Interférométrie différentielle avec l'instrument A M BE R / V L T I

ulti stronomical am ecombiner ery arge elescope nterferometer

Florentin Millour

Laboratoire d'AstrOphysique de Grenoble

Laboratoire Universitaire d'Astrophysique de Nice

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

Pourquoi la haute résolution angulaire ?

Pourquoi la HRA ?

Un exemple : η Car

Étoile de type $L_{uminous}B_{lue}V_{ariable}$

$L = 4.10^{6}\ L_{soleil}$

Perte de masse $5.10^{-3}\ M_{Soleil}$ / an

Vent, V > 500 km/s

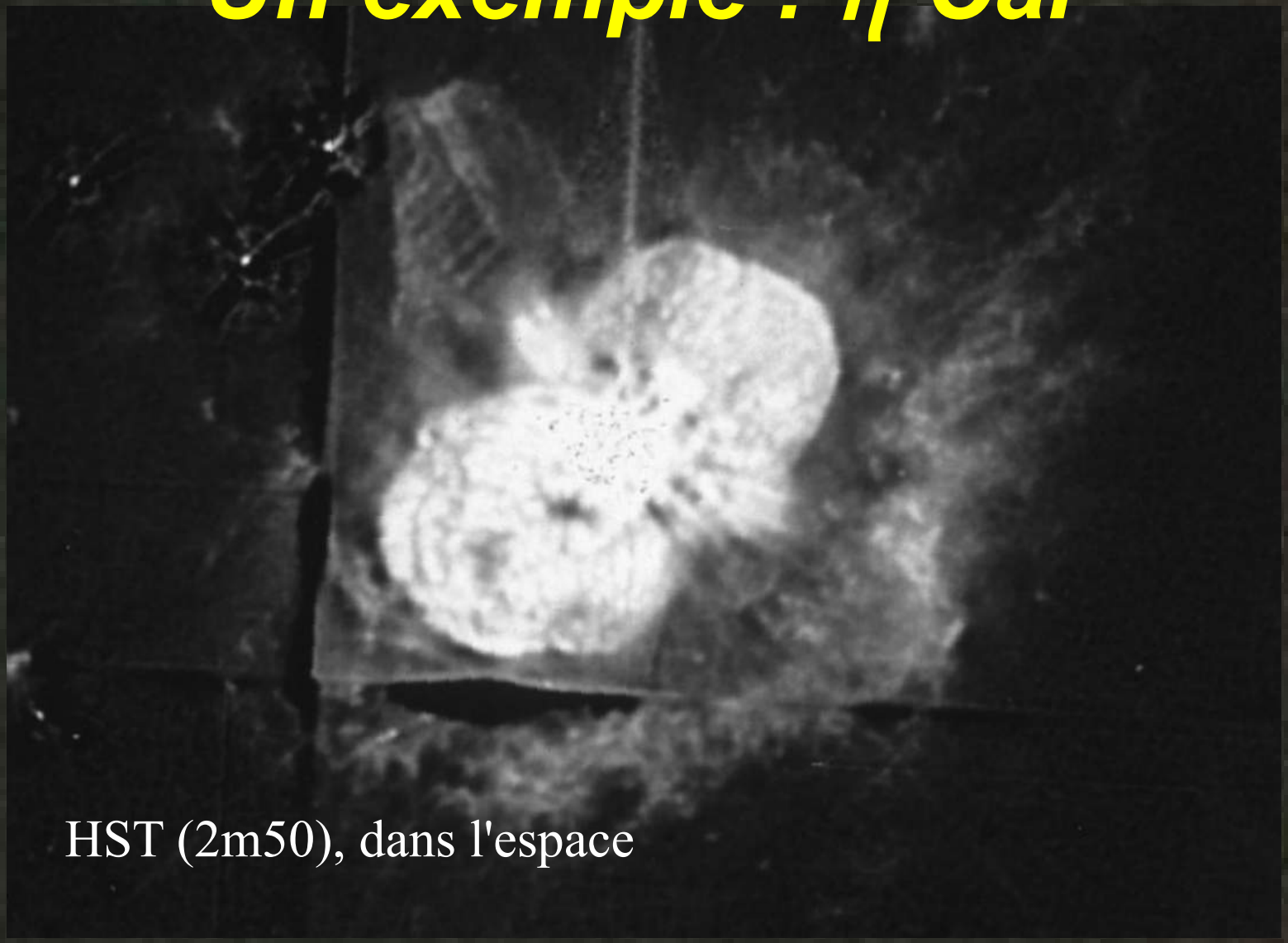
Ex-candidat $M > M_{Eddington}$

Nébuleuse de l'Homunculus (1841)

Pourquoi la HRA ?
Un exemple : η Car

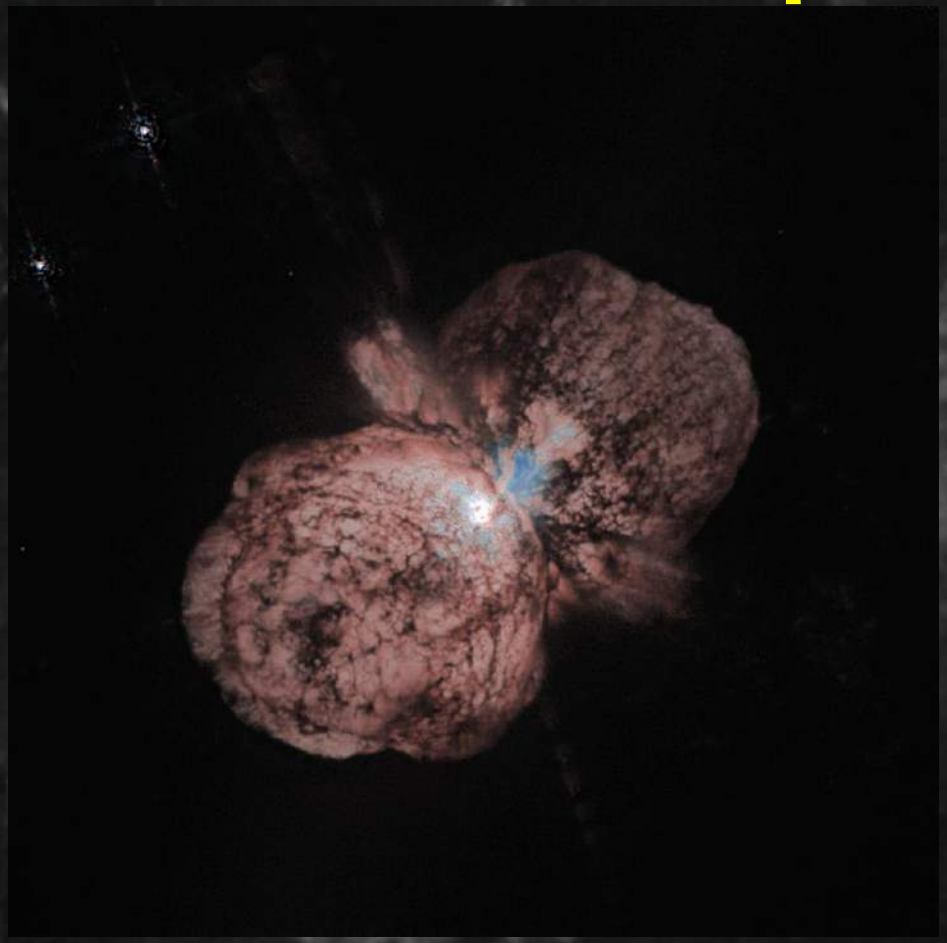
AAT (4m), limité par le seeing

Pourquoi la HRA ?
Un exemple : η Car



AAT (4m), limité par le seeing

Pourquoi la HRA ?
Un exemple : η Car

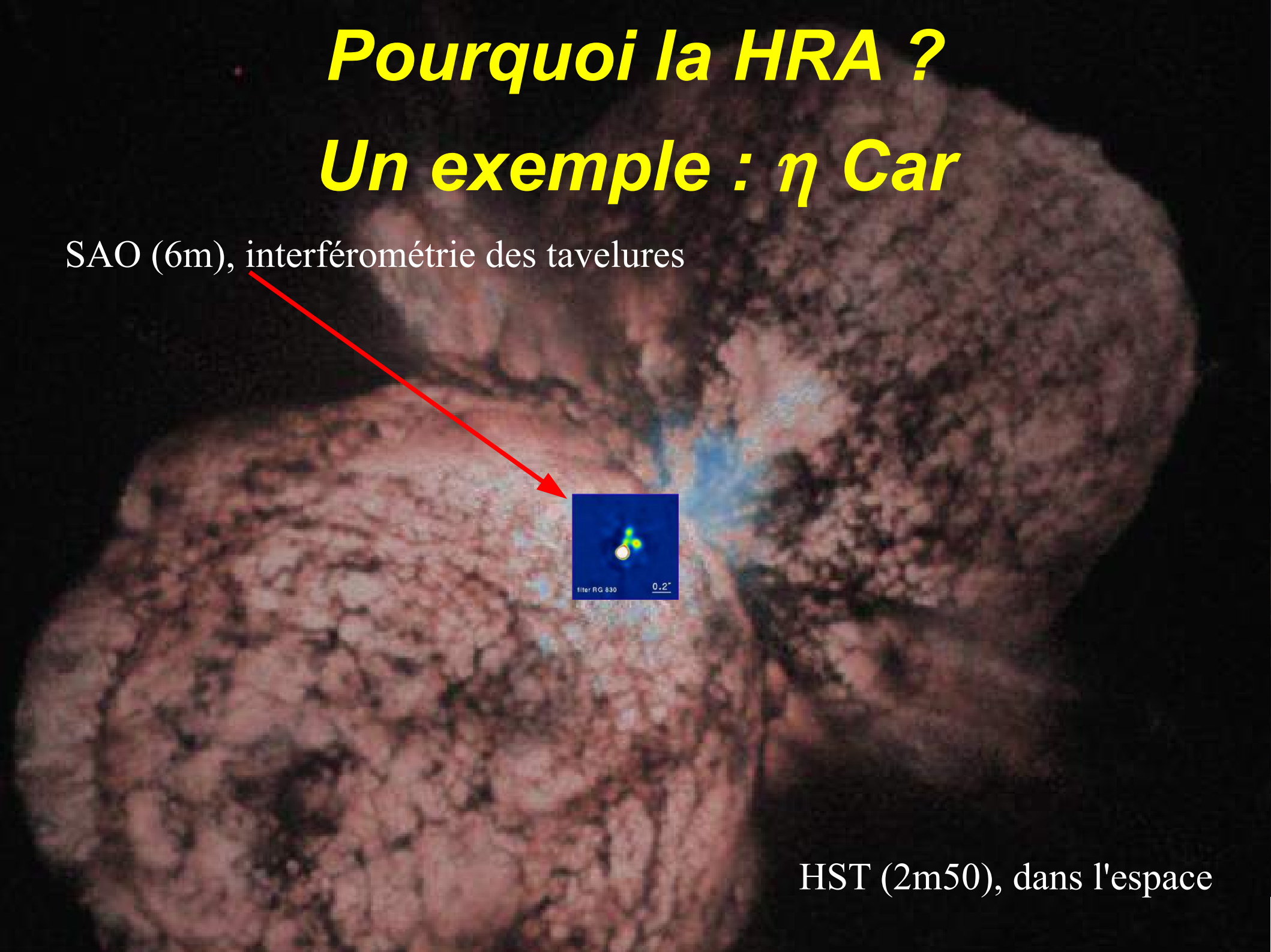


HST (2m50), dans l'espace

AAT (4m), limité par le seeing

Pourquoi la HRA ?
Un exemple : η Car

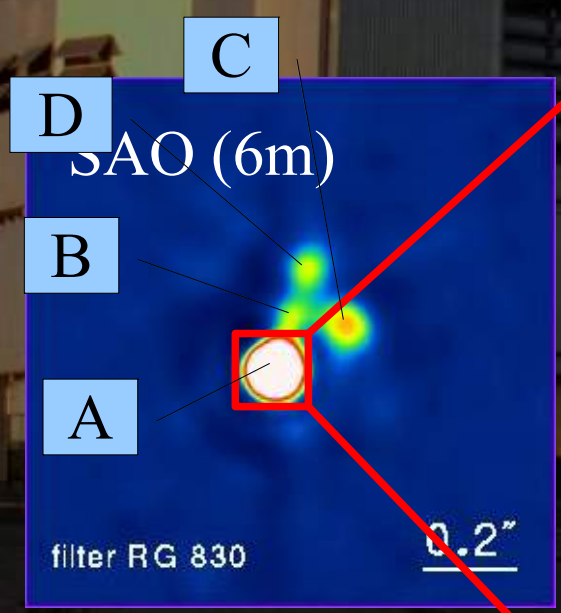
SAO (6m), interférométrie des tavelures



HST (2m50), dans l'espace

Pourquoi la HRA ?

Un exemple : η Car

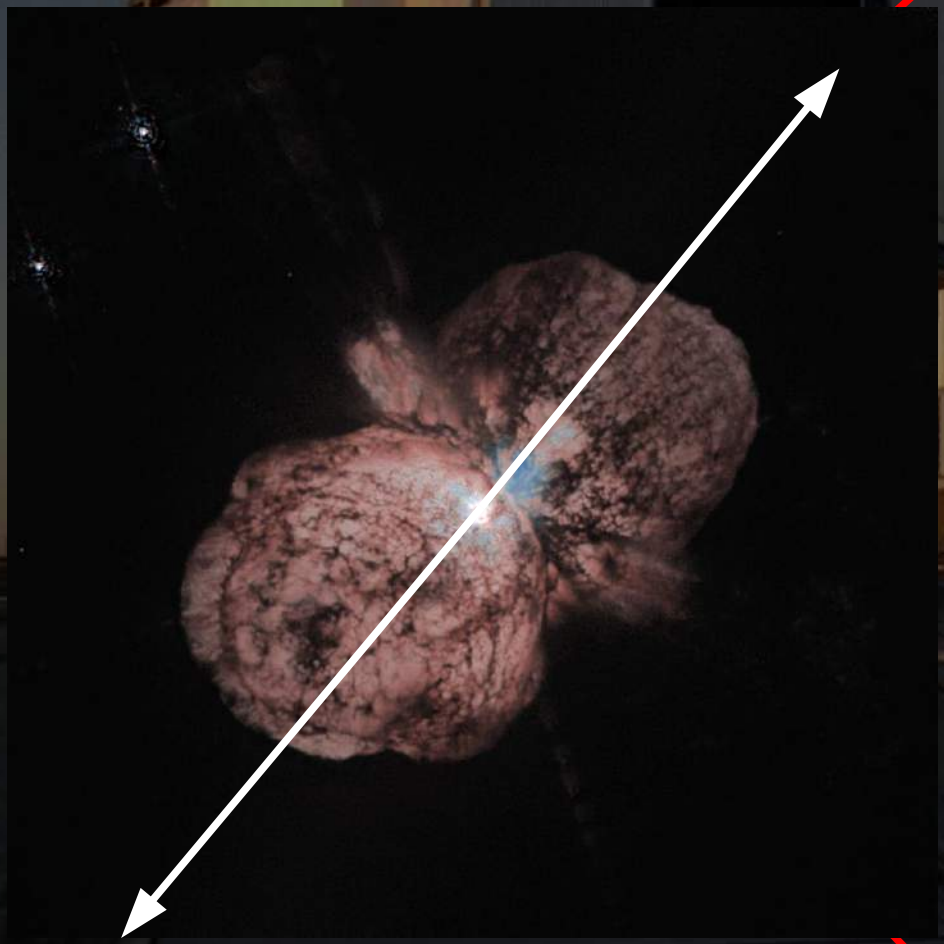


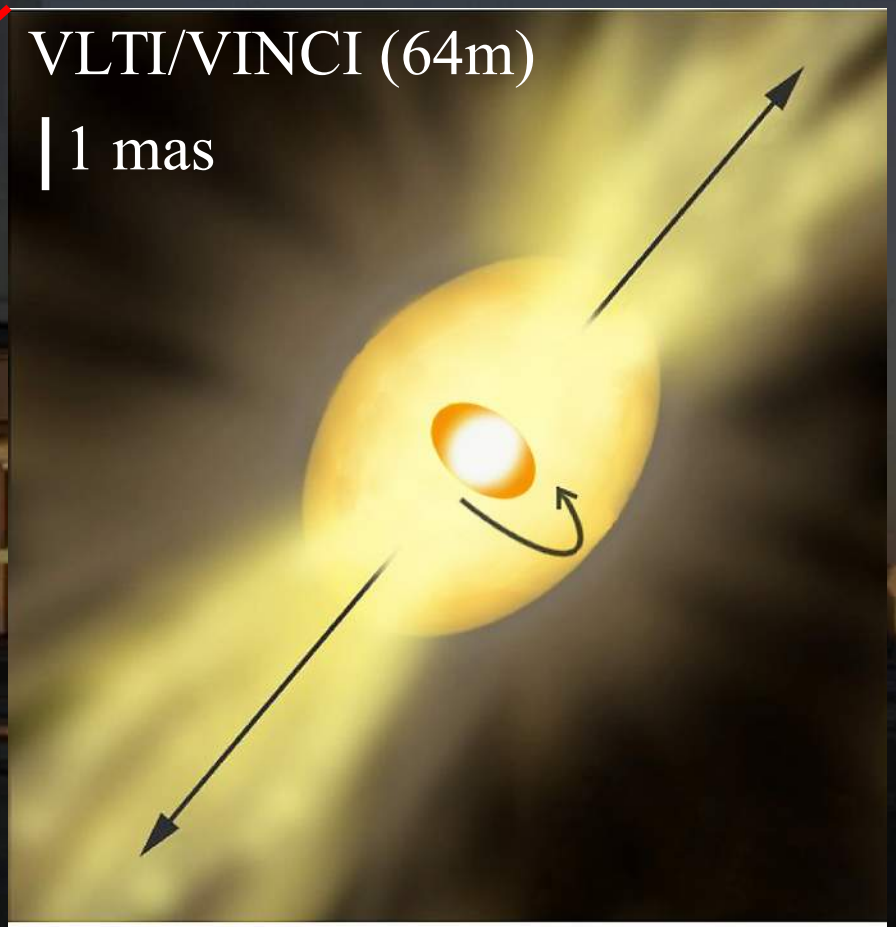
Weigelt & co. 1988

Van Boekel & co. 1998

Pourquoi la HRA ?

