

Journées VEGAS

Quelques éléments de prospective
sur l'étude des étoiles massives
en interférométrie visible

Anthony Meilland

featuring Ph. Stee, F. Millour, O. Chesneau, J.-B. Lebouquin & Karine Perraut

Thèmes abordés dans cette Présentation

Surfaces d'étoiles

Mesure de diamètres
Rotation rapide et effets induits
Activité stellaire (Pulsations, magnétisme...)

Environnements circumstellaires

Géométrie et cinématique
Caractérisation des flux de masse
Interface surface/environnement

Multiplicité des étoiles massives

Caractérisation des systèmes multiples
Interactions entre les composantes

Quelques éléments de prospective sur l'étude des étoiles massives en interférométrie visible

I. Quelques mots sur VEGA

II Prospective VEGAS sur les étoiles massives

1. Surfaces d'étoiles
2. Environnements circumstellaires
3. Multiplicité des étoiles massives

III. Quelles spécifications pour VEGAS ?

I. Quelques mots sur VEGA...



Ce qui a déjà été fait dans le visible avec VEGA

11 articles concernant des étoiles chaudes/massives sur un total de 16 articles VEGA

9 Articles sur la géométrie et la cinématique des environnements, principalement H α (AB Aur, Deneb & Rigel, 48 Per & ψ Per, β Lyr & ν Sgr, δ Sco, γ Cas, ε Aur, HD 200775)



1 Article sur une mesure de diamètre (γ Equ)

1 Article sur la géométrie dans le continu (δ Cep)

Les programmes en cours avec VEGA

concernant des étoiles massives et/ou chaudes

Pour 2013 : 10 Programmes (50% des programmes VEGA)

- 6 programmes sur les environnements circumstellaires (Be – Herbig – B[e] ...)
- 4 programmes concernant les surfaces d'étoiles (YHG – étoiles BA – Ap – Bn/Be)
- 3 programmes sur la multiplicité des étoiles massives (β Lyr – θ 1 Ori C – ξ Tau)



Observations VEGA en « remote » à Nice

Limitations de l'instrument VEGA

Magnitudes limites

V=7 (MR)	V=3.5 (HR)
B2V à 1000 pc	B2V à 200 pc
$D_* = 0.05$ mas	$D_* = 0.25$ mas
$D_{\text{env}} = 0.5 - 1$ mas	$D_{\text{env}} = 2.5 - 5$ mas

Couverture du plan (u,v)

Résolution maximale $D = 0.5$ mas ($B = 330$ m)
limitée pour les objets étendus (> 2 mas)
Pas de triplet compact sur CHARA
Nulle pour $D > 5.5$ mas ($B = 30$ m)

VEGA sur CHARA

Mal optimisé pour l'obs des environnements circumstellaires

Problèmes liés au détecteur

« Ecrasement » des spectres
Saturation pour les objets brillants
Filtres \Leftrightarrow perte de SNR

Autres limitations

SNR faible dans le bleu
Pas de clôture de phase



II. Prospective VEGAS sur les étoiles massives

1. Surfaces d'étoiles

Surfaces d'étoiles

Mesures de diamètres

Pourquoi?

- Améliorer les modèles d'évolution stellaire des étoiles massives
- Calibrer les relations surface-brillance (distance dans l'univers)

Problème de Magnitude limite?

T. spec.	Cl. Lum.	mV=5	mV=6	mV=7
B	IV-V	260	683	1460
	III	76	185	383
	I-II	57	165	549
O	IV-V	5	13	18
	III	4	5	8
	I-II	4	11	21

NON !!!

Problème de Résolution limite?

Pour une B2V	mV=5	mV=6	mV=7
Distance	400pc	600pc	1000pc
Diamètre	0.13mas	0.08mas	0.05mas
B (V=0.9 λ =0.6)	270m	440m	700m
B (V=0.5 λ =0.6)	660m	1080m	1730m
B (V=0.9 λ =0.4)	180m	300m	470m
B (V=0.5 λ =0.4)	440m	720m	1150m

OUI !!!

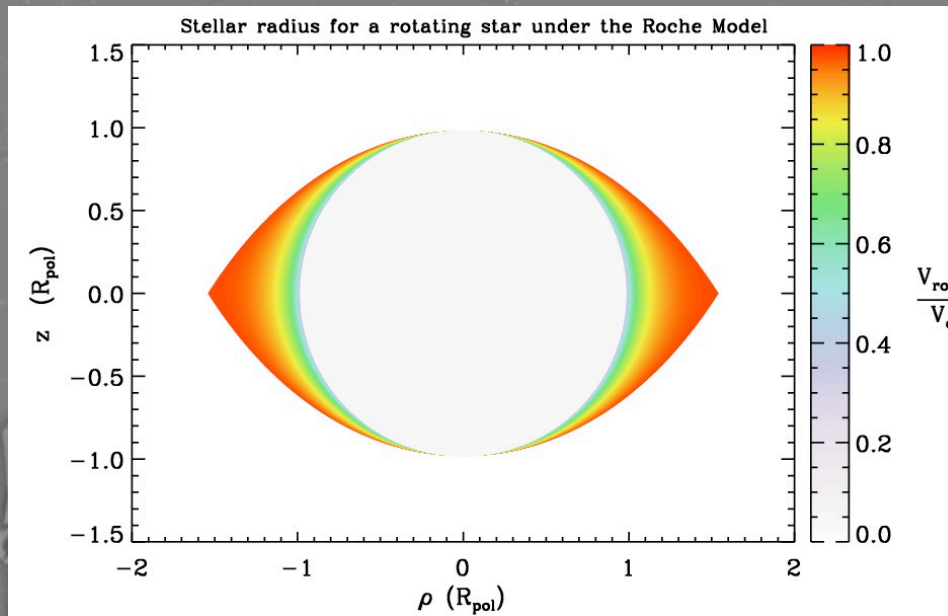
Solutions

bases plus longues
Longueur d'onde plus petite
Précision plus grande

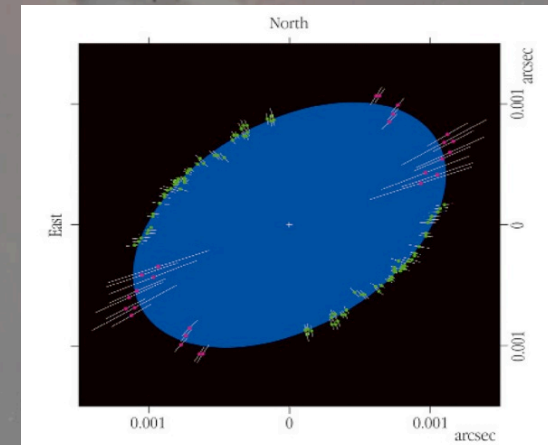
Surfaces d'étoiles

Rotation rapide et effets induits

Déformation de la photosphère



Ex : Aplatissement Achernar



Domiciano de Souza et al. (2003)

