

Imager la surface et l'environnement proche des étoiles : du rêve à la réalité

Florentin Millour



Max-Planck-Institut
für Radioastronomie

Plan

- **Pourquoi la haute résolution angulaire ?**
- Qu'est-ce que la visibilité ?
- Qu'est-ce que l'interférométrie optique à longue base ?
- Quelles sont les mesures ?
- Qu'est-ce que le plan (u,v)
- Le VLTI et quelques applications
- Les premiers pas en imagerie
- Et ensuite ?



Pourquoi observer à haute résolution angulaire ?

Exemple: h Car

.Étoile L_{luminous} B_{blue} Variable

. $L = 4 \cdot 10^6 L_{\text{soleil}}$

. $dM/dt = 5 \cdot 10^{-3} M_{\odot} / \text{an}$

.Vent, $V > 500 \text{ km/s}$

. $M > M_{\text{eddington}} (?)$

.Nébuleuse de l'Homunculus

(1841)

AAT (4m), limité par le seeing

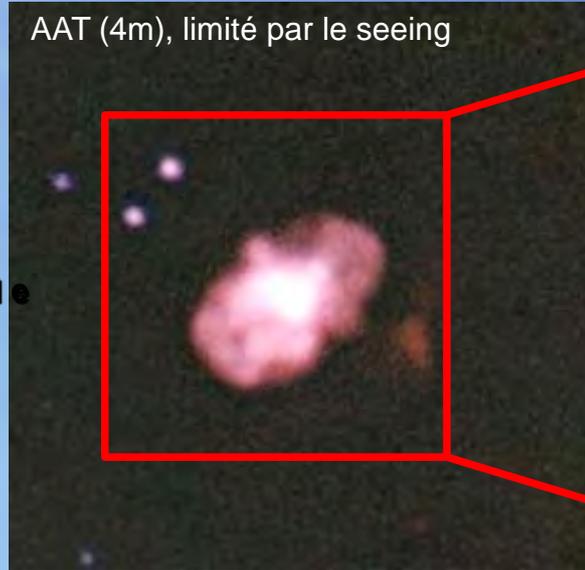


Pourquoi observer à haute résolution angulaire ?

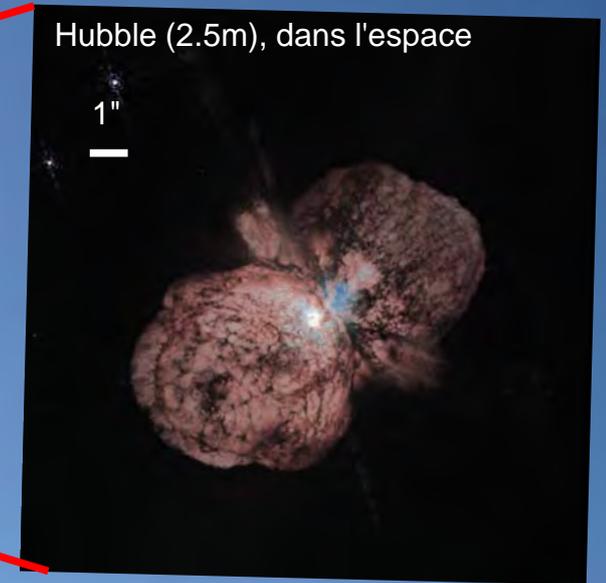
Exemple: h Car

- Étoile L_{luminous} B_{blue} Variable
- $L = 4 \cdot 10^6 L_{\text{soleil}}$
- $dM/dt = 5 \cdot 10^{-3} M_{\odot} / \text{an}$
- Vent, $V > 500 \text{ km/s}$
- $M > M_{\text{eddington}} (?)$
- Nébuleuse de l'Homunculus (1841)

AAT (4m), limité par le seeing



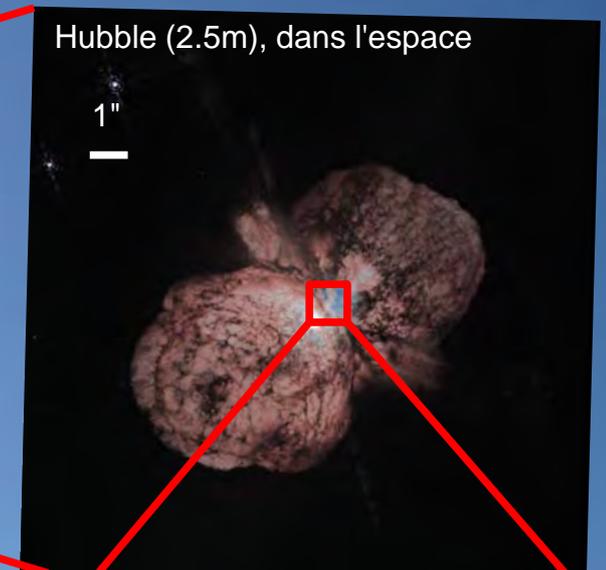
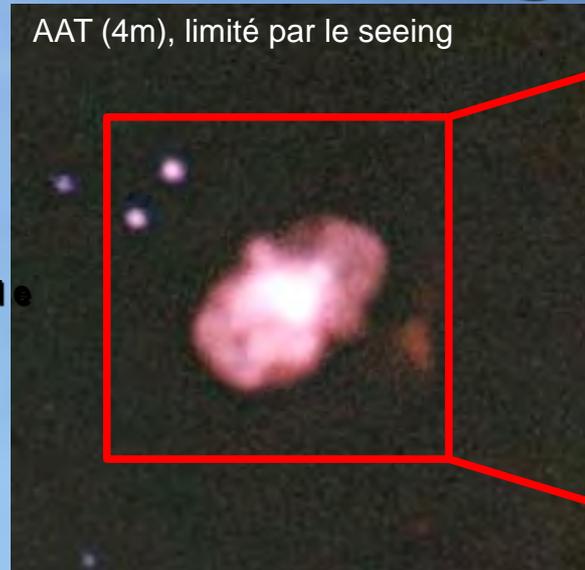
Hubble (2.5m), dans l'espace



Pourquoi observer à haute résolution angulaire ?

Exemple: h Car

- Étoile L_{luminous} B_{blue} Variable
- $L = 4 \cdot 10^6 L_{\text{soleil}}$
- $dM/dt = 5 \cdot 10^{-3} M_{\odot} / \text{an}$
- Vent, $V > 500 \text{ km/s}$
- $M > M_{\text{eddington}} (?)$
- Nébuleuse de l'Homunculus (1841)



Pourquoi observer à haute résolution angulaire ?

Exemple: h Car

.Étoile L_{luminous} B_{blue} Variable

. $L = 4 \cdot 10^6 L_{\text{soleil}}$

. $dM/dt = 5 \cdot 10^{-3} M_{\odot} / \text{an}$

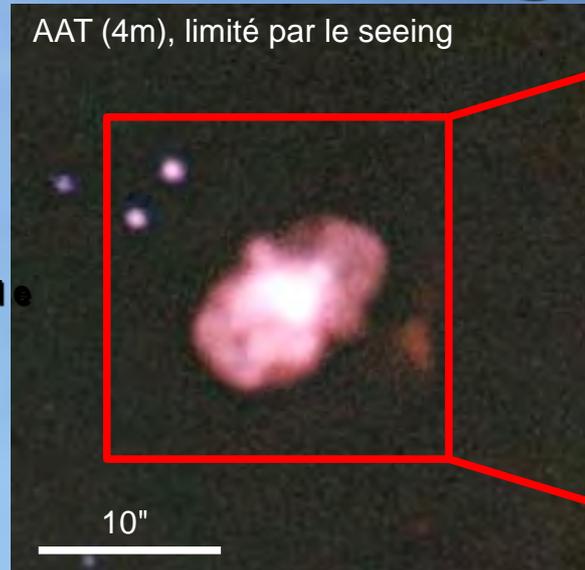
.Vent, $V > 500 \text{ km/s}$

. $M > M_{\text{eddington}} (?)$

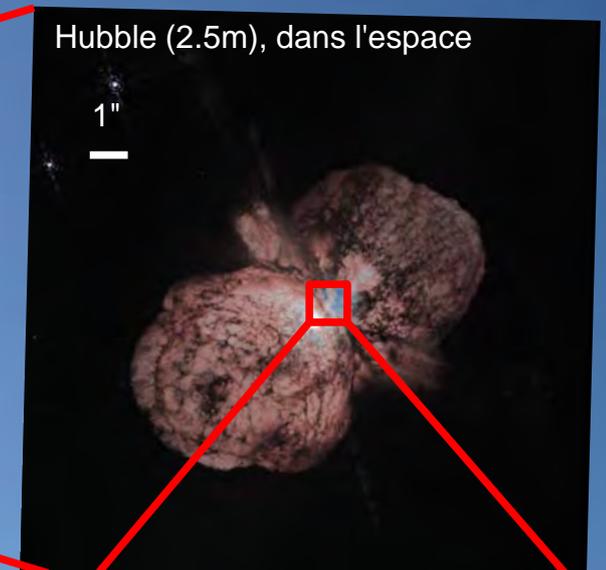
.Nébuleuse de l'Homunculus

(1841)

AAT (4m), limité par le seeing



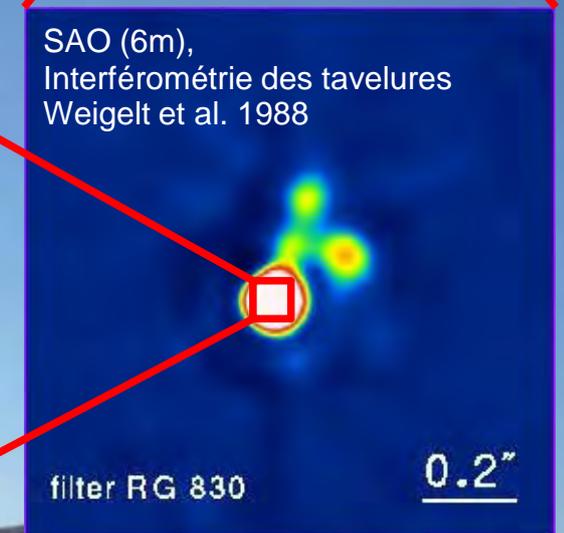
Hubble (2.5m), dans l'espace



AMBER / VLTI (130m)
Weigelt et al. 2007



SAO (6m),
Interférométrie des tavelures
Weigelt et al. 1988



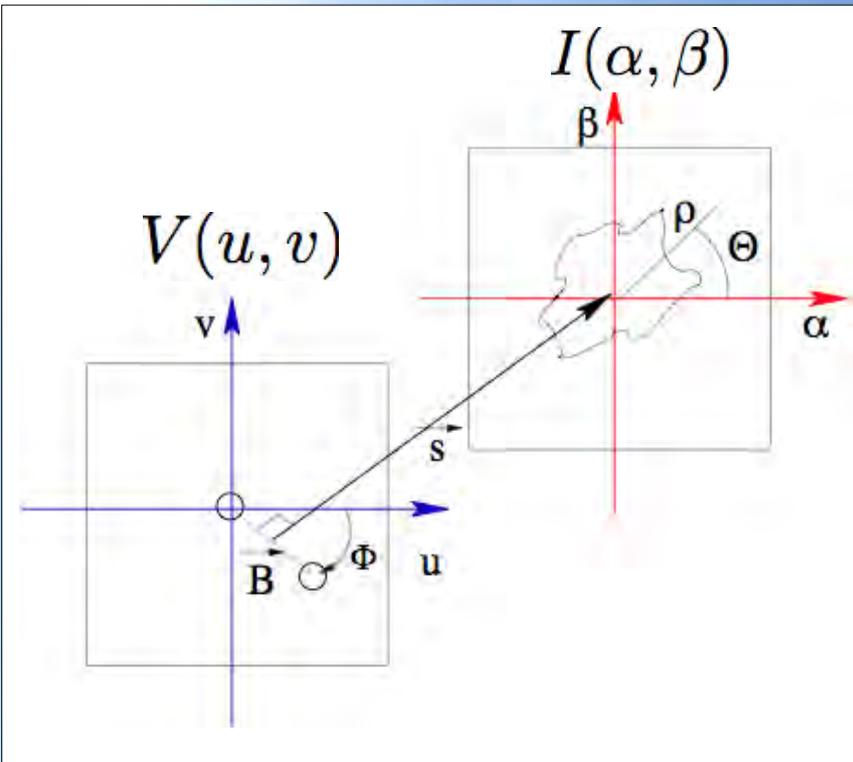
Plan

- Pourquoi la haute résolution angulaire ?
- **Qu'est-ce que la visibilité ?**
- Qu'est-ce que l'interférométrie optique à longue base ?
- Quelles sont les mesures ?
- Qu'est-ce que le plan (u,v)
- Le VLTI et quelques applications
- Les premiers pas en imagerie
- Et ensuite ?



Qu'est-ce que la visibilité ?

Une application du théorème de Zernike & Van-Cittert



Le théorème de ZVC lie :

La distribution d'intensité d'un objet sur le fond du ciel (champ éloigné)

Au champ électromagnétique arrivant à l'instrument de mesure (champ proche)

$$V(u, v) = \frac{\iint I(\alpha, \beta) \exp^{-2i\pi(\alpha u + \beta v)} d\alpha d\beta}{\iint I(\alpha, \beta) d\alpha d\beta}$$

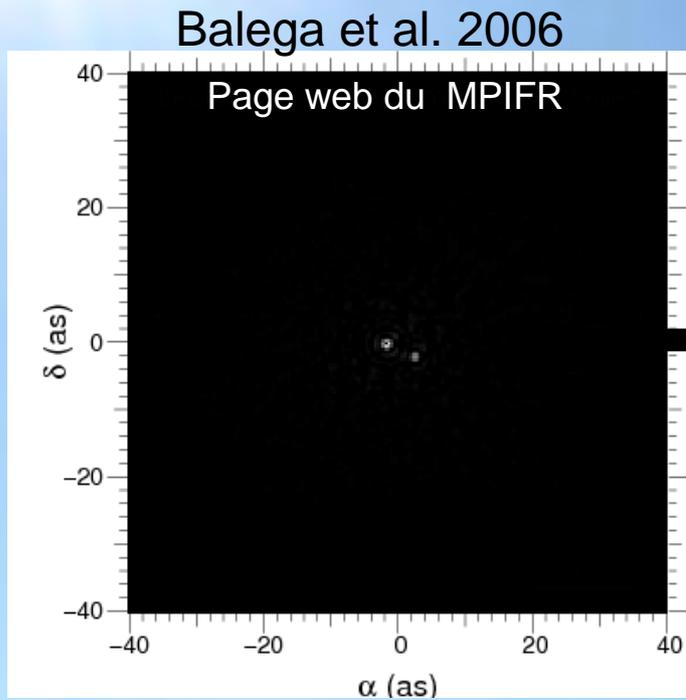
Cette relation est une **transformée de Fourier**

Coordonnées de fréquences spatiales $\mathbf{u} = \mathbf{B}_x / l$ $\mathbf{v} = \mathbf{B}_y / l$

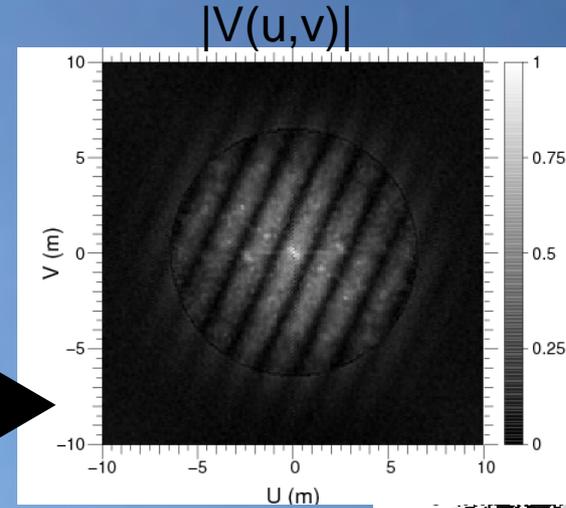
où \mathbf{B}_x et \mathbf{B}_y sont les coordonnées des bases dans le plan pupille du télescope



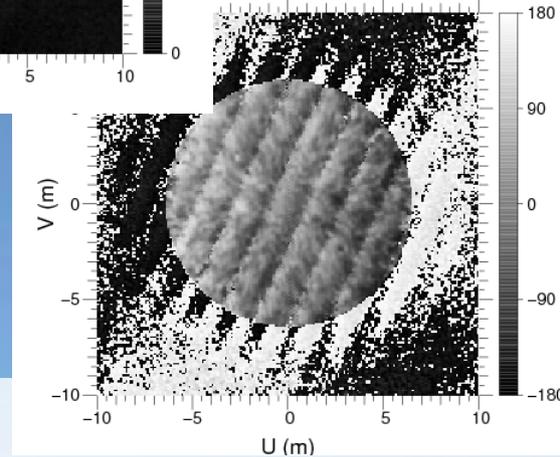
Visibilité et télescope monopupille



TF
(Transformée de Fourier)



$f(u,v)$



Théorème de Zernike-van Cittert

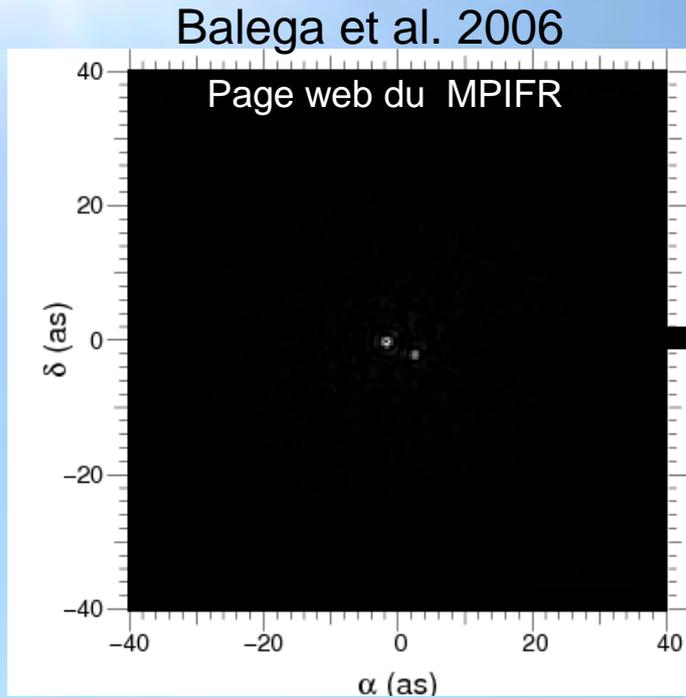
$$\text{Image : } I(x,y) = O * \text{PSF} \xrightarrow{\text{TF}} \hat{I}(u,v) = \hat{O} \times \hat{\text{PSF}} = |V(u,v)|, \phi(u,v)$$

Fréquence de coupure D/λ

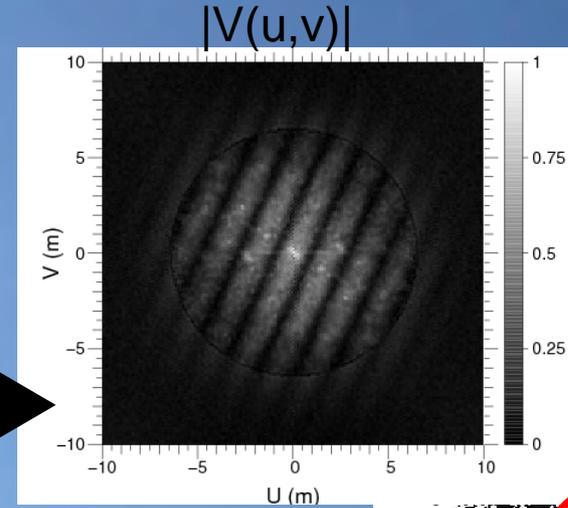
Δ Visibilité



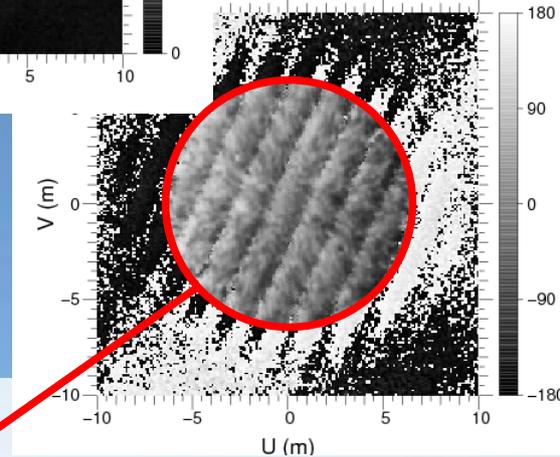
Visibilité et télescope monopupille



TF
(Transformée de Fourier)



$f(u,v)$



Théorème de Zernike-van Cittert

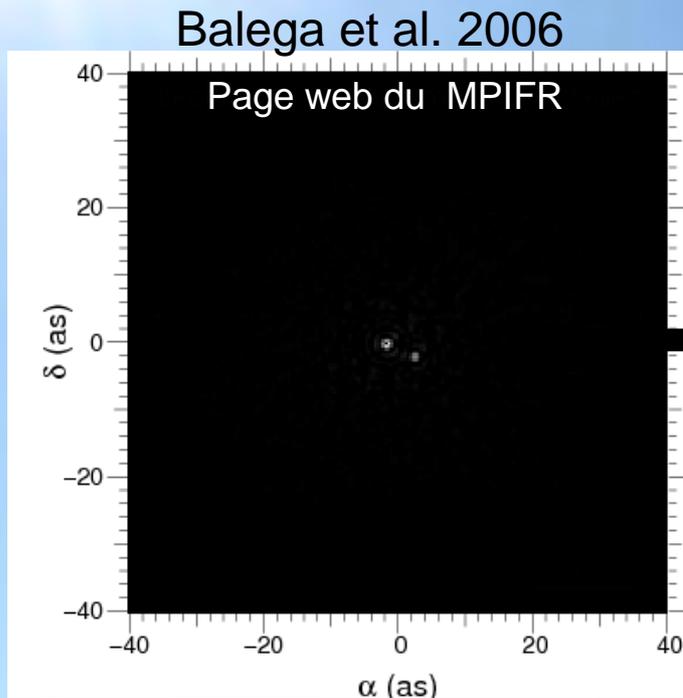
$$\text{Image : } I(x,y) = O * \text{PSF} \xrightarrow{\text{TF}} \hat{I}(u,v) = \hat{O} \times \hat{\text{PSF}} = |V(u,v)|, \phi(u,v)$$

Fréquence de coupure D/λ

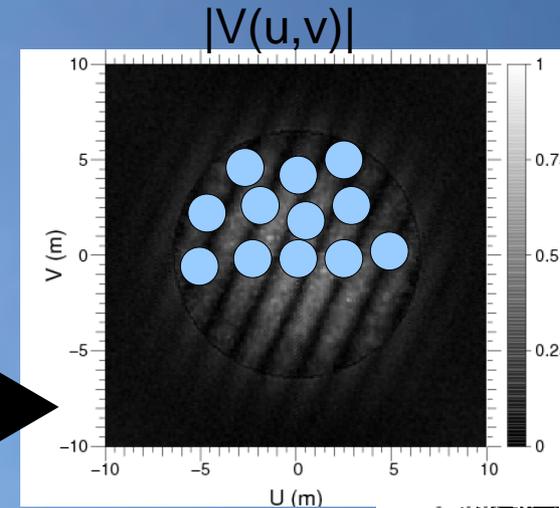
Δ Visibilité



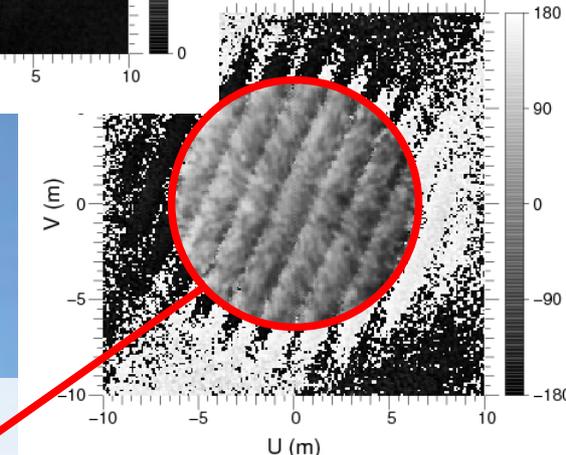
Visibilité et télescope mono-pupille (masquage de pupille)



TF
(Transformée de Fourier)



$f(u,v)$



Théorème de Zernike-van Cittert

$$\text{Image : } I(x,y) = O * \text{PSF} \xrightarrow{\text{TF}} \hat{I}(u,v) = \hat{O} \times \hat{\text{PSF}} = |V(u,v)|, \phi(u,v)$$

Fréquence de coupure D/λ

Δ Visibilité



Plan

- Pourquoi la haute résolution angulaire ?
- Qu'est-ce que la visibilité ?
- **Qu'est-ce que l'interférométrie optique à longue base ?**
- Quelles sont les mesures ?
- Qu'est-ce que le plan (u,v)
- Le VLTI et quelques applications
- Les premiers pas en imagerie
- Et ensuite ?

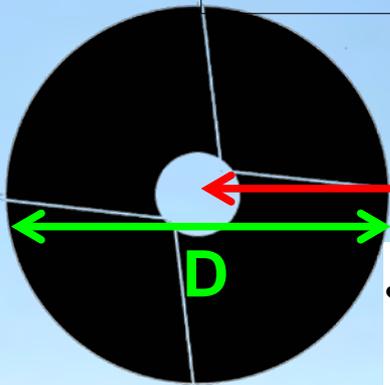
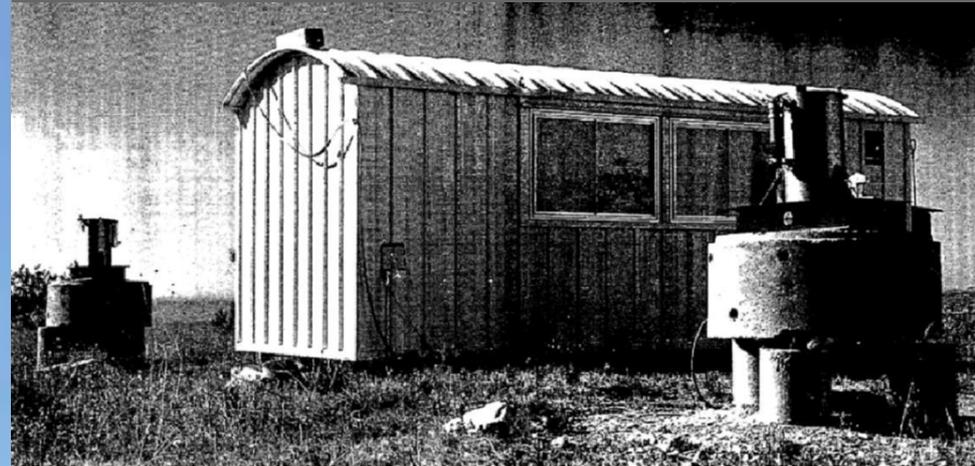


L'interférométrie à longue base dans l'optique/IR

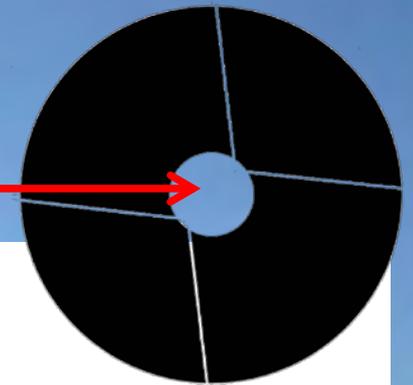
Michelson & Pease, 1921



Labeyrie, 1975



B



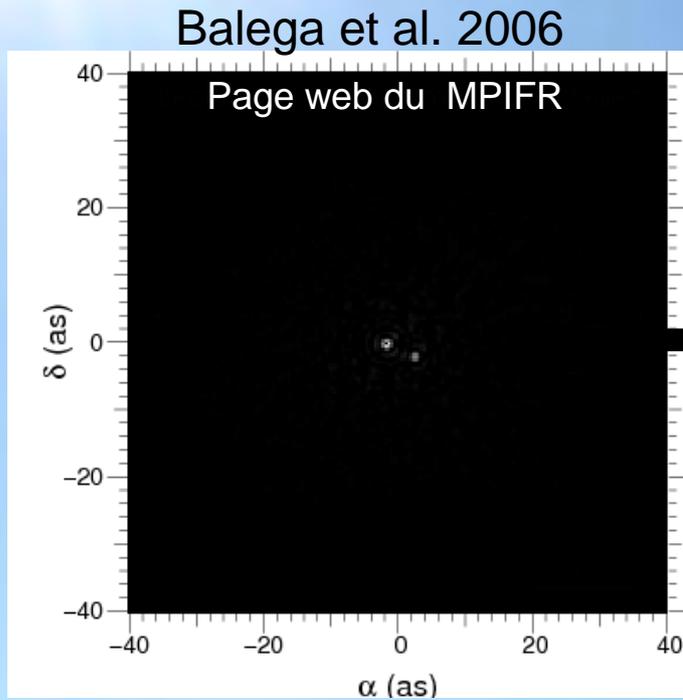
•Télescope mono-pupille : $0 < F_{ij} < \alpha D / 1$

•Interféromètre 2T : $F_{ij} = 0$ et $B / 1$

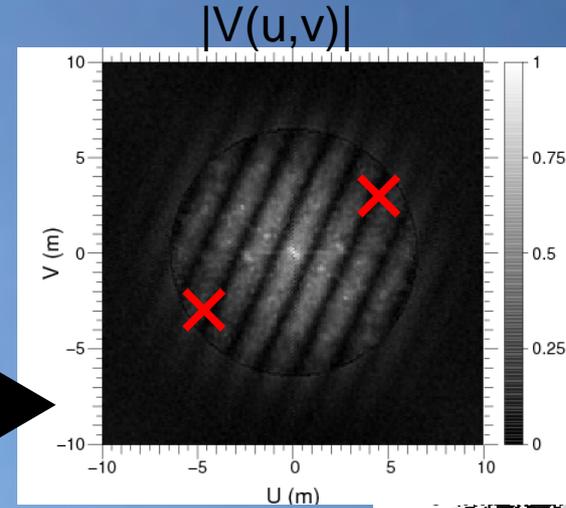
⇒ Seulement une (ou très peu) de fréquences spatiales sont enregistrées par un interféromètre



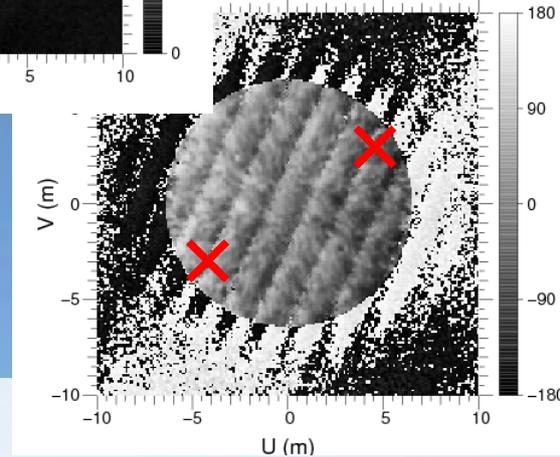
Que mesure un interféromètre ?