Un exemple : η Car





Van Boekel & co. 1998

ESO PR Photo 32b/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

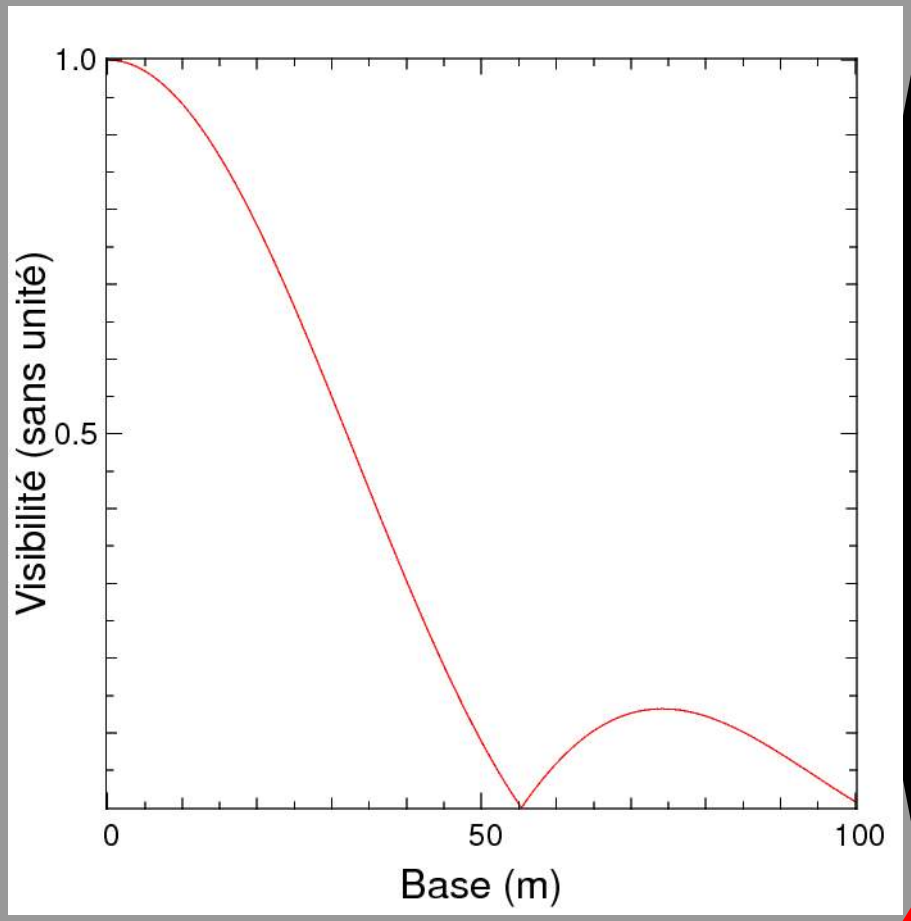
Les étoiles chaudes

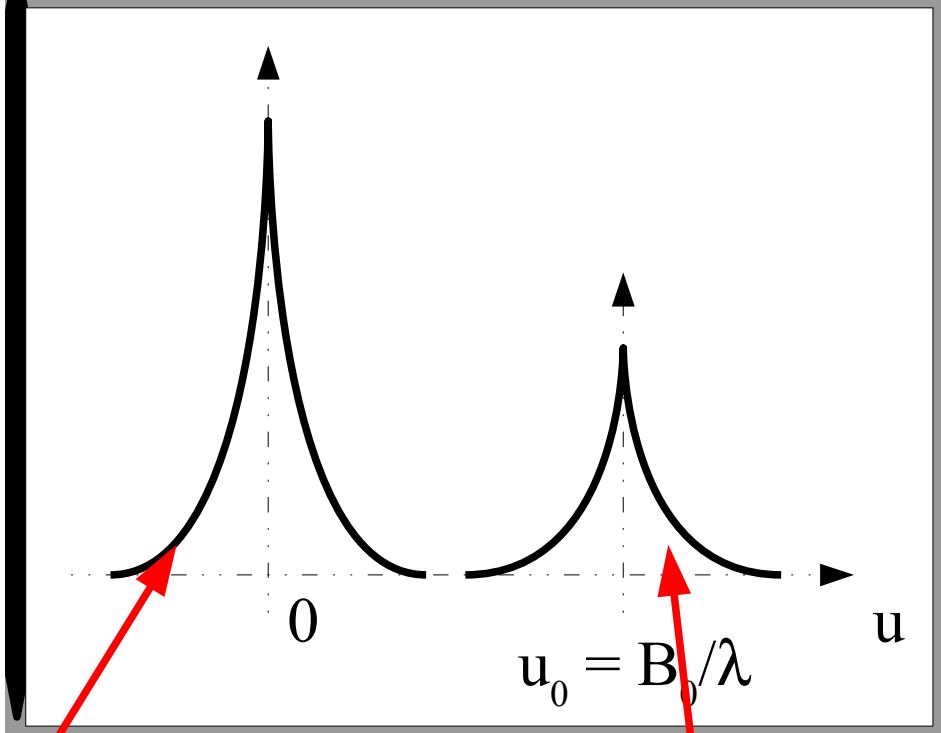
- η Car
- α Arae
- γ^2 Velorum

AMBER et l'interférométrie

L'interféromètre à 2T

Télescopes

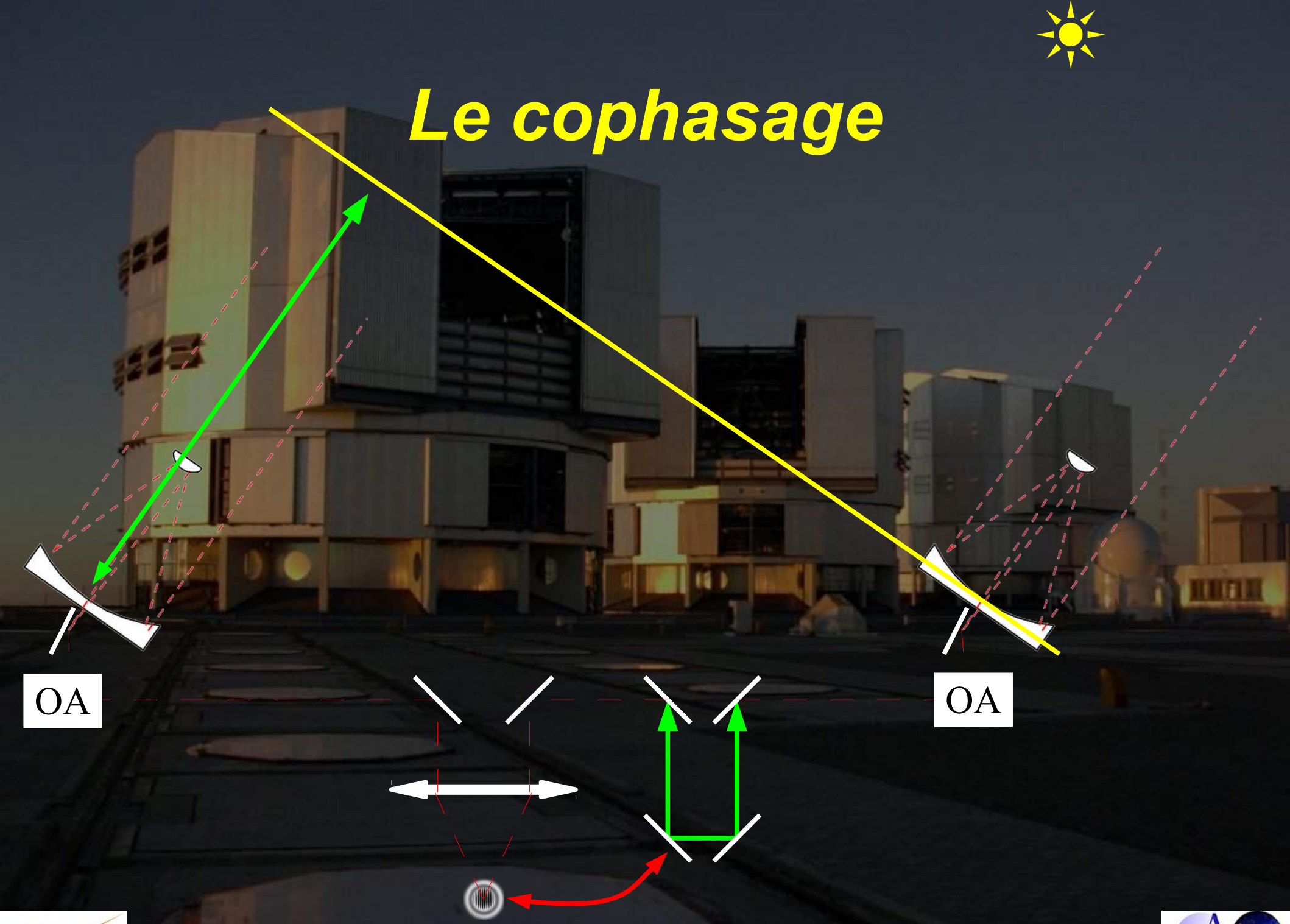




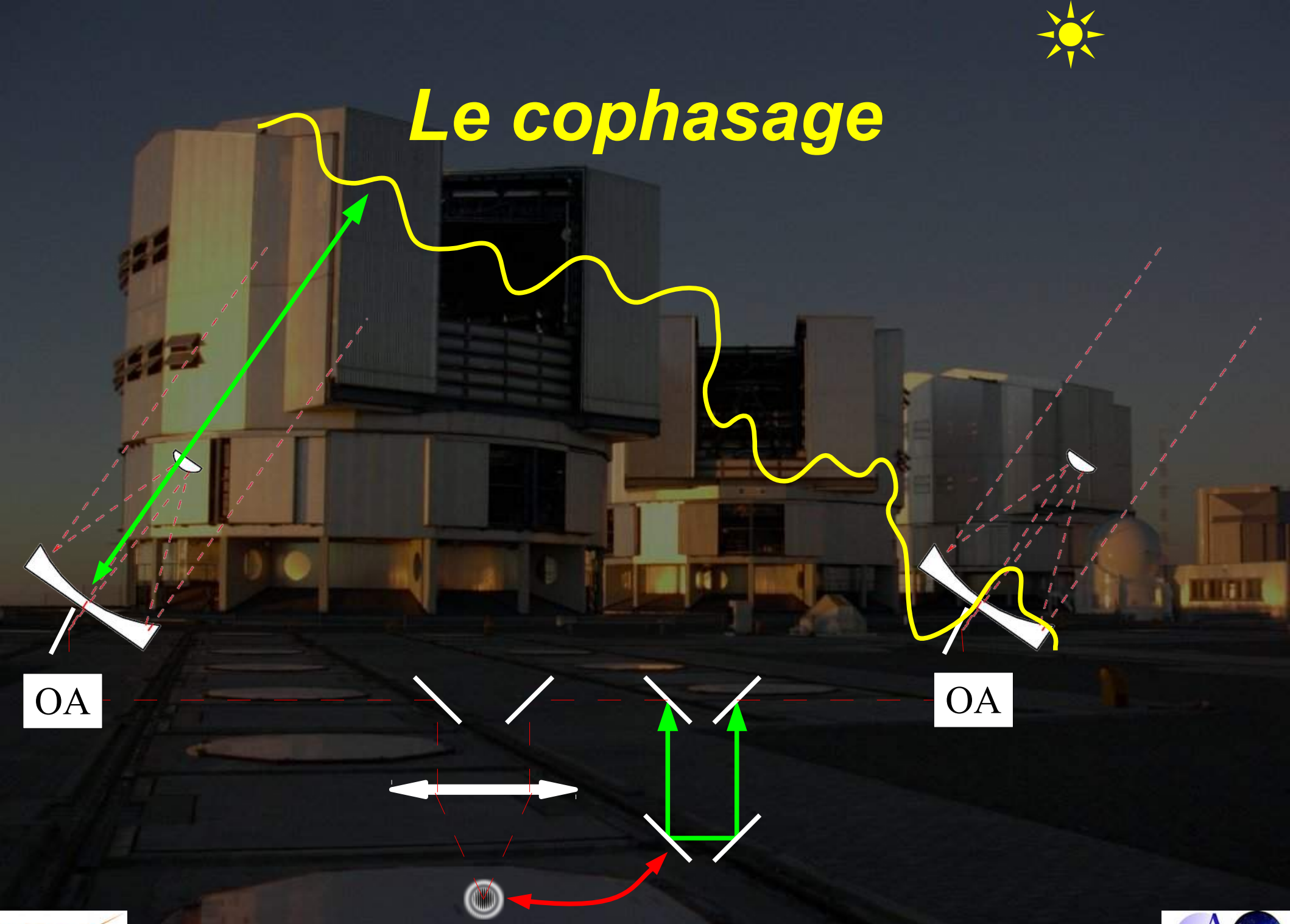
Détecteur

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

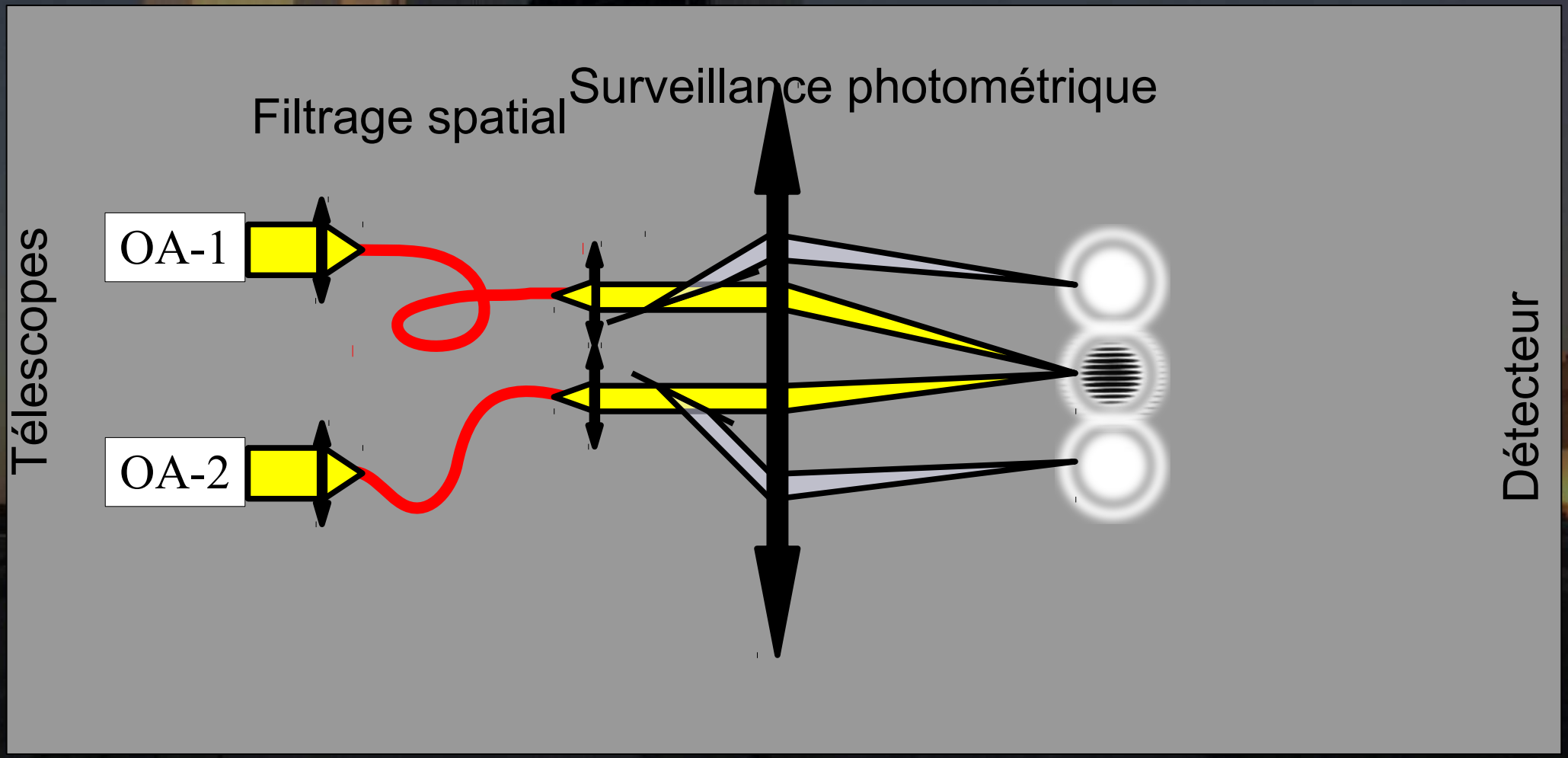
Le cophasage



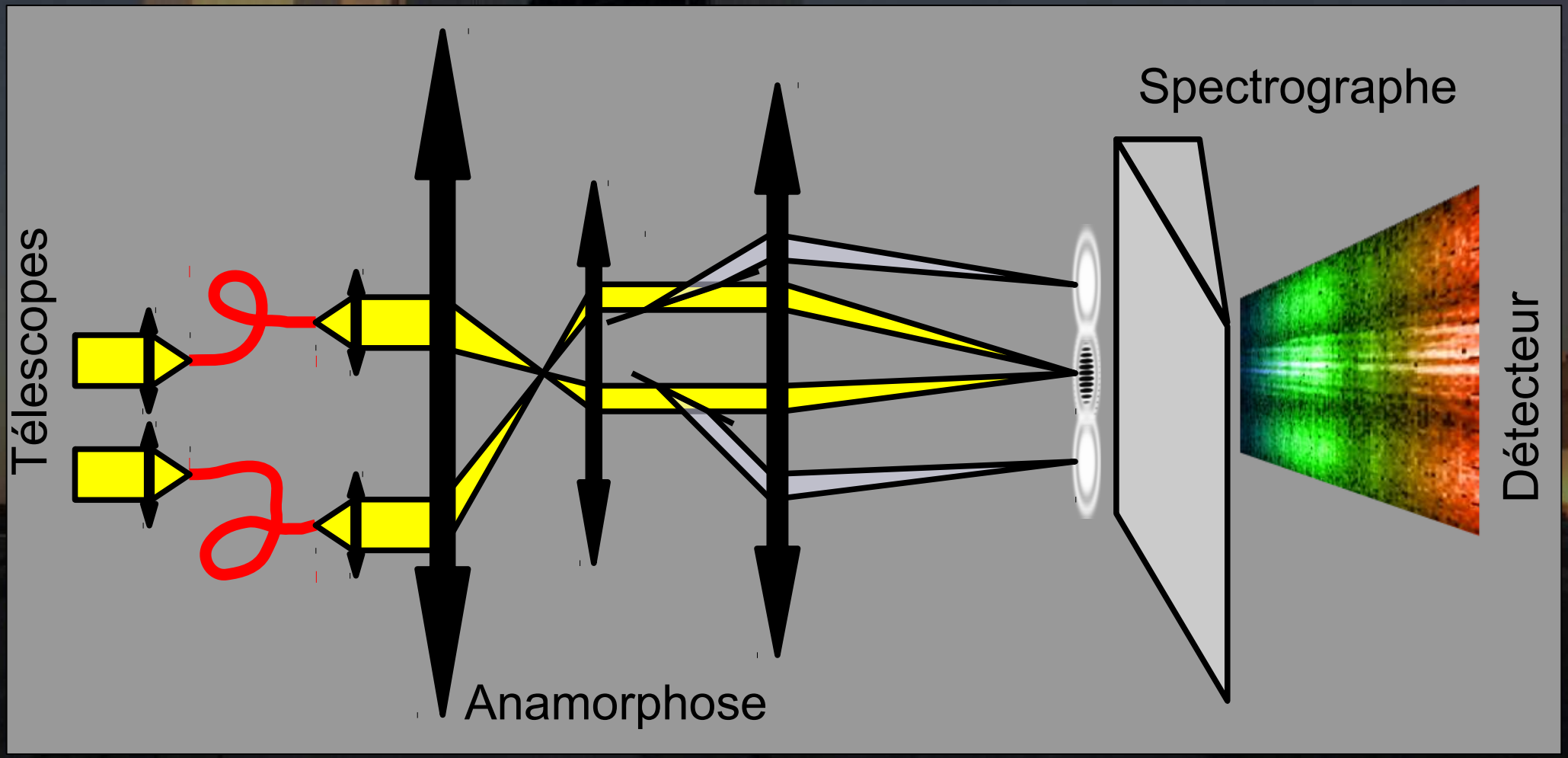
Le cophasage



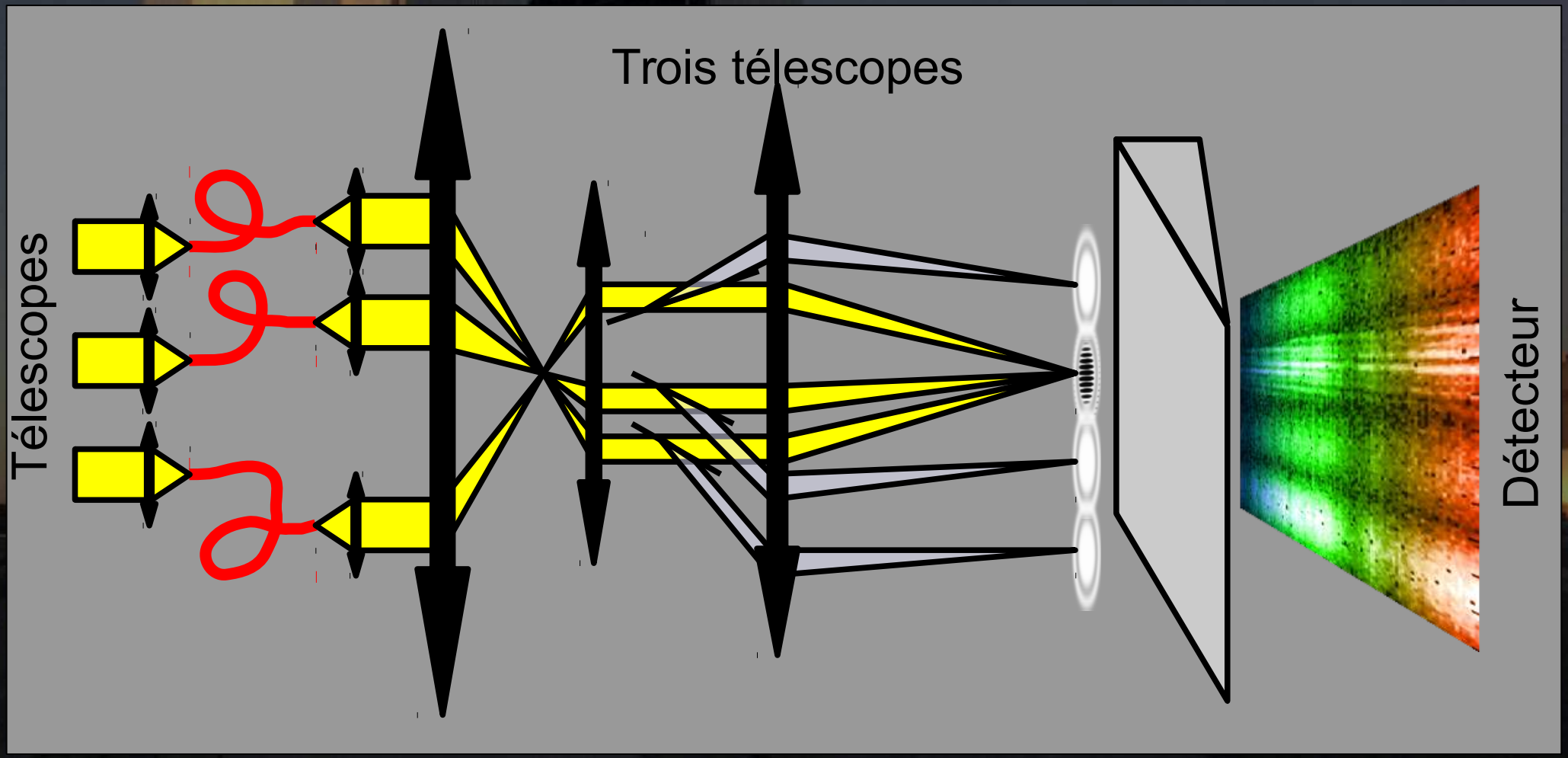
L'interféromètre monomode 2T



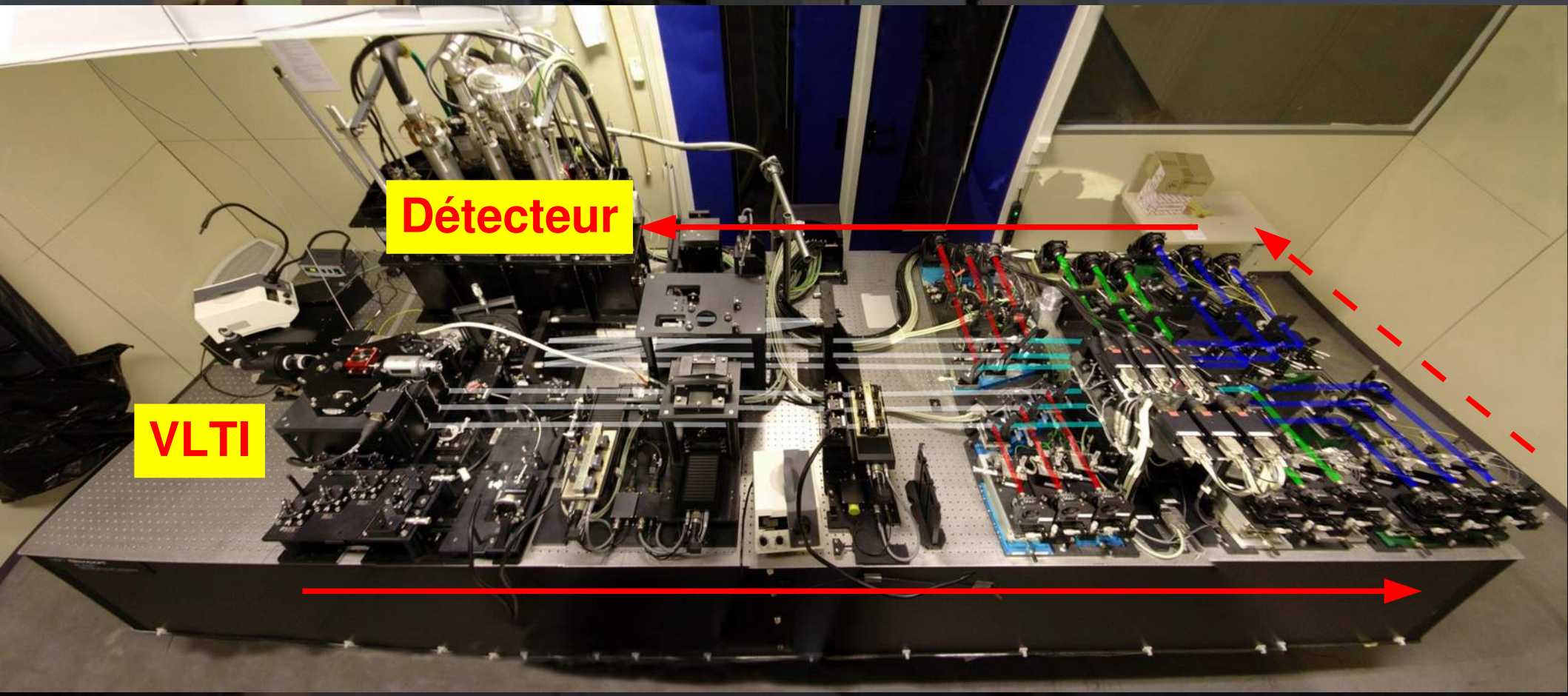
Le spectro-interféromètre monomode 2T



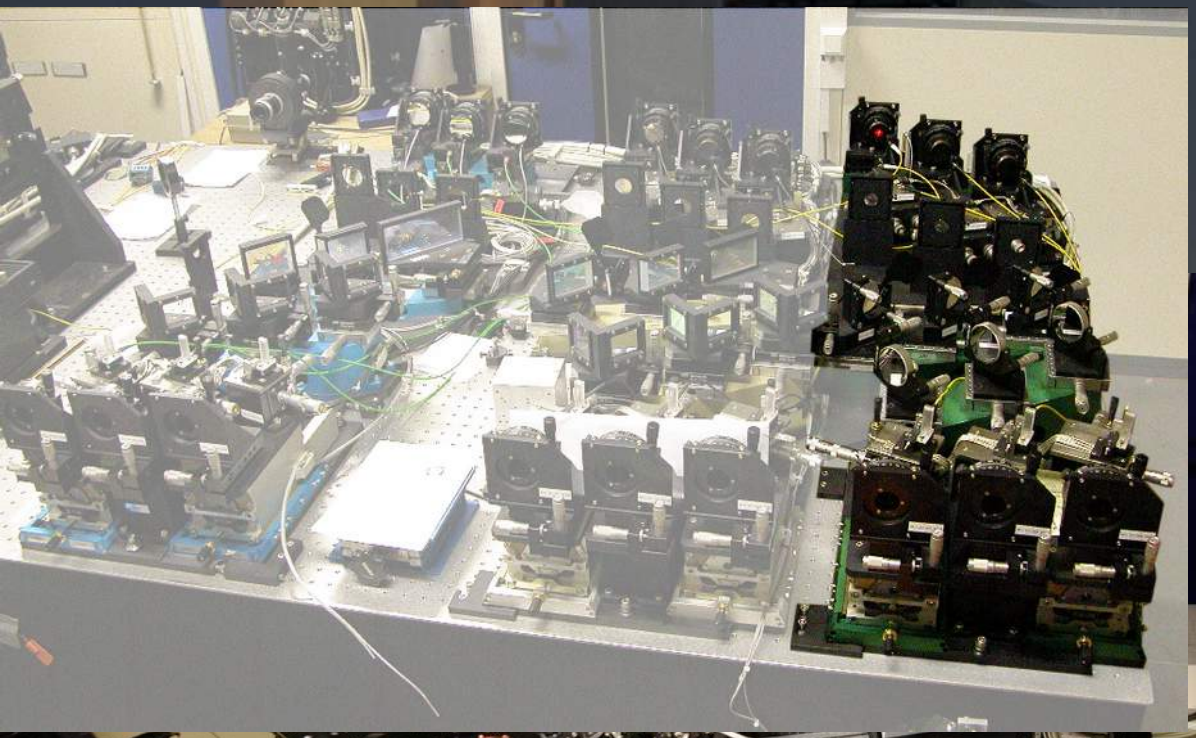
Le spectro-interféromètre monomode 3T



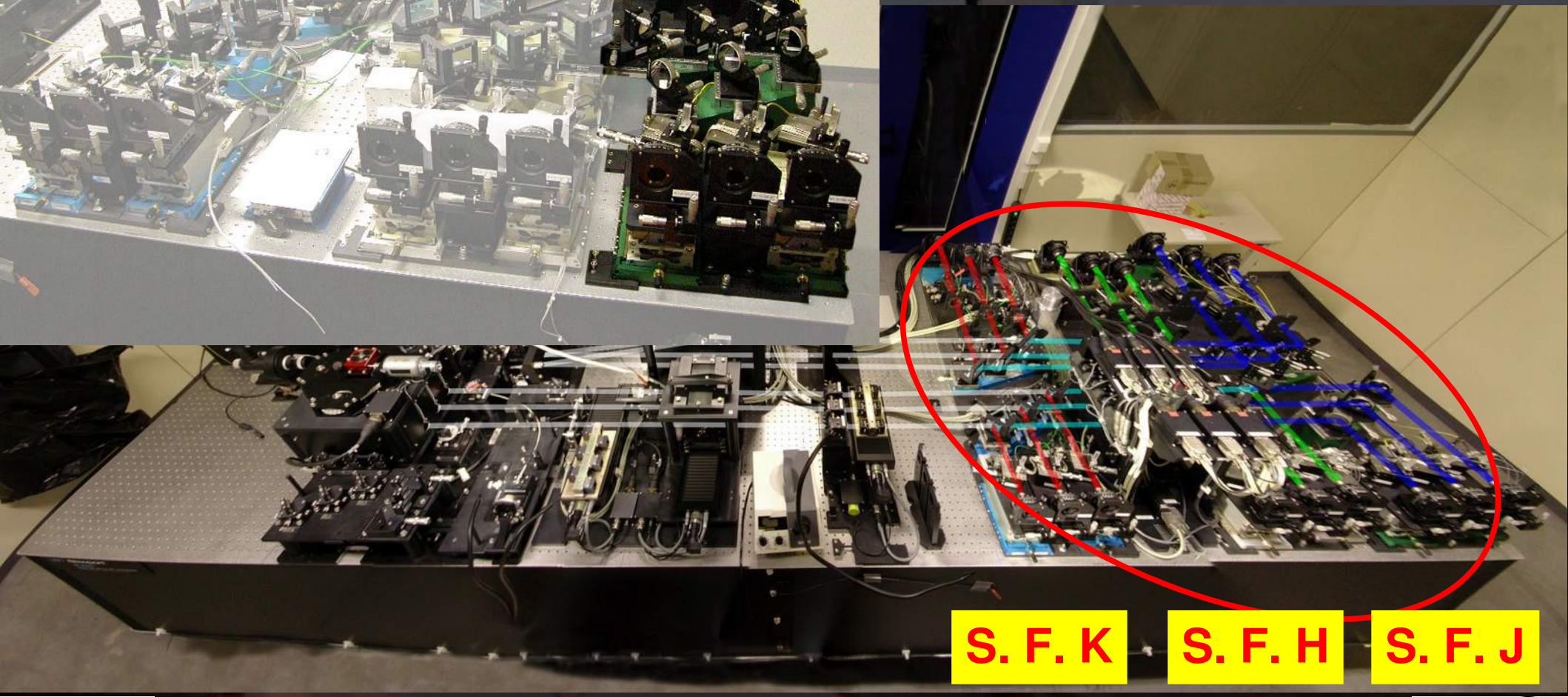
AMBER



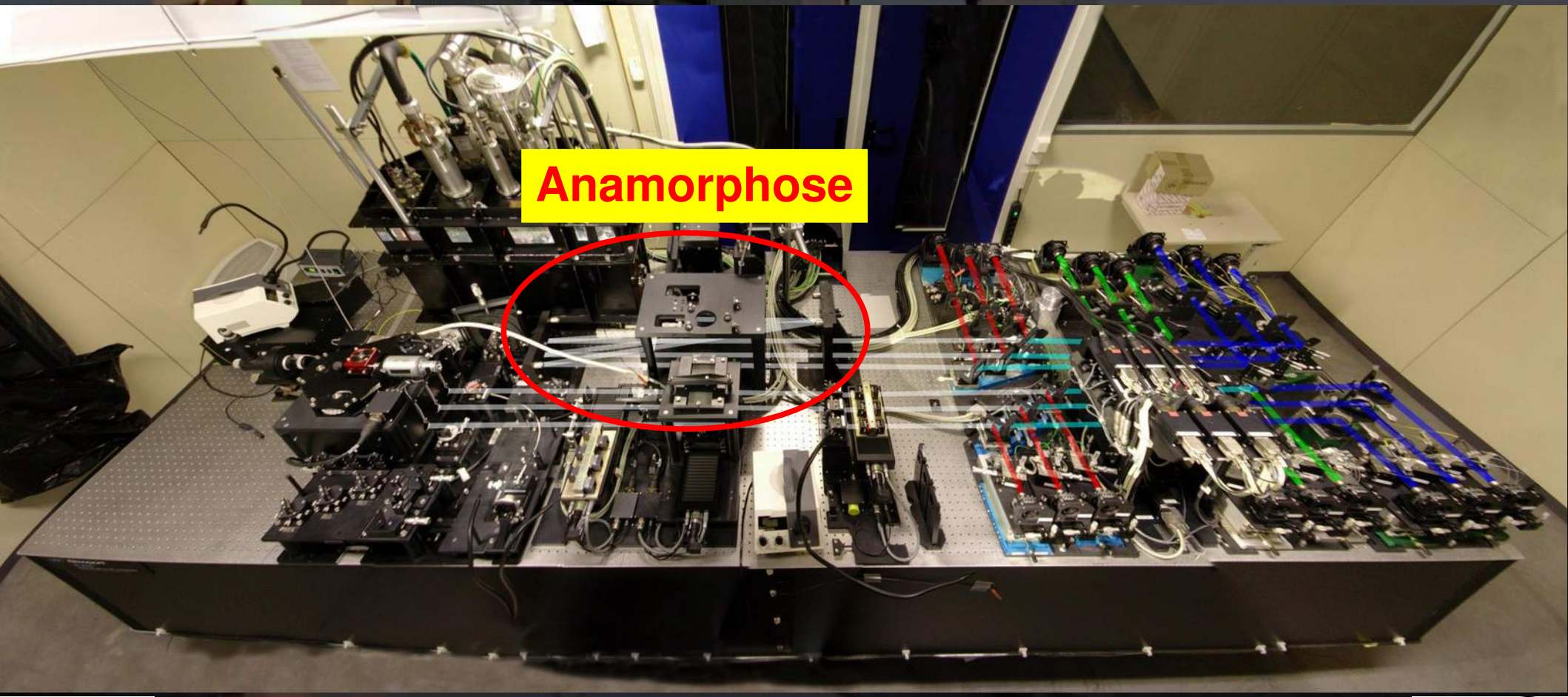
AMBER



J (1.1µm), H (1.5µm)
et K (2.1µm) simultanés



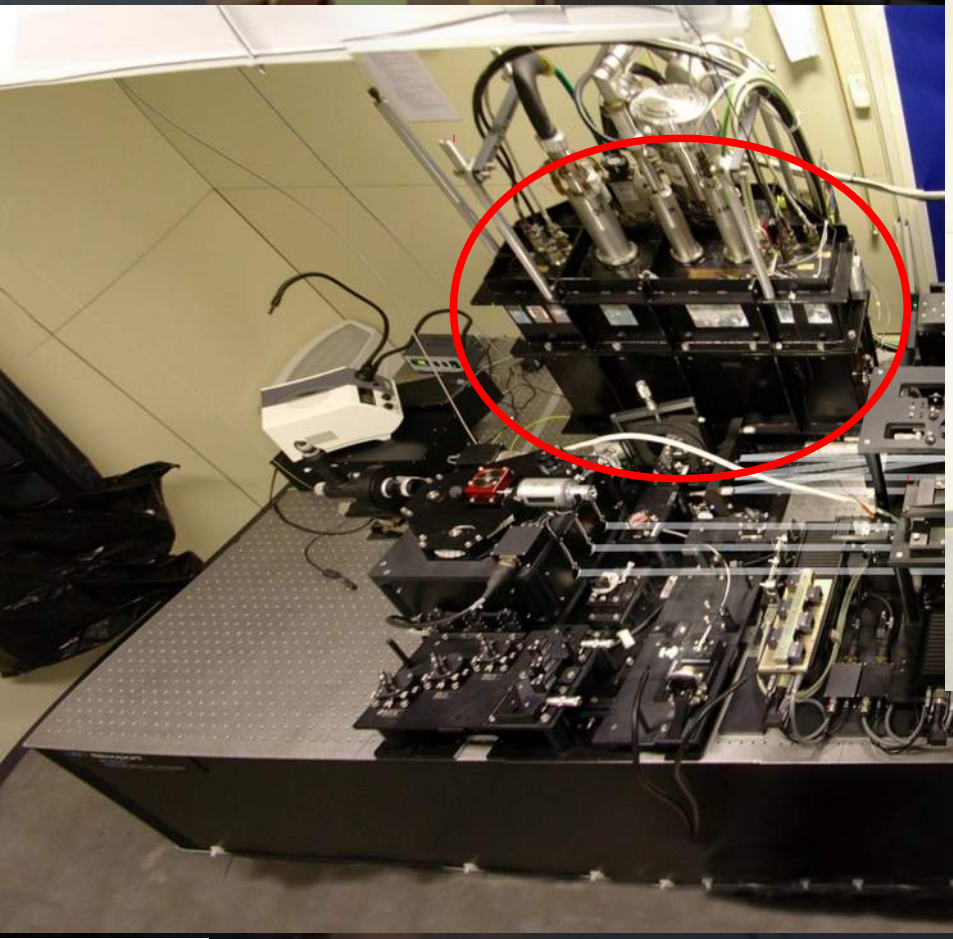
AMBER

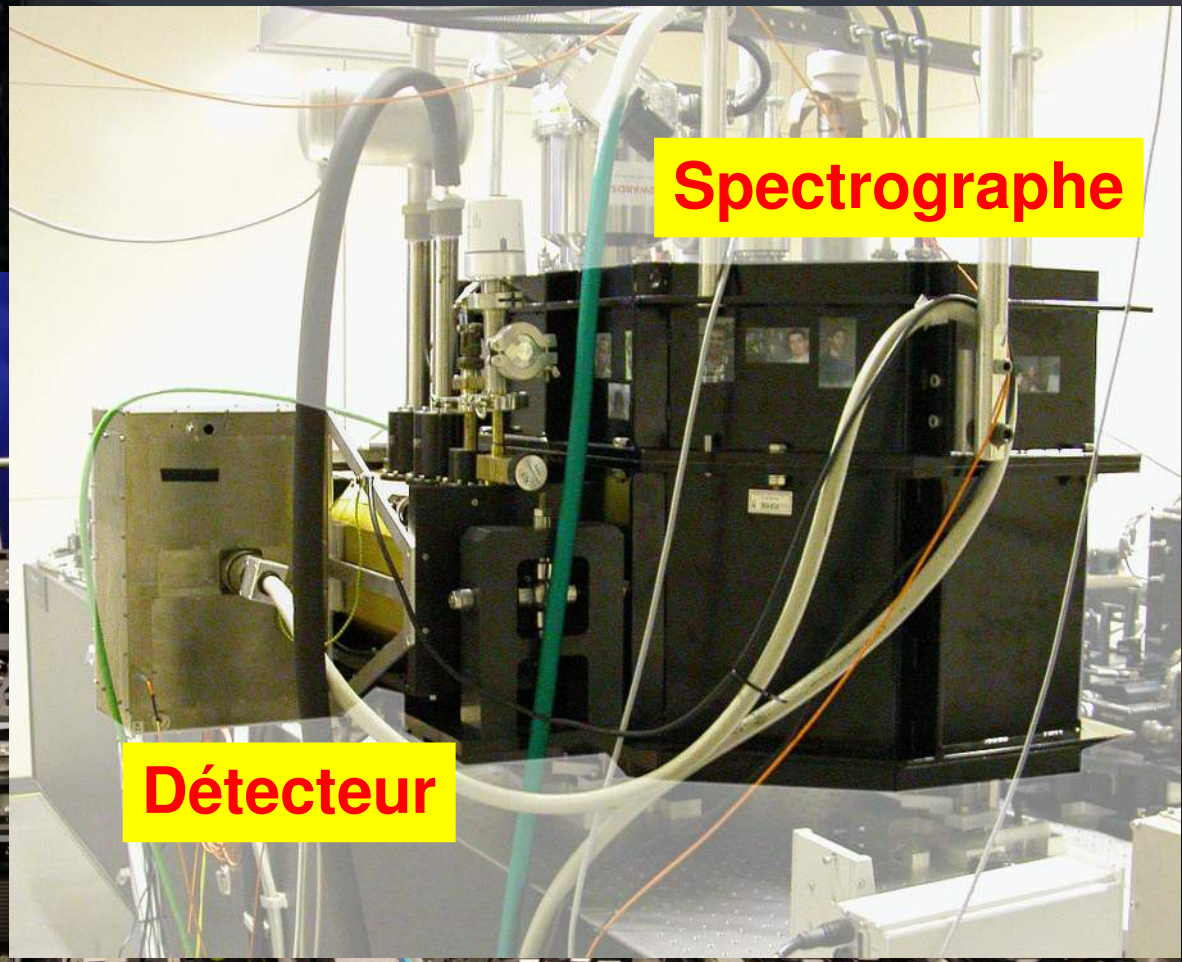


AMBER

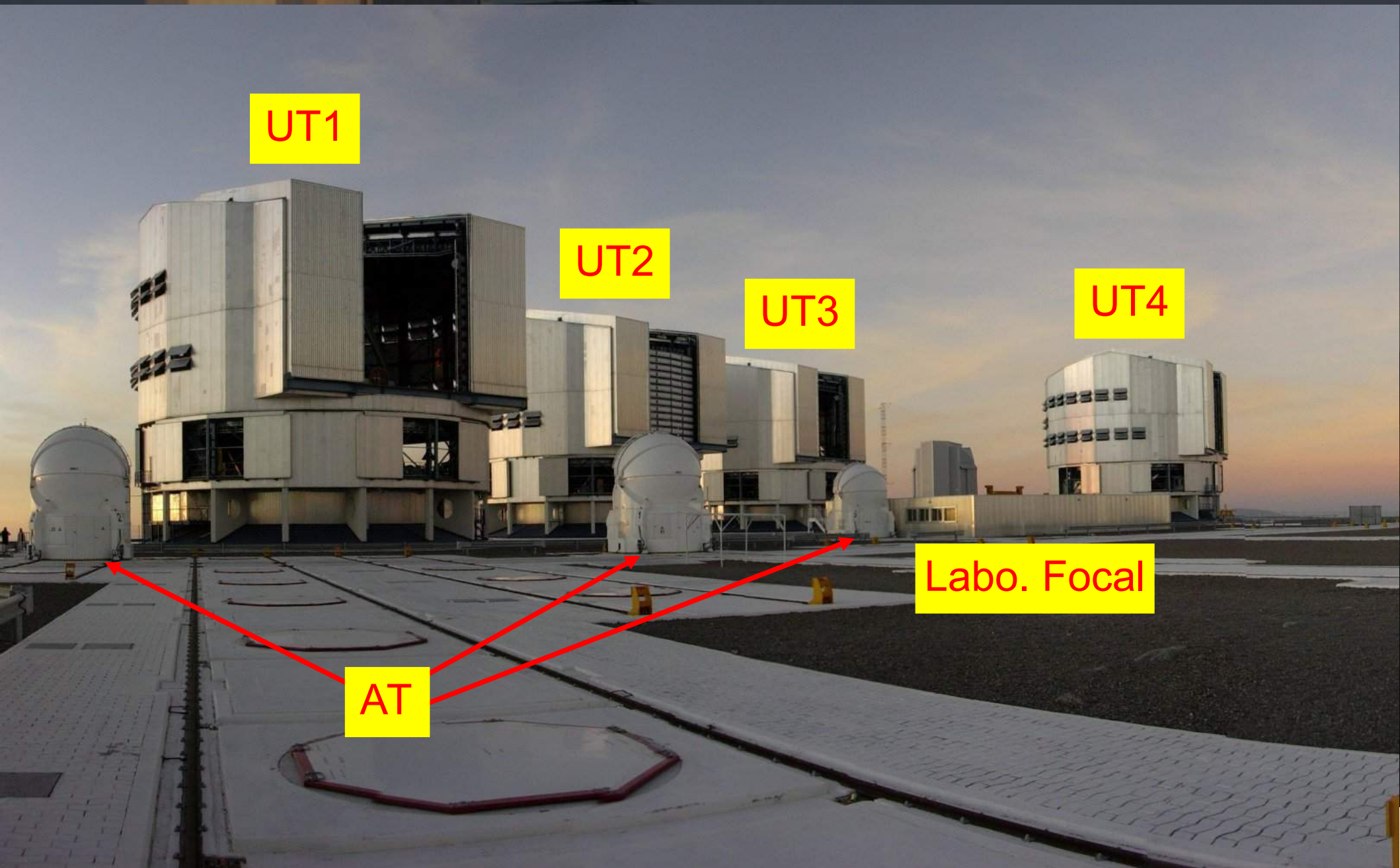
Rockwell Hawaii, $\sigma_{det} = 12e^-$

R = 35, 1500 ou 12000

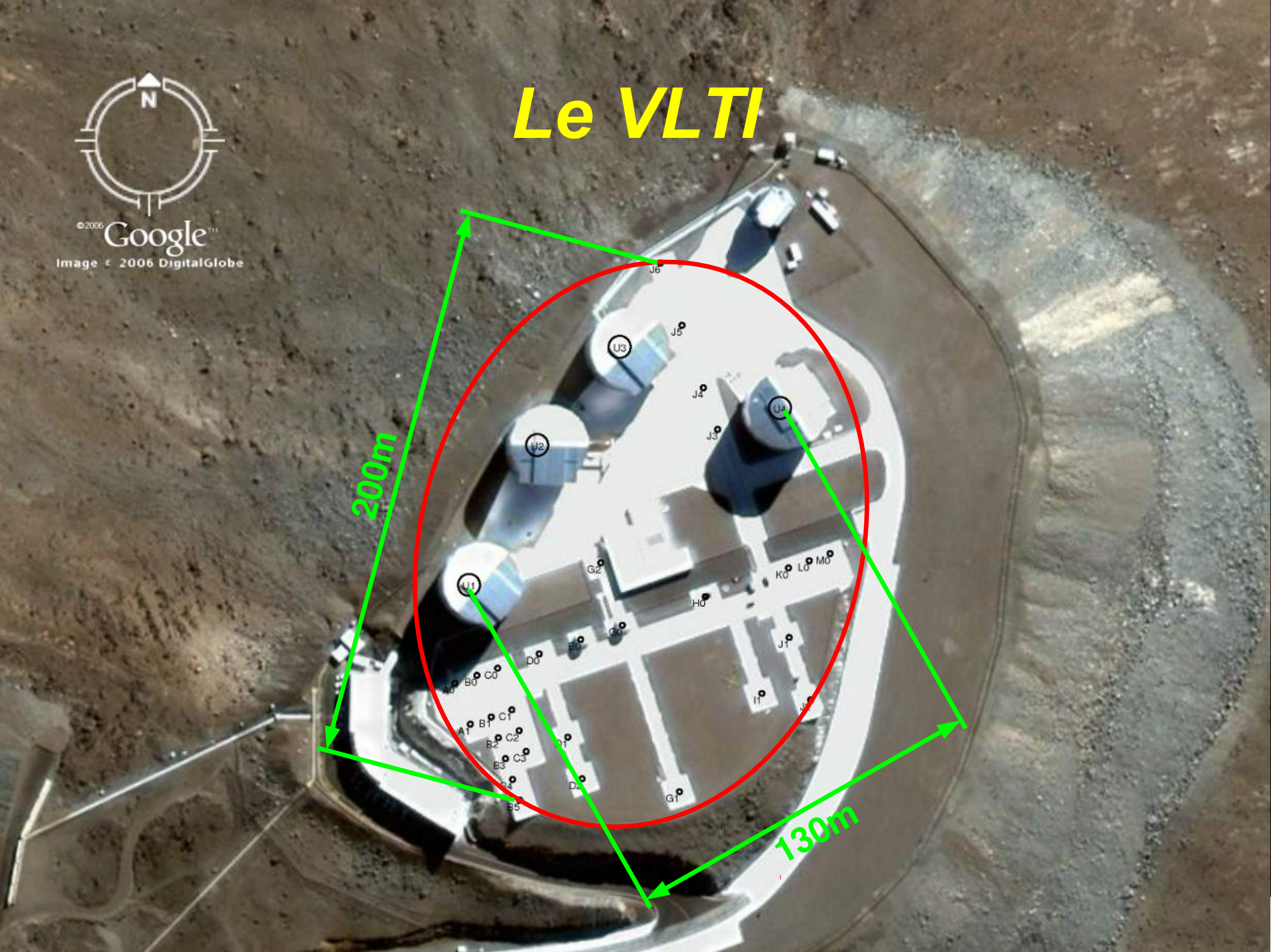




Le VLTI



Le VLTI


©2006 Google
Image © 2006 DigitalGlobe
N
200m
130m
U1
U2
U3
U4
J6
J5
J4
J3
G2
H0
K0
L0
M0
J1
I1
D0
E0
G0
B0
C0
A0
A1
B1
C1
B2
C2
B3
C3
B4
B5
D1
D2
G1

