

Défis et ambitions de l'observation astronomique au sol

VLT, VLT-I et ELT



Crédits: J. Beltrán/ESO

Alexis Carlotti - UGA/IPAG - GePhyX 2024
alexis.carlotti@univ-grenoble-alpes.fr



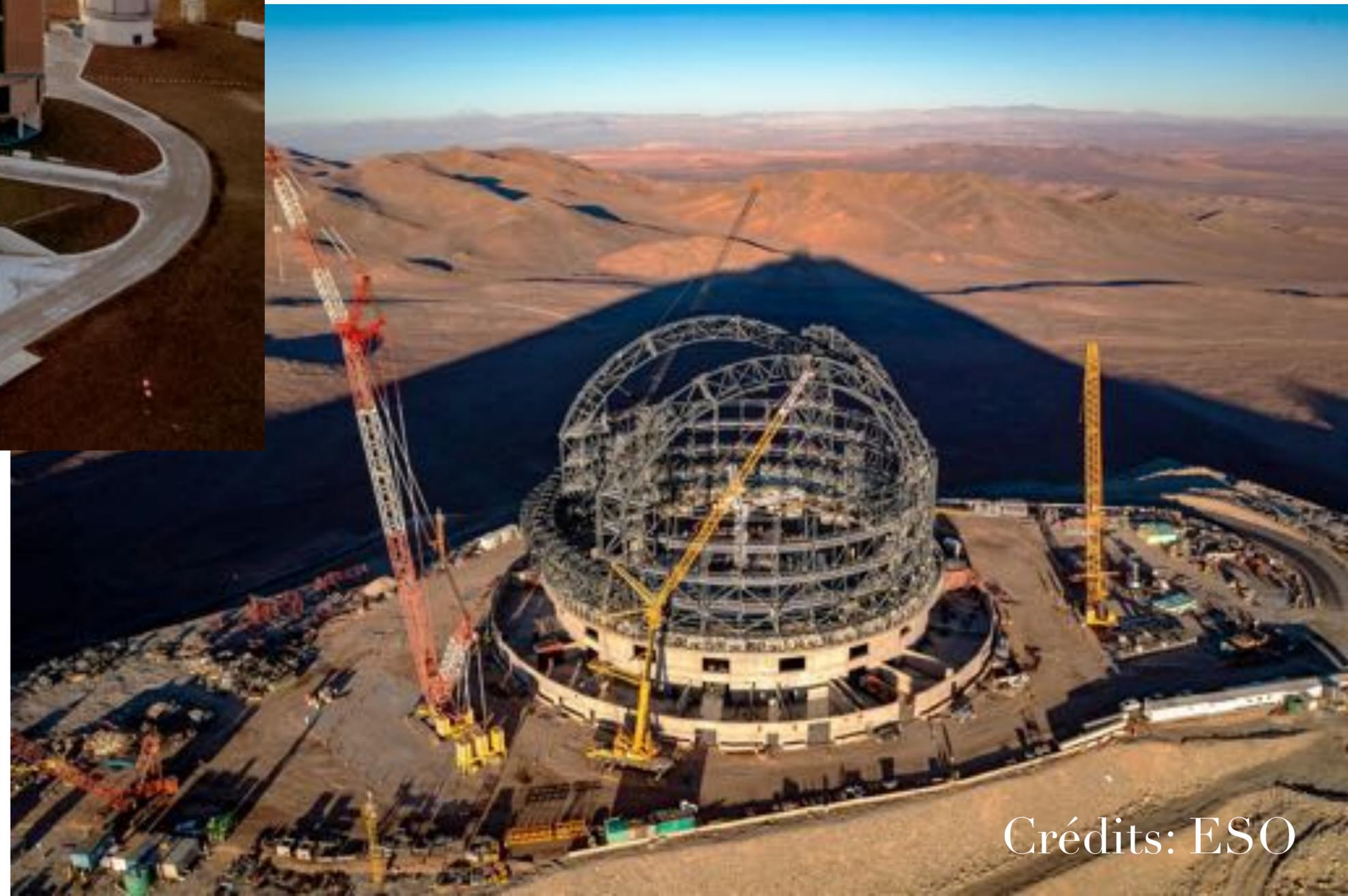


Very Large Telescope (ESO Paranal)

4x8m et 4x2m pouvant fonctionner en mode interférométrique

Extremely Large Telescope (ESO Armazones)

39m



Crédits: ESO

I - Objectifs astrophysiques

Milky Way Galaxy

Diamètre de la voie lactée : ~ 32000 parsec (pc)



La moitié des planètes connues sont à moins de 250pc



Exoplanètes

Comment se forment-elles ?

A quoi ressemblent-elles ?

Sont-elles « habitables » ?

**Nous avons besoin d'analyser leur
lumière pour répondre à ces questions !**

Vue d'artiste - Crédits: ESO/M. Kornmesser/Nick Risinger

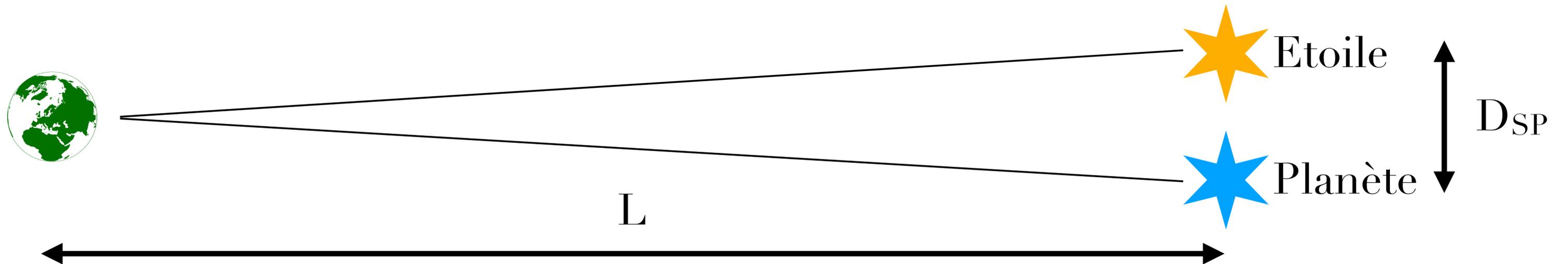
Une (très) petite séparation angulaire

Séparation angulaire
étoile-planète :

$$\alpha = \frac{D_{SP}}{L}$$

D_{SP} : Distance étoile-planète
(du point de vue de l'observateur)

L : Distance observateur-étoile

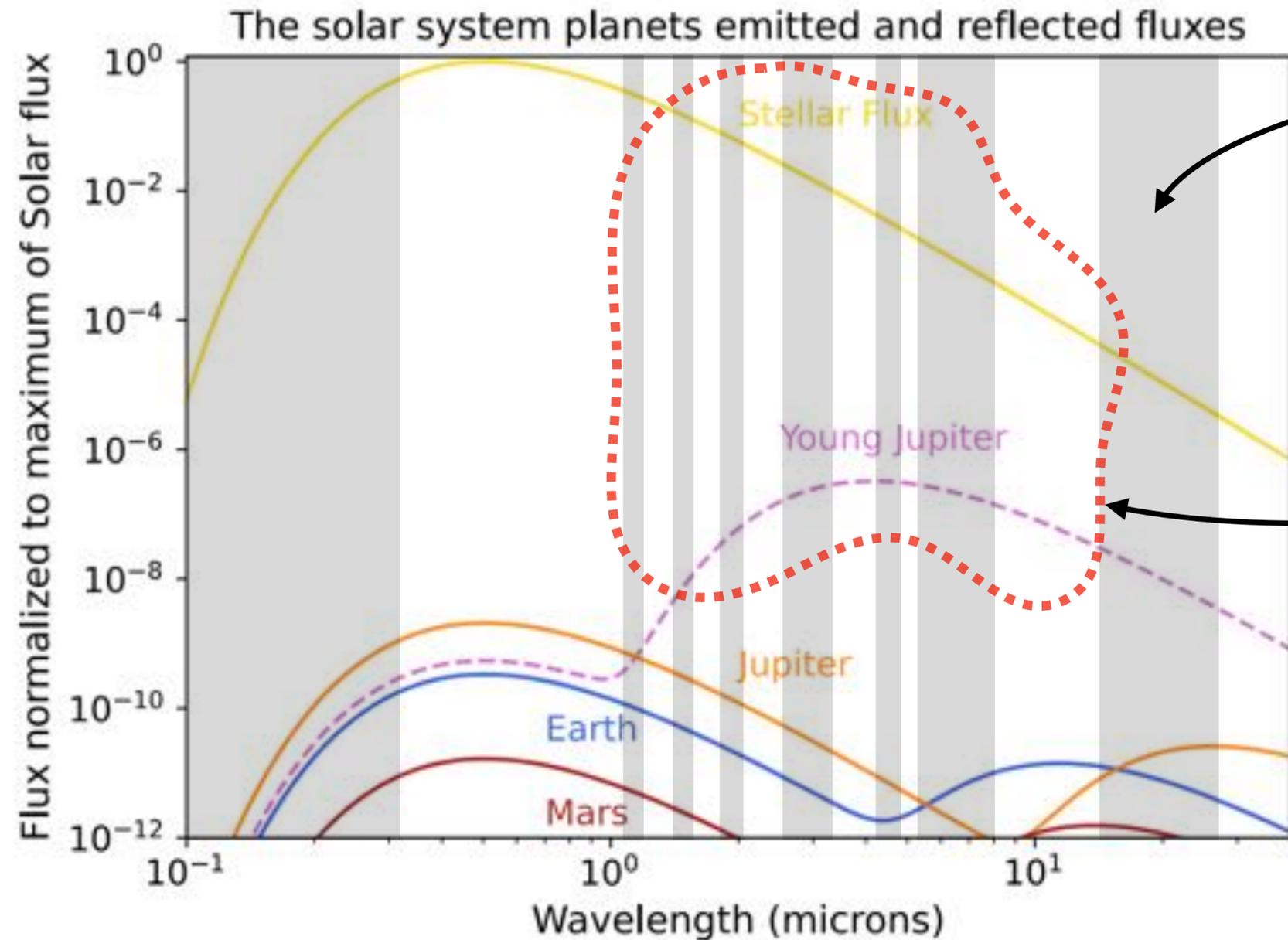


Par définition du parsec (pc) :

Si $L = 1\text{ pc}$ et $D_{SP} = 1\text{ UA}$, la séparation angulaire α vaut $1''$, soit $1/3600^\circ$

(1 UA = distance Terre-Soleil, et $1\text{ pc} \sim 3.26$ années-lumière)

Une (très) fort rapport de flux

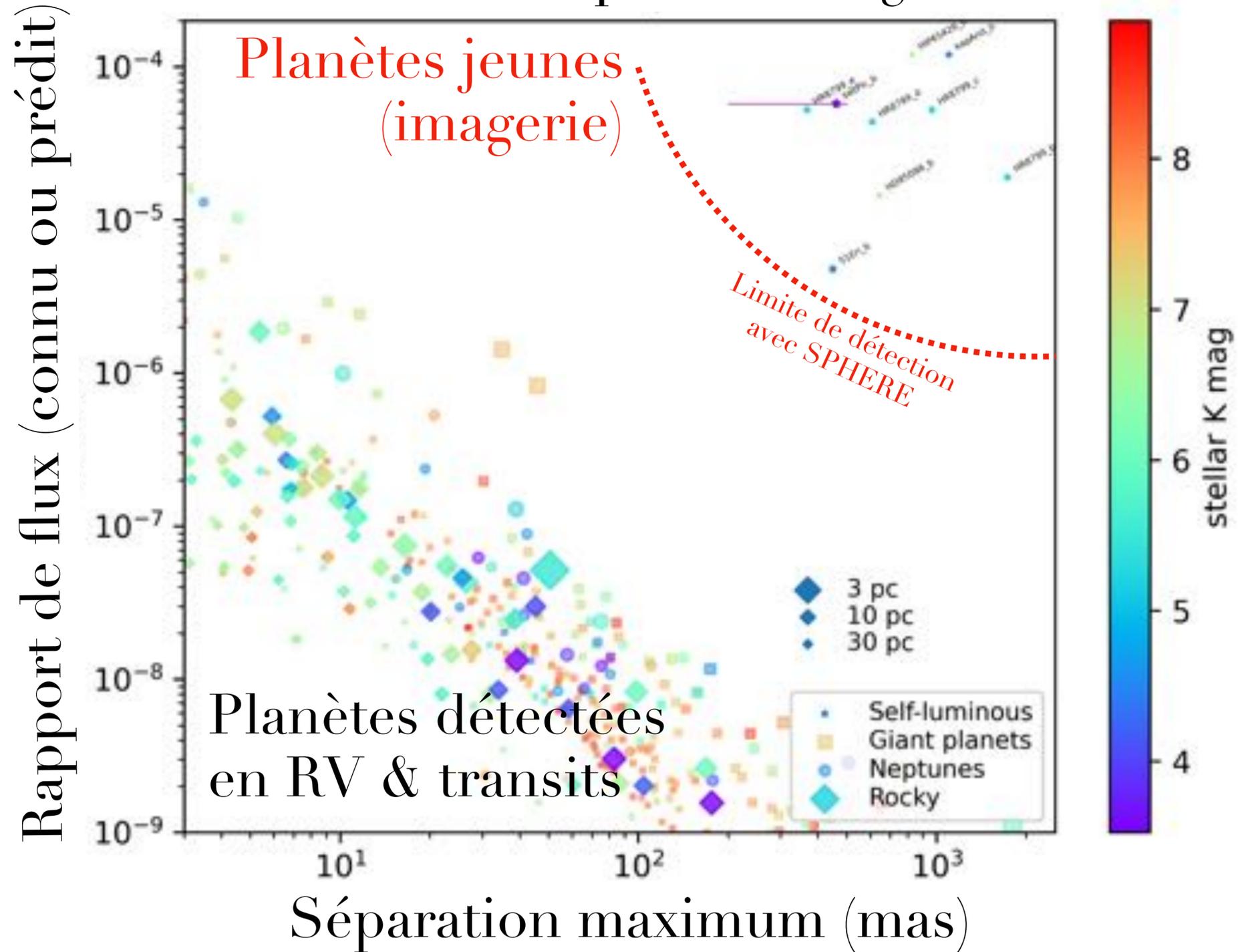


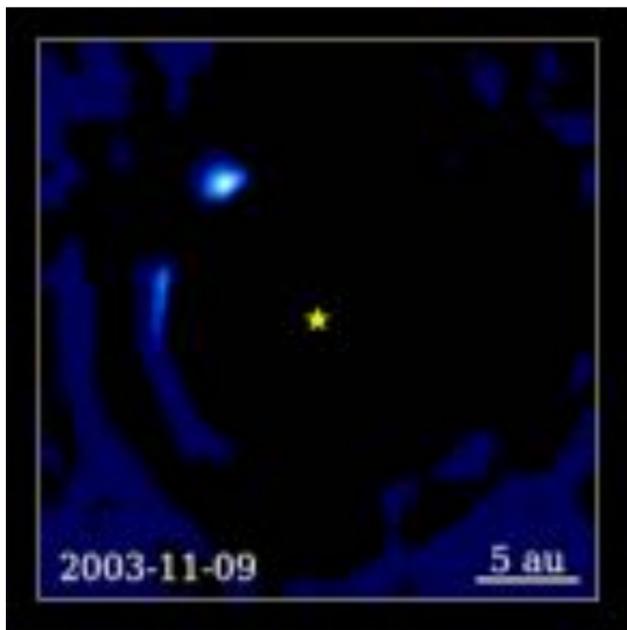
Absorption par l'atmosphère terrestre (simplifiée)

Dans le proche et moyen IR : des rapports de flux plus favorables pour les planètes jeunes

Adapté de Galicher & Mazoyer, 2023

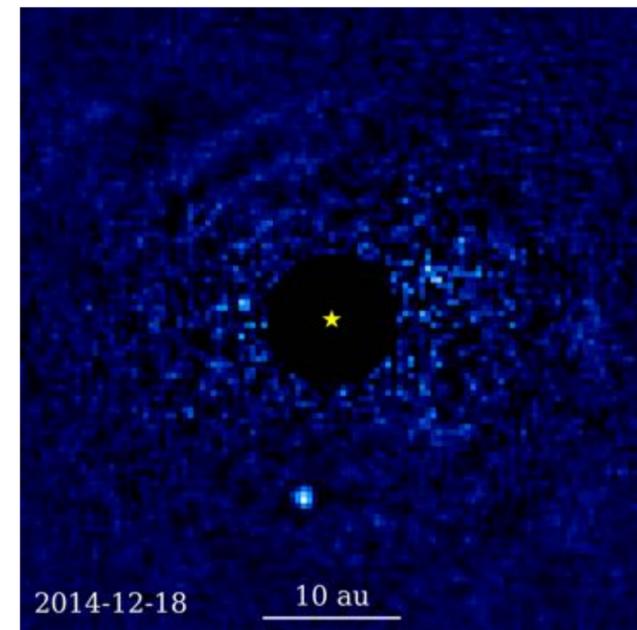
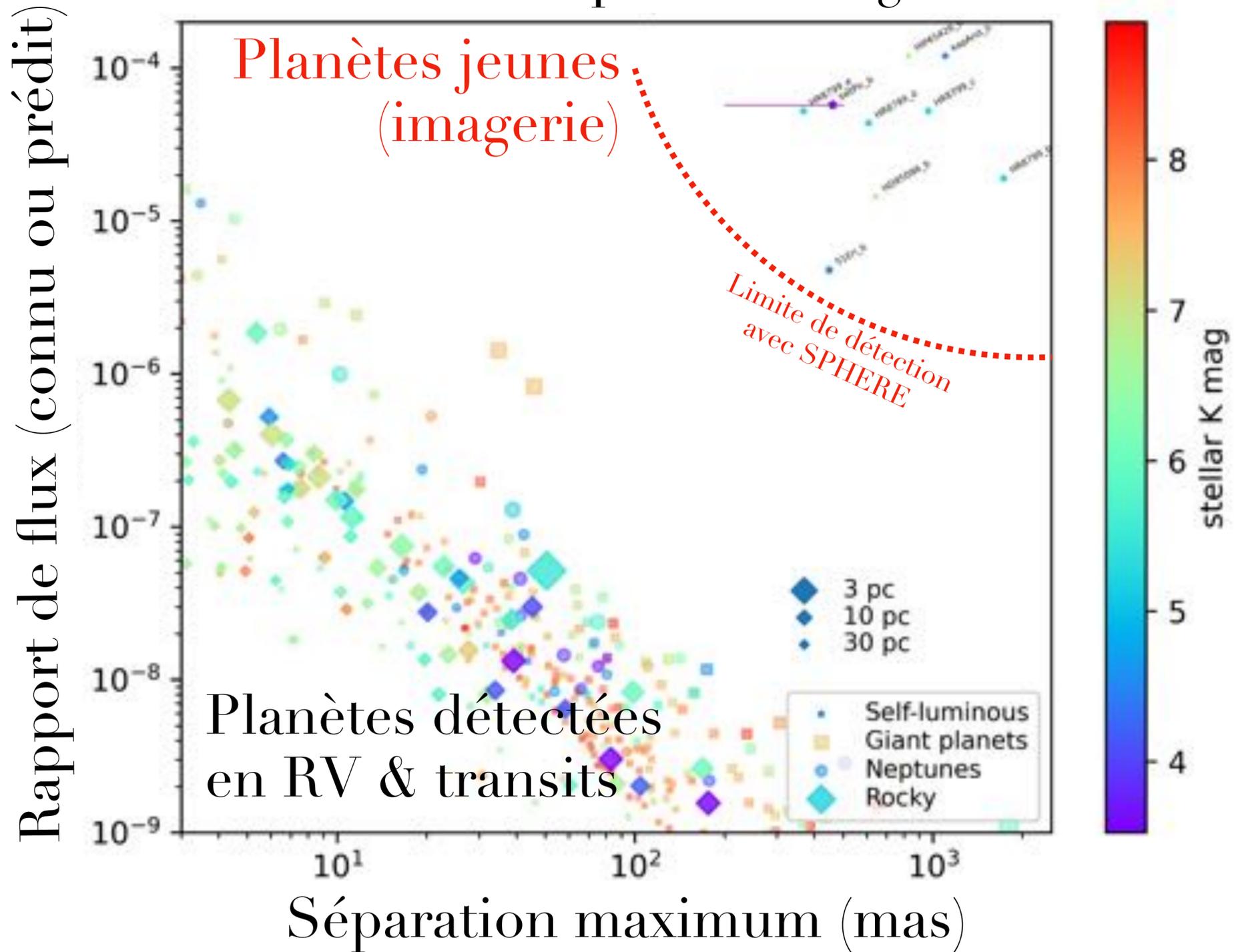
Contraintes observationnelles : flux relatif vs. séparation angulaire



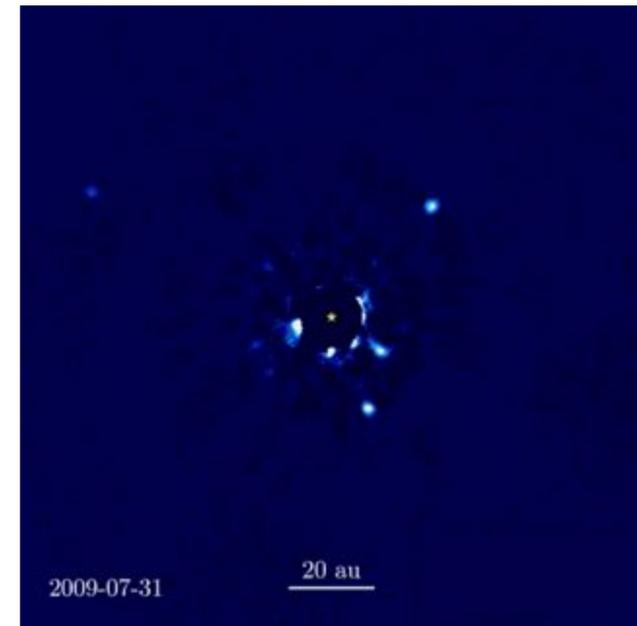


Beta Pictoris b

Contraintes observationnelles : flux relatif vs. séparation angulaire



51 Eri b



HR 8799 b,c,d,e

Centre galactique

A quoi ressemble le voisinage du centre galactique ?

Que peut-on dire sur le trou noir central ?

Que nous apprend tout ça sur la gravité ?

**On a besoin d'un pouvoir de résolution
inégalé pour répondre à ces questions !**

Distance à Sag A* $\sim 8200\text{pc}$; Séparation angulaire $\sim 5\text{mas}$ (précision $\sim 0.05\text{mas}!!!$)



Orbite de 100 AU

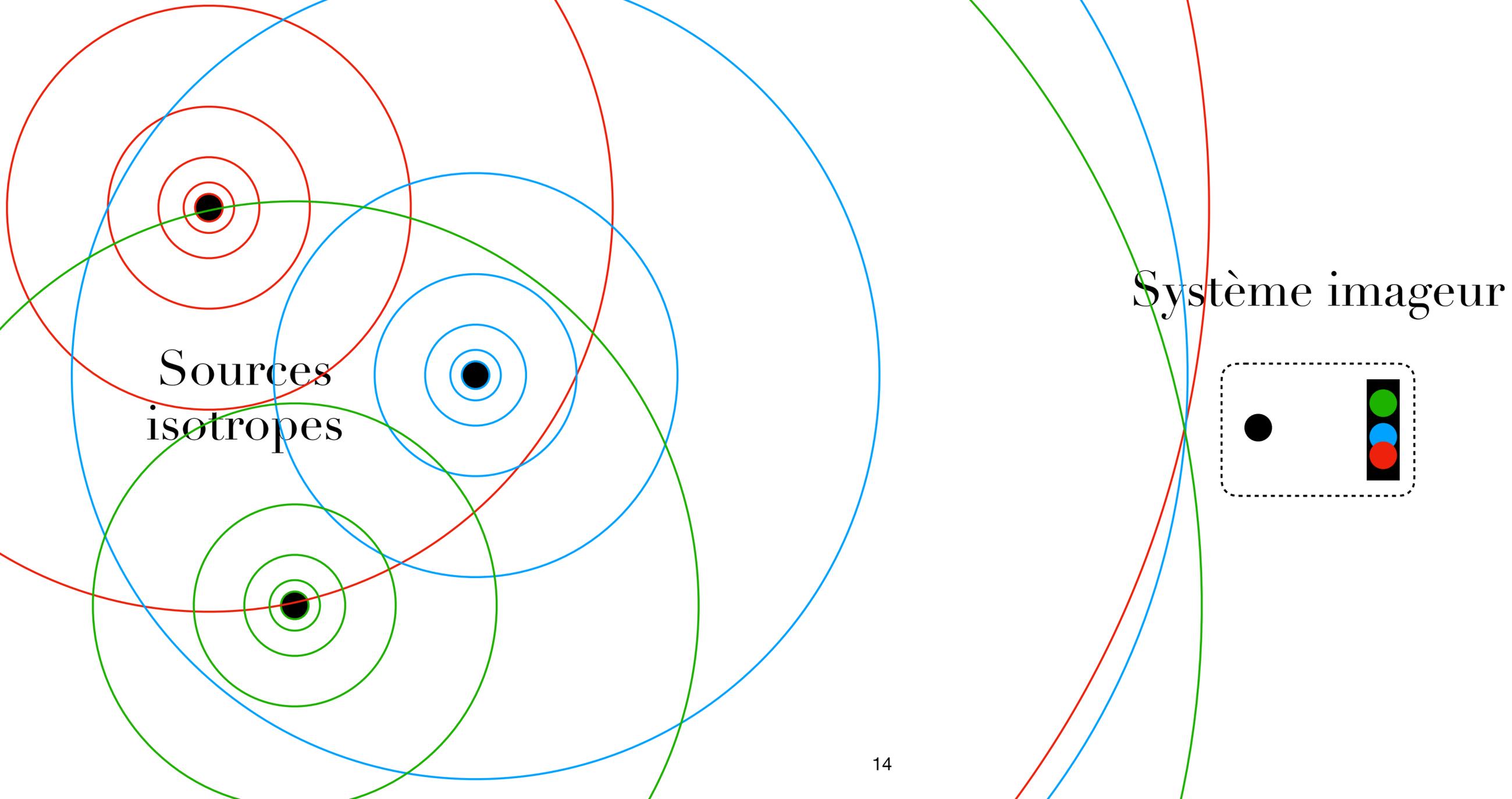


Credit: ESO/GRAVITY collaboration

II - Voir

Qu'est-ce qu'une image?

Une mesure de la distribution de signaux provenant de différentes sources



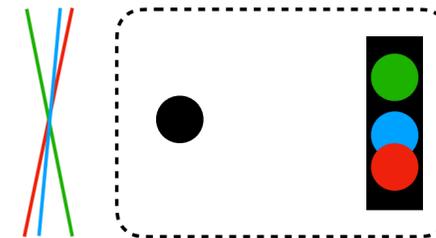
Qu'est-ce qu'une image?

Une mesure de la distribution de signaux provenant de différentes sources

Sources
isotropes



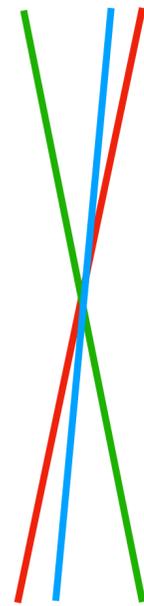
Systeme imageur



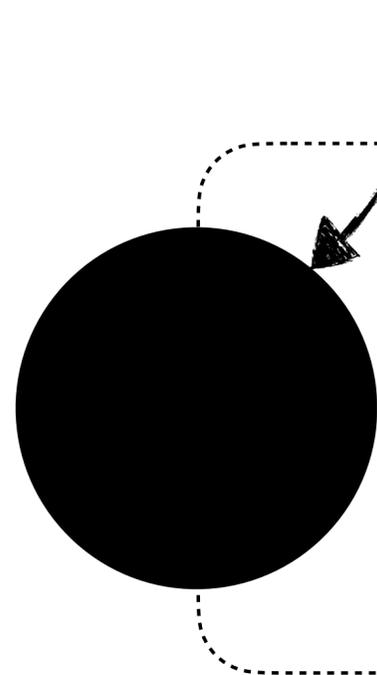
Qu'est-ce qu'un système imageur?

- 1 - Il sépare spatialement les signaux provenant de directions différentes
- 2 - Il encode ces signaux, par exemple sous forme d'un signal électrique, ou via un effet photochimique.

