



Interférométrie différentielle avec l'instrument

AMBER / VLTI

stronomical

ulti

am

ecombiner

ery

arge

telescope

nterferometer

Florentin Millour



Dirigé par Romain G. Petrov et Alain Chelli

Plan

- **Contexte**

- Pourquoi la HRA ?
- L'interférométrie stellaire optique et AMBER

- **Traitement du signal et instrumentation**

- Les observables d'AMBER
- L'apport potentiel de la phase différentielle
- Les vraies données

- **Les étoiles chaudes**

- η Car
- α Arae
- γ^2 Velorum

Plan

- **Contexte**

- Pourquoi la HRA ?
- L'interférométrie stellaire optique et AMBER

- **Traitement du signal et instrumentation**

- Les observables d'AMBER
- L'apport potentiel de la phase différentielle
- Les vraies données

- **Les étoiles chaudes**

- η Car
- α Arae
- γ^2 Velorum

Pourquoi la haute résolution angulaire ?



15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

Pourquoi la HRA ?

Un exemple : η Car

- Étoile de type $L_{\text{luminous}} B_{\text{lue}} V_{\text{variable}}$
- $L = 4 \cdot 10^6 L_{\text{soleil}}$
- Perte de masse $5 \cdot 10^{-3} M_{\text{Soleil}} / \text{an}$
- Vent, $V > 500 \text{ km/s}$
- Ex-candidat $M > M_{\text{Eddington}}$

Nébuleuse de l'Homunculus (1841)

Pourquoi la HRA ?

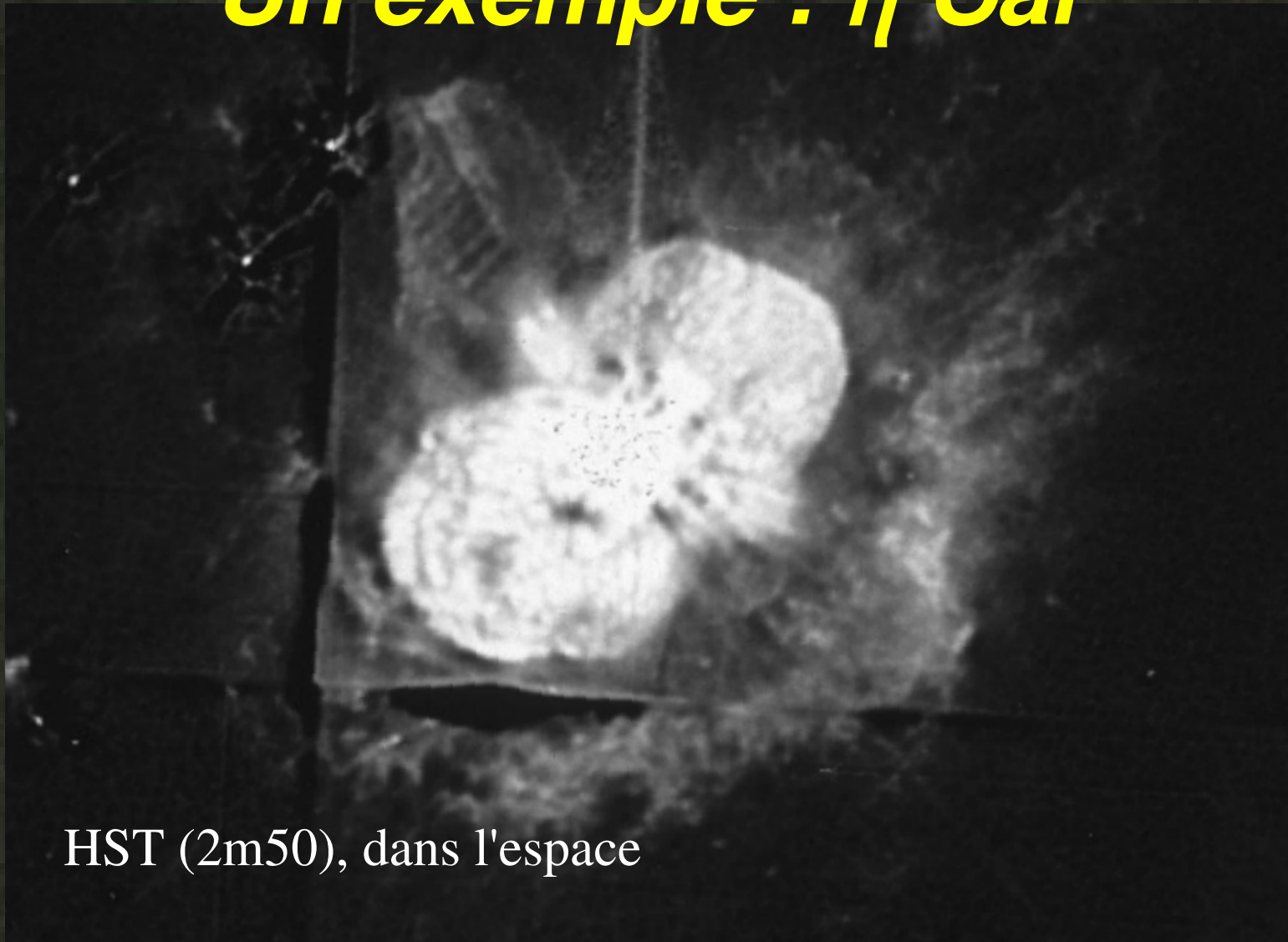
Un exemple : η Car



AAT (4m), limité par le seeing

Pourquoi la HRA ?

Un exemple : η Car

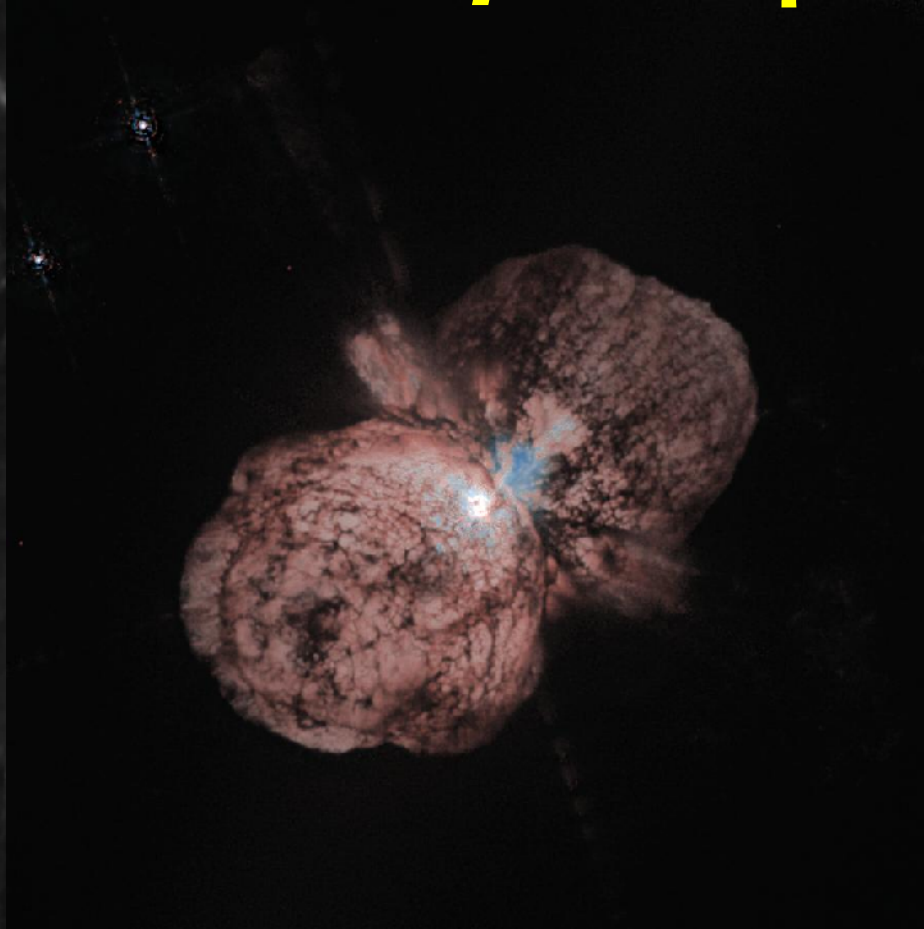


HST (2m50), dans l'espace

AAT (4m), limité par le seeing

Pourquoi la HRA ?

Un exemple : η Car



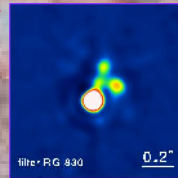
HST (2m50), dans l'espace

AAT (4m), limité par le seeing

Pourquoi la HRA ?

Un exemple : η Car

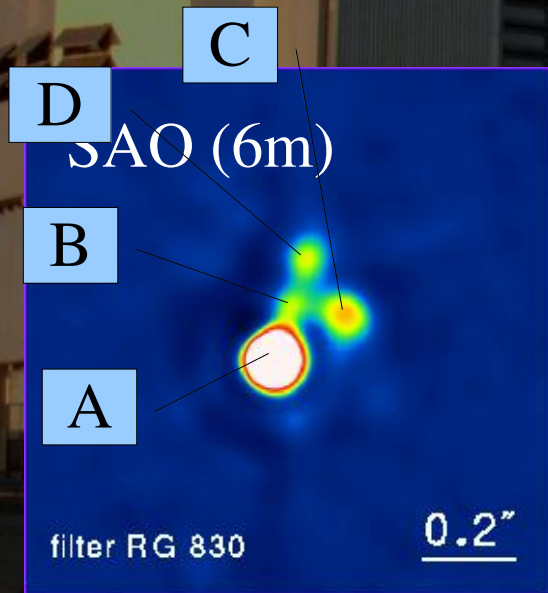
SAO (6m), interférométrie des tavelures



HST (2m50), dans l'espace

Pourquoi la HRA ?

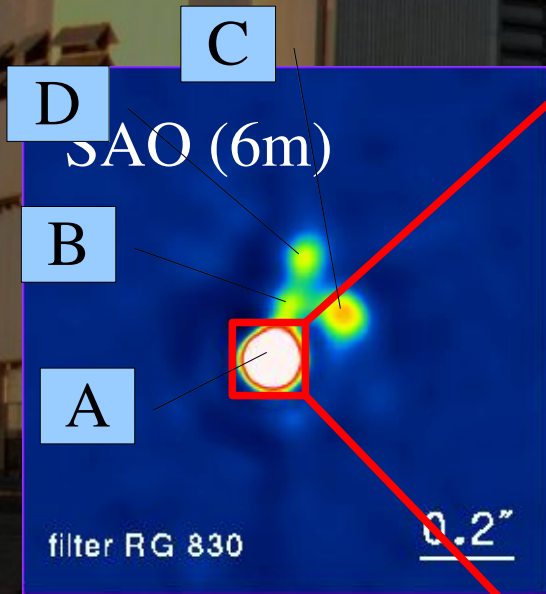
Un exemple : η Car



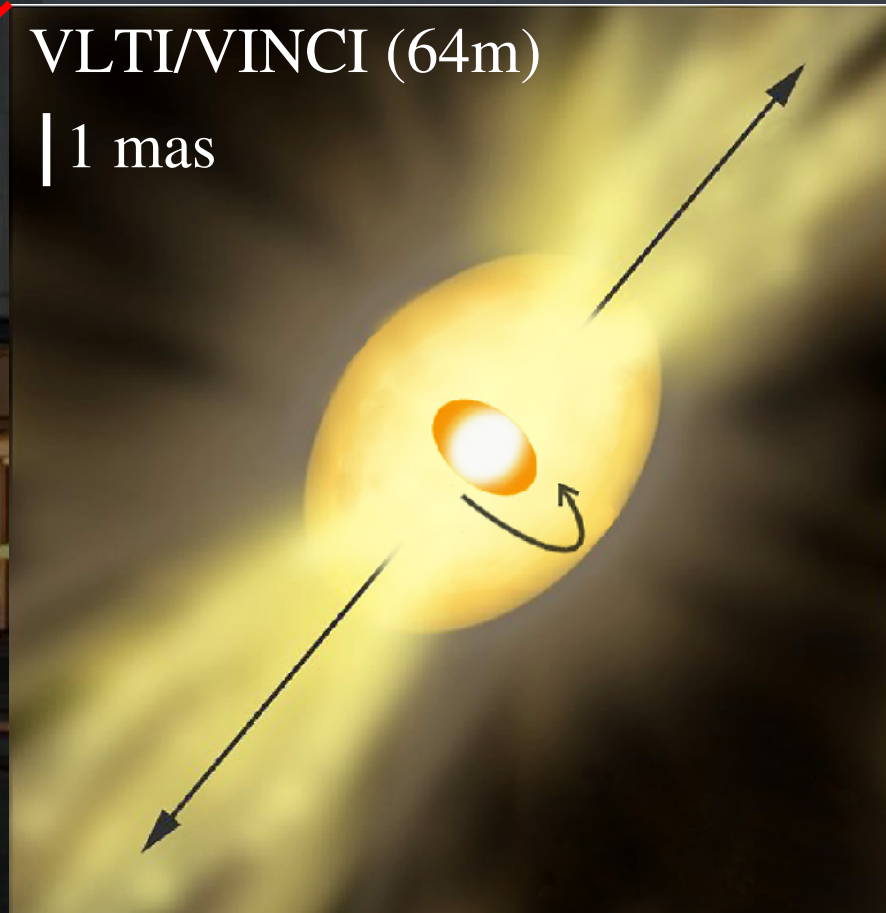
Weigelt & co. 1988

Pourquoi la HRA ?

Un exemple : η Car



Weigelt & co. 1988



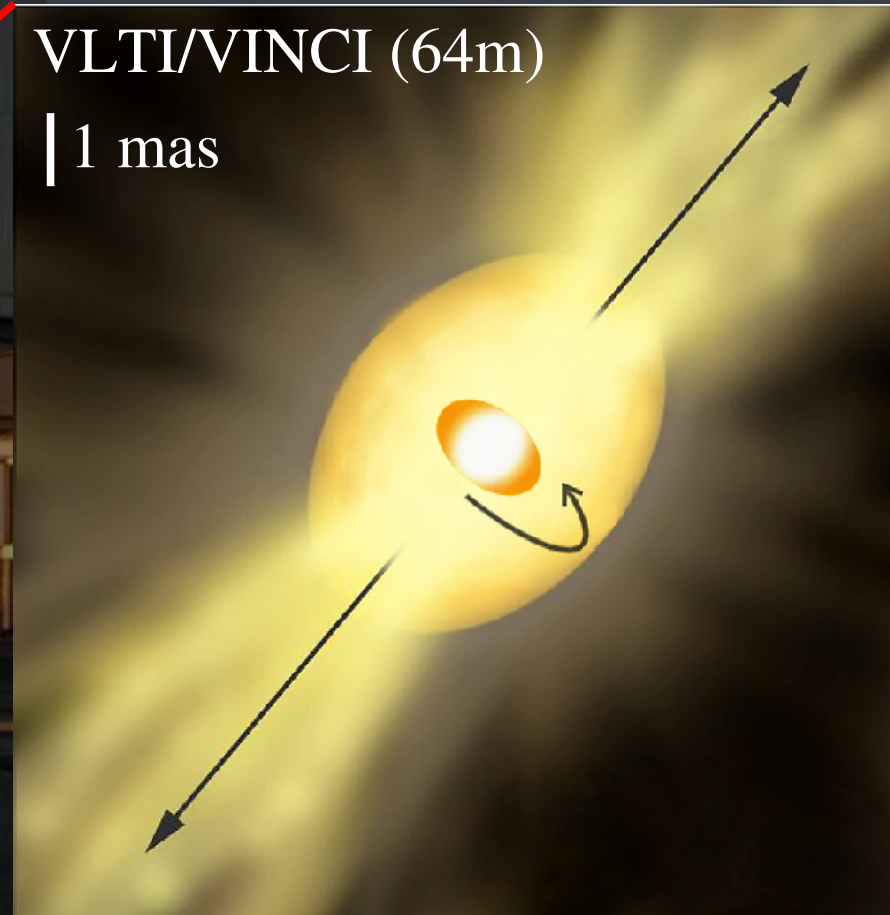
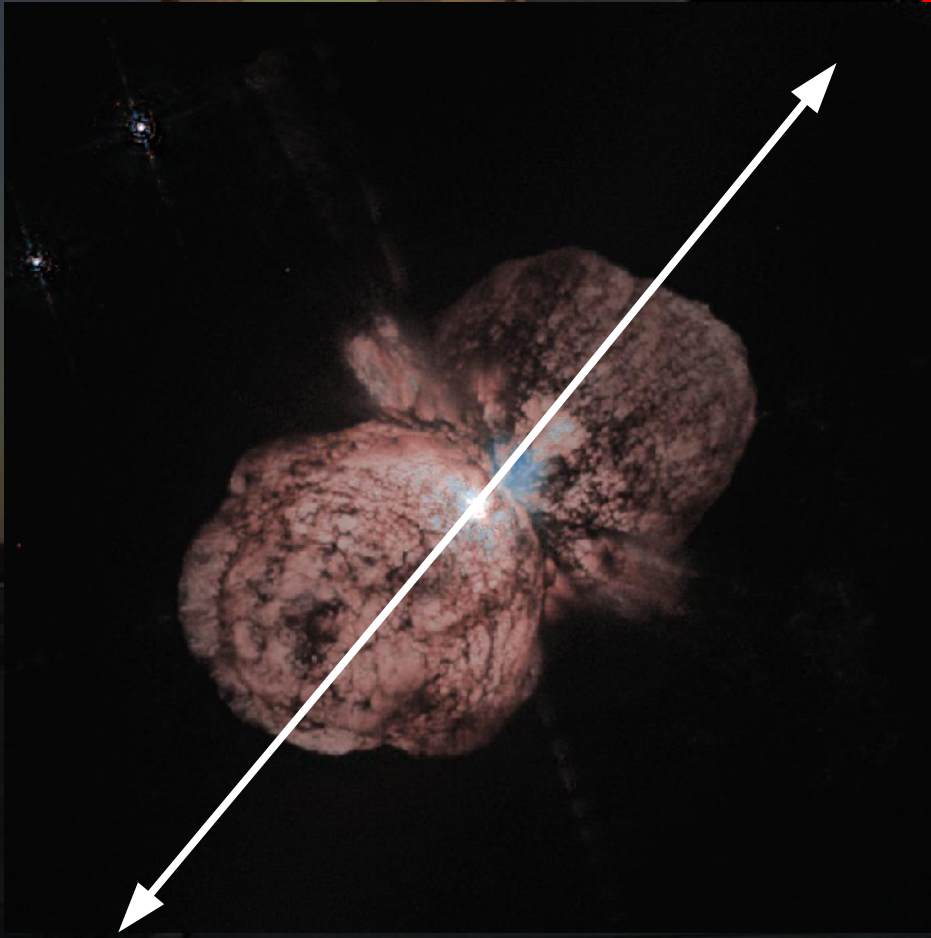
Van Boekel & co. 1998

ESO PR Photo 32t/03 (26 November 2003)

© European Southern Observatory

Pourquoi la HRA ?

Un exemple : η Car



VLTI/VINCI (64m)

| 1 mas

Van Boekel & co. 1998

ESO PR Photo 32e/03 (26 November 2003)

© European Southern Observatory

Plan

- **Contexte**

- Pourquoi la HRA ?
- L'interférométrie stellaire optique et AMBER

- **Traitement du signal et instrumentation**

- Les observables d'AMBER
- L'apport potentiel de la phase différentielle
- Les vraies données

- **Les étoiles chaudes**

- η Car

- α Arae

- γ^2 Velorum

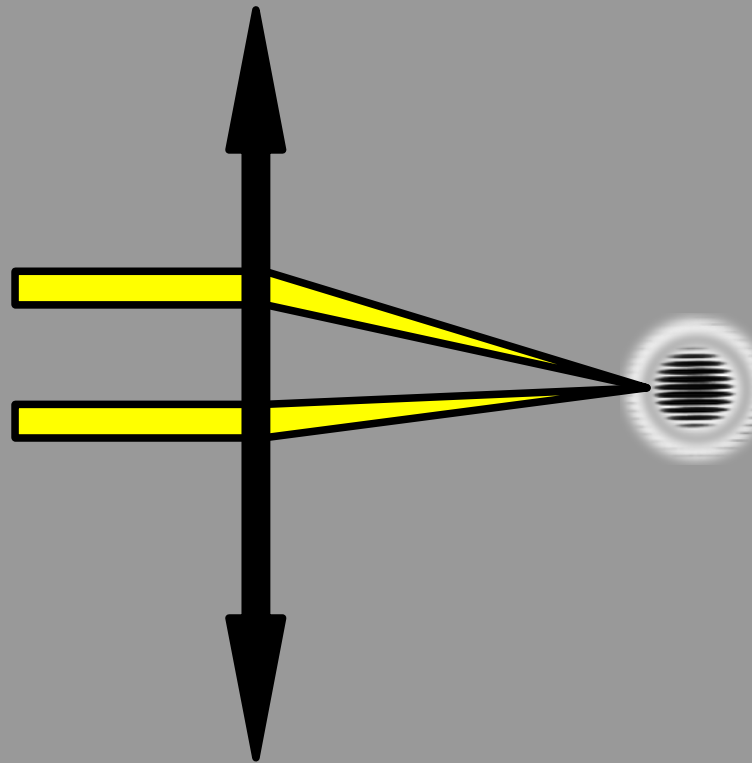
AMBER et l'interférométrie



L'interféromètre à 2T

Télescopes

Faisceaux collimatés
et cophasés de deux
télescopes



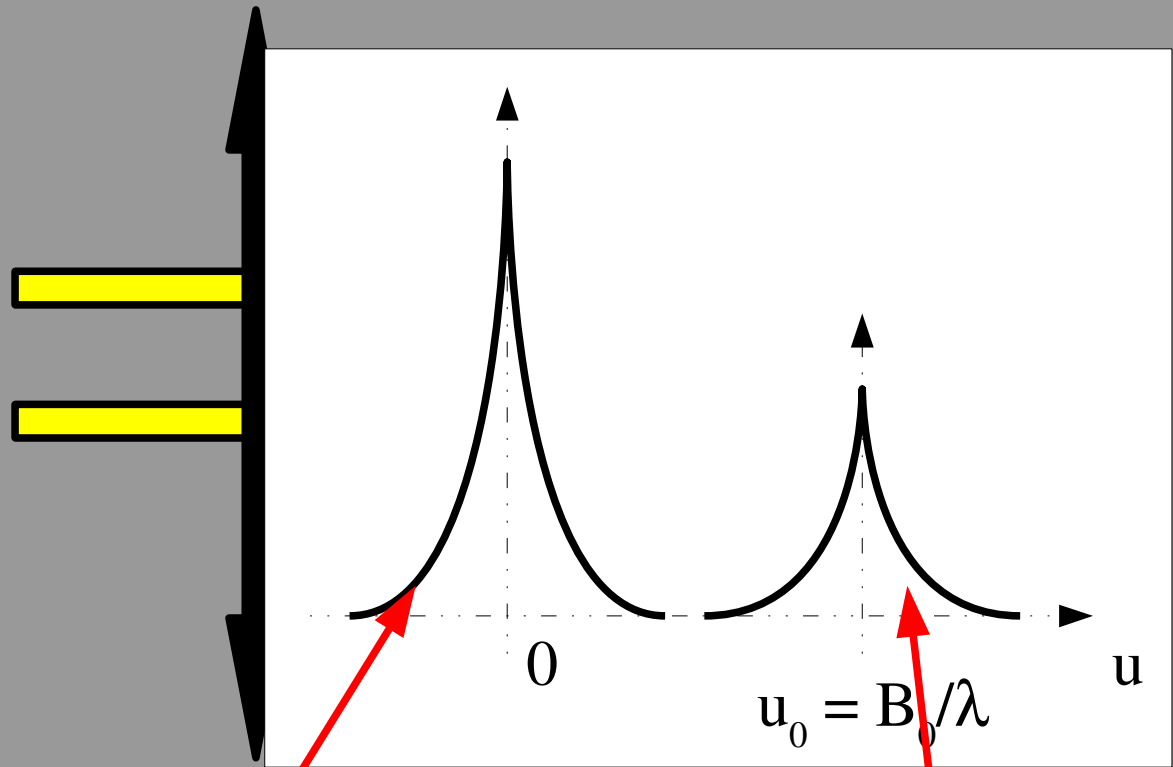
Détecteur

$$\tilde{I}(\vec{u}, \lambda, D) = \tilde{o}(\vec{u}, \lambda) \times [2 \Pi \otimes \Pi(\vec{u}, D) + \Pi \otimes \Pi(\vec{u} + \vec{u}_0, D) + \Pi \otimes \Pi(\vec{u} - \vec{u}_0, D)]$$

L'interféromètre à 2T

Télescopes

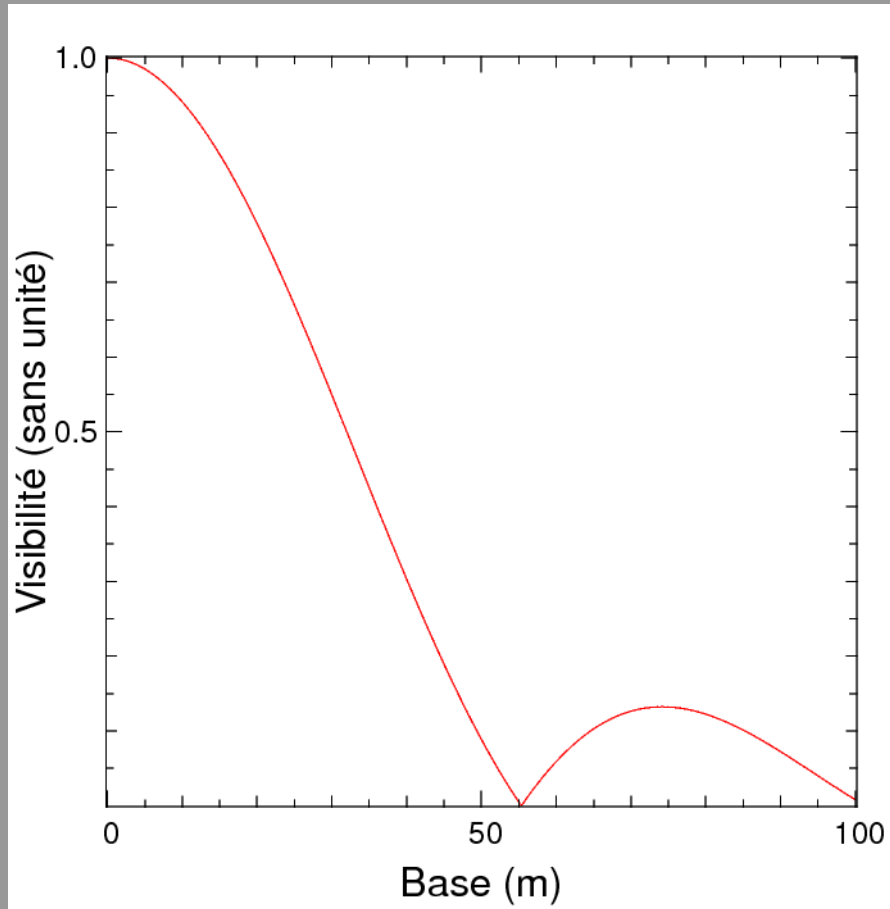
Faisceaux collimatés
et cophasés de deux
télescopes



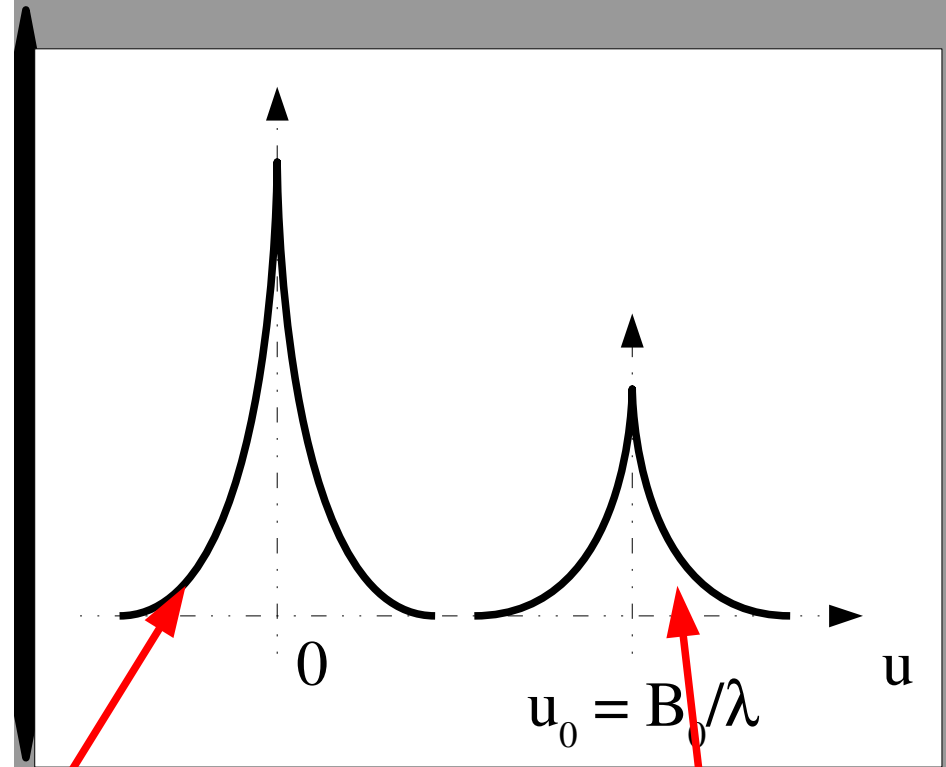
$$\tilde{I}(\vec{u}, \lambda, D) = \tilde{o}(\vec{u}, \lambda) \times [2 \Pi \otimes \Pi(\vec{u}, D) + \Pi \otimes \Pi(\vec{u} + \vec{u}_0, D) + \Pi \otimes \Pi(\vec{u} - \vec{u}_0, D)]$$

L'interféromètre à 2T

Télescopes



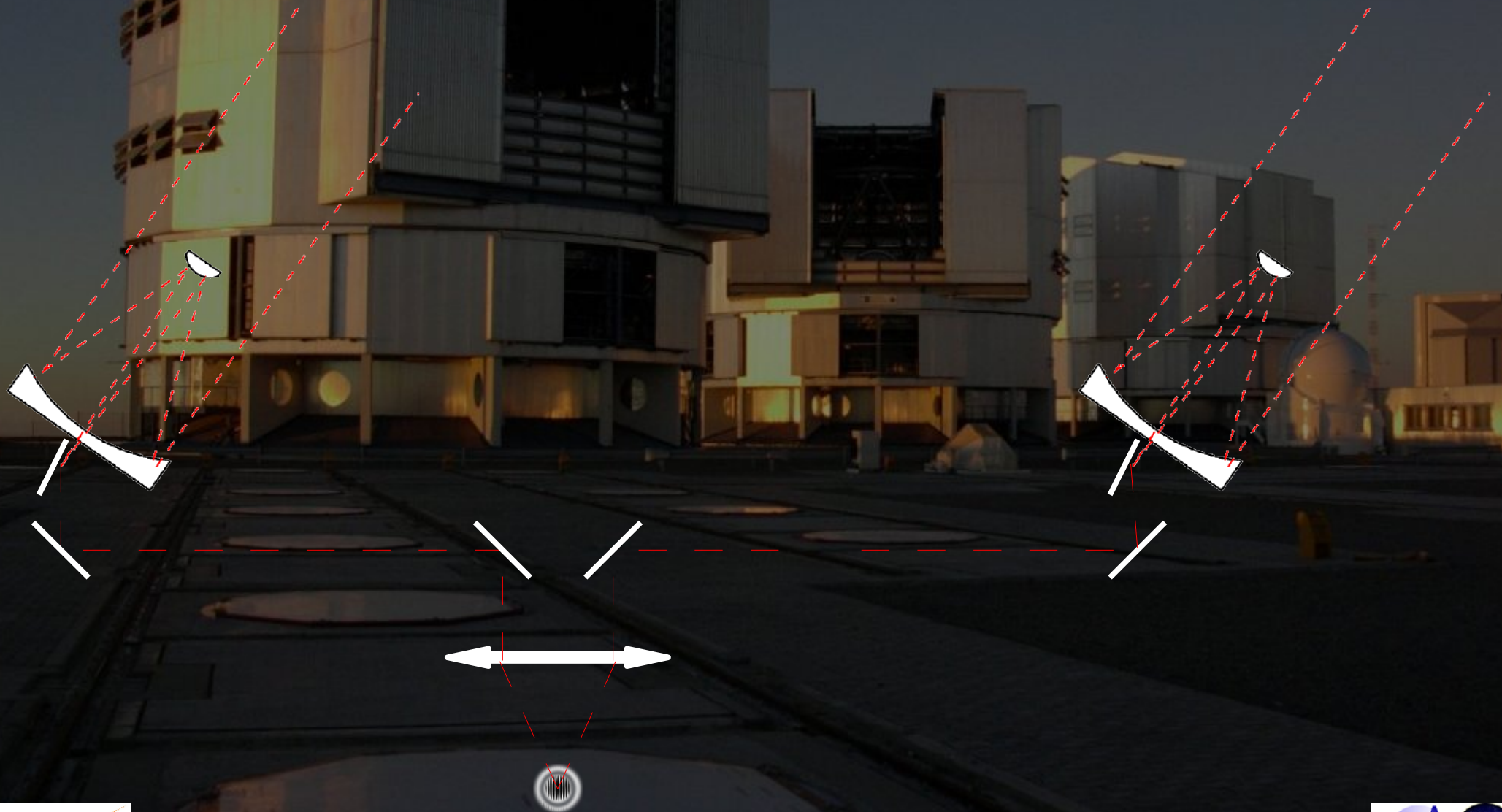
Détecteur



$$\tilde{I}(\vec{u}, \lambda, D) = \tilde{o}(\vec{u}, \lambda) \times [2 \Pi \otimes \Pi(\vec{u}, D) + \Pi \otimes \Pi(\vec{u} + \vec{u}_0, D) + \Pi \otimes \Pi(\vec{u} - \vec{u}_0, D)]$$

