

Imagerie par synthèse d'ouverture optique, application aux étoiles chimiquement particulières

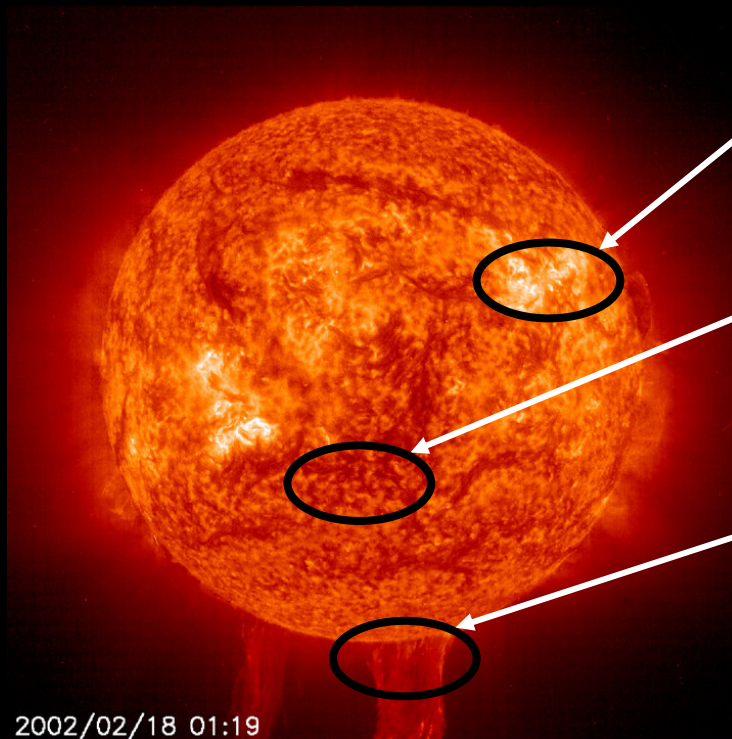
Jean-Baptiste LeBouquin

directrices de thèse:

Karine Rousselet-Perraut & Claudine Kahane

Simulation des observables
Observations interférométriques
Développements instrumentaux

Résoudre spatialement la surface des étoiles



Une étoile résolue : le Soleil

Taches photosphériques

Rotation différentielle

Éjection de matière



Champ magnétique

Étude des structures locales :

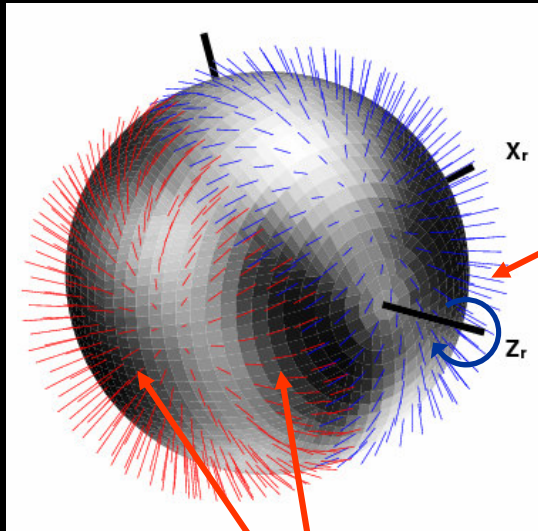
⇒ compréhension de la physique

⇒ rôle du champ magnétique

Les étoiles plus précoces

Les étoiles chimiquement particulières Ap

Modèle de α^2CVn
Kochukhov, A&A 2002



Faible rotation

($V_{\text{sini}} \sim 0-50 \text{ km/s}$)

couple magnétique ?

Pulsation rapide, roAp

(2 – 15 min)

B

0.5 – 5kG

excitation / sélection ?

diffusion des espèces
chimiques ?

Tache d'abondance métallique

(contraste de 10 – 1000)

⇒ Études des structures locales

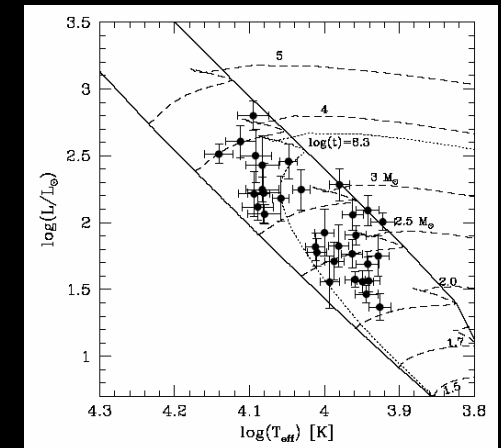
Problématiques astrophysiques

- Pourquoi *certaines* A sont Ap ?
- Pourquoi *certaines* Ap pulsent ?
- Relation **B**, abondance, pulsations... ?
- Origine du champ magnétique ?
 - fossile / dynamo ?
- Position évolutive ?
 - centre de la séquence principale
 - découverte d'étoiles jeunes magnétiques

⇒ Mesure des paramètres fondamentaux

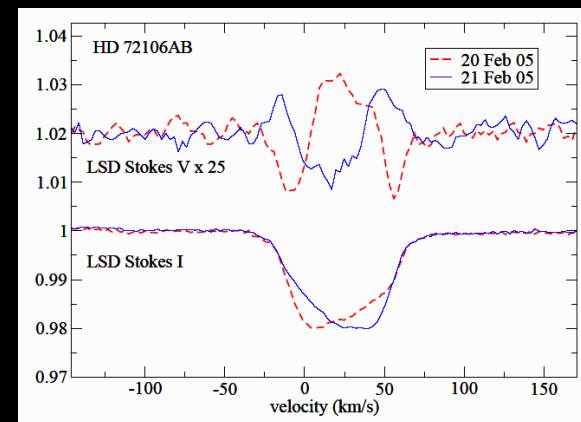
⇒ Imagerie de la surface

Position des étoiles magnétiques



Hubrig et al., 2005 sep, AIP proc

Une étoile magnétique jeune : HD72106



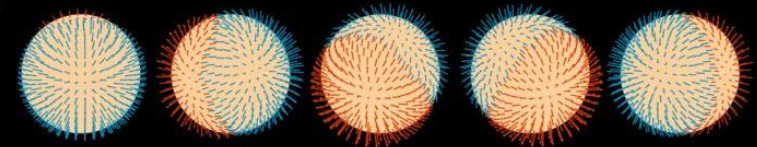
Wade et al., 2005 sep, A&A

Problématiques instrumentales

- Taches d'abondance, faible rotation
 - Haute résolution spectrale
 $R = 10\,000 - 100\,000$
- Magnétisme, effet Zeeman
 - Polarisation circulaire $\sim 0 - 5\%$

Méthodes d'études actuelles :

- Photométrie
- Spectro - polarimétrie
- Reconstitutions Doppler

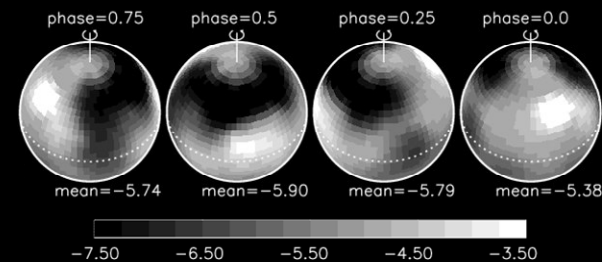


Champ magnétique de $\alpha^2 CVn$
Kochukhov, A&A 2002

- Résoudre les structures locales
→ diamètre apparent ?