TF
(Transformée de Fourier)



$f(u,v)$



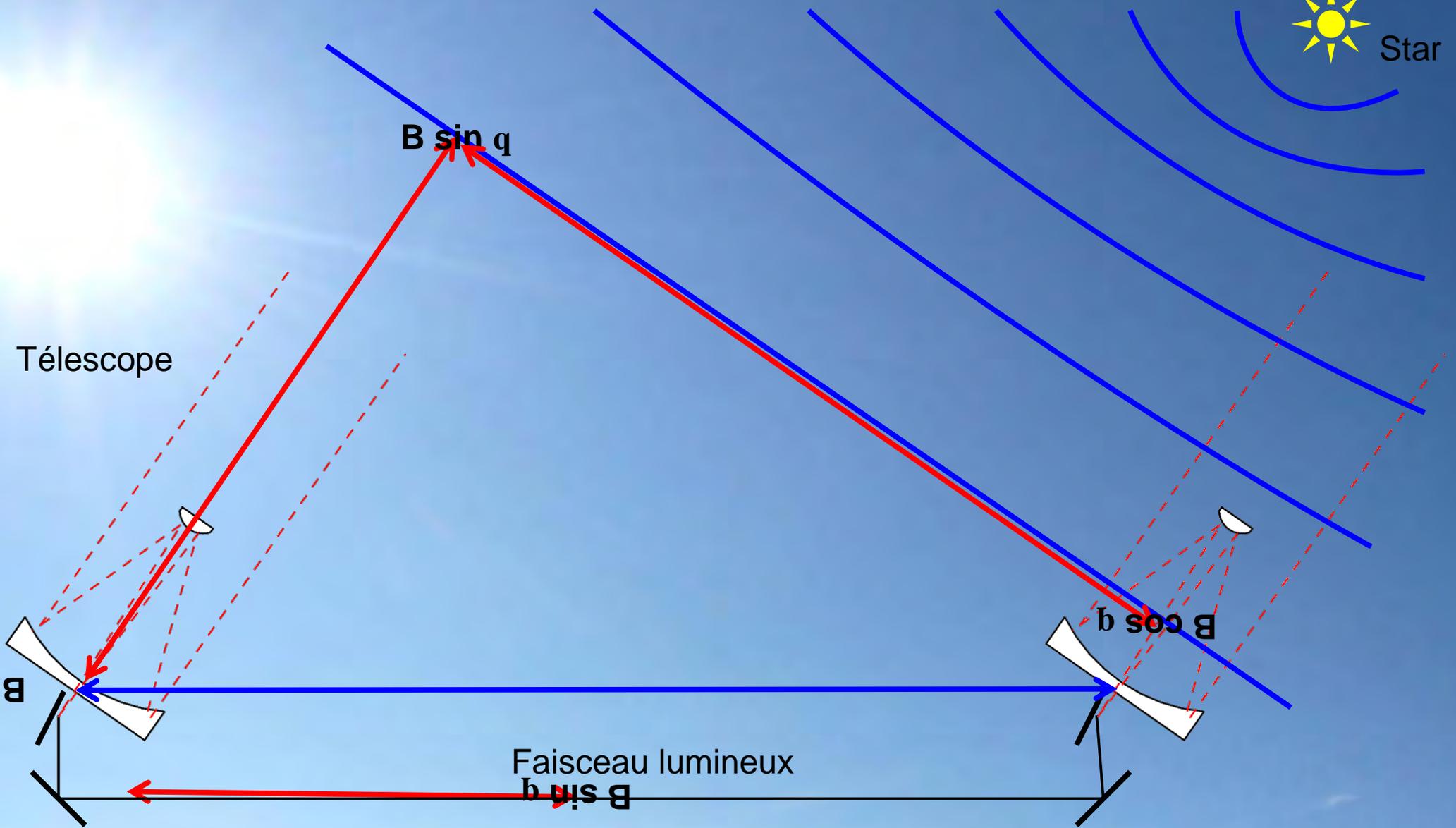
Théorème de Zernike-van Cittert

$$\text{Image : } I(x,y) = O * \text{PSF} \xrightarrow{\text{TF}} \hat{I}(u,v) = \hat{O} \times \hat{\text{PSF}} = |V(u,v)|, \phi(u,v)$$

Fréquence de coupure D/λ

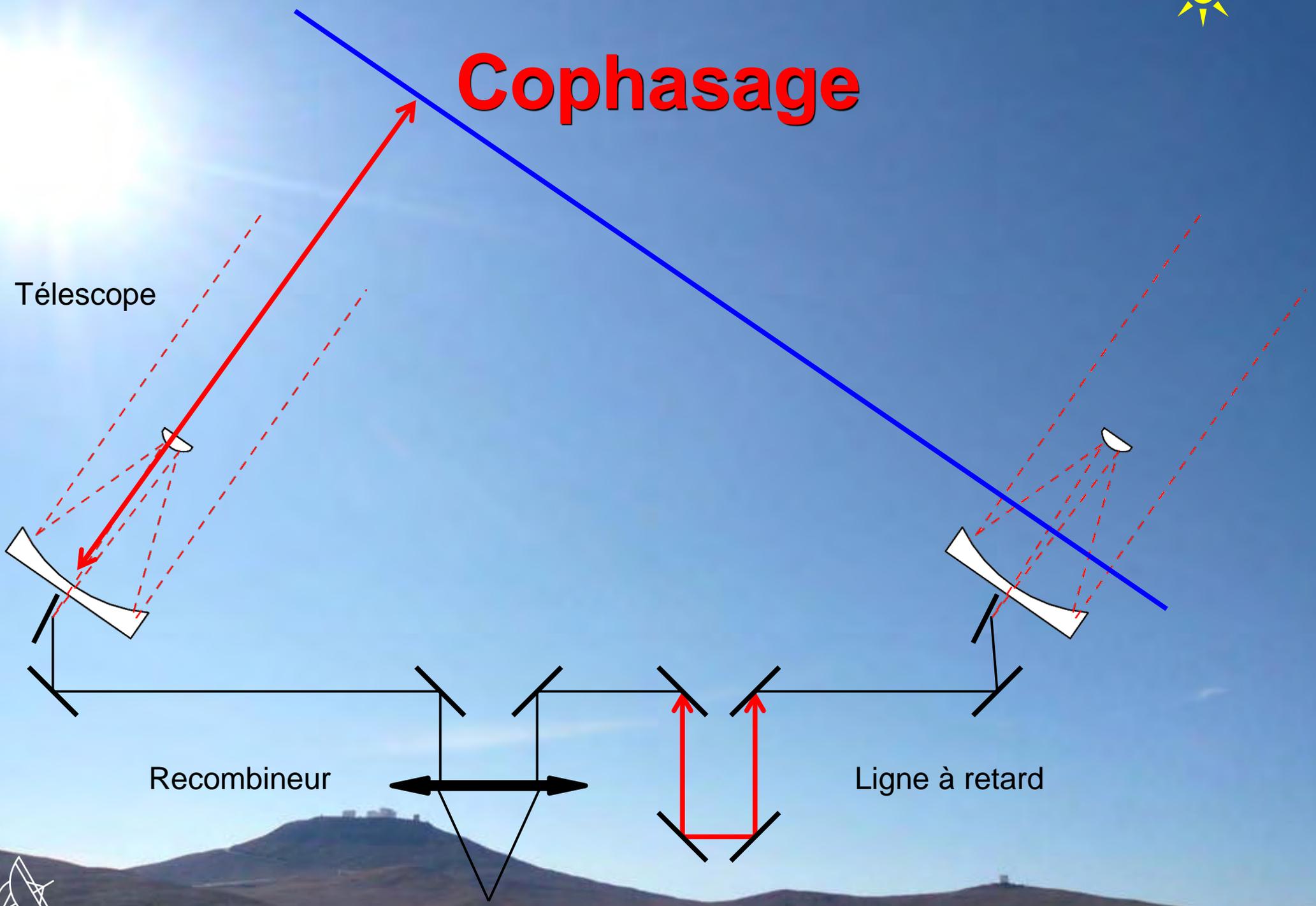
Δ Visibilité





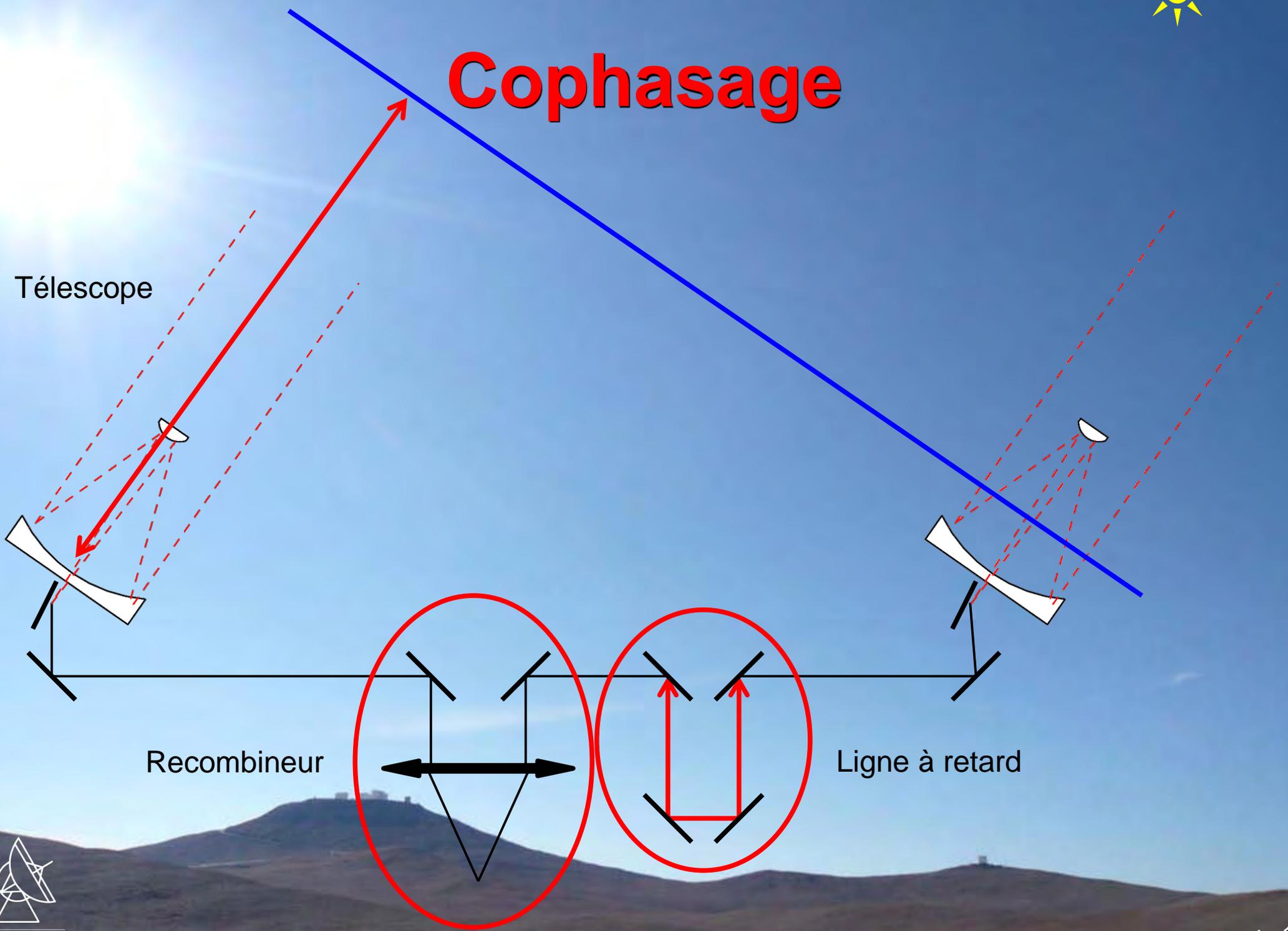


Cophasage





Cophasage



Lignes à retard



VLT



CHARA

VLT Delay Line Retroreflector Carriage

ESO PR Photo 26c/00 (11 October 2000)

<http://www.eso.org>

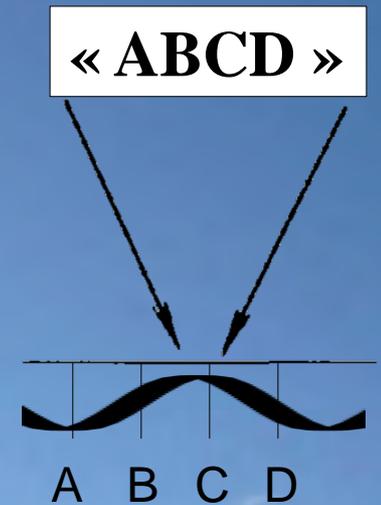
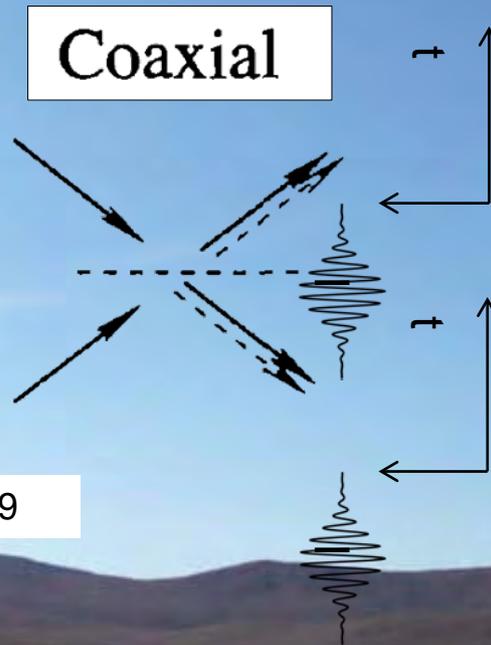
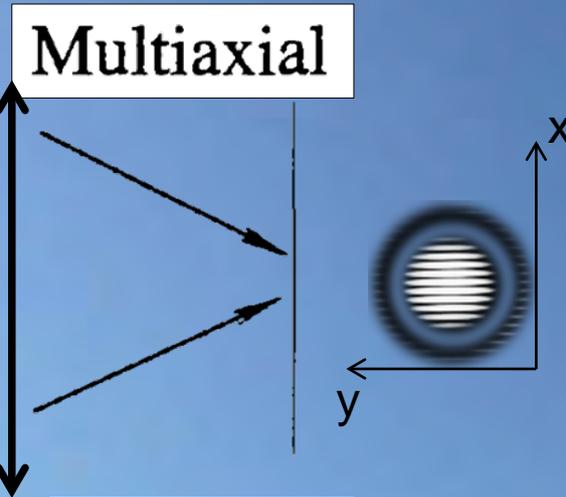
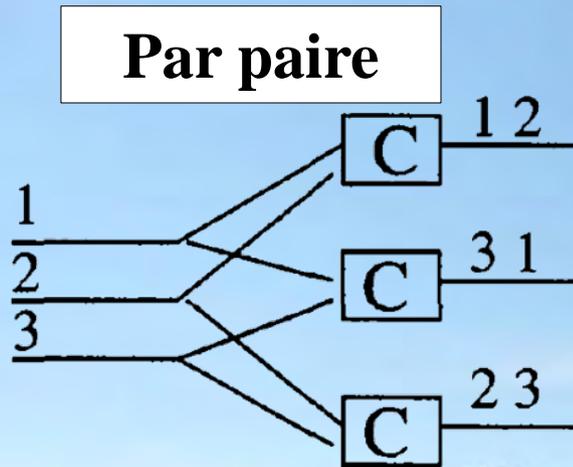
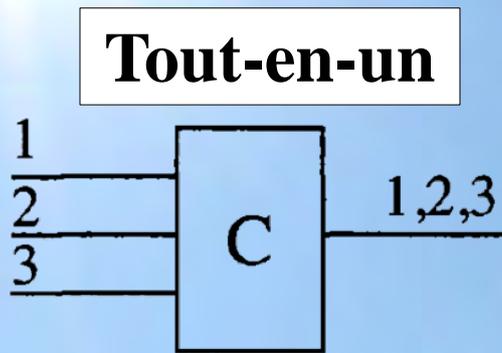
MROI



<http://www.mro.nmt.edu/Projects/interferometer.htm>



Comment recombiner la lumière ?



Berger et al. 1999



Comment recombiner la lumière ?

- **Tout-en-un multiaxial**

- AMBER / VLT
- VEGA / CHARA
- MIRC / CHARA

Meilleure calibration des phases,
Moins bonne calibration des V^2

- **Par paire multiaxial** (y compris ABCD)

- MATISSE / VLT (2nde génération)
- PRIMA / VLT (+ double champ)
- GI2T

- **Par paire coaxial** (y compris ABCD)

- IONIC / IOTA
- VINCI / VLT
- MIDI / VLT
- FINITO / VLT

Meilleure calibration des V^2 ,
Moins bonne calibration des phases

$$\text{Image : } I(x,y) = O * \text{PSF}$$

TF ↓

$$\hat{I}(u,v) = \hat{O} \times \text{PSF} = |V(u,v)|, \phi(u,v)$$

- **Tout-en-un coaxial**



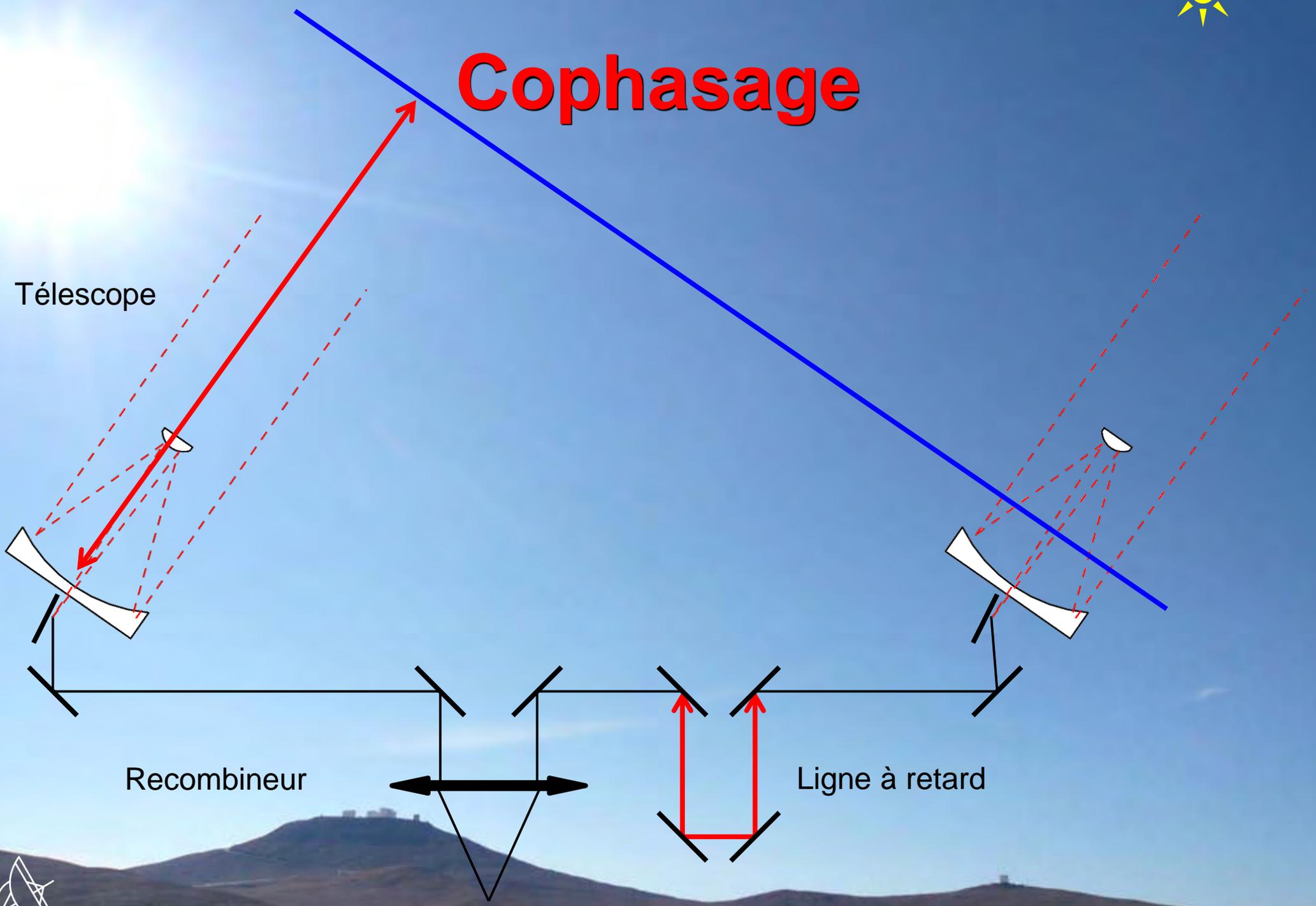
Plan

- Pourquoi la haute résolution angulaire ?
- Qu'est-ce que la visibilité ?
- Qu'est-ce que l'interférométrie optique à longue base ?
- **Quelles sont les mesures ?**
- Qu'est-ce que le plan (u,v)
- Le VLTI et quelques applications
- Les premiers pas en imagerie
- Et ensuite ?





Cophasage



Télescope

Recombineur

Ligne à retard



Cophasage

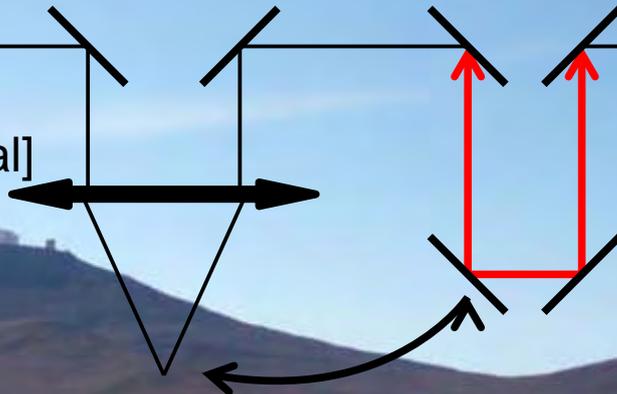
Turbulence atmosphérique

Grand
Télescope

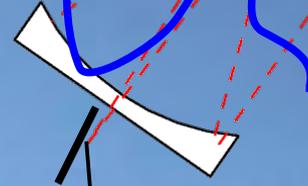


OA

Recombineur
[instrument focal]



Suiveur de franges
[optique adaptative]



OA



Cophasage

Turbulence atmosphérique

Grand
Télescope

Fiabilité système !