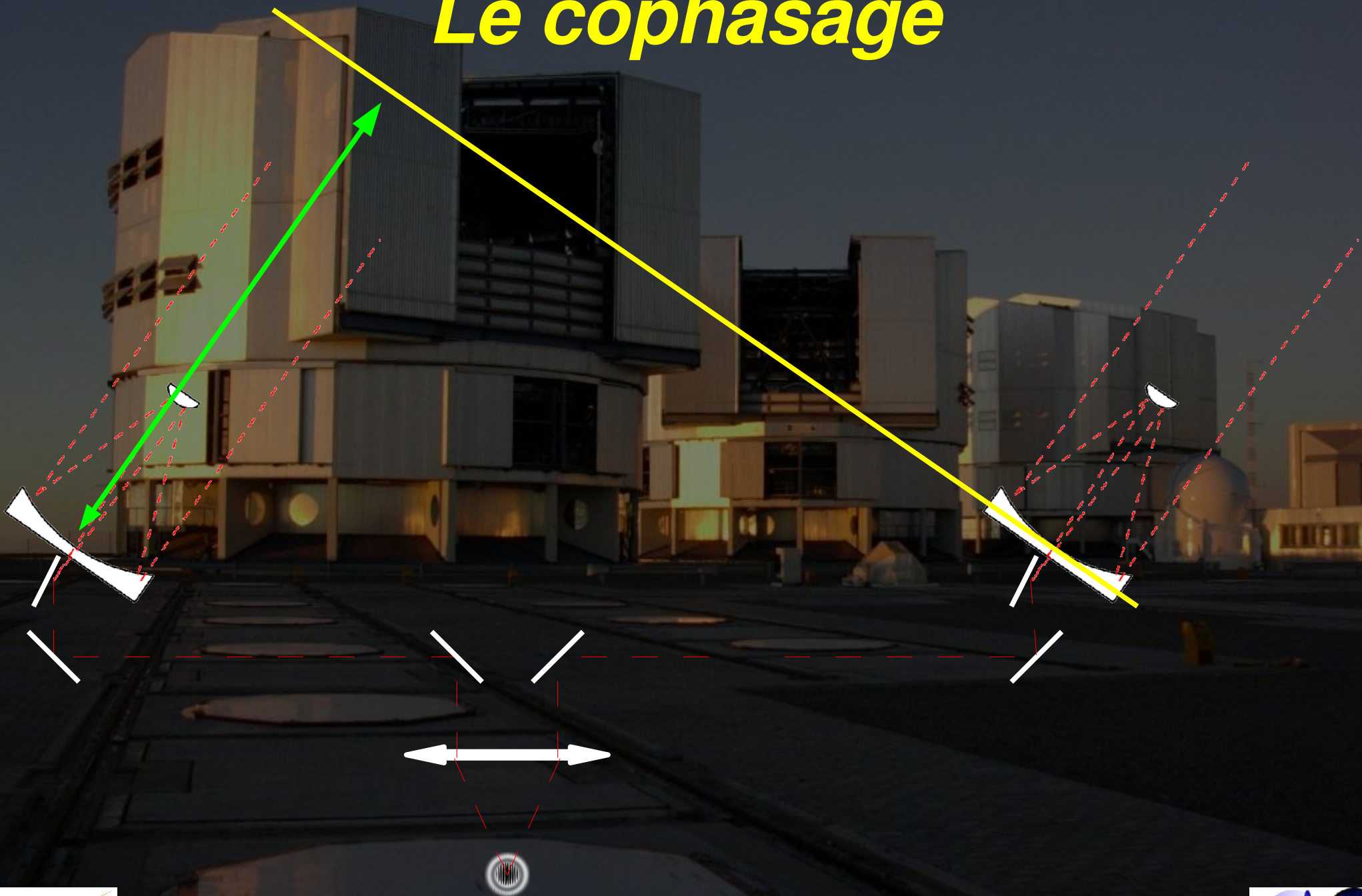


Le cophasage



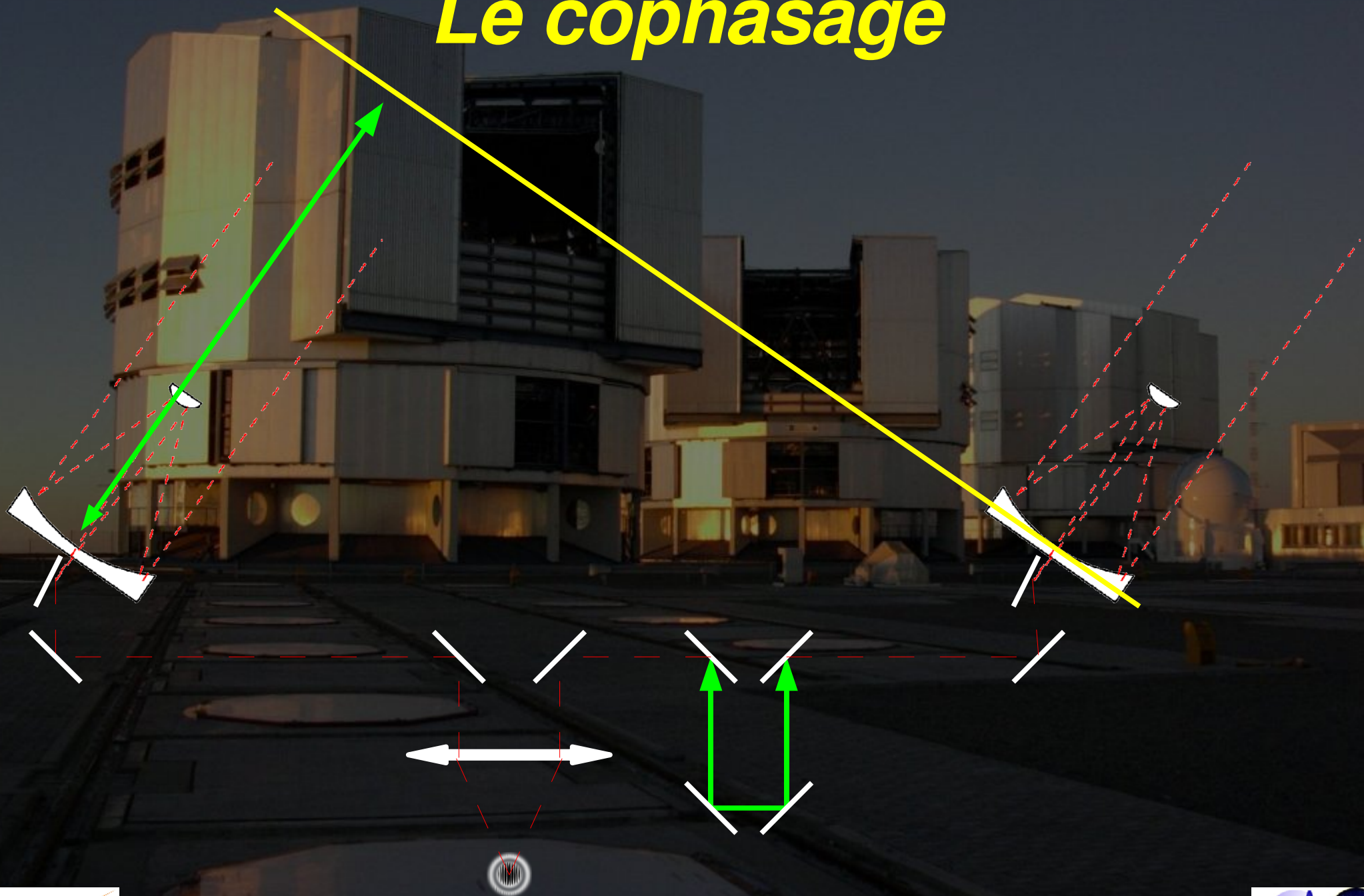


Le cophasage



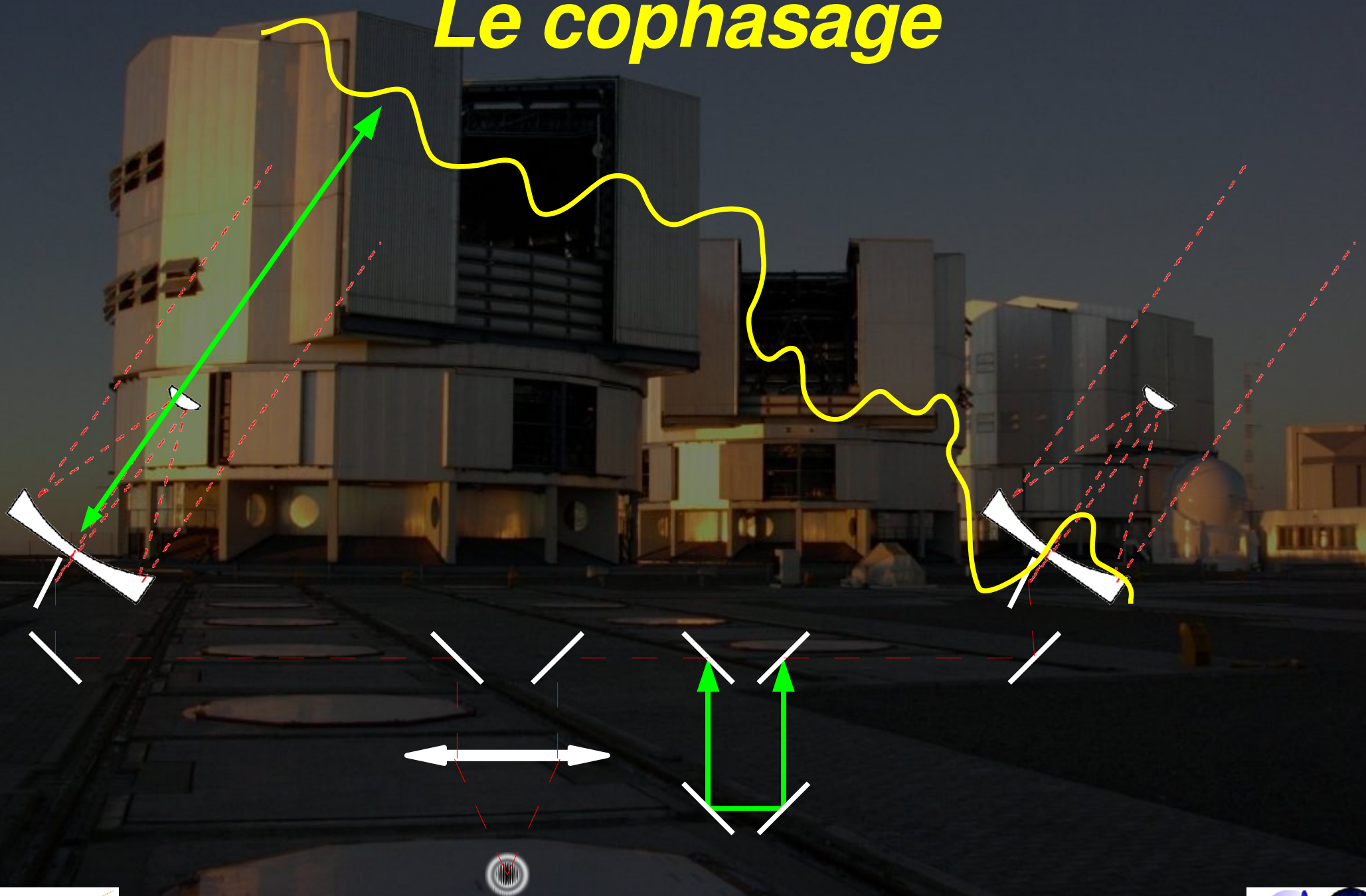


Le cophasage



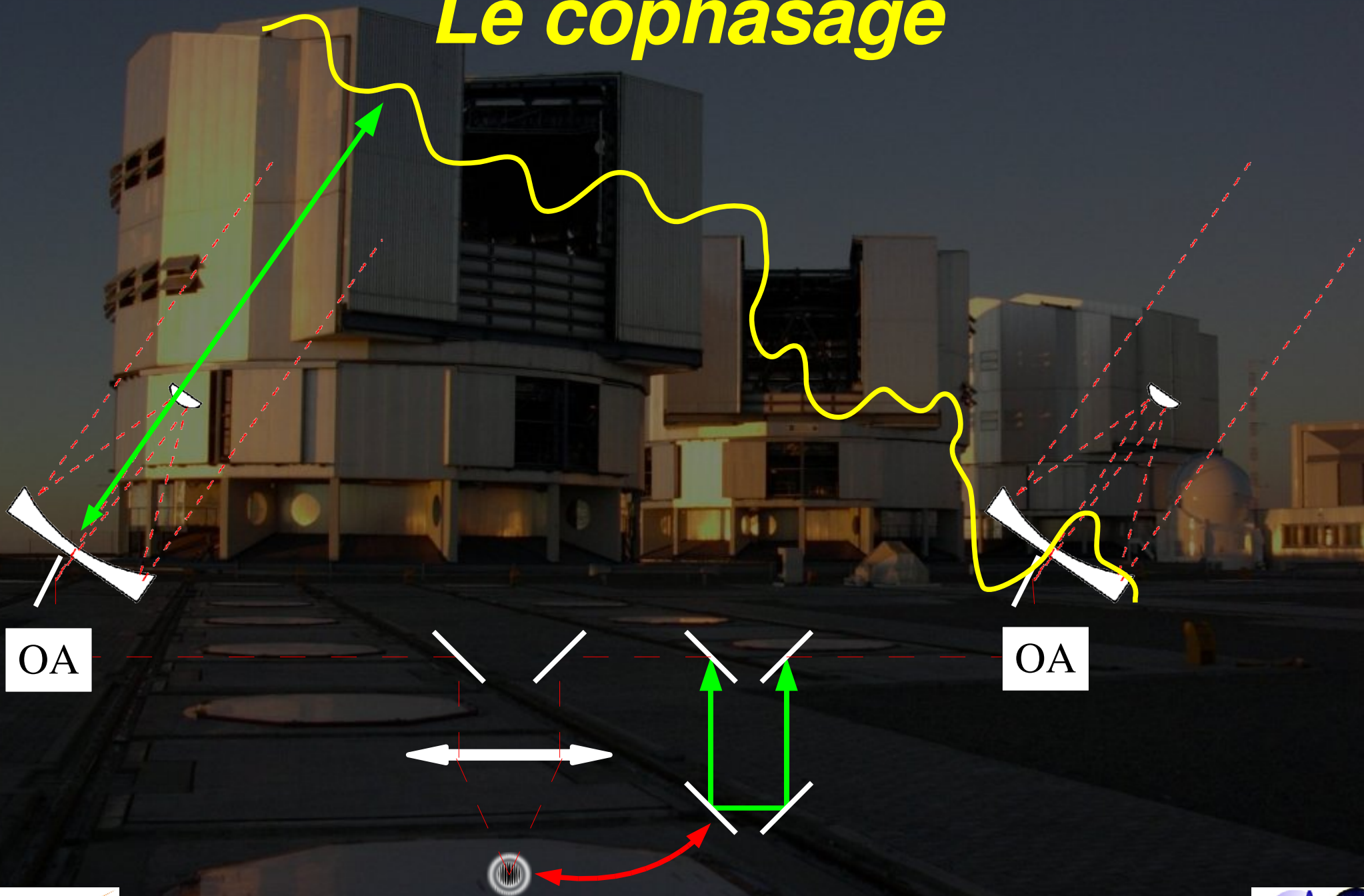


Le cophasage





Le cophasage

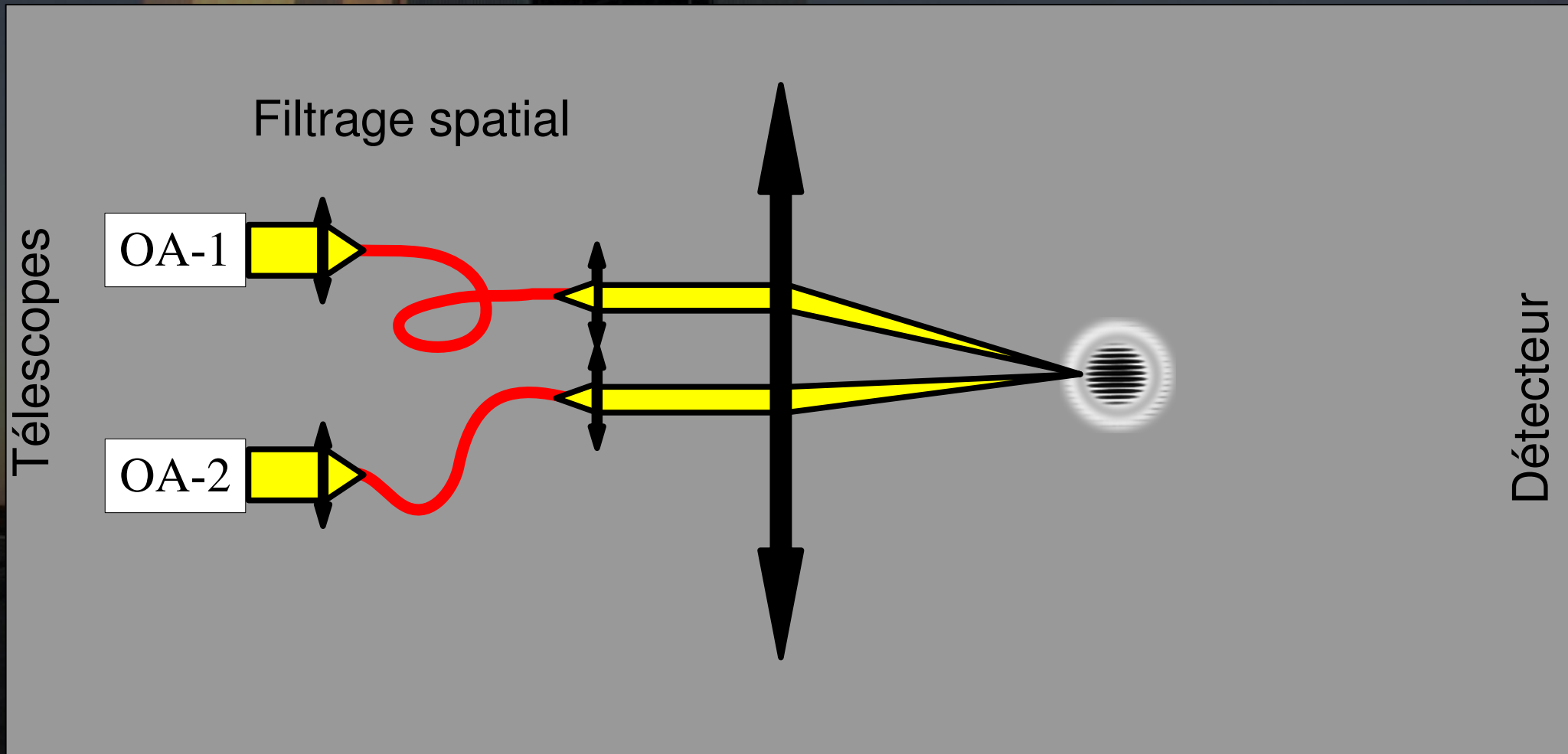


OA

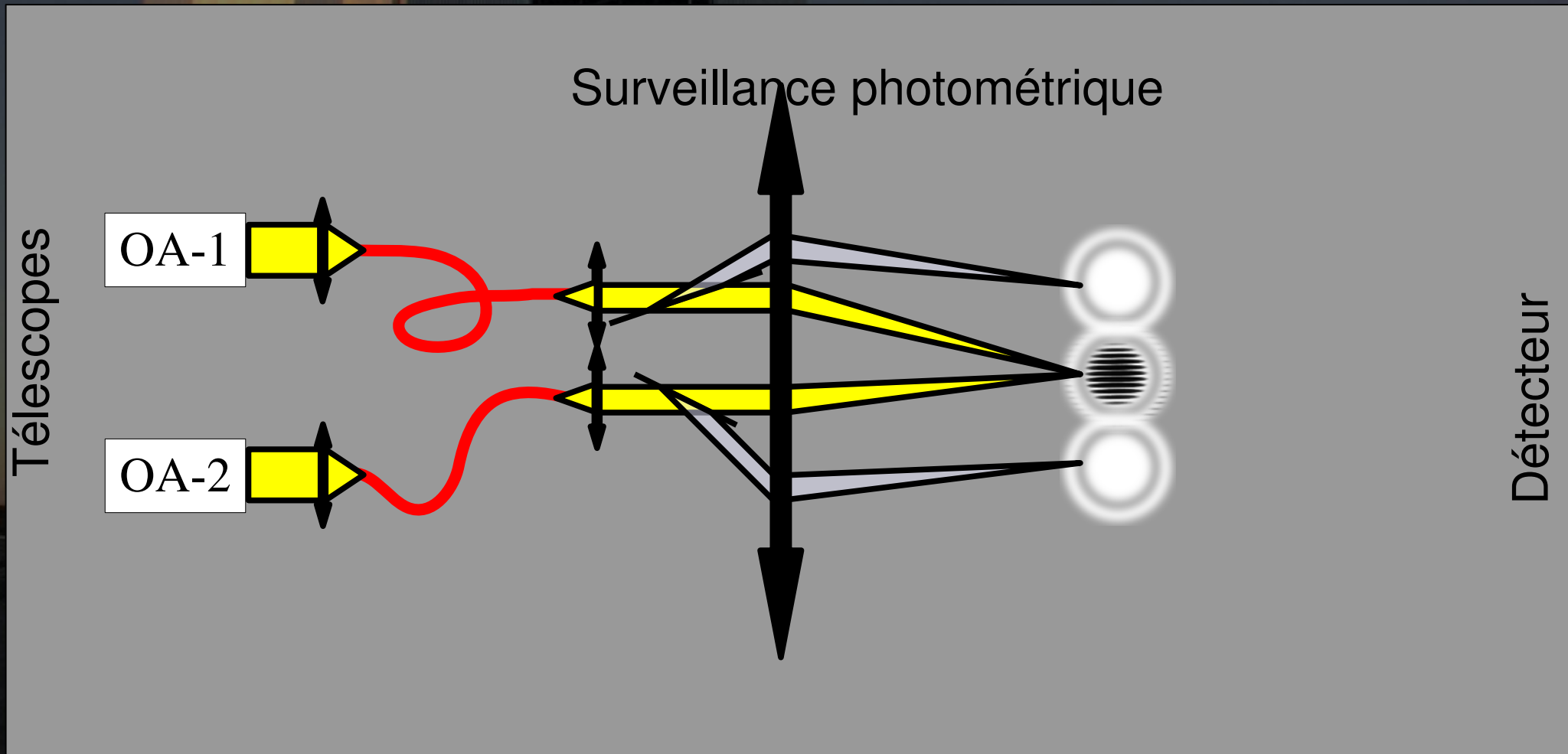
OA

15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

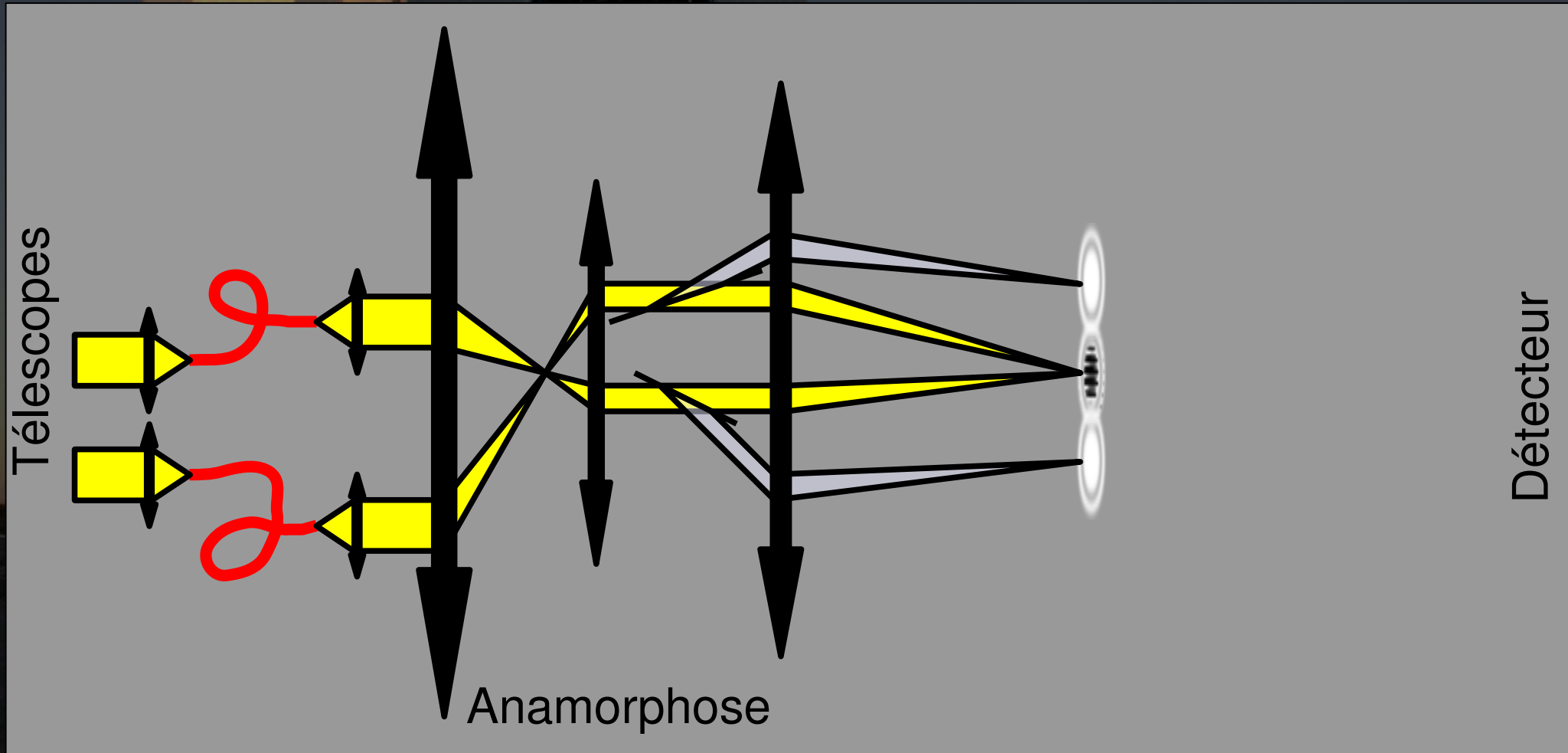
L'interféromètre monomode 2T



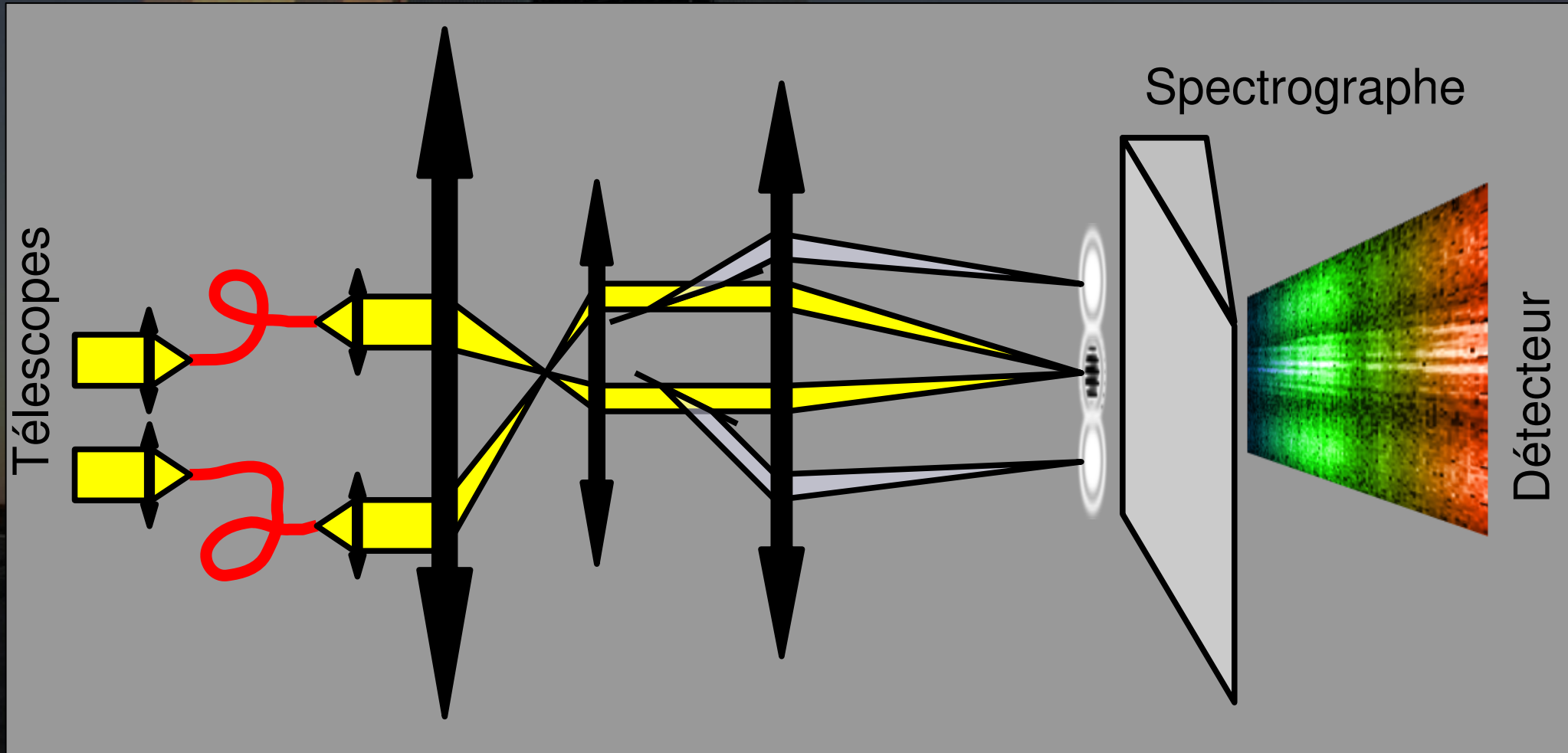
L'interféromètre monomode 2T



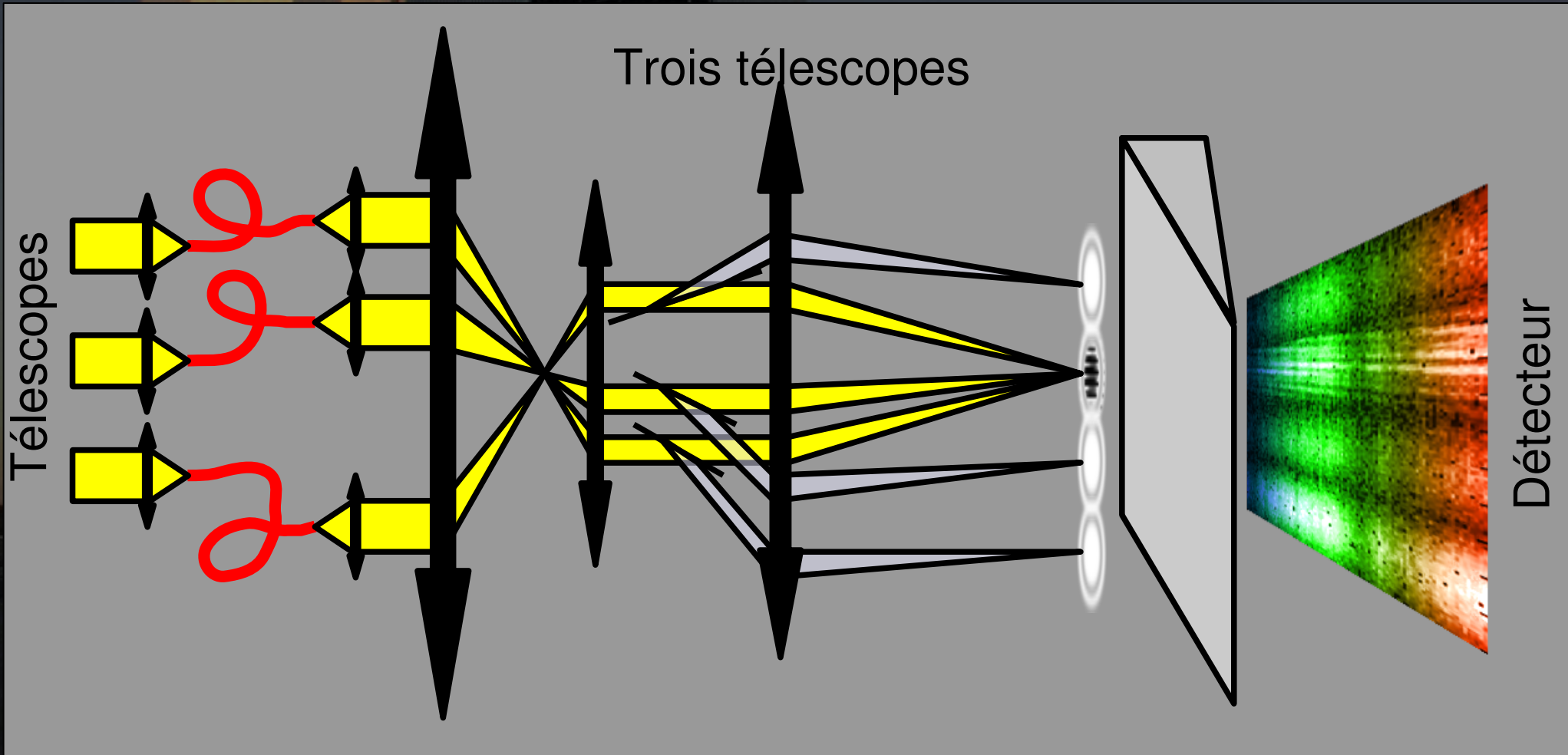
Le spectro-interféromètre monomode 2T



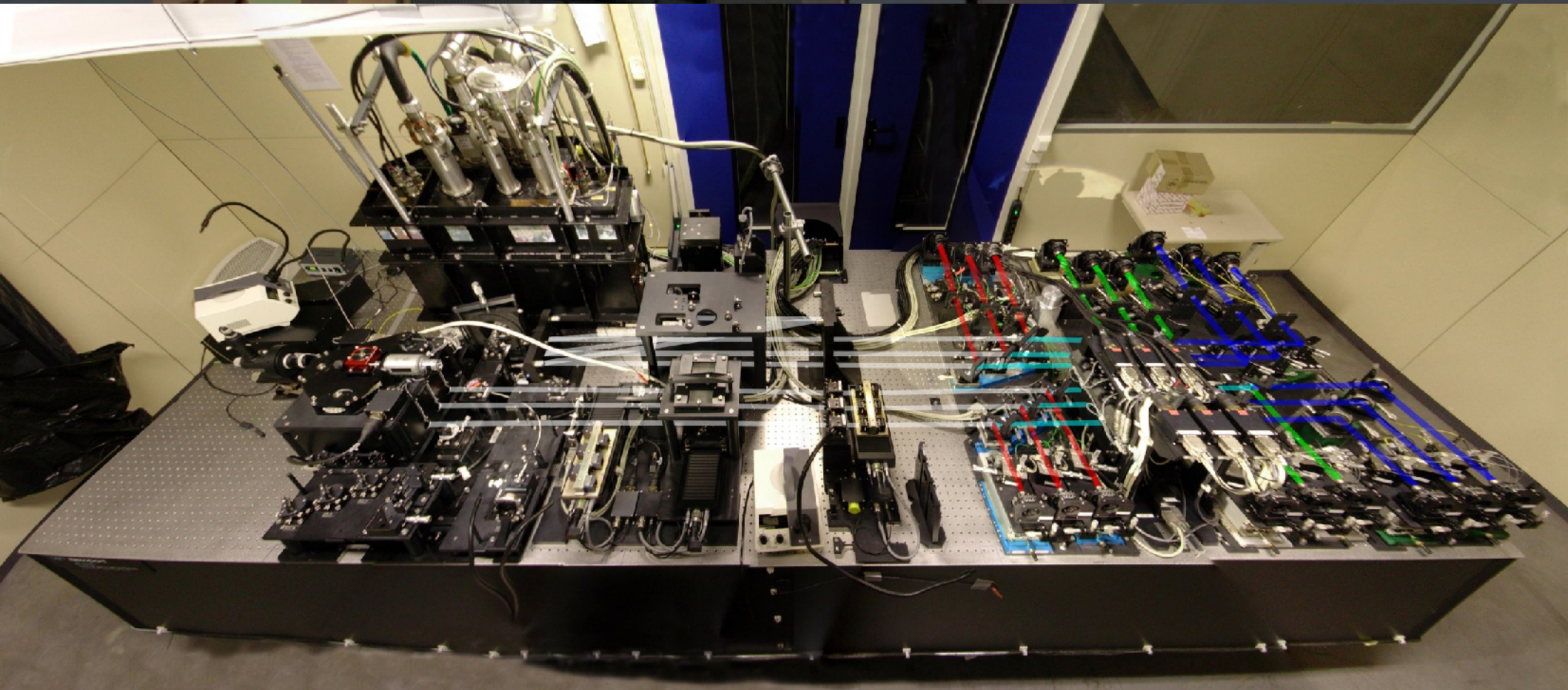
Le spectro-interféromètre monomode 2T



Le spectro-interféromètre monomode 3T

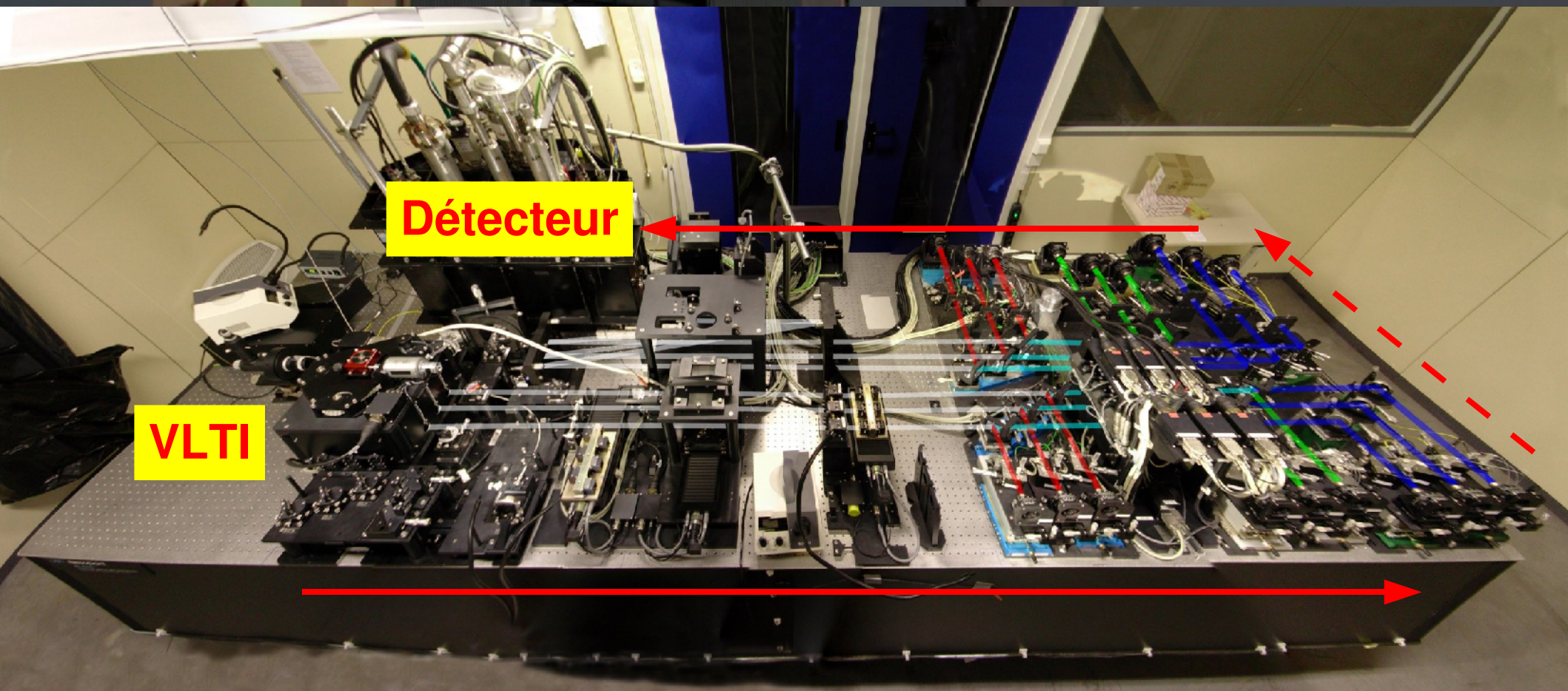


AMBER



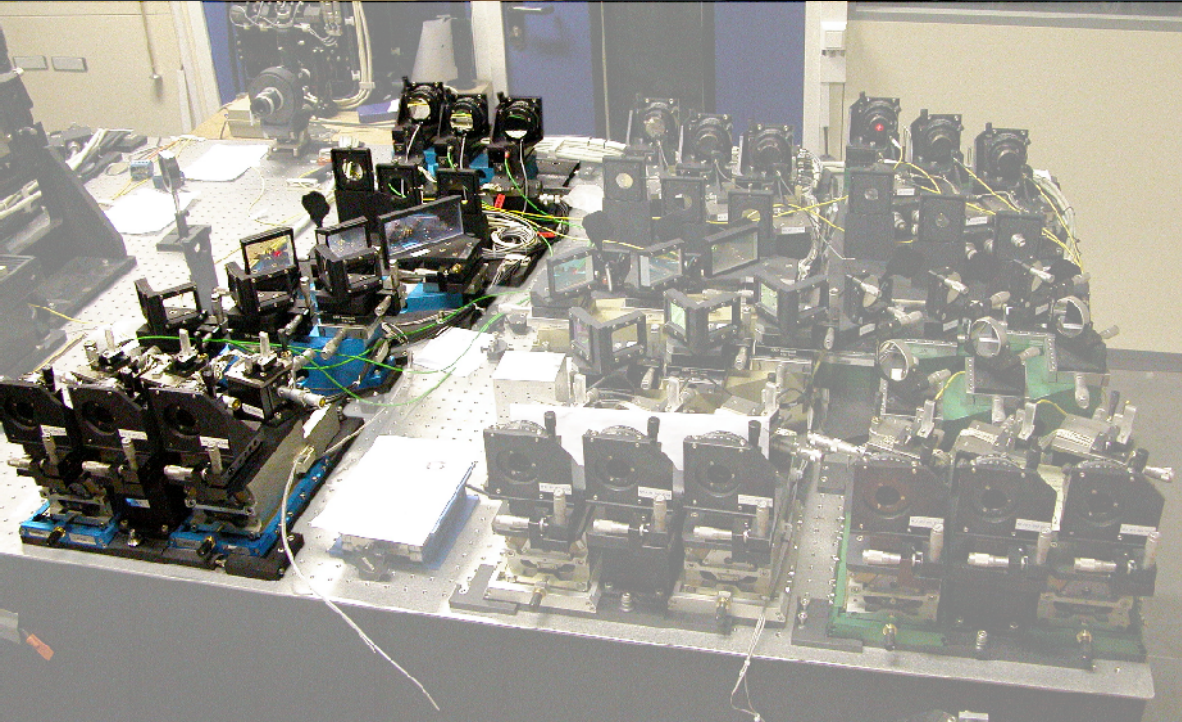
15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

AMBER



AMBER

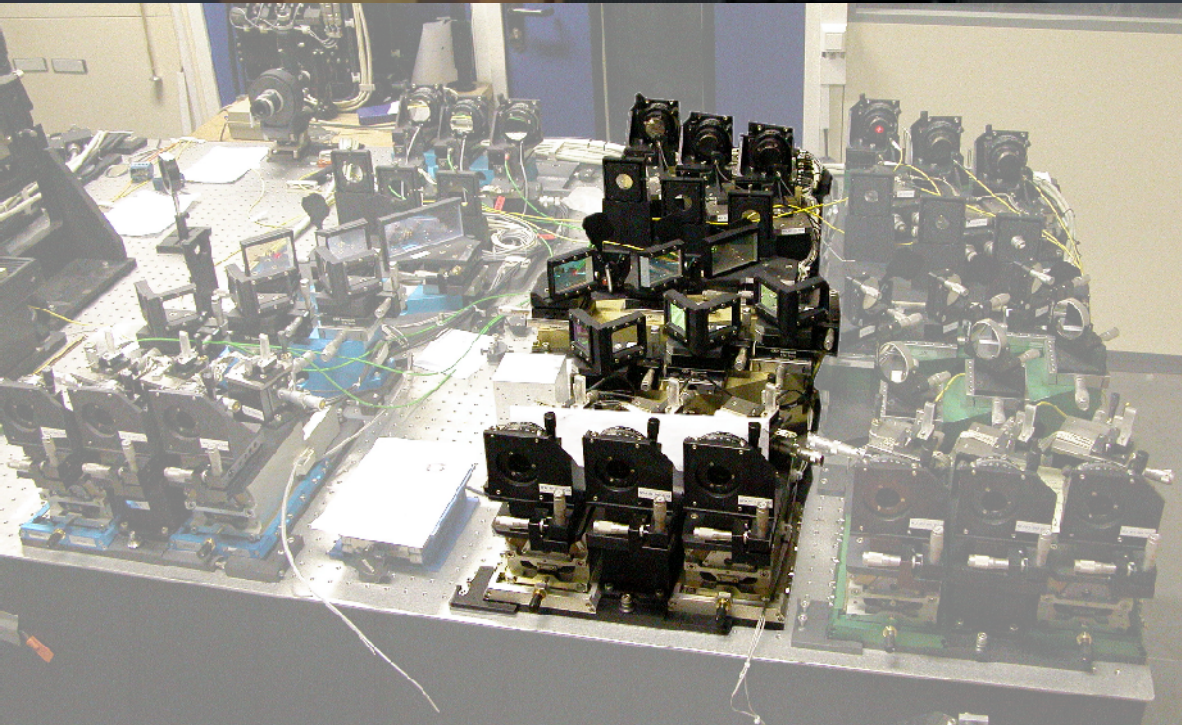
J ($1.1\mu\text{m}$), H ($1.5\mu\text{m}$)
et K ($2.1\mu\text{m}$) simultanés



S. F. K

AMBER

J ($1.1\mu\text{m}$), H ($1.5\mu\text{m}$)
et K ($2.1\mu\text{m}$) simultanés

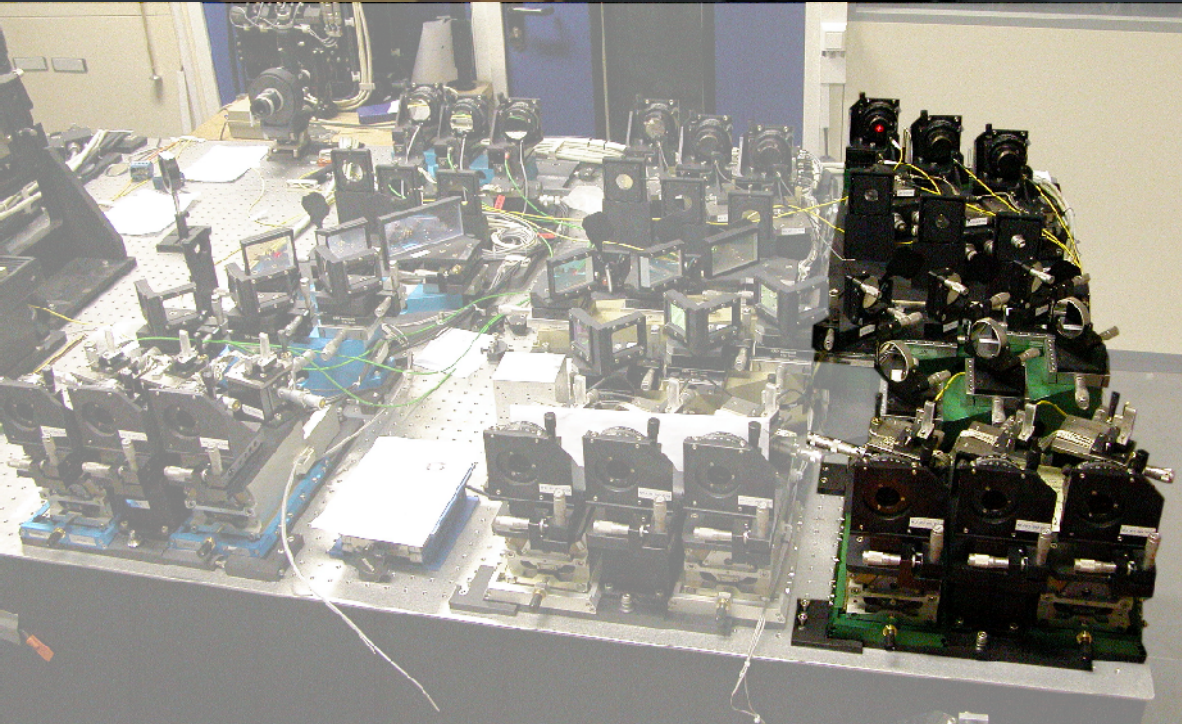


S. F. K

S. F. H

AMBER

J ($1.1\mu\text{m}$), H ($1.5\mu\text{m}$)
et K ($2.1\mu\text{m}$) simultanés



S. F. K

S. F. H

S. F. J

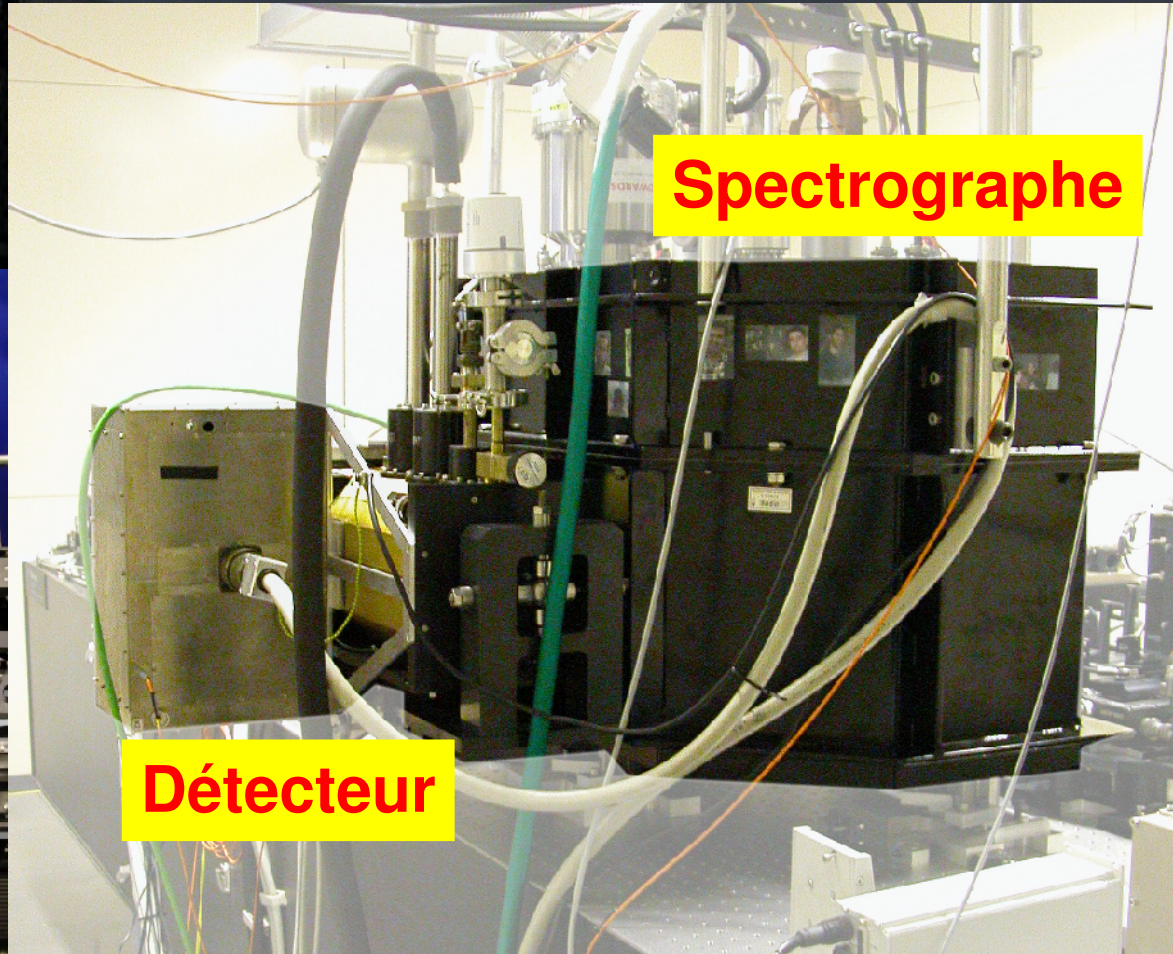
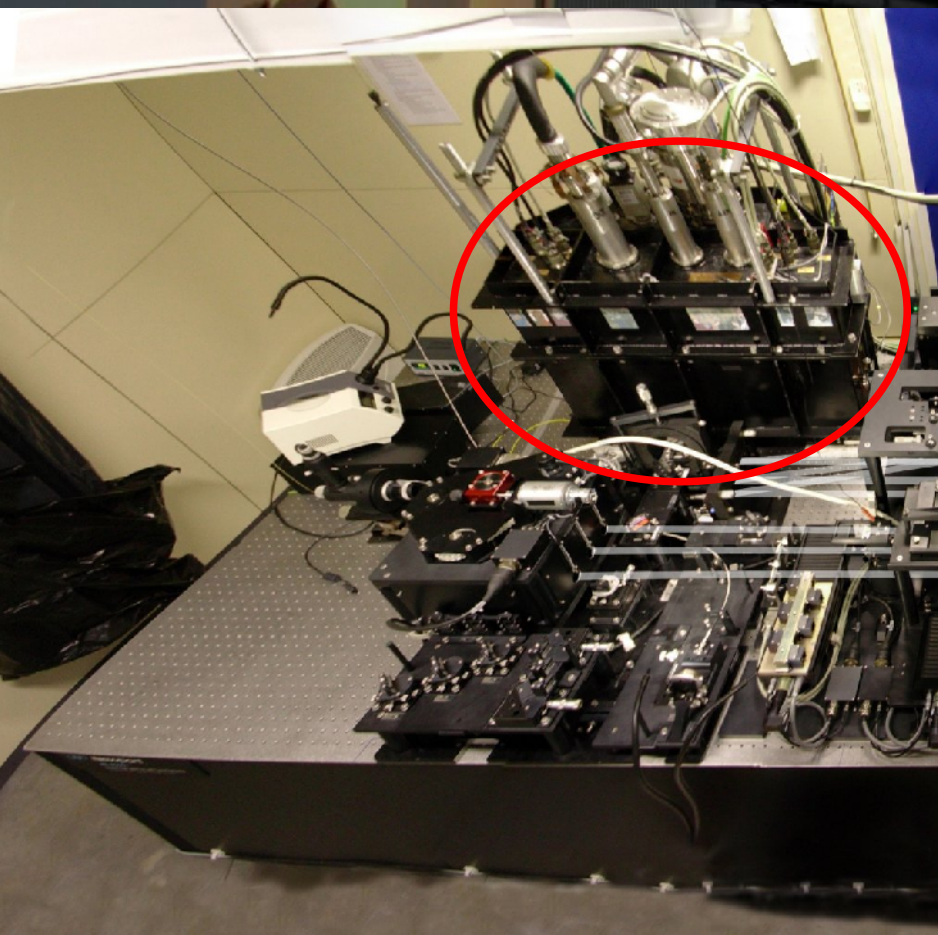
15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

AMBER

Anamorphose

AMBER

Rockwell Hawaii, $\sigma_{\text{det}} = 12e^-$
R = 35, 1500 ou 12000



Le VLTI

UT1

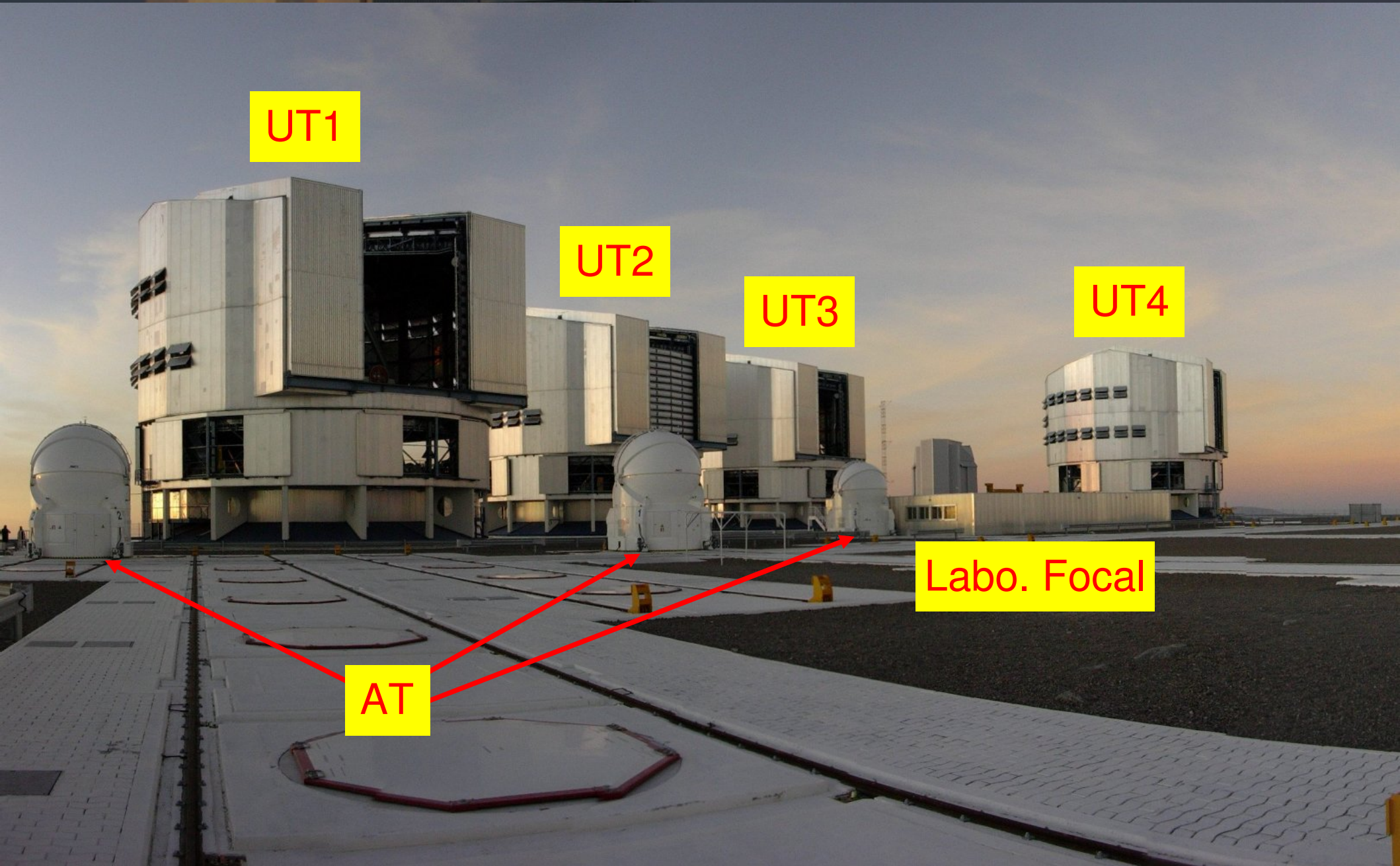
UT2

UT3

UT4

Labo. Focal

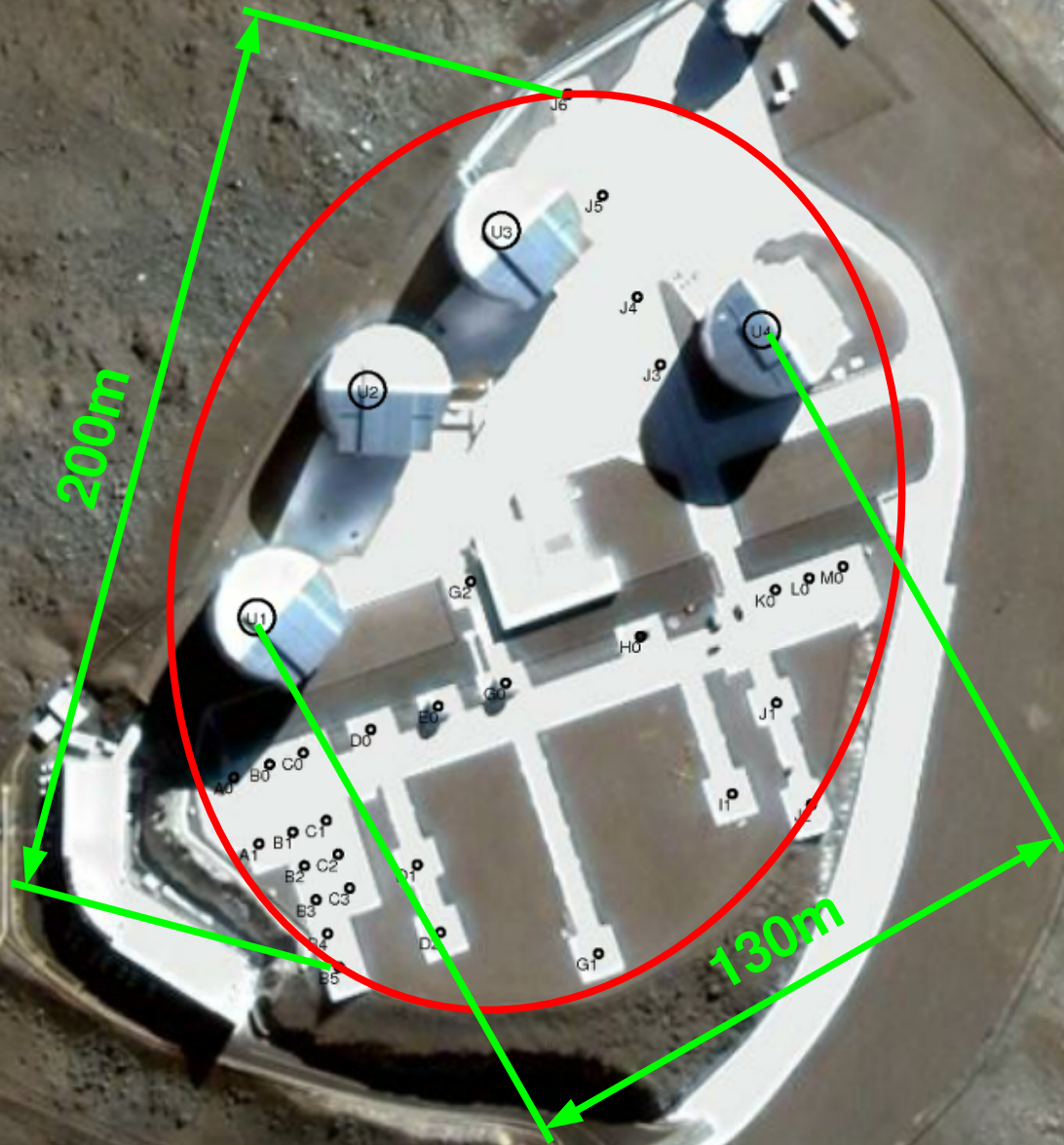
AT





©2006 Google™
Image © 2006 DigitalGlobe

Le VLTI



Plan

- **Contexte**

- Pourquoi la HRA ?
- L'interférométrie stellaire optique et AMBER

- **Traitement du signal et instrumentation**

- Les observables d'AMBER
- L'apport potentiel de la phase différentielle
- Les vraies données

- **Les étoiles chaudes**

- η Car

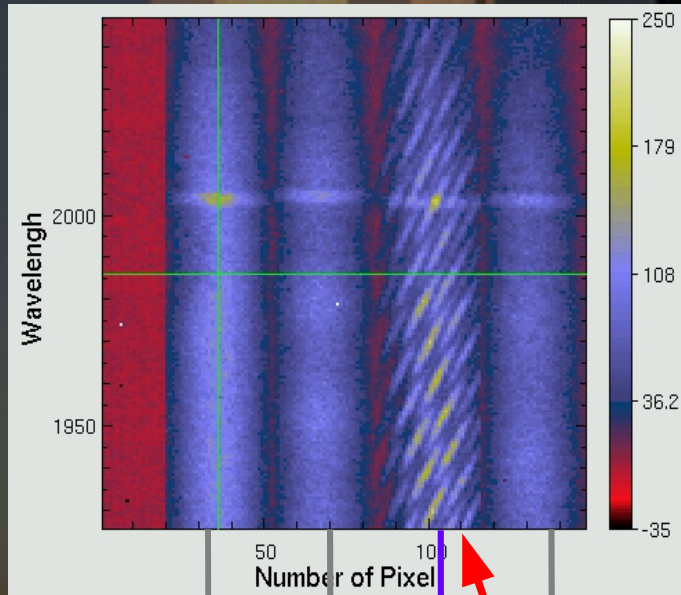
- α Arae

- γ^2 Velorum

Les observables d'AMBER



L'équation interférométrique multiaxiale monomode



Voies photométriques

Voie interférométrique

i_k : Flux mesuré par pixel

N : Flux de l'objet par canal spectral (spectre instantané)

a_k^i : Structure spatiale du faisceau

p^i : Transmission instantanée de chaque télescope

$f^{1,2}$: Fréquence spatiale de codage des franges

$V_o^{i,j}$: Visibilité de l'objet

$V_I^{i,j}$: Visibilité instrumentale

$\phi_o^{i,j}$: Phase de l'objet

$\phi_I^{i,j}$: Phase instrumentale

$\phi_p^{i,j}$: Phase de piston achromatique

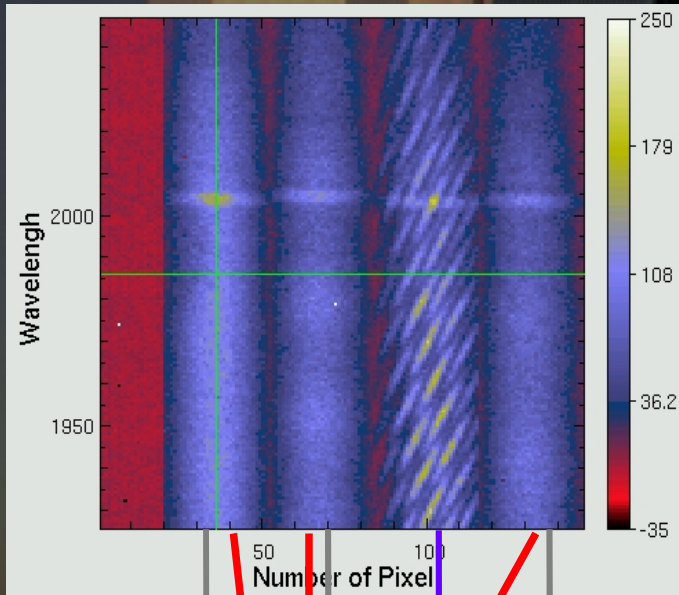
$\phi_c^{i,j}$: Phase de piston chromatique

Figure de franges :

$$i_k = \sum_{i=1}^{N_{tel}} N p^i a_k^i + \sum_{i < j}^{N_{tel}} 2 N V_I^{i,j} V_o^{i,j} \sqrt{p^i a_k^i p^j a_k^j} \cos(2 \Pi f^{i,j} \alpha_k + \phi_I + \phi_c + \phi_p + \phi_o)$$

mesurée sur M images

L'équation interférométrique multiaxiale monomode



Voies photométriques

Voie interférométrique

i_k : Flux mesuré par pixel

N : Flux de l'objet par canal spectral (spectre instantané)

a_k^i : Structure spatiale du faisceau

p^i : Transmission instantanée de chaque télescope

$f^{1,2}$: Fréquence spatiale de codage des franges

$V_o^{i,j}$: Visibilité de l'objet

$V_I^{i,j}$: Visibilité instrumentale

$\phi_o^{i,j}$: Phase de l'objet

$\phi_I^{i,j}$: Phase instrumentale

$\phi_p^{i,j}$: Phase de piston achromatique

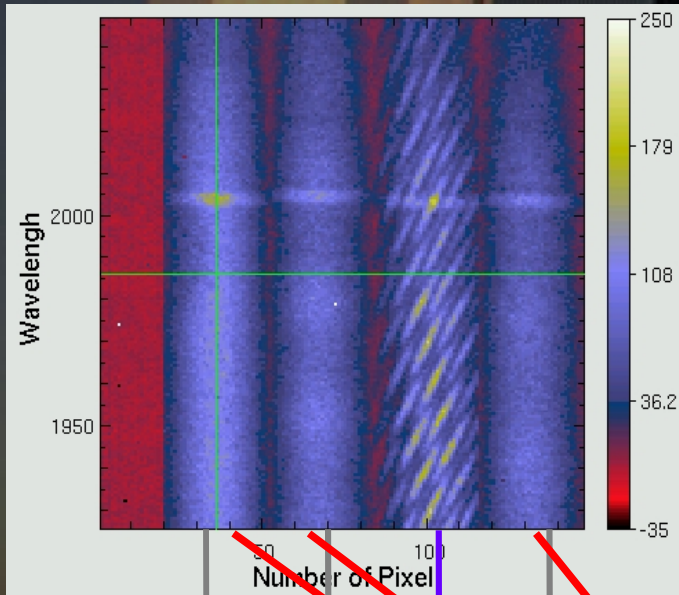
$\phi_c^{i,j}$: Phase de piston chromatique

Figure de franges :

$$i_k = \sum_{i=1}^{N_{tel}} N p^i a_k^i + \sum_{i < j} 2 N V_I^{i,j} V_o^{i,j} \sqrt{p^i a_k^i p^j a_k^j} \cos(2 \Pi f^{i,j} \alpha_k + \phi_I + \phi_c + \phi_p + \phi_o)$$

mesurée sur M images

L'équation interférométrique multiaxiale monomode



Voies photométriques

Voie interférométrique

- i_k : Flux mesuré par pixel
- N : Flux de l'objet par canal spectral (spectre instantané)
- a_k^i : Structure spatiale du faisceau
- p^i : Transmission instantanée de chaque télescope
- $f^{1,2}$: Fréquence spatiale de codage des franges
- $V_o^{i,j}$: Visibilité de l'objet
- $V_I^{i,j}$: Visibilité instrumentale
- $\phi_o^{i,j}$: Phase de l'objet
- $\phi_I^{i,j}$: Phase instrumentale
- $\phi_p^{i,j}$: Phase de piston achromatique
- $\phi_c^{i,j}$: Phase de piston chromatique

Figure de franges :

$$i_k = \sum_{i=1}^{N_{tel}} N p^i a_k^i + \sum_{i < j}^{N_{tel}} 2NV_I^{i,j} V_o^{i,j} \sqrt{p^i a_k^i p^j a_k^j} \cos(2 \Pi f^{i,j} \alpha_k + \phi_I + \phi_c + \phi_p + \phi_o)$$

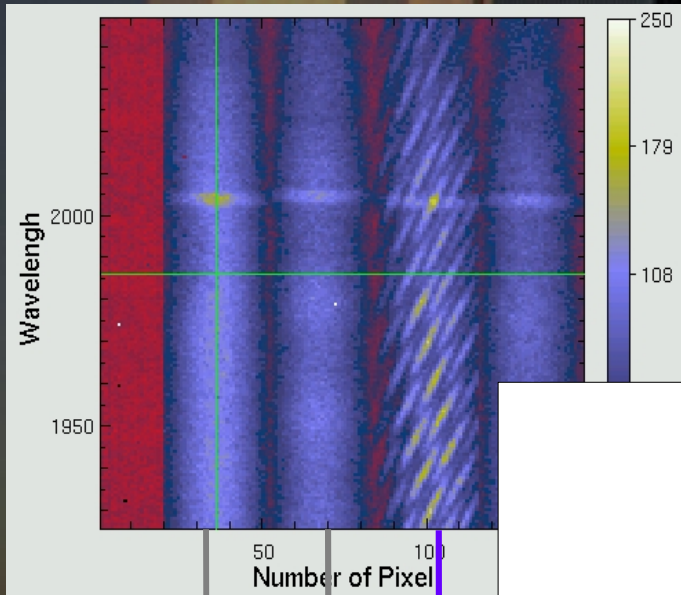
mesurée sur M images

L'algorithme P2VM

Amélioration RSB ?