- Mesures dans le continu
- Pas de résolution spectrale nécessaire
- Pas de nécessité de bases résolvantes
- Visibilité $< 1 - 4 \alpha_V$ ($V < 0.8$)
- Maximum de bases
- Nombreuses mesures

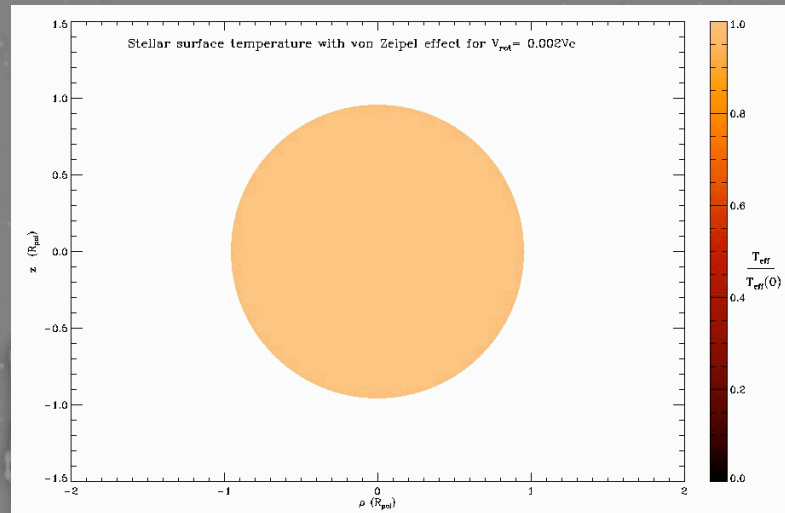
Cl. spec.	Diam.	Dist max	Nb *
B9 IV-V	2.7 Ro	150 pc	131
B5 IV-V	3.9 Ro	210 pc	33
B2 IV-V	5.6 Ro	300 pc	51
O9 IV-V	7.9 Ro	450 pc	96

Obs sur CHARA (B=330m pour $V < 0.8 \Leftrightarrow D > 0.15 \text{ mas}$)

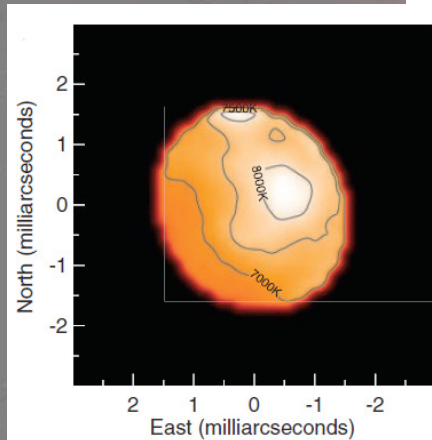
Surfaces d'étoiles

Rotation rapide et effets induits

Assombrissement gravitationnel

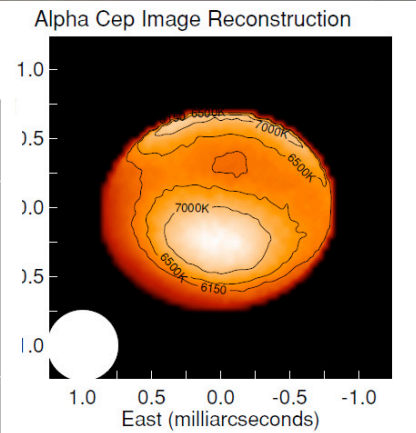


Altaïr



Monnier et al. (2007)

Alpha Cep



Zhao et al. (2009)

- Mesures dans le continu ou dans les raies
- Pas de résolution spectrale nécessaire
- Bases résolvantes ($V \sim 0$)
- Second lobe de visibilité
- Maximum de bases
- Clôture de phase
- Reconstruction d'image + model-fitting

Cl. spec.	Diam.	Dist max	Nb *
B9 IV-V	2.7 Ro	50 pc	7
B5 IV-V	3.9 Ro	70 pc	2
B2 IV-V	5.6 Ro	100 pc	3
O9 IV-V	7.9 Ro	150 pc	1

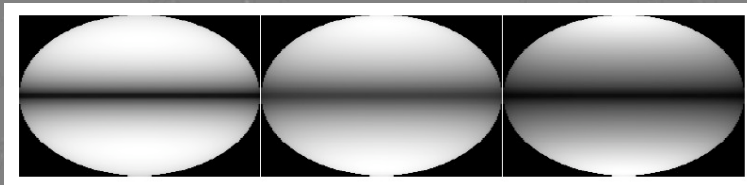
Obs sur CHARA (B=330m D>0.5mas)

Surfaces d'étoiles

Rotation rapide et effets induits

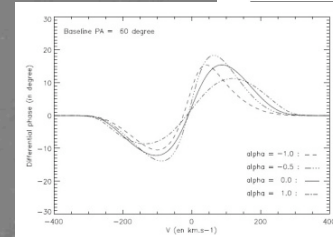
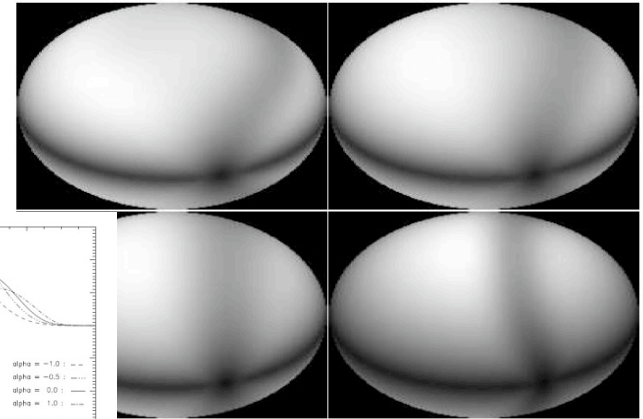
Effet de la rotation différentielle sur l'assombrissement gravitationnel

Dans le continu



Dégénérescence entre α et β

Dans des raies photosphériques



Nombreuses bases par objets
Précision sur la phase de quelques degrés

$$R_{\min} = 10000 \text{ (} R_{\text{opt}} = 20000 \text{)}$$

Limité par la résolution spatiale!

