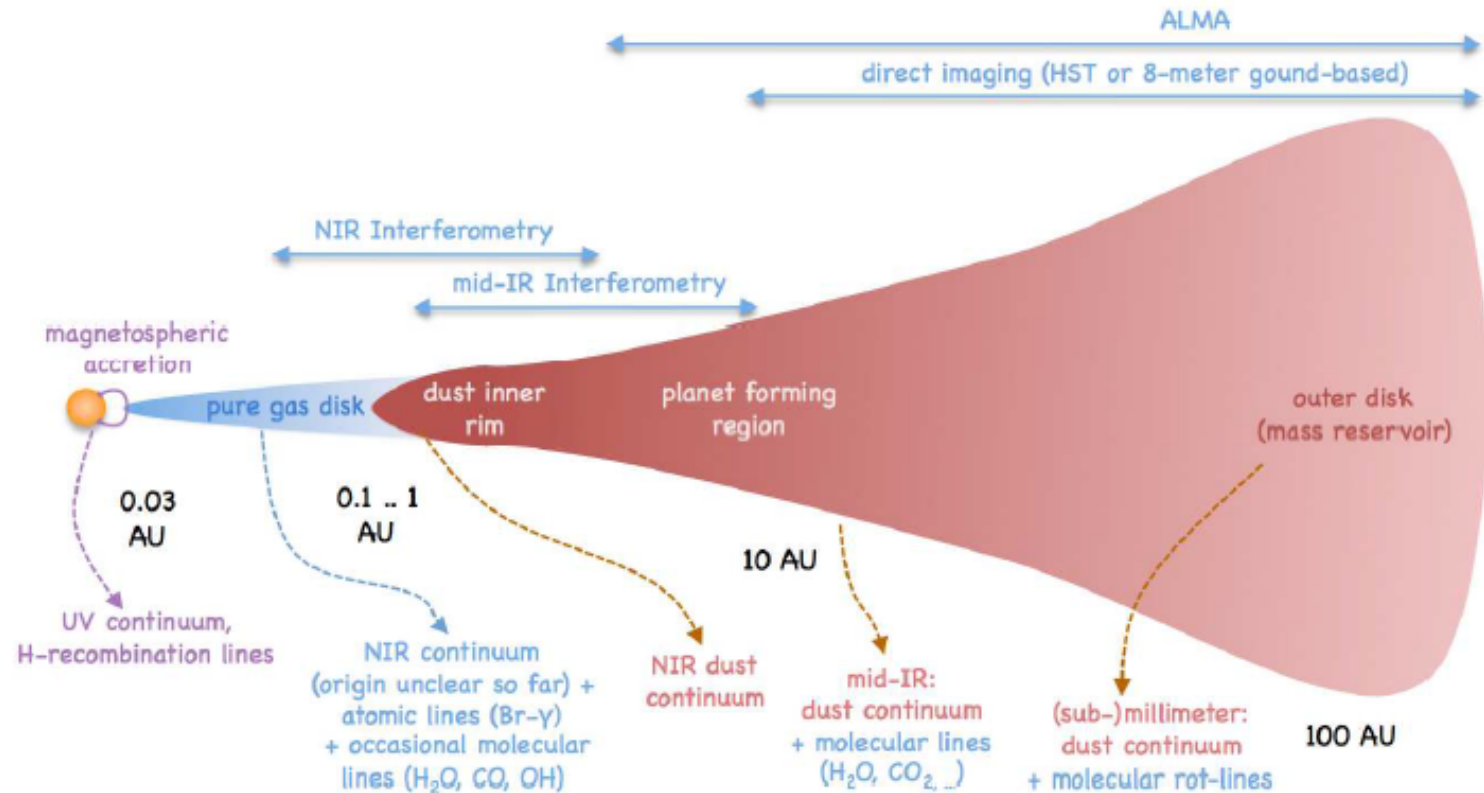


$\theta = 0.544 \pm 0.007$  mas  
Aplatissement de  $1.121 \pm 0.013$   
57% de la vitesse critique