Vibrations des télescopes

Sauts de métrologie

Problèmes de polarisation

Problèmes de pupille

OA

OA

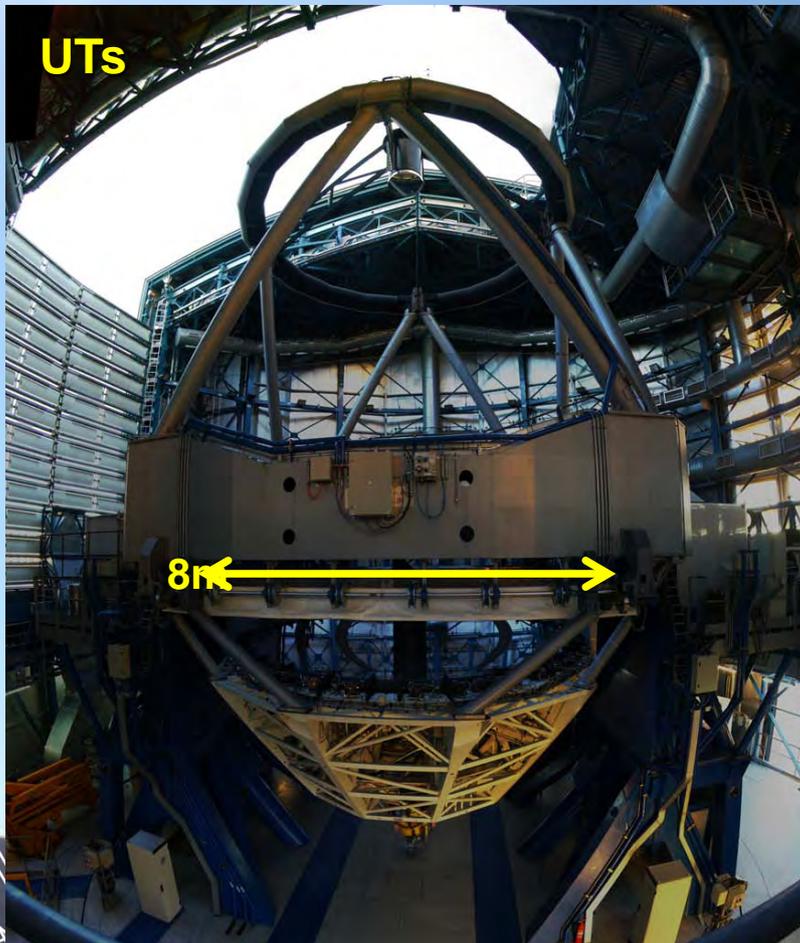
(in)stabilité instrumentale

Turbulence dans les tunnels

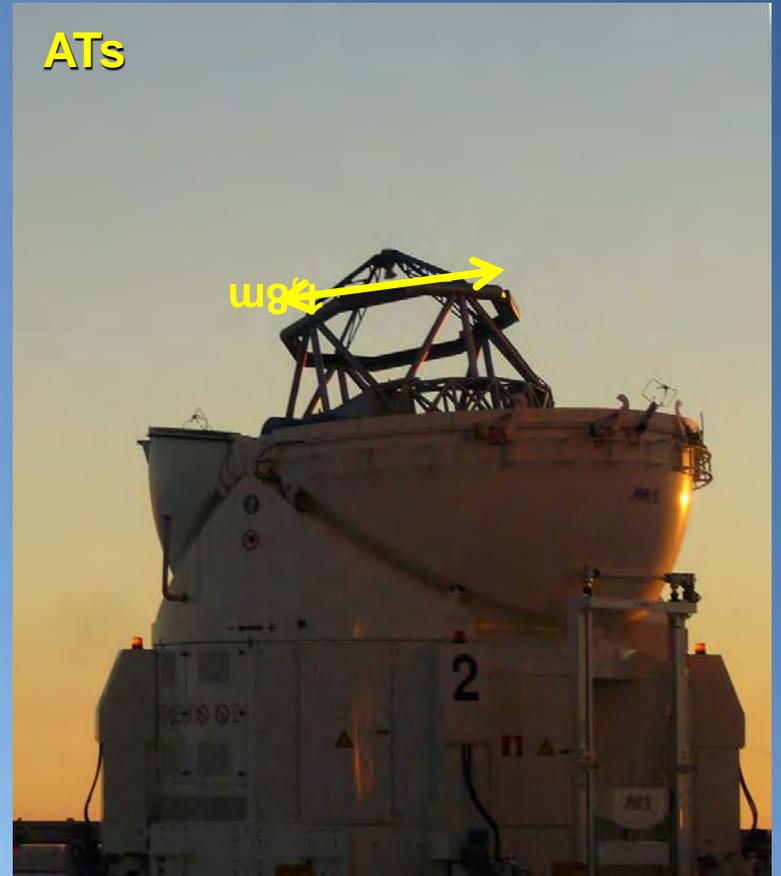


Les télescopes pour l'interférométrie

Doivent être grands

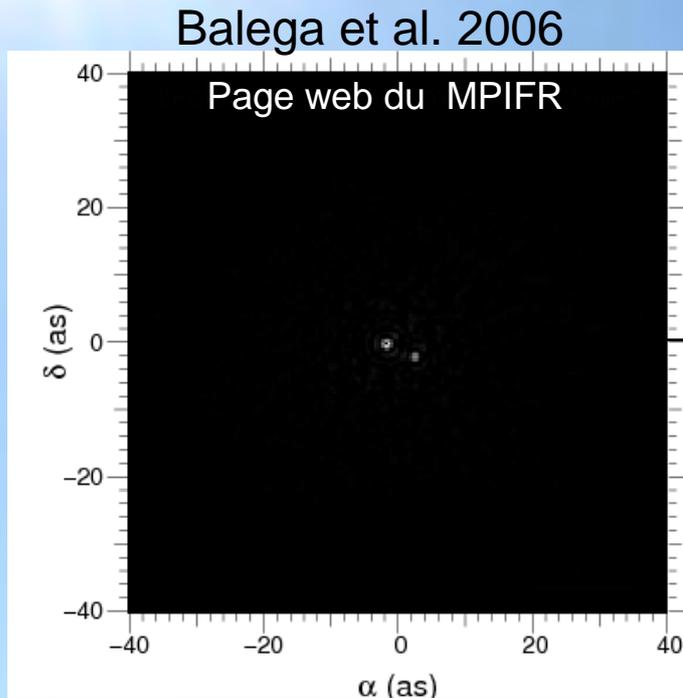


fiables

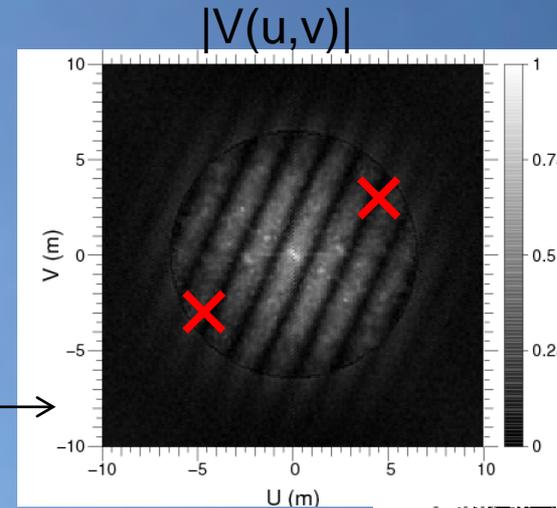


Et solides

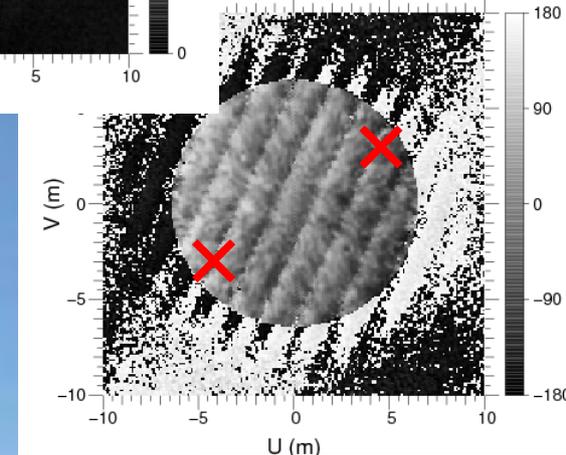
Quelle visibilité avec un interféromètre ?



T
F



$f(u,v)$



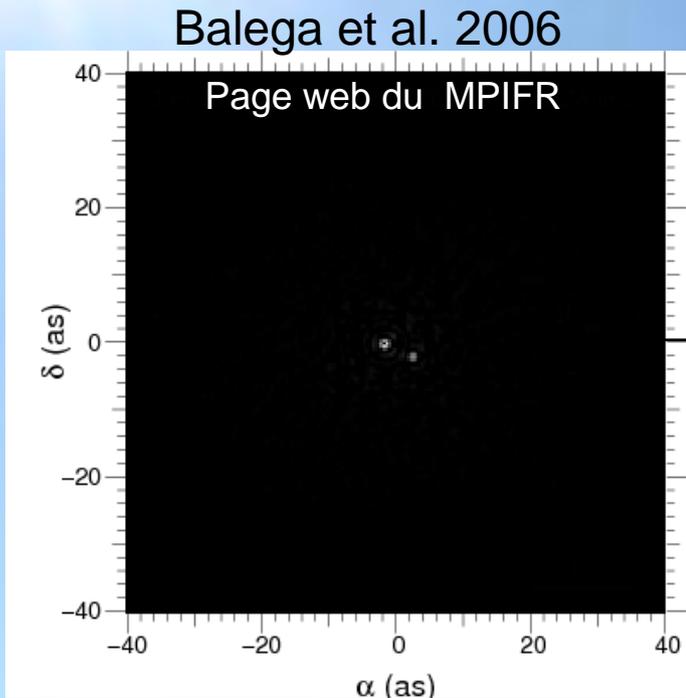
Théorème de Zernike-van Cittert

$$\text{Image : } I(x,y) = O * \text{PSF} \xrightarrow{\text{TF}} |V(u,v)|, \phi(u,v)$$

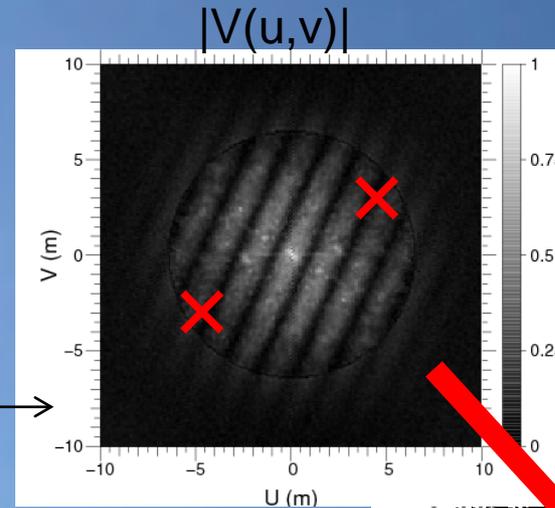
Fréquence de coupure D/λ



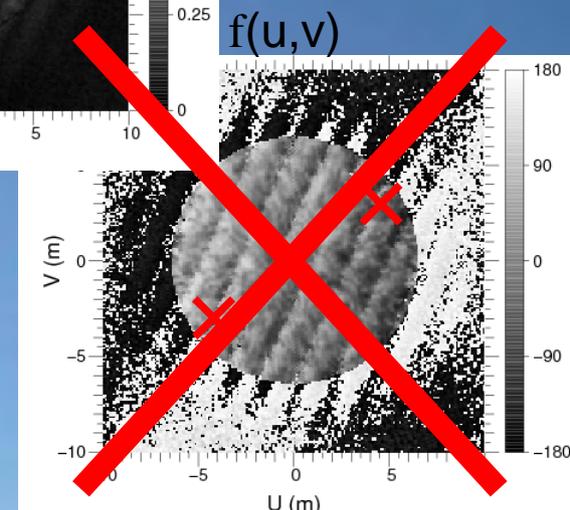
Quelle visibilité avec un interféromètre ?



T
F



Atmosphère !
(et vibrations!)

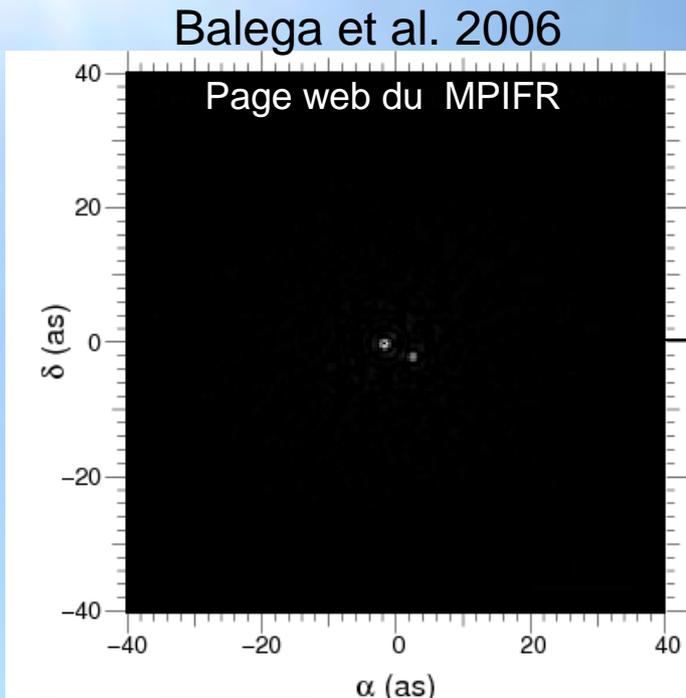


Théorème de Zernike-van Cittert

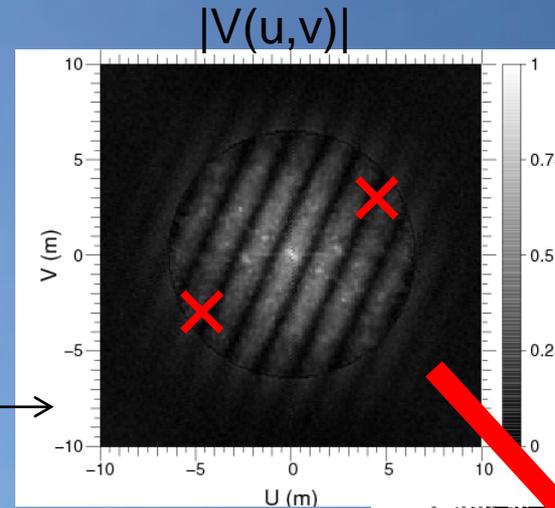
Image : $I(x,y) = O * \text{PSF} \xrightarrow{\text{TF}} |V(u,v)|, \phi(u,v)$
Fréquence de coupure D/λ



Quelle visibilité avec un interféromètre ?

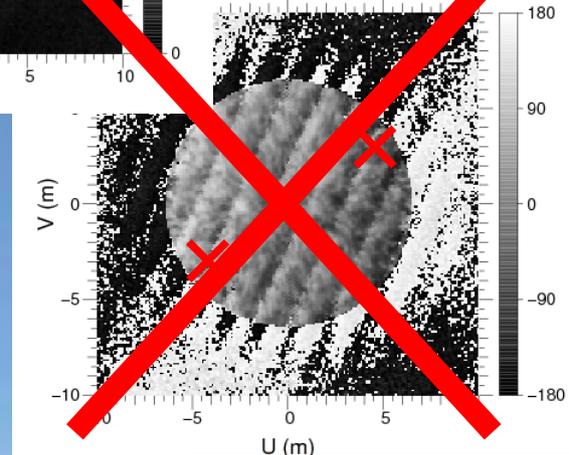


T
F



- . Clôture de phase
- . Référence de phase
- . Phase différentielle

$f(u,v)$



Théorème de Zernike-van Cittert

$$\text{Image : } I(x,y) = O * \text{PSF} \xrightarrow{\text{TF}} |V(u,v)|, \phi(u,v)$$

Fréquence de coupure D/λ



Plan

- Pourquoi la haute résolution angulaire ?
- Qu'est-ce que la visibilité ?
- Qu'est-ce que l'interférométrie optique à longue base ?
- Quelles sont les mesures ?
- **Qu'est-ce que le plan (u,v)**
- Le VLTI et quelques applications
- Les premiers pas en imagerie
- Et ensuite ?



Le plan (u,v)

Transformée de Fourier



Est la base projetée

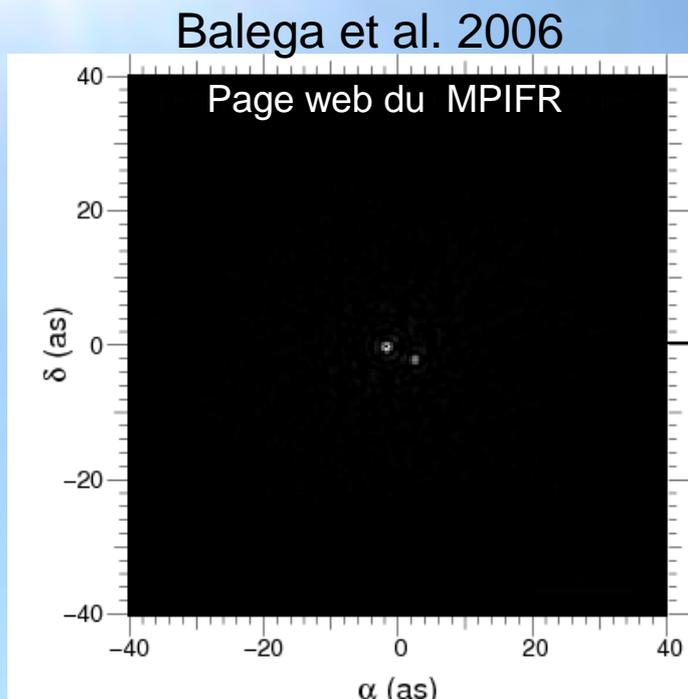
Sont les fréquences spatiales

Fréquences spatiales :

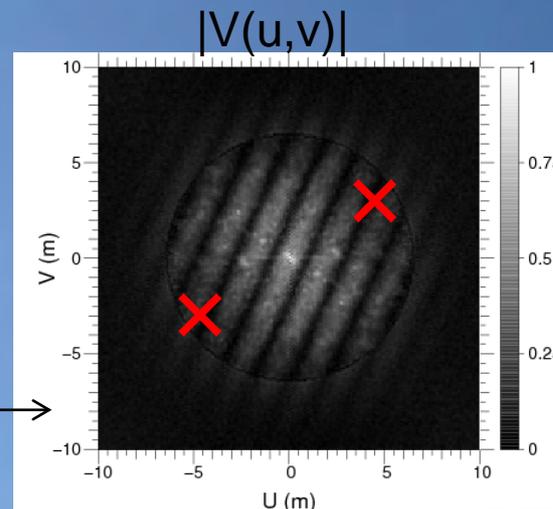
- Sans unité (radians^{-1})
- Représentent un chemin optique dans le front d'onde en unités de longueurs d'ondes
- (u,v) est conjugué à (x,y)



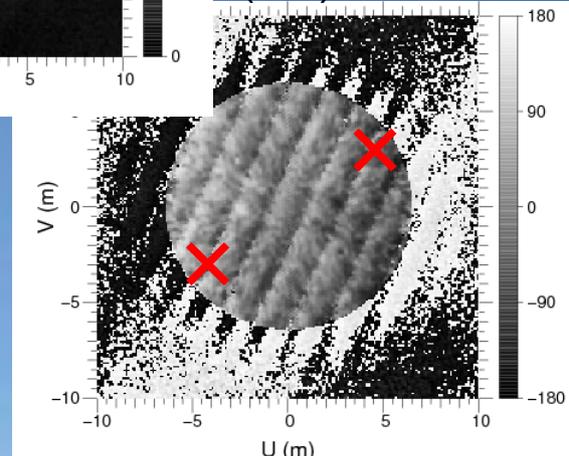
Le plan (u,v) avec un interféromètre



T
F



$f(u,v)$



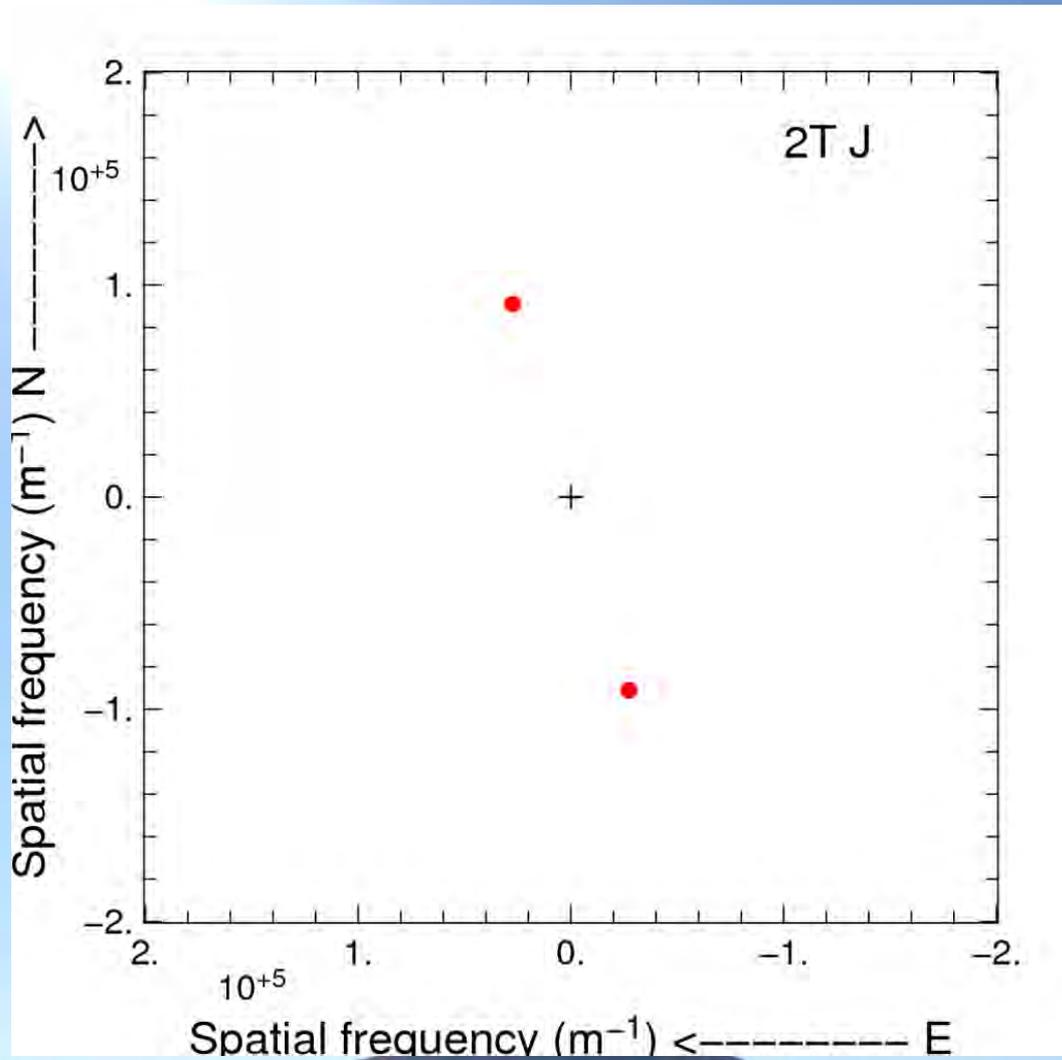
Théorème de Zernike-van Cittert

$$\text{Image : } I(x,y) = O * \text{PSF} \xrightarrow{\text{TF}} |V(u,v)|, \phi(u,v)$$

Fréquence de coupure D/λ



Le plan (u,v) avec un interféromètre



- Le plan (u,v) est mal échantillonné.
- Beaucoup de l'information sur l'objet est manquante du fait des « trous » dans le plan (u,v)



Comment remplir les trous du plan (u,v) ?

.Méthodes « pas cher »:

.Rotation terrestre (supersynthèse d'ouverture)

.Intervalle spectral

Prend du temps

Baisse de sensibilité

.Méthodes « chères »:

.Plus de télescopes

Cher

Cher et prend du temps

Télescopes mono-pupilles:

Contraintes : **angle horaire et altitude de la source**

=> Paramètres importants : temps sidéral, ascension droite, déclinaison

Grande efficacité d'observation

(plan (u,v) complet, peu de temps morts)
Exemple: image NACO ~1-2 h

Interféromètres:

Contraintes : A. H., Alt. **Et plan (u,v)**

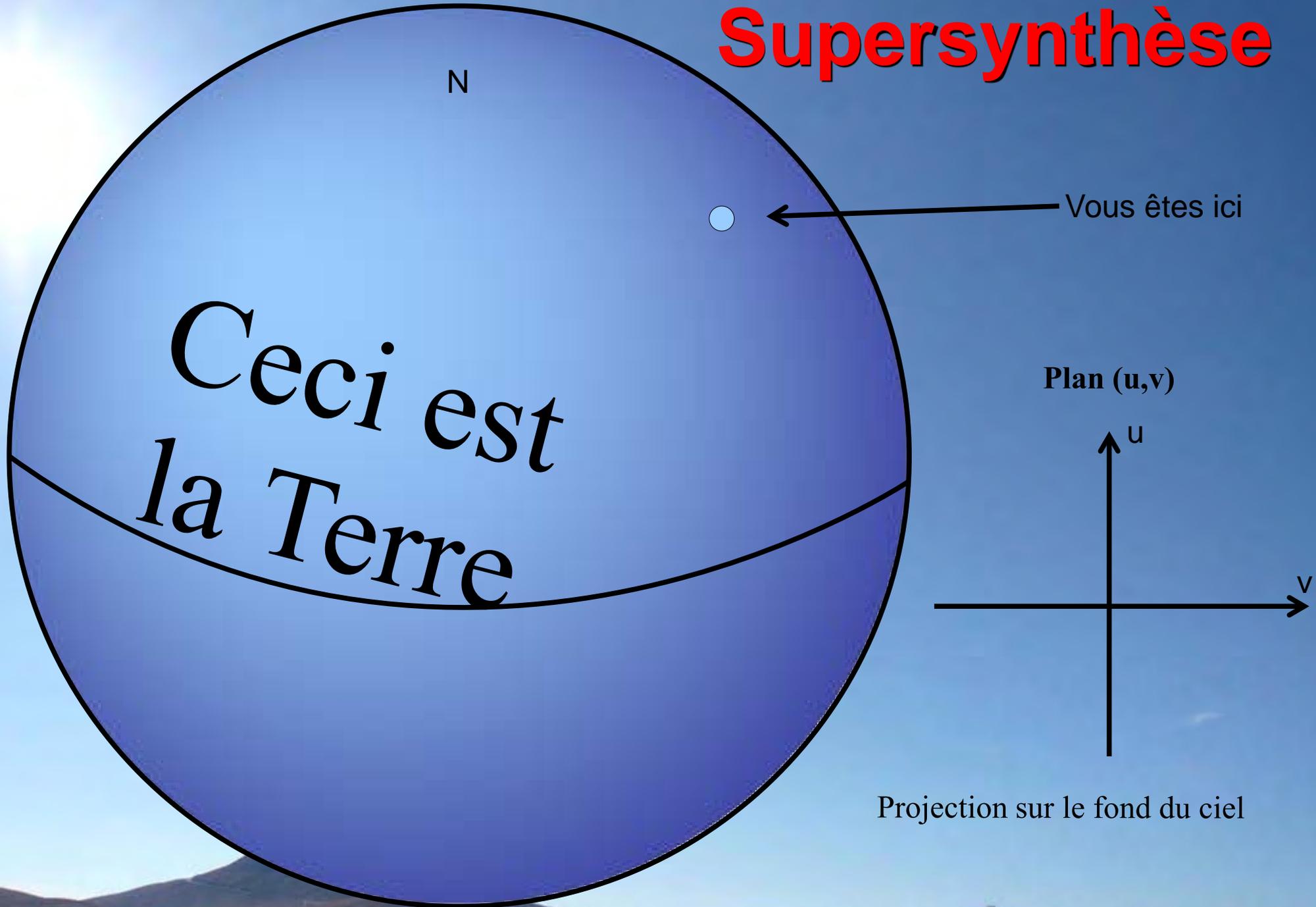
=> Paramètres importants : temps sidéral, ascension droite, déclinaison + bases projetées et contraintes matérielles

Faible efficacité d'observation

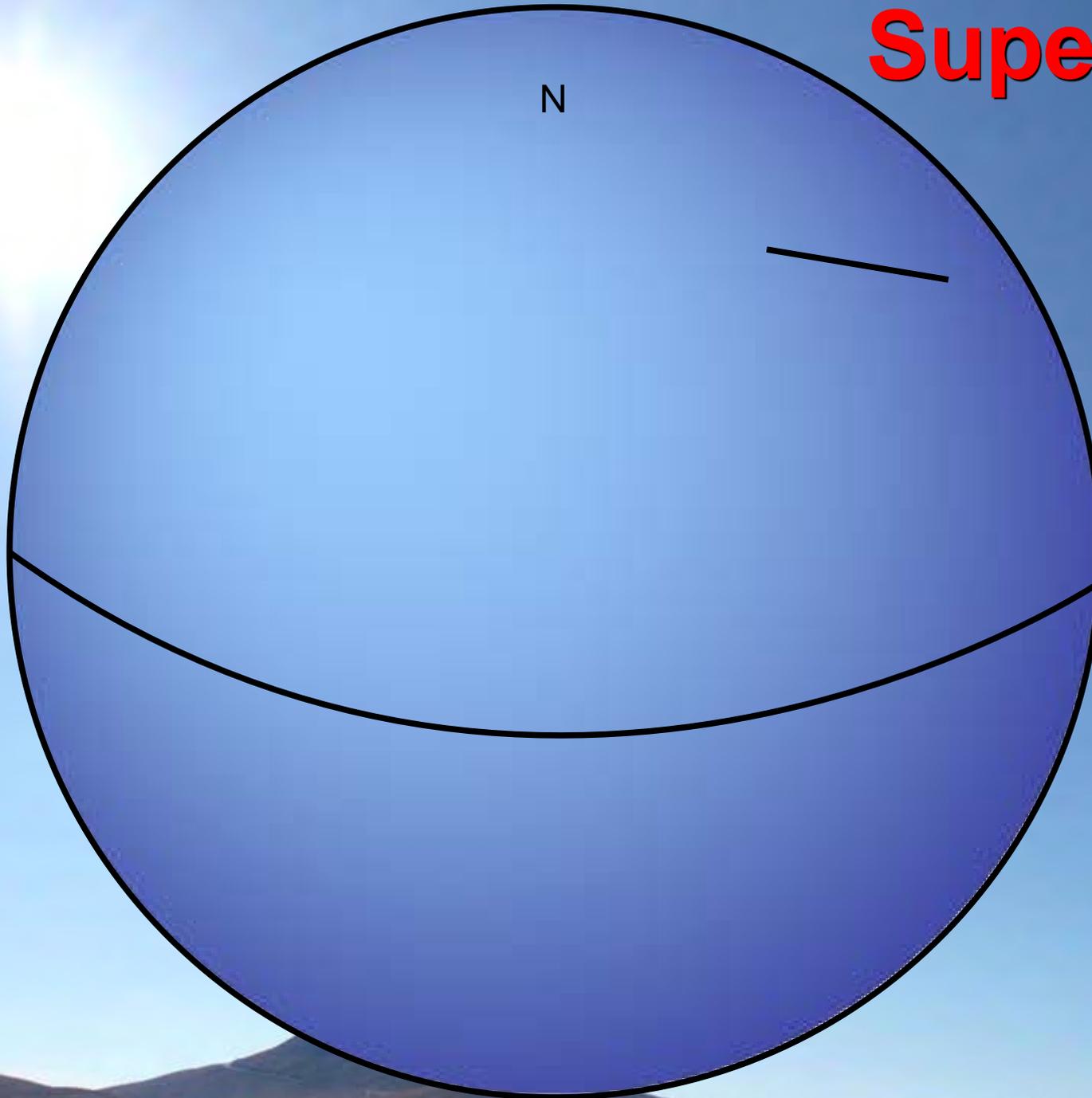
(plan (u,v) incomplet, temps morts)

