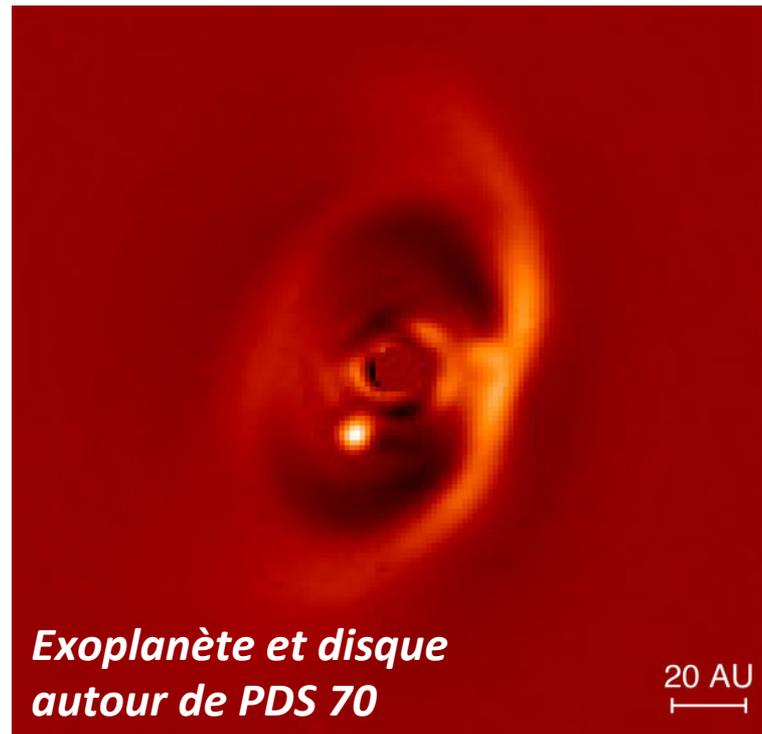


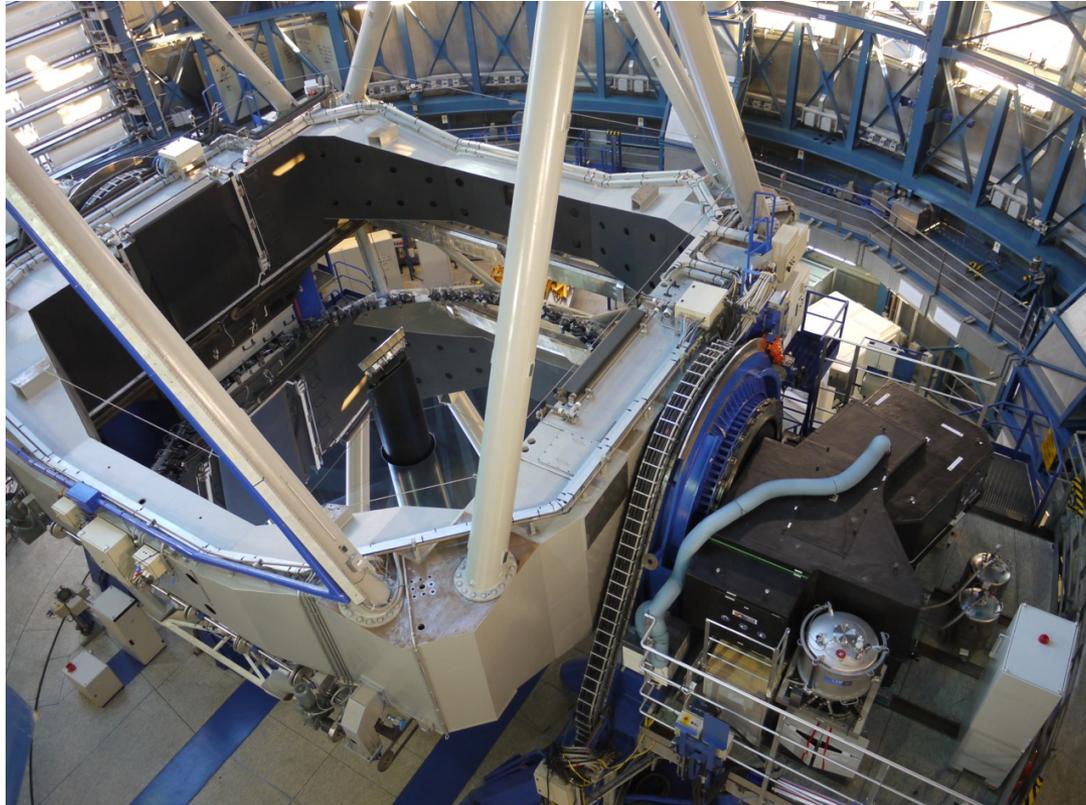
Quels instruments pour l'imagerie d'exoplanètes ?



Faustine Cantalloube
Max Planck Institute for Astronomy, Heidelberg



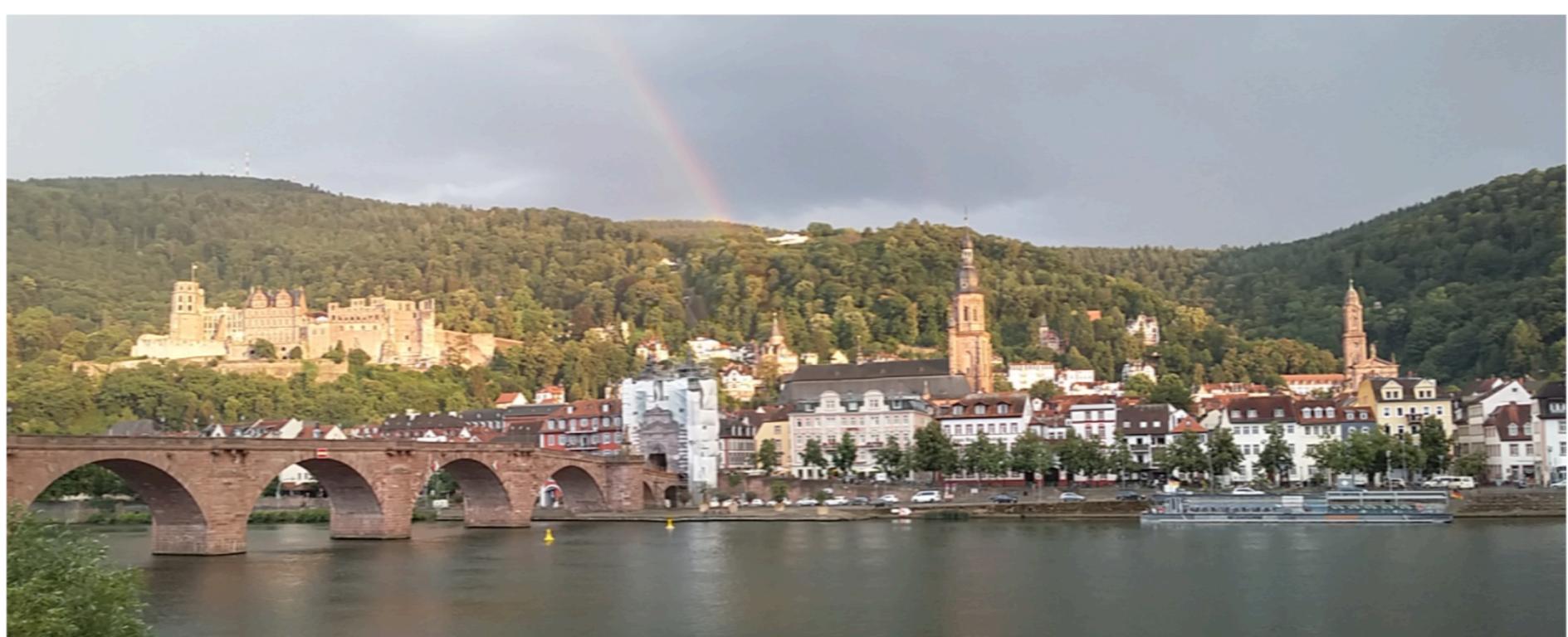
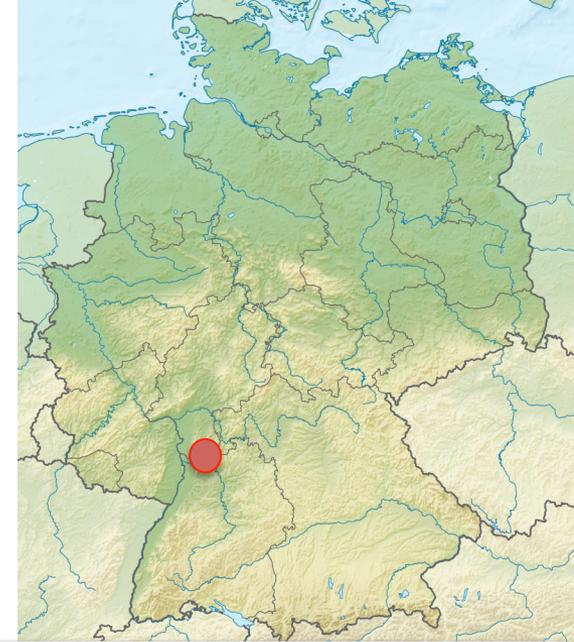
Que se cache-t-il dans cette grosse boîte noire ?



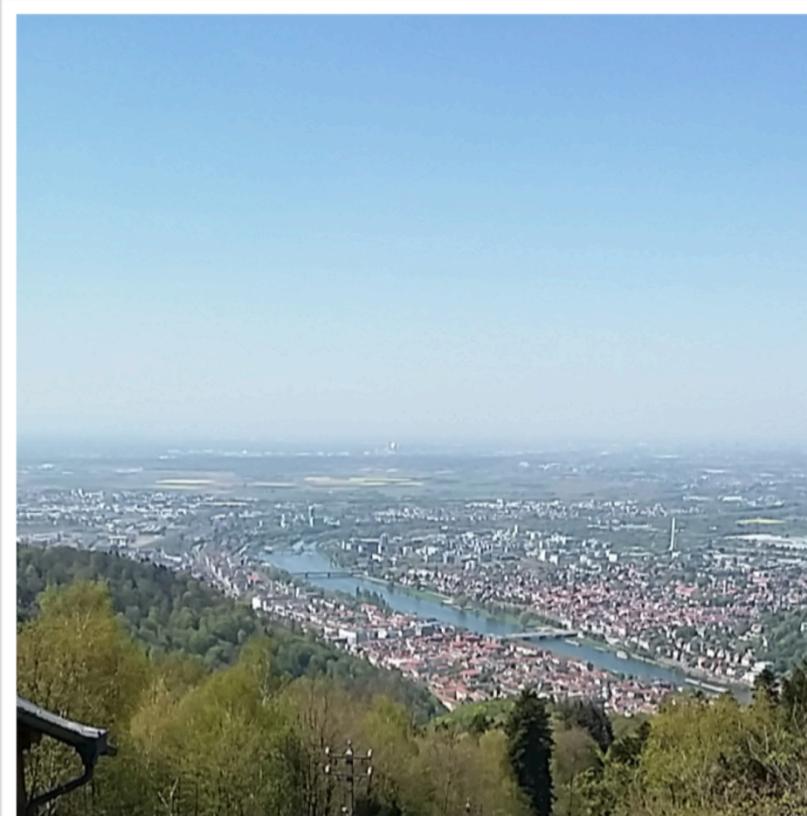
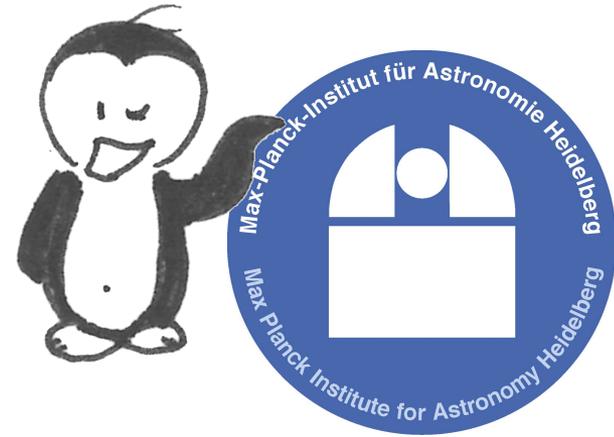
Instrument **SPHERE** au Very Large Telescope (VLT),
Observatoire de Paranal, Atacama, *Chili*

Heidelberg

Baden-Württemberg,
Allemagne



L'institut Max Planck Astronomie Königstuhl, Heidelberg





Définir une exoplanète

“Planète située en dehors de notre système solaire”

Définition de l’UAI (2006):

Une “**planète**” est un corp céleste qui :

- a) Est en orbite autour du Soleil,
- b) Est suffisamment massif pour que sa gravitation \gg les forces électrostatiques,
- c) A nettoyé des petits corps, le voisinage de son orbite,
- d) N’est pas un satellite.

<https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau0603/>

Définition de l’UAI (2003):

Une “**naine brune**” un objet substellaire dont :

- a) La masse $<$ à la masse pour démarrer la fusion de l’hydrogène ($<0.07 M_{\text{solaire}}$)
- b) La masse $>$ à celle nécessaire pour démarrer la fusion du deutérium

→ Pas de consensus sur la limite inférieure,
entre planète et naine brune (de 13 à $75 M_{\text{jupiter}}$)

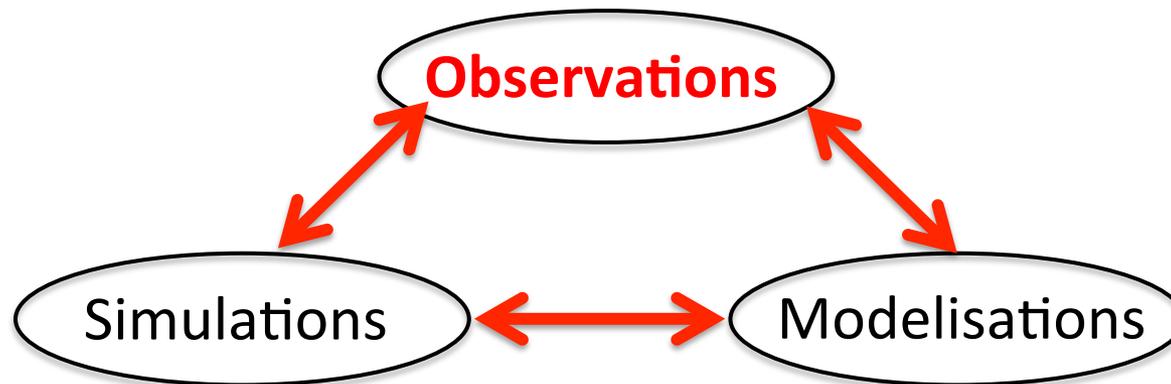




Les grandes questions des exoplanètes

- **Formation** des planètes
- **Nature** des exoplanètes
- **Évolution** dynamique et physique des planètes

Pour y répondre, les astronomes ont trois outils :

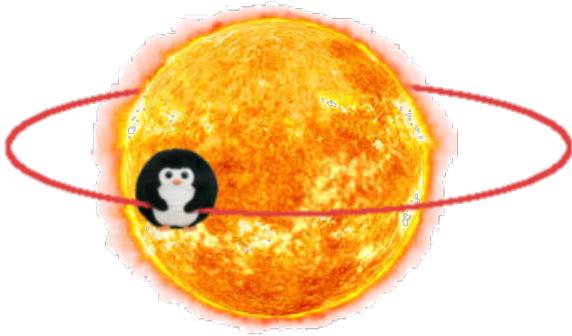




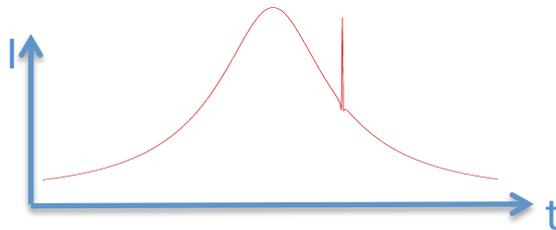
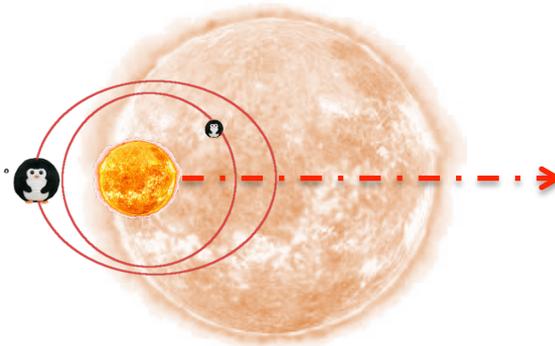
Détecter des exoplanètes

Il existe aujourd'hui **4 méthodes** majeures de détection autour d'**étoiles jeunes**

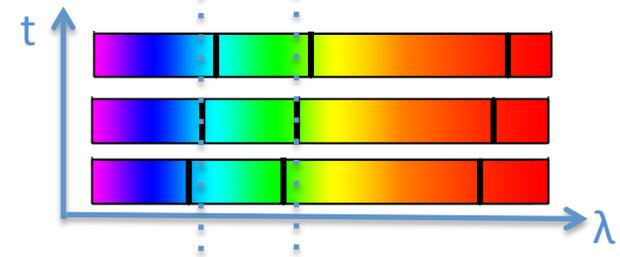
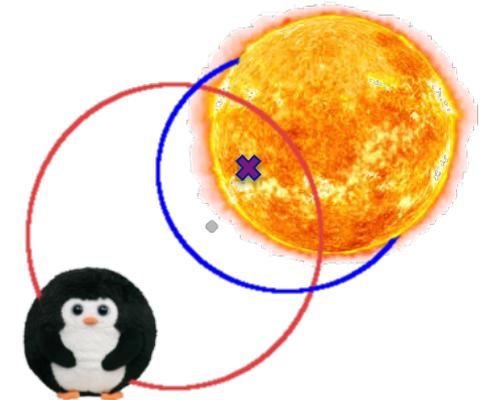
Méthode des transits



Méthode des microlentilles gravitationnelles



Méthode des vitesses radiales



Les 3 méthodes dites “indirectes”

L'imagerie d'exoplanètes

Rappel: les questions

- **Formation** des planètes
- **Nature** des exoplanètes
- **Évolution** dynamique
- **Évolution** physique

L'imagerie d'exoplanètes

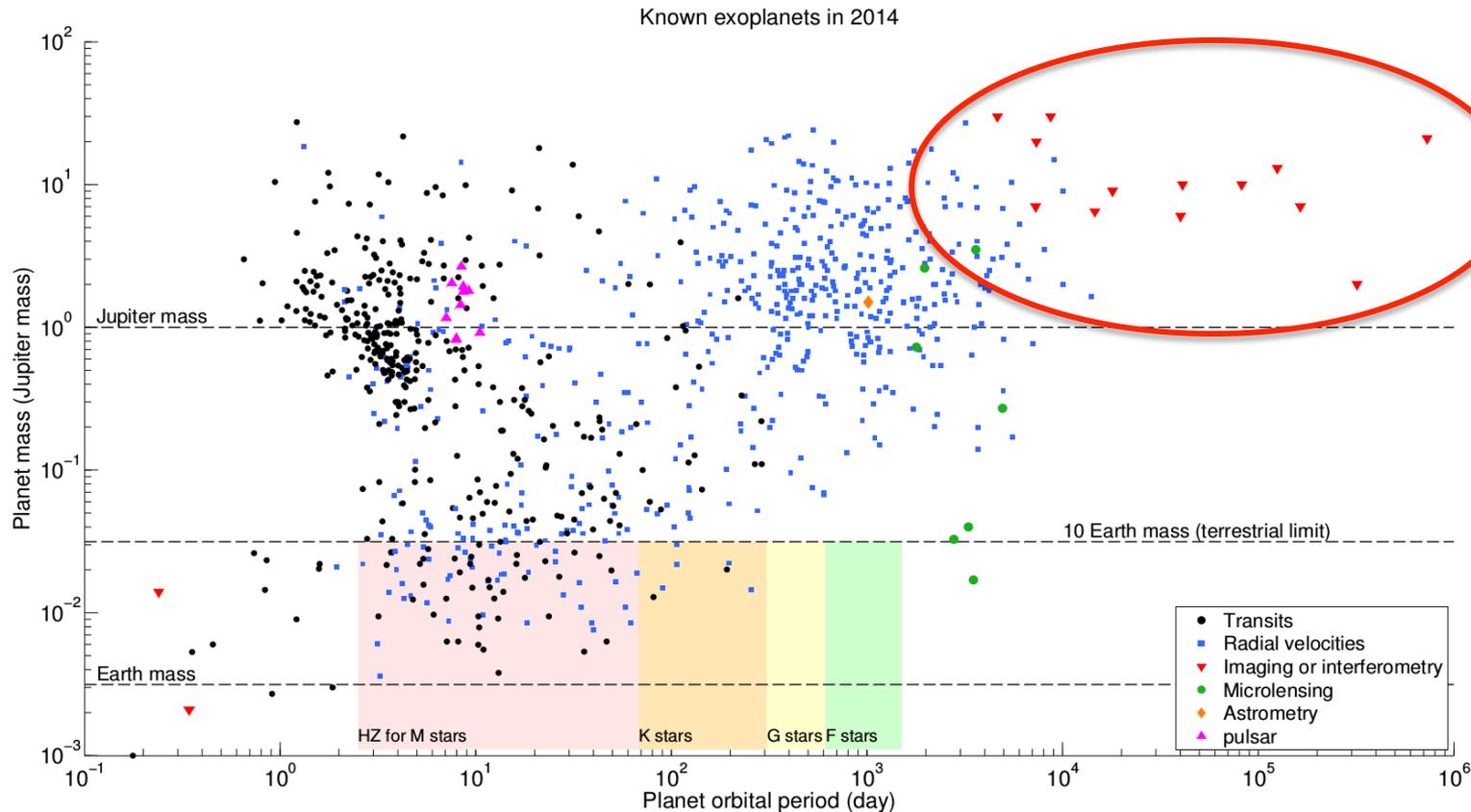
- **Complémentaire** des autres méthodes:
Étoile hôte très **jeunes**

Planètes **massives** (1-70 Masse Jupiter)

Grandes **distance** (50 – 1000 Unités Astronomiques)

Rappel: les questions

- **Formation** des planètes
- **Nature** des exoplanètes
- **Évolution** dynamique
- **Évolution** physique

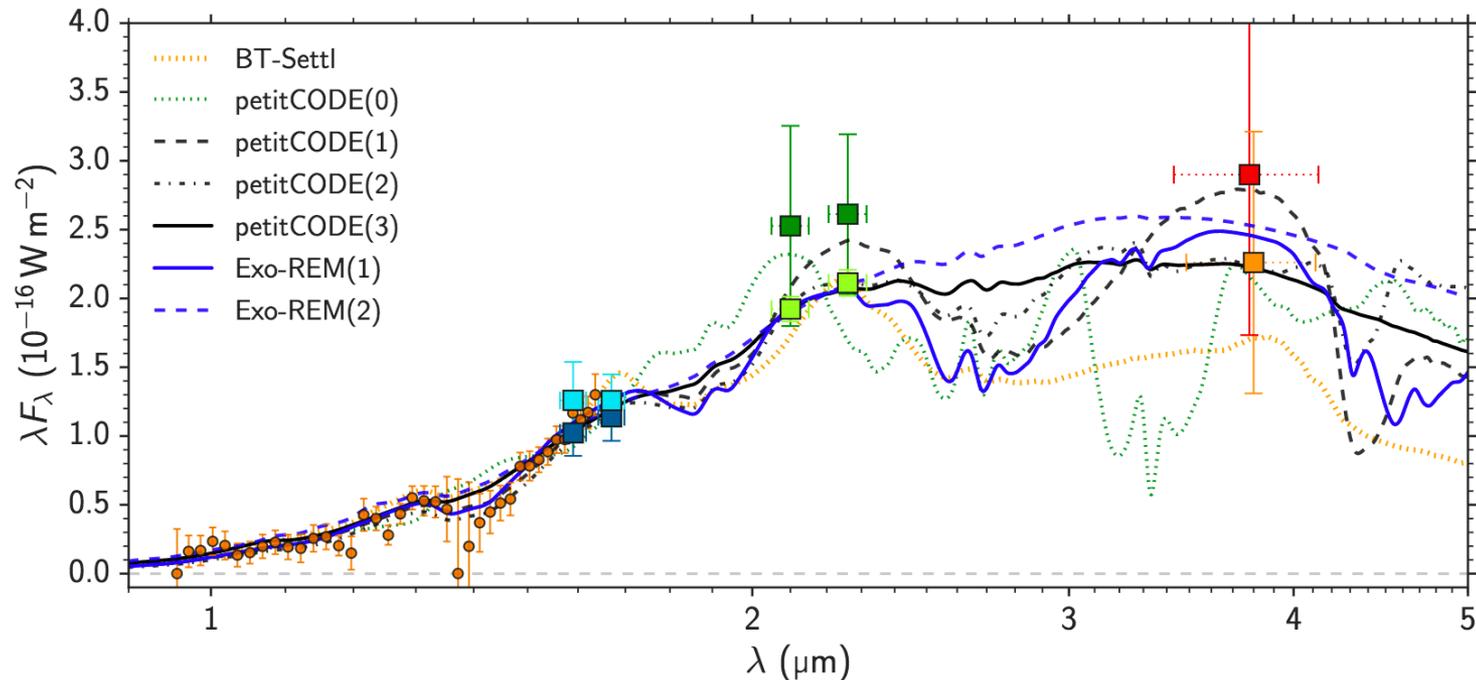


L'imagerie d'exoplanètes

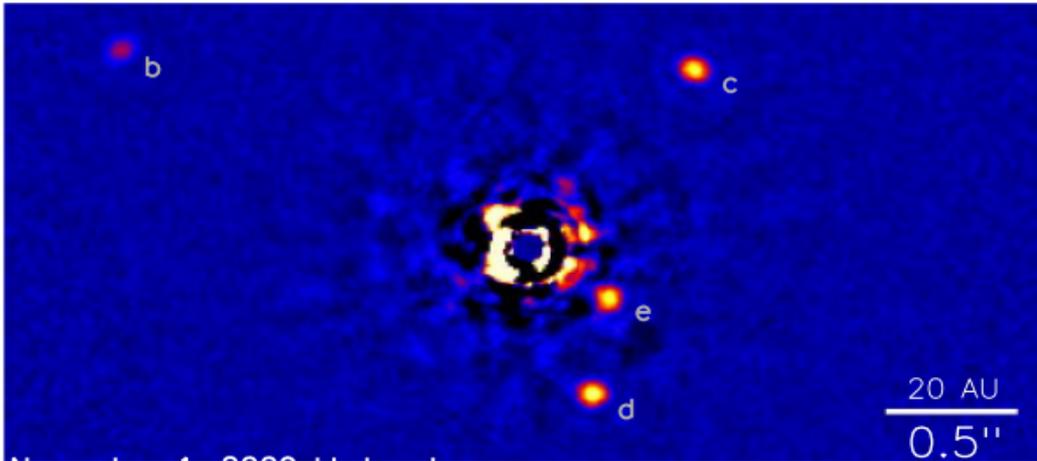
Rappel: les questions

- **Formation** des planètes
- **Nature** des exoplanètes
- **Évolution** dynamique
- **Évolution** physique

- Analyse directe du **spectre en émission** de la planète
Étude de sa **composition** atmosphérique (nuages, molécules)
Étude de sa **structure** atmosphérique (pression, température, courants)

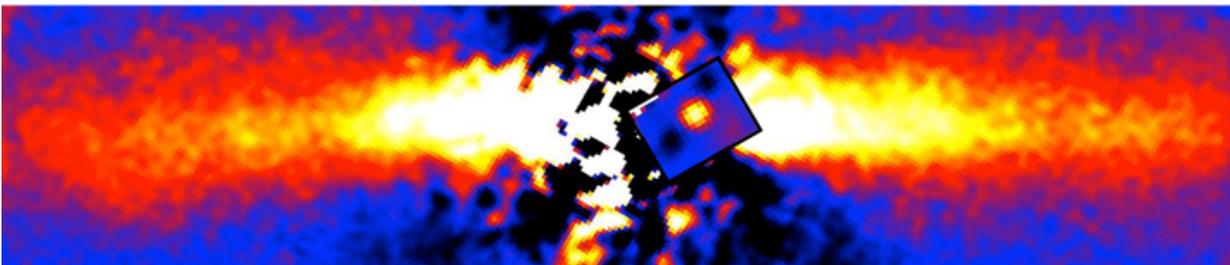


L'imagerie d'exoplanètes



Systeme quadruple HR8799

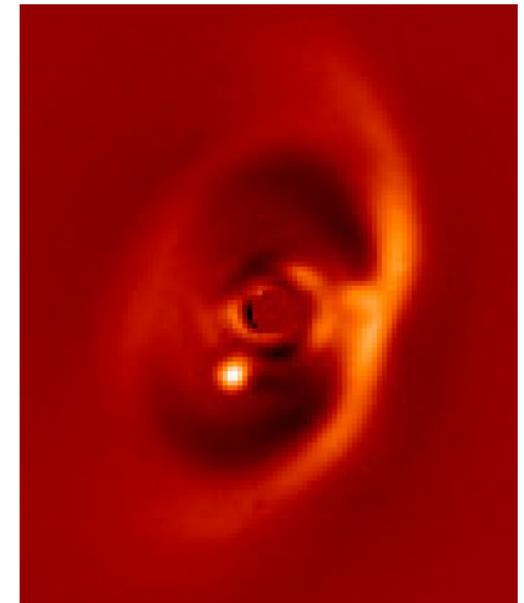
- Étude de l'**interaction** leur environnement
Disque protoplanétaire ou disque de débris
Interactions avec les autres planètes (stabilité...)