# Origines

## Structure d'un disque proto-planétaire !

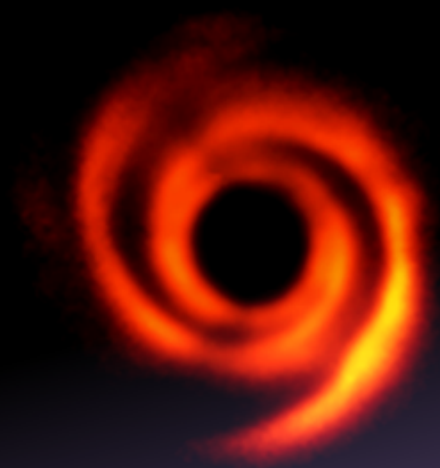
*[cf. présentations d'A. Mérand et F. Ménard]*



**NB: AB Aur (YSO) avec VEGA/CHARA**  
**[Perraut+17]**

# Ecole Evry Schatzman 2017 du PNP8

## Imagerie à Haute Résolution Angulaire des Surfaces Stellaires et de leur Environnement Proche



### Comité Scientifique

N. Nardetto (OCA, chair)  
J. Lebreton (LESIA)  
É. Lagarde (OCA)  
A. Meilland (OCA)

### Comité d'Organisation

N. Nardetto (OCA, chair)  
J. Lebreton (LESIA)  
É. Lagarde (OCA)  
A. Meilland (OCA)  
I. Lapasset (OCA)

Roscoff, 24-29 Septembre 2017

<https://ees2017.sciencesconf.org>

### Format:

- ~40 participants (60% d'étudiants)
- Cours d'imagerie, interférométrie optique & radio (techniques & objets astrophysiques)
- TP : SPHERE & outils du JMMC (+ Gravity)

### Objectifs:

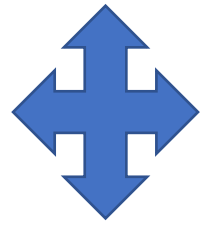
- Recherche de synergies au sein des communautés optique/radio, planétologie/physique stellaire, concepteurs/utilisateurs de la HRA, interférométrie/imagerie
- Objectif de rendre la HRA plus abordable aux non spécialistes (soutien du JMMC)

# JMMC

Structure et  
évolution stellaires  
(paramètres fondamentaux)

# Synergie entre l'interférométrie (+ *Gaia*) et l'astérosismologie !

HRA



Astérosismologie

[slide R. Ligi]

Relations Brillance de surface  
- couleur

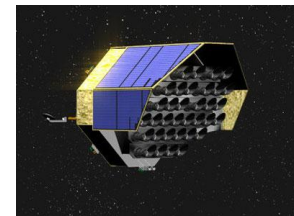
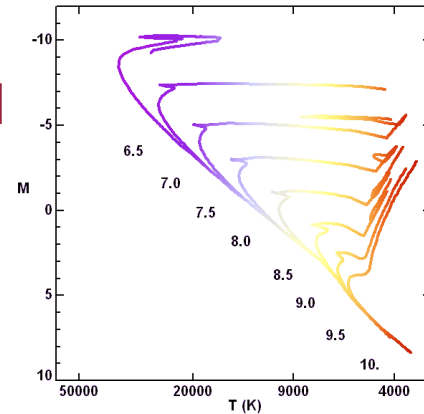
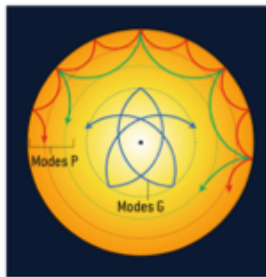
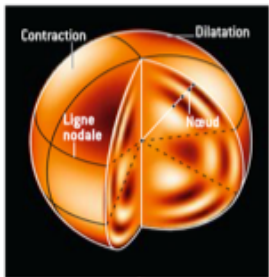
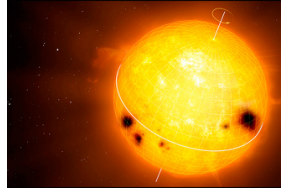
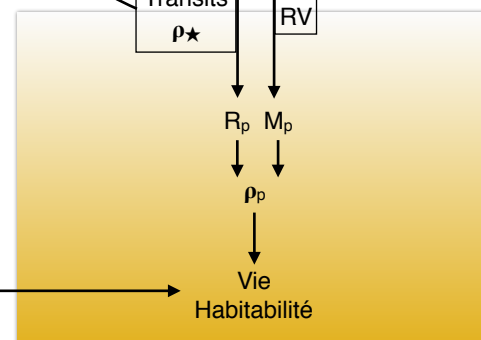
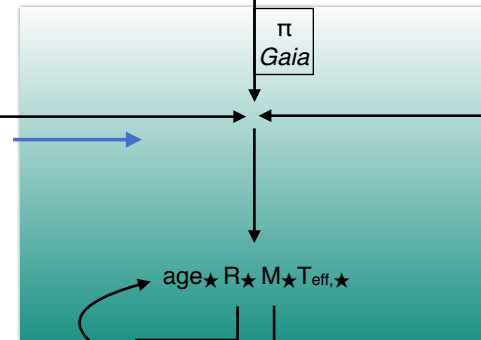
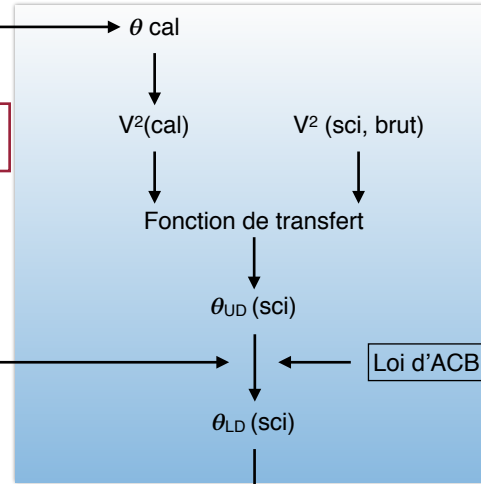
Activité  
Vent  
Environnement  
Taches  
Granulation