Plan

Contexte

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

Traitement du signal et instrumentation

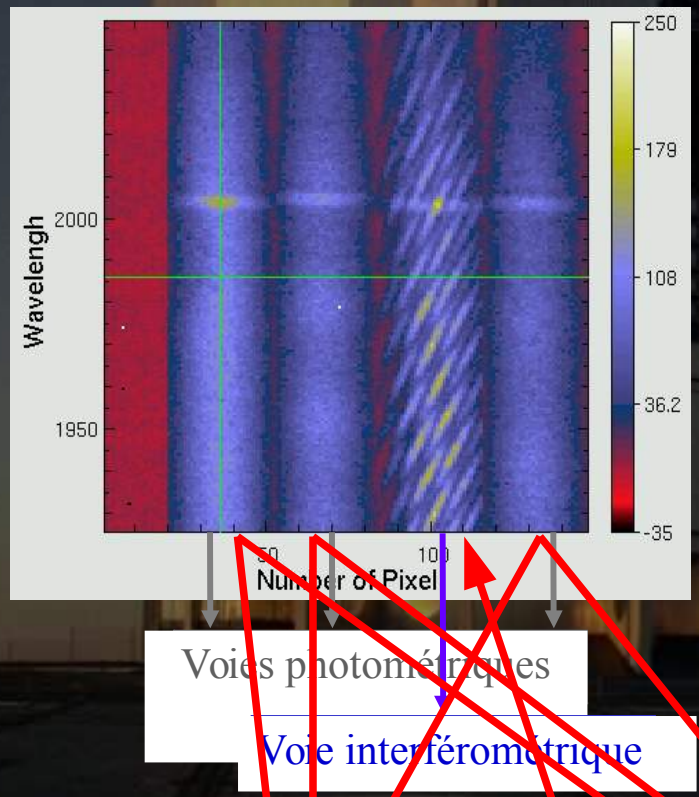
- Les observables d'AMBER
- L'apport potentiel de la phase différentielle
- Les vraies données

Les étoiles chaudes

- η Car
- α Arae
- γ^2 Velorum

Les observables d'AMBER

L'équation interférométrique multiaxiale monomode



i_k : Flux mesuré par pixel

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

a^i_k : 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

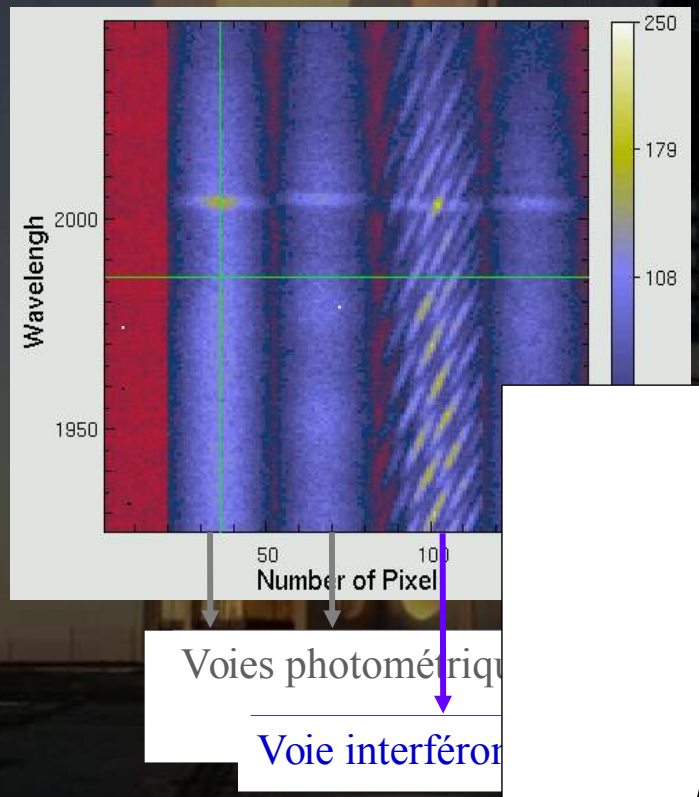
$\phi_c^{i,j}$: Phase de piston chromatique

Figure de franges :

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

mesurée sur M images

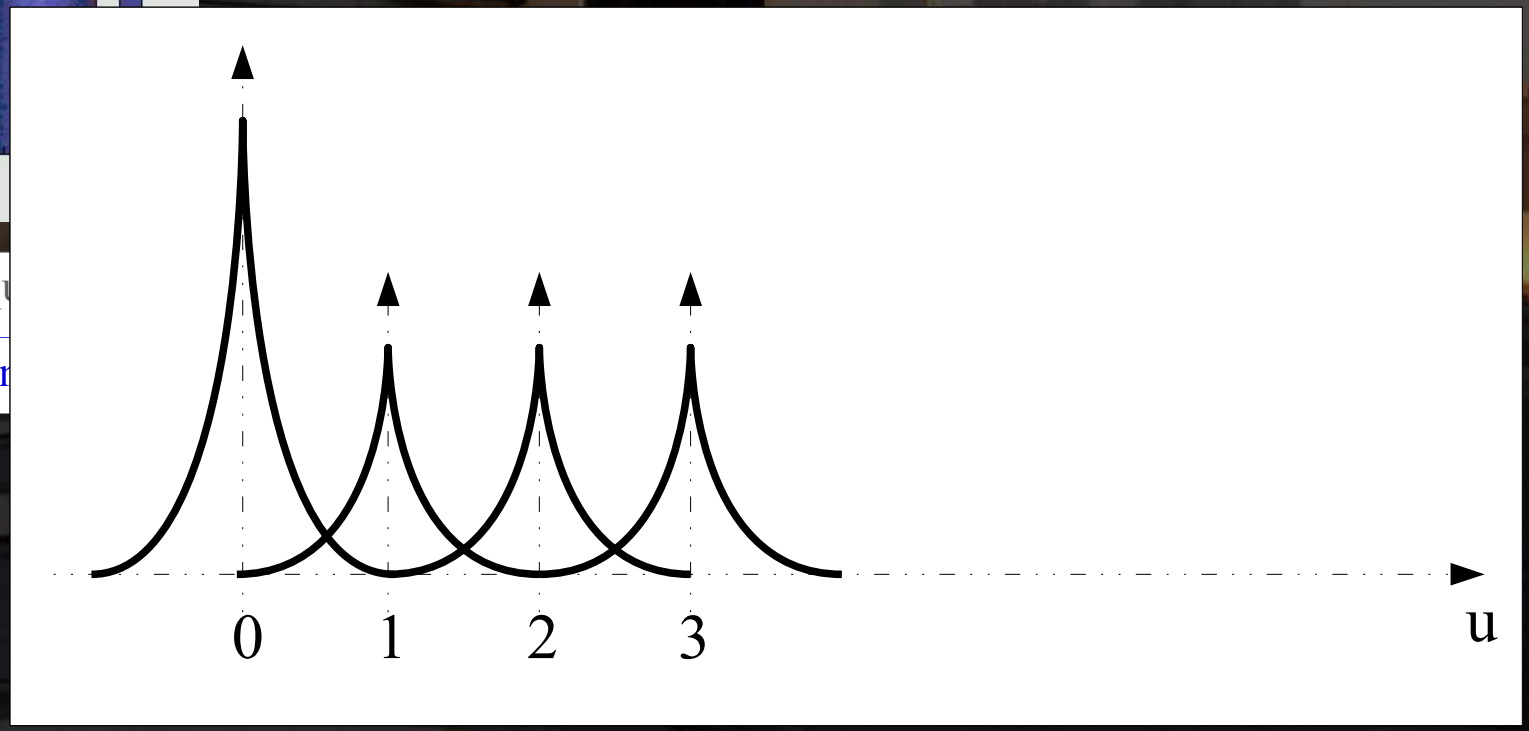
L'algorithme P2VM



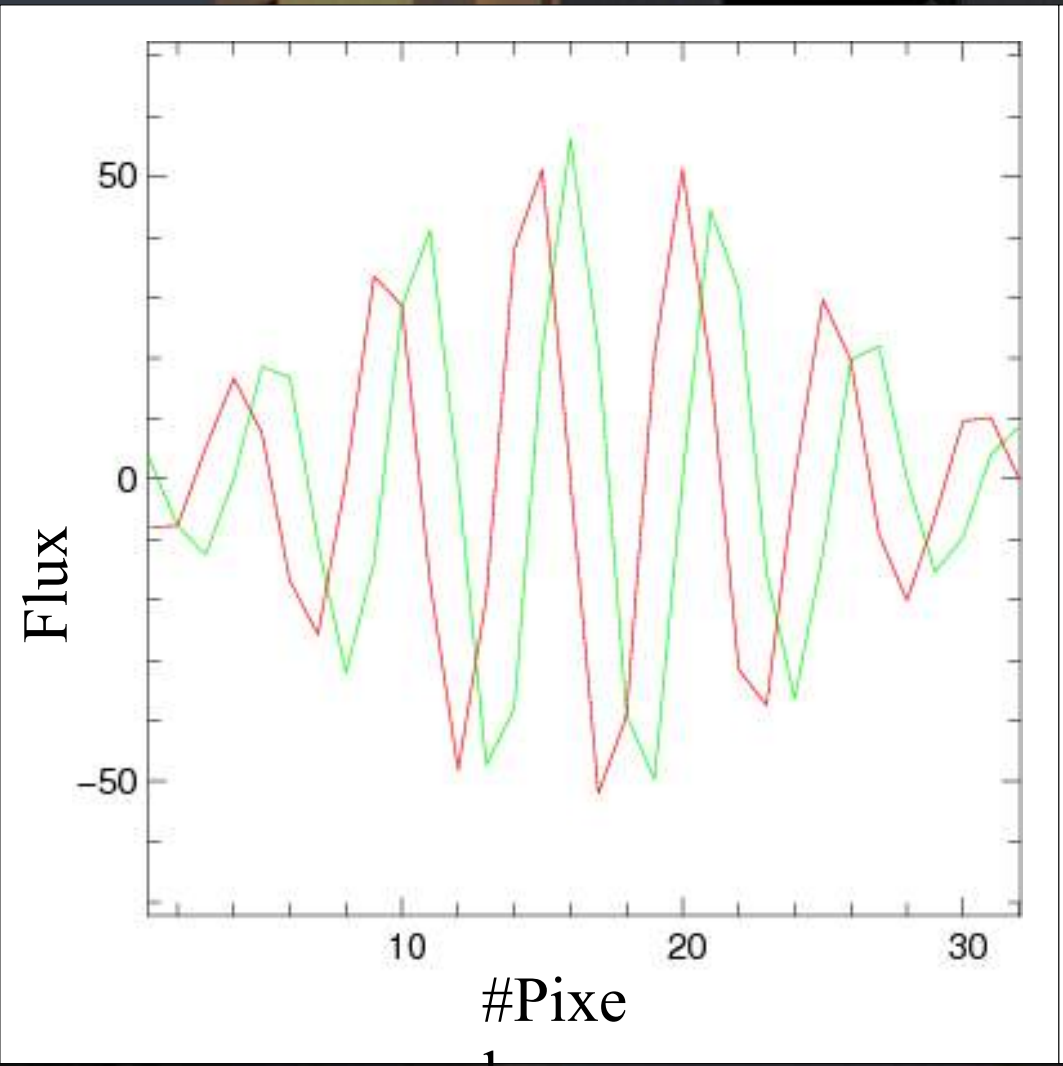
Amélioration RSB ?

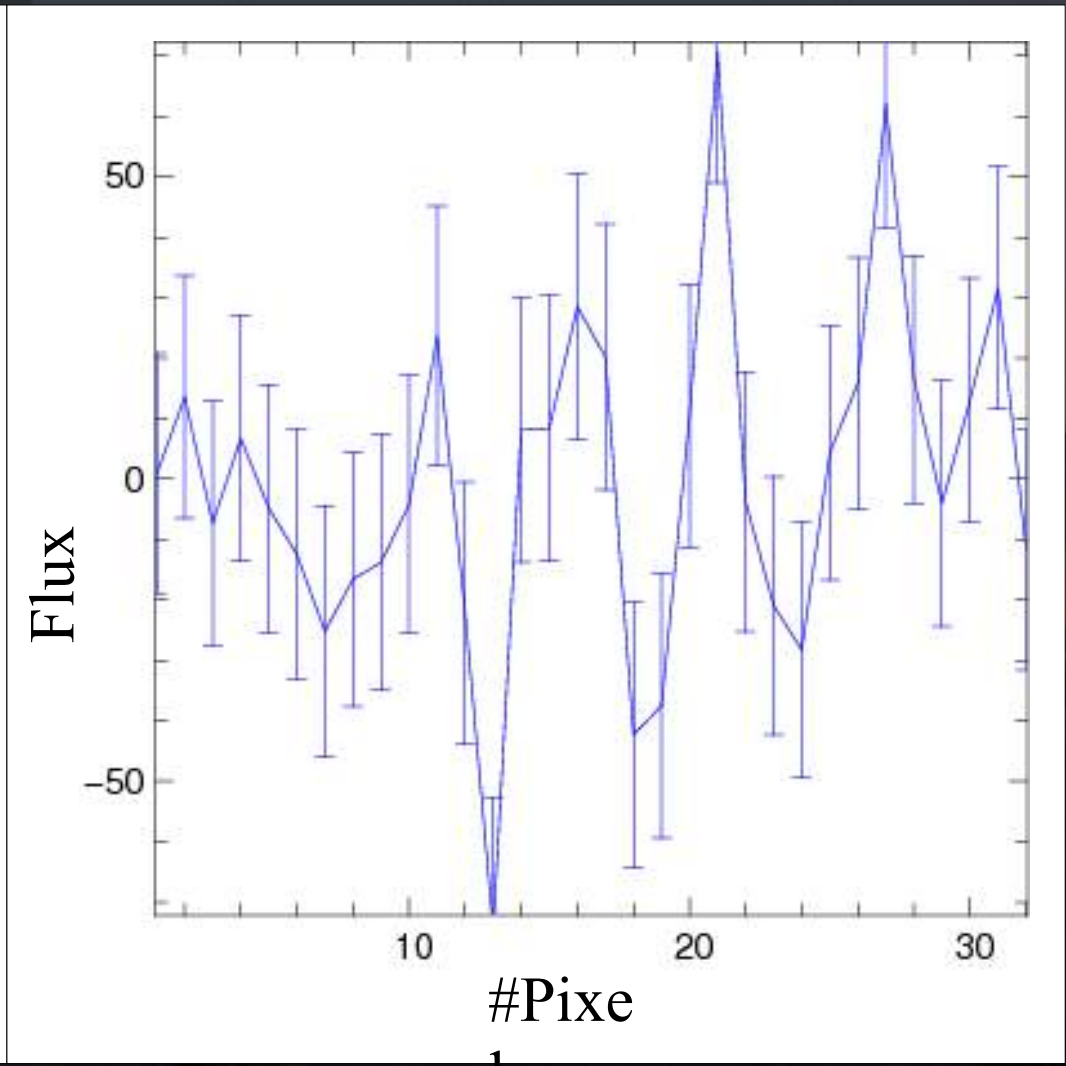
=> Réduction du nombre de pixels

=> Pb avec traitement de Fourier

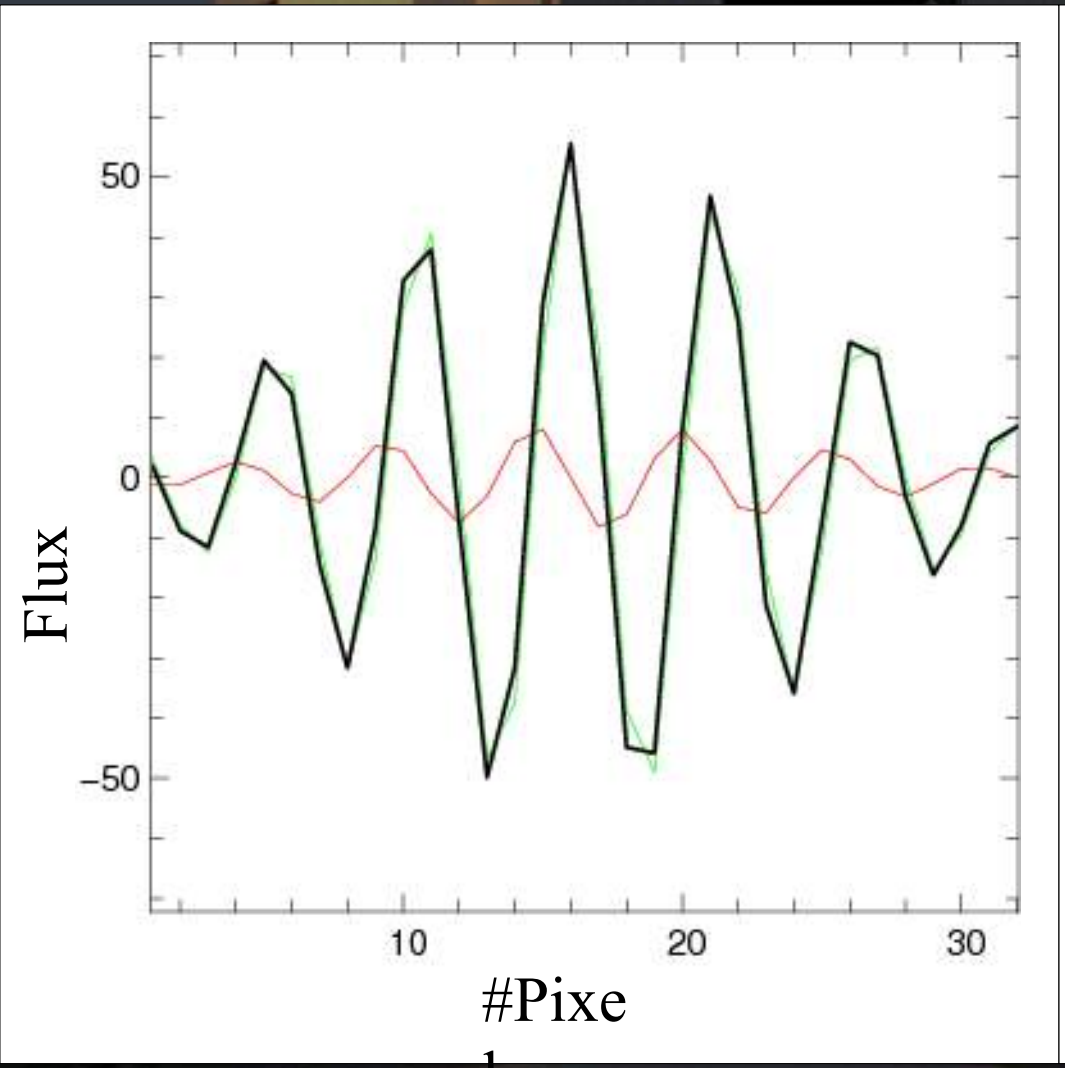


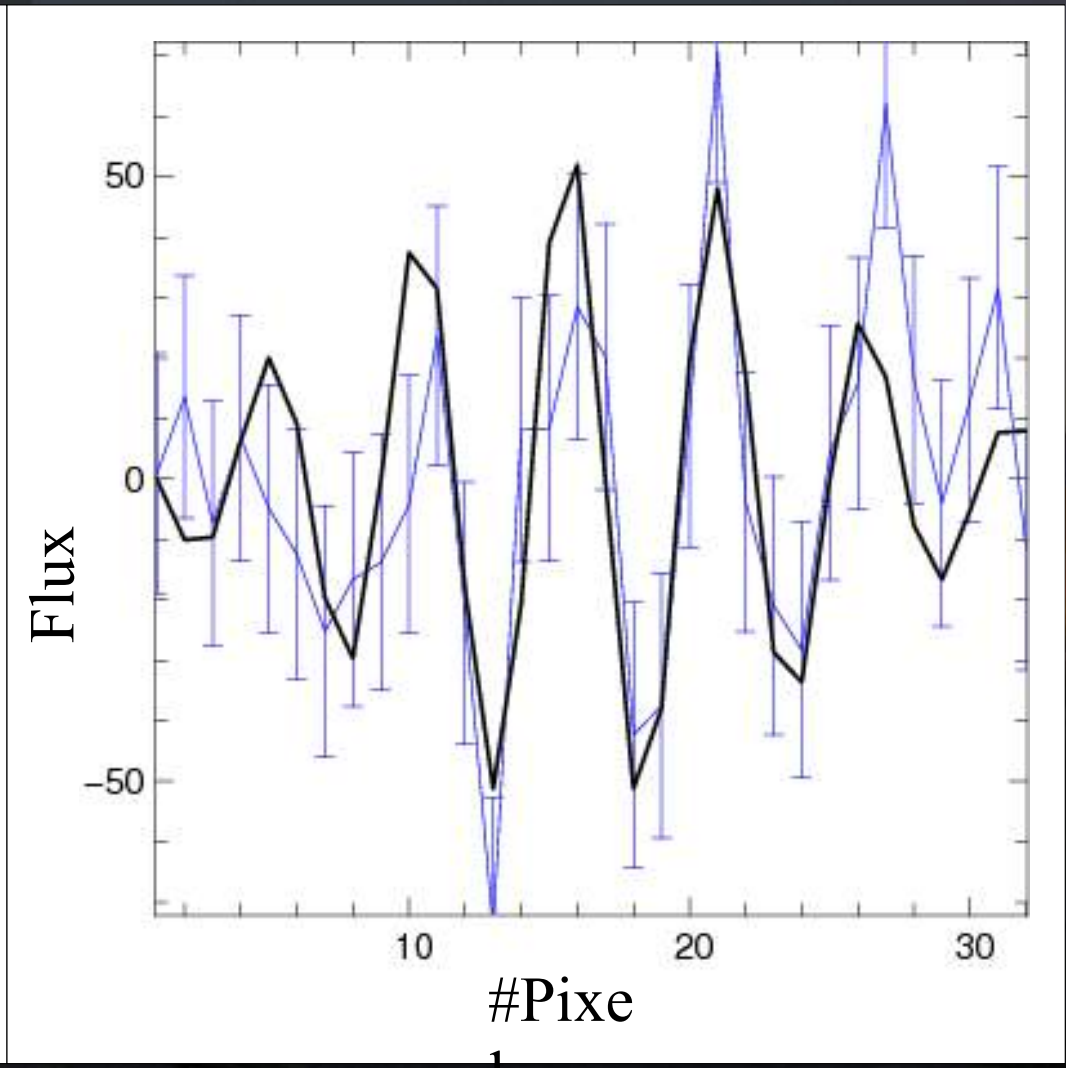
L'algorithme P2VM





L'algorithme P2VM





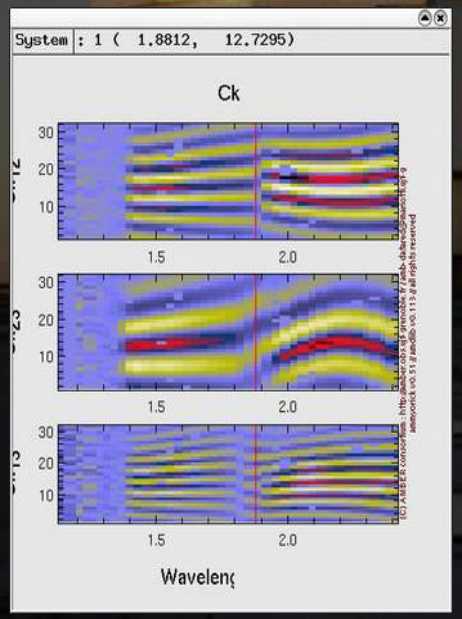
L'algorithme P2VM

C=R+iI est déterminé en minimisant :

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

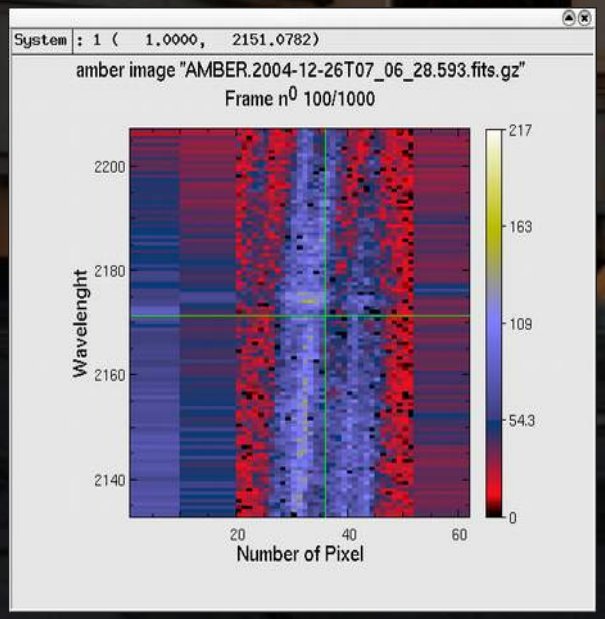
ce qui donne :

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



P2VM
"franges instrumentales"

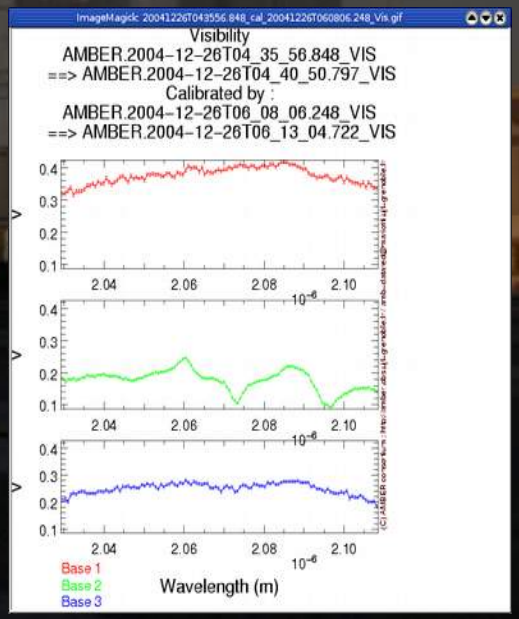
X



Données nettoyées

Multiplication matricielle

=



Observable
(flux cohérent complexe)

L'algorithme P2VM

Est valable si :

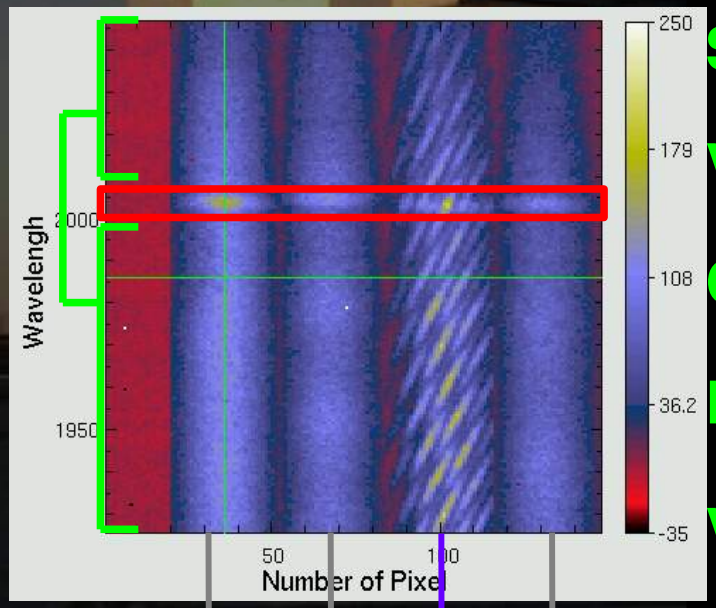
- L'instrument est stable entre la calibration et les observations
- Le RSB sur la P2VM est suffisant
- Les canaux spectraux sont suffisament étroits
- On connaît bien le détecteur
- On connait bien la calibration spec

Toutes les observables spectro-interférométriques d'AMBER

Flux cohérent complexe :

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

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

Phase différentielle : $\Phi^{i,j}_{diff}(\lambda)$

Visibilité différentielle : $V^{i,j}_{diff}(\lambda)$

"Clôture" des phases différentielles :

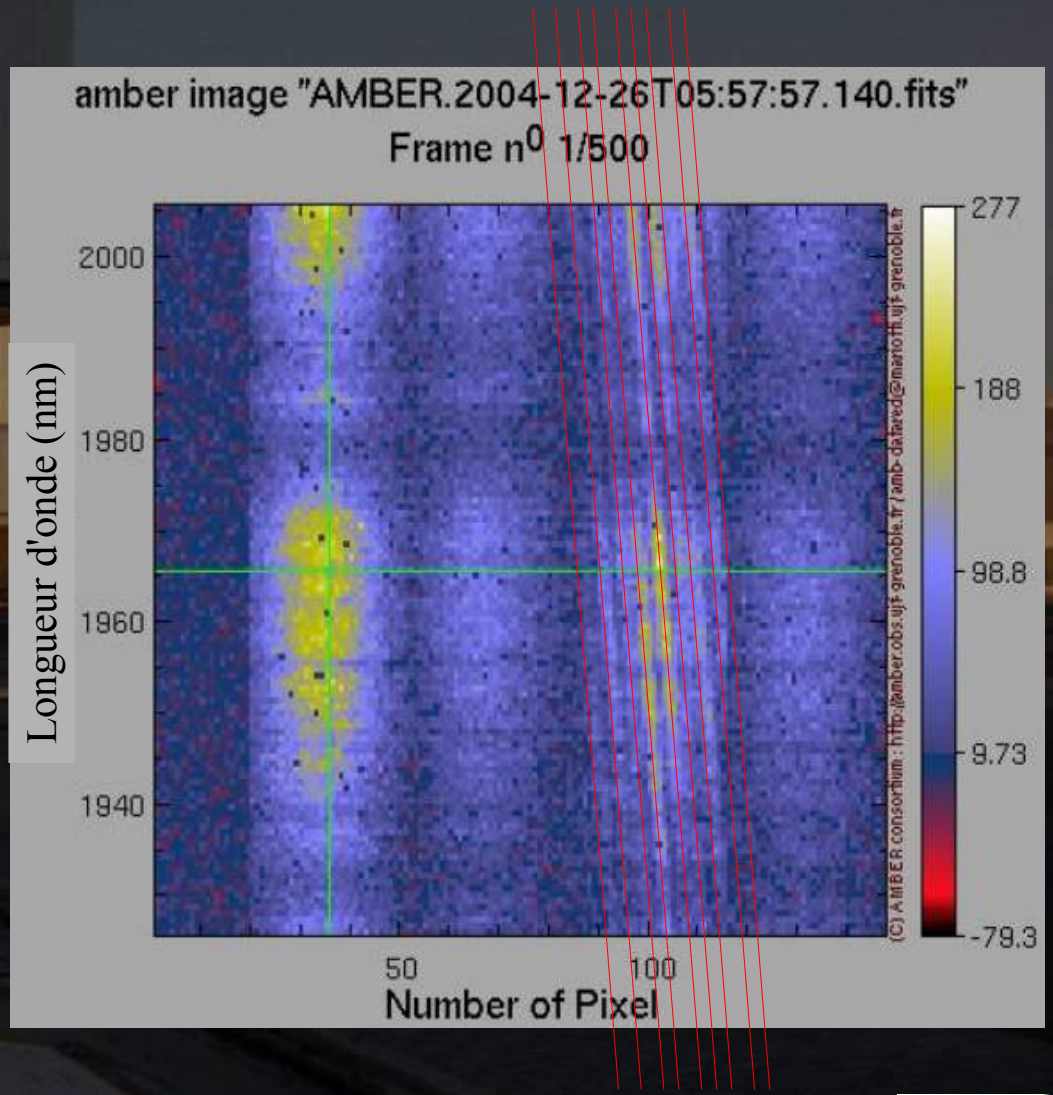
$$\Psi^{123}_{diff}(\lambda) = \Phi^{1,2}_{diff}(\lambda) + \Phi^{2,3}_{diff}(\lambda) + \Phi^{3,1}_{diff}(\lambda)$$

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

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

Utilisée en temps réel sur l'instrument

Méthode par minimisation du χ^2

$$\chi^2_\delta = \sum_\lambda \frac{\Im\left[C_\lambda \, e^{2i\Pi\frac{\delta}{\lambda}}\right]^2}{\sigma^2_{\Im[C_\lambda]}}$$