Exemple: image AMBER ~ 2-3 nuits

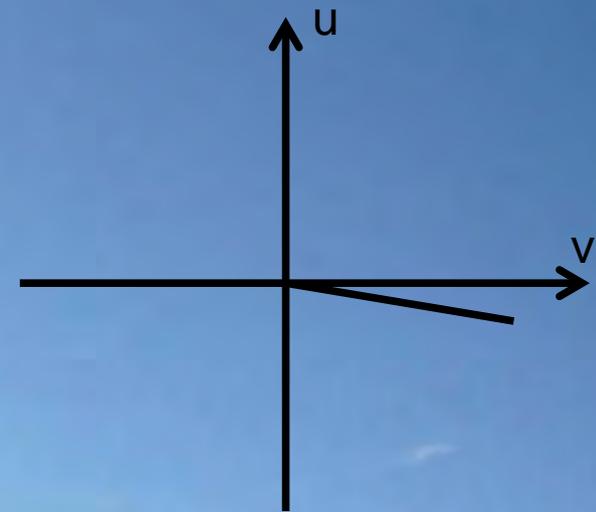
Supersynthèse



Supersynthèse



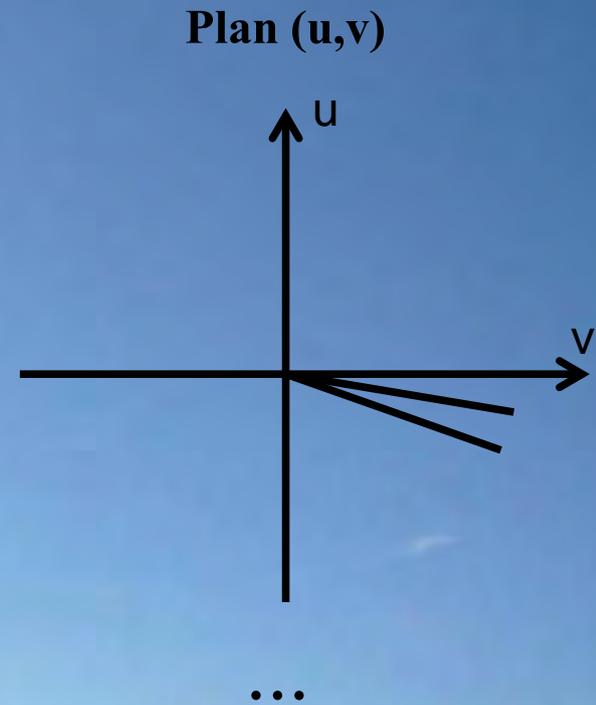
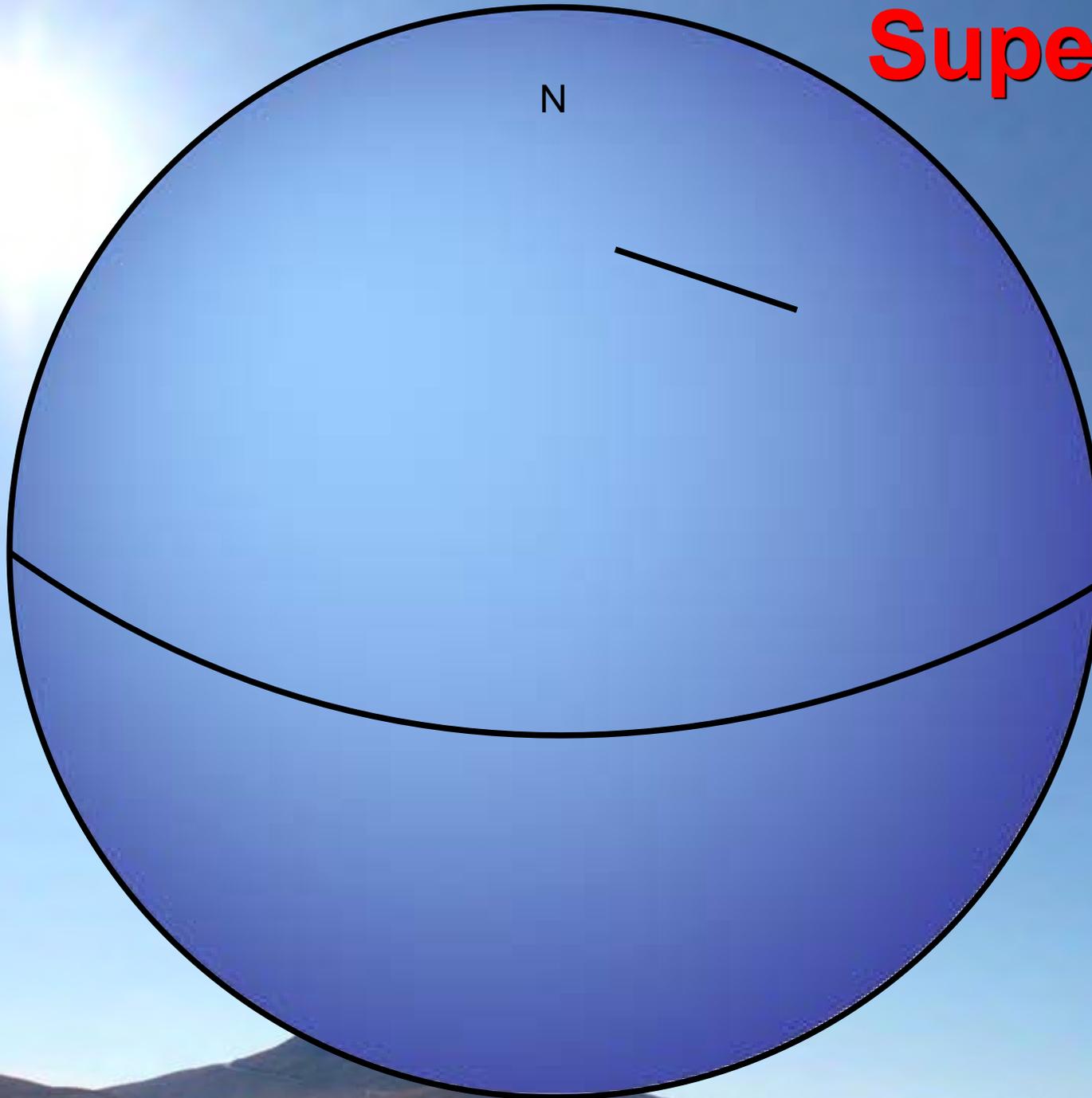
Plan (u,v)



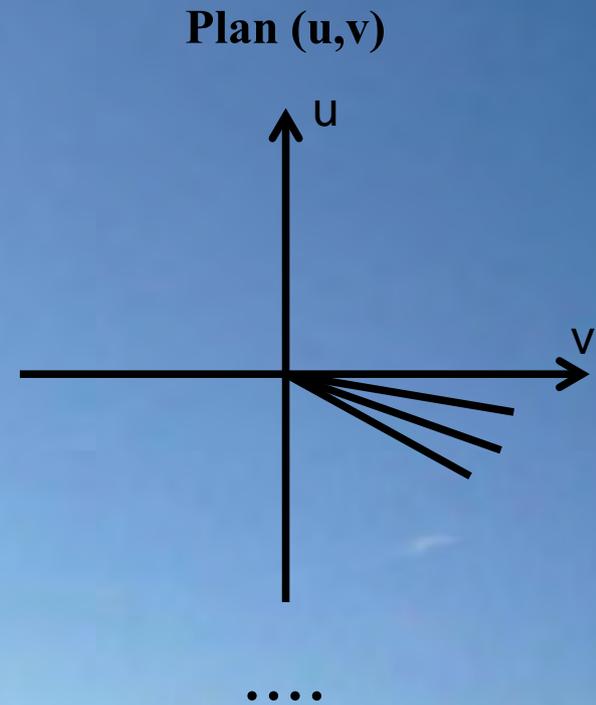
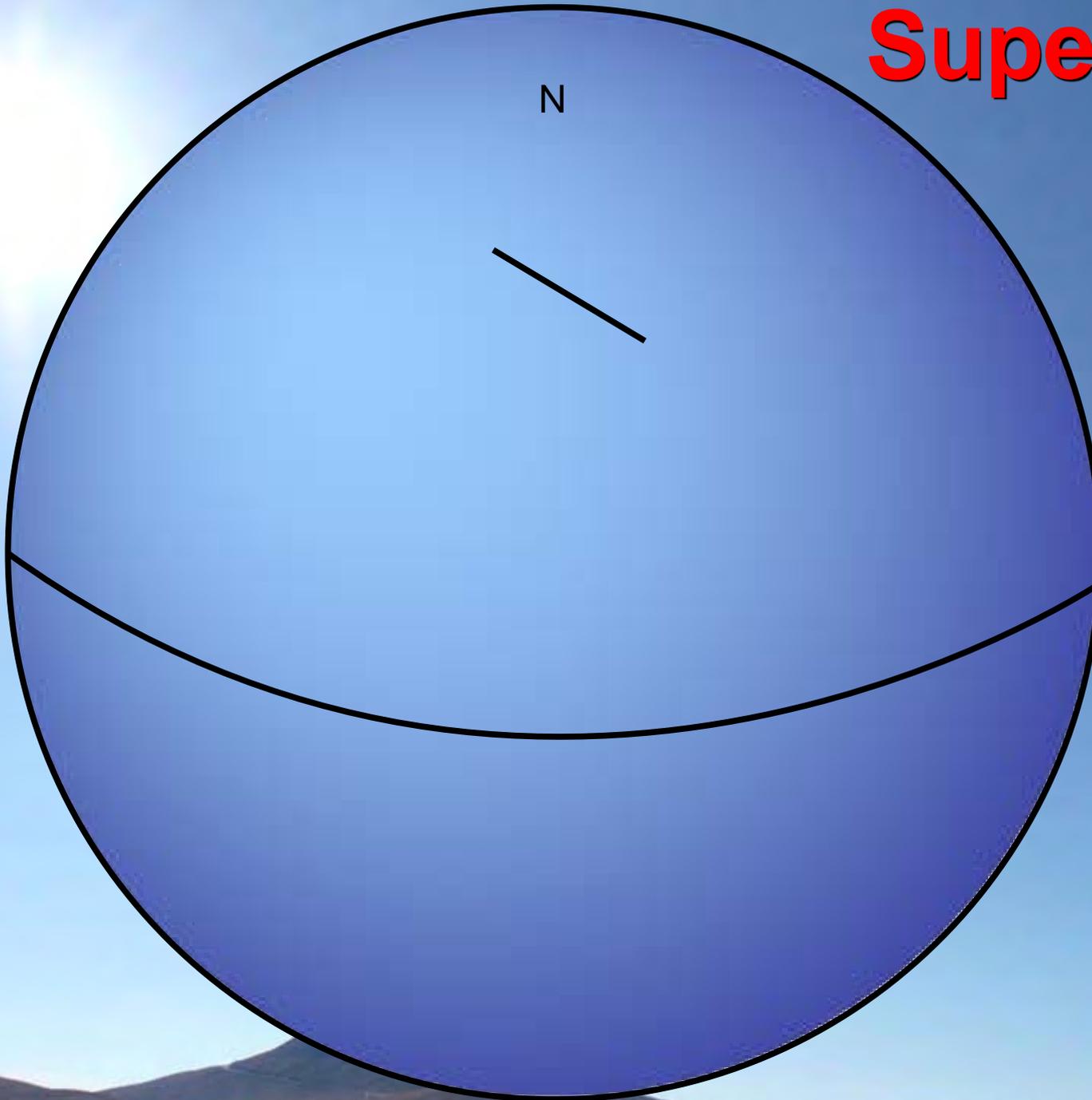
Lorsque la terre tourne...



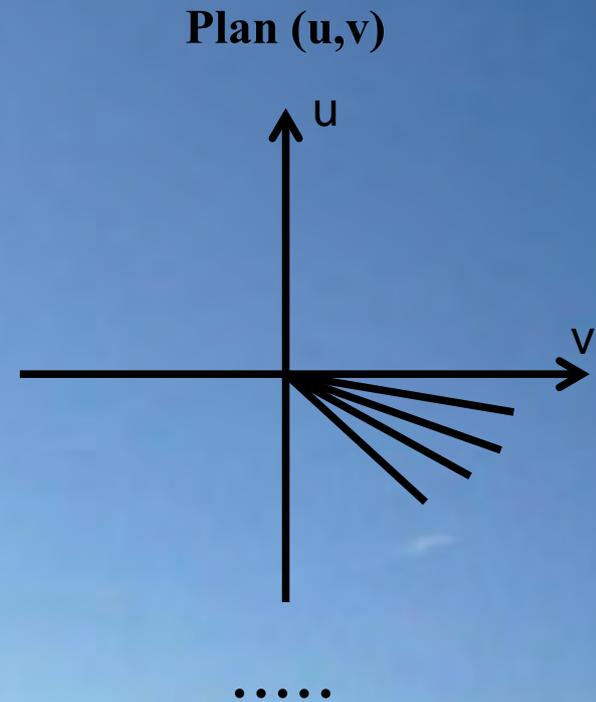
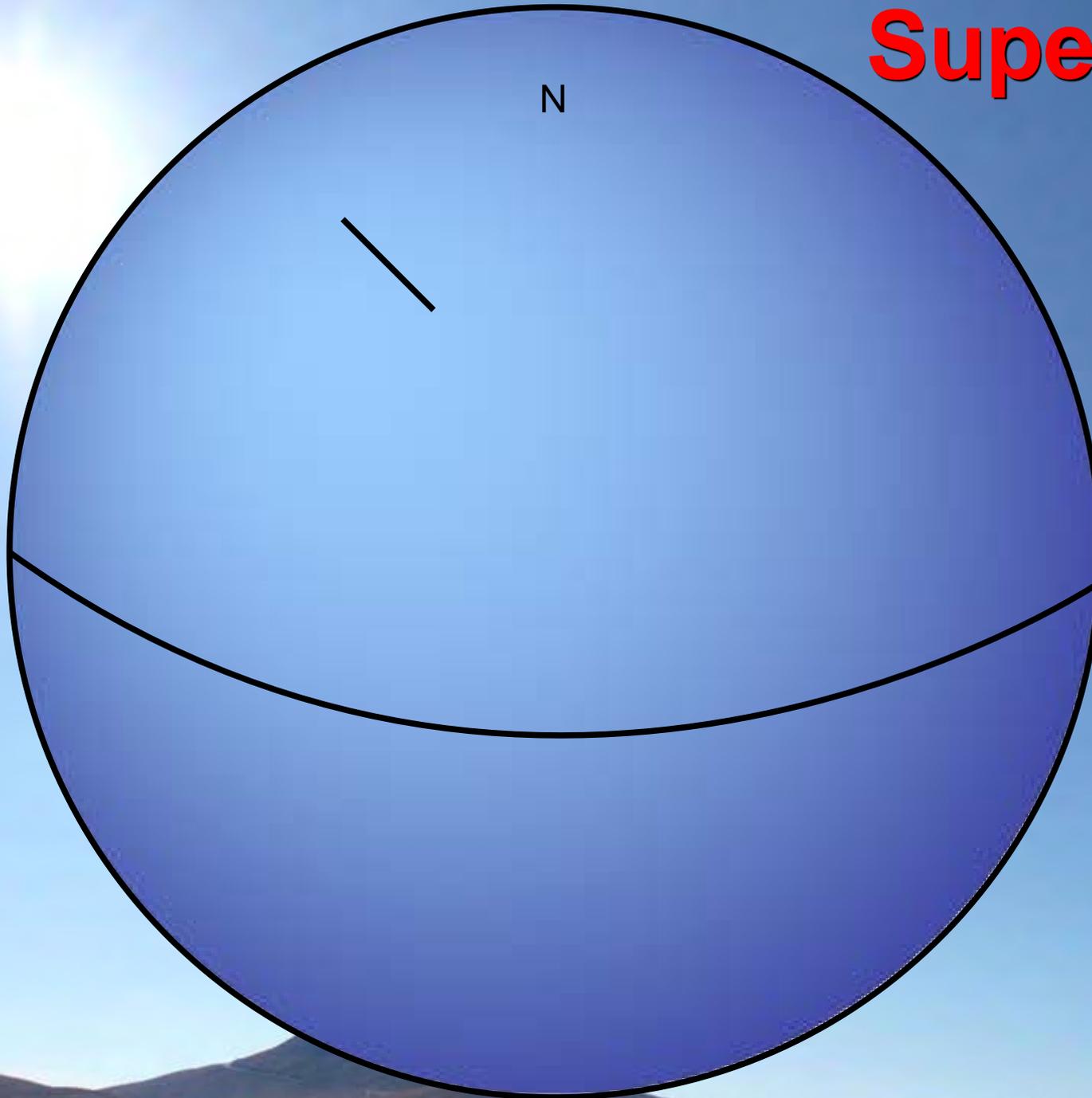
Supersynthèse



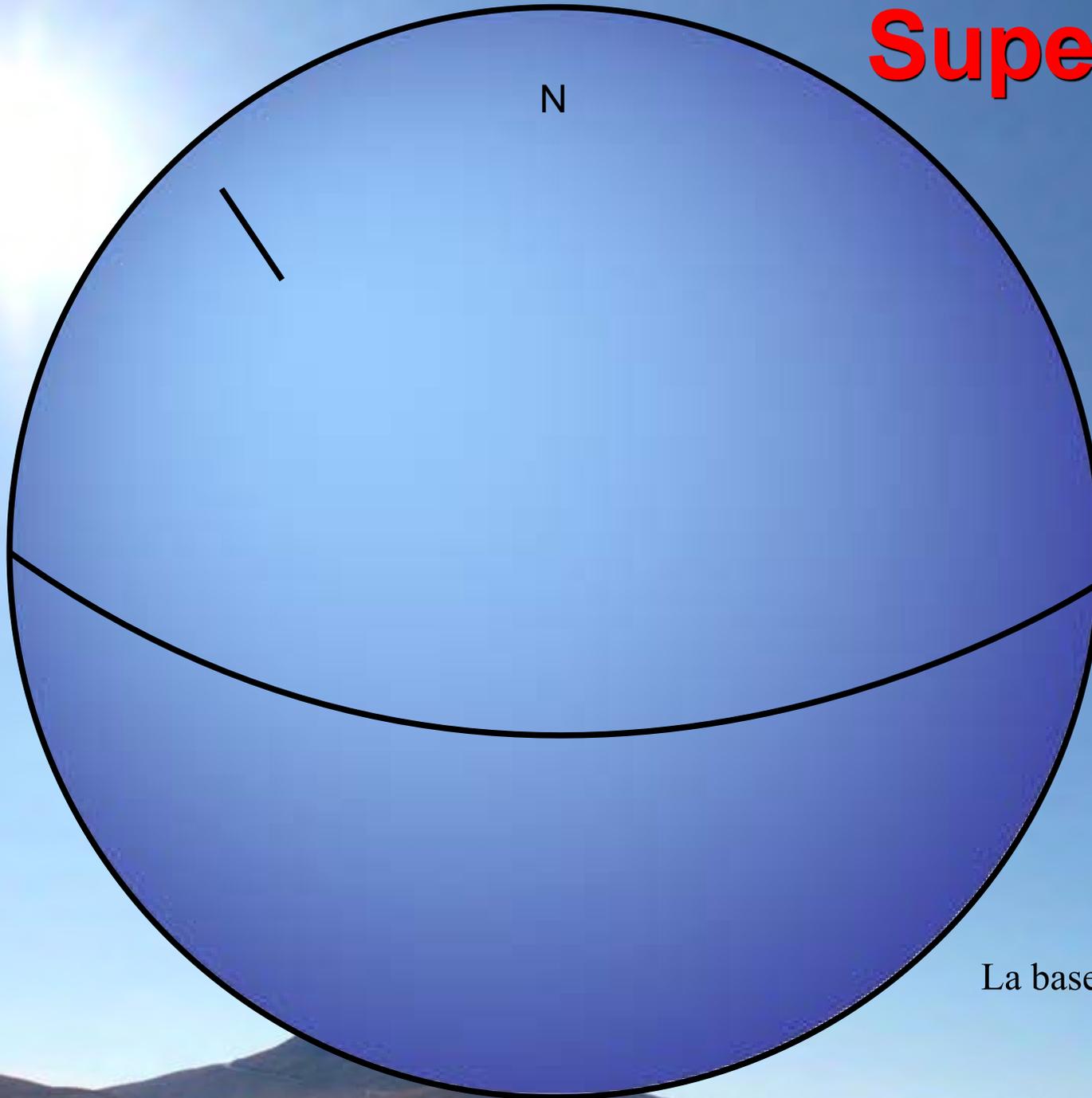
Supersynthèse



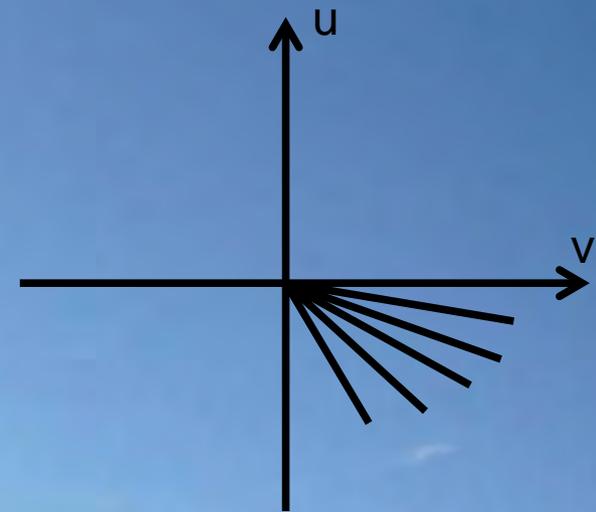
Supersynthèse



Supersynthèse



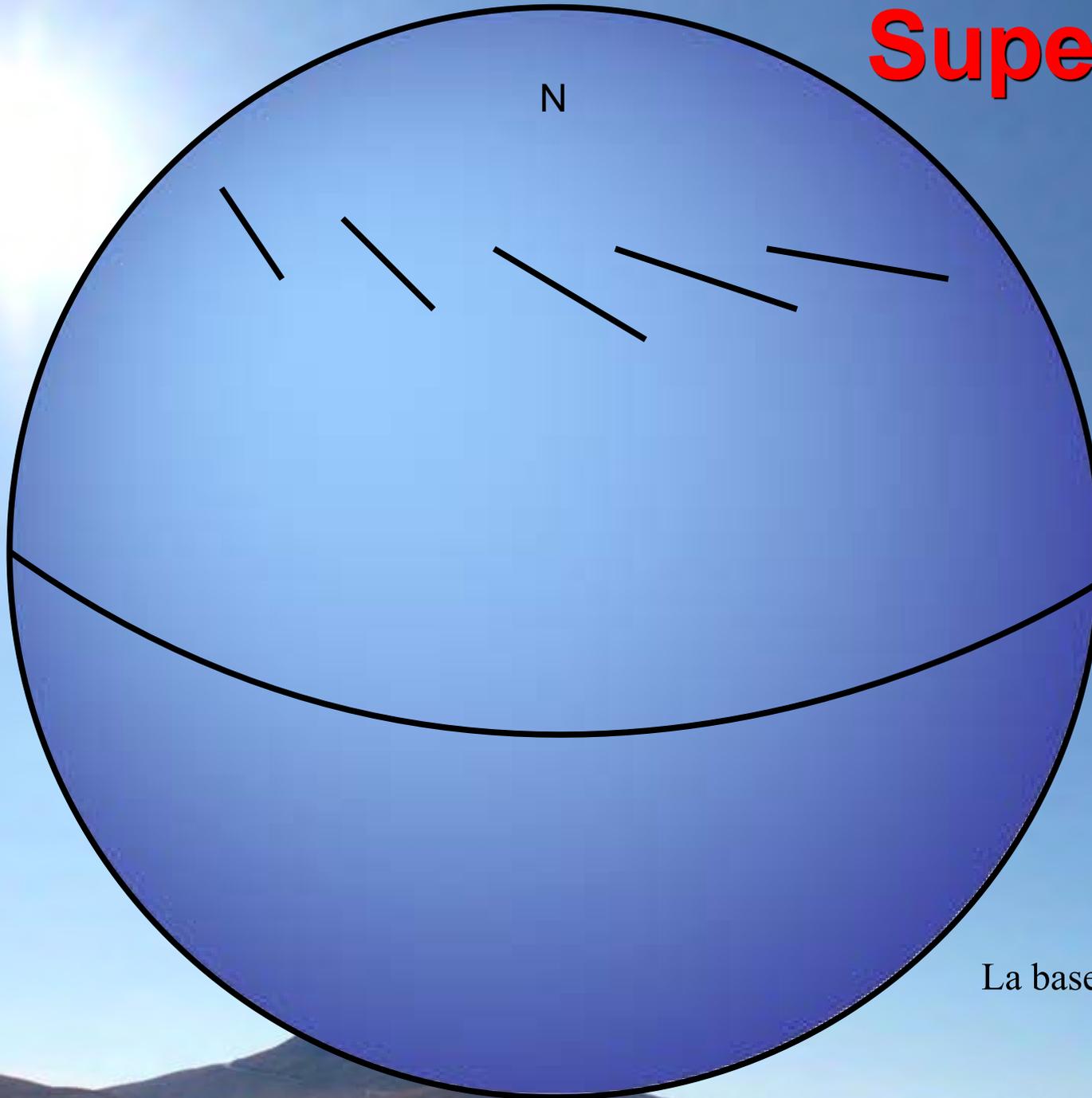
Plan (u,v)



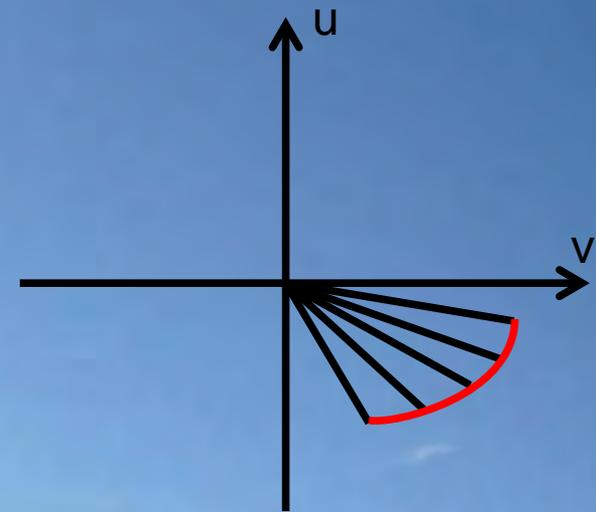
La base projetée trace...