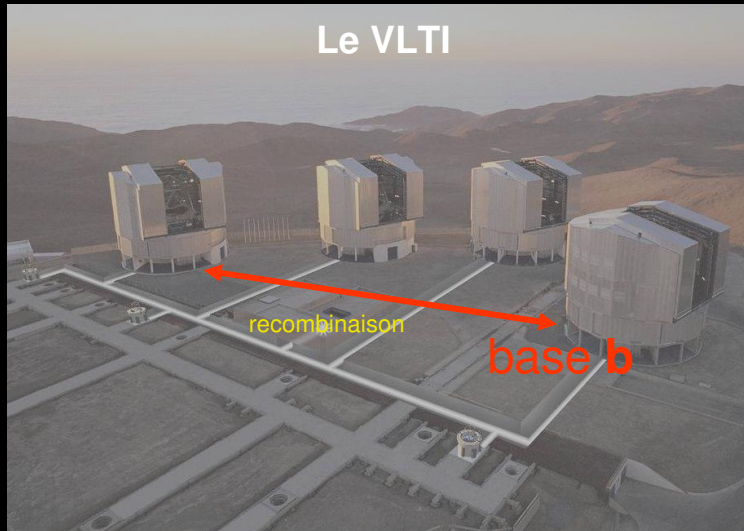
1 mas @ $1\mu m = 200m$

⇒ Interférométrie
longue base



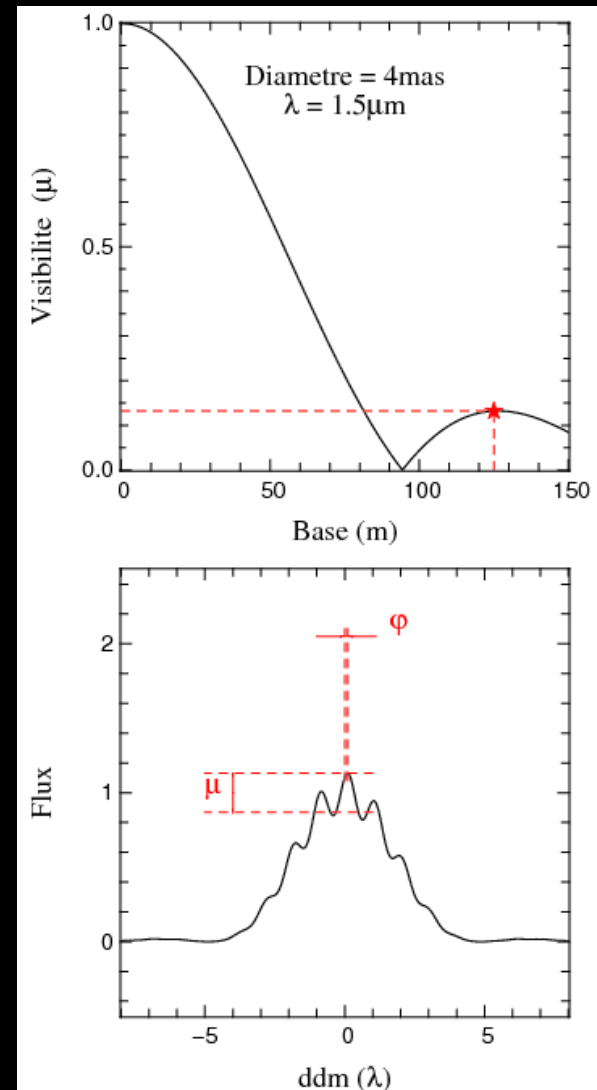
Abondance de ϵUMa
Lueftinger, A&A 2003

Principe de l'interférométrie



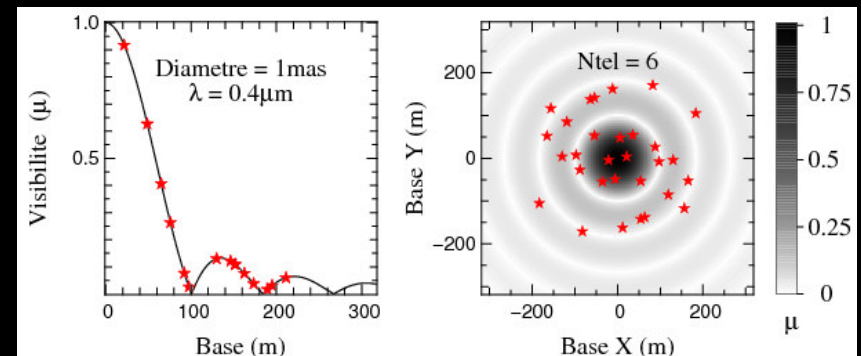
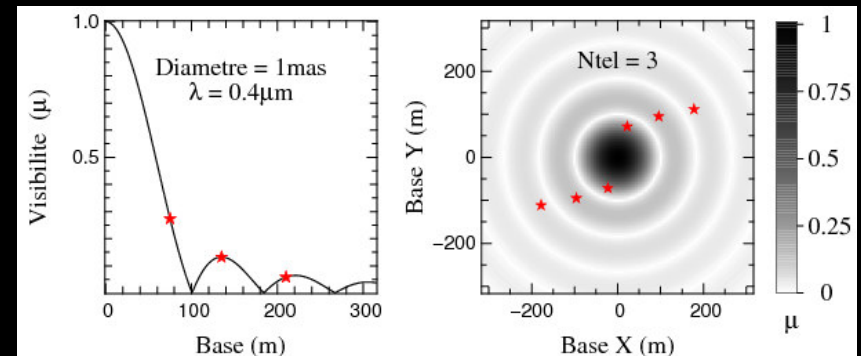
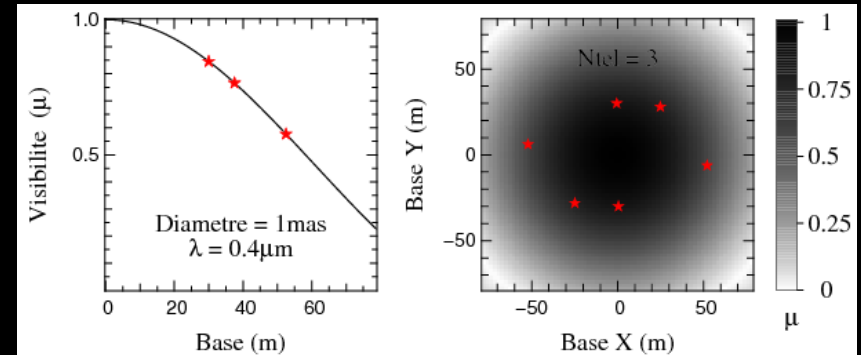
- Grandeurs interférométriques
 - visibilités μ et phases φ
 - fonction de la forme de l'objet :

$$\mu e^{i\varphi} = \text{TF}\{\text{objet}\} (b/\lambda)$$



Les trois « régimes » d'observations

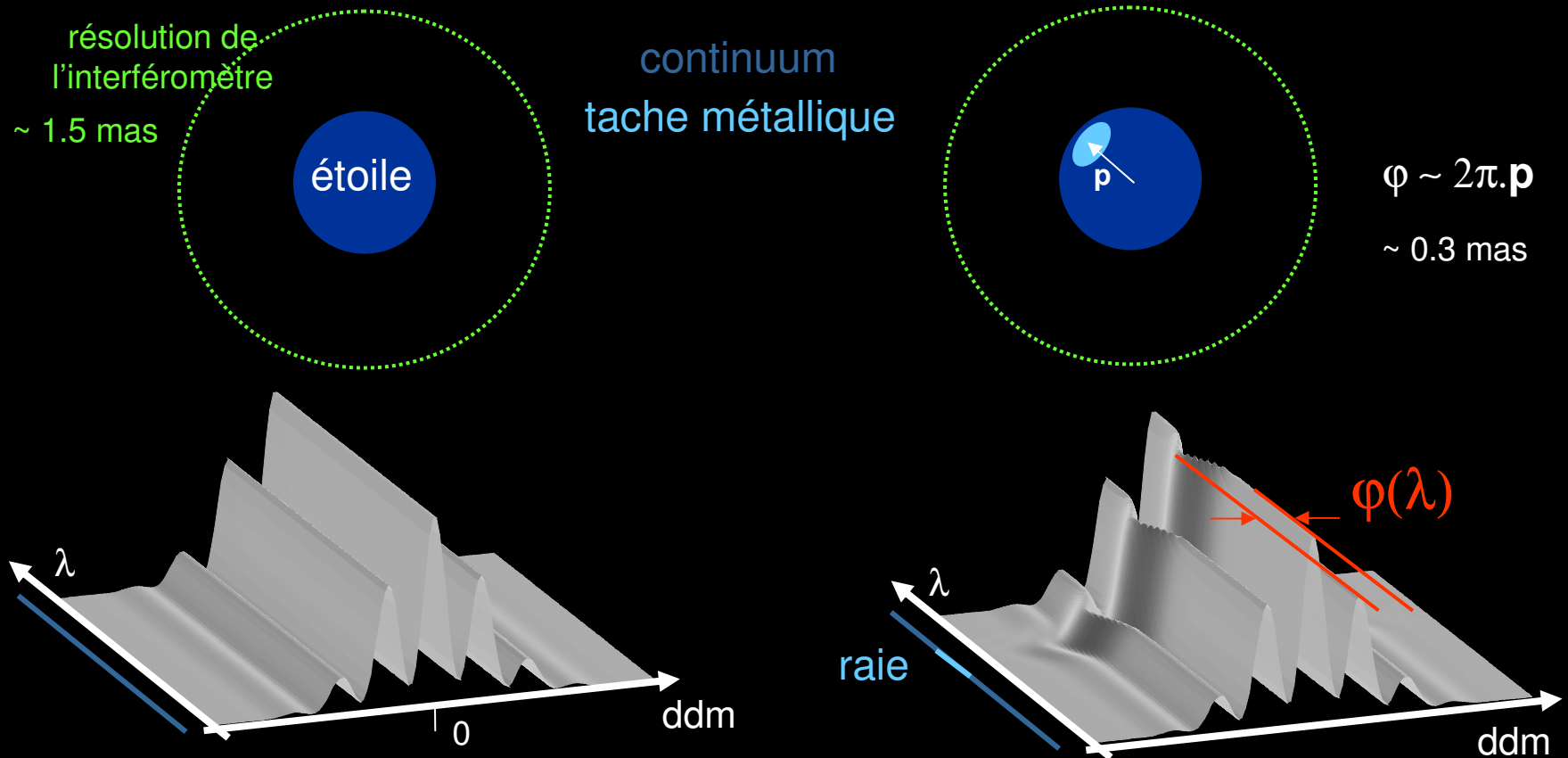
- **Partiellement résolue**
 - $r = 3 - 1$ mas
 - mesures des structures locales par **interférométrie différentielle**
- **Résolue**
 - $r < 1$ mas
 - **mesure directe** des structures
 - analyse paramétrique (position, amplitude...)
- **Résolue et fort échantillonnage**
 - $r < 1$ mas
 - beaucoup de télescopes
 - **imagerie** par synthèse d'ouverture



Plan de la présentation

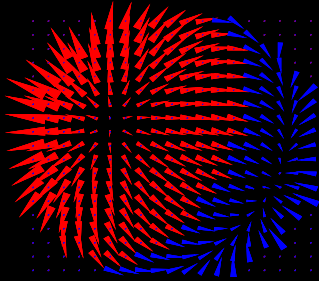
- Contexte astrophysique de la thèse
- • Interférométrie différentielle, application aux étoiles Ap
 - Principes de la technique
 - Simulation du signal interférométrique
 - Validation de la technique au GI2T
 - Perspectives
- Vers un instrument spectro-polar imageur par synthèse d'ouverture
 - Le projet VITRUV
 - Précurseurs à 2T au VLT1
 - Étude de la recombinaison
 - Le problème de la polarisation
- Synthèse des travaux