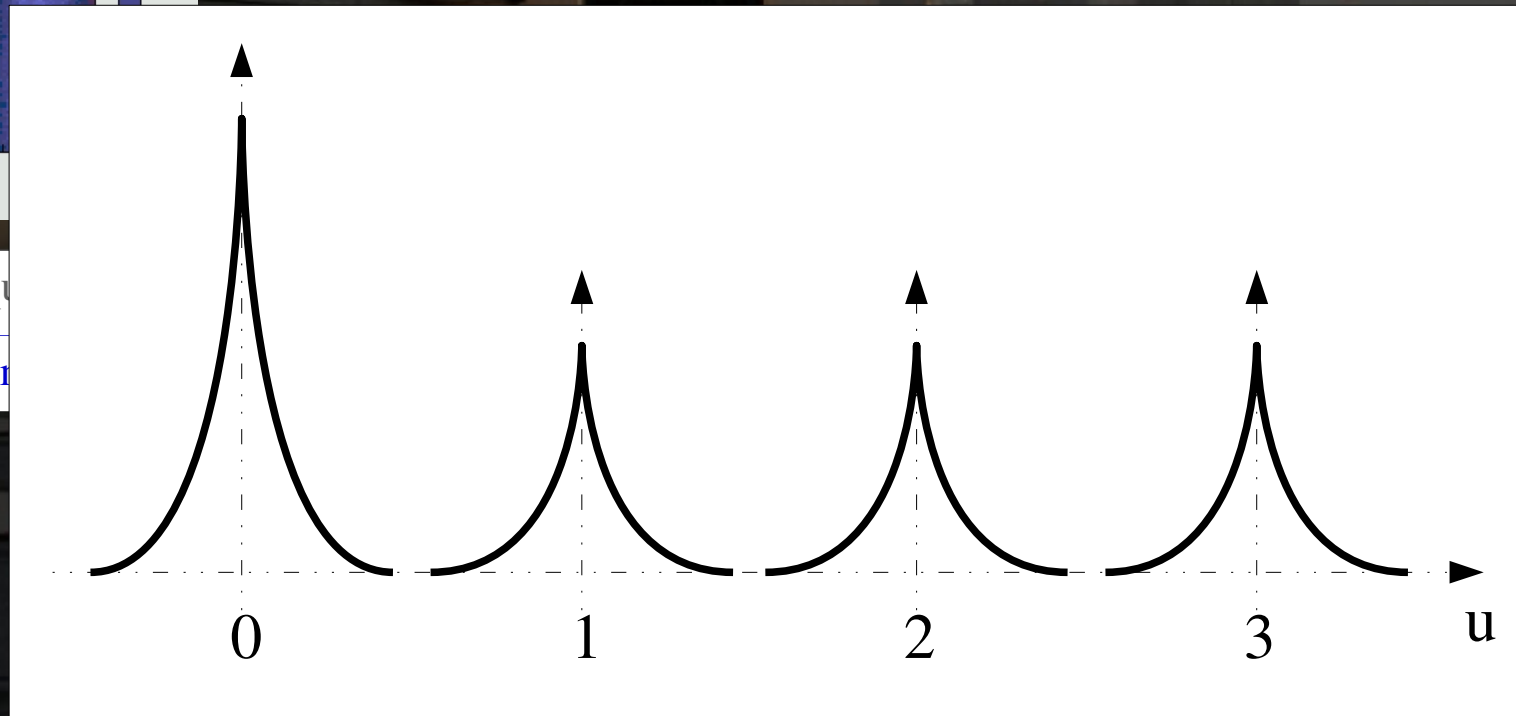
=> Réduction du nombre de pixels

=> Pb avec traitement de Fourier



Voies photométriques

Voie interférométrique

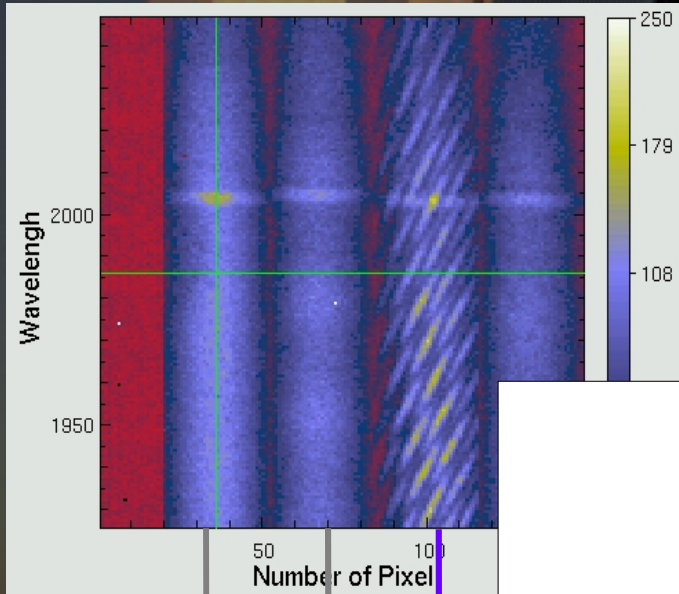


L'algorithme P2VM

Amélioration RSB ?

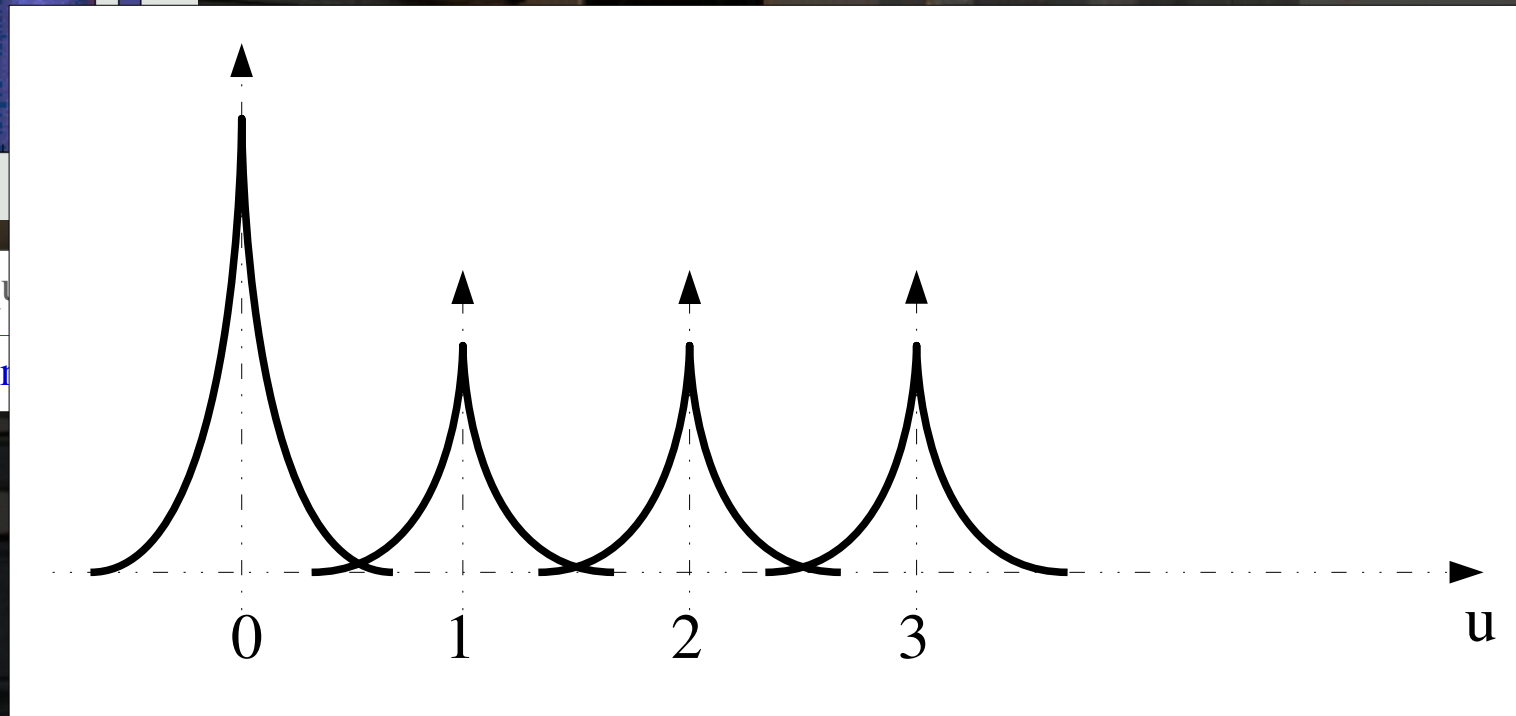
=> Réduction du nombre de pixels

=> Pb avec traitement de Fourier



Voies photométriques

Voie interférométrique

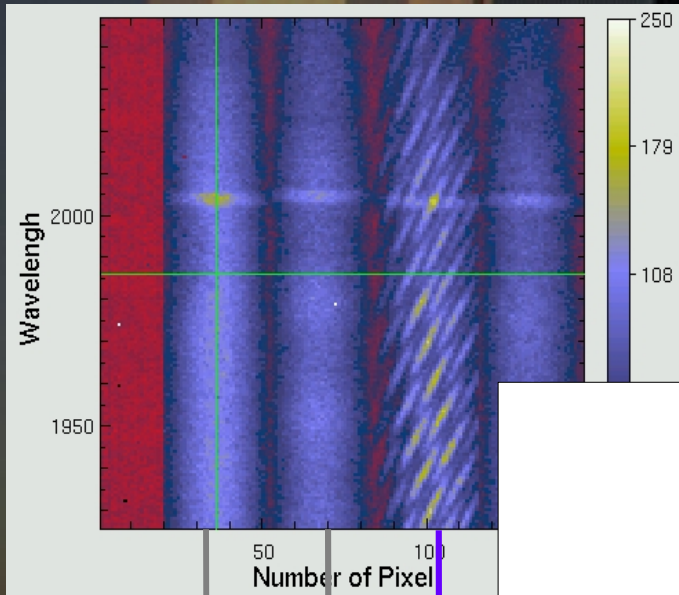


L'algorithme P2VM

Amélioration RSB ?

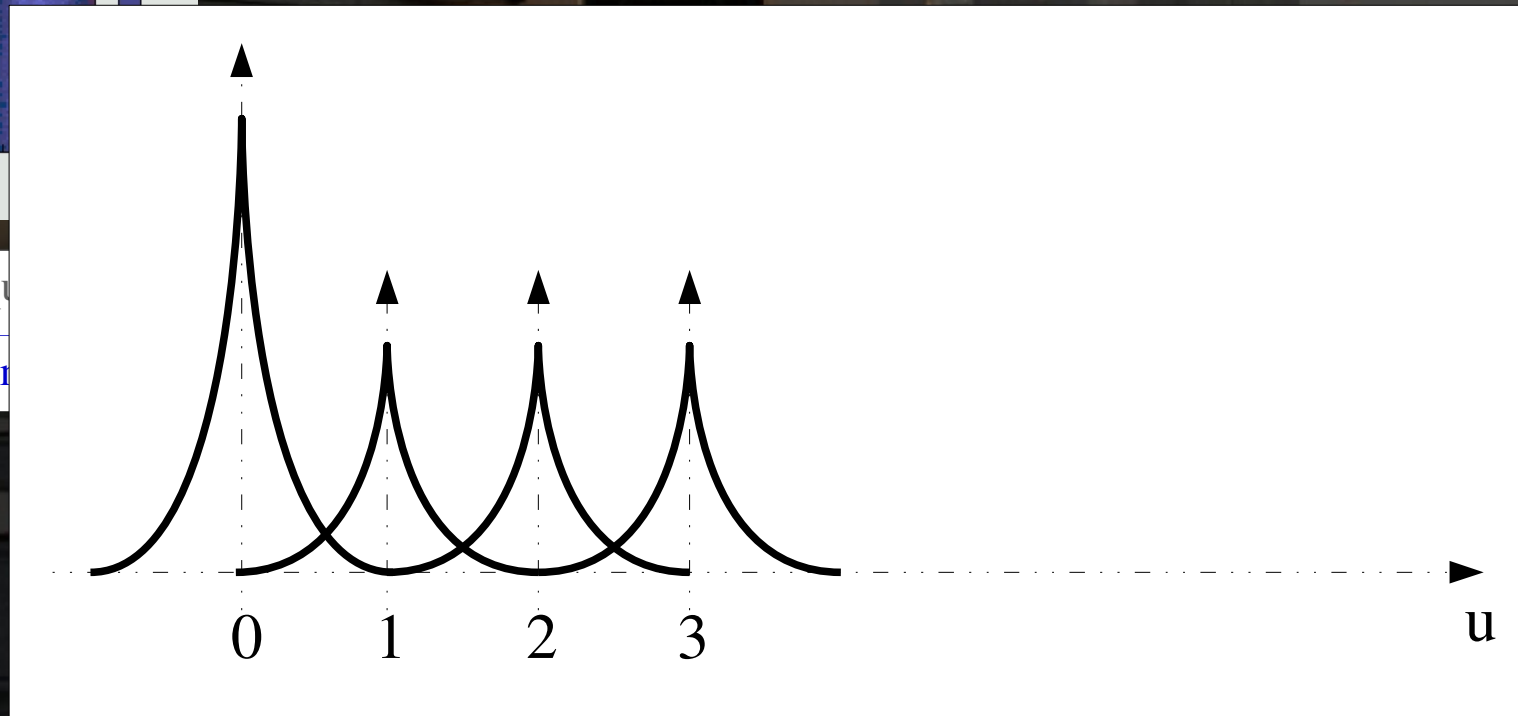
=> Réduction du nombre de pixels

=> Pb avec traitement de Fourier

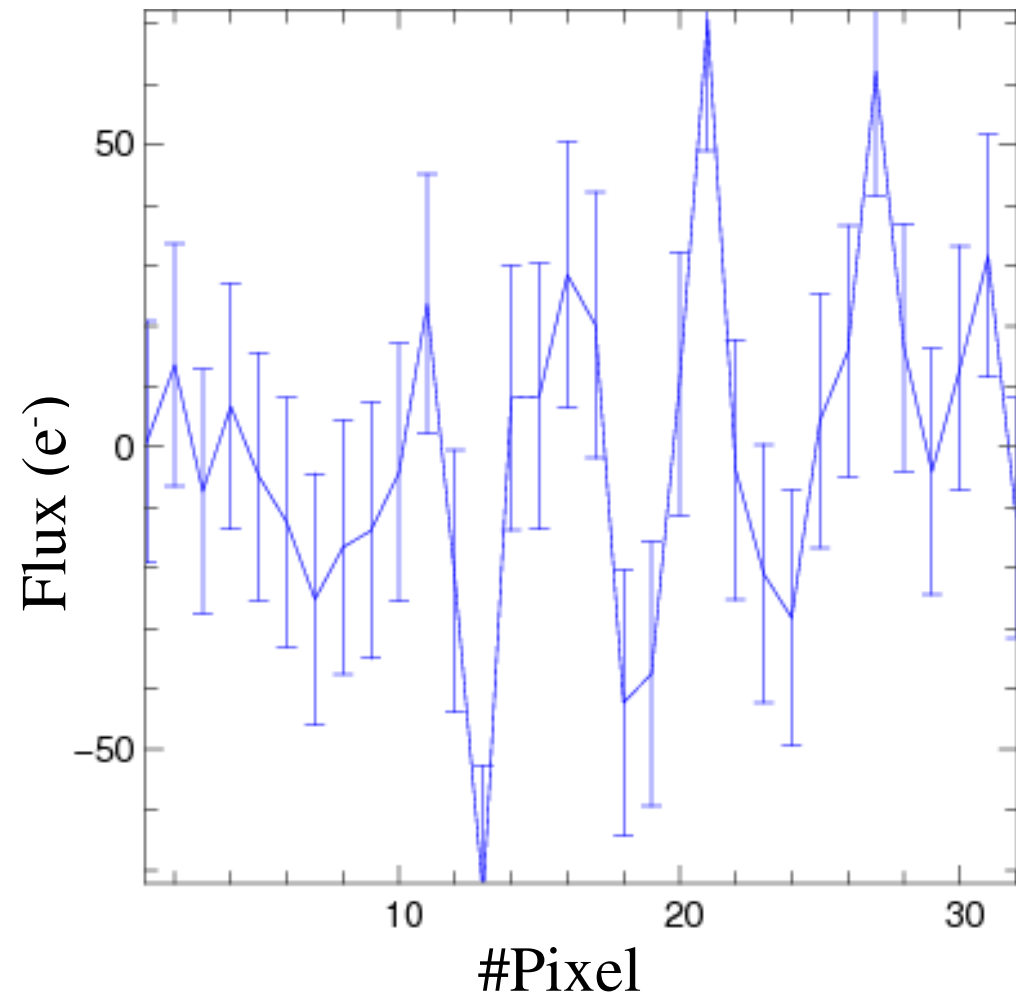
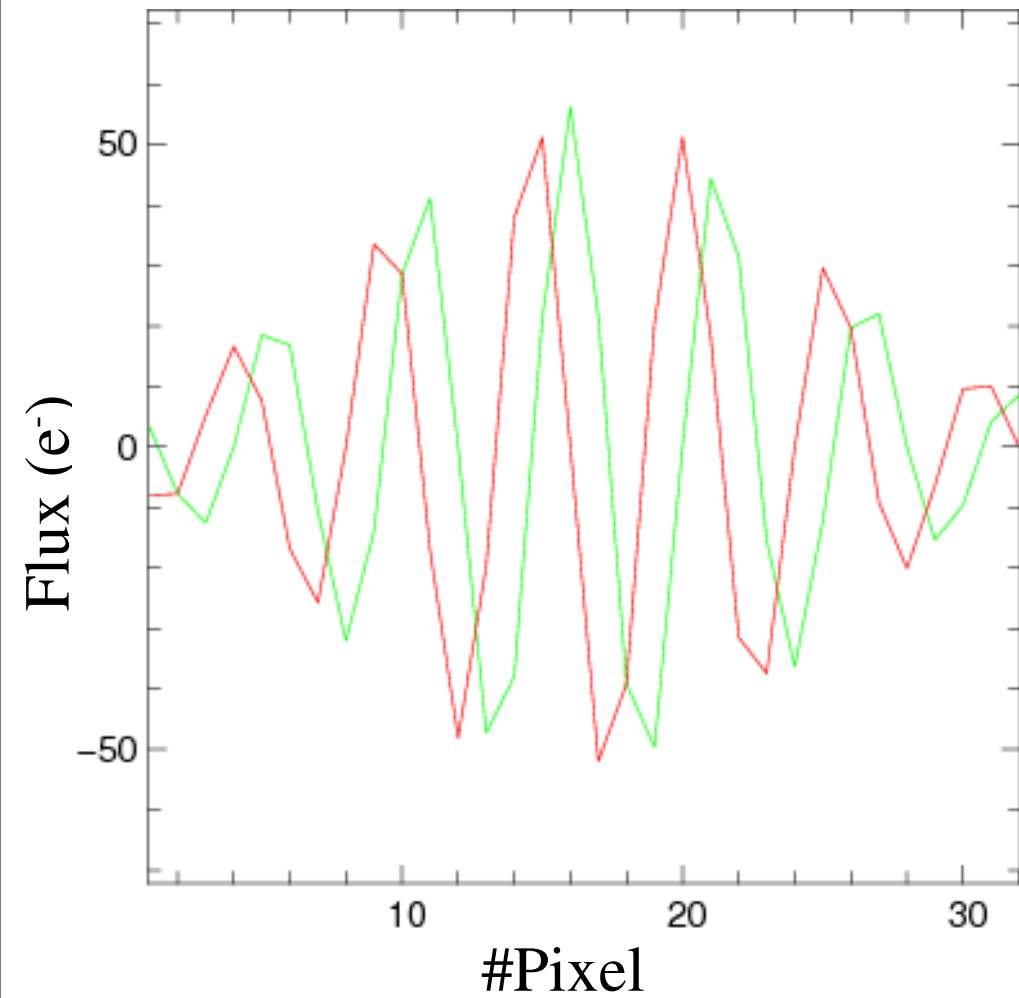


Voies photométriques

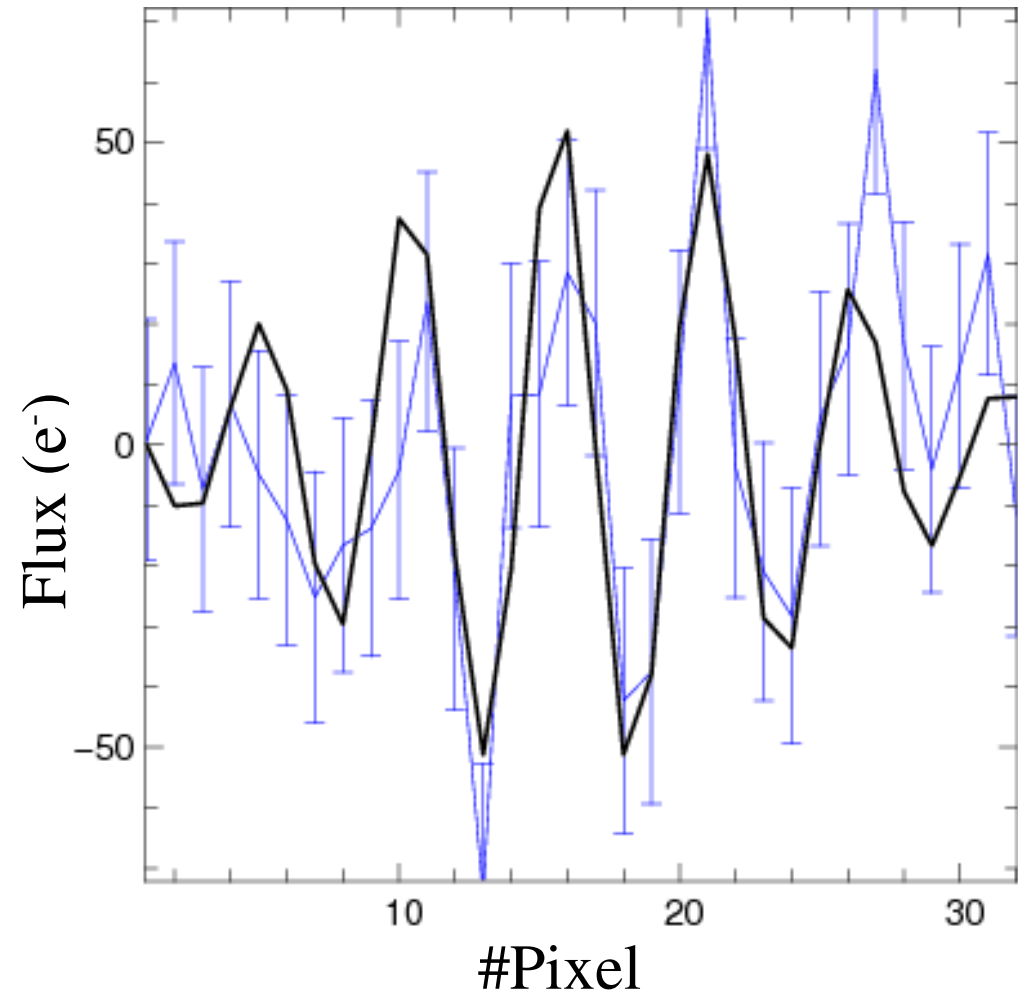
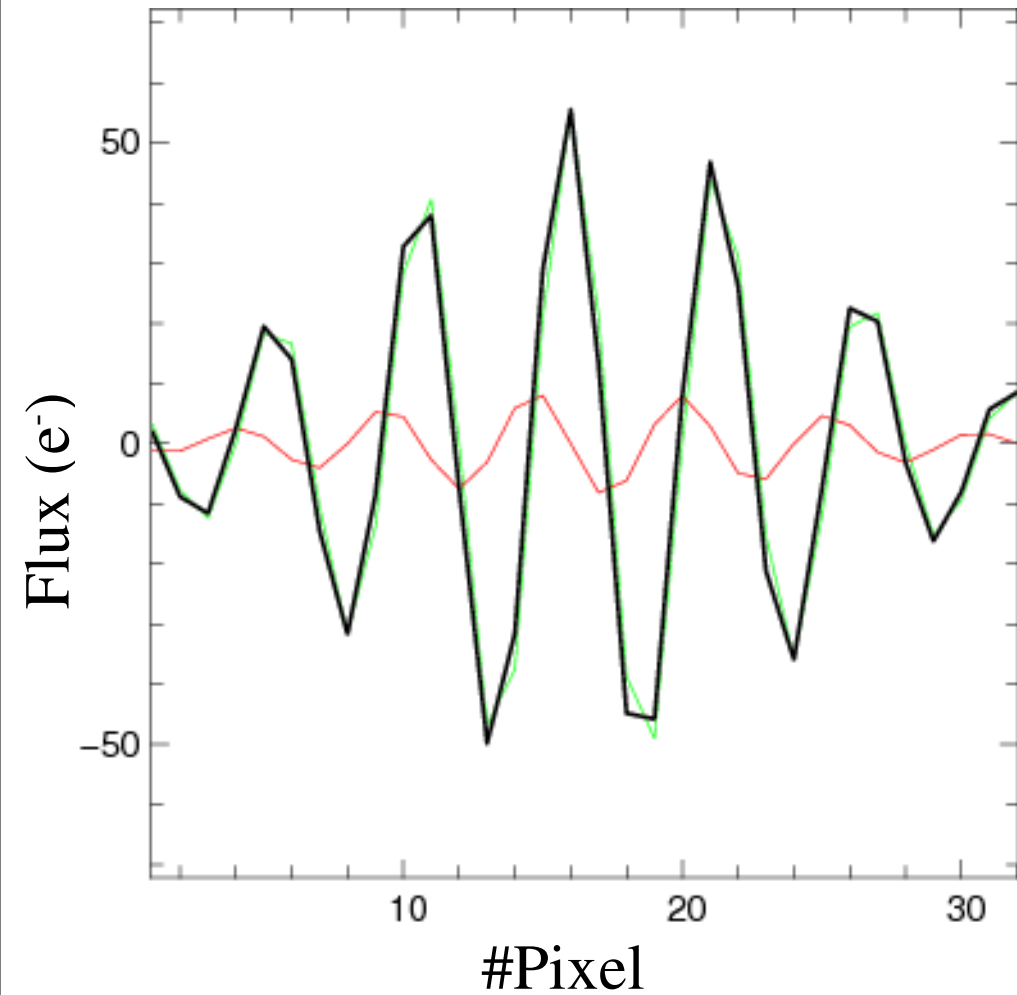
Voie interférométrique



L'algorithme P2VM



L'algorithme P2VM



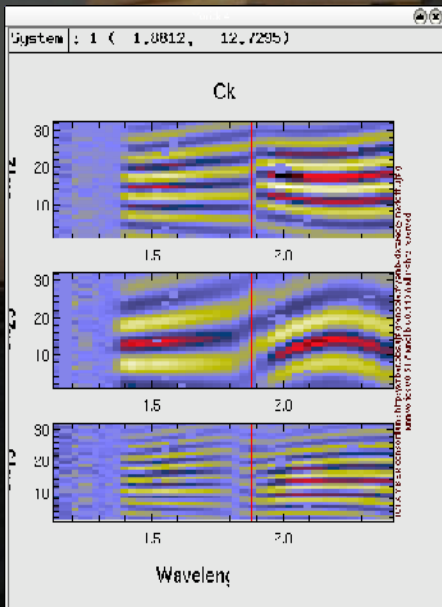
L'algorithme P2VM

C=R+iI est déterminé en minimisant :

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^n \left(\frac{m_k - c_k R + d_k I}{\sigma_k} \right)^2$$

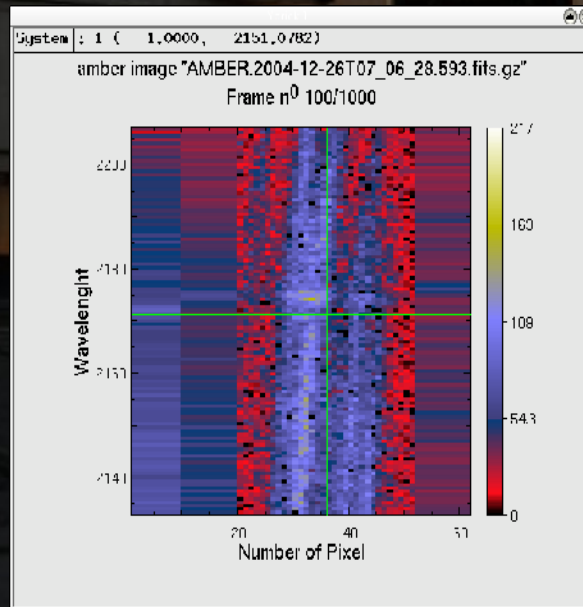
ce qui donne :

$$\begin{bmatrix} R \\ I \end{bmatrix} = [P2VM] \times [m_k]$$



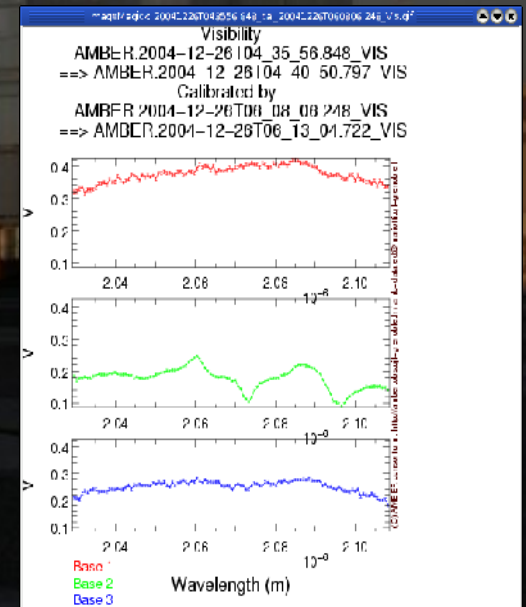
P2VM

"franges instrumentales"



Données nettoyées

Multiplication matricielle



Observable

(flux cohérent complexe)



L'algorithme P2VM



Est valable si :



- L'instrument est stable entre la calibration et les observations
- Le RSB sur la P2VM est suffisant
- Les canaux spectraux sont suffisamment étroits
- On connaît bien le détecteur
- On connaît bien la calibration spectrale

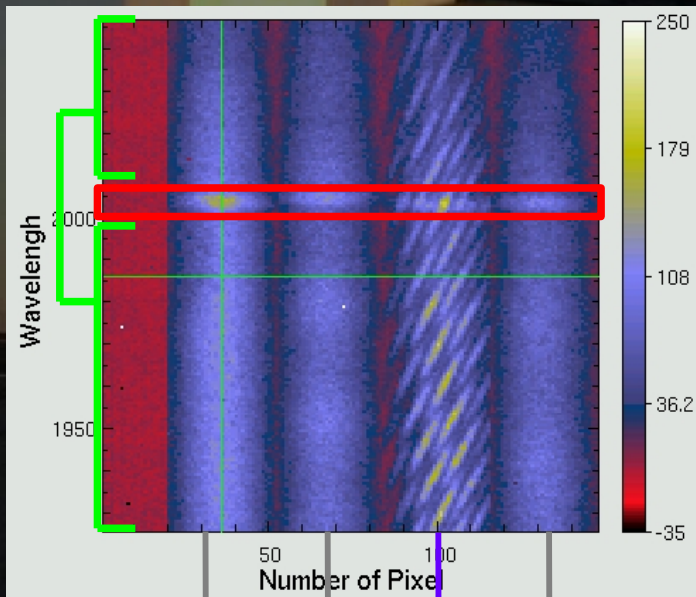


Toutes les observables spectro-interférométriques d'AMBER

Flux cohérent complexe :

$$C^{i,j}(\lambda) = 2 N V^{i,j}(\lambda) e^{i(\phi_c^{i,j}(\lambda) + \phi_p^{i,j}(\lambda) + \phi^{i,j}(\lambda))} = R^{i,j}(\lambda) + i I^{i,j}(\lambda)$$

mesuré sur **M** images



Voies photométriques

Voie interférométrique

Spectre :

$$S(\lambda) = N(\lambda)$$

Visibilité :

$$V^{i,j}(\lambda) = |C^{i,j}(\lambda)| / N(\lambda)$$

Clôture de phase :

$$\Psi^{123}(\lambda) = \text{atan} \langle C^{1,2} C^{2,3} C^{*1,3} \rangle$$

Phase différentielle :

$$\Phi_{\text{diff}}^{i,j}(\lambda)$$

Visibilité différentielle :

$$V_{\text{diff}}^{i,j}(\lambda)$$

“Clôture” des phases différentielles :

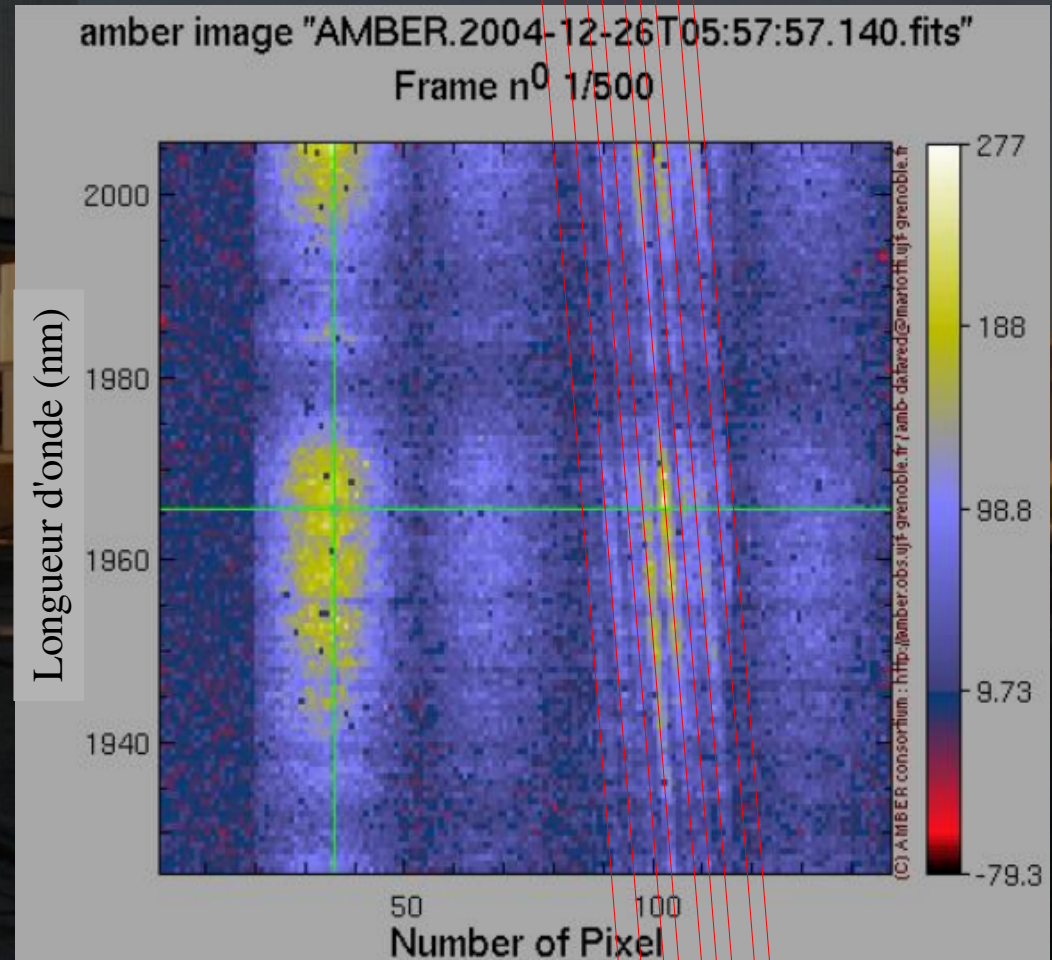
$$\Psi_{\text{diff}}^{123}(\lambda) = \Phi_{\text{diff}}^{1,2}(\lambda) + \Phi_{\text{diff}}^{2,3}(\lambda) + \Phi_{\text{diff}}^{3,1}(\lambda)$$

Le piston achromatique

- Phase due à la DDM :

$$\phi_p = 2 \Pi \frac{\delta}{\lambda} = 2 \Pi \delta \sigma$$

$$\delta = \left\langle \frac{1}{2 \Pi} \frac{\phi_2 - \phi_1}{\sigma_2 - \sigma_1} \right\rangle_{\sigma}$$



Le piston achromatique

- Méthode par différences finies

$$\tilde{\delta} = \frac{\arctan \langle C_{2k+1} C_{2k}^* \rangle_{\lambda_k}}{\langle \sigma_{2k+1} - \sigma_{2k} \rangle_{\lambda_k}}$$

Utilisée en temps réel sur
l'instrument

- Méthode par minimisation du χ^2

$$\chi_{\delta}^2 = \sum_{\lambda} \frac{\Im \left[C_{\lambda} e^{2i\pi \frac{\delta}{\lambda}} \right]^2}{\sigma_{\Im[C_{\lambda}]}^2}$$

Utilisée pour le traitement des
données

La phase différentielle

$$C_{nop}^{i,j}(t, \lambda) = C^{i,j}(t, \lambda) \times e^{-2i\pi \frac{\delta^{i,j}(t)}{\lambda}}$$

$$C_{ref}^{i,j}(t, \lambda_k) = \left\langle C_{nop}^{i,j}(t, \lambda_m) \right\rangle_{\lambda_k \neq \lambda_m}$$

$$W^{i,j}(\lambda_k) = \left\langle \left(C_{nop}^{i,j}(t, \lambda) \right) \left(C_{ref}^{i,j}(t, \lambda_k) \right)^* \right\rangle_t$$

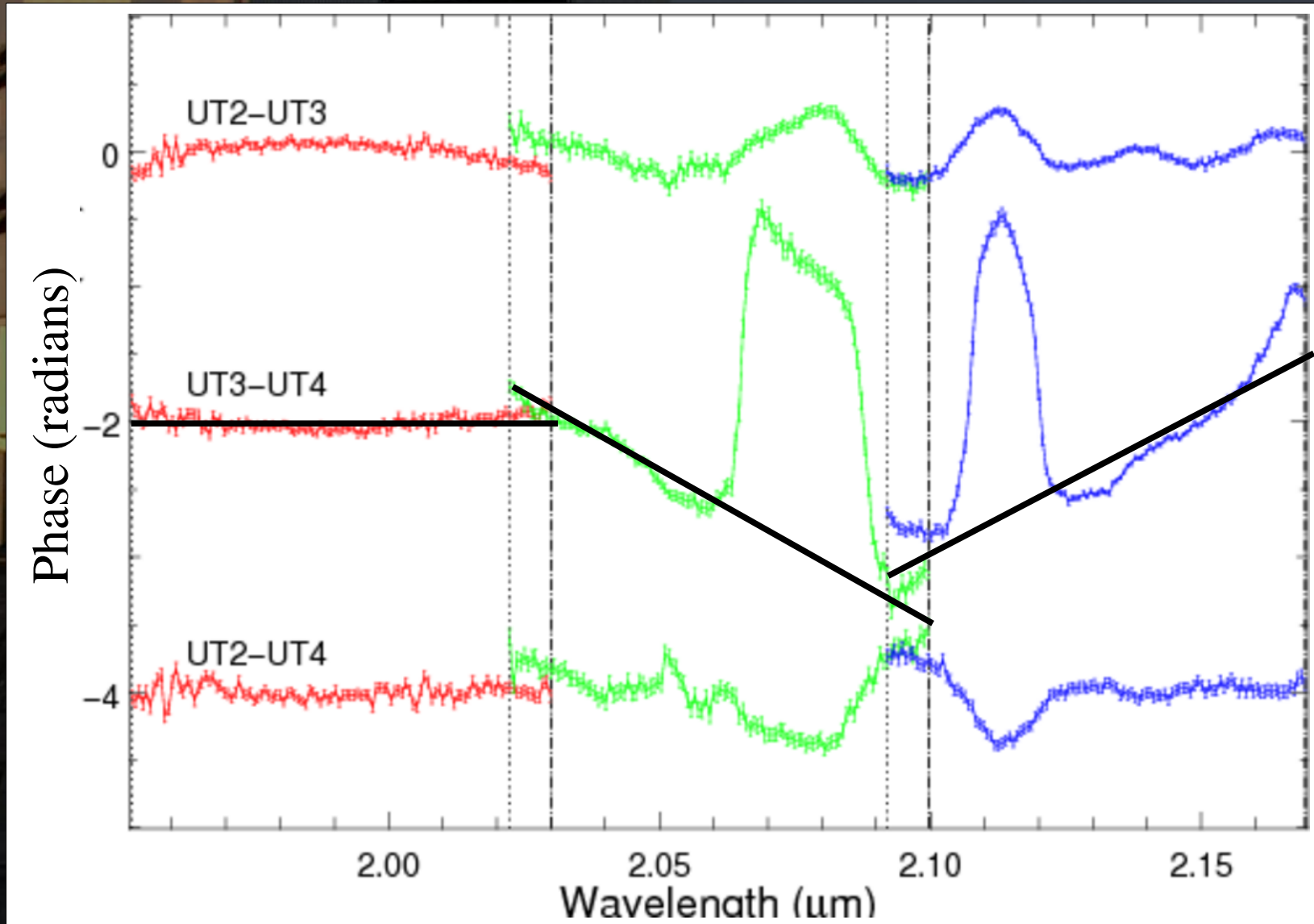
$$\begin{aligned} \Phi_{diff}^{i,j}(\lambda_k) &= \arg \left(W^{i,j}(\lambda_k) \right) \\ &= \Omega \phi_o^{i,j}(\lambda_k) + \frac{a}{\lambda} + b \end{aligned}$$

$$\Omega = \frac{N_\lambda}{N_\lambda - 1}$$

$$a = 2\pi \delta_o^{i,j}$$

$$b = \frac{N_\lambda}{N_\lambda - 1} \left\langle \phi_o^{i,j}(\lambda) \right\rangle_\lambda$$

