

La dynamique atmosphérique des Céphéides et l'étalonnage des échelles de distance dans l'Univers



Nicolas Nardetto

Soutenance de Thèse – OCA – Le 28 nov. 2005

DIRECTEUR de Thèse : Denis MOURARD
CO-DIRECTEUR de Thèse : Philippe MATHIAS



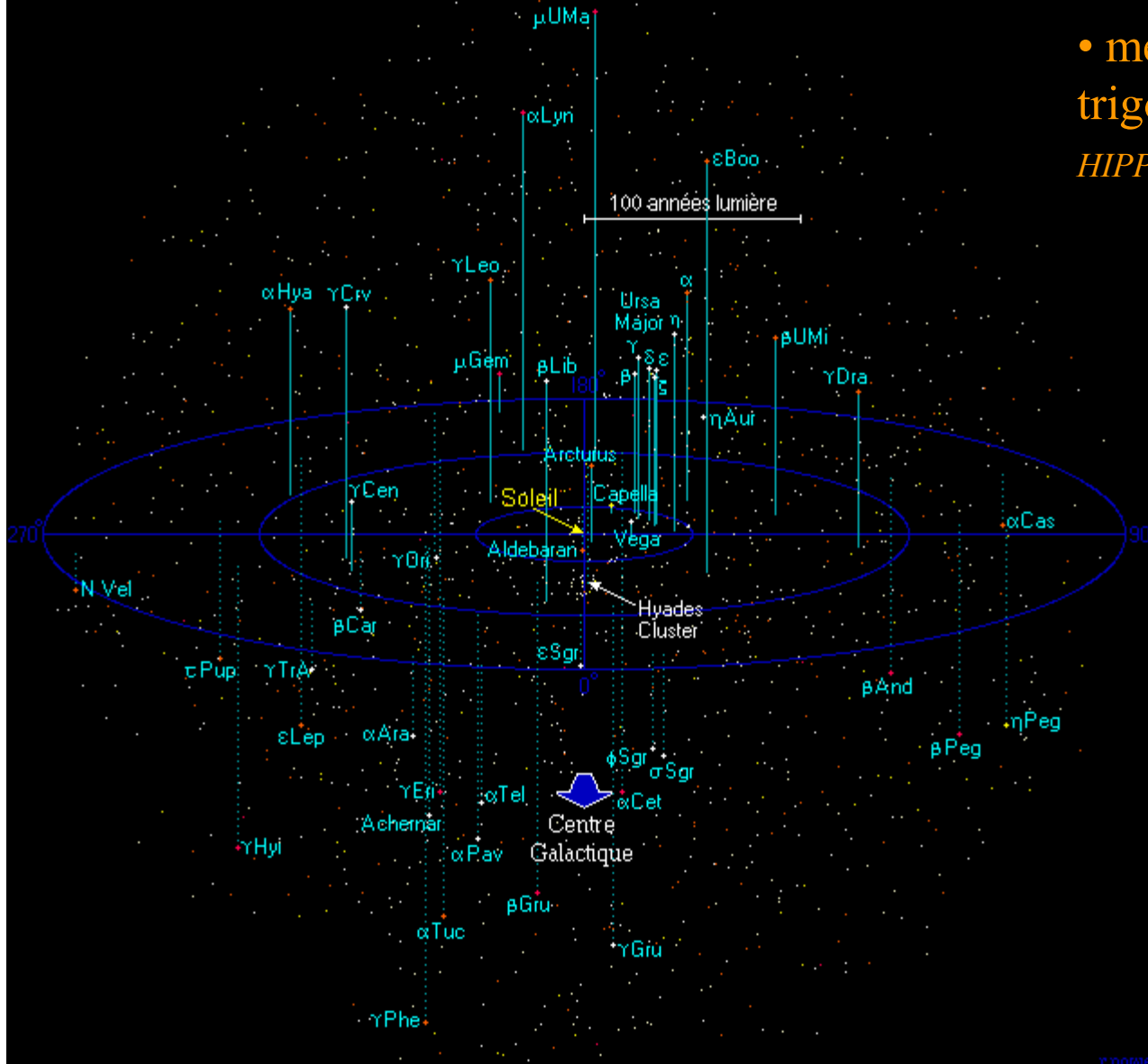
OBSERVATOIRE DE LA CÔTE D'AZUR



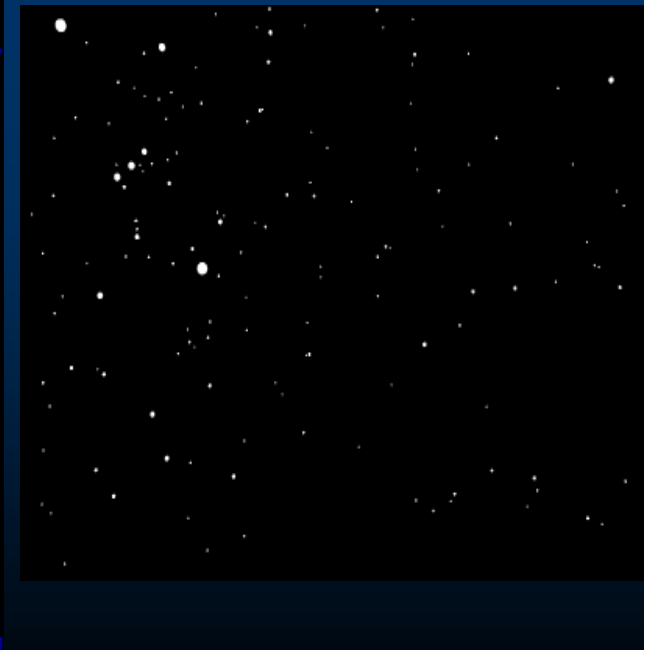
PLAN

- 1 – Les Céphéides et les distances dans l'Univers
- 2 – La méthode de la parallaxe de pulsation ($\Delta\theta$, p , ∇)
 - 3 – $\Delta\theta$ Les observations du VLTI
 - 4 – p Le facteur de projection
 - 5 – ∇ La dynamique atmosphérique
 - 6 – Conclusions & Perspectives

L'univers jusqu'à 250 années lumière : Le voisinage du soleil

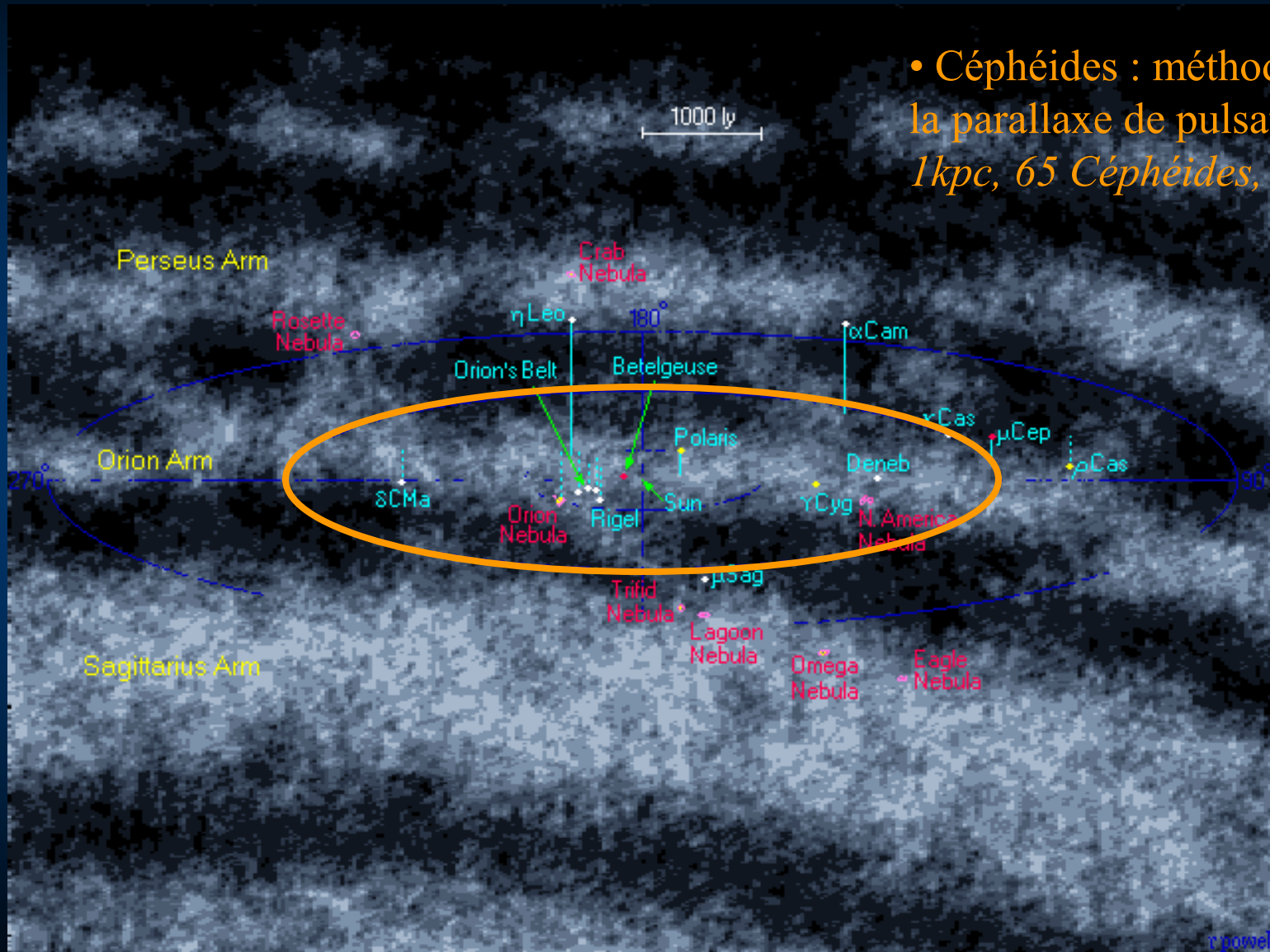


- méthode de la parallaxe trigonométrique
- HIPPARCOS : 150pc, 6000 étoiles, 5%*



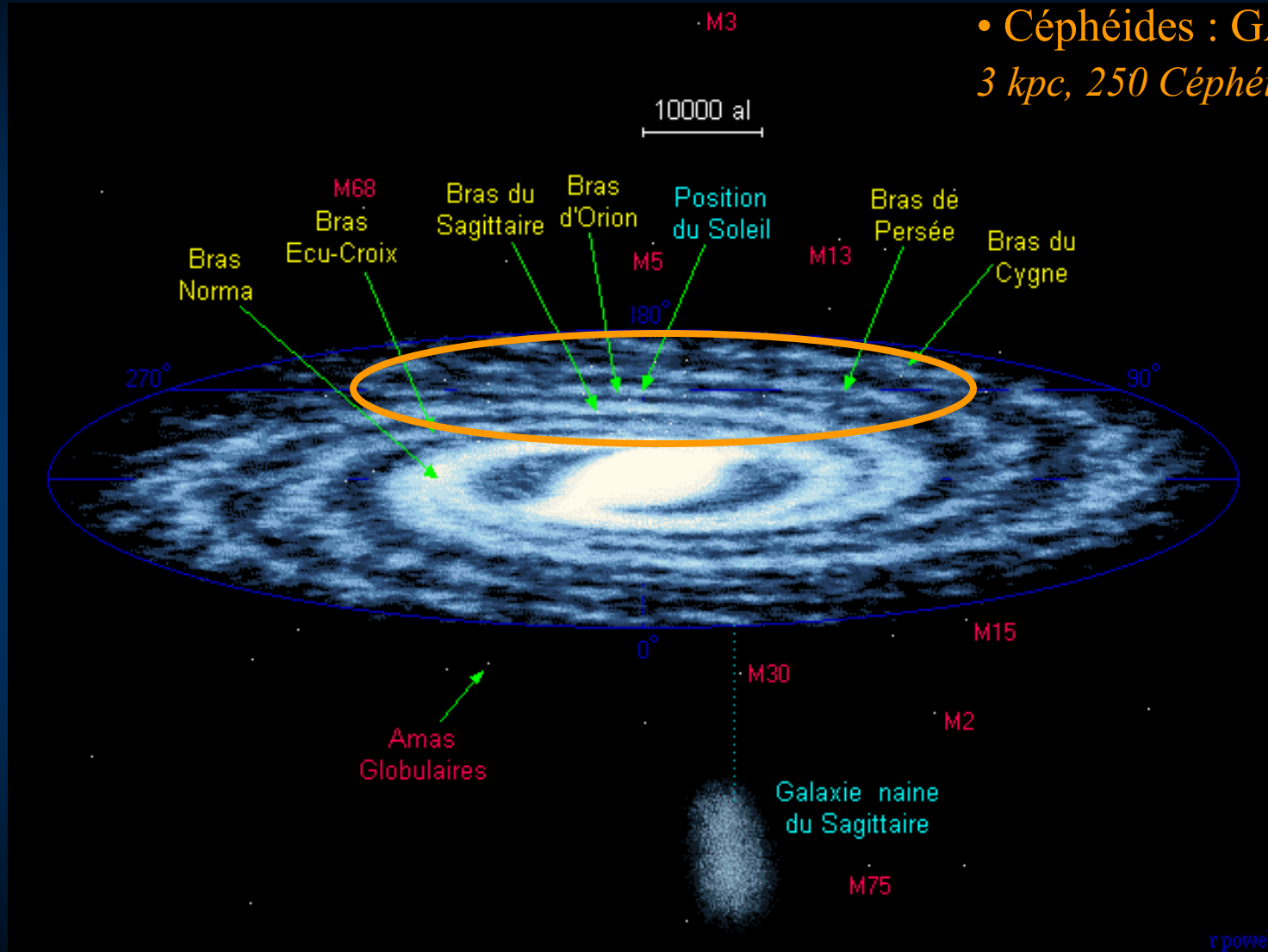
r powell

L' Univers jusqu'à 5000 années lumière : Le bras d'Orion



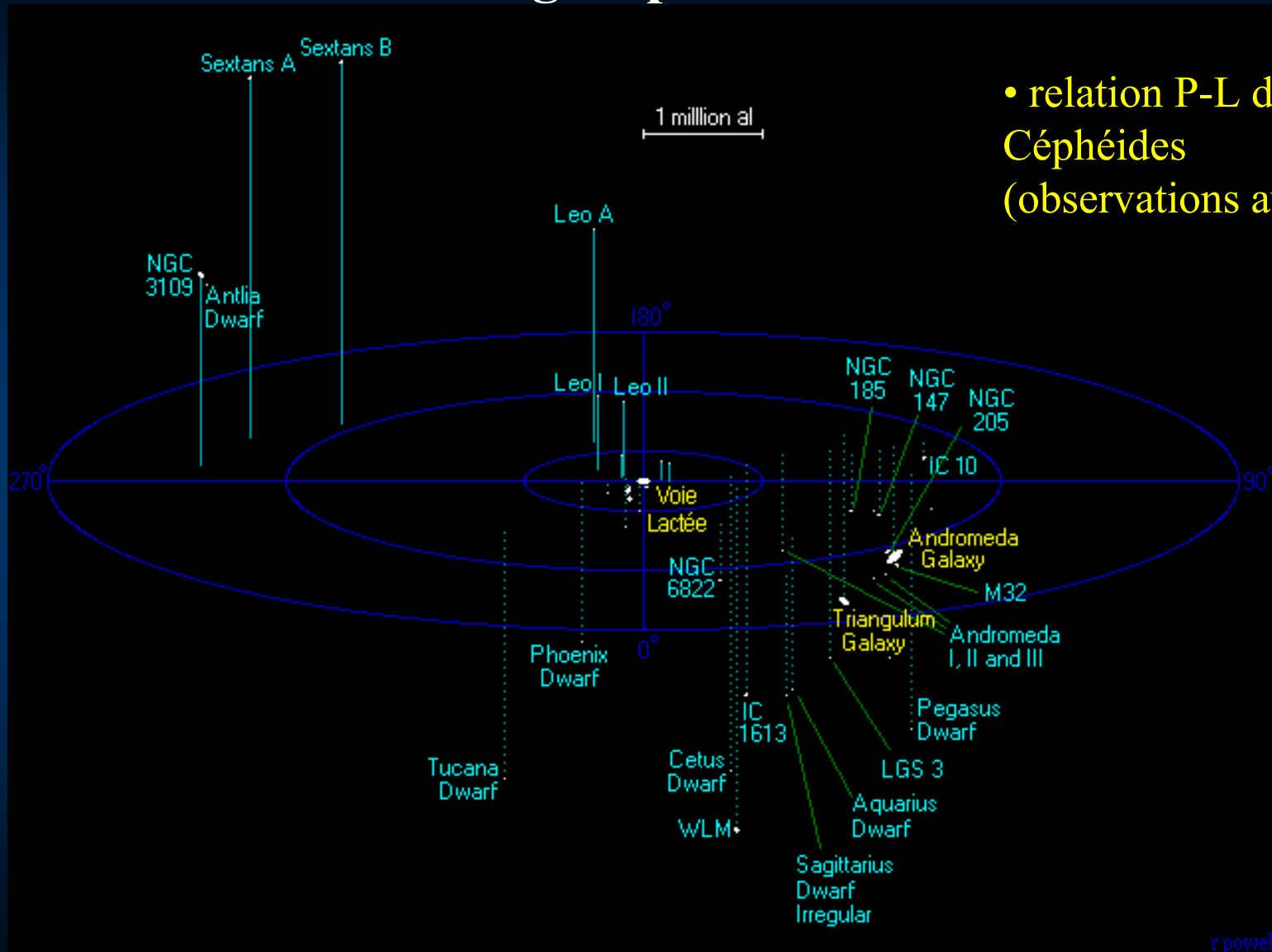
- Céphéides : méthode de la parallaxe de pulsation
1 kpc, 65 Céphéides, 5%