Supersynthèse



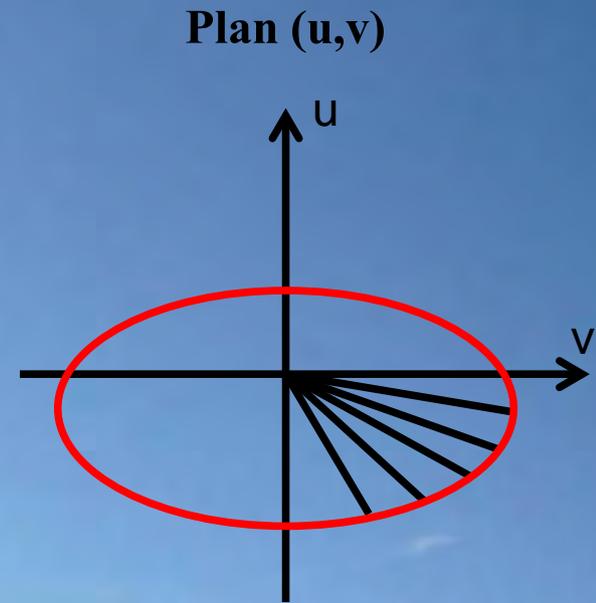
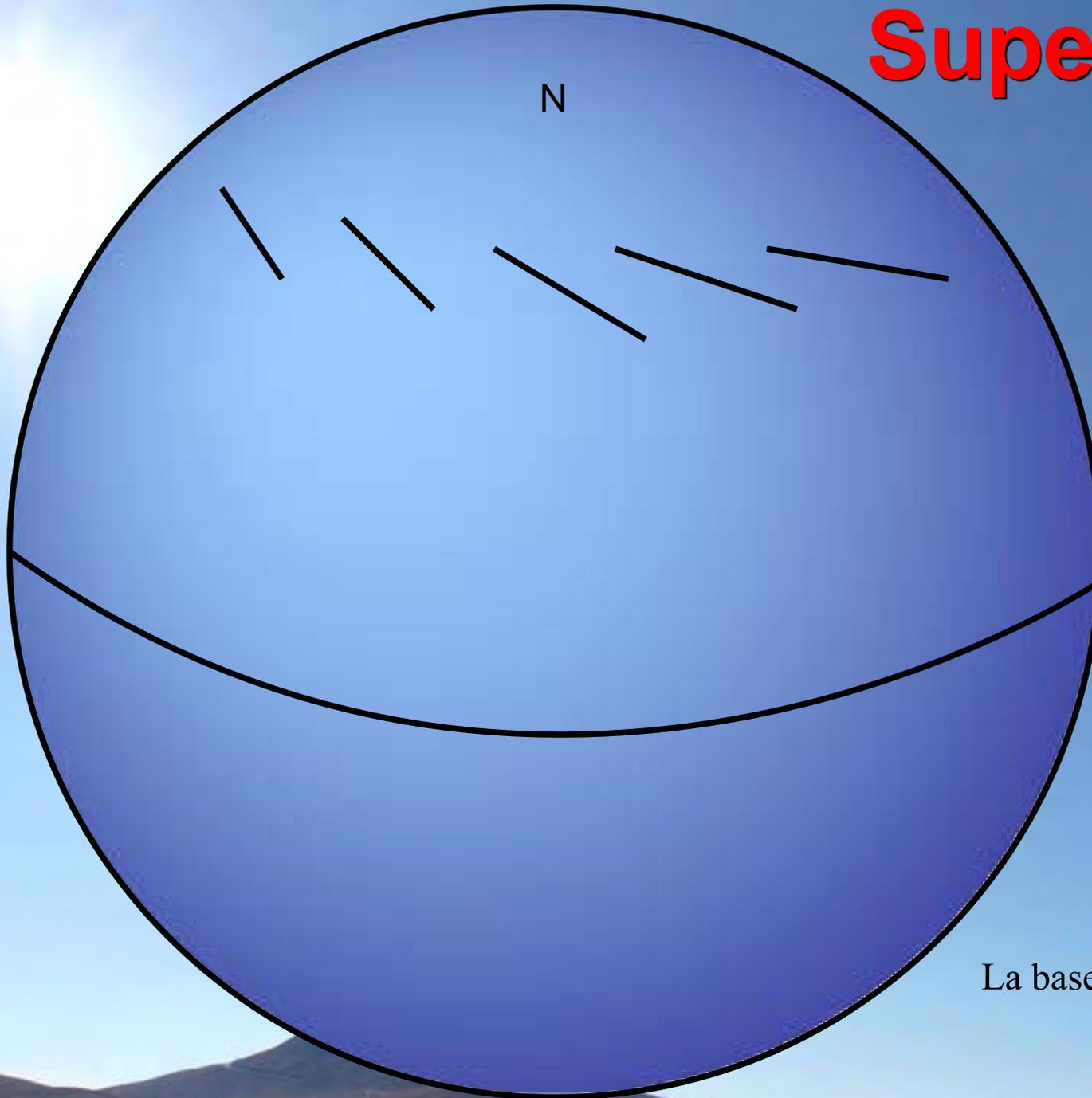
Plan (u,v)



La base projetée trace un arc...



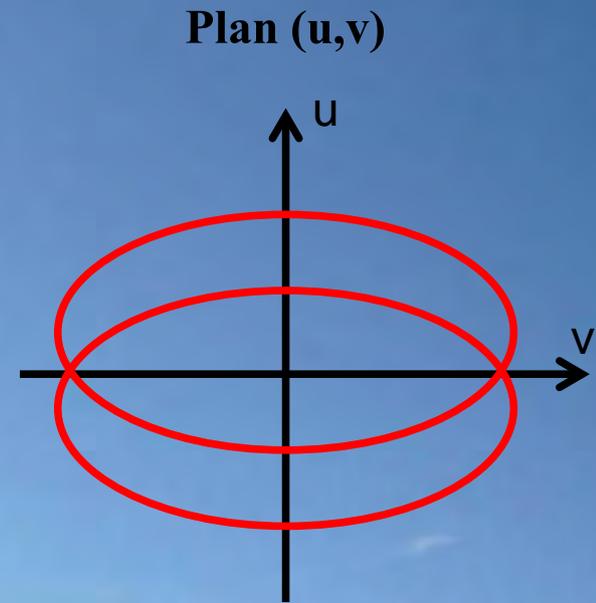
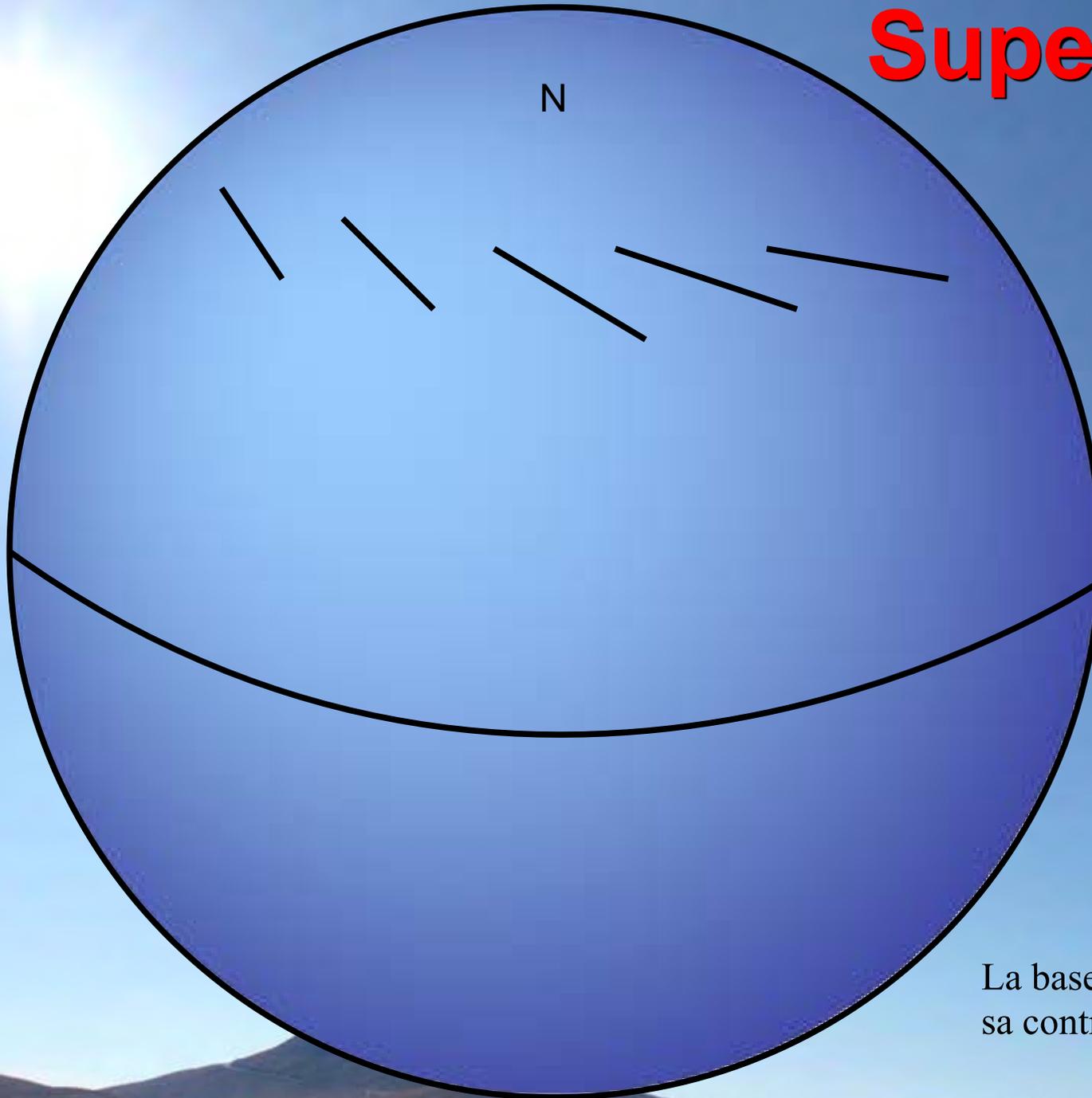
Supersynthèse



La base projetée trace un arc d'ellipse...



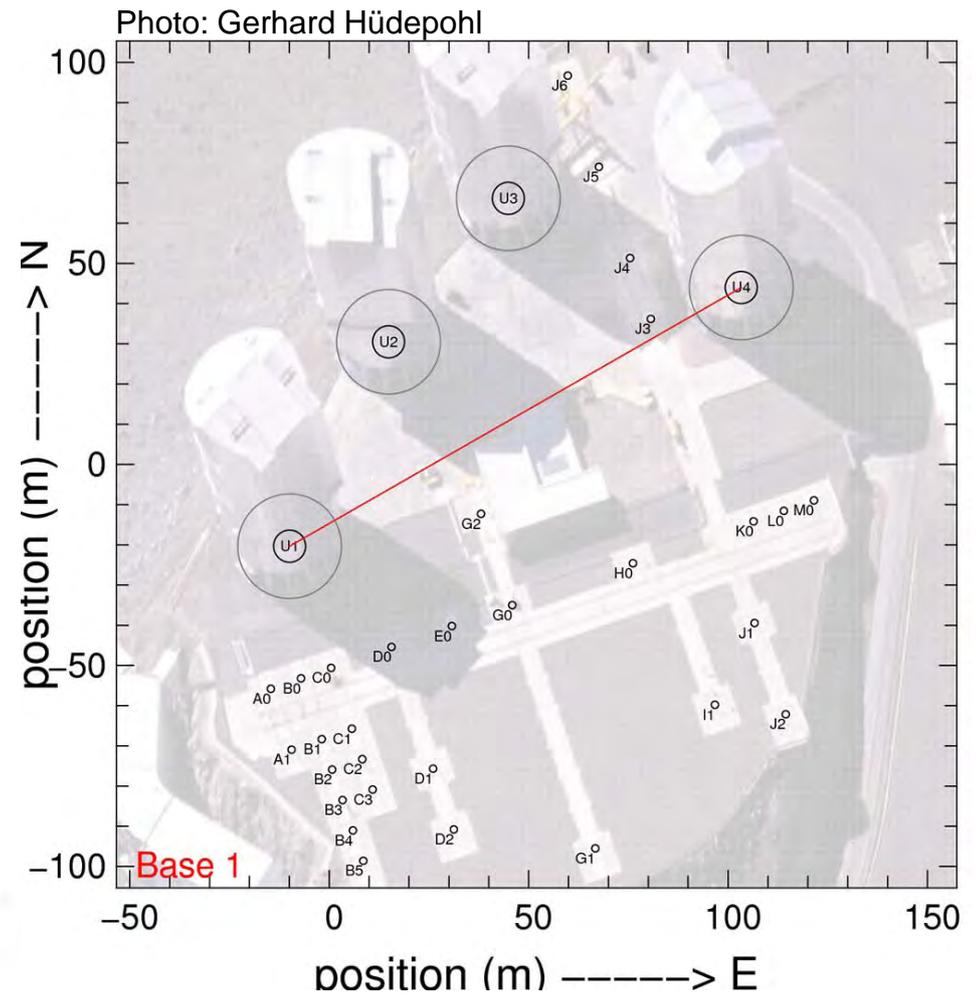
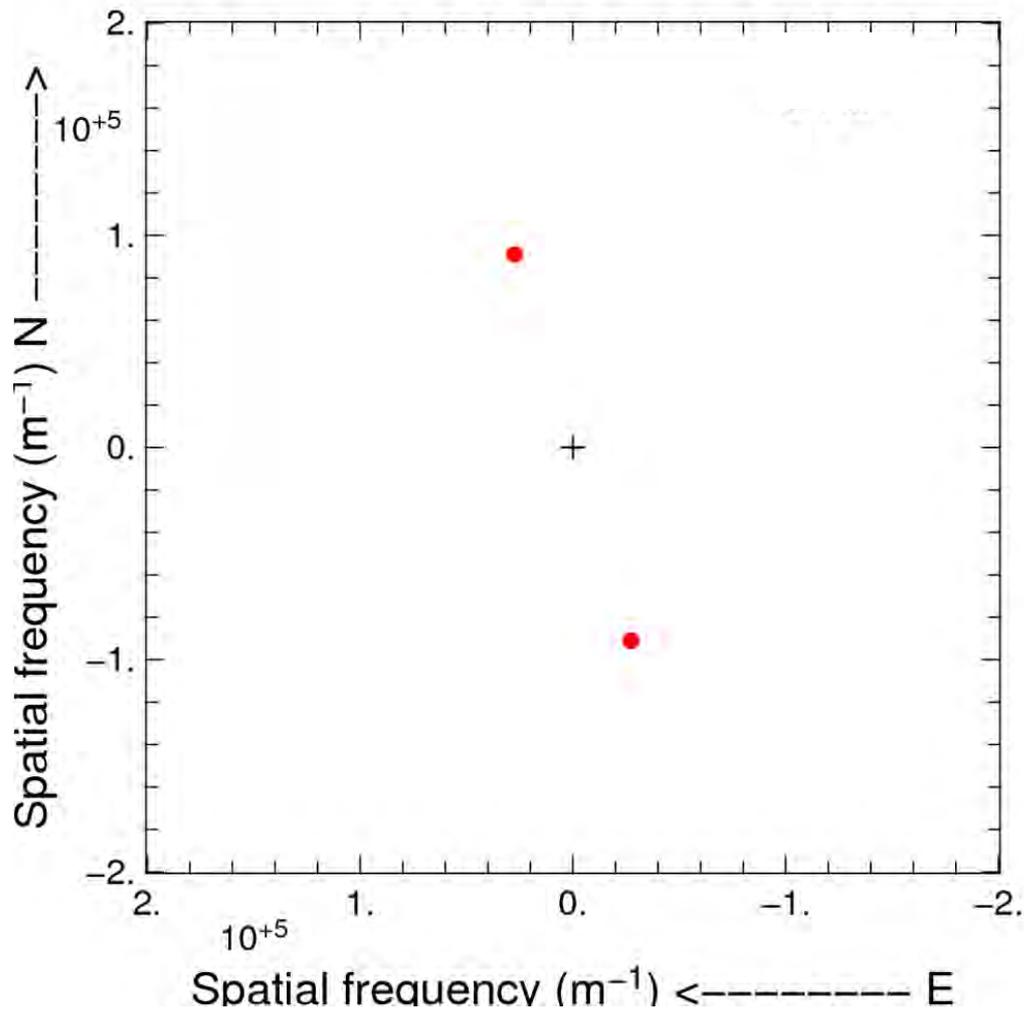
Supersynthèse



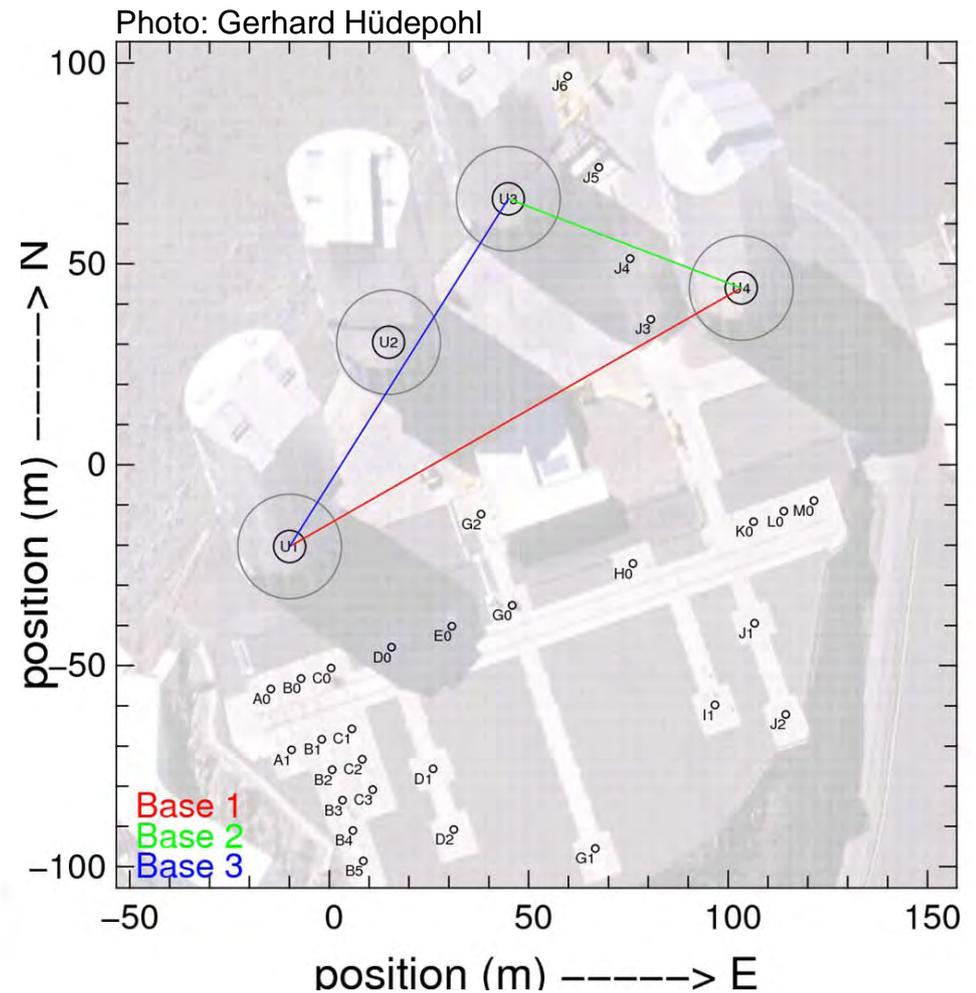
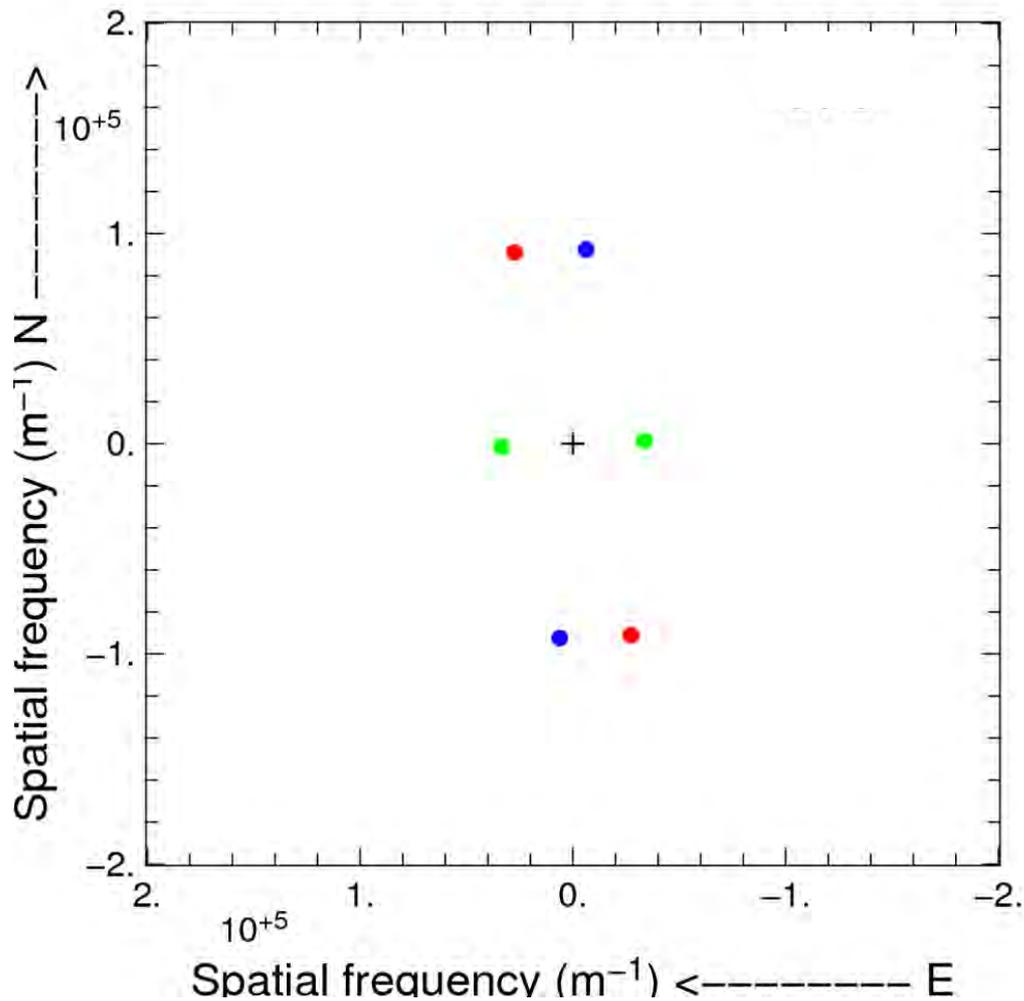
La base projetée trace un arc d'ellipse et sa contrepartie



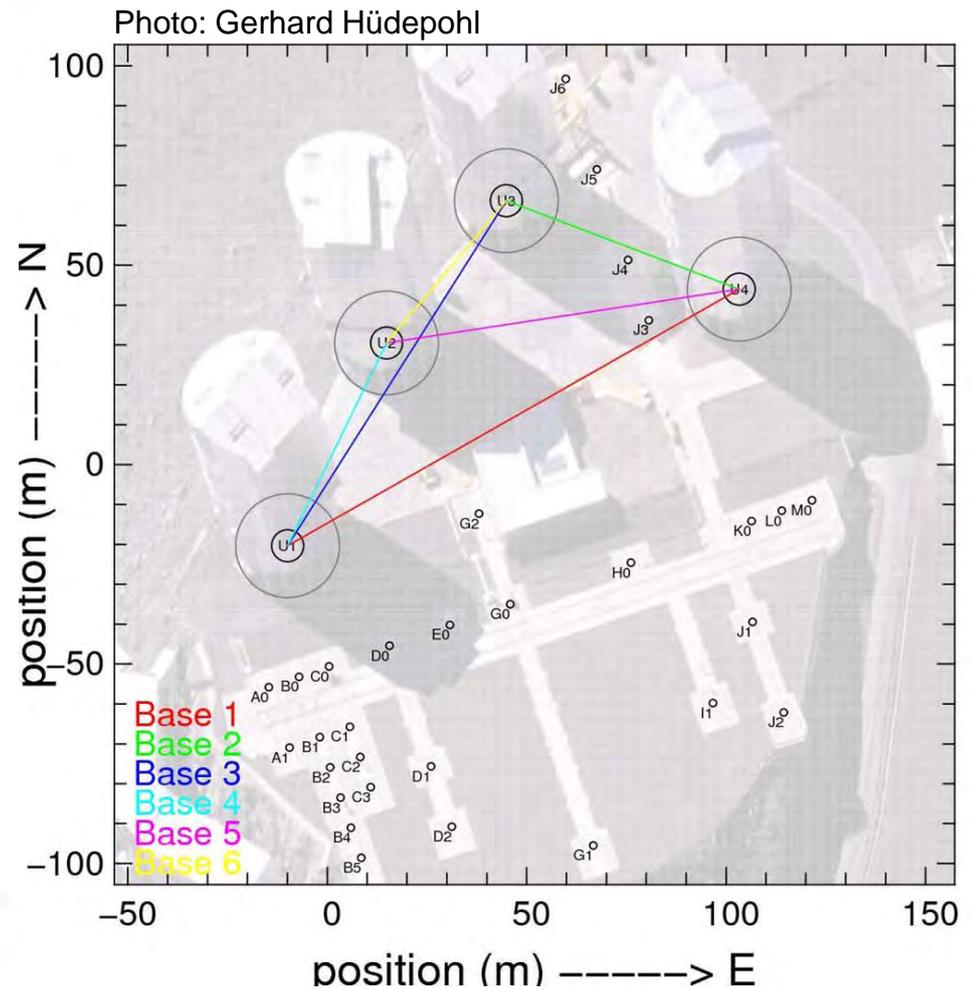
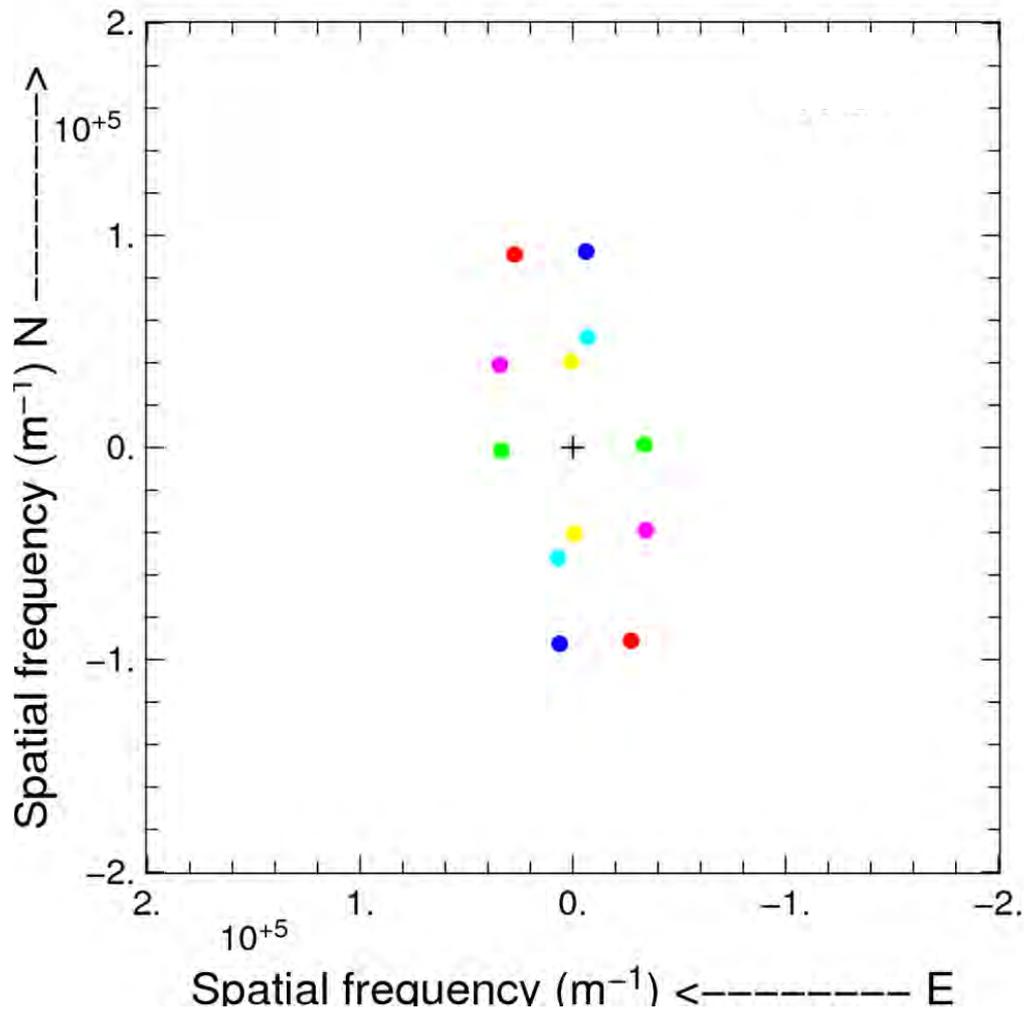
Plan (u,v) avec plus de télescopes : 2T