Interférométrie différentielle

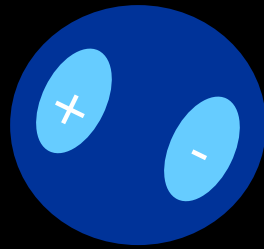


- ⇒ Augmente la résolution spatiale
- ⇒ Étude des structures locales

Interférométrie + polarimétrie



champ
magnétique



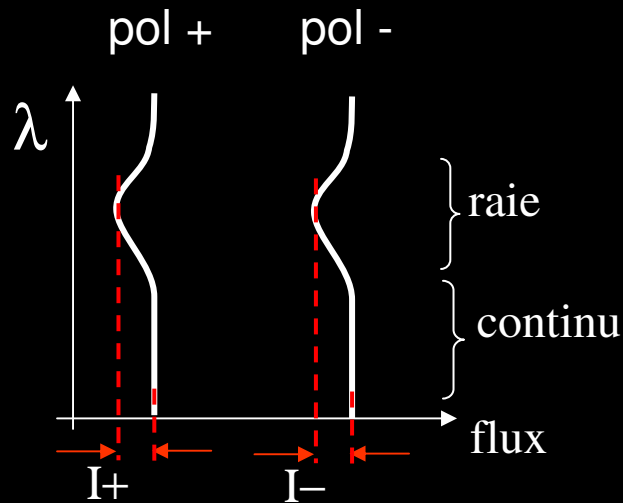
raie sensible à
l'effet Zeeman

- Polarisation circulaire est une signature du magnétisme (effet Zeeman)

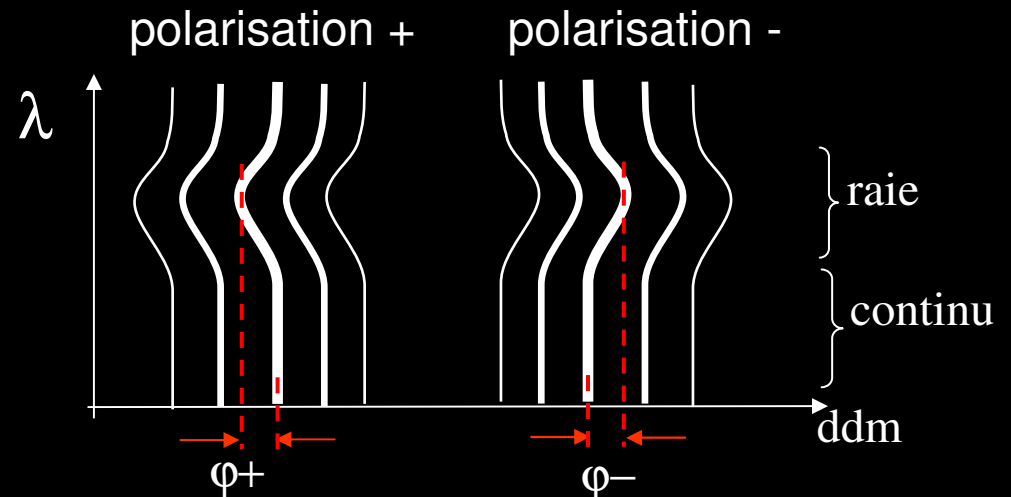
$$(I+) - (I-) \sim 0 \Rightarrow \text{peu d'effet intégré}$$

$$(\varphi+) - (\varphi-) > 0 \Rightarrow \text{effet de phase interférométrique}$$

Polarimétrie



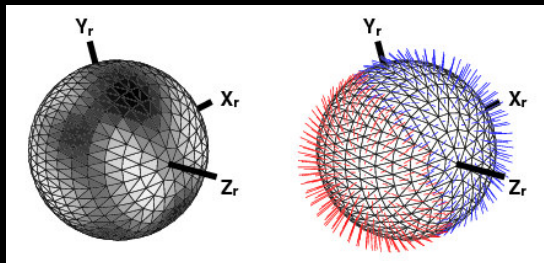
Interférométrie



Un outil de simulation numérique

Paramètres atmosphériques

- Abondances
- Structure: Atlas9
- Champ Magnétique



© O. Kochukhov

Géométrie Stellaire

- Vitesse de Rotation
- Angle d'inclinaison

Paramètre atomiques

- Énergie
- Coefficients d'élargissement
- Paramètres magnétiques

Transfert Radiatif

LTE Feautrier
Plan-parallèle Polarisé

© T. Lanz

© C. Stehlé

Carte d'intensité

- en fonction de λ
- en fonction de la polarisation
- en fonction de la phase stellaire

Paramètres instrumentaux

- Résolution Spectrale
- Base Interférométrique

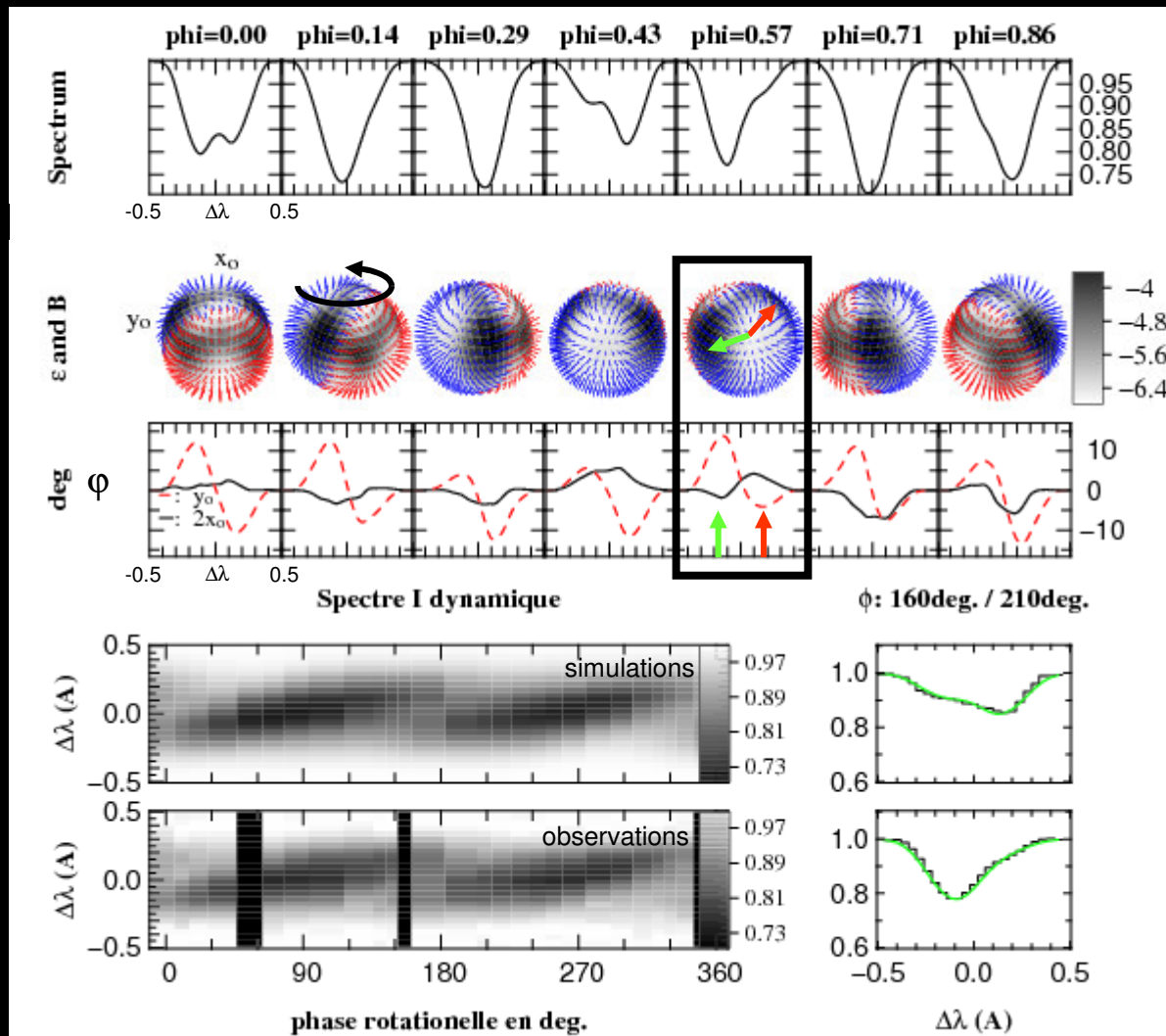
Simulation d'instrument

Observables

- Spectre intégré
- Visibilité μ
- Phase φ

Perraut et al., 2005 A&A 422, p.193

Exemple de simulation : le prototype α^2CVn



- Observations spectrales de
 - α^2CVn
 - CrII 4824A
- Reconstruction Doppler de Kochukhov, 2002
- Validation du transfert radiatif
- Prédiction des grandeurs interférométriques
- Phases = Contraintes géométriques à 2D
- Indépendante de l'aspect « tomographique »