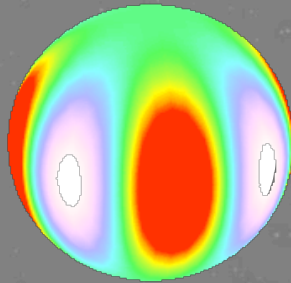
Cl. spec.	Diam.	Dist max	Nb *
B9 IV-V	2.7 Ro	50 pc	7
B5 IV-V	3.9 Ro	70 pc	2
B2 IV-V	5.6 Ro	100 pc	3
O9 IV-V	7.9 Ro	150 pc	1

Obs sur CHARA (B=330m D>0.5mas et mV<4)

Surfaces d'étoiles

Activité stellaire

Pulsations



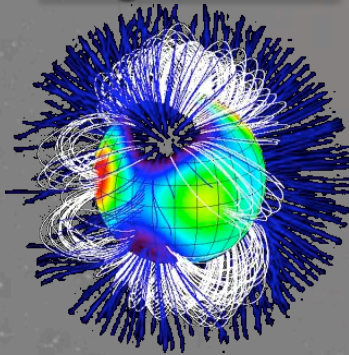
Importance supposée
des pulsations dans le
phénomènes Be

Mesure dans les raies
photosphériques

$S/N = 100$
 $R > 15000 \Leftrightarrow 20 \text{ km/s}$

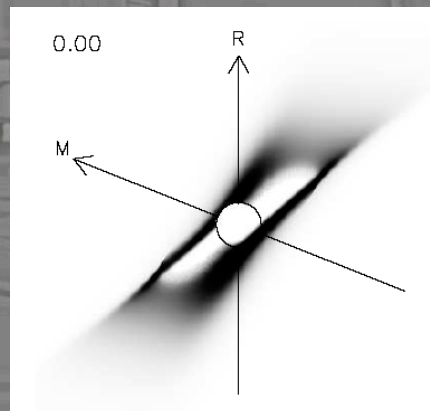
Mesure indirecte dans
les raies en émission

Magnétisme



Mesure directe ?

Mesure indirecte par
influence sur
l'environnement
circumstellaire



Tâches stellaires



Oui
Si couche
convective due à la
rotation

DéTECTABLE ?



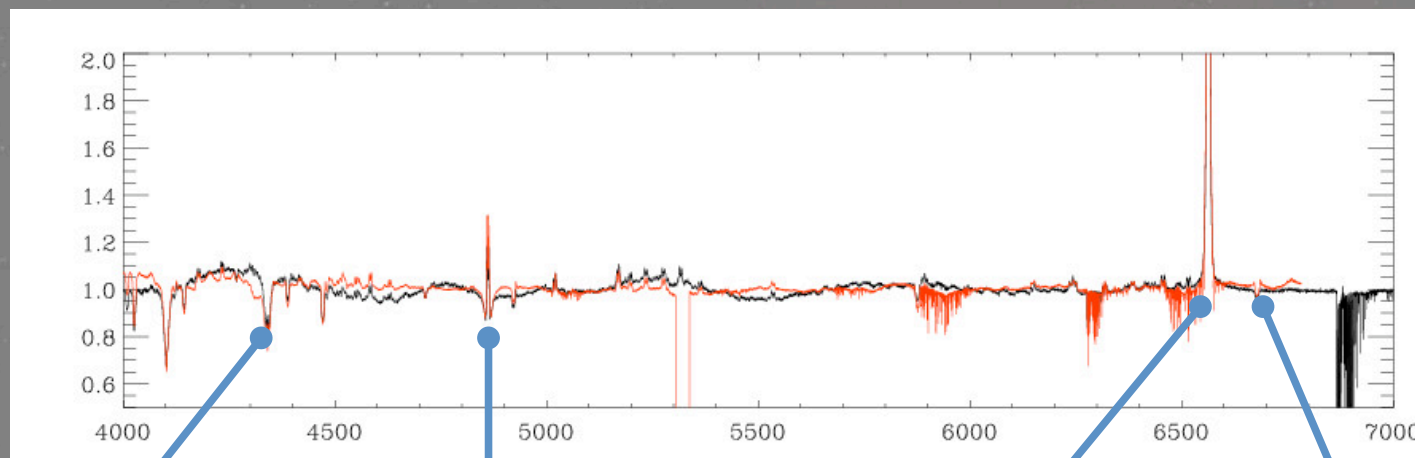
II. Prospective VEGAS sur les étoiles massives

1. Surfaces d'étoiles

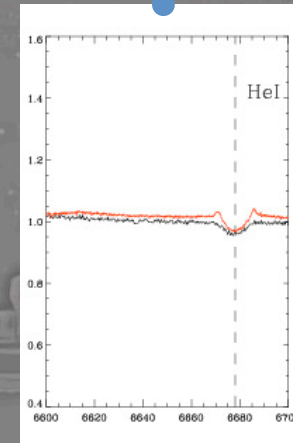
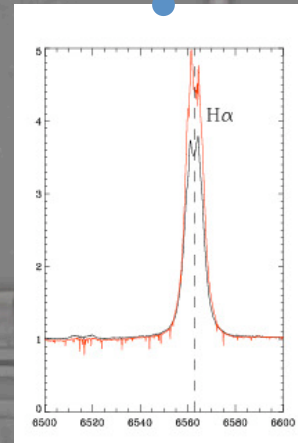
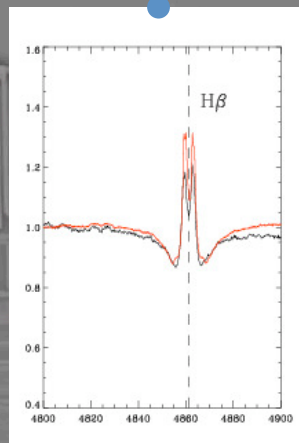
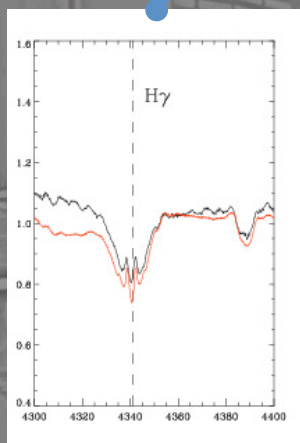
2. Environnements circumstellaires

Environnements circumstellaires

Sortir de $H\alpha$



Spectre visible de la Be classique Alpha Ara



Aller vers le bleu
Turbulence atmosphérique

Accès aux raies faibles
Précision <1% sur Vis. diff.

Environnements circumstellaires

Reconstruction d'image

Problèmes généraux:

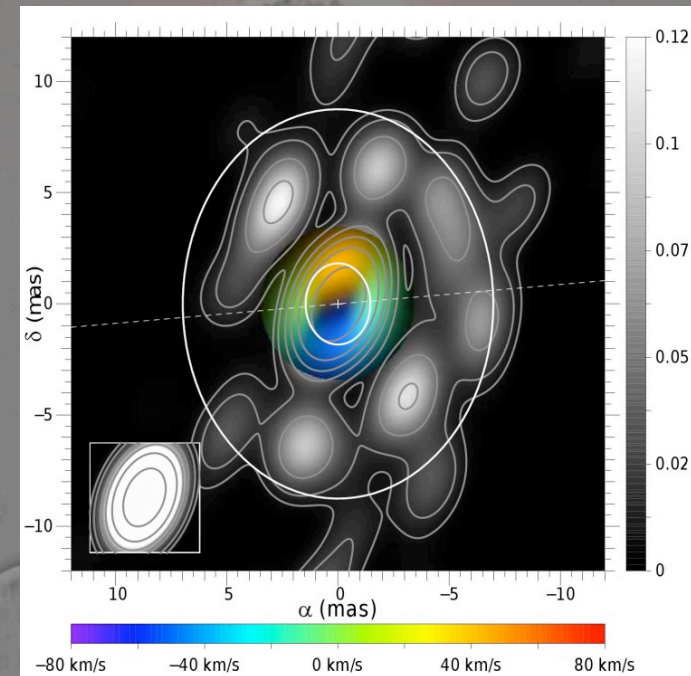
- Clôture de phase
- Faibles visibilités