Disque de débris et sa planète autour de Beta Pictoris

Rappel: les questions

- **Formation** des planètes
- **Nature** des exoplanètes
- **Évolution** dynamique
- **Évolution** physique

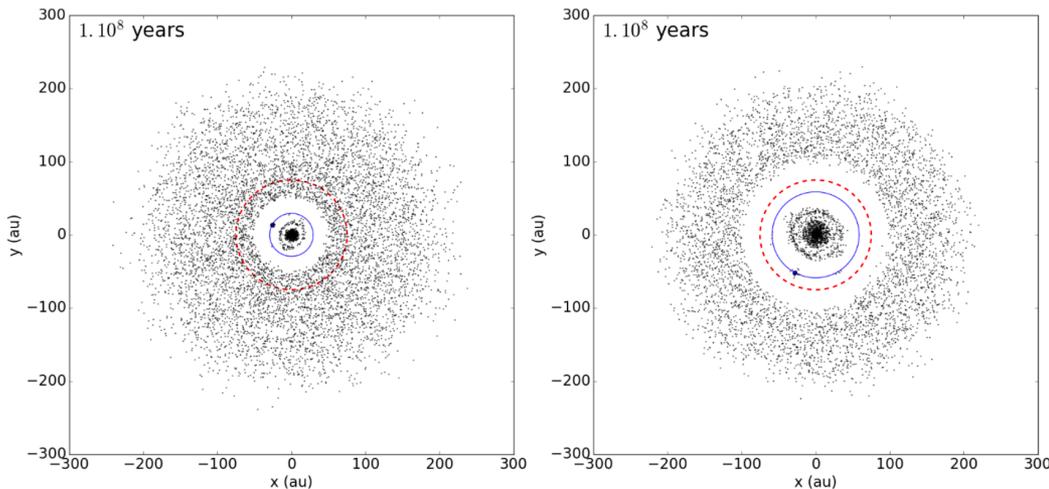


Disque protoplanétaire et sa planète autour de PDS70

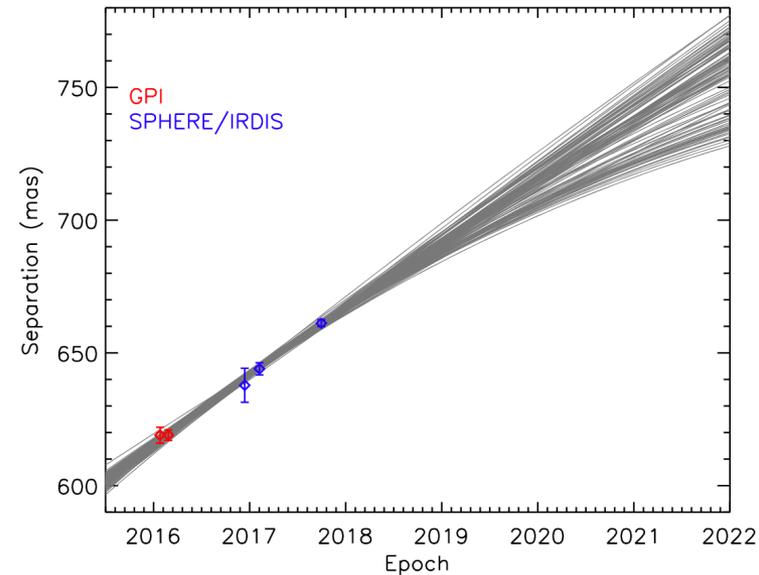
L'imagerie d'exoplanètes

Rappel: les questions

- **Formation** des planètes
- **Nature** des exoplanètes
- **Évolution** dynamique
- **Évolution** physique



Simulation de l'interaction avec les débris



Modélisation de l'évolution de la distance planète-étoile

- **Suivi** de l'orbite dans le temps
Estimation des **paramètres orbitaux**
Estimation de la **masse** dynamique

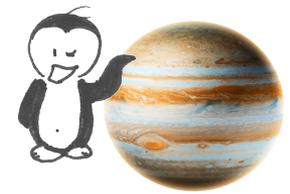
L'imagerie d'exoplanètes

- **Complémentaire** des autres méthodes
- Analyse directe du **spectre en émission** de la planète
- Étude de **l'interaction** leur environnement
- **Suivi** de l'orbite dans le temps

Rappel: les questions

- **Formation** des planètes
- **Nature** des exoplanètes
- **Évolution** dynamique
- **Évolution** physique

Pourquoi est-ce si difficile ?



Exemple de Jupiter :

Distance : 5 AU (période 11 ans)

→ Observation à 50pc: séparation **100 mas** !

Âge : 1 milliard d'année

→ **1 000 000 000** moins brillant que le Soleil !

Note#1, de la Terre:

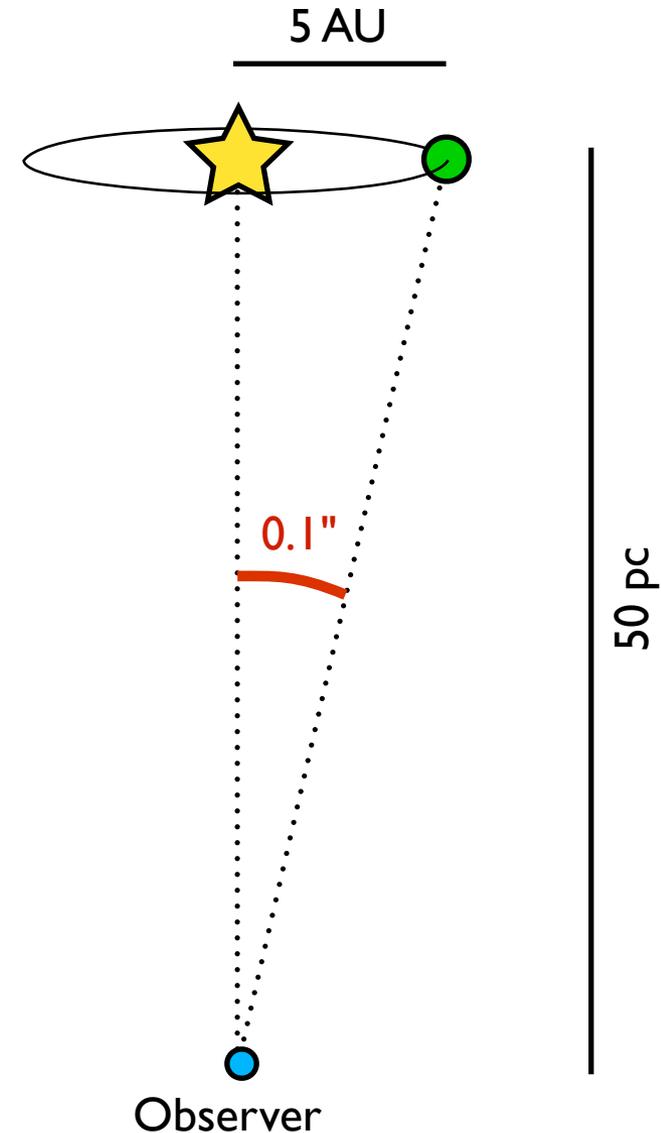
Distance de Proxima Cen

Note#2, vue de la Terre:

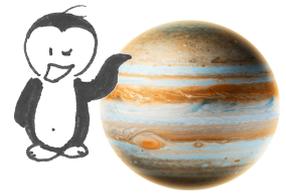
Résolution angulaire de la Lune

Résolution angulaire du Soleil

Résolution angulaire de Jupiter



Pourquoi est-ce si difficile ?



Exemple de Jupiter :

Distance : 5 AU (période 11 ans)

→ Observation à 50pc: séparation **100 mas** !

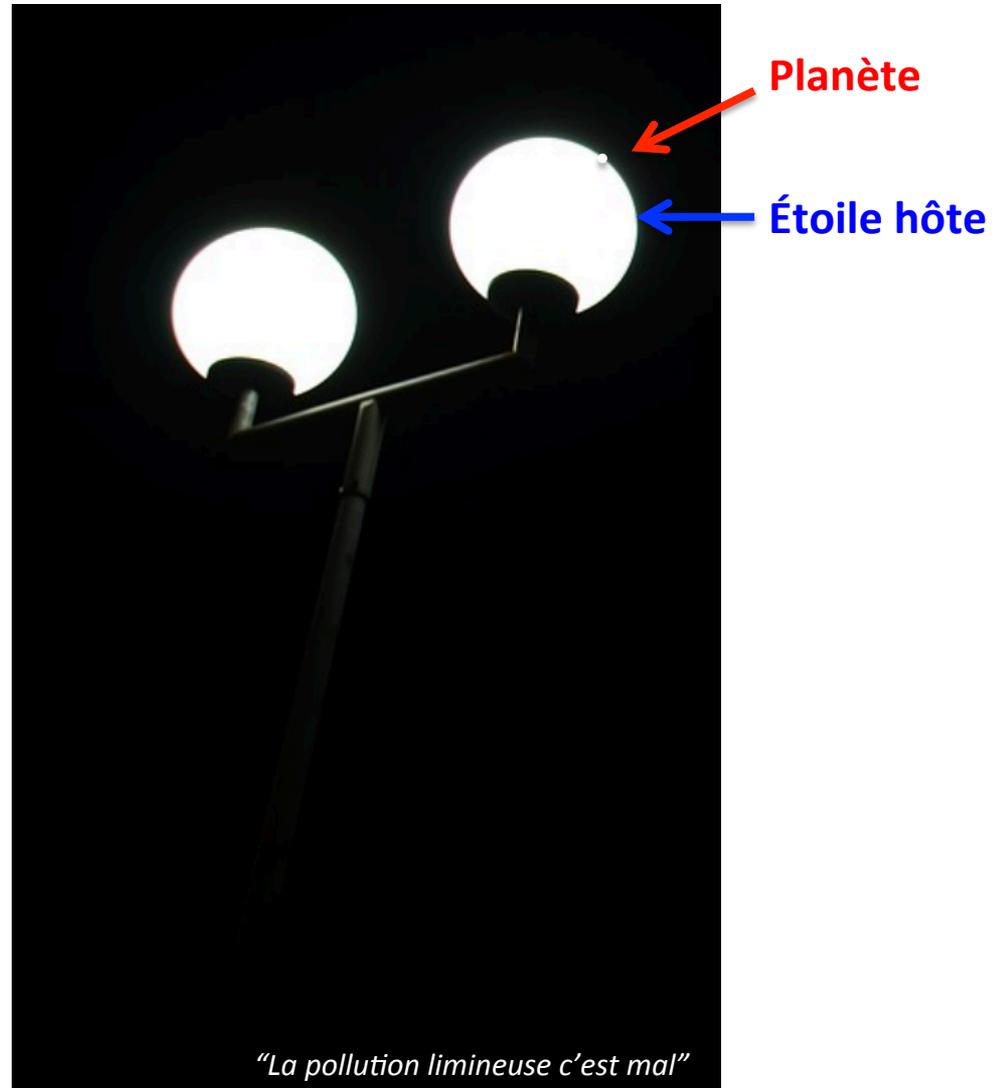
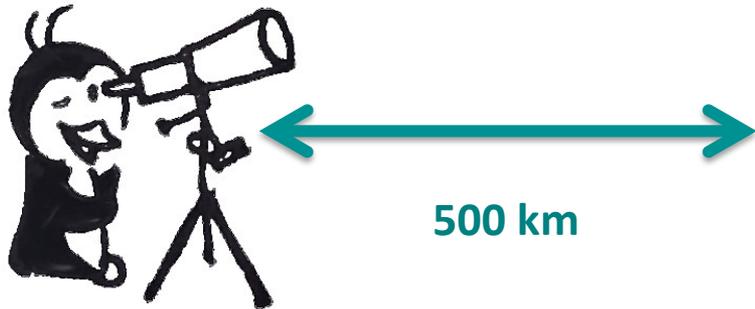
Age : 1 milliard d'année

→ **1 000 000 000** moins brillant que le Soleil !

On veut voir quelque chose de :

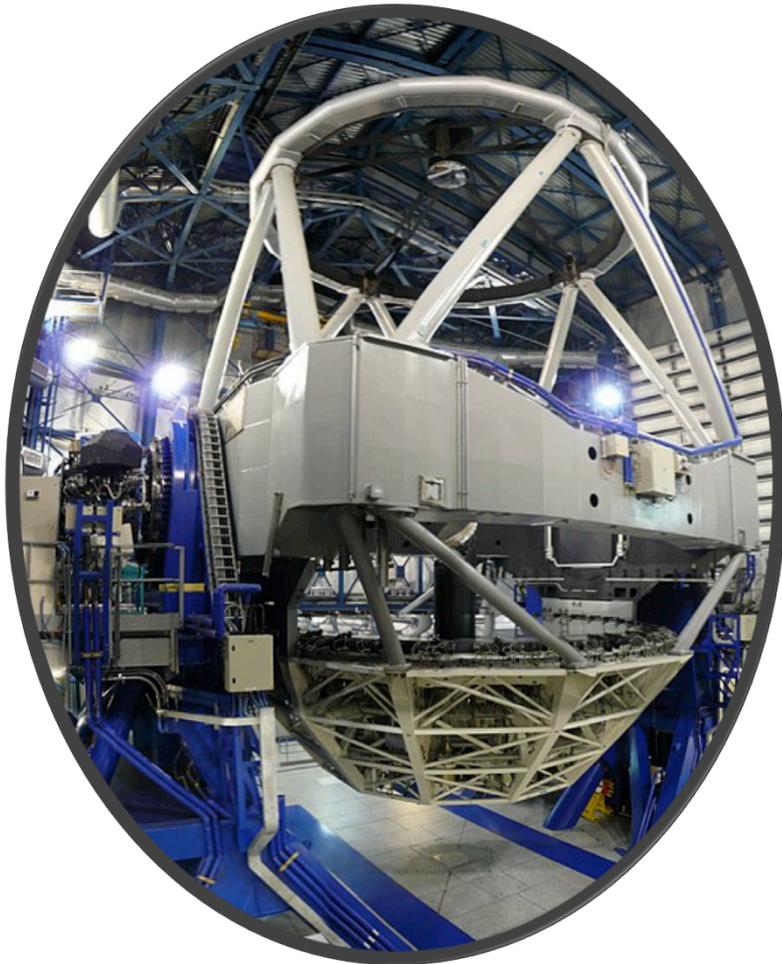
- très très très proche de l'étoile hôte = **résolution angulaire**
- super méga très faible par rapport à l'étoile hôte = **haut contraste**

Pourquoi est-ce si difficile ?

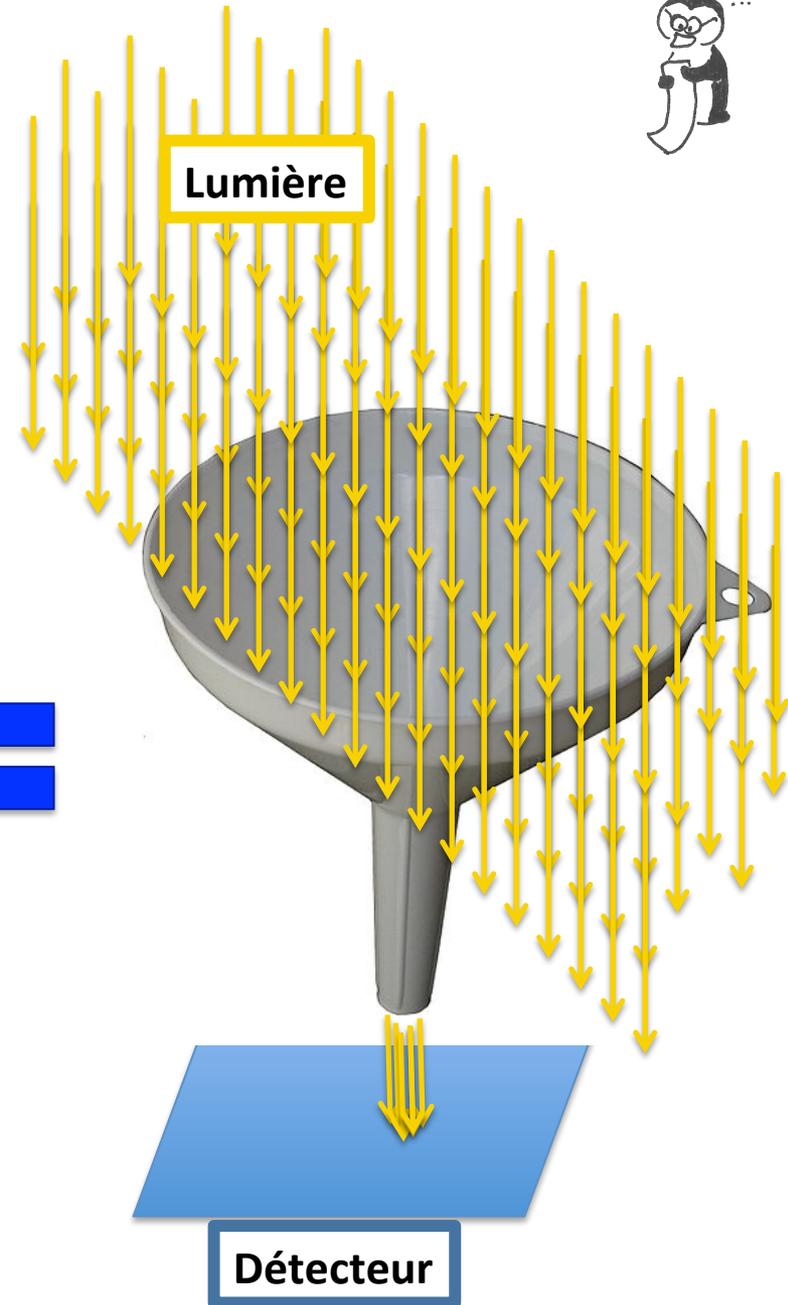




#0: Un telescope

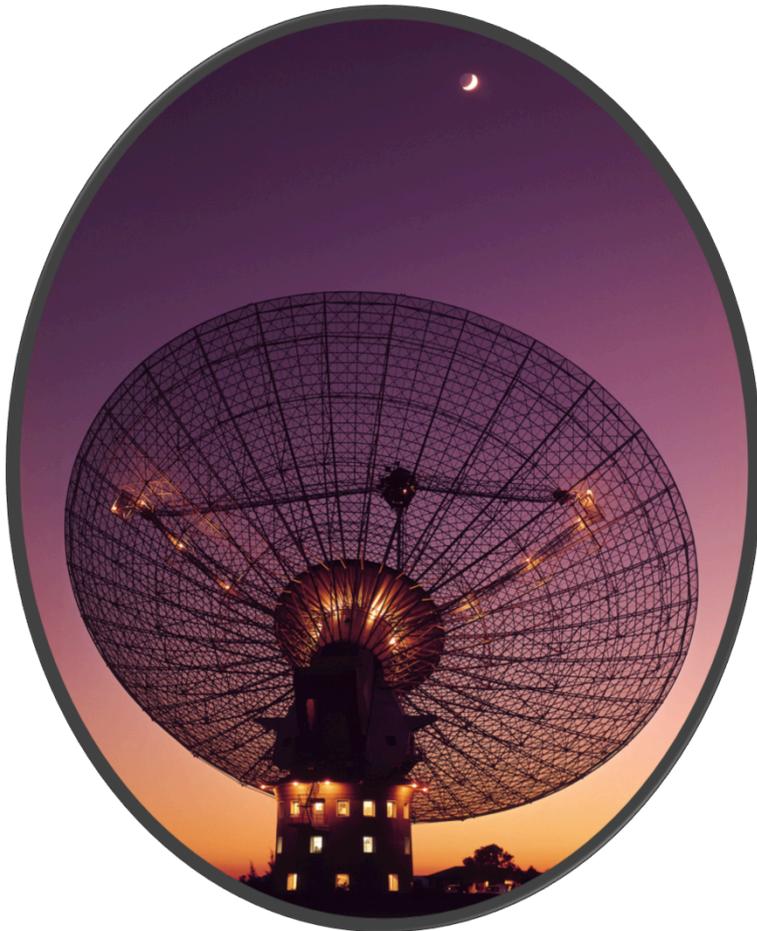


UT3 à Paranal (VLT)

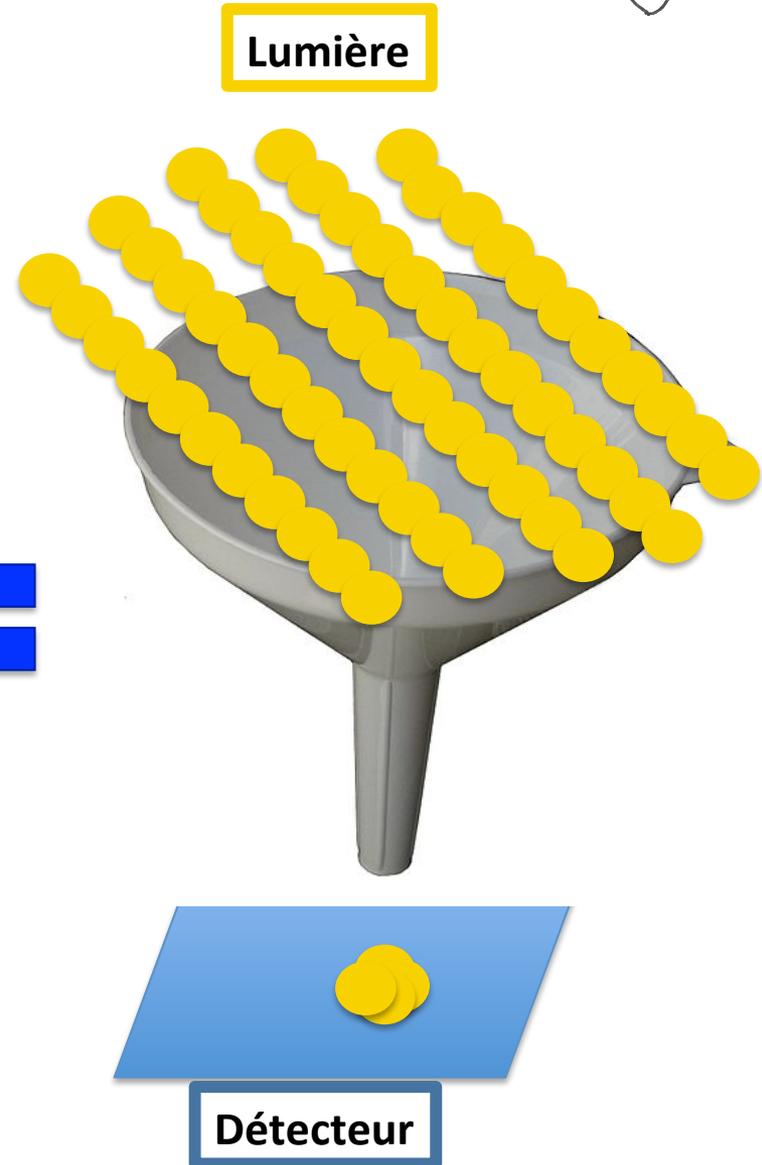




#0: Un telescope terrestre

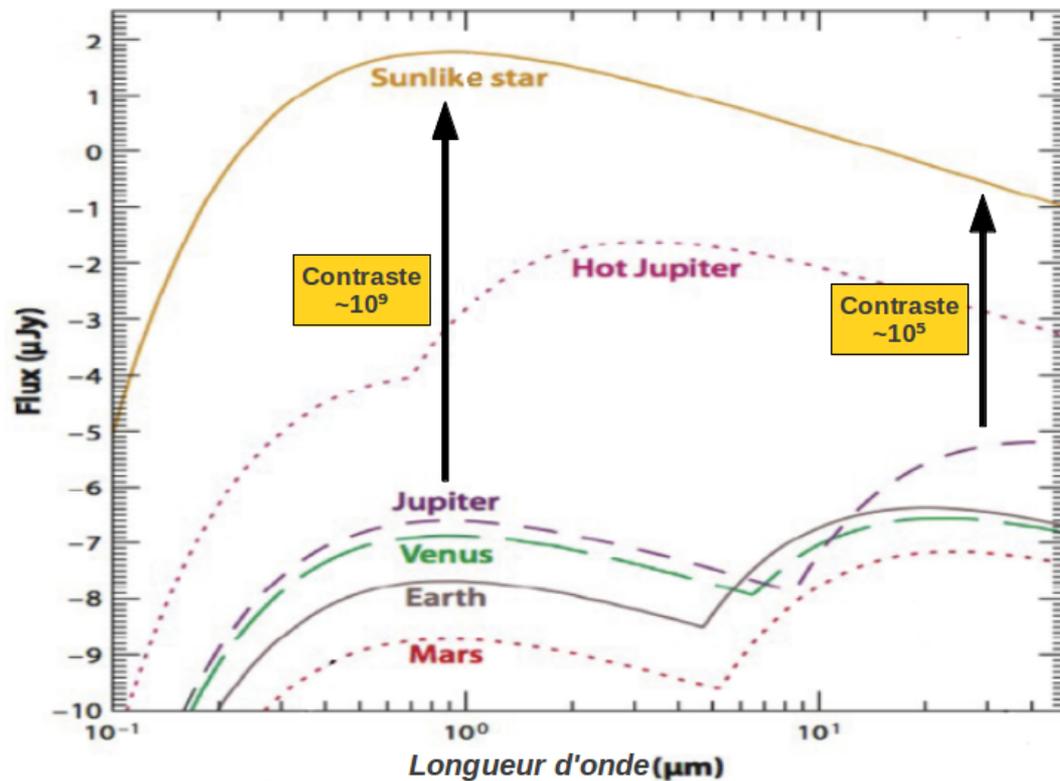


Parkes telescope (CSIRO)



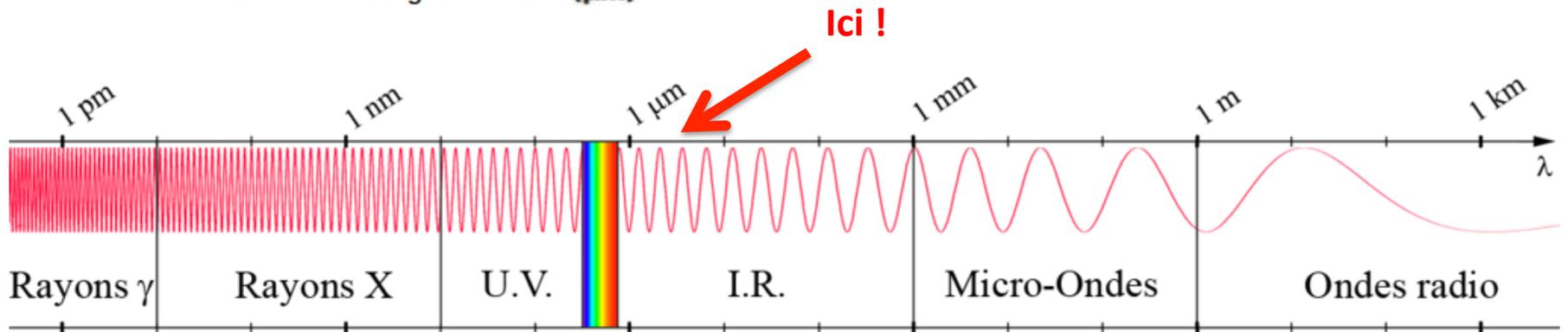


#0: Un telescope terrestre optique



Le contraste est favorable en proche infrarouge

→ En pratique:
De la bande H ($1.6\mu\text{m}$) à L' ($3.8\mu\text{m}$)





#1: Une liste d'étoiles cibles

Résolution angulaire:

0.1 arcsec = 10 UA pour une distance d'observation à 100pc

→ Proche, c'est mieux !

Contraste:

Plus les planètes sont jeunes plus elles sont chaudes et emettent en NIR

→ Jeune c'est mieux !

Indicateur d'exoplanètes:

Si les étoiles ont un disque de poussière il y a plus de chance d'avoir une détection

→ Étoiles qui ont un excès d'émission en IR

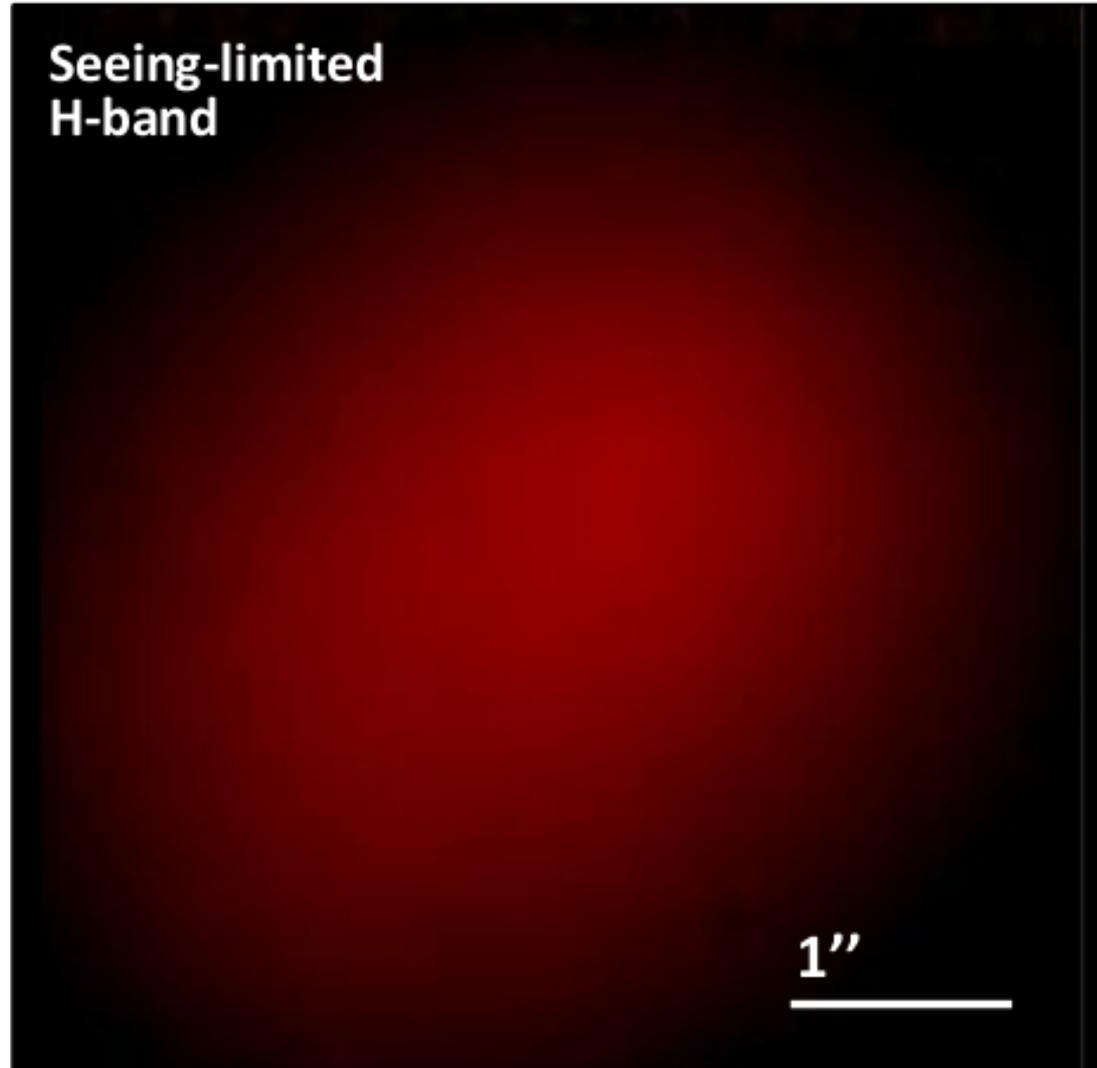
Probabilité de formation d'exoplanètes:

Peut-être que les étoiles massives ont plus de chance d'avoir des compagnons

→ Étoiles massives

Environs **300** étoiles jeunes (< 300 millions d'années)
dans l'environnement proche du Soleil (< 100 pc)