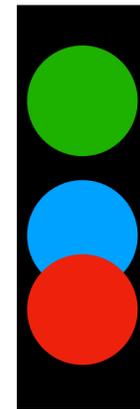
Ondes planes incidentes



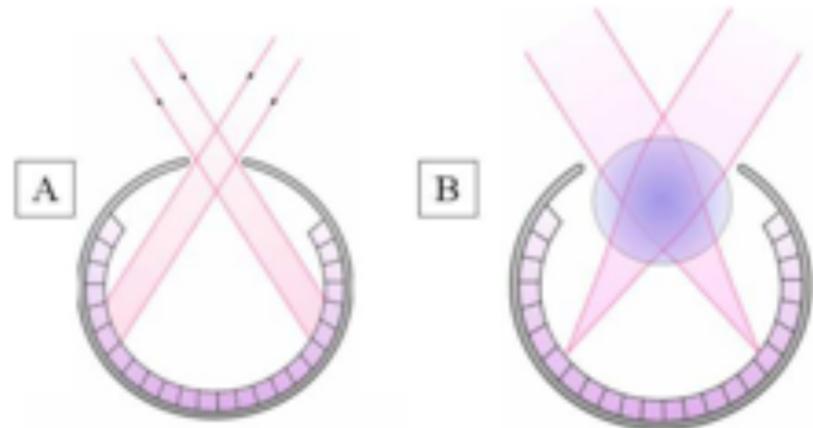
Séparateur



Encodeur



La vie trouve toujours un chemin

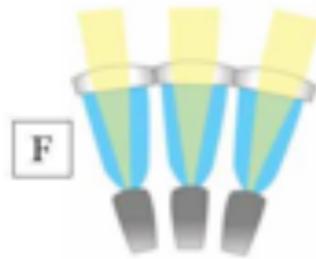


A: sténopé (larves & mollusques)

B: lentille sphérique (poissons)



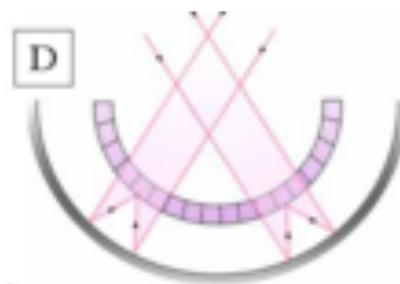
C: cornée (mammifères, oiseaux, araignées)



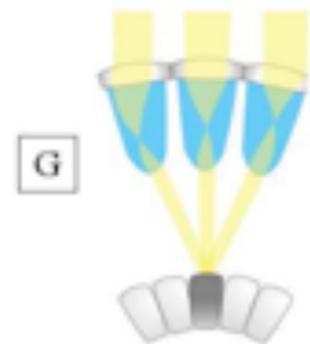
D: miroir (certains crustacés)



E: puit (palourdes, étoiles de mer, vers de terre)



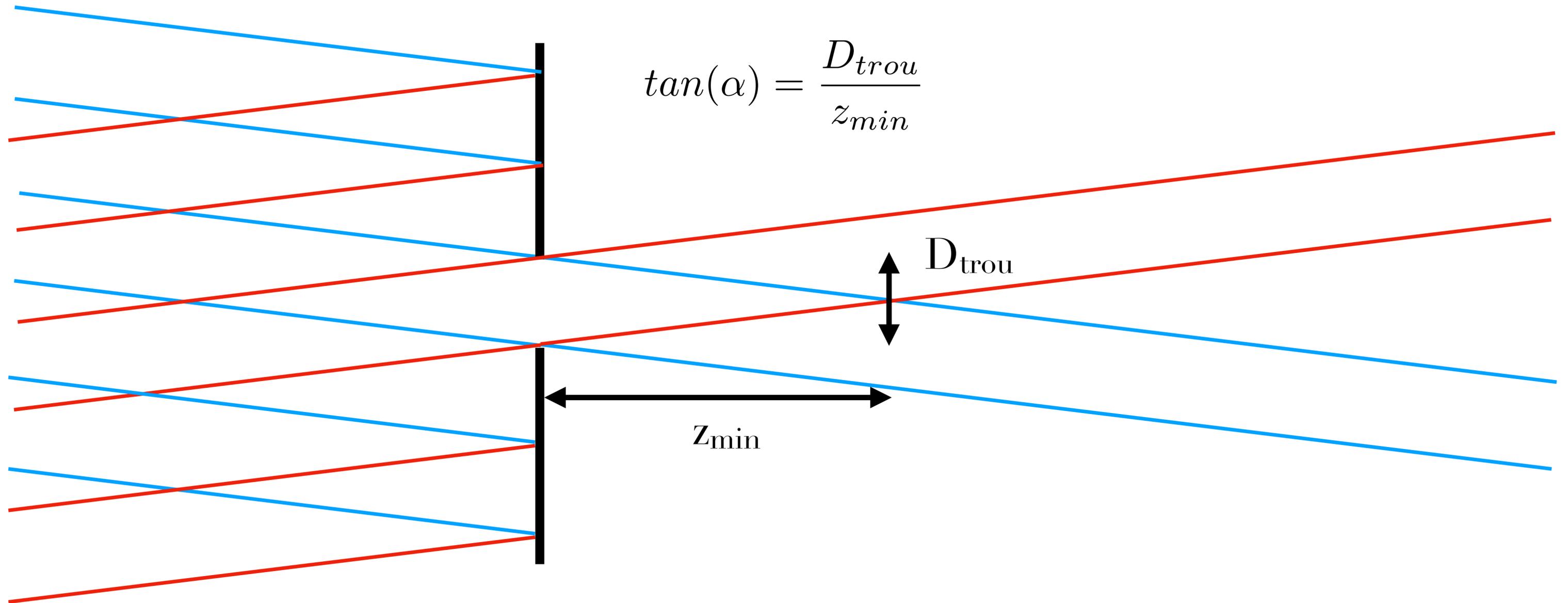
F,G,H: facettes (insectes, crustacés)



Variété d'architecture optiques dans le monde animal

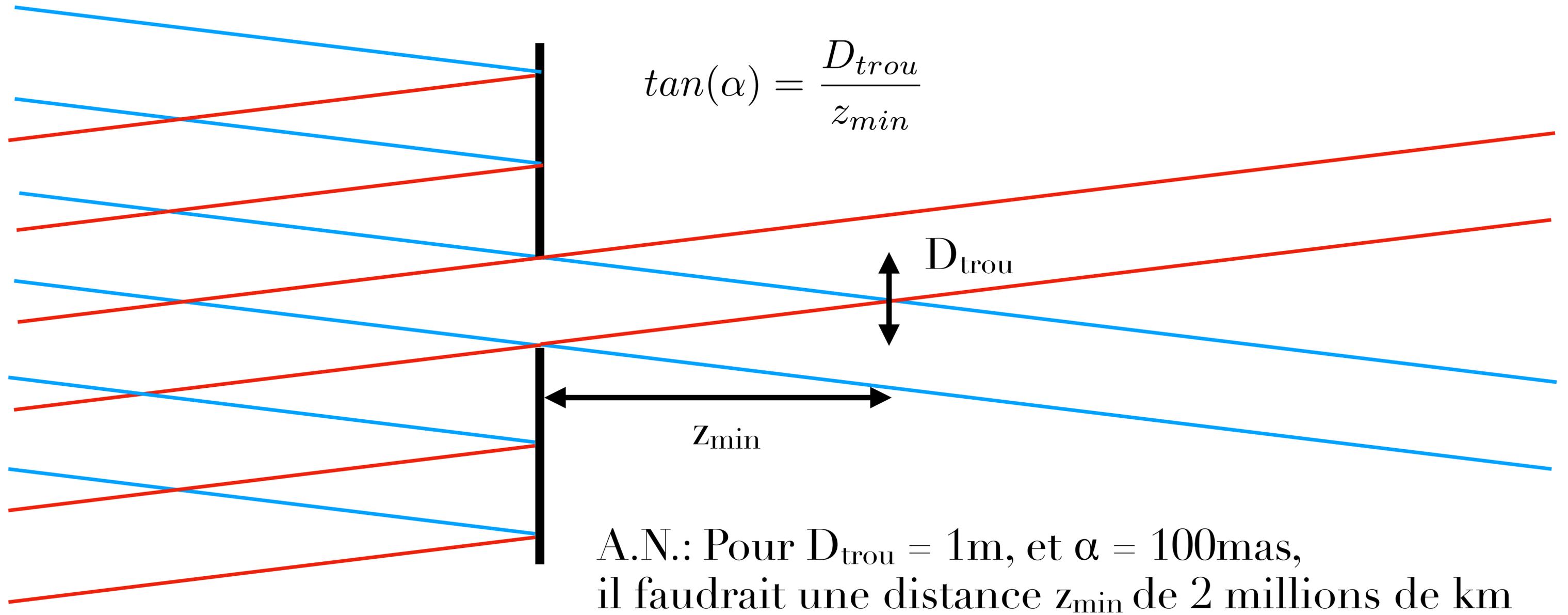
Extrait de la Thèse de Guillaume Druart 2010 (ONERA). « Nouvelles briques de conception de systèmes intégrés pour la vision infrarouge. D'une approche minimaliste à la caméra sur puce »

Sténopé : simple, et pas très pratique

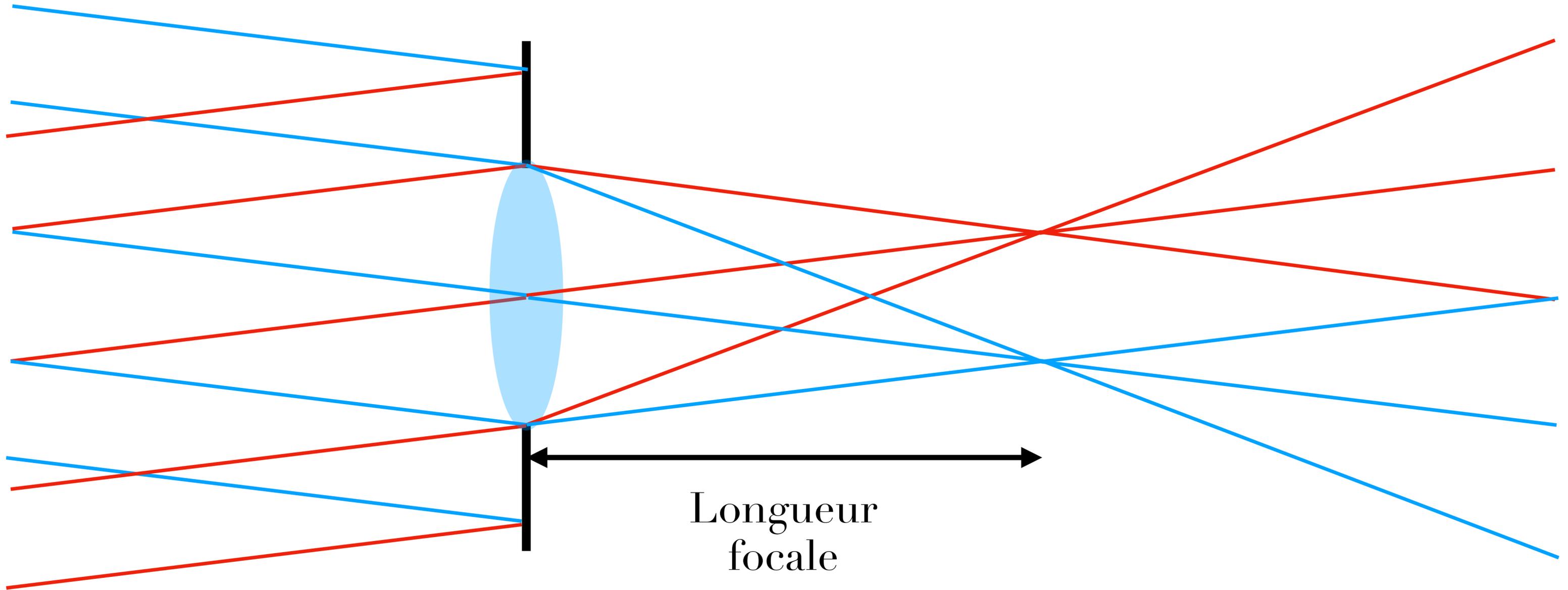


Pour réaliser une image, il faut filtrer spatialement les ondes incidentes

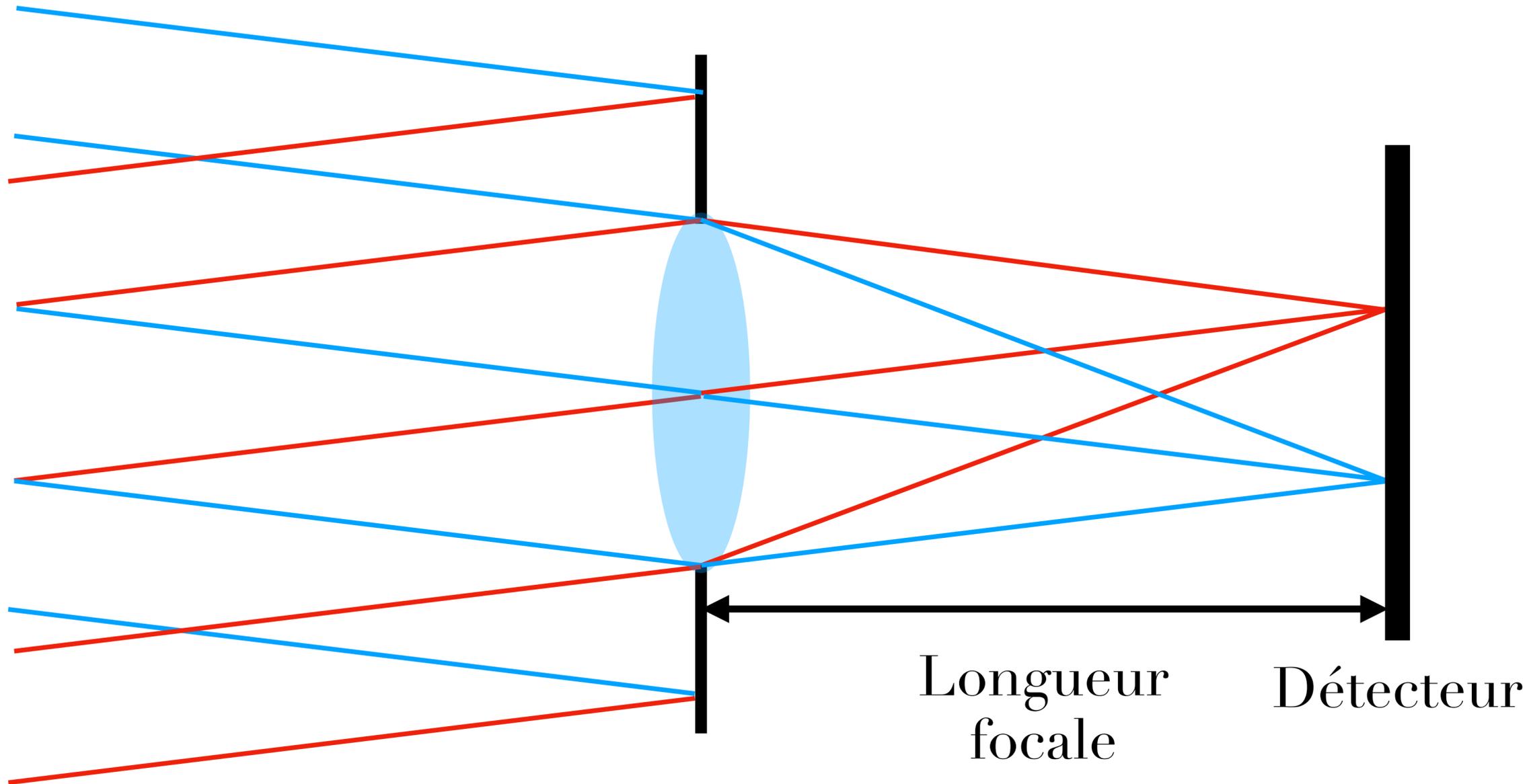
Sténopé : simple, et pas très pratique



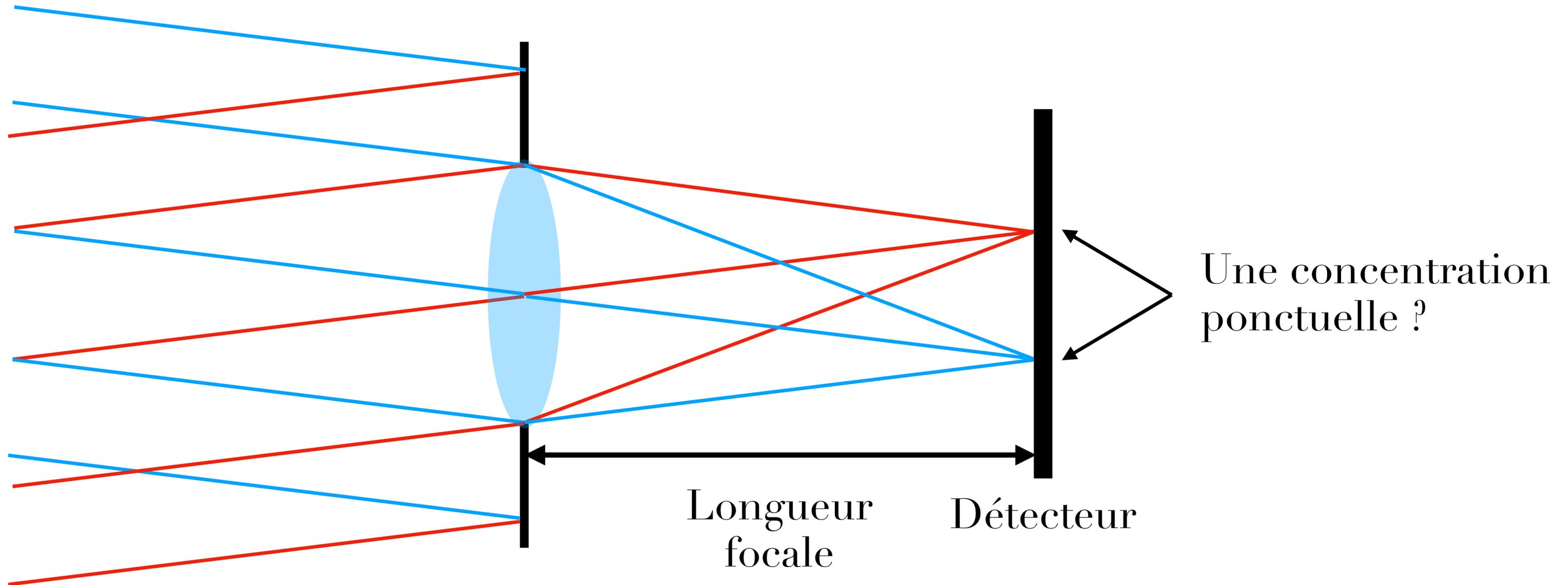
Avec une lentille, c'est déjà plus efficace



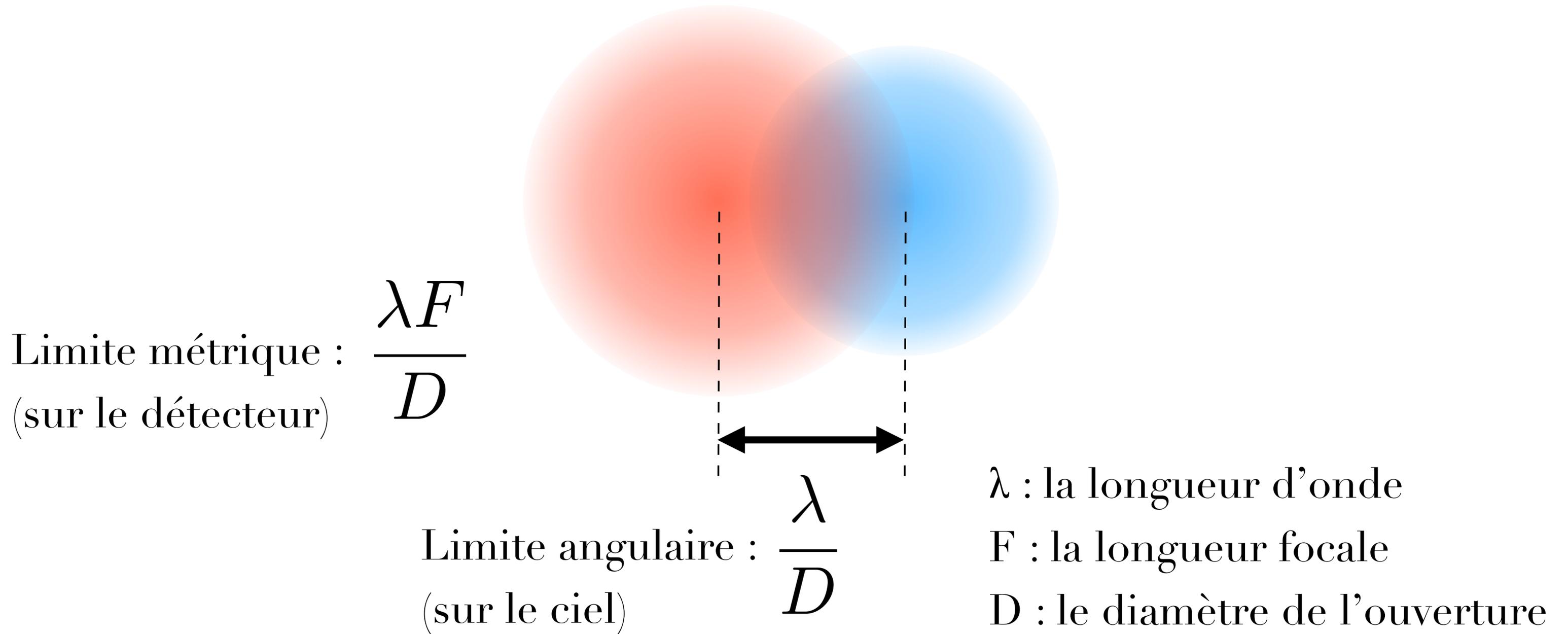
Avec une lentille, c'est déjà plus efficace



Avec une lentille, c'est déjà plus efficace



La limite de diffraction, ou critère de Rayleigh



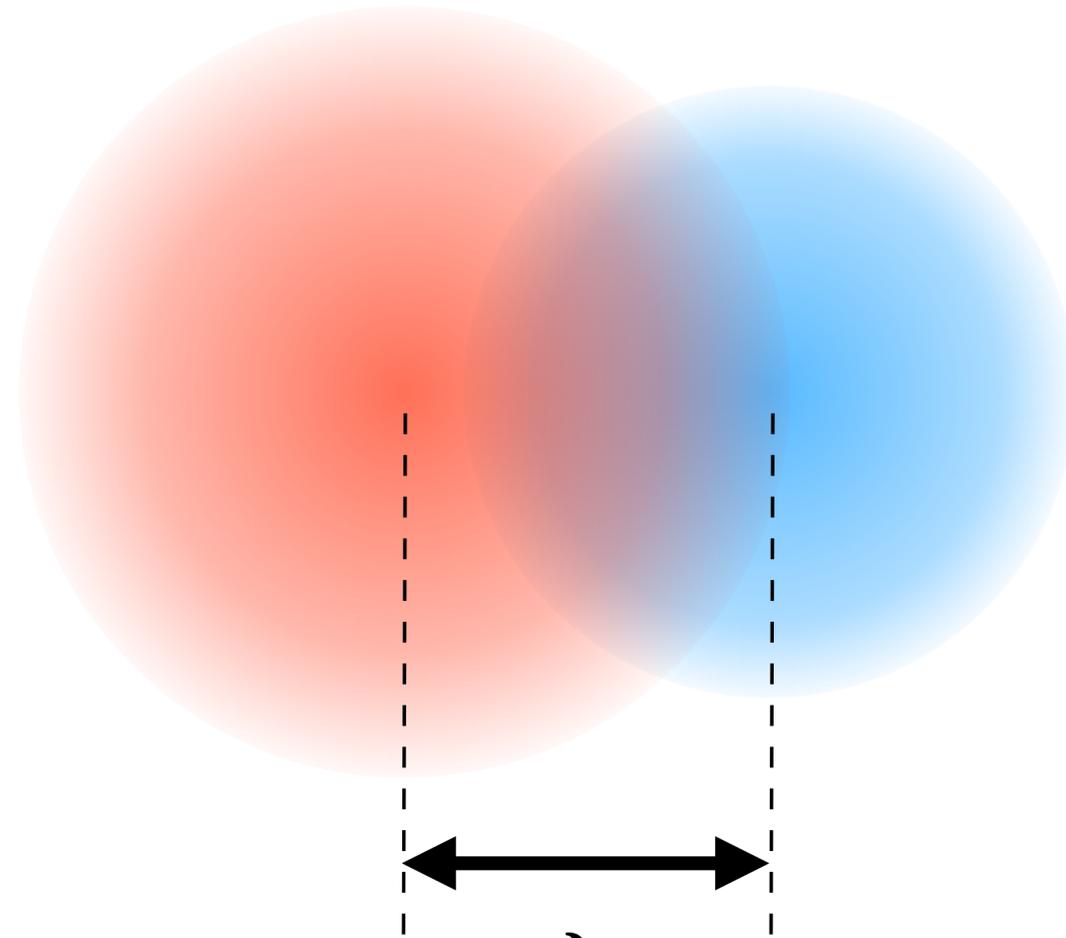
La limite de diffraction, ou critère de Rayleigh

A.N.

pour :

$$\lambda = 2\mu\text{m}$$

$$D = 8\text{m}$$



Limite angulaire : $\frac{\lambda}{D} \sim 50\text{mas}$

Attention !

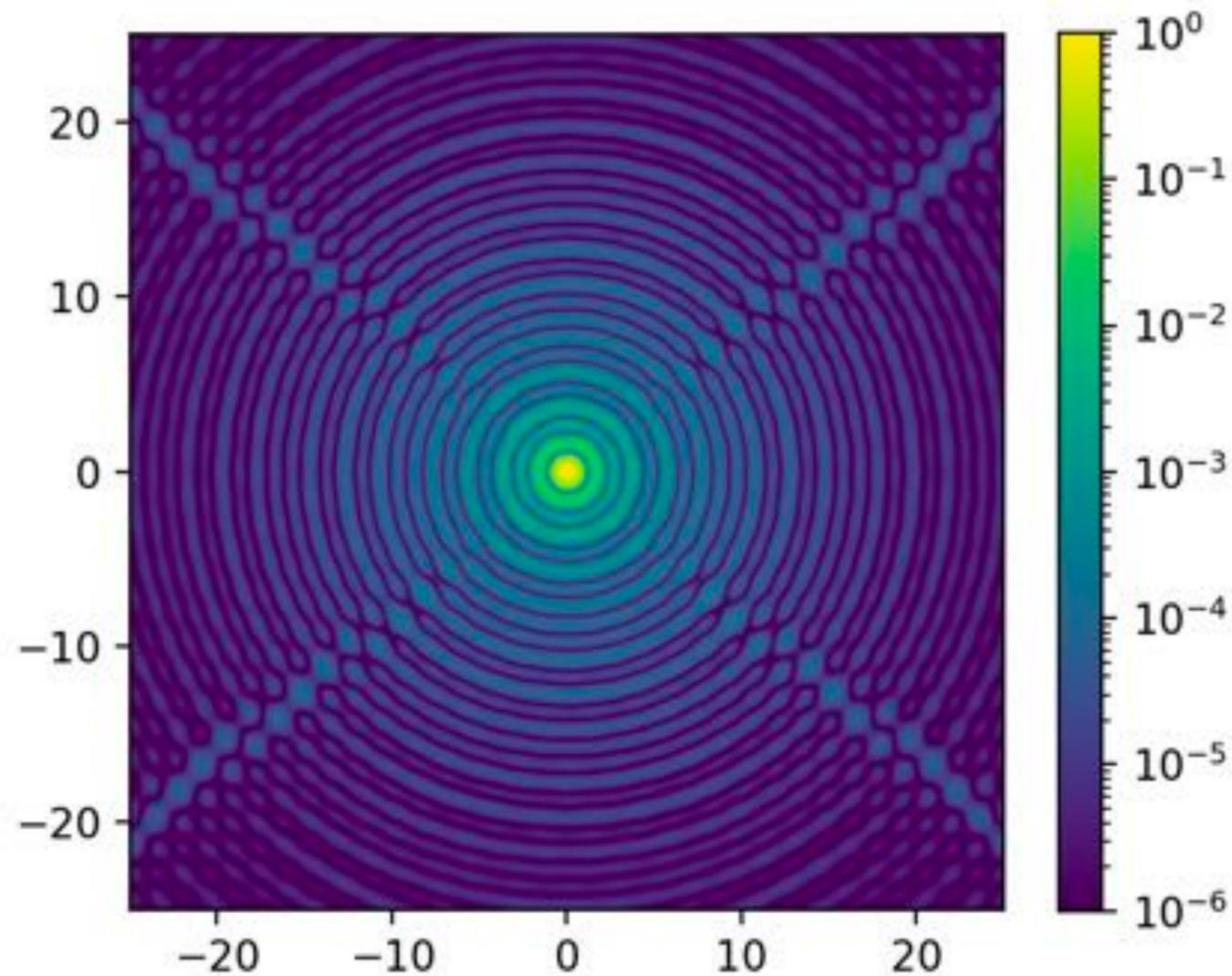
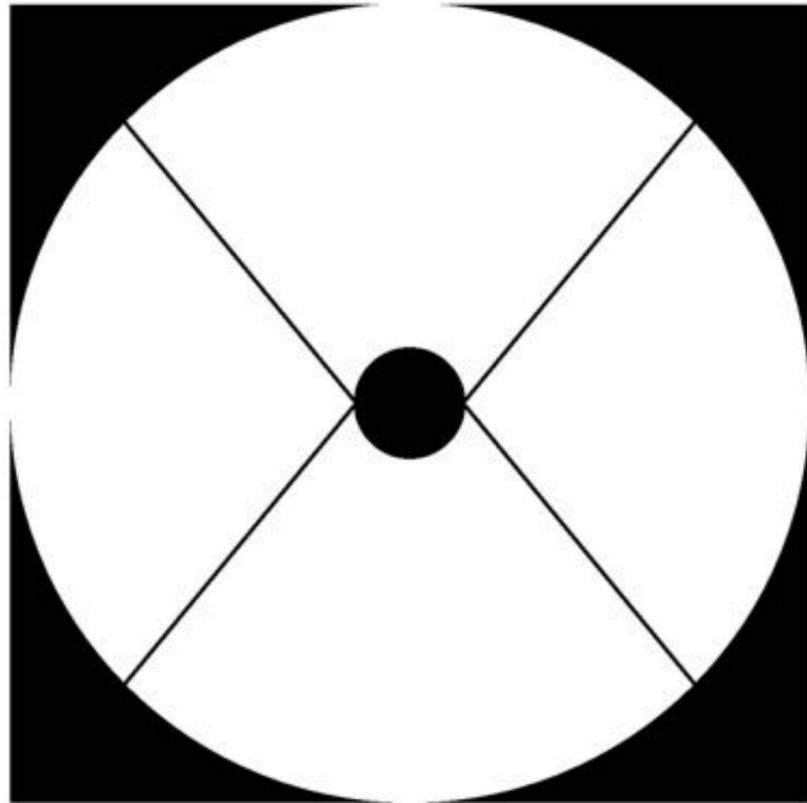
On parle ici de sources
de même intensité

La diffraction : un écho de l'ouverture

La figure de diffraction est la transformée de Fourier de l'ouverture

Image (axes en unités de λ/D)

Ouverture

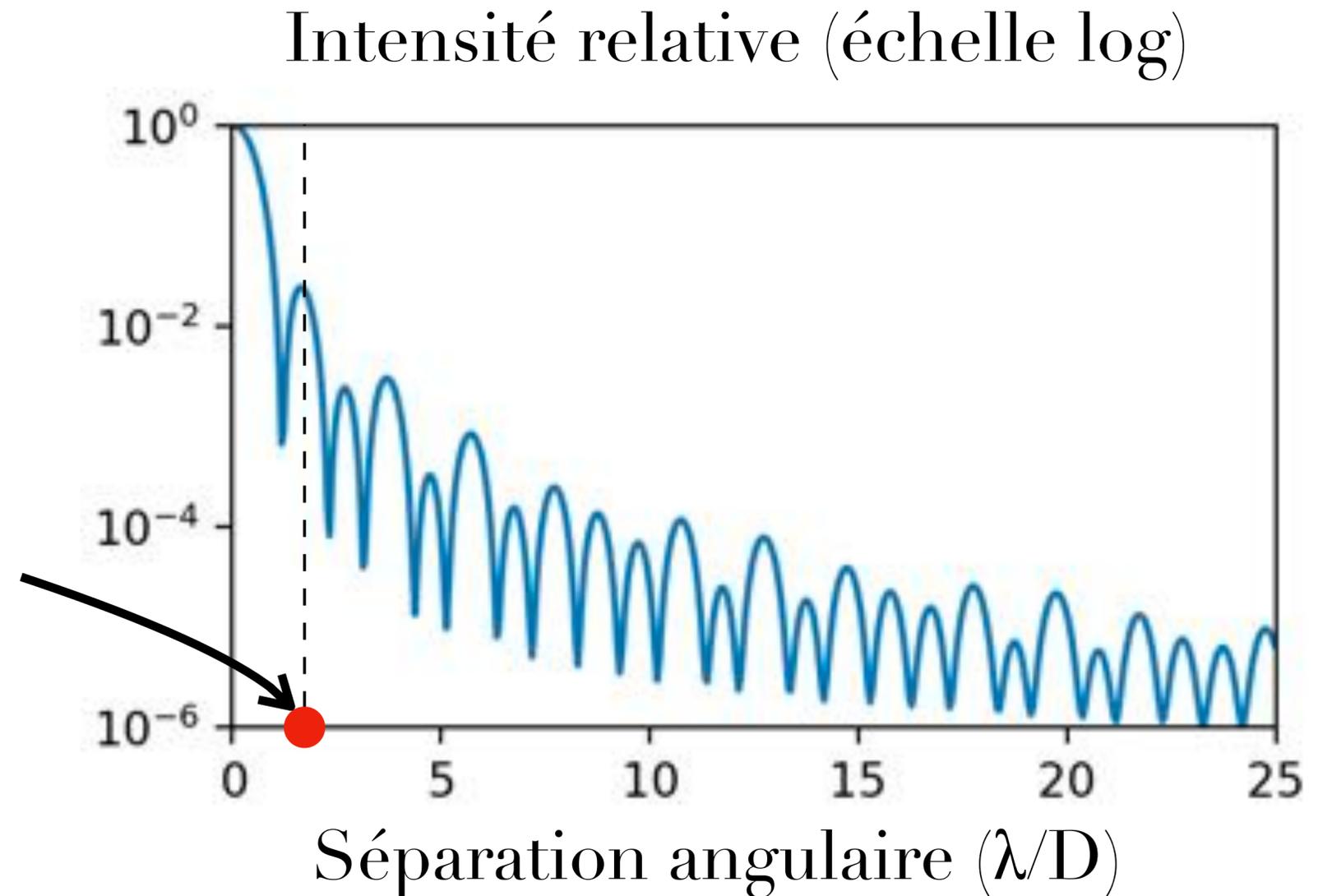


Affichage logarithmique

La lumière diffractée s'étend à l'infini !

La diffraction : un écho de l'ouverture

Planète située à 1UA d'une étoile à 10pc : 0.1" de séparation, équivalente à $2\lambda/D$ (pour $\lambda=2\mu\text{m}$ et $D=8\text{m}$)
=> 10000x plus de lumière de l'étoile que d'une planète jeune !