La phase différentielle



15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

La visibilité différentielle

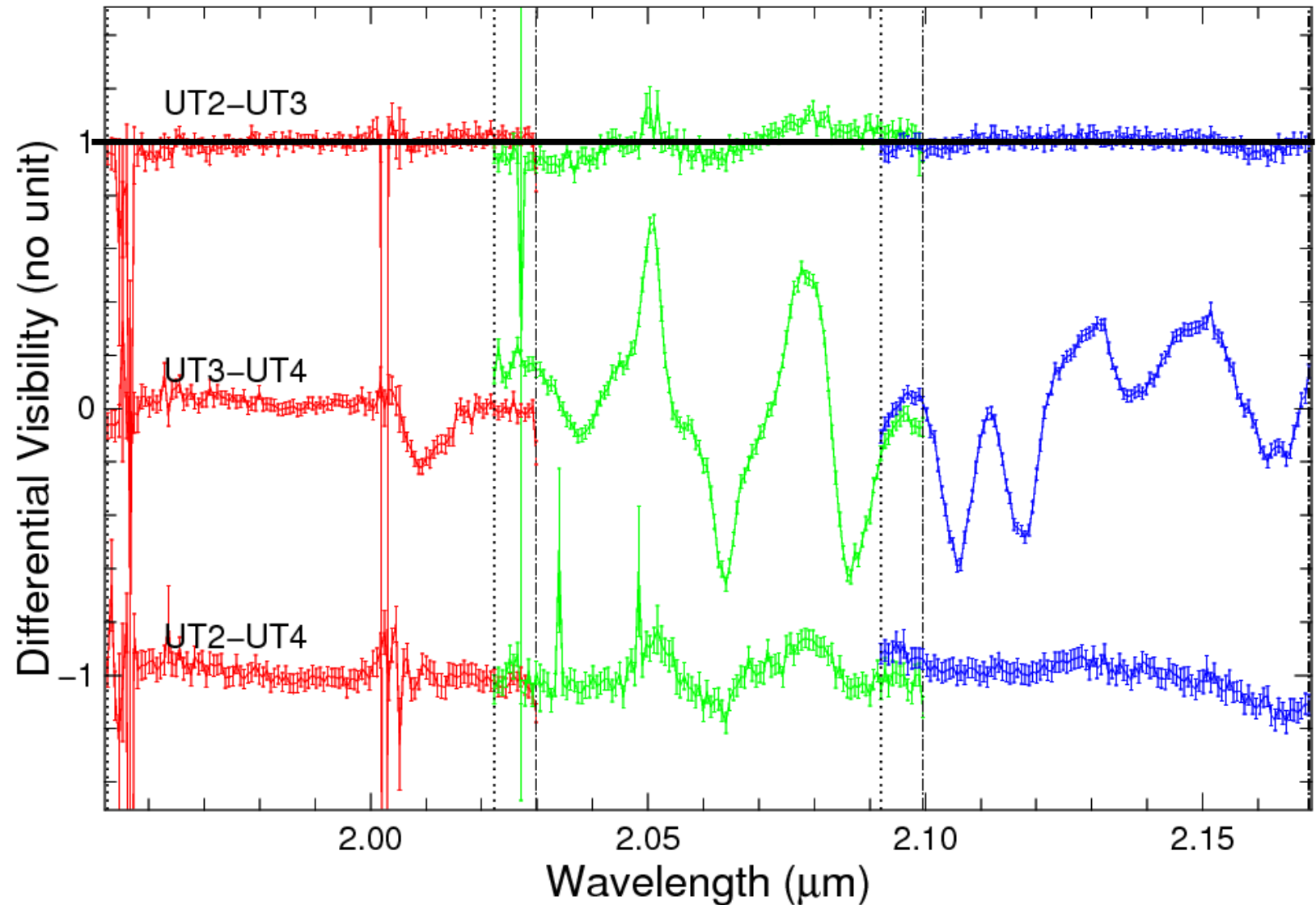
$$C_{nop}^{i,j}(t, \lambda) = C^{i,j}(t, \lambda) \times e^{-2i\pi \frac{\delta^{i,j}(t)}{\lambda}}$$

$$C_{ref}^{i,j}(t, \lambda_k) = \left\langle C_{nop}^{i,j}(t, \lambda_m) \right\rangle_{\lambda_k \neq \lambda_m}$$

$$W_2^{i,j}(\lambda_k) = \left\langle \frac{\left(C_{nop}^{i,j}(t, \lambda) \right) \left(C_{ref}^{i,j}(t, \lambda_k) \right)^*}{\left| C_{ref}^{i,j}(t, \lambda_k) \right|^2} \right\rangle_t$$

$$V_{diff}^{i,j}(\lambda_k) = \Re \left(W_2^{i,j}(\lambda_k) \right) \\ \simeq V_o^{i,j}(\lambda_k) / \left\langle V_o^{i,j}(\lambda) \right\rangle_\lambda$$

La visibilité différentielle



15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

Plan

- **Contexte**

- Pourquoi la HRA ?
- L'interférométrie stellaire optique et AMBER

- **Traitement du signal et instrumentation**

- Les observables d'AMBER
- L'apport potentiel de la phase différentielle
- Les vraies données

- **Les étoiles chaudes**

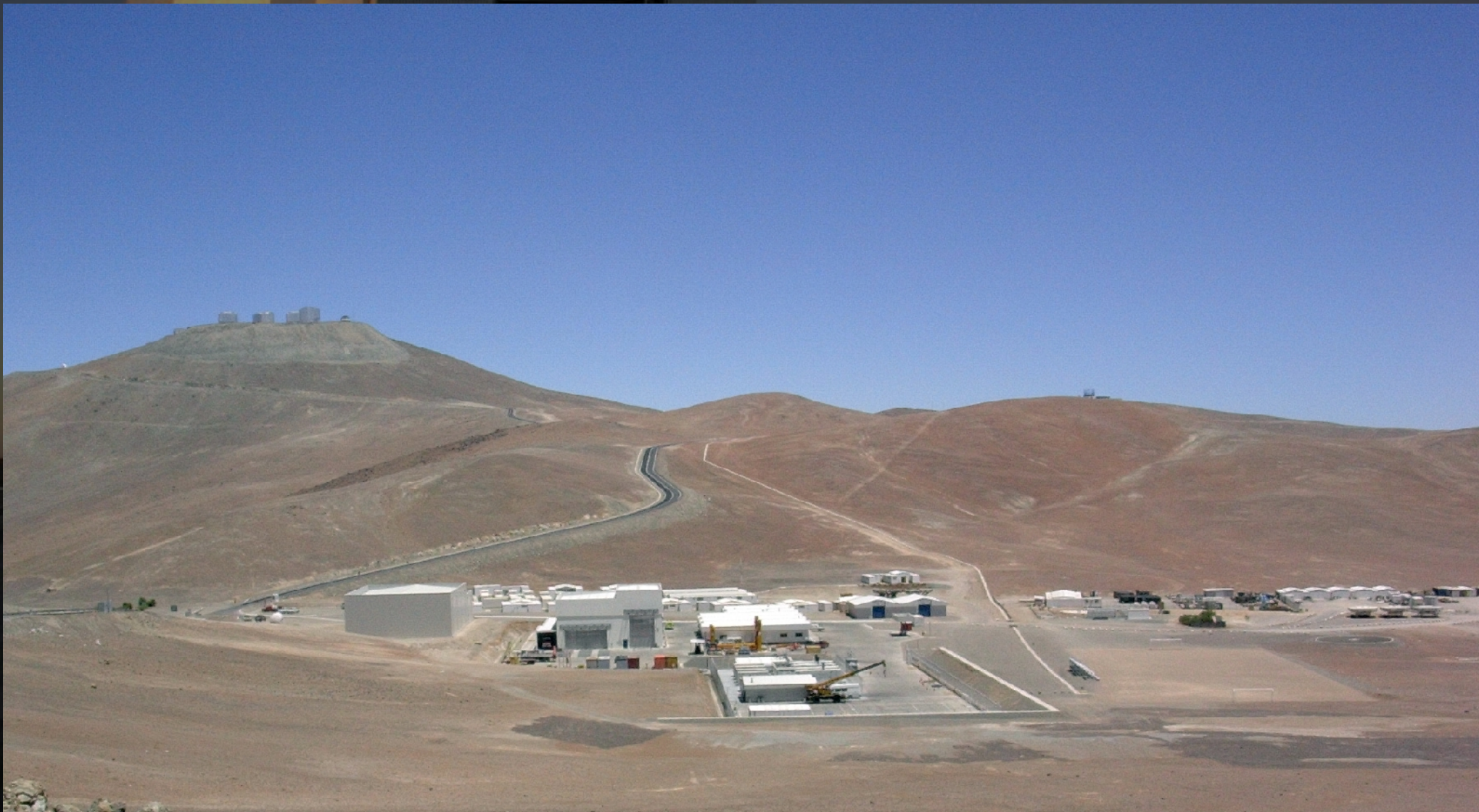
- η Car

- α Arae

- γ^2 Velorum

15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

L'apport de la phase différentielle en interférométrie stellaire optique



Ajustement de modèles

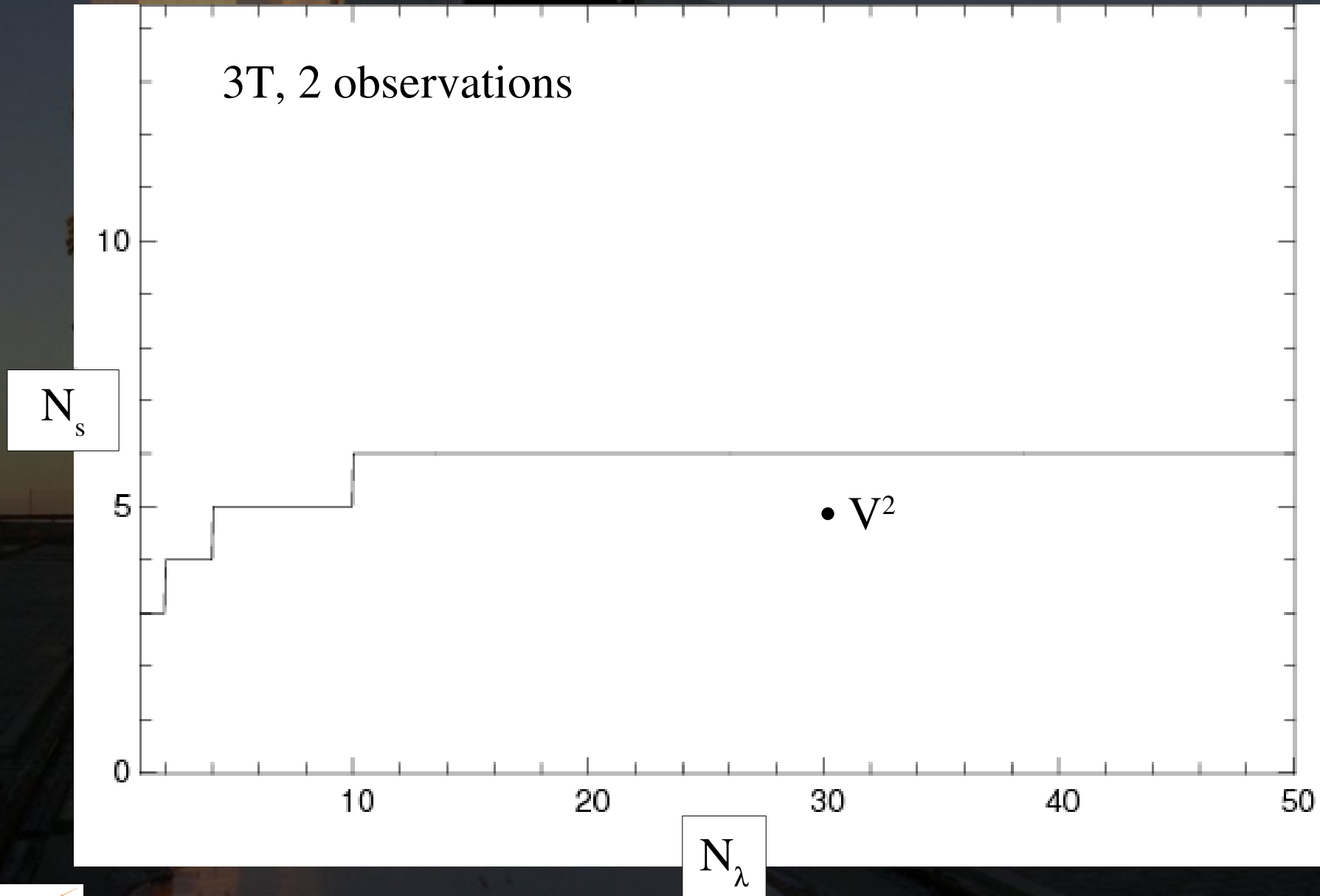
Nombre N_s de sources ponctuelles

- Inconnues I : $2N_s - 2$ positions et $N_s N_\lambda$ flux
- Mesures M : Visibilités, clôture de phase, etc.

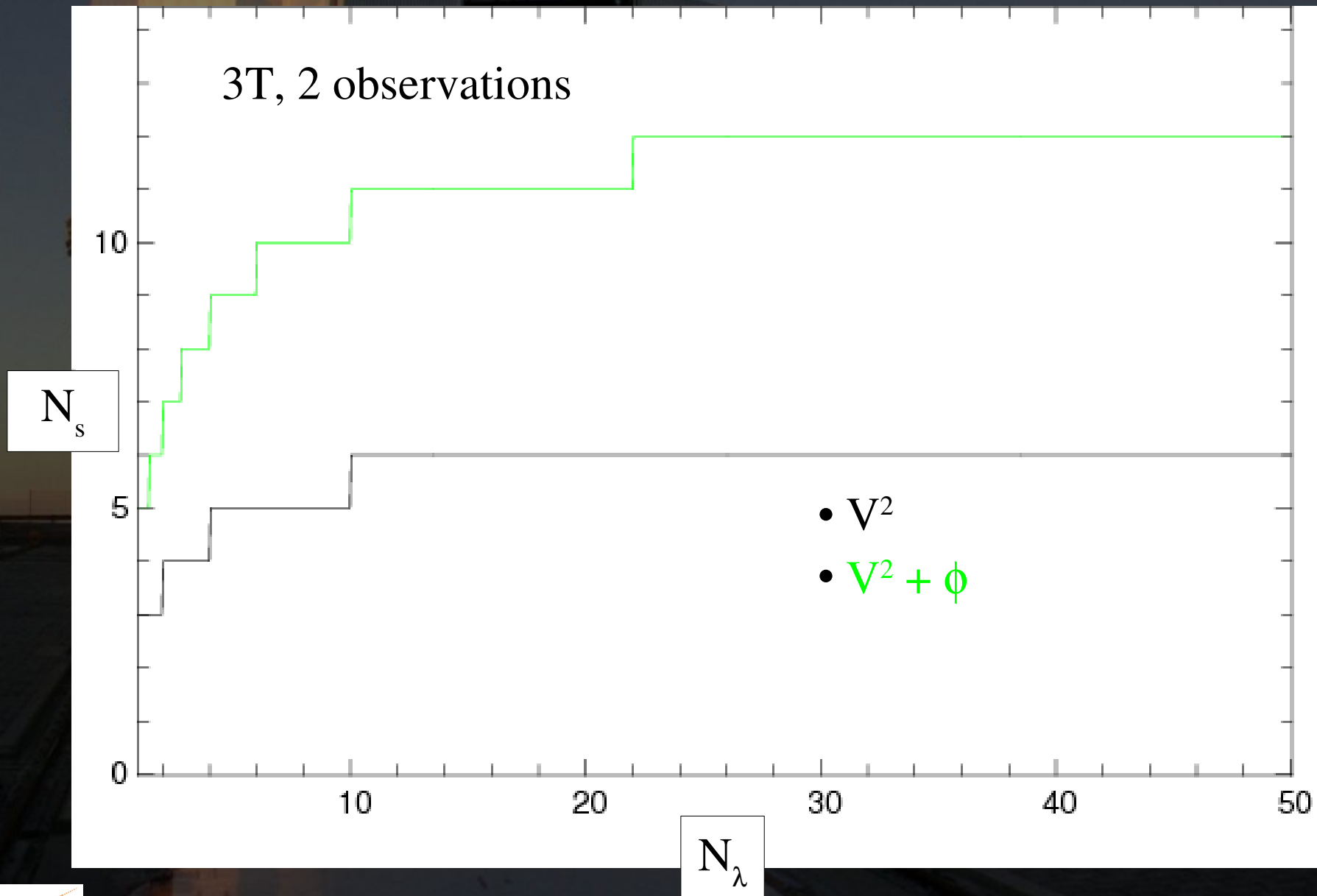
=> Annulation du nombre de degrés de libertés
du problème

$$D = M - I = 0$$

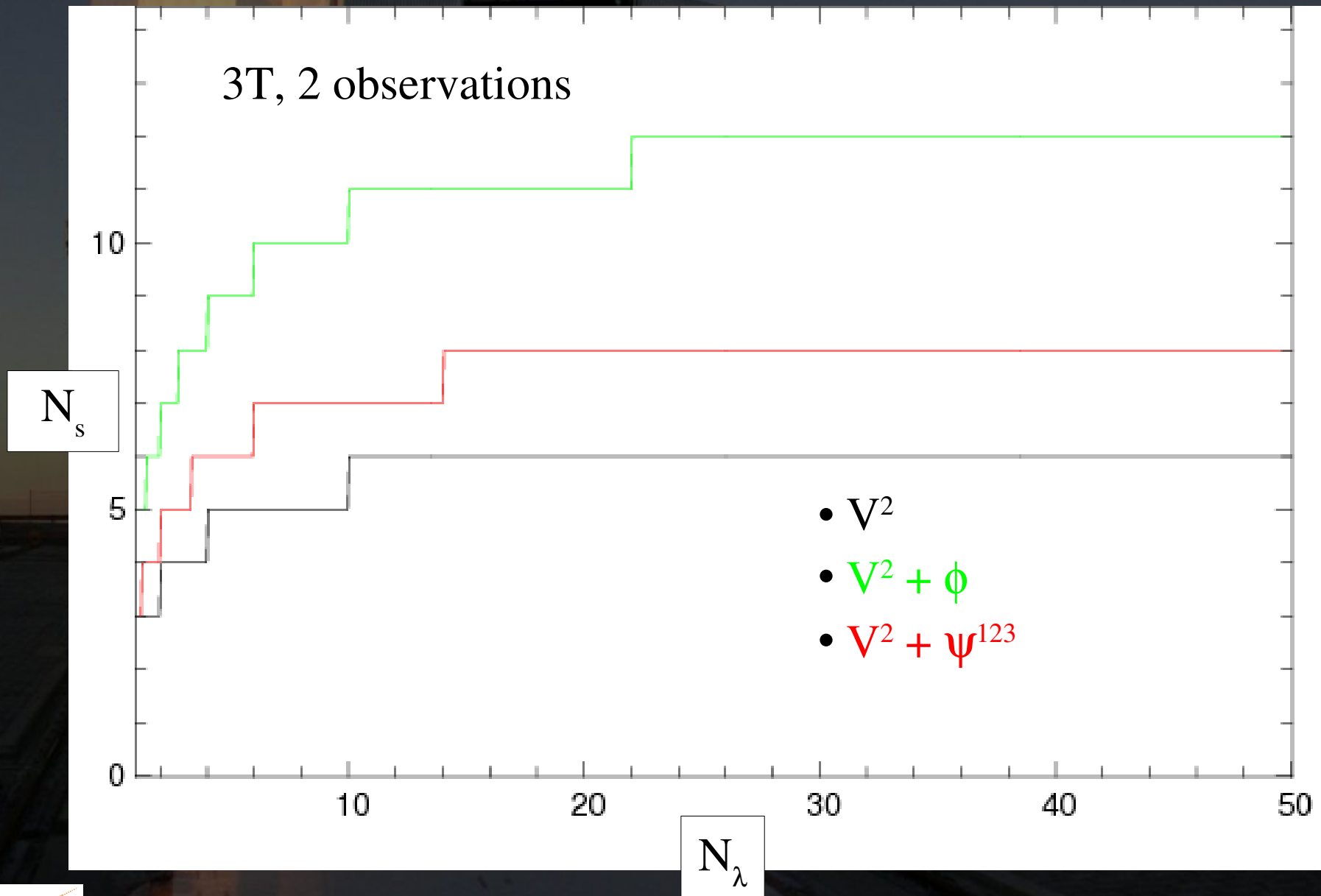
Ajustement de modèles



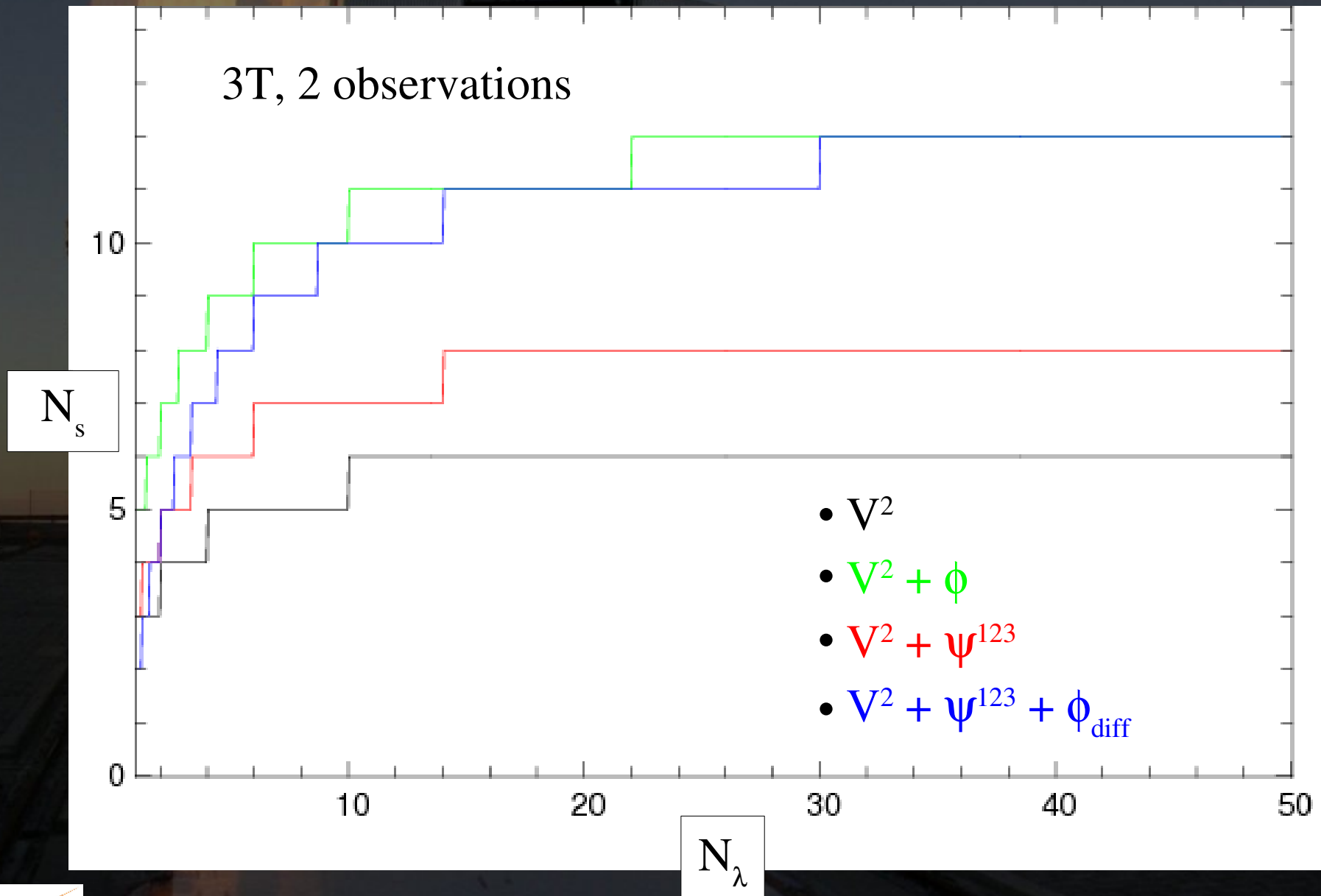
Ajustement de modèles



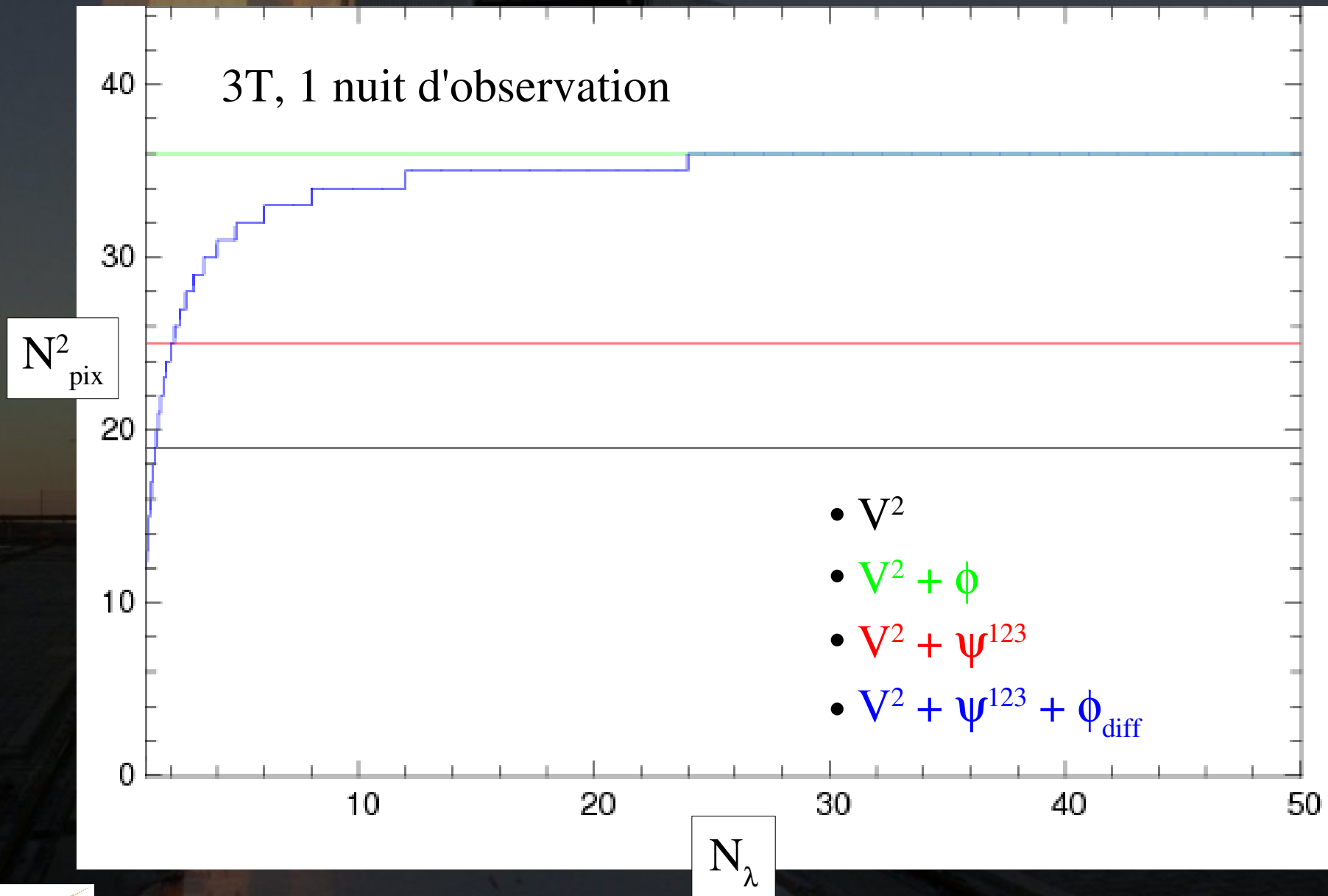
Ajustement de modèles



Ajustement de modèles



Reconstruction d'images



15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

Plan

- **Contexte**

- Pourquoi la HRA ?
- L'interférométrie stellaire optique et AMBER

- **Traitement du signal et instrumentation**

- Les observables d'AMBER
- L'apport potentiel de la phase différentielle

Les vraies données

- **Les étoiles chaudes**

- η Car

- α Arae

- γ^2 Velorum

15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

Les vraies données



15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

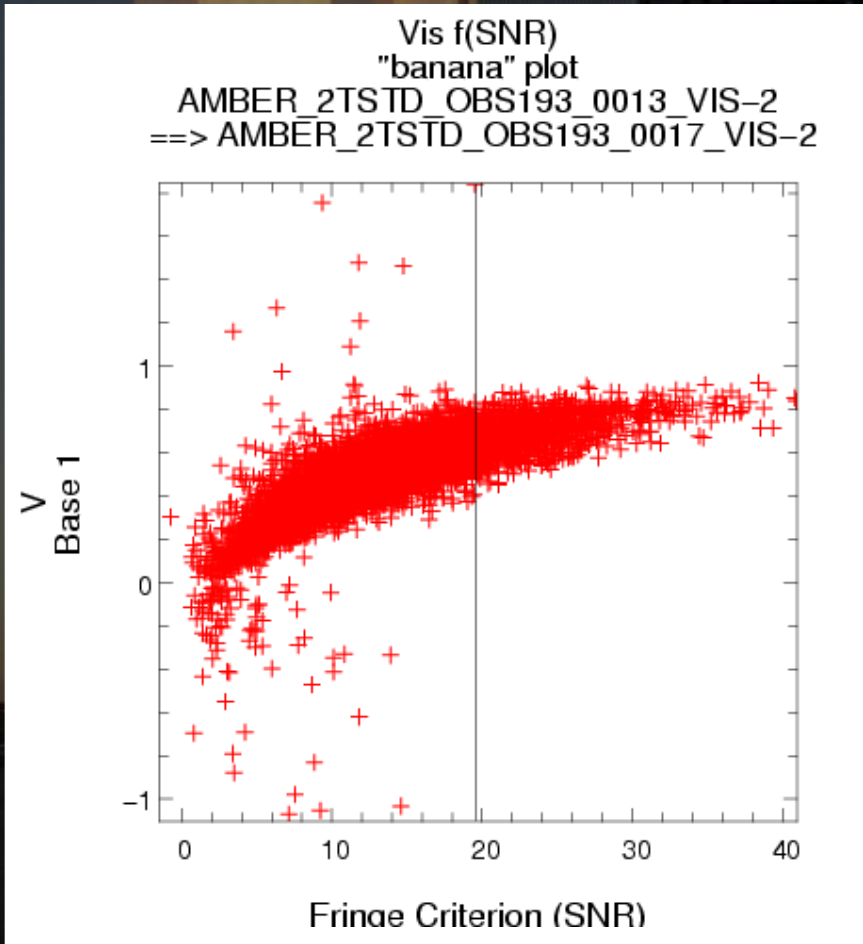
Contraste instrumentale sur le ciel

- Visibilité intrumentale au labo : 0.85
- Visibilité attendue sur le ciel : 0.60

- SANS FINITO :
- Visibilité moyenne UT sur le ciel : 0.20
 - Visibilité moyenne AT sur le ciel : 0.60



“Vibrations VLTI / UT”
Amplitude de DDM : entre 0.2 et 1 μm
Fréquence : >20Hz



=> **Besoin d'une correction de l'atténuation du contraste
ET/OU**

Sélection d'images

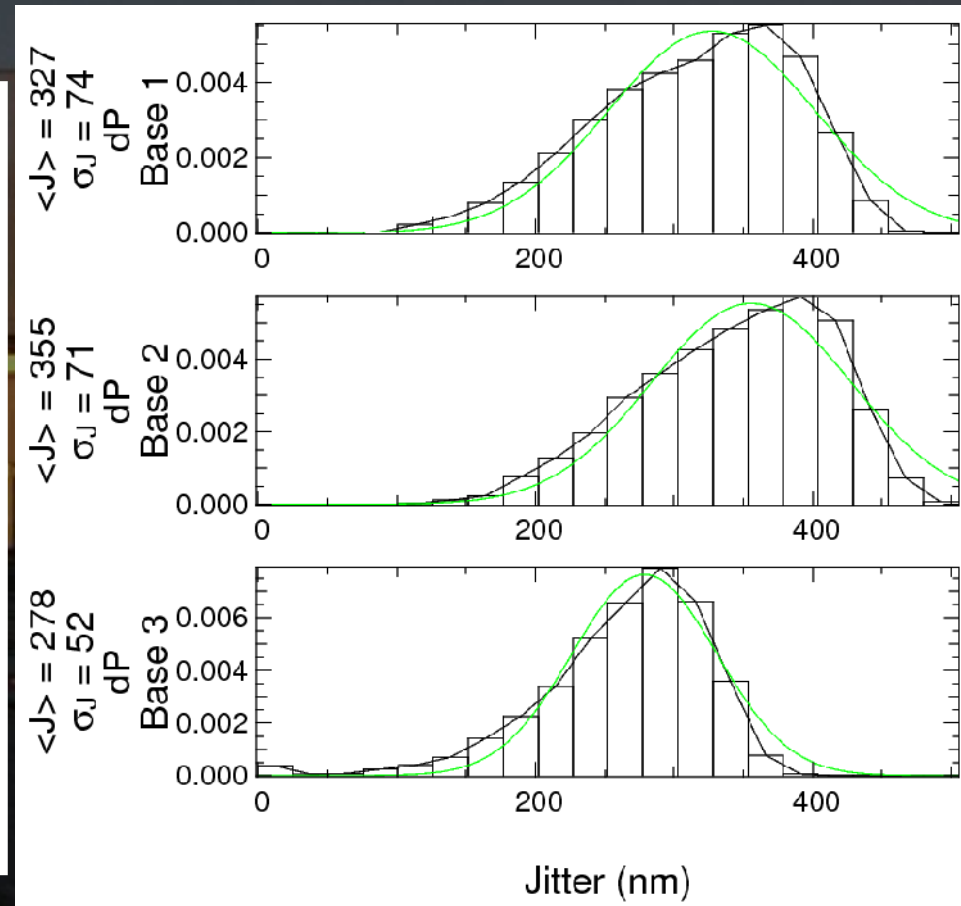
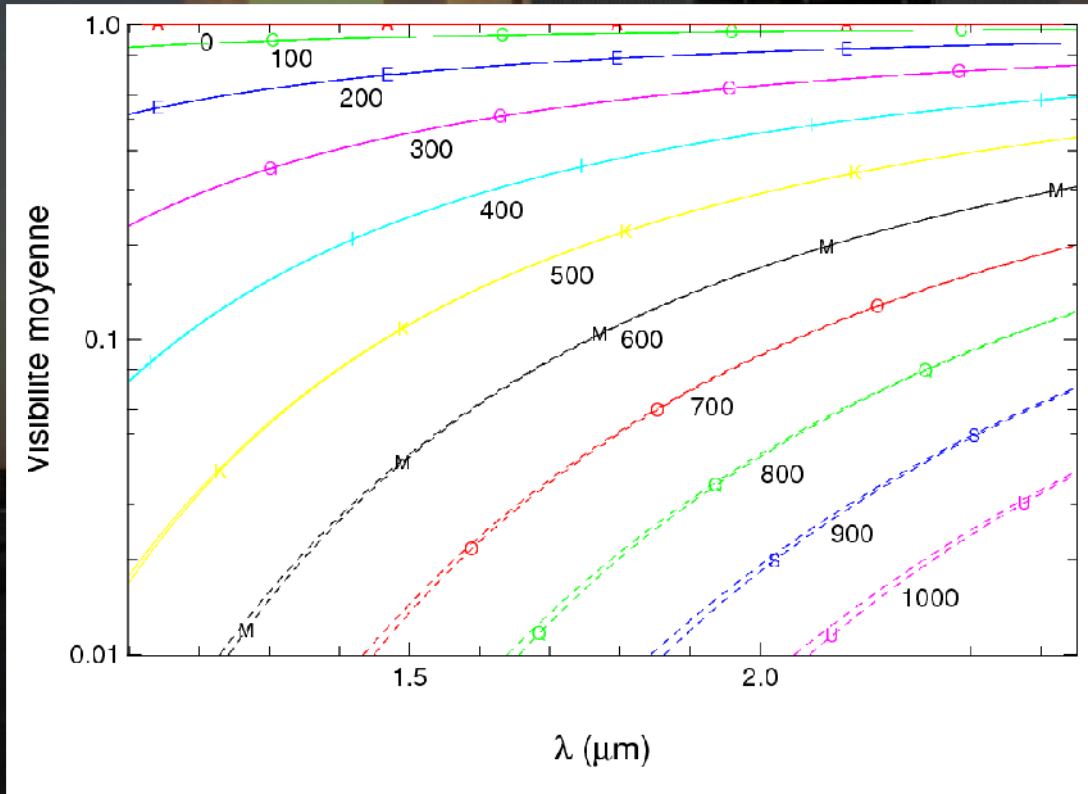
Vibrations des UT : l'effet sur le contraste

Calibrateur :

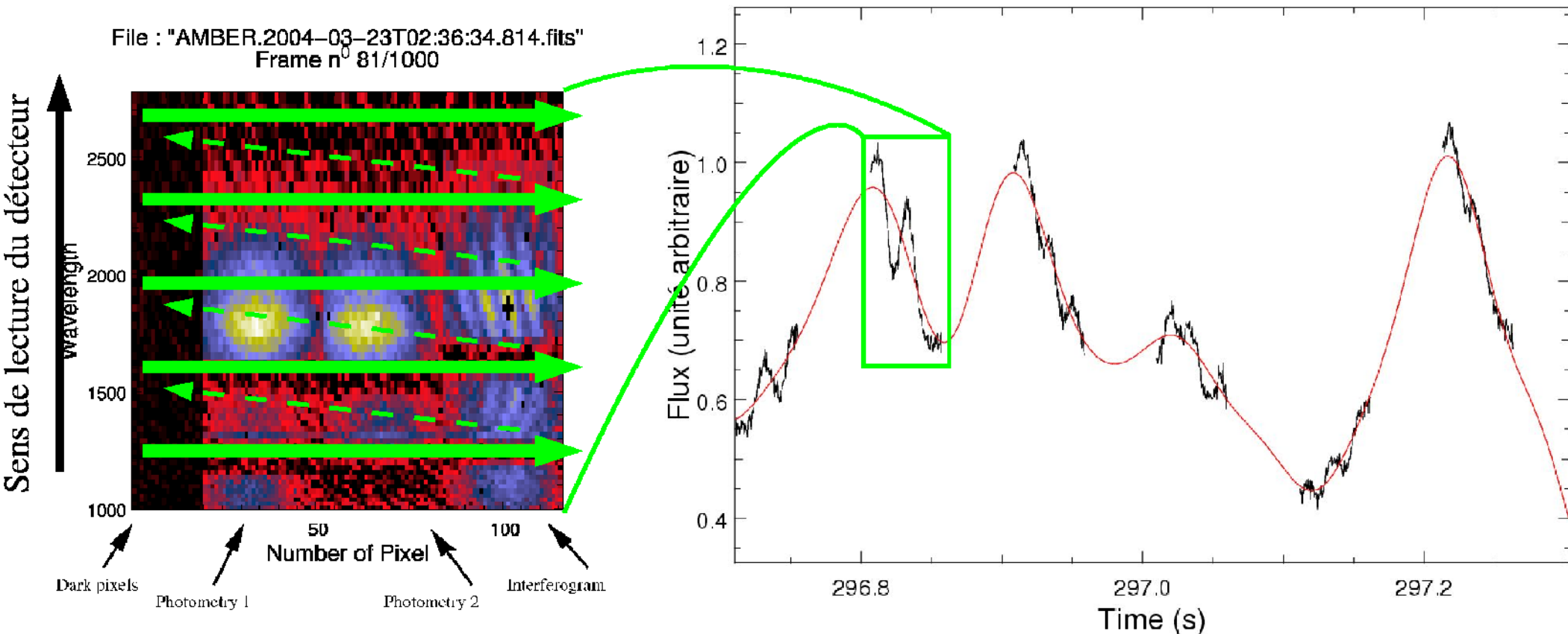
$$V_{mes}^{i,j}(\lambda, \sigma_G) = V_o^{i,j}(\lambda) e^{-2\pi^2 \frac{\sigma_G^2}{\lambda^2}}$$

$$\sigma_G = \left\langle \sqrt{-\log \frac{(V^2(\lambda)) \times \lambda^2}{4\pi^2}} \right\rangle_{\lambda}$$

Vibrations des UT : l'effet sur le contraste

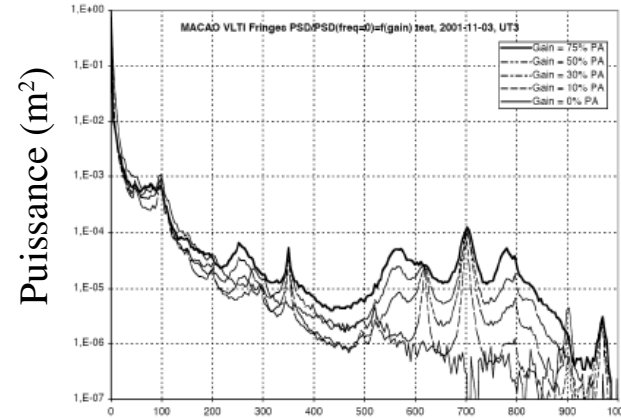
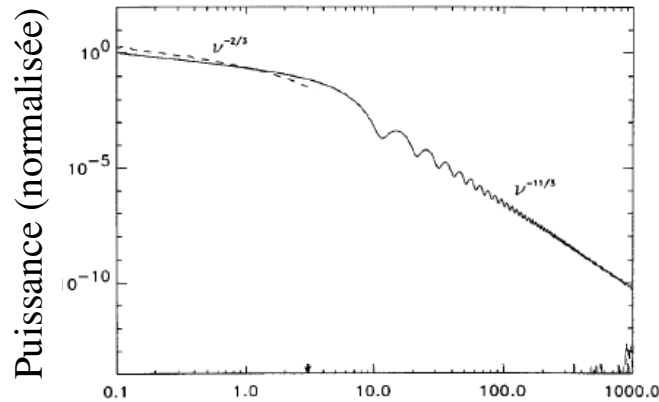


Vibrations des UT : le flux

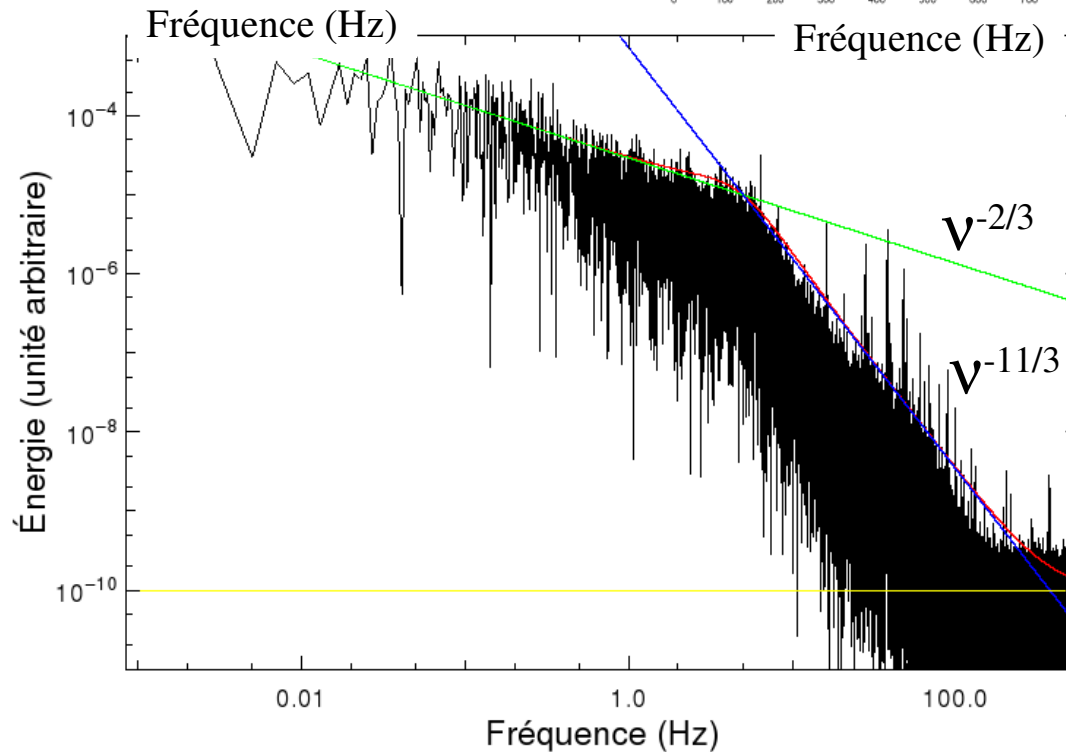


Vibrations des UT : le flux

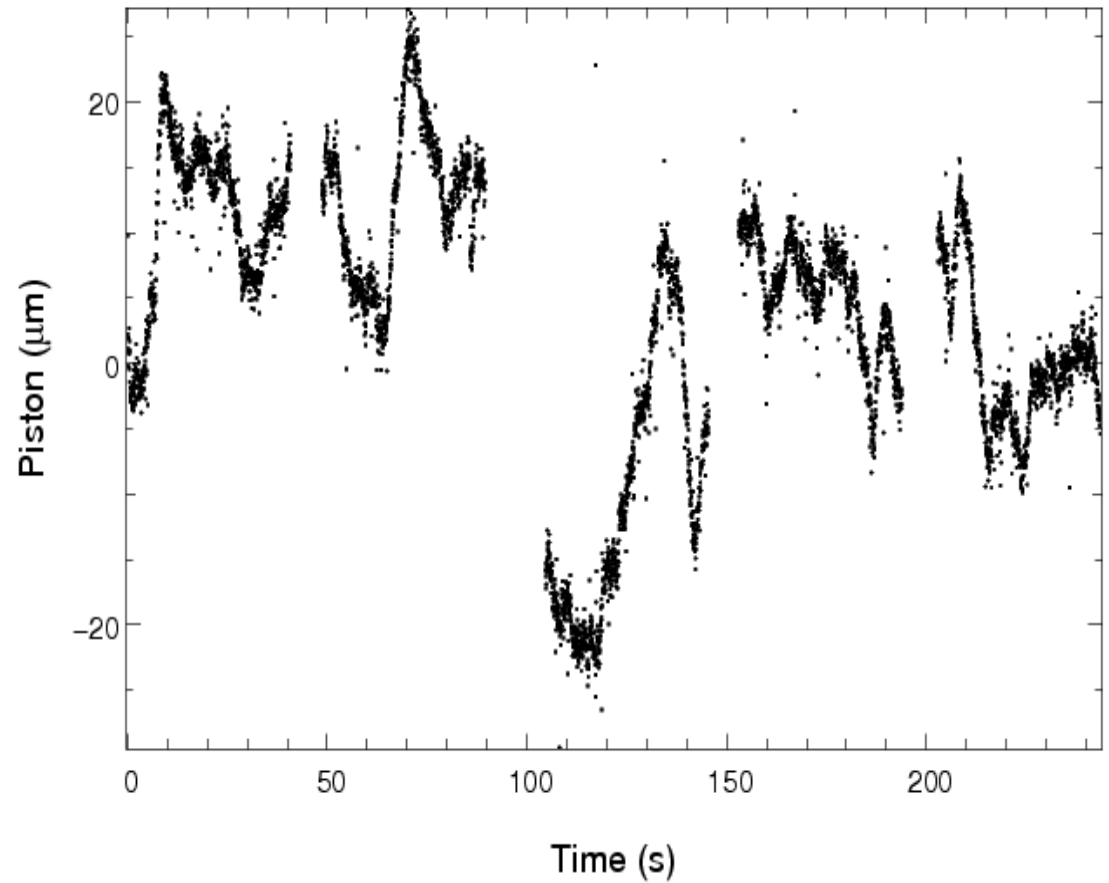
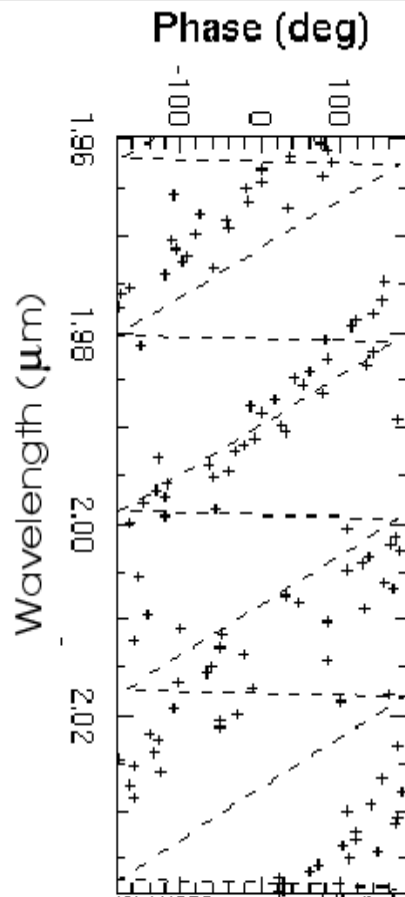
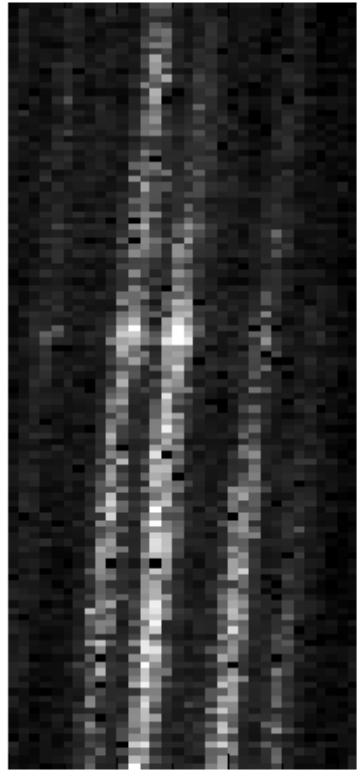
Conan & co.
1995



Kervella
2005

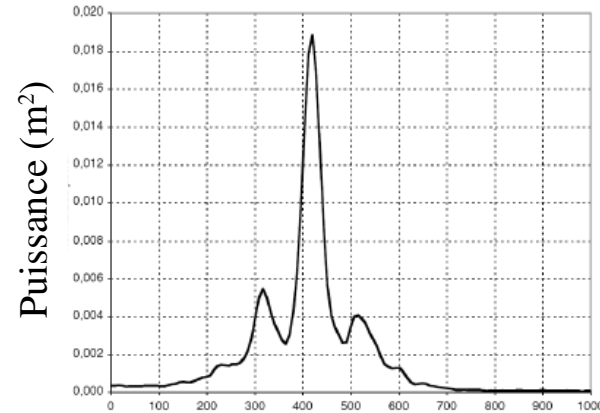
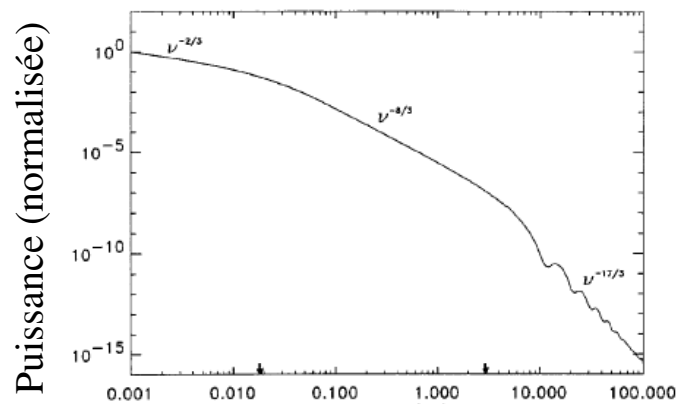