Image d'une étoile de la liste, avec l'UT3 du Very Large Telescope





La haute résolution angulaire

La turbulence atmosphérique



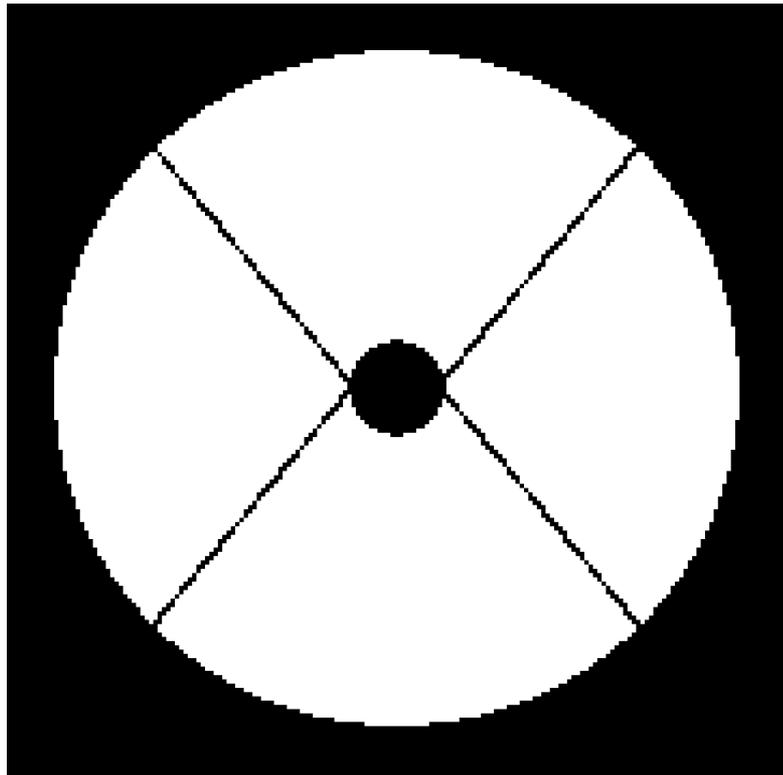
Turbulence de l'air derrière un avion (Groenland)



La haute résolution angulaire

Sans turbulence atmosphérique

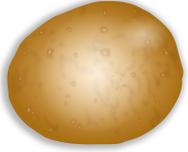
Pupille du télescope (ouverture)



Diamètre du télescope (8.2m)



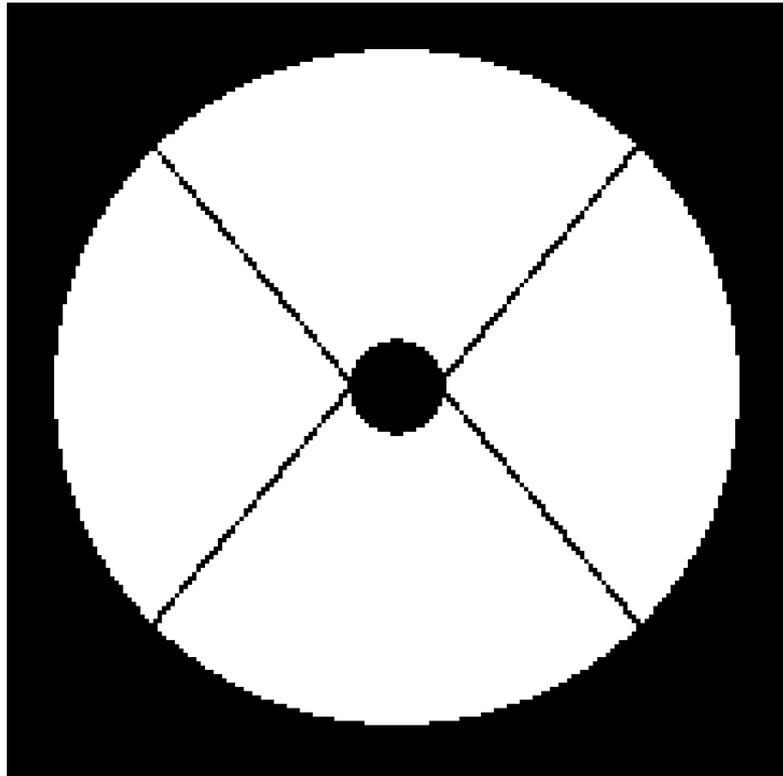
Télescope Subaru, NAOJ, Hawaï, USA



La haute résolution angulaire

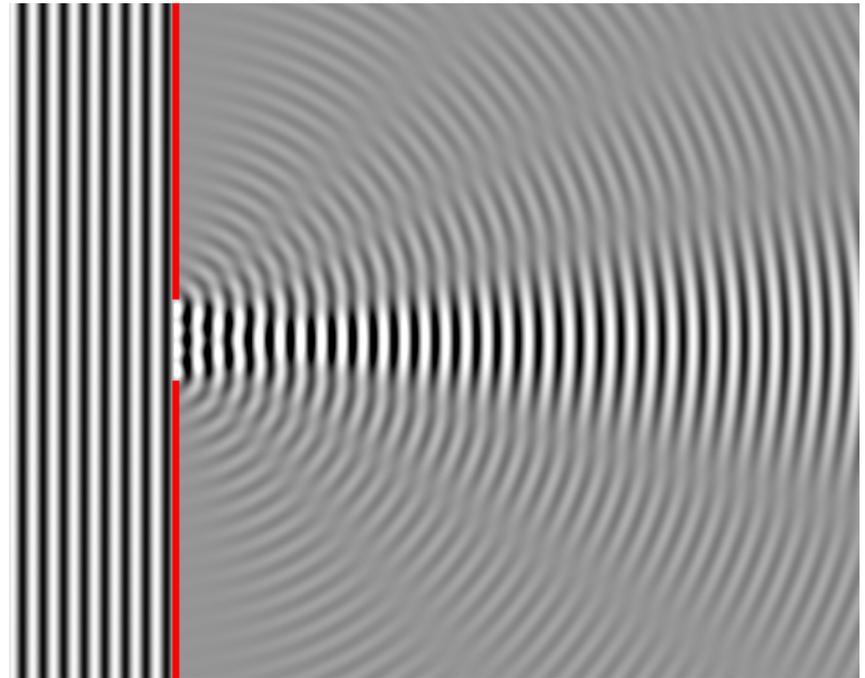
Sans turbulence atmosphérique

Pupille du télescope (ouverture)



Diamètre du télescope ($D = 8.2\text{m}$)

Image d'une vague après une fente



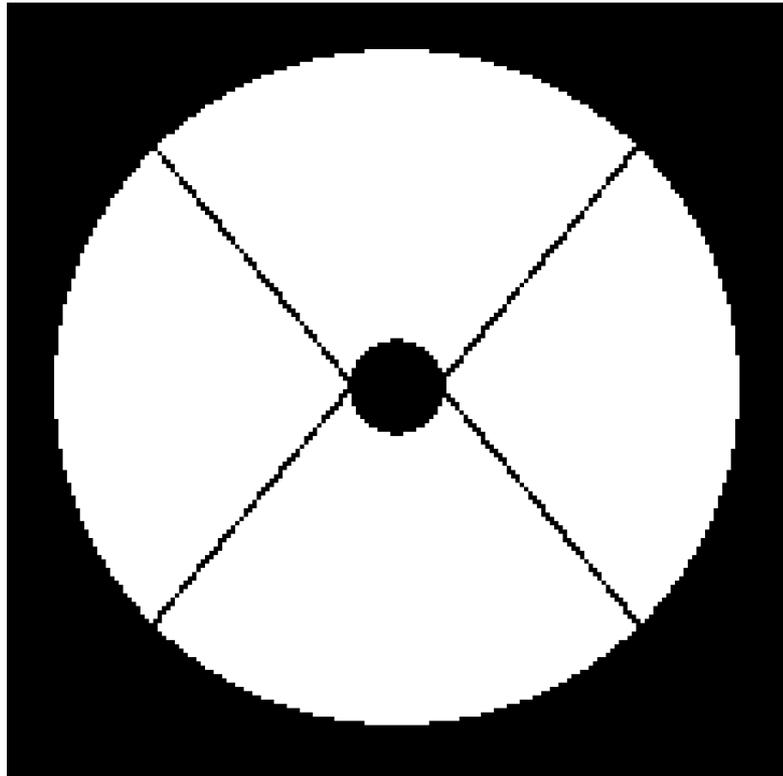
Phénomène de **diffraction** de la lumière



La haute résolution angulaire

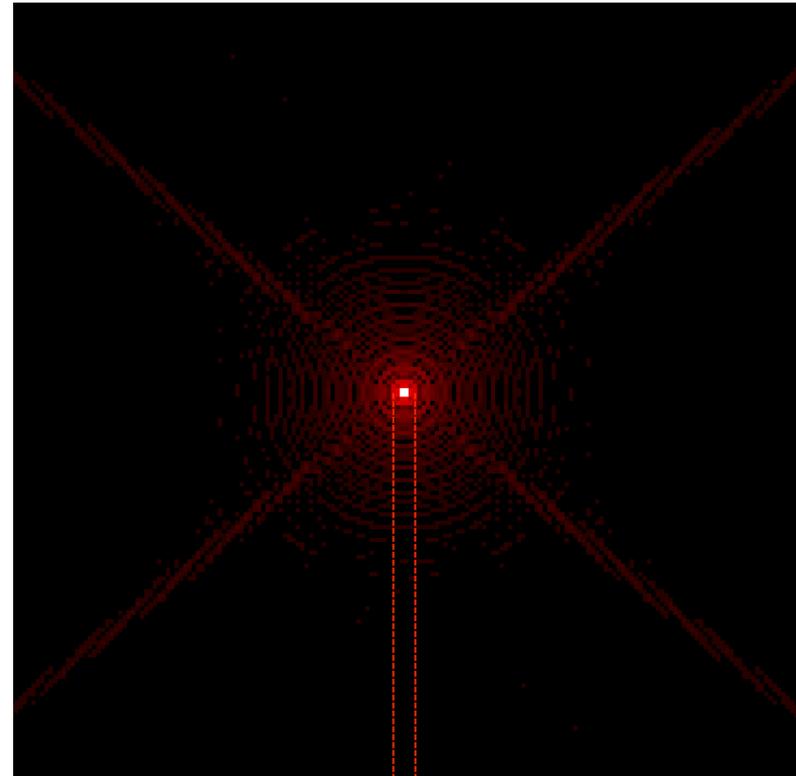
Sans turbulence atmosphérique

Pupille du télescope (ouverture)



Diamètre du télescope ($D = 8.2\text{m}$)

Image d'une étoile au télescope



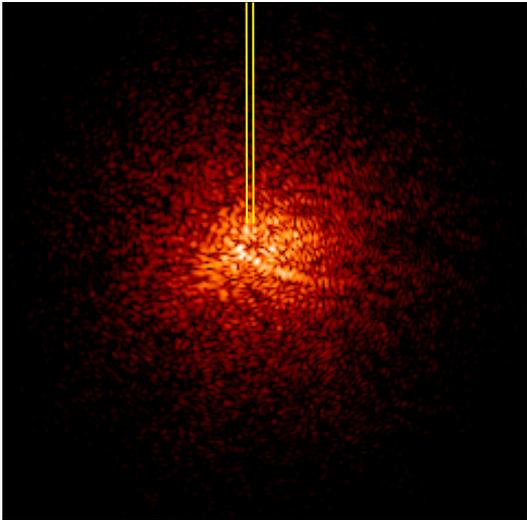
Taille de la tache centrale $\sim \lambda/D$



La haute résolution angulaire

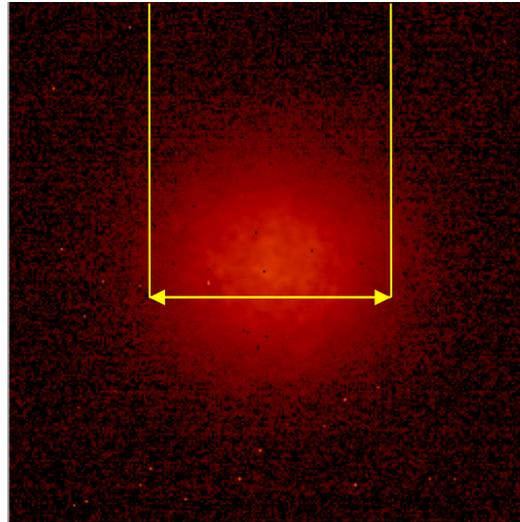
Avec turbulence atmosphérique

$$\sim \lambda/D$$

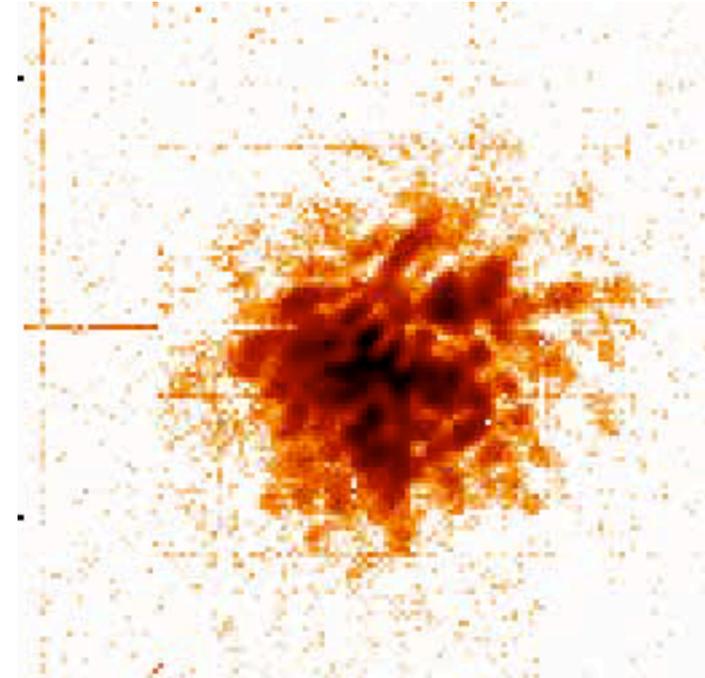


Courte pose

$$\sim \lambda/r_0$$



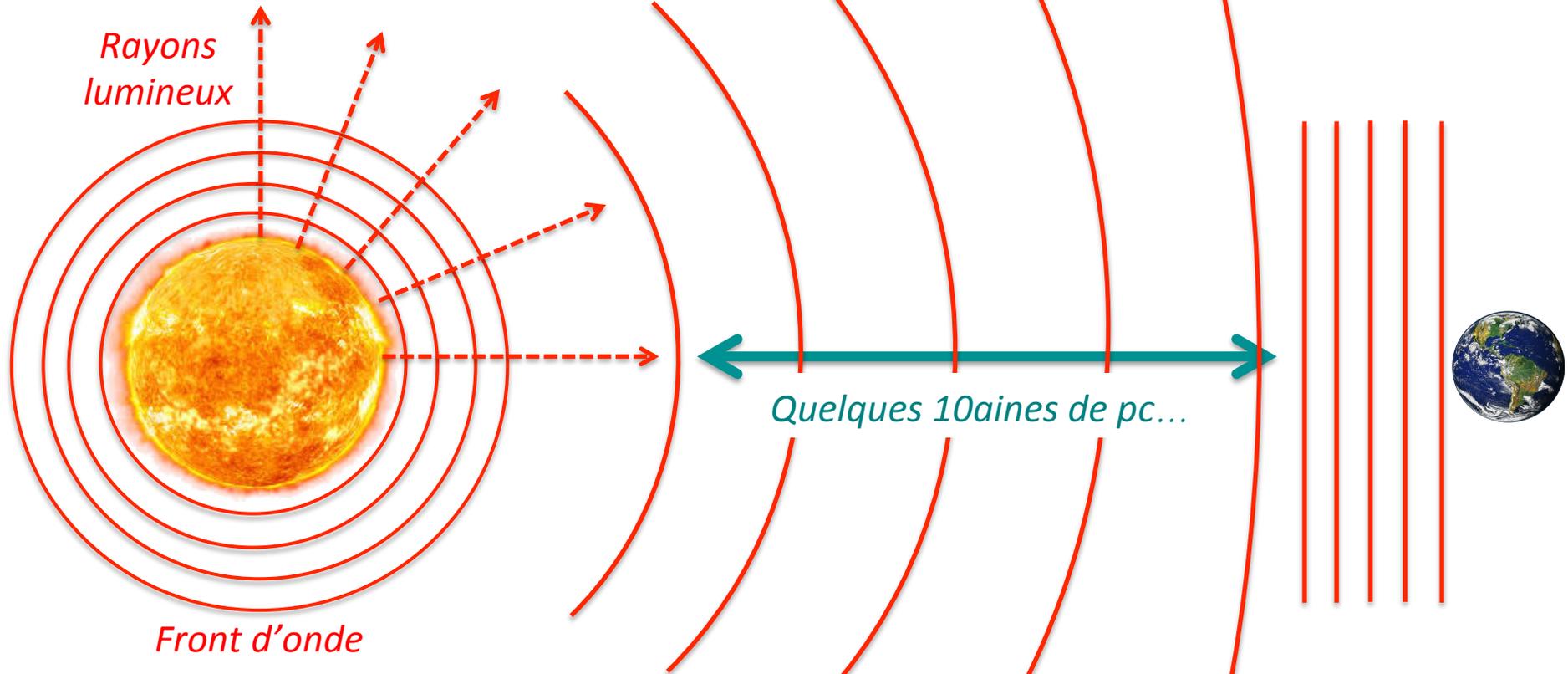
Longue pose





La haute résolution angulaire

La turbulence atmosphérique



Les rayons lumineux se propagent **perpendiculaires** au front d'onde

Le front d'onde émit par une étoile est **sphérique**

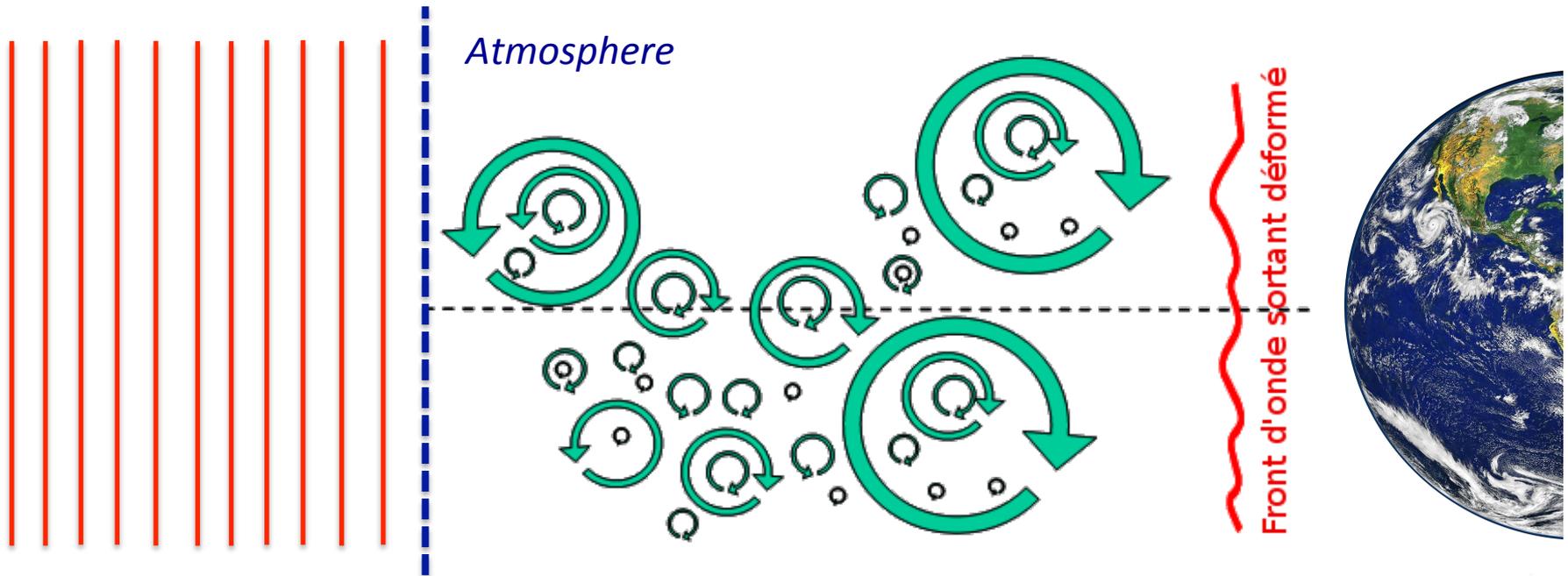
Le front d'onde reçu très loin de l'étoile (sur Terre) est **plan**

→ L'étoile est **non-résolue** (c'est un "point source")



La haute résolution angulaire

La turbulence atmosphérique

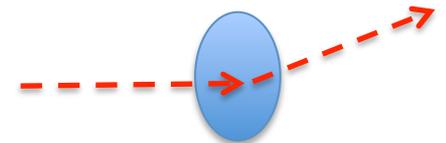


L'air est un très **mauvais** conducteur thermique

L'indice optique de l'air **dépend de la température** (et un peu de la pression)

Les rayons lumineux sont **refractés** par les bulles d'air chaudes et froides

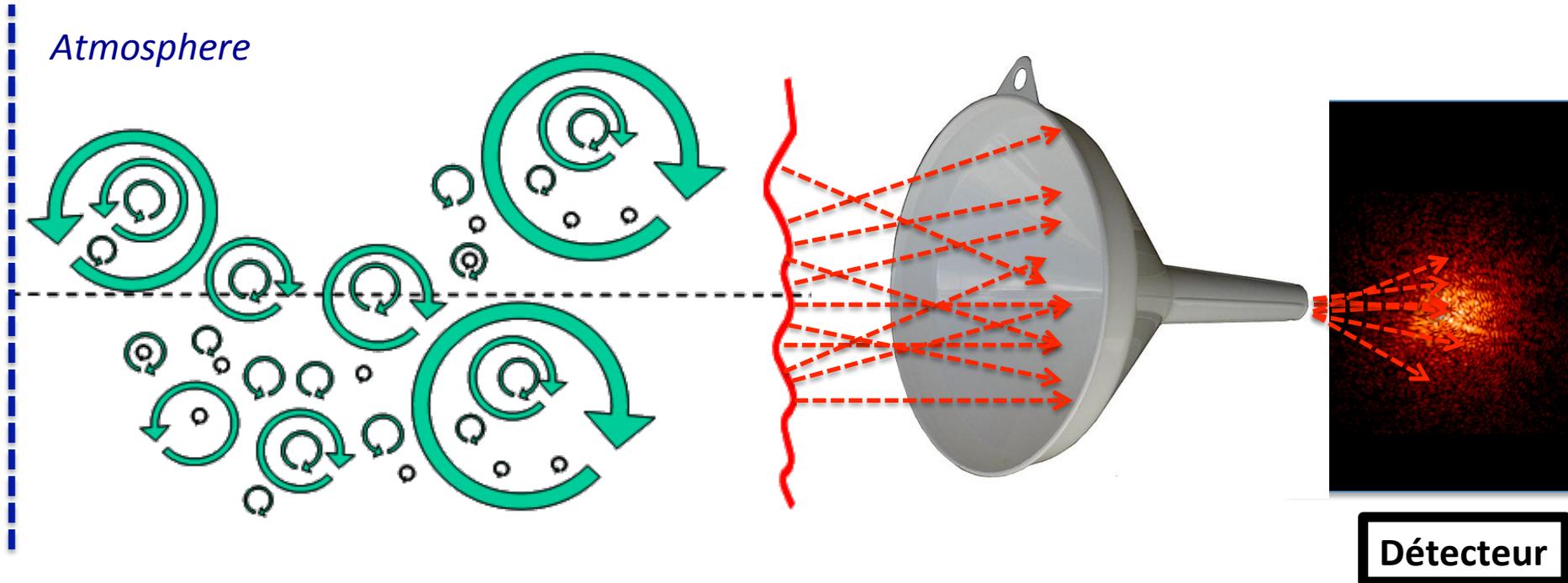
→ Ils se propagent dans des directions aléatoires !





La haute résolution angulaire

La turbulence atmosphérique



L'atmosphère terrestre provoque des **distortion** du front d'onde

Les rayons lumineux sont **déviés** et n'atteignent pas le détecteur au bon endroit

De plus il se crée des **interférences** destructives et constructives

→ Présence de **tavelures**



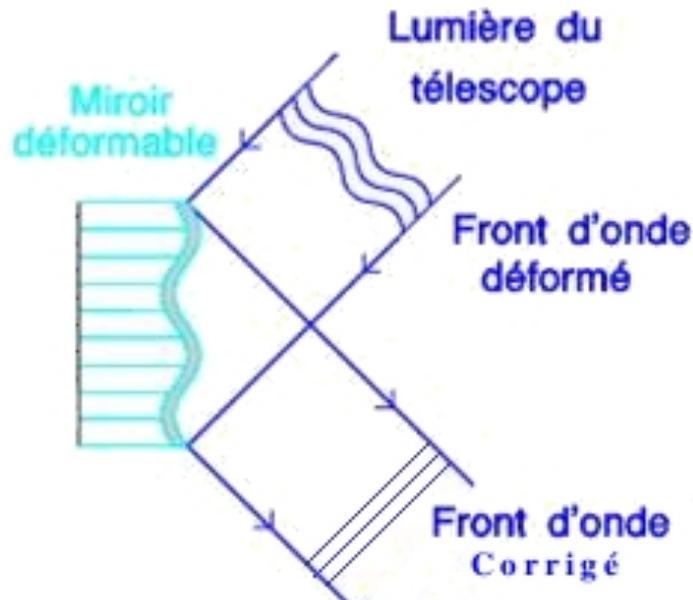
La haute résolution angulaire

#2: Une optique adaptative

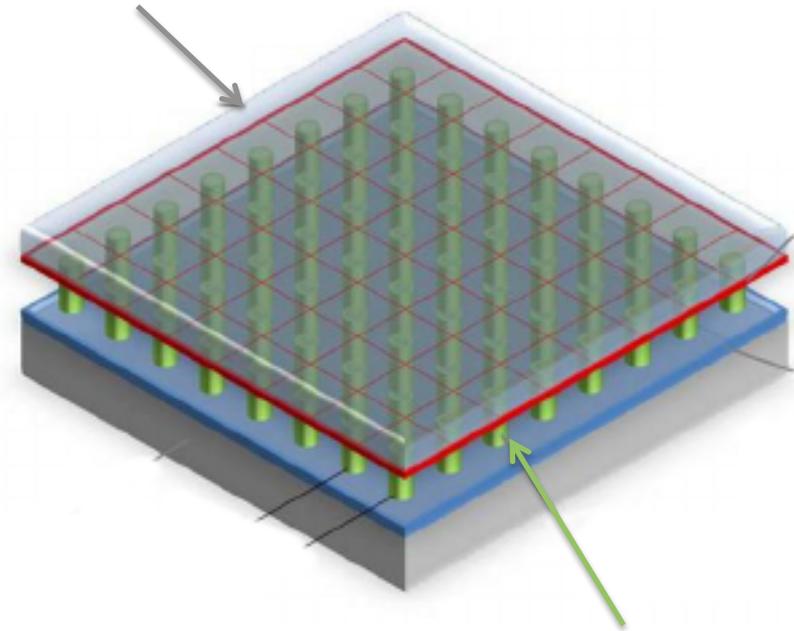
Idée de base:

Corriger le front d'onde pour le re-rendre **plan**

→ **Miroir déformable**



Surface réfléchissante



Actuateurs

Plus on a d'actuateurs, plus on peut régler les détails
Plus on va vite, plus on peut corriger les changements



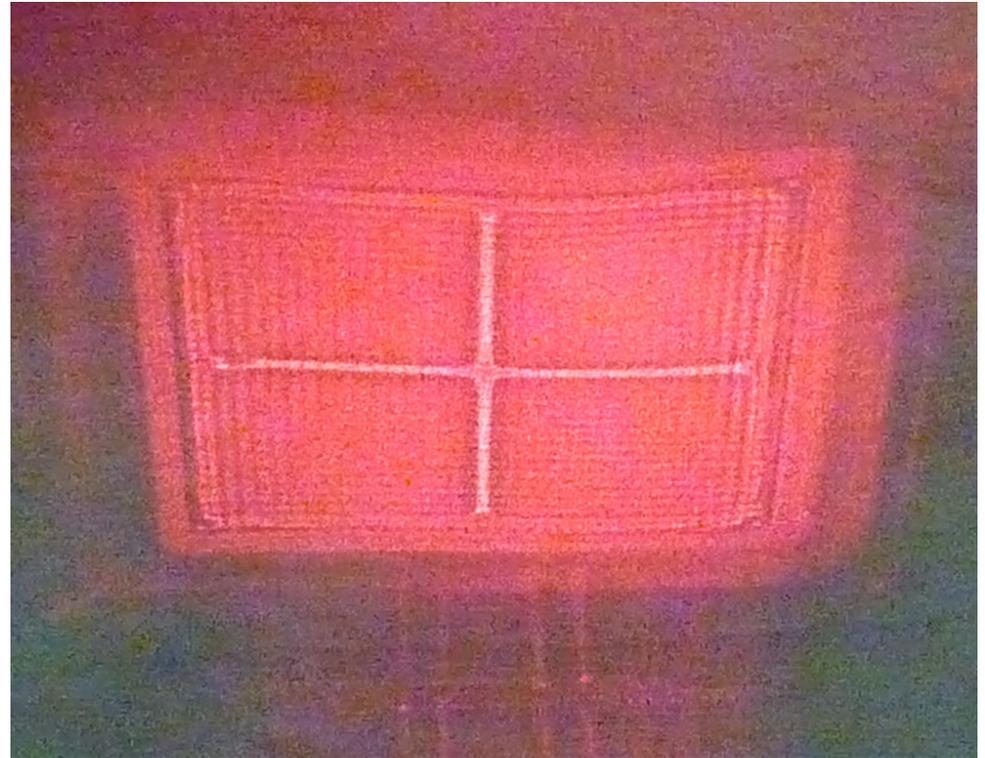
La haute résolution angulaire

#2: Une optique adaptative

Idée de base:

Corriger le front d'onde pour le re-rendre **plan**

→ **Miroir déformable**



*MD Boston Micromachine
32 x 32 actuators*



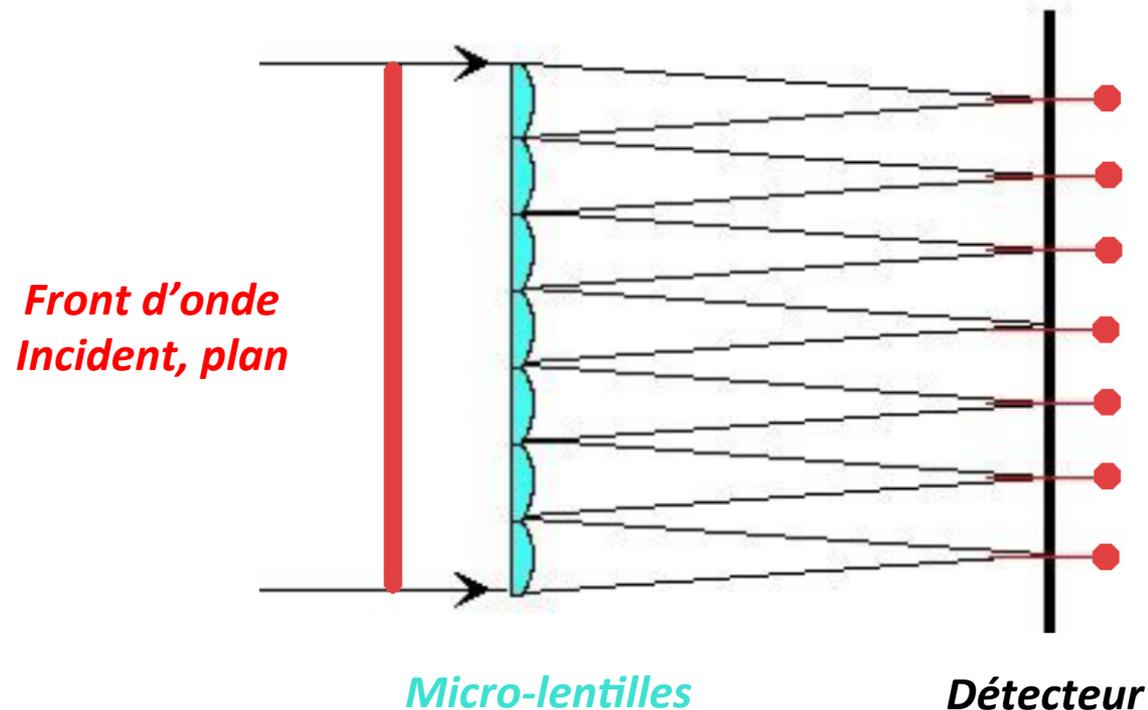
#2: Une optique adaptative

Comment savoir quoi envoyer comme commande au MD:

→ **Utiliser un analyseur de front d'onde**

Il existe de nombreuses technologies.