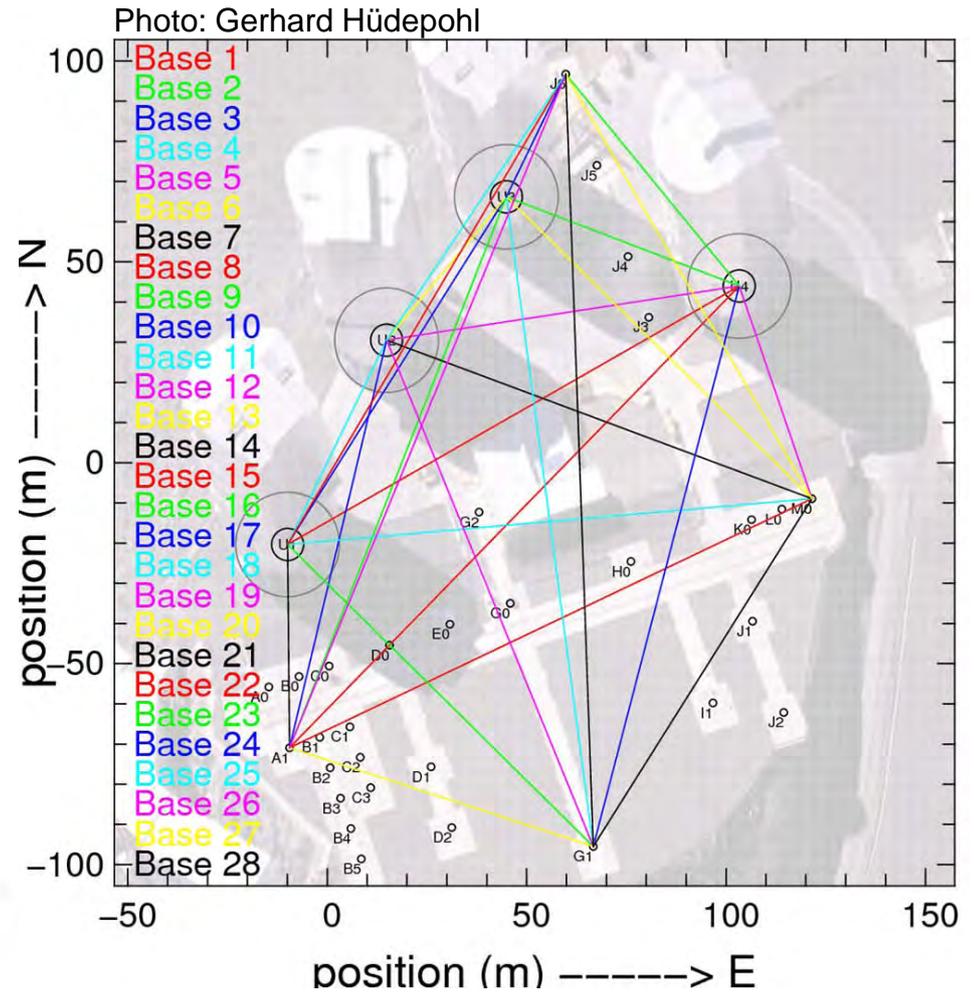
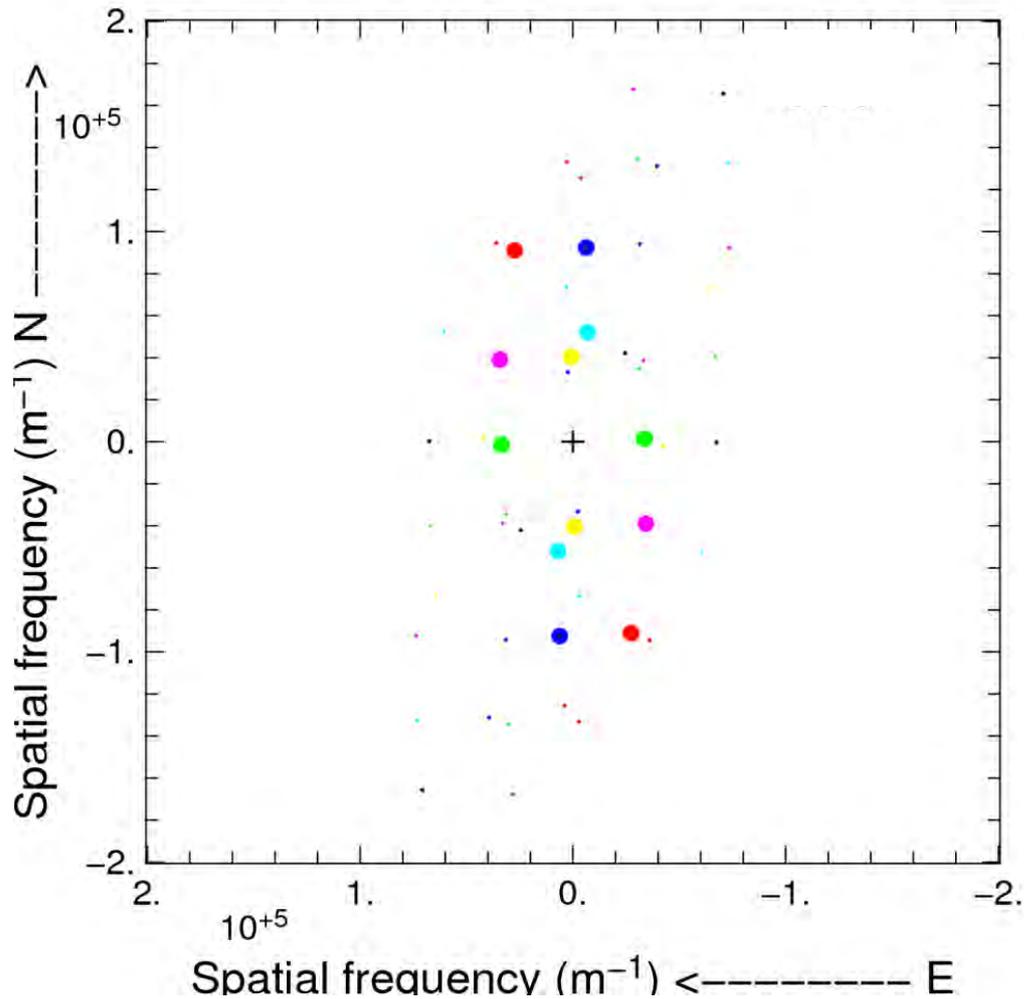
Plan (u,v) avec plus de télescopes : 3T



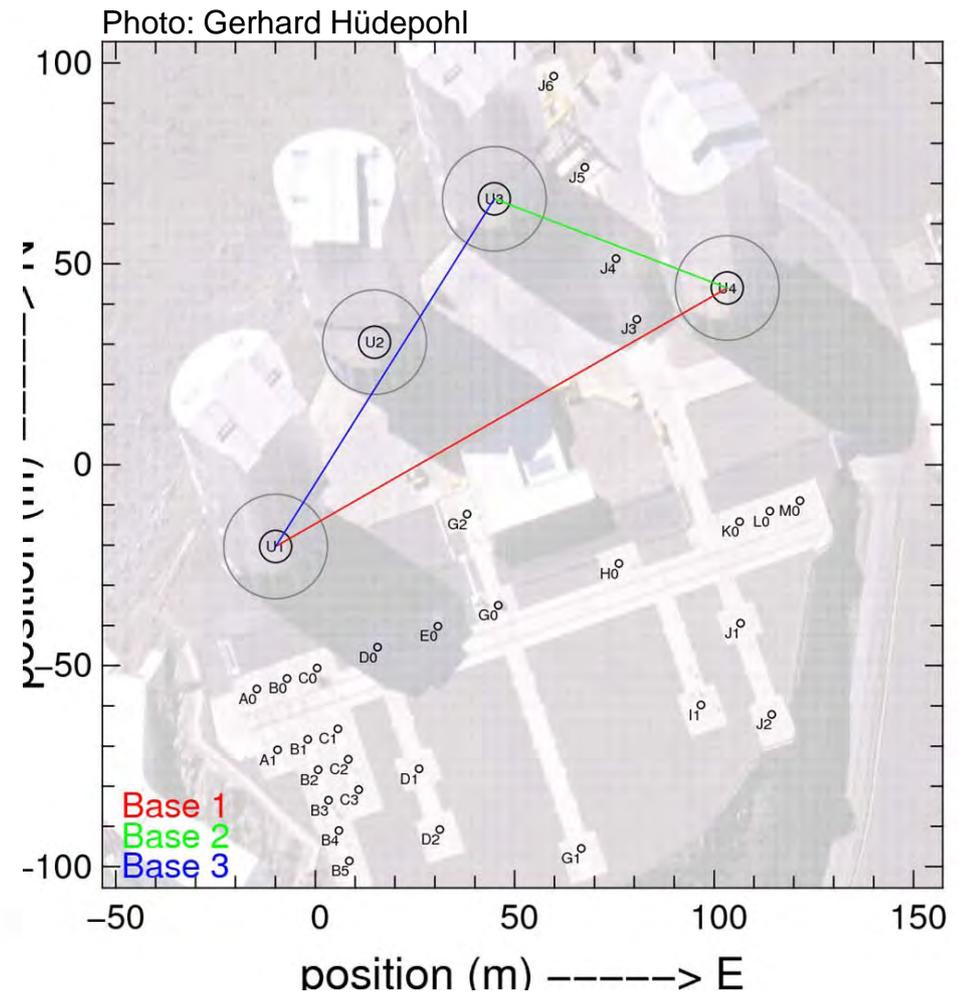
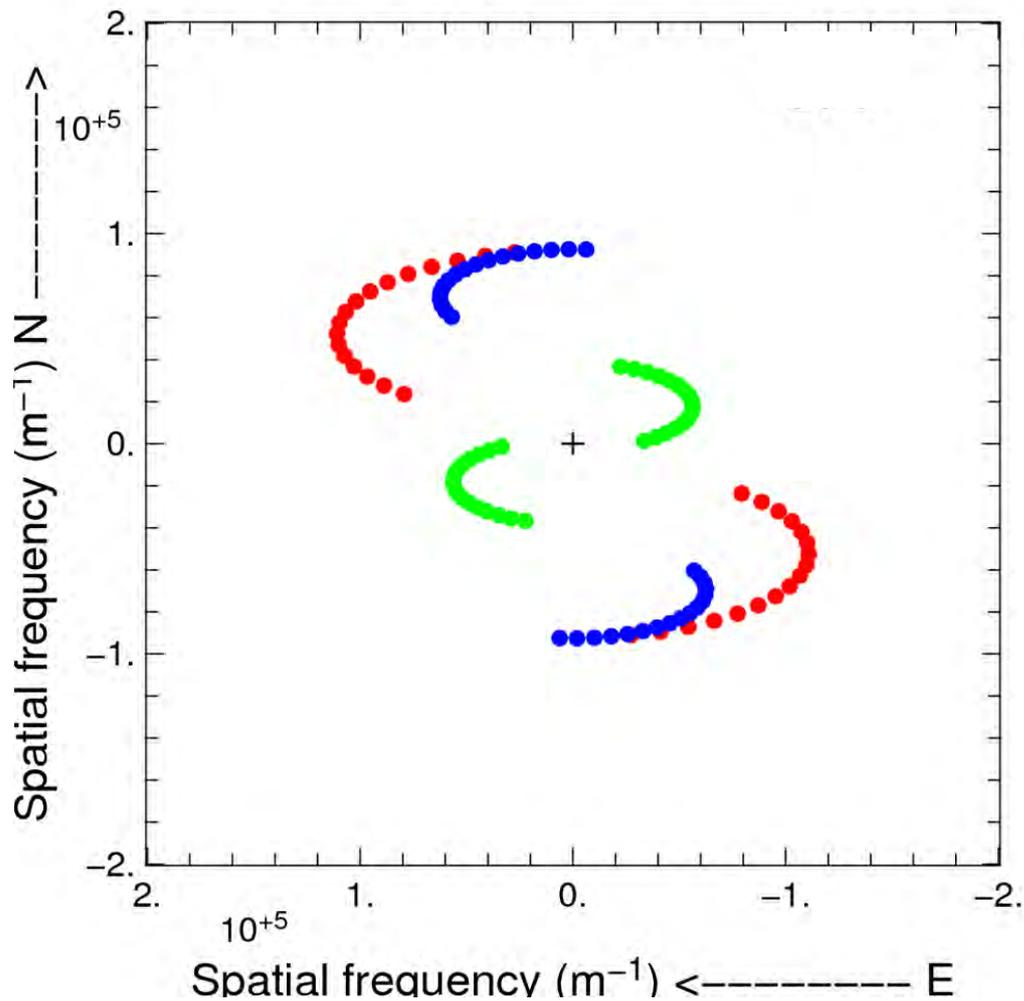
Plan (u,v) avec plus de télescopes : 4T



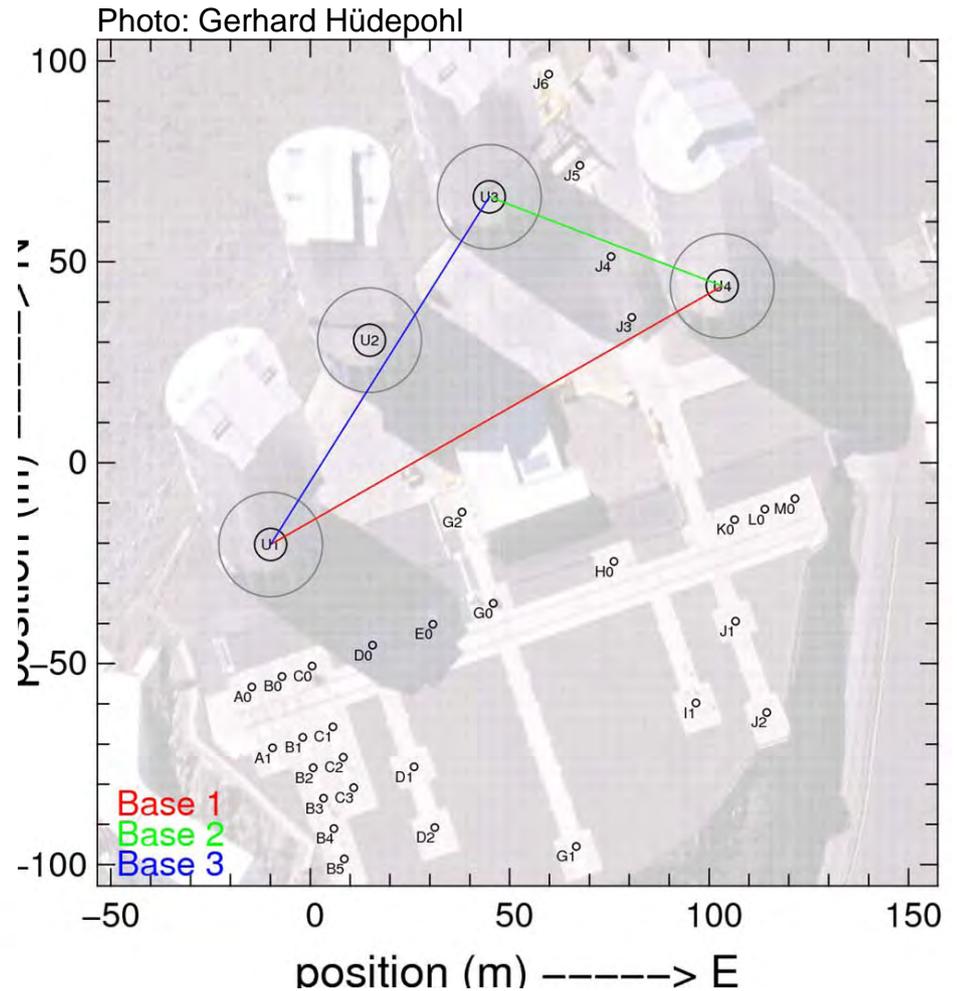
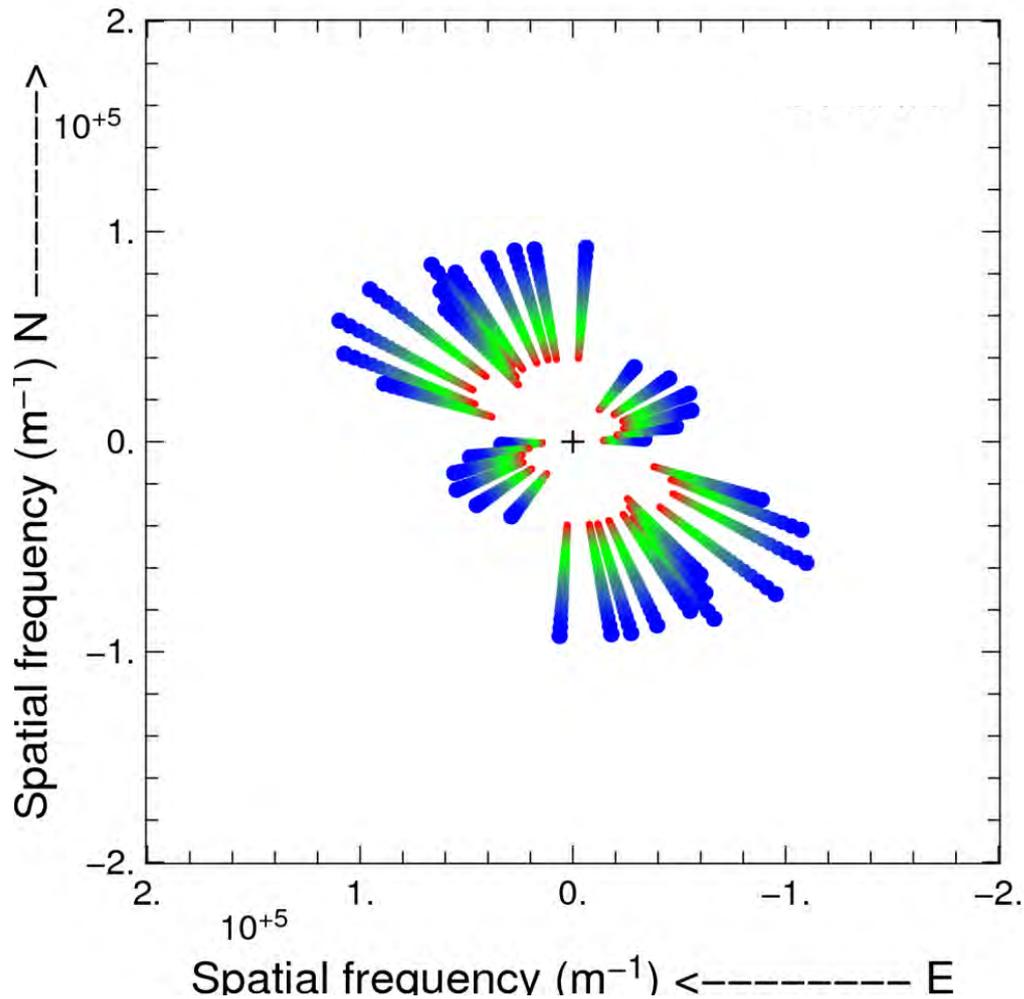
Plan (u,v) avec plus de télescopes : 8T



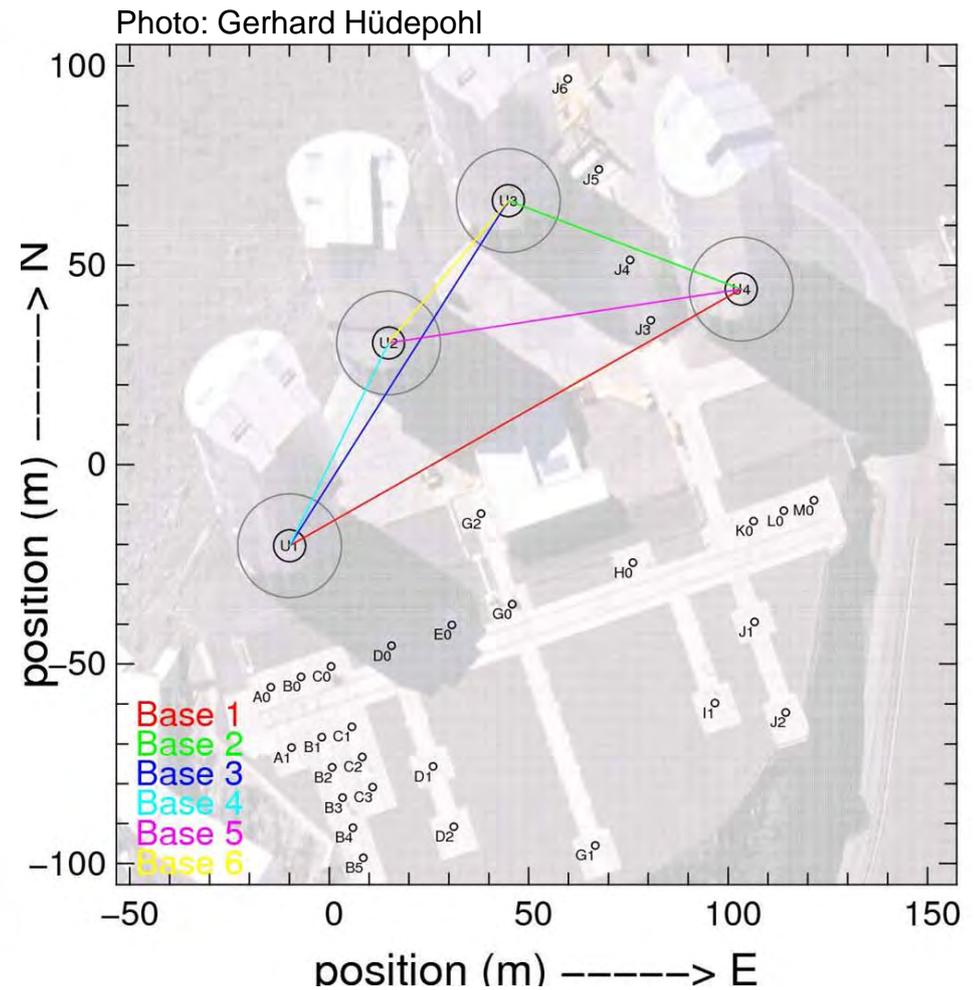
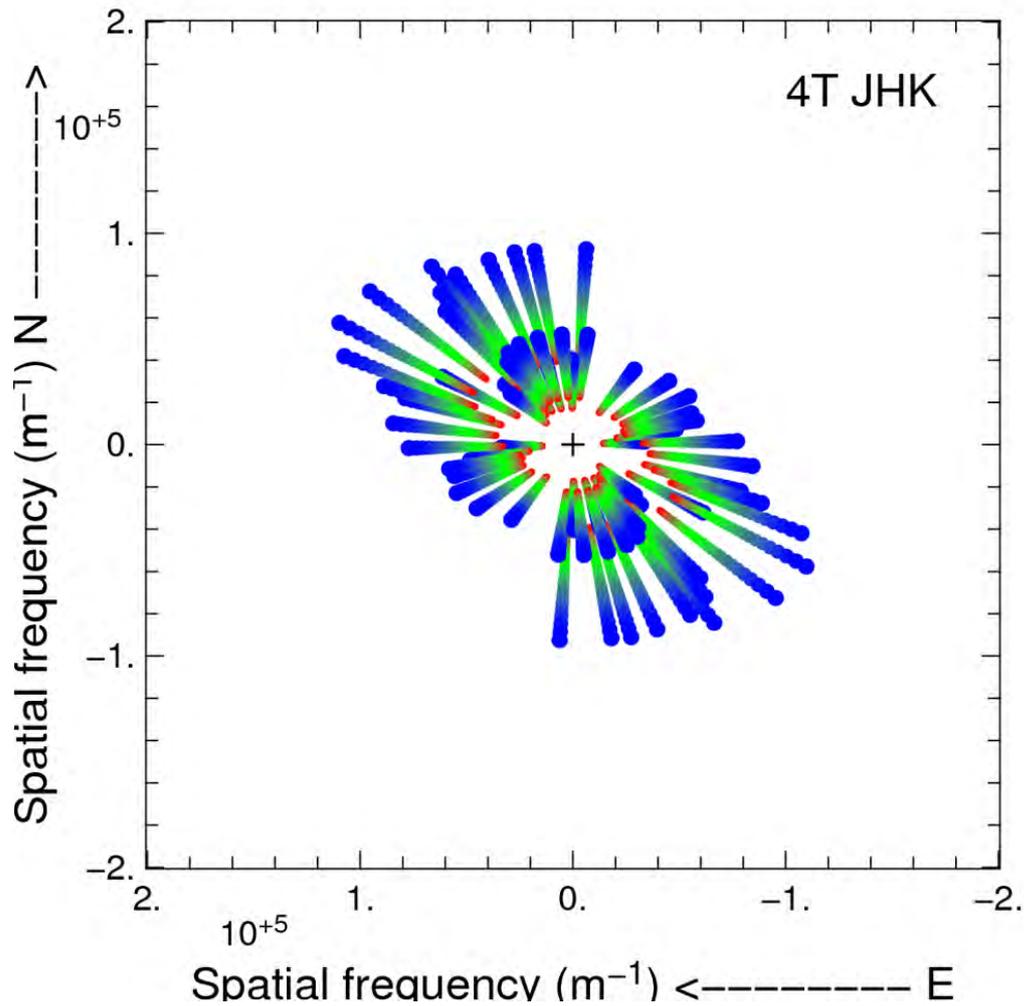
Supersynthèse (3T)



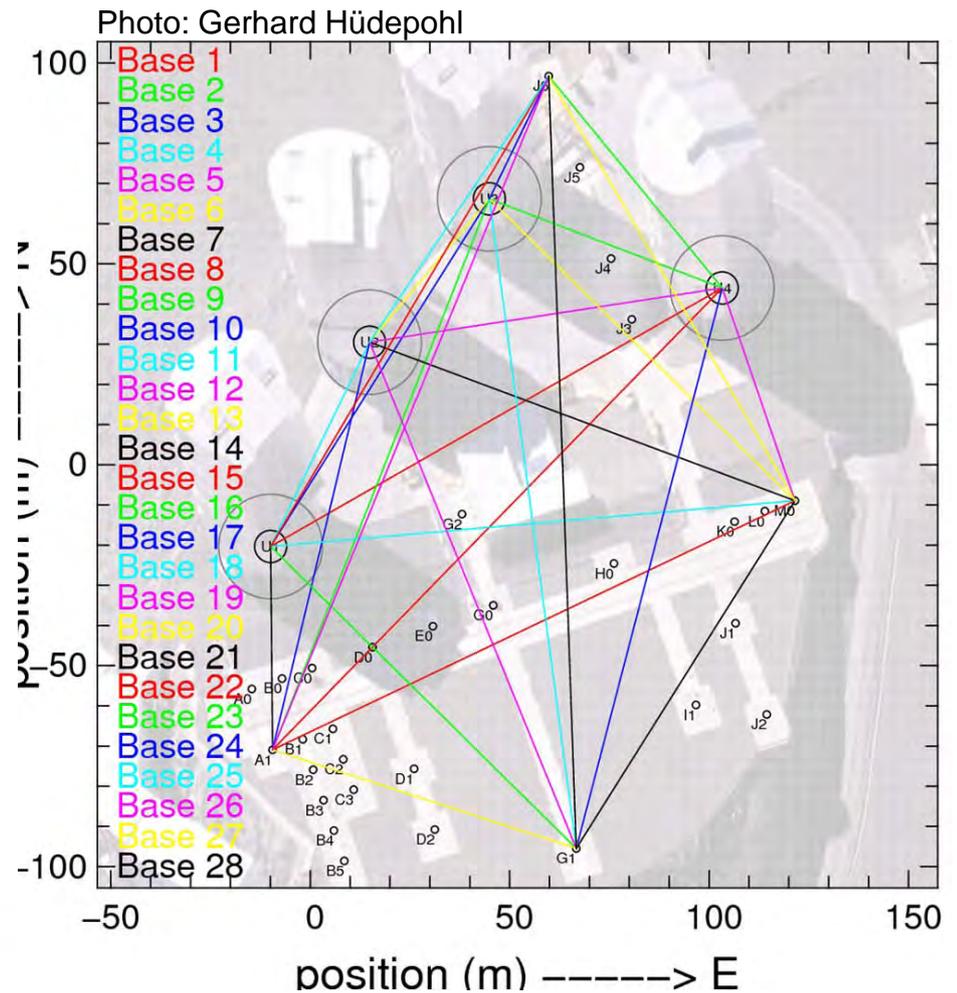
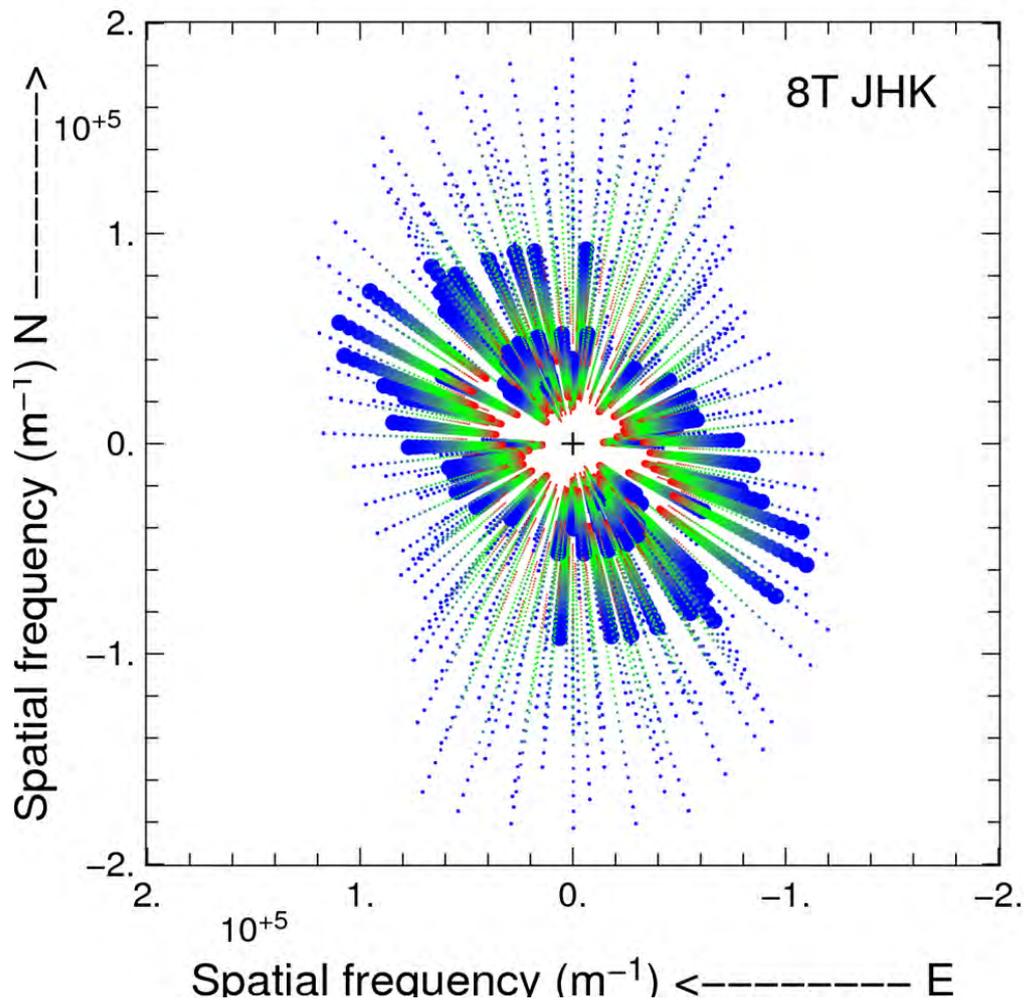
Supersynthèse + couverture spectrale (3T)