Vibrations des UT : la DDM

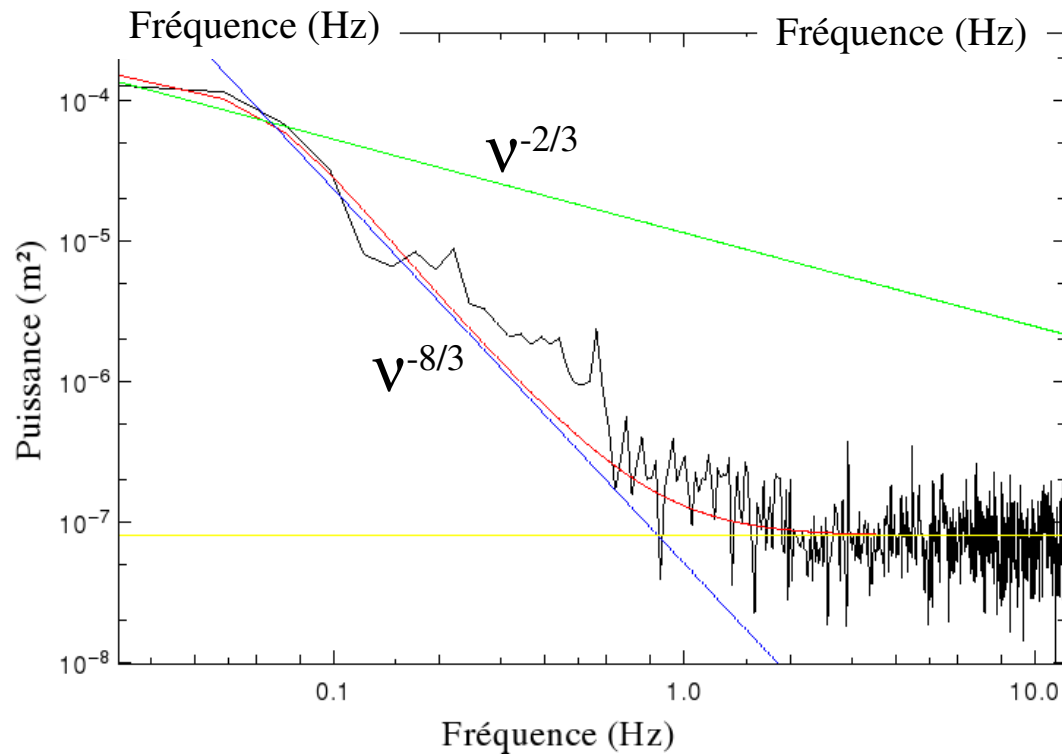


Vibrations des UT : la DDM

Conan & co.
1995



Kervella
2005



Sélection des images

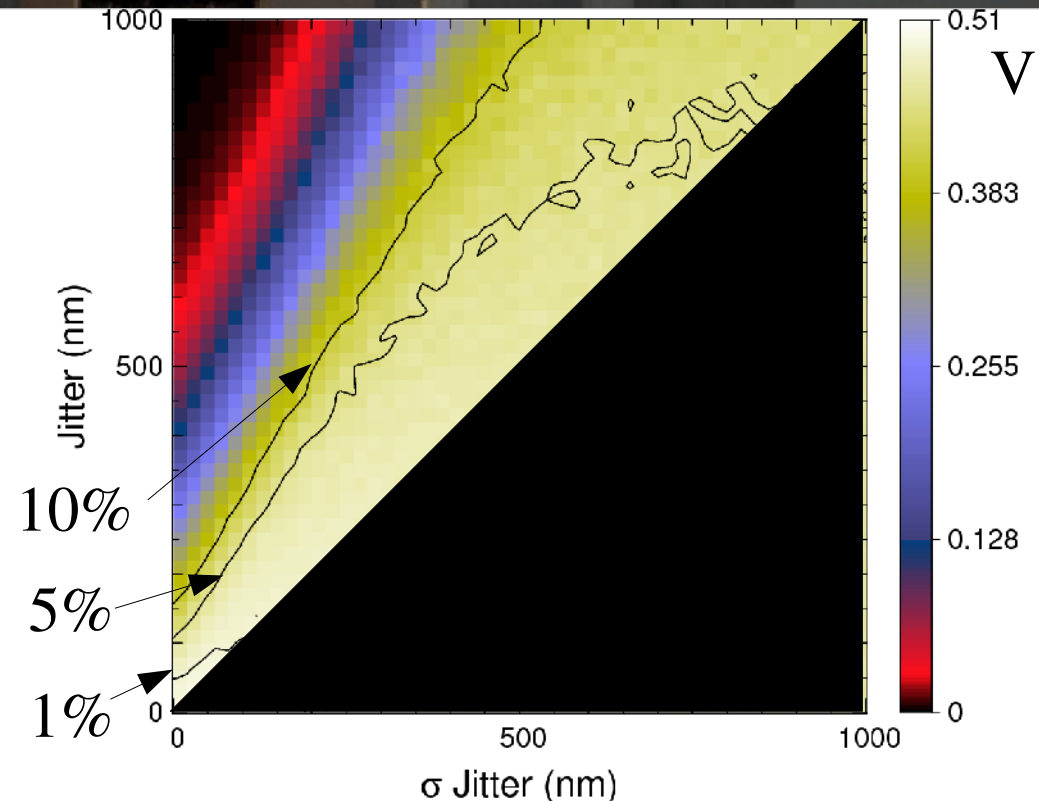
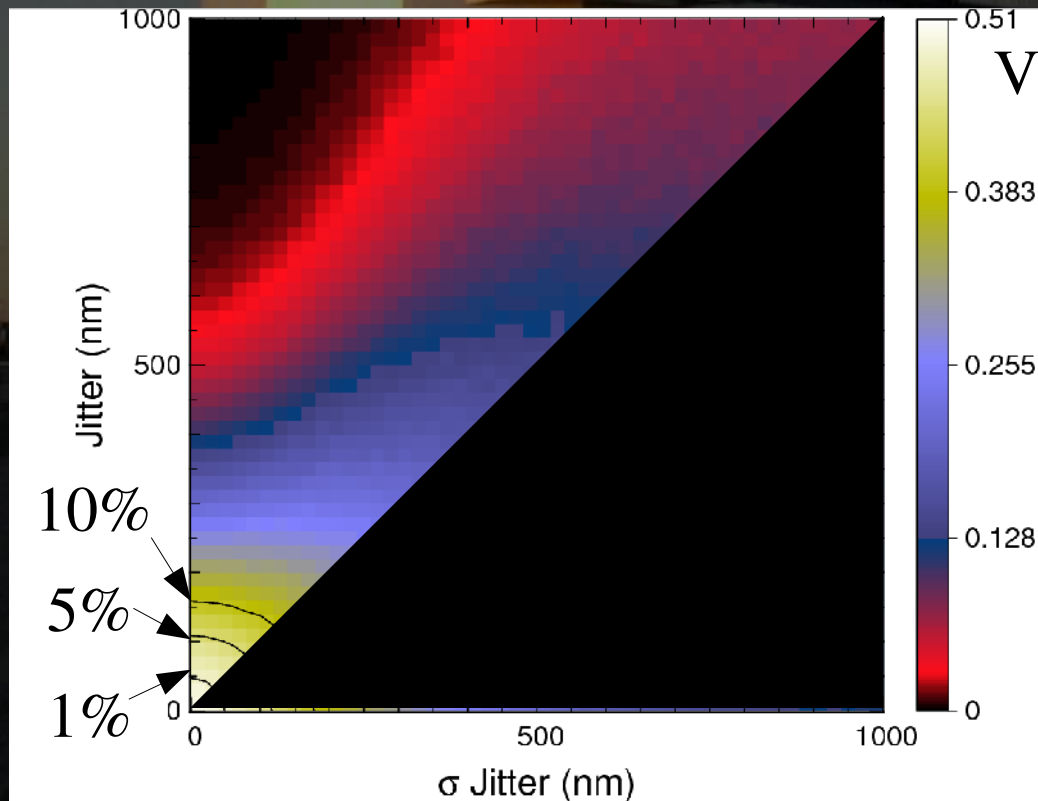
Simulation de mesure de visibilité

=> évaluation de l'erreur introduite par des variations des conditions

=> évaluation de l'effet de sélection sur les données

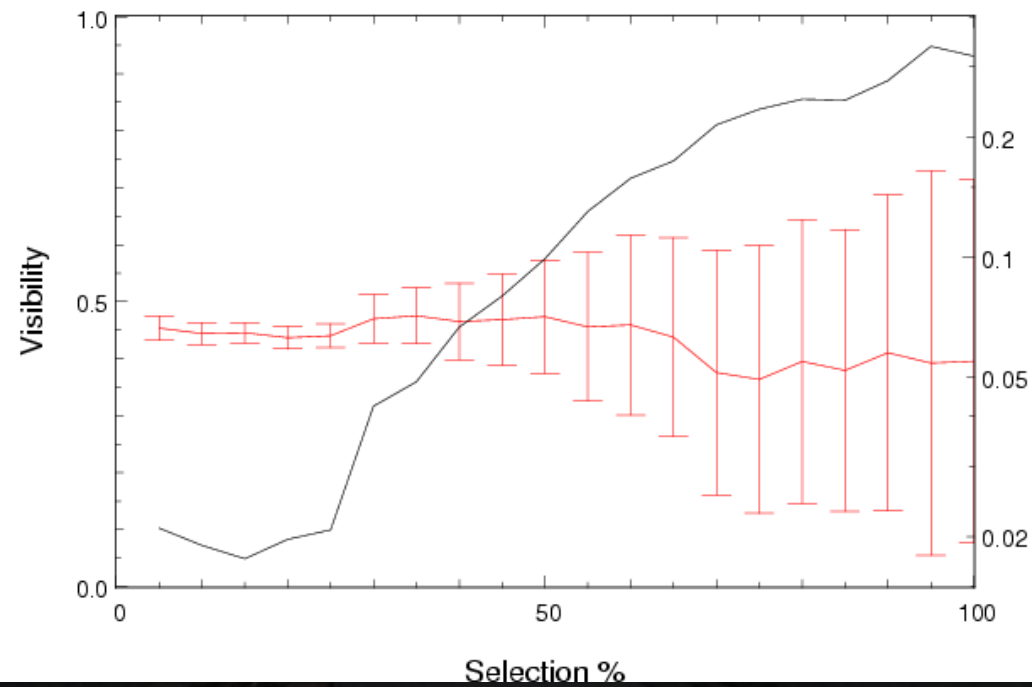
Pas de sélection

5% des meilleures images (RSB)

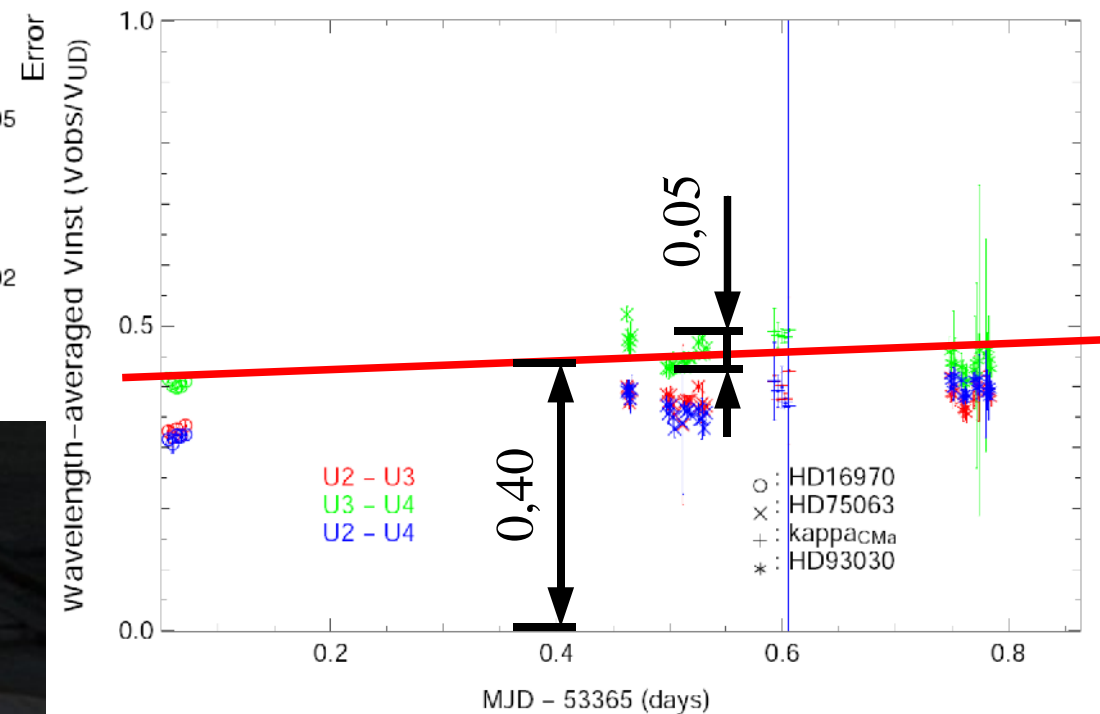


Sélection, biais et fonction de transfert

Selection Influence

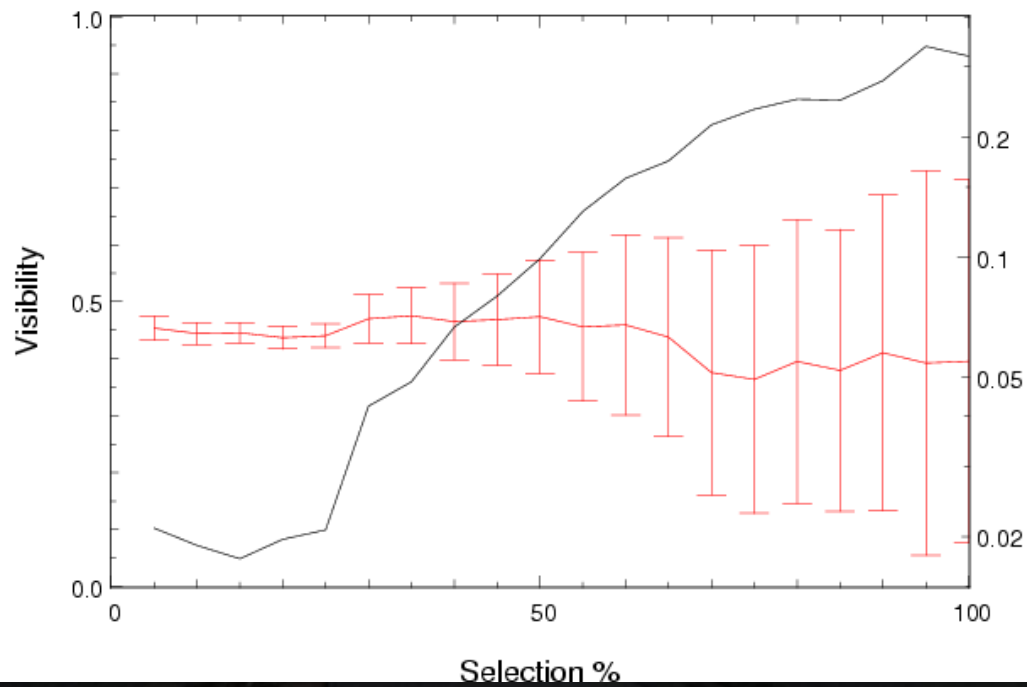


2004-12-25 : fluxthreshold-3

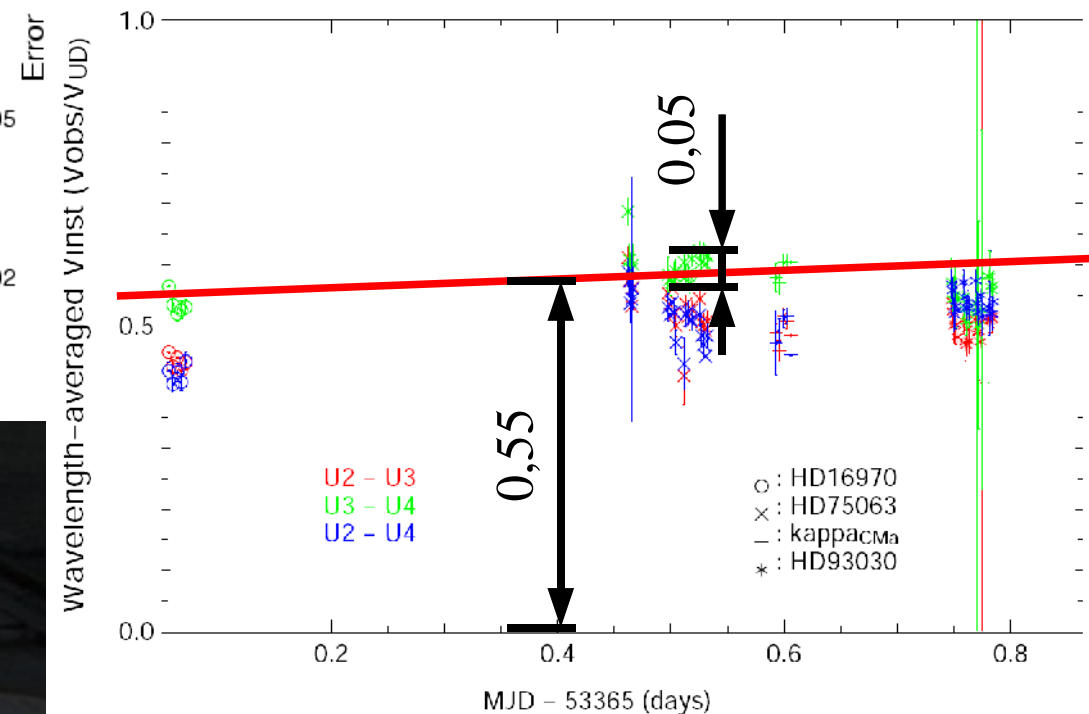


Sélection, biais et fonction de transfert

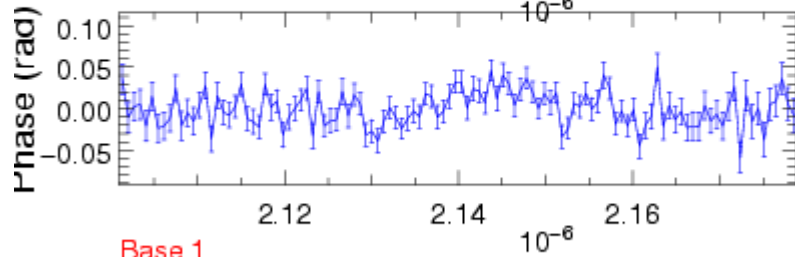
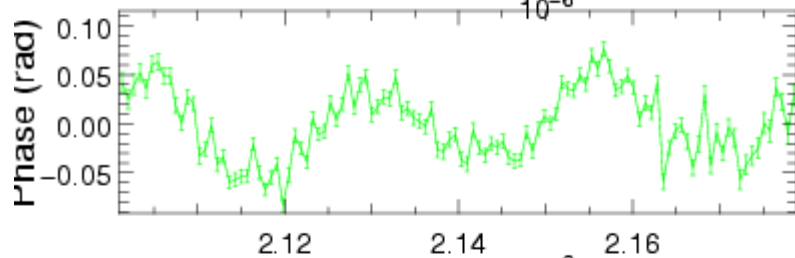
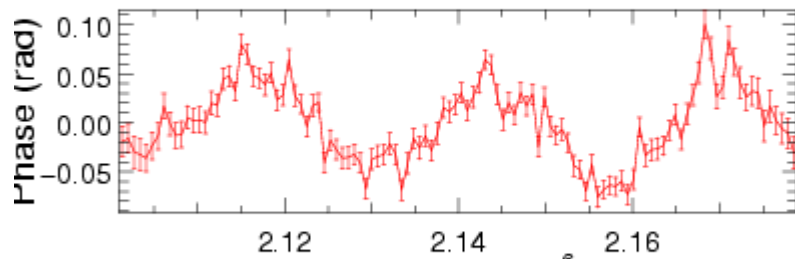
Selection Influence



2004-12-25 : snrpercent=20

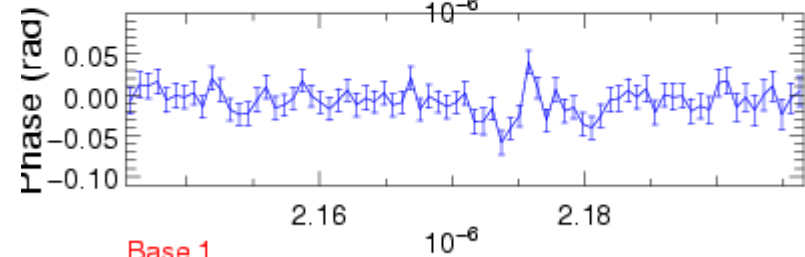
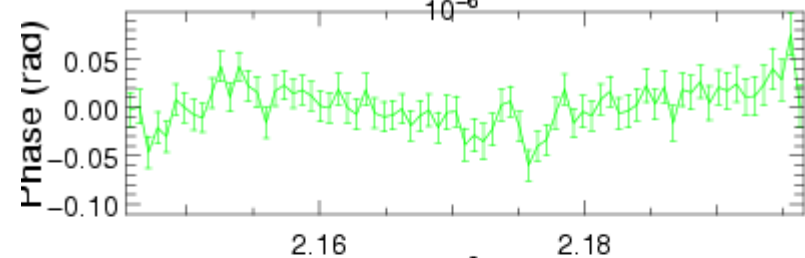
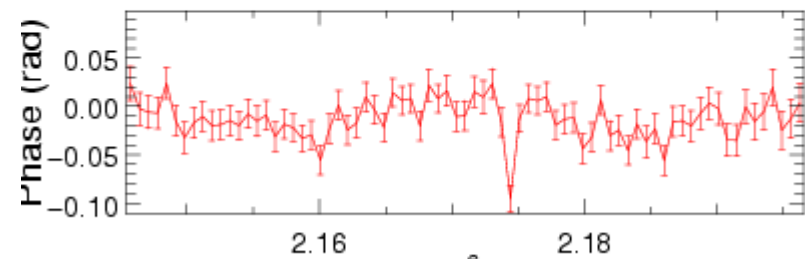


Biais sur la phase



Base 1
Base 2
Base 3

Wavelength (m)



Base 1
Base 2
Base 3

Wavelength (m)

Bilan actuel

- Moyenne résolution ($R=1500$)
- Étoile brillante ($K=3.5$)

Erreur sur les observables

	Courant	Spécifications
Visibilité	0.05	0.01
Visibilité différentielle	0.01	0.01
Clôture de phase (rad)	0.05	0.02
Phase différentielle (rad)	0.01	0.01

Bilan actuel

- **Basse résolution (R=35)**
- **Étoile brillante (K=5)**

Erreur sur les observables

	Courant	Spécifications
Visibilité	?	0.01
Visibilité différentielle	?	0.01
Clôture de phase (rad)	0.01	0.002
Phase différentielle (rad)	0.001*	0.001

* **dispersion chromatique : amplitude ~ de 0.1 rad à 1 rad**

Plan

- **Contexte**

- Pourquoi la HRA ?
- L'interférométrie stellaire optique et AMBER

- **Traitement du signal et instrumentation**

- Les observables d'AMBER
- L'apport potentiel de la phase différentielle
- Les vraies données

- **Les étoiles chaudes**

- η Car
- α Arae
- γ^2 Velorum

Étude d'étoiles chaudes



Étude d'étoiles chaudes

- MWC 297 (Malbet et al. A&A, accepté)
- η Carinae (Weigelt et al. A&A, accepté)
- α Arae (Meilland et al. A&A, accepté)
- κ Canis Majoris (Meilland, Millour et al. A&A, accepté)
- γ^2 Velorum (Millour et al. A&A, accepté)
- RS Ophucius (Chesneau et al. A&A, accepté)

Plan

- **Contexte**

- Pourquoi la HRA ?
- L'interférométrie stellaire optique et AMBER

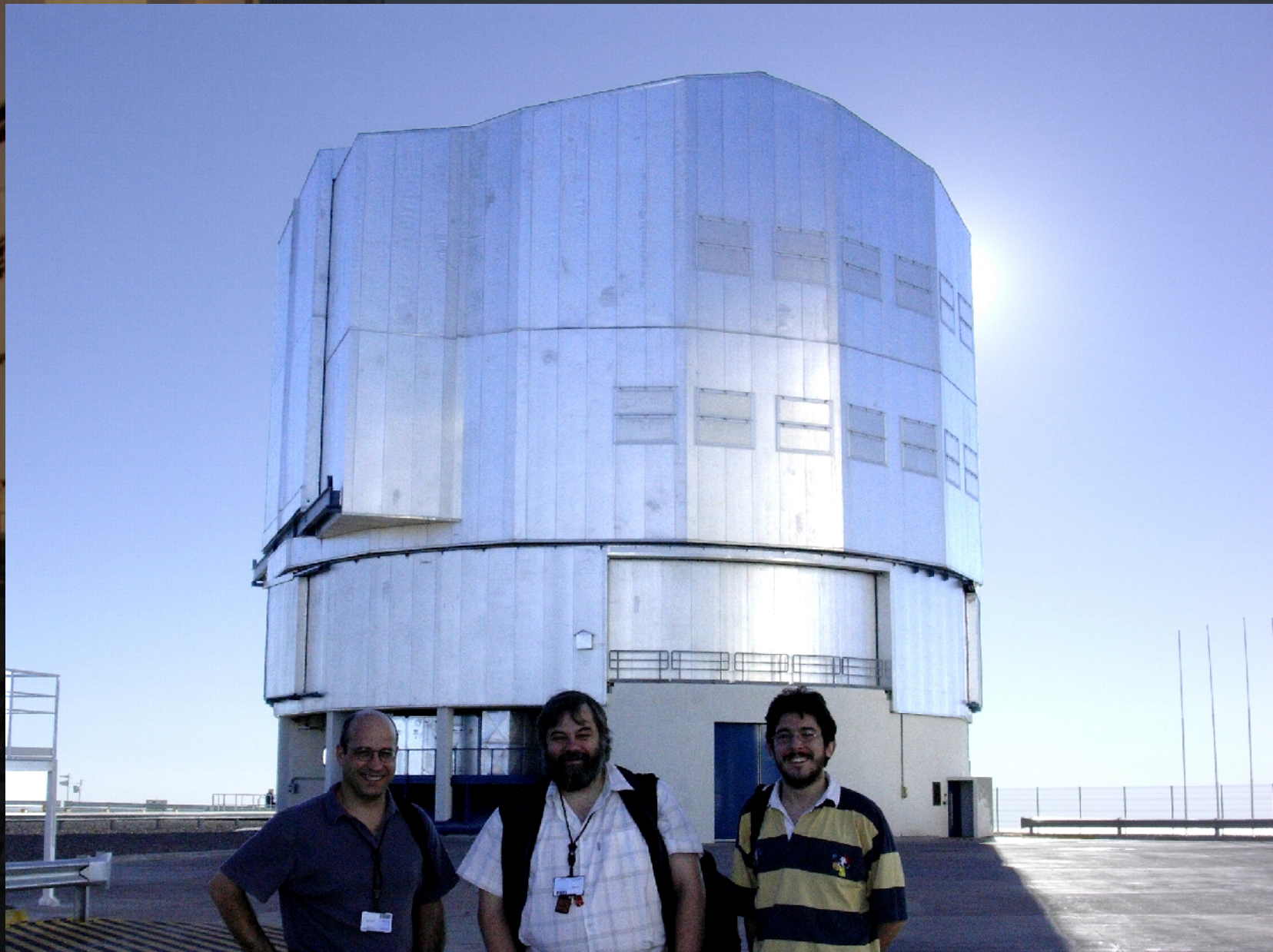
- **Traitement du signal et instrumentation**

- Les observables d'AMBER
- L'apport potentiel de la phase différentielle
- Les vraies données

- **Les étoiles chaudes**

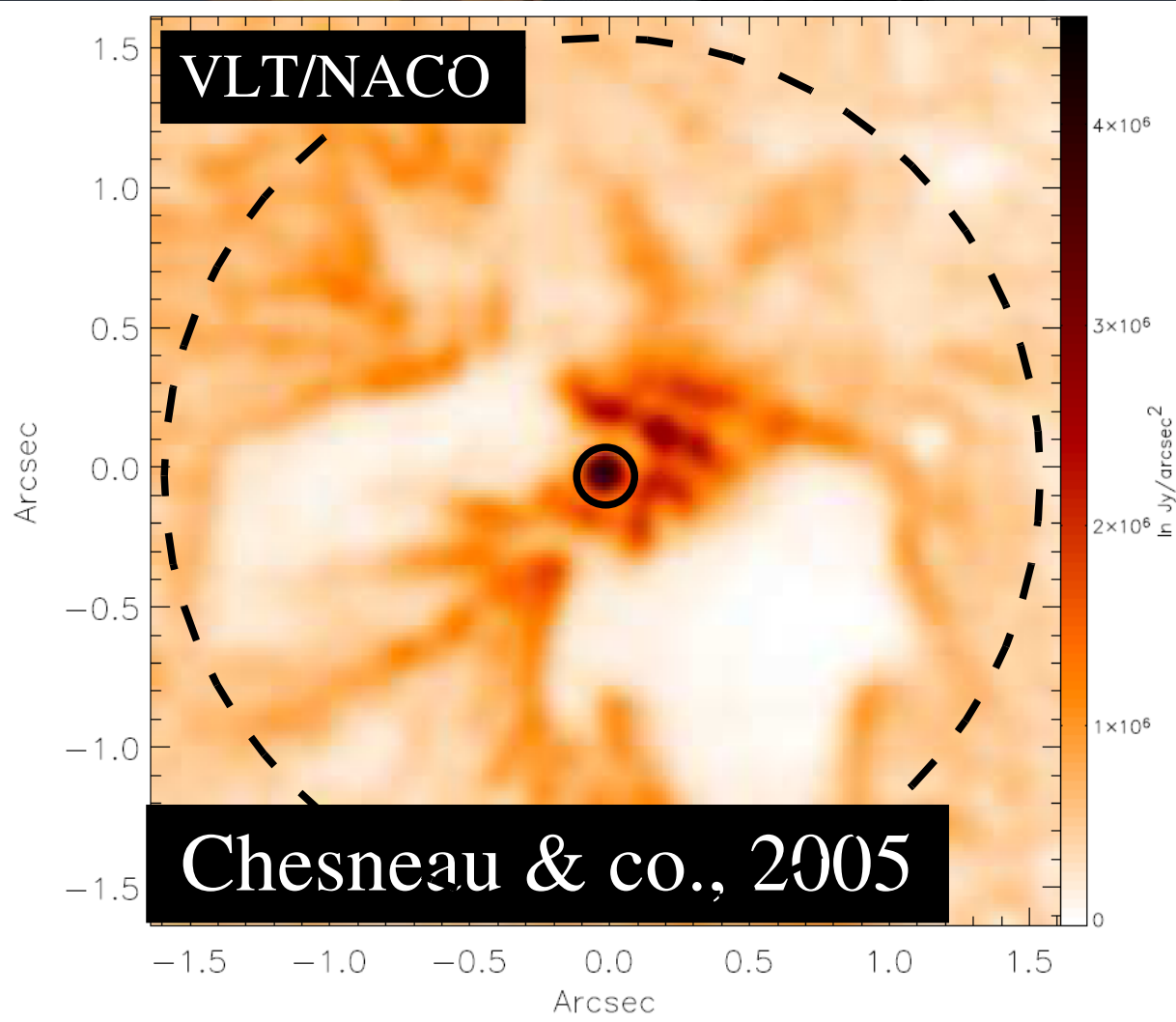
- η Car
- α Arae
- γ^2 Velorum

η Car



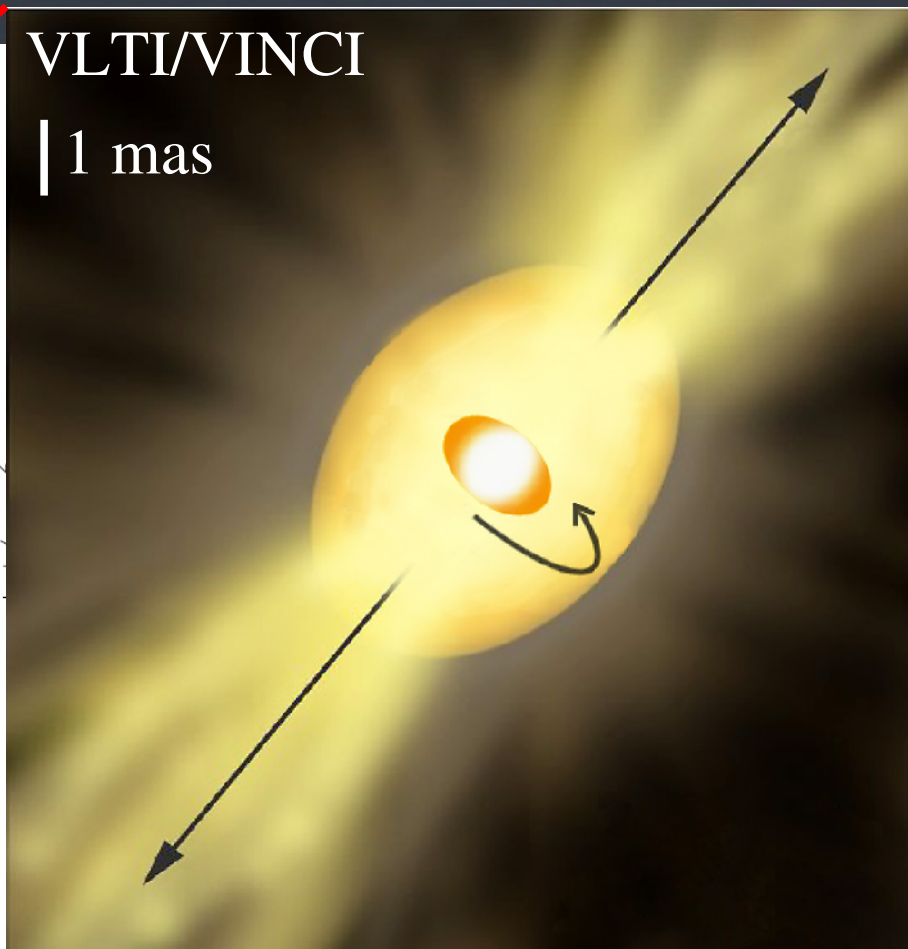
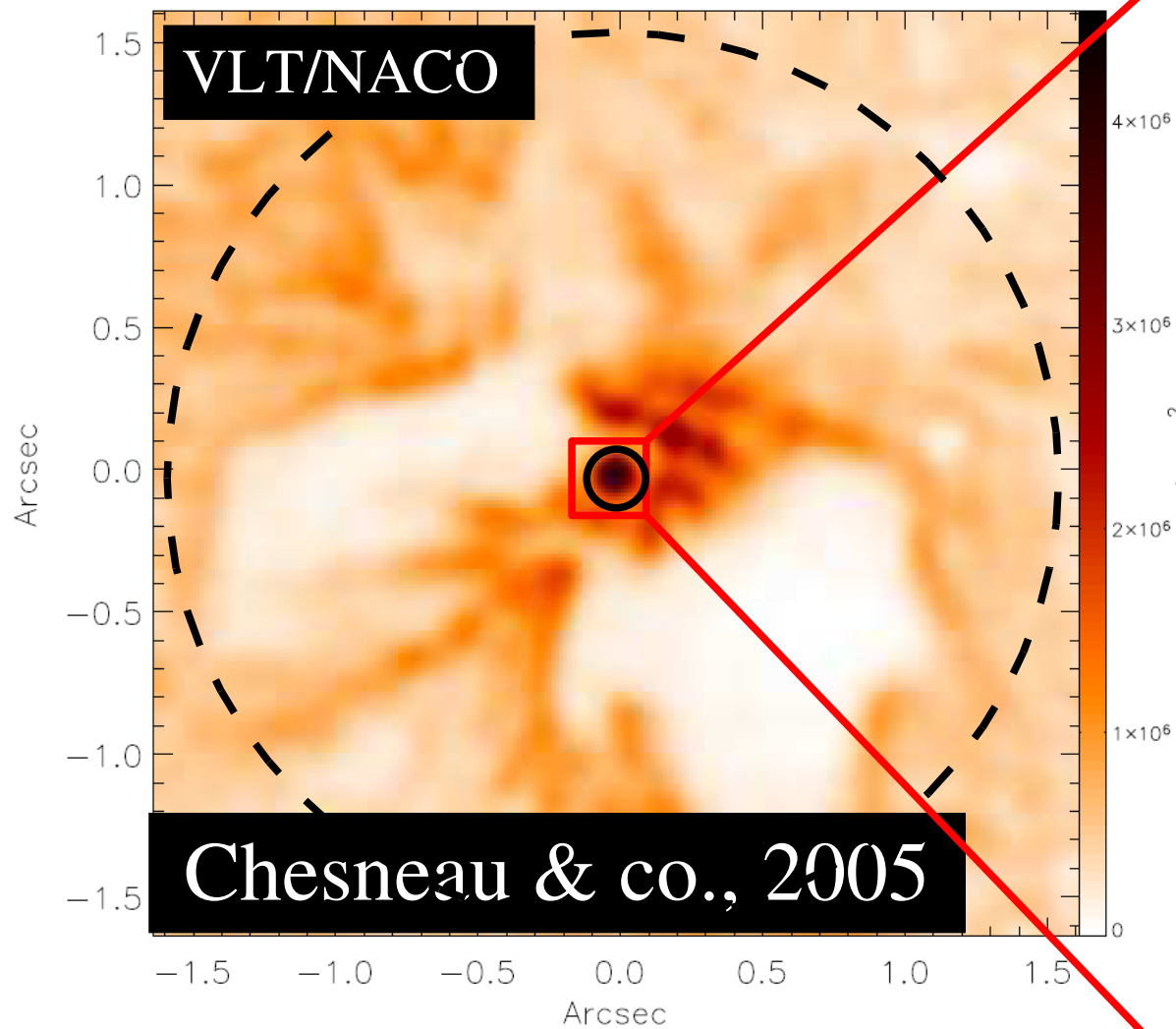
15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

η Car



15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

η Car



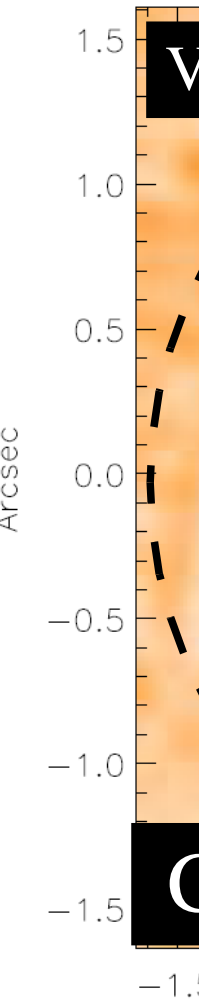
Van Boekel & co. 1998

ESO PR Photo 32b/03 (26 November 2003)

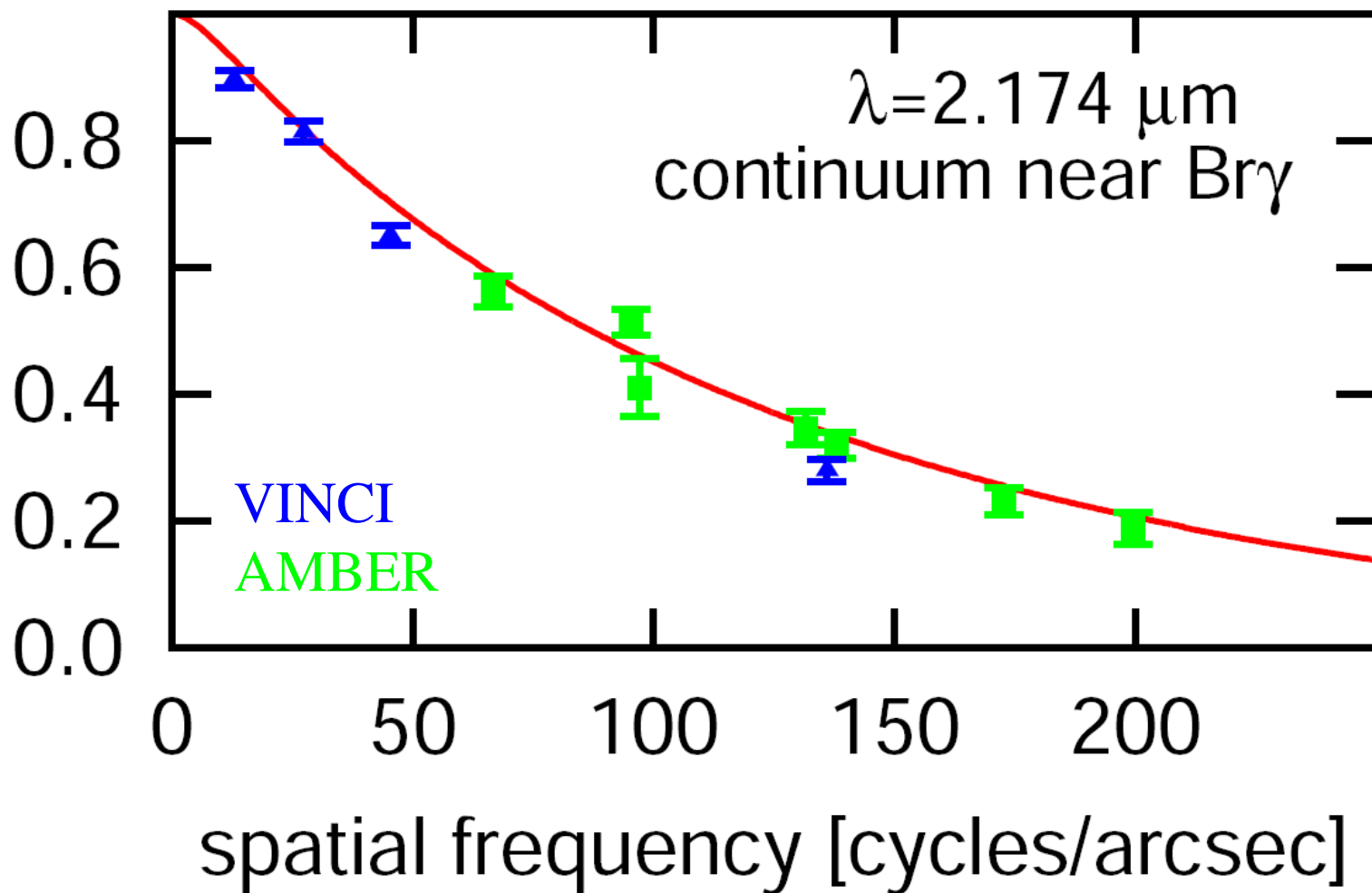
© European Southern Observatory

η Car

VLT/VINCI



visibility



spatial frequency [cycles/arcsec]

Arcsec

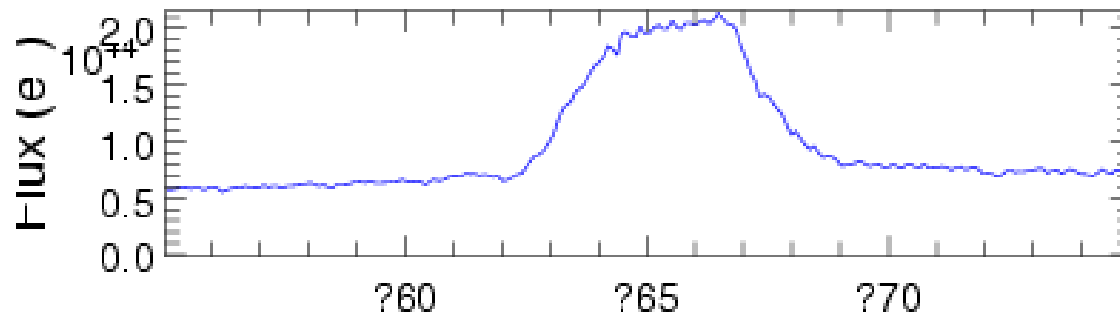
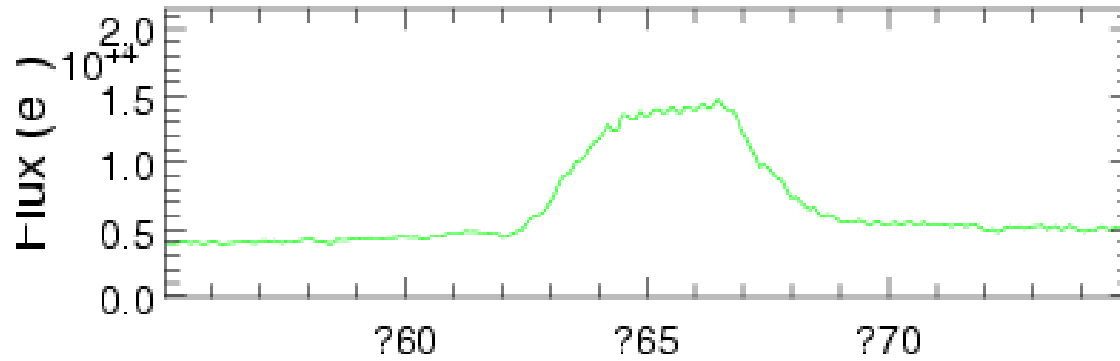
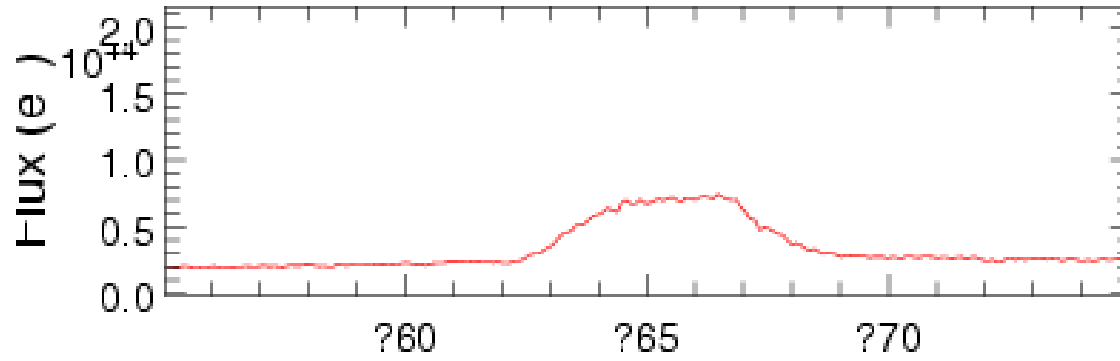
van Boekel et al. 1998

ESO PR Photo 32b/03 (26 November 2003)

© European Southern Observatory

η Car

Spectrum of the object



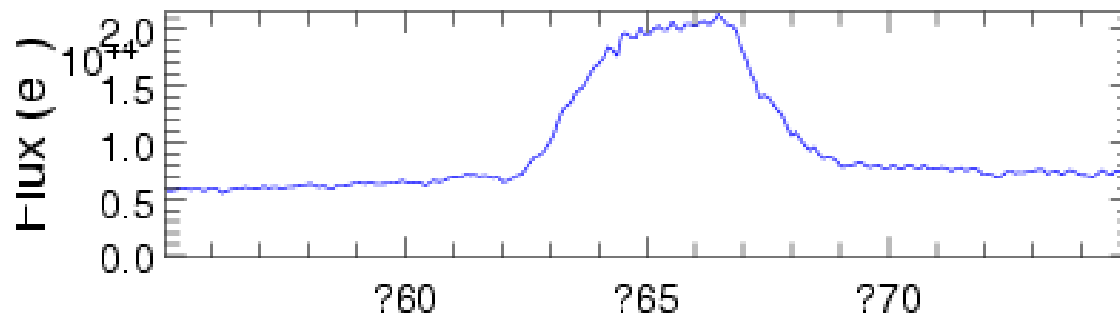
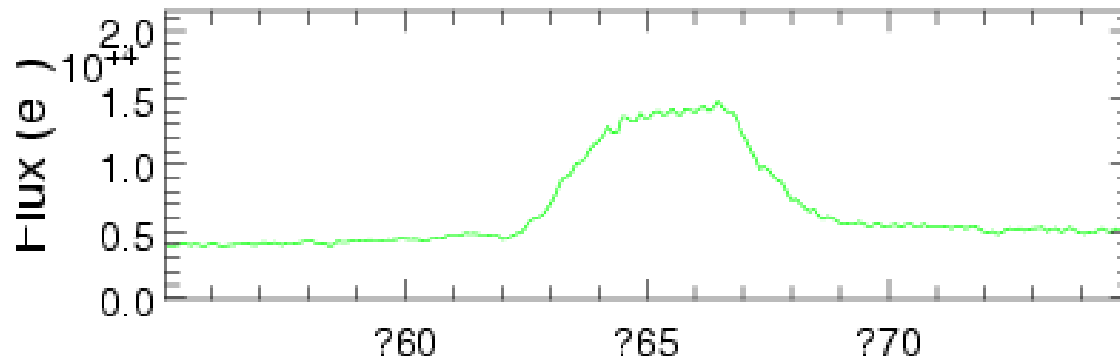
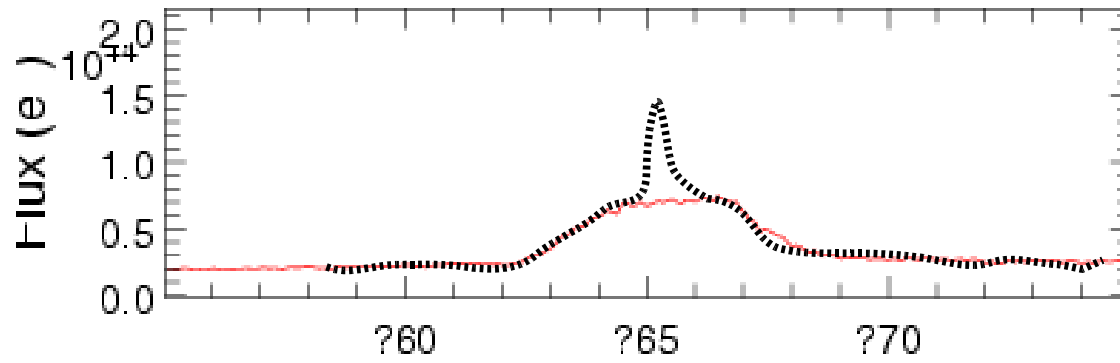
Base 1
Base 2
Base 3