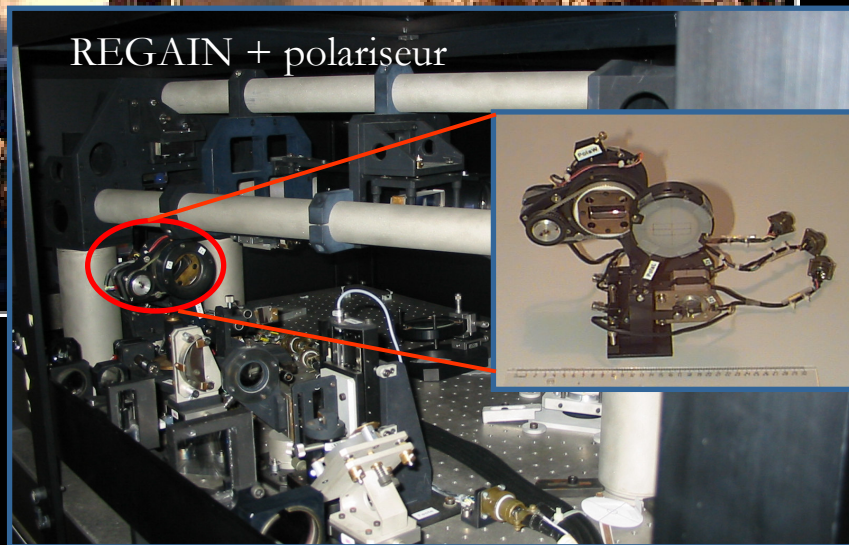
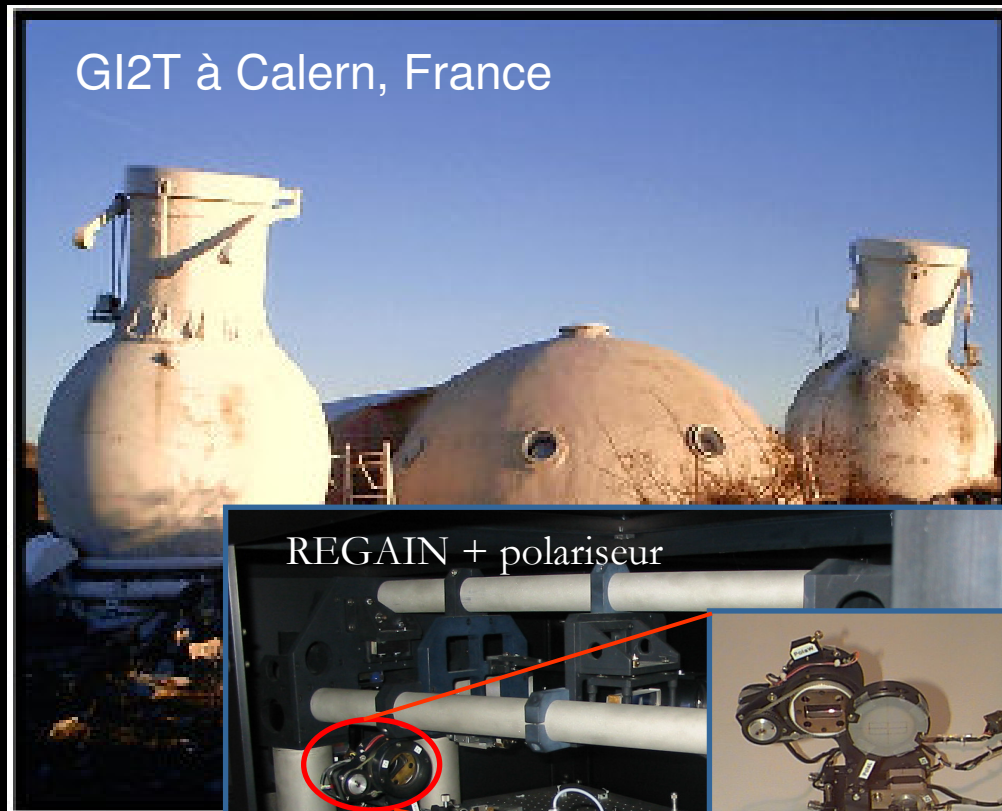
Perraut et al., 2005 A&A 422, p.193

Résultats des simulations

Étoiles	Taches d'abondance	Effet de phase dans H α	Champ magnétique et polarisation
α2CVn <i>d = 0.8mas,</i> <i>Vsini = 15km/s</i> <i>i = 30°</i> <i>B = 5kG</i>	oui ex. simulation précédente	oui mesure de l'axe de rotation	non
ϵUMa <i>d = 1.3mas</i> <i>Vsini = 35km/s</i> <i>i = 45°</i> <i>B = 0.2kG</i>	non <ul style="list-style-type: none"> • Fer: trop peu contrasté • Cr: pas assez abondant 	oui mesure de l'axe de rotation	?
βCrB <i>d = 1mas</i> <i>Vsini = 3.5km/s</i> <i>i = 4°</i> <i>B = 10kG</i>	? inconnues car étoile vue par le pôle	non	oui – raies Fer → distinction entre les deux modèles magnétiques de Bagnulo,2000

caractéristiques: visible, base=50m, R=30000, polarisation

Validation de la technique au GI2T / REGAIN

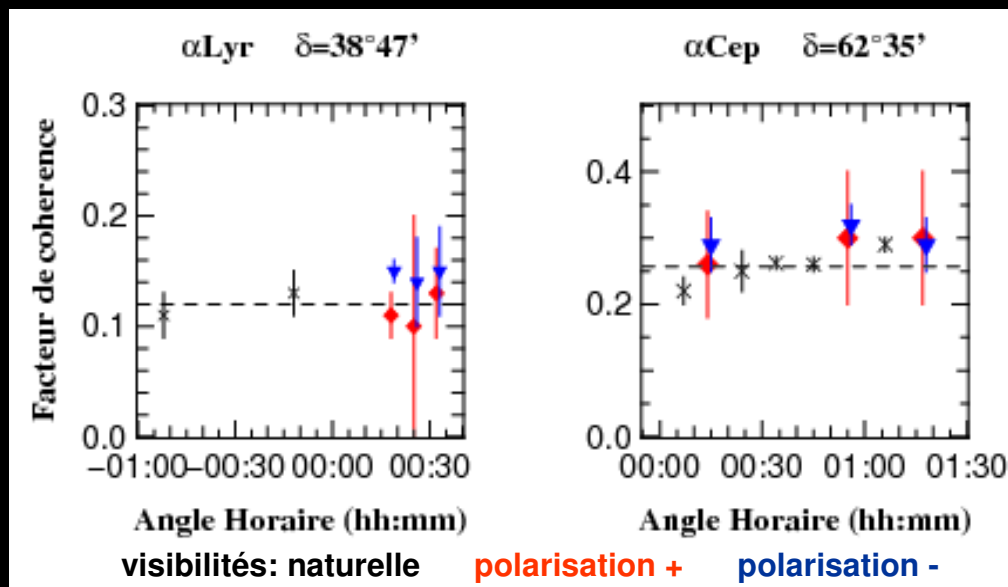


- Interféromètre GI2T
 - 2 télescopes
 - base = 50m
 - $r \sim 1.5\text{mas}$
 - Table REGAIN
 - voie visible
 - résolution spectrale
 $R = 1500 - 30\,000$
 - module d'analyse de la polarisation
- ⇒ 5 semaines d'observations
- ⇒ Pas de données sur des Ap à cause de problèmes techniques
- ⇒ Validation du polarimètre

Validation de la technique au GI2T / REGAIN

- Mon implication :
 - mesure sur le simulateur interne
 - observations sur des calibrateurs
 - réduction des données

Polarisation instrumentale
contrôlée

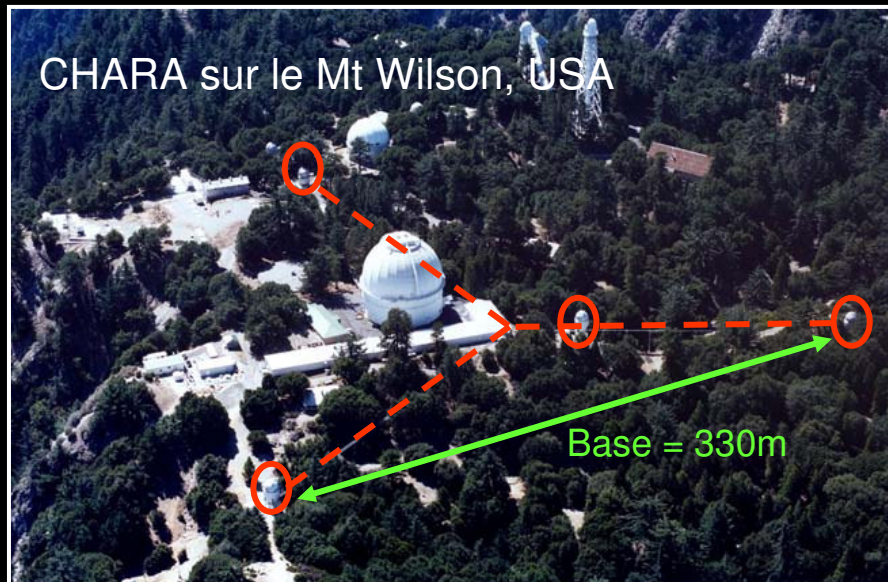


© D. Mourard, J.L. Chevassut

- Pas de chute de visibilité avec l' Angle Horaire
 - Observations autour du transit :
 - GI2T -2h / +2h
 - SUSI -20min / +20min
- Ireland, 2005 MNRAS

Perraut et al., A&A, soumis

Perspectives possibles sur CHARA



- Fermeture programmée du GI2T
- Possibilité de déplacer la table REGAIN sur CHARA

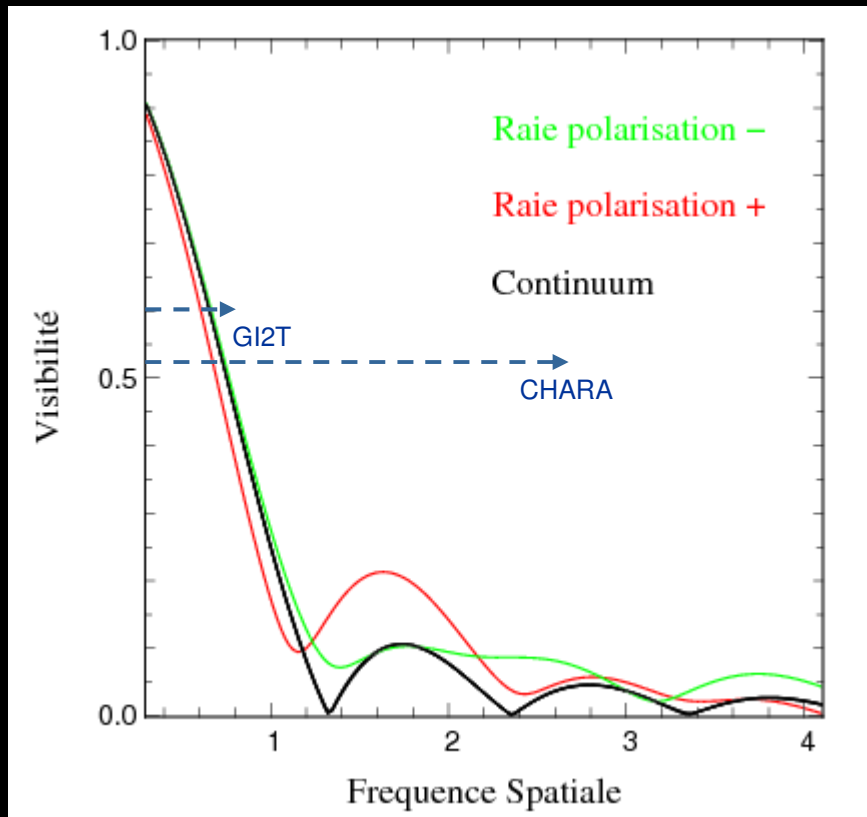
- CHARA
 - Base = 330m
 - 6 Télescopes
 - Ouvertures = 1m
- REGAIN
 - 3 faisceaux
 - Spectromètre R = 30 000
 - Analyse de la polarisation