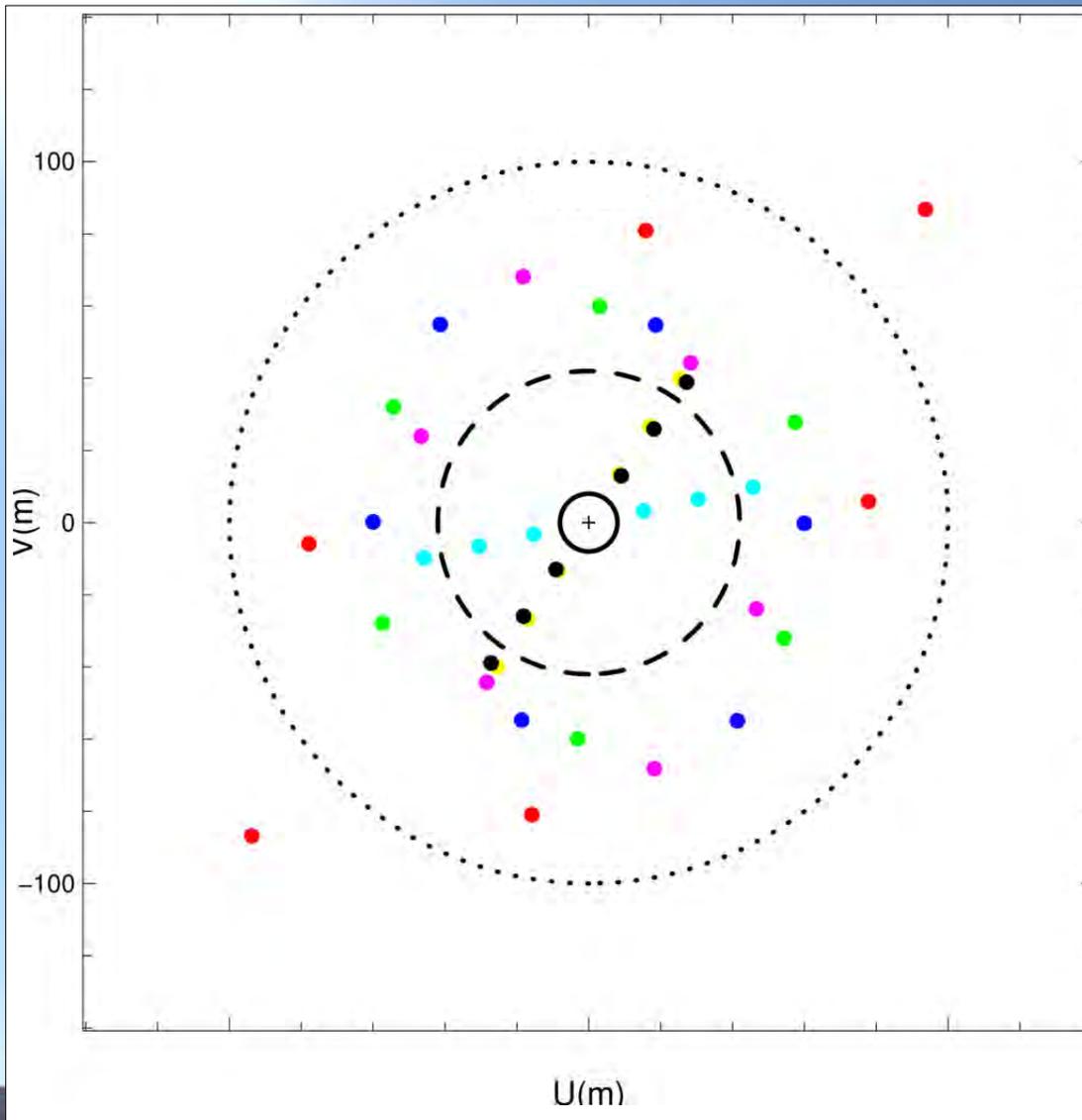
Supersynthèse + couverture spectrale (4T)



Supersynthèse + couverture spectrale (8T)



Résumé



- Cercle continu = **VLT aujourd'hui** (NACO ~ 1-2 **heures**)
- Cercle discontinu = **E-ELT** (42m). (?? h, opérationnel dans ?? ans)
- Cercle pointillé = **OWL** (100m). (Pas dans un futur proche)
- Points colorés = **AMBER aujourd'hui** (1.5 **nuits**)

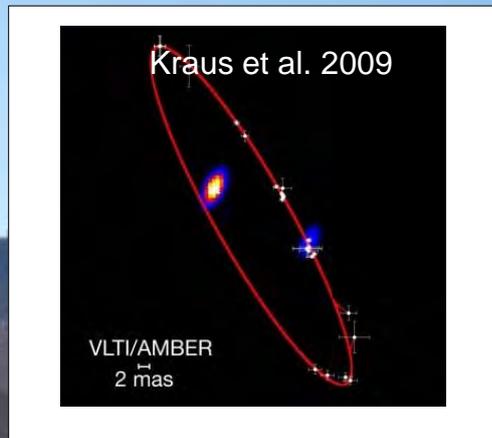
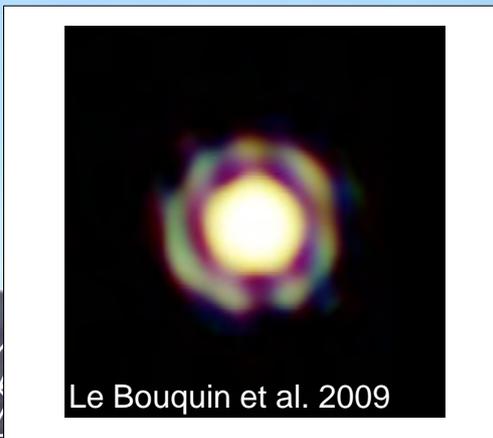
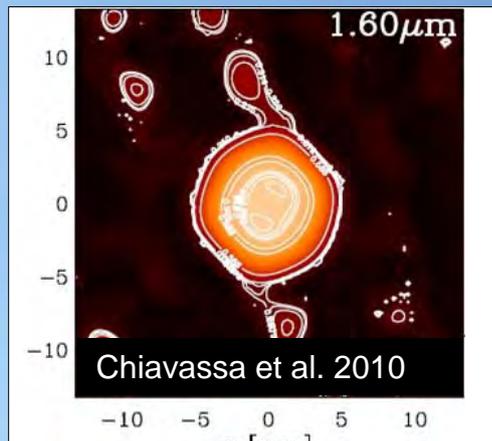
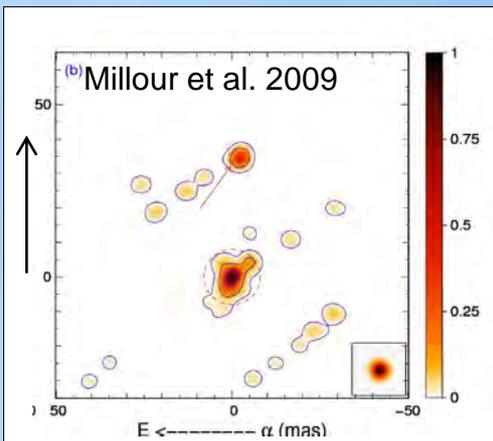
Caractéristiques importantes:

- Faible efficacité
- Faible magnitude limite
- Interférométrie à « phase déficiente »



Résumé

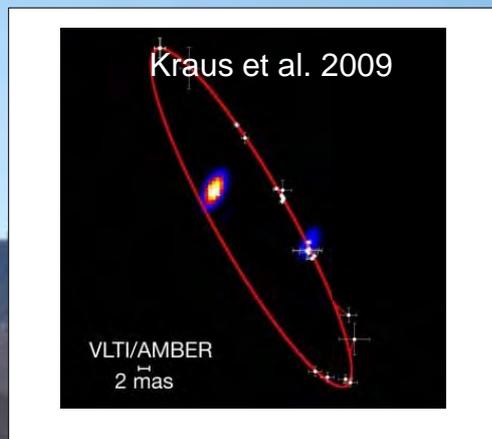
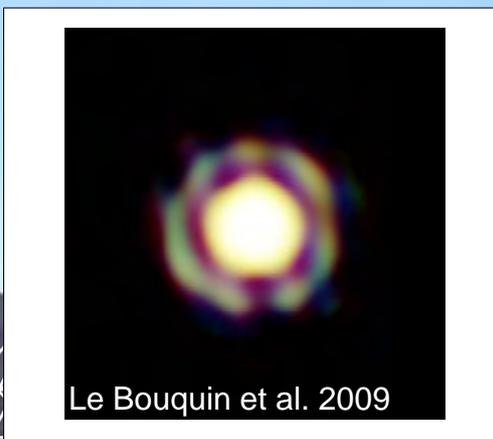
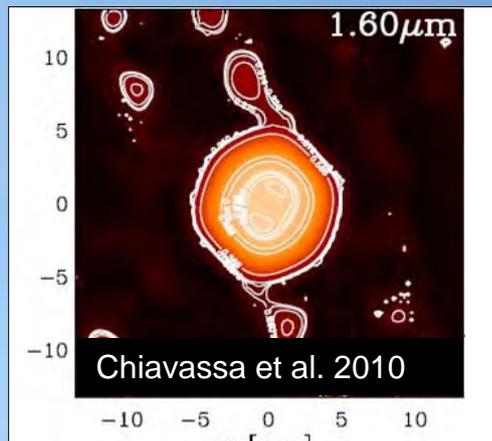
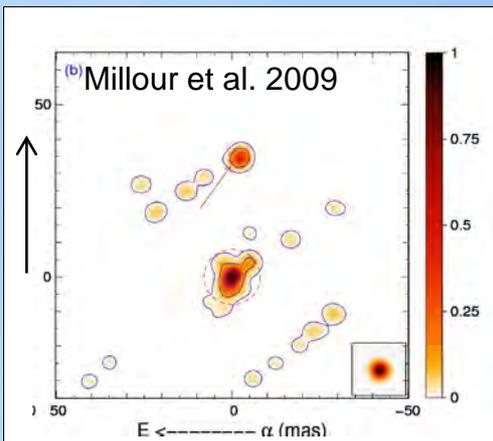
- **Visibilité quadratique (V^2)**
- Si $N_{tel} > 3$
Phase de clôture



- Si spectrographe
Spectre,
Phase différentielle,
Visibilité différentielle
- Si $N_{tel} > 3$ et spectrographe
Phase de clôture des
phases différentielles
- Si $N_{tel} > 4$
Clôture d'amplitude
- Si plan UV bien rempli
Synthèse d'images
- Si beaucoup de télescopes,
double champ
Images directes

Résumé

- **Visibilité quadratique (V^2)**
- **$S_i N_{tel} > 3$**
Phase de clôture



- **S_i spectrographe**
Spectre,
Phase différentielle,
Visibilité différentielle
- **$S_i N_{tel} > 3$ et spectrographe**
Phase de clôture des
phases différentielles
- **$S_i N_{tel} > 4$**
Clôture d'amplitude
- **S_i plan UV bien rempli**
Synthèse d'images
- **S_i beaucoup de télescopes,**
double champ
Images directes

Plan

- Pourquoi la haute résolution angulaire ?
- Qu'est-ce que la visibilité ?
- Qu'est-ce que l'interférométrie optique à longue base ?
- Quelles sont les mesures ?
- Qu'est-ce que le plan (u,v)
- **Le VLTI et quelques applications**
- Les premiers pas en imagerie
- Et ensuite ?



Le VLT

un très grand télescope sur une petite planète

Vous êtes ici



VLT1

ATs

Labo focal

UT1

UT2

UT3

UT4

stations des AT





©2006 Google
Image © 2006 DigitalGlobe

VLTI

UTs

ATs

Focal lab.

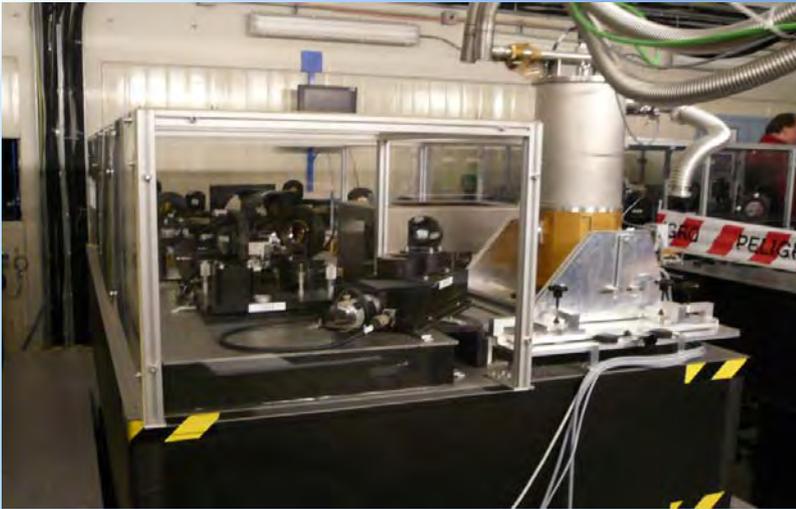
136m

200m



VINCI

- 2 télescopes
- Bande K ($2\mu\text{m}$)
- Large bande



VLT

MIDI

- 2 télescopes
- Bande N ($8-13\mu\text{m}$)
- Résolutions spectrales $R=30$ & 300

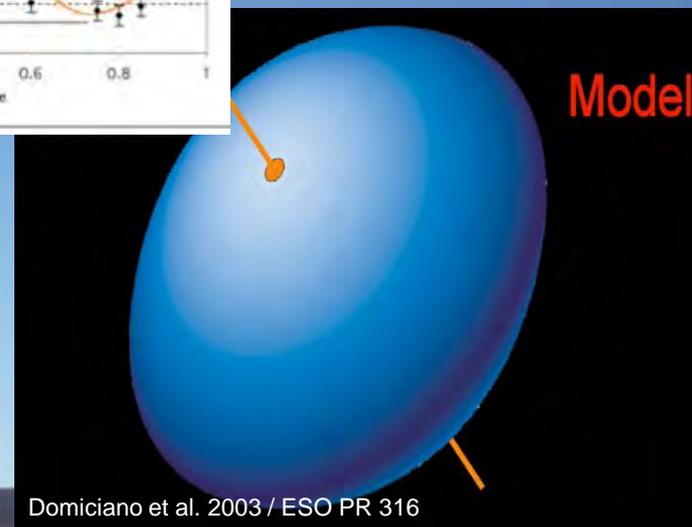
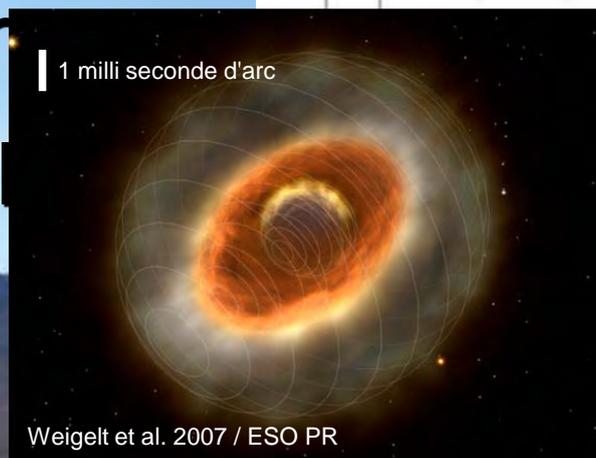
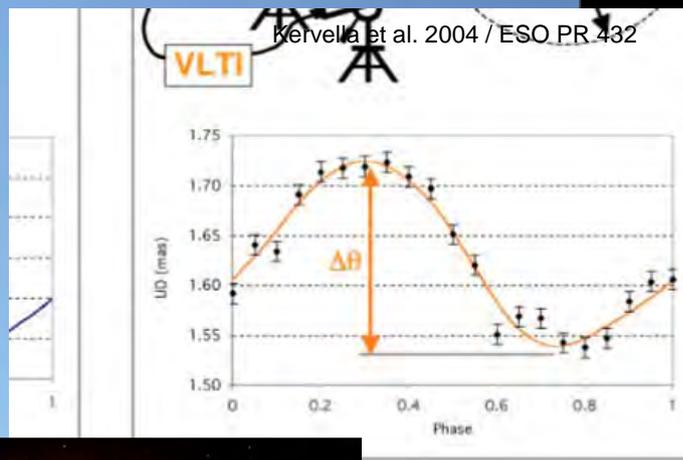
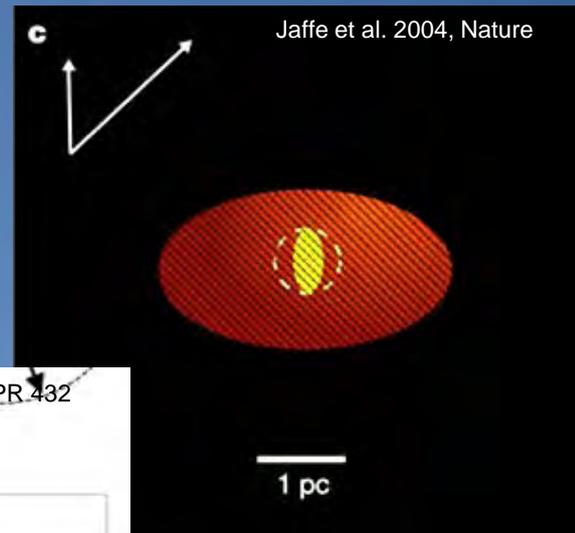


AMBER

- 3 télescopes (capacités d'imagerie)
- Fibres optiques (calibration)
- J, H & K simultanés ($1-2\mu\text{m}$)
- Résolution spectrales
 $R=35, 1500$ & 12000

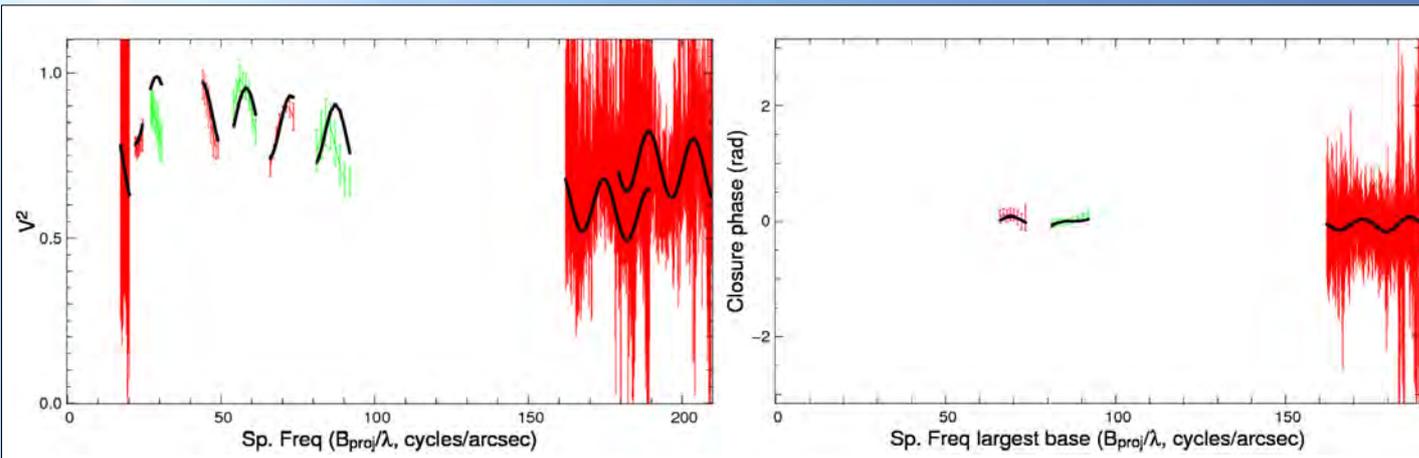
VLTI

- Le disque central de la galaxie NGC 1068 résolu !
- Pulsation des Céphéides
- Étoile Be aplatie par la rotation
- Disque d'étoiles en rotation Keplerienne



Détection et caractérisation de binaires

Exemple 1: Cen (Meilland, Millour et al. 2008)

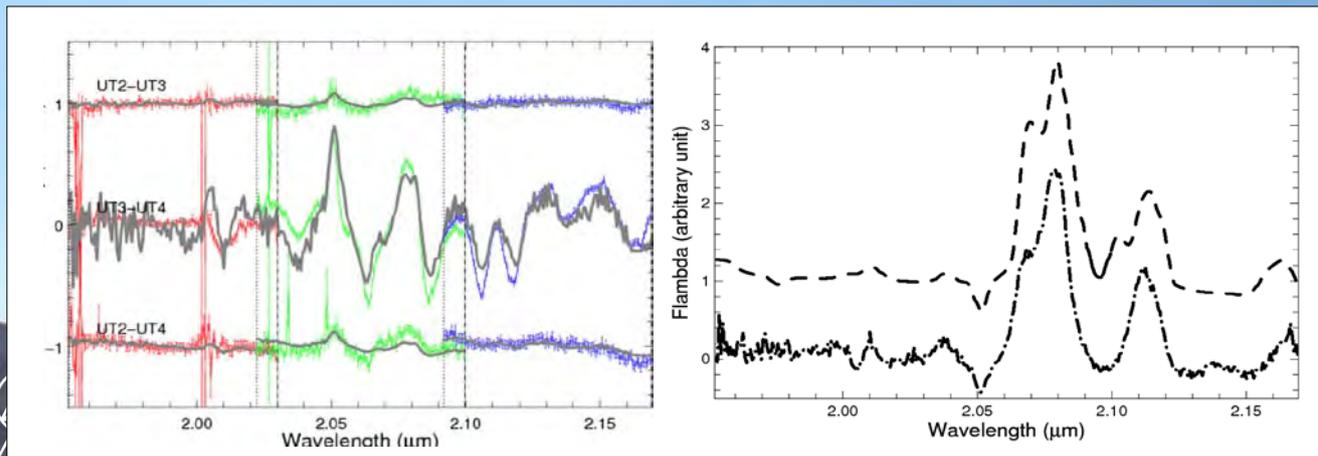


Séparation 68.5 mas

Disque ~1.5 mas

Flux compagnon ~5%

Exemple 2: Vel (Millour et al. 2007)



Séparation des spectres

+

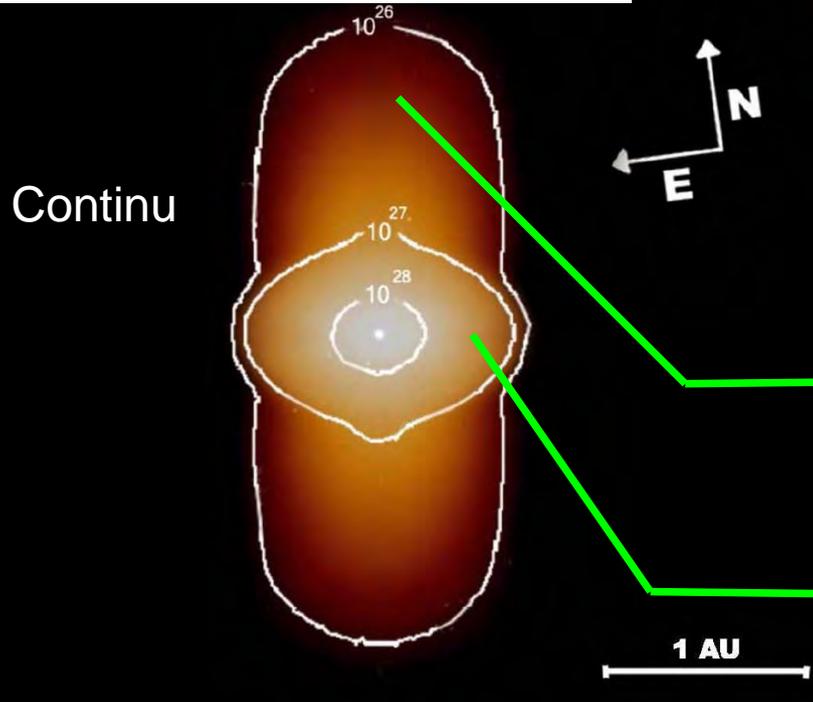
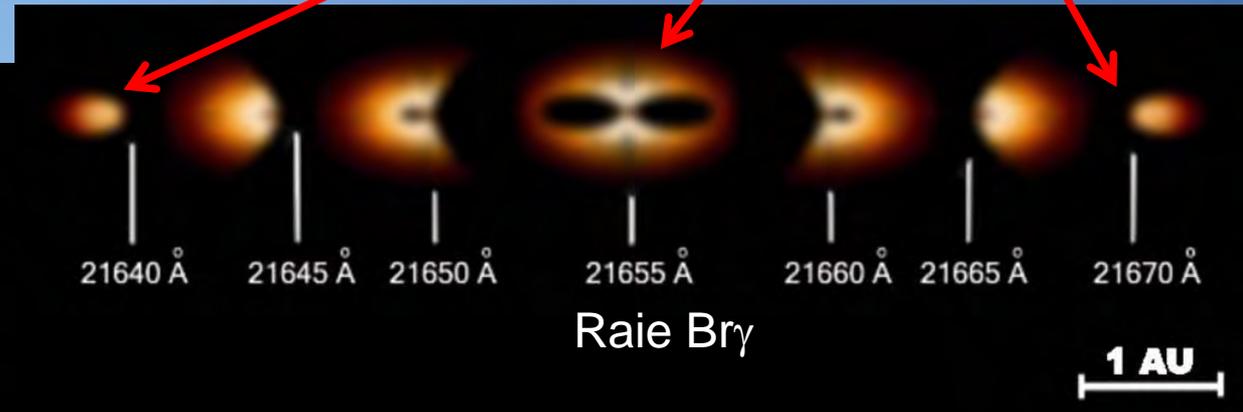
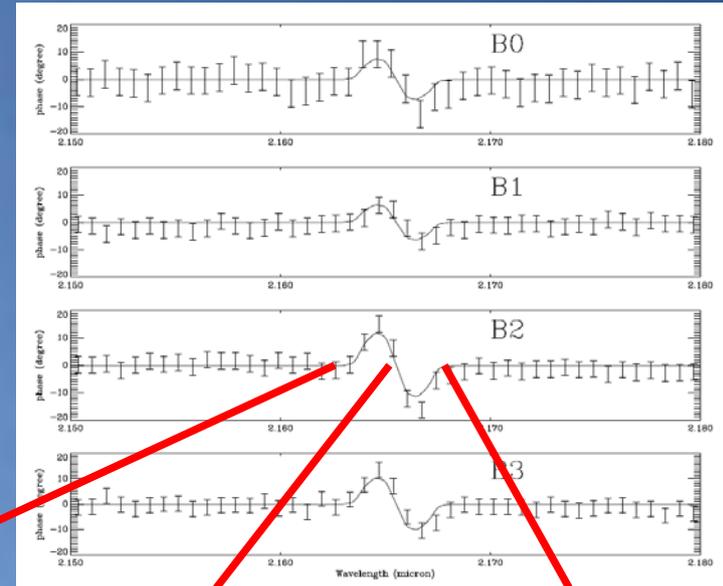
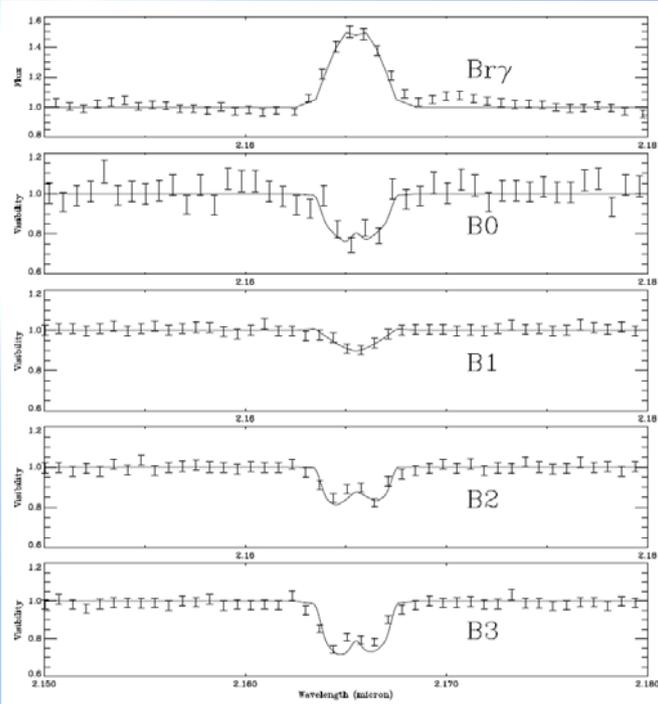
Détection 3^{ème} structure

+

Astrométrie & distance

α Arae

Détection d'un disque de gaz Keplérien !