Pour les EC des étoiles massives en V:

- Dans le continu :
Flux généralement dominé par l'étoile
Grande précision sur les mesures (1%)

- Dans des raies d'émission :
Continu peu résolu
« Auto-calibration »

HD62623 : 3 nuits avec AMBER



Millour et al. 2011

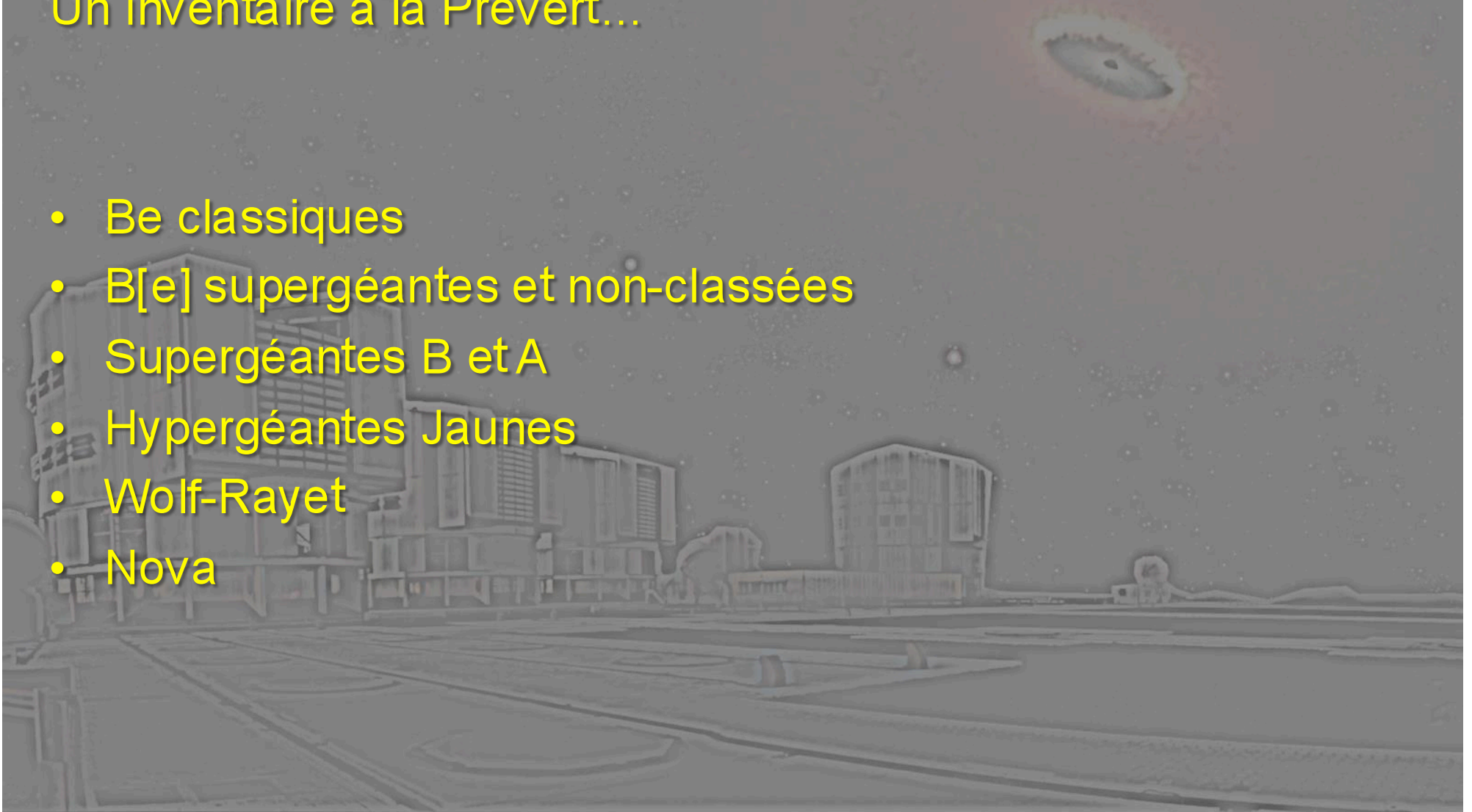
Nb de tel.	3T	4T	5T	6T	7T
Temps d'obs	3n	1.5n	1n	0.6n	0.4n

Environnements circumstellaires

De nombreux types d'objets

Un inventaire à la Prévert...

- Be classiques
- B[e] supergéantes et non-classées
- Supergéantes B et A
- Hypergéantes Jaunes
- Wolf-Rayet
- Nova



Environnements circumstellaires

Etoiles Be classiques

γ Cas

Objectifs :

- Déterminer la cinématique inter-raie
- Lien photosphère \leftrightarrow environnement
- Be-Shell \leftrightarrow $i \sim 90^\circ$ \leftrightarrow ouverture disque
- Polémique sur les vents polaires
- Etude Statistique
- Objets variables (Pulsation & Binarité)
- Modélisation : ionisation, Température, densité

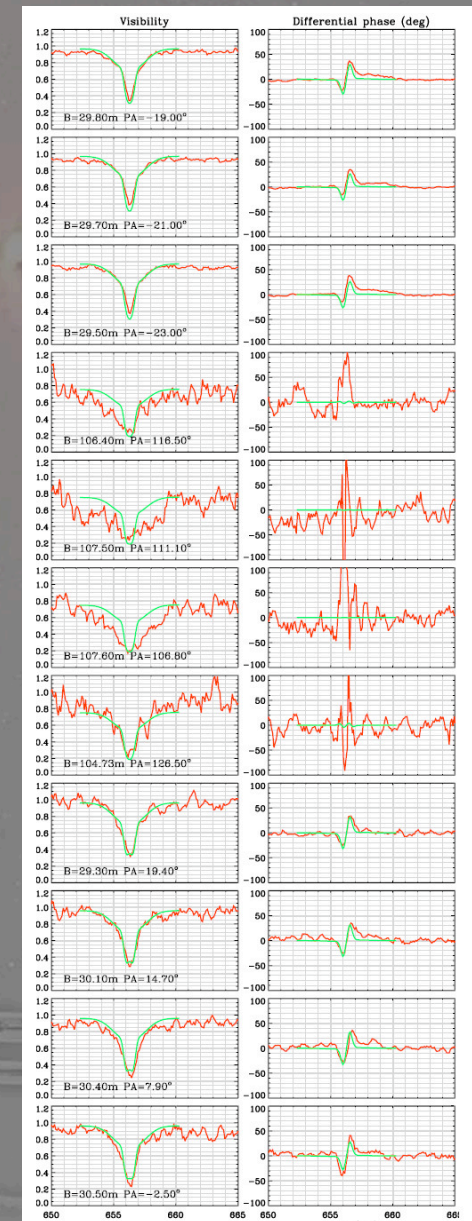
Besoins :