330m @ 0.5 μ m
→ 0.3mas

surfaces stellaires résolues

Perspectives possibles sur CHARA

Observation du champ magnétique



CHARA + REGAIN + Modèle de β CrB

- Cible résolue
- Effets en visibilité importants
- Observation dans le second lobe de la visibilité

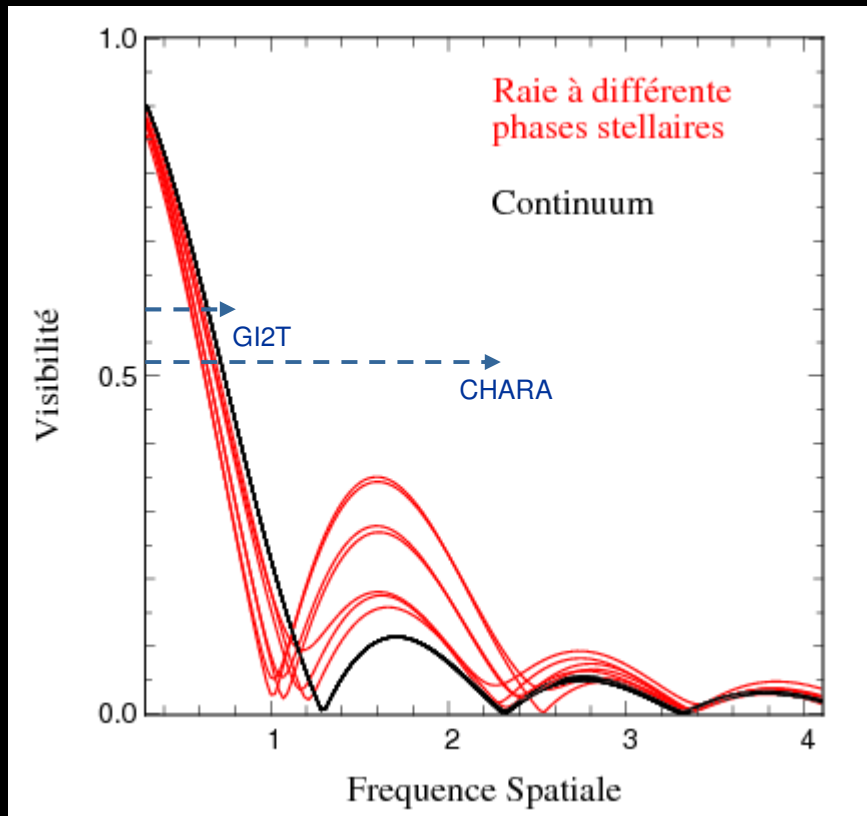
Champ magnétique dipolaire :

⇒ Structures polarisées égales à une fraction du diamètre

⇒ 2^{ème} et 3^{ème} lobe de visibilité

Perspectives possibles sur CHARA

Étude de l'abondance



CHARA + REGAIN + Modèle d' α^2CVn

- Cibles résolues
- Effets en visibilité importants
- Observation dans le second lobe de la visibilité
- Mais imagerie par synthèse d'ouverture difficile
 - visibilités faibles
 - faible nombre de télescopes

Vers l'imagerie par synthèse d'ouverture...

Intérêts:

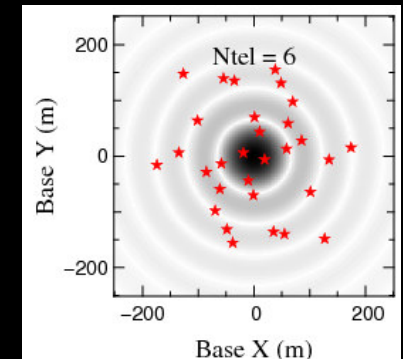
- pas d' *a priori* sur la morphologie de l'objet

Difficultés

- grand nombre de télescopes

... applications aux étoiles Ap :

- forte résolution spatiale nécessaire
⇒ visible et / ou longues bases
- signature spectrale des structures d'abondances
⇒ spectroscopie haute résolution
- présence de champ magnétique
⇒ analyse de la polarisation



Panorama des instruments imageurs existants ou *en projet...*

Nom	Nb. Tel.	Base max.	λ	Rés. Ang. (mas)	Res. Spec.	Polar
IOTA-IONIC	3T	30 m	H	10.3	15	testée
VLT-AMBER	3T	200 m	JHK	0.9	10 000	
CHARA-MIRC	6T	330 m	HK	0.9	300	

<i>CHARA-REGAIN</i>	3T	330 m	Vis	0.3	30 000	oui
<i>VLT-VITRUV</i>	4T	200 m	Vis - JHK	0.5 – 0.9	10 000	possible
<i>OHANA</i>	?T	800 m	JHK	0.4	?	

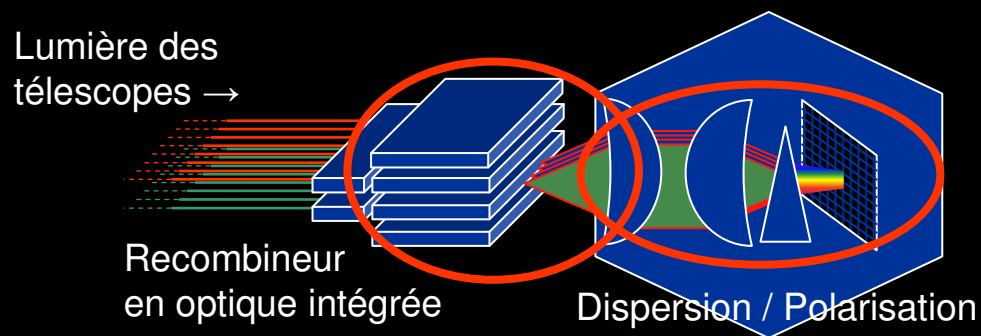
liste non exhaustive
Monnier, 2003, RPPh

Plan de la présentation

- Contexte astrophysique de la thèse
- Interférométrie différentielle, application aux étoiles Ap
 - Principes de la technique
 - Simulation du signal interférométrique
 - Validation de la technique au GI2T
 - Perspectives
- ➔ • Vers un instrument spectro-polar imageur par synthèse d'ouverture
 - Le projet VITRUV
 - Précurseurs à 2T au VLT1
 - Étude de la recombinaison
 - Le problème de la polarisation
- Synthèse des travaux

Le projet VITRUV

- En cours de discussion entre l'ESO, l'équipe IONIC du LAOG... [Malbet et al. 2005]
- Spécifications:
 - Infrarouge J,H,K + extension visible
 - 4 à 8 télescopes : synthèse d'ouverture
 - Haute résolution spectrale
100 – 10 000
 - Résolution angulaire < 1 mas



- Comment recombinaison 4 à 8 télescopes, tout en autorisant la **haute résolution spectrale** ?
- Problématique de la **polarisation** ?

Mon implication concrète dans le projet

R&D Optique intégrée

© IONIC / LETI / IMEP

Précurseurs au VLTI

- Mise au point d'un outil de réduction des données
- Qualification d'un composant 2T en bande H (été 2003)
- Installation / Qualification d'un composant 2T bande K (2004)

© IONIC / ESO

Recombinaison 4 à 8T

- Comparaison théorique des différentes solutions
- Recommandations

© P. Labeye, JP Berger

1



2

Étude de la réduction des données

- Étude formelle des estimateurs
- Optimisation des performances

© E. Tatulli

Simulateur Optique

© L. Jocou, M. Benisty, P. Gratier

Simulateur Numérique

- Centralisation de l'information (VLTI, fibres, atmosphère...)
- Codage et utilisation

© E. Herwats

Étude de la polarisation

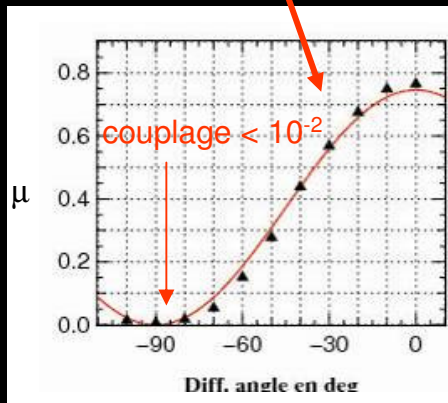
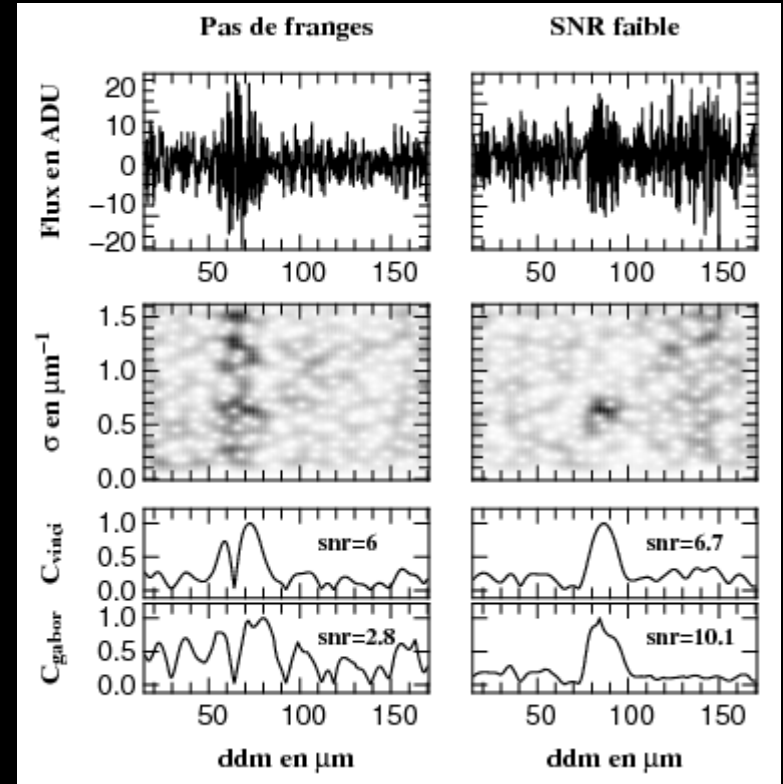
- Mise au point d'un formalisme adapté
- Étude théorique des différents biais
- Proposition de module d'analyse