L'Univers jusqu'à 50000 années lumière : La voie lactée

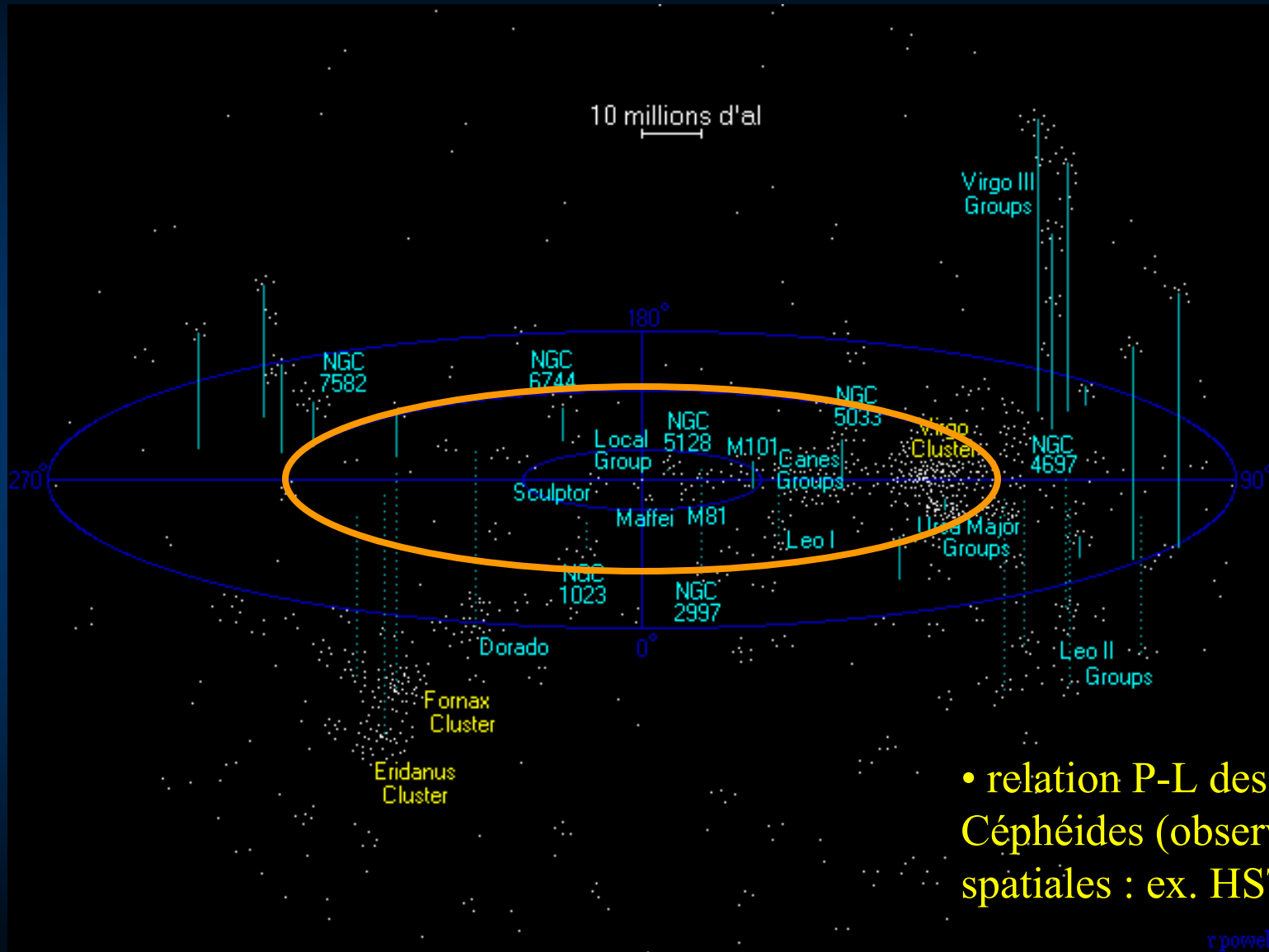


• Céphéides : GAIA (2011)
3 kpc, 250 Céphéides, 1%

L'univers jusqu'à 5 millions d'années lumière : Le groupe local

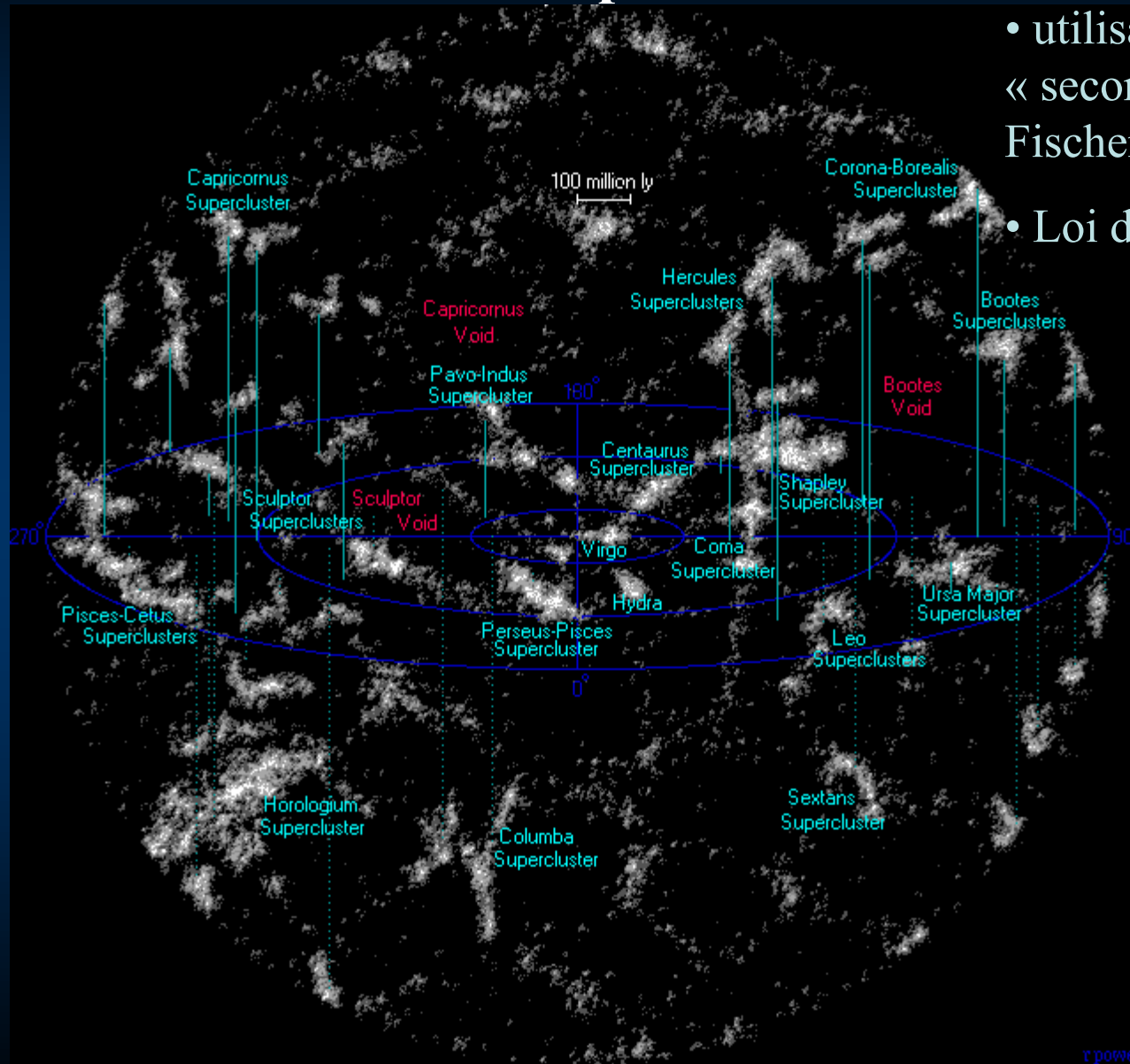


L'univers jusqu'à 100 millions d'années lumière : Le Superamas de la Vierge

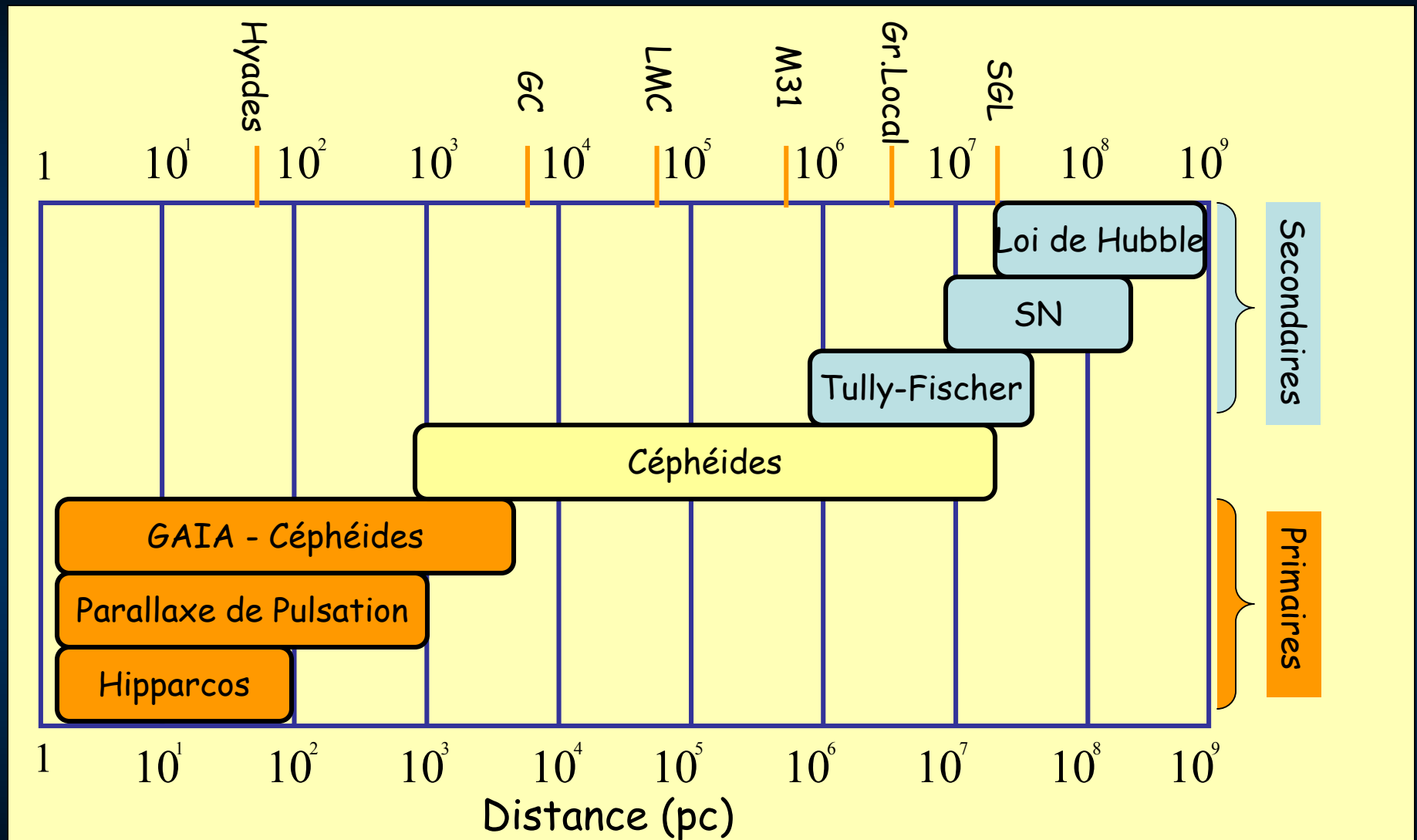


L'univers jusqu'à 1 milliard d'années lumière : Les Superamas voisins

- utilisation de méthodes « secondaires » (Tully-Fischer, Supernovae)
- Loi de Hubble



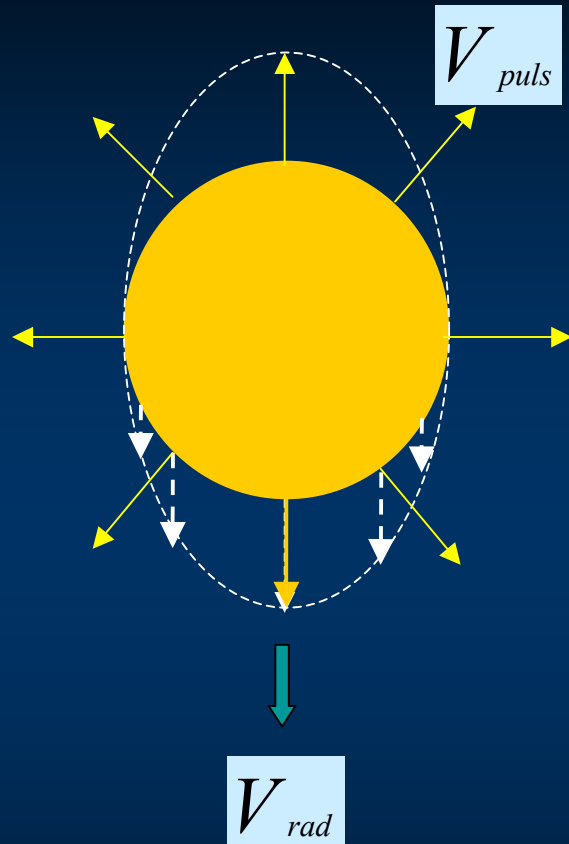
Les distances dans l'univers



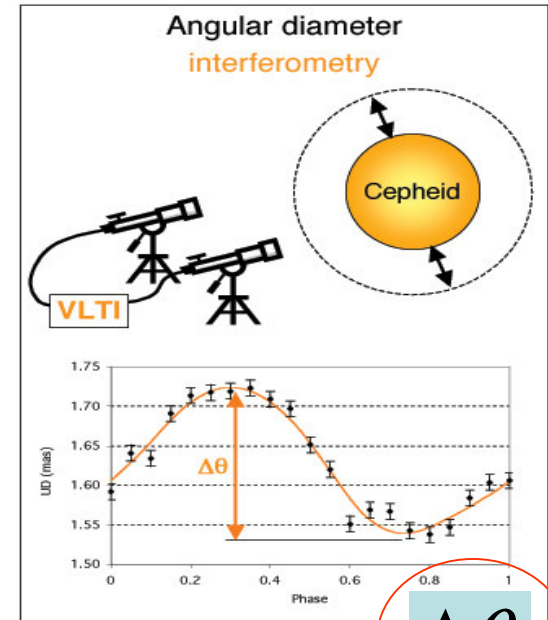
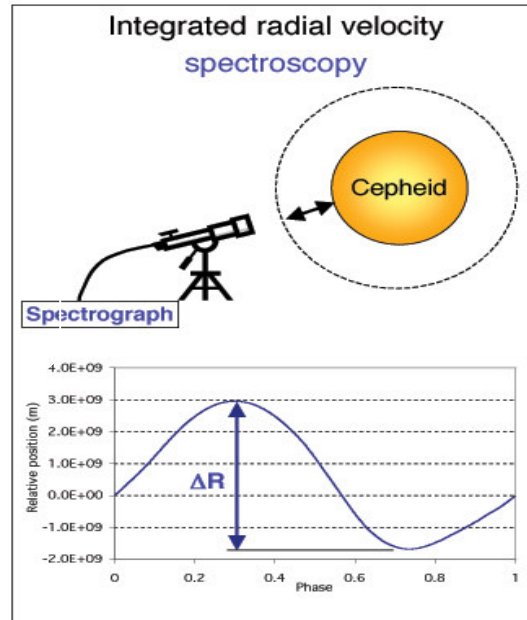
PLAN

- 1 – Les Céphéides et les distances dans l'Univers
- 2 – La méthode de la parallaxe de pulsation ($\Delta\theta$, p , ∇)
 - 3 – $\Delta\theta$ Les observations du VLTI
 - 4 – p Le facteur de projection
 - 5 – ∇ La dynamique atmosphérique
 - 6 – Conclusions & Perspectives

La méthode de la parallaxe de pulsation



2.
$$p = \frac{V_{puls}}{V_{rad}}$$



$d \text{ [pc]} = 9.305 \Delta R \text{ [R}_{\odot}] / \Delta \theta \text{ [mas]}$