Astérosismologie

Modèles d'atmosphère  
( $T_{\text{eff}}$ ,  $\log(g)$ ,  $Z$ ,  $v_t$ )

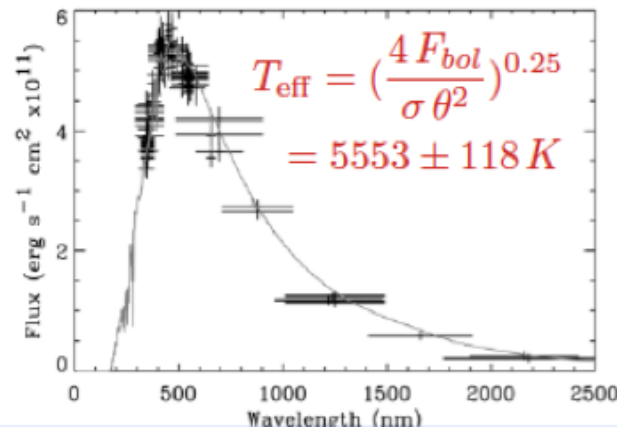
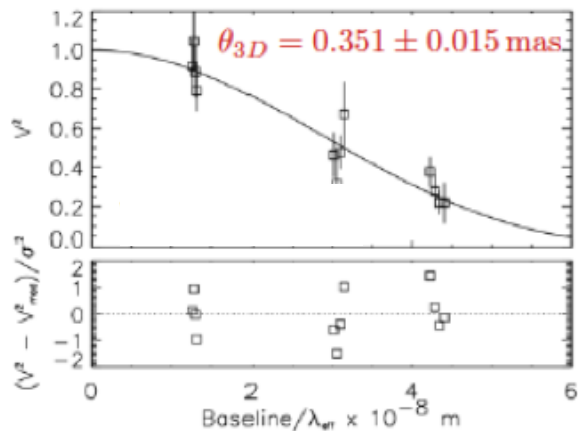
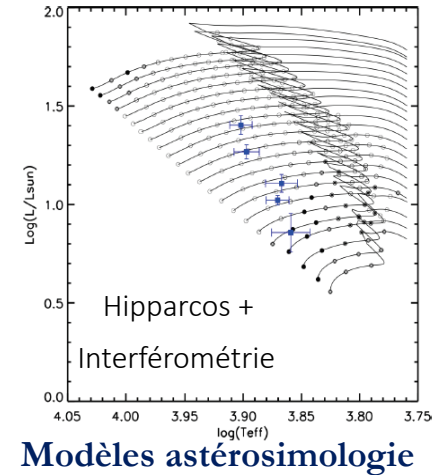
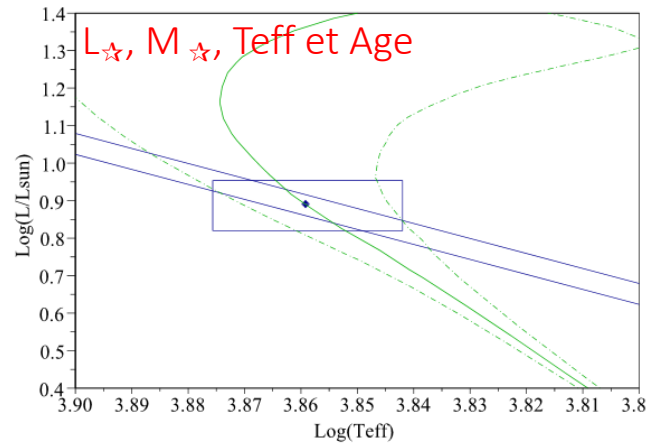
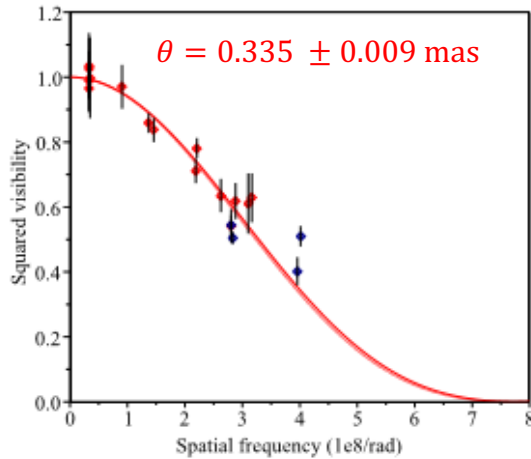
Modèles d'évolution