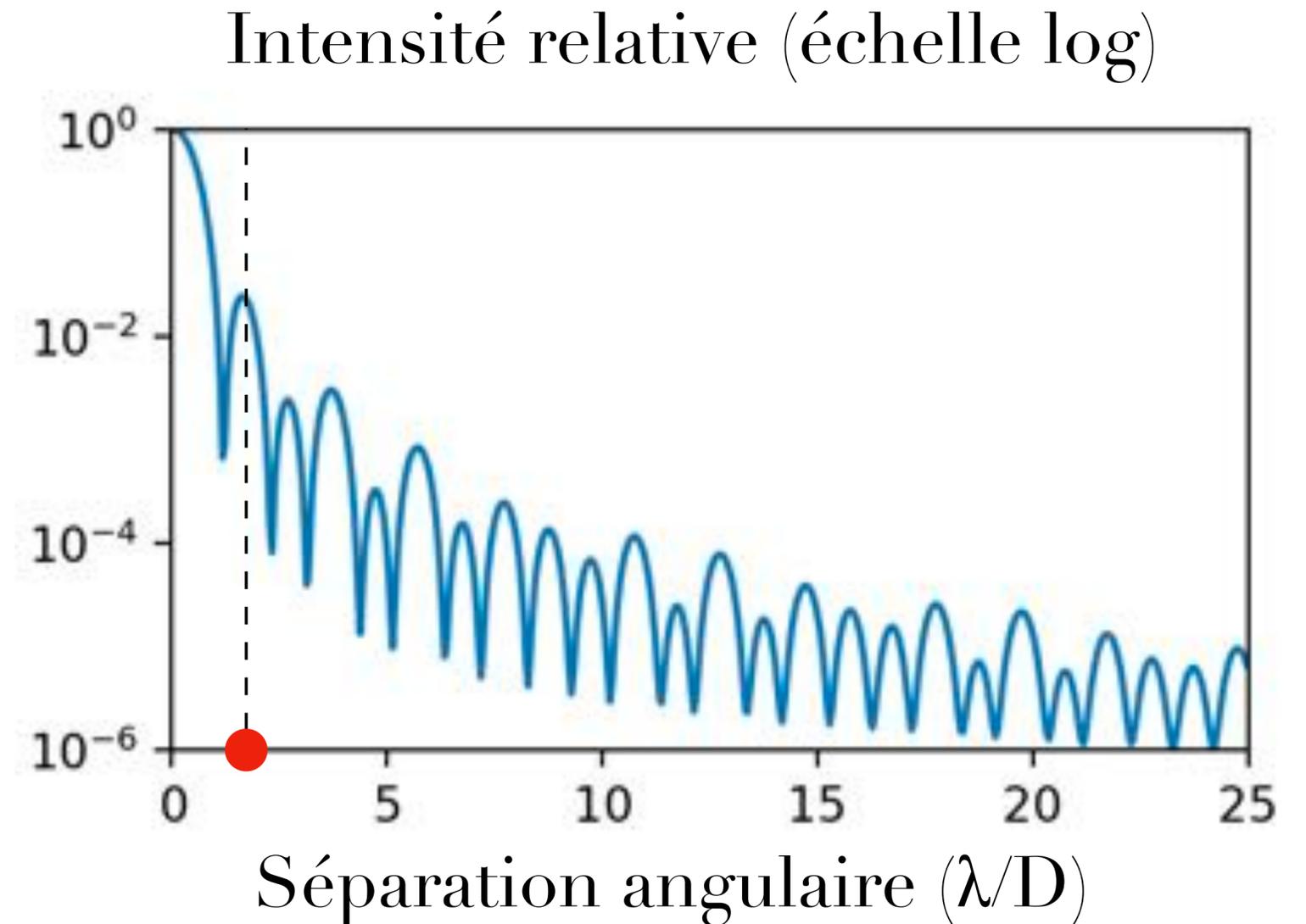


La diffraction : un écho de l'ouverture

$$SNR_P = \sqrt{N_P * T_{exp}} \quad \frac{SNR_P}{SNR_{P|S}} = \sqrt{\frac{N_S}{N_P}}$$
$$SNR_{P|S} = \frac{N_P * T_{exp}}{\sqrt{N_S * T_{exp}}}$$

(N_S est le nombre de photons de l'étoile là où se trouve la planète)

Le SNR de cette planète est réduit d'un facteur 100 ! (par rapport au cas sans étoile, et en supposant uniquement du bruit de photons)

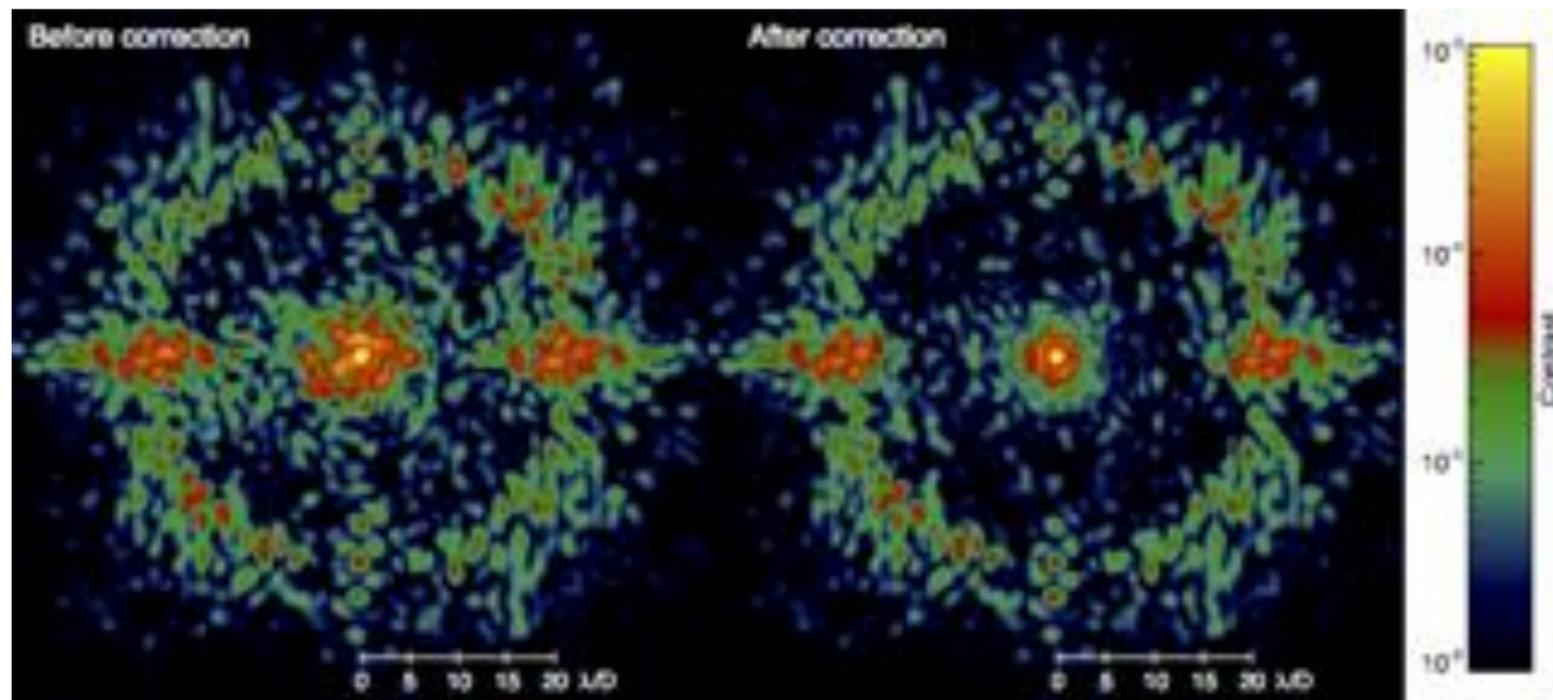


III - Plus près, toujours plus près

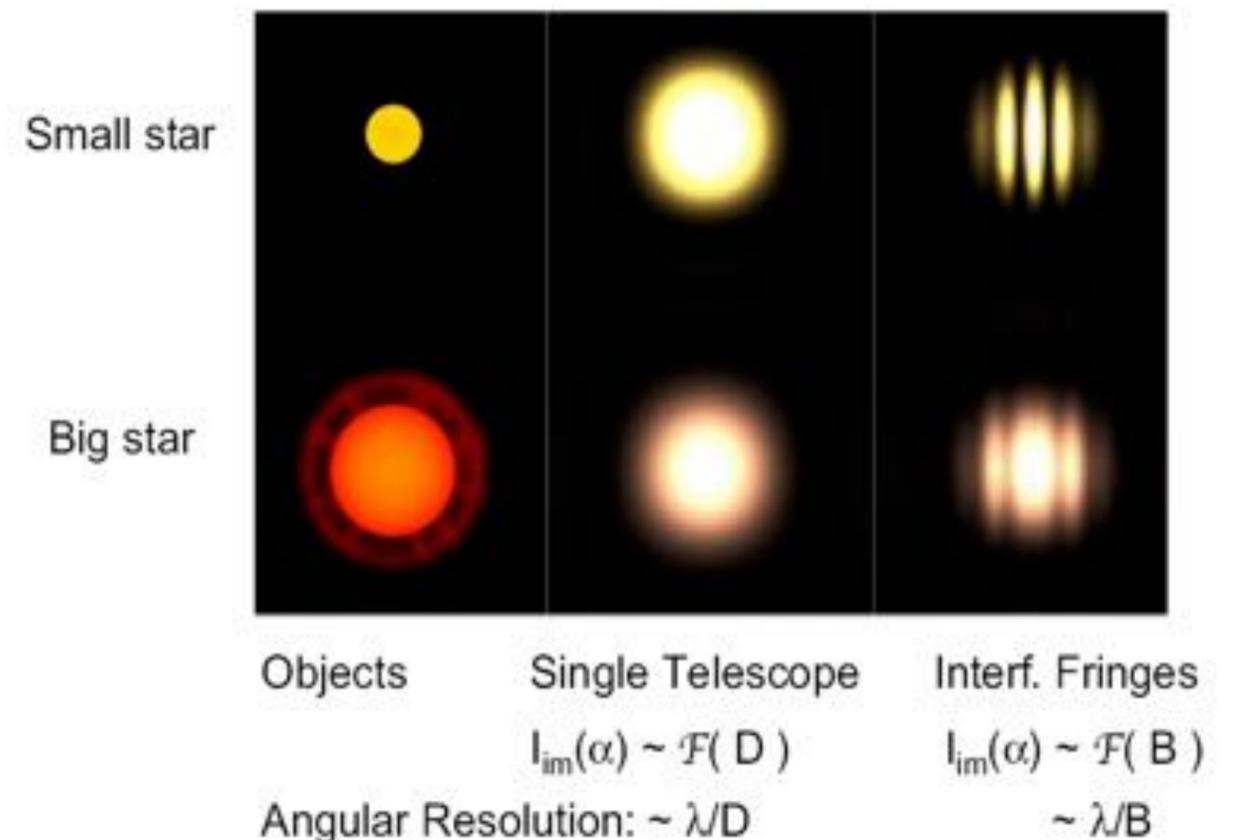
Deux techniques pour aller plus près

1. **Coronographie** : pour atténuer l'intensité de la lumière diffractée là où l'on cherche des planètes
2. **Interférométrie** : pour accéder à une résolution angulaire plus fine en combinant plusieurs télescopes

Coronographe de VLT/SPHERE (Vigan et al.)



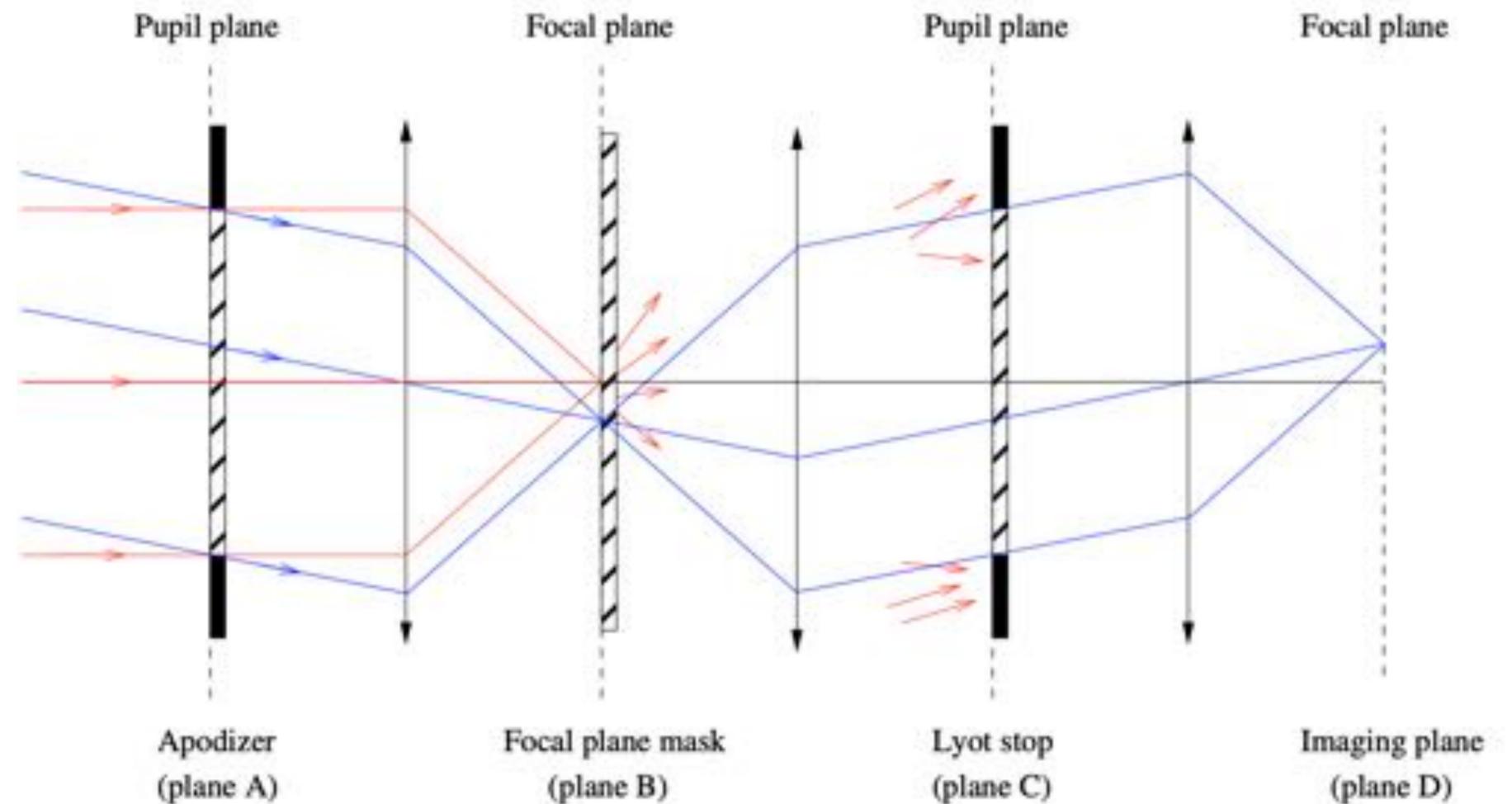
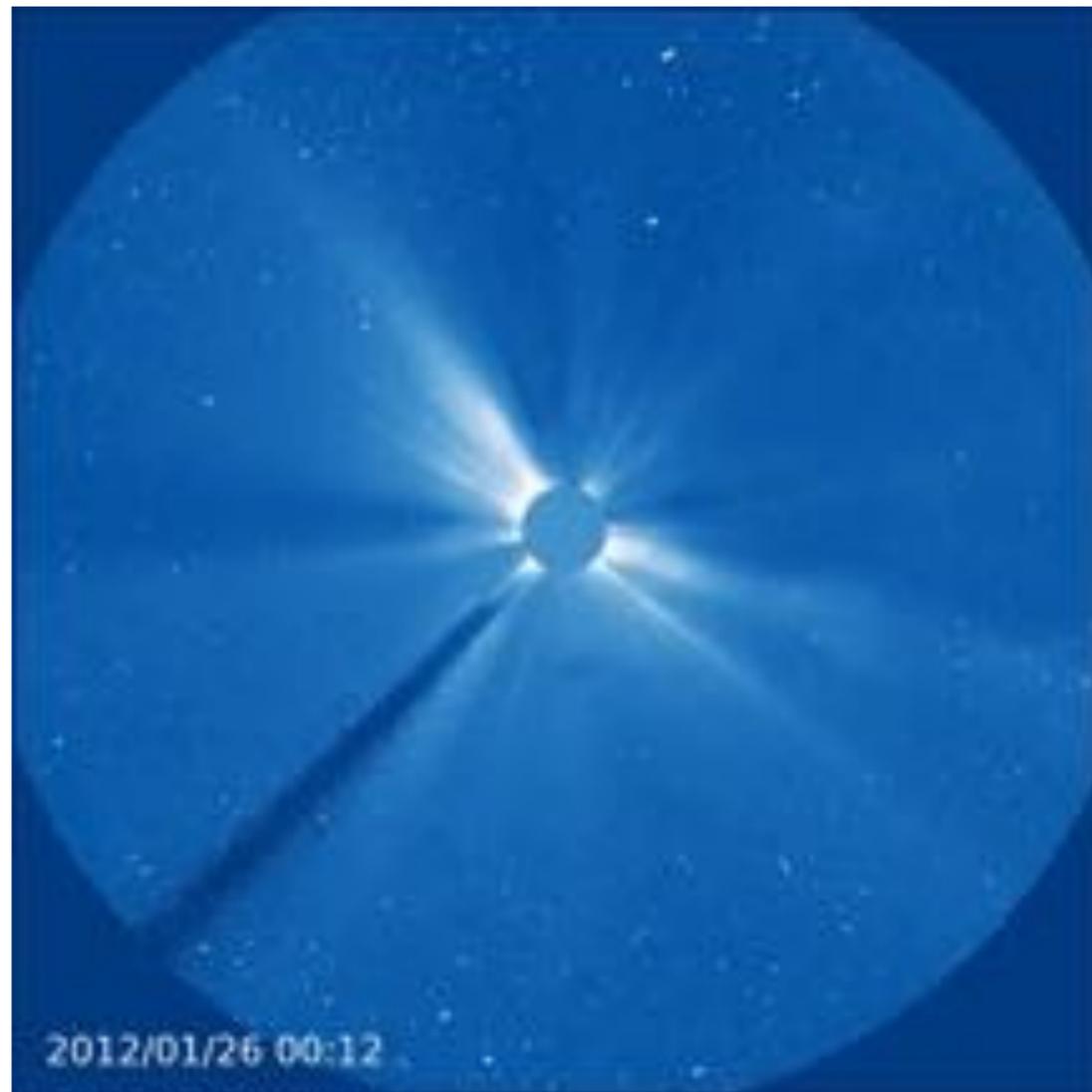
Principe de l'interférométrie (ESO)



Atténuation de l'étoile par coronographie

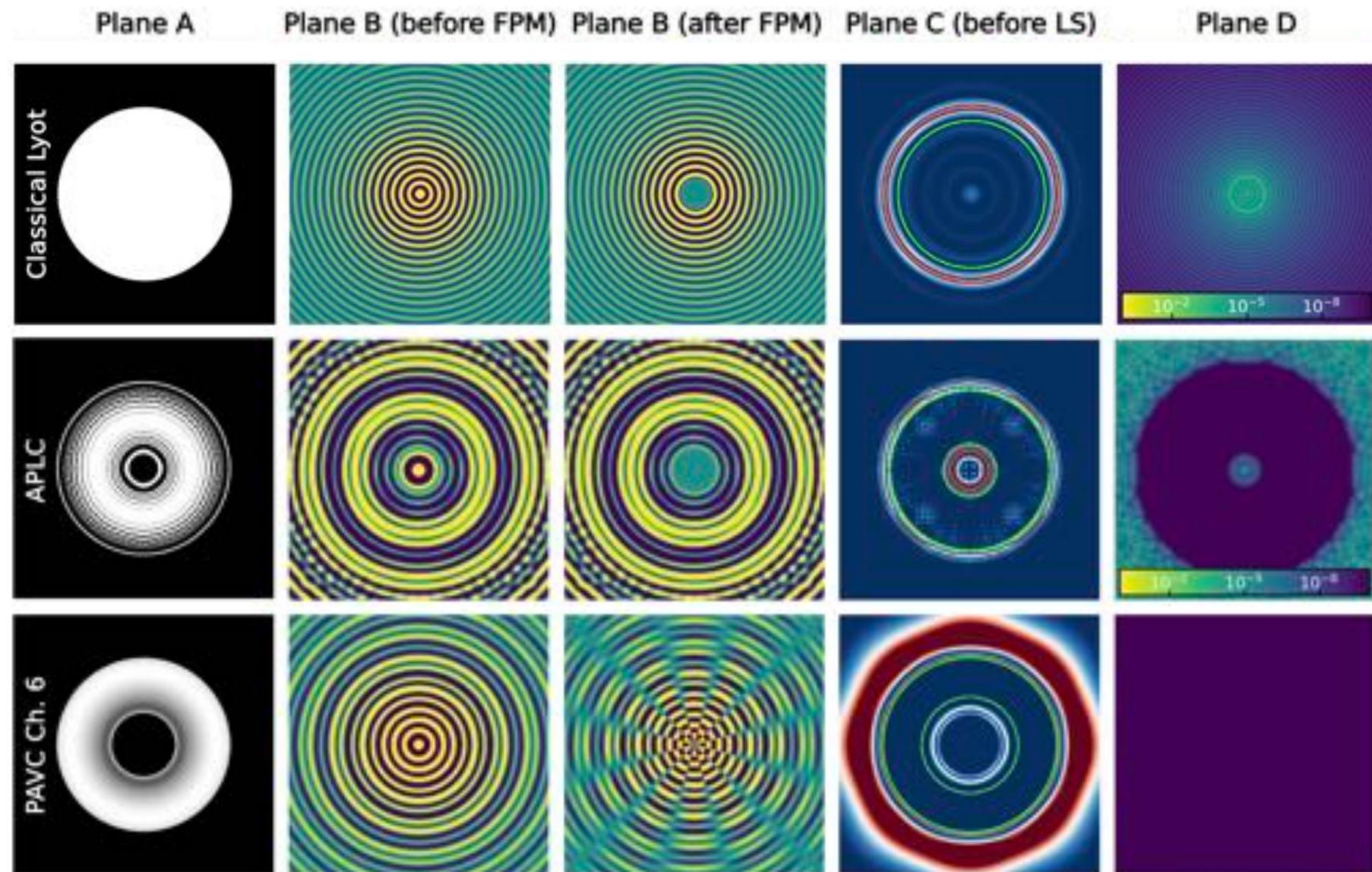
Une technique développée en 1932 pour observer la **couronne solaire**

Données SOHO (ESA/NASA) Principe du coronographe de Lyot



Atténuation de l'étoile par coronagraphie

De nombreux développements pour les exoplanètes depuis 25ans



Coronographe de Lyot originel

Coronographe de Lyot apodisé

Coronographe vortex apodisé
(masque pupille et masque de phase en plan focal)

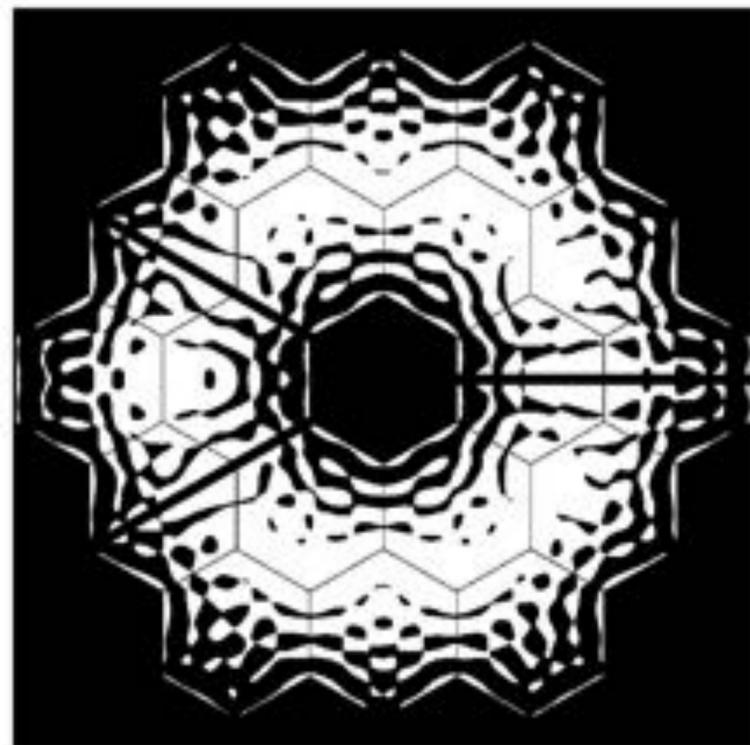
Adapté de Galicher & Mazoyer, 2023

Atténuation de l'étoile par coronographie

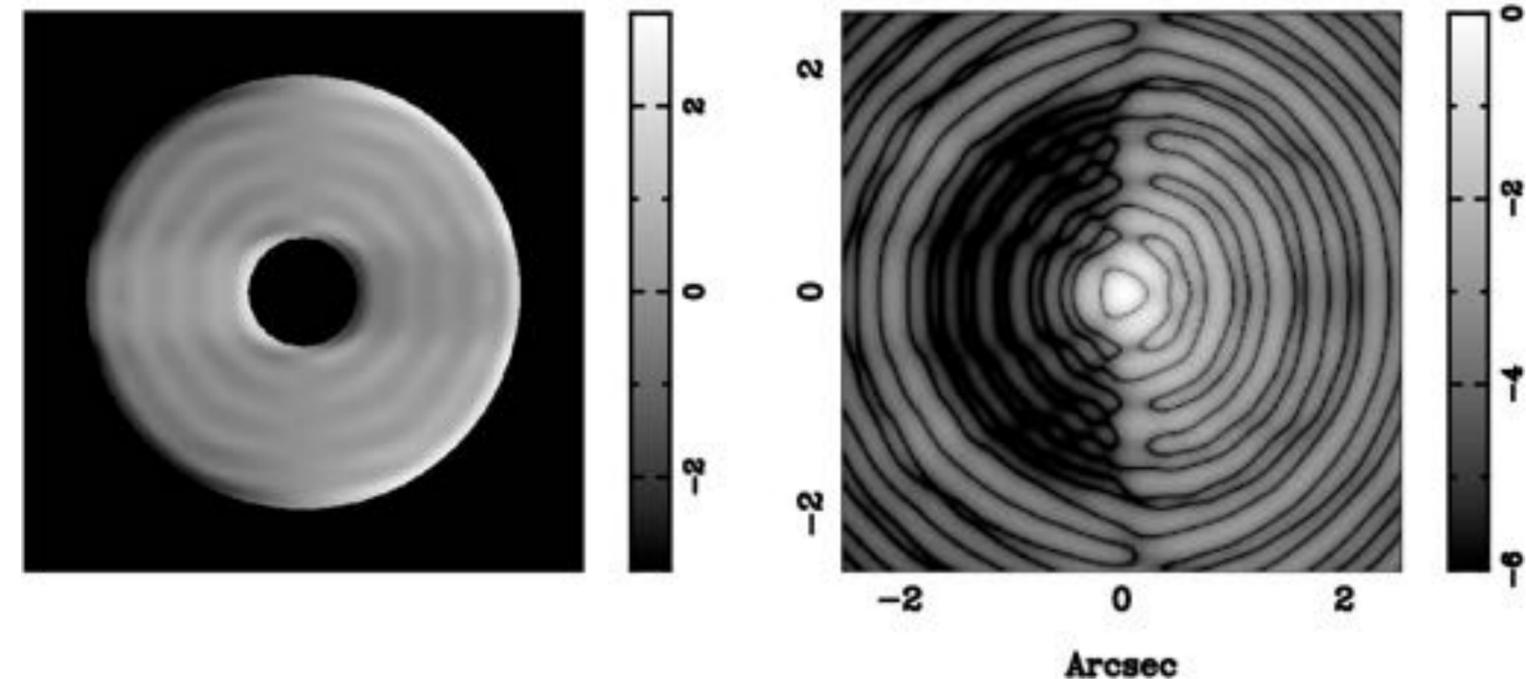
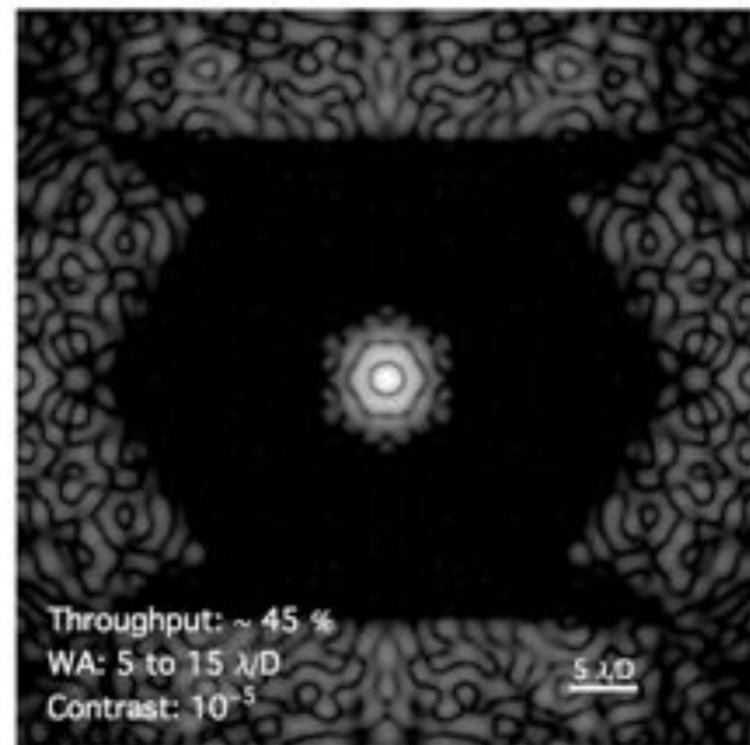
Des alternatives apparentées reposant principalement sur l'apodisation