1. $\Delta \theta$

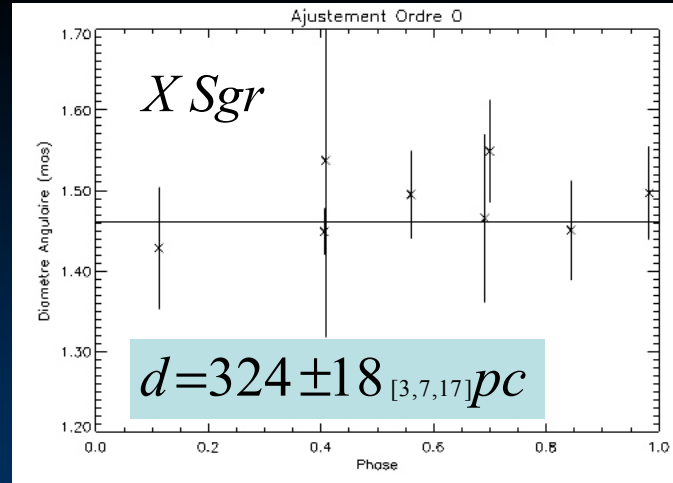
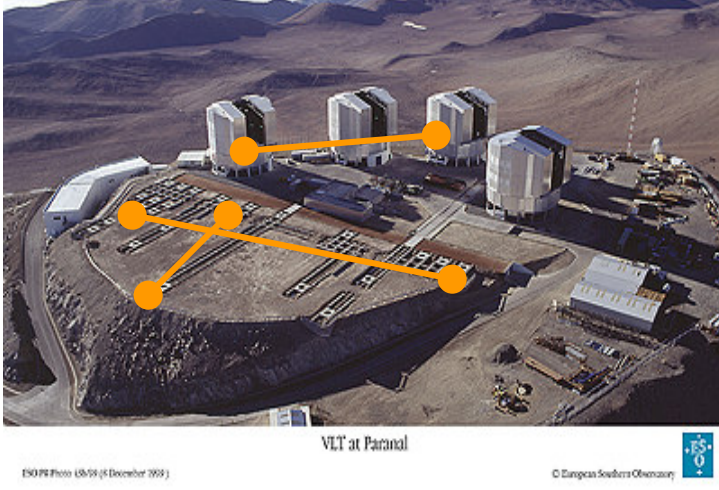
3. $\Delta R \Leftrightarrow \Delta \theta$

PLAN

- 1 – Les Céphéides et les distances dans l'Univers
- 2 – La méthode de la parallaxe de pulsation ($\Delta\theta$, p , ∇)
 - 3 – $\Delta\theta$ Les observations du VLTI
 - 4 – p Le facteur de projection
 - 5 – ∇ La dynamique atmosphérique
 - 6 – Conclusions & Perspectives

Observations VINCI/VLTI (1/2)

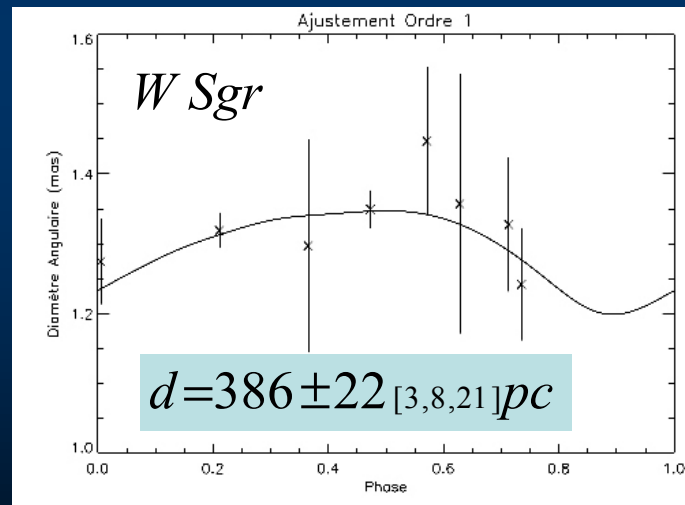
90 heures d'observations
7 Céphéides
3 bases (sidérostats)
bande K



Ordre 0

$$\theta_{\text{model}}(\phi_i) = \bar{\theta} = 9.305 \frac{\bar{D}}{d}$$

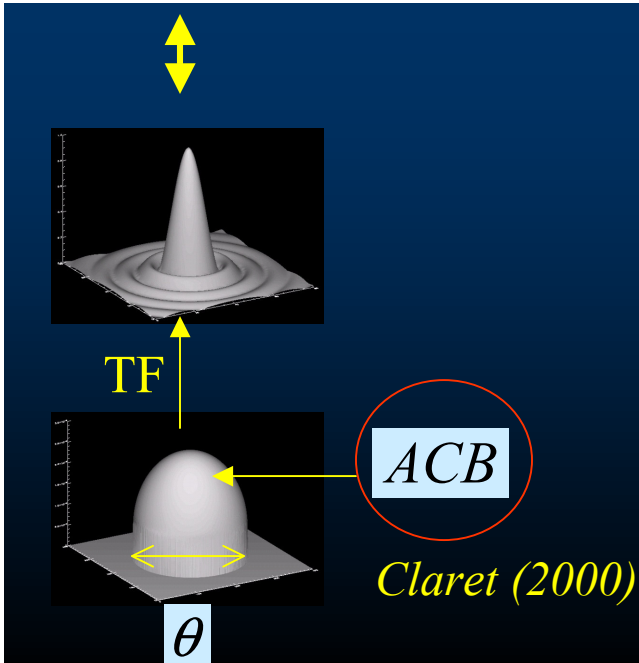
Gieren et al. (1998)



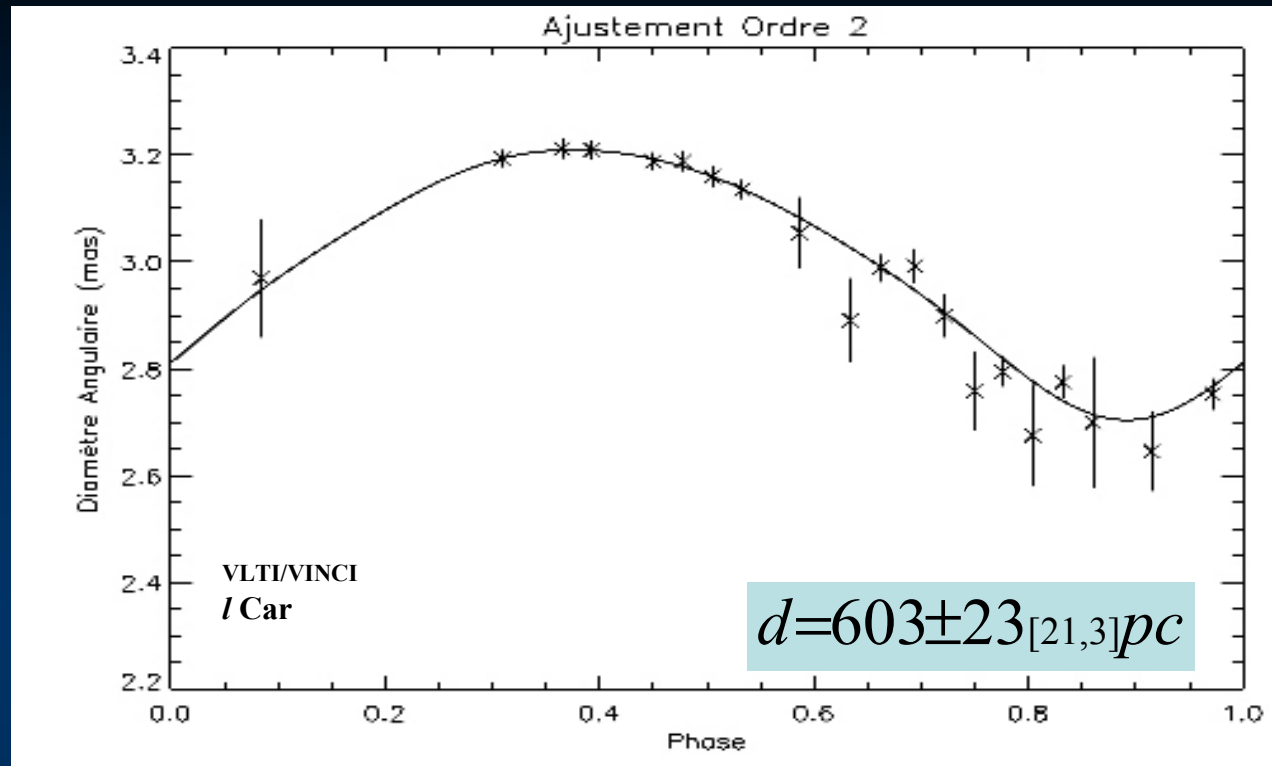
Ordre 1

$$\theta_{\text{model}}(\phi_i) = \frac{\bar{D}}{d} + 9.305 \left(\frac{\Delta D(\phi_i)}{d} \right)$$

CORAVEL Burki et al. (1982)



Observations VINCI (2/2)



Ordre 2

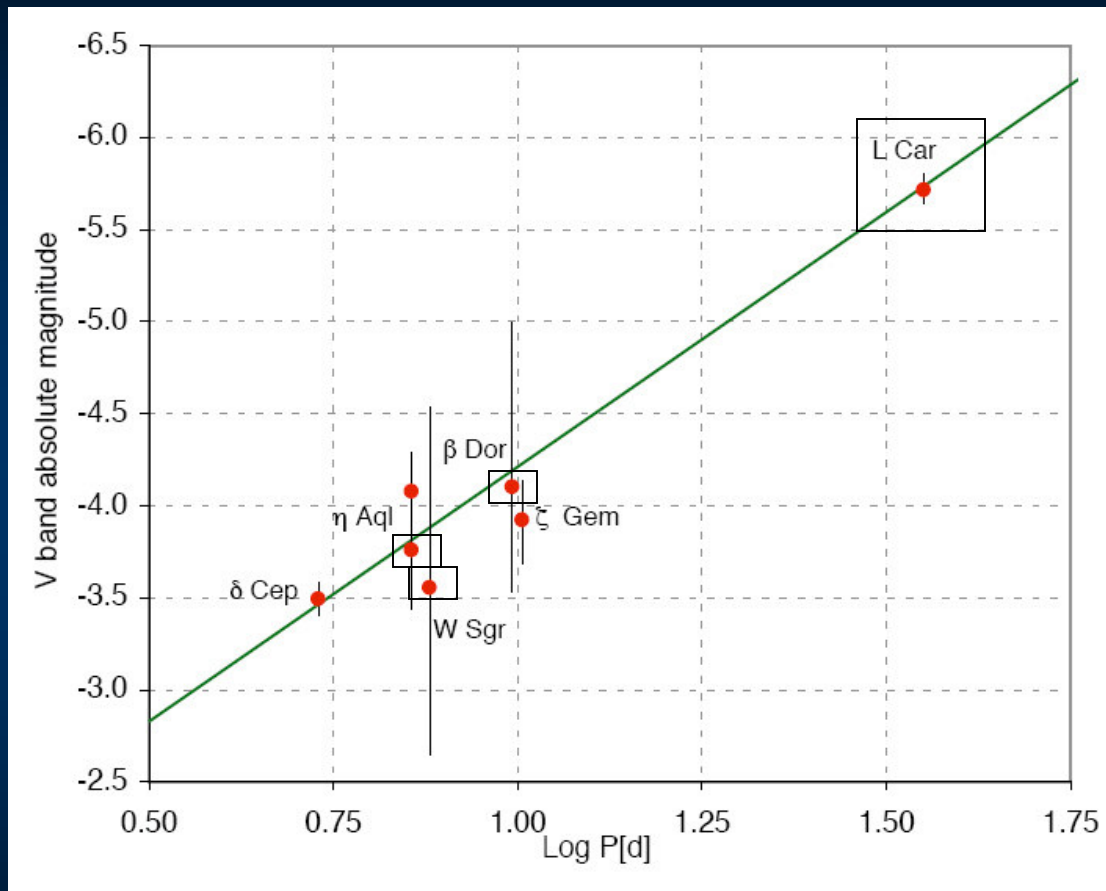
$$\theta_{\text{model}}(\phi) = \theta_{LD} + 9.305 \left(\frac{\Delta R(\phi)}{d} \right)$$

Cepheid distances from infrared long-baseline interferometry I. VINCI/VLTI observations of seven Galactic Cepheids. P. Kervella, N. Nardetto, D. Bersier, D. Mourard and V. Coudé du Foresto., 2004, *A&A*, 416, 941K

C1 : Méthode de la parallaxe de pulsation : 5% d'erreur sur la distance de l Car

Calibration de la relation Période-Luminosité

Cepheid distances from infrared long-baseline interferometry II. Calibration of the Period-Radius and Period-Luminosity relations. P. Kervella, D. Bersier, D. Mourard, N. Nardetto and V. Coudé du Foresto., 2004, *A&A*, 423, 327K



$$M_V = \alpha_V (\log P - 1) + \beta_V$$

$$\alpha_V = -2.769 \pm 0.073 \text{ (LMC)}$$

$$\beta_V = -4.209 \pm 0.075$$

E2 - Précision en magnitude sur le Point-zéro :
 0.08 en bande V
 0.06 en bande K

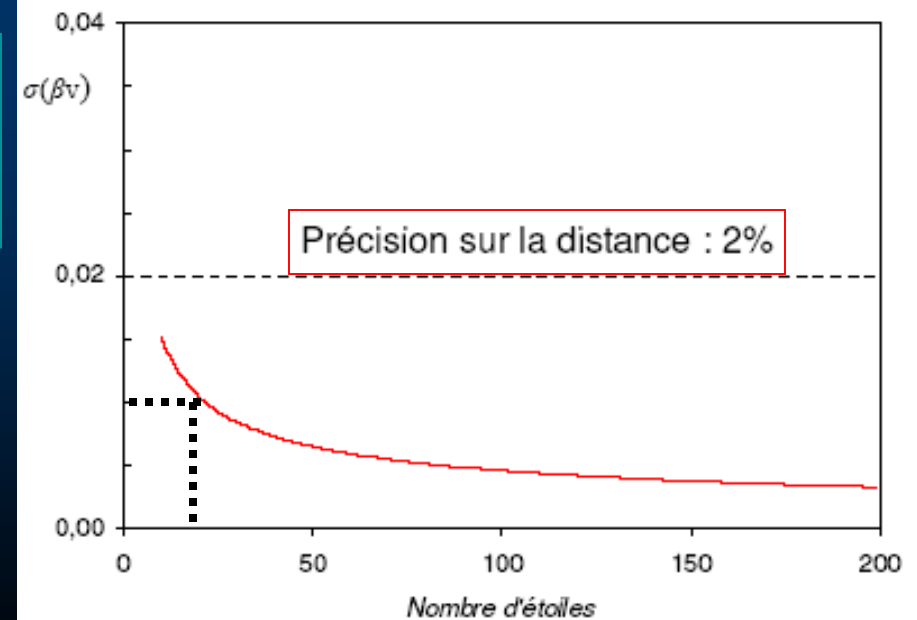
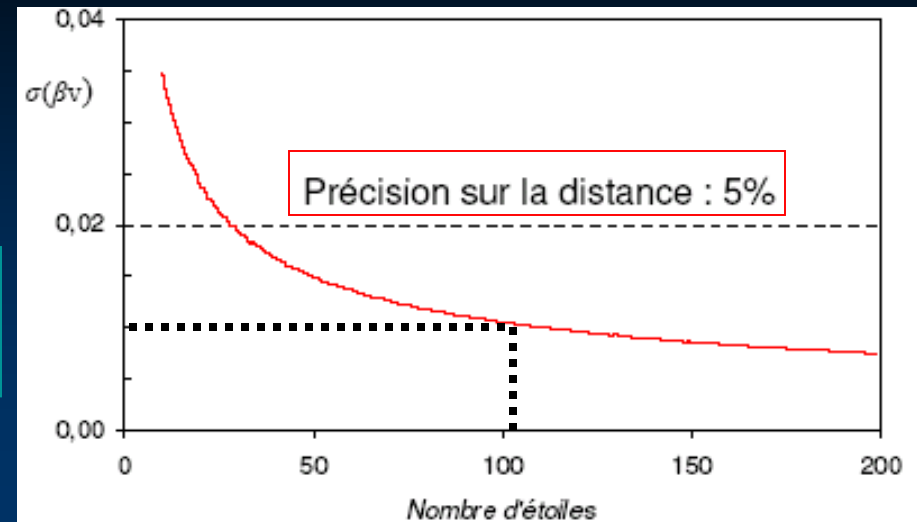
Cepheid distances from infrared long-baseline interferometry III. Calibration of the surface brightness-color relations. P. Kervella, D. Bersier, D. Mourard, N. Nardetto, P. Fouqué, and V. Coudé du Foresto., 2004, *A&A*, 428, 587K

The angular size of the Cepheid lCar : a comparison of the interferometric and surface brightness techniques. P. Kervella, P. Fouqué, J. Storm, W. P. Gieren, D. Bersier, D. Mourard, N. Nardetto, V. Coudé Du Foresto, 2004, *ApJ*, 604, 113K

Perspective : le programme Céphéïdes avec AMBER/VLTI

P1 : Obtenir une précision de **0.01** mag. sur le point zéro de la relation P-L

P2 : Mesure directe de la variation de l'assombrissement centre-bord de **1 Car** avec la phase.