Modèles planétaires



# Synergie entre l'interférométrie (+ *Gaia*) et l'astérosismologie. L'apport de VEGA/CHARA

roAp HD 24712,  
VEGA/CHARA  
[Perraut+16]



HD140283

[Creevey+15]

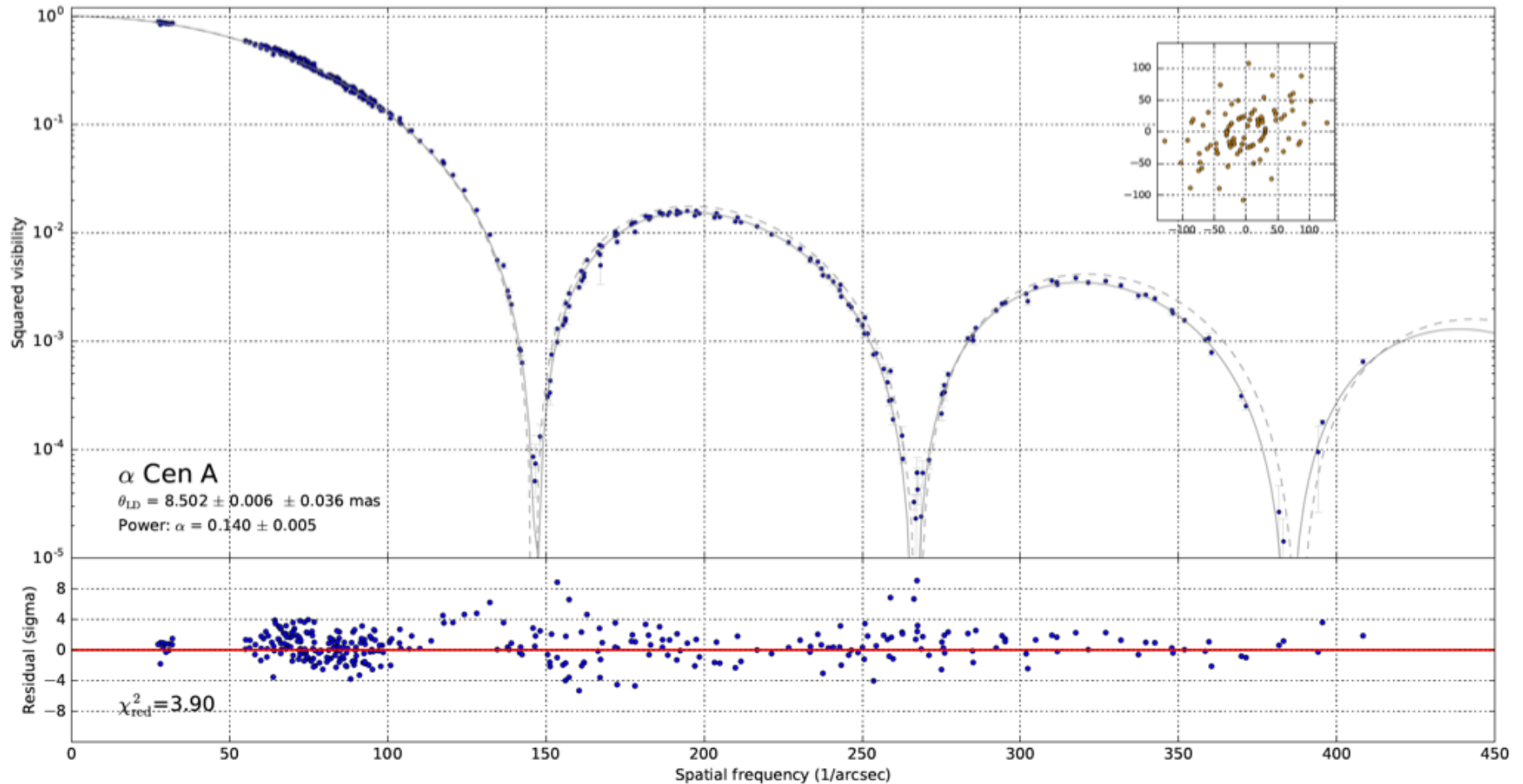
3D hydro atmosphere  
modeling + CESAM2k