© K. Perraut

3

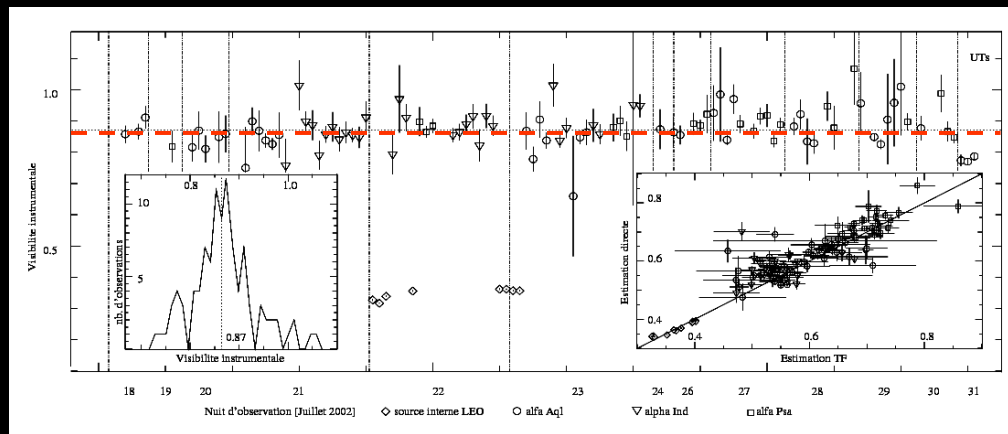
Précurseurs au VLTI : composants à 2T

- L'optique intégrée au VLTI :
 - © LAOG – LETI – IMEP – ESO
 - recombineur 2T-H (été 2002)
 - recombineur 2T-K (été 2004)
- Originalité de ces travaux :
 - outil de réduction des données basé sur la décomposition de Gabor
 - analyse de la stabilité
 - analyse de la polarisation



LeBouquin et al., A&A 2004

LeBouquin et al., A&A, soumis



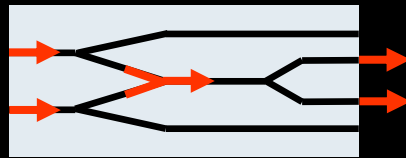
$\mu = 87\%$

Vers un spectro-imageur

Recombineurs multi faisceaux : analyse système



composant 2T
existant

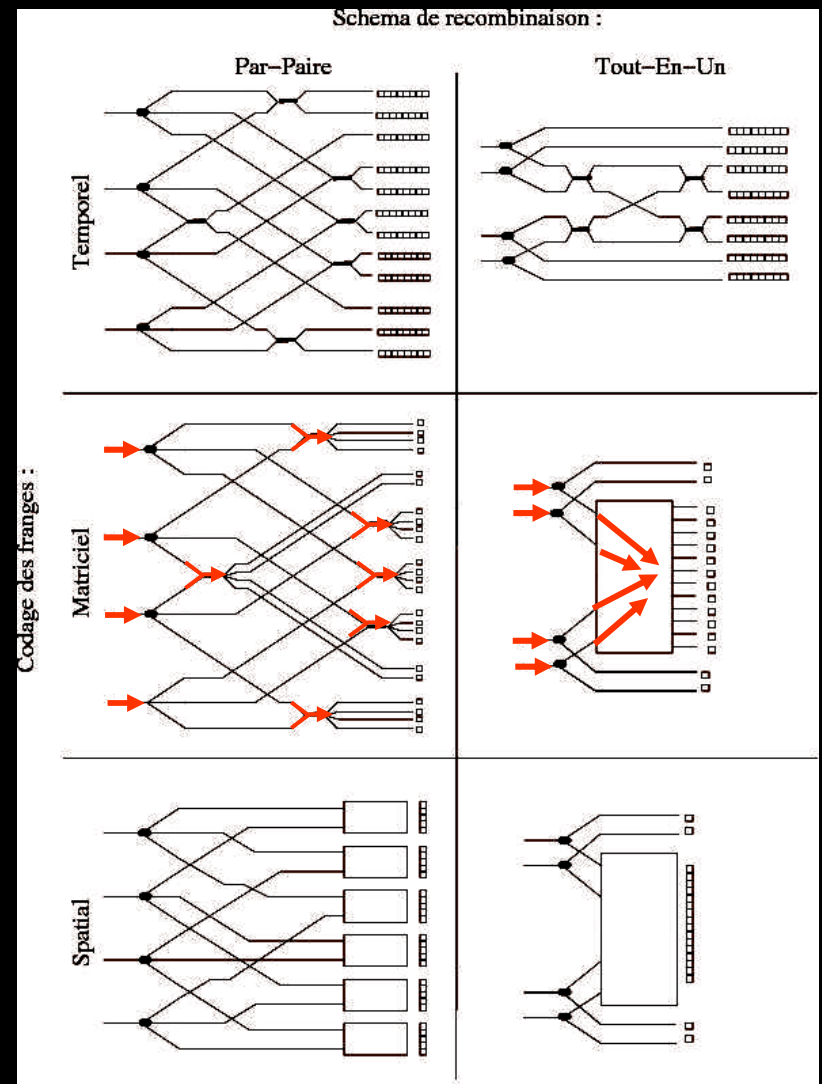


- Recombiner 4 à 8T ne se résume pas à coller des composants 2T
 - L'optique intégrée autorise de nombreux concepts
- ⇒ Analyse comparative :
- Temps de lecture (~nombre de pixels)
 - Performances

Analyse « système » : LeBouquin et al., 2004 SPIE

concepts de composants 4T

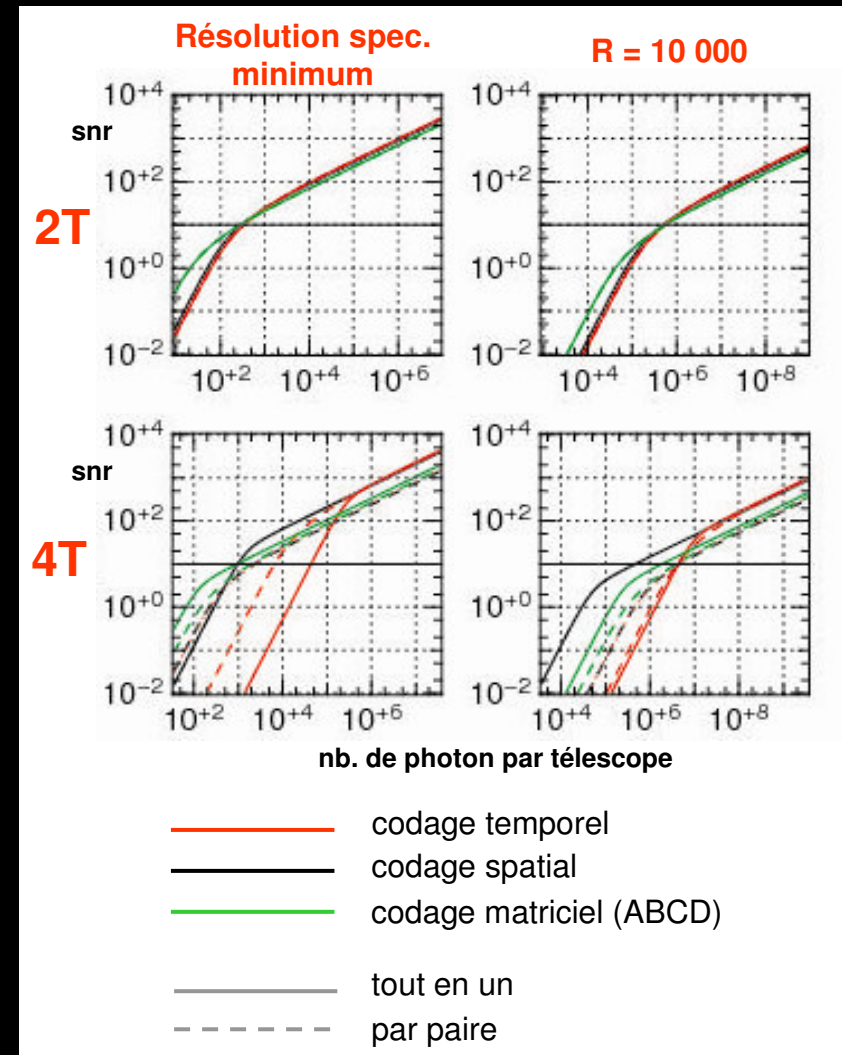
Schema de recombinaison :



Recombineurs multi faisceaux : comparaison des performances

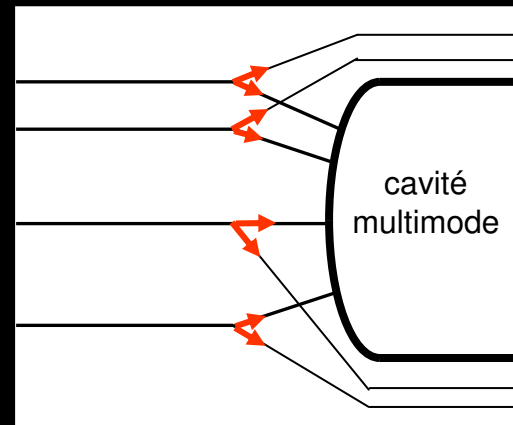
- Recombineurs 2T :
 - tous les concepts sont équivalents
- Recombineurs 4,6 et 8T :
 - grandes disparités
- Conclusions différentes si on veut
 - objets faibles / brillants
 - objets résolus / non résolus
 - haute / basse résolution spectrale