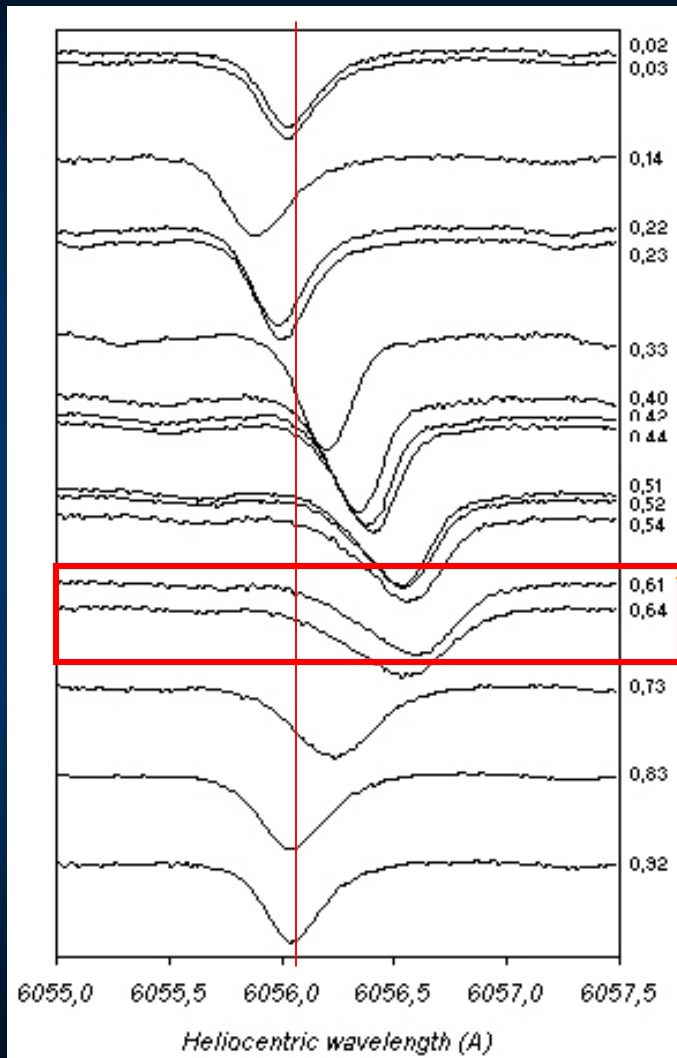


PLAN

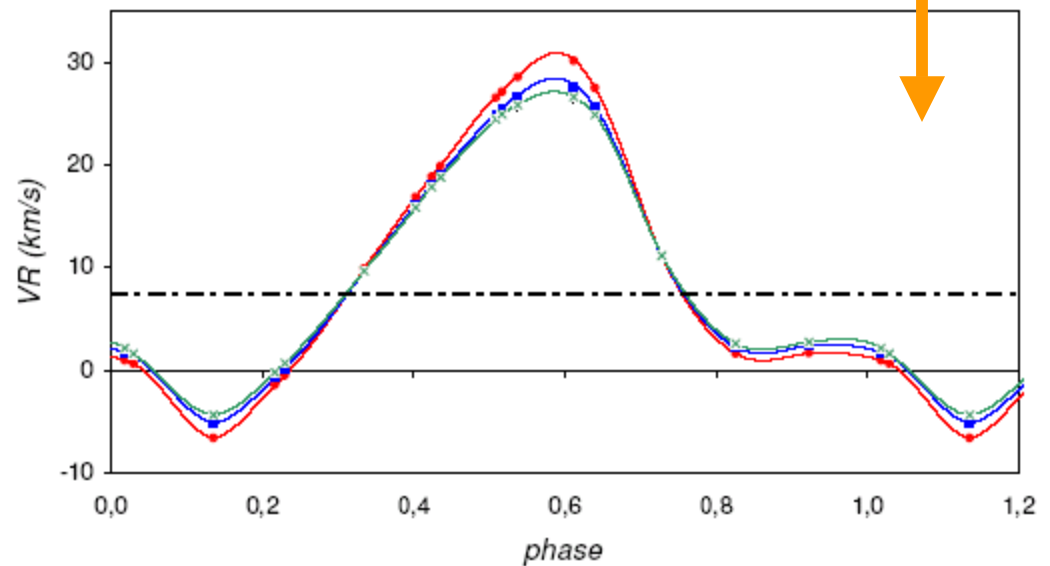
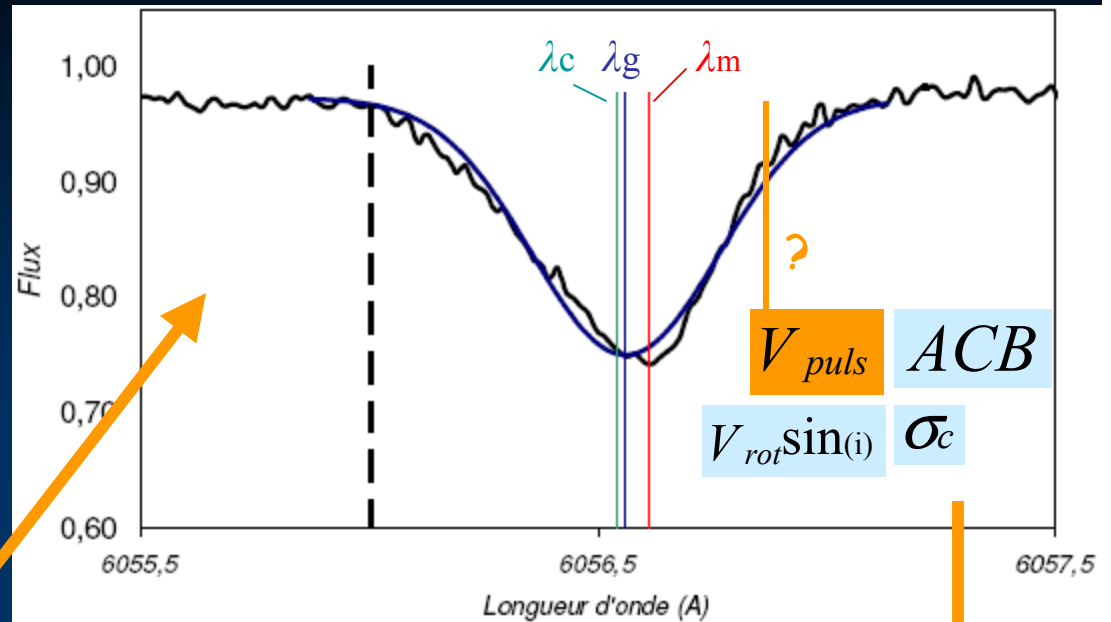
- 1 – Les Céphéides et les distances dans l'Univers
- 2 – La méthode de la parallaxe de pulsation ($\Delta\theta$, p , ∇)
 - 3 – $\Delta\theta$ Les observations du VLTI
 - 4 – p **Le facteur de projection**
 - 5 – ∇ La dynamique atmosphérique
 - 6 – Conclusions & Perspectives

La définition de la vitesse radiale

$$V_{rad}$$



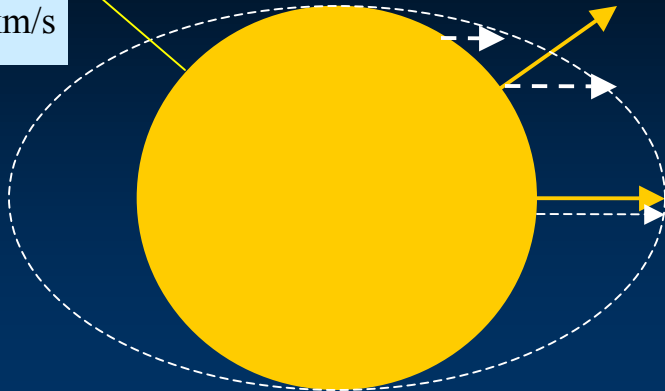
*β Dor – Fe I line
Observations HARPS*



Le facteur de projection (1/2)

• Effet de projection géométrique

$$V_{puls} = 30 \text{ km/s}$$



$$VR_c = 20 \text{ km/s}$$

$$p_c = 1.5$$

ACB

$$u = 0$$

Dispersion Doppler

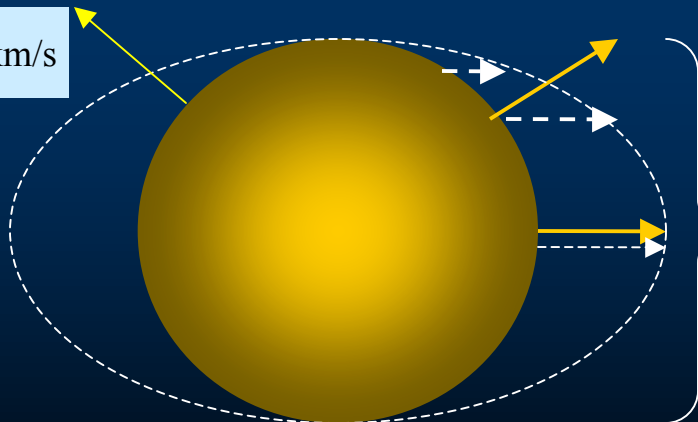
$$\sigma_c = 0 \text{ \AA}$$

Rotation

$$V_{rot} \sin(i) = 0 \text{ km/s}$$

• Effet de l'assombrissement centre-bord

$$V_{puls} = 30 \text{ km/s}$$



$$VR_c = 21.5 \text{ km/s}$$

$$p_c = 1.39$$

ACB

$$u = 0.7$$

Dispersion Doppler

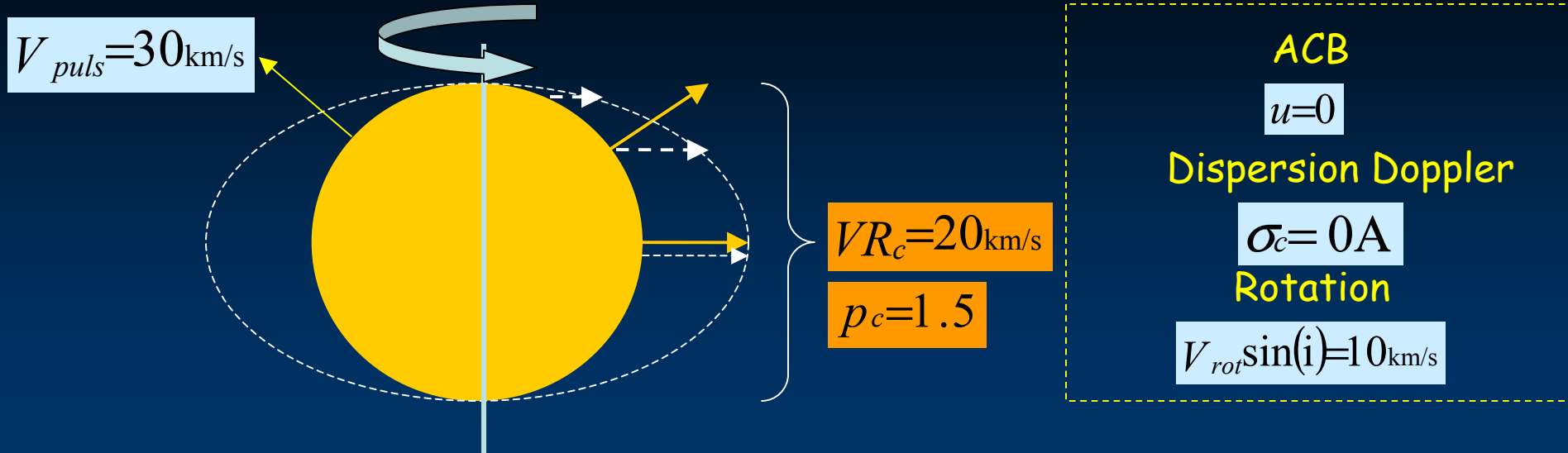
$$\sigma_c = 0 \text{ \AA}$$

Rotation

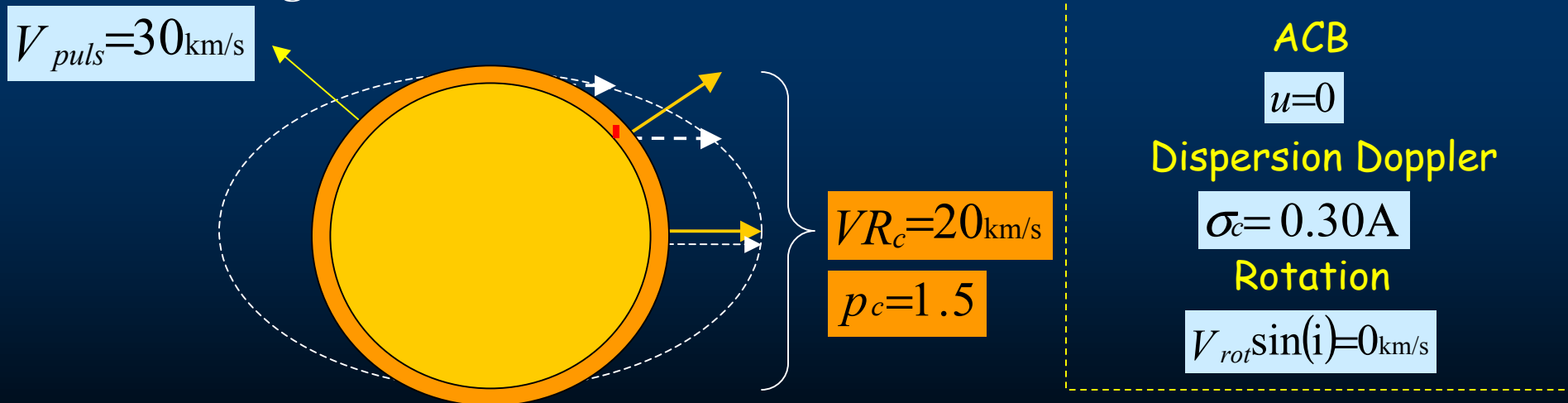
$$V_{rot} \sin(i) = 0 \text{ km/s}$$

Le facteur de projection (2/2)

• Effet de la rotation

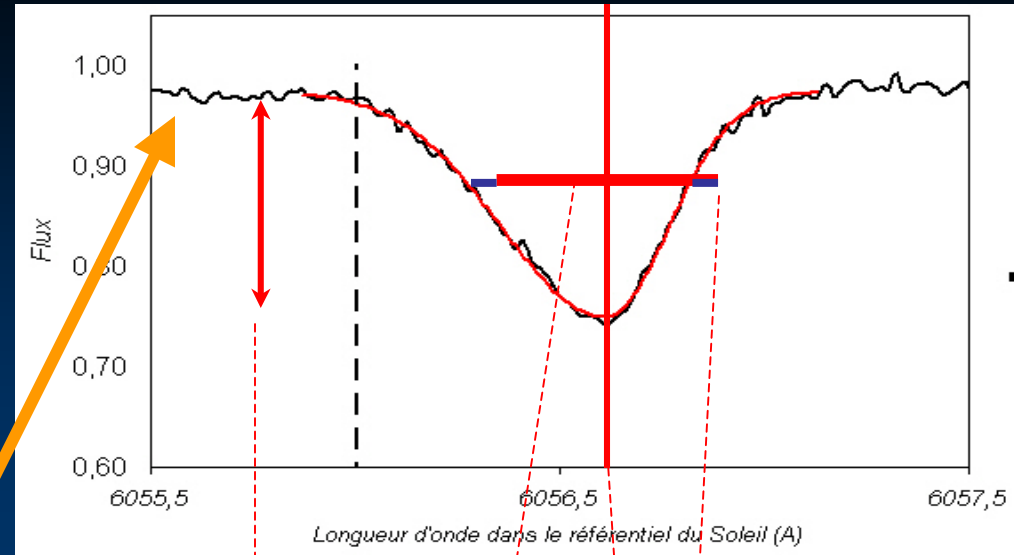
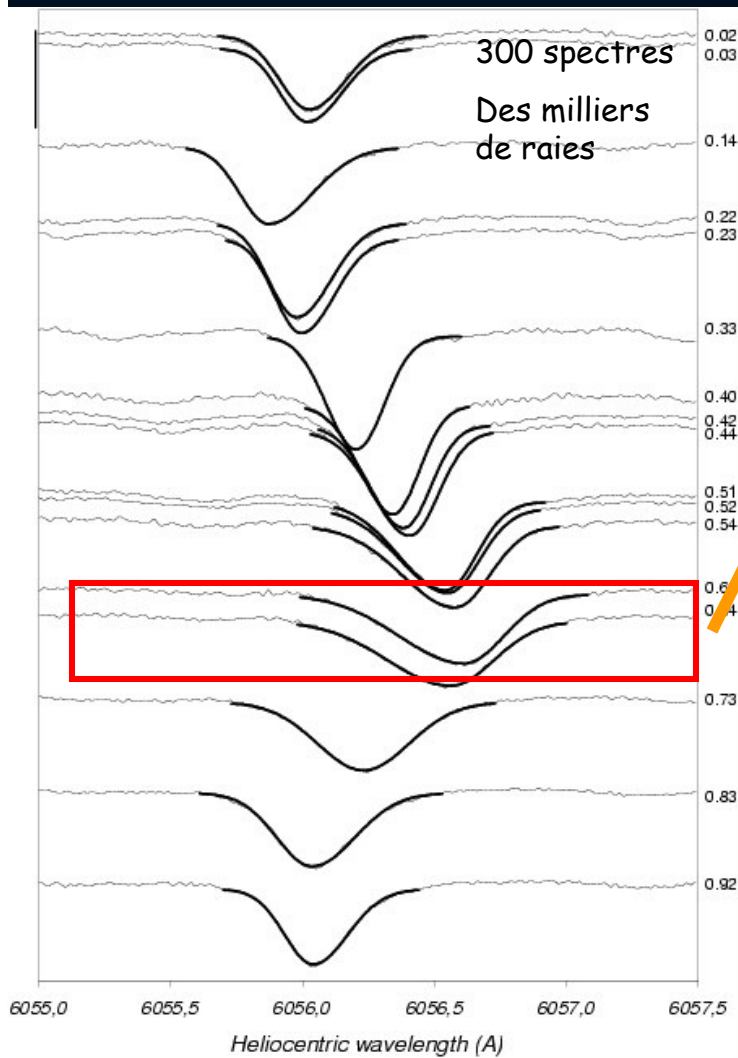


• Effet de la largeur de la raie σ_c



C3 : La VR déduite grâce à la méthode du premier moment de la raie est indépendante de σ_c et de $V_{rot} \sin(i)$.