$\times 10^{-6}$

Wavelength (m)

η Car

Spectrum of the object



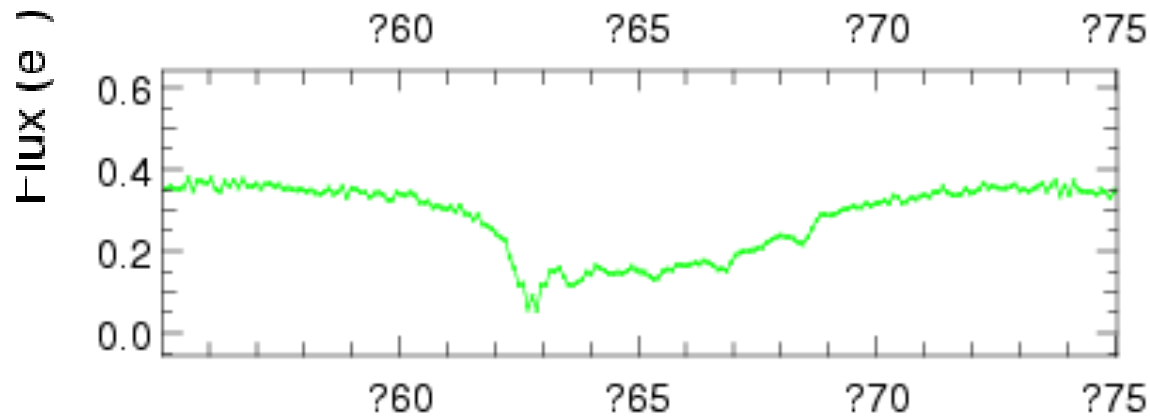
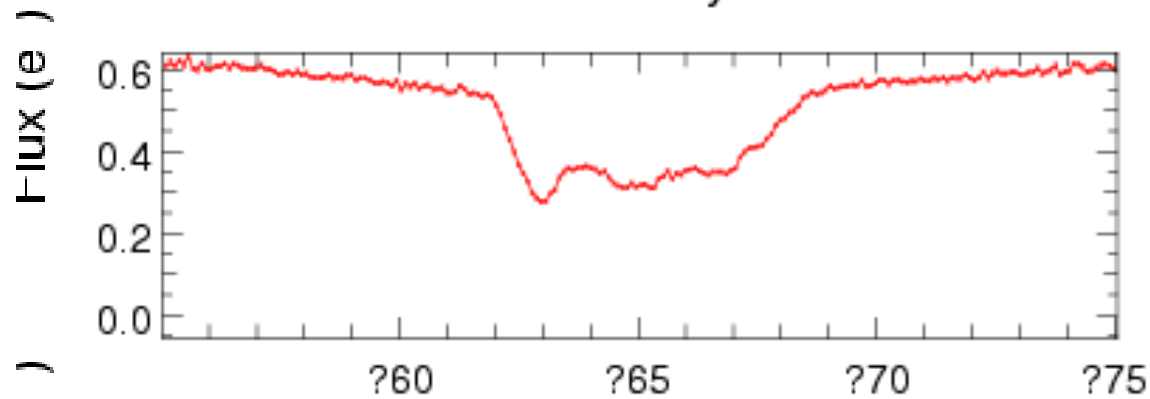
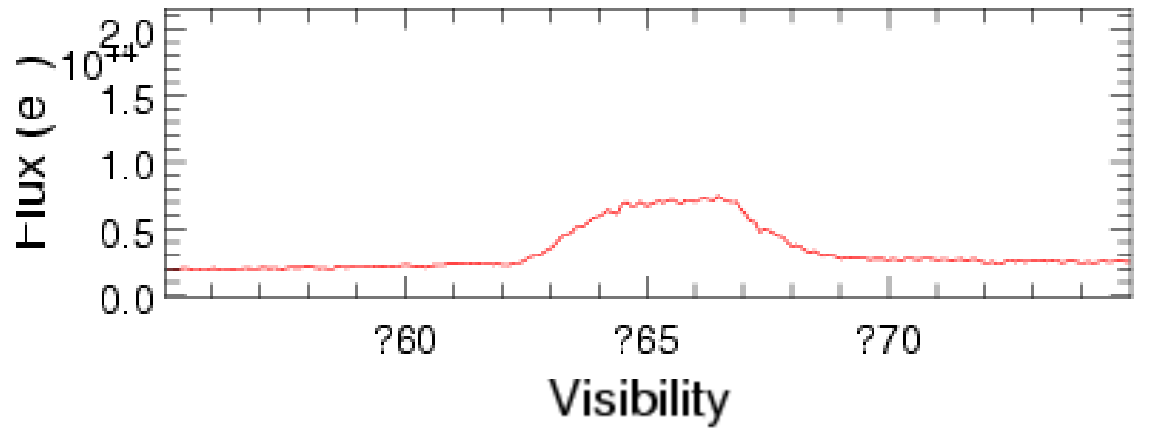
Base 1
Base 2
Base 3

$x0 = 2.177E-6$

Wavelength (m)

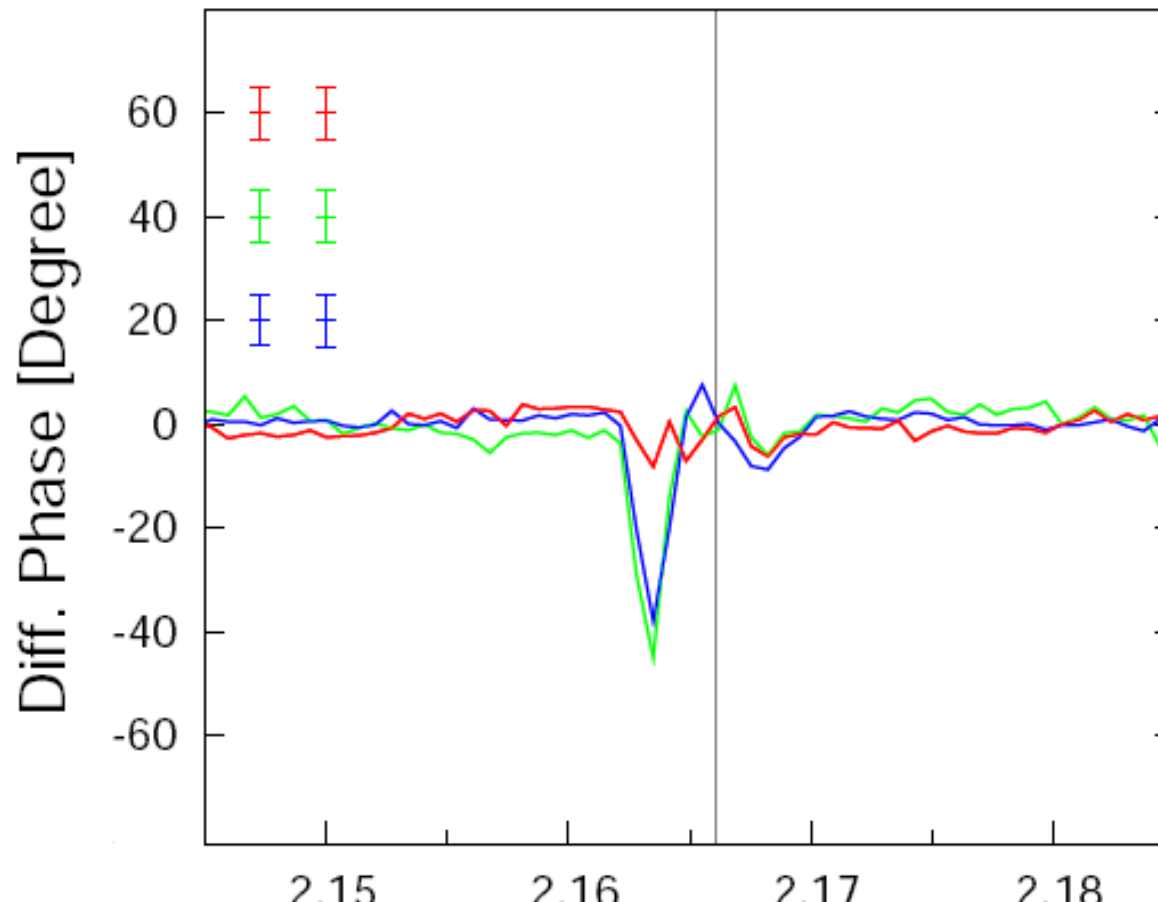
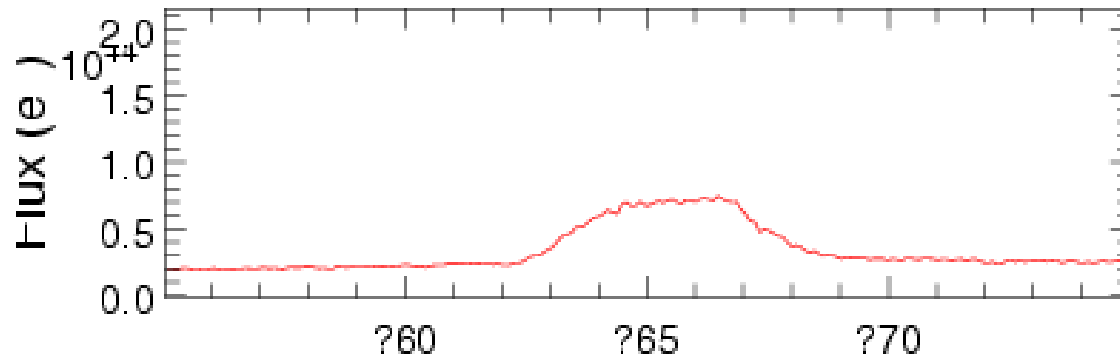
η Car

Spectrum of the object



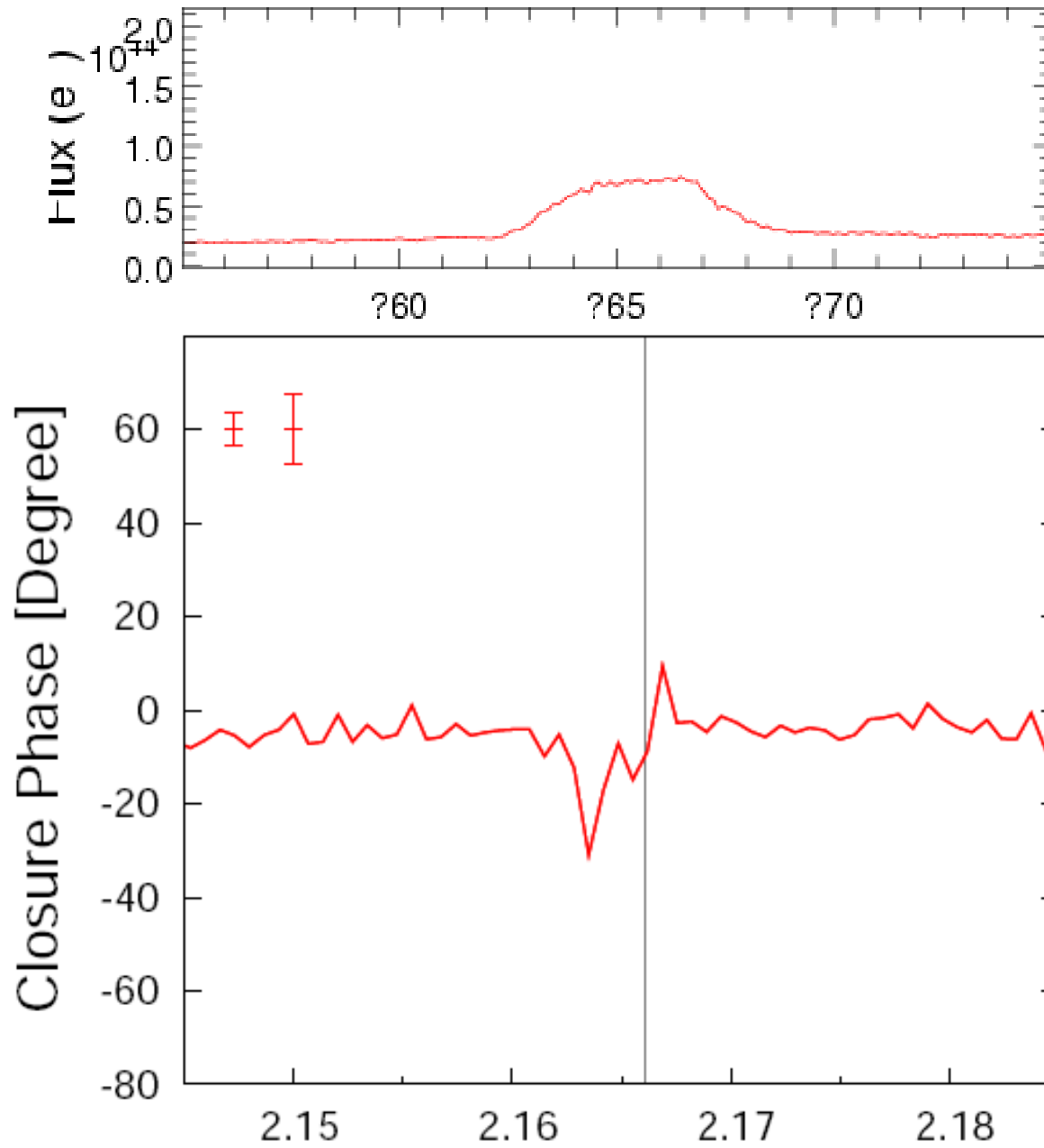
η Car

Spectrum of the object



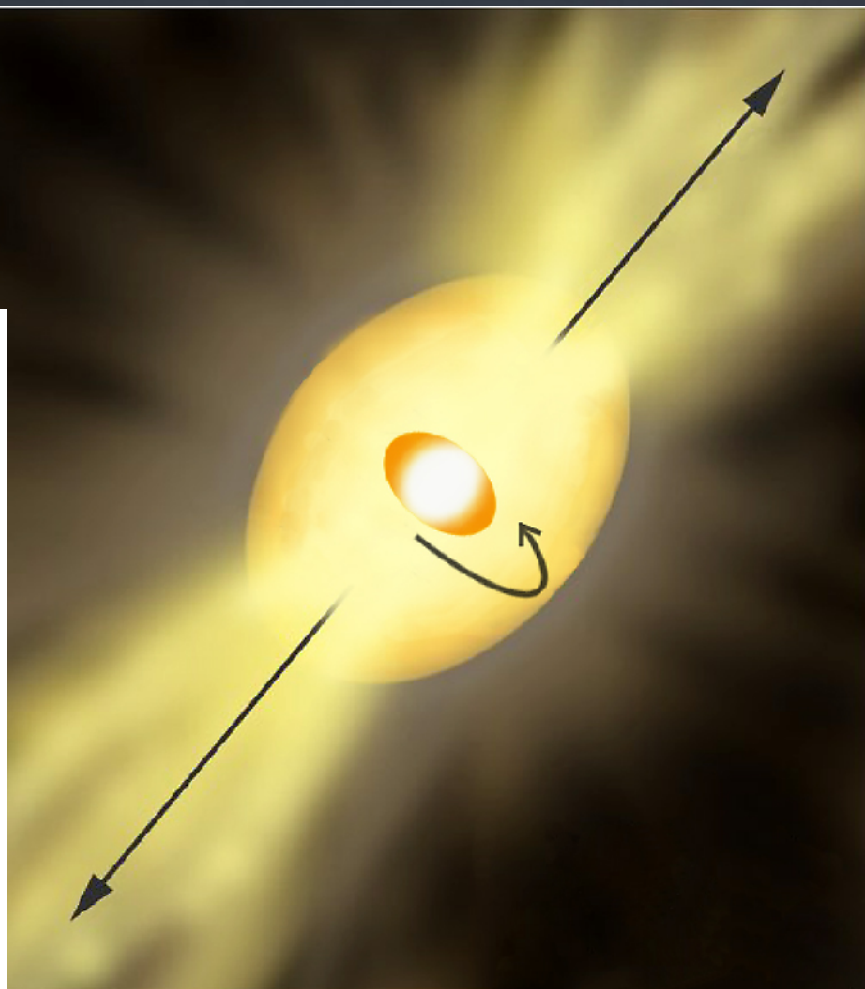
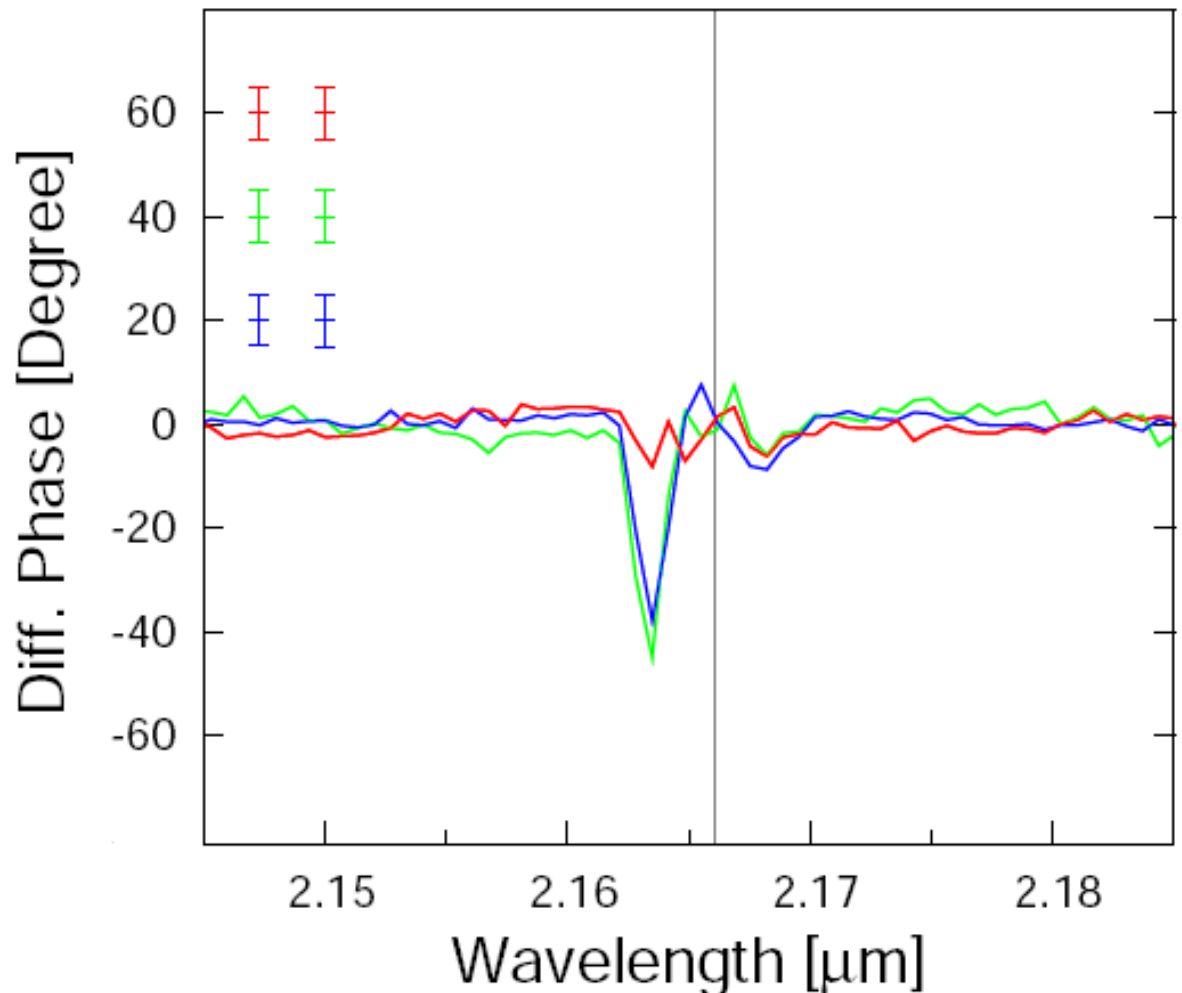
η Car

Spectrum of the object



η Car

Weigelt & co.,
A&A 2007
(sous presse)



The Highly Unstable Star Eta Carinae
(Artist's Impression)

foto 32b/03 (26 November 2003)

© European Southern Observatory

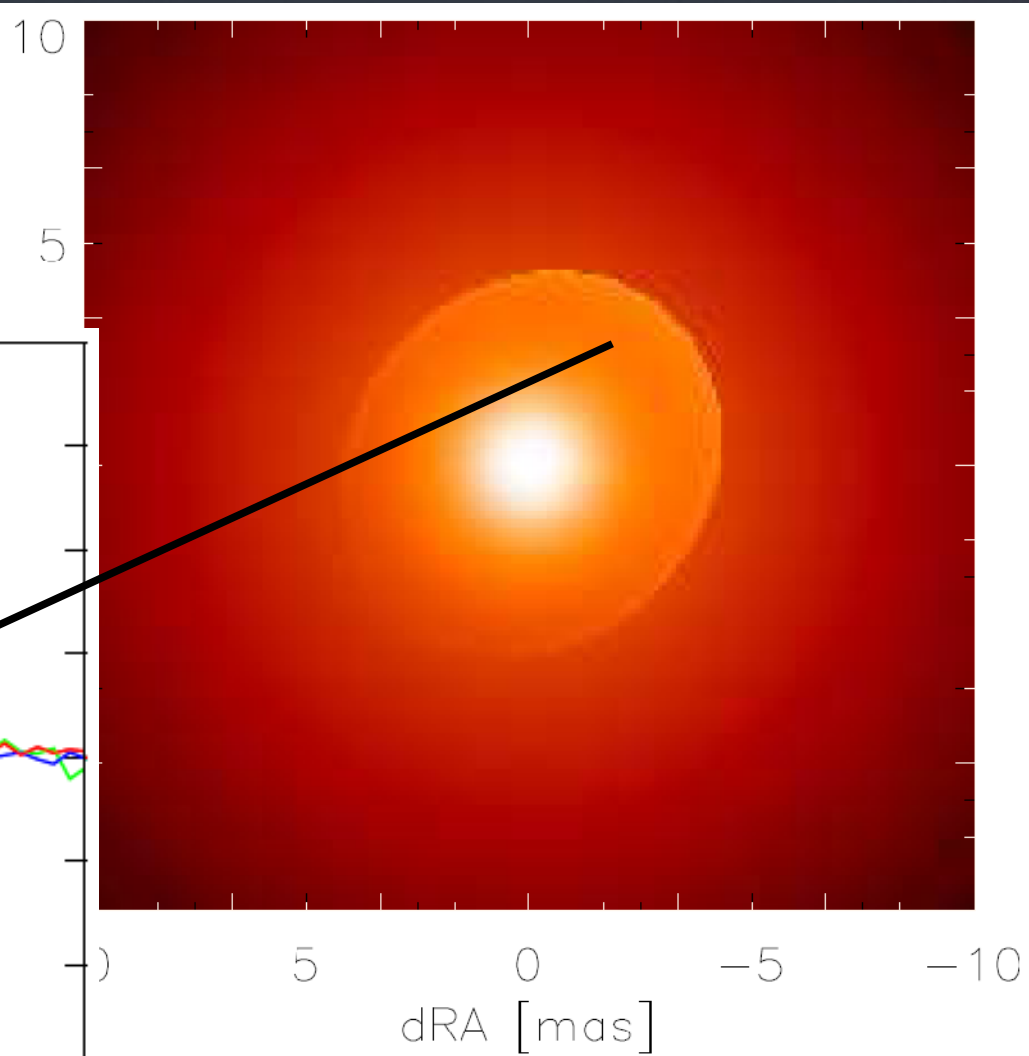
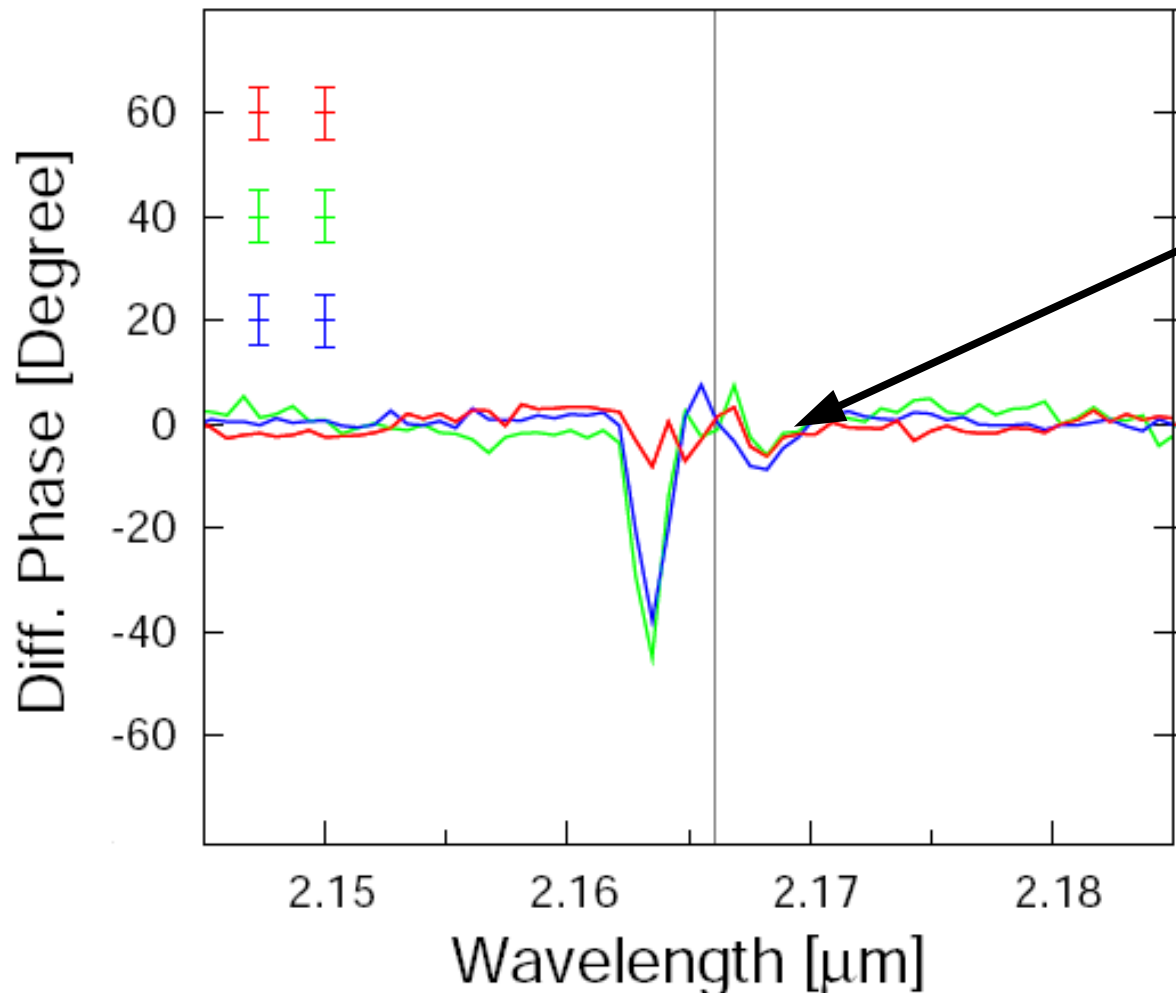


de Florentin Millour



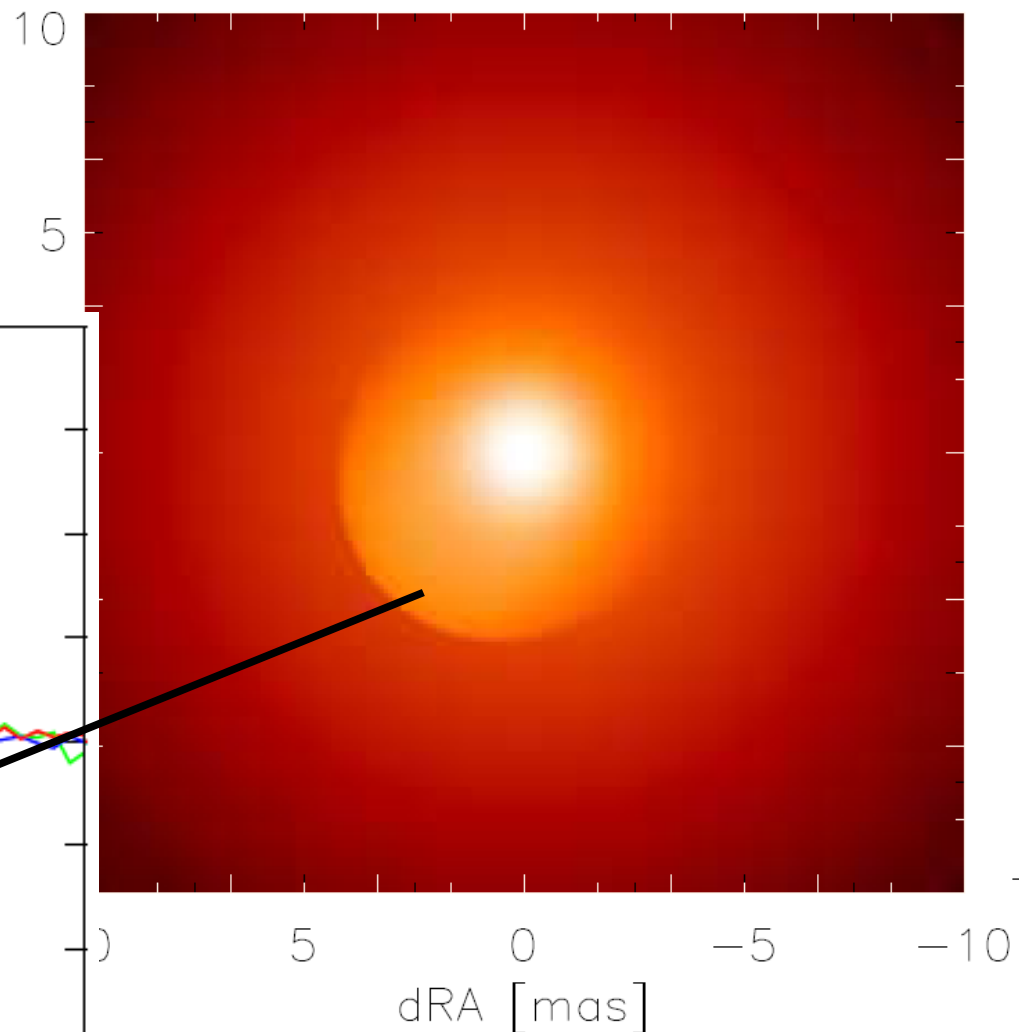
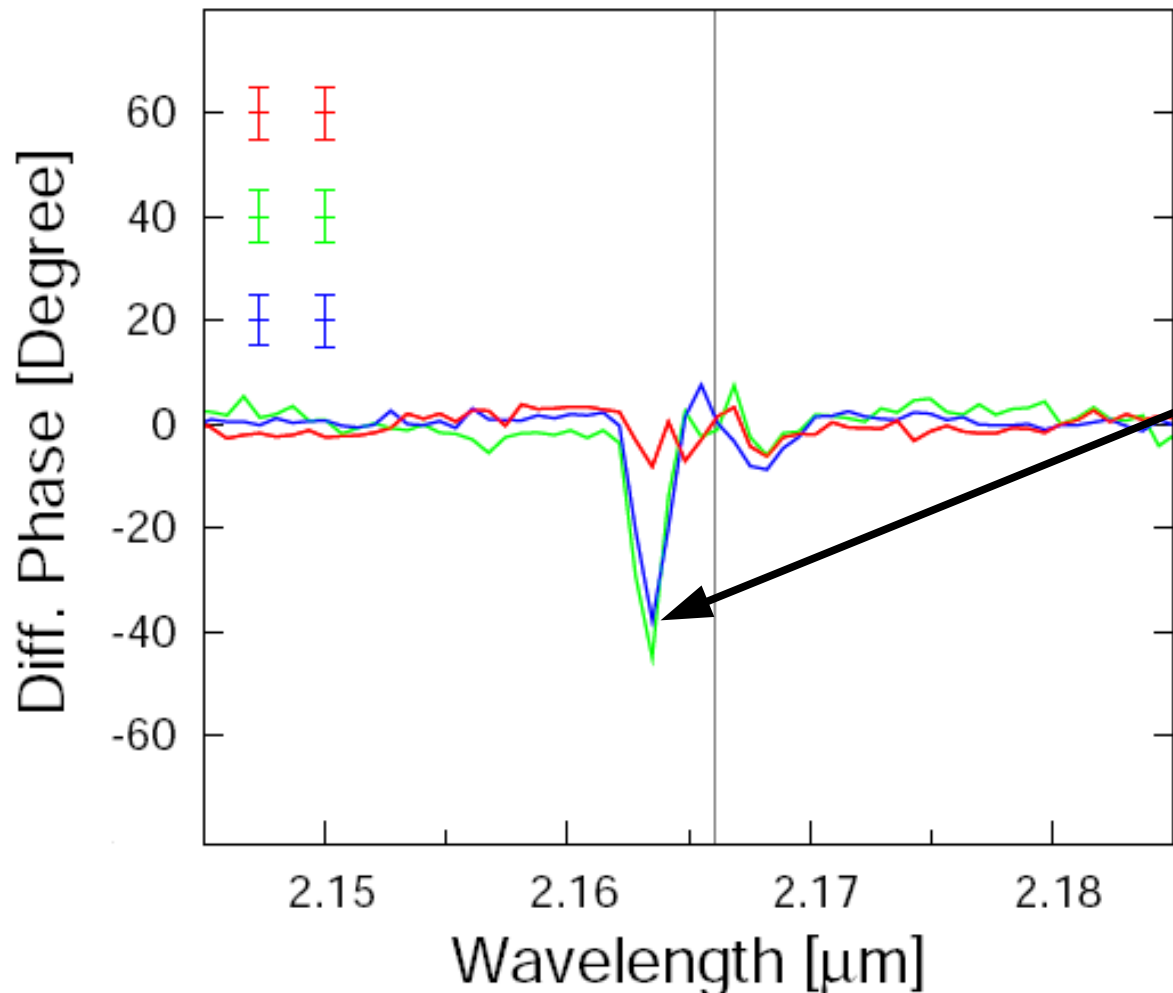
η Car

Weigelt & co.,
A&A 2007
(sous presse)



η Car

Weigelt & co.,
A&A 2007
(sous presse)



de Florentin Millour



Plan

- **Contexte**

- Pourquoi la HRA ?
- L'interférométrie stellaire optique et AMBER

- **Traitement du signal et instrumentation**

- Les observables d'AMBER
- L'apport potentiel de la phase différentielle
- Les vraies données

- **Les étoiles chaudes**

- η Car

- α Arae

- γ^2 Velorum

α Arae

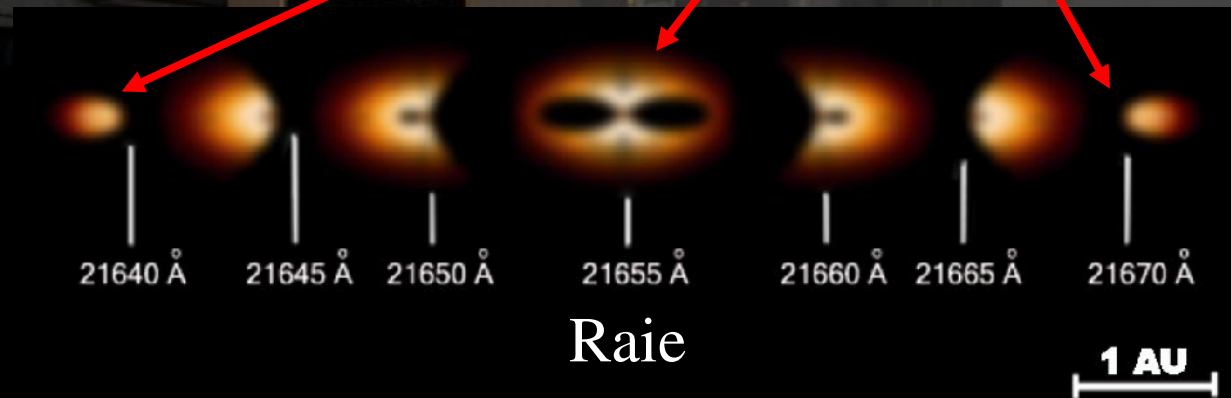
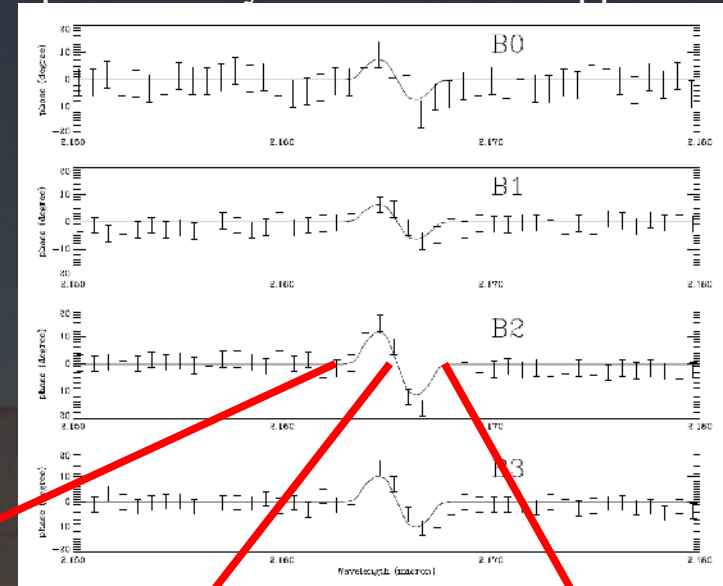
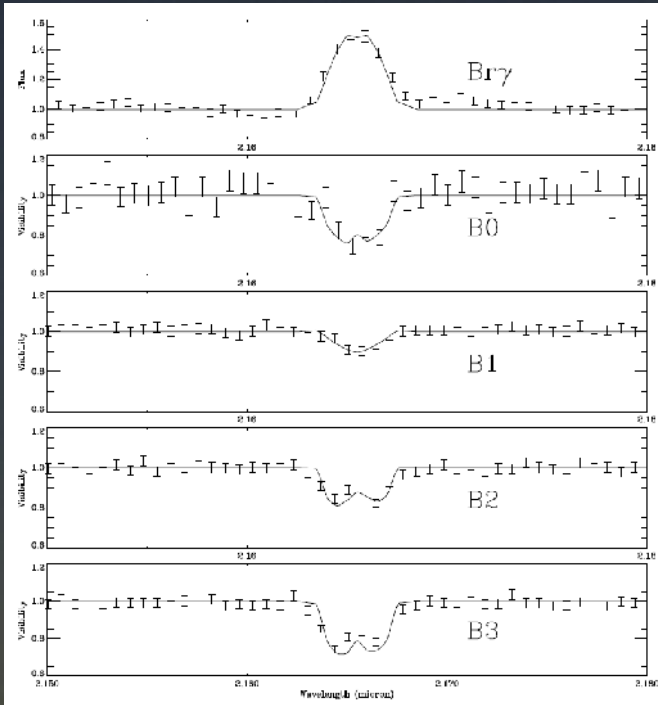


15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

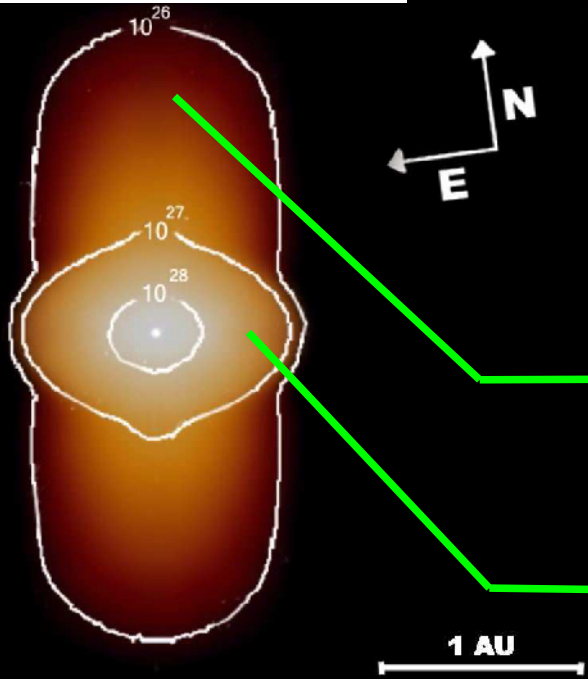
Étoiles Be

- Étoiles massives B
- $L \sim 10^3 - 10^4 L_{\text{soleil}}$
- Raies de Balmer au moins une fois en émission
- Excès IR
- Enveloppe circumstellaire
- Perte de masse $\sim 10^{-6} M_{\text{soleil}} / \text{an}$

α Arae



Continu

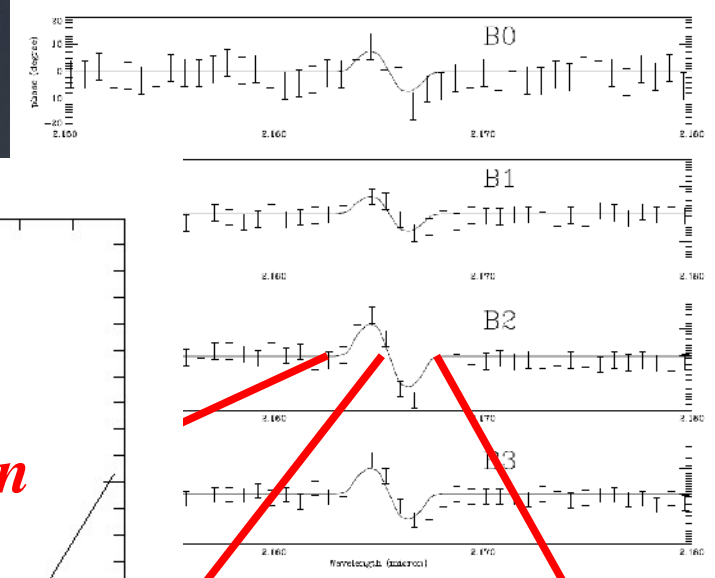
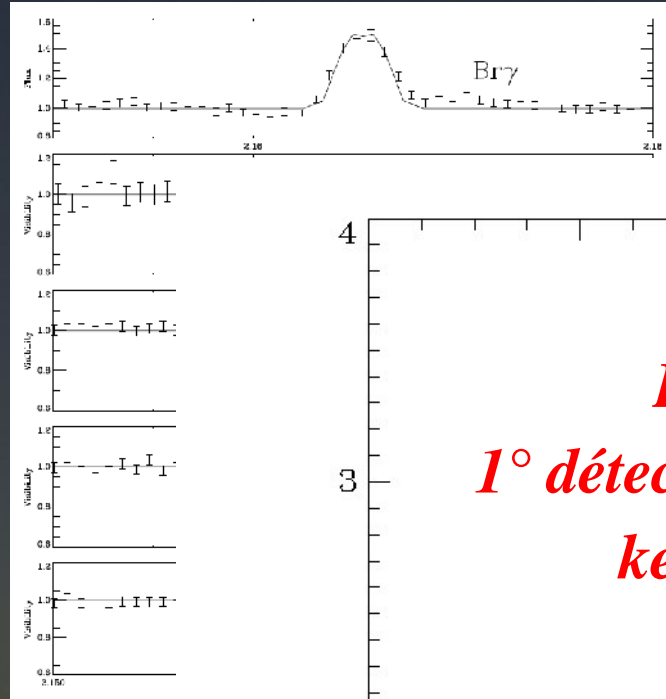


Vent polaire

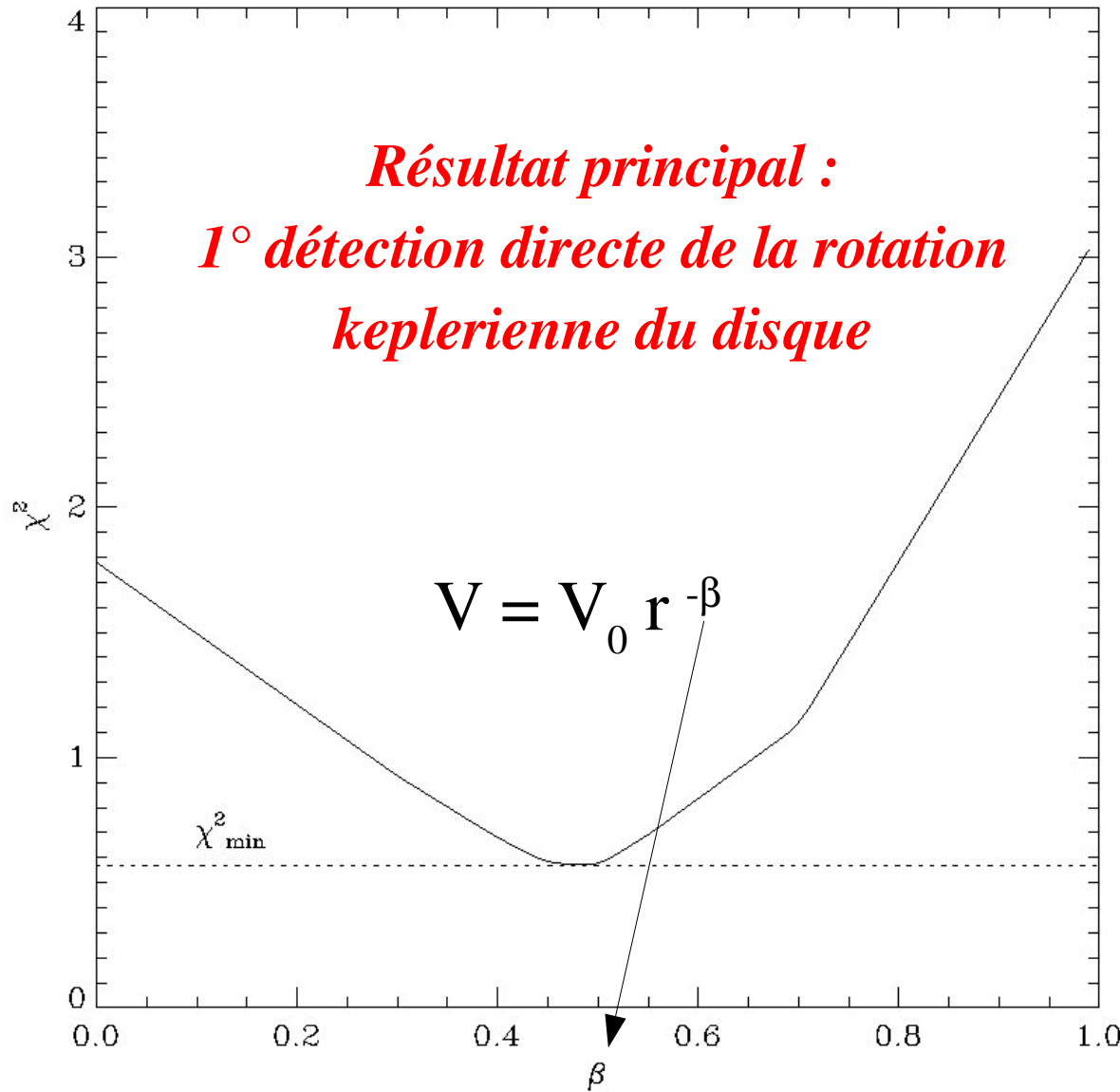
Disque équatorial

Meilland, Stee,
Vannier, Millour
& co., A&A 2007
(sous presse)

α Arae



Résultat principal :
1° détection directe de la rotation
keplérienne du disque



Cont

Meilland, Stee,
 Vannier, Millour
 & co., A&A 2007
 (sous presse)

Plan

- **Contexte**

- Pourquoi la HRA ?
- L'interférométrie stellaire optique et AMBER

- **Traitement du signal et instrumentation**

- Les observables d'AMBER
- L'apport potentiel de la phase différentielle
- Les vraies données

- **Les étoiles chaudes**

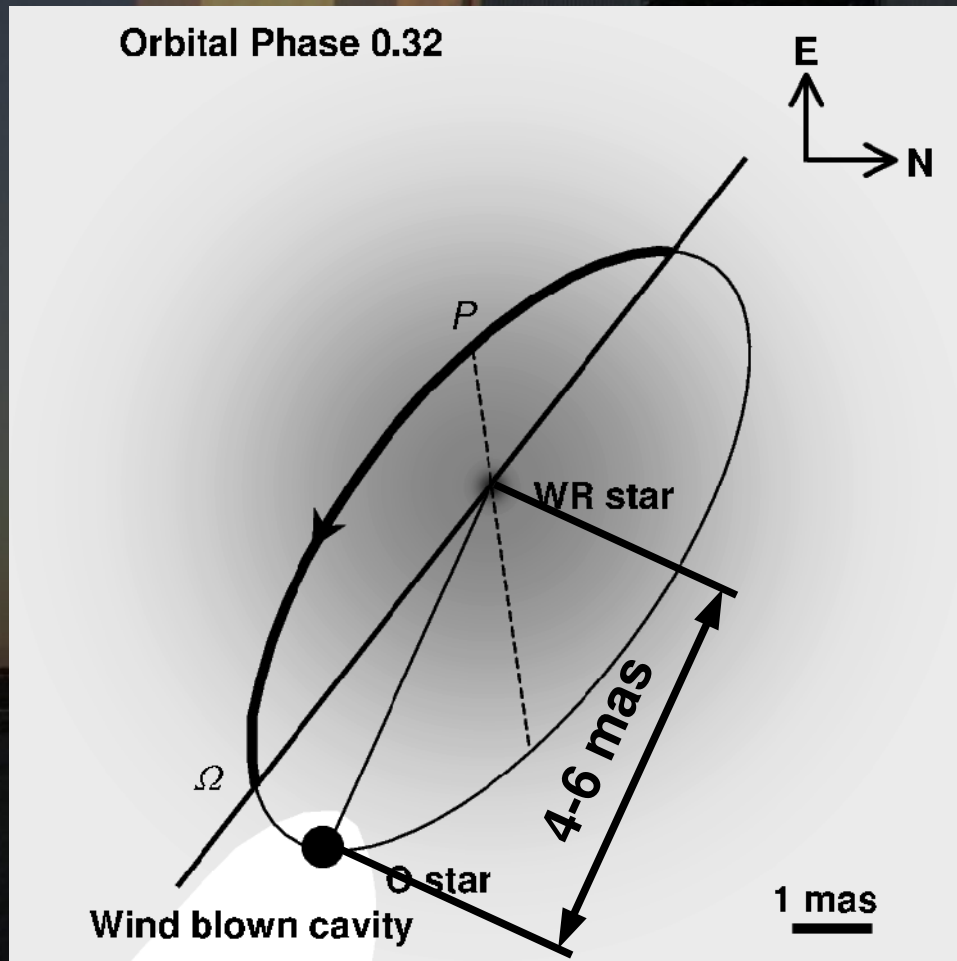
- η Car
- α Arae
- γ^2 Velorum

γ^2 Velorum



15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

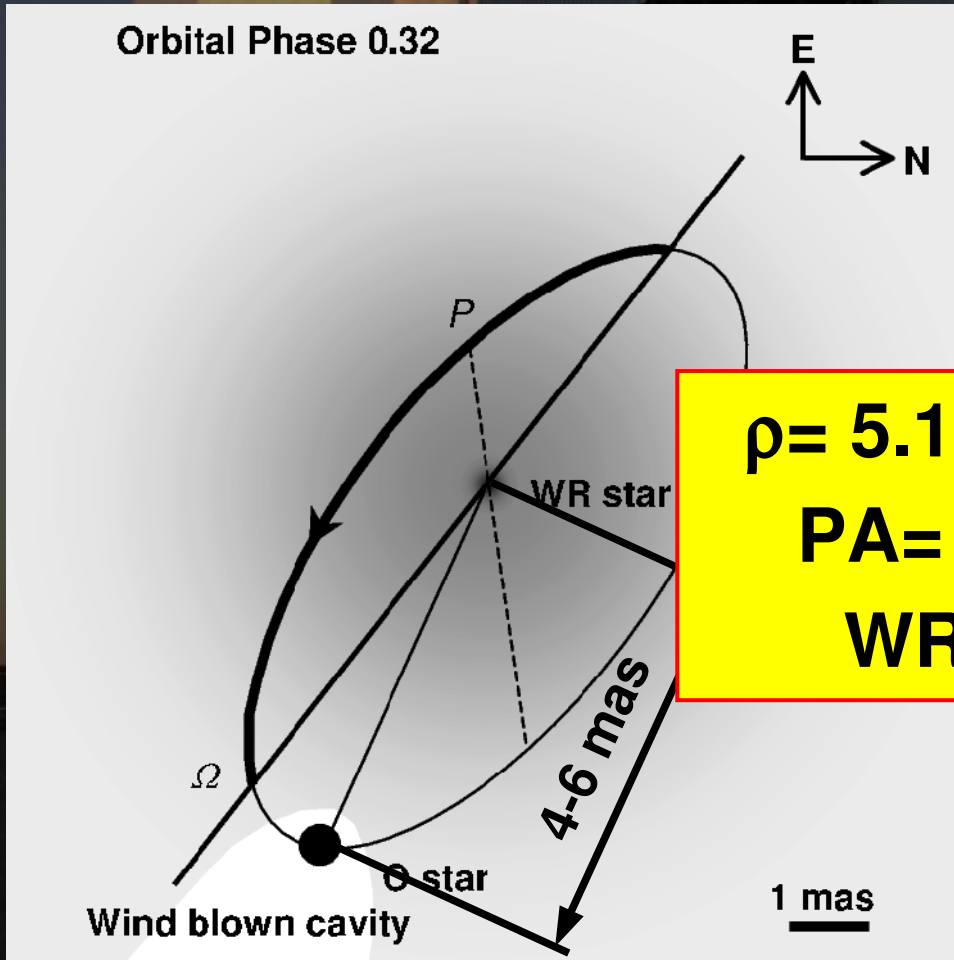
γ^2 Velorum



Parameter	Value	Error
Distance	258 pc	+41/-31
Period	78.53 day	0.01
Periastron	2450120.5 day	2
Eccentricity	0.326	0.01
Periastron longitude ω_{WR}	68°	4
$a_1 \sin i$	39.10^6 km	2.10^6
$a_2 \sin i$	125.10^6 km	2.10^6
inclination i	63°	3
PA of node Ω	322°	10
R_O	$12.4 R_\odot$	1.7
R_c of WR star	$3.0 R_\odot$	0.5
θ_O	0.48 mas	0.09
θ_c of WR star	0.11 mas	0.06
$\theta_{(\tau_K=1)}$ of WR star	0.28 mas	0.1
$\pi_{(a_1+a_2)}$	4.8 mas	0.7

Étoile double WR + O (Smith 1968) + Collision vent-vent (St-Louis 1993)
+ Poussière ?