Utilisée pour le traitement des données

La phase différentielle

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

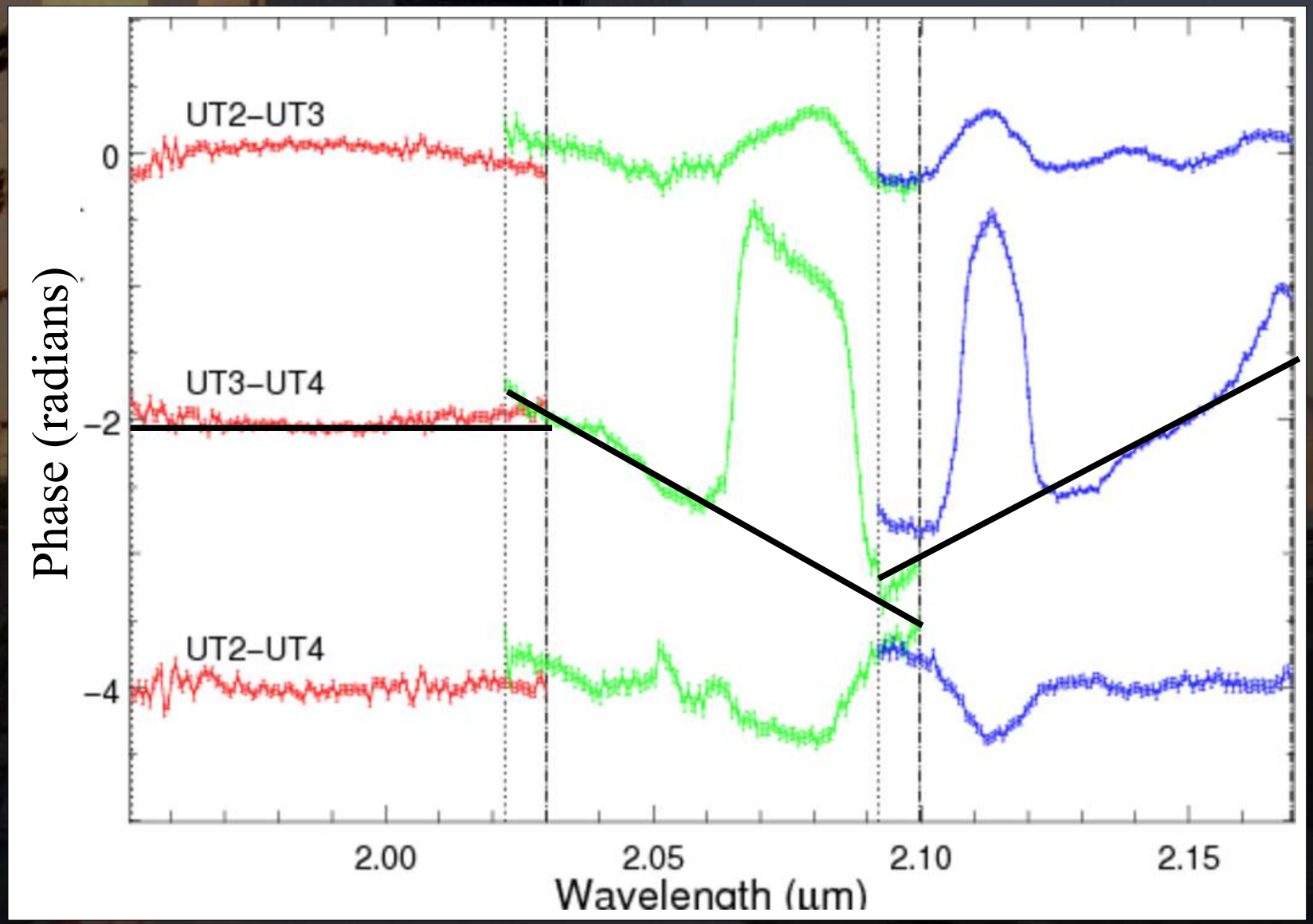
$$C_{ref}^{i,j}(t,\lambda_k)=\left\langle C_{nop}^{i,j}(t,\lambda_m)\right\rangle_{\lambda_k\neq\lambda_m}$$

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

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

$$\Omega=\frac{N_\lambda}{N_\lambda-1}$$
$$a=2\Pi\,\delta_o^{i,j}$$
$$b=\frac{N_\lambda}{N_\lambda-1}\left\langle\phi_o^{i,j}(\lambda)\right\rangle_\lambda$$

La phase différentielle



La visibilité différentielle

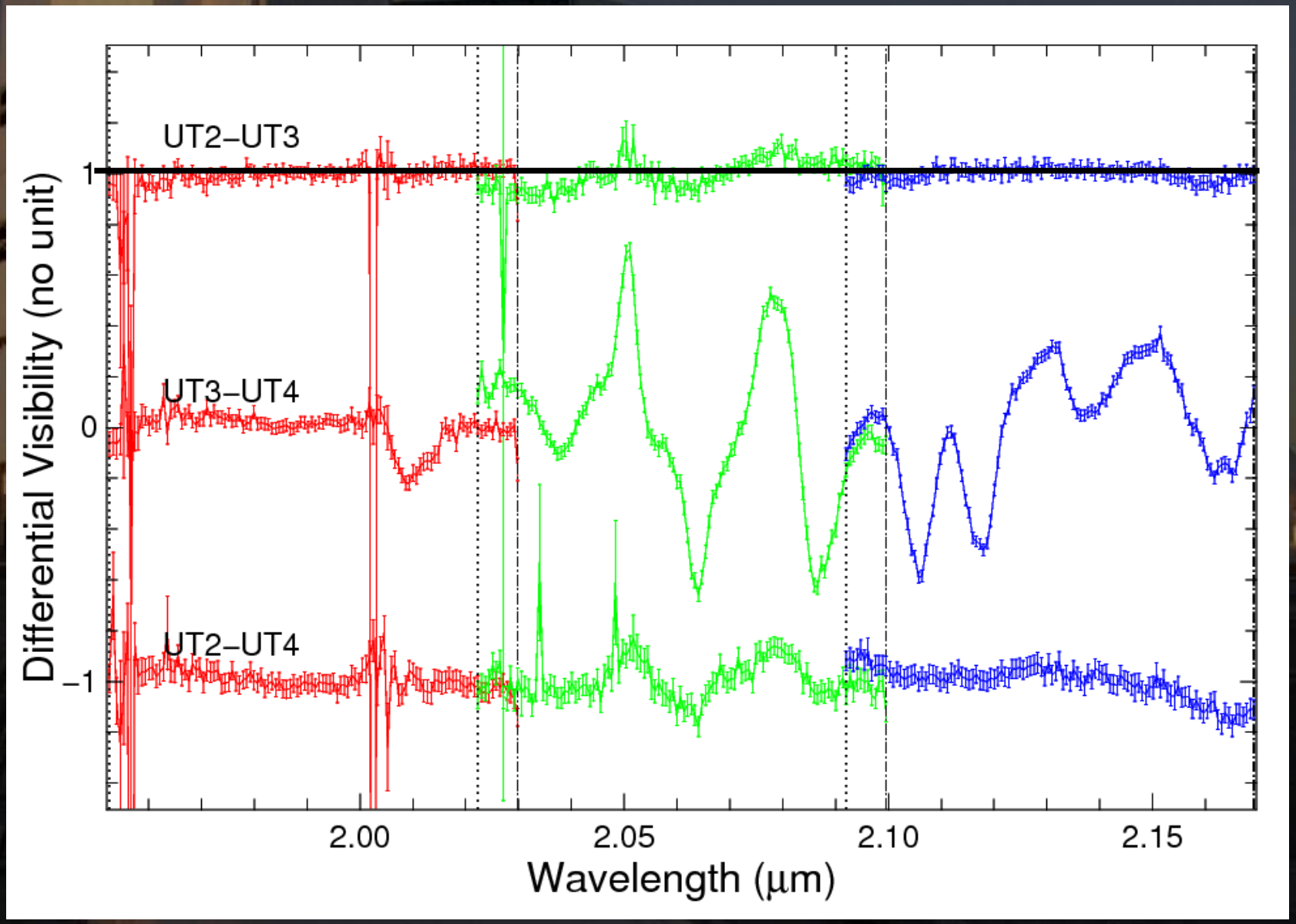
$$C_{nop}^{i,j}(t,\lambda)=C^{i,j}(t,\lambda)\times e^{-2i\Pi\frac{\delta^{i,j}(t)}{\lambda}}$$

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

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

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

La visibilité différentielle



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

L'apport de la phase différentielle en interférométrie stellaire optique

Ajustement de modèles

Nombre N_s de sources ponctuelles

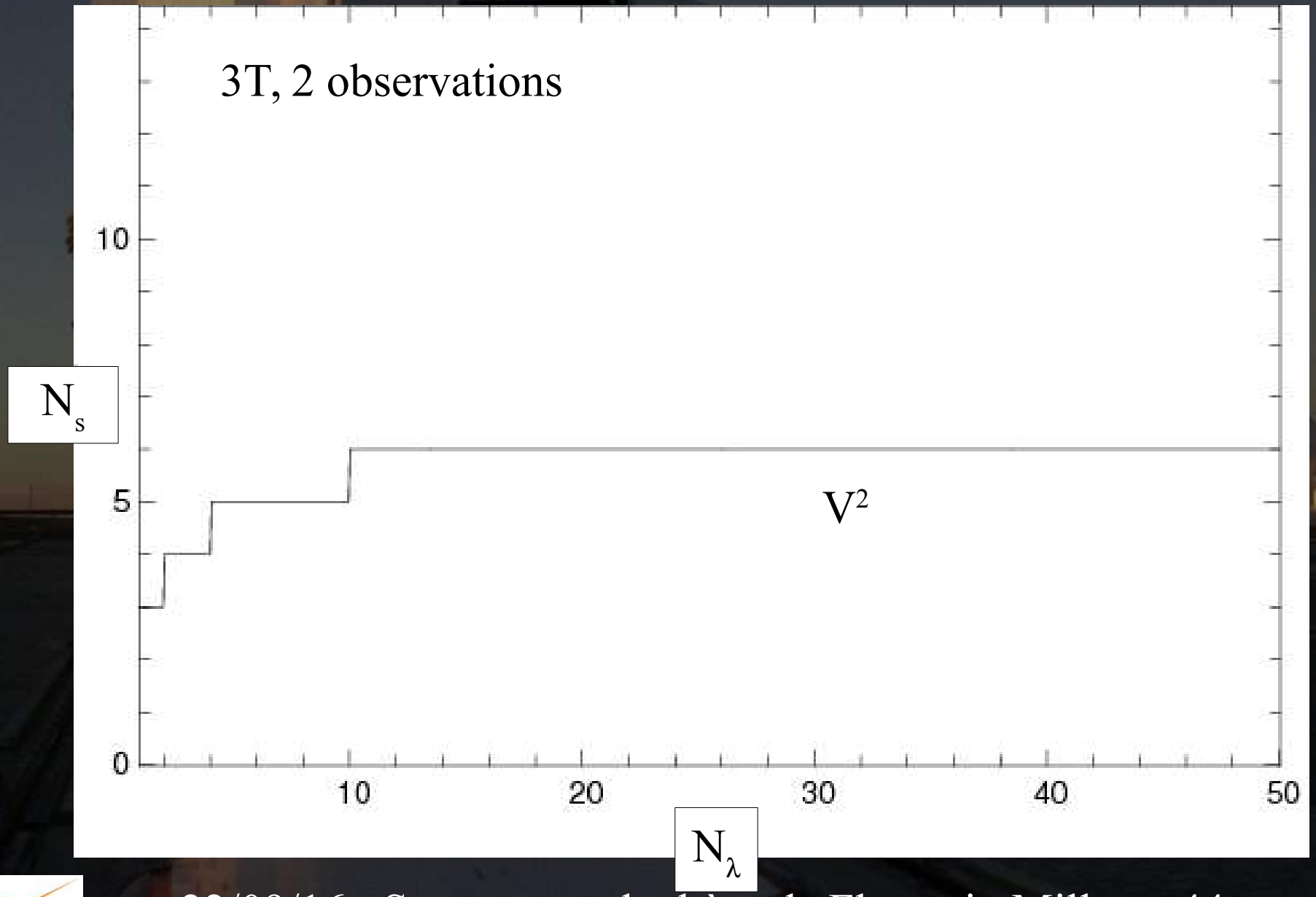
Inconnues I : $2N_s$-2 positions et $N_s N_\lambda$ flux

Mesures M : Visibilités, clôture de phase, etc.

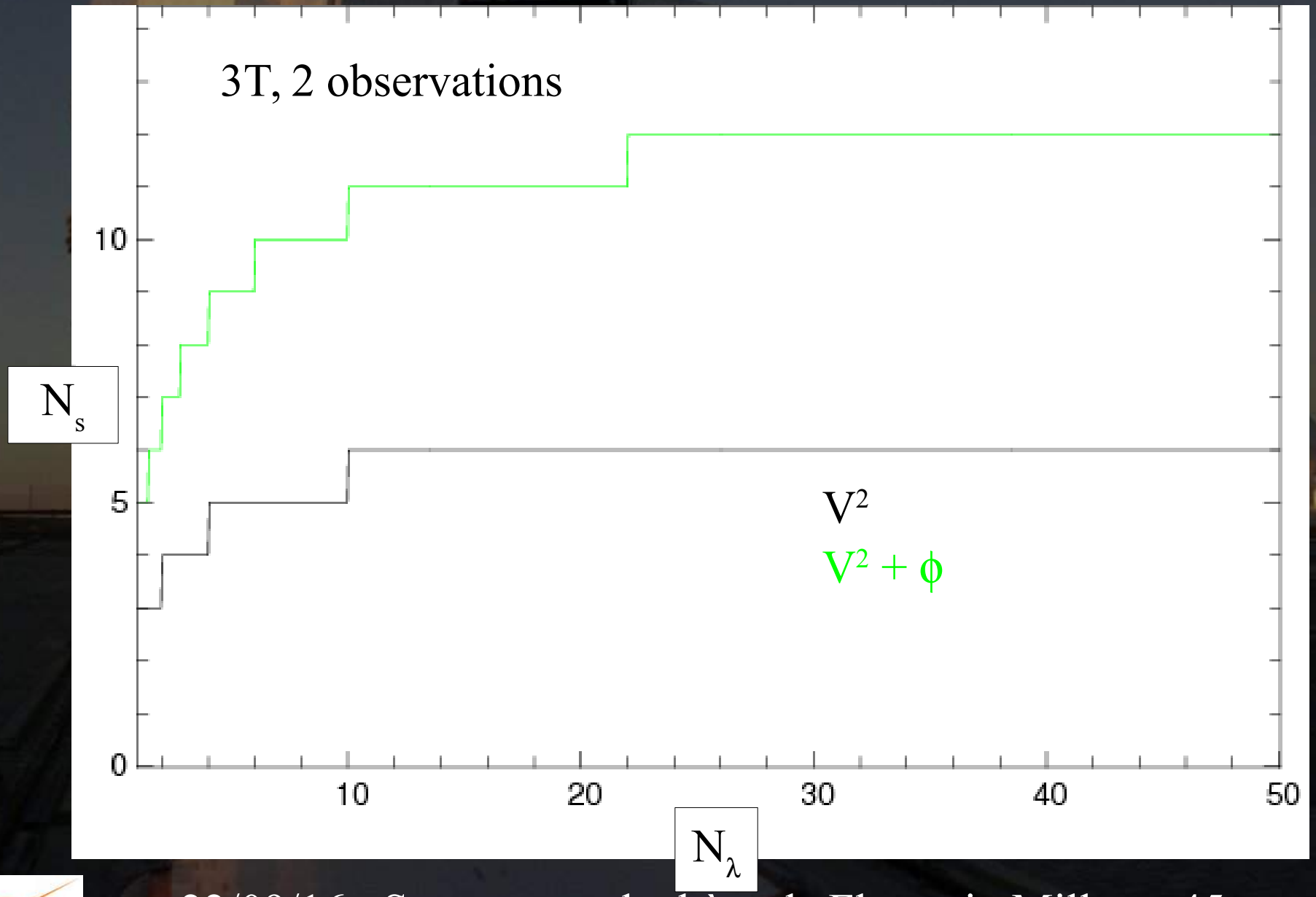
=> Annulation du nombre de degrés de libertés du problème

$$D = M - I = 0$$

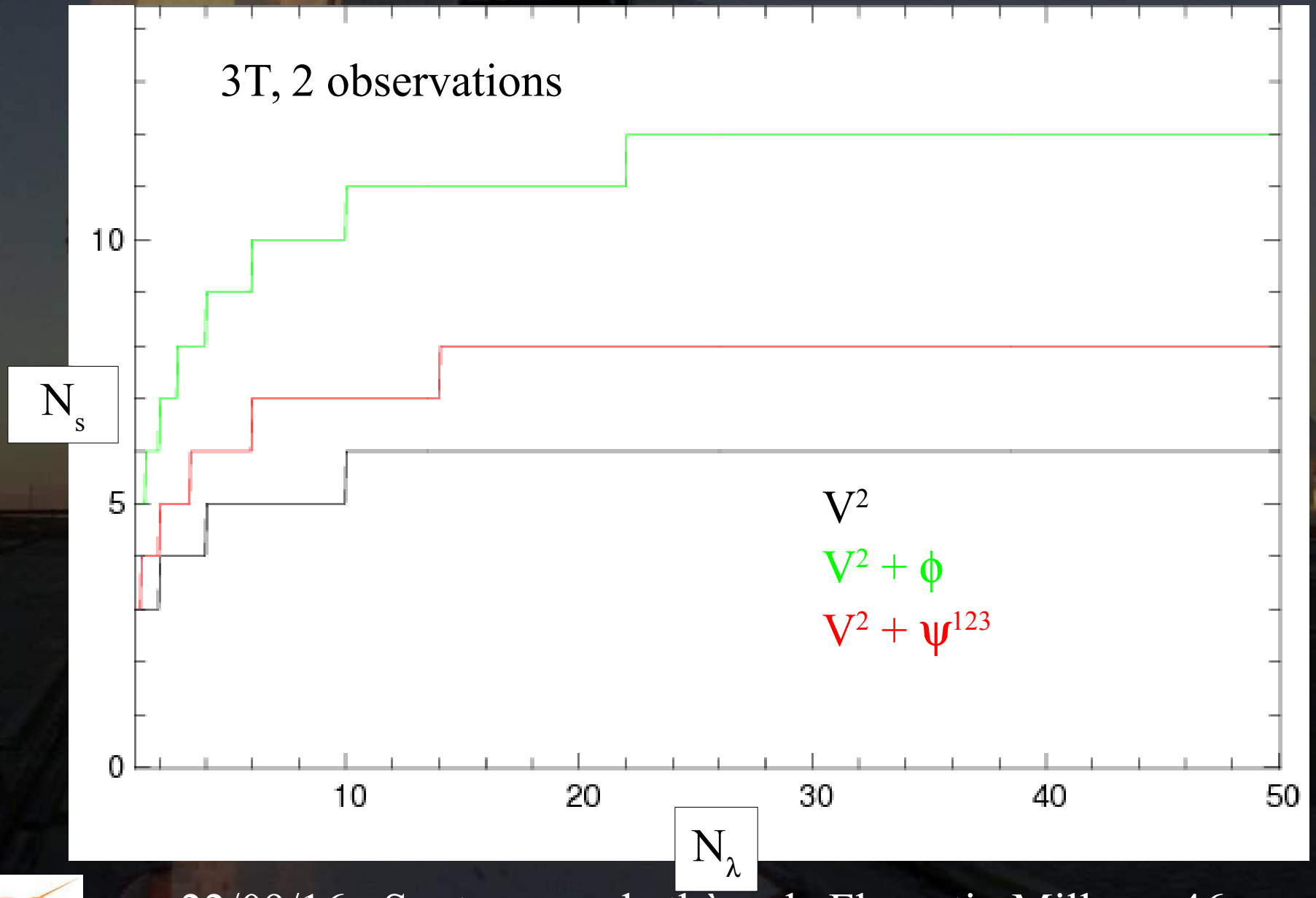
Ajustement de modèles



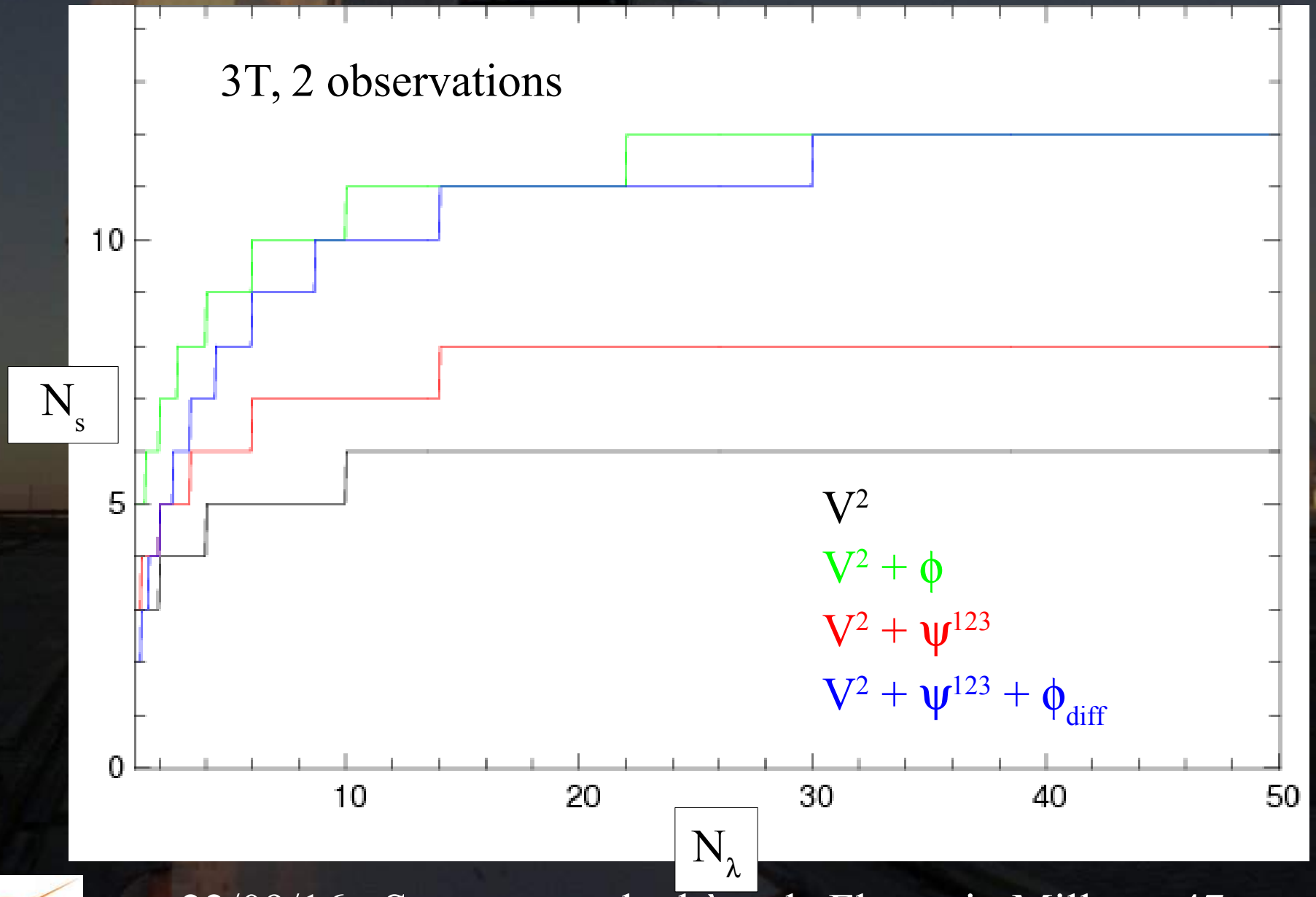
Ajustement de modèles



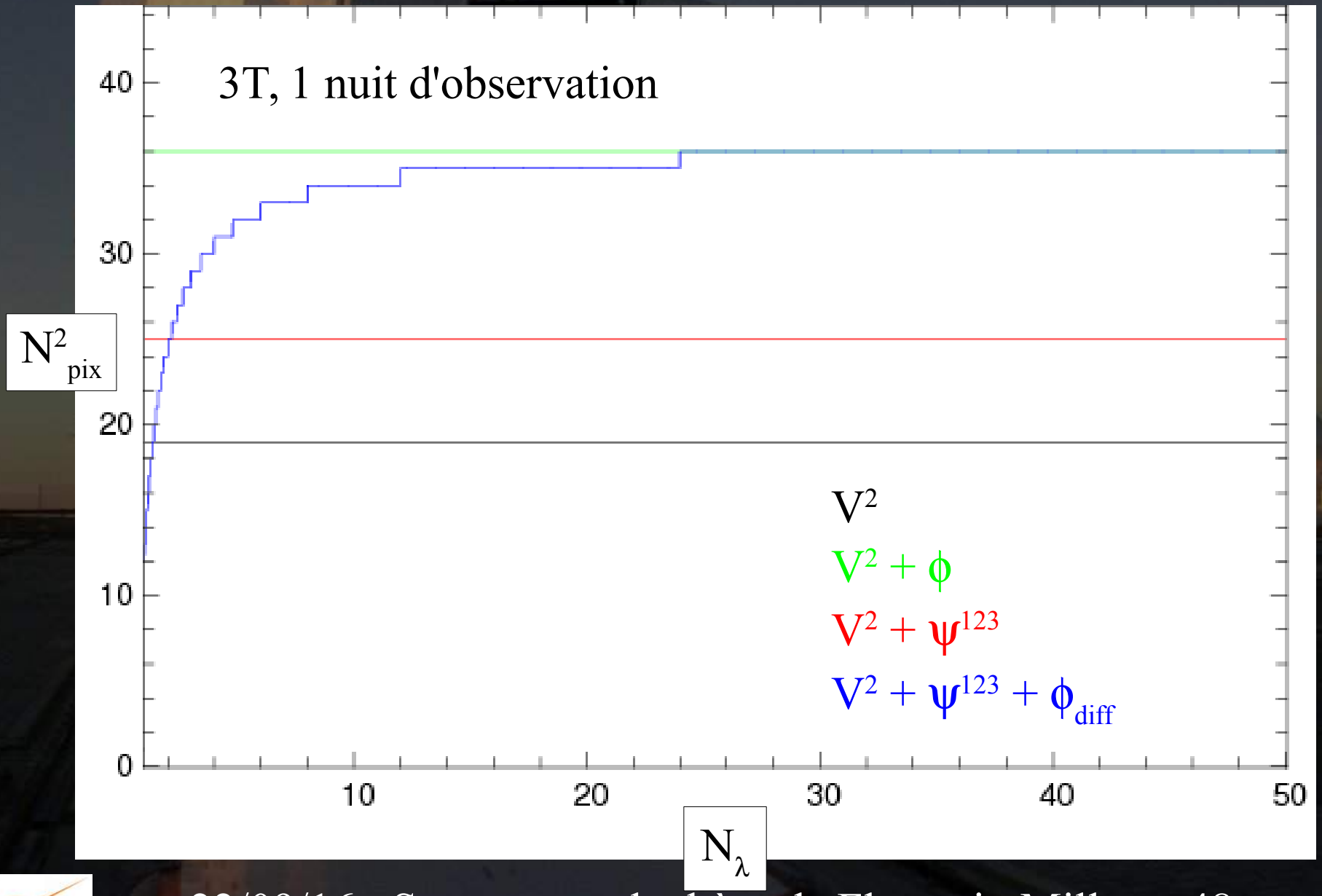
Ajustement de modèles



Ajustement de modèles



Reconstruction d'images



Plan

Contexte

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

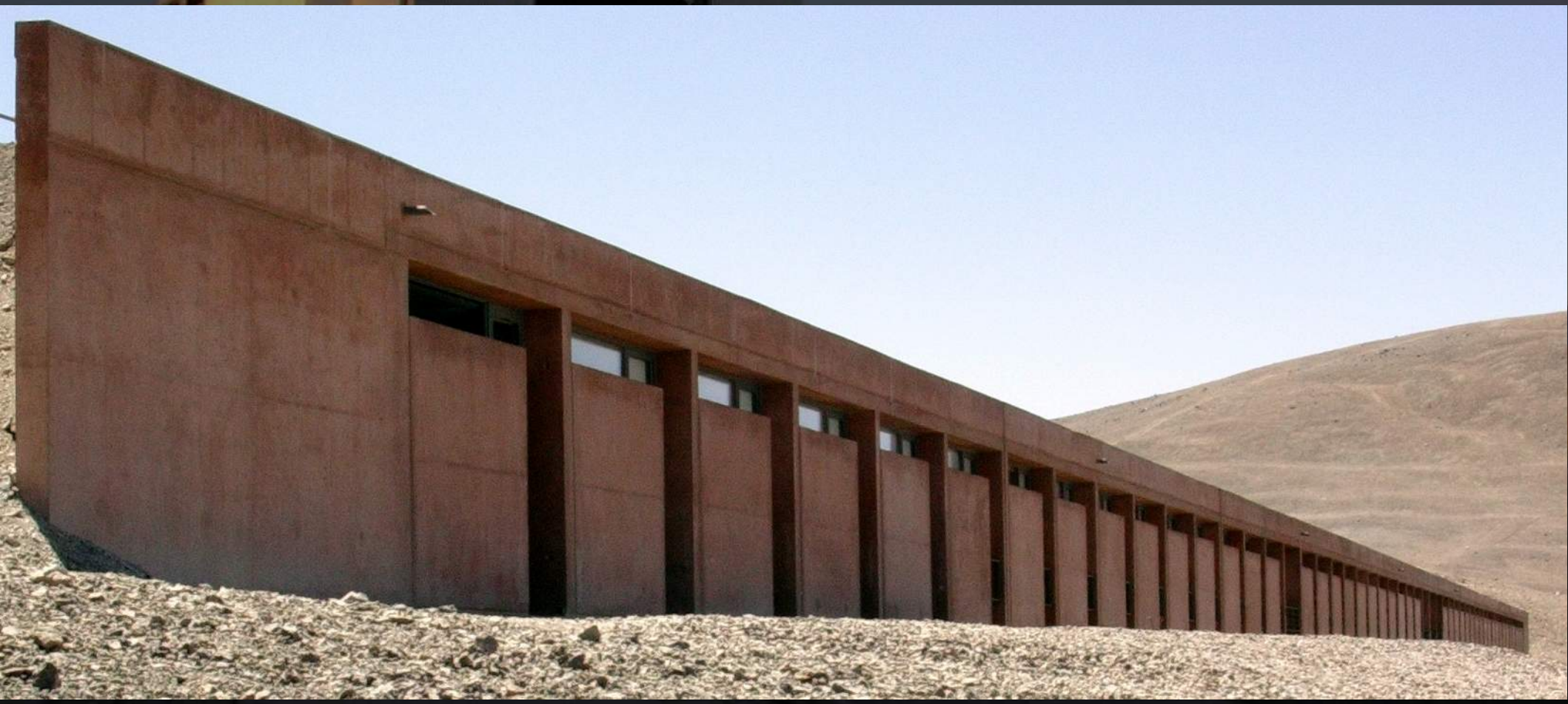
Traitement du signal et instrumentation

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

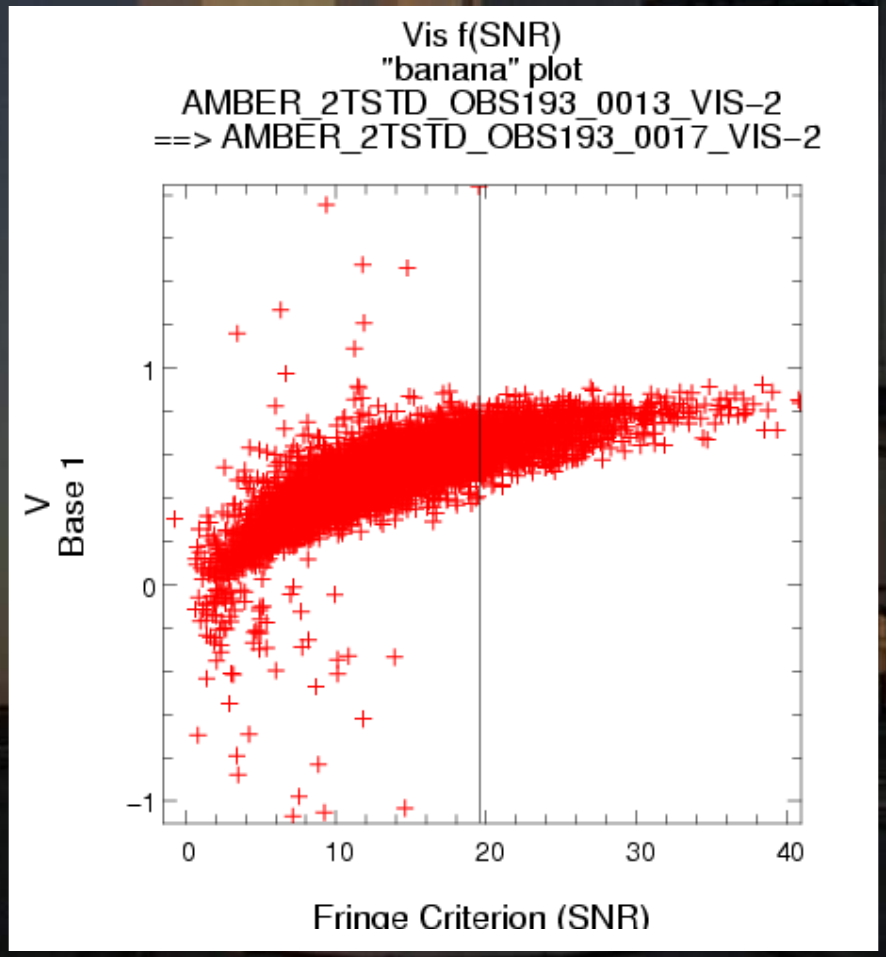
Les étoiles chaudes

- η Car
- α Arae
- γ^2 Velorum

Les vraies données



Contraste instrumental 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 1µm
Fréquence : >20Hz