Observations HARPS de 10 Céphéides (P=3j à P=42j)



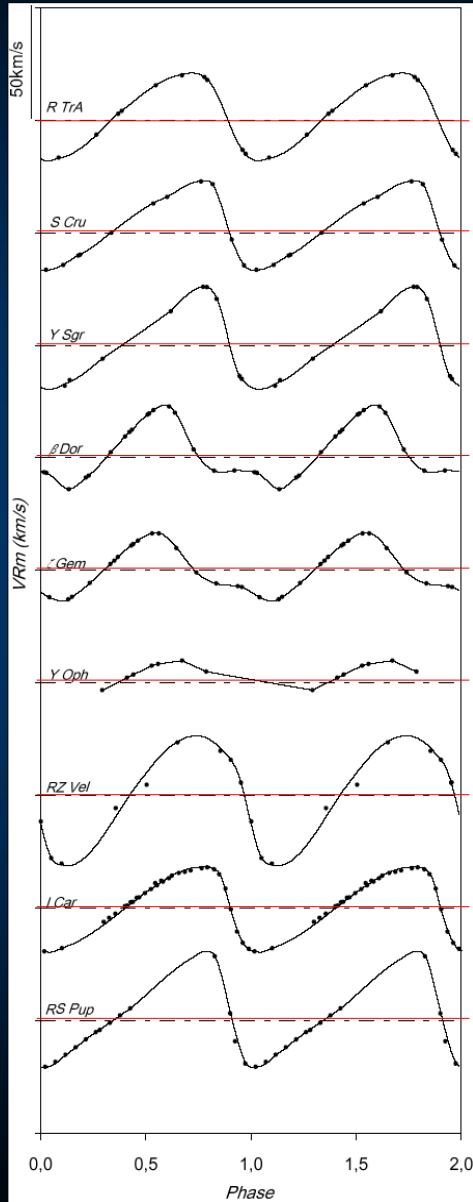
$$f(\lambda) = 1 - A \exp\left(\frac{4 \ln 2 (\lambda - \lambda_m)^2}{(FWHM (1 + asy))^2}\right) \quad \text{si } \lambda > \lambda_m$$

$$f(\lambda) = 1 - A \exp\left(\frac{4 \ln 2 (\lambda - \lambda_m)^2}{(FWHM (1 - asy))^2}\right) \quad \text{si } \lambda < \lambda_m$$

β Dor – FeI line

Observations HARPS

VRm



Correlation



R TrA, P=3.39j

S Cru, P=4.69j

Y Sgr, P=5.77j

beta Dor P=9.84j

zeta Gem, P=10.15j

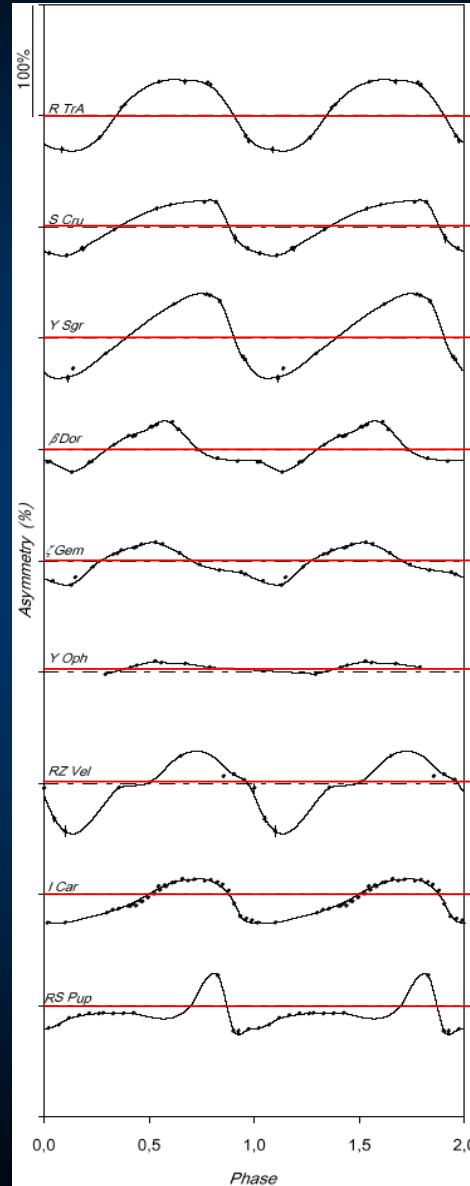
Y Oph=17.13j

RZ Vel, P=20.40j

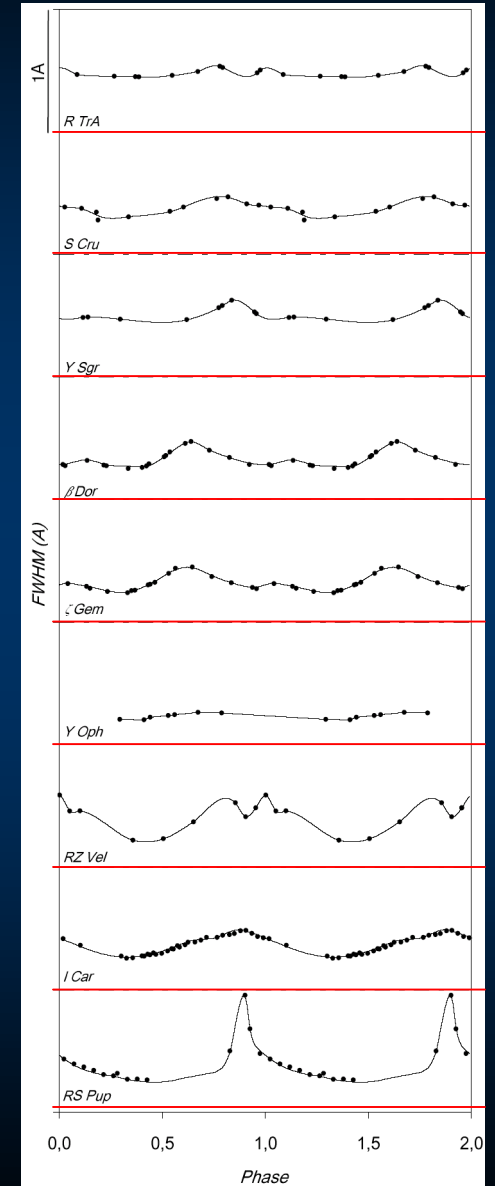
l Car, P=35.56j

RS Pup, P=41.51j

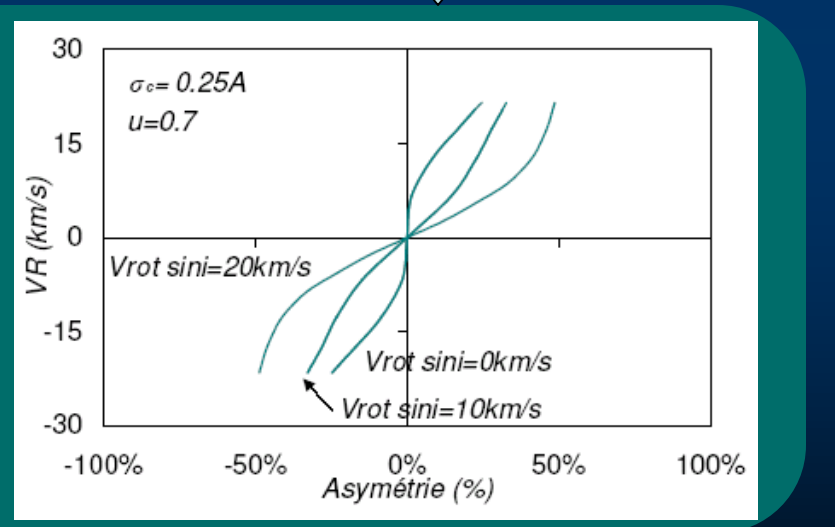
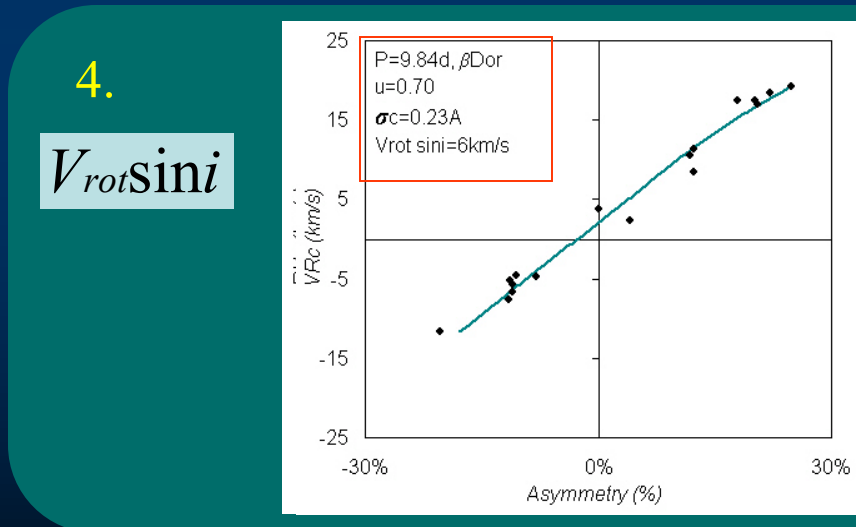
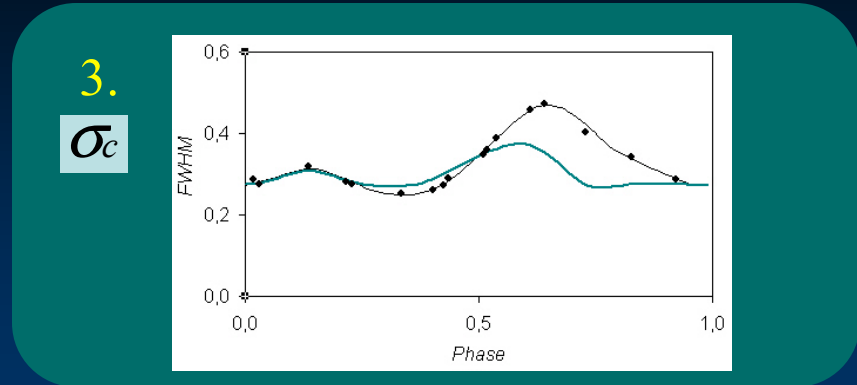
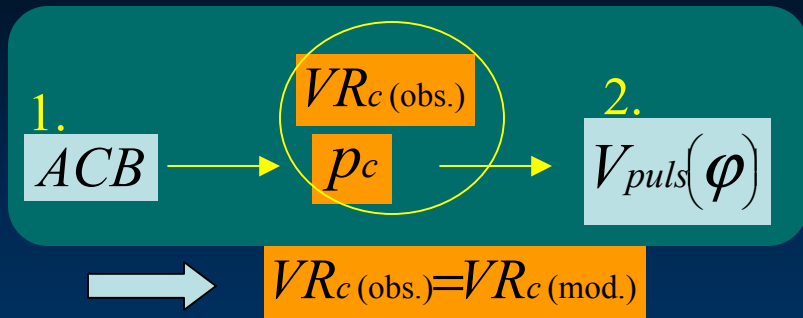
Asymétrie



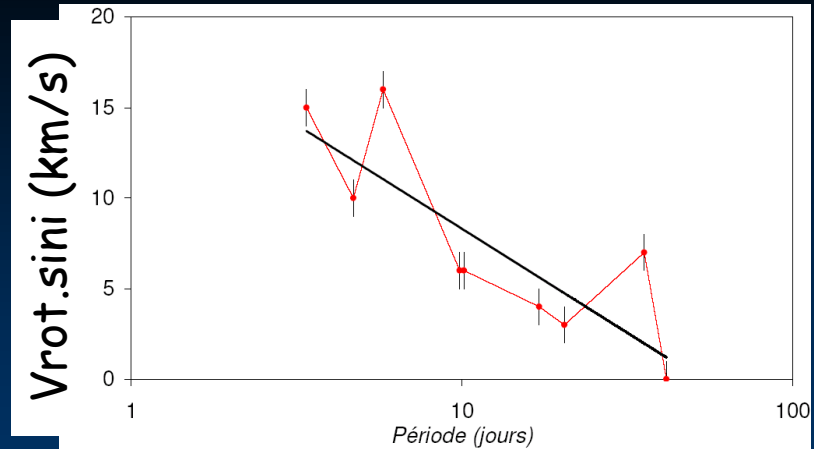
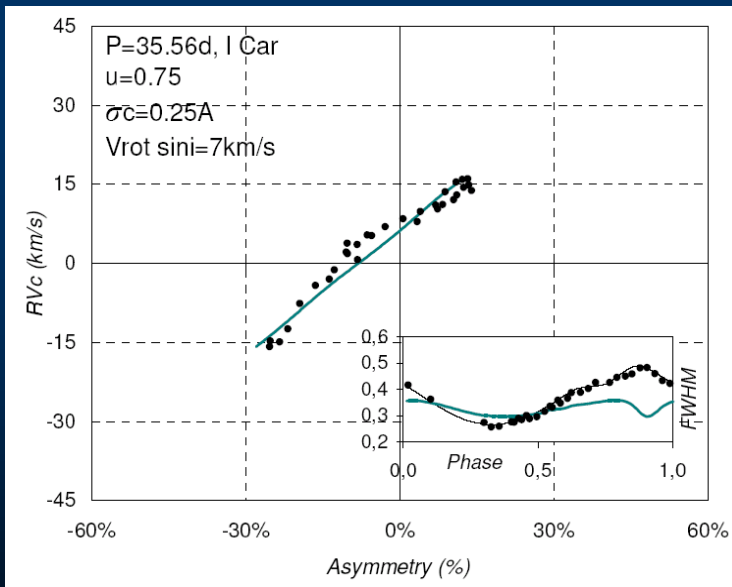
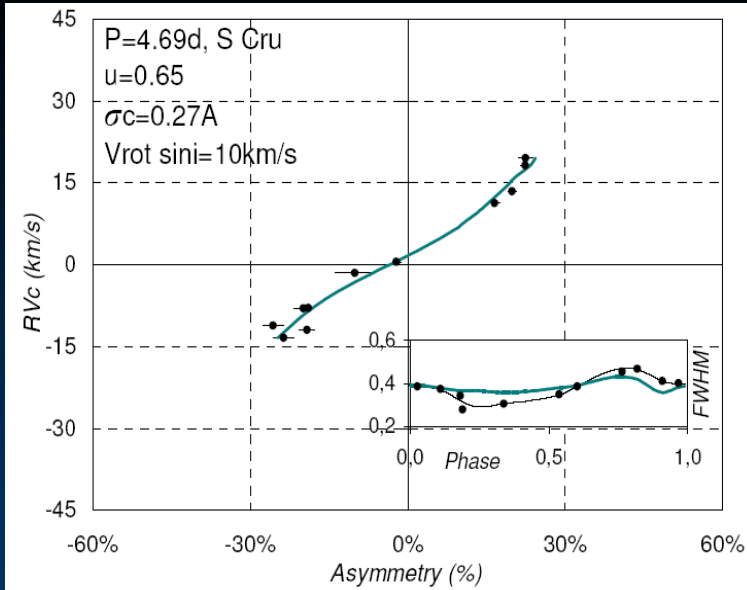
FWHM



Procédure d'ajustement

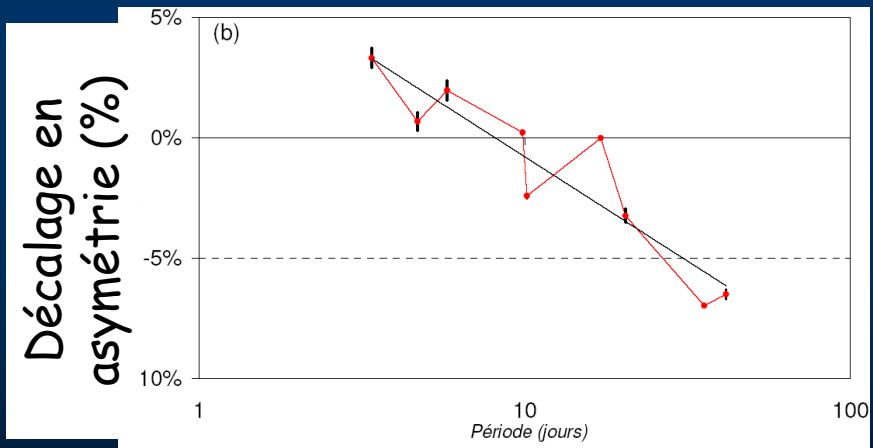


Résultats HARPS



e4 :

$$V_{rot} \sin i = (-11.7 \pm 0.9) \log(P) + (20.5 \pm 1.0) [km/s]$$



e5 :