Études formelles des estimateurs :
Tatulli & LeBouquin, MNRAS, soumis
LeBouquin & Tatulli, MNRAS, à soumettre



Recommandations pour VITRUV

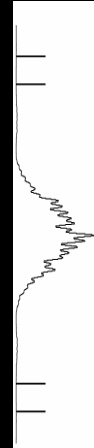
- Schéma tout-en-un / spatial
 - beaucoup de pixels (~150)
 - résolution minimum ($R > 100$)
 - performances optimales



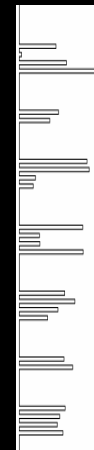
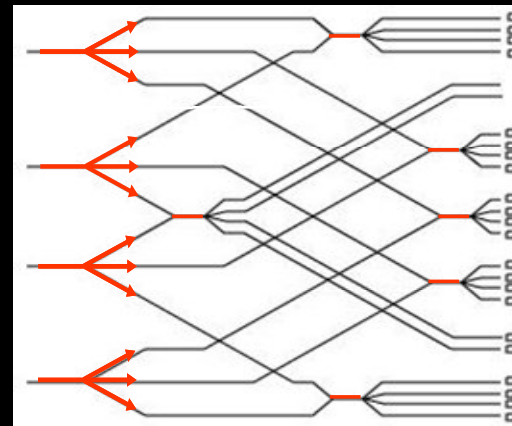
composant

lentille

détecteur

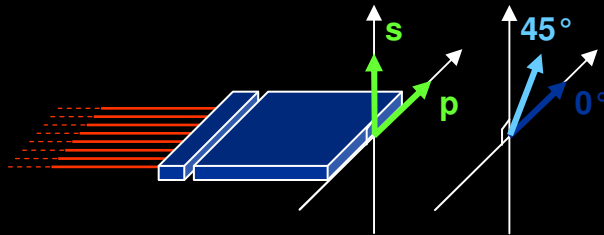


- Schéma par-paire / matriciel
 - peu de pixels (24)
 - bande large possible
 - performances acceptables



Concept encore jamais utilisé
pour un tel nombre de télescopes

La polarisation dans le contexte de VITRUV



- Mise en évidence expérimentale d'effets de polarisation

© L. Jocou, M. Benisty, P. Gratier

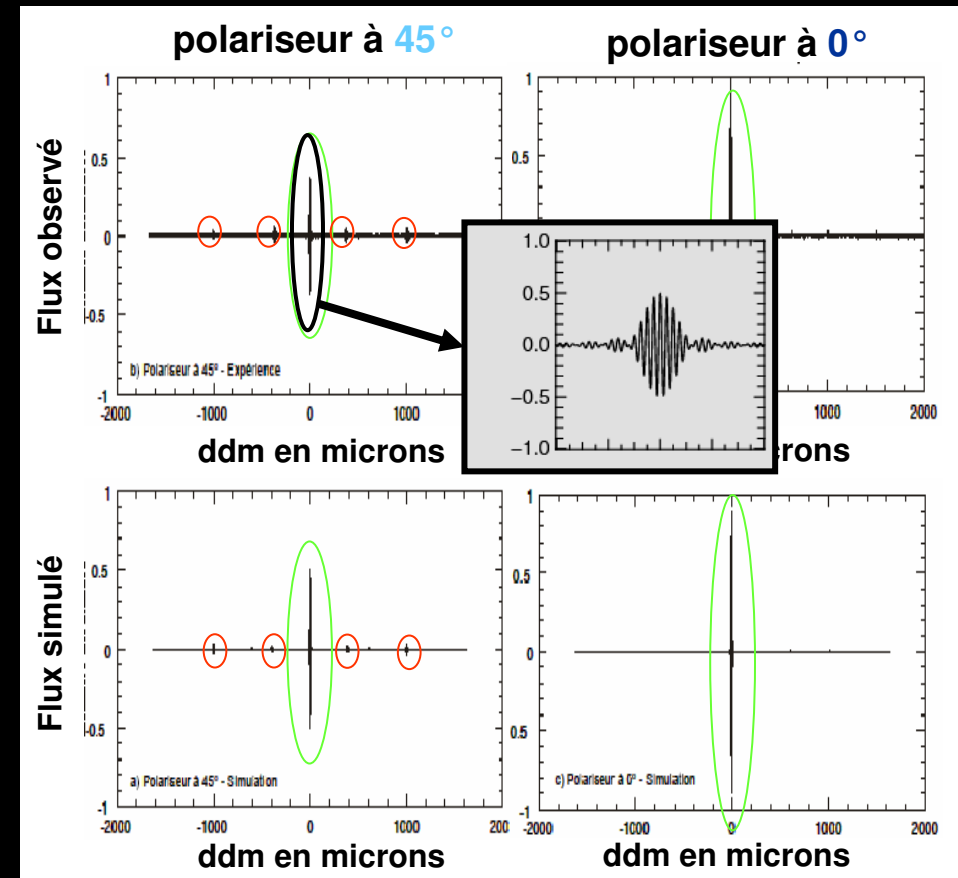
- VITRUVsim (outil de simulation) :

- fibres + composant
- polarisation de la source

© E. Herwats

⇒ Explication : couplages des polarisations dues aux fibres

interférogramme principal
interférogrammes parasites



VITRUV et la polarisation : premières recommandations

Étude d'un mode polarisé =
VITRUVsim + approche formelle

- La séparation des polarisations est **nécessaire** pour s'affranchir des principaux biais instrumentaux :
 - réflexions du VLTI
 - fibres optiques + recombineur
- L'étude de la **polarisation linéaire** de la source astrophysique semble envisageable :
 - simulations à approfondir
 - biais introduits par le VLTI à mesurer
- L'étude de la **polarisation circulaire** semble difficile, principalement à cause des effets non connus du VLTI

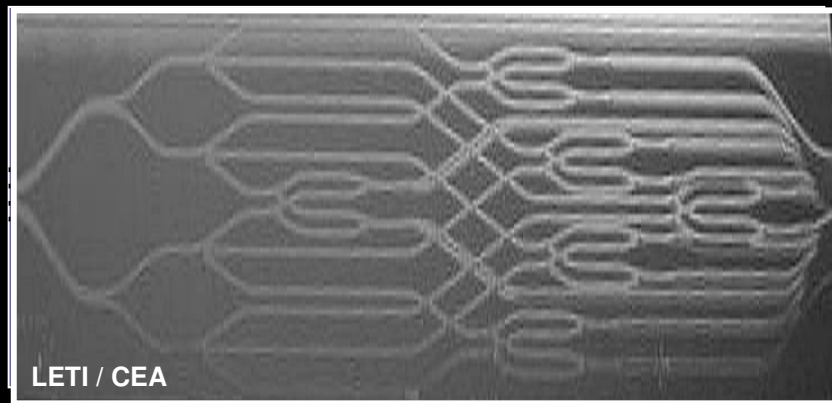
⇒ un mode polarisé dans VITRUV est envisageable

Plan de la présentation

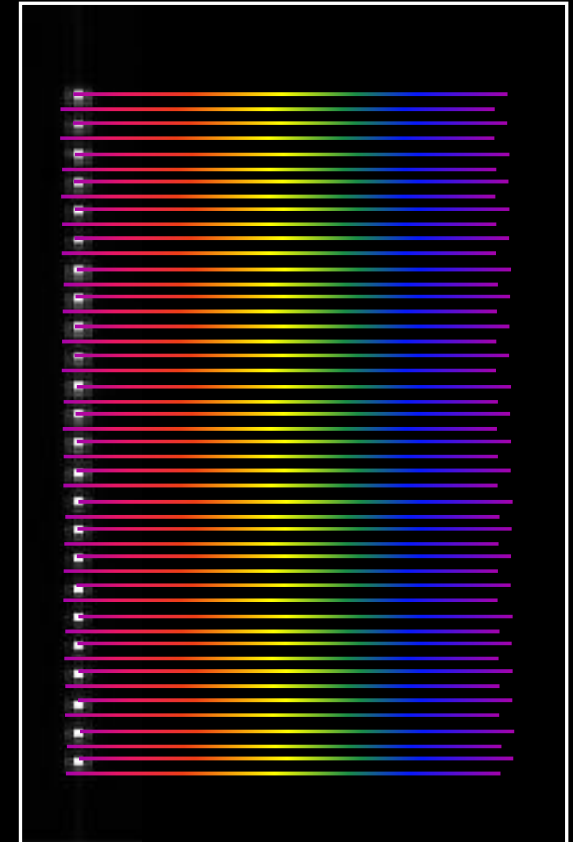
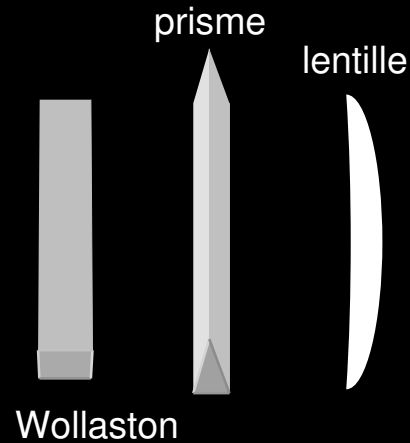
- Contexte astrophysique de la thèse
- Interférométrie différentielle, application aux étoiles Ap
 - Principes de la technique
 - Simulation du signal interférométrique
 - Validation de la technique au GI2T
 - Perspectives
- Vers un instrument spectro-polar imageur par synthèse d'ouverture
 - Le projet VITRUV
 - Précurseurs à 2T au VLT1
 - Étude de la recombinaison
 - Le problème de la polarisation
- ➔ • Synthèse des travaux