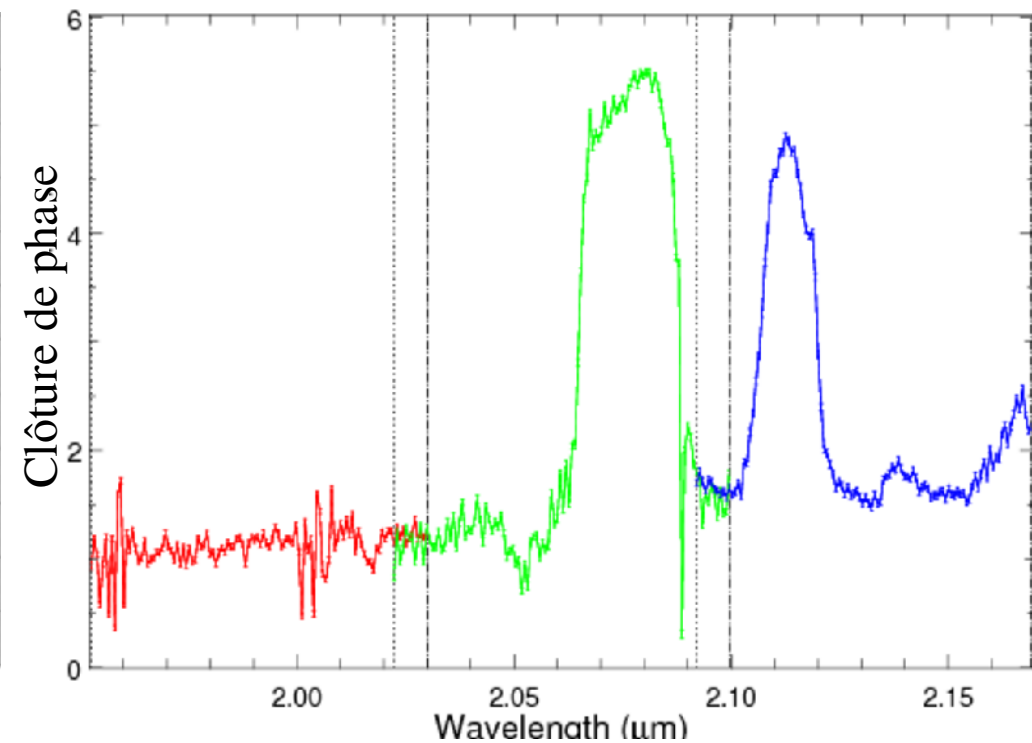
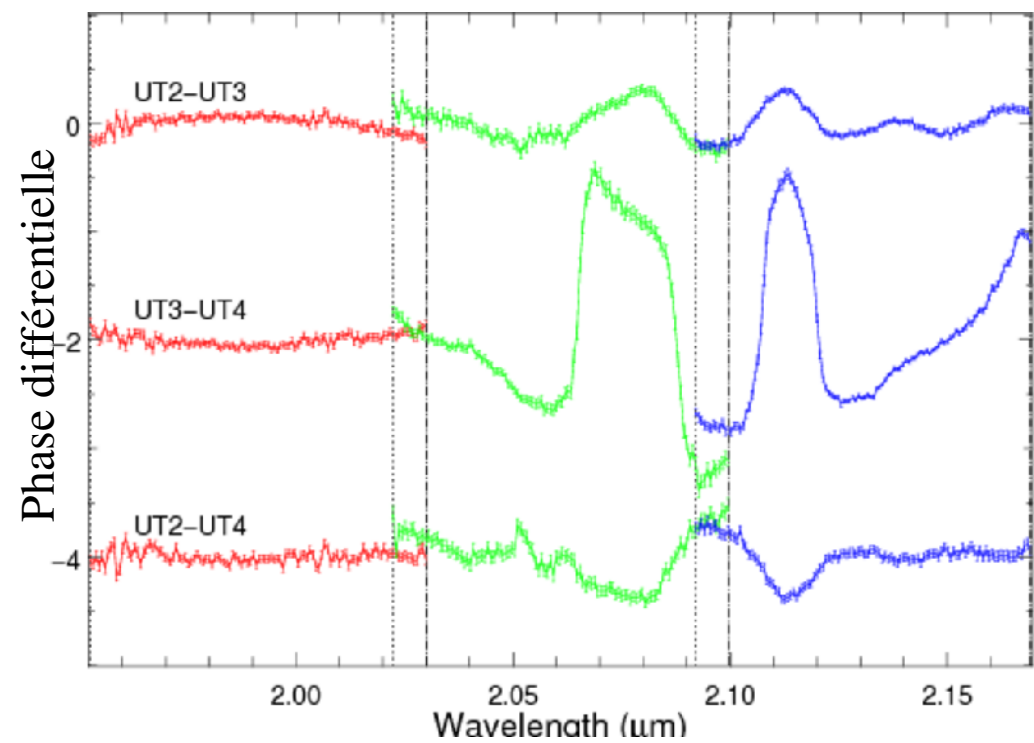
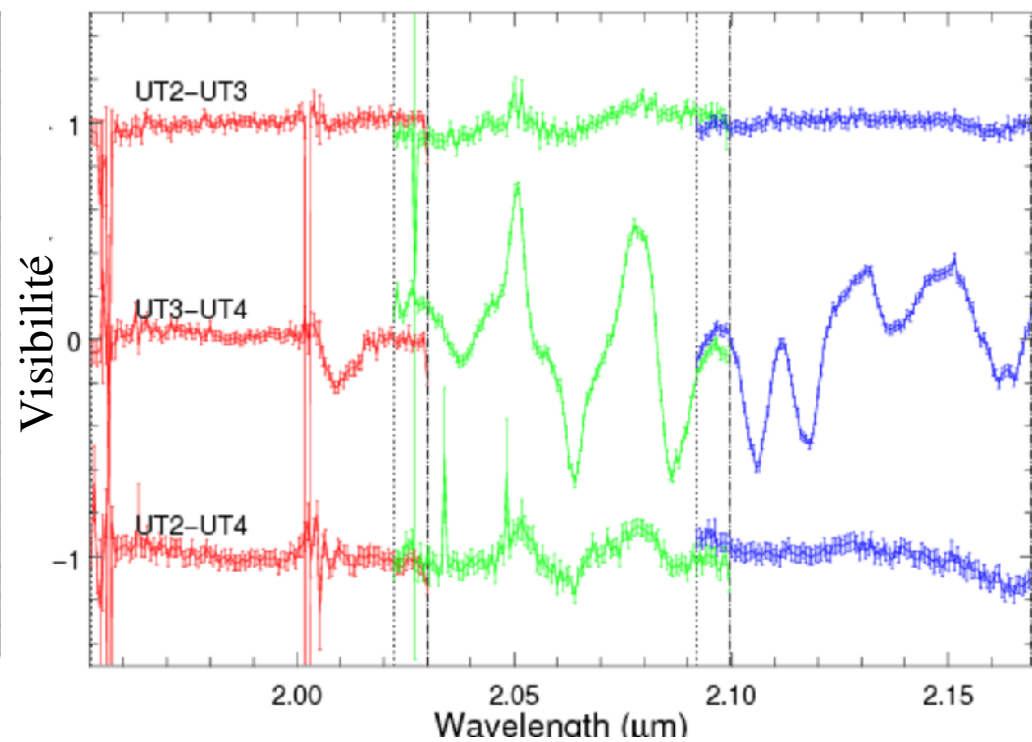
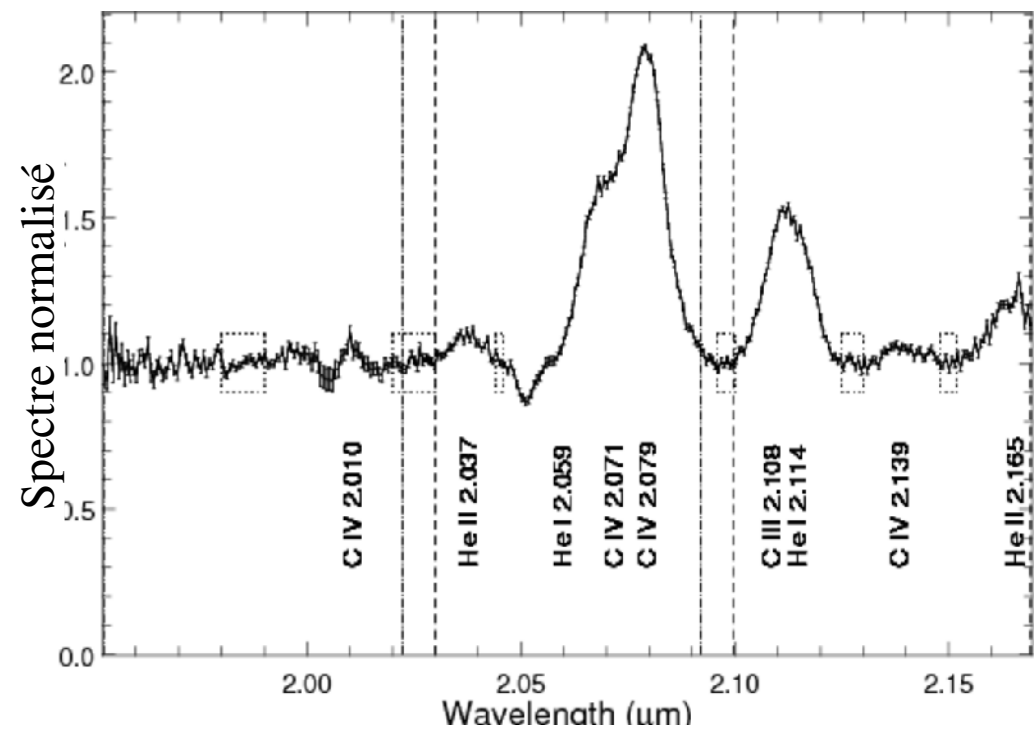
γ^2 Velorum

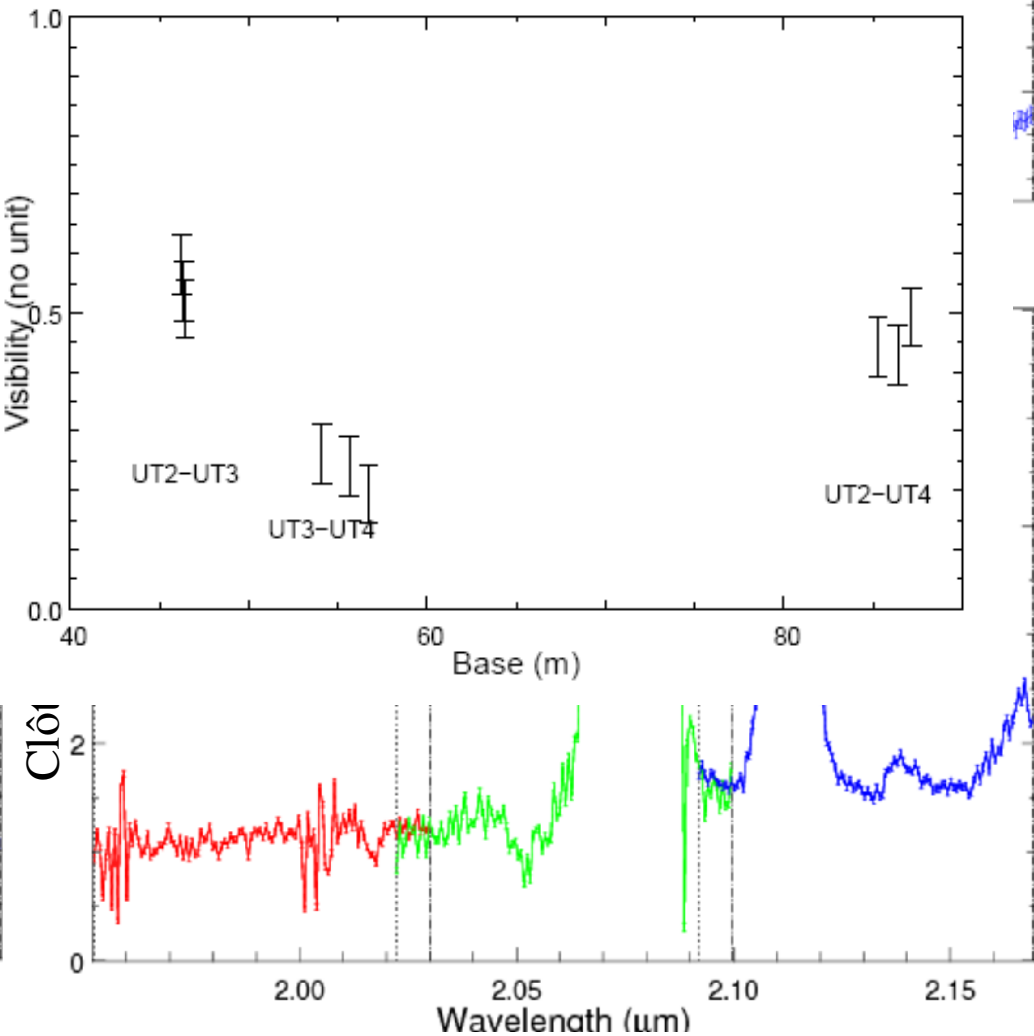
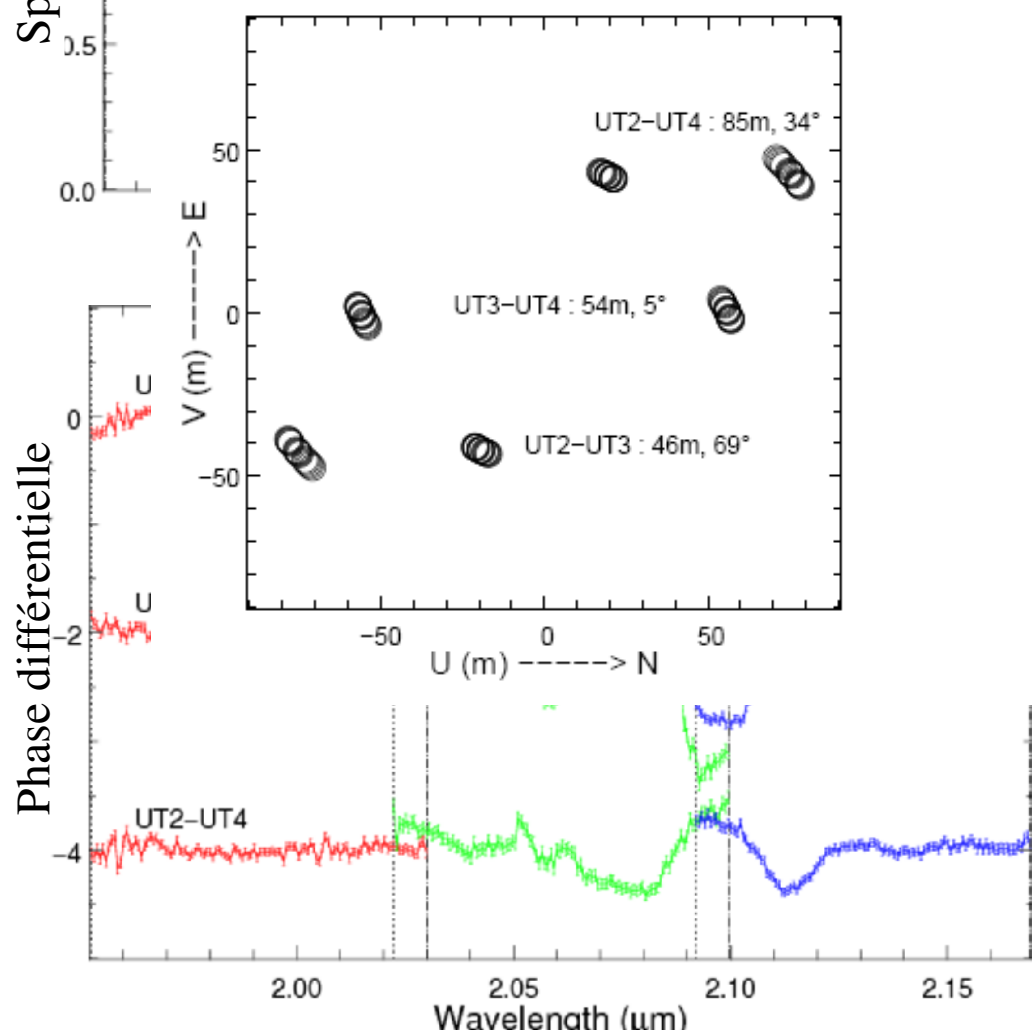
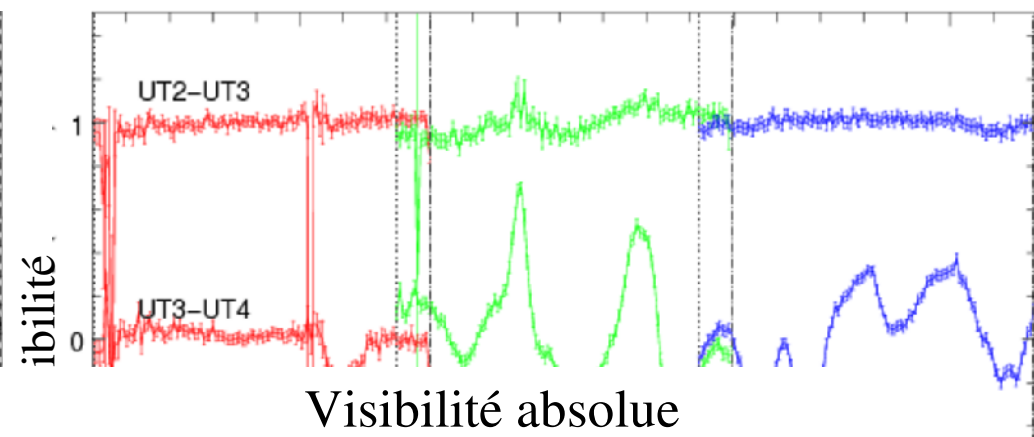
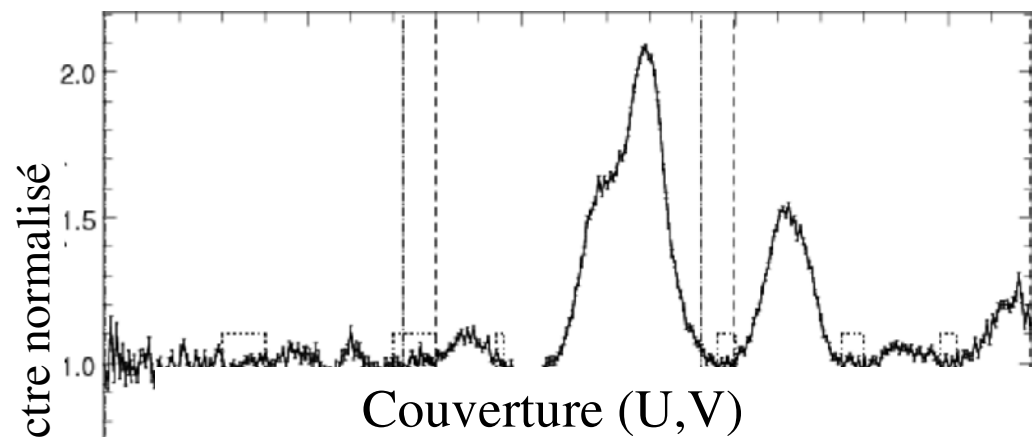


$\rho = 5.1 \pm 0.9$ mas
PA = $66 \pm 15^\circ$
WR/O ~ 1

Parameter	Value	Error
Distance	258 pc	+41/-31
Period	78.53 day	0.01
Periastron	2450120.5 day	2
Eccentricity	0.326	0.01
Periastron longitude ω_{WR}	68°	4
	39.10^6 km	2.10^6
	125.10^6 km	2.10^6
	63°	3
	322°	10
	$12.4 R_\odot$	1.7
	$3.0 R_\odot$	0.5
θ_O	0.48 mas	0.09
θ_c of WR star	0.11 mas	0.06
$\theta_{(\tau_K=1)}$ of WR star	0.28 mas	0.1
$\pi_{(a1+a2)}$	4.8 mas	0.7

Étoile double WR + O (Smith 1968) + Collision vent-vent (St-Louis 1993)
 + Poussière ?





Modèle géométrique utilisé

"Etoile double + Composante diffuse"

$$C_{jk}(\lambda) = \frac{1 + R_c(\lambda) + R_s(\lambda) e^{-2i\pi \frac{\vec{u}_{jk} \cdot \vec{\rho}}{\lambda}}}{1 + R_c(\lambda) + R_s(\lambda)}$$

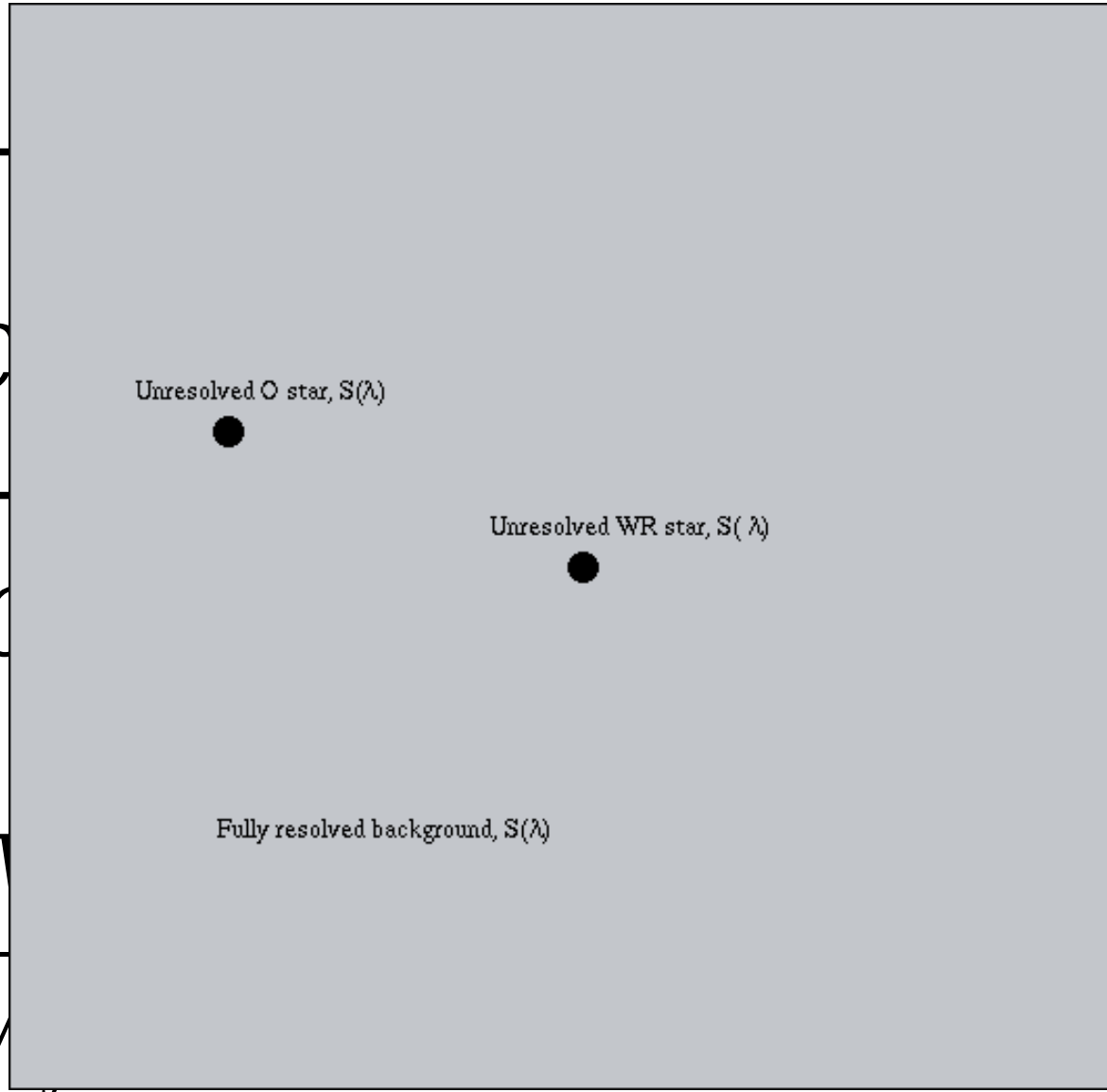
$$V_{jk}(\lambda) = |C_{jk}(\lambda)|$$

$$\psi_{123}(\lambda) = \arctan(C_{12} C_{23} C_{13}^*)$$

$$V_{jk}^{diff}(\lambda) = \frac{V_{jk}(\lambda)}{\langle V_{jk}(\lambda) \rangle_\lambda}$$

$$\varphi_{jk}^{diff}(\lambda) = \arctan\left(C_{jk} e^{-2i\pi \frac{\delta}{\lambda}}\right)$$

Modèle géométrique utilisé



$$V_{jk}(\lambda) = |C_{jk}|$$

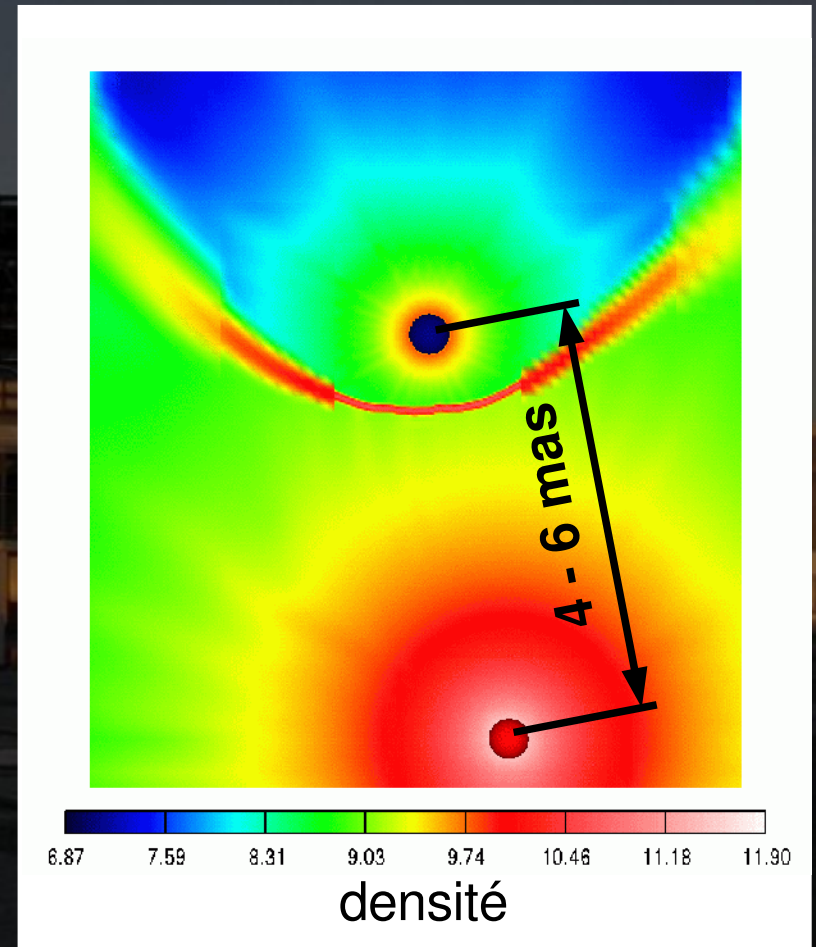
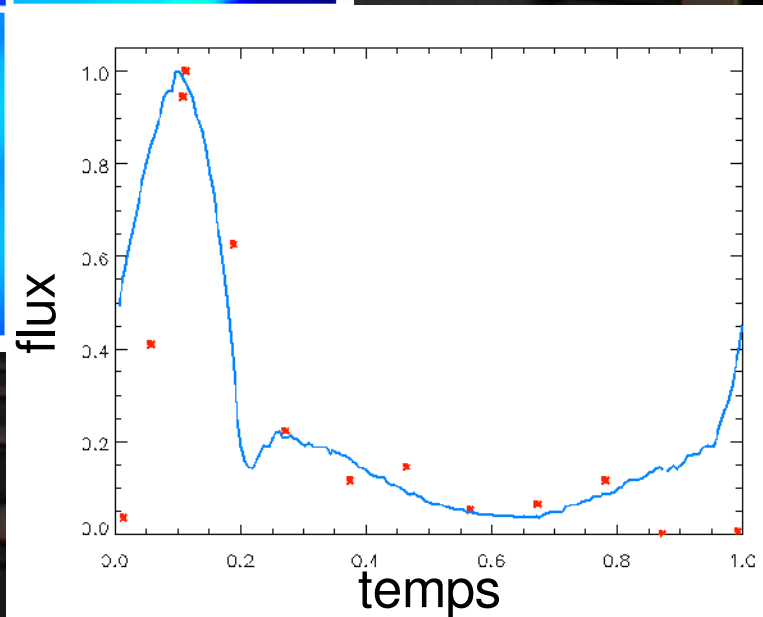
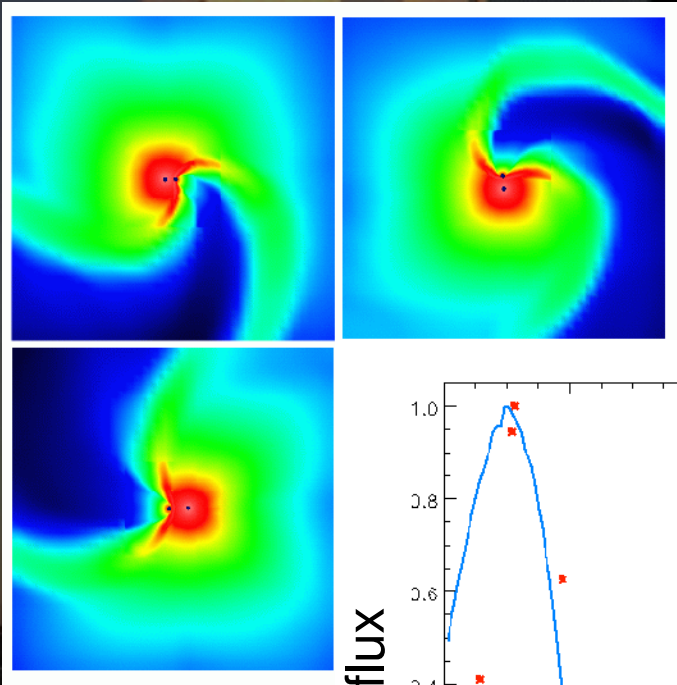
$$V_{jk}^{diff}(\lambda) = \frac{V_{jk}(\lambda) - \langle V_{jk} \rangle}{\langle V_{jk} \rangle}$$

$$\begin{pmatrix} C_{12} & C_{23} & C_{13}^* \end{pmatrix}$$

$$e^{-2i\pi \frac{\delta}{\lambda}}$$

Simulations hydrodynamiques

Follini et al. (1999, 2002)



Structure réelle de l'ensemble nettement plus complexe :
3^o composante ou au moins un fond diffus

15/12/2006 : Soutenance de thèse de Florentin Millour

Ajustement dans le continu

- Paramètres de binaire stables

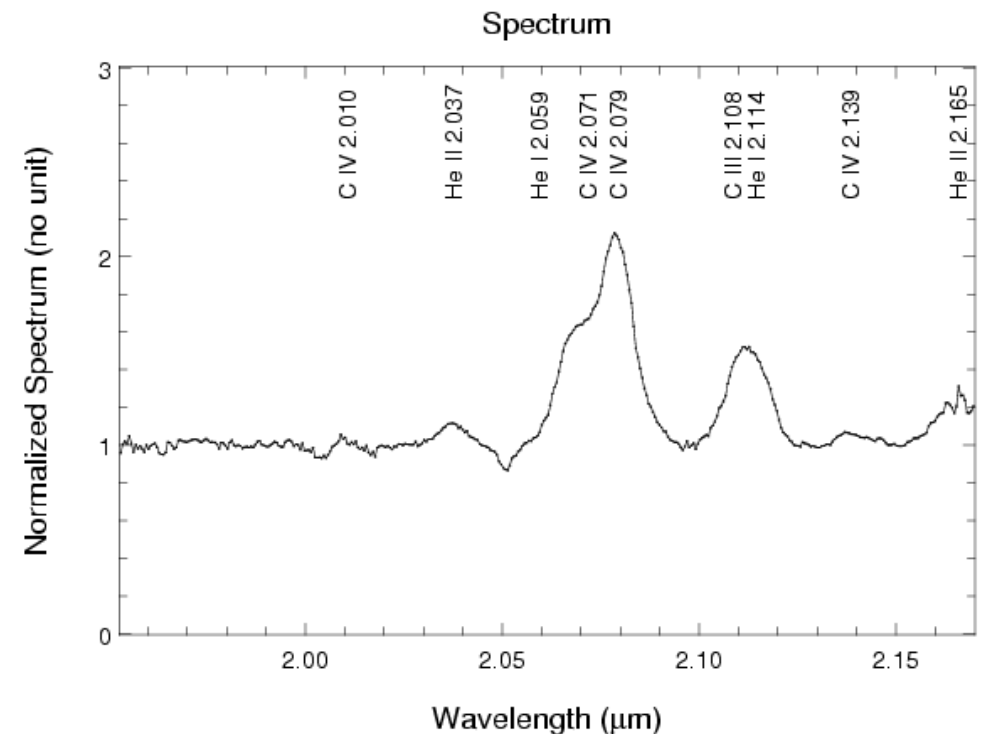
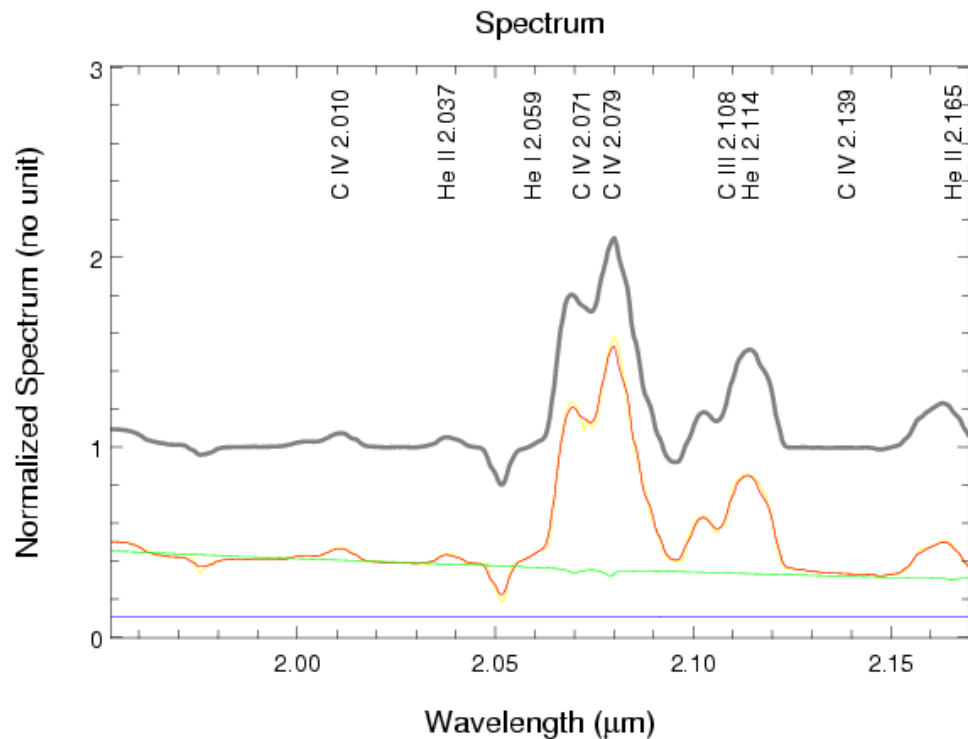
$$\begin{aligned} \rho &= 3.65 \pm 0.12 \text{ mas} \\ \text{PA} &= 73 \pm 13^\circ \\ \text{WR/O} &= 0.79 \pm 0.12 \end{aligned}$$

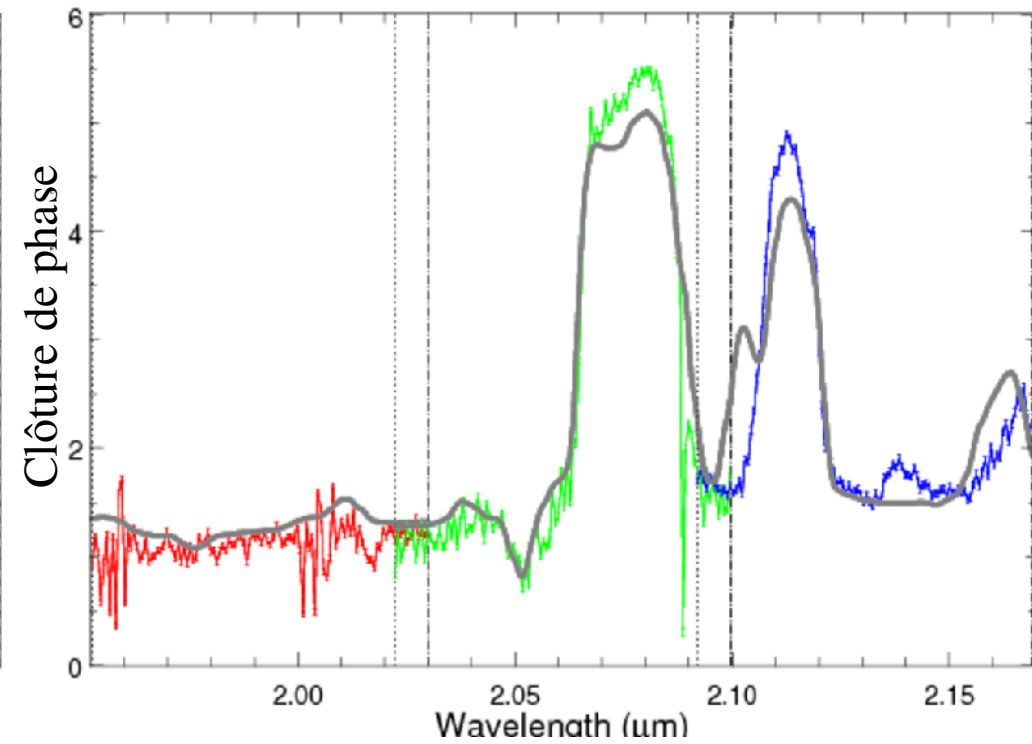
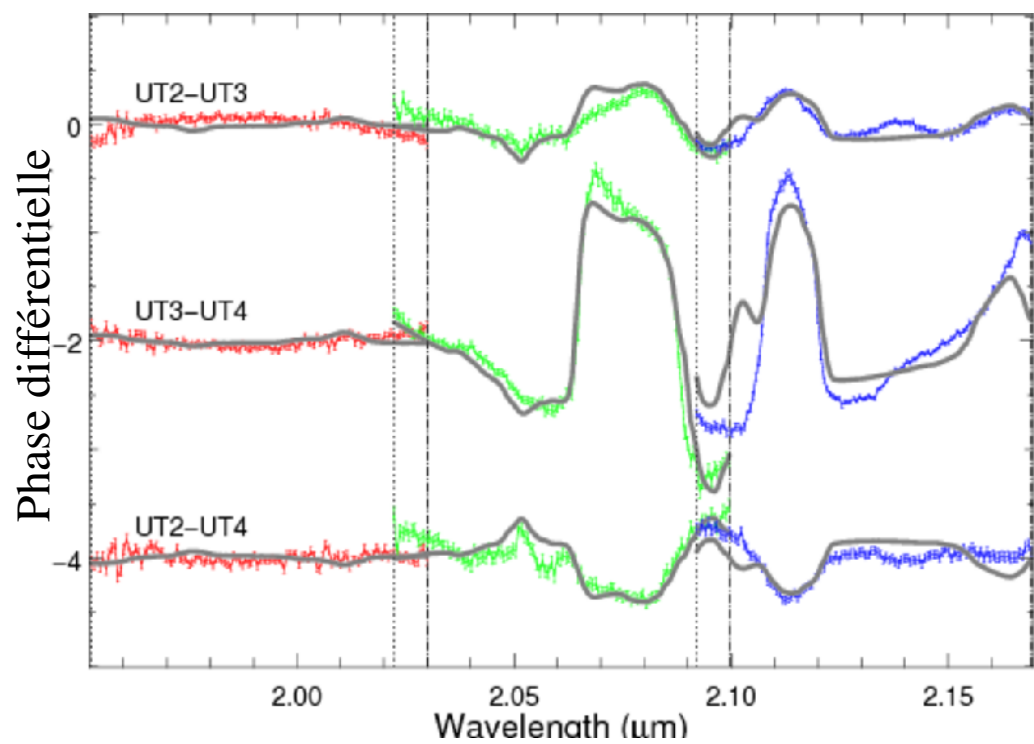
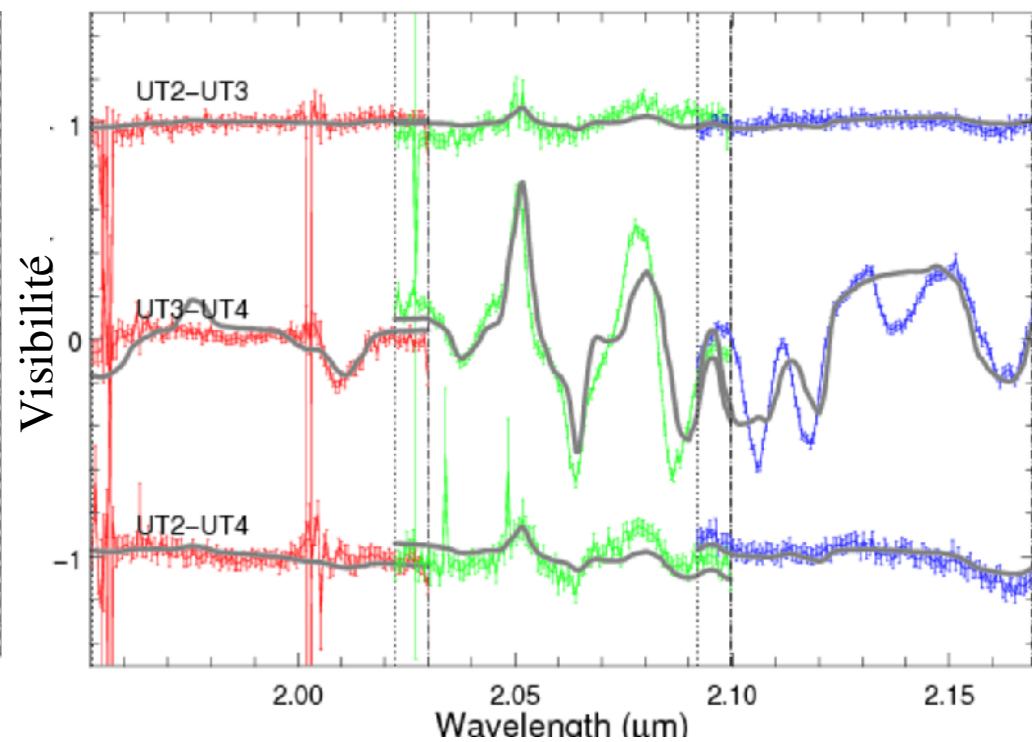
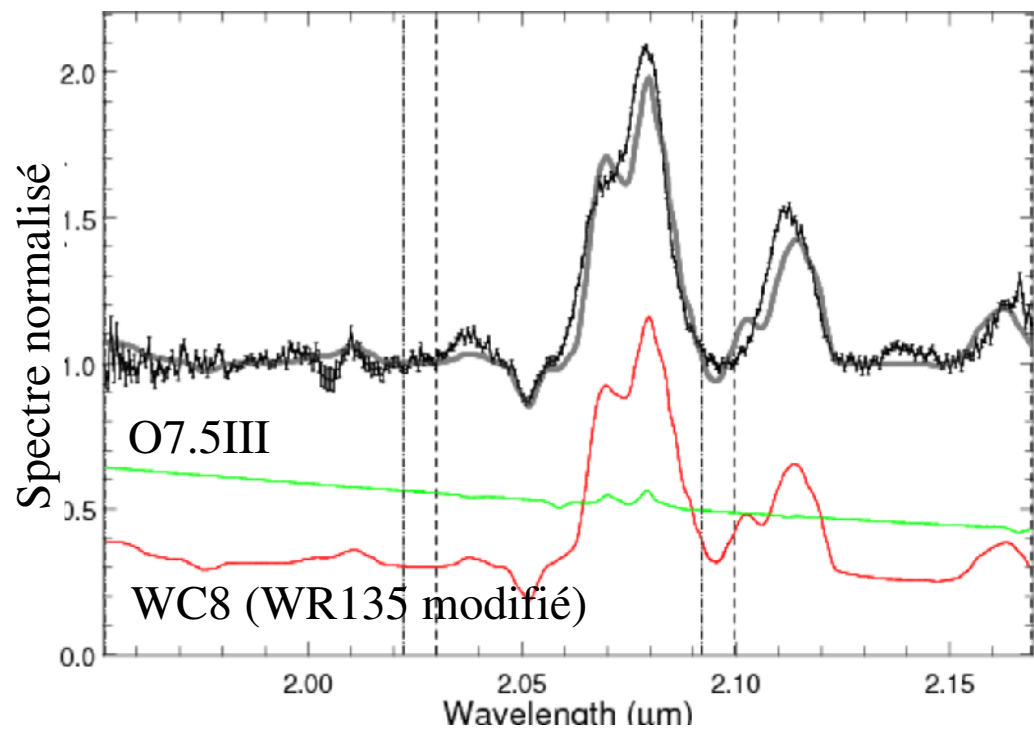
- Mauvais ajustement des visibilités (2σ)
- Continu peut contribuer jusqu'à 20% du flux