Le plus connu est l'analyseur de **Shack-Hartmann**





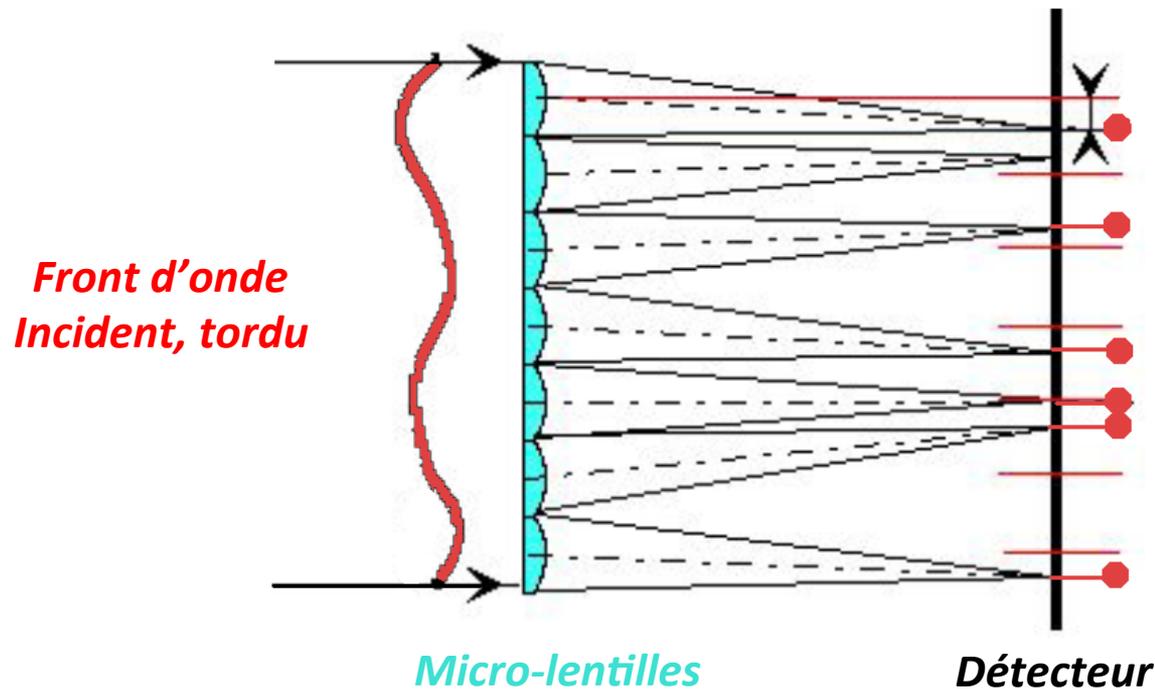
#2: Une optique adaptative

Comment savoir quoi envoyer comme commande au MD:

→ **Utiliser un analyseur de front d'onde**

Il existe de nombreuses technologies.

Le plus connu est l'analyseur de **Shack-Hartmann**



Décalage
sur le détecteur !



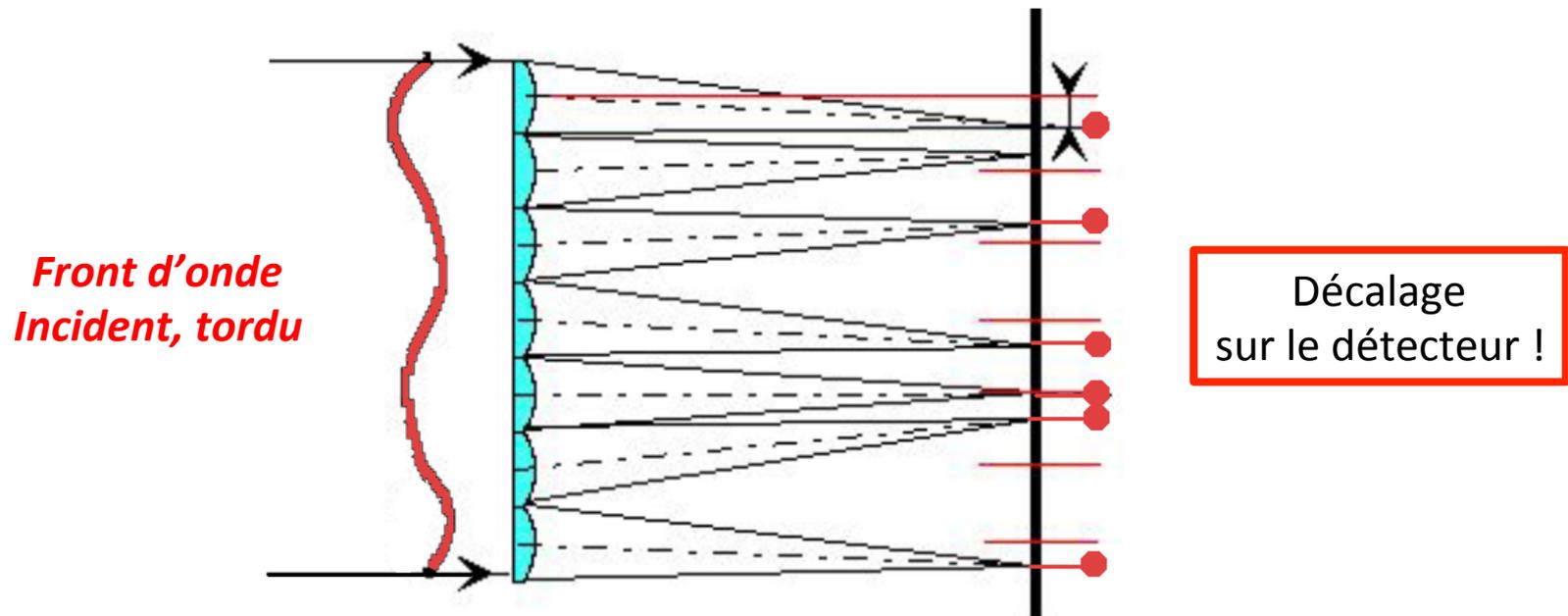
#2: Une optique adaptative

Comment savoir quoi envoyer comme commande au MD:

→ **Utiliser un analyseur de front d'onde**

Il existe de nombreuses technologies.

Le plus connu est l'analyseur de **Shack-Hartmann**



Plus on a de lentilles, plus on échantillonne finement (détails)
Mais, on a moins de lumière qui arrive au détecteur...

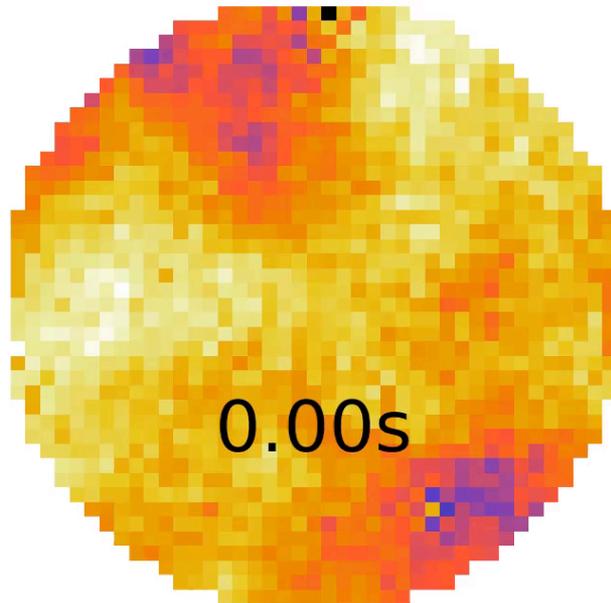


#2: Une optique adaptative

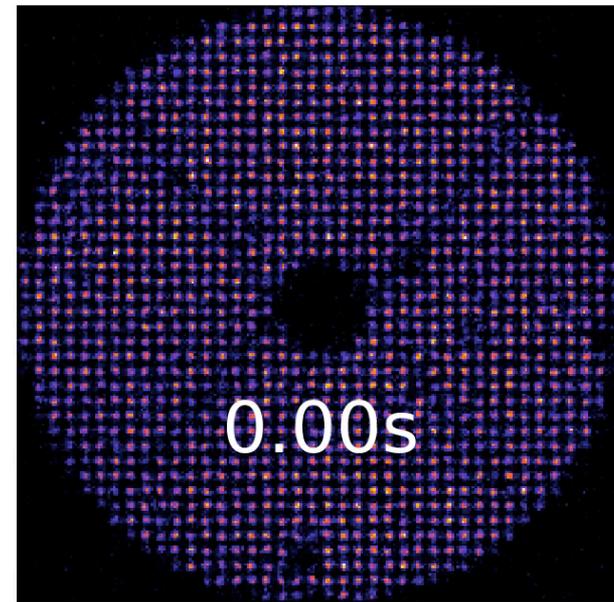
Comment savoir quoi envoyer comme commande au MD:

→ **Utiliser un analyseur de front d'onde**

Deformable mirror shape



Wavefront sensor



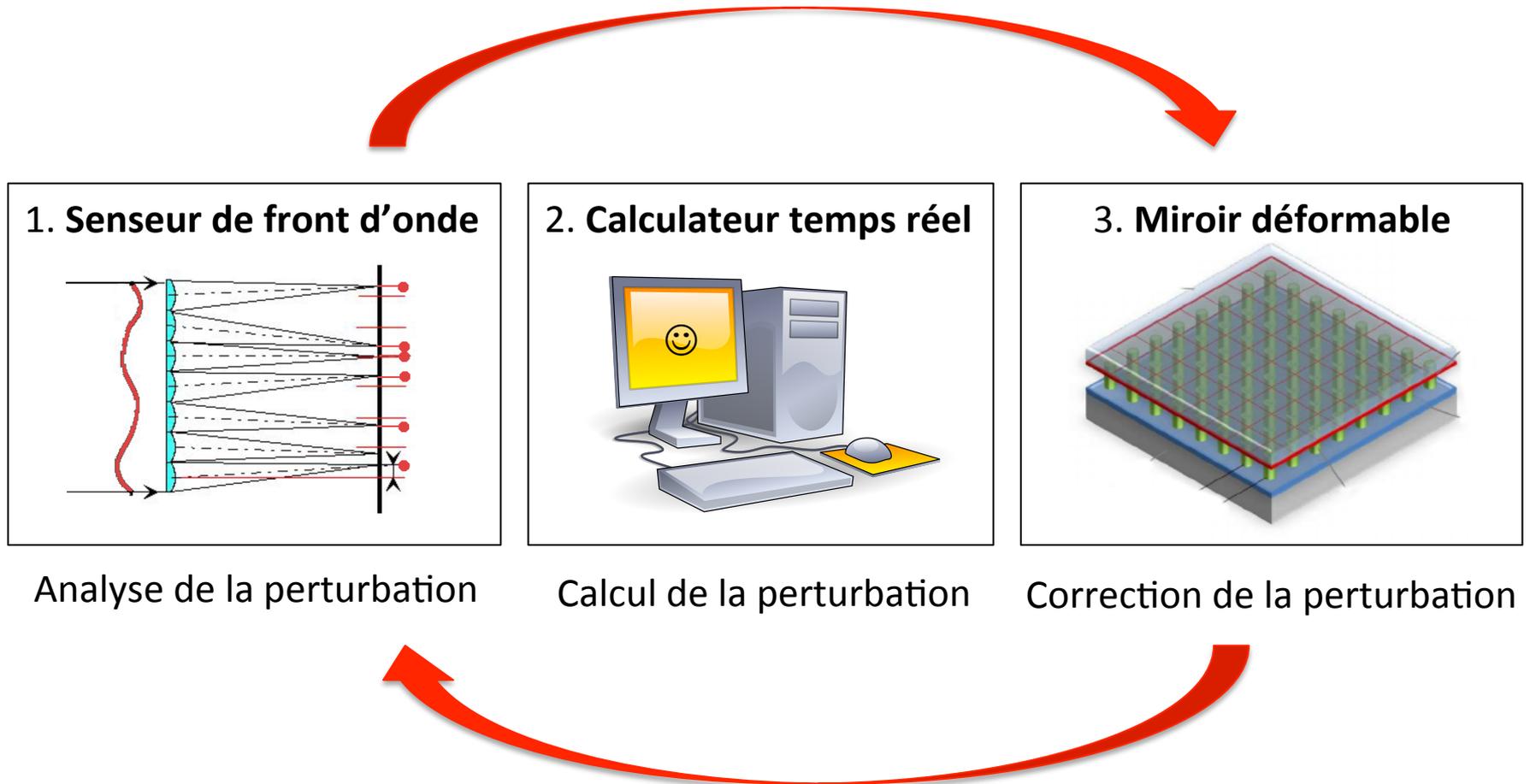
Images réelles du miroir et du détecteur après l'analyseur Shack-Hartmann de SPHERE (40 x 40 micro-lentilles et actuateurs)



#2: Une optique adaptative

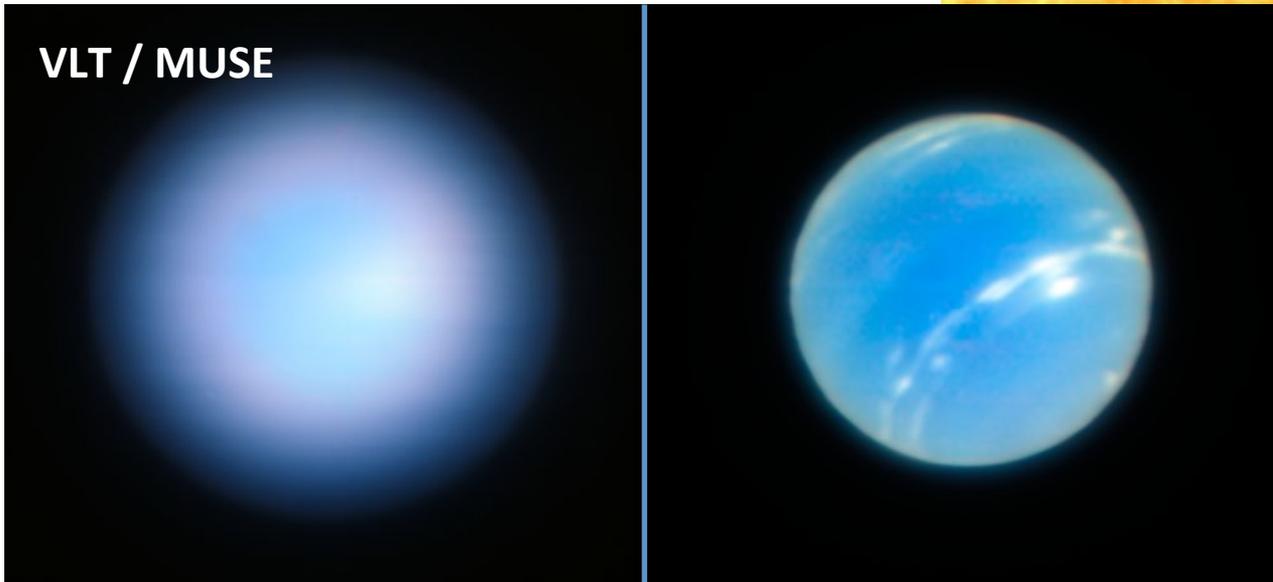
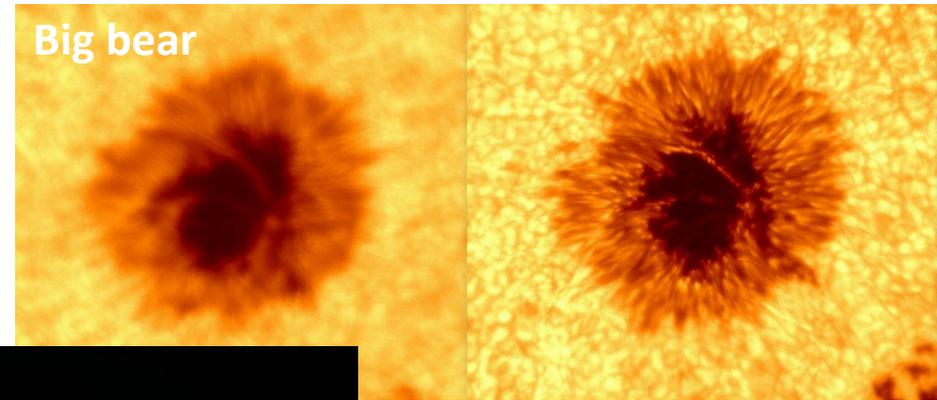
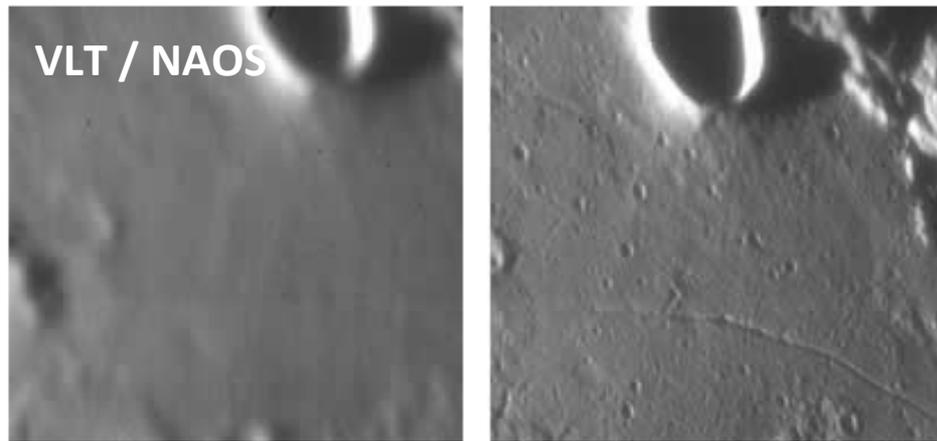
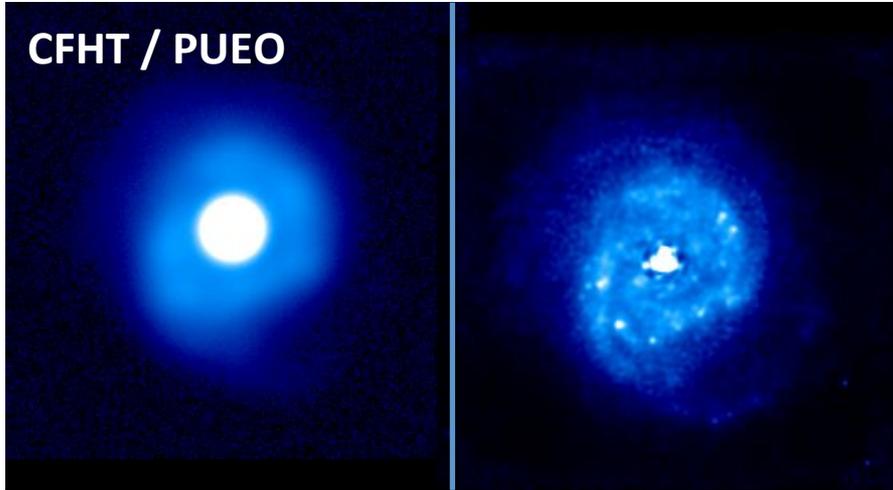
Comment savoir quoi envoyer comme commande au MD:

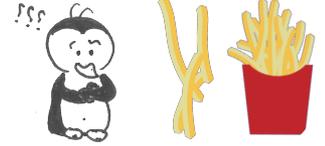
→ Utiliser un analyseur de front d'onde + calcul de la reconstruction



Fonctionne en boucle fermée

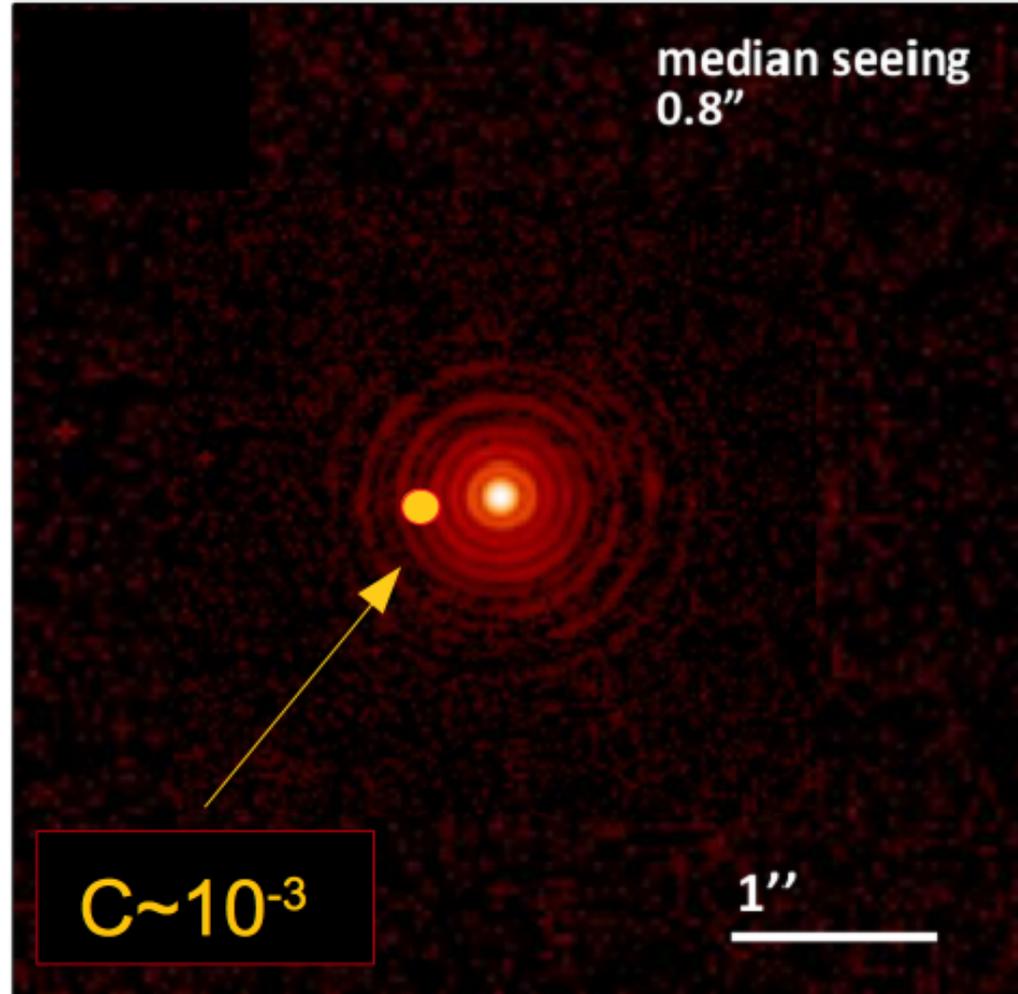
#2: Une optique adaptative





La haute résolution angulaire

Optique adaptative: les résultats !



VLT / SPHERE



Le haut contraste

#3: Coronographe pour regarder proche

Idée de base:

Cacher la lumière de l'étoile pour n'avoir que les planètes

→ Coronographe



Le Soleil de Fleurance ce lundi...



Le Soleil de Fleurance ce lundi et un pouce !



Le haut contraste

#3: Coronographe



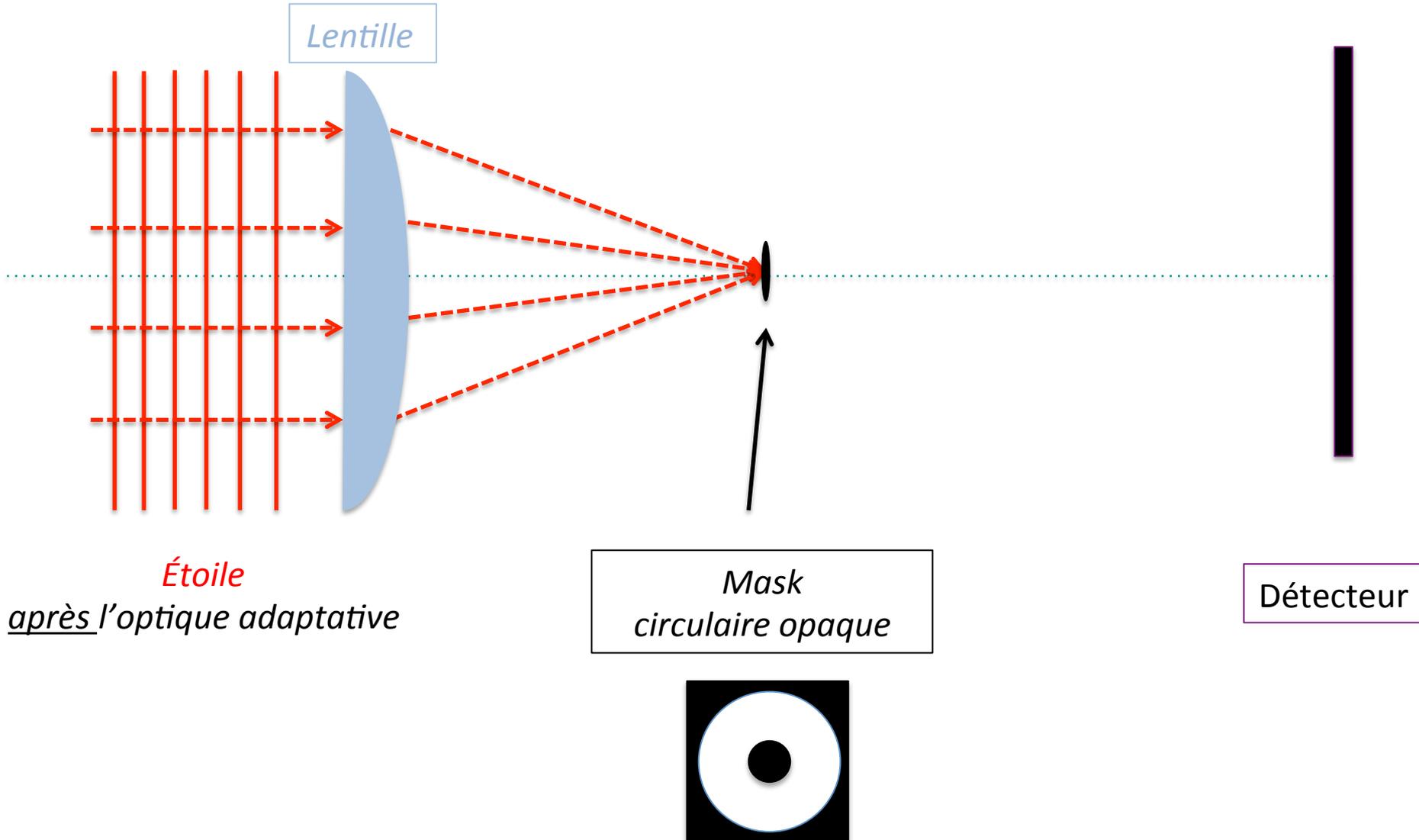
© Nicolas Lefaudeux 2017

Mais... le Soleil n'est **pas un point source**, il est résolu.