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

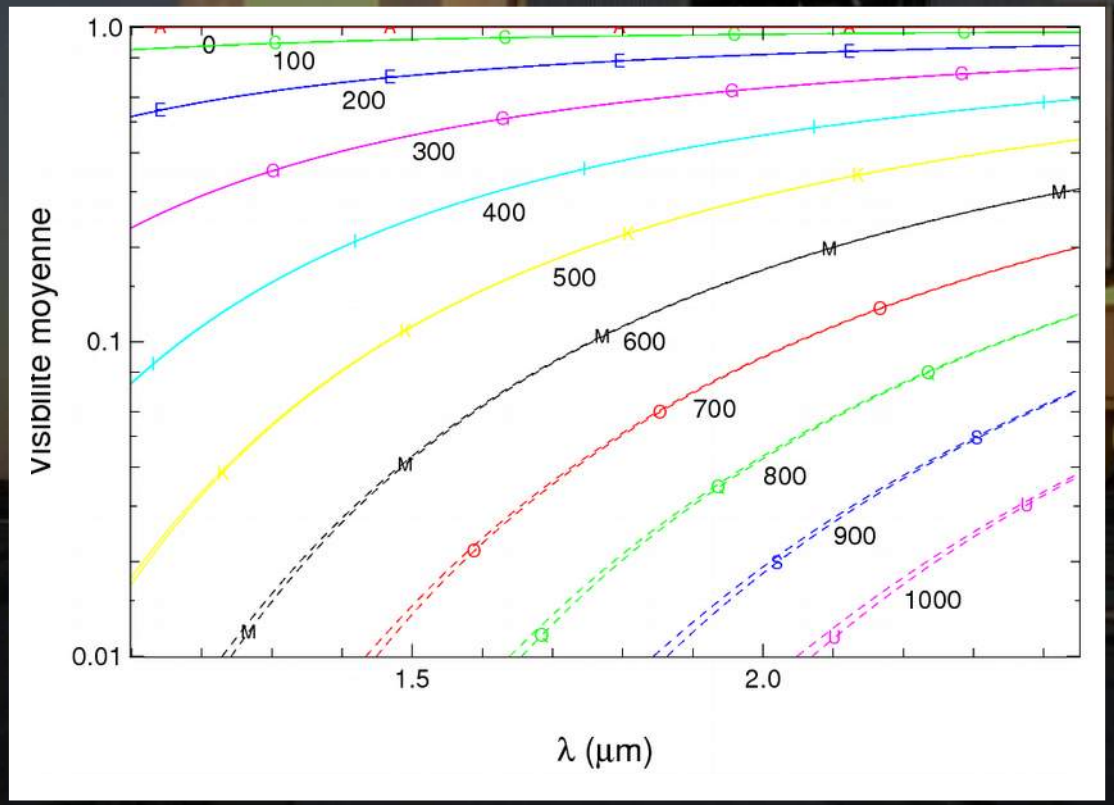
Vibrations des UT : l'effet sur le contraste

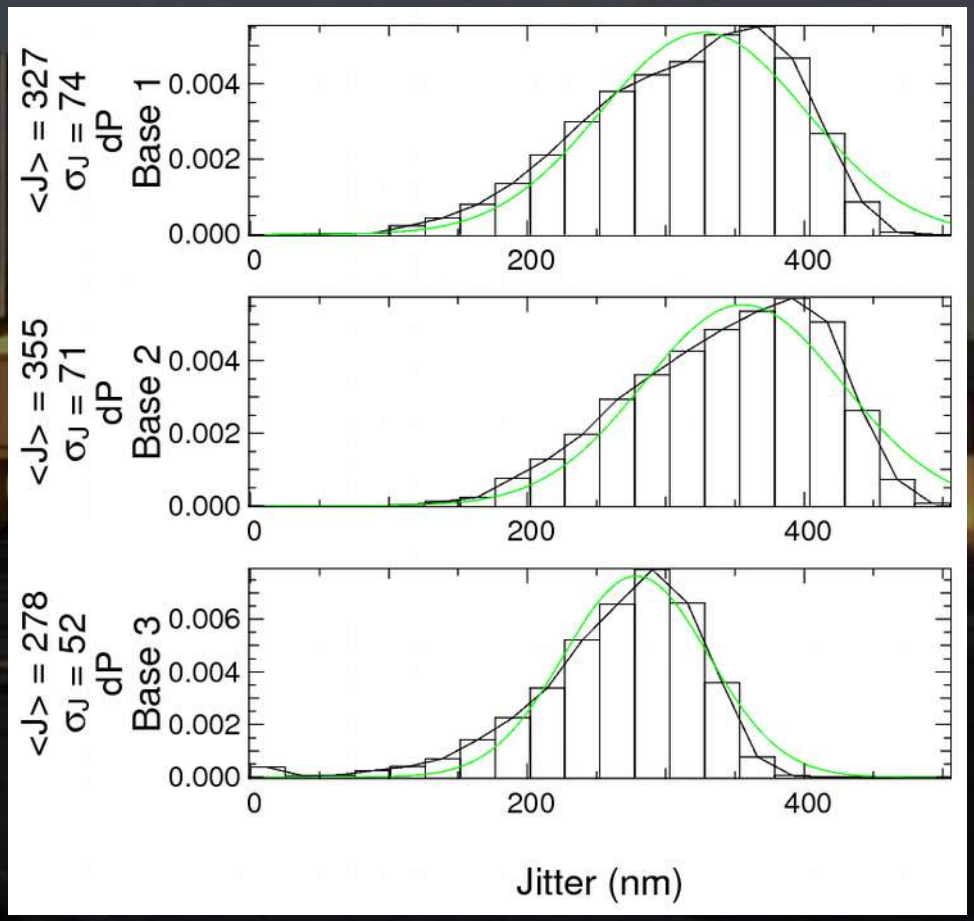
Calibrateur :

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

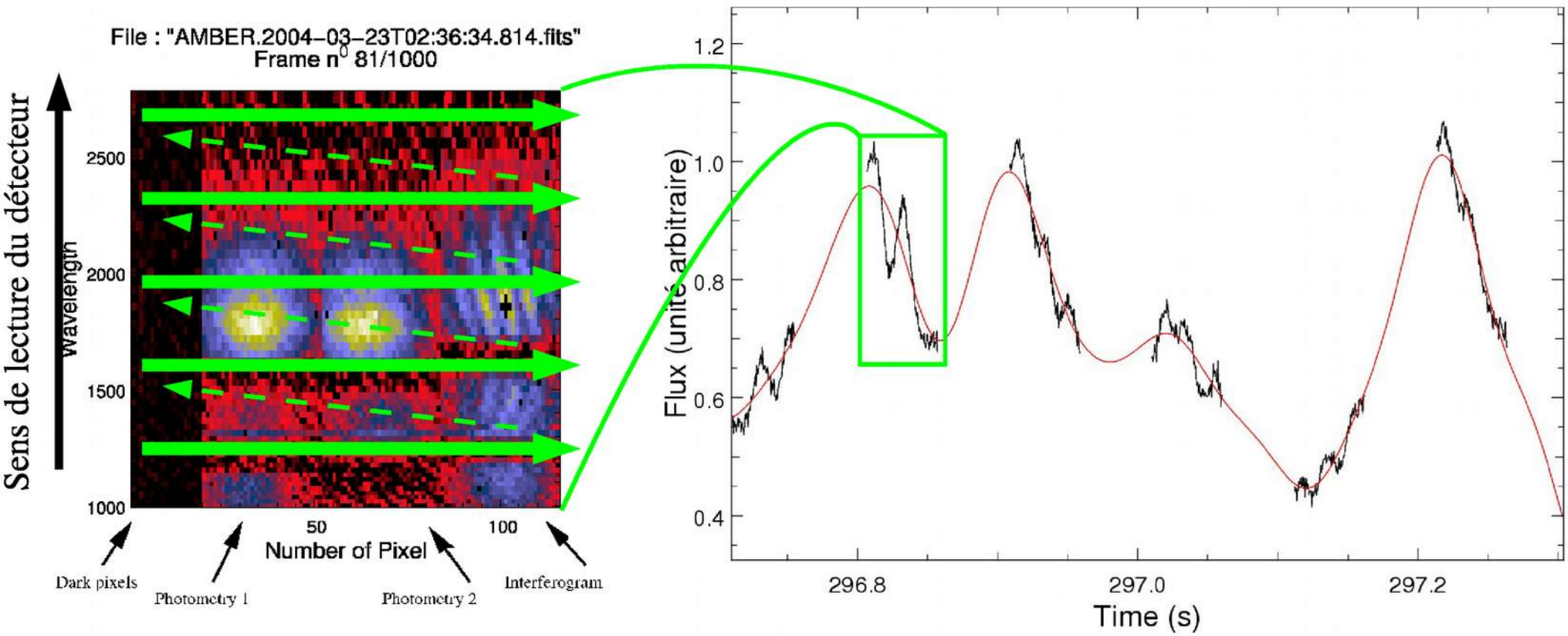
$$\sigma_G=\left\langle\sqrt{-\log\frac{(V^2(\lambda))\times\lambda^2}{4\Pi^2}}\right\rangle_\lambda$$

Vibrations des UT : l'effet sur le contraste



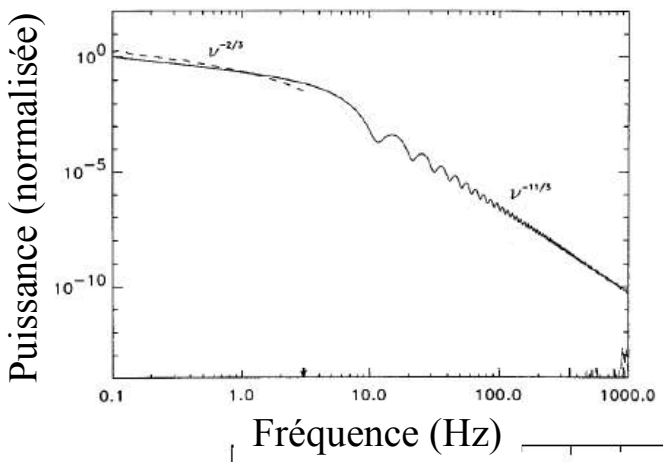


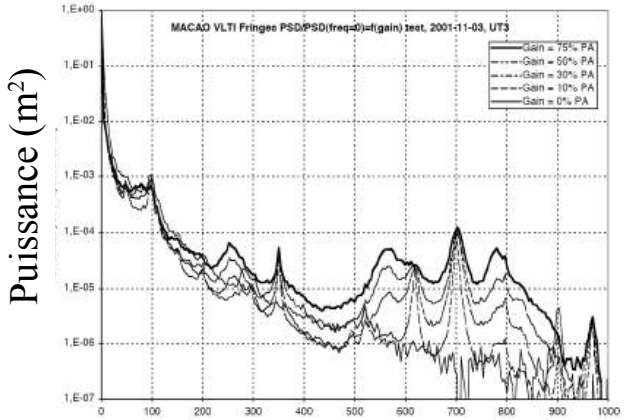
Vibrations des UT : le flux



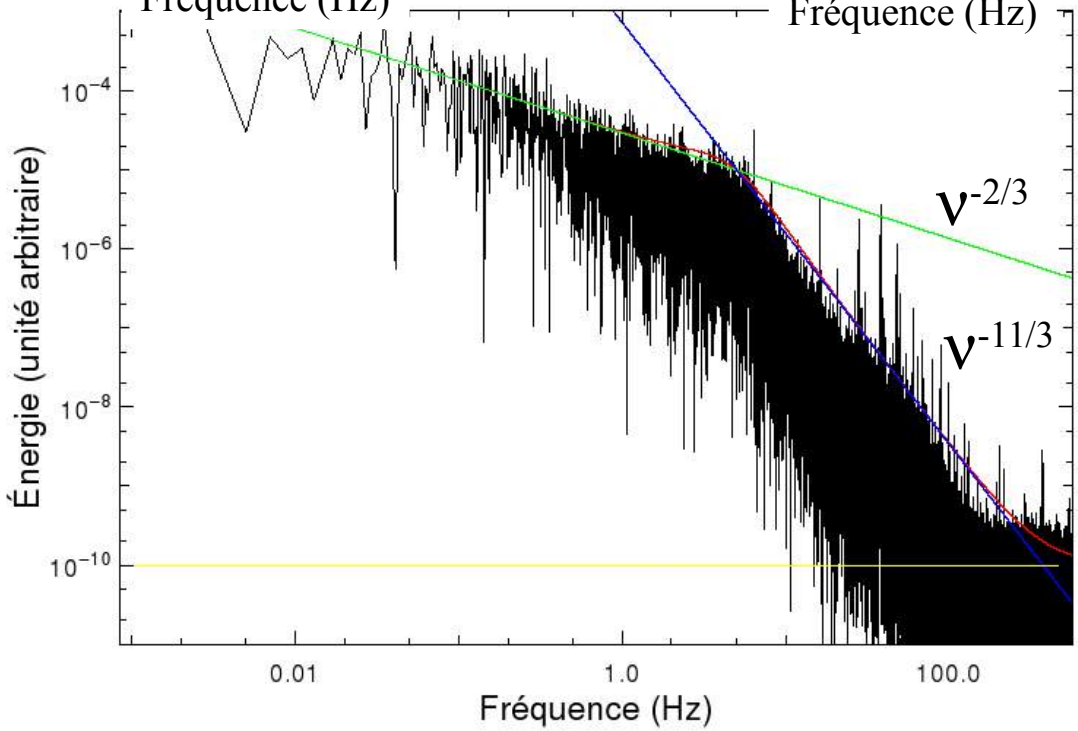
Vibrations des UT : le flux

Conan & co. 1995

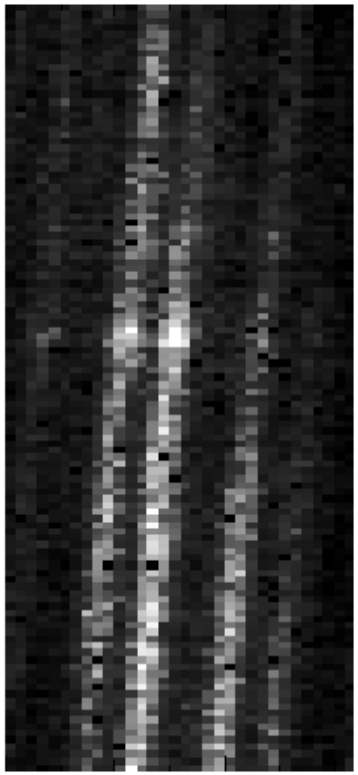


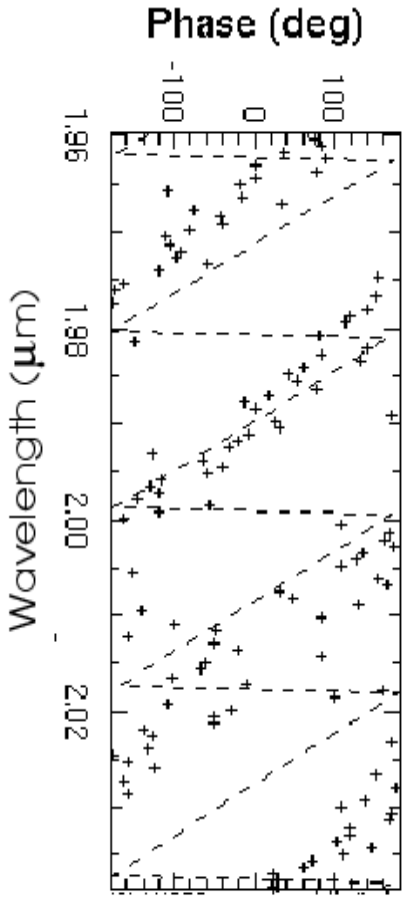


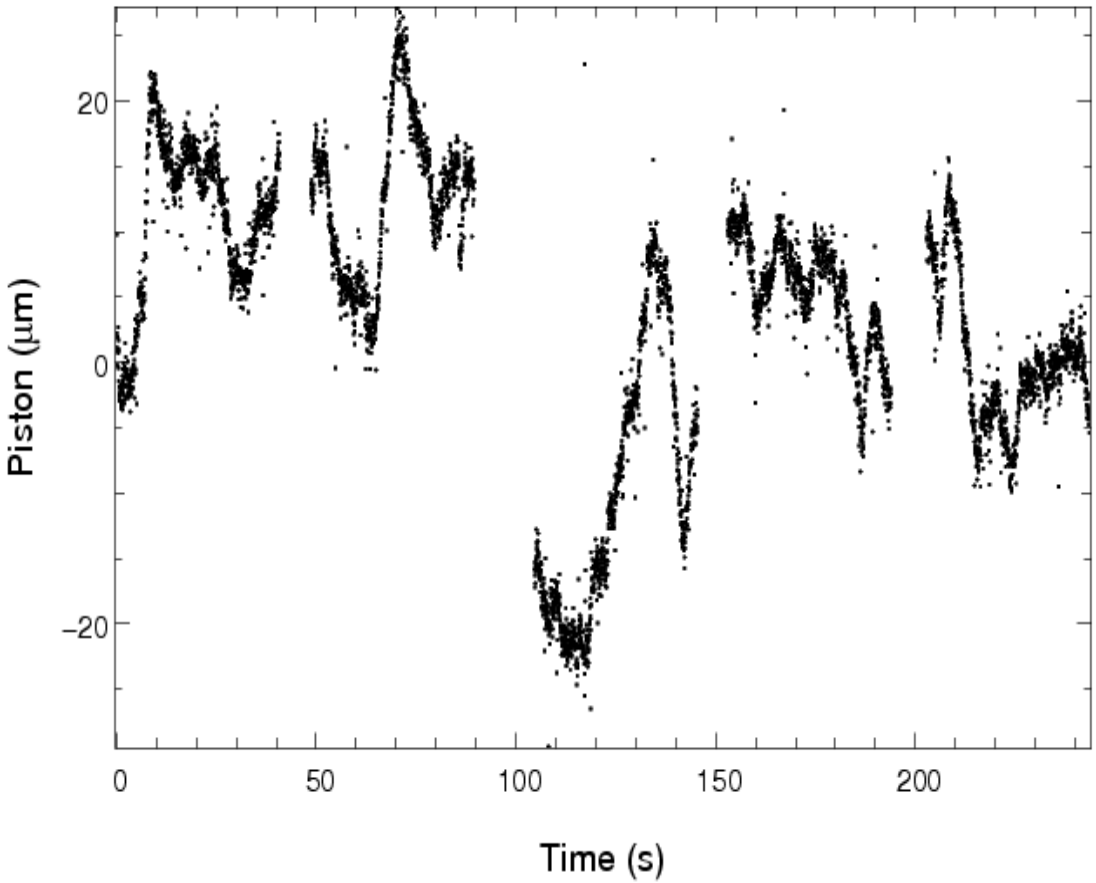
Kervella 2005



Vibrations des UT : la DDM

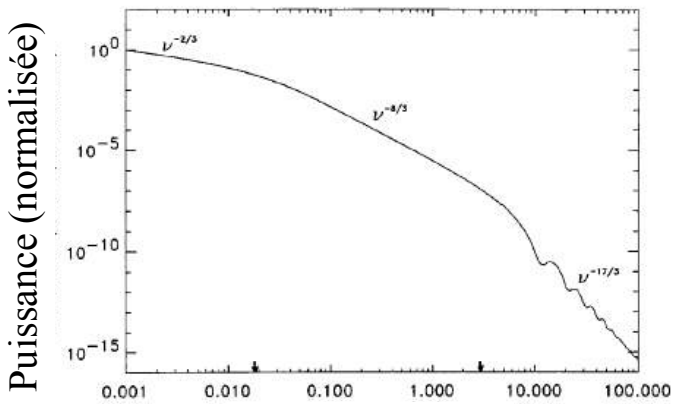


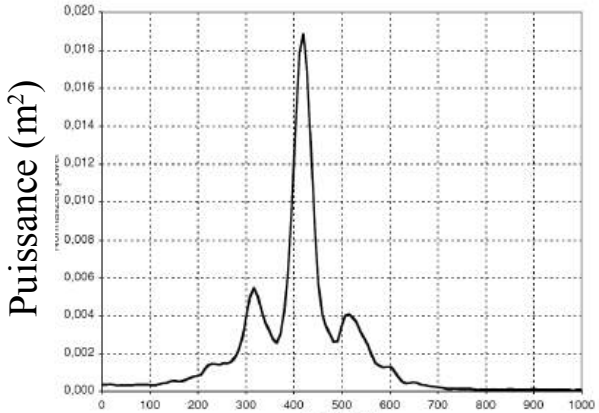




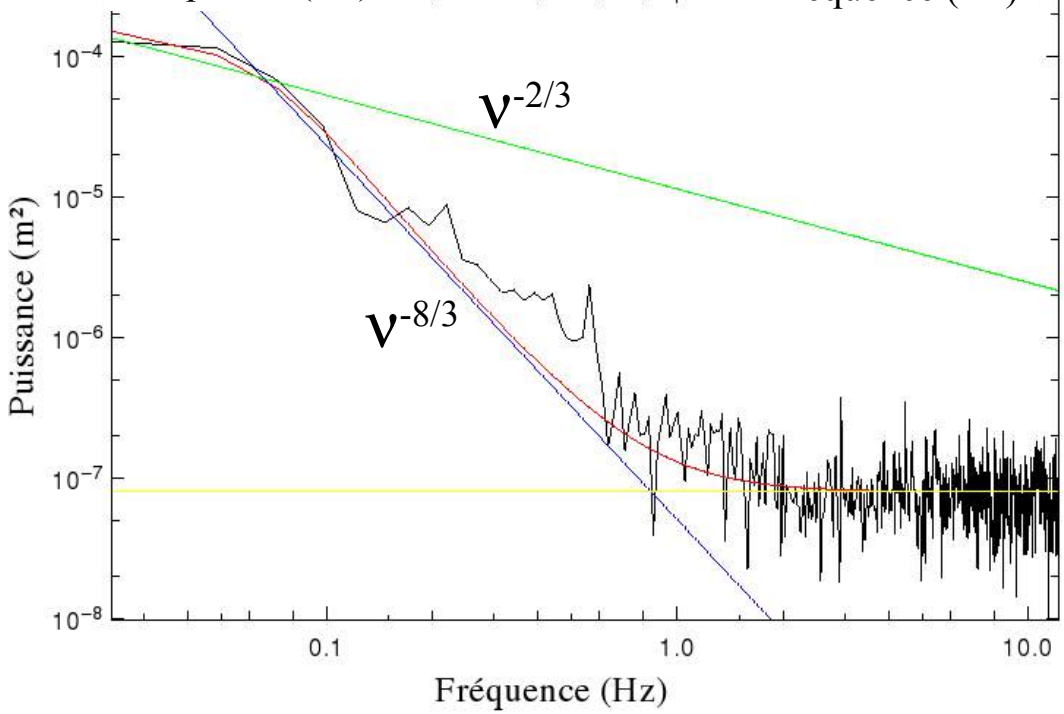
Vibrations des UT : la DDM

Conan & co. 1995





Kervella 2005



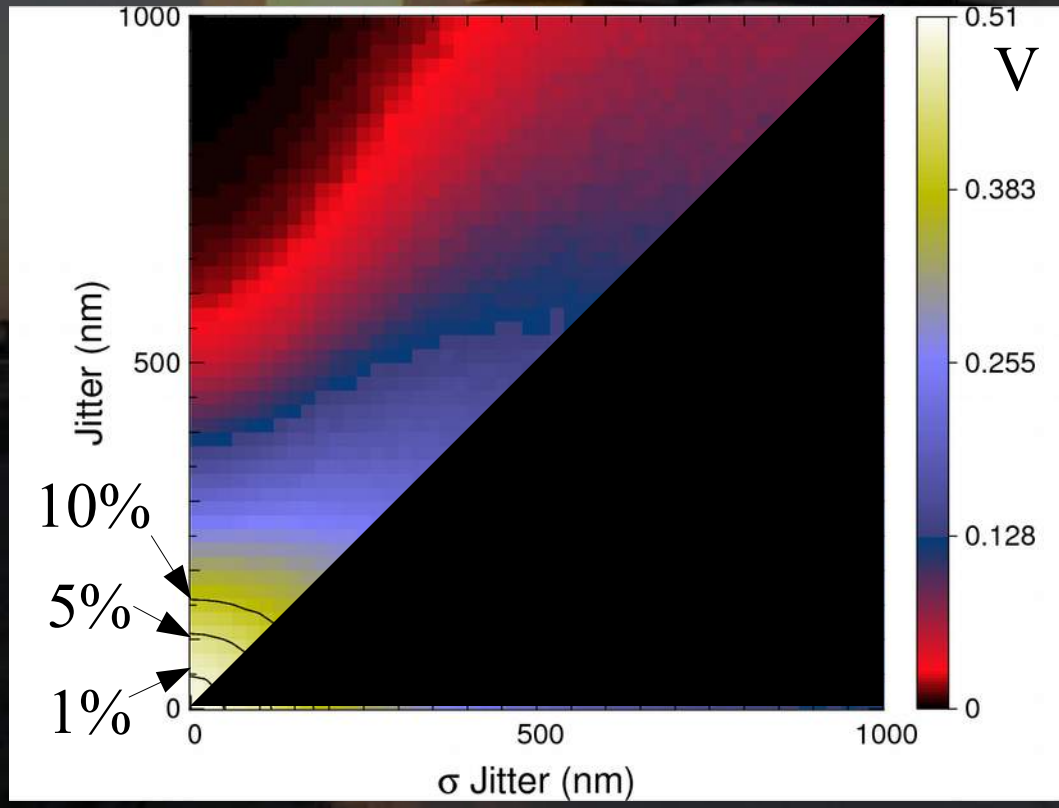
Sélection des images

Simulation de mesure de visibilité

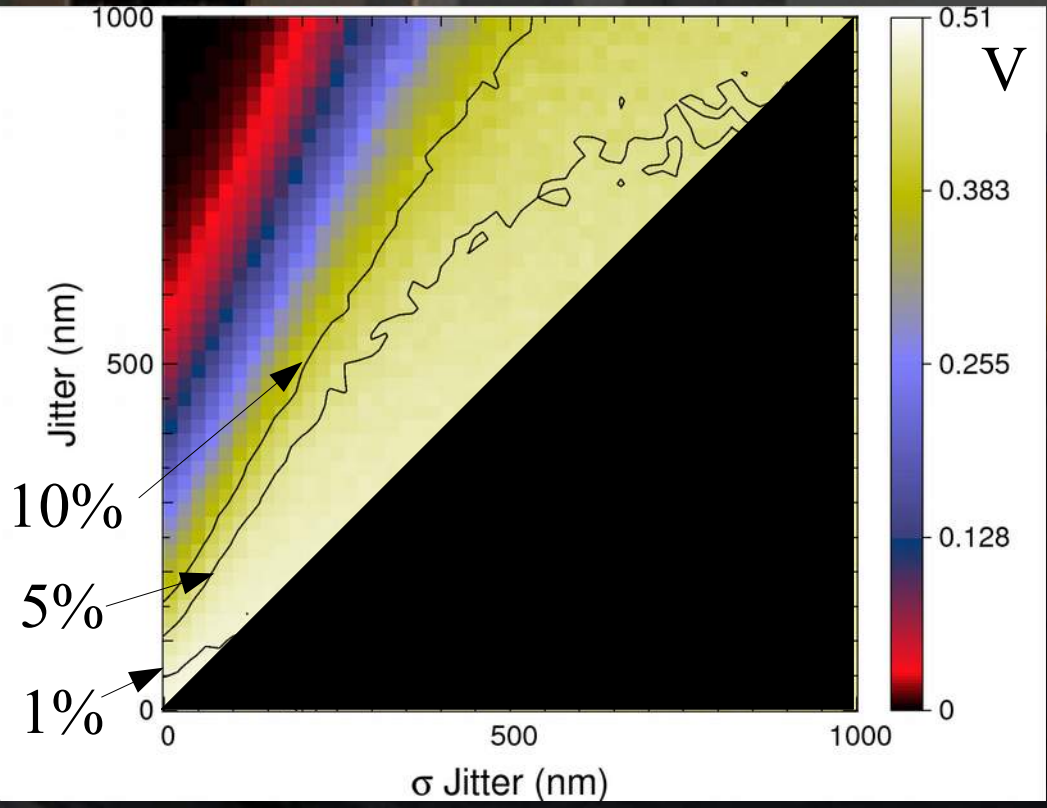
=> évaluation de l'erreur introduite par des variations des conditions

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

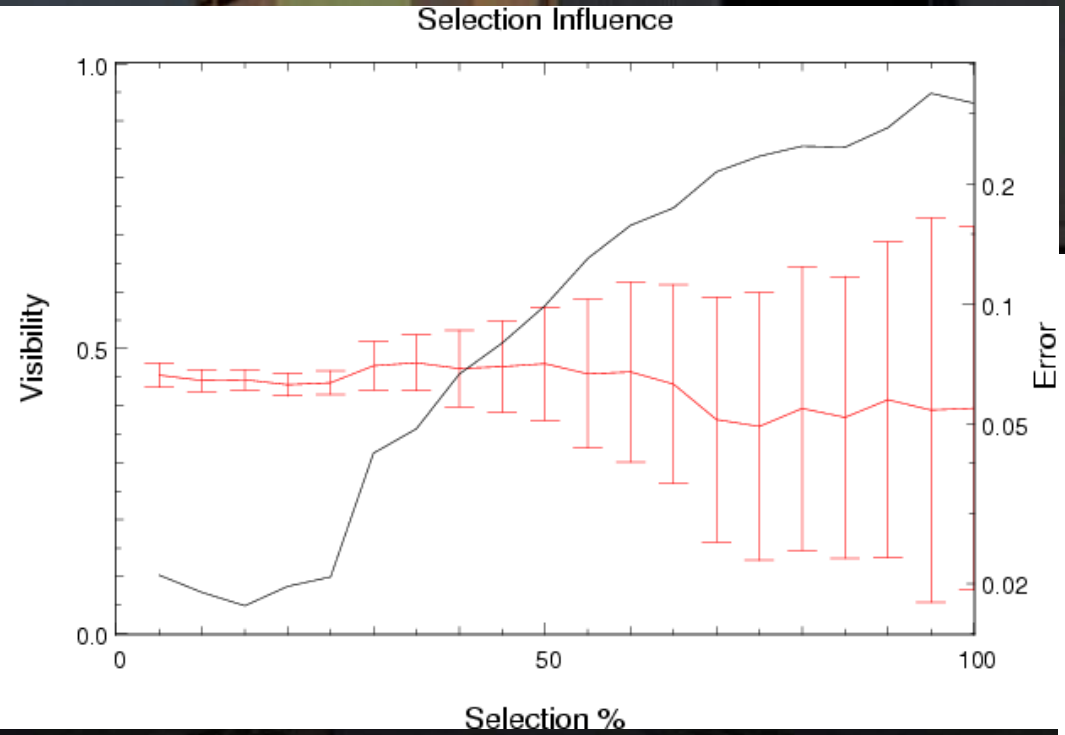
Pas de sélection

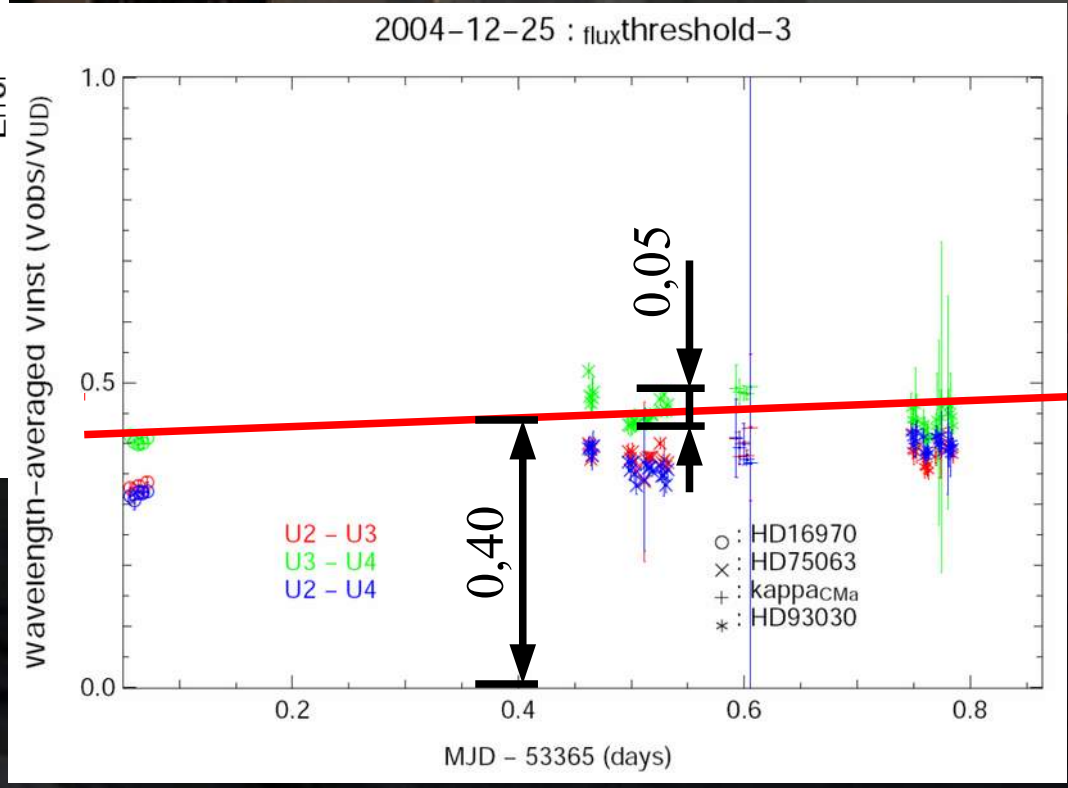


5% des meilleures images (RSB)