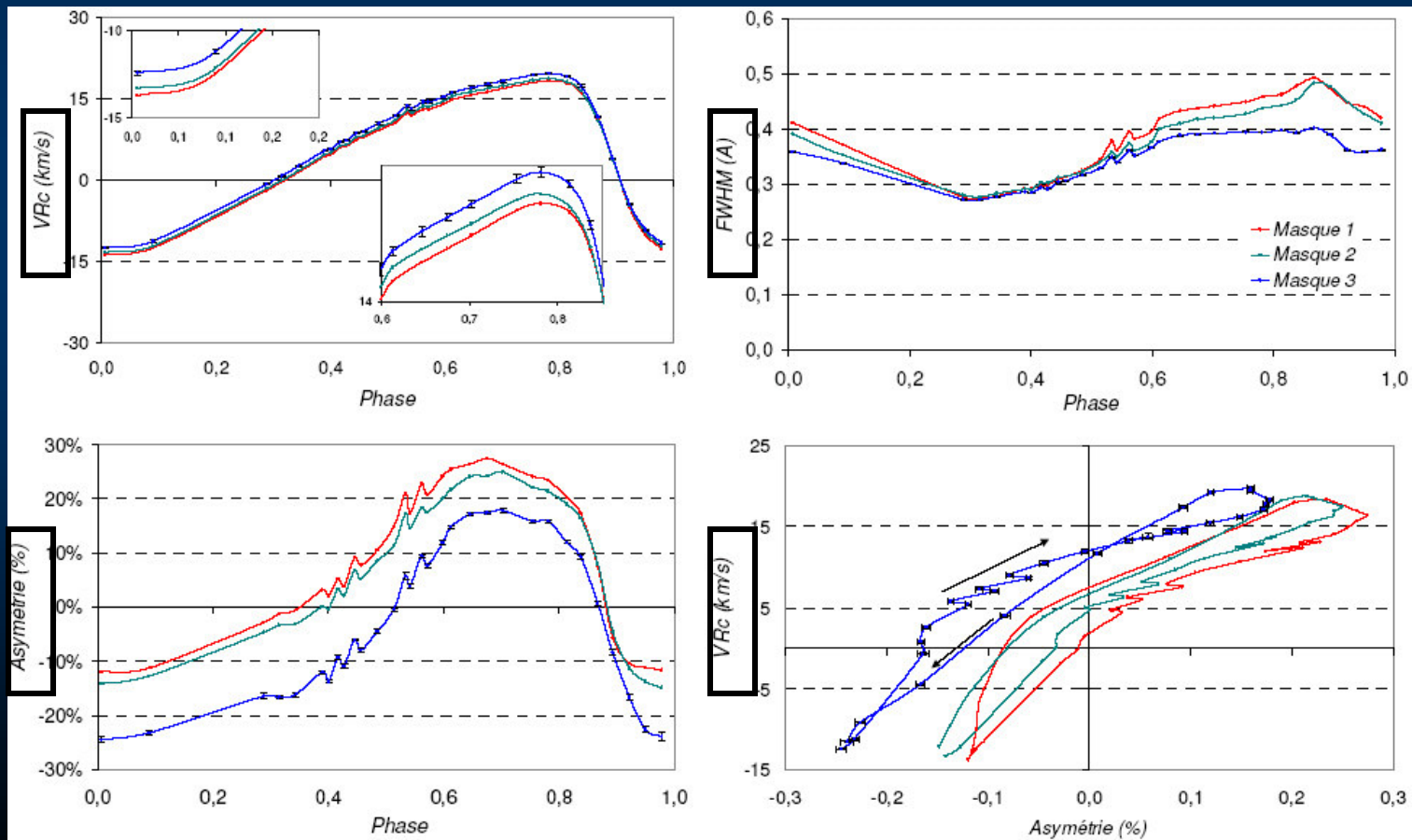
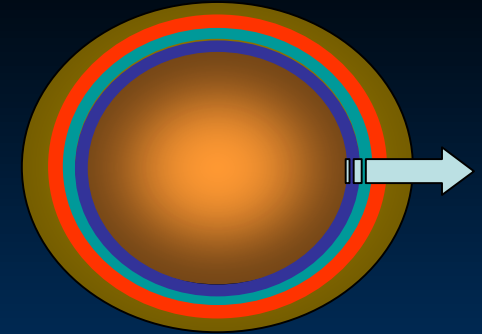
$$\overline{asy}(\phi) = (-10.7 \pm 0.1) \log(P) + (9.7 \pm 0.2) [\%]$$

High resolution spectroscopy for Cepheids distance determination I. Line asymmetry

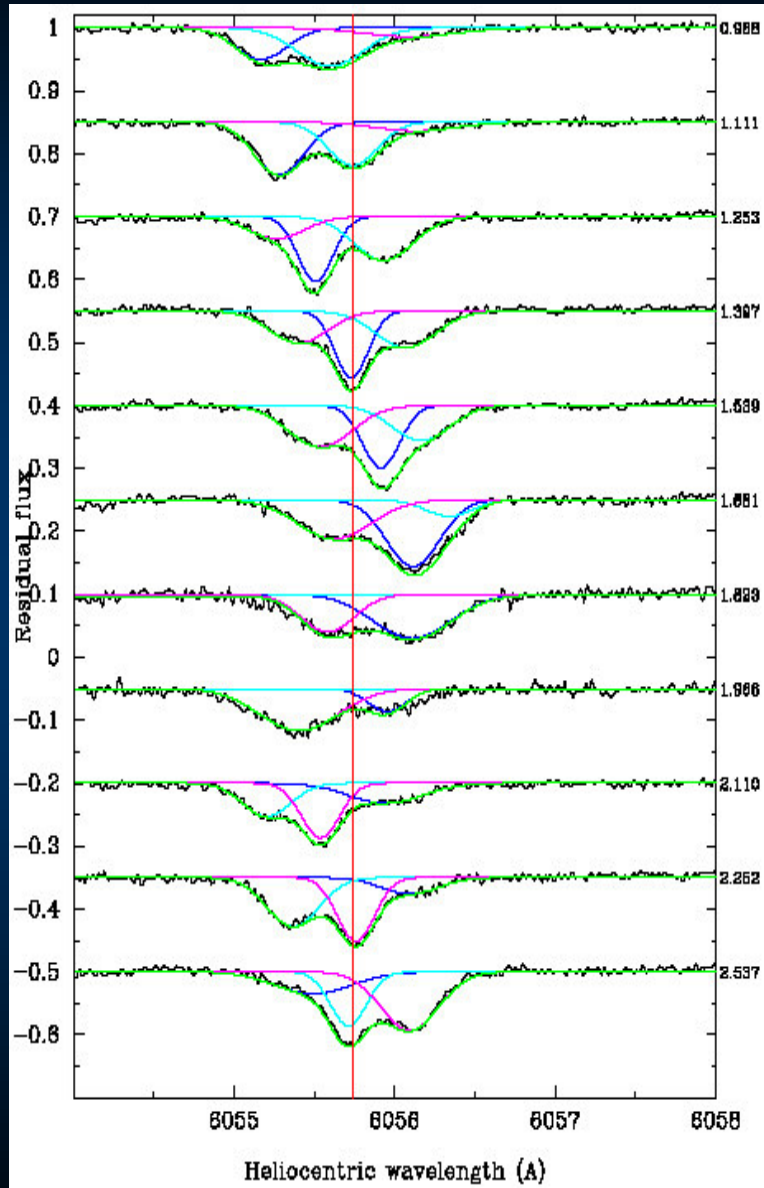
N. Nardetto, D. Mourard, P. Kervella, Ph. Mathias, A. Mérand, D. Bersier., 2005, soumis à A&A

P4 : Etude multi-raie HARPS pour étudier les gradients de vitesse dans l'atmosphère

masque 1			masque 2			masque 3		
Line	λ (Å)	Ep(eV)	Line	λ (Å)	Ep(eV)	Line	λ (Å)	Ep(eV)
Fe 1	6003.012	3.88	Fe 1	6020.169	4.61	C 1	6012.225	8.64
Fe 2	6084.111	3.20	Fe 1	6024.058	4.55	Si 1	6125.021	5.61
Fe 1	6096.665	3.98	Fe 1	6027.051	4.08	Si 1	6155.134	5.62
Fe 2	6149.258	3.89	Fe 1	6056.005	4.73	Si 1	6237.319	5.61
Fe 1	6187.990	3.94	Fe 1	6093.644	4.61			
Fe 1	6232.641	3.65	Ni 1	6111.066	4.09			
			Ni 1	6204.600	4.09			
			Ni 1	6223.981	4.11			



P5 : Les observations HARPS de χ Sgr + observations AMBER

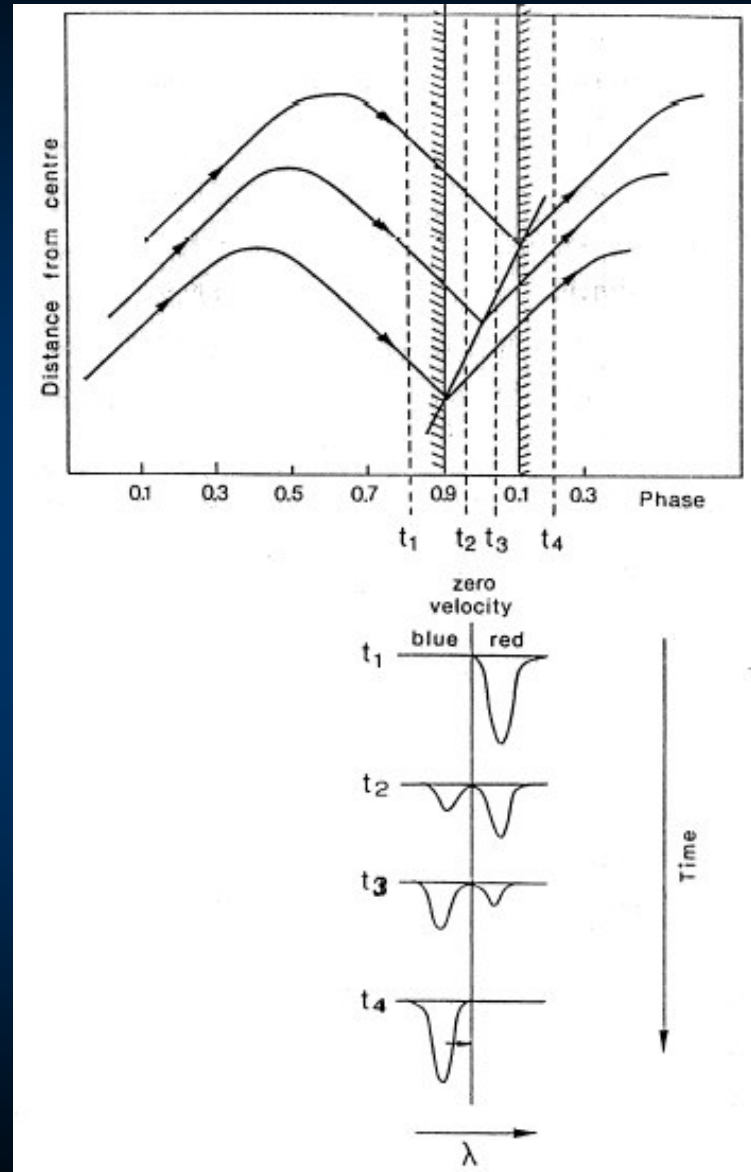


cycle 1

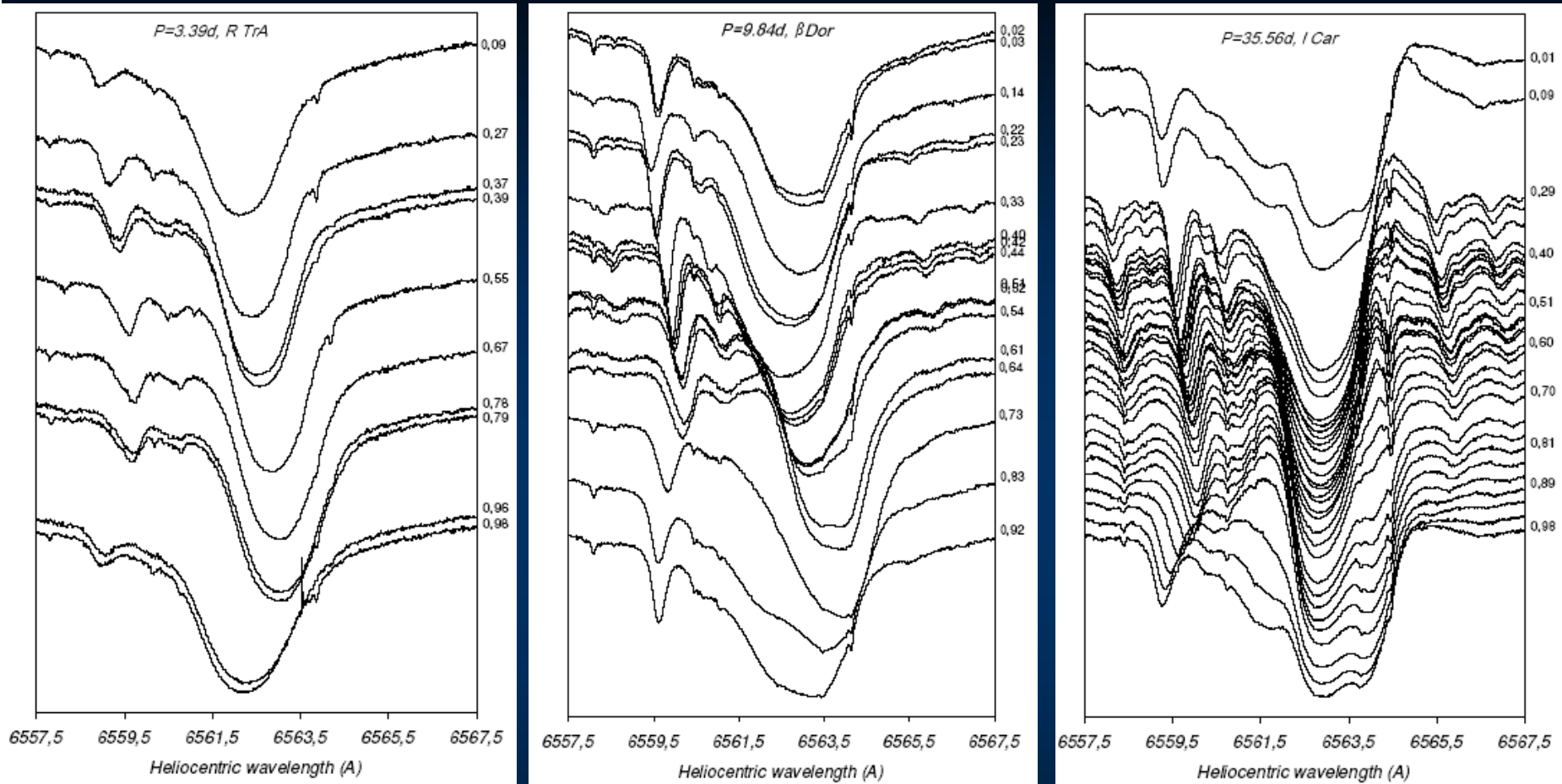
cycle 2

cycle 3

$P=7.01j$



P6 : Etude de la perte de masse via les profils de Balmer



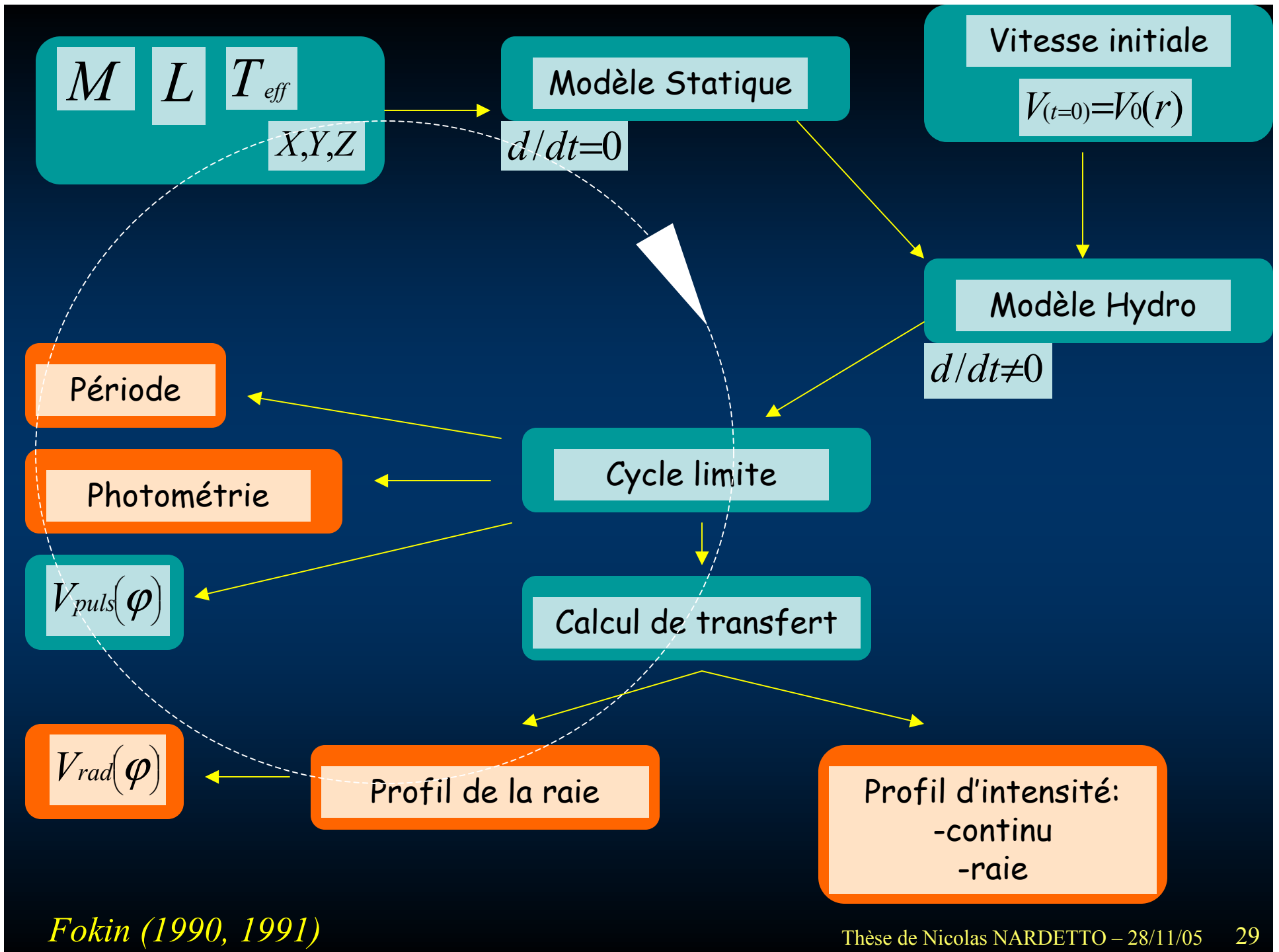
R TrA – P=3.39j

beta Dor – P=9.84j

l Car – P=35.56j

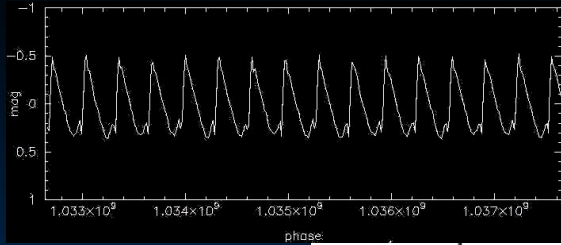
PLAN

- 1 – Les Céphéides et les distances dans l'Univers
- 2 – La méthode de la parallaxe de pulsation ($\Delta\theta$, p , ∇)
 - 3 – $\Delta\theta$ Les observations du VLTI
 - 4 – p Le facteur de projection
 - 5 – ∇ **La dynamique atmosphérique**
 - 6 – Conclusions & Perspectives