Le haut contraste

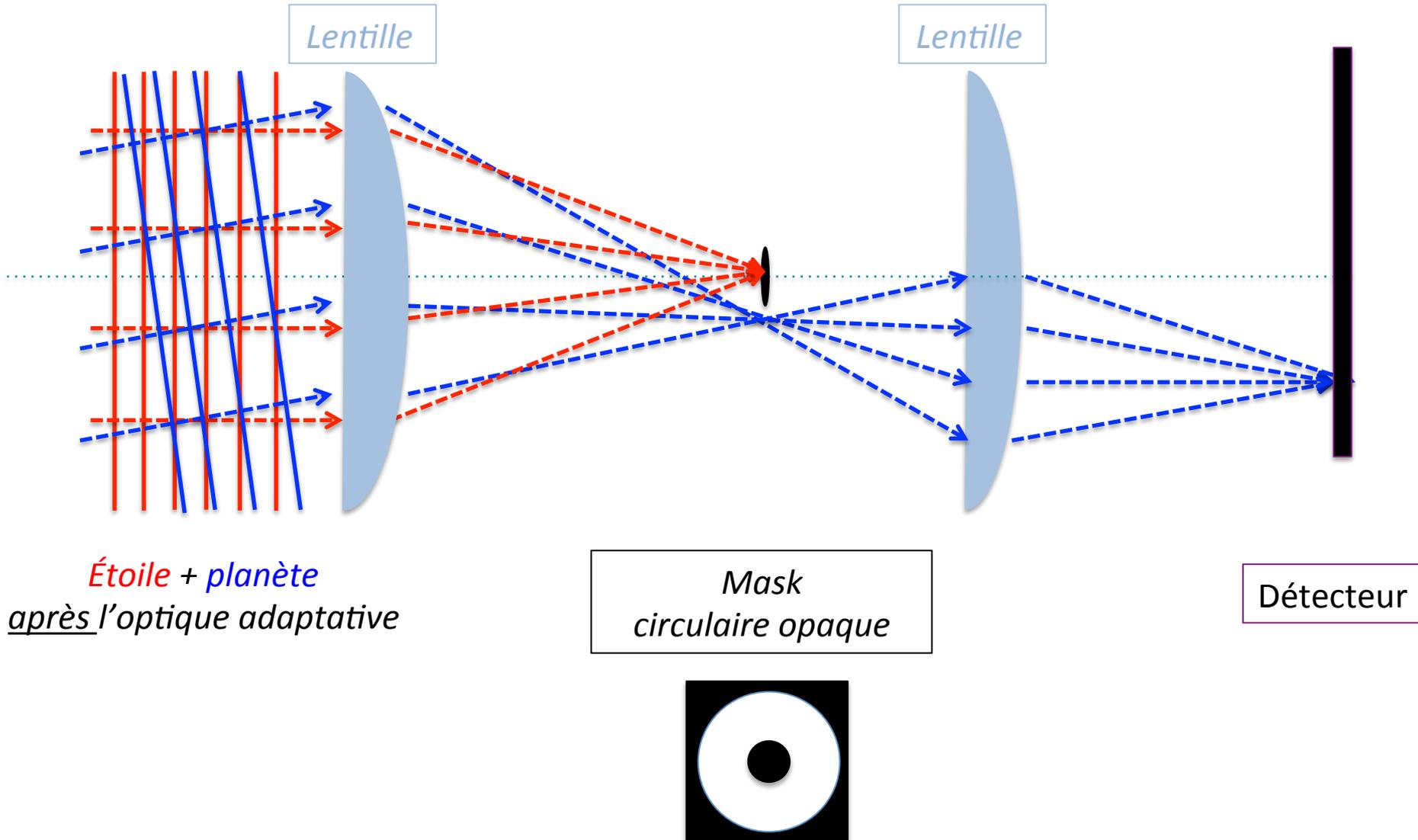
#3: Coronographe de Lyot





Le haut contrast

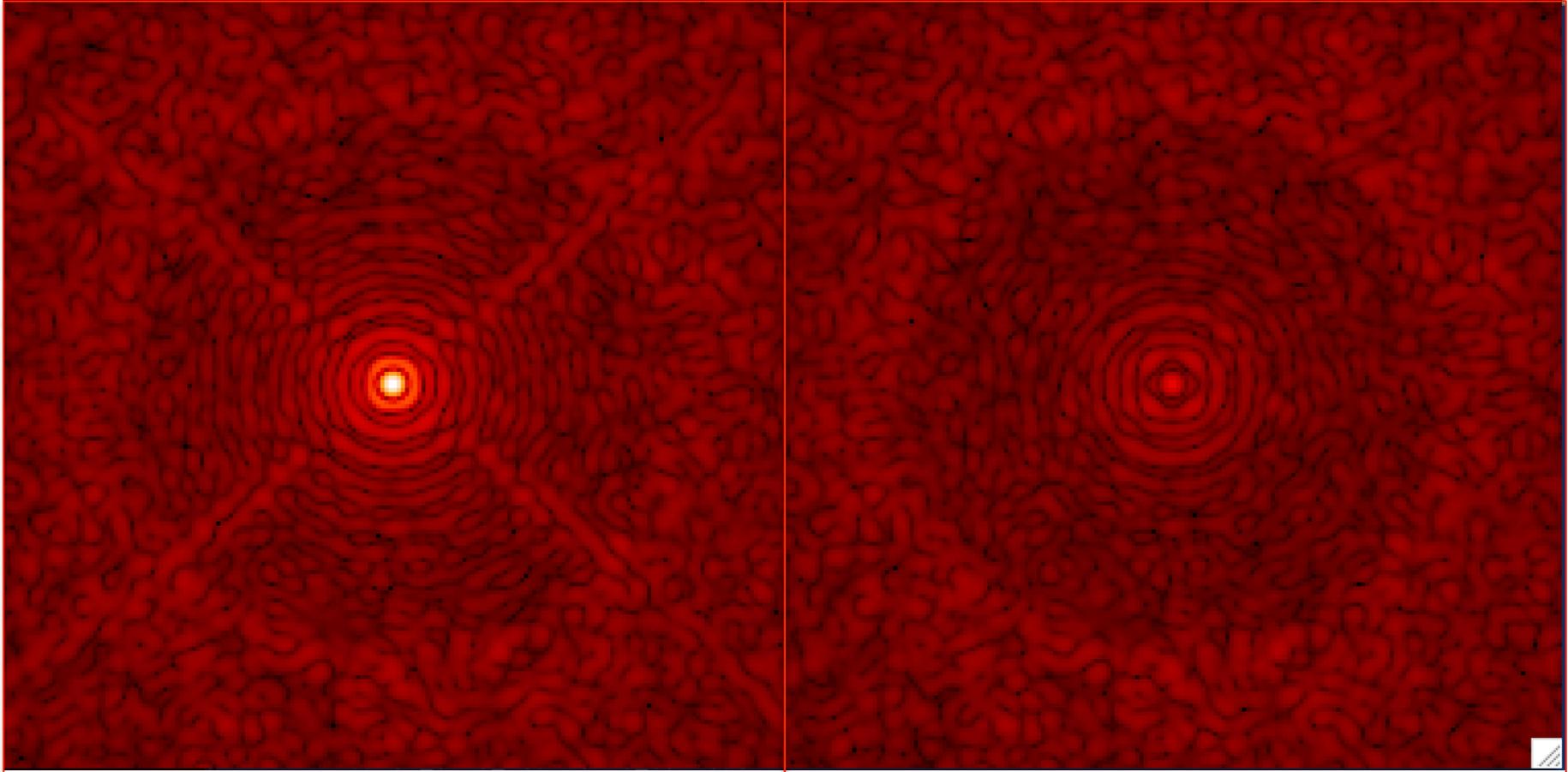
#3: Coronographe de Lyot





Le haut contrast

#3: Coronographe de Lyot



Sans masque plan focal

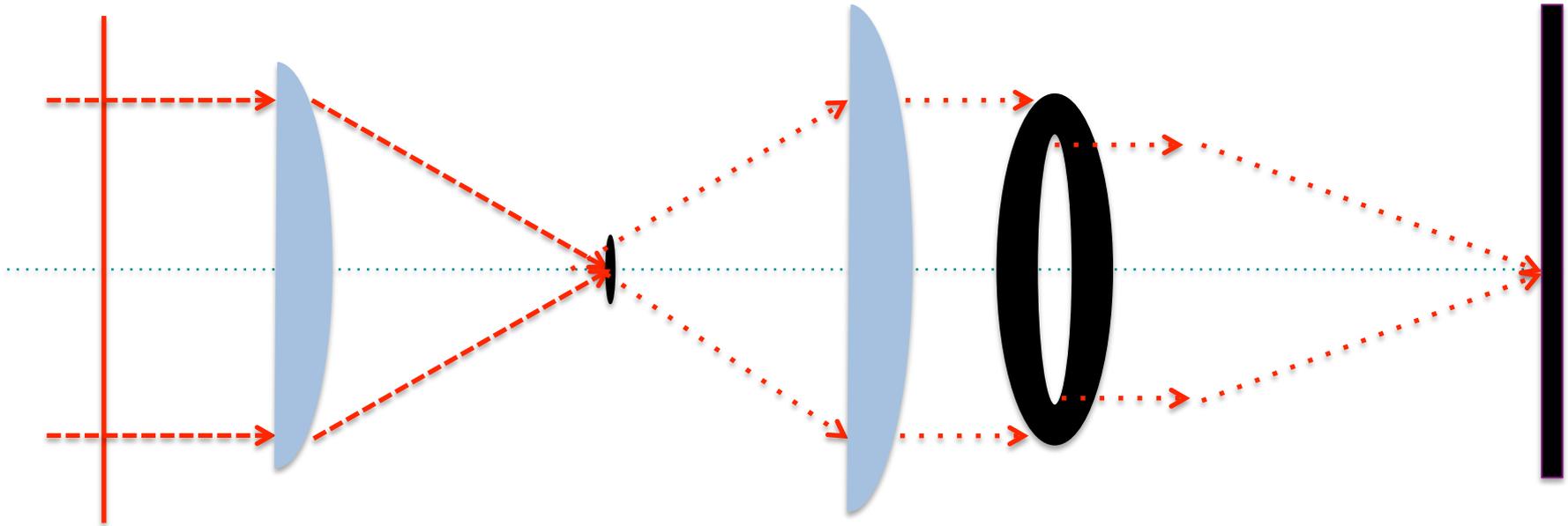
Avec masque plan focal



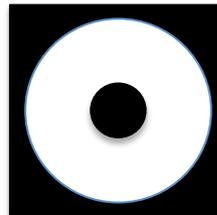


Le haut contraste

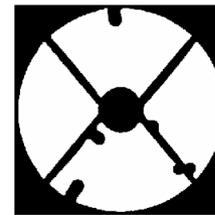
#3: Coronographe de Lyot



Masque
plan focal



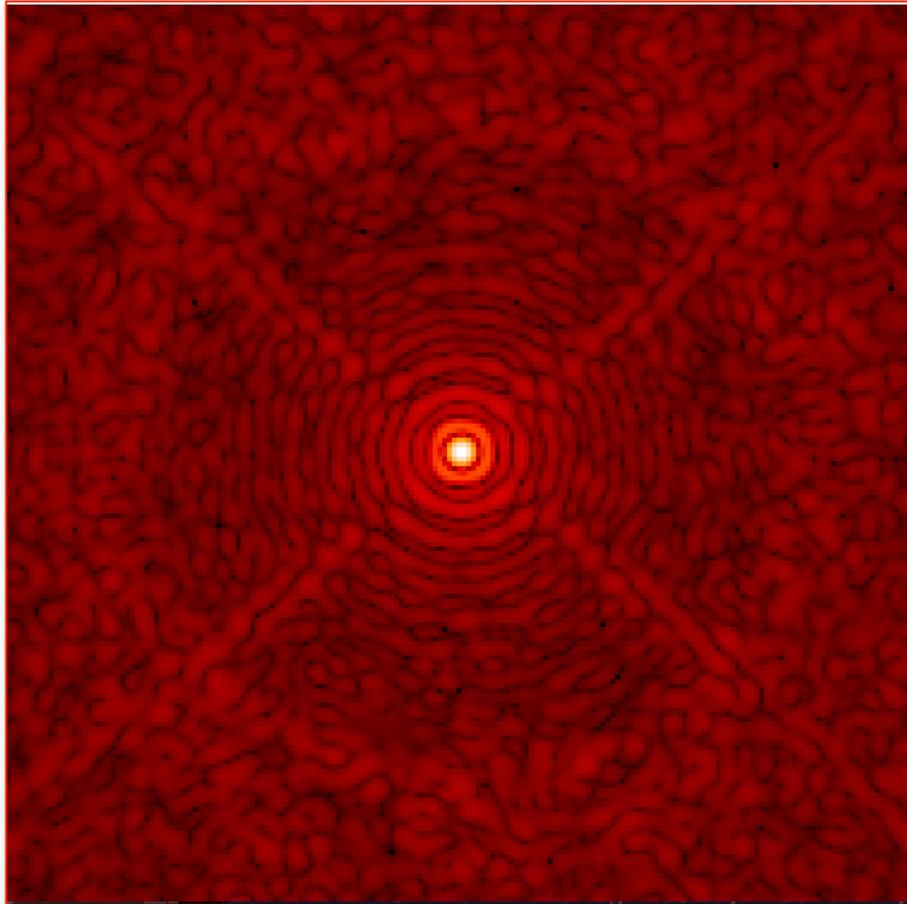
Lyot Stop



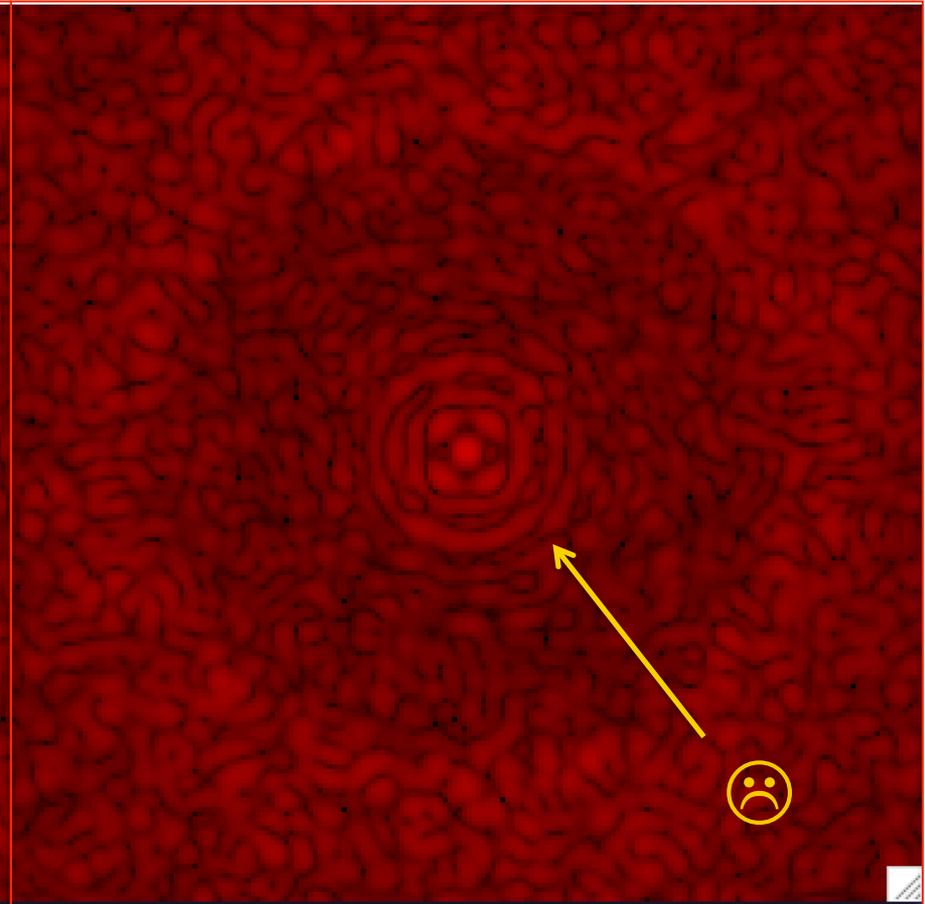


Le haut contraste

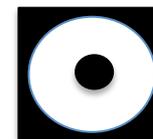
#3: Coronographe de Lyot



Sans masque plan focal



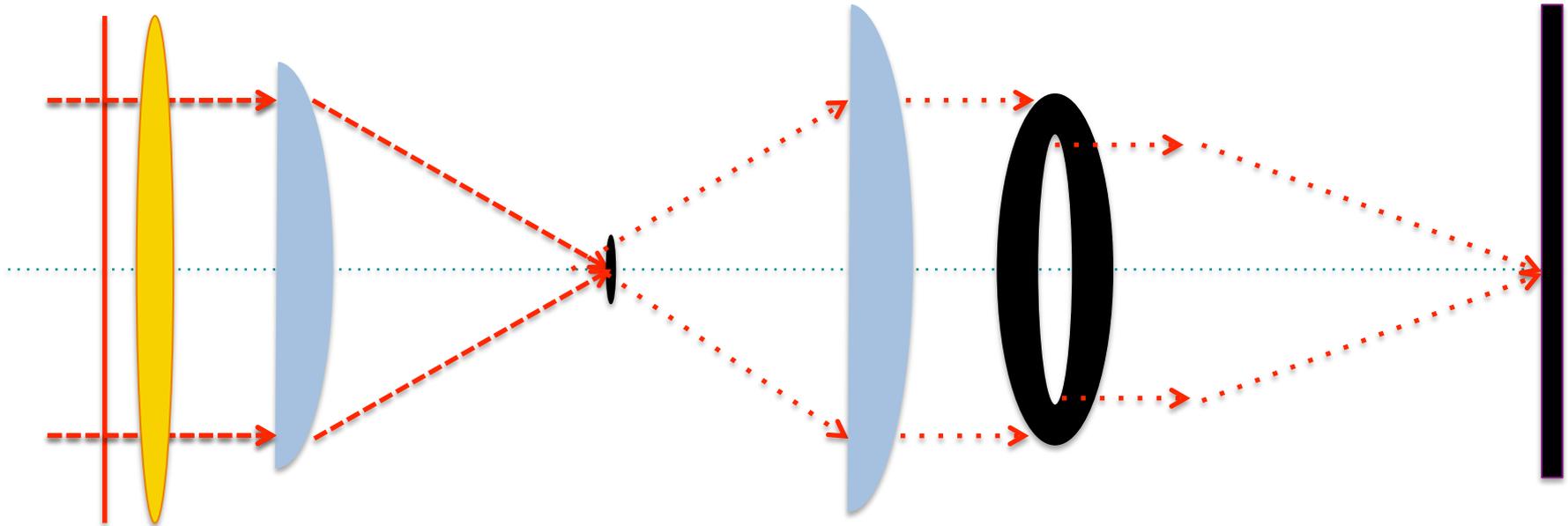
Avec masque plan focal + Lyot stop





Le haut contraste

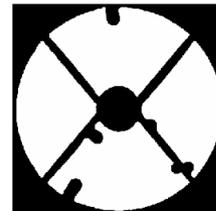
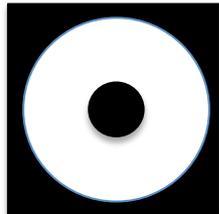
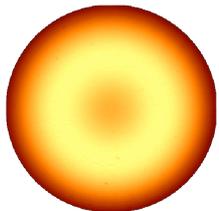
#3: Coronographe de Lyot apodisé



Apodiseur

Masque
plan focal

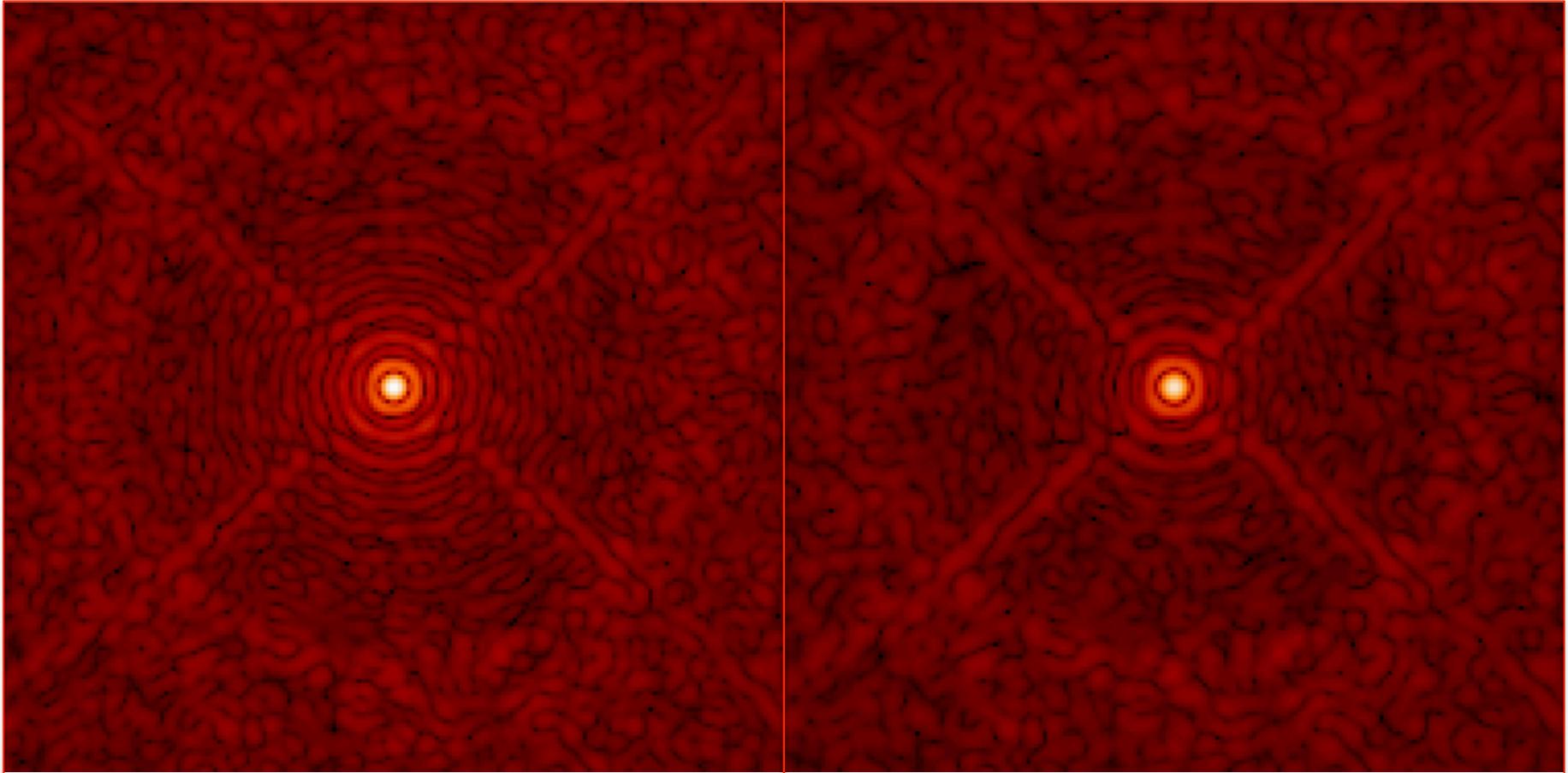
Lyot Stop



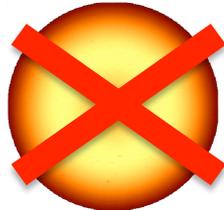


Le haut contraste

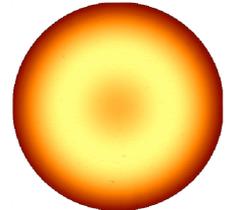
Apodiseur de pupille



Sans apodiseur



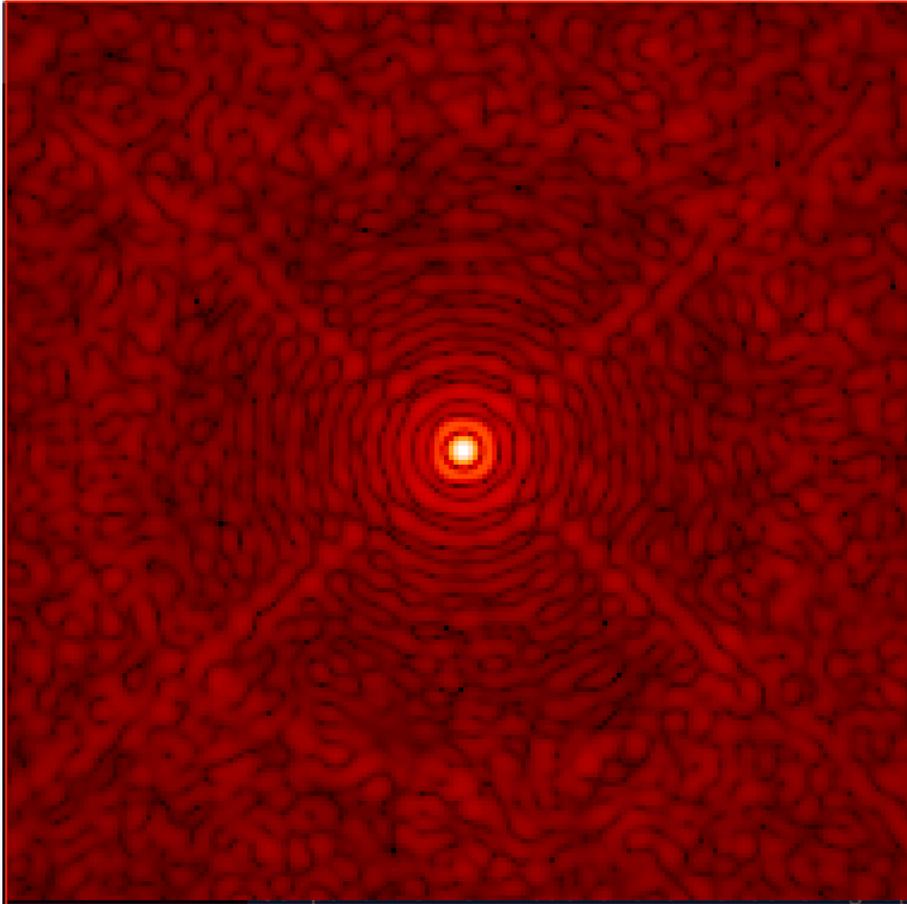
Avec apodiseur!



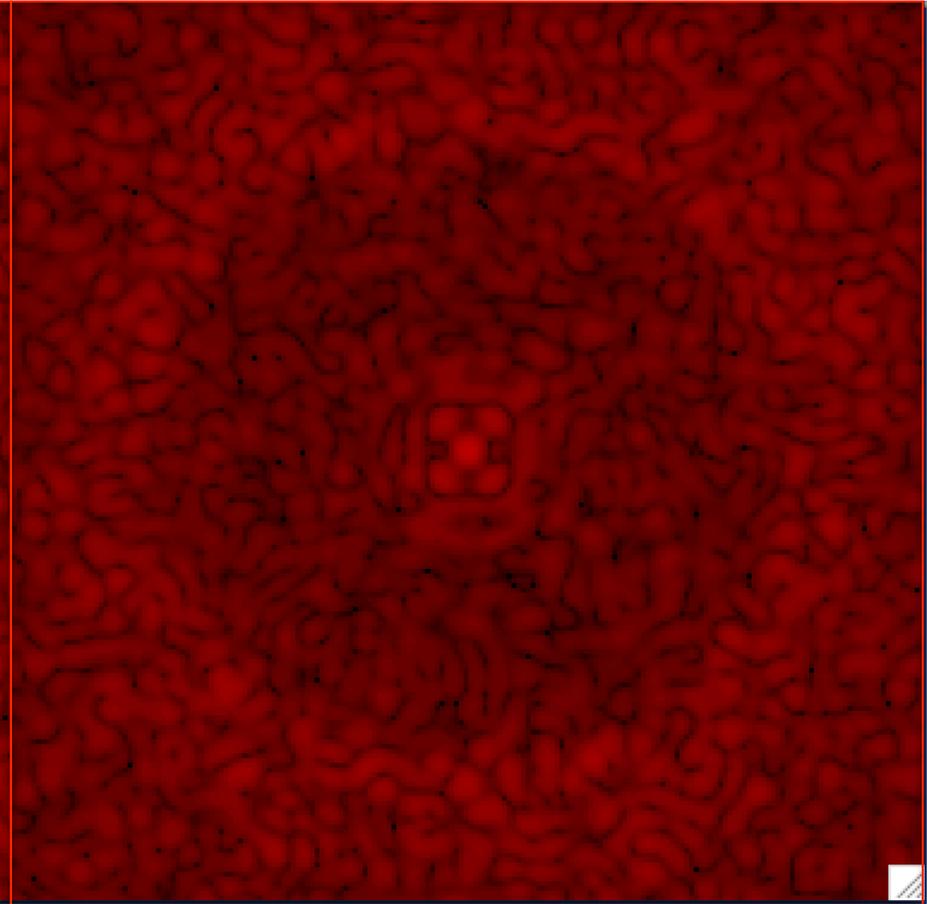


Le haut contraste

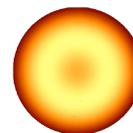
#3: Coronographe de Lyot apodisé



Sans masque plan focal



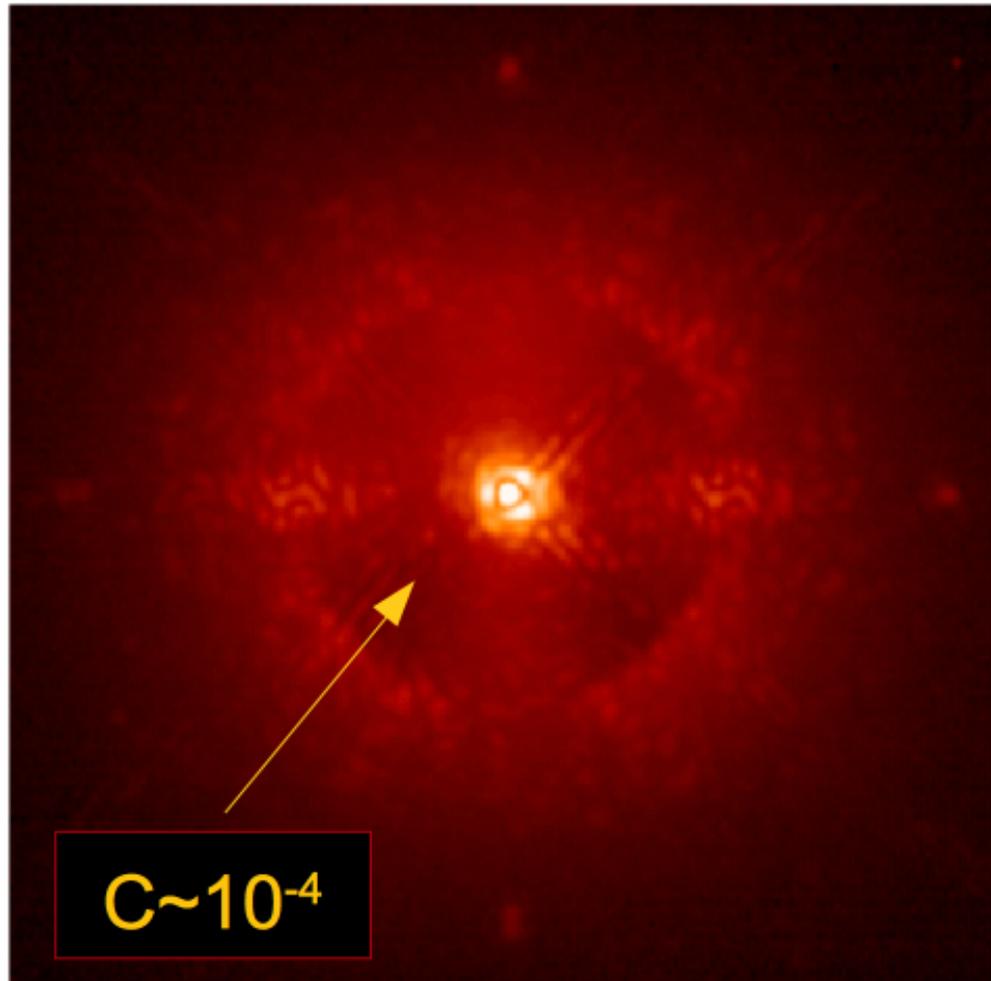
Apodiseur + Masque plan focal + Lyot stop +





Le haut contraste

Coronographe: les résultats !