Validation de l'étude de concept

Premières analyses du composant 4T



© P. Labeye, L. Jocou



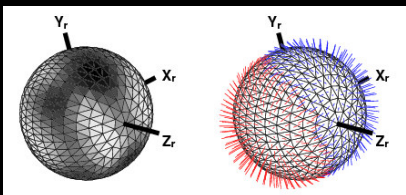
- ⇒ $[\mu, \varphi] \times 6 + 4T = 16$ inconnues pour 24 pixels
- AMBER = 6 inconnues pour 100 pixels
- ⇒ Possibilité de disperser le signal
- ⇒ Possibilité d'entrelacer les polarisations

simple
compact / stable
performant

Synthèse des travaux

Simulation d'observations des étoiles Ap avec VITRUV

Modélisation étoile Ap



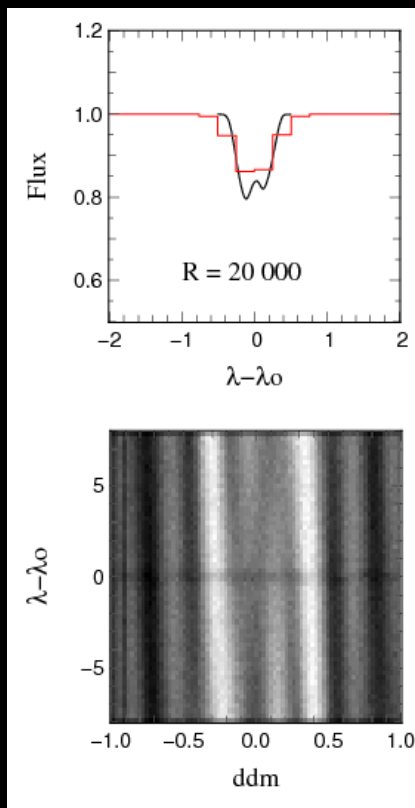
transfert de rayonnement

simulation de l'instrument

Modélisation de VITRUV:

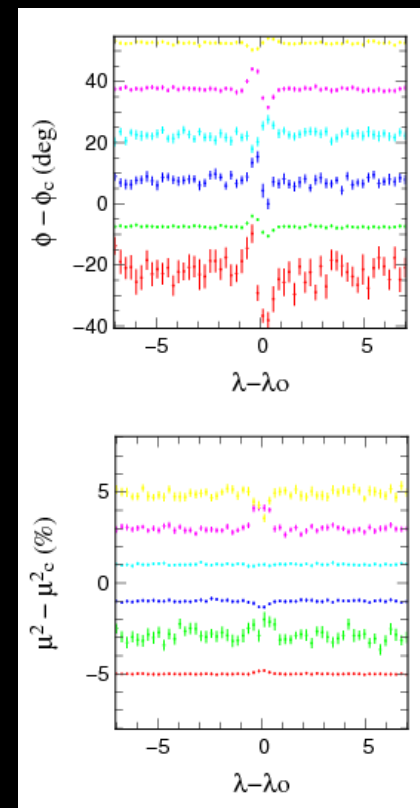
- visible / 4 ATs

Observables simulées

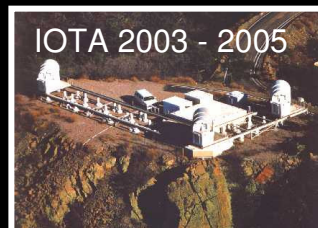


réduction des données

Données réduites



Observations

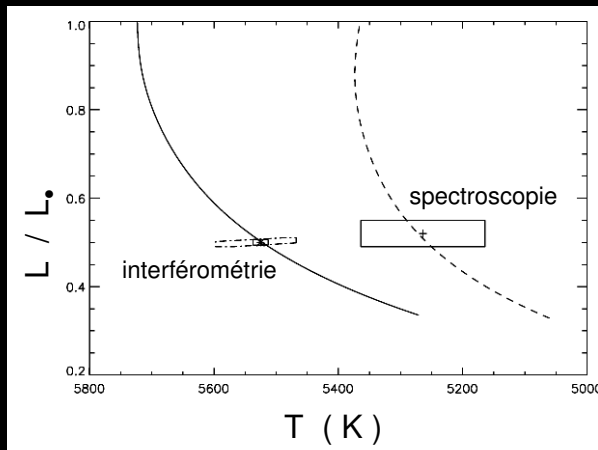


Quelques réflexions et perspectives...

Quelques réflexions...

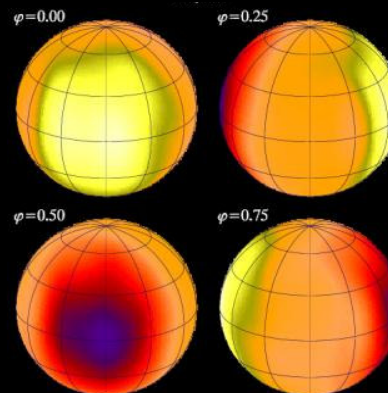
Interférométrie et étoiles chimiquement particulières

- Le visible est la « voie royale »
 - plus de raies / meilleure résolution spatiale
- Complémentarité Interférométrie + Astérosismologie
 - contraindre la structure interne...
 - cartographier les pulsations



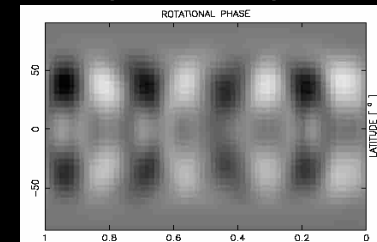
Étoile pulsante τ Ceti étudiée par Pijpers et al., A&A 2003

Application aux roAp: collaborations avec M. Cunha

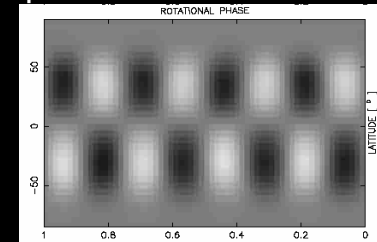


Pulsation de HR3831 reconstruite par Kochukhov et al., ApJ 2004

Spectroscopie



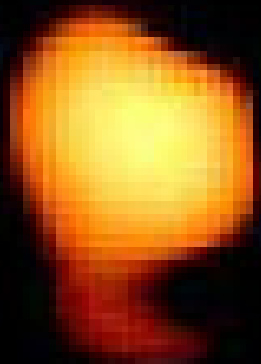
Spectro + interférométrie



Reconstruction de pulsations. Simulations de Jankov et al., A&A 2001

Quelques réflexions...

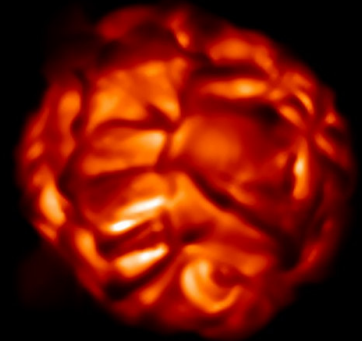
Des instruments arrivent : IOTA-Polar, AMBER, CHARA-R, VITRUV
Extension de la technique à d'autres types d'objets



Mira dans l'UV par le HST

Environnement proche et activité des ABG, Miras...

Structures de convection dans les géantes



Betelgeuse par Freytag et al.

Activité magnétique des étoiles de type tardif



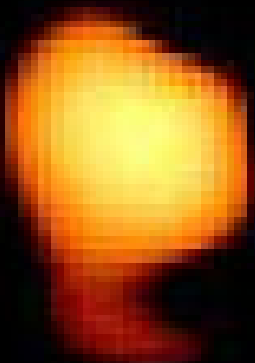
AB Dor par Cameron et al.

Merci à tous...

Mathilde, Karine, Chantal, Denis, Jean-Louis, Florentin, Martin, Pierre, Thierry, Claudine, Jean-Philippe, Fabien, Frédéric, Laurent, Brahim, François, Jérôme, Myriam, Lucas, Nicolas, Sylvain, Régis, Béné, Pierre K, Pierre L, Éric, Gaël, Benjamin, Claire-Marie, Gautier, Augustin, Yves, Janette, Markus, Émilie, Guy, Jean-François, Josie, Oleg, Margaridha, Khadîdja, Françoise...

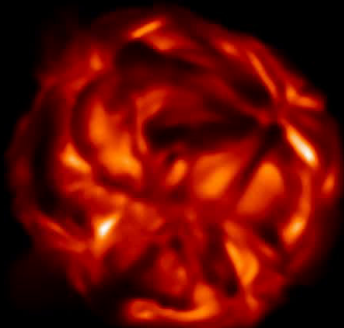
Et aussi aux développeurs...

Yorick, ADS, CDS, Aspro, LaTeX, Linux, cygwin, Mozilla, amdlib, vndrs, archives ESO, archives Elodie...

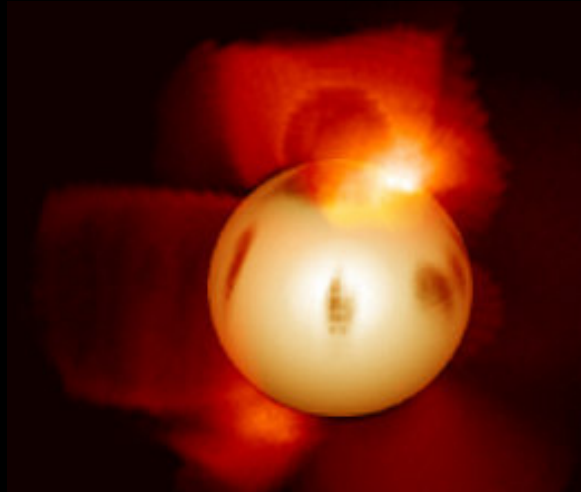


Mira dans l'UV par
le HST

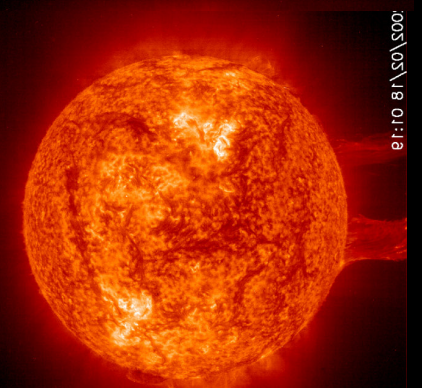
st35gm04n28: Surface Intensity(11), time(0.0)=30.263 yrs



Betelgeuse par Freytag et al.



AB Dor par Cameron et al.



Notre étoile : le Soleil