$M = 0.800 \pm 0.015 M_{\odot}$ ,  
Age =  $12.1 \pm 0.9$  Gyr  
Logg =  $3.65 \pm 0.05$ ,  
 $\alpha = 1.0$  ( $\alpha_{\odot} = 2.0$ )



# La mesure d'assombrissement centre-bord par interférométrie ...

$\alpha$  Cen A & B, Pionier/VLTI  
[Kervella+17]



... c'est important pour l'étude des exo-atmosphères avec PLATO  
[e.g. Parmentier+16]

*[cf. présentation D. Mourard sur les liens  
Interférométrie/SBCR/PLATO/Distances des binaires à éclipses]*

# Imagerie Doppler des Surfaces Stellaires et filtrage de l'activité

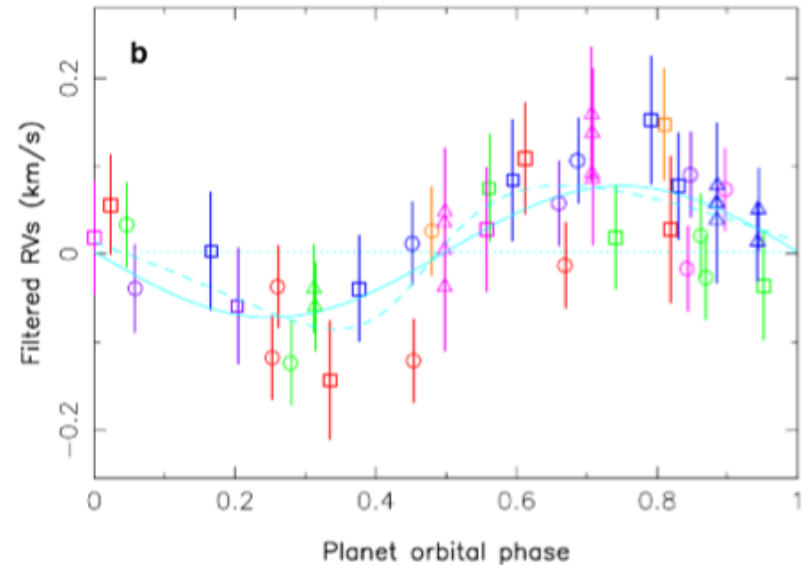
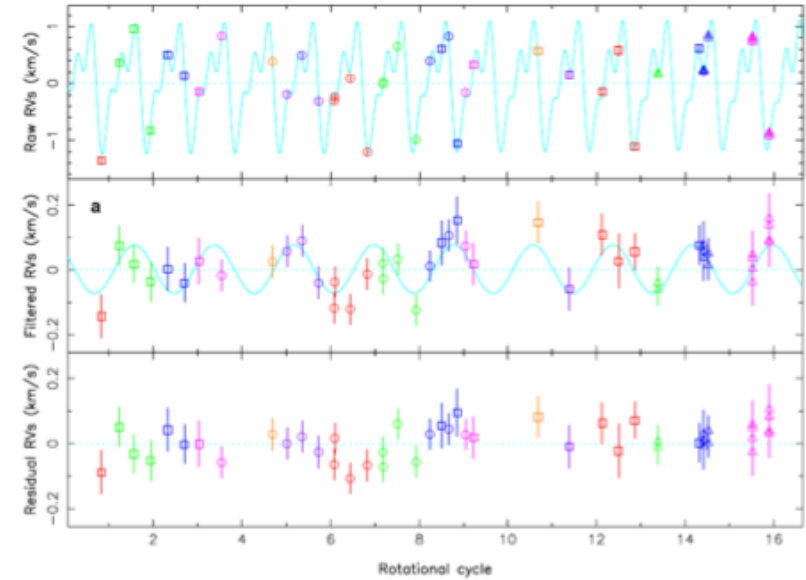
- Modélisation DI/ZDI
  - Spectropolarimétrie : mesure précise  $P_{\text{rot}}$
  - Imagerie Doppler :
  - taches  $\rightarrow$  jitter RV
  - *E. Hébrard et al. (2016)*
- Ajustement direct paramètres planètes