VLT / SPHERE



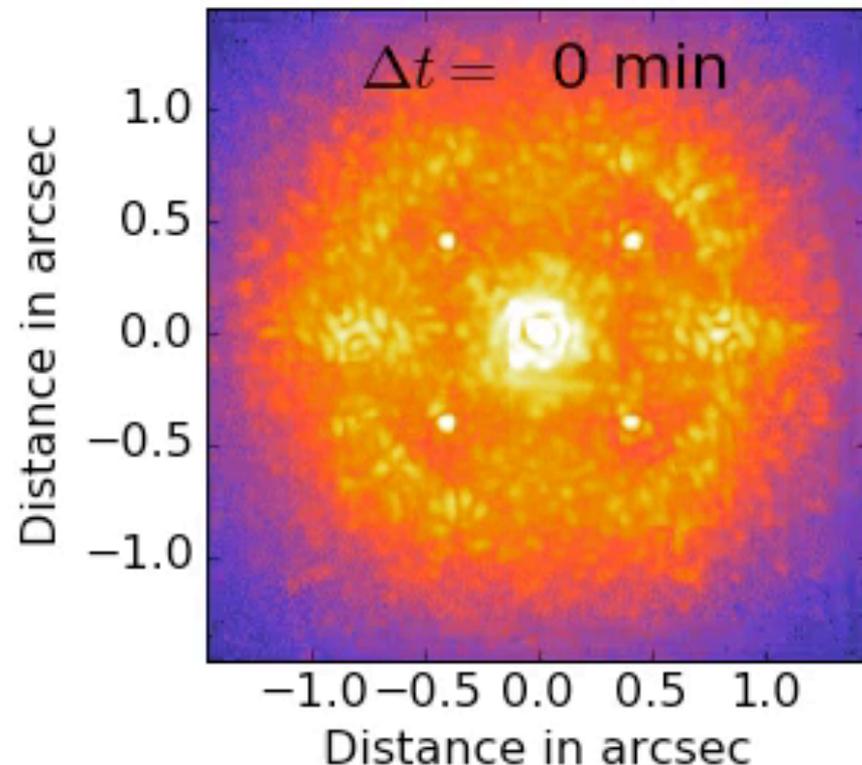
Le très haut contraste

#4: Le traitement d'images pour se débarrasser des résidus

Il **reste** des aberrations optiques qui varient dans le temps... :

- Aberrations non vues par l'optique adaptative
- Turbulence interne

Vidéo de SPHERE





Le très haut contraste

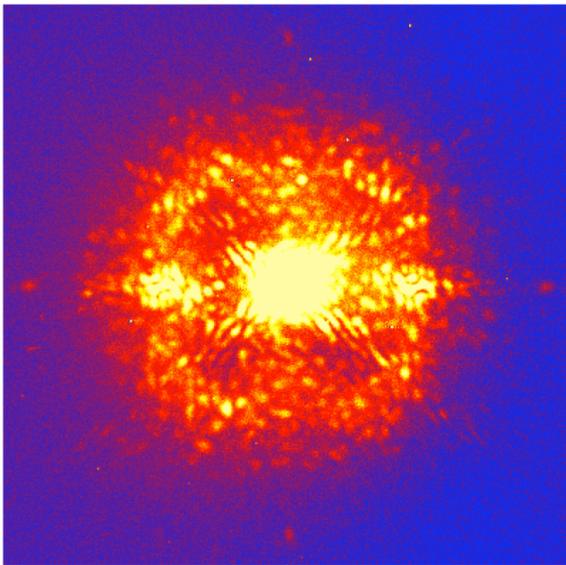
#4: Le traitement d'images pour se débarrasser des résidus

Idée de base:

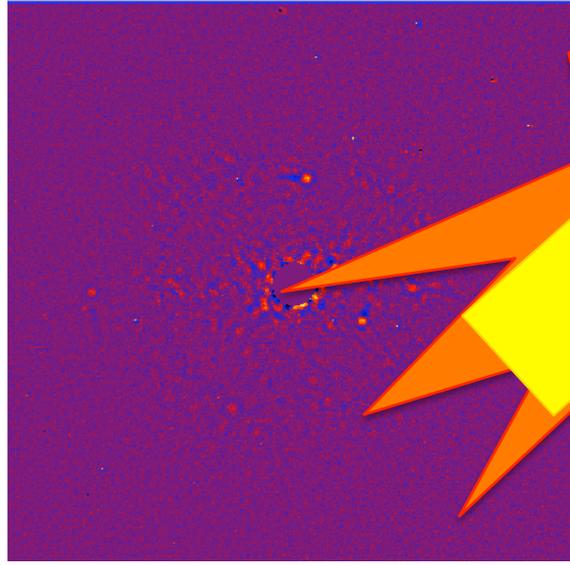
Trouver un comportement qui est **différent**
entre les résidus d'aberrations et les signaux planétaires
→ **L'exploiter pour retrouver le signal**

Aujourd'hui tous sont basés sur:

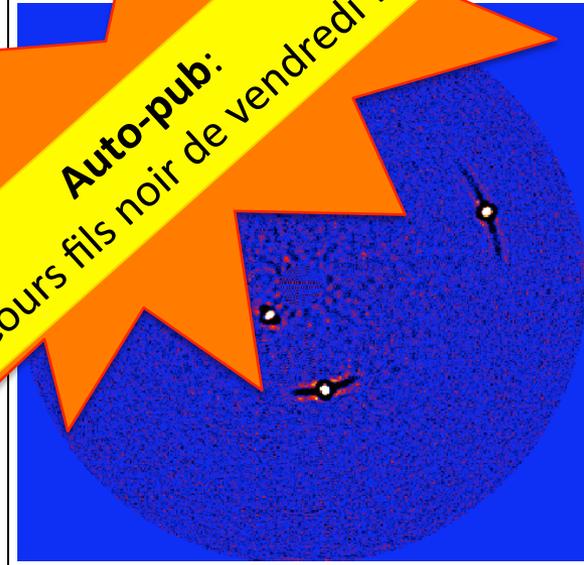
1. **Estimer** l'image de l'étoile



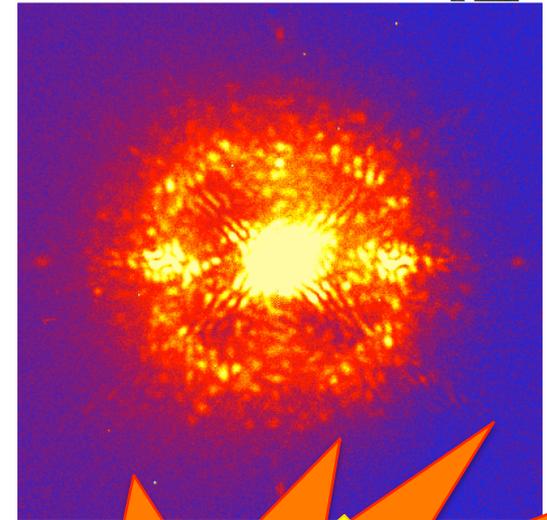
2. La **soustraire** à l'image



3. **Rechercher** les images



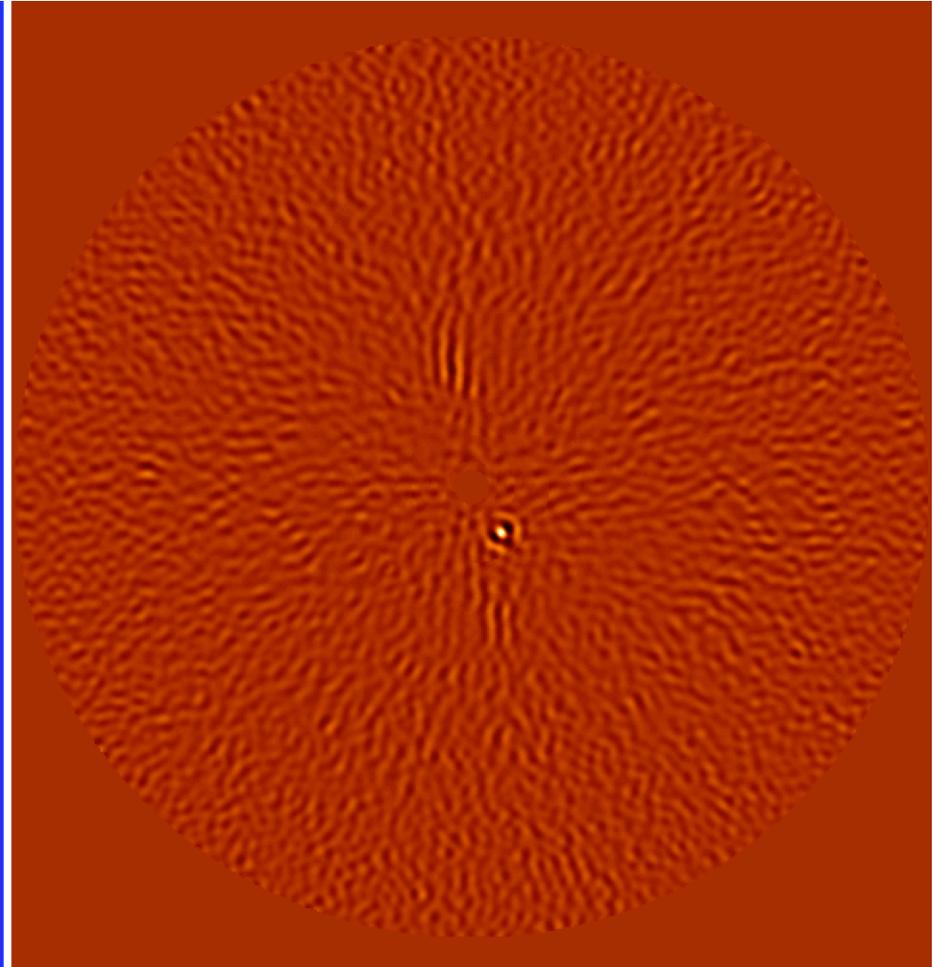
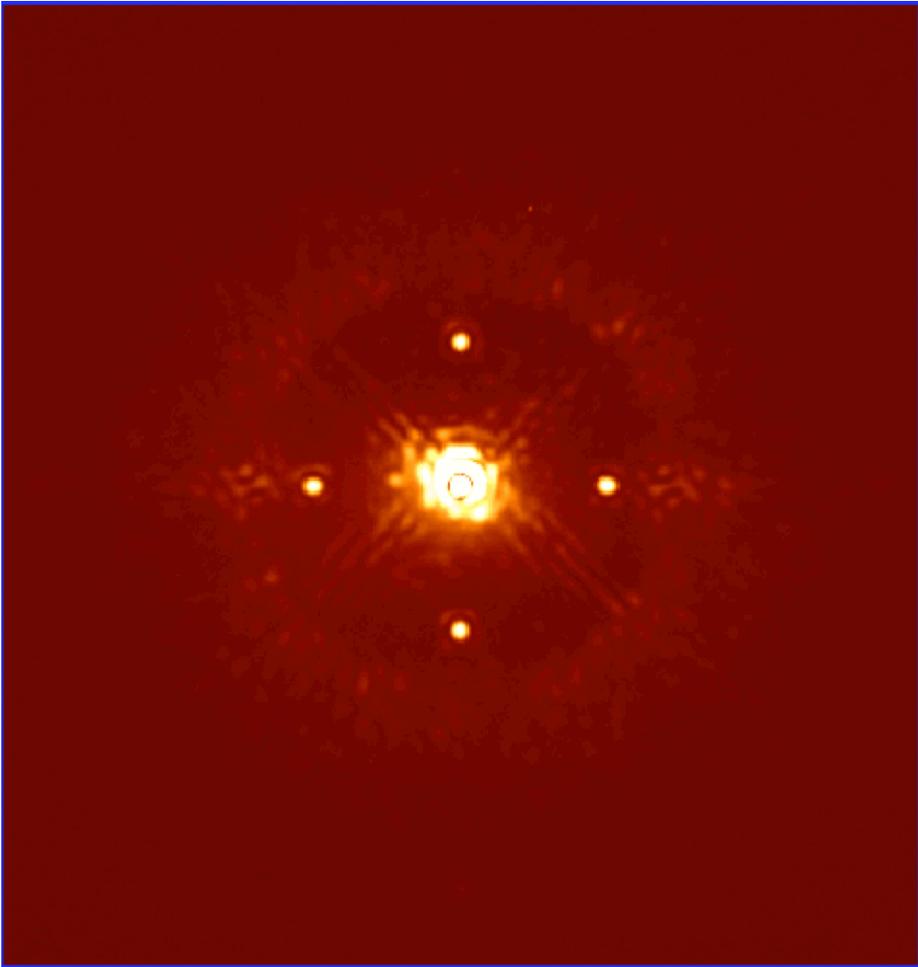
Auto-pub:
Cours fils noir de vendredi !





Le très haut contraste

Le traitement d'images: les résultats !





Le très haut contraste

Le traitement d'images: les résultats !

Gemini / NICI



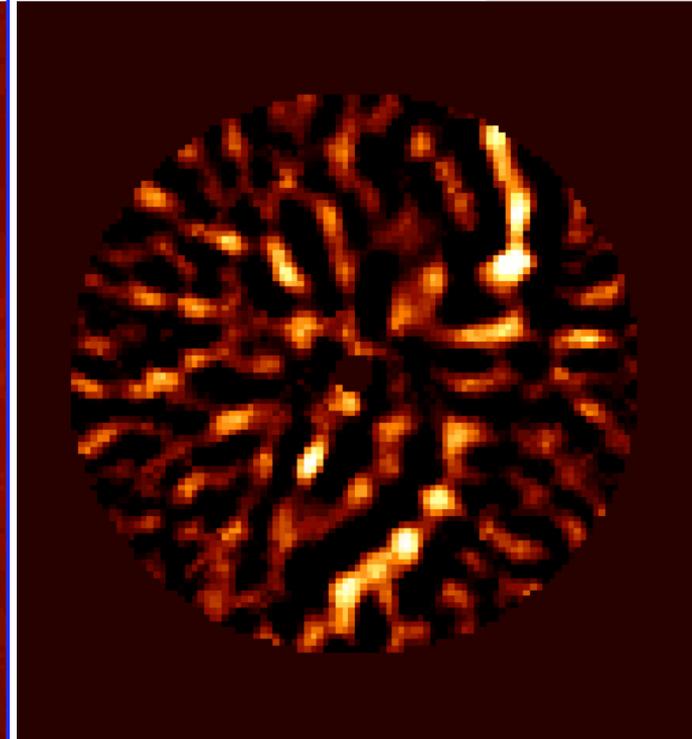
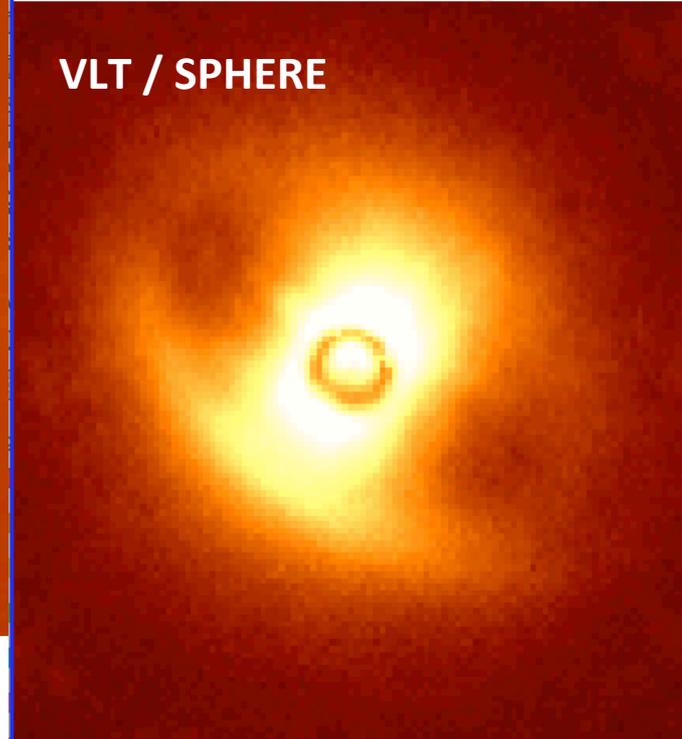
VLT / NACO



VLT / SPHERE



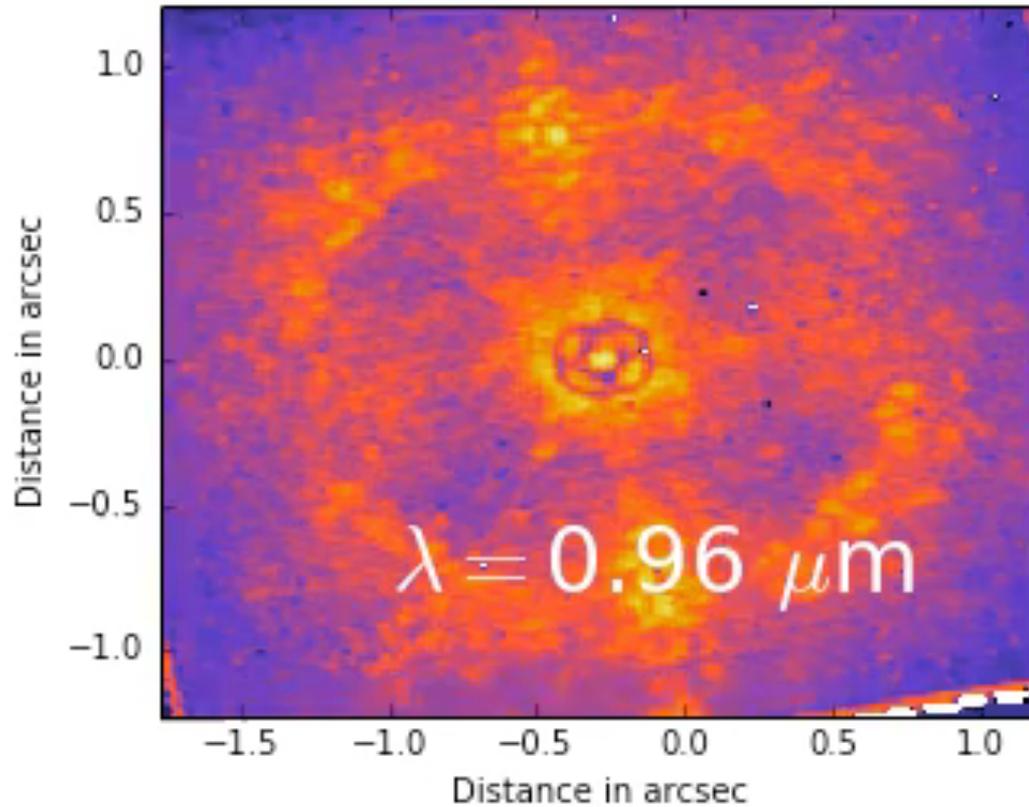
VLT / SPHERE





Le très haut contraste

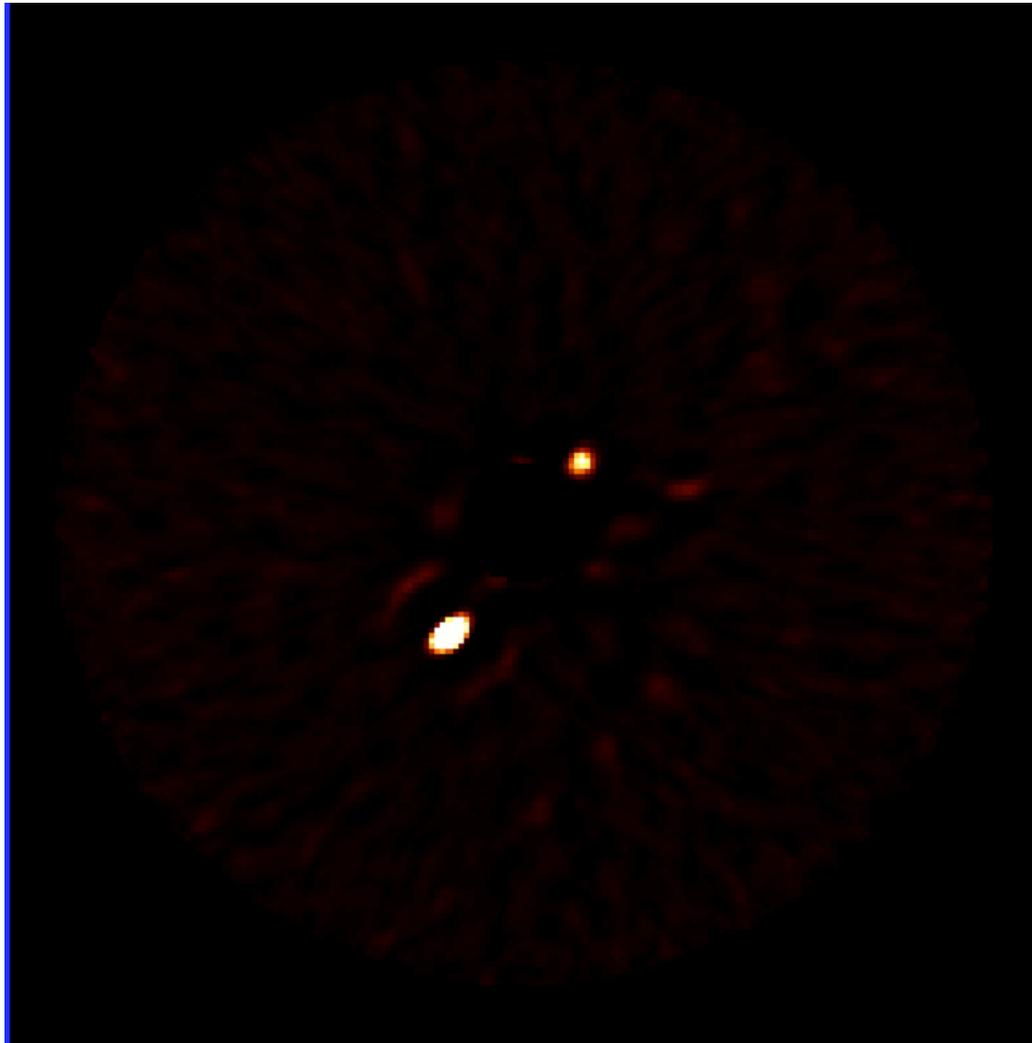
Le traitement d'images: les résultats !





Le très haut contraste

Le traitement d'images: les résultats !

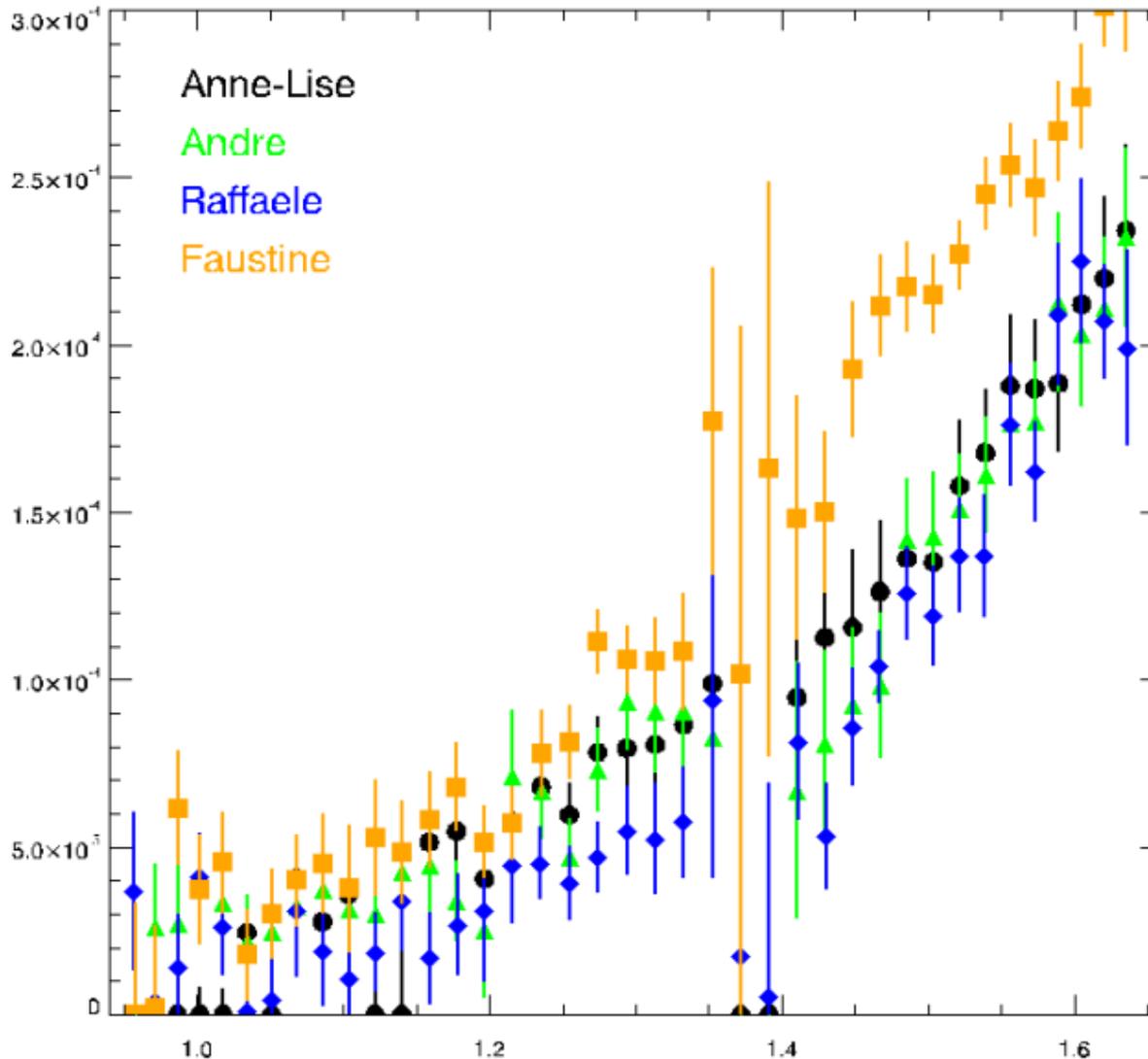


En combinant toutes les longueurs d'onde...



Le très haut contraste

Le traitement d'images: les résultats !

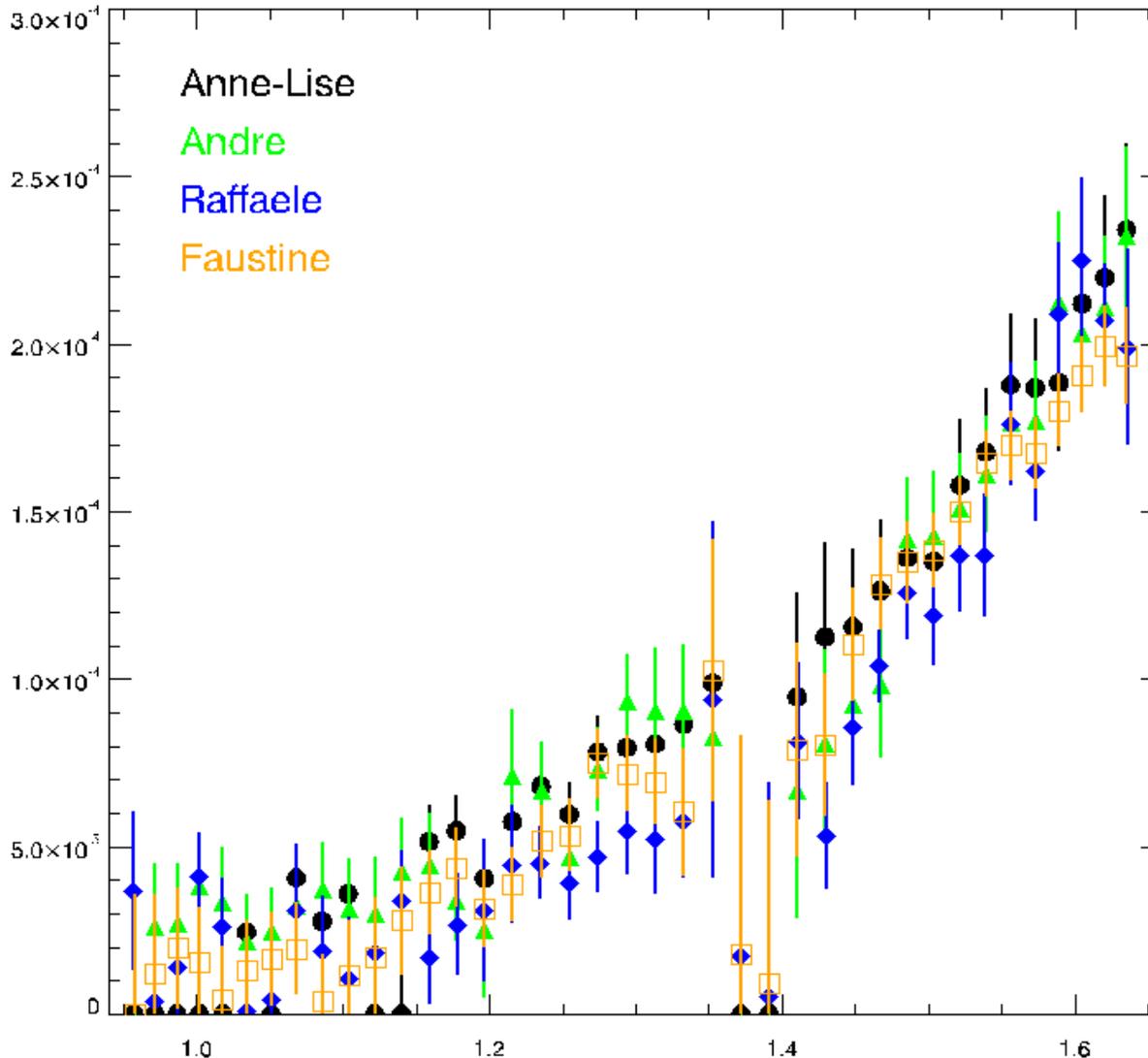


Avant le bug...



Le très haut contraste

Le traitement d'images: les résultats !



Après réparation
du bug !

La chaine d'imagerie

Pourquoi c'est difficile...

Notre liste de courses :

- #0- Un **gros télescope**
- #1- En **infrarouge proche**
- #2- Une **optique adaptative** qui va vite
- #3- Un **coronographe** bien efficace
- #4- Des **traitement d'images avancés**
- #5- Des **gentils** astronomes





La chaîne d'imagerie

Pourquoi c'est difficile...