Soit en jouant sur l'amplitude : zone 'haut-contraste' circumstellaire

Soit en jouant sur la phase : plus transmissif, mais zone limitée à 1 seul côté



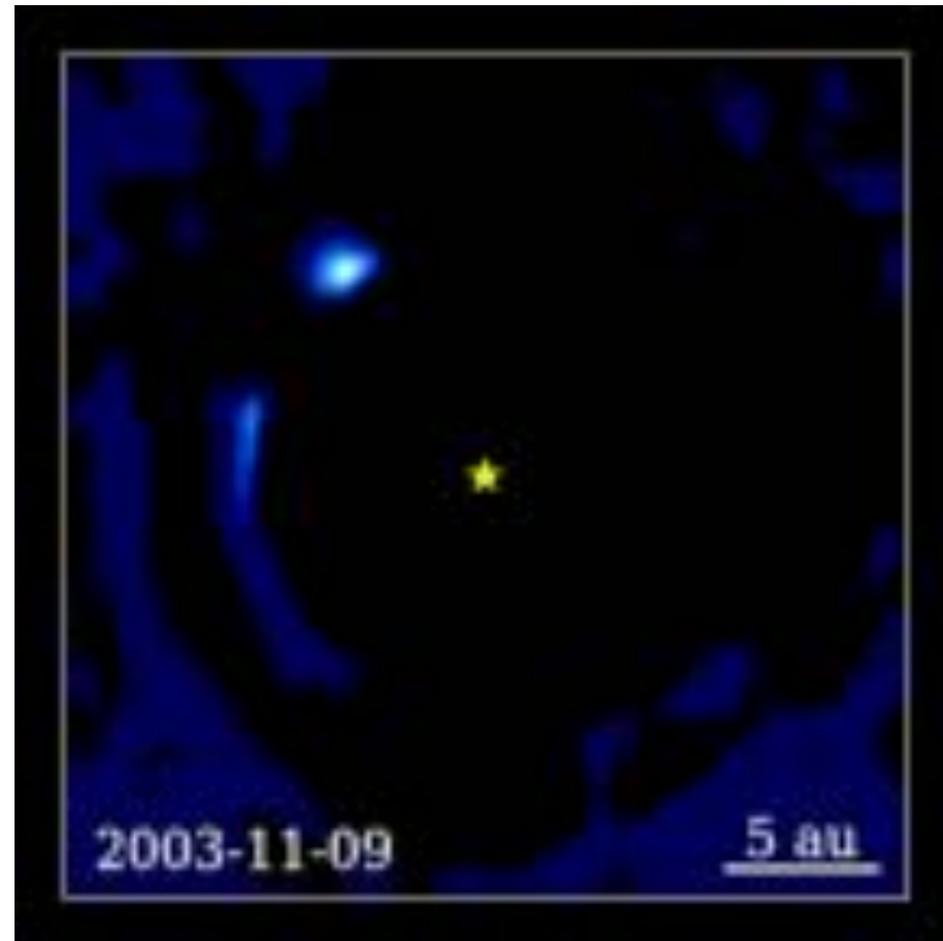
Carlotti et al. 2011



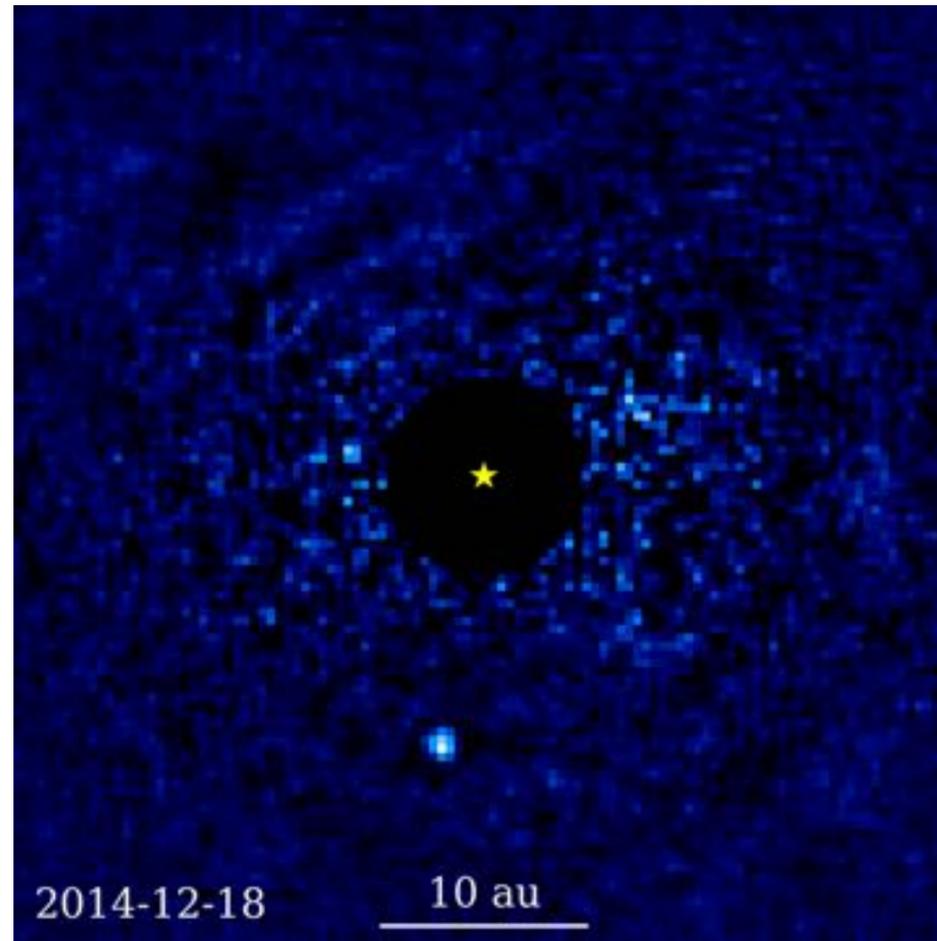
Kenworthy et al. 2007

Atténuation de l'étoile par coronagraphie

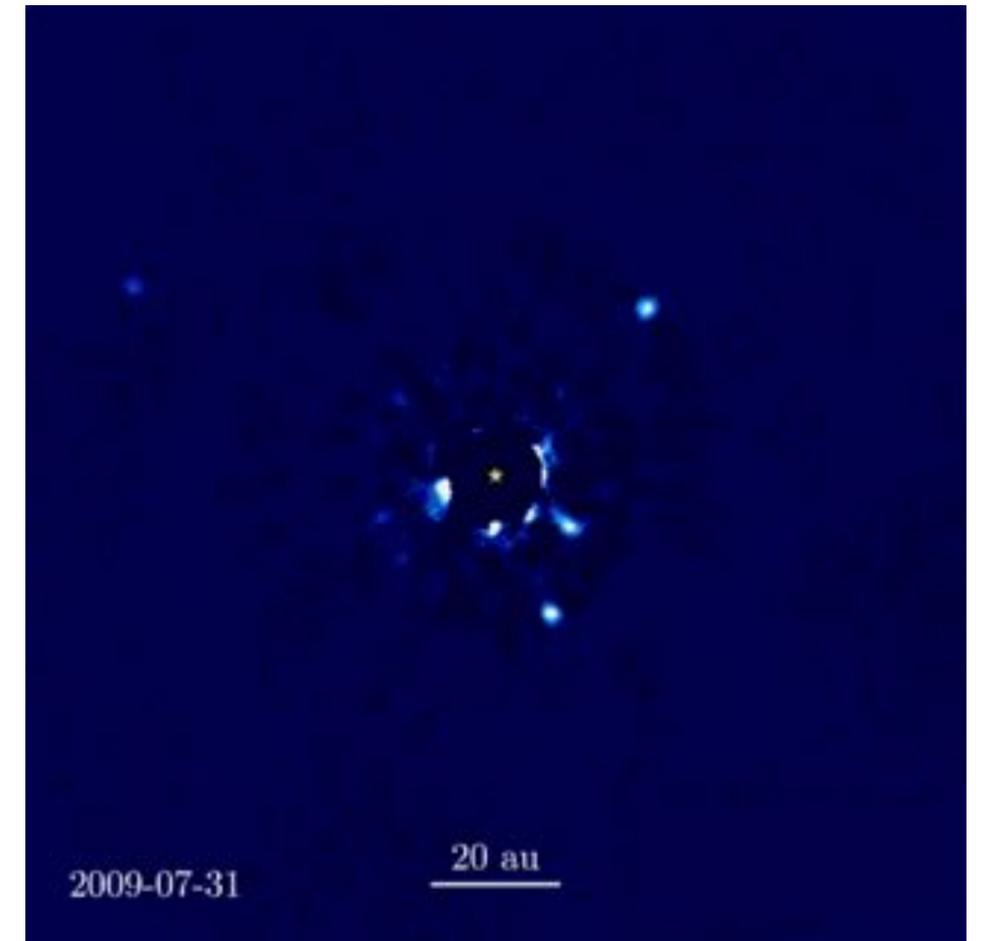
Beta Pictoris



51 Eri



HR 8799



Crédits : J. Wang (Northwestern U.)

Recombinaison interférométrique de N ouvertures

Mesurer la cohérence de l'onde en observant les franges d'interférence produites par la lumière de N télescopes

UN trou : diffraction

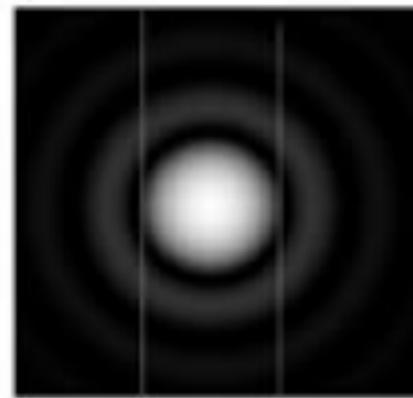
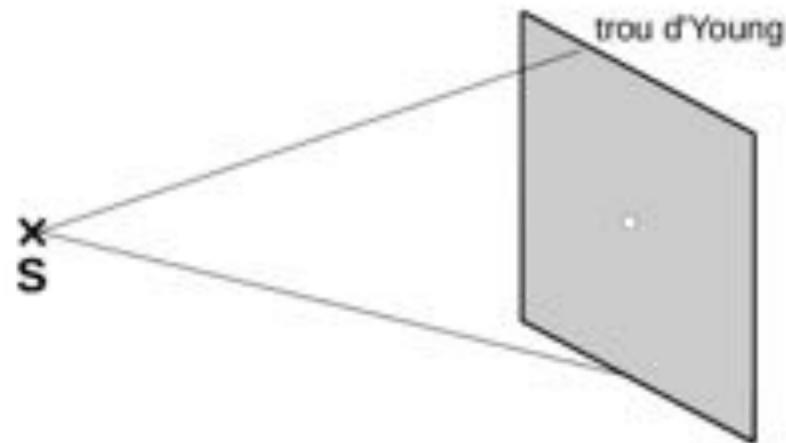
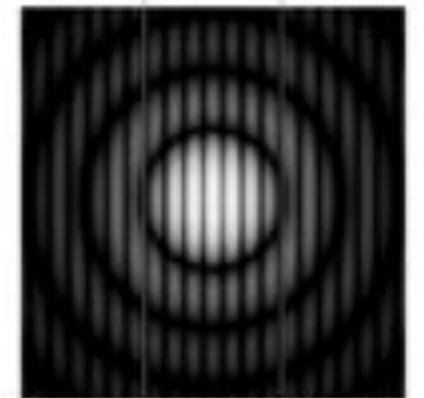
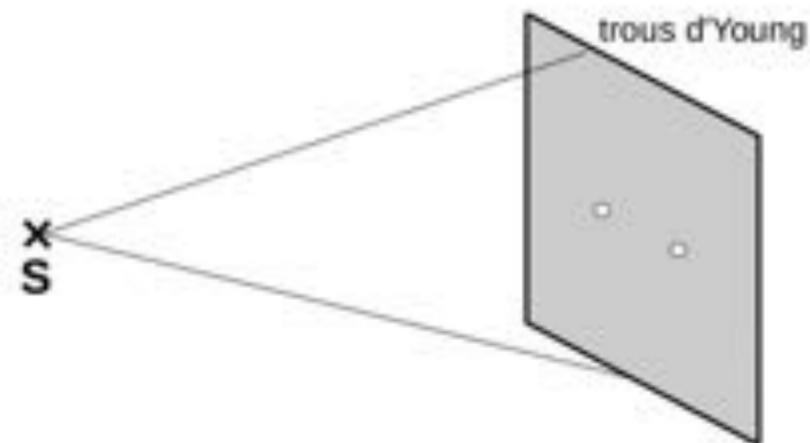


Figure de diffraction

DEUX trous : diffraction + interférences



Dans la figure de diffraction produite par un trou, on voit des interférences

Si les franges ne sont pas parfaitement contrastées, l'objet visé n'est pas ponctuel ! L'interprétation des franges permet alors de remonter à sa forme.

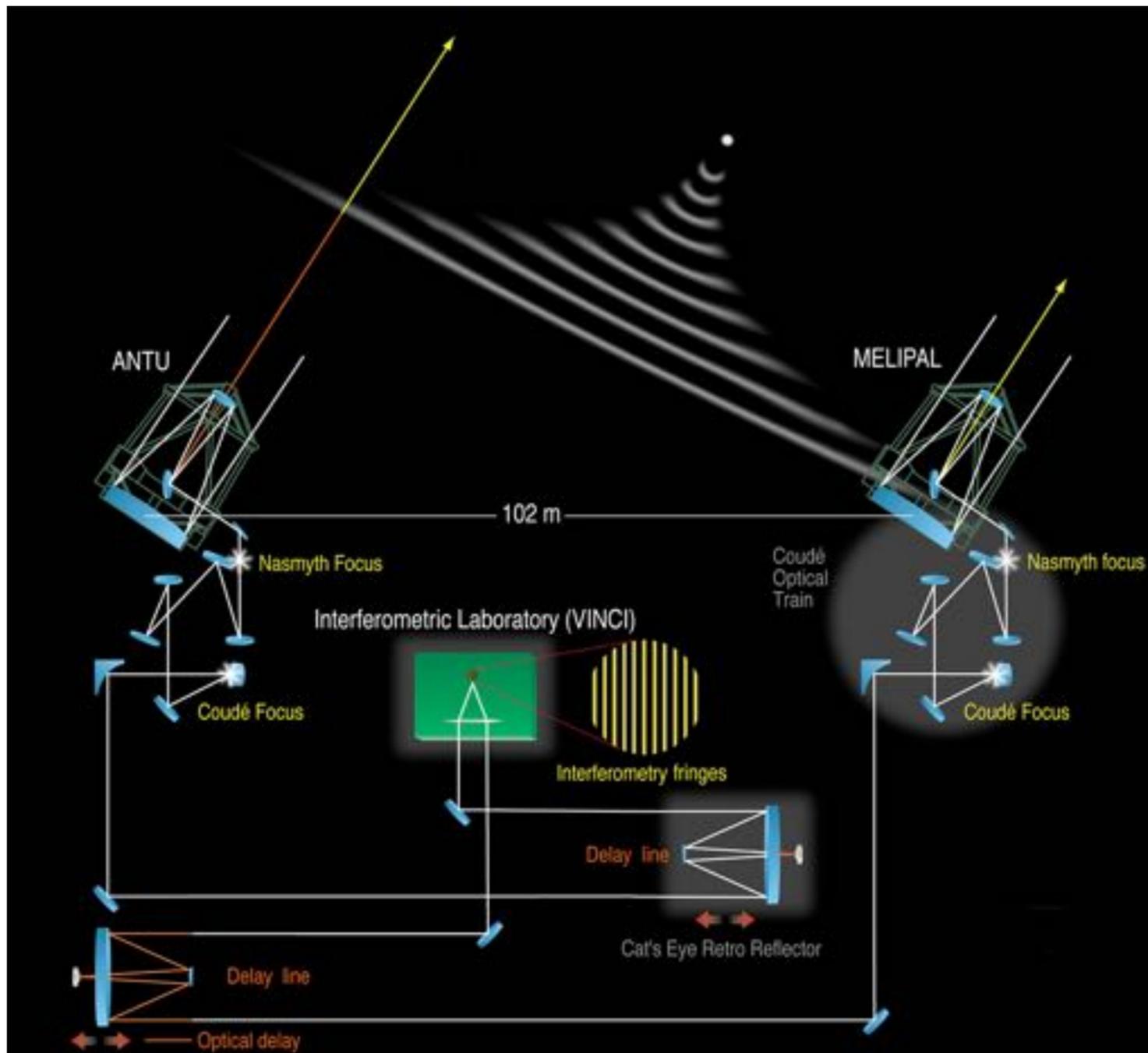
Recombinaison interférométrique de N ouvertures

Exemple avec 2 télescopes

Lignes à retard pour ré-équilibrer la longueur des bras (des dizaines de m!)

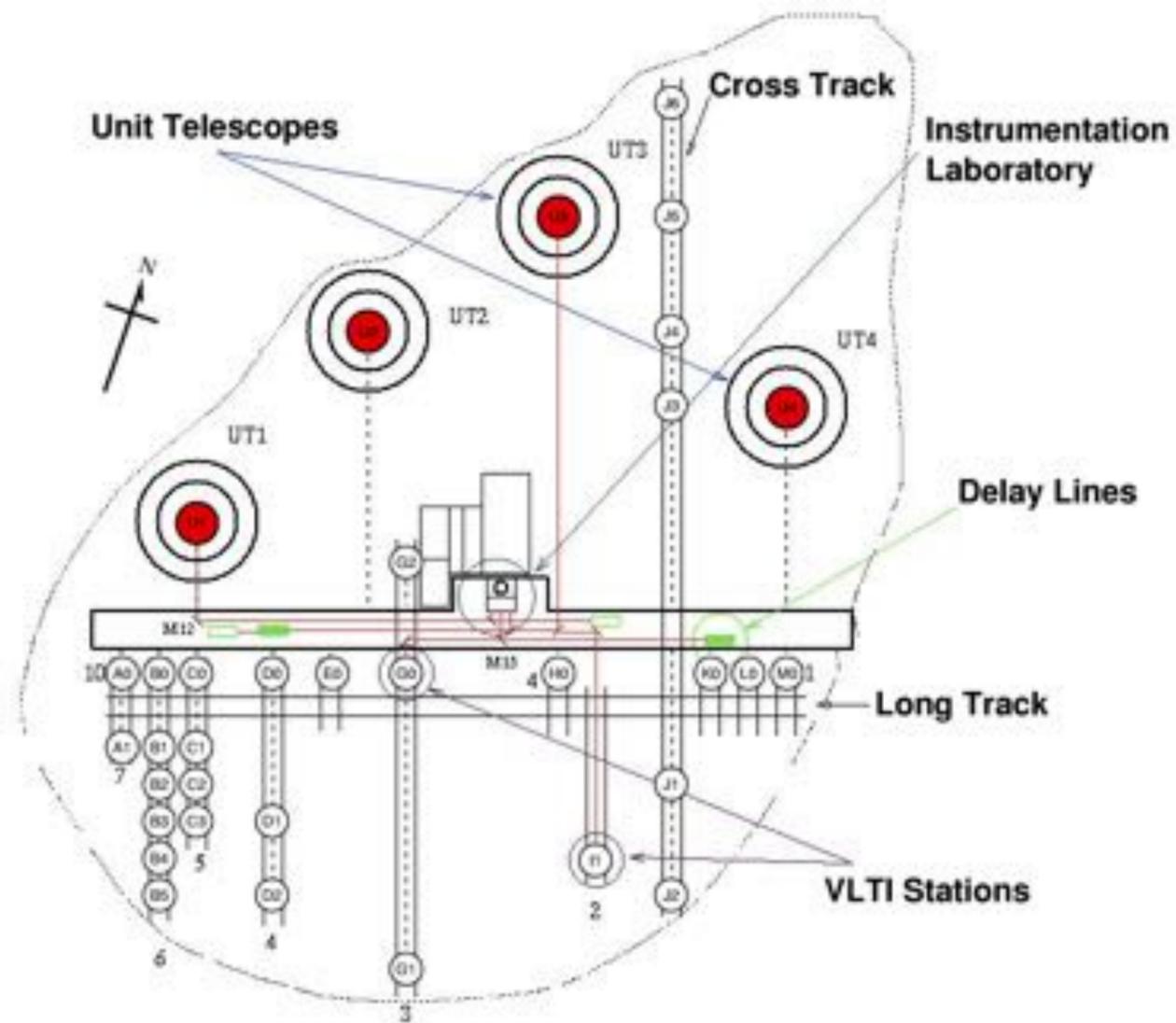
Recombinaison et formation des franges (et dispersion, en général)

Chaque paire d'ouvertures sonde la cohérence selon une seule fréquence spatiale de l'image

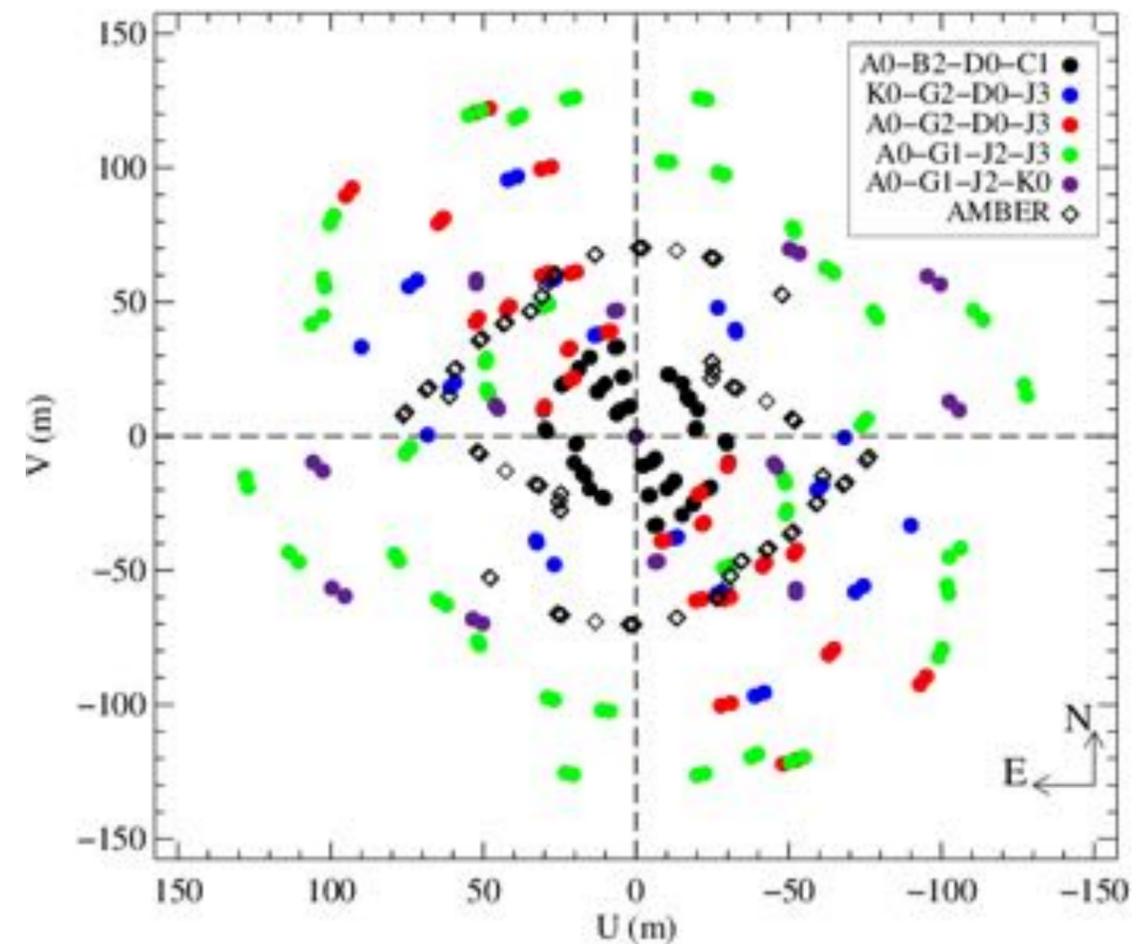


Crédits : ESO

Recombinaison interférométrique de N ouvertures



Couverture du plan image
pour une observation typique

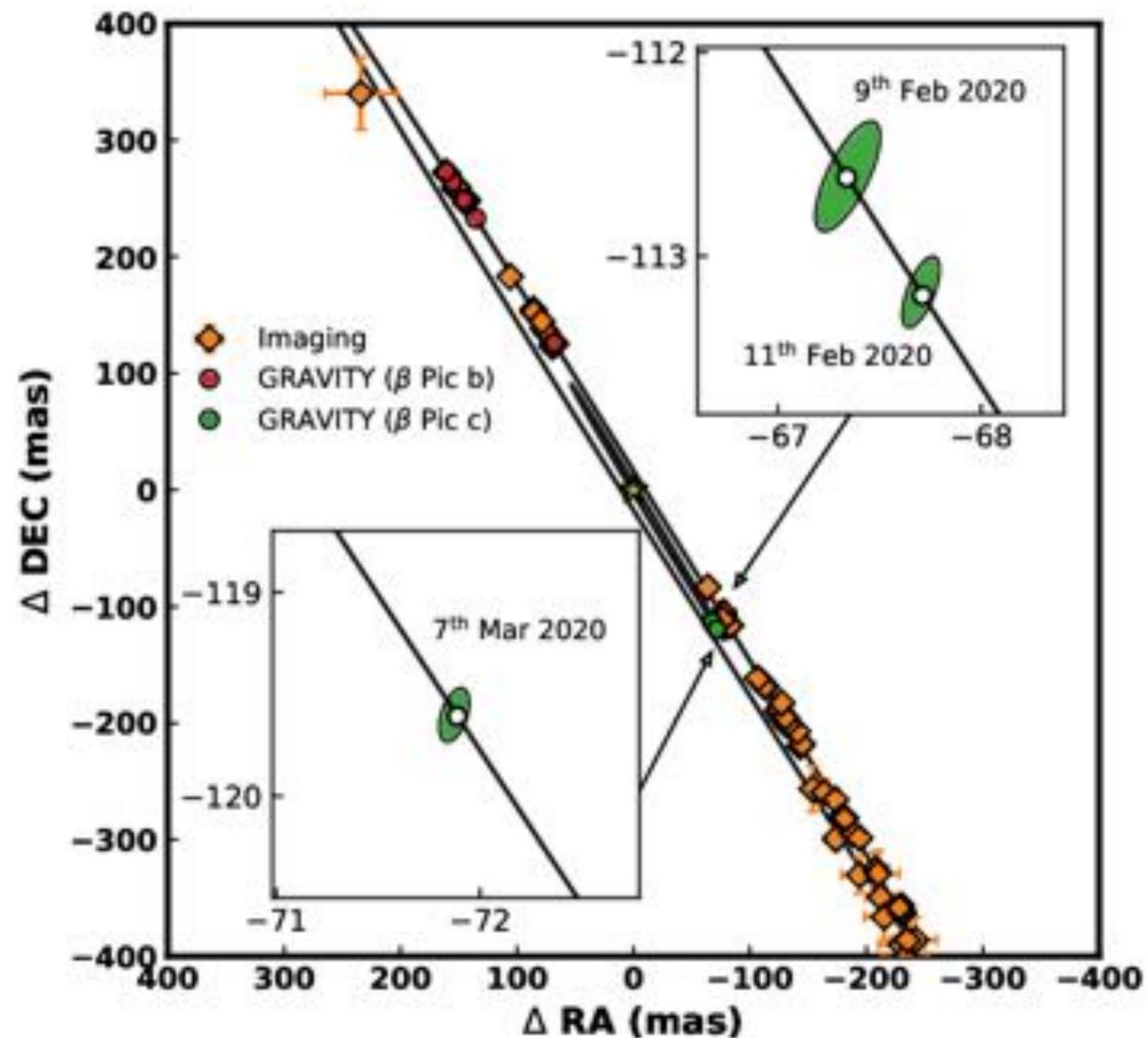


Crédits : ESO

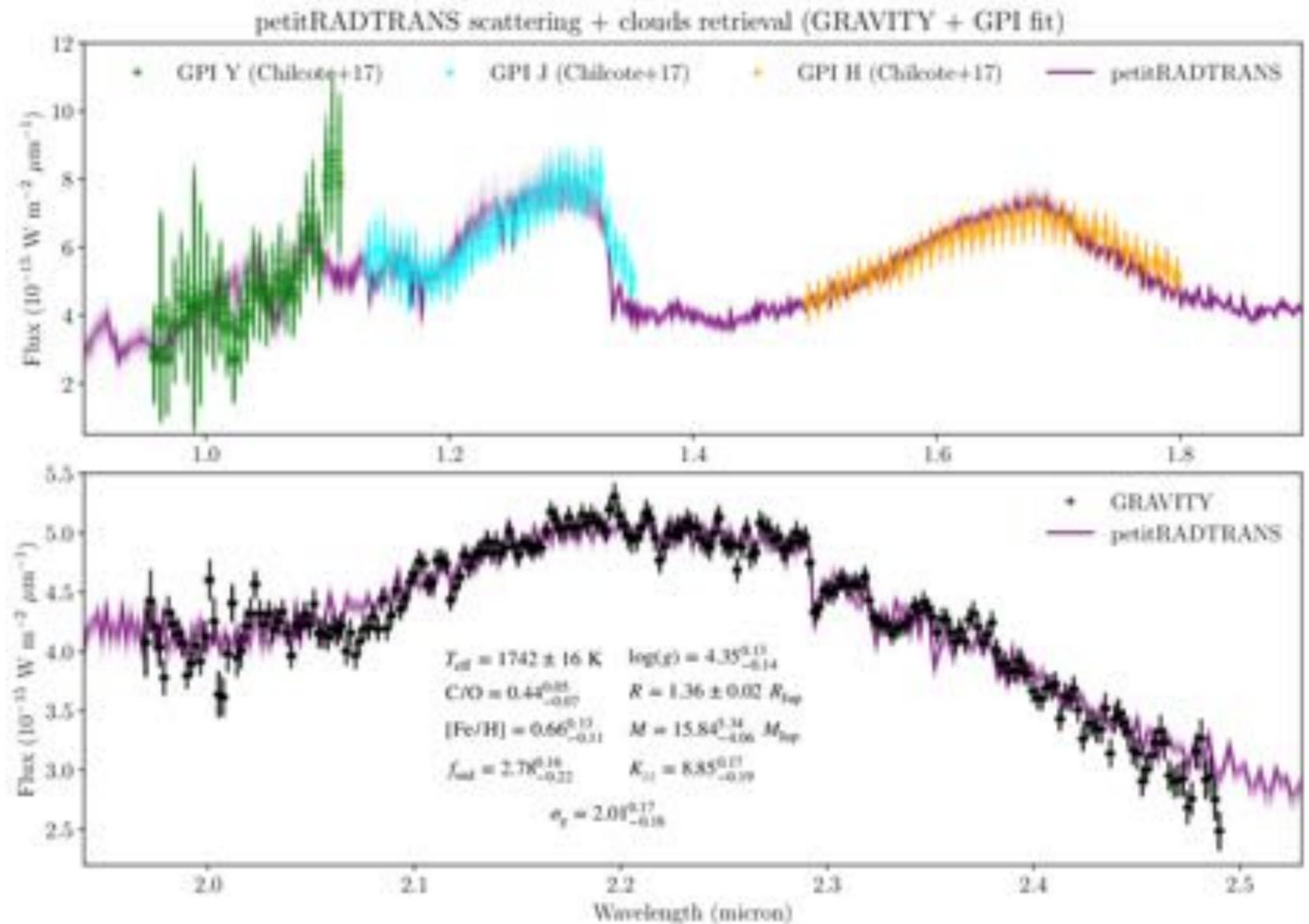
Observation de planètes avec VLT/GRAVITY

Nowak et al. 2020

Observations de Beta Pic b et c
(qui n'avait jamais été vue!)