- $R_{\min} = 1500 \leftrightarrow 200 \text{ km/s}$
- $R_{\text{opt}} = 15000 \leftrightarrow 20 \text{ km/s}$
- Bases courtes (20-50m)
- Précision visibilité : 1-2%
- Visibilité faible (raie)

Pas de problème de magnitude limite !

mV	3	4	5	6
Nb d'étoiles	11	23	59	102

Frémat et al. 2005



Stee et al. 2012

Environnements circumstellaires

Etoiles B[e]

Objectifs :

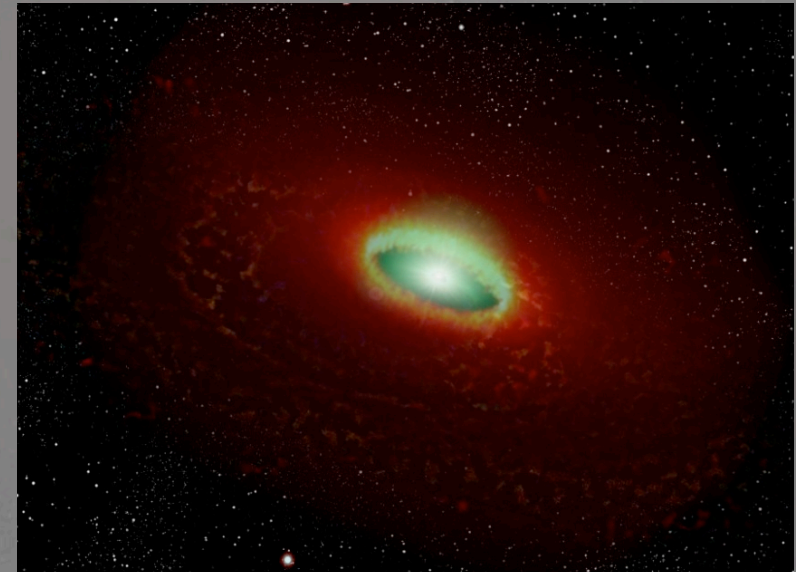
- Contraindre les zones de formation des raies
- Déterminer la cinématique (disques ou vents)
- Classification des objets (jeunes/évolués/binaires)
- Etude de la variabilité (suivi en imagerie)

Besoins :

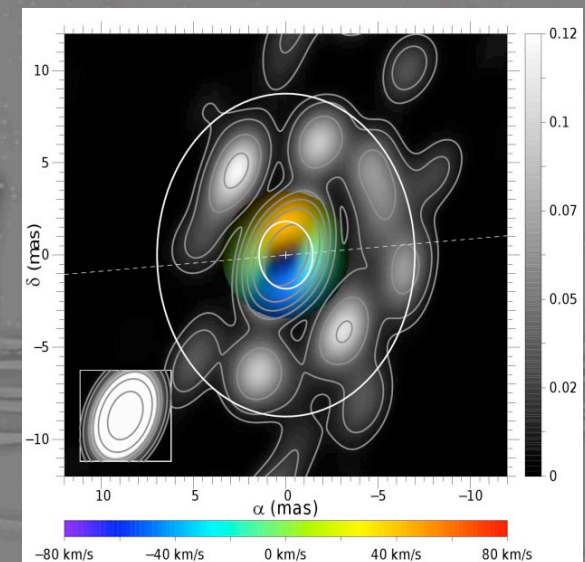
- $R_{\min} = 1500 \Leftrightarrow 200 \text{ km/s}$
- $R_{\text{opt}} = 15000 \Leftrightarrow 20 \text{ km/s}$
- Objets relativement faible en V

mV	5	7	9
Nb d'étoiles	1	4	10

Recherche rapide et non exhaustive !



HD62623



Millour et al. 2011

Environnements circumstellaires

Supergéantes B et A

Objectifs :

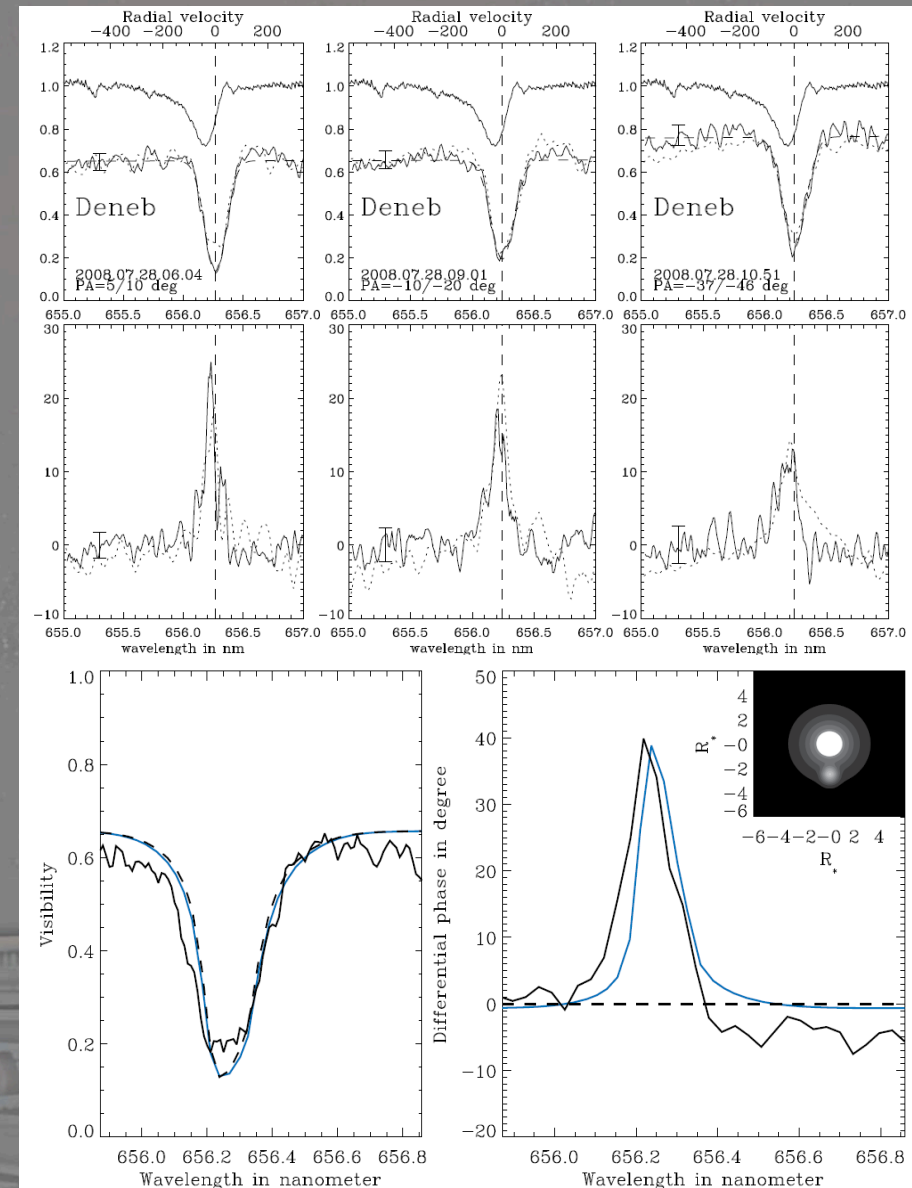
- Mesures de diamètres
- Extension dans $H\alpha$ (et autres raies)
- Perte de masse
- **Asymétries et évolution temporelle**