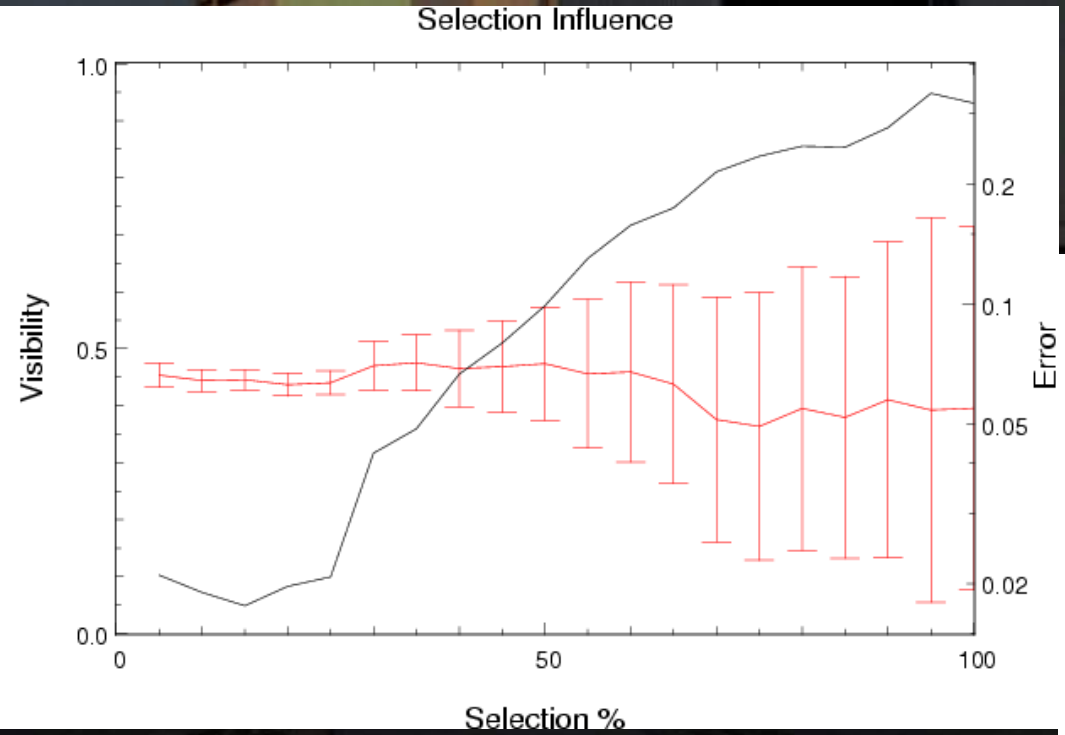


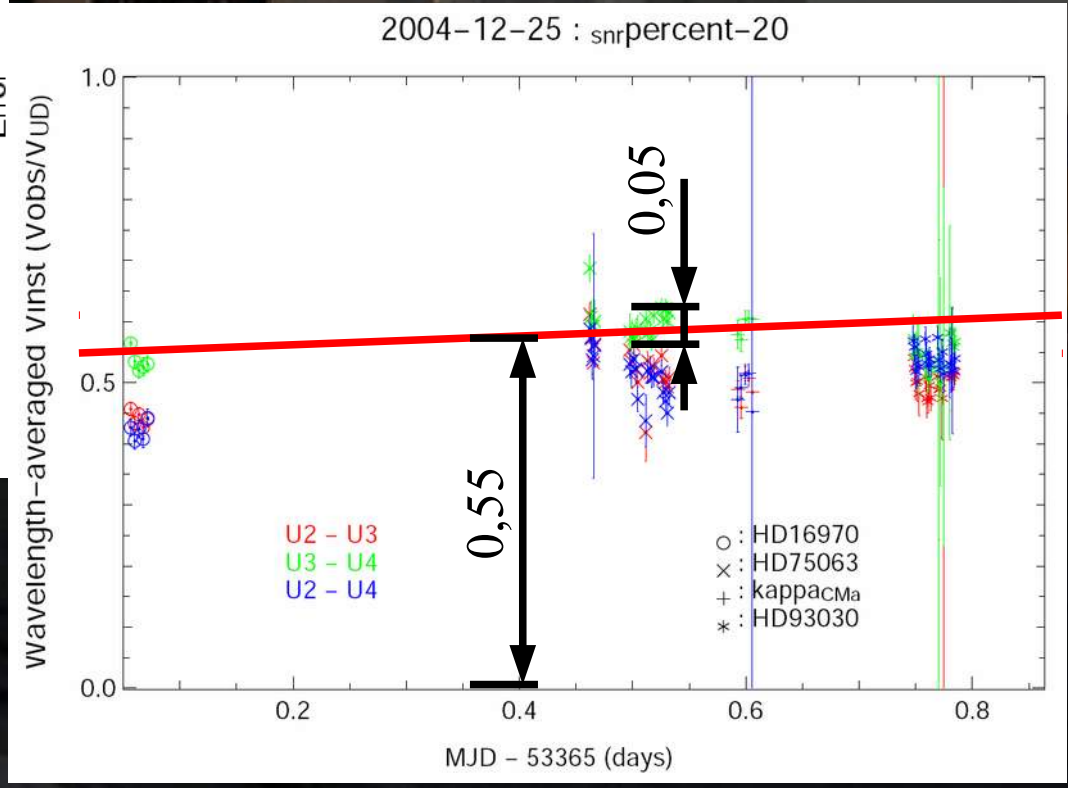
Sélection, biais et fonction de transfert



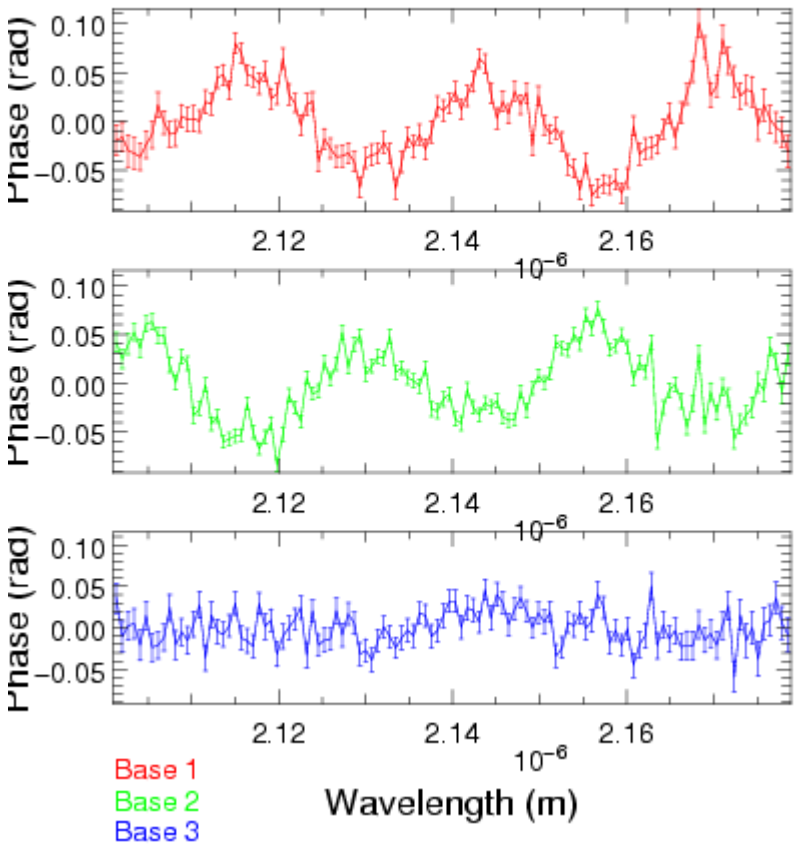


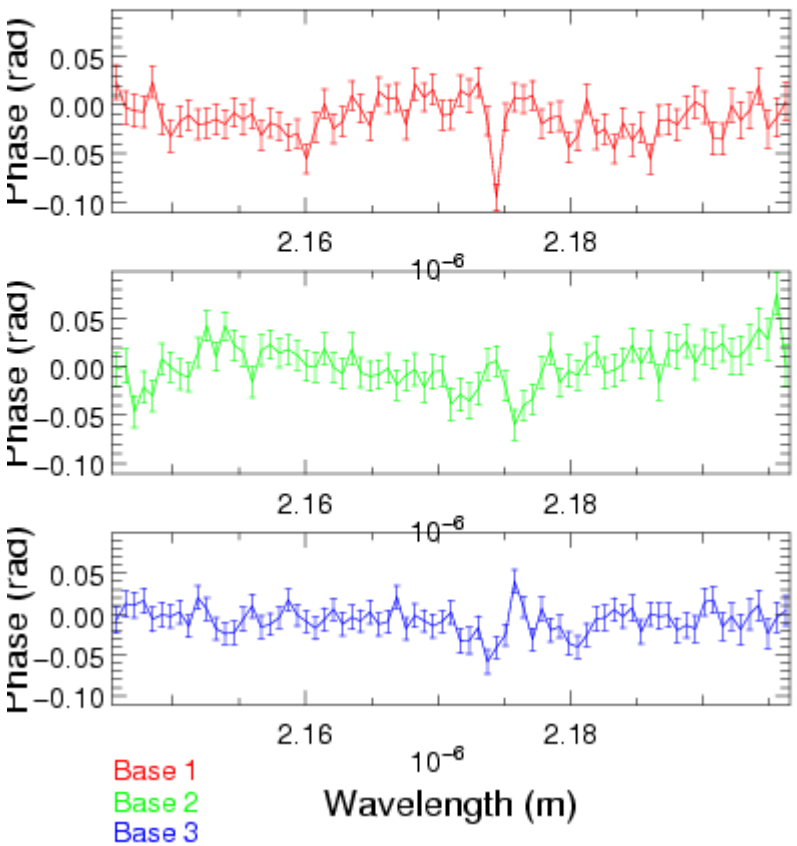
Sélection, biais et fonction de transfert





Biais sur la phase





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

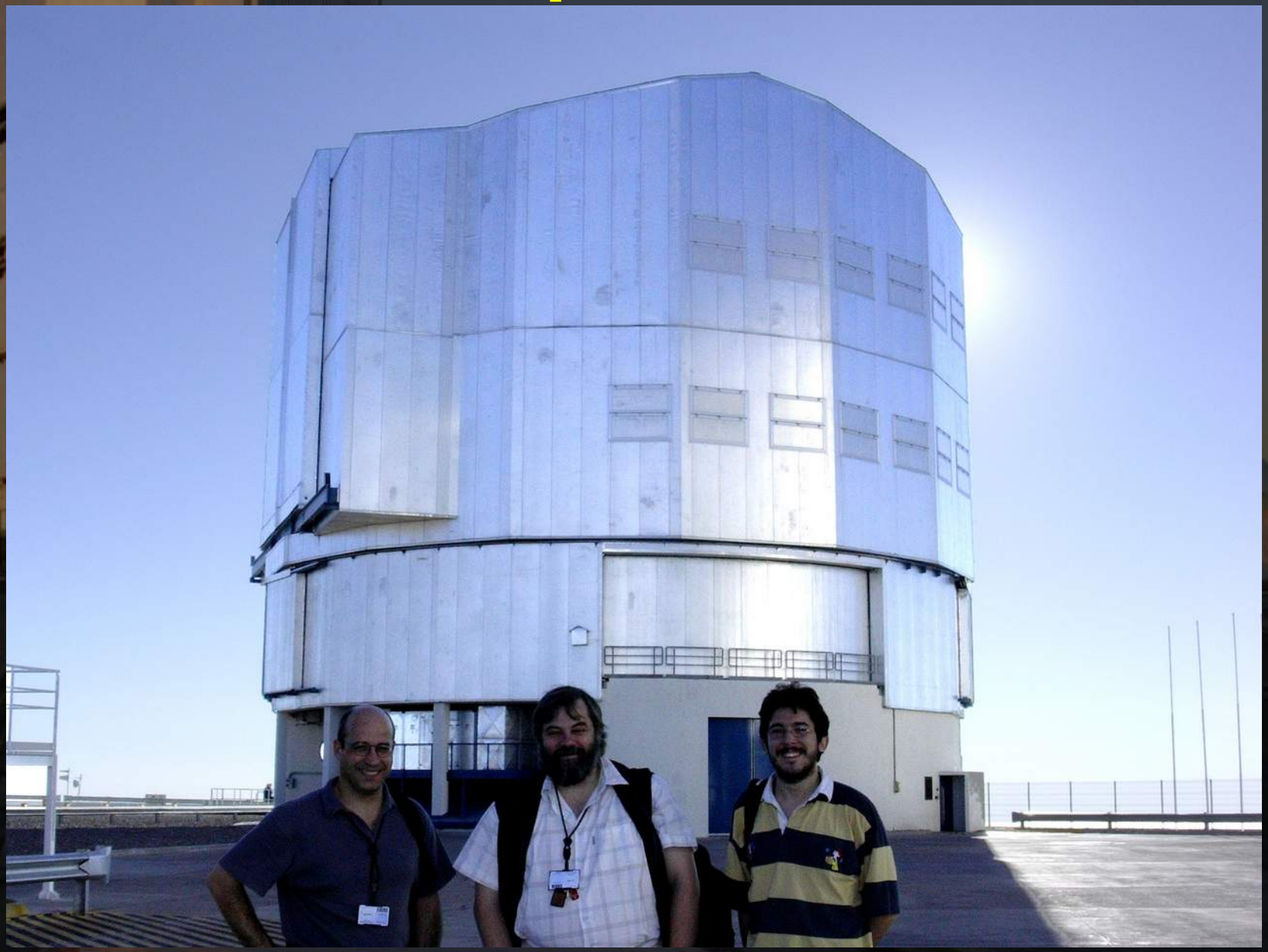
Traitement du signal et instrumentation

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

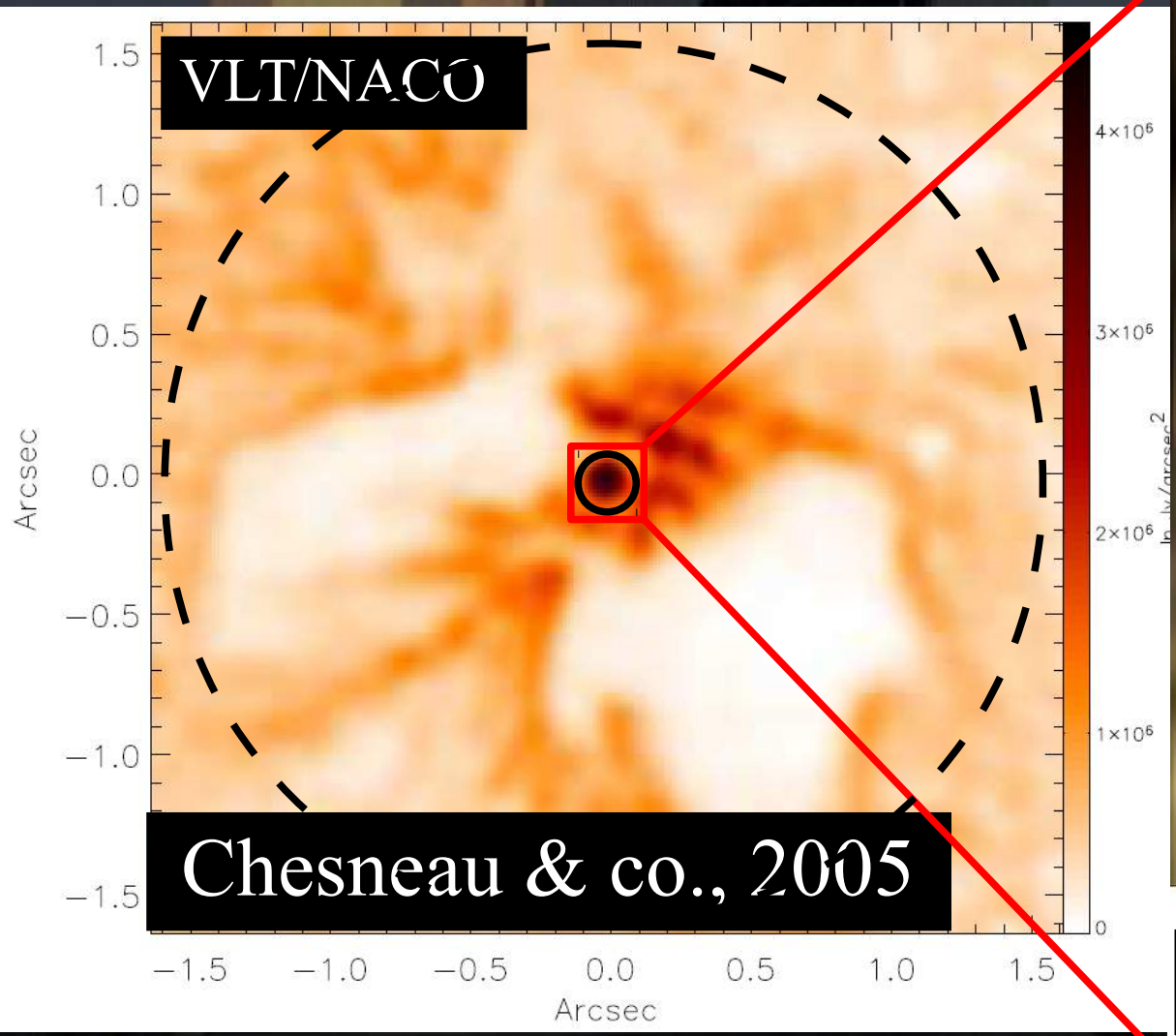
Les étoiles chaudes

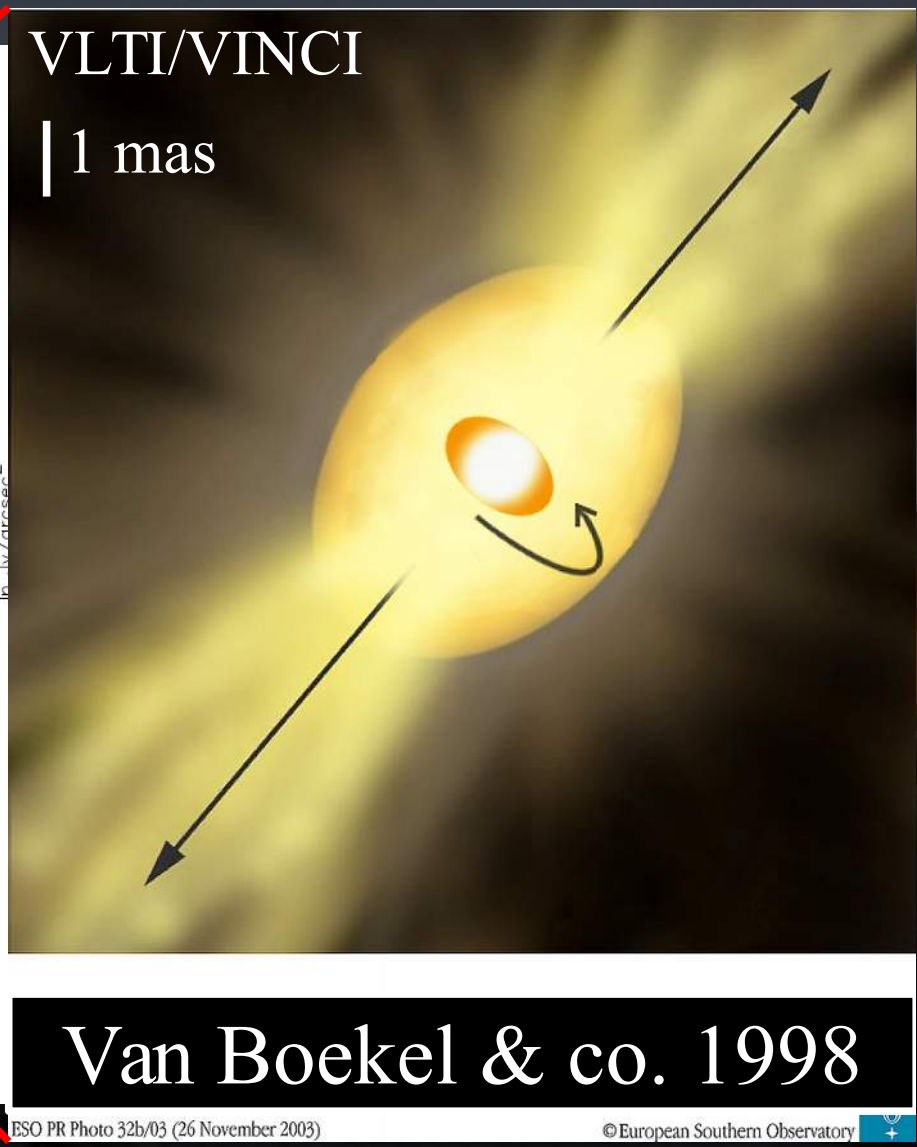
- η Car
- α Arae
- γ^2 Velorum

η Car

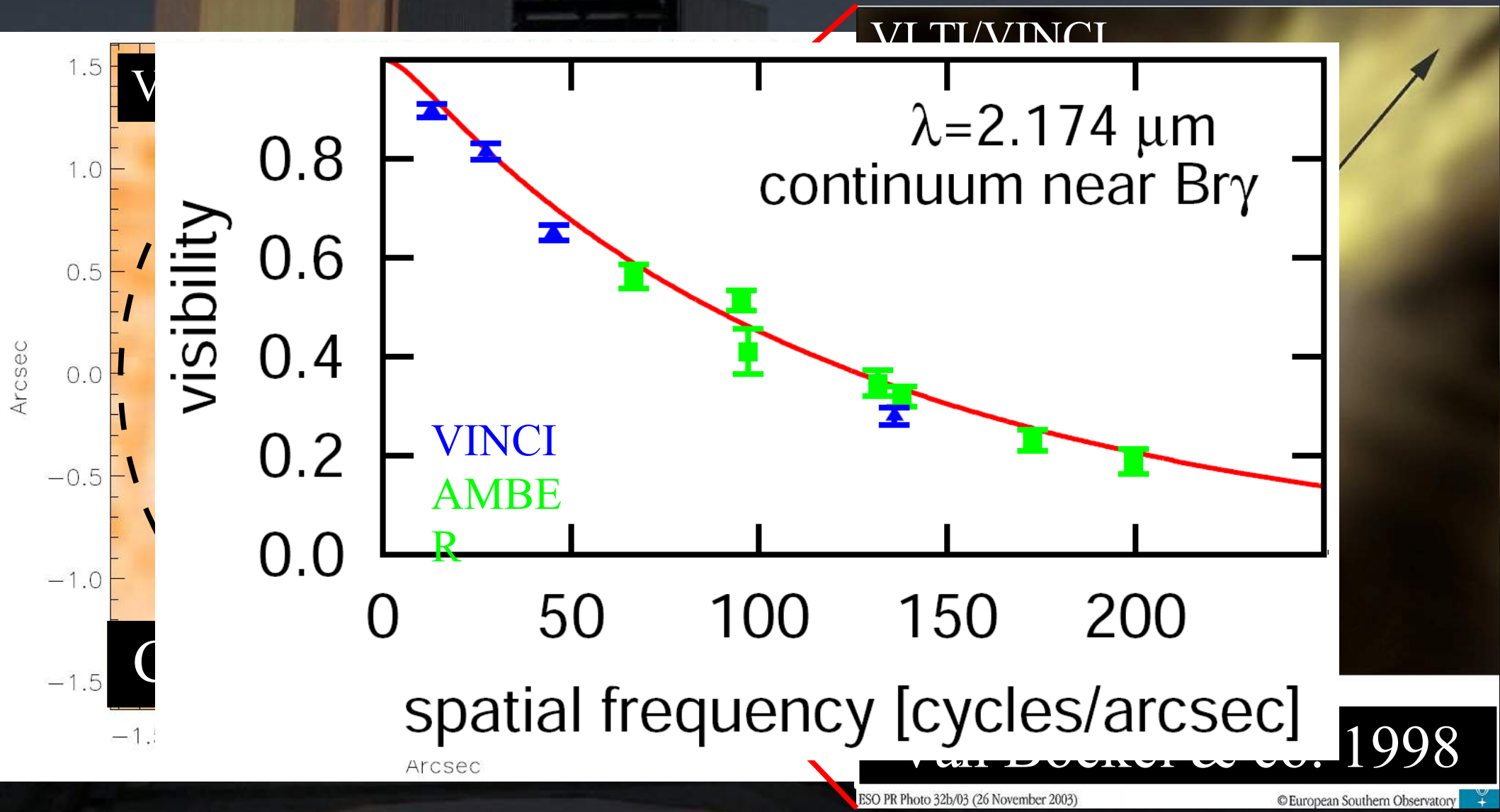


η Car

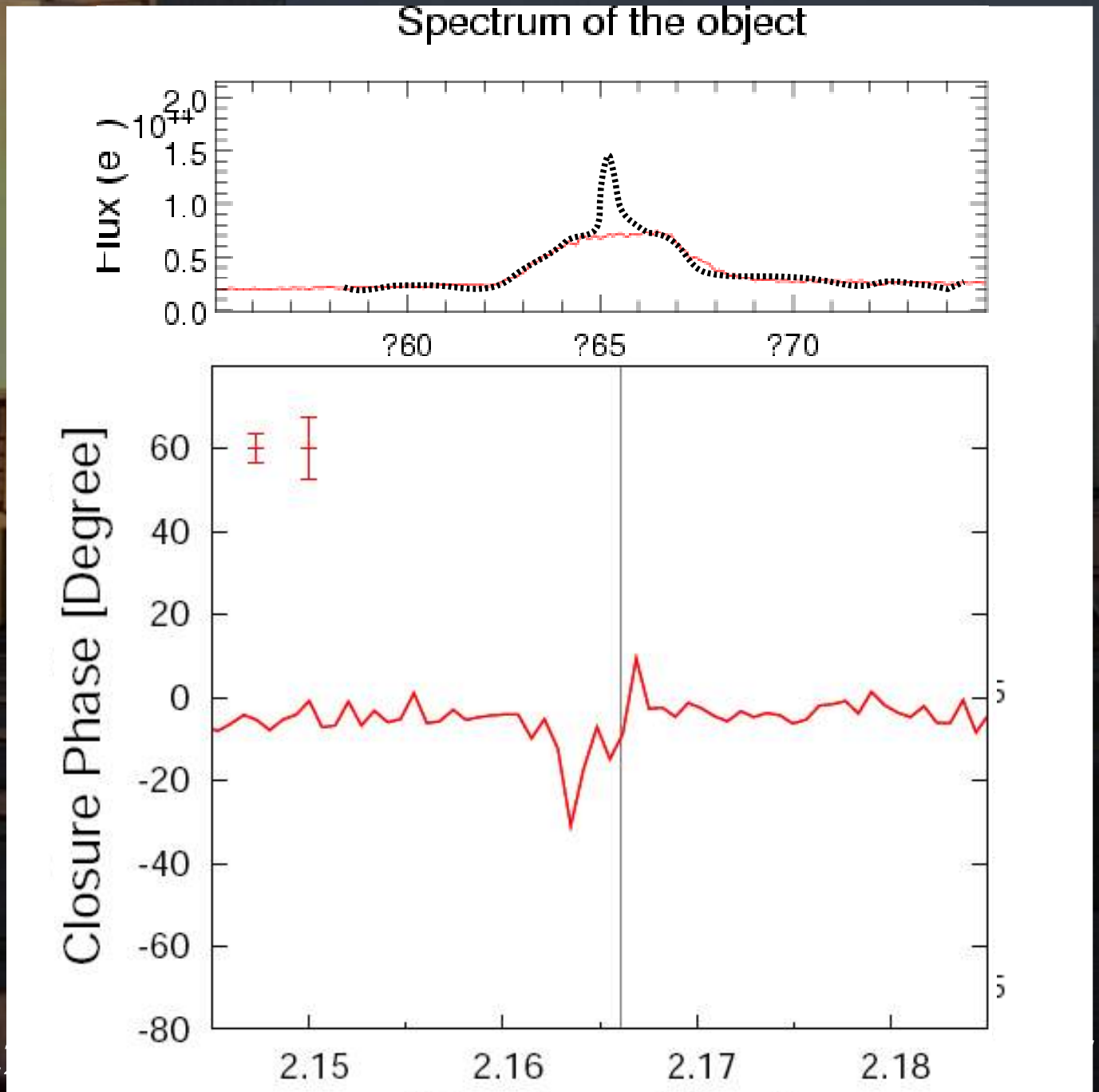

VLT/NACO
Chesneau & co., 2005
Arcsec
Arcsec
1.5
1.0
0.5
0.0
−0.5
−1.0
−1.5
4×10⁶
3×10⁶
2×10⁶
1×10⁶
0


VLTI/VINCI
1 mas
Van Boekel & co. 1998
ESO PR Photo 32b/03 (26 November 2003)
©European Southern Observatory

η Car

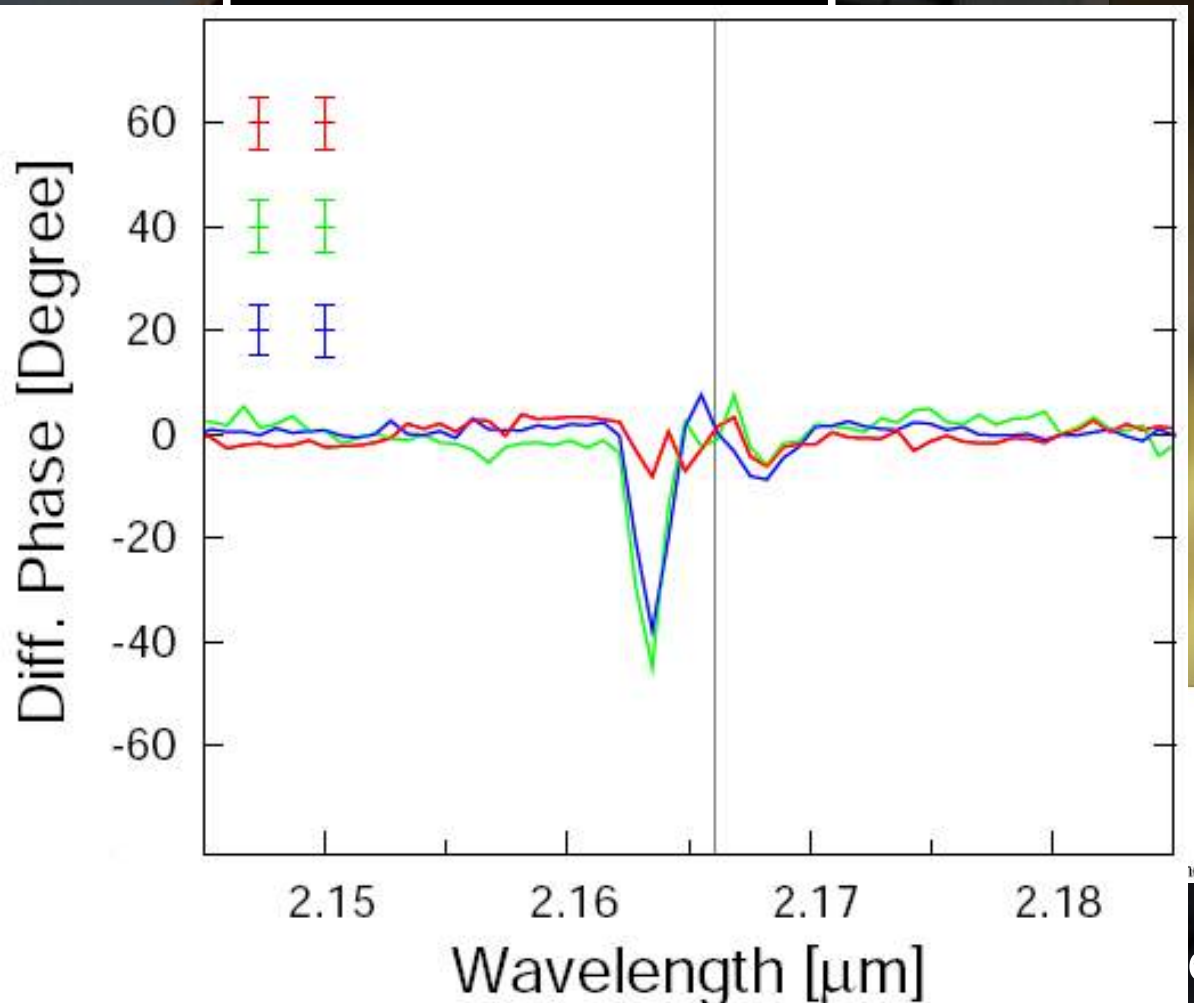

λ=2.174 μm
continuum near Brγ
visibility
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
50
100
150
200
spatial frequency [cycles/arcsec]
VINCI
AMBER
1.5
1.0
0.5
0.0
−0.5
−1.0
−1.5
Arcsec
Arcsec
1998
ESO PR Photo 32b/03 (26 November 2003)
©European Southern Observatory