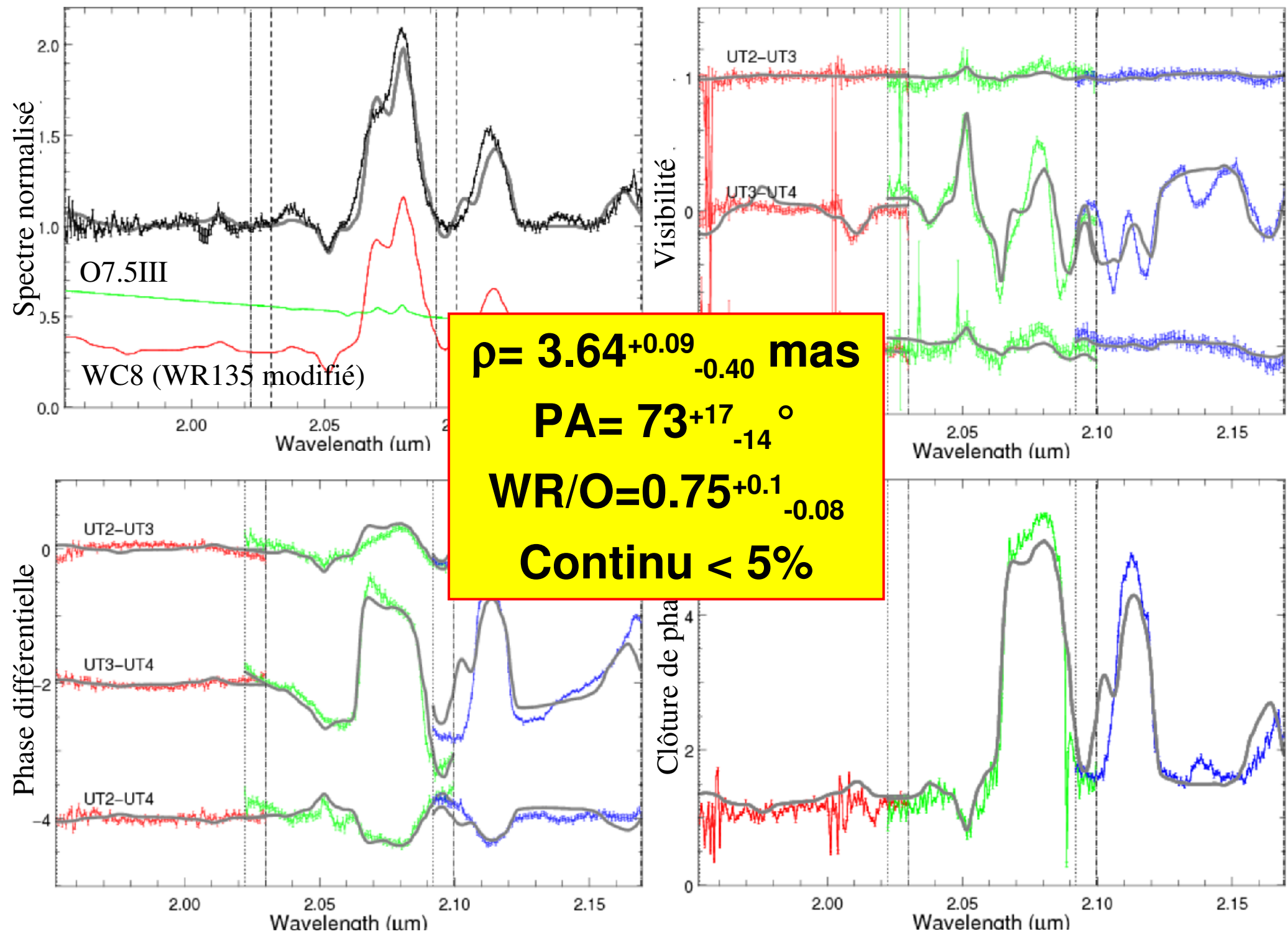
Wavelength (μm)	1.985	2.025 ₁	2.025 ₂	2.045	2.098 ₁	2.098 ₂	2.1275	2.150	Avg.	RMS	Δ
	Observation										
Visibility UT2-UT3	0.50	0.52	0.47	0.54	0.54	0.58	0.59	0.59			
Visibility UT3-UT4	0.26	0.26	0.28	0.28	0.23	0.20	0.24	0.26			
Visibility UT2-UT4	0.44	0.43	0.42	0.42	0.41	0.53	0.52	0.48			
Closure Phase	1.09	1.22	1.11	1.37	1.49	1.61	1.78	1.60			
	Fit Binary										
Separation (mas)	3.69	3.68	3.57	3.53	3.60	3.72	3.69	3.68	3.65	0.06	0.1
Position Angle ($^\circ$)	64.0	64.8	93.4	68.8	76.4	72.3	71.1	70.8	72.7	8.7	10
Flux Ratio 2nd star	0.57	0.57	0.57	0.59	0.64	0.68	0.66	0.64	0.62	0.04	0.1

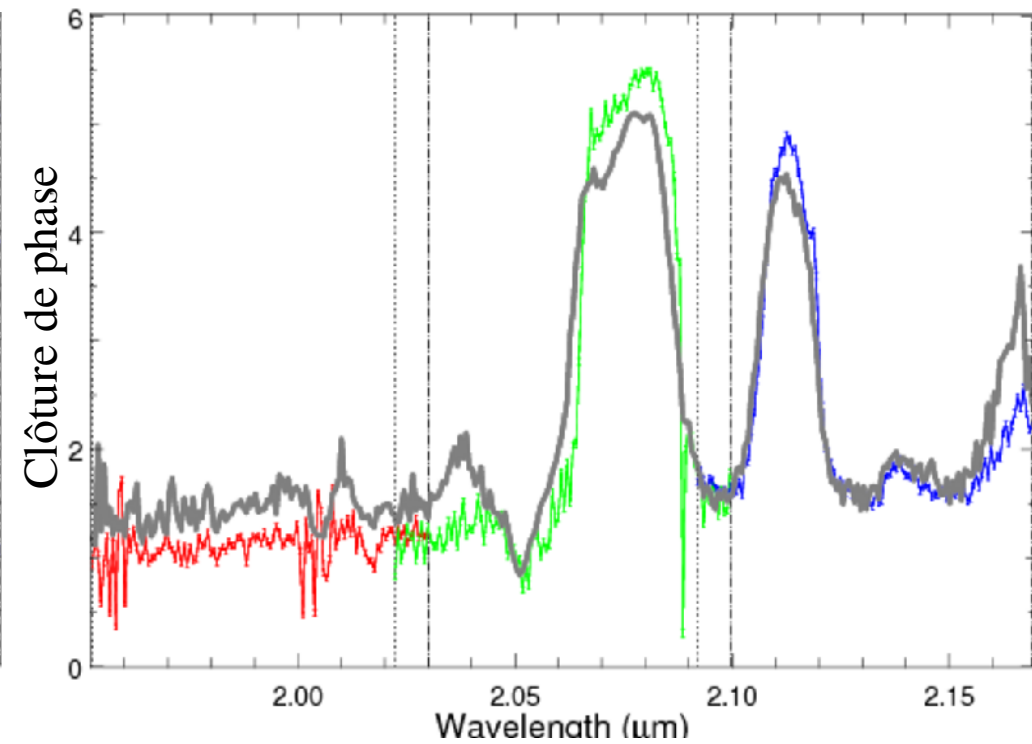
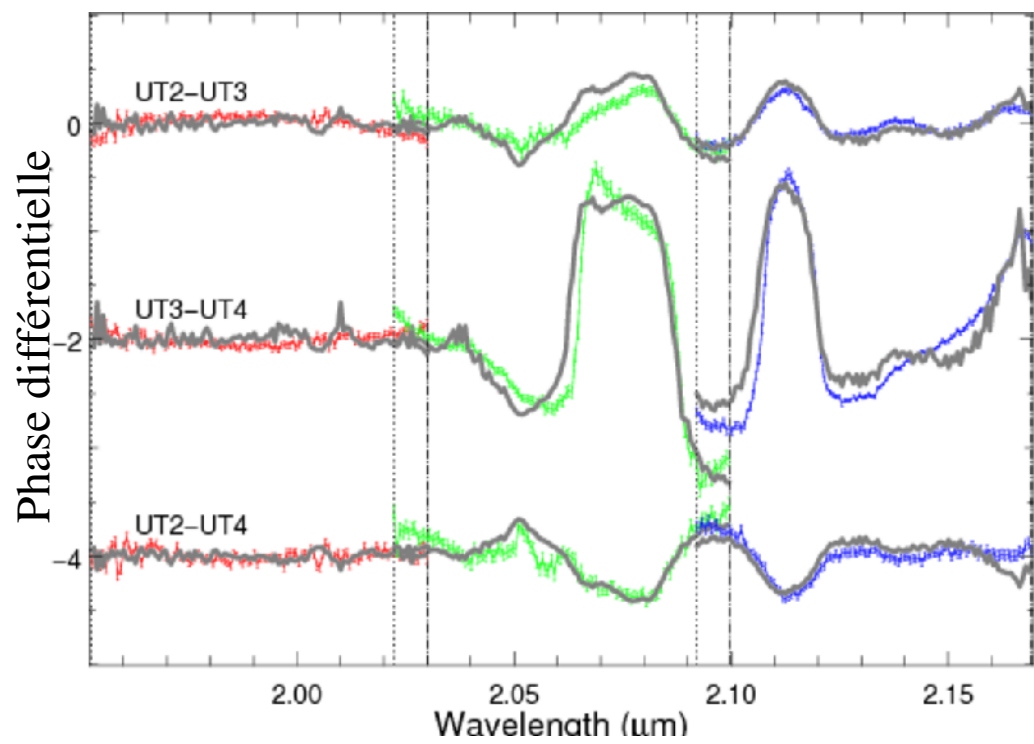
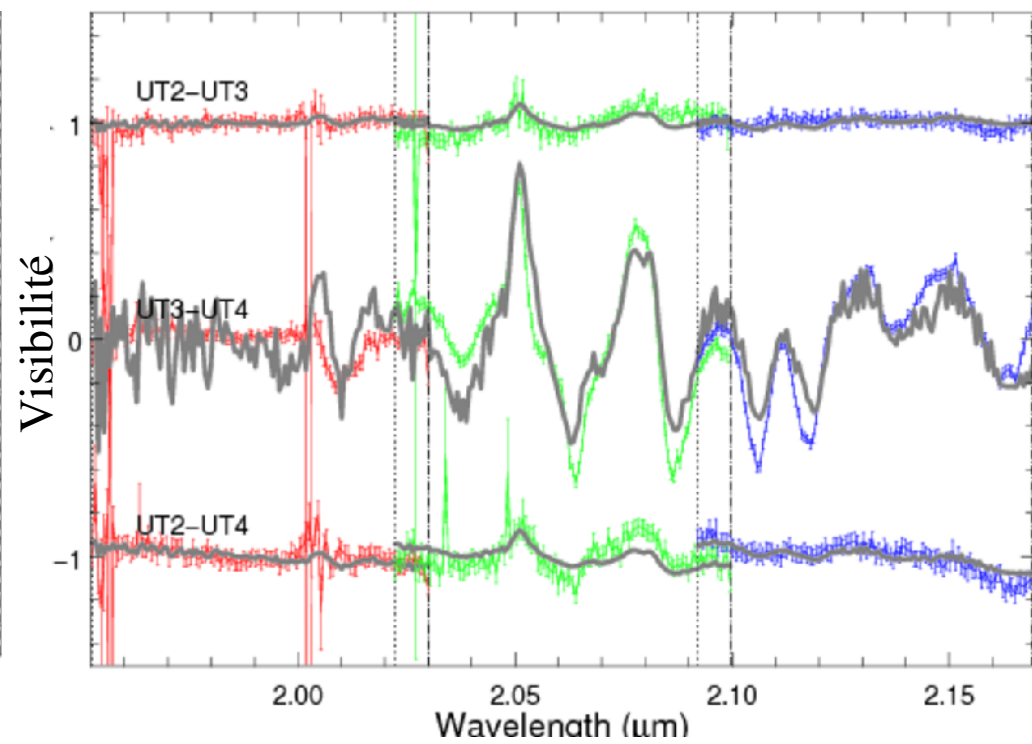
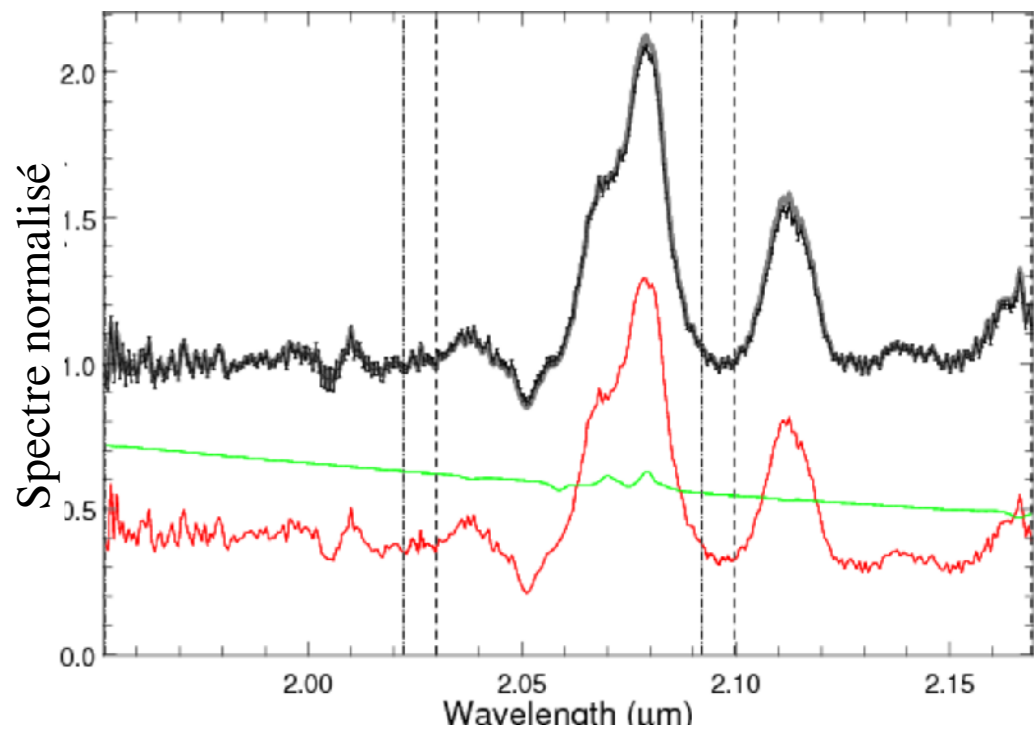
Modèles de spectre utilisés

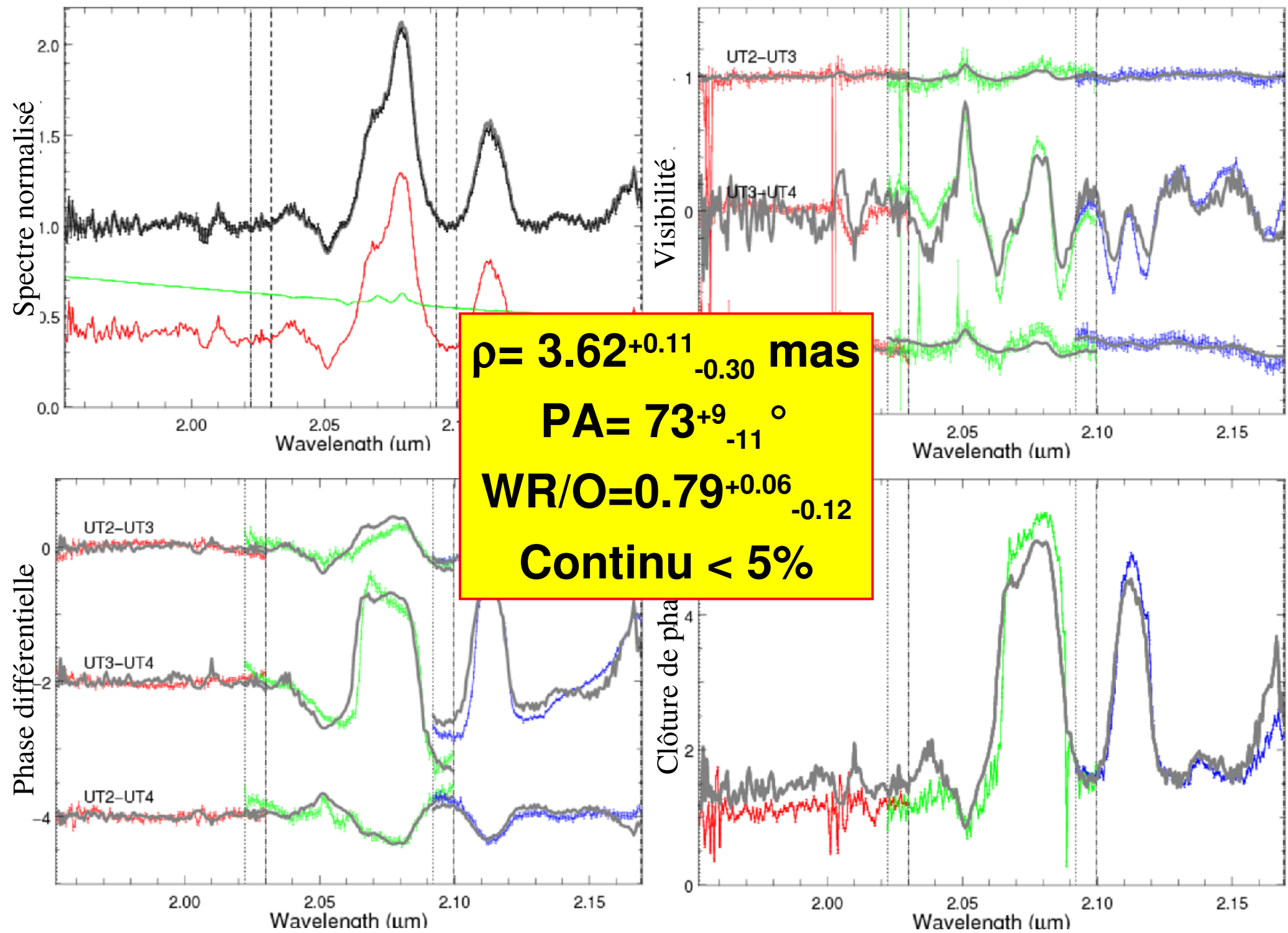
- Spectre de WR135 modifié (Dessart & co. 2000)
- Bibliothèque de spectres d'étoiles O (De Marco & co. 2000)
- Continu diffus (=> poussières)



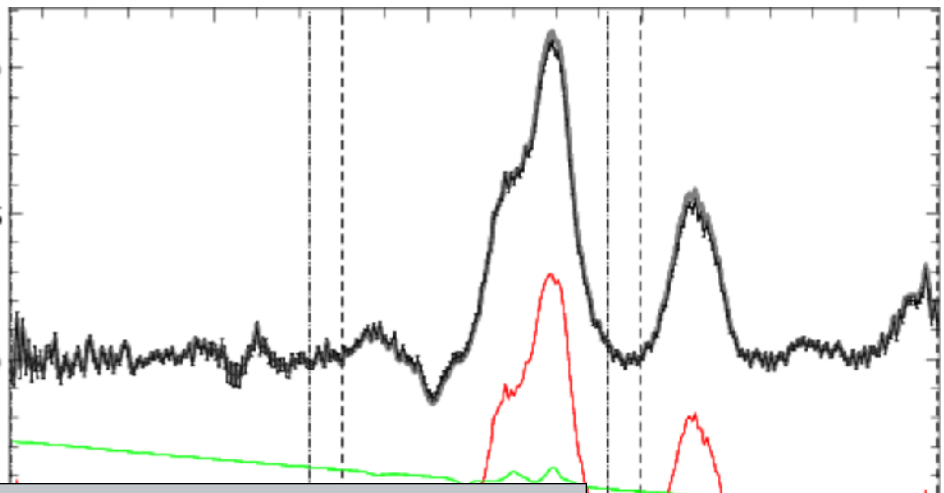




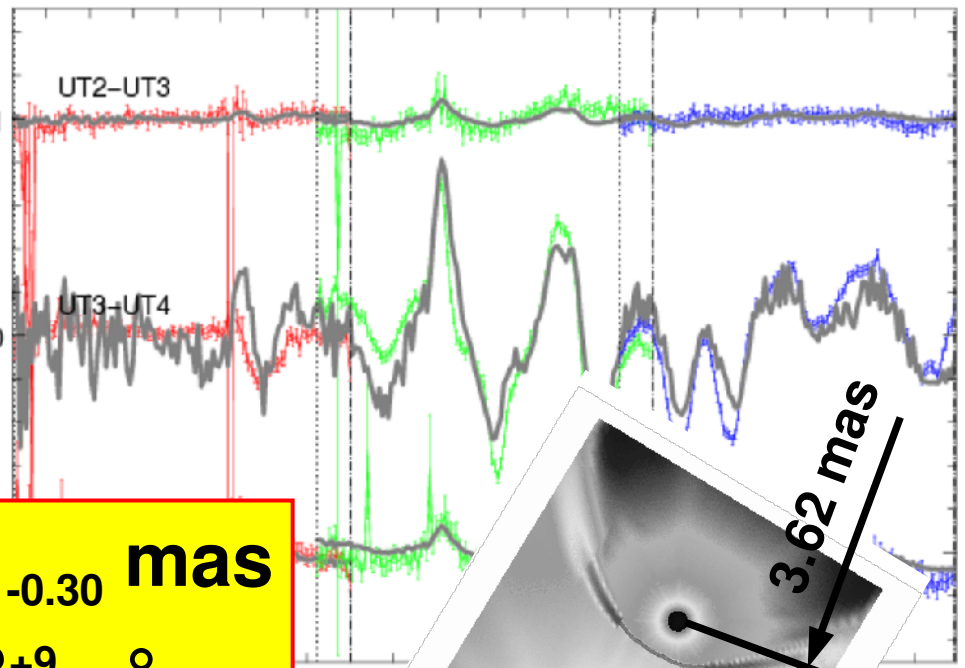




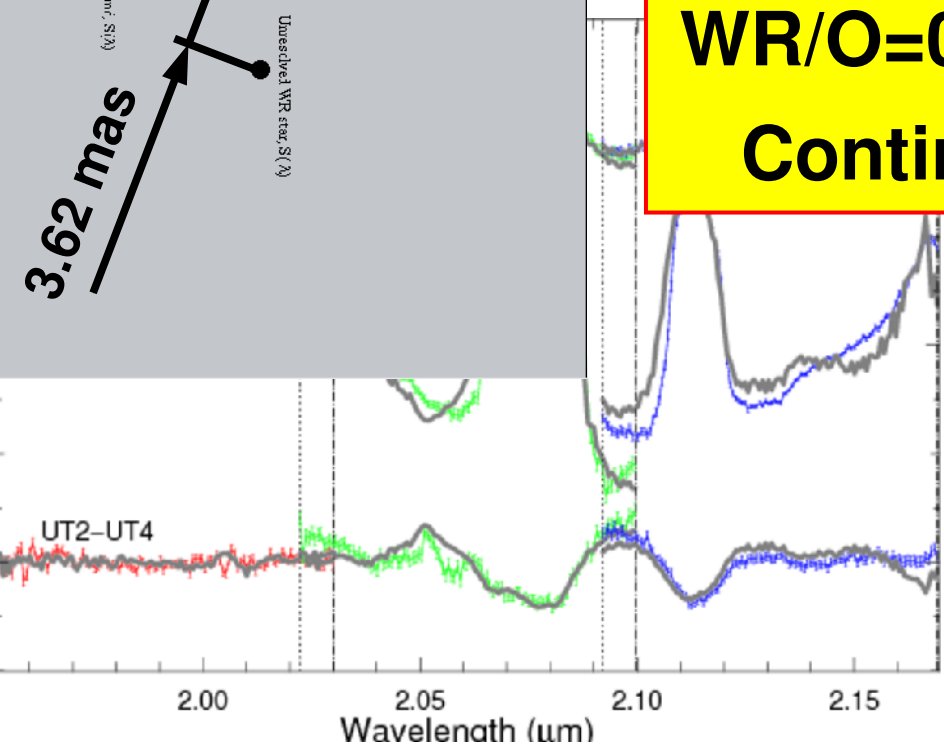
Spéctre normalisé



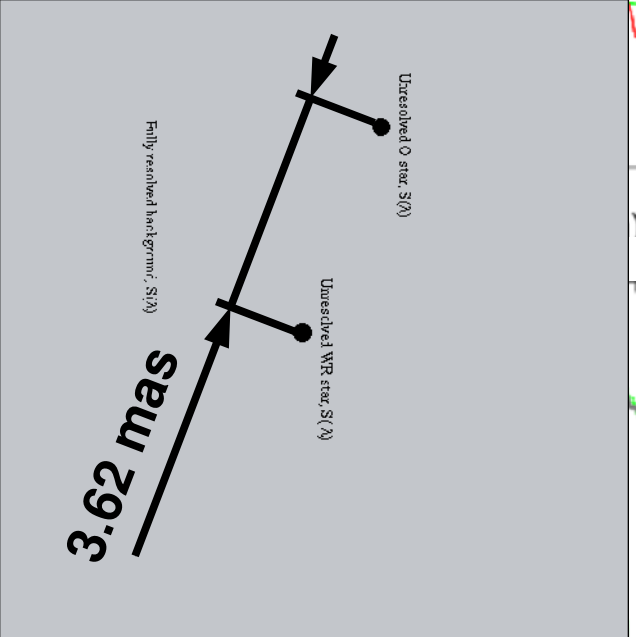
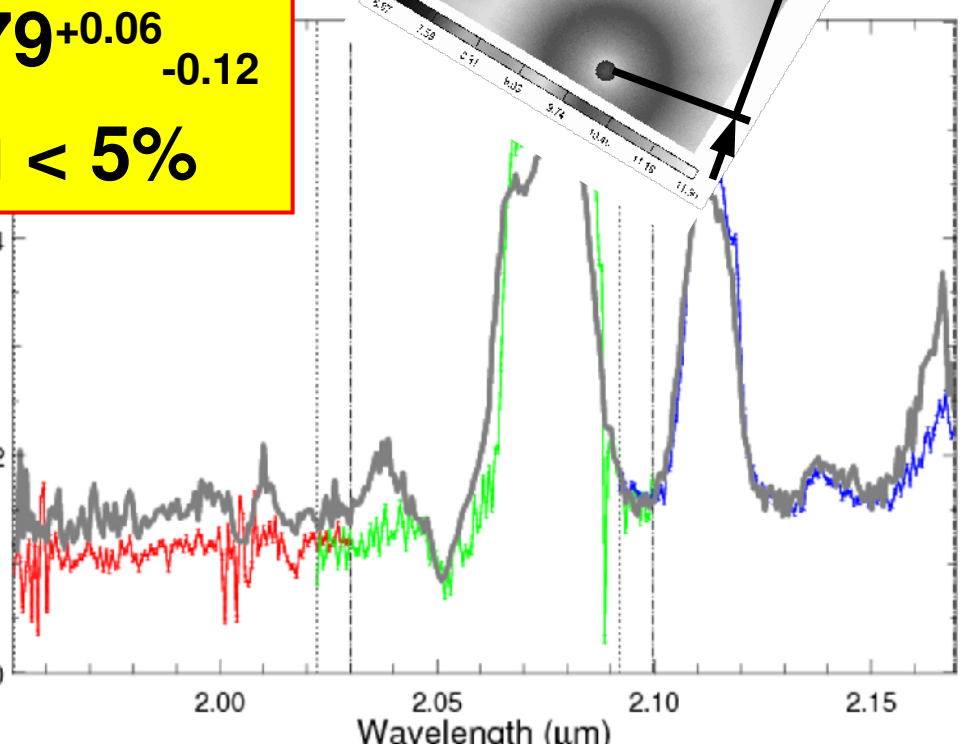
Visibilité



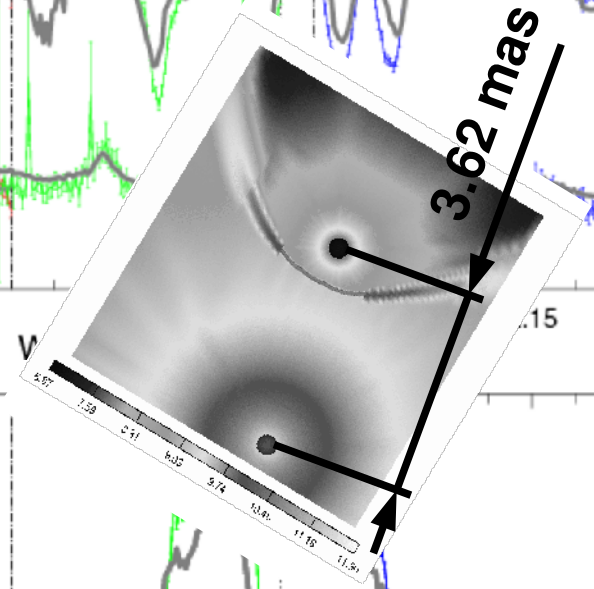
Phase différentielle



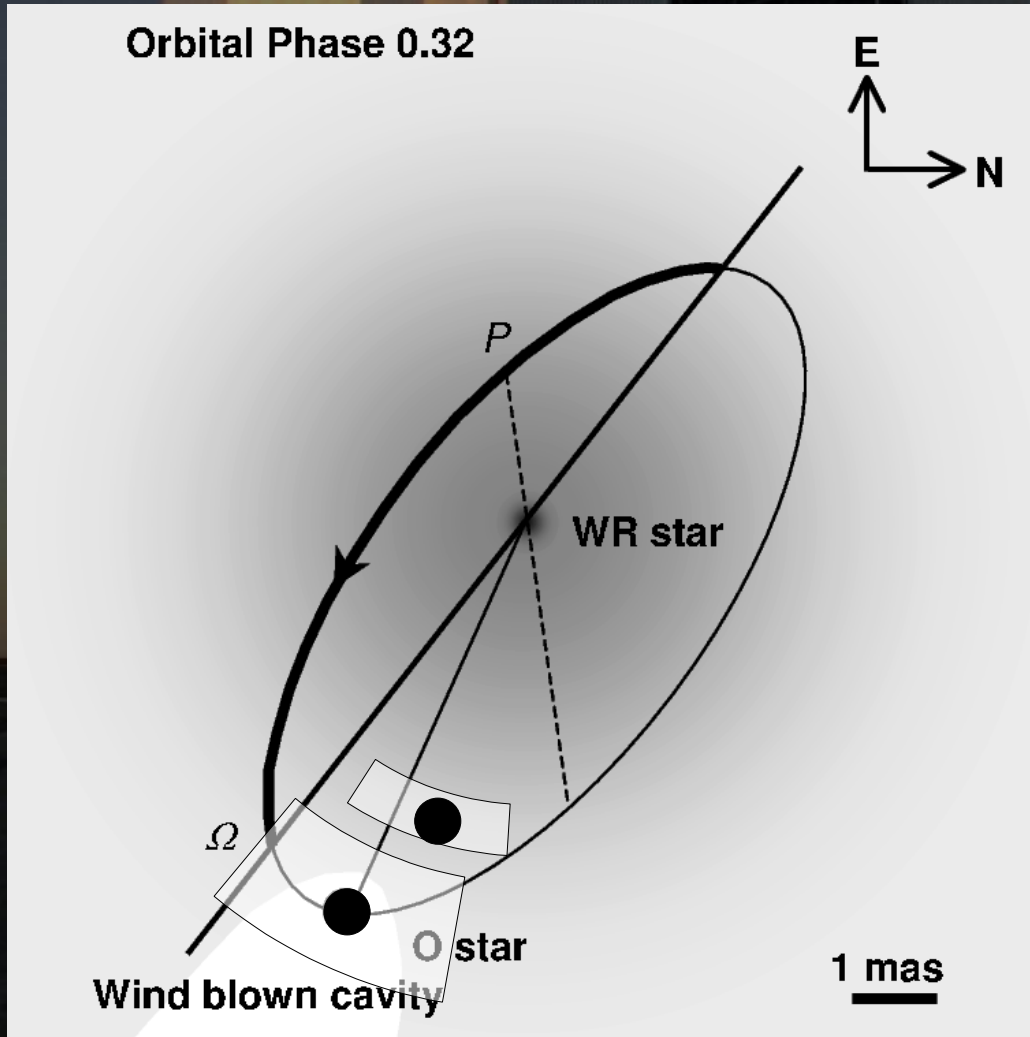
Clôture de pha



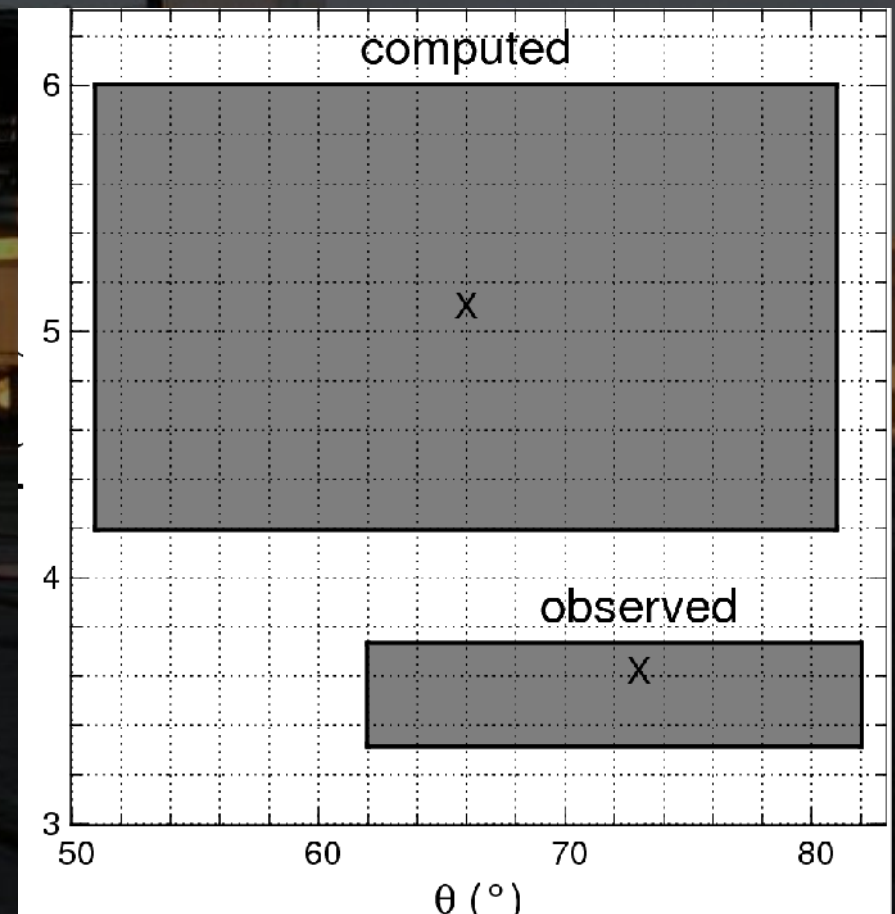
$\rho = 3.62^{+0.11}_{-0.30}$ mas
 $PA = 73^{+9}_{-11}$ °
 $WR/O = 0.79^{+0.06}_{-0.12}$
Continu < 5%



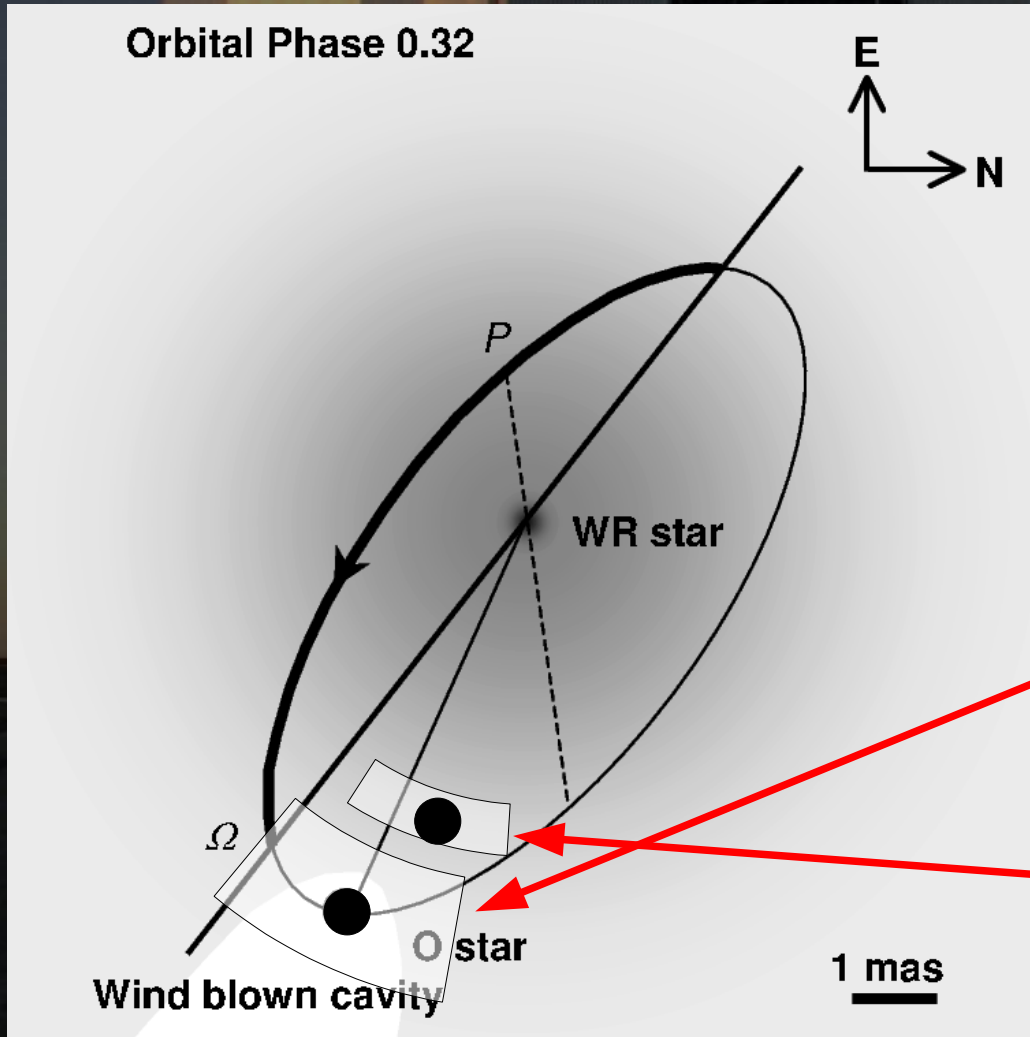
Paramètres de la binaire



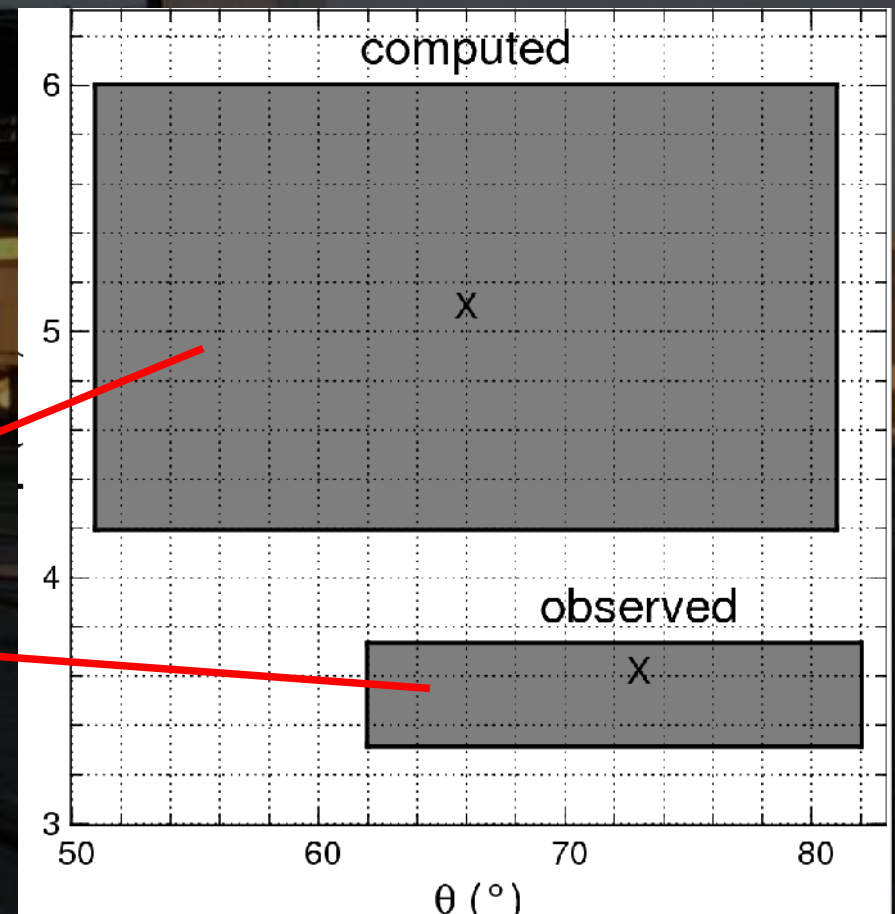
Separation (mas)	Pos. angle ($^{\circ}$)	Averaged fx. rat. (1.95-2.17 μm)
$3.62^{+0.11}_{-0.30}$	73^{+9}_{-11}	$0.79^{+0.06}_{-0.12}$



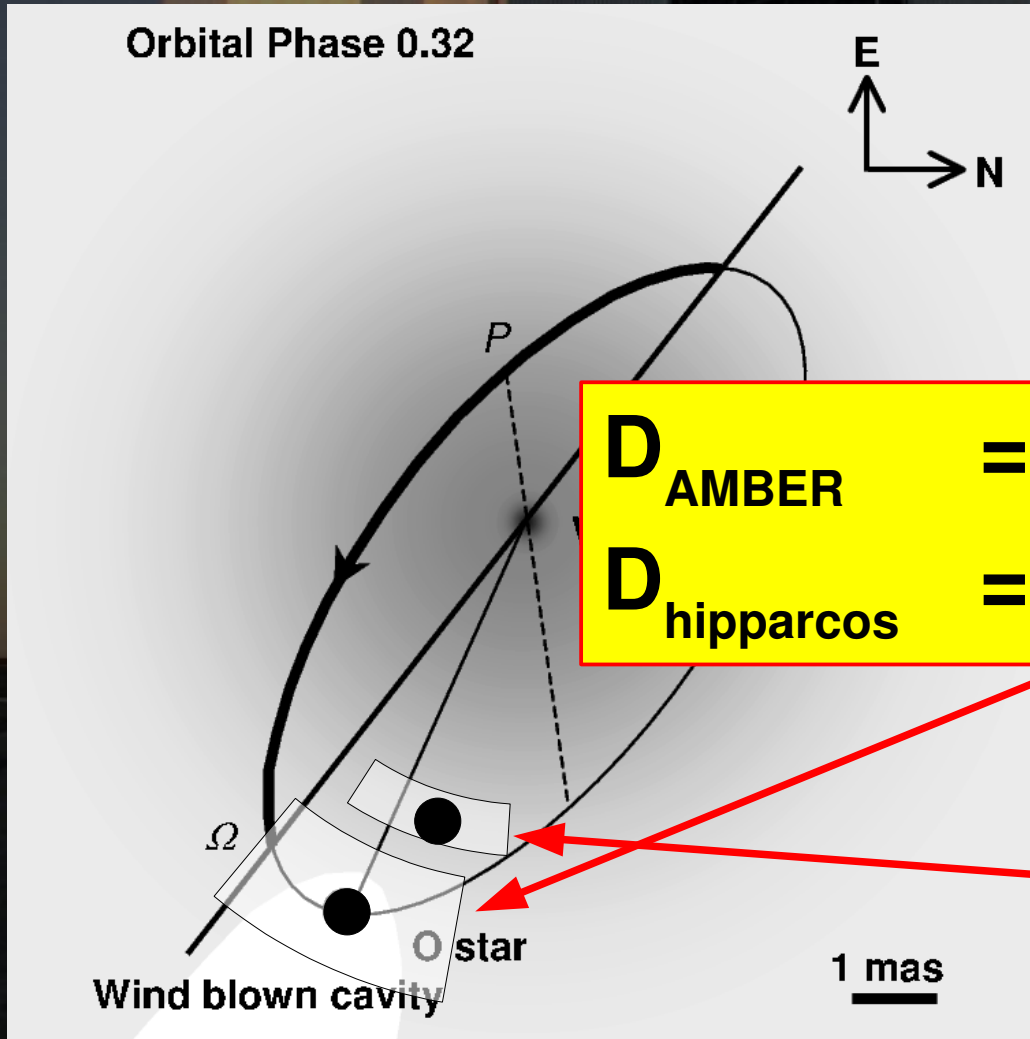
Paramètres de la binaire



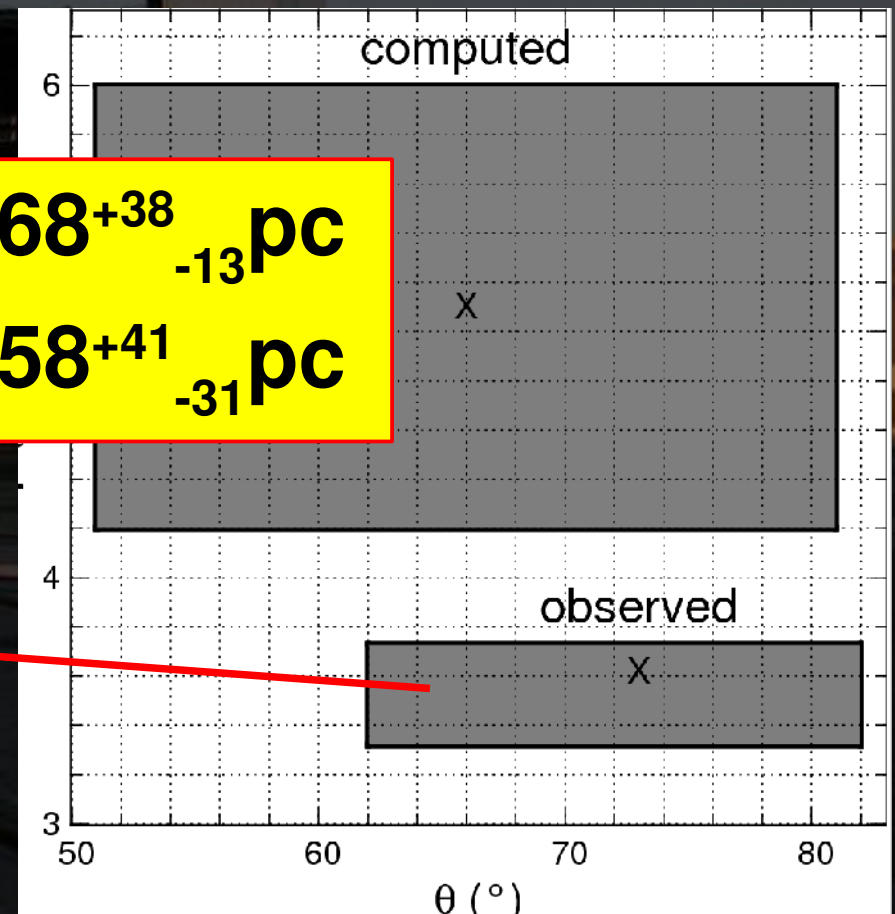
Separation (mas)	Pos. angle ($^{\circ}$)	Averaged fx. rat. (1.95-2.17 μm)
$3.62^{+0.11}_{-0.30}$	73^{+9}_{-11}	$0.79^{+0.06}_{-0.12}$



Paramètres de la binaire



Separation (mas)	Pos. angle ($^{\circ}$)	Averaged fx. rat. (1.95-2.17 μm)
$3.62^{+0.11}_{-0.30}$	73^{+9}_{-11}	$0.79^{+0.06}_{-0.12}$



Conclusions

(avec une seule observation AMBER !)

- Estimation directe de la distance du système
- Mesure d'un point de l'orbite visuelle
- Test de modèles d'étoile WR
- Détection d'une composante supplémentaire :
=> collision vent-vent ?

Millour & co., A&A 2007 (sous presse)

Résumé de mon travail de thèse

- Instrument

- participation aux tests et validation en labo et sur le ciel

- Traitement du signal

- Observables différentielles d'AMBER

- Sélection d'images

- Etoiles chaudes

- LBV : η Car

- Be : α Arae, κ CMa

- WR : γ^2 Velorum

- Exoplanètes

- Développement de modèles

- Observations de Tau Boo

Et l'avenir (à Bonn) ?

- Observations γ^2 Vel. supplémentaires
- Étude d'étoiles binaires B
- Spectro-imagerie interférométrique
- Exoplanètes / haute dynamique
- Traitement des données à bas flux

Merci de votre attention