*Petit et al. (2015)*

- Détection Jupiter chaud !

*Donati et al. (2016)*

*Yu et al. (2017)*



Anatomie/Imagerie/Cartographie  
des surfaces et intérieurs stellaires  
et de leur environnement proche

*Spectro*

*Polarimétrie*

(ESPaDOnS, Narval,  
SPIRou, HARPSpol+,...)

*cf. Présentation  
A. Lèbre !*

*HRA*

(VLTI: Pionier,  
Gravity, MATISSE,  
CHARA: MIRCx,  
Mystic, ALMA,  
NOEMA...)

*Imagerie directe*

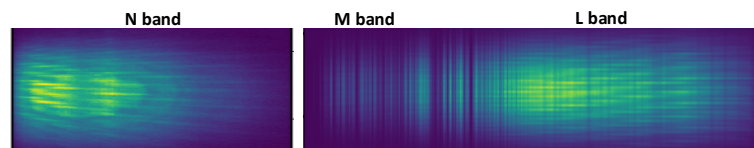
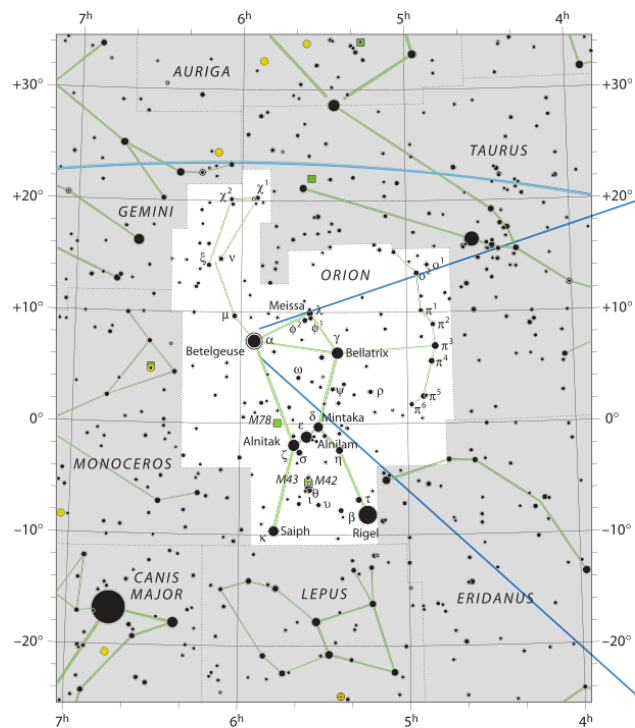
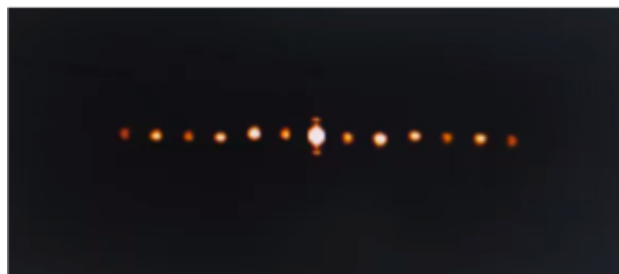
(SPHERE, SPHERE+,  
SPHERE+CRIRES,  
upgrade VISIR, ELT, ...)