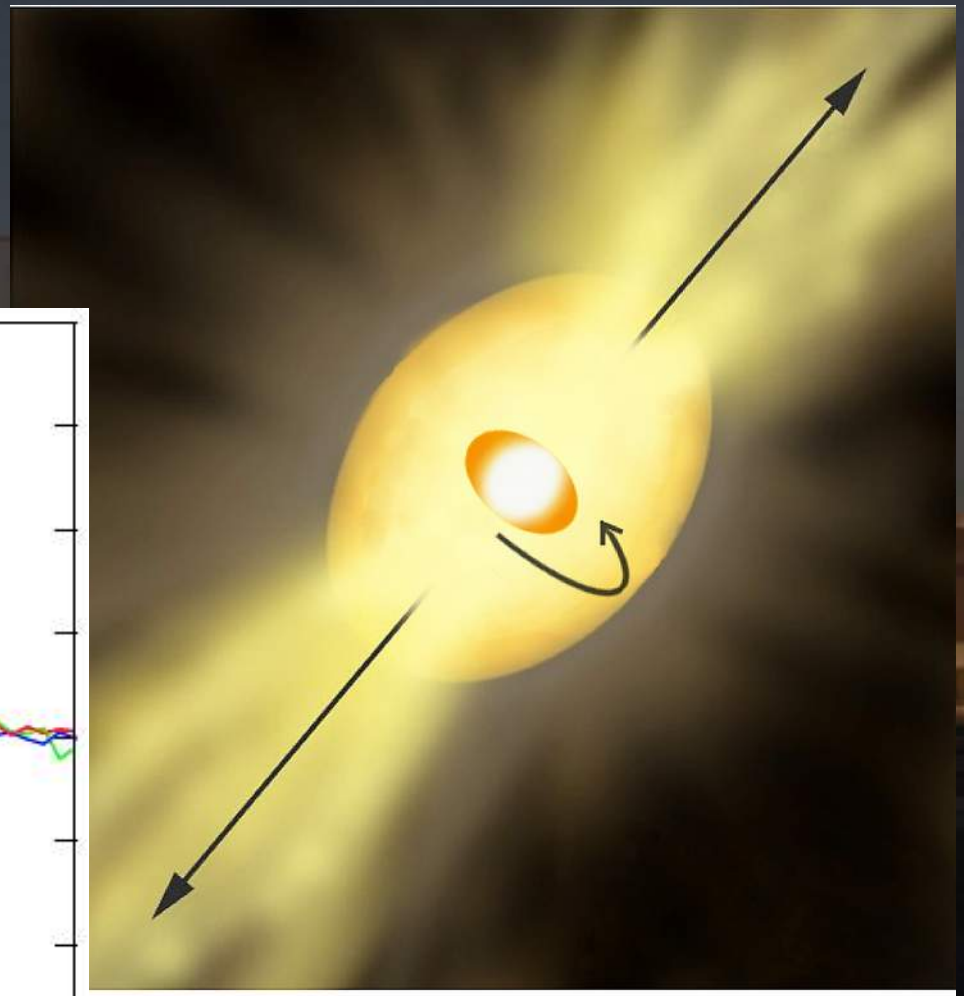
η Car


Spectrum of the object
Flux (e)
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
?60
?65
?70
Closure Phase [Degree]
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
2.15
2.16
2.17
2.18

η Car

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





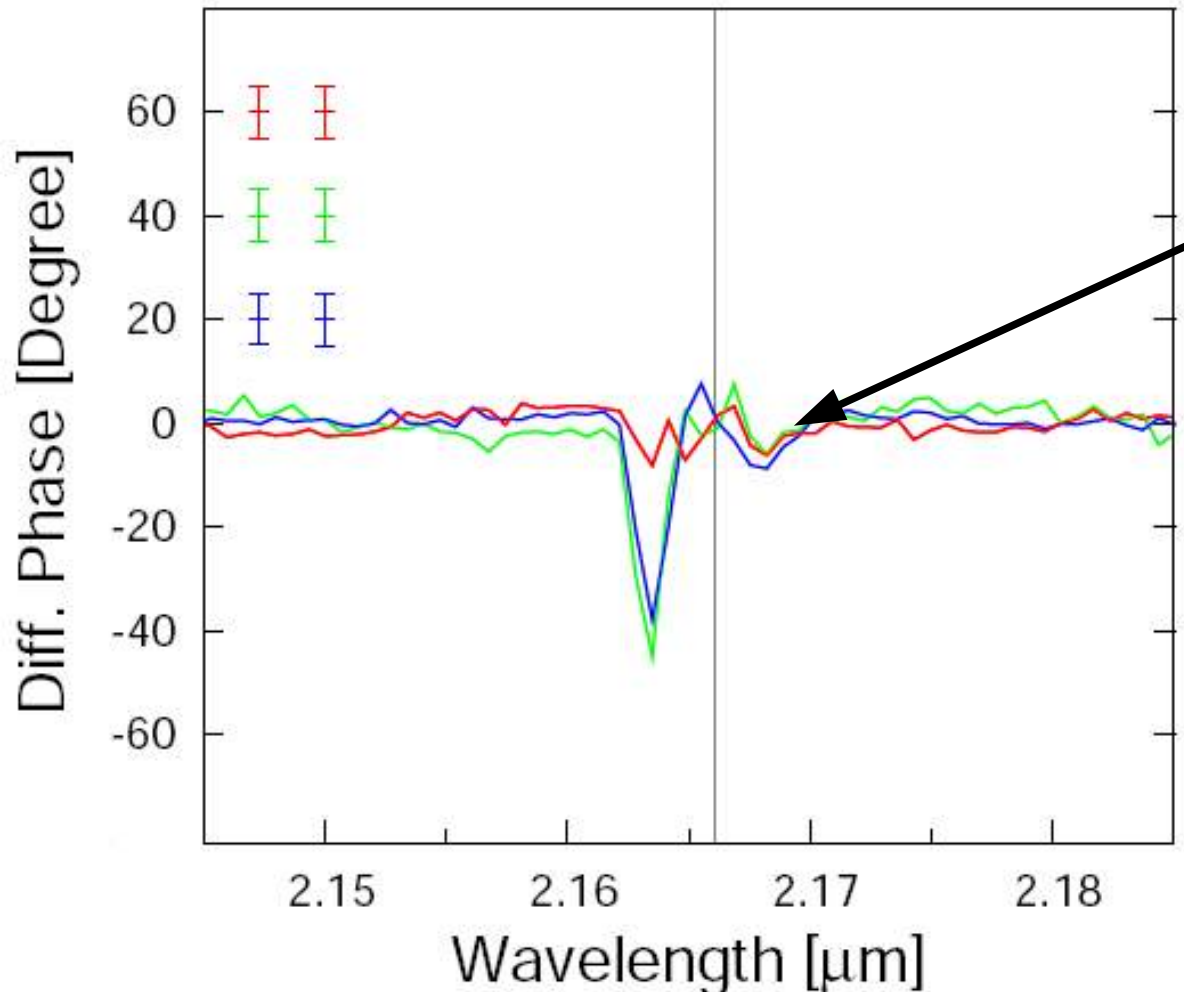
The Highly Unstable Star Eta Carinae
(Artist's Impression)

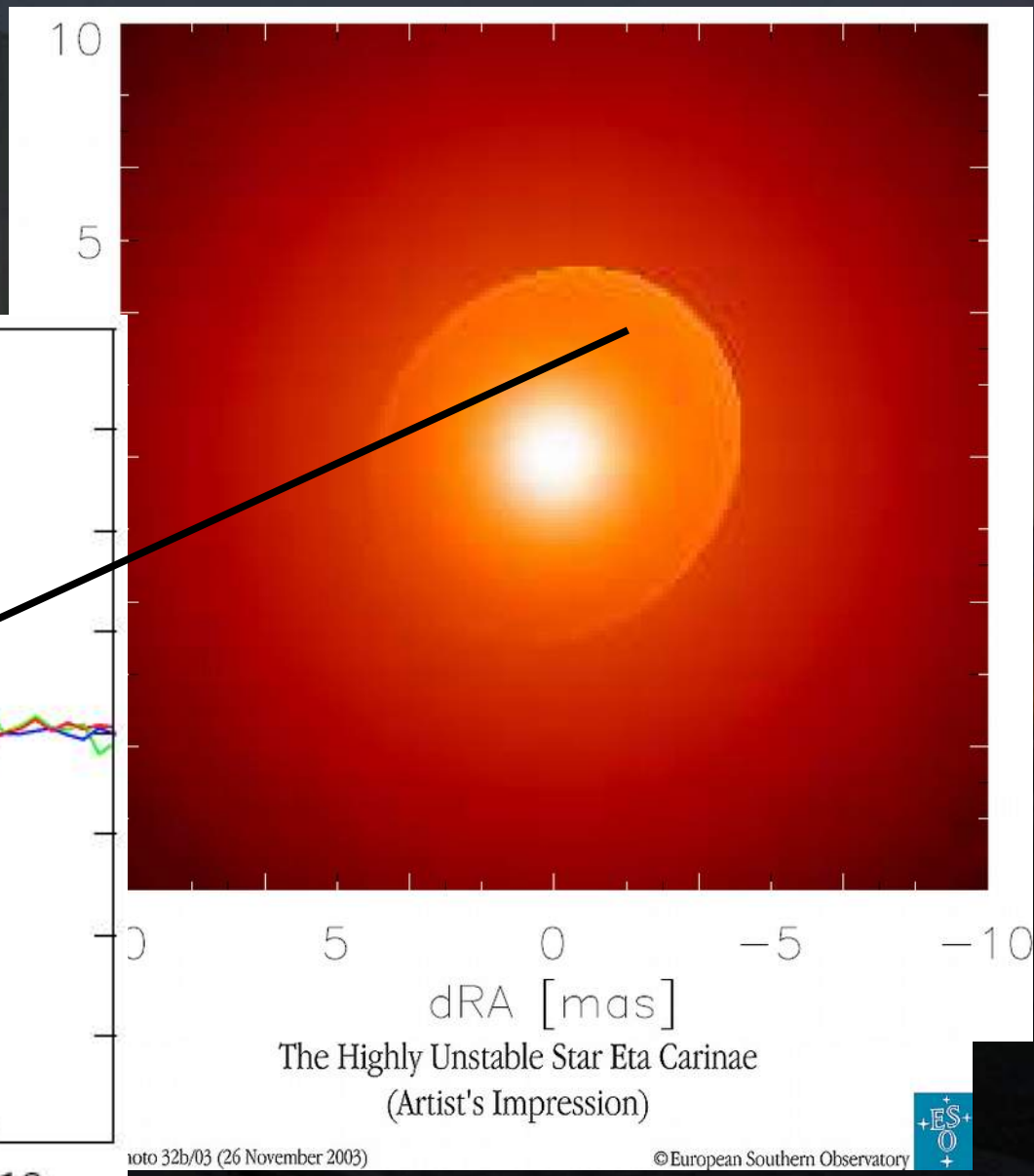
oto 32b/03 (26 November 2003)

©European Southern Observatory

η Car

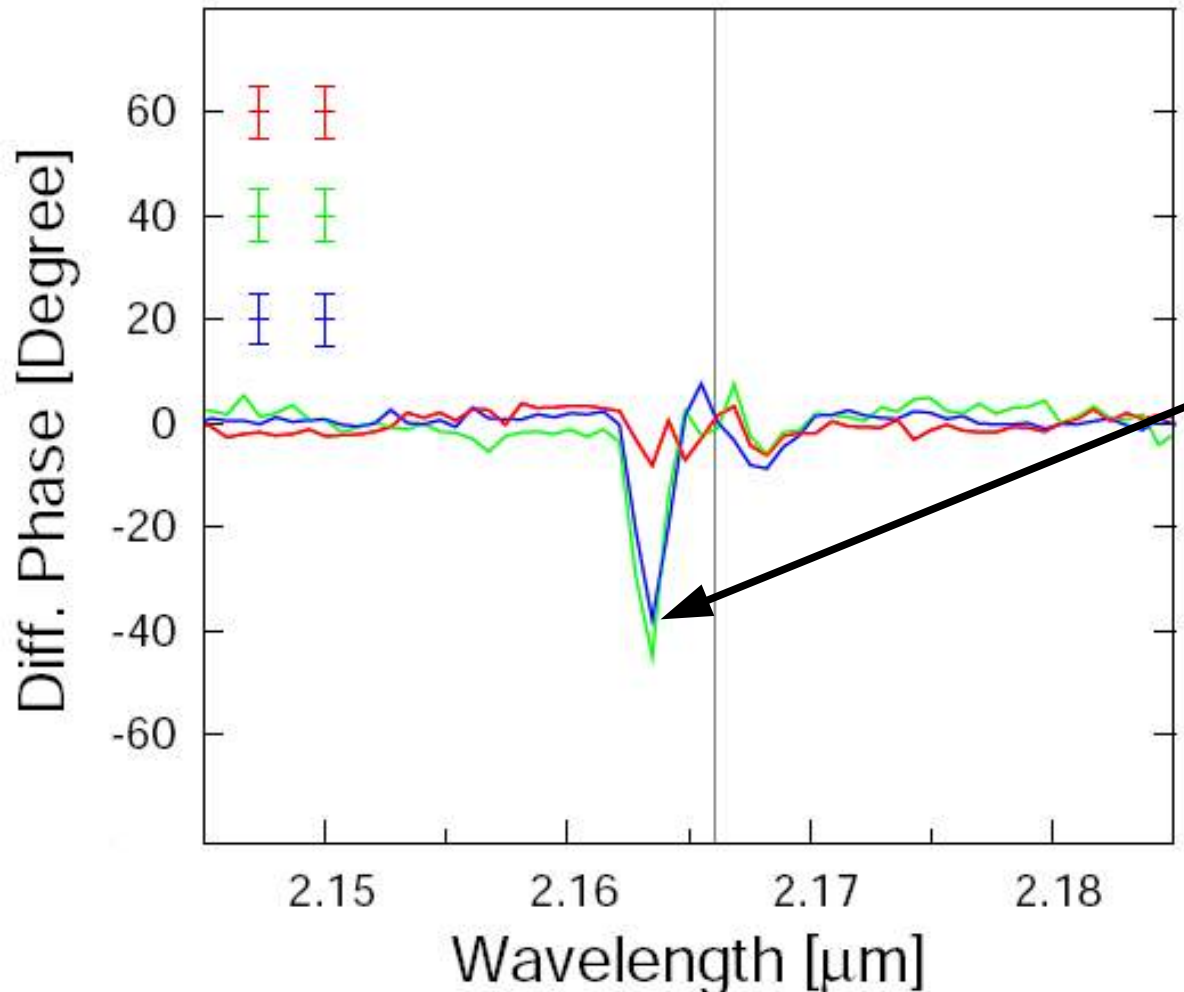
Weigelt & co., A&A 2007 (sous presse)

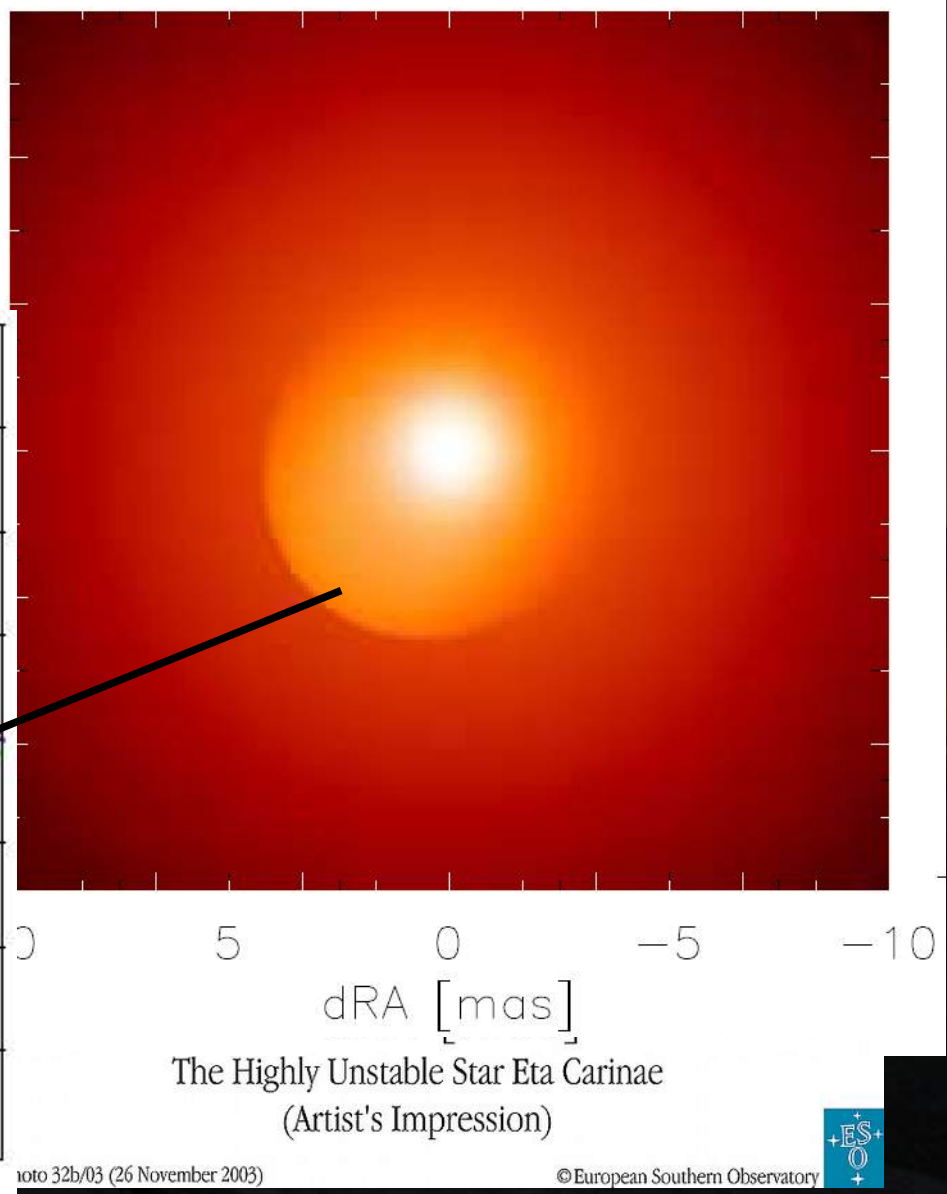




η Car

Weigelt & 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

α Arae

Étoiles Be

Étoiles massives B

L ~ 10^3 - 10^4 L_{soleil}

Raies de Balmer au moins une fois en émission

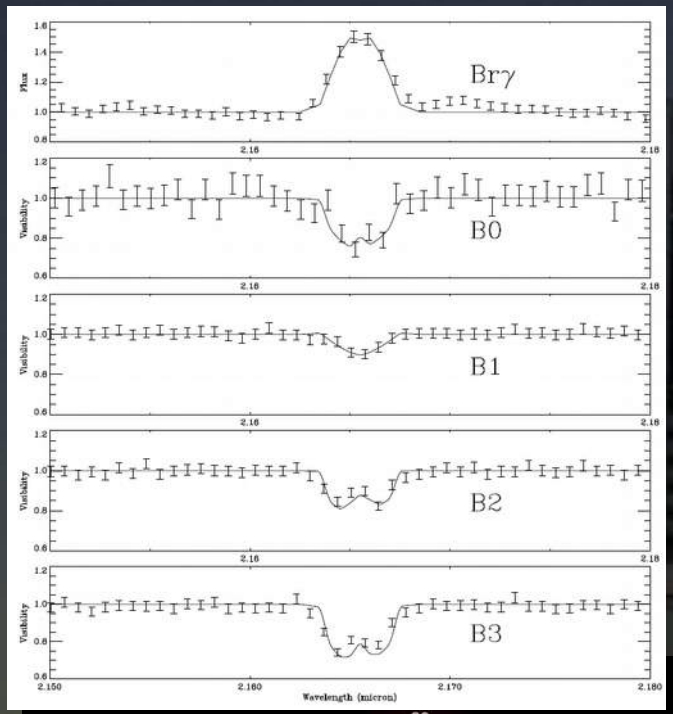
Excès IR

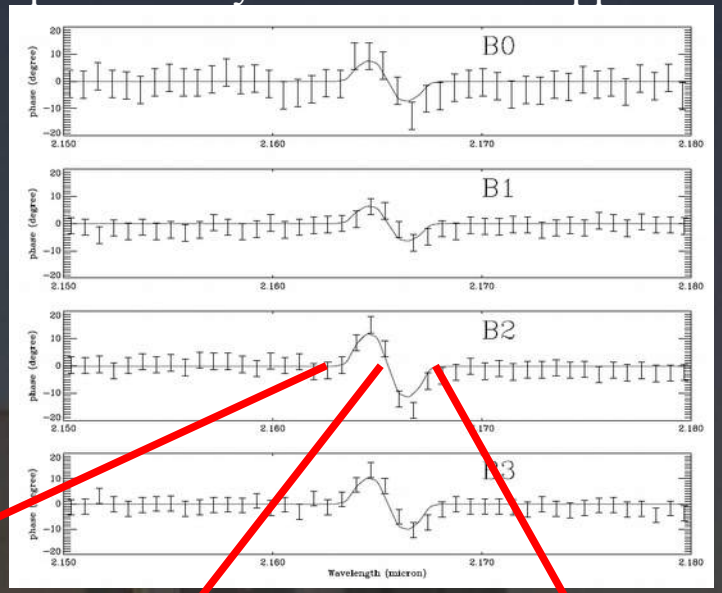
Enveloppe circumstellaire

Perte de masse ~ 10^{-6} M_{soleil} / an

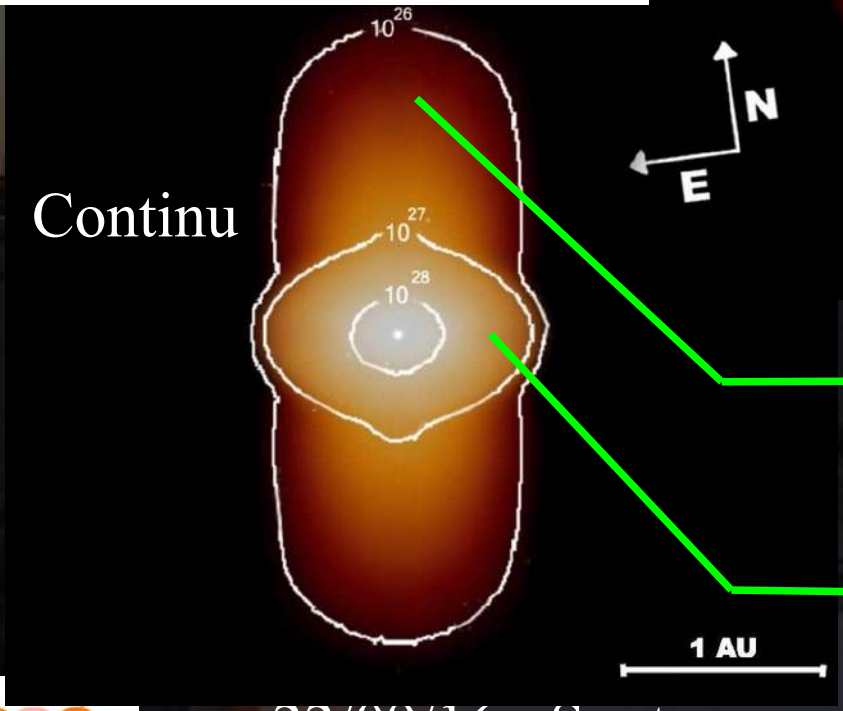
Réduction des données : F. Millour et M. Vannier, modélisation SIMECA par Anthony Meilland et Philippe Stee

α Arae





Raie



Continu

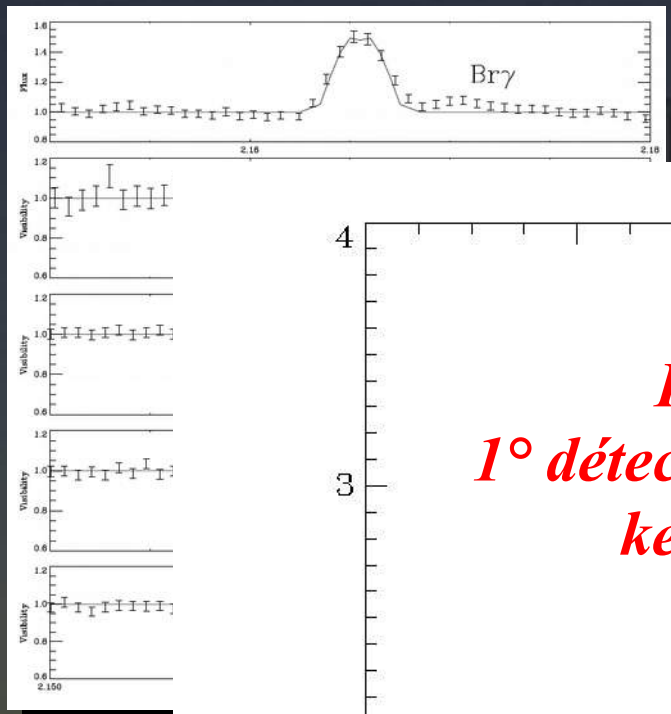
Vent polaire

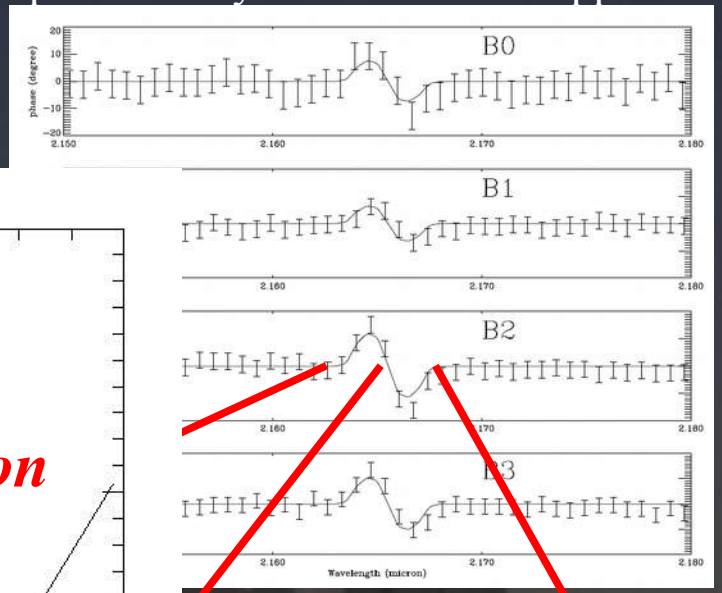
Disque équatorial

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

Réduction des données : F. Millour et M. Vannier, modélisation SIMECA par Anthony Meilland et Philippe Stee

α Arae



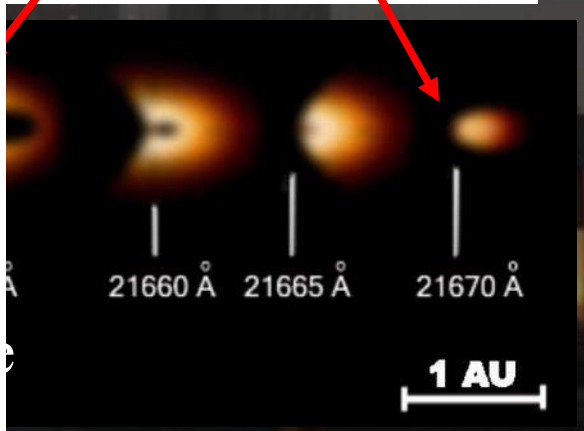


Résultat principal :
1° détection directe de la rotation keplerienne du disque

$$V = V_0\, r^{-\beta}$$

χ^2_{min}

χ^2 — β



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

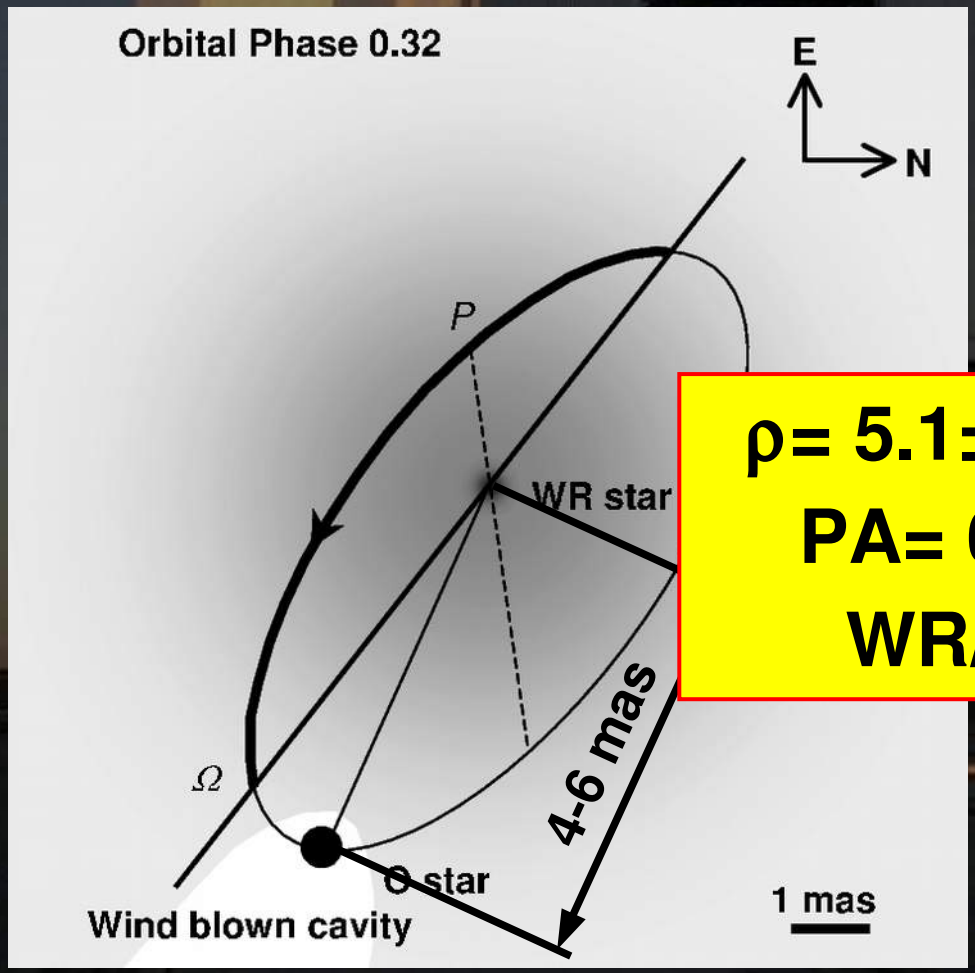
- Les observables d'AMBER
- L'apport potentiel de la phase différentielle
- Les vraies données

Les étoiles chaudes

- η Car
- α Arae
- γ^2 Velorum

γ^2 Velorum

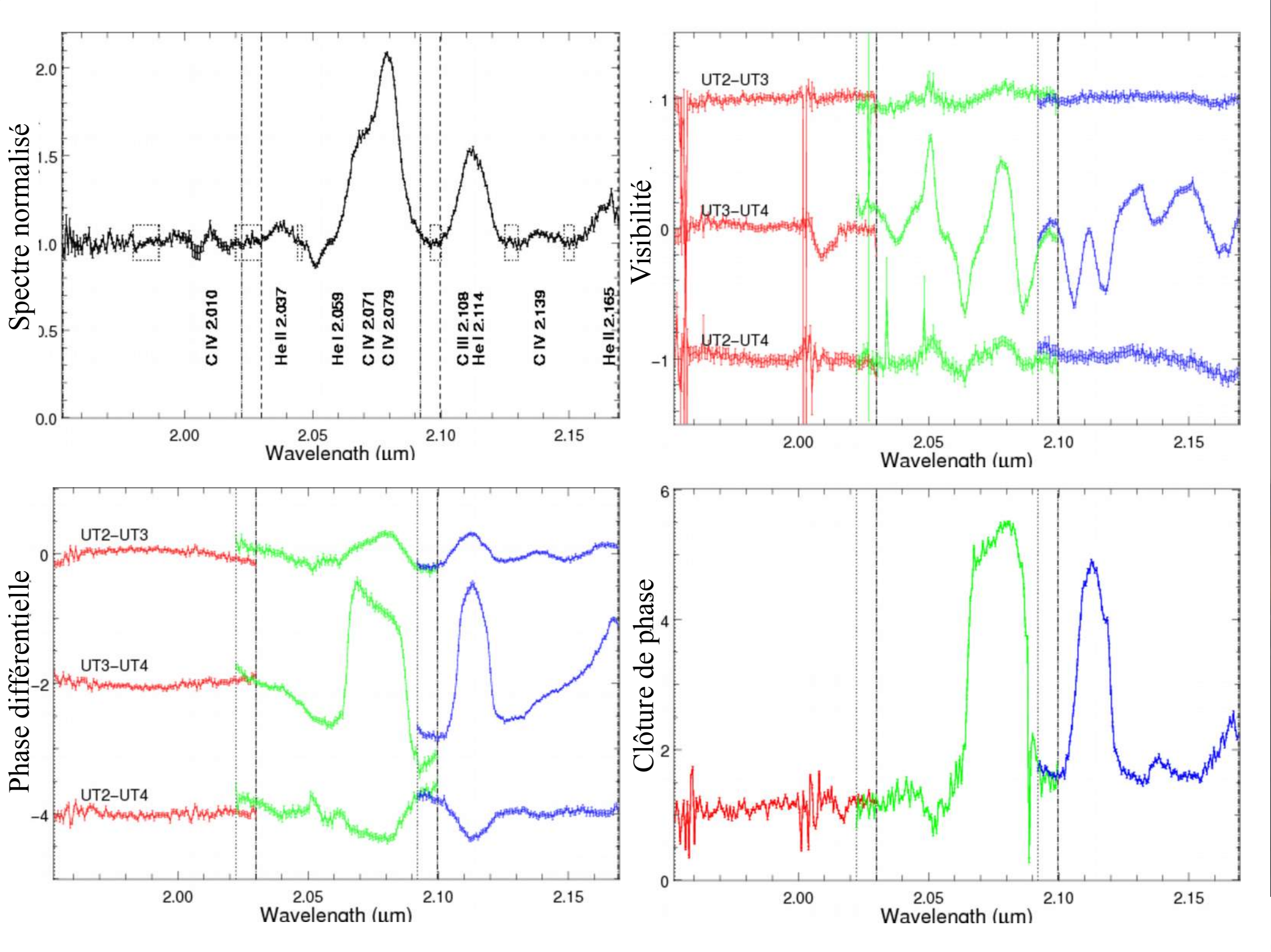
γ^2 Velorum

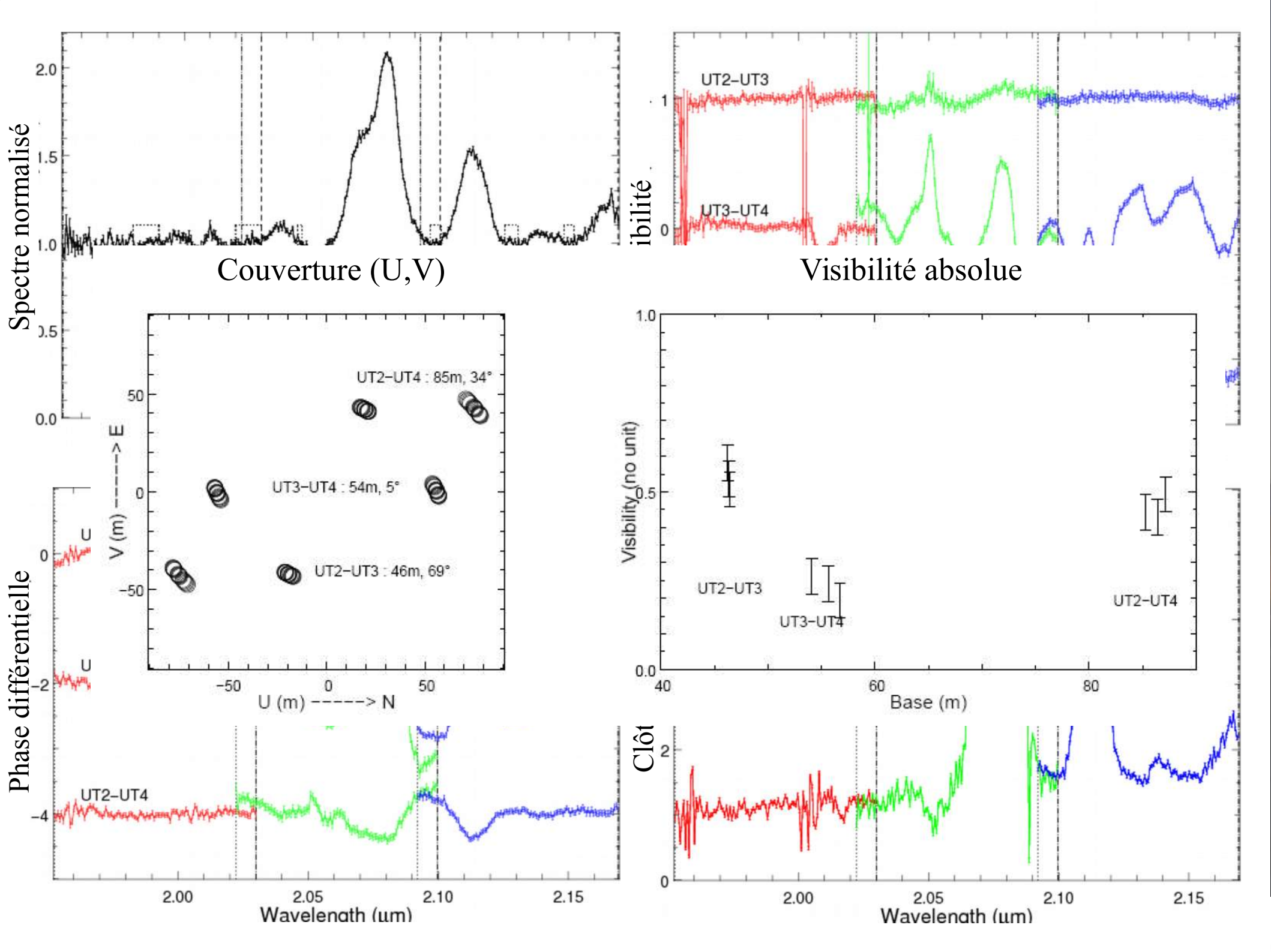


ρ= 5.1±0.9 mas
PA= 66±15°
WR/O ~ 1

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 ?