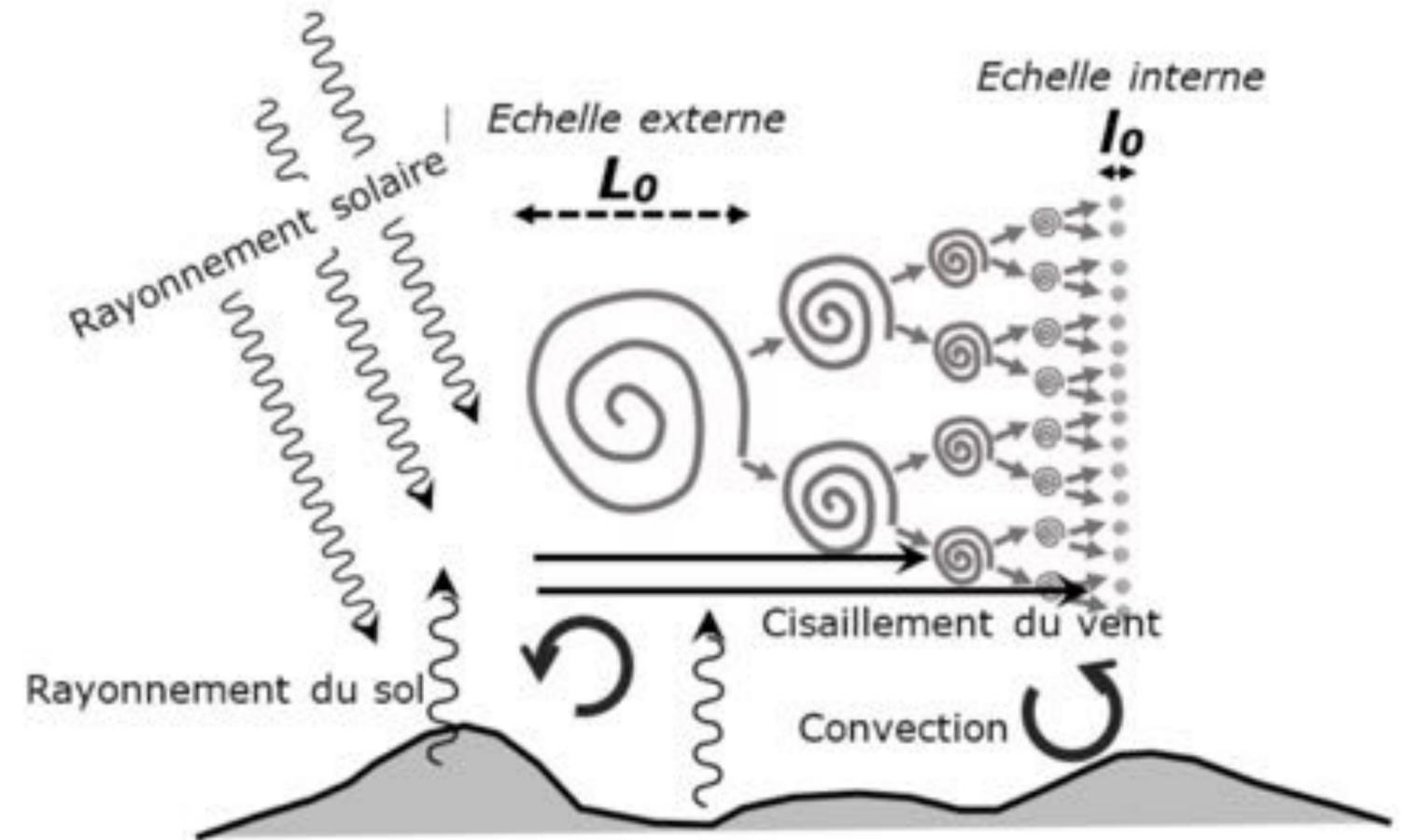
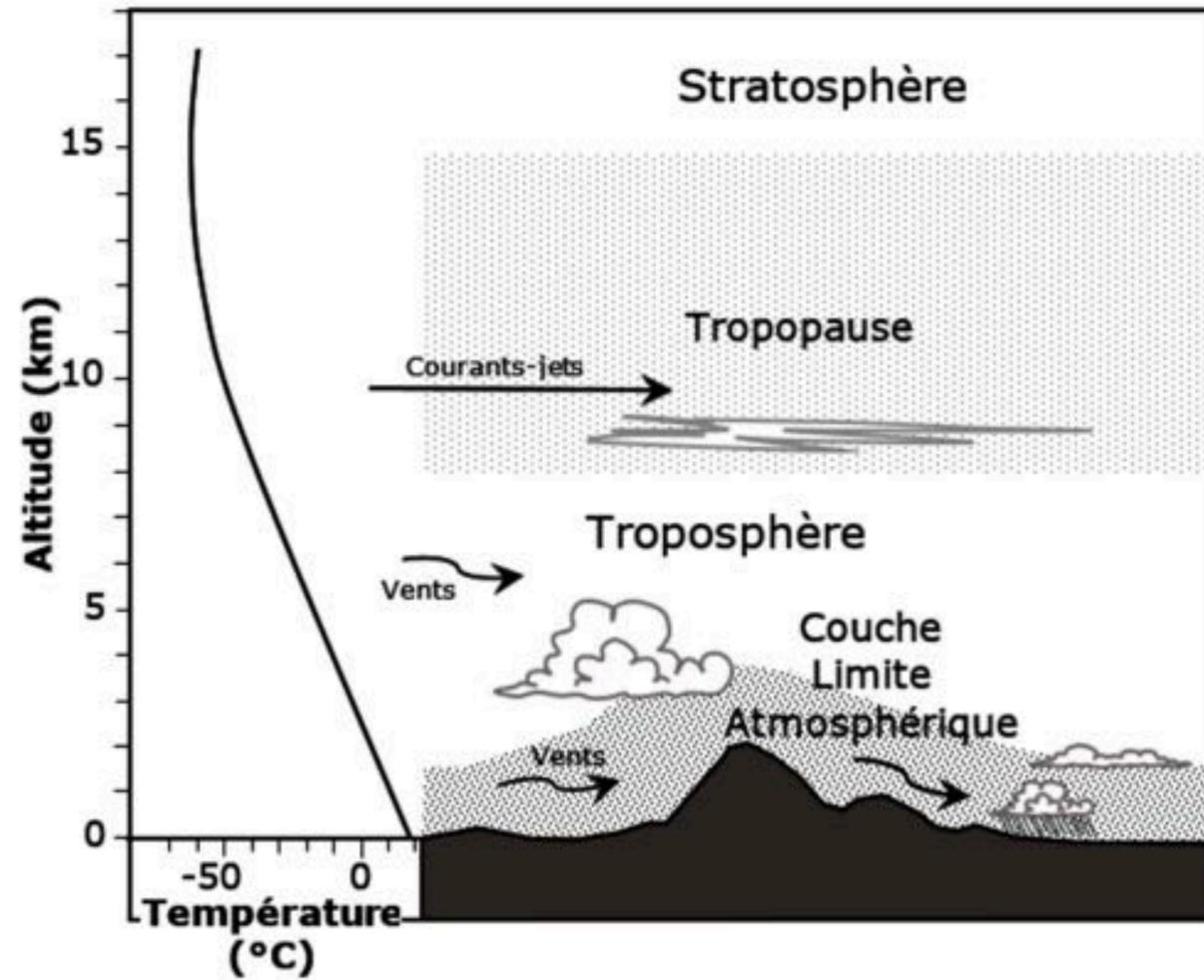


Spectre de Beta Pic b



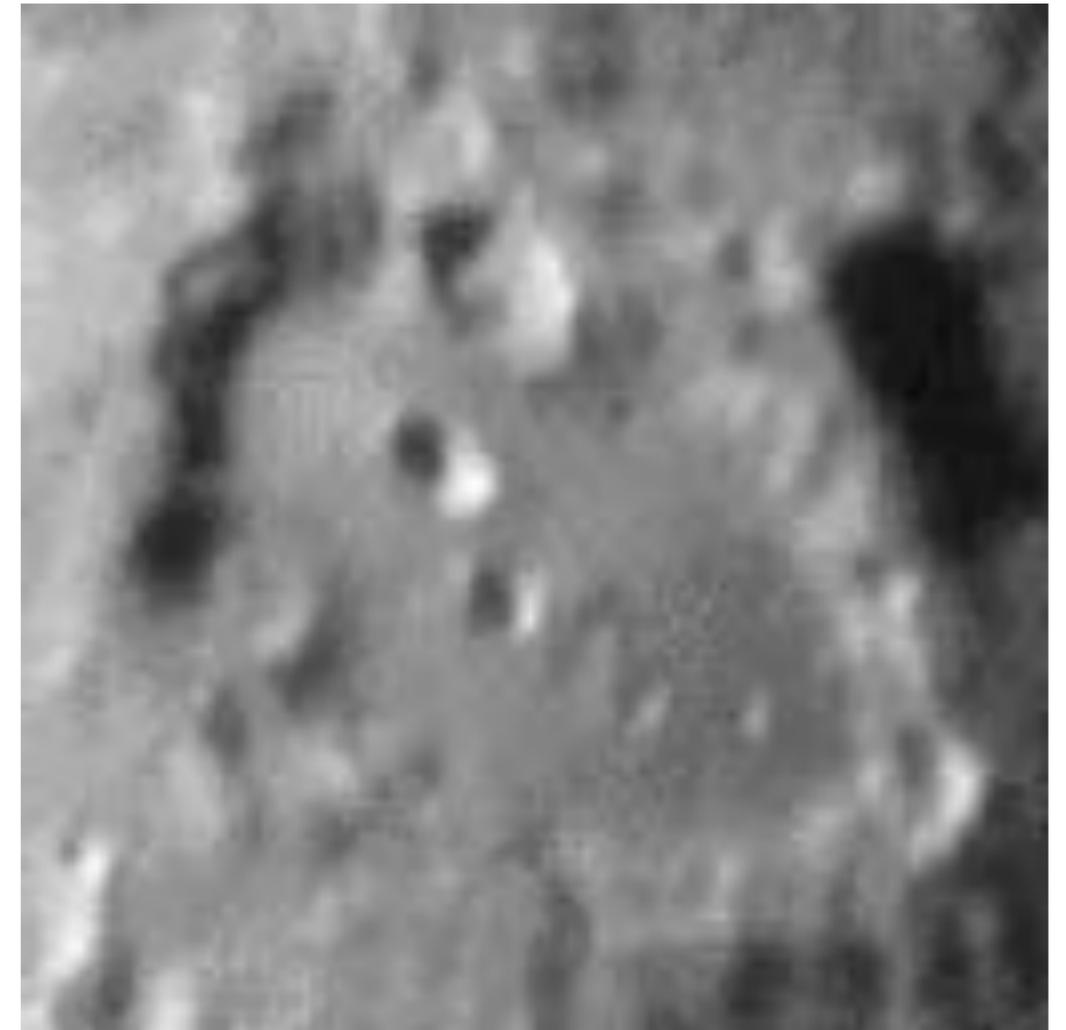
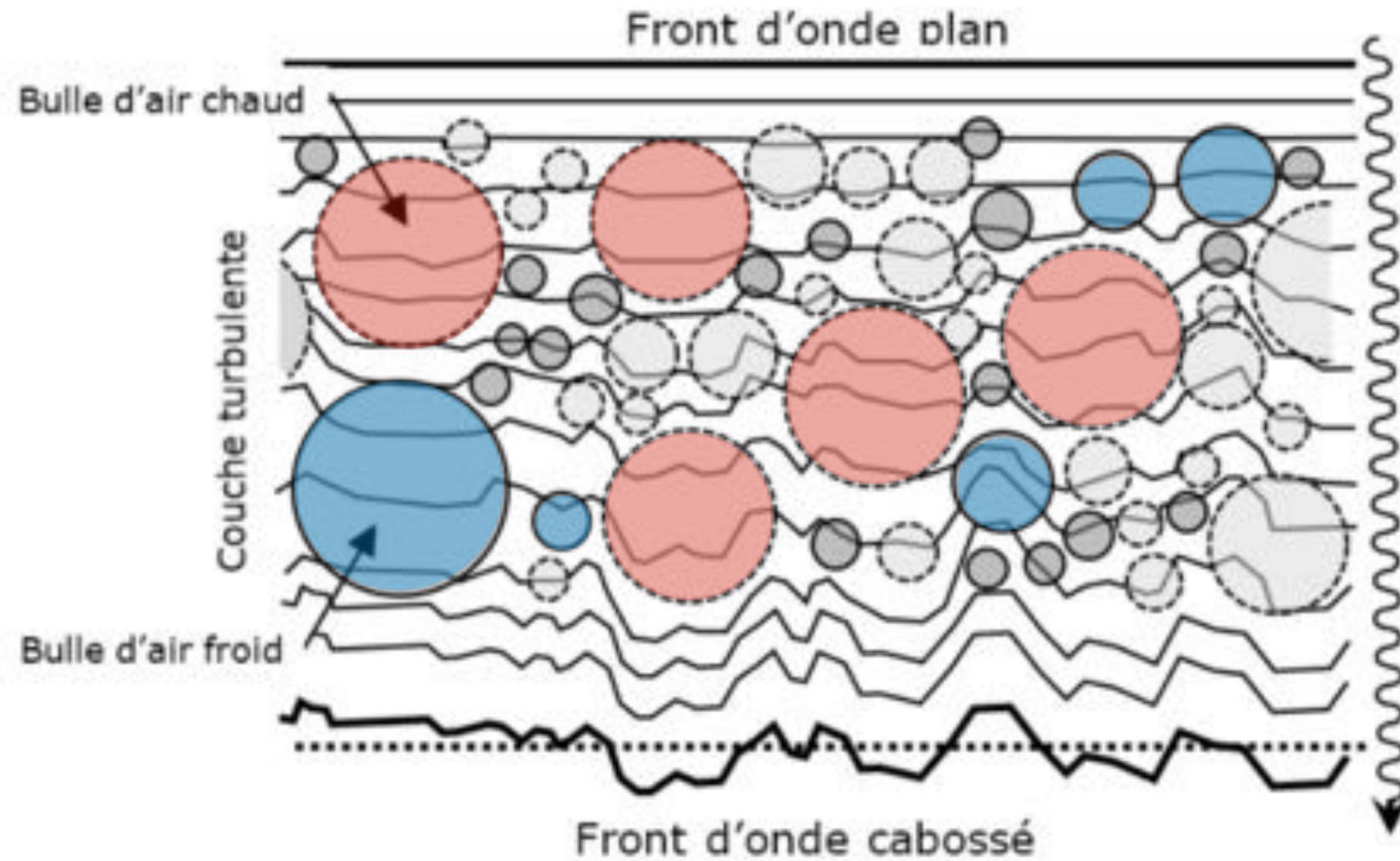
IV - L'atmosphère s'en mêle

Turbulence atmosphérique



Crédits: Daniel Bonneau (OCA/Lagrange)

Turbulence atmosphérique



Crédits: Daniel Bonneau (OCA/Lagrange)

Tâche de seeing

Sans turbulence :

$$\lambda/D \sim 0.05''$$

($\lambda=2\mu\text{m}$, $D=8\text{m}$)



Dépend du diamètre
du télescope

Avec turbulence, et pour un *bon*
site d'observation :

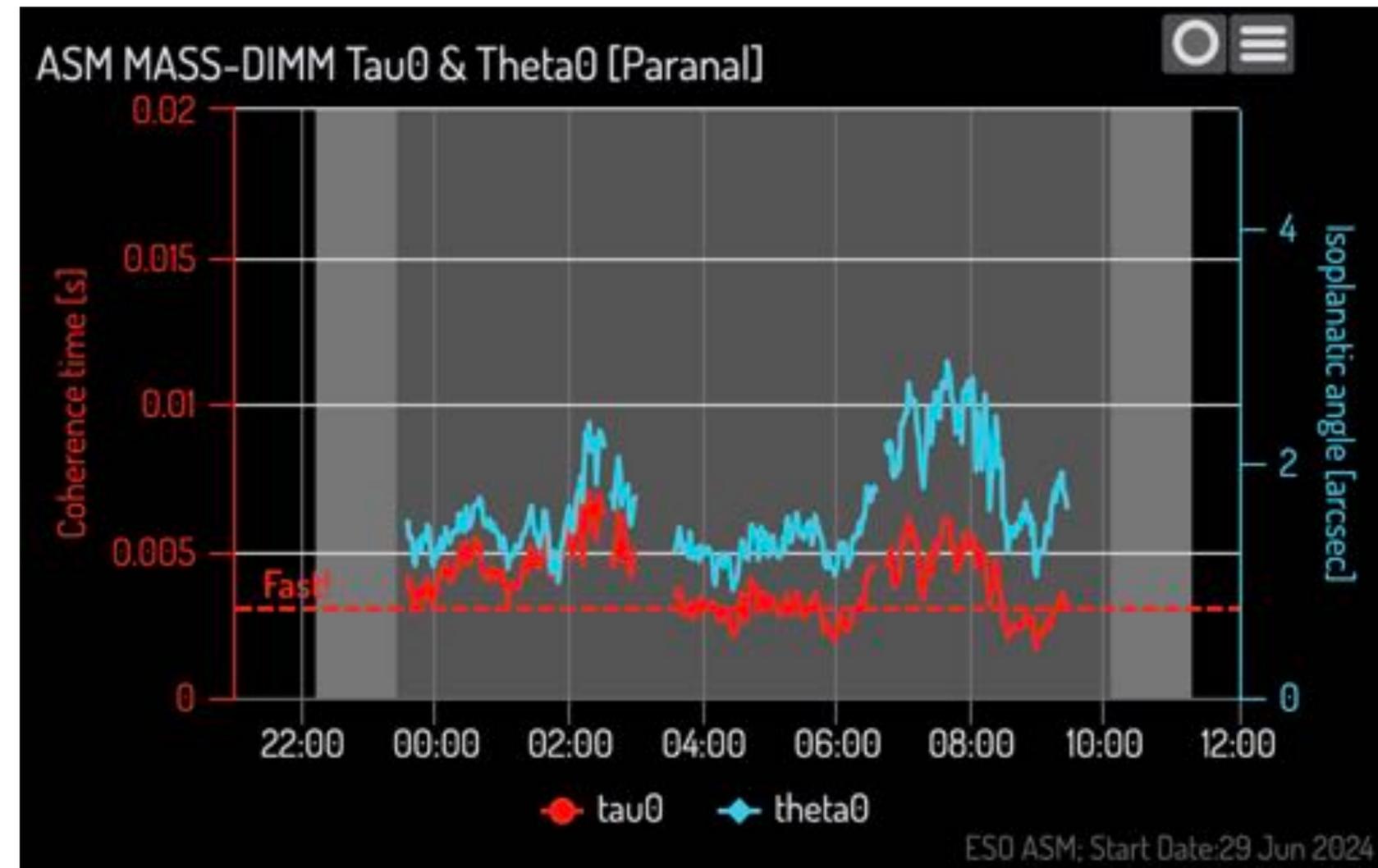
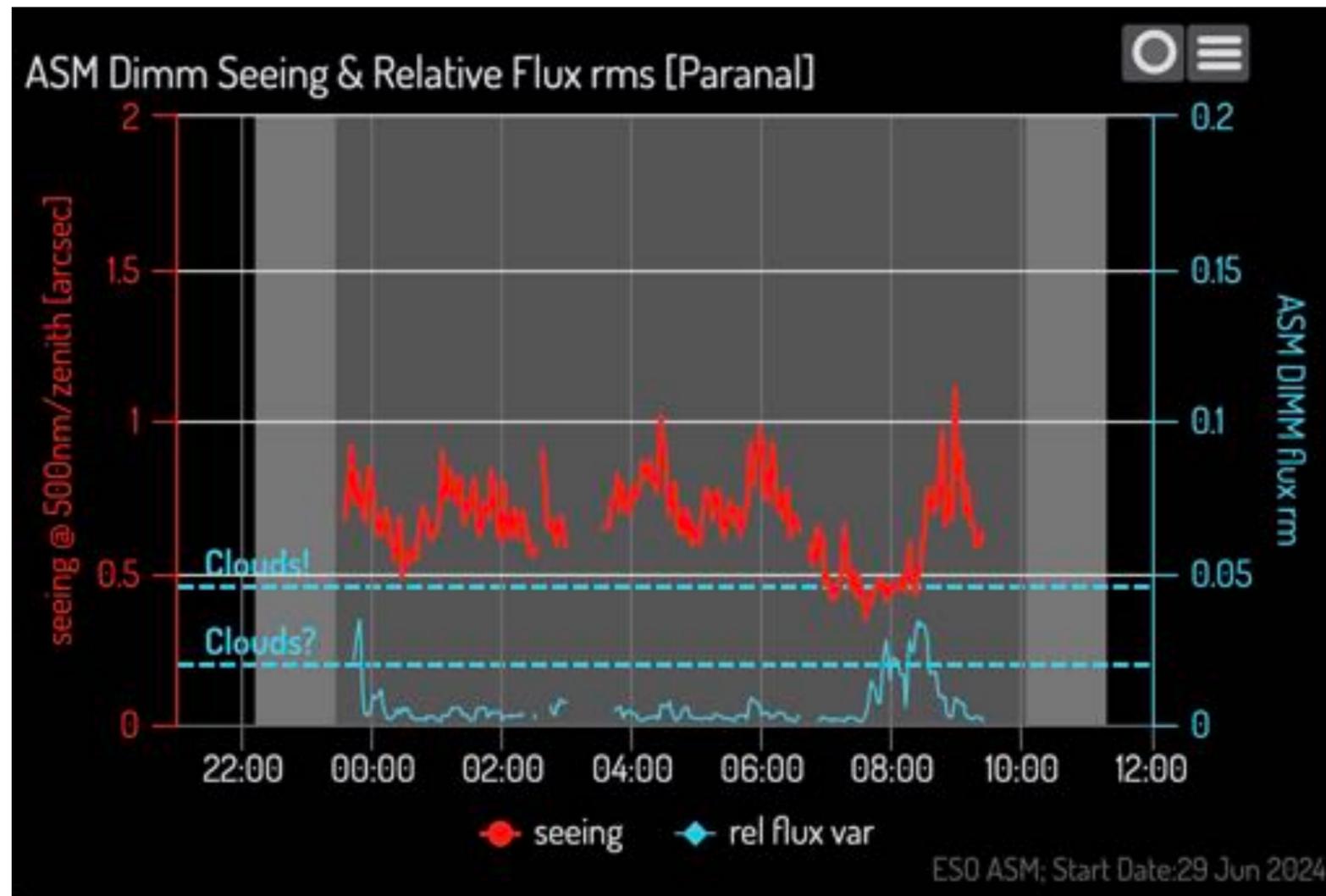
$\sim 1''$

Ne dépend PAS du
diamètre du télescope

Exemple d'astro-météo au VLT

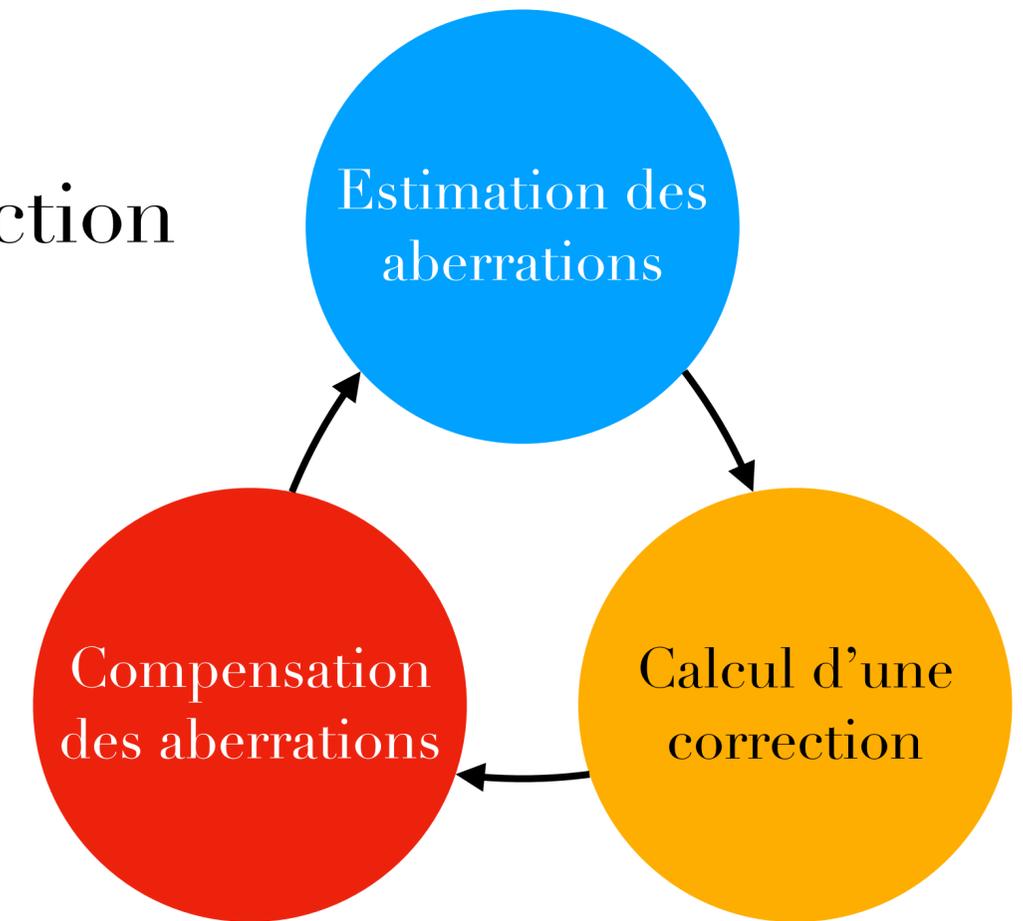
Evolution du seeing sur une nuit :
0.5 à 1" en moyenne

Evolution du temps de cohérence sur une nuit :
3-6ms en moyenne



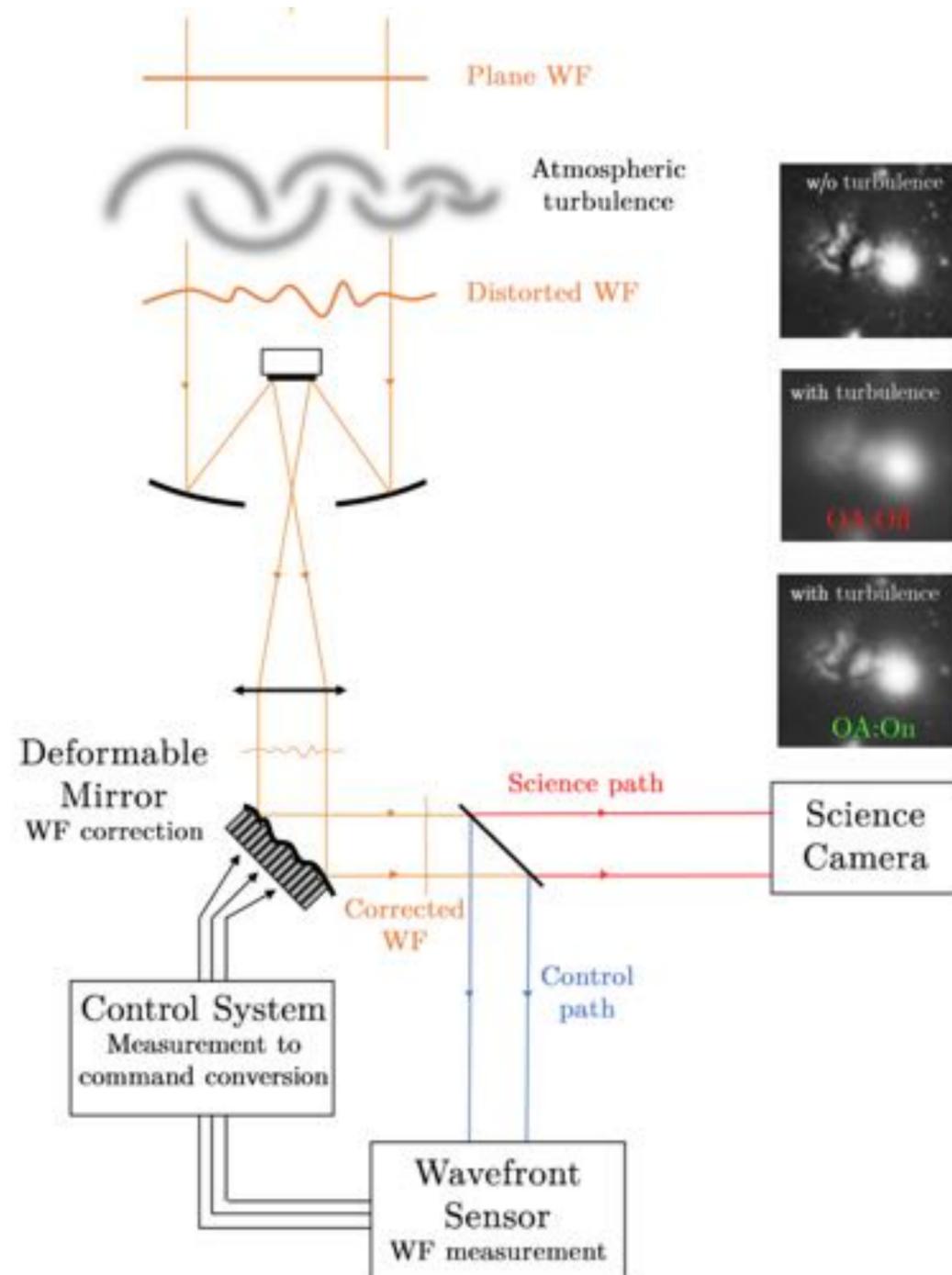
Optique adaptative

Principe d'une correction en boucle fermée :



Des limitations intrinsèques :

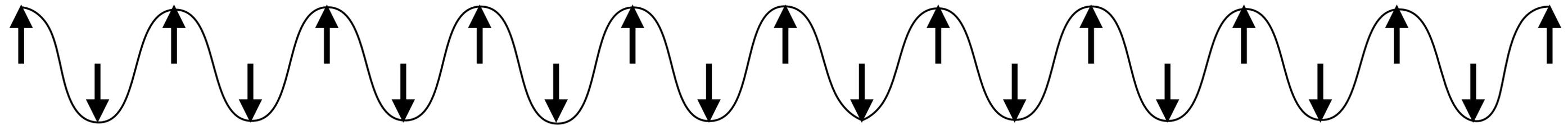
- Délai entre la mesure et la correction
- Imperfections de la mesure et de la correction
- Aberrations non-communes



Optique adaptative

Le nombre d'actuateurs du miroir fixe le niveau de détail de la correction.

Pour des détails plus fins, il faut plus d'actuateurs !



Diamètre de la zone corrigée sur le ciel (en λ/D) = Nombre d'actuateurs

C'est toujours Fourier qui oeuvre en coulisse !

Et ça marche !

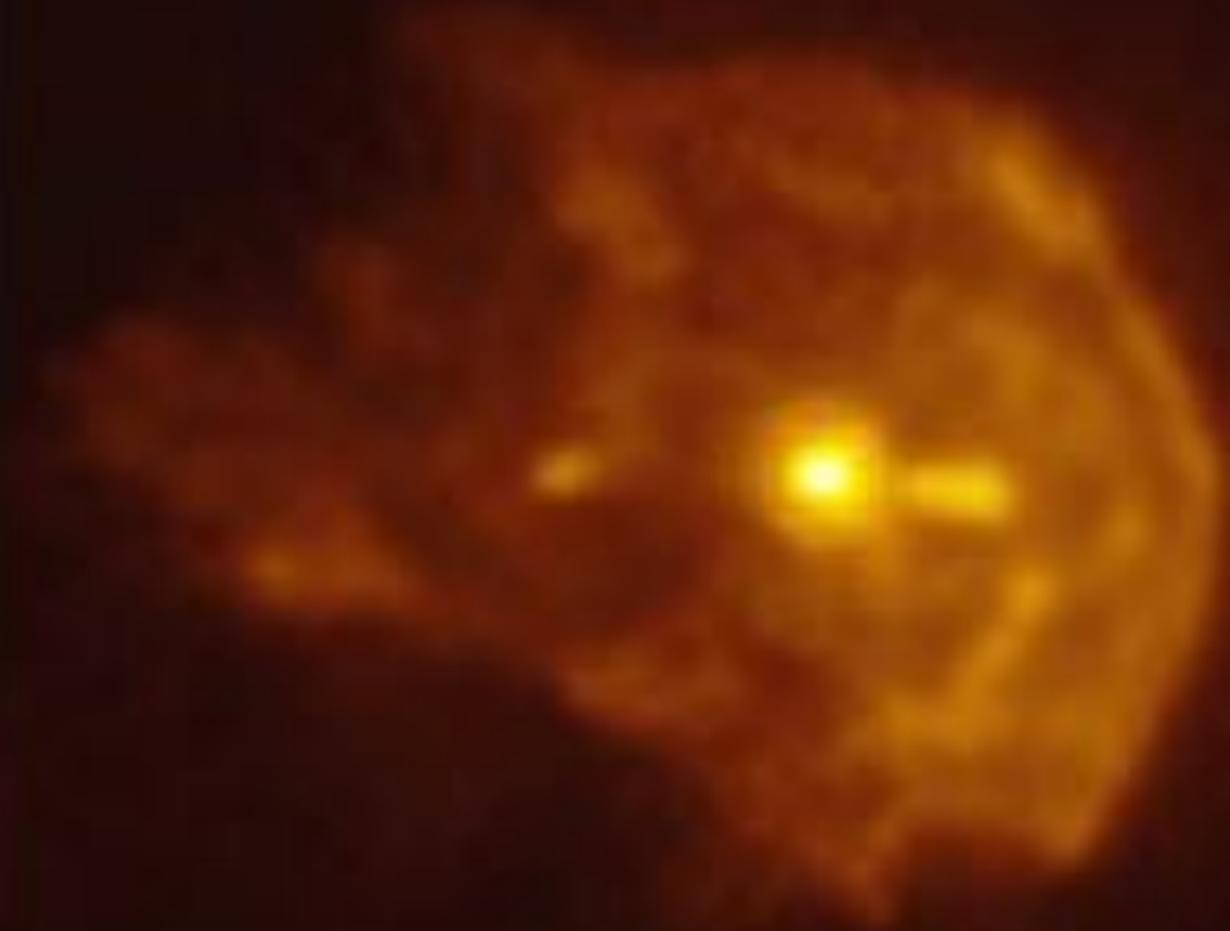


Neptune observée avec VLT/MUSE (8m, au sol)

Une haute résolution angulaire depuis le sol !