*Astérosismologie*

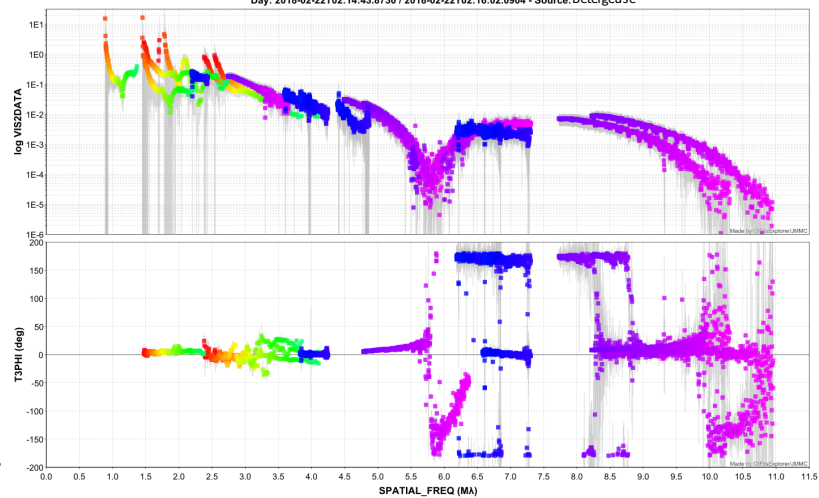
(CoRoT, Kepler, TESS, PLATO, ...)

*[Perspectives ASHRA, cf. présentation D. Mouillet]*

# La première «étoile» de MATISSE



VLT - MATISSE [2.5205  $\mu\text{m}$  - 5.324  $\mu\text{m}$ ] / [7.9058  $\mu\text{m}$  - 13.1234  $\mu\text{m}$ ] - A0-B2-C1-D0  
Day: 2018-02-22T02:14:43.8730 / 2018-02-22T02:16:02.0904 - Source: Betelgeuse



# Prospective: éléments de réflexion/discussion

- . **Interférométrie/imagerie (OA-Haut-Contraste)**: une seule et même chose
- . Renforcer les approches multi longueur d'onde: visible, IR, radio,...
- . Pousser la haute résolution spectrale: images polychromatiques, cinématique
- . Suivi temporelle !
- . Pousser l'interférométrie visible, plus de résolution angulaire, plus de contraste sur les phénomènes physiques [cf. white book P. Stee et al.] sur CHARA (SPICA) et sur le VLTI (VLT-iVis)
- . Augmenter l'échantillon d'objets observés (proposition SPICA de D. Mourard). Lien PLATO.
- . ASHRA: Plus d'ouvertures, bases. ? Quelle direction ?
  
- . Forte synergie **interférométrie/astérosismologie (PLATO) + planétologie (Rp)**
  
- . Nouveau lien très intéressant entre **spectro-polarimétrie, interférométrie, imagerie directe** [présentation A. Lèbre]
  
- . Besoin de progrès sur les modèles... gaz/poussière
- . Approche globale pulsation/rotation: photométrie, spectroscopie, interférométrie, etc... (cf. A. Mérand).

## Messages ASHRA:

- . **Exploitation optimale des investissements HRA pour les stellaires**
- . **Instruments d'avenir: priorités, messages ?**
- . Exploitation VLTI (Gravity, MATISSE) & CHARA (VEGA, JOUFlu, ...)
- . Lien utilisateurs: JMMC => pôle VLTI et SPHERE-DC
- . Priorités: interférométrie, OA & ELT, SPHERE upgrade
- => Articulation PNPS/ASHRA !**