Seeing-limited
H-band

Optique adaptative

Coronagraphie

Post-traitement

median seeing
0.8"

$C \sim 10^{-3}$

$C \sim 10^{-4}$

$C \sim 10^{-5} - 10^{-6}$

1"

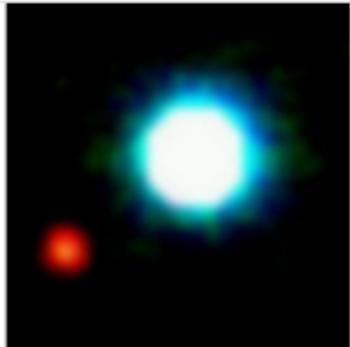


Détection d'exoplanètes, avant

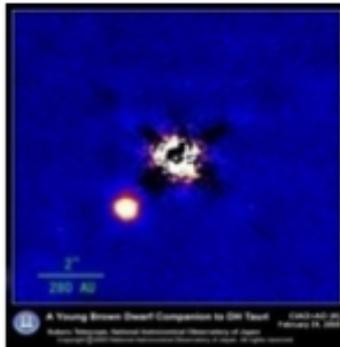
Les exoplanètes **loin** de leur étoile:

- Étoile K-M de faible masse
- > 200 UA

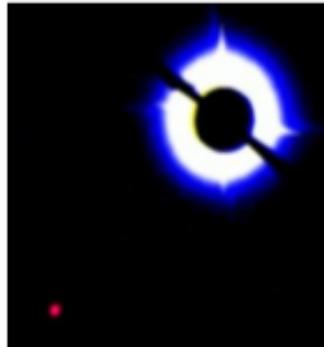
2M1207



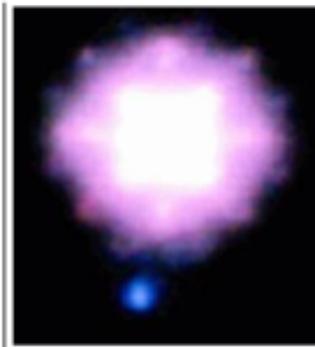
DH Tau



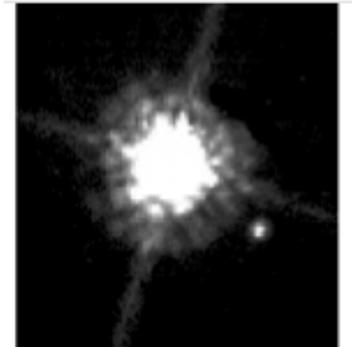
AB Pic



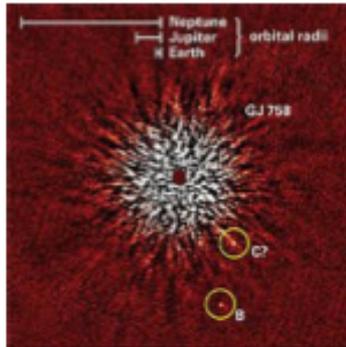
SCR1845



CHXR 73



GJ 758



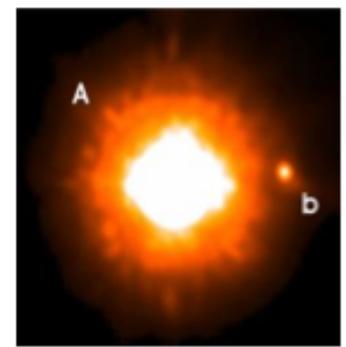
CT Cha



1RXJS609



GQ Lup



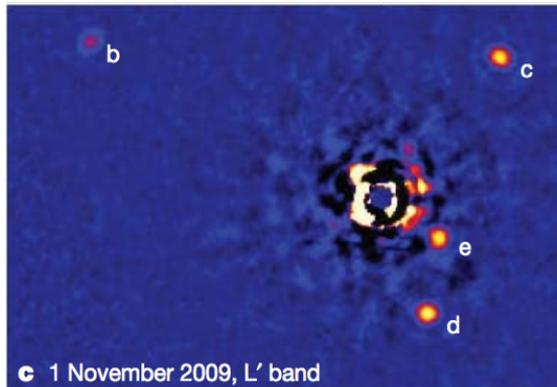


Détection d'exoplanètes, avant

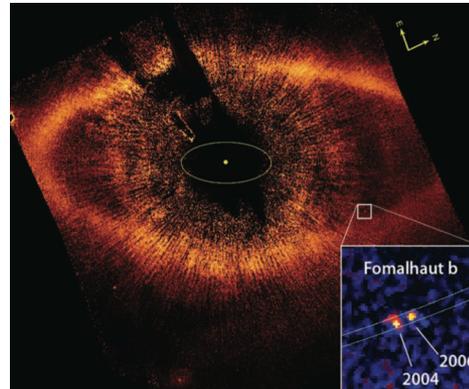
Les exoplanètes **proche** de leur étoile:

- Étoiles massives (A4V-A5V)
- < 120 UA
- Signatures de disques !

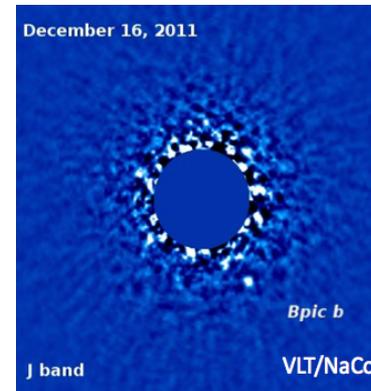
HR8799



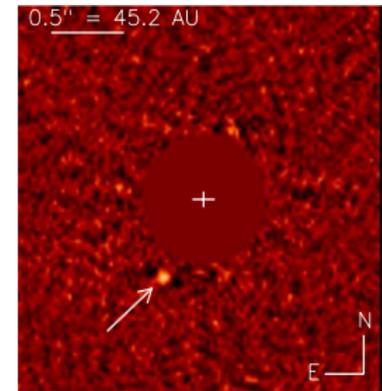
Fomalhaut



Beta Pic



HD95086

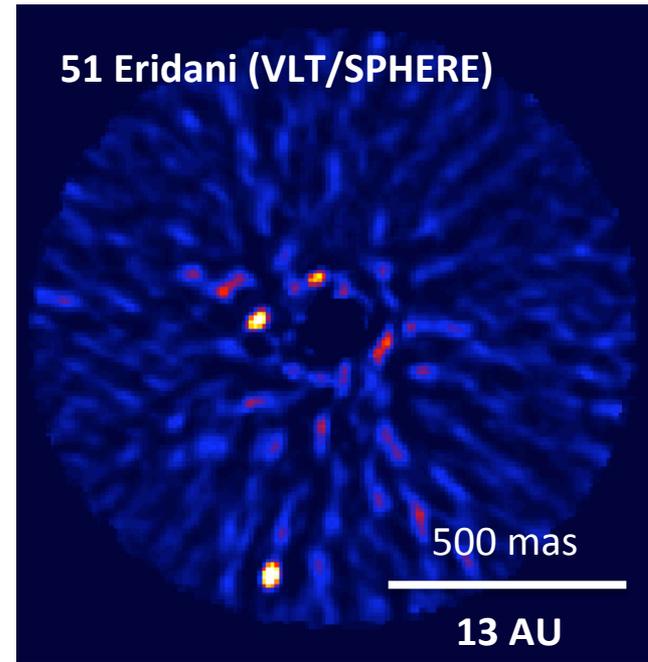


Les nouvelles détections

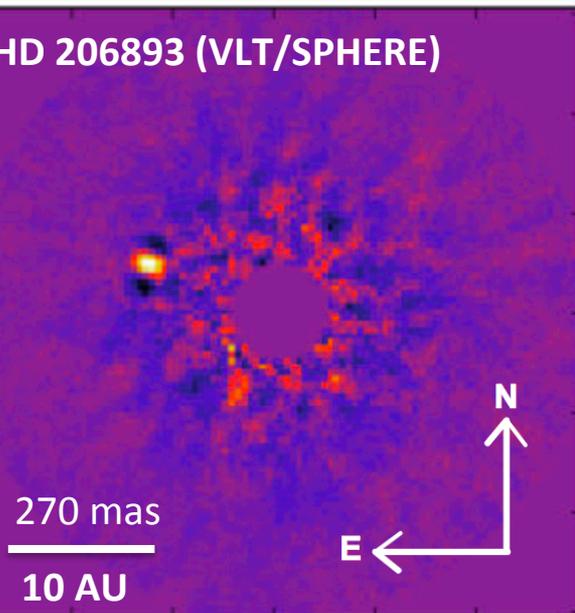
Seulement 4... depuis Mai 2014 !

Mais pleins de candidats !

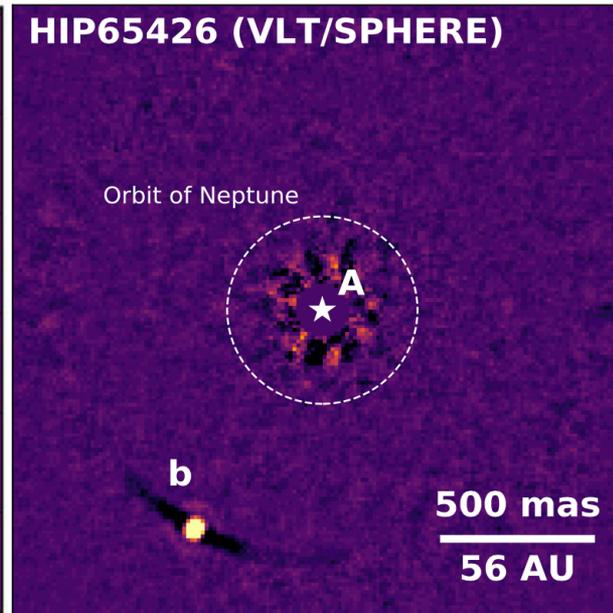
Les résultats



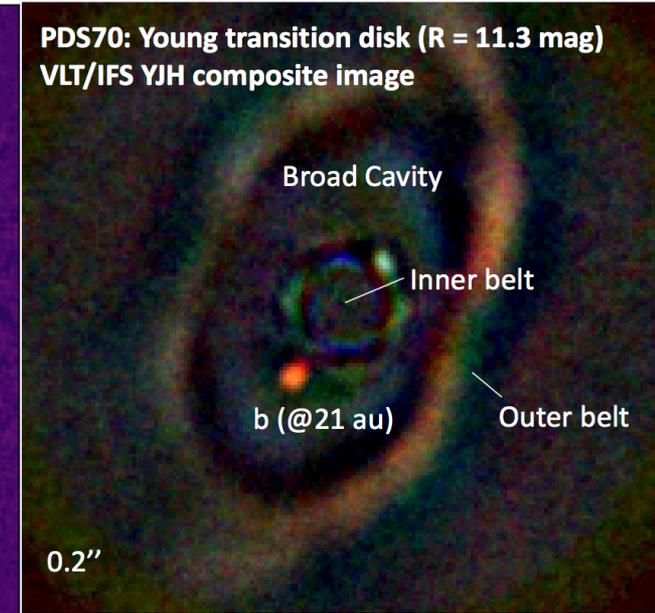
HD 206893 (VLT/SPHERE)



HIP65426 (VLT/SPHERE)

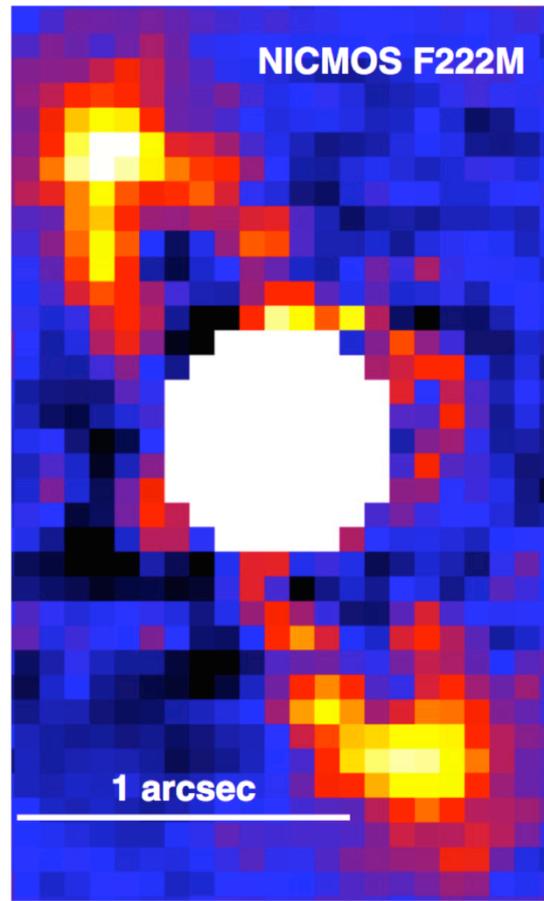


PDS70: Young transition disk (R = 11.3 mag)
VLT/IFS YJH composite image

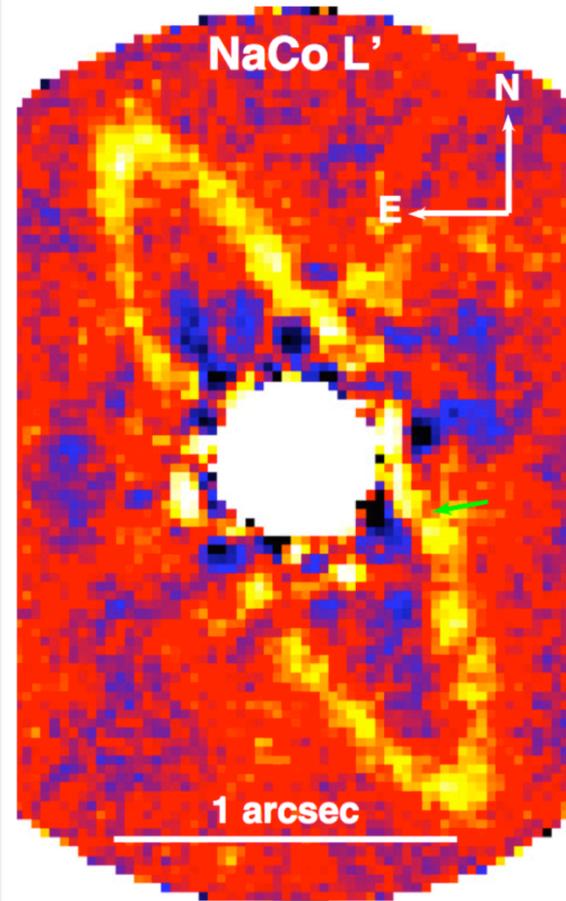




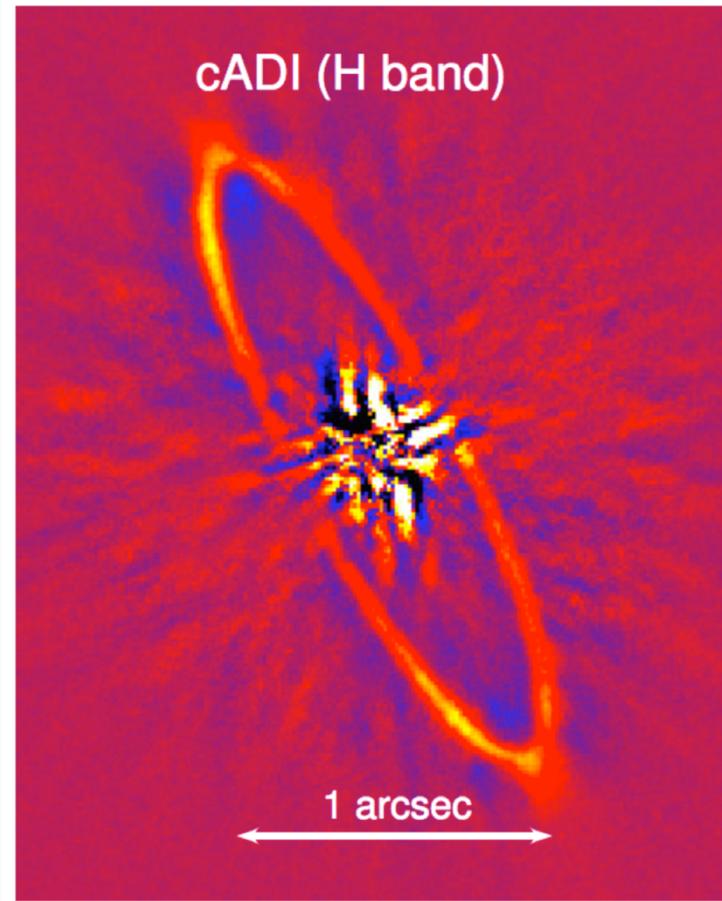
Disques de débris, ex/ HR4796



Telescope spatial Hubble

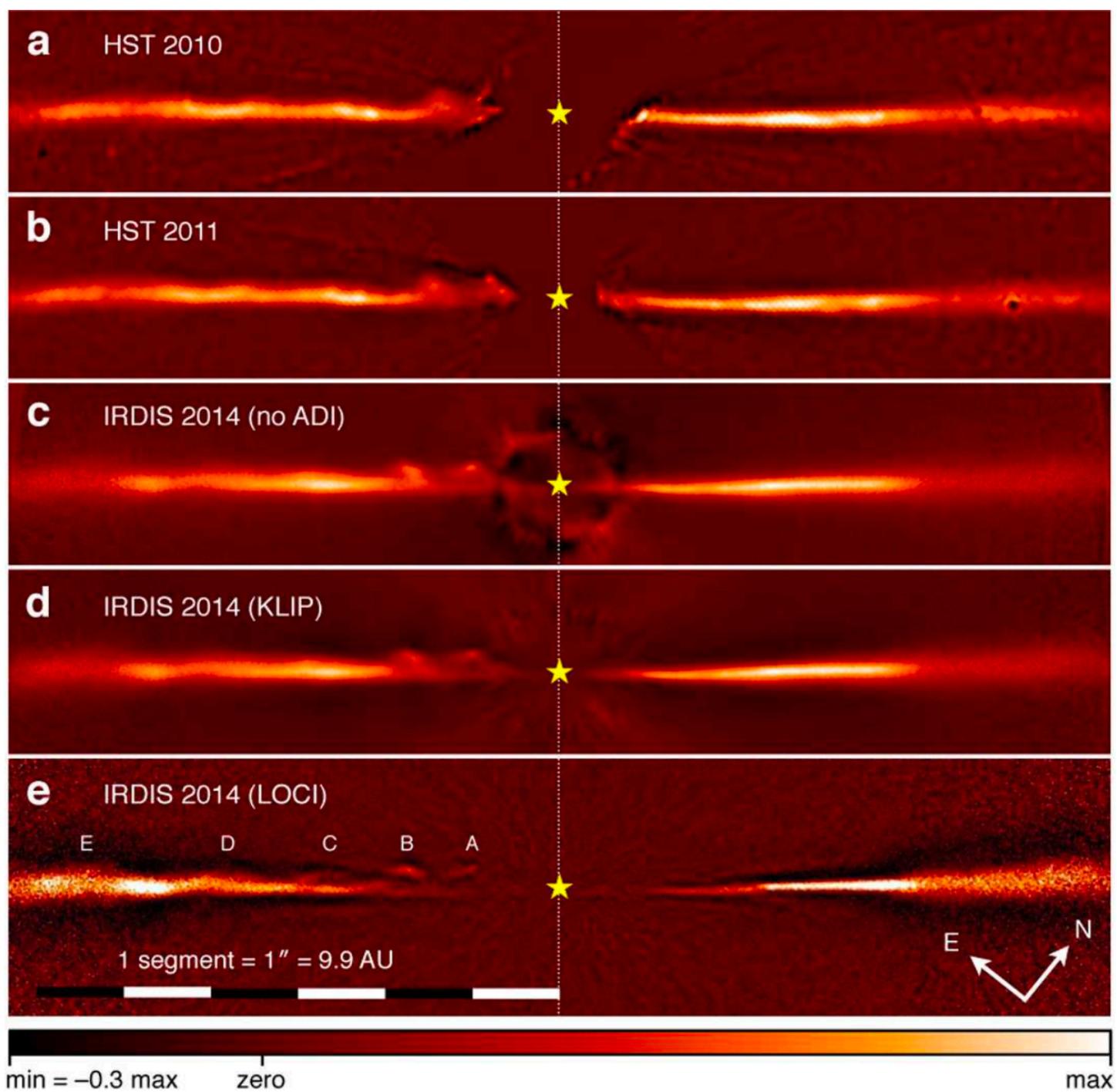


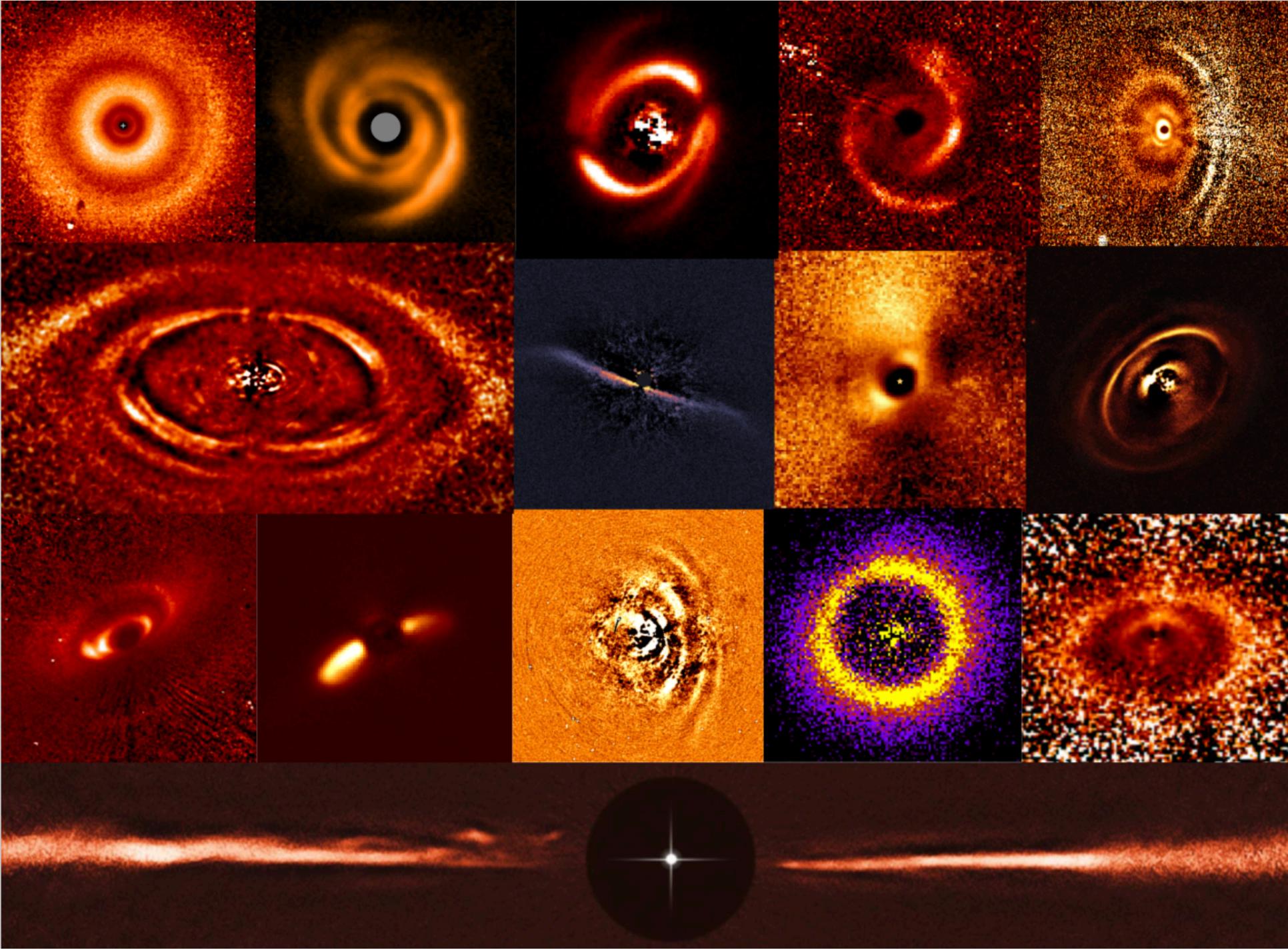
VLT / NaCo en bande L'



VLT / SPHERE en bande H

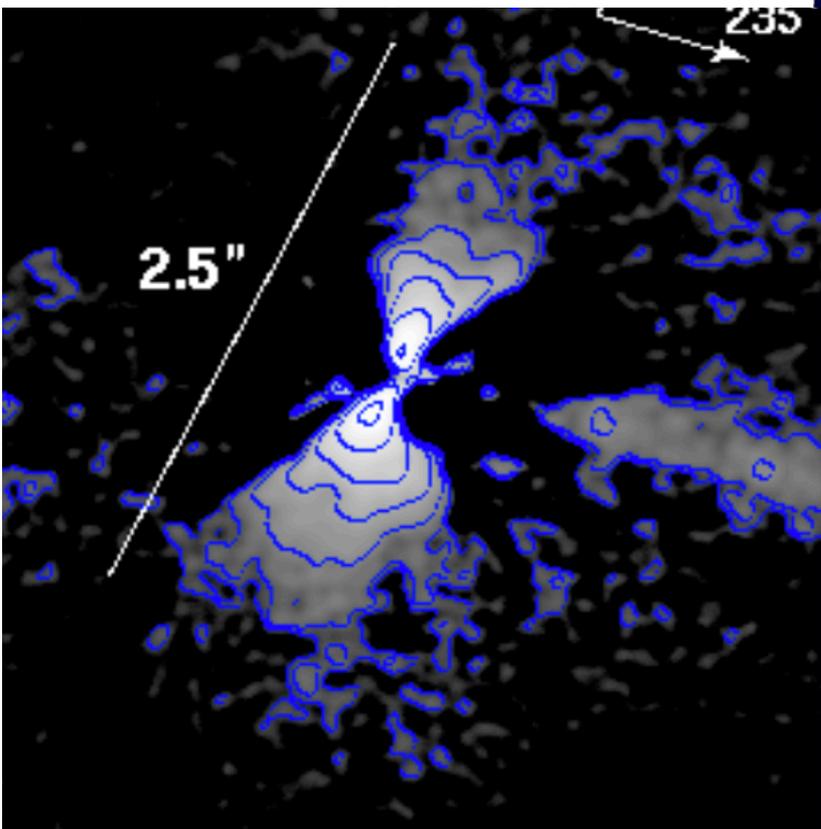
Le cas de AU Mic



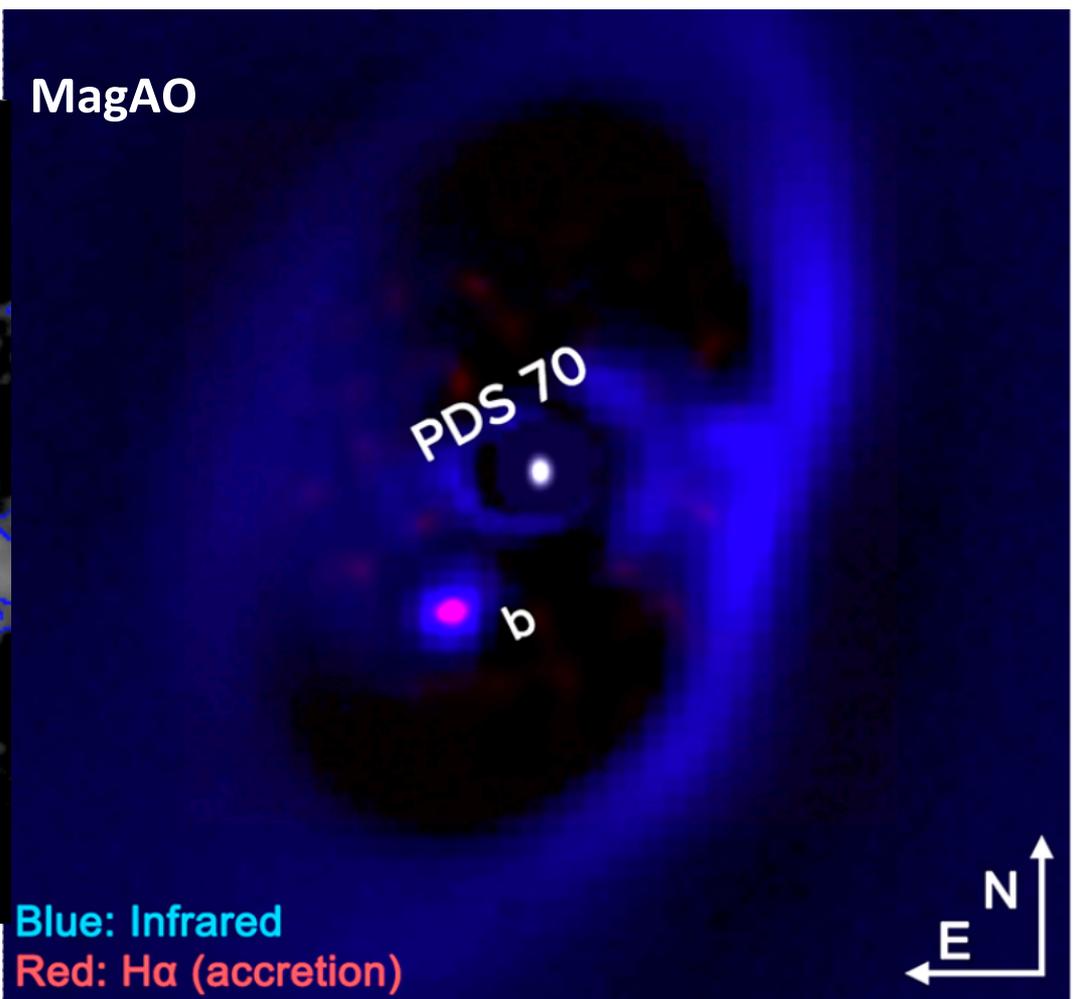




Disques jeunes



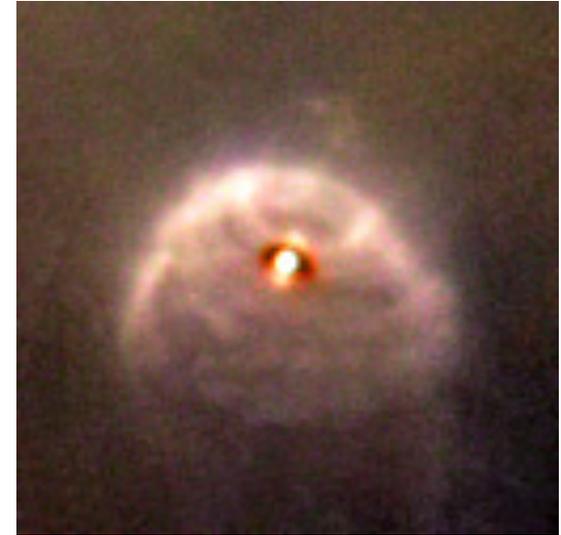
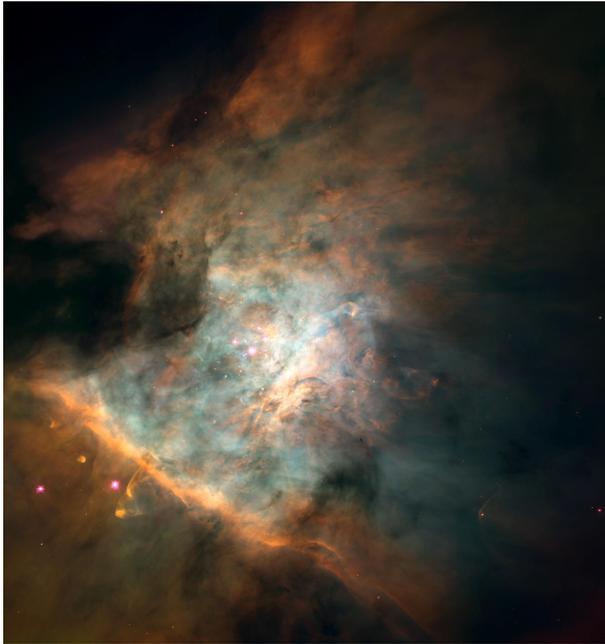
2007