Problème :

Trop résolues avec CHARA/VEGA!

Solutions :

- Étudier des étoiles plus lointaines
- Avoir des bases plus courtes



Chesneau et al. 2010

Environnements circumstellaires

Hyper-géantes Jaunes

Objectif :

- Contraindre la géométrie dans le continu
- Etudier l'atmosphère instable dans différentes raies
- Contraindre la rotation de la (pseudo-photosphère)
- Détecter des compagnons et séparer les spectres

Besoins :

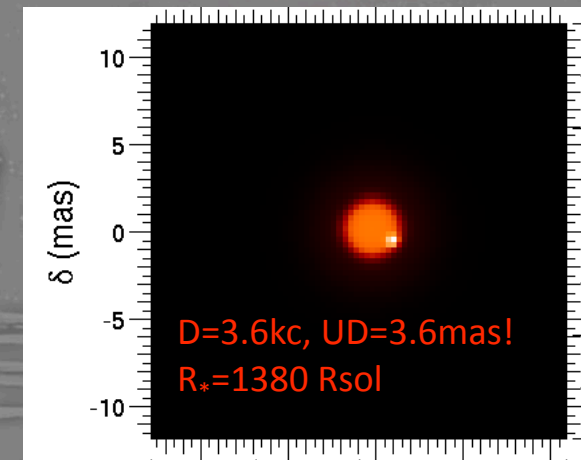
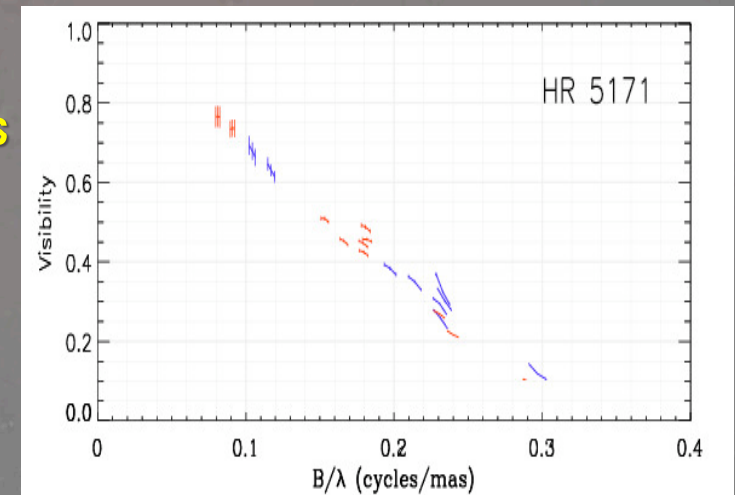
- $R = 30000 \Leftrightarrow 10\text{km/s}$
- $mV = 5$ (8)

Au moins deux cibles identifiées (hémisphère Nord):

- ρ Cas
- HR 8752

+ 2 objets $mV < 8$

+ 5 hémisphère Sud



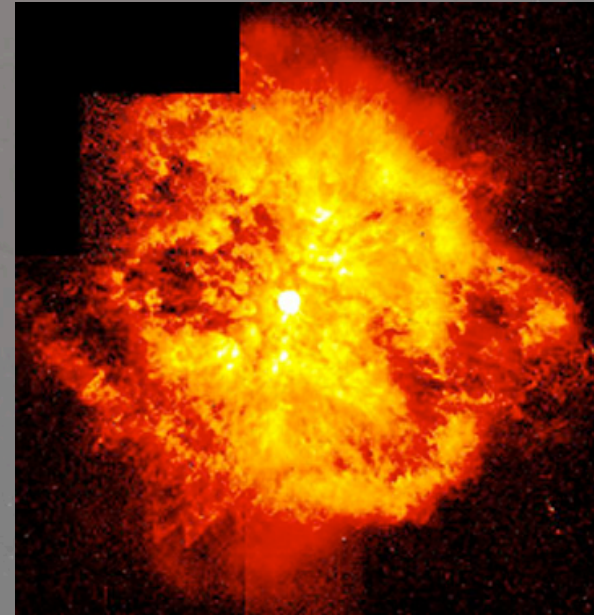
Chesneau et al. (en préparation)

Environnements circumstellaires

Wolf-Rayet

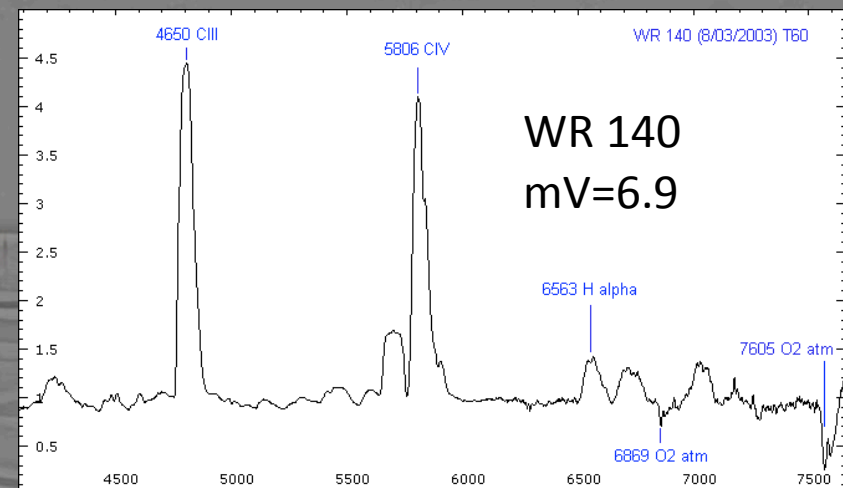
Objectifs :

- Extension dans différentes raies
- Sonder la structure d'ionisation
- Modéliser la perte de masse
(Hillier et Dessart)
- Etudier la binarité



Besoin :

- Raies larges $\Leftrightarrow R = 1500 \Leftrightarrow 200 \text{ km/s}$
- Etoiles faibles dans le visible ($mV = 8$)
- Nombreuses raies très brillantes