VLT/MUSE (8m, au sol)

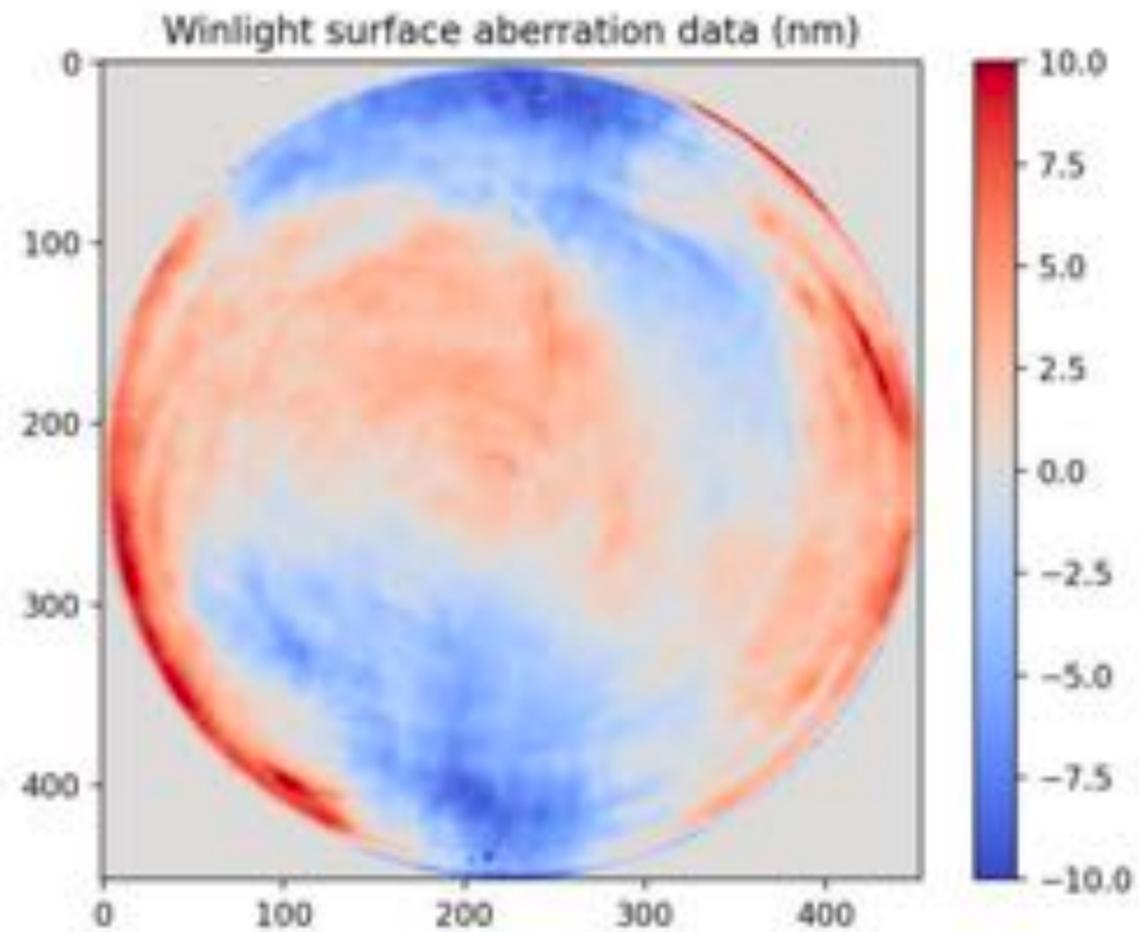


Hubble (2.4m, en orbite)

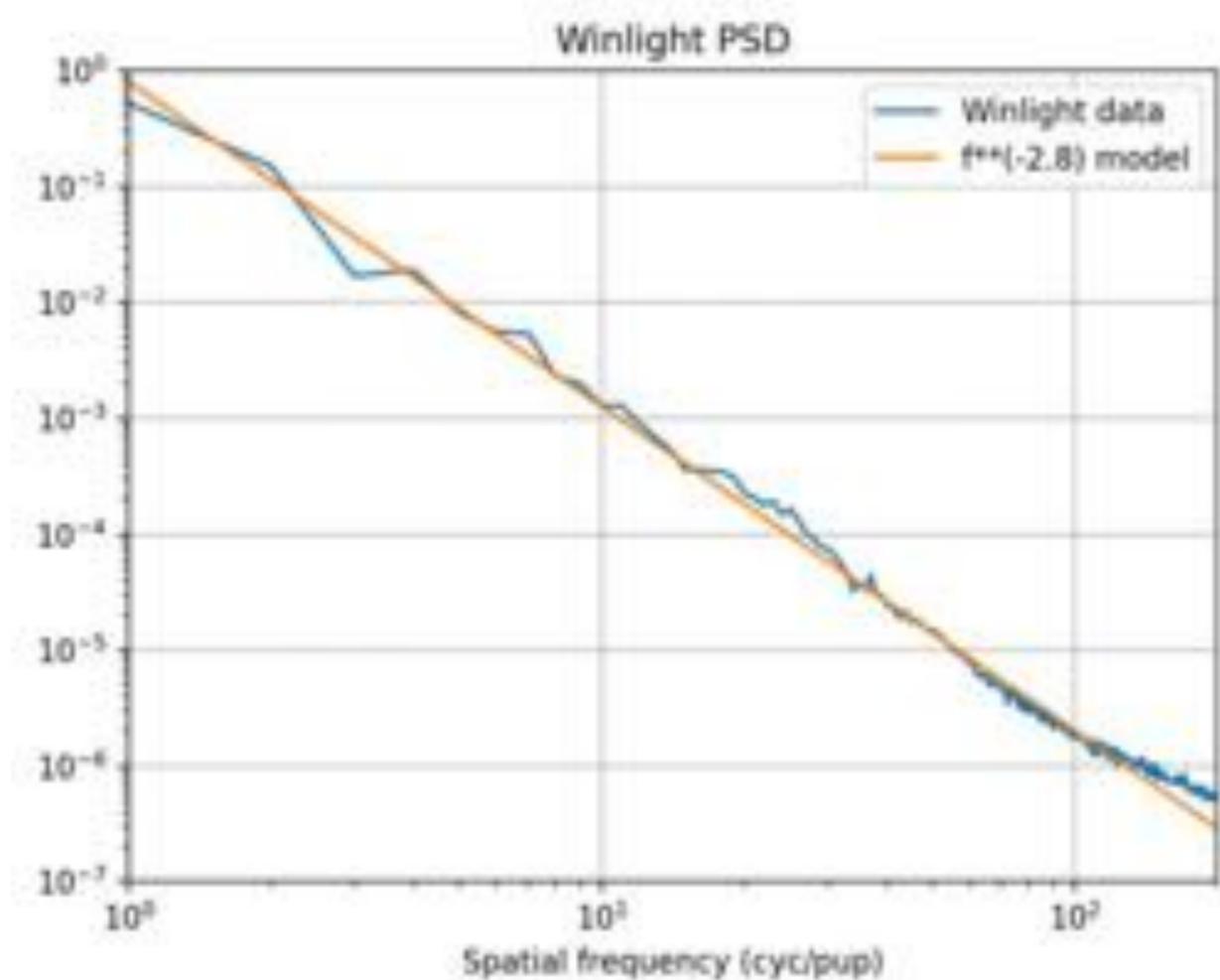
V - Les optiques s'en mêlent (aussi)

Des surfaces optiques toujours imparfaites

Défauts de surface
(optique du satellite EUCLID)

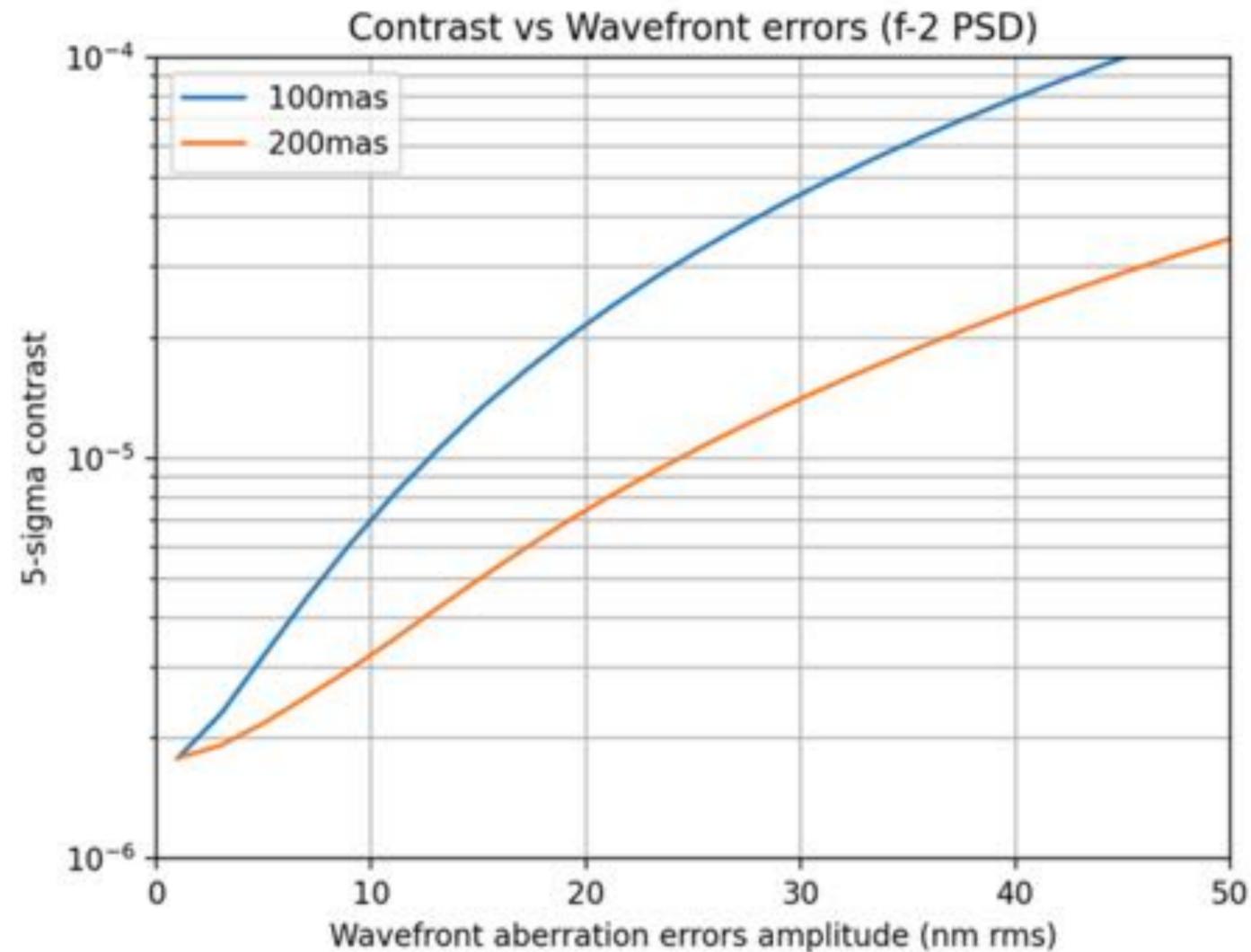


Idem, mais analysés en terme
de fréquences spatiales

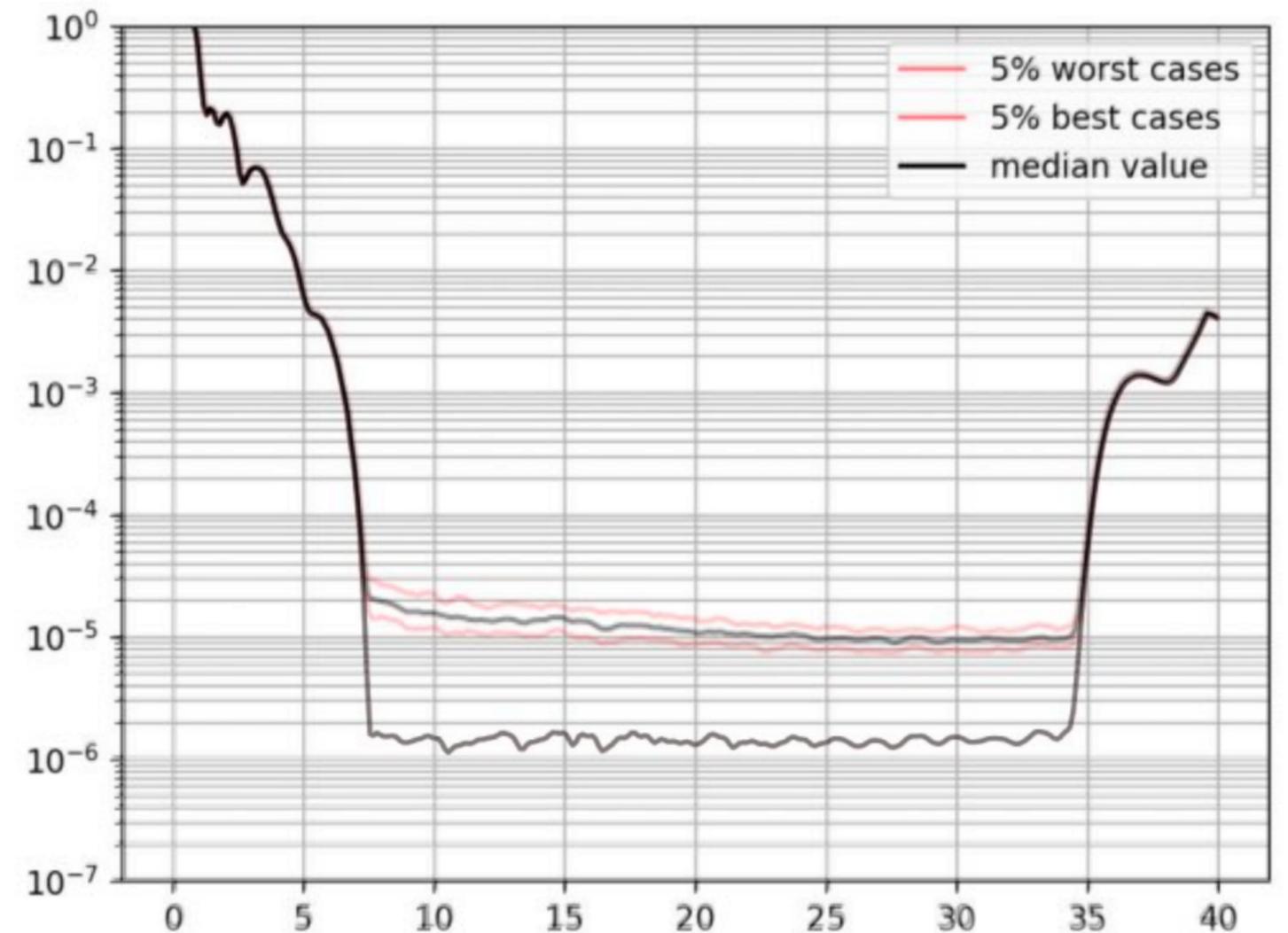


Conséquences sur les images coronographiques

Impact des aberrations sur le rapport de flux mesurable

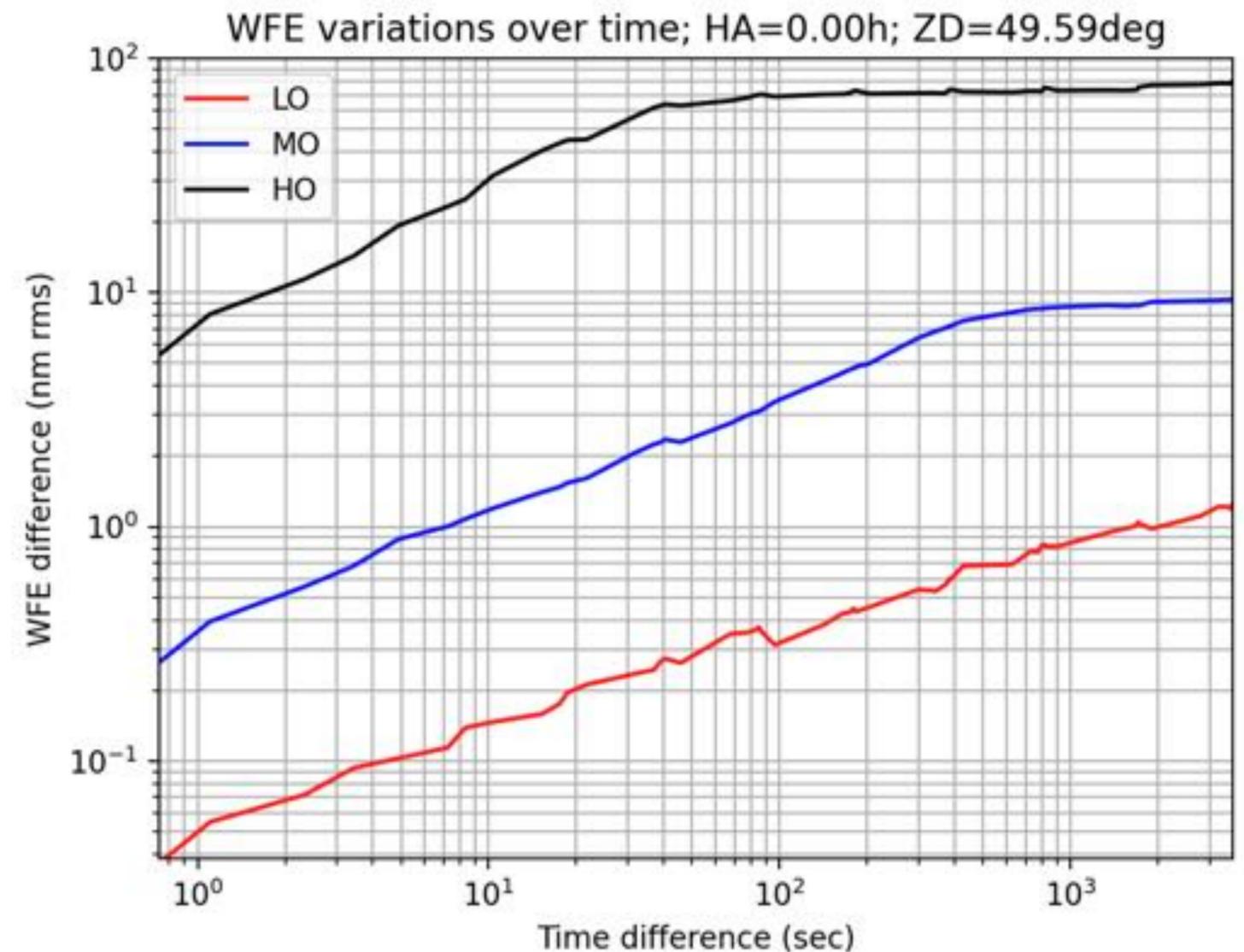
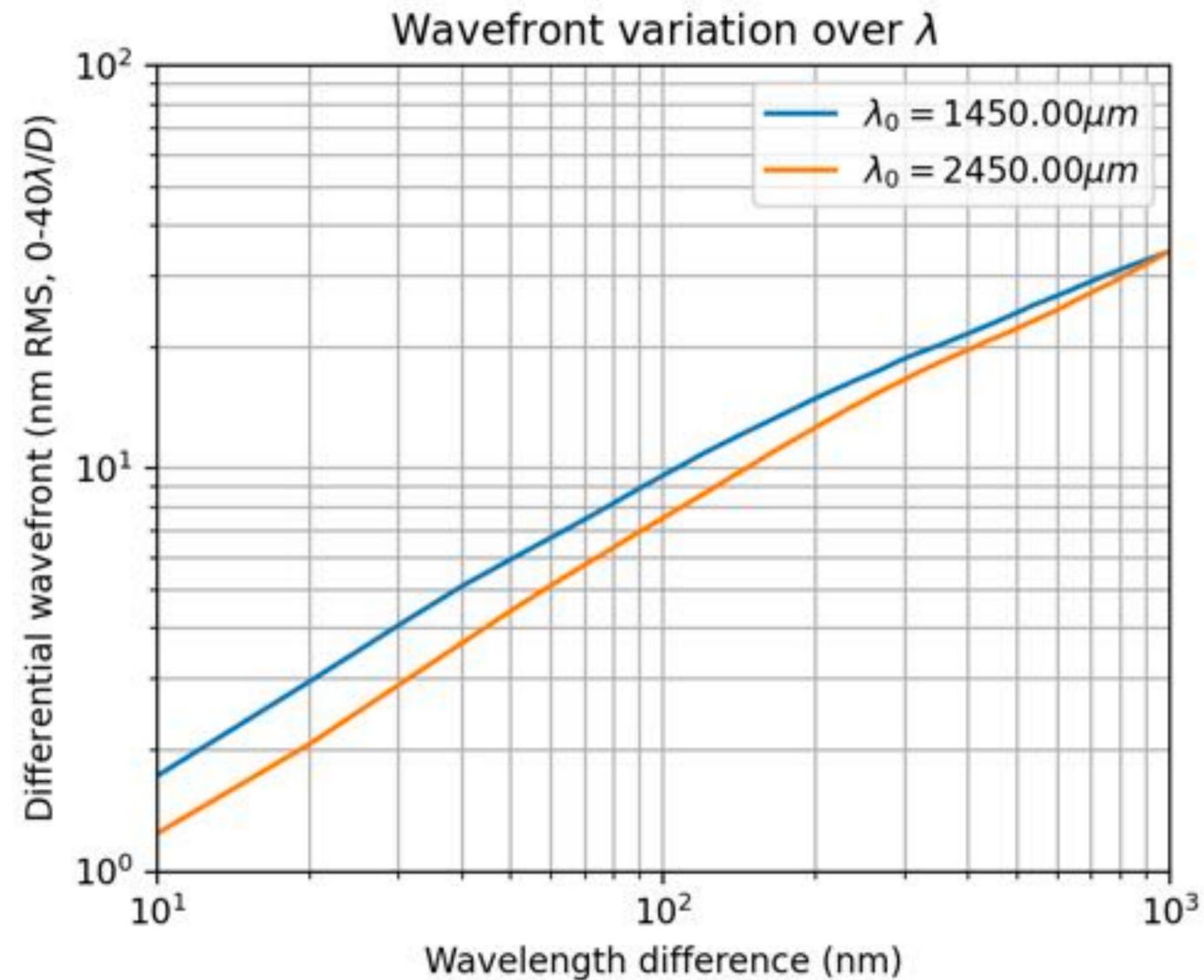


Exemple de figure de diffraction après apodisation, avec et sans aberrations

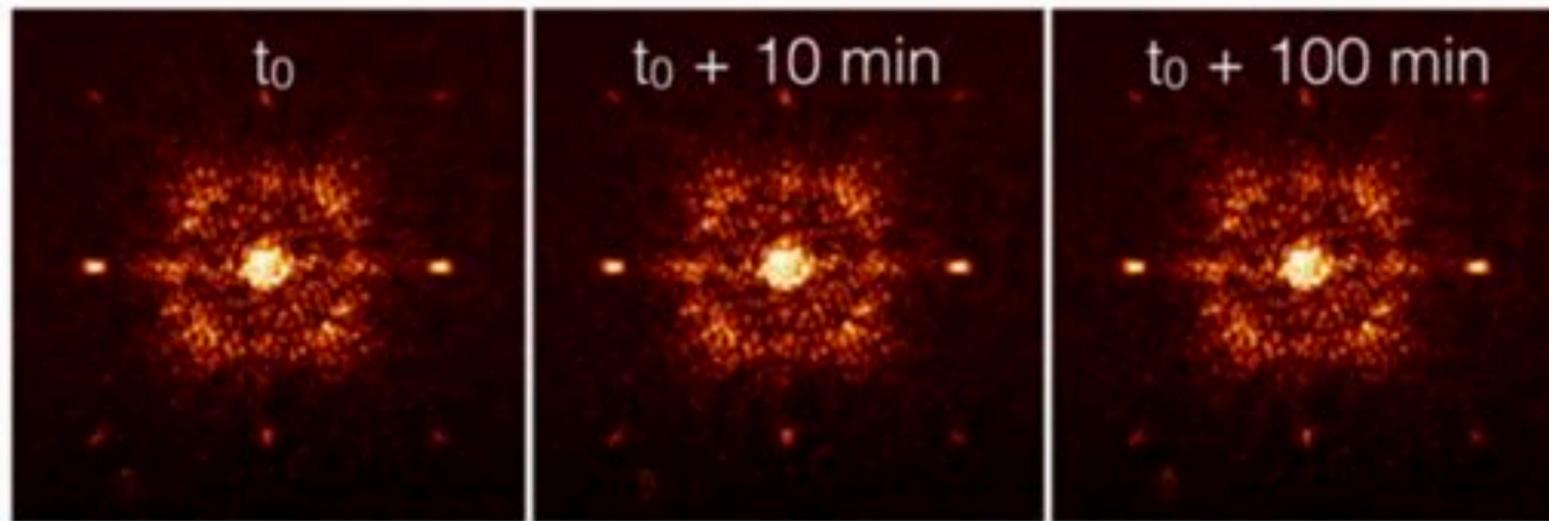


Le vrai problème c'est la stabilité !

- En λ : 10nm RMS pour $\Delta\lambda=10\text{nm}$
- Temporellement: 5nm RMS en 3min, 10nm après 10min (et ça avec l'OA)

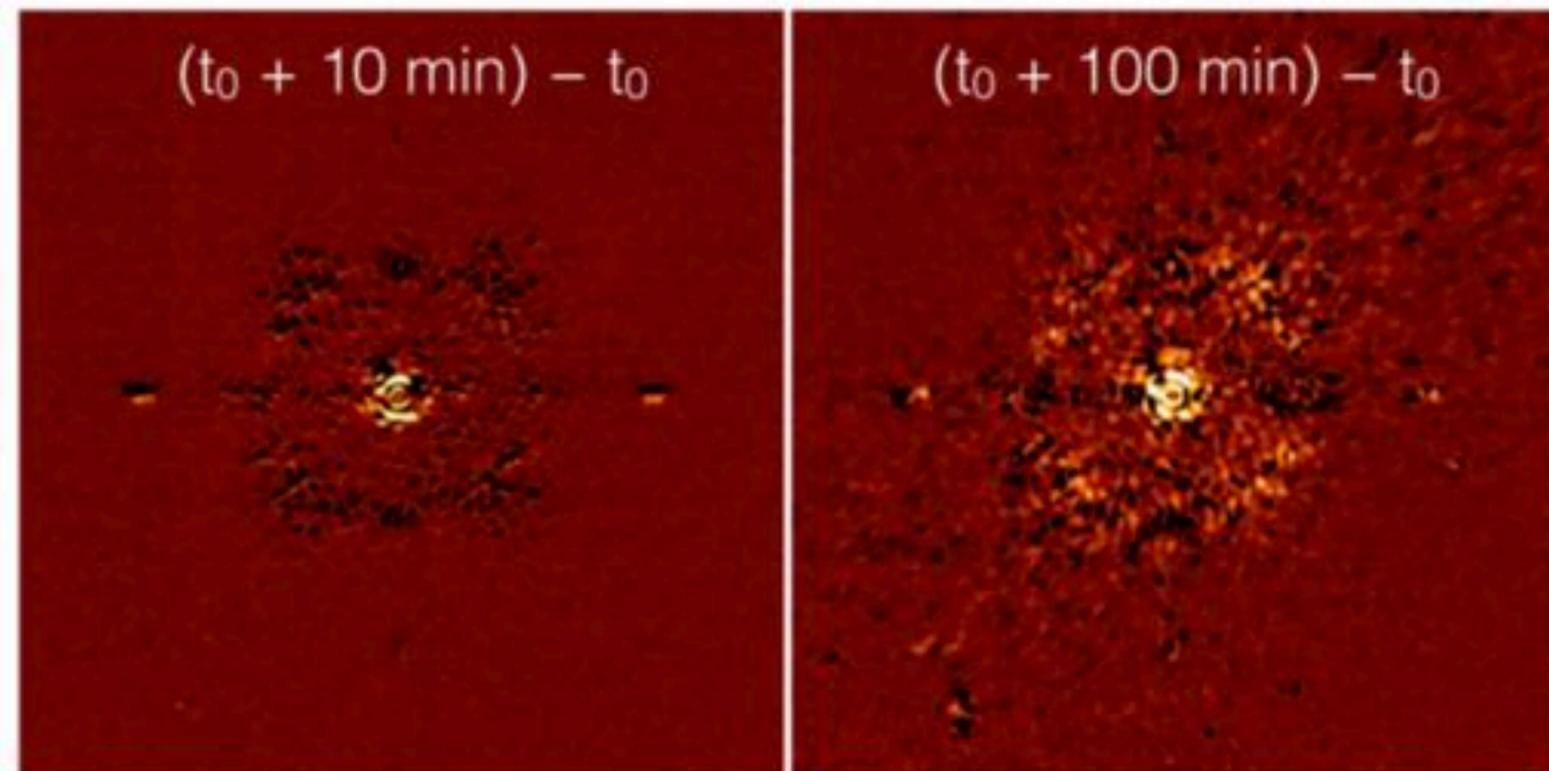


Le vrai problème c'est la stabilité !

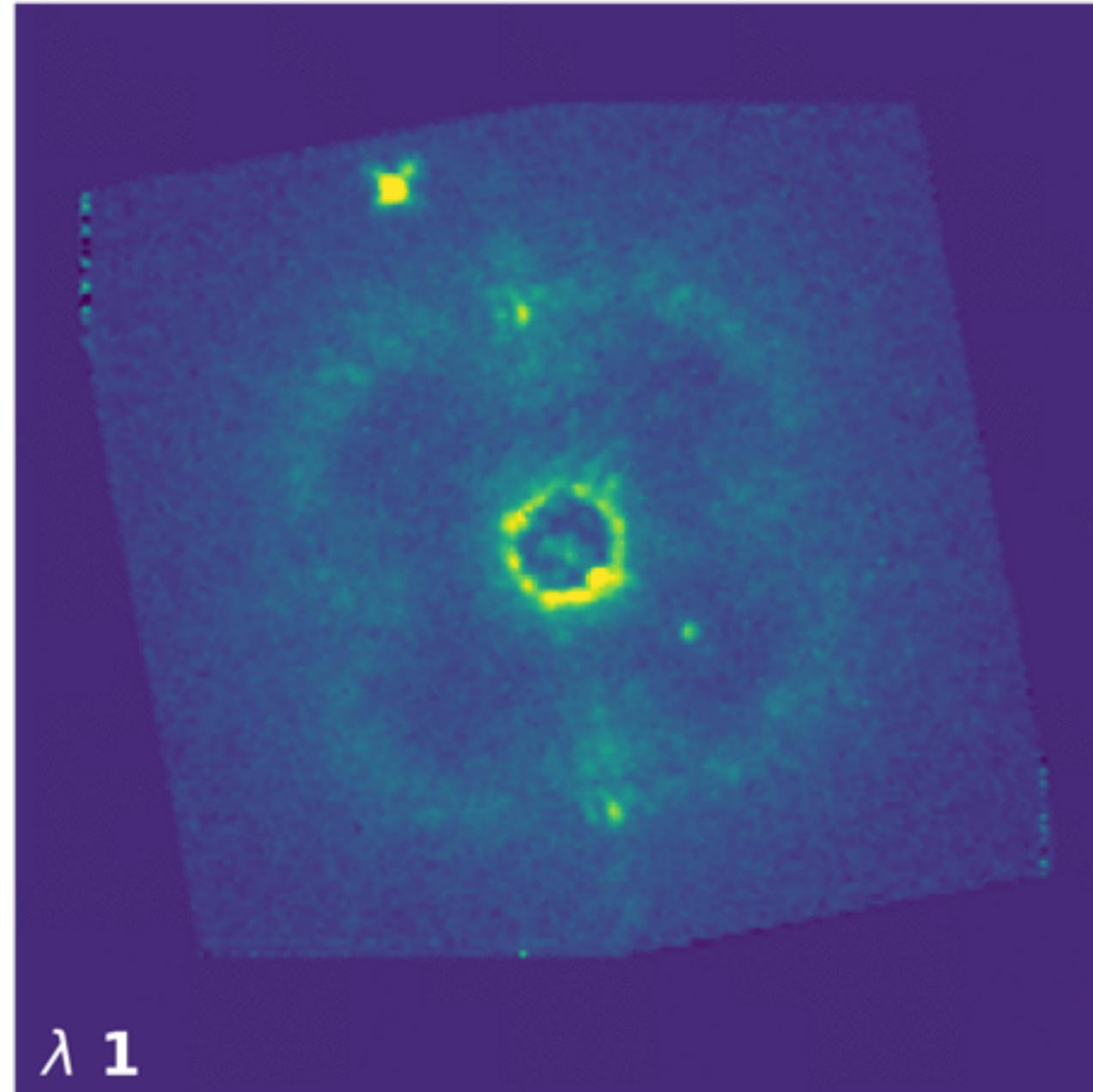


Plus on attend, plus les figures de diffraction évoluent dans le temps !

Où se trouvent les planètes ?
Comment les distinguer des aberrations plan focal ?