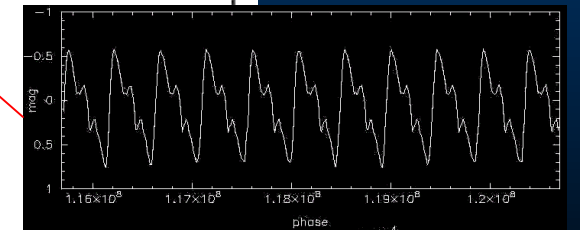
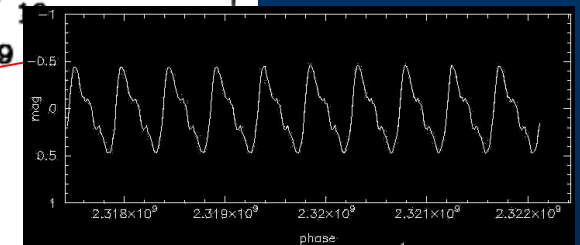
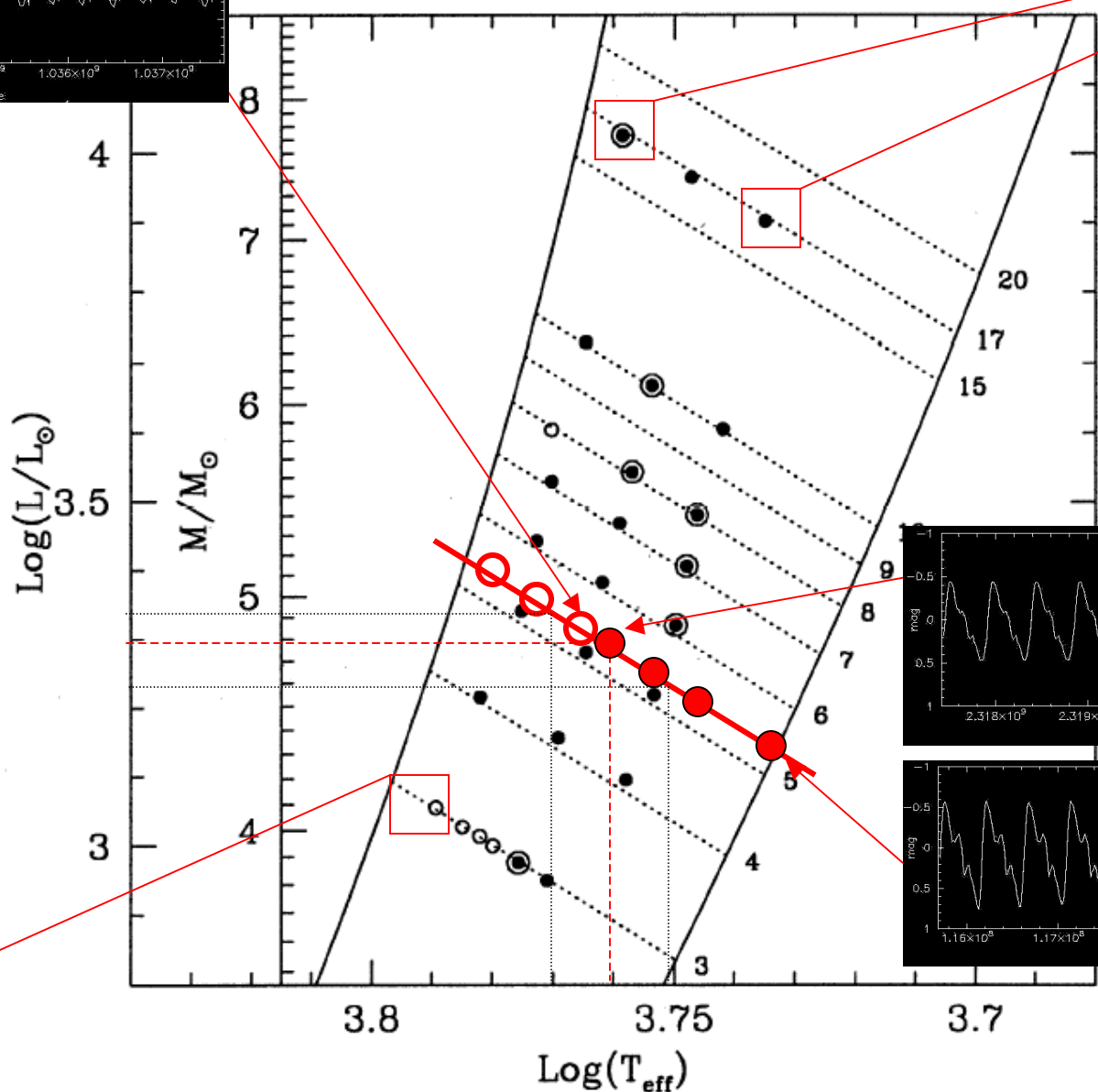


Ajustement du modèle

δ Cep



Double mode
Fondamental



P7 : Un modèle incluant la convection, une grille adaptative ...

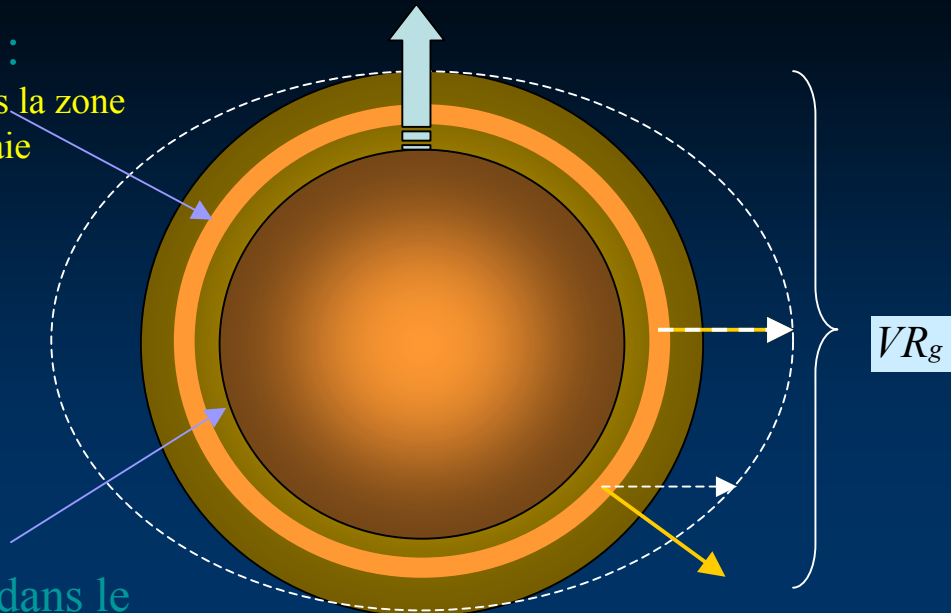
1er harmonique

Le facteur de projection et la définition de la vitesse pulsante

Spectroscopie :

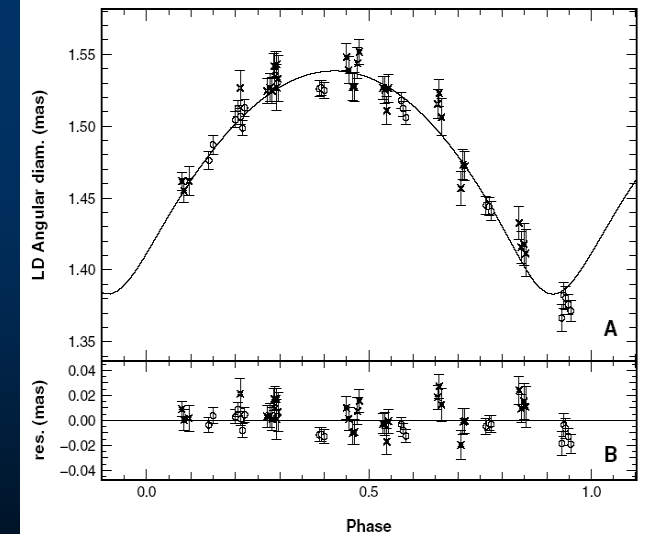
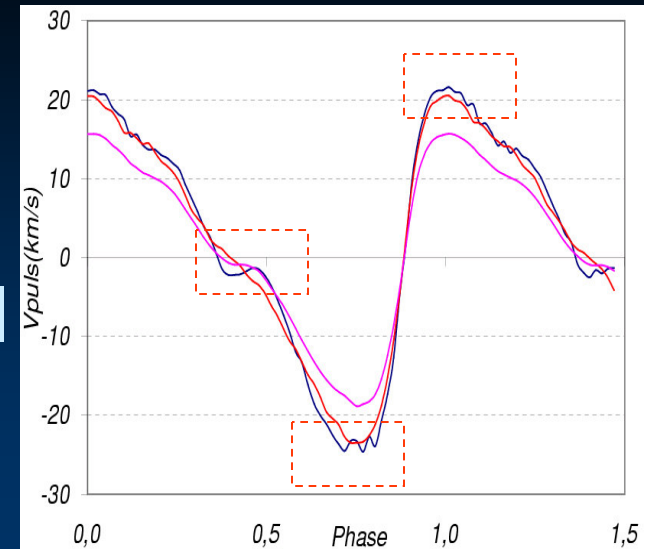
« vitesse du gaz dans la zone de formation de la raie ($\tau=2/3$) »

$$p=1.35$$



Interférométrie dans le continu : « vitesse de la couche optique associée à la photosphère »

$$p=1.27$$

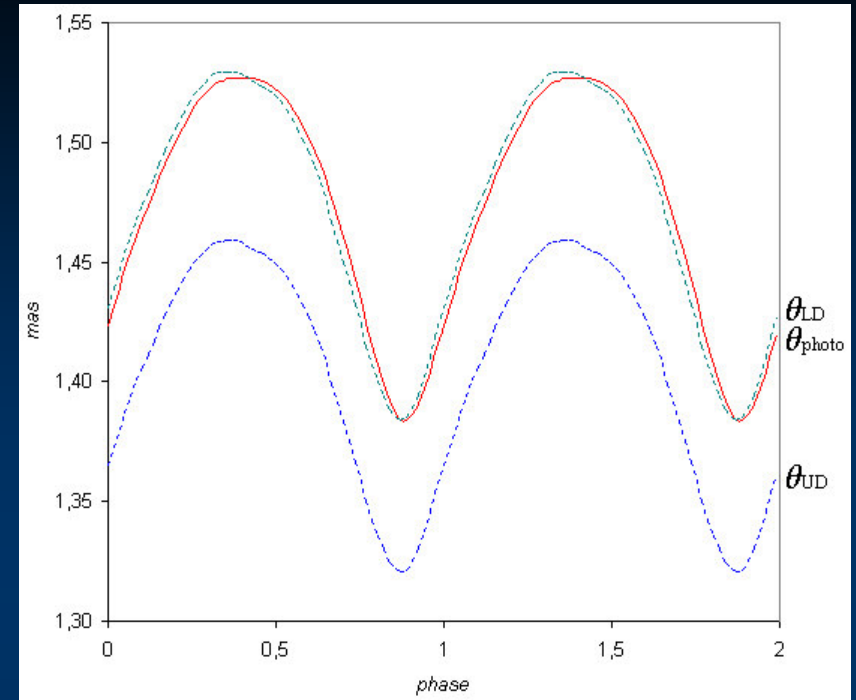
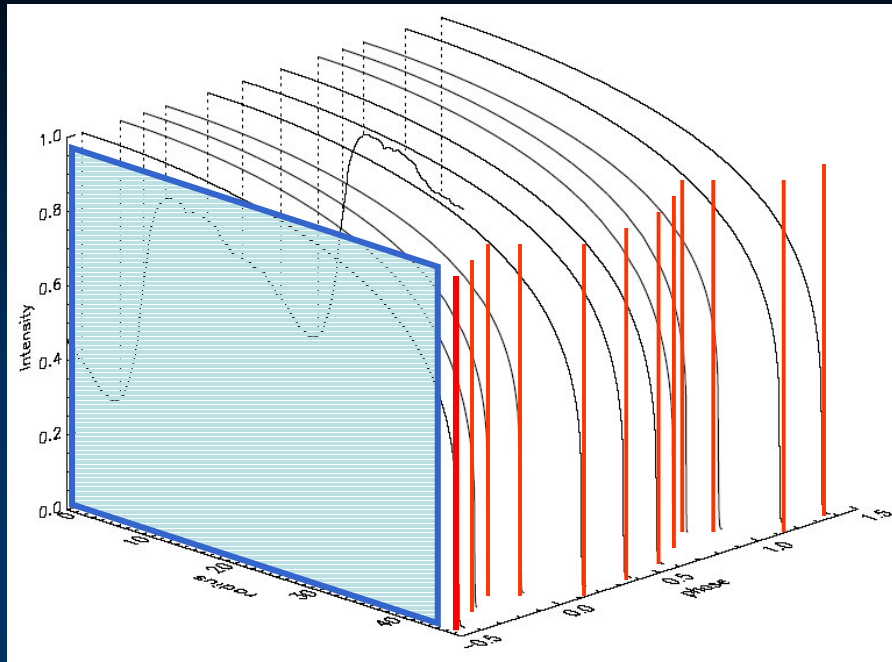


C6 : Sur-estimation des distances de 6%.
C7 : La dépendance temporelle du p-facteur a peu d'impact sur la distance

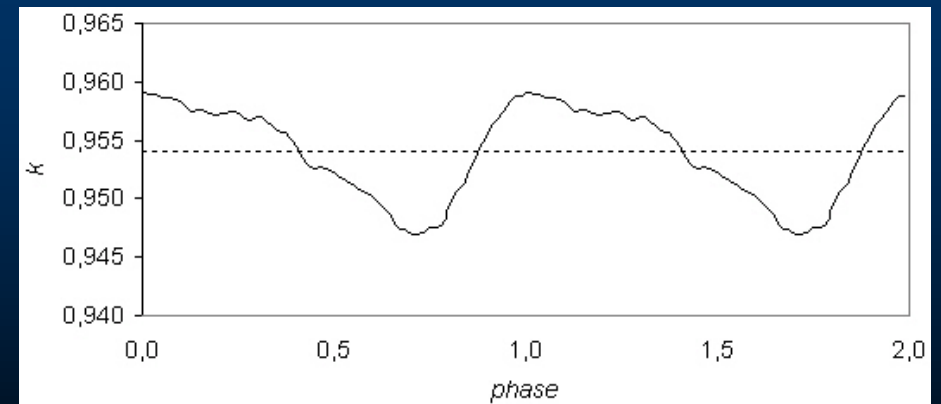
Mérand et al. 2005

« Self consistent modelling of the projection factor for interferometric distance determination »