Environnements circumstellaires

Nova

T Pyx observée avec AMBER

- Objets brillants pendant un courte période
- Fortes raies en émission
- Evolution rapide de l'environnement
- Environnement fortement asymétriques

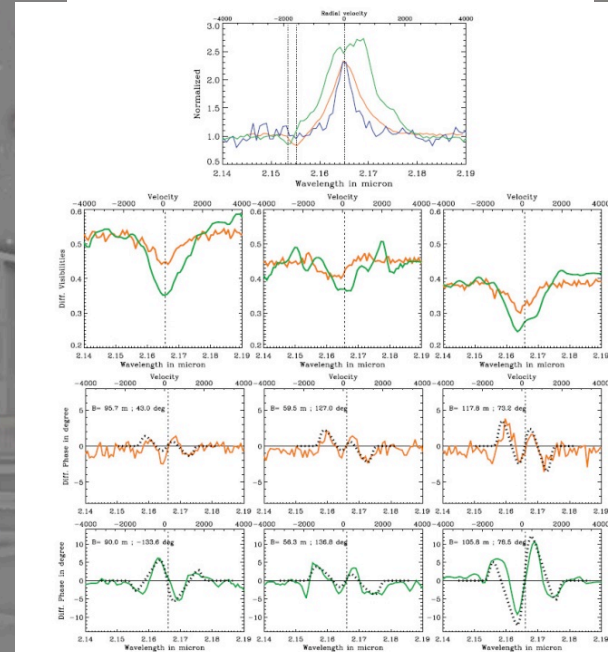
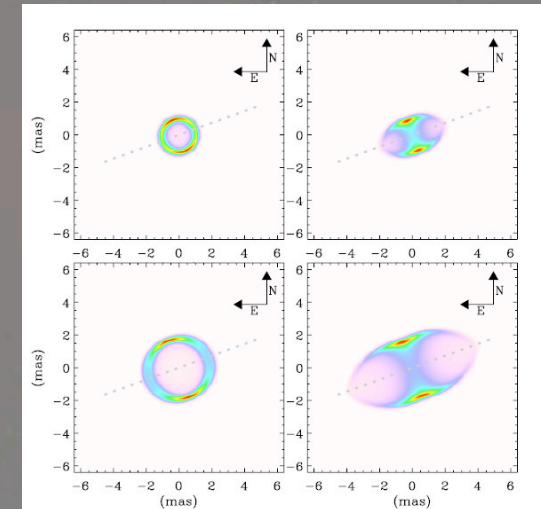
Réactivité + nombreuses bases \Leftrightarrow spectro-imagerie

Résolution nécessaire : au moins 1500 \Leftrightarrow 200km/s

Magnitude : en 37 ans

- 13 nova avec $m_V < 6$
- 4 nova avec $m_V < 4$

$m_V = 8 \Leftrightarrow$ 1 nova / par an pour VEGAS



Chesneau et al. 2011



II. Prospective VEGAS sur les étoiles massives

1. Surfaces d'étoiles
2. Environnements circumstellaires
3. Multiplicité des étoiles massives

Multiplicité des étoiles massives

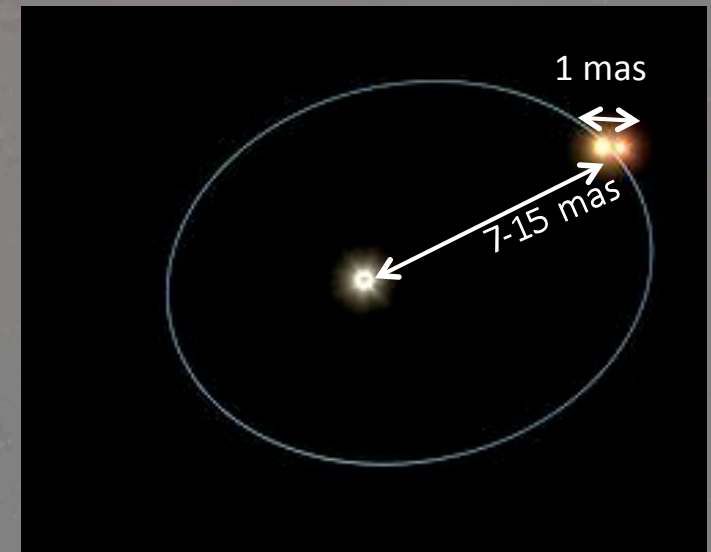
Caractérisation des systèmes multiples

Pourquoi ?

- Détermination des masses des composantes
- Contraintes sur la formation des étoiles massives ?

Comment ?

- Nécessite des bases longues et courtes simultanément
=> Intérêt de l'imagerie
- « Super-synthèse » grâce à la résolution spectrale



Système triple hiérarchique ξ Tau
Orbite 7 et 145 jours

Nombreuses cibles potentielles jusqu'à $V = 7$

Multiplicité des étoiles massives

Interaction entre les composantes

Be-binaires X : Prototype β Lyr

- $D = 1$ mas
- $T = 12.9$ jours

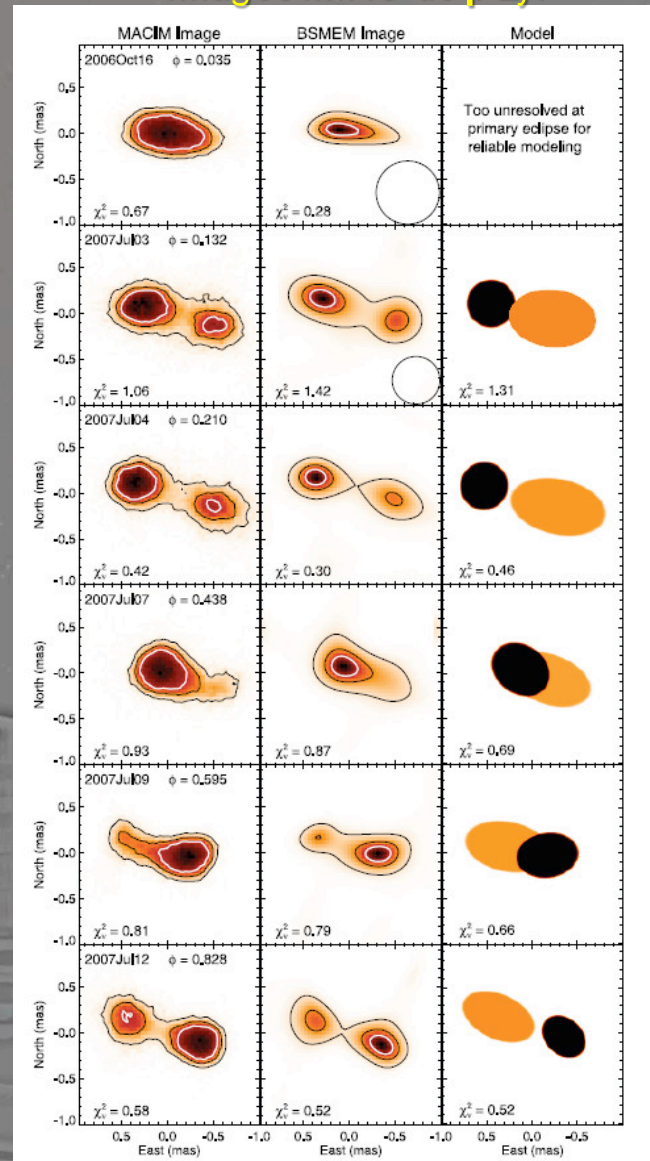
Parfait pour imageur visible avec 300m de base
Premières études VEGA convaincante dans les raies
Premières images avec MIRC