Spectre normalisé
C IV 2.010
He II 2.037
He I 2.059
C IV 2.071
C IV 2.079
C III 2.108
He I 2.114
C IV 2.139
He II 2.165
Wavelength (μm)
Visibilité
UT2–UT3
UT3–UT4
UT2–UT4
Wavelength (μm)
Phase différentielle
UT2–UT3
UT3–UT4
UT2–UT4
Wavelength (μm)
Clôture de phase
Wavelength (μm)


Spectre normalisé
Couverture (U,V)
UT2–UT3
UT3–UT4
Visibilité absolue
UT2–UT4 : 85m, 34°
UT3–UT4 : 54m, 5°
UT2–UT3 : 46m, 69°
V (m) ------> E
U (m) ------> N
Visibility (no unit)
Base (m)
UT2–UT3
UT3–UT4
UT2–UT4
Phase différentielle
UT2–UT4
Wavelength (µm)
Clôt
Wavelength (µm)

Modèle géométrique utilisé

"Etoile double + Composante diffuse"

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

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

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

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

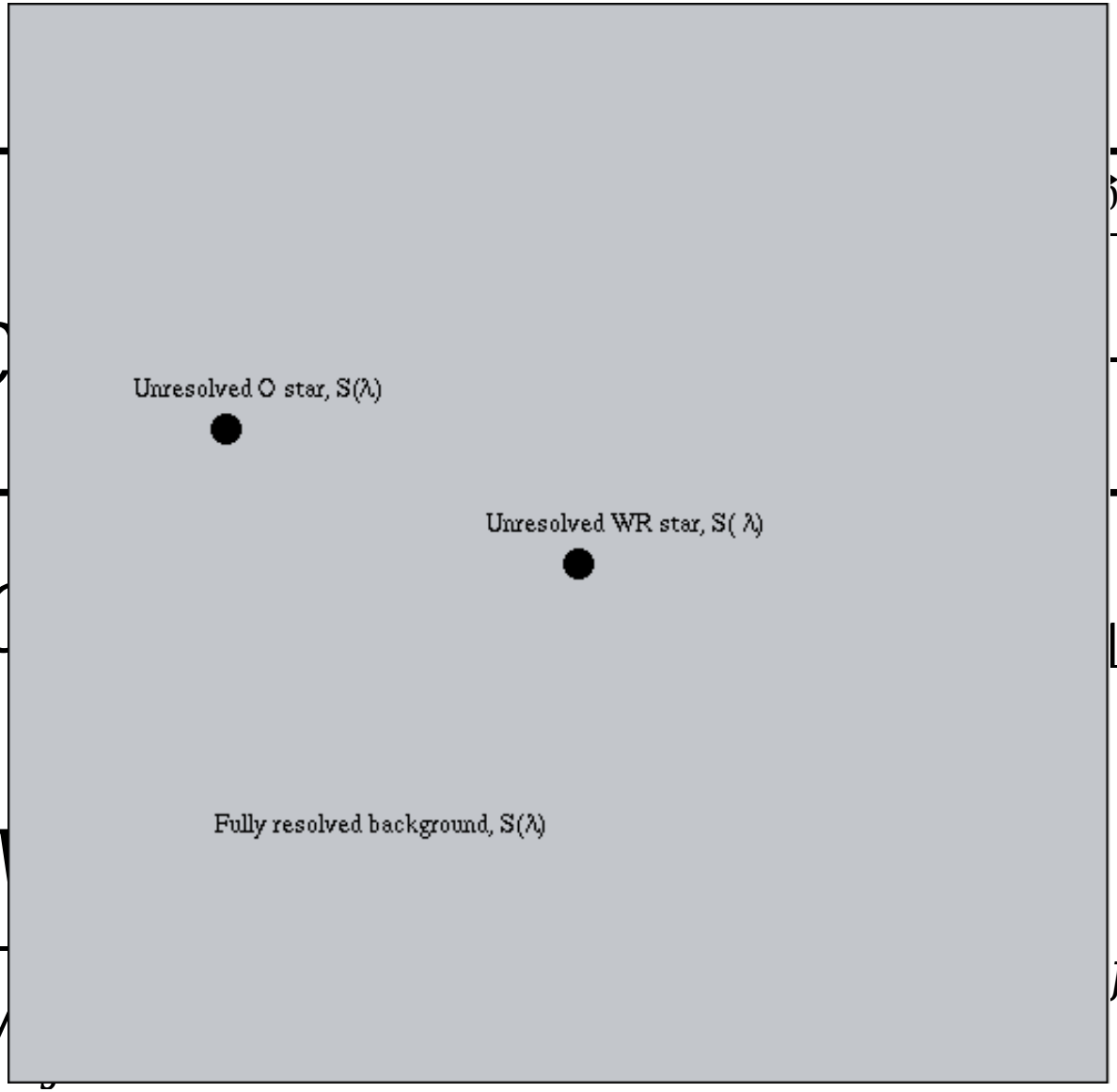
$$\varphi_{jk}^{diff}(\lambda)=\arctan\left(C_{jk}e^{-2\mathrm{i}\pi\frac{\delta}{\lambda}}\right)$$

Modèle géométrique utilisé

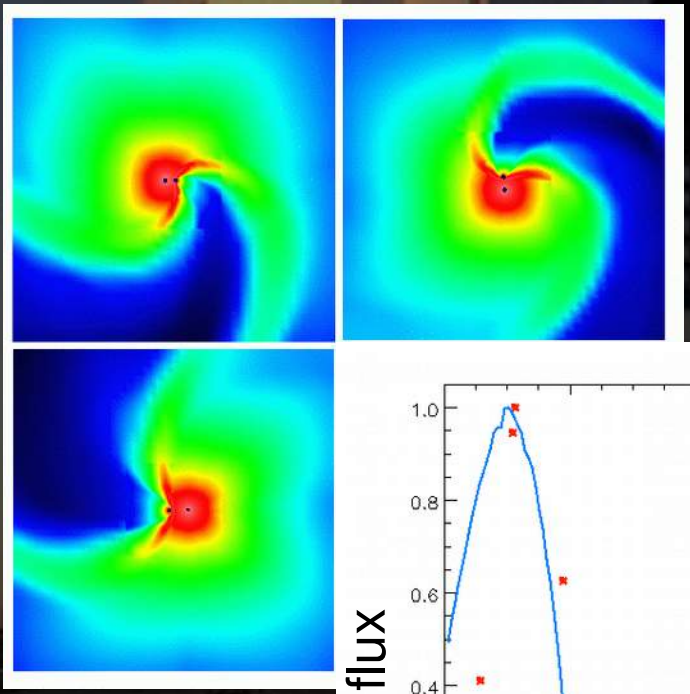
$$C$$

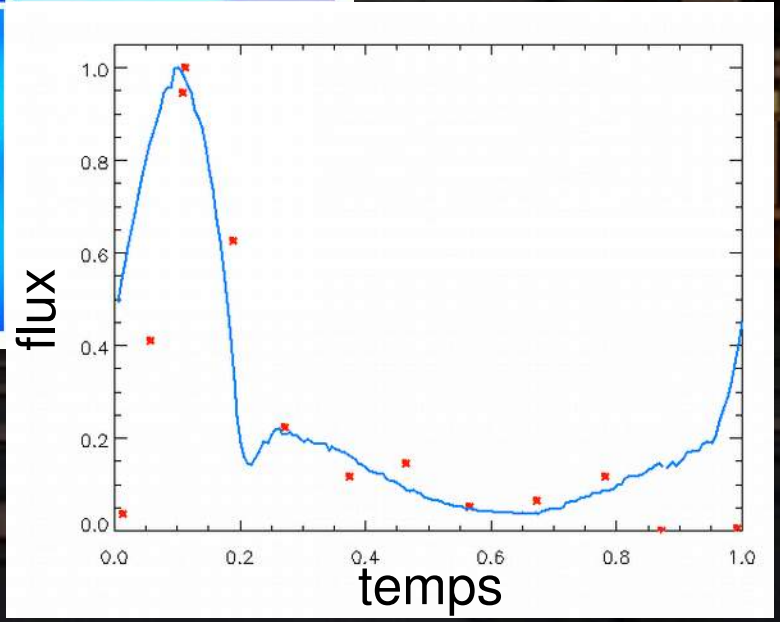
$$V_{jk}(\lambda)=|C \qquad 12 C_{23} C_{13}^{*})$$

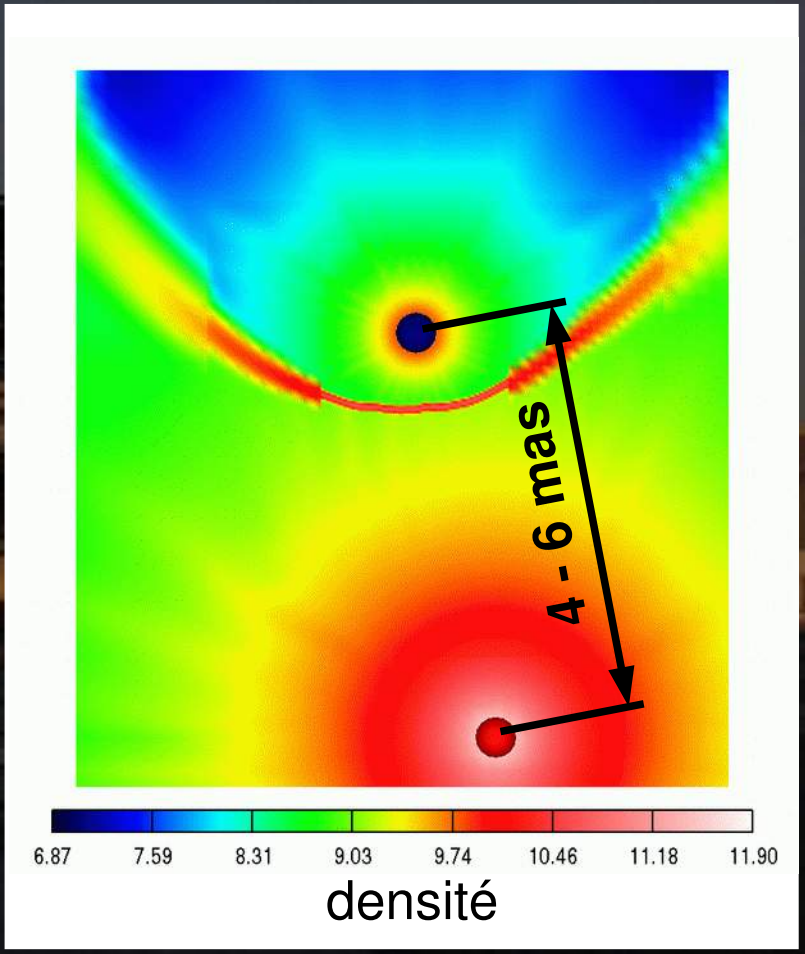
$$V_{jk}^{diff}(\lambda)=\frac{V}{\langle V \qquad jk\, e^{-2i\pi\frac{\delta}{\lambda}})}$$



Simulations hydrodynamiques Follini et al. (1999, 2002)







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

Ajustement dans le continu

Paramètres de binaire stables

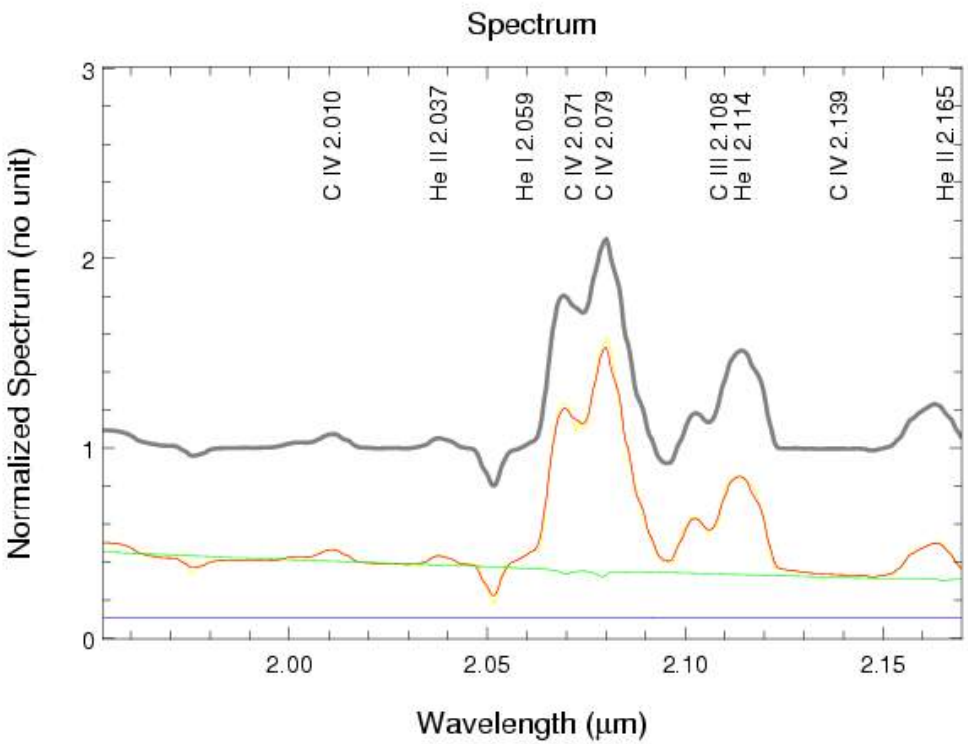
= 3.65±0.12 mas
PA = 73±13°
WR/O = 0.79±0.12

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

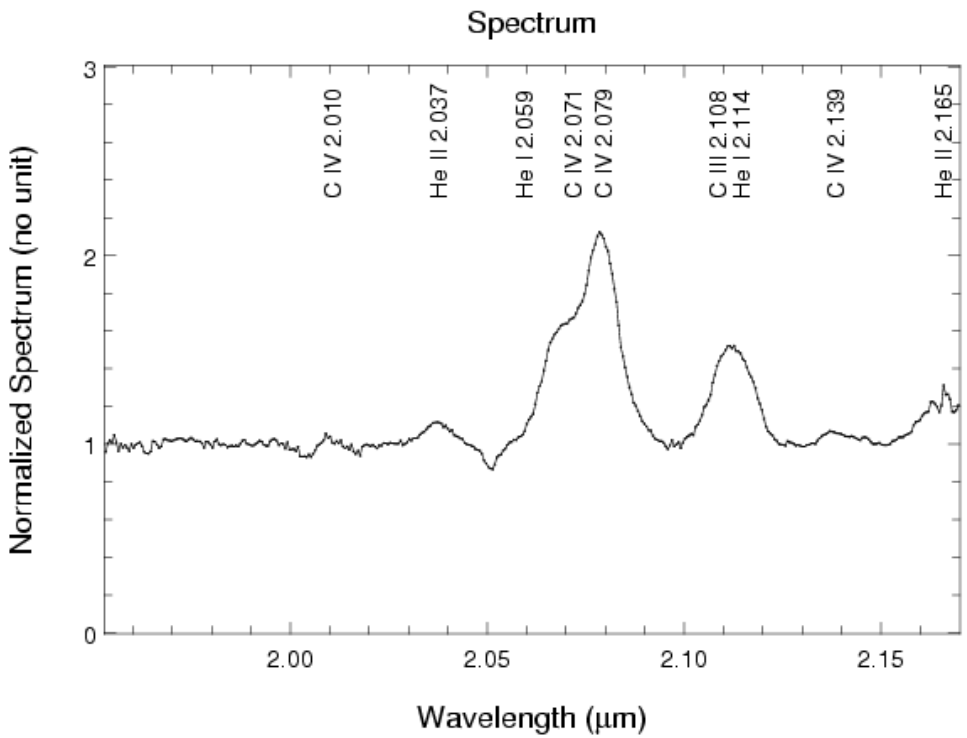
Wavelength (μm)	1.985	2.025_1	2.025_2	2.045	2.098_1	2.098_2	2.1275	2.150	Avg.	RMS	Δ
					Observation						
Visibility UT2-UT3	0.50	0.52	0.47	0.54	0.54	0.58	0.59	0.59			
Visibility UT3-UT4	0.26	0.26	0.28	0.28	0.23	0.20	0.24	0.26			
Visibility UT2-UT4	0.44	0.43	0.42	0.42	0.41	0.53	0.52	0.48			
Closure 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 (°)	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

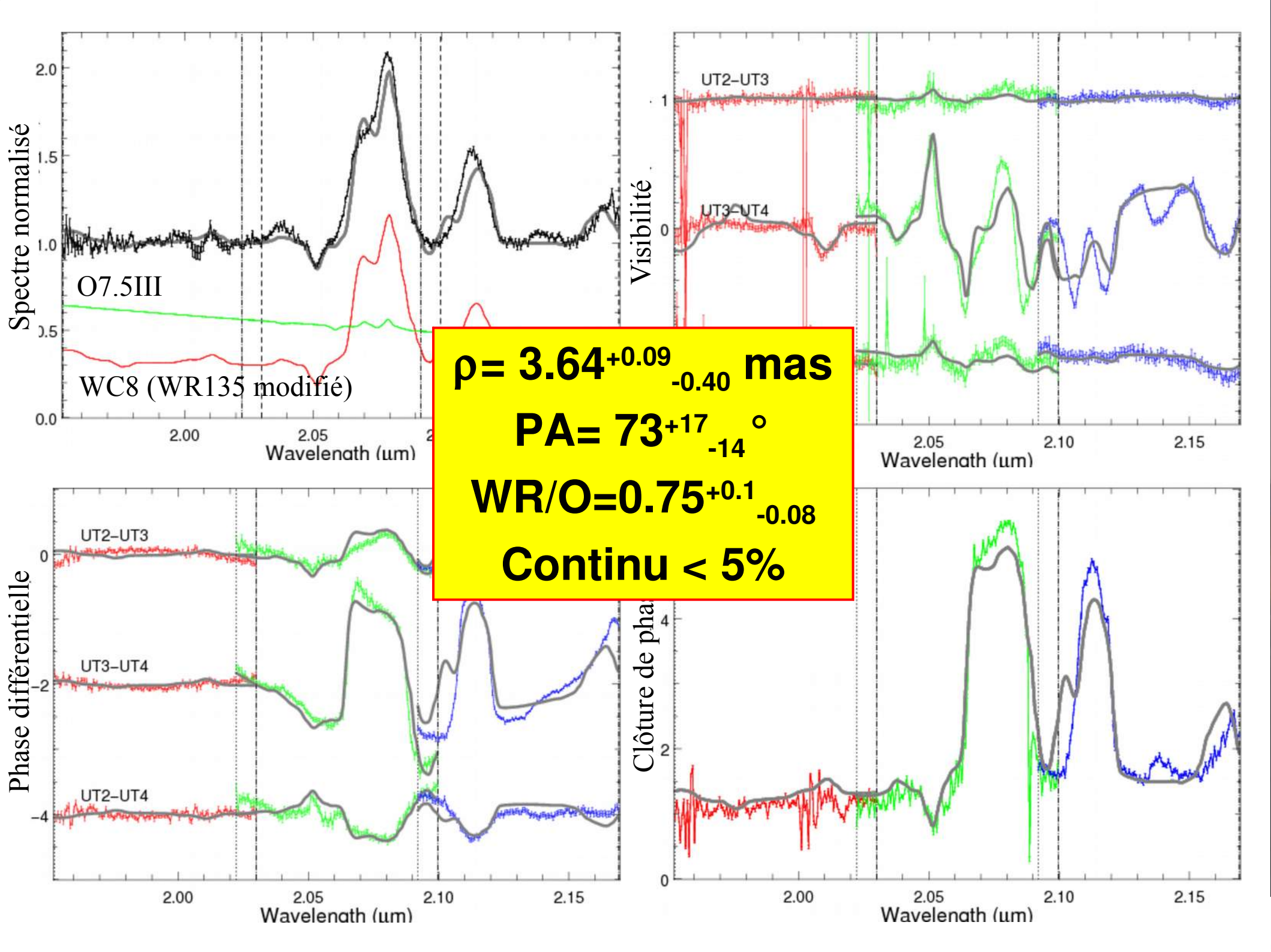
Spectre de WR135 modifié (Dessart & co. 2000)
Bibliothèque de spectres d'étoiles O (De Marco & co. 2000)
Continu diffus (=> poussières)

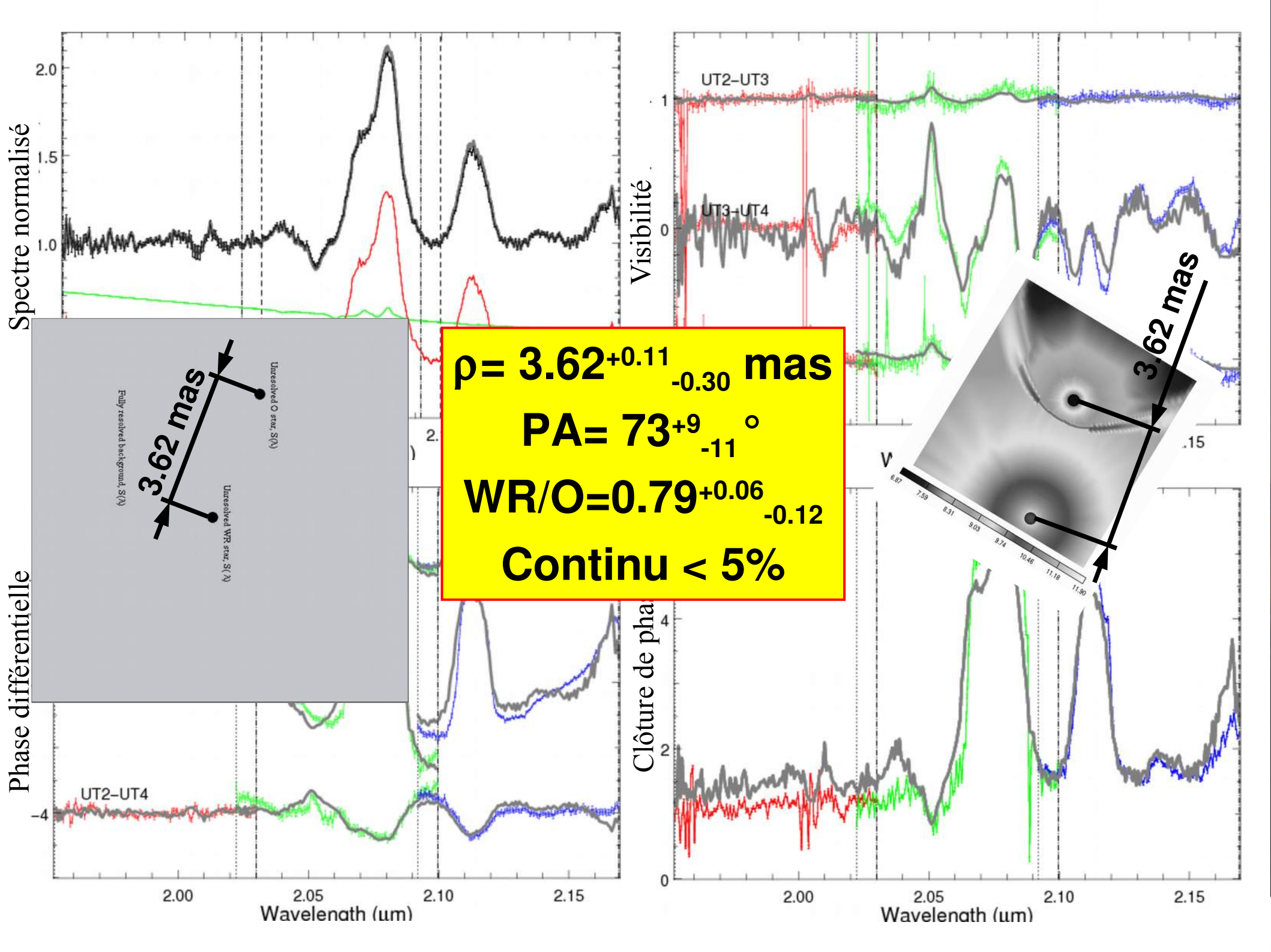


Modèle



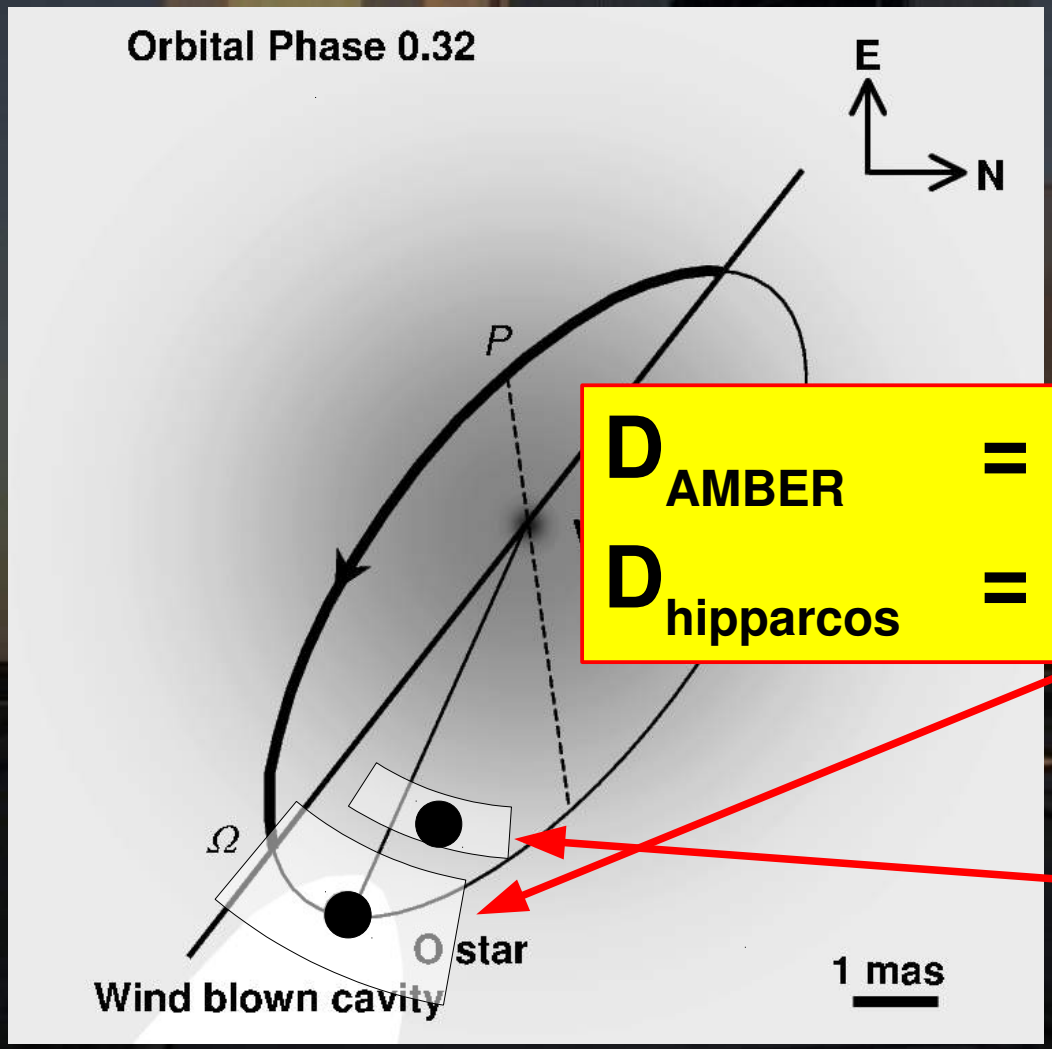
Mesure AMBER


Spectre normalisé
O7.5III
WC8 (WR135 modifié)
Wavelength (μm)
Visibilité
UT2–UT3
UT3–UT4
Phase différentielle
UT2–UT4
Clôture de phase
ρ= 3.64+0.09-0.40 mas
PA= 73+17-14 °
WR/O=0.75+0.1-0.08
Continu < 5%


Spectre normalisé
Visibilité
Phase différentielle
Clôture de phase
UT2–UT3
UT3–UT4
UT2–UT4
Wavelength (μm)
Wavelength (μm)
3.62 mas
3.62 mas
Unresolved O star, S(λ)
Unresolved WR star, S(λ)
Fully resolved background, S(λ)
ρ= 3.62+0.11 -0.30 mas
PA= 73+9 -11 °
WR/O=0.79+0.06 -0.12
Continu < 5%

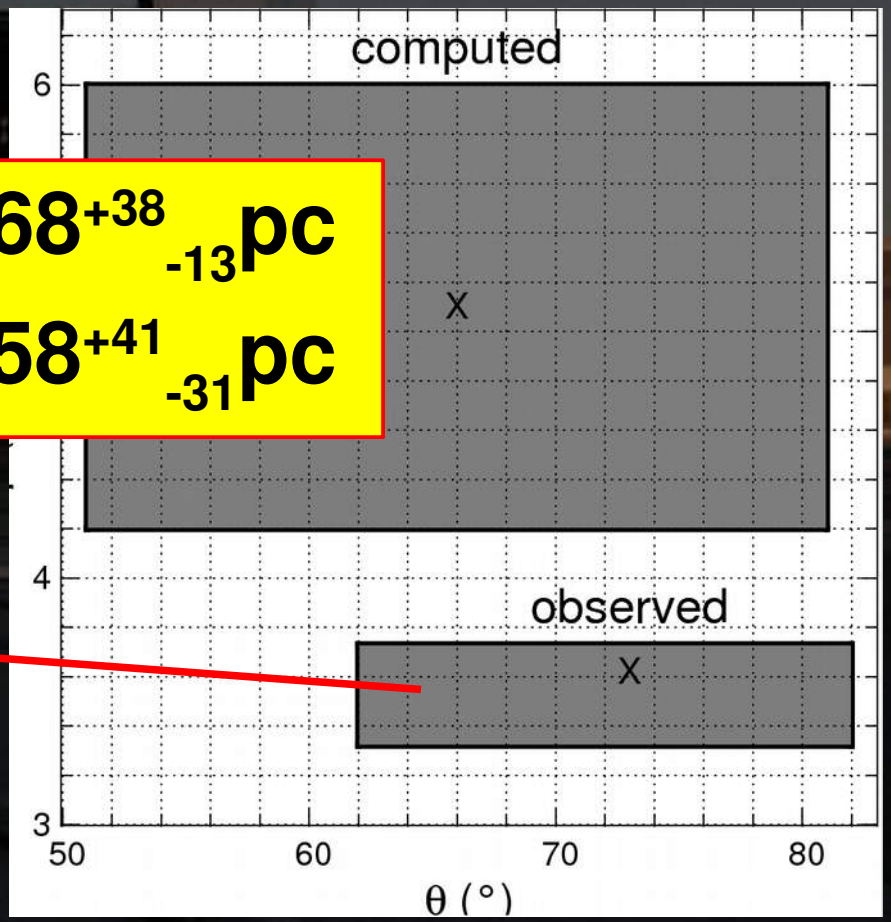
Paramètres de la binaire

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



$D_{AMBER} = 368^{+38}_{-13}$ pc

$D_{hipparcos} = 258^{+41}_{-31}$ pc



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

22/09/16 : Soutenance de thèse de Florentin Millour, 97