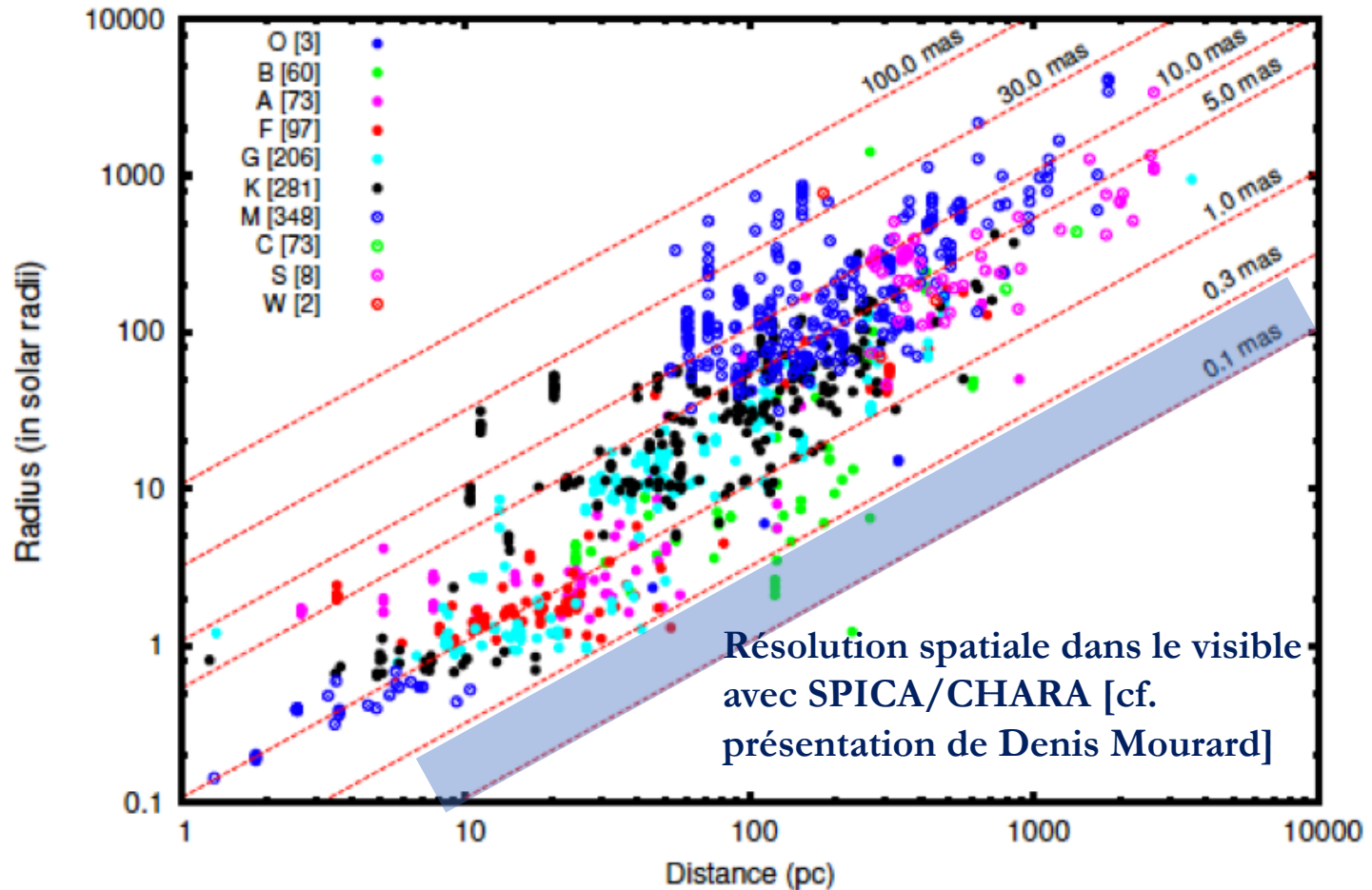
Remarque: problème des ITs dans les laboratoires.





## De l'importance des relations brillance de surface

- 1/ ~1150 mesures des diamètres angulaires jusqu'à présent (Duvert+16; 2016yCat.2345...0D)
- 2/ Ces mesures sont utilisées pour étalonner les relation brillance de surface: environ 20 papiers de reference dans la littérature, mais relations peu précises (précoces) ou inexactes (tardives)
- 3/ Un outil précieux à améliorer pour PLATO, pour les distances (binaires à éclipses), ...



Antares SGR  
Pionier/VLTI  
[Montargès+17]