Impact de la variation de l'ACB sur la distance



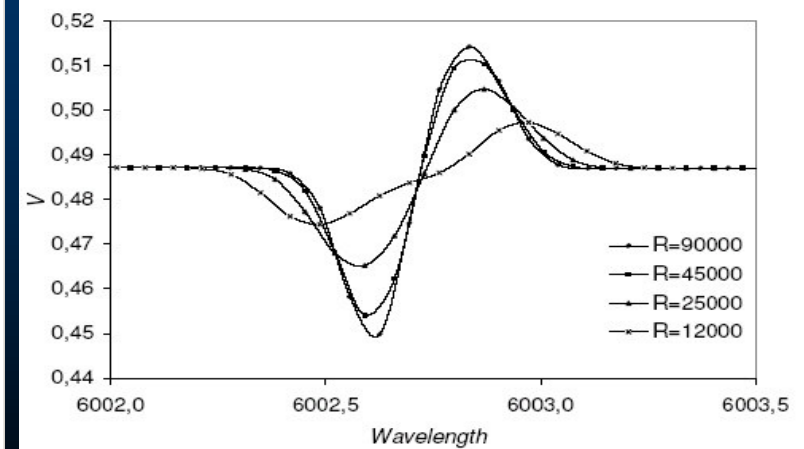
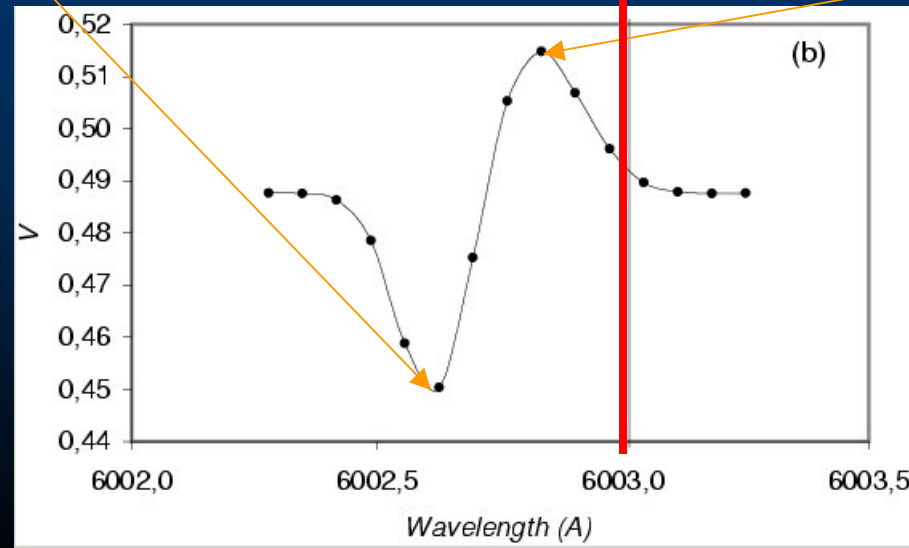
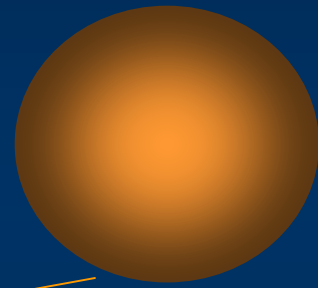
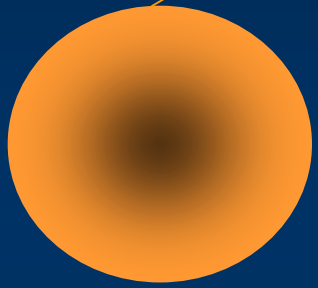
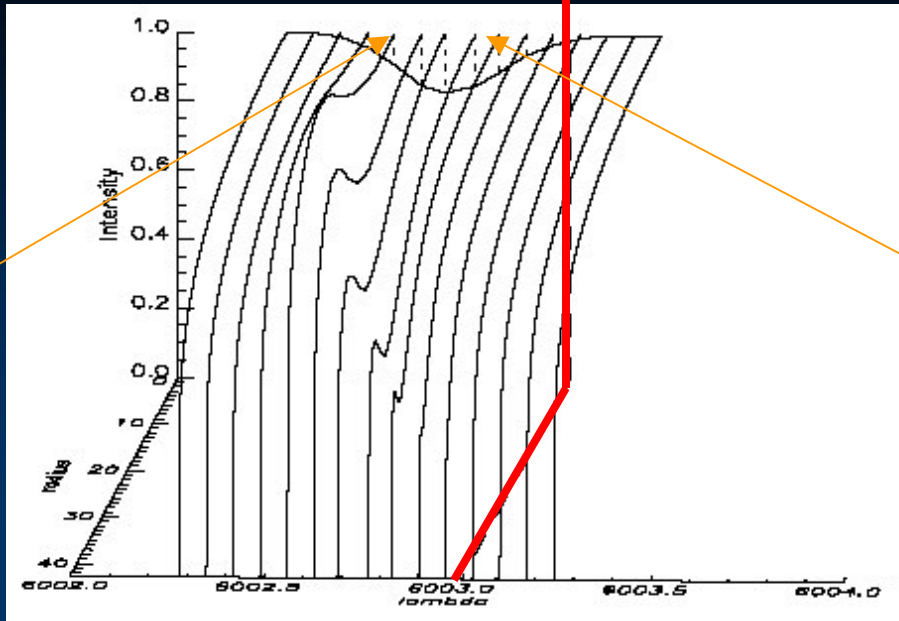
$$k(\varphi) = \frac{\theta_{UD}(\varphi)}{\theta_{photo}(\varphi)}$$



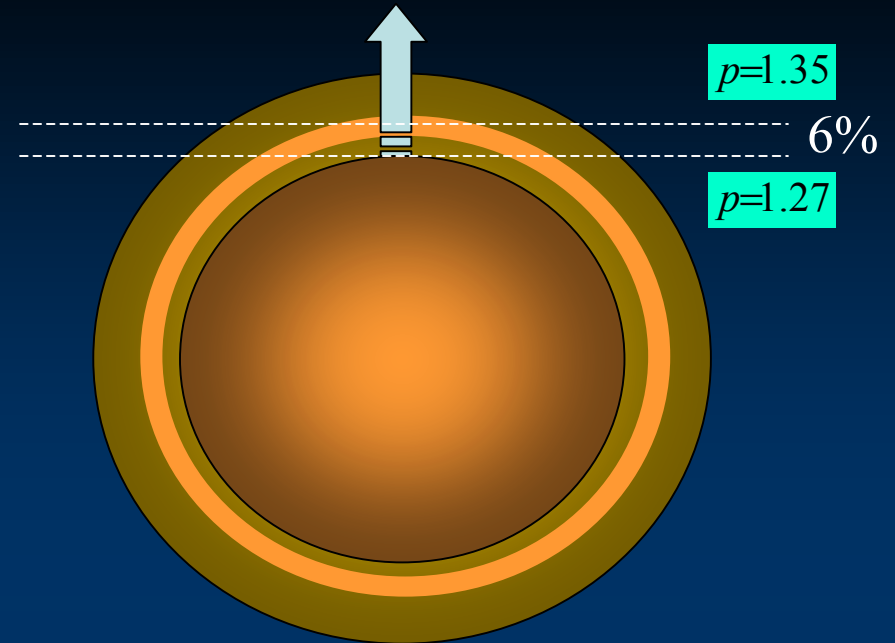
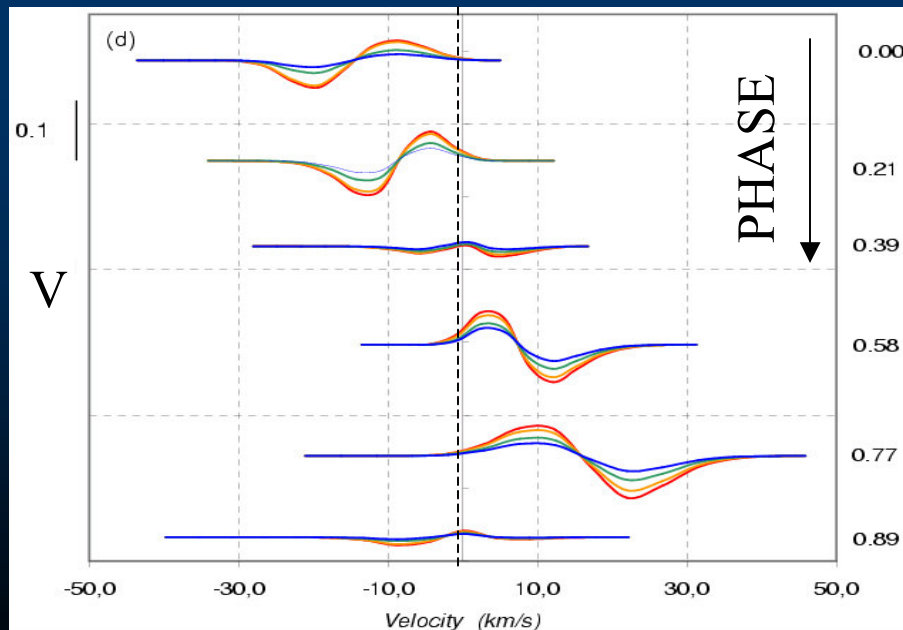
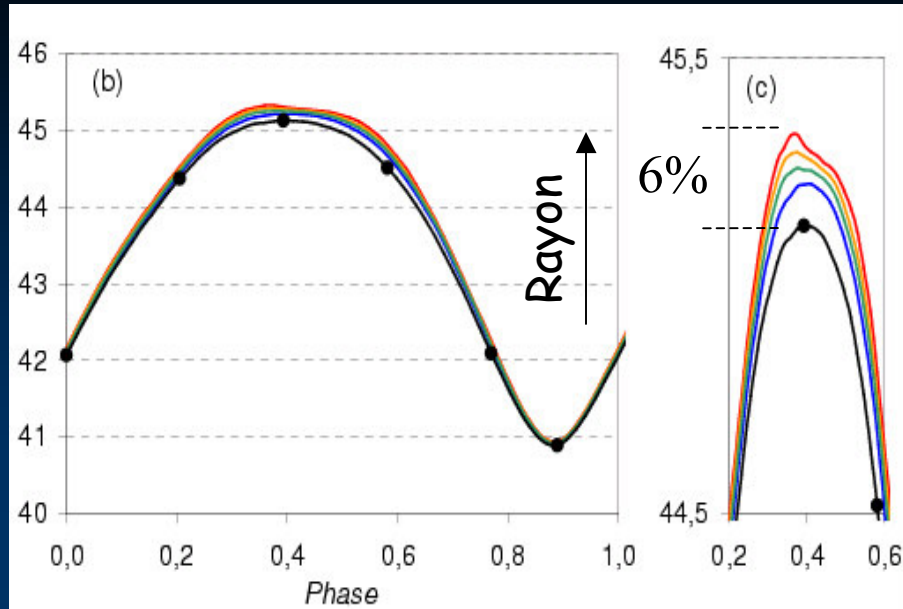
CS : La dépendance temporelle de l'ACB est négligeable pour la détermination de la distance (0.01%)

Le facteur de projection et la spectro-interférométrie (1/2)

$\varphi=0$ $V_{puls}=20\text{km/s}$



Le facteur de projection et la spectro-interférométrie (2/2)

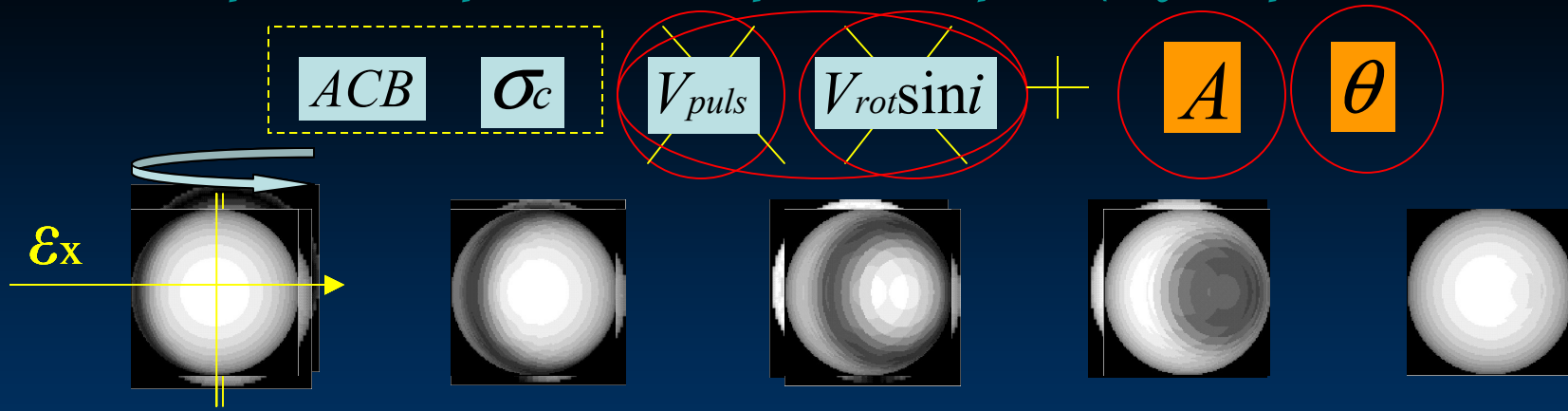


e9

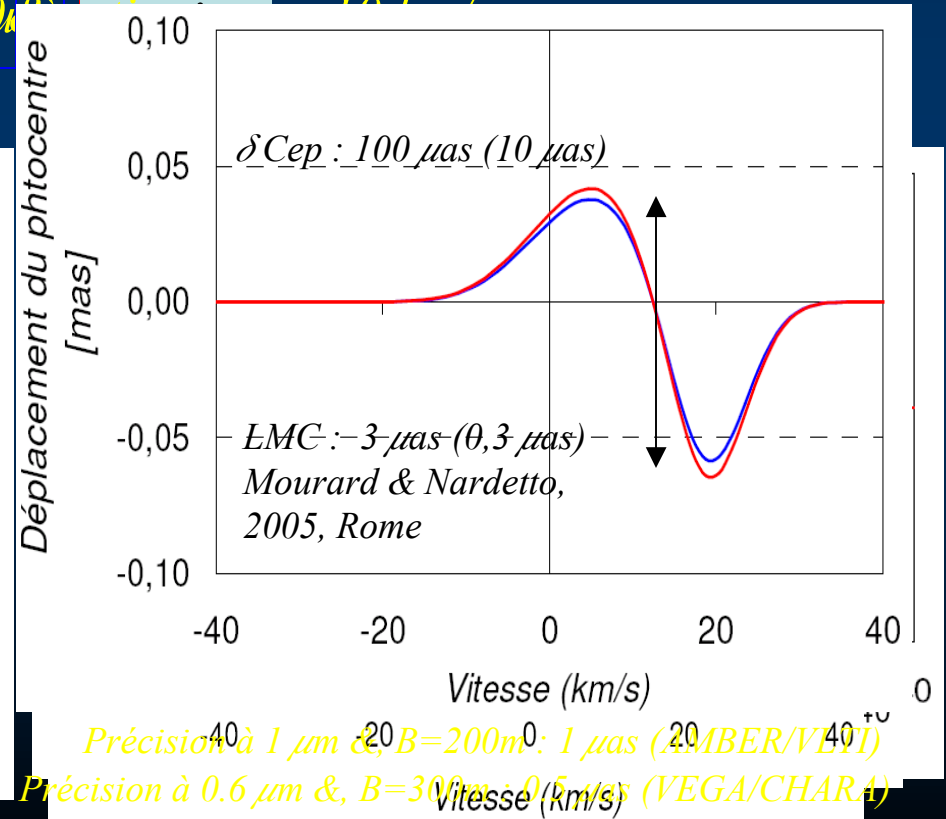
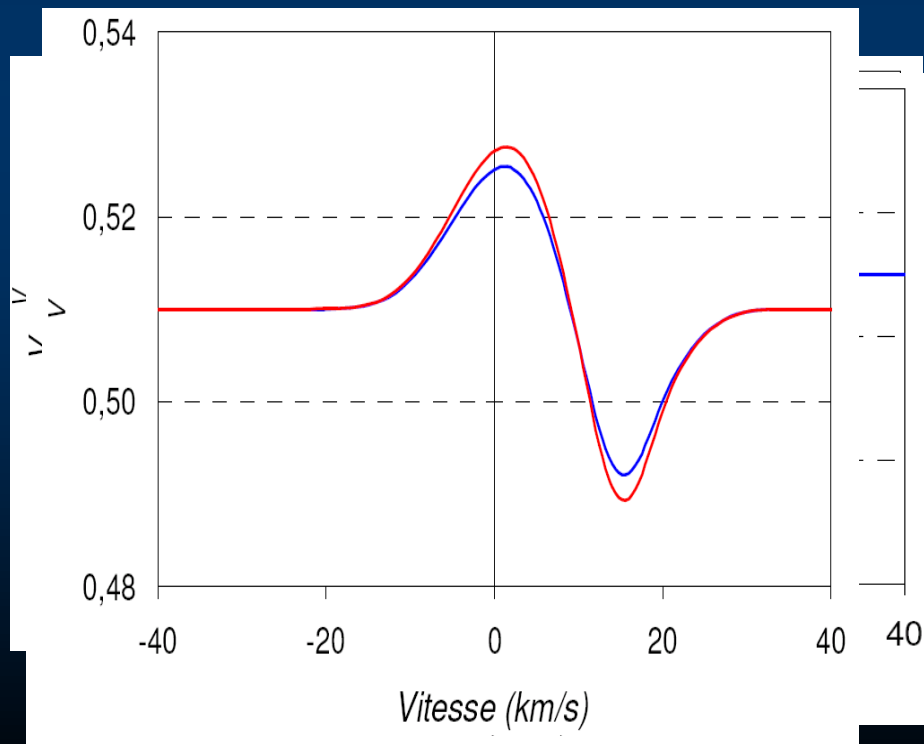
- *Vers une confirmation spectro-interférométrique du facteur de projection...*

« Probing the dynamical structure of Cepheid's atmosphere »
 N. Nardetto, F. Fokin, D. Mourard, Ph. Mathias, 2005, soumis à A&A

P8 : Perspectives Spectro-Interférométriques (e.g. Céphéides dans le LMC)



θ de 1.38 mas à 1.53 mas ($V_{rot} \sin i$)



Conclusions :

LA METHODE DE LA PARALLAXE DE PULSATION : UN NOUVEAU MOYEN D'ETALONNER LA RELATION P-L

$$\Delta\theta$$

Précision obtenue sur la distance de l Car : 5%
Précision sur le point-zéro : 0.06 magnitude (bande K)

$$p = \frac{V_{puls}}{V_{rad}}$$

Utiliser la méthode du premier moment
L'asymétrie un indicateur de la dynamique atmosphérique

$$\nabla$$

Impact des gradients de vitesse sur le facteur de projection : 6%
Vers une confirmation spectro-interférométrique

Perspectives :

VERS PLUS DE PRECISION & D'EXACTITUDE SUR LA RELATION P-L

$\Delta\theta$

Augmenter l'*échantillon* d'étoiles
(survey AMBER/VLTI de 20 Céphéides + CHARA + OHANA?)

∇

Une étude *multi-raies* HARPS
La *spectro-interférométrie* avec AMBER/VLTI & VEGA/CHARA

+

Développement d'un modèle de nouvelle génération
(avec *convection, grille adaptative...*)

Et à long terme :

Mesure de la distance des Céphéides du LMC en interférométrie différentielle
GAIA

« Le silence éternel de ces espaces infinis m'effraie » Pascal (Clermont 1623, Paris 1662)



Merci à tous...