Imagerie Continu + Raies ($H\alpha$, $H\beta$ et HeI)

- Déformation du compagnon
- Répartition spatiale du gaz ionisé
- Cinématique du gaz ionisé
- conditions physiques dans l'environnement (T, ρ, n_i)
- Contraintes sur les transferts de masses

D'autres objets similaires accessibles

Images MIRC de β Lyr



Zhao et al. 2008

III. Quelles spécifications pour VEGAS ?



Quelles spécifications pour VEGAS?

Modes spectraux : 2, 3 ou 4

- | | | | |
|-------|-----------------|---------------|---------------------------------------|
| • HR1 | : R=30000-40000 | ⇔ 7-10 km/s | ⇔ Pulsations, rotation supergéantes |
| • HR2 | : R=10000-15000 | ⇔ 20-30 km/s | ⇔ Rotation rapides, disques et vents |
| • MR | : R=2000-5000 | ⇔ 60-150 km/s | ⇔ Wolf-Rayet, spectro EC faibles |
| • LR | : R<500 | ⇔ X | ⇔ Diamètres d'étoiles, sources rouges |

Sensibilité :

- mV = 5 pour HR1
- mV = 7 pour HR2
- mV = 9 pour MR
- mV = ? LR

Précision sur les mesures :

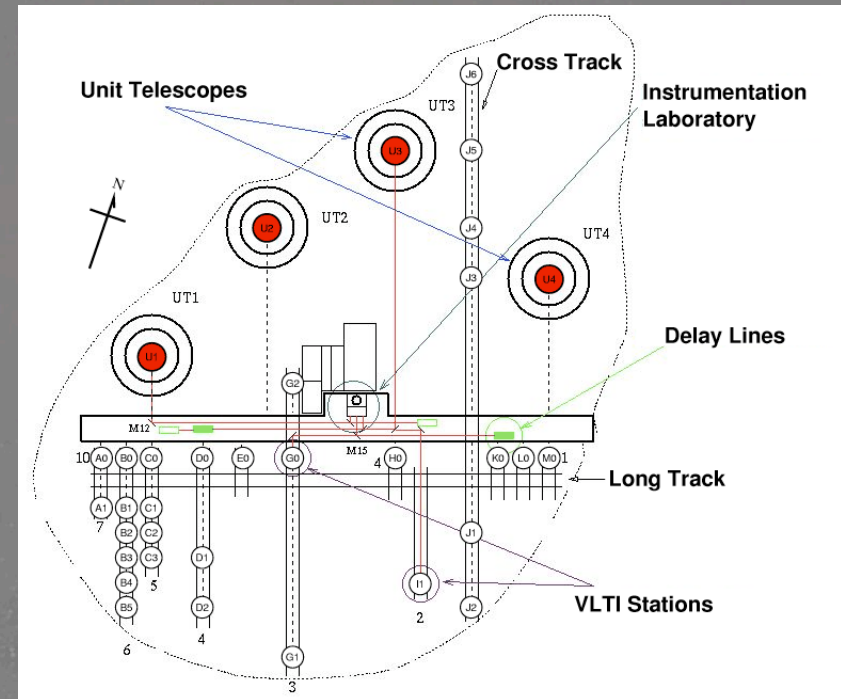
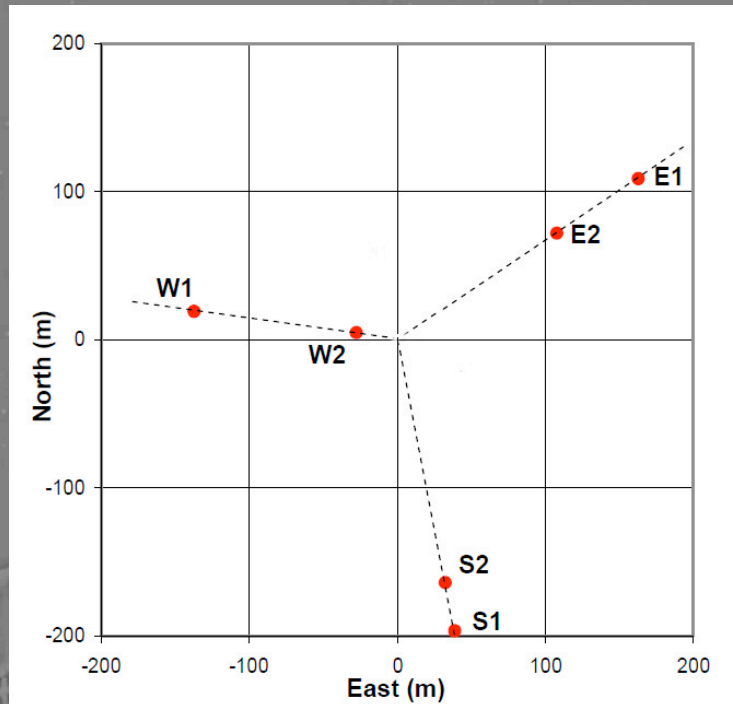
- Faibles visibilités (surfaces d'étoiles)
- $\sigma_v = \text{qq \%}$ dans le continu (Env cont.)
- $\sigma_v = \text{qq } 0.1\%$ dans les raies (Pulsations)
- $\sigma_\phi = 1^\circ$ dans les raies (Rotation/Pulsation)
- Clôture de phase exploitable

Nombres de télescopes :

- Au moins 5 télescopes pour obtenir 1 image/nuit
- Besoin de bases courtes (20-30m) et longues (>300m) selon les programmes

Où installer VEGAS?

CHARA ou VLT?



Beaucoup de longues bases (330m)
Organisation flexible

2 petites bases (34m et 66m)



Télescopes fixes

Uniquement petits télescopes

Surfaces d'étoiles

vs



Beaucoup de bases courtes (10-50m)

Grands télescopes 8.2m (UT)

AT 1.6m = 1 mag de plus que CHARA



4 Télescopes max

Pas de longues bases (> 200 m)

Gestion de l'ESO!

Environnements circumstellaires

Où installer VEGAS?

Sur MROI ?



- 9 télescopes de déplaçables de 1.4 m
- 28 stations
- Bases de 8 à 340 m

Choix de Grandes ou petites configurations