Vent polaire

Disque équatorial

Meilland, Stee, Vannier, Millour et al., A&A 2007

Plan

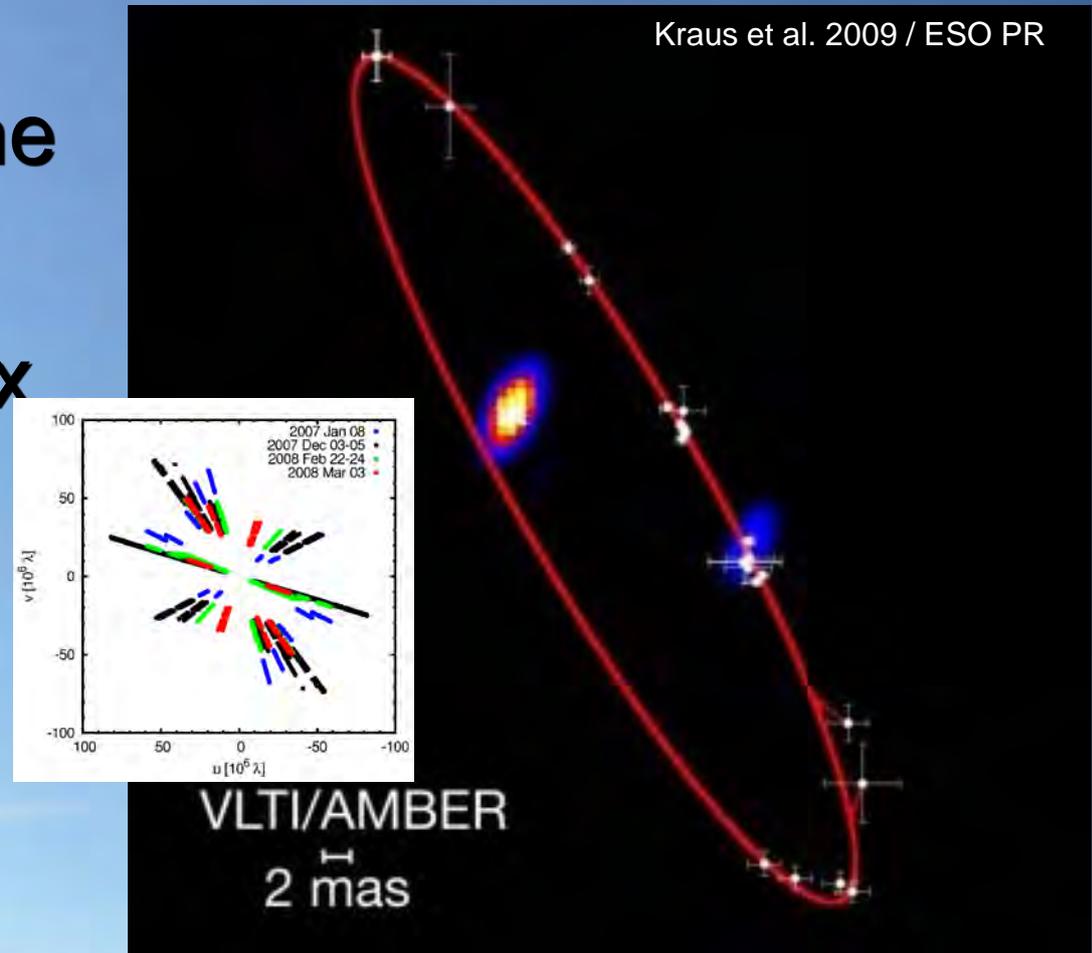
- Pourquoi la haute résolution angulaire ?
- Qu'est-ce que la visibilité ?
- Qu'est-ce que l'interférométrie optique à longue base ?
- Quelles sont les mesures ?
- Qu'est-ce que le plan (u,v)
- Le VLTI et quelques applications
- **Les premiers pas en imagerie**
- Et ensuite ?



q¹ Ori C

L'image d'une étoile binaire O jeune

- Suivi de l'orbite du système binaire jeune dans le temps
- Masses et âge mieux déterminés
- L'image AMBER ne détecte aucune matière circumstellaire en dehors de la binaire

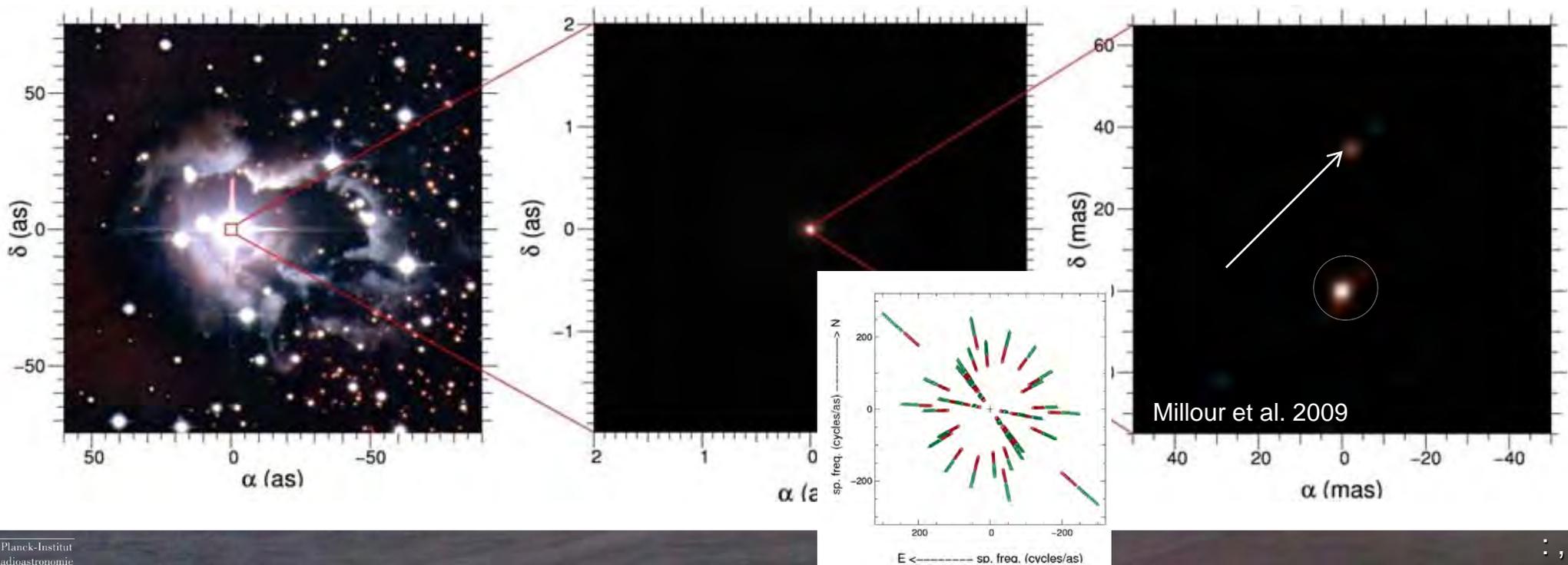


HD87643

L'environnement et le compagnon d'une étoile B[e]

Étoile B[e] précédemment mal comprise

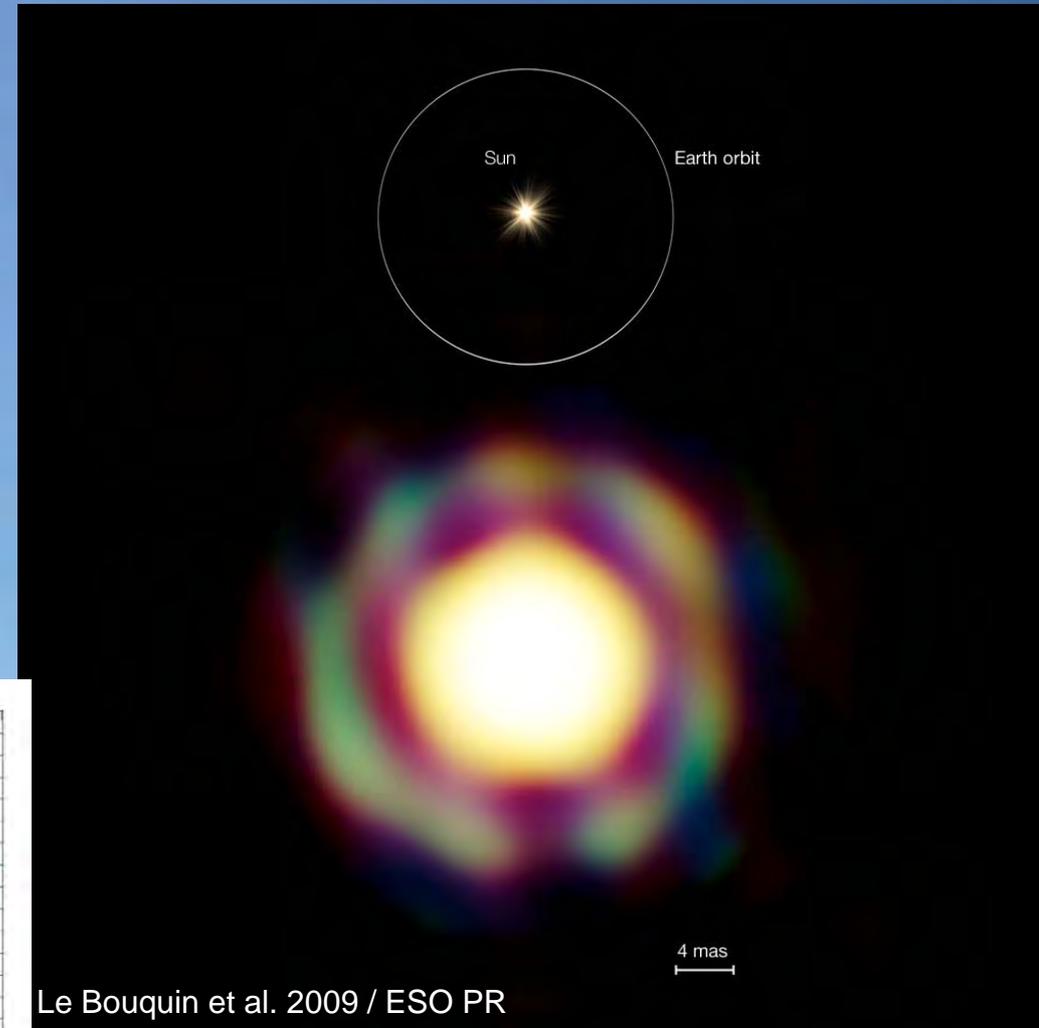
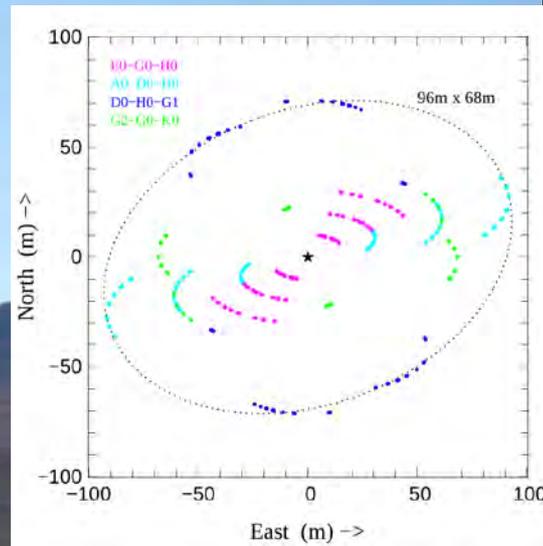
- C'est une **étoile binaire** (longue période, lien avec la nébuleuse) !
- **De la poussière** ... partout, mais pas à grande échelle ($>0.5''$) ?!?
- **Étoile primaire de type B + disque de poussière** (étoile B[e] ???)
- **Étoile secondaire étonnante** (étoile T Tauri ???)



T Lep

l'image de l'environnement proche d'une étoile Mira

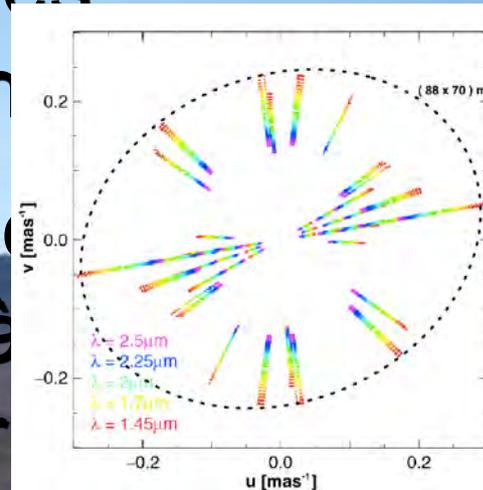
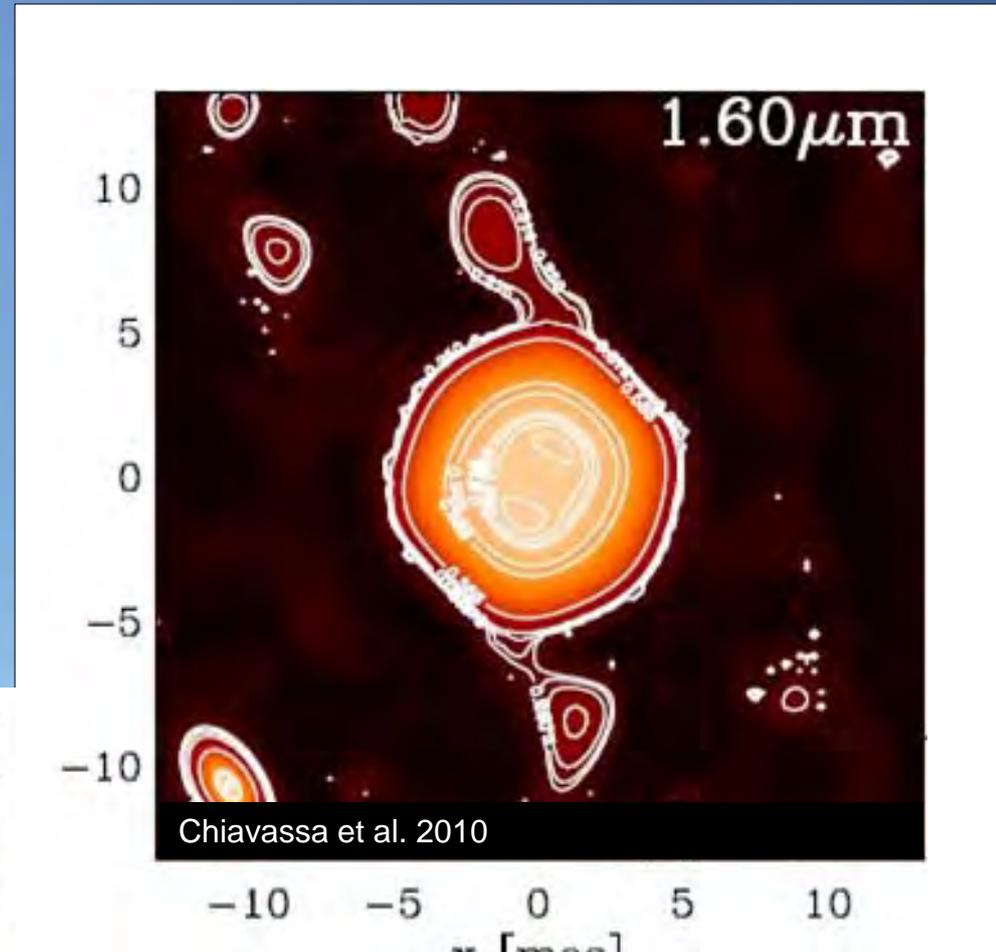
- Image directe de l'enveloppe de molécules d'une étoile Mira (mol-sphere)
- Confirmation des modèles



VX Sgr

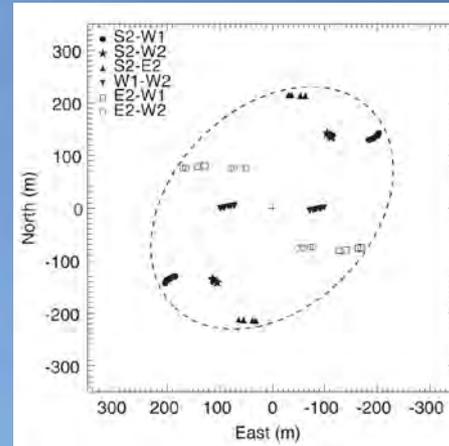
des taches à la surface d'une étoile AGB

- Image de l'enveloppe de molécules (mol-sphere)
- Deux taches détectées à la surface, conformes aux modèles d'hydrodynamique
- Les modèles poussent à considérer

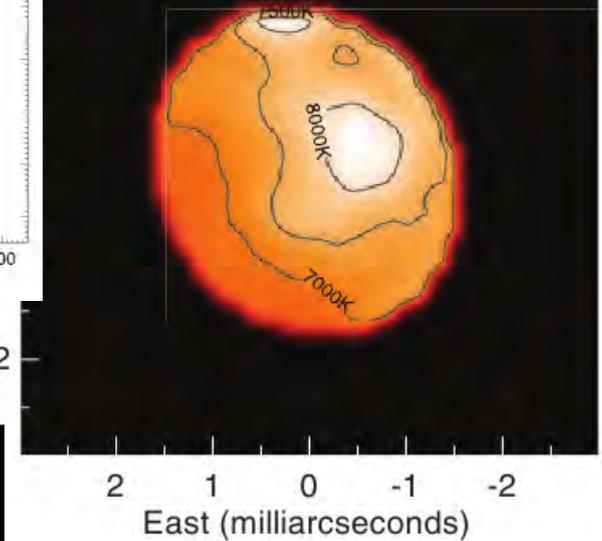


D'autres images ?

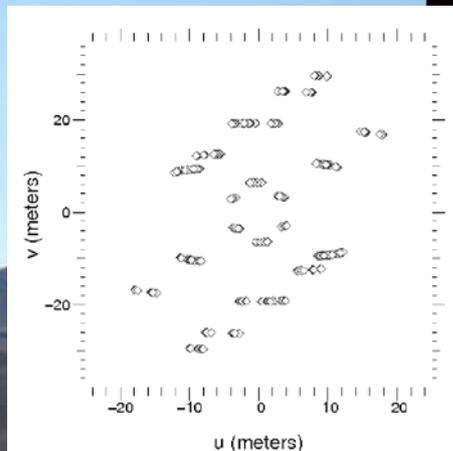
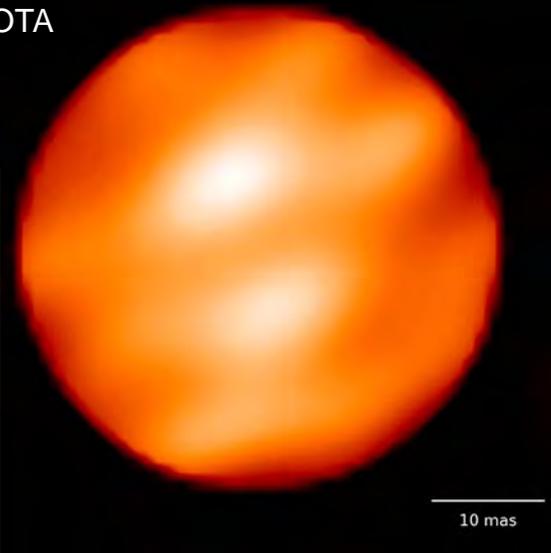
- VLT
- CHARA
- IOTA (terminé)
- MROI (en construction)
- COAST
- NPOI



Monnier et al. Science 2007
CHARA



Hautbois et al. A&A 2009
IOTA



Plan

- Pourquoi la haute résolution angulaire ?
- Qu'est-ce que la visibilité ?
- Qu'est-ce que l'interférométrie optique à longue base ?
- Quelles sont les mesures ?
- Qu'est-ce que le plan (u,v)
- Le VLTI et quelques applications
- Les premiers pas en imagerie

• **Et ensuite ?**



Prospective

Quelle science

- Meilleures magnitudes limites
 - Science extragalactique (AGNs, S/LMC, etc.)
 - Programmes systématiques stellaires
- Plus grandes bases / plus courtes longueurs d'ondes
 - Imager plus de surfaces stellaires
 - Programmes systématiques

Quelles techniques

- Généralisation du double champ
- Meilleure transmission (miroirs / optimisation optique)
- Meilleure efficacité (optimisation système)
- Meilleures capacités d'imagerie (plus de télescopes)
- Plus grandes surfaces collectrices / plus grandes



2ⁿ d e génération du VLT

• GRAVITY

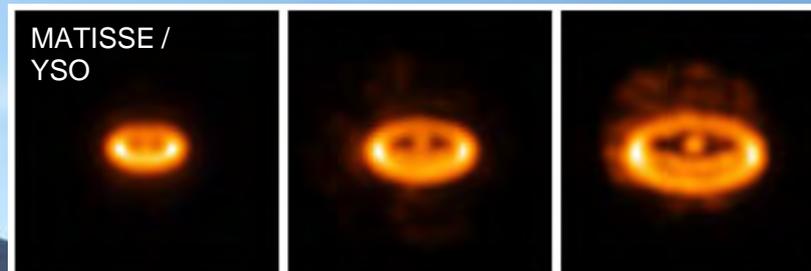
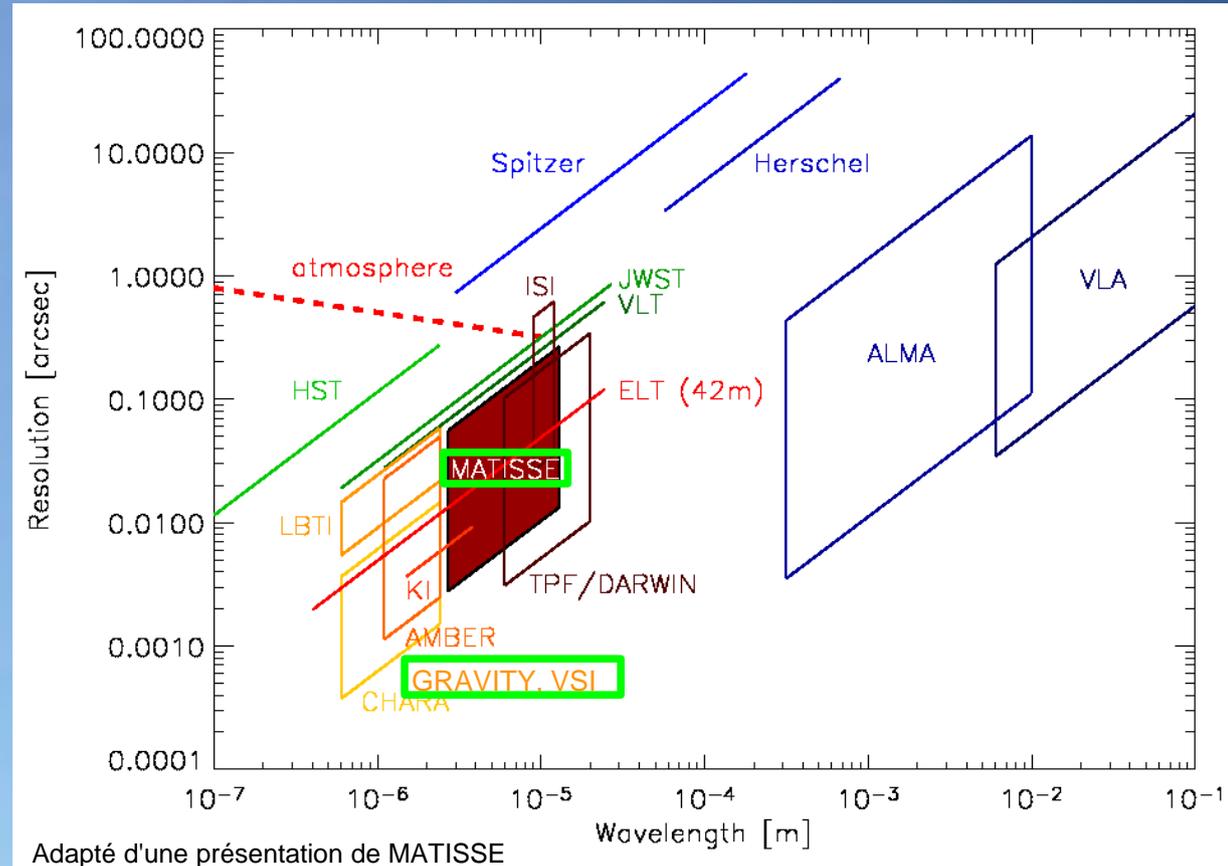
- 4T, bande K
- R=30, 300, double champ
- Le centre Galactique

• VSI

- 4-6T, J, H ou K
- R=30, 1500, 12000
- Meilleures images que AMBER

• MATISSE

- 4T, bandes L, M et N
- R=30, 300, 2500
- Des images dans l'infrarouge thermique



Autres projets d'interféromètres imageurs

- MROI : optimiser la transmission
- CARLINA : changer le concept
- KEOPS : généraliser le double champ
- OVLA
- LISA
- VIDA
- ...

KEOPS (page web du laboratoire FIZEAU)



Merci de votre attention

VLT

Camp de base

Résidence
des astronomes

Vers Antofagasta (~150 km)