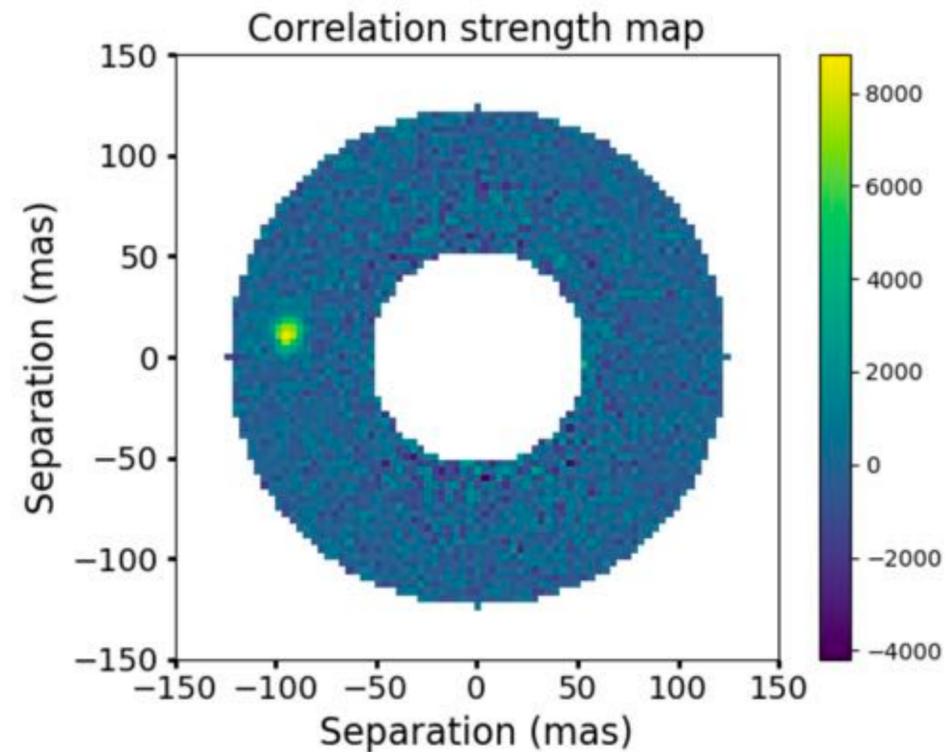
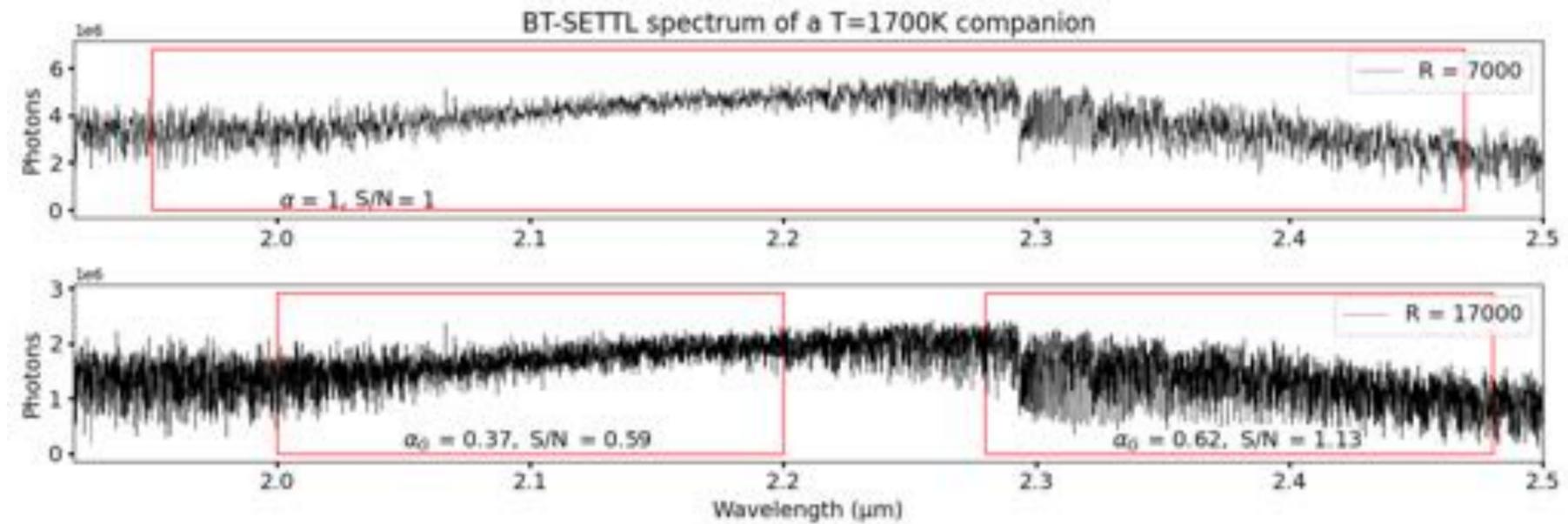
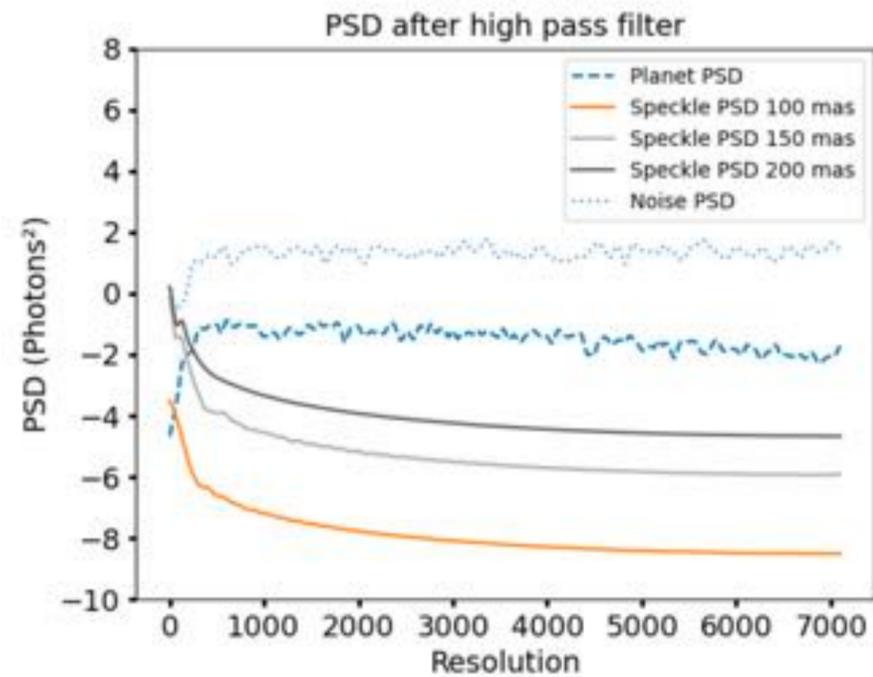
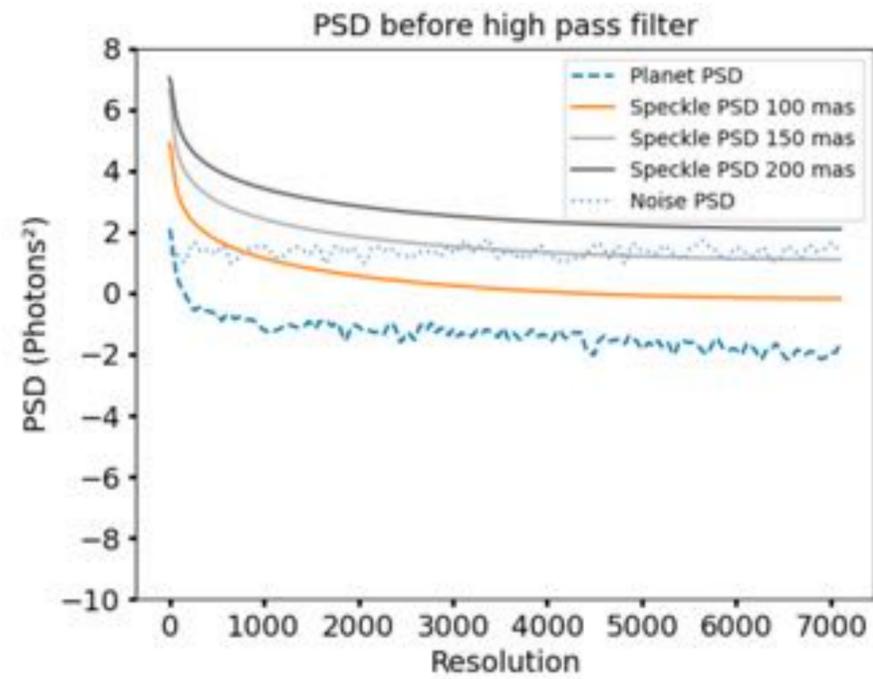


Imagerie différentielle spectrale



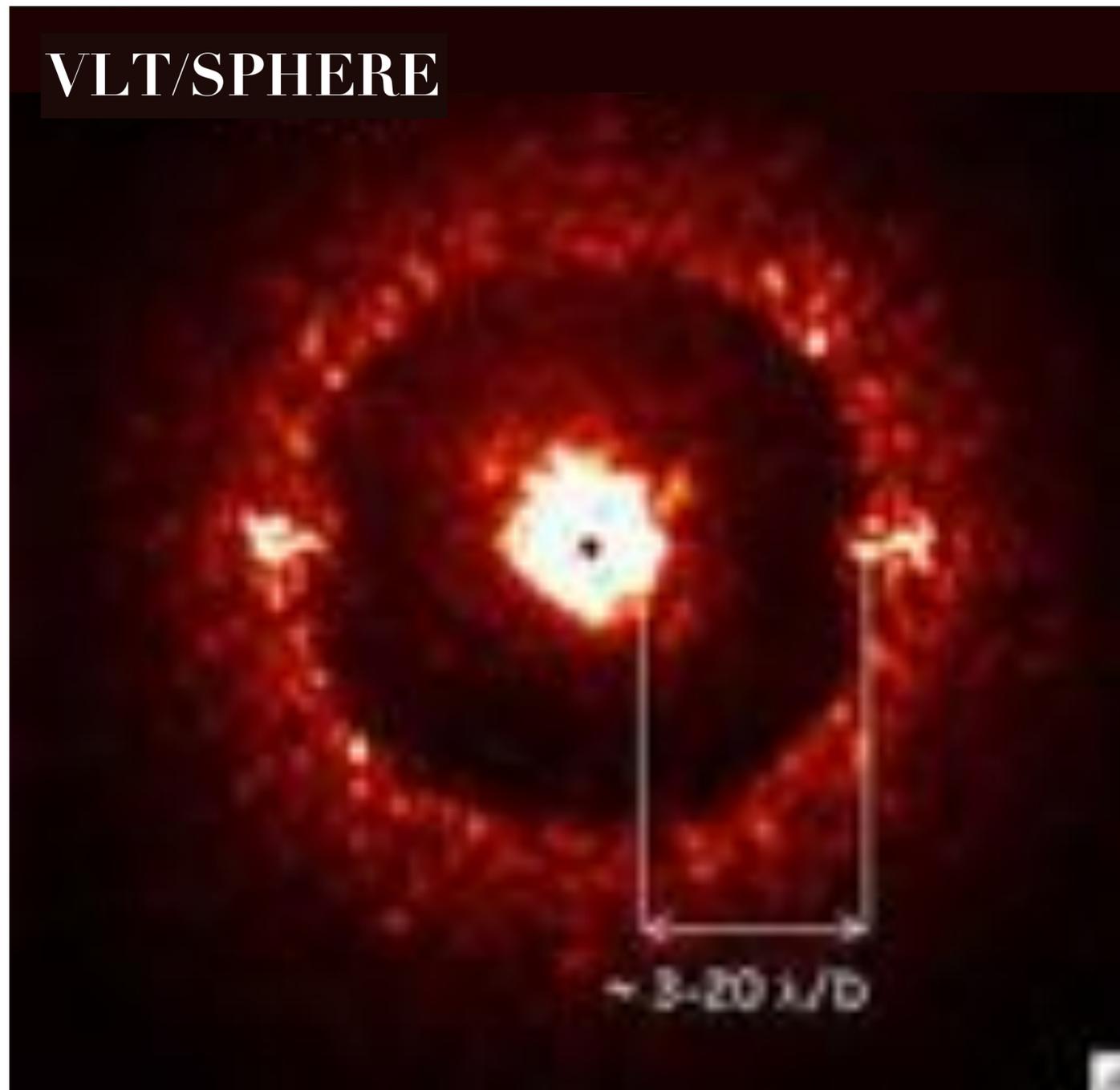
Crédits : Exoplanet Imaging Data Challenge

Cross-correlation spectrale



Crédits : Bidot et al. 2024

Une optique adaptative « extrême »



Rayon de correction : $20 \lambda/D$

Car miroir avec 40×40 actionneurs

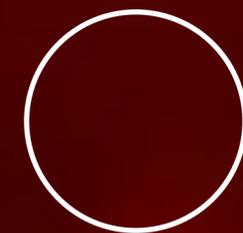
40 actionneurs sur un 8m : taille d'un actionneur sur le ciel = 20cm

C'est choisi pour coller à la longueur de cohérence du front d'onde turbulent au VLT

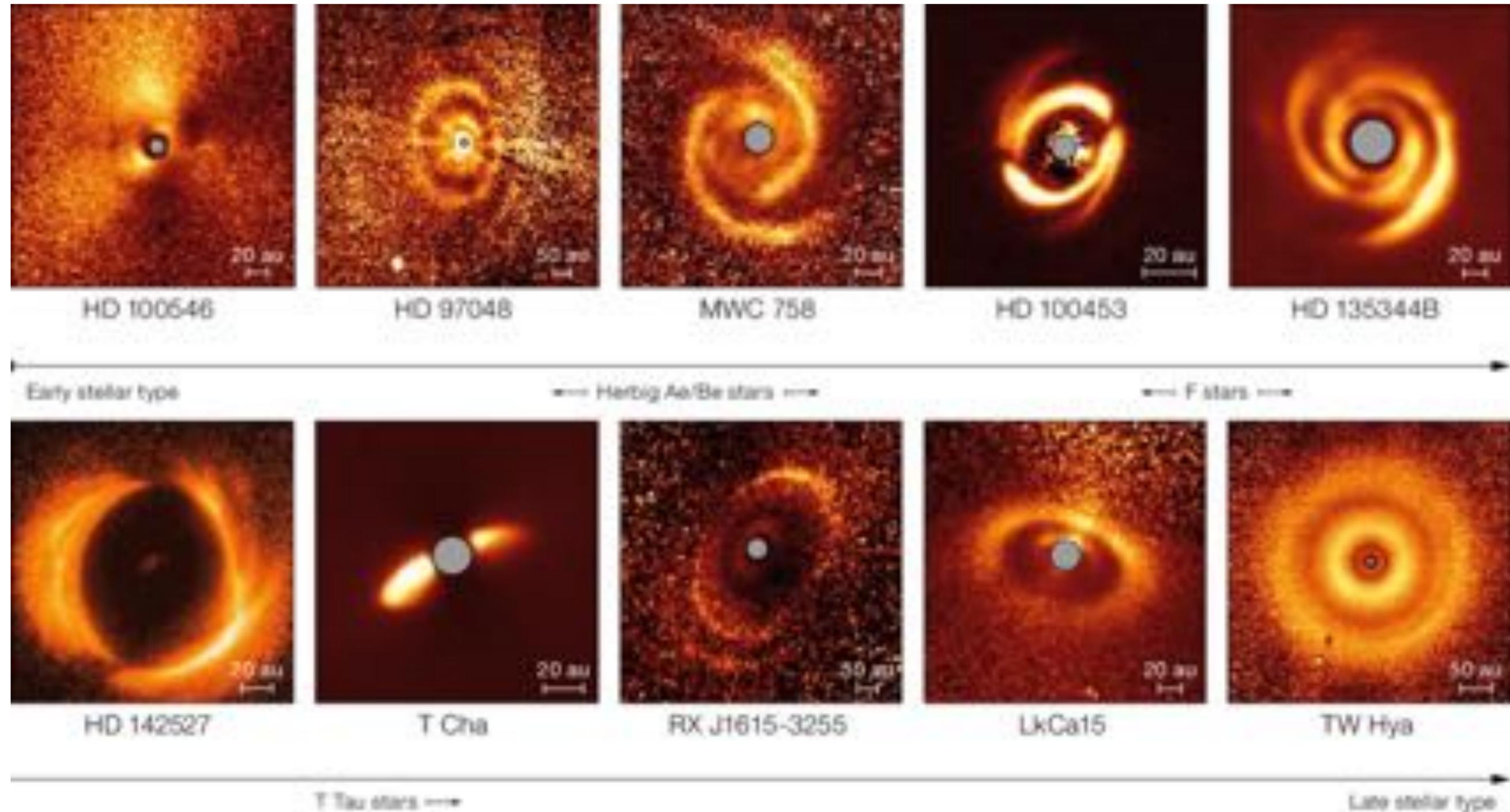
Observation d'un disque jeune (AB Aurigae)



Orbite de Neptune



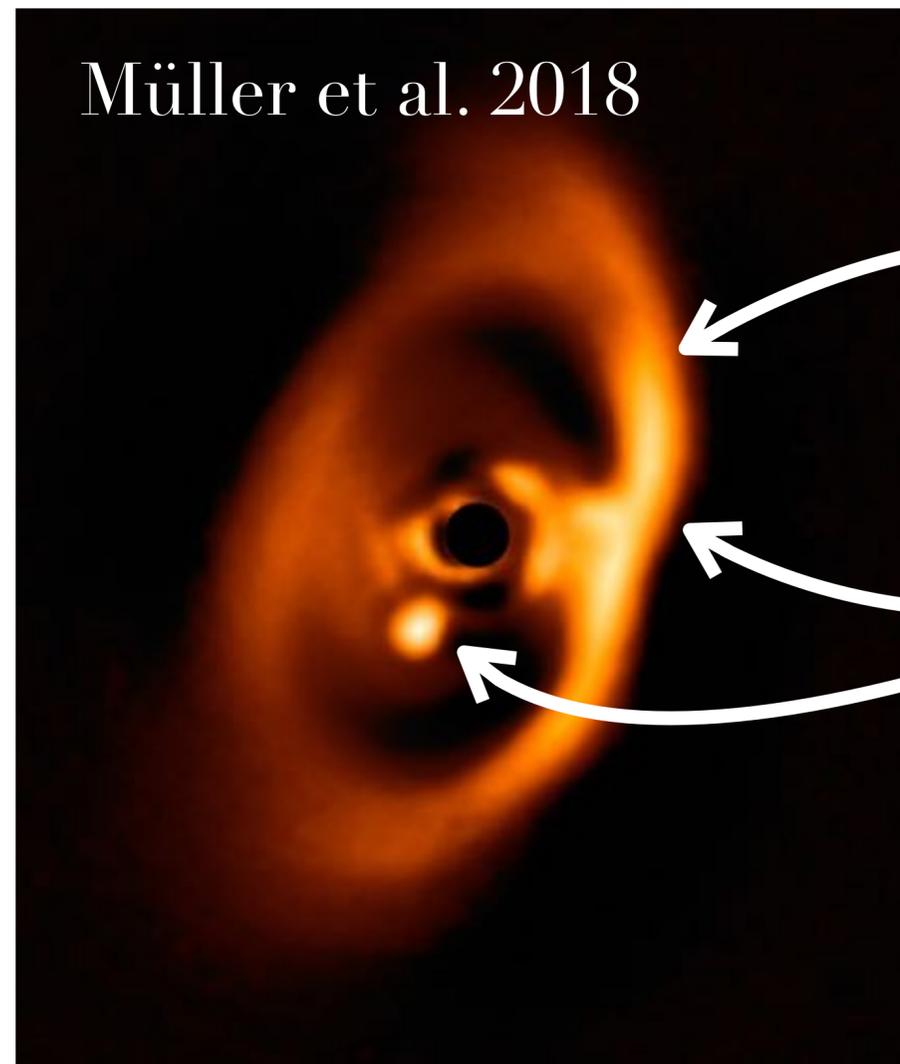
Toujours plus de disques



Deux planètes en pleine croissance

PDS 70 observée avec VLT/SPHERE (NIR) et VLT/MUSE (visible)

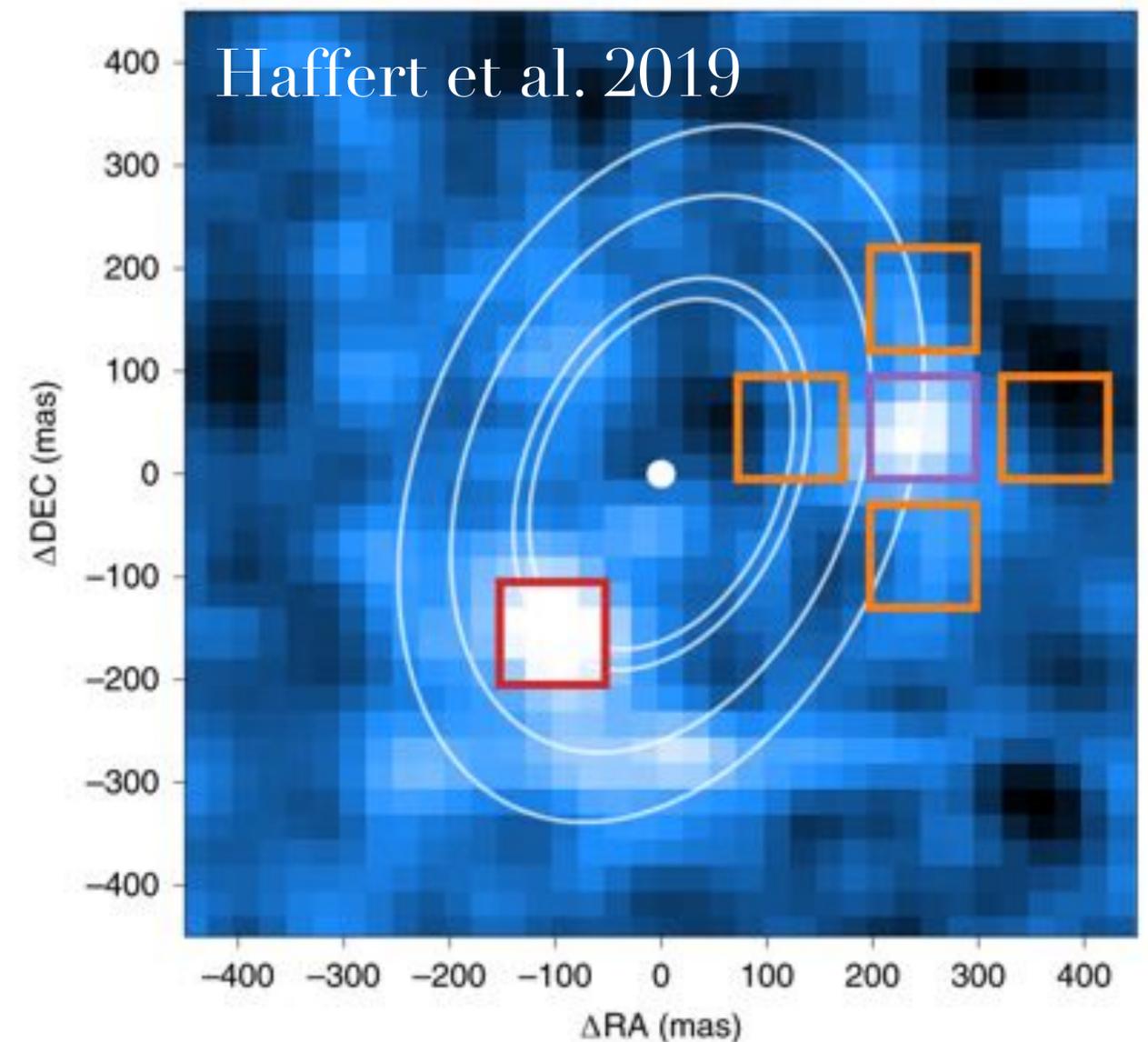
Image coronographique



Disque de formation
(gaz & poussières)

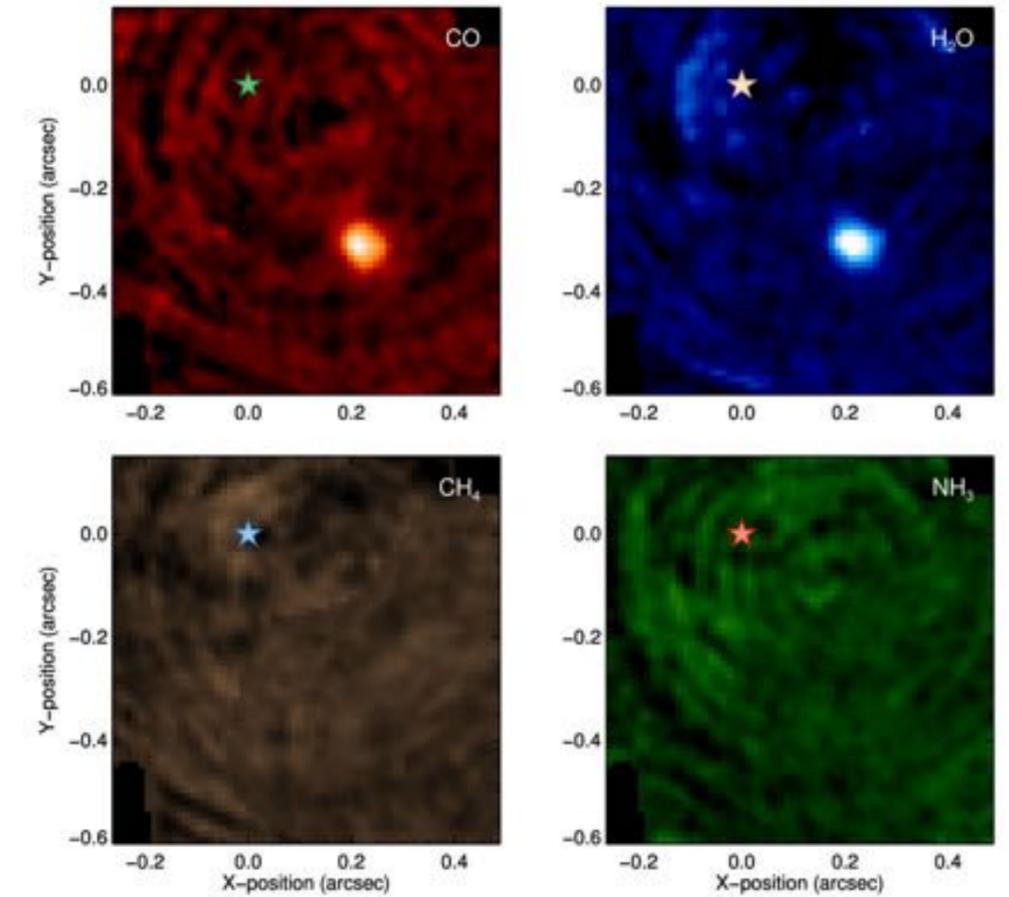
Planètes b et c

Détection de l'accrétion de l'hydrogène

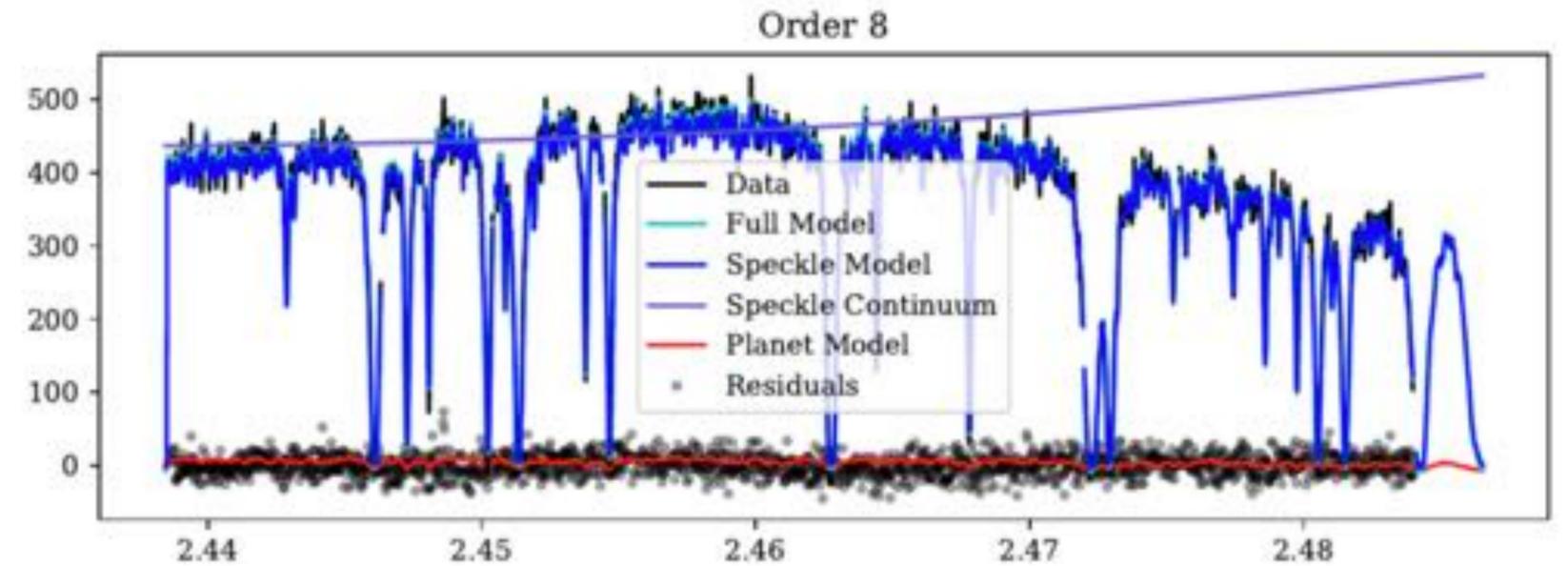
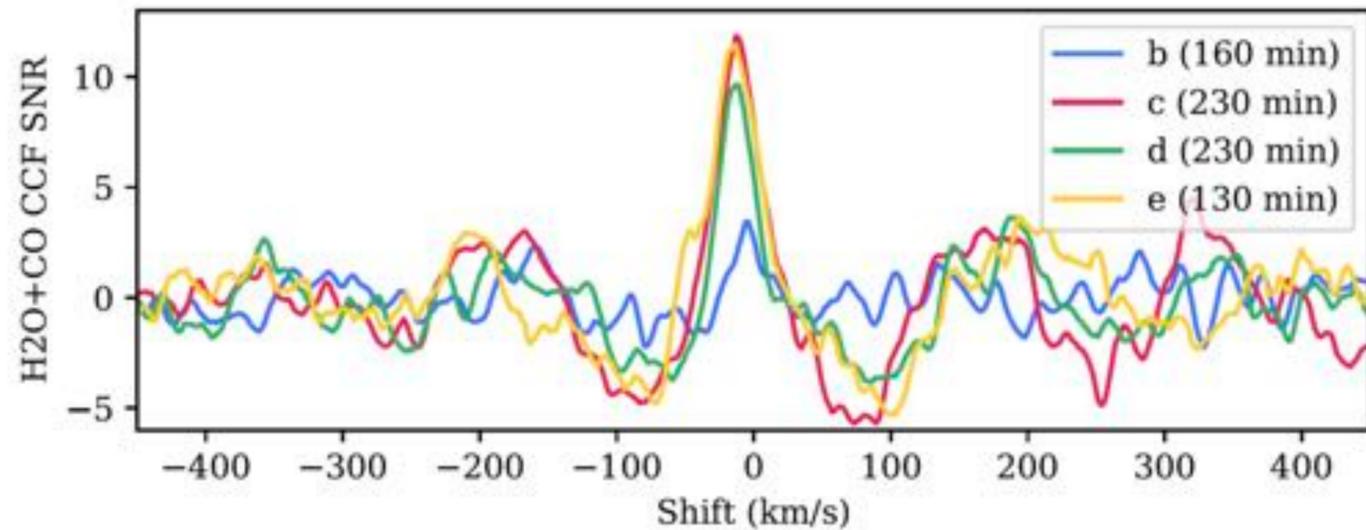


Haute résolution spectrale

Détection de CO et de H₂O par cross-corrélation spectrale, et non-détection de CH₄ et de NH₃ (Hoeijmakers et al. 2018)

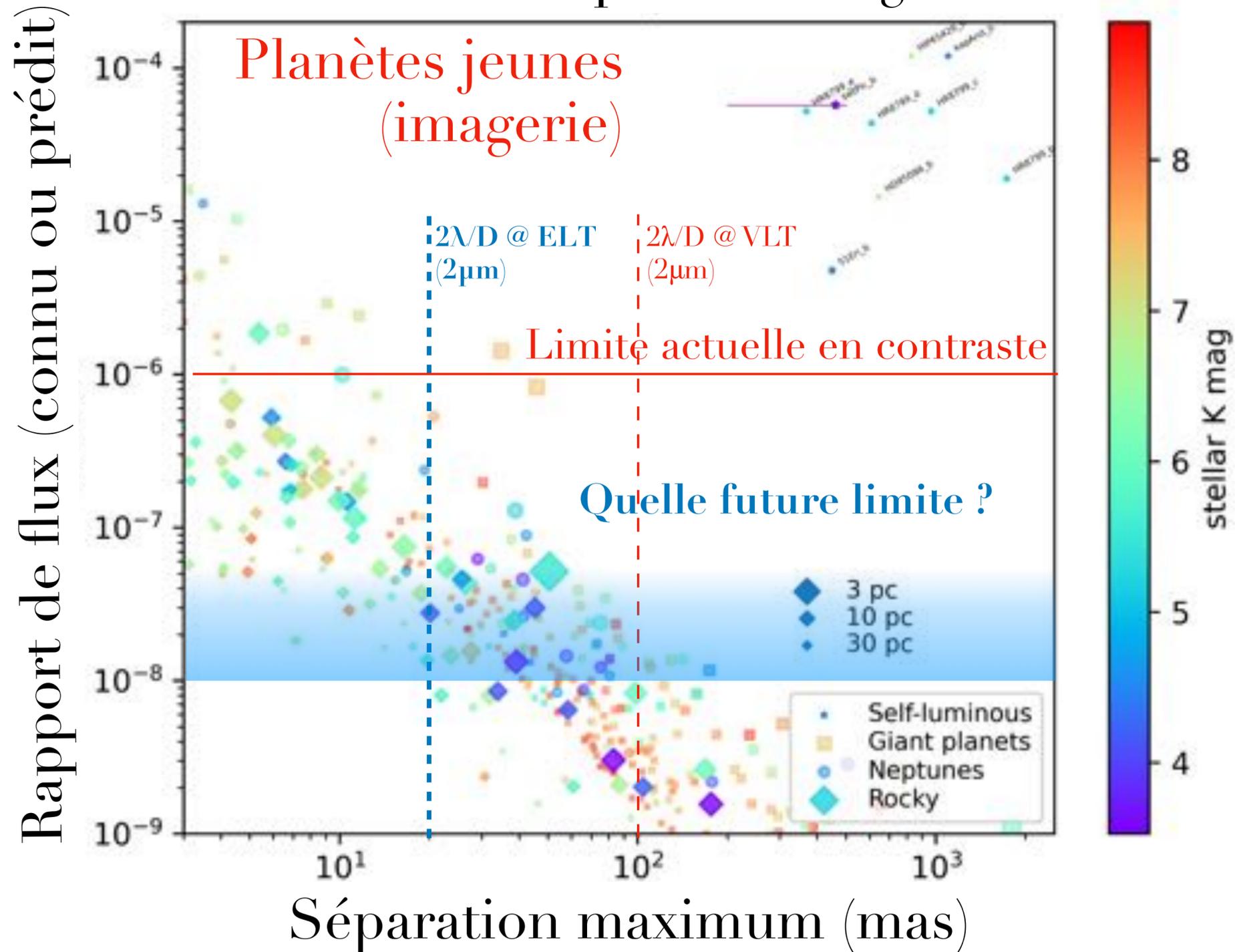


Détection de CO et de H₂O par cross-corrélation spectrale, et spectre extrait (Wang et al. 2021)



VI - Et maintenant ?

Contraintes observationnelles : flux relatif vs. séparation angulaire



$< 10^{-6}$: probablement grâce à :

- (1) une meilleure OA
- (2) la cross-corrélation spectrale

$< 10^{-8}$: probablement depuis l'espace

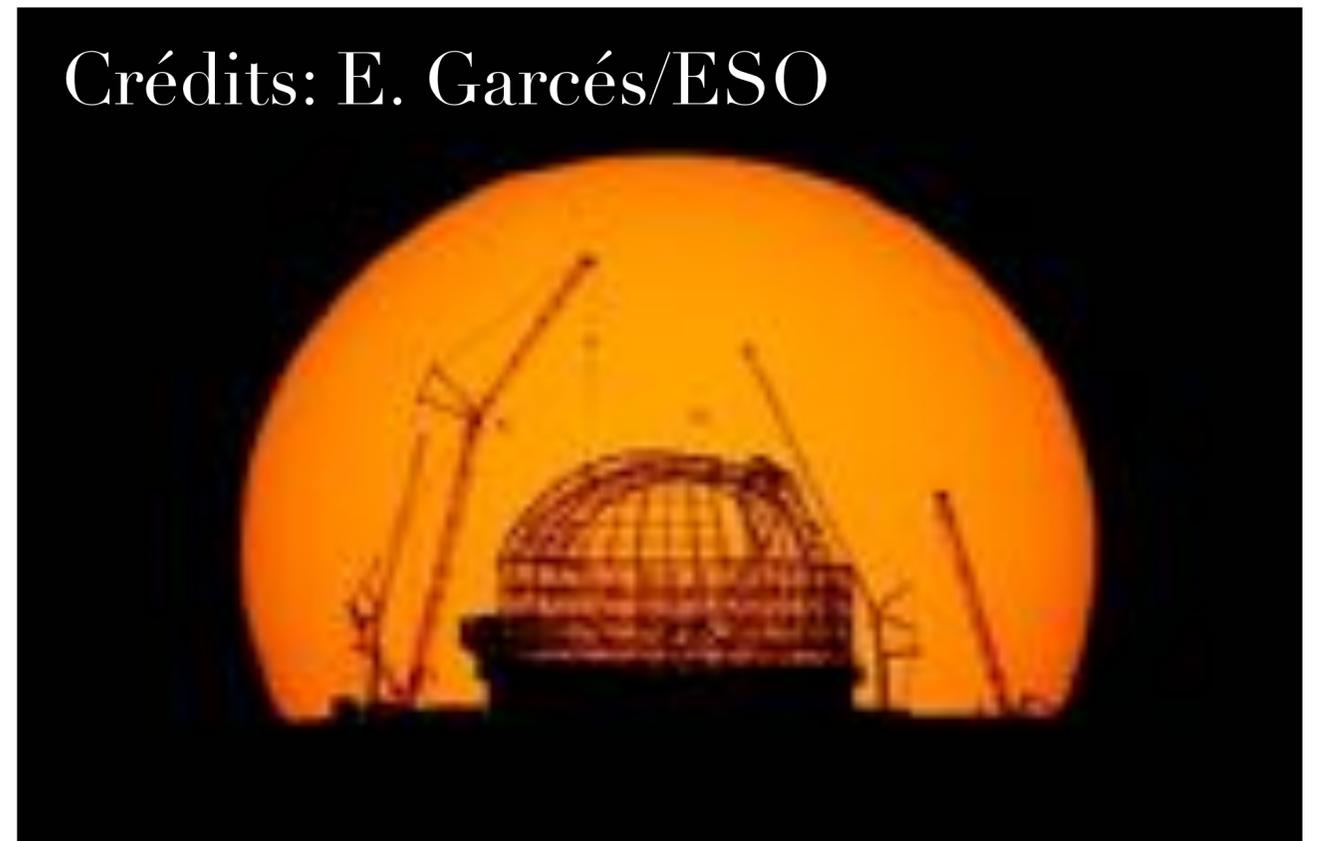
L'Extremely Large Telescope de l'ESO

Plus grand télescope optique au monde : 39m de diamètre

Fortement segmenté : 798 hexagones de 1.5m, tous réalisés

3 instruments de 1^{ère} lumière, tous équipés de coronographes

Premières observations scientifiques en 2029 (?)

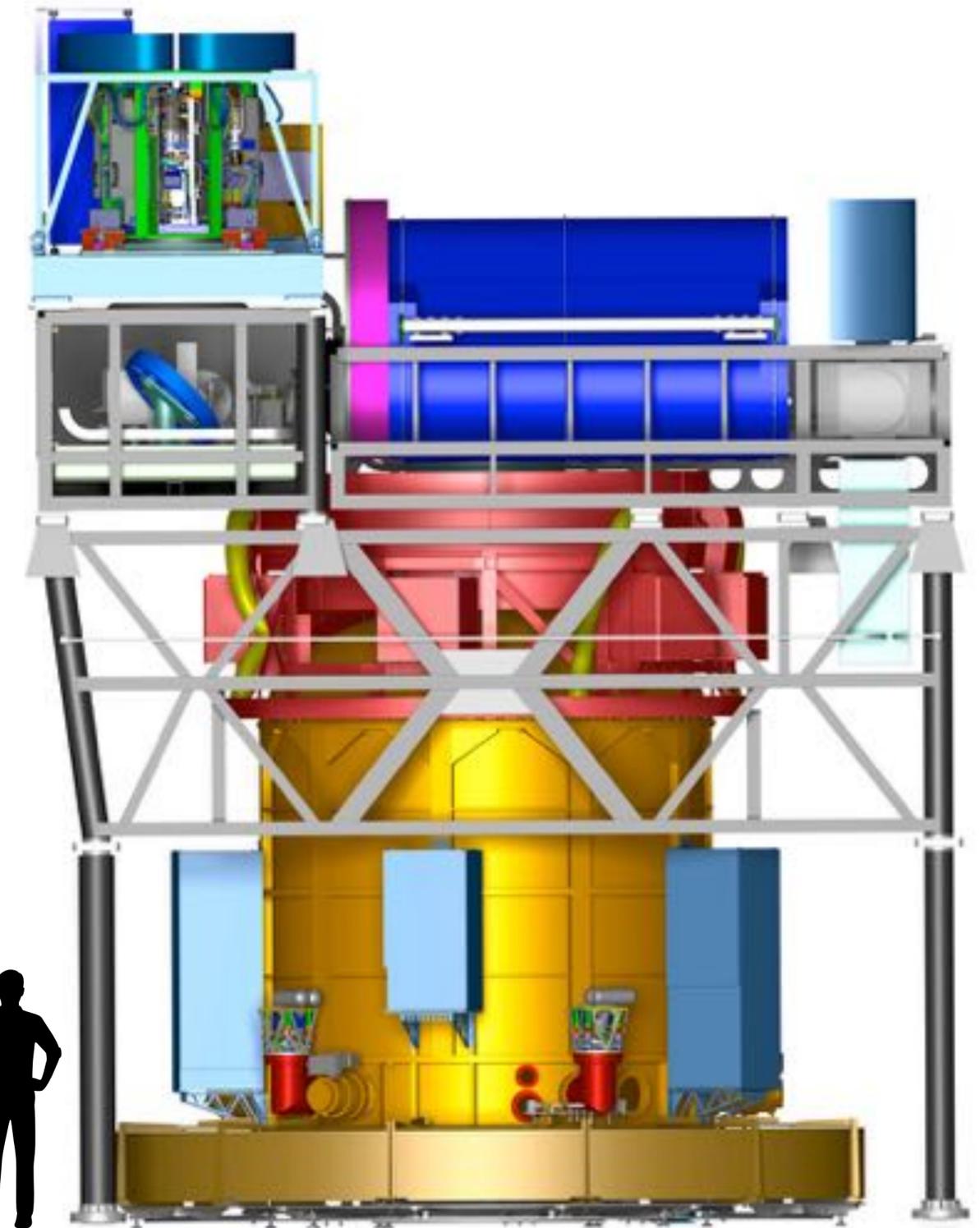
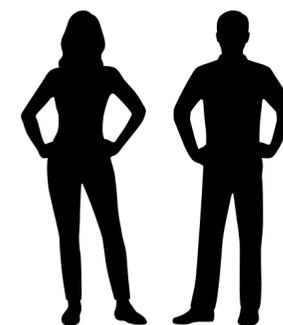
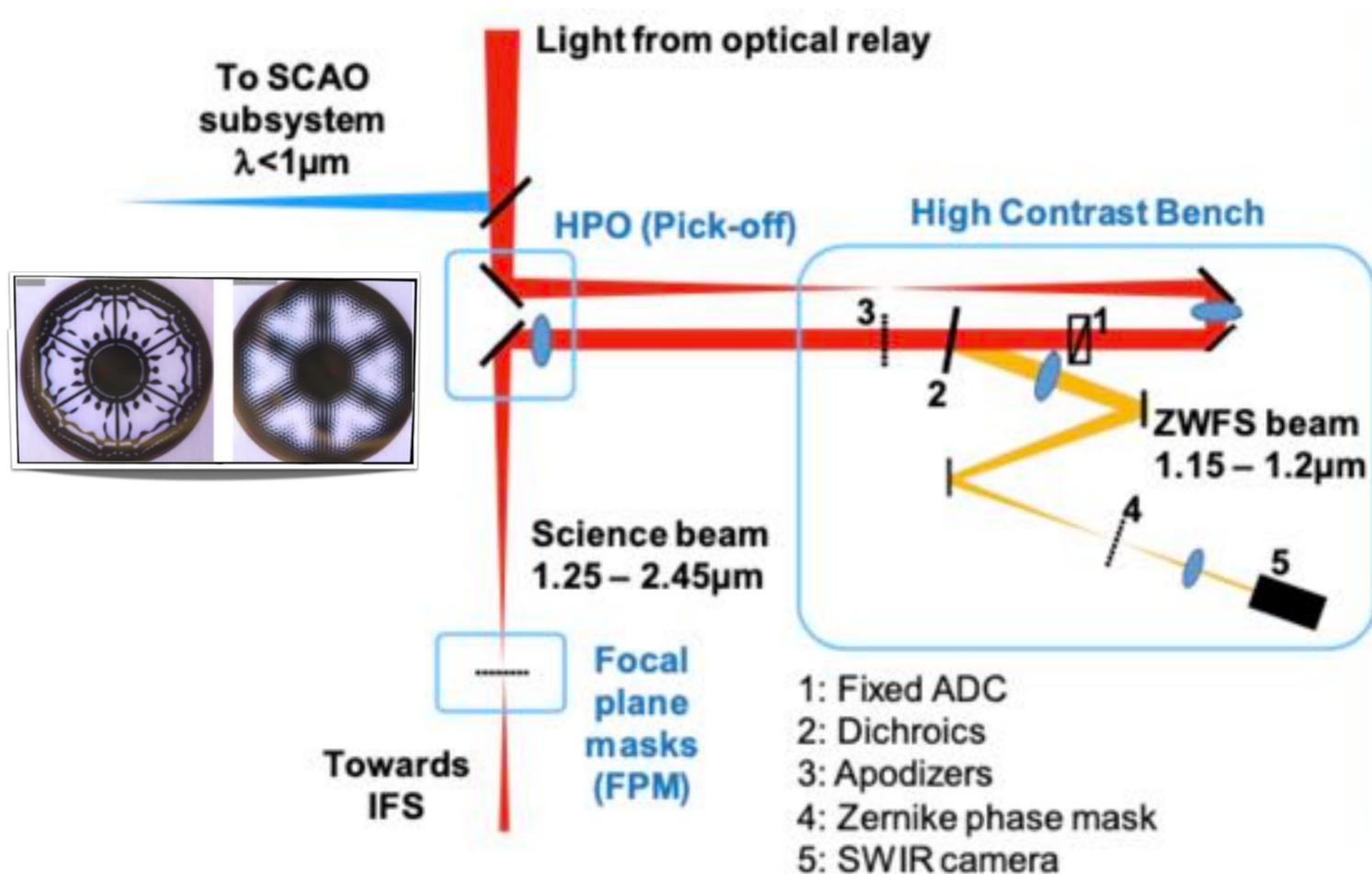


ELT/HARMONI

Prévu pour 2031 (?)

Spectrographe intégral de champ : 0.5-2.5 μm

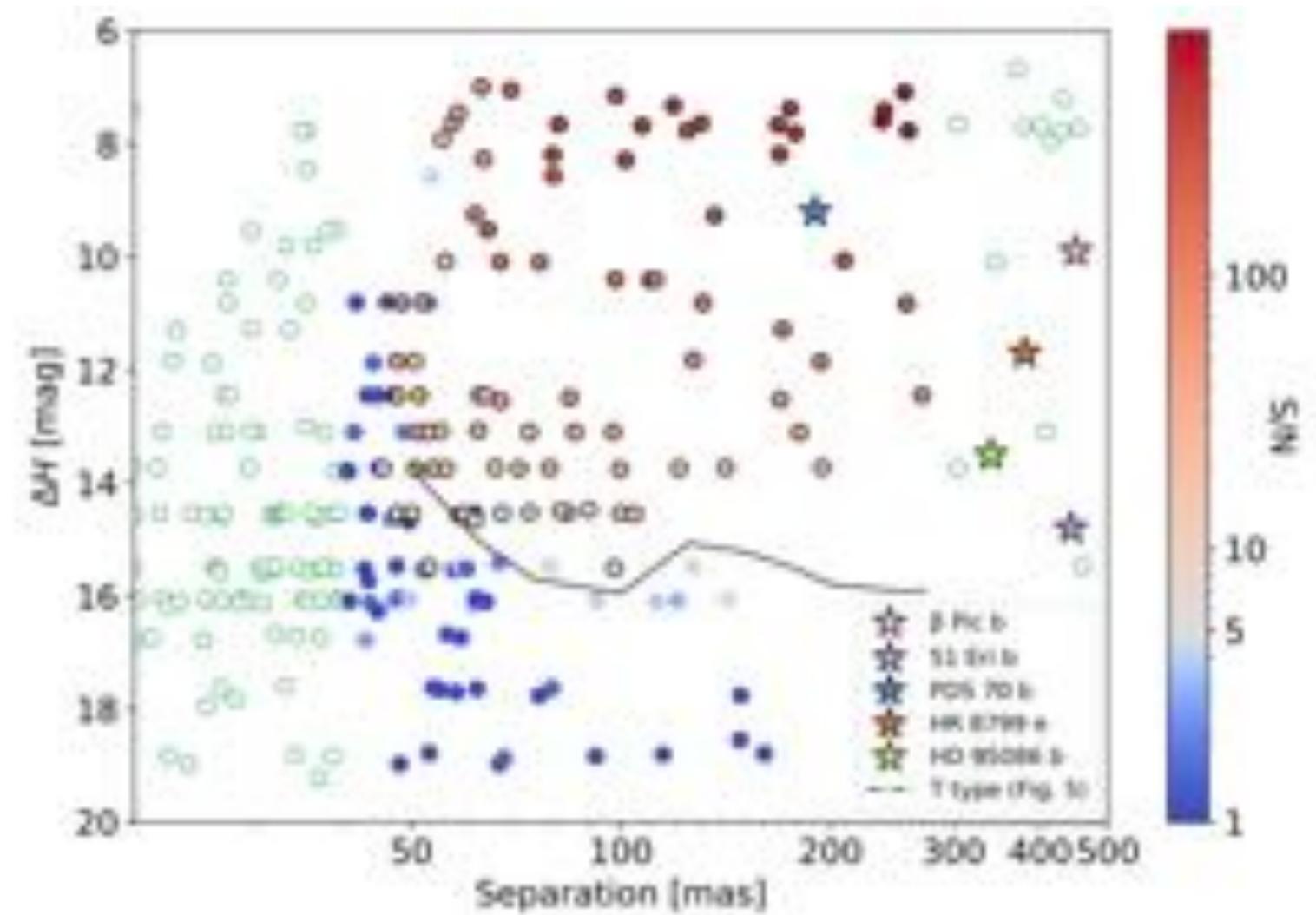
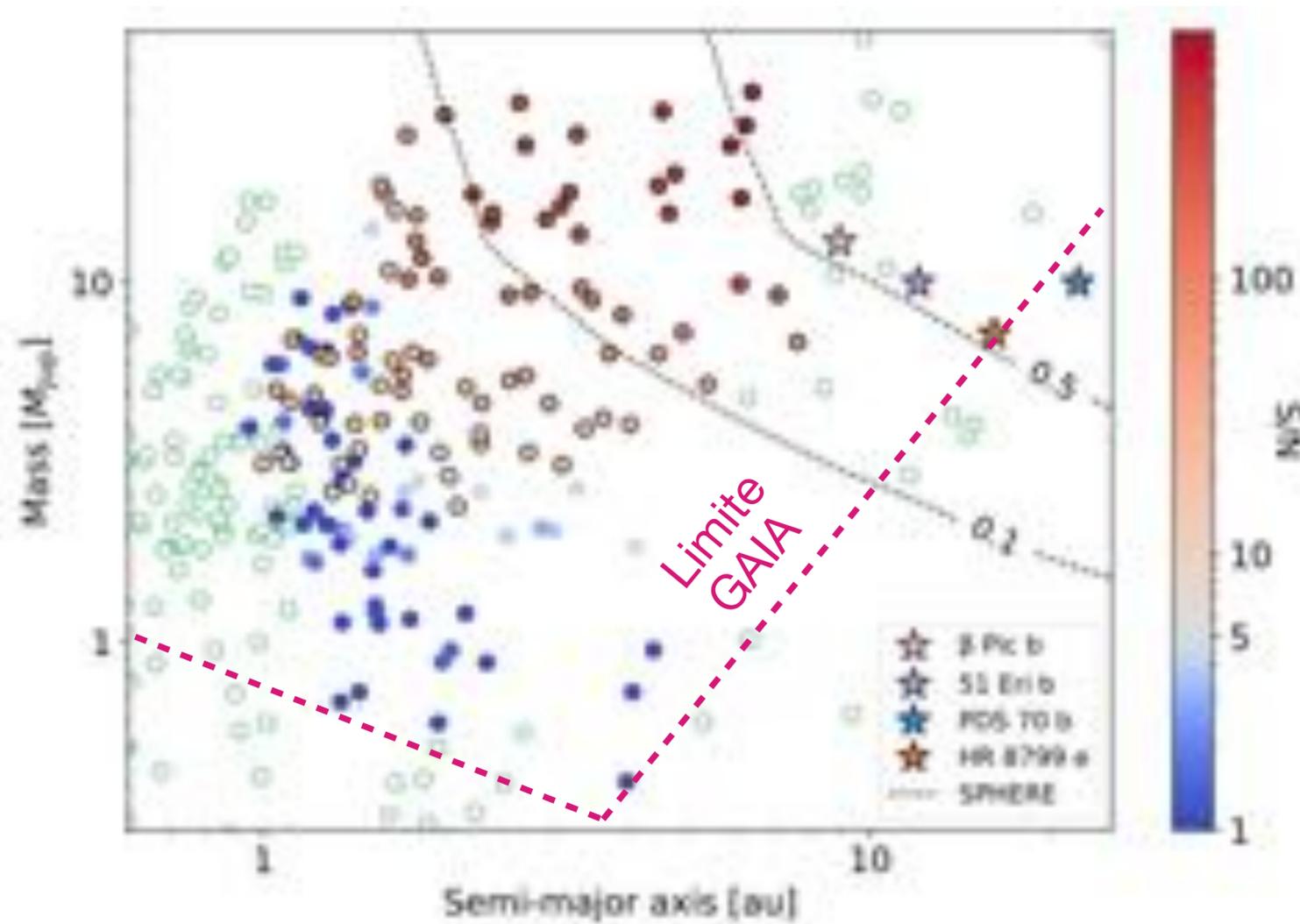
Mode coronographique de 1.2 à 2.5 μm (IPAG)

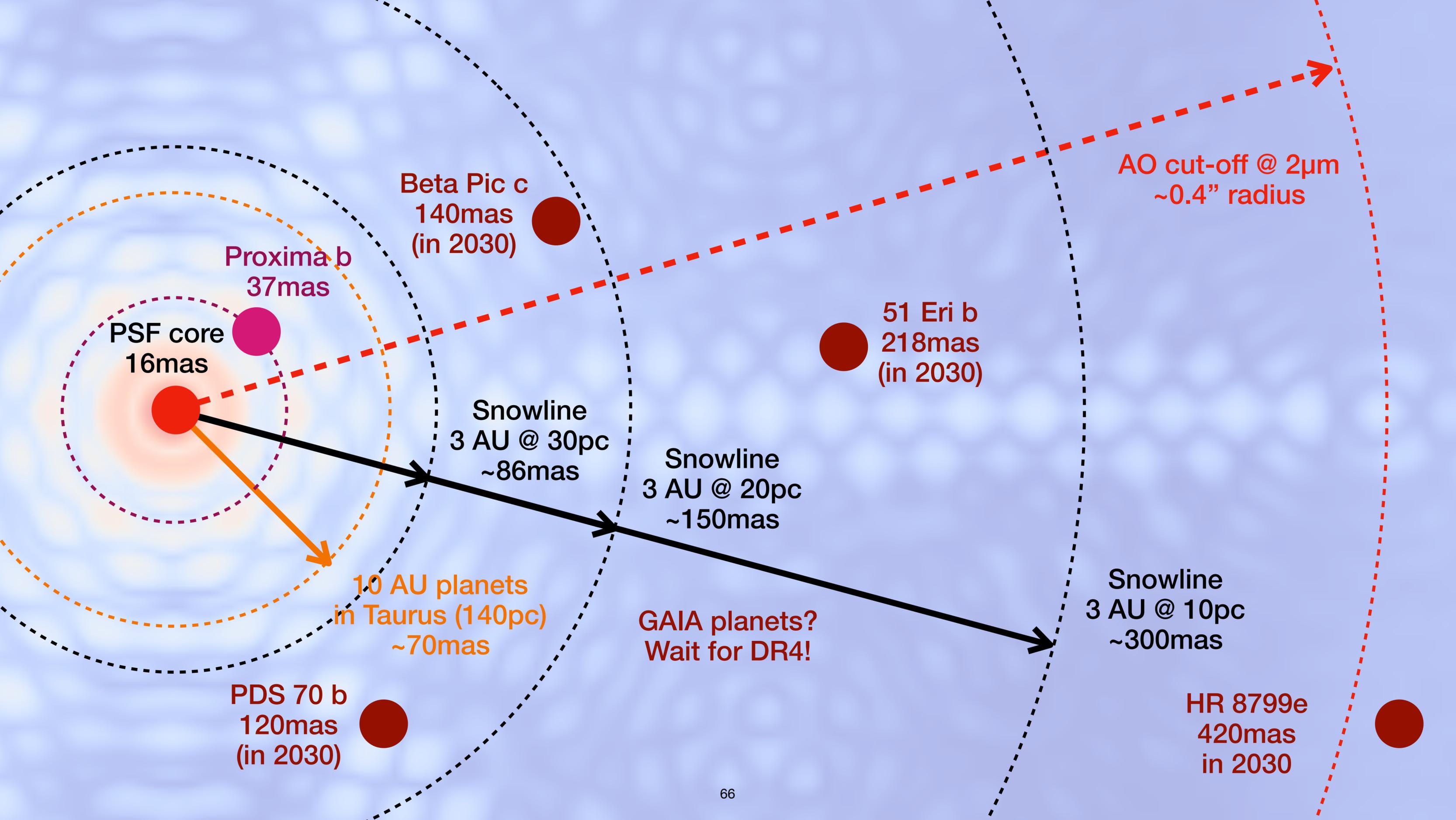


ELT/HARMONI

Des planètes jeunes de 2-3 M_{Jup} à seulement 1AU autour d'étoiles à 20pc

Une grande complémentarité avec GAIA

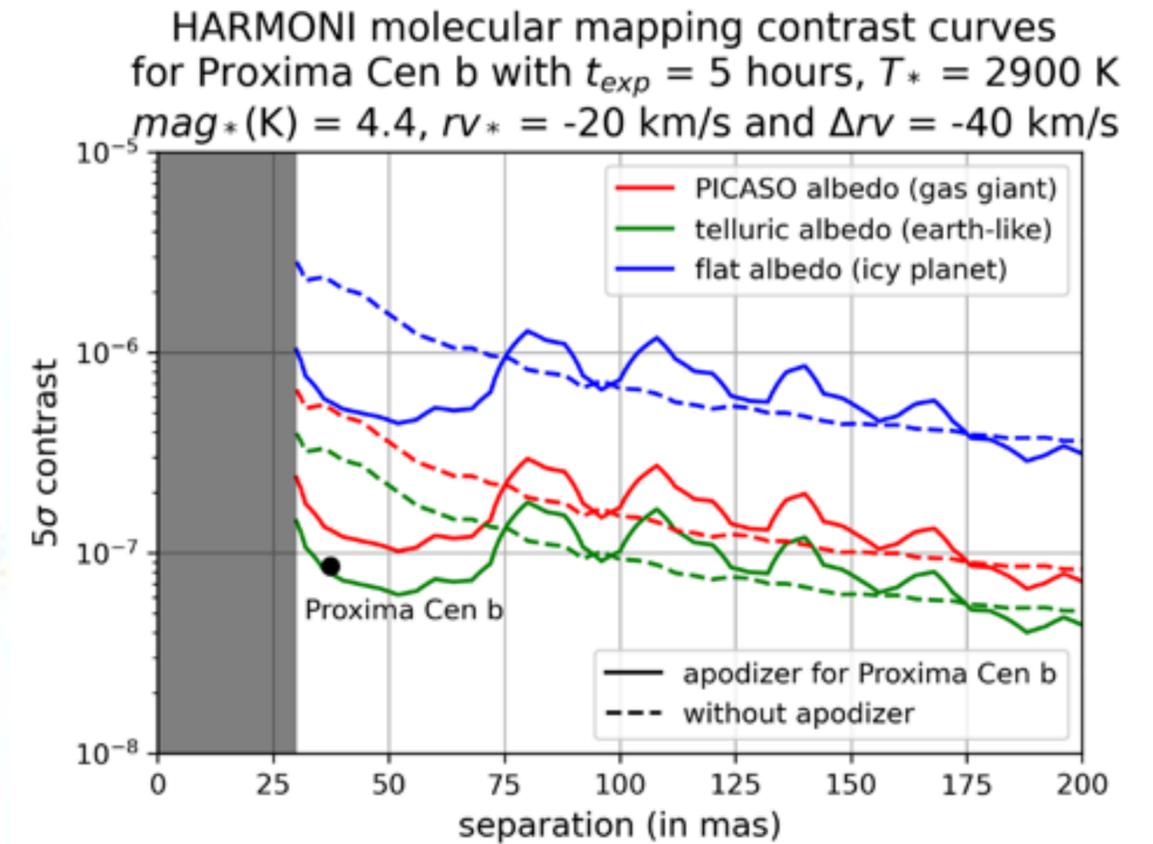
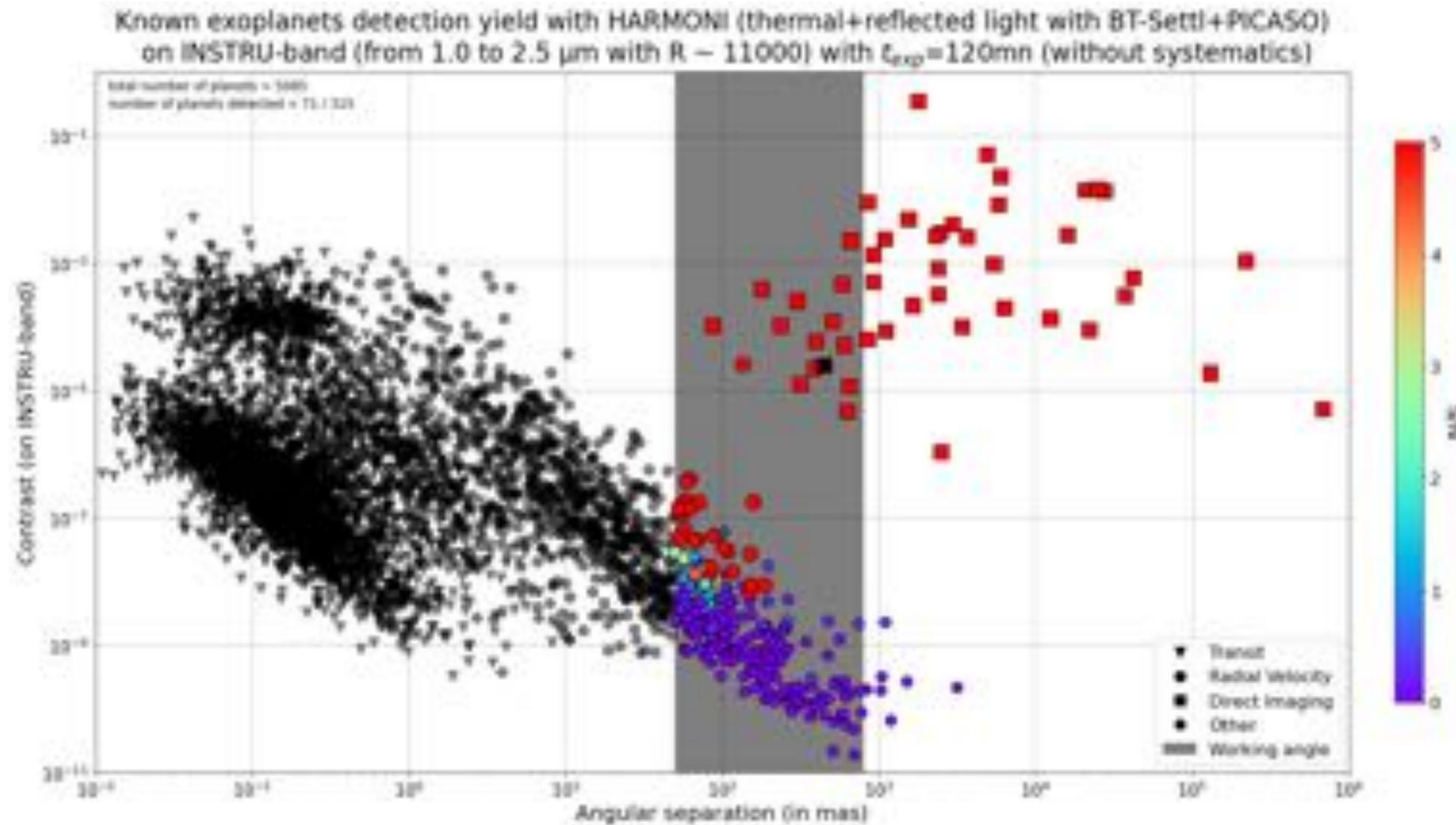




ELT/HARMONI



Et peut-être des planètes âgées, y compris des planètes rocheuses (?)





Crédits : ESO/M. Kommesser

~ **Fin** ~