2018

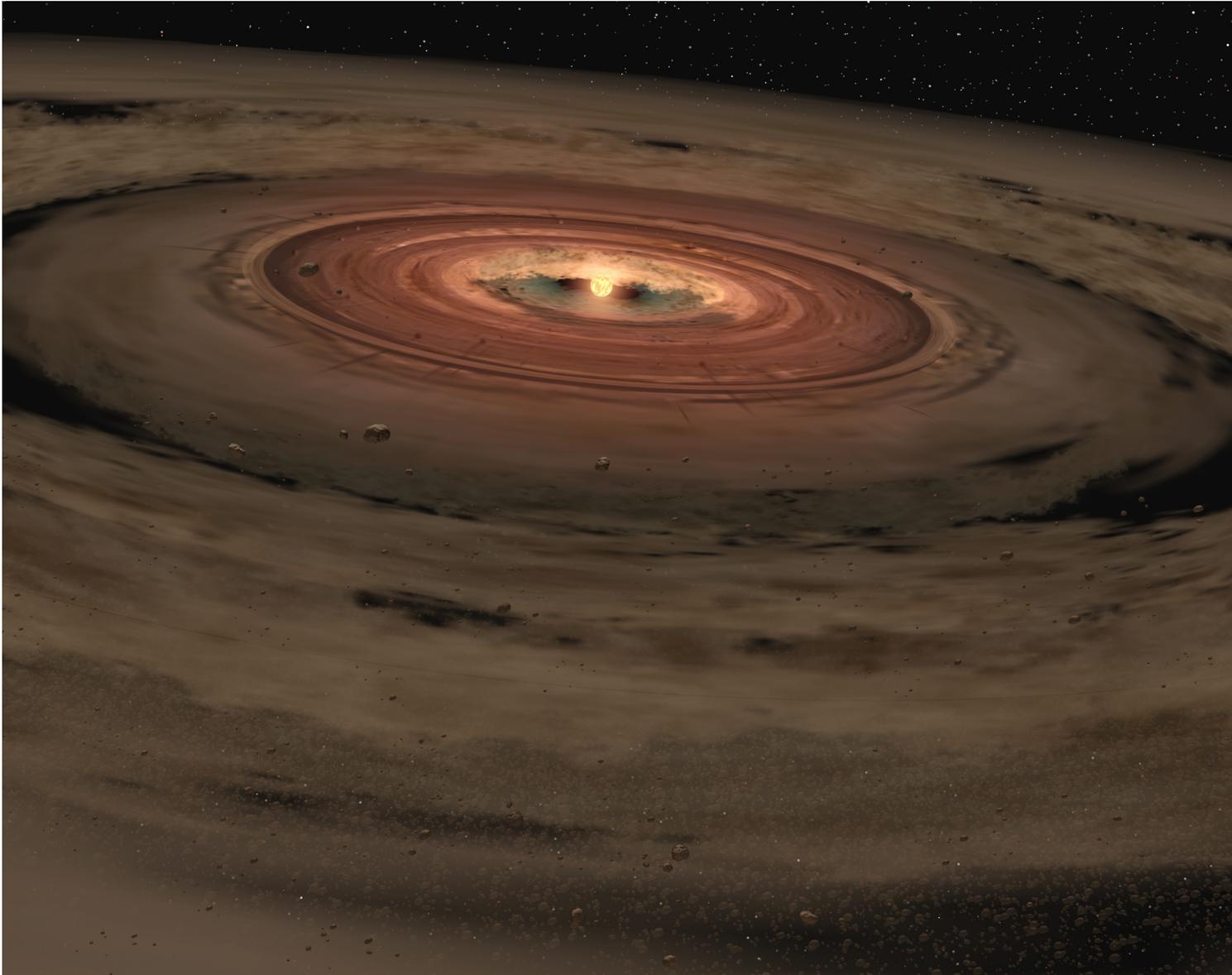
Disques très jeunes

Les résultats



Disques très jeunes

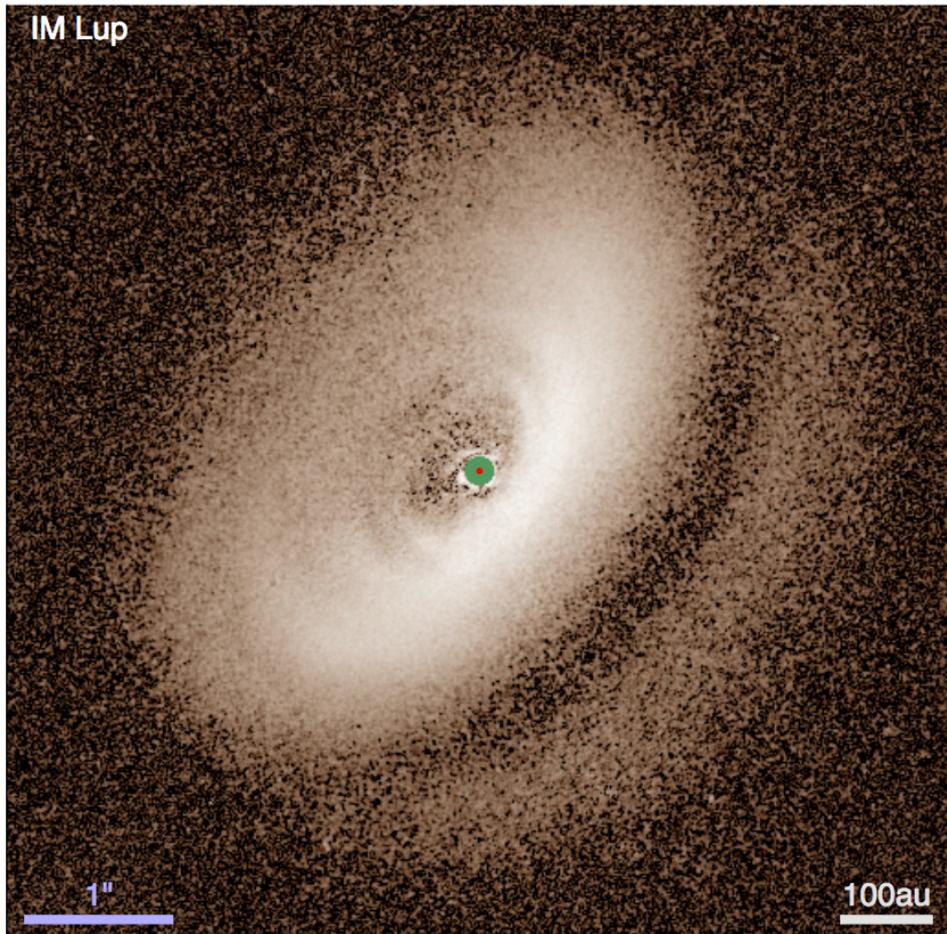
Les résultats



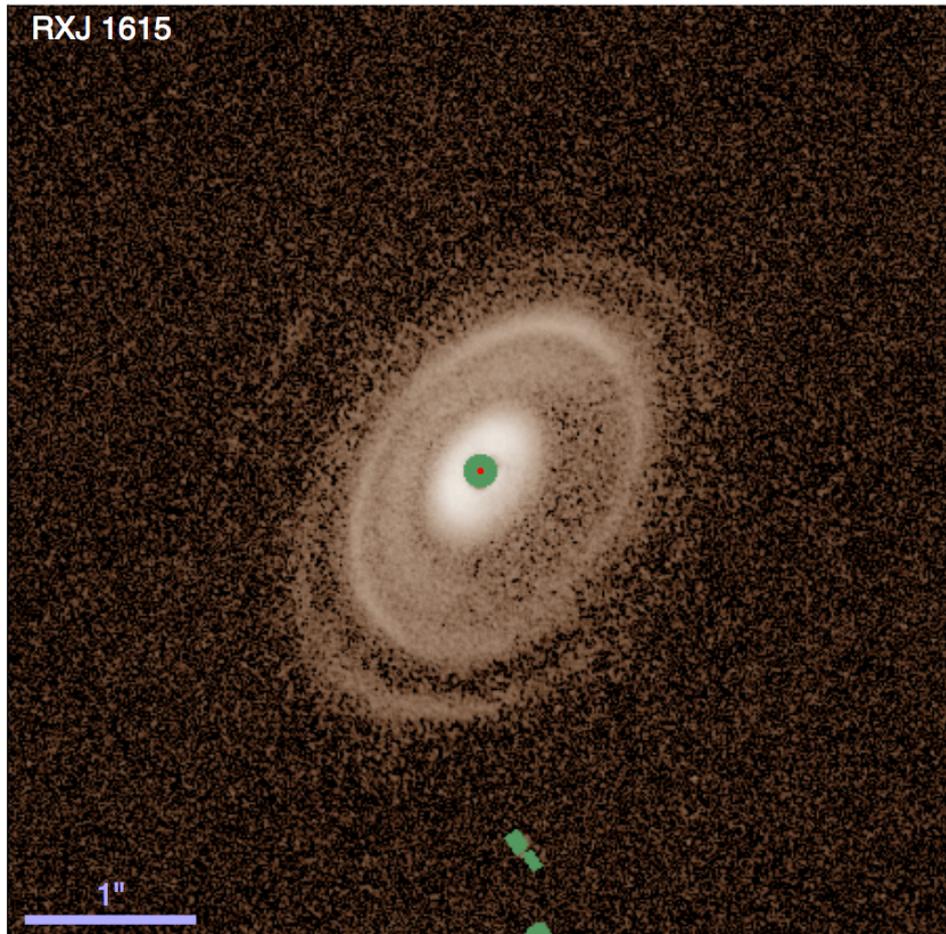


Disques très jeunes

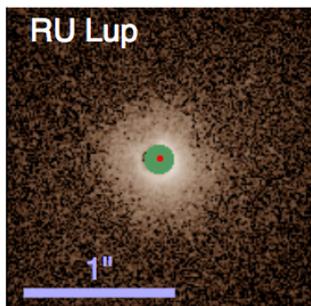
IM Lup



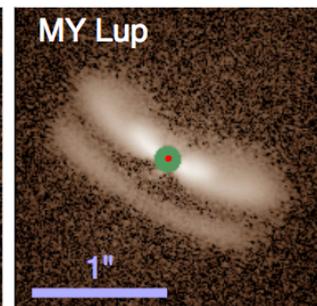
RXJ 1615



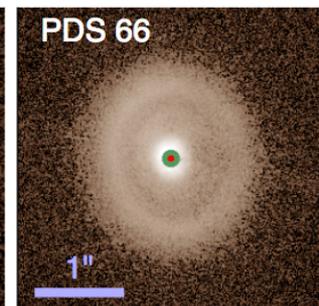
RU Lup



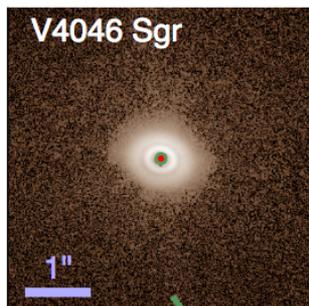
MY Lup



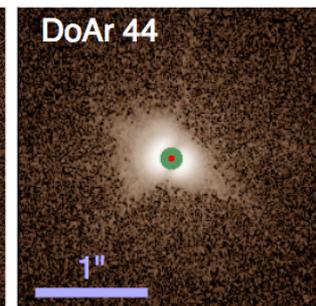
PDS 66



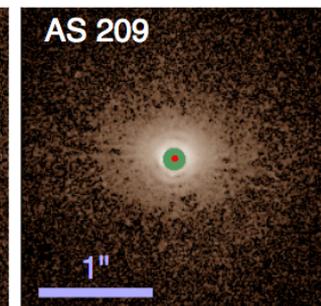
V4046 Sgr



DoAr 44



AS 209



L'imagerie d'exoplanètes

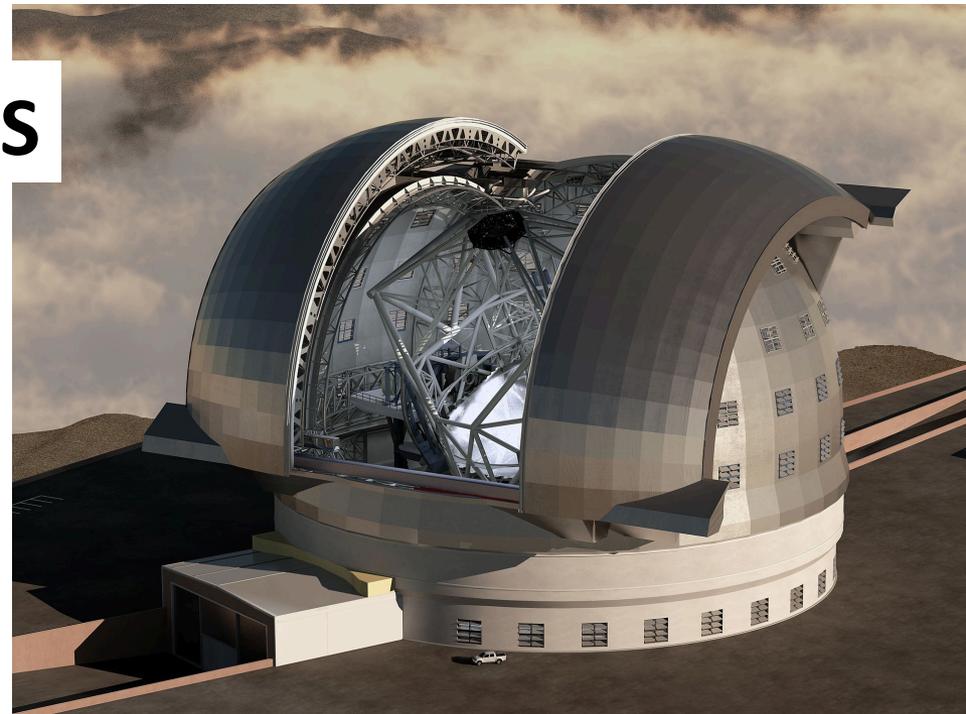
Le futur !

Le futur...



L'américain
L'USA-ien

V.S



L'europpéen



Notre liste de courses:

#0- Un gros telescope

#1- En infrarouge proche

#2- Une optique adaptative avec un bon miroir déformable qui va vite

#3- Un coronographe bien efficace

#4- Des traitement d'images avancés et des lignes de codes

#5- Des gentils astronomes

Le futur...



Great Paris Exhibition Telescope

(lens at the same scale)
Paris, France (1900)

Yerkes Observatory

(40" refractor lens at the same scale)
Williams Bay, Wisconsin (1893)



Hooker (100")
Mt Wilson, California (1917)



Hale (200")
Mt Palomar, California (1948)



(1979-1998) **Multi Mirror Telescope**
Mount Hopkins, Arizona



Hobby-Eberly Telescope
Davis Mountains, Texas (1996)



BTA-6 (Large Altazimuth Telescope)
Zelenchuksky, Russia (1975)



Large Zenith Telescope
British Columbia, Canada (2003)



Gaia
Earth-Sun L2 point (2014)



Kepler
Earth-trailing solar orbit (2009)



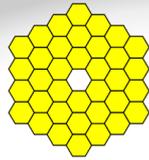
James Webb Space Telescope
Earth-Sun L2 point (planned 2018)



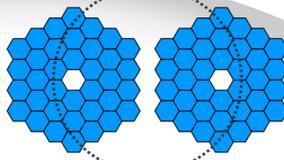
Hubble Space Telescope
Low Earth Orbit (1990)



Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope
Hebei, China (2009)



Gran Telescopio Canarias
La Palma, Canary Islands, Spain (2007)



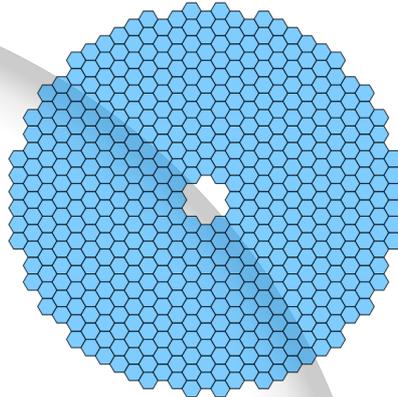
Keck Telescope
Mauna Kea, Hawaii (1993/1996)



Gemini North
Mauna Kea, Hawaii (1999)



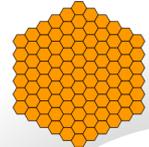
Subaru Telescope
Mauna Kea, Hawaii (1999)



Thirty Meter Telescope
Mauna Kea, Hawaii (planned 2022)



Southern African Large Telescope
Sutherland, South Africa (2005)



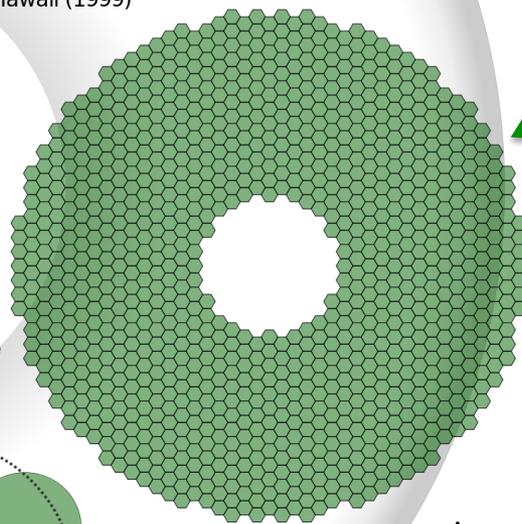
Very Large Telescope
Cerro Paranal, Chile (1998-2000)



Gemini South
Cerro Pachón, Chile (2000)

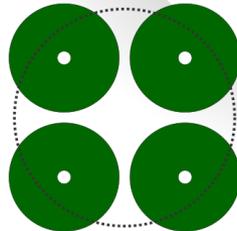
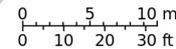


Large Synoptic Survey Telescope
El Peñón, Chile (planned 2020)

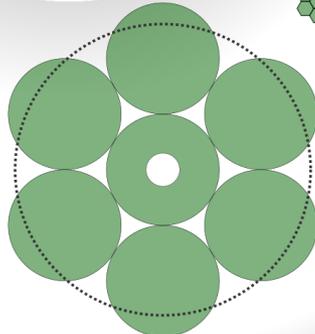


European Extremely Large Telescope
Cerro Armazones, Chile (planned 2022)

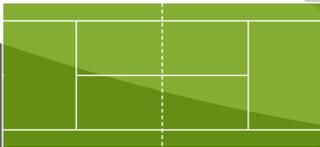
Human at the same scale



Magellan Telescopes
Las Campanas, Chile (2000/2002)



Giant Magellan Telescope
Las Campanas Observatory, Chile (planned 2020)

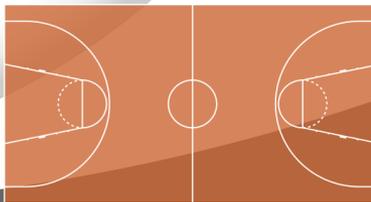


Tennis court at the same scale



Overwhelmingly Large Telescope
(cancelled)

Arecibo radio telescope at the same scale



Basketball court at the same scale

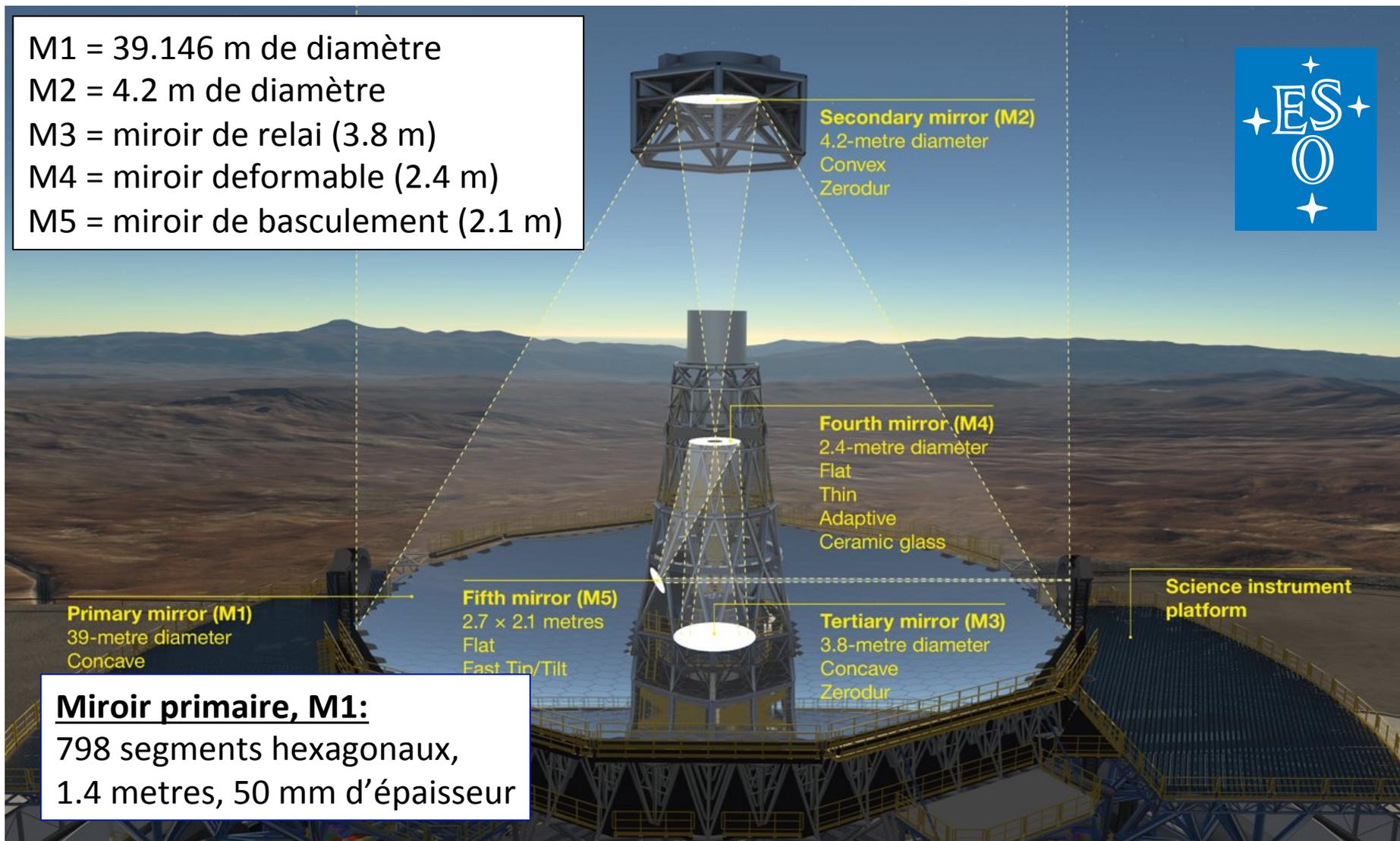
L'ELT !





L'Extremely Large Telescope

M1 = 39.146 m de diamètre
M2 = 4.2 m de diamètre
M3 = miroir de relai (3.8 m)
M4 = miroir déformable (2.4 m)
M5 = miroir de basculement (2.1 m)



Miroir primaire, M1:

798 segments hexagonaux,
1.4 metres, 50 mm d'épaisseur



Notre liste de courses mise à jour:

#0- Un **trés gros telescope**

#1- En **infrarouge proche moyen !**

#2- Une **optique adaptative** avec un bon miroir déformable qui va vite

#3- Un **coronographe** bien efficace

#4- Des **traitement d'images avancés** et des lignes de codes

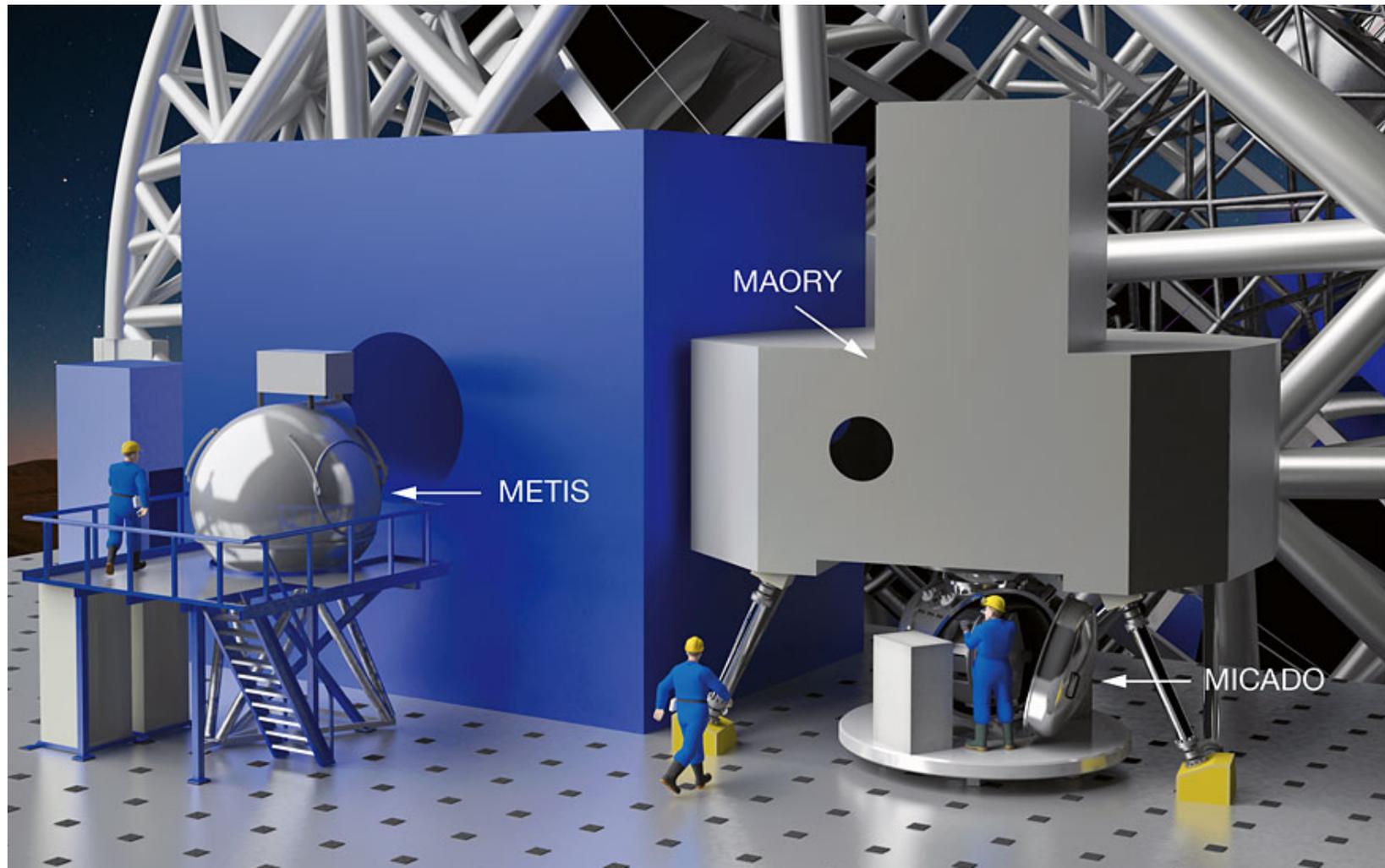
#5- Des **gentils** astronomes

METIS à l'ELT



Mid-infrared
E-ELT Imager and
Spectrograph

Le futur...





Notre liste de courses mise à jour:

#0- Un **trés** gros telescope

#1- En **infrarouge proche moyen** !

#2- Une **optique adaptative** avec un bon miroir déformable (qui va vite)
+ un **capteur de front d'onde** plus sensible

#3- Un **coronographe** bien efficace

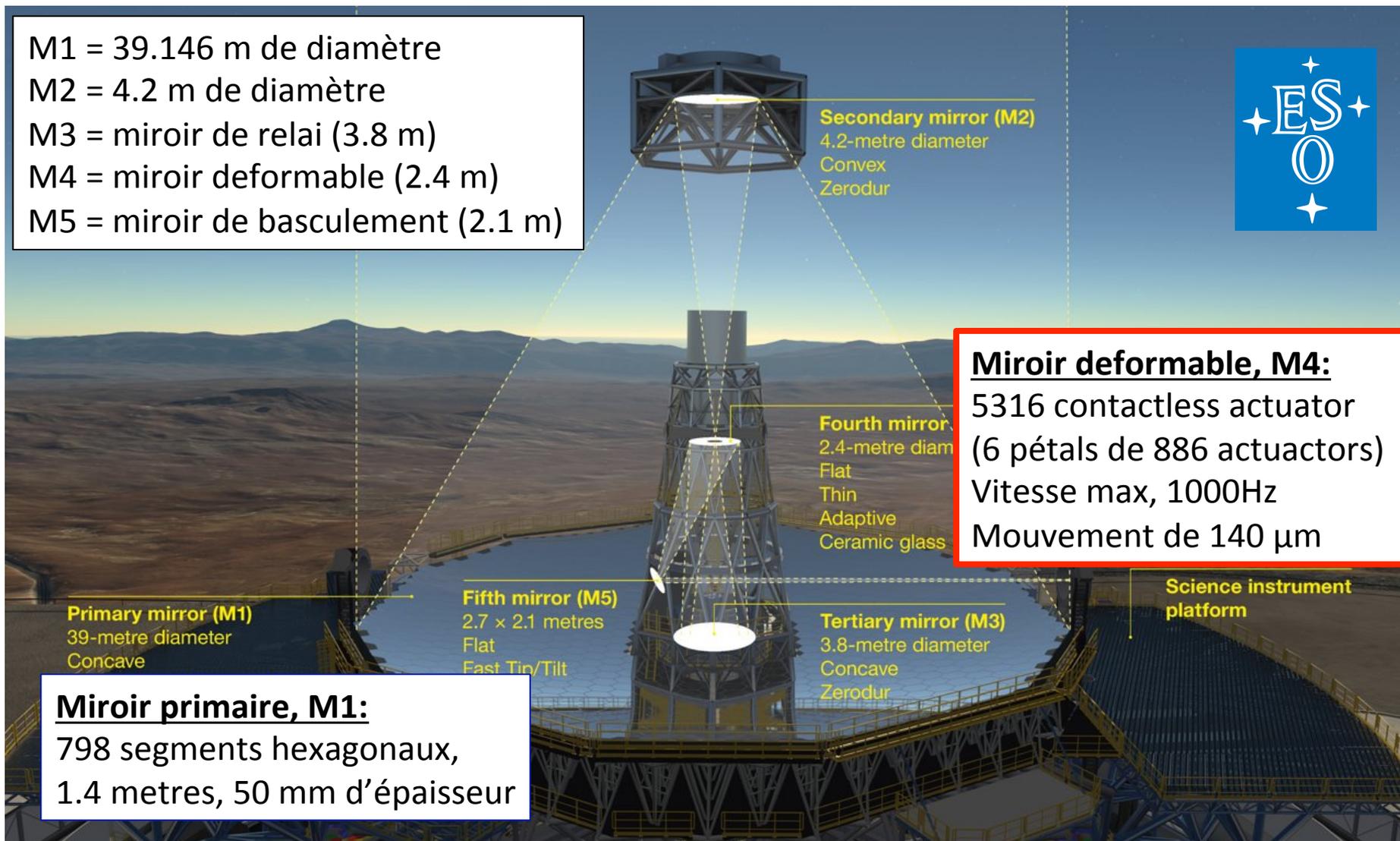
#4- Des **traitement d'images avancés** et des lignes de codes

#5- Des **gentils** astronomes



L'Extremely Large Telescope, Miroir déformable

M1 = 39.146 m de diamètre
M2 = 4.2 m de diamètre
M3 = miroir de relai (3.8 m)
M4 = miroir déformable (2.4 m)
M5 = miroir de basculement (2.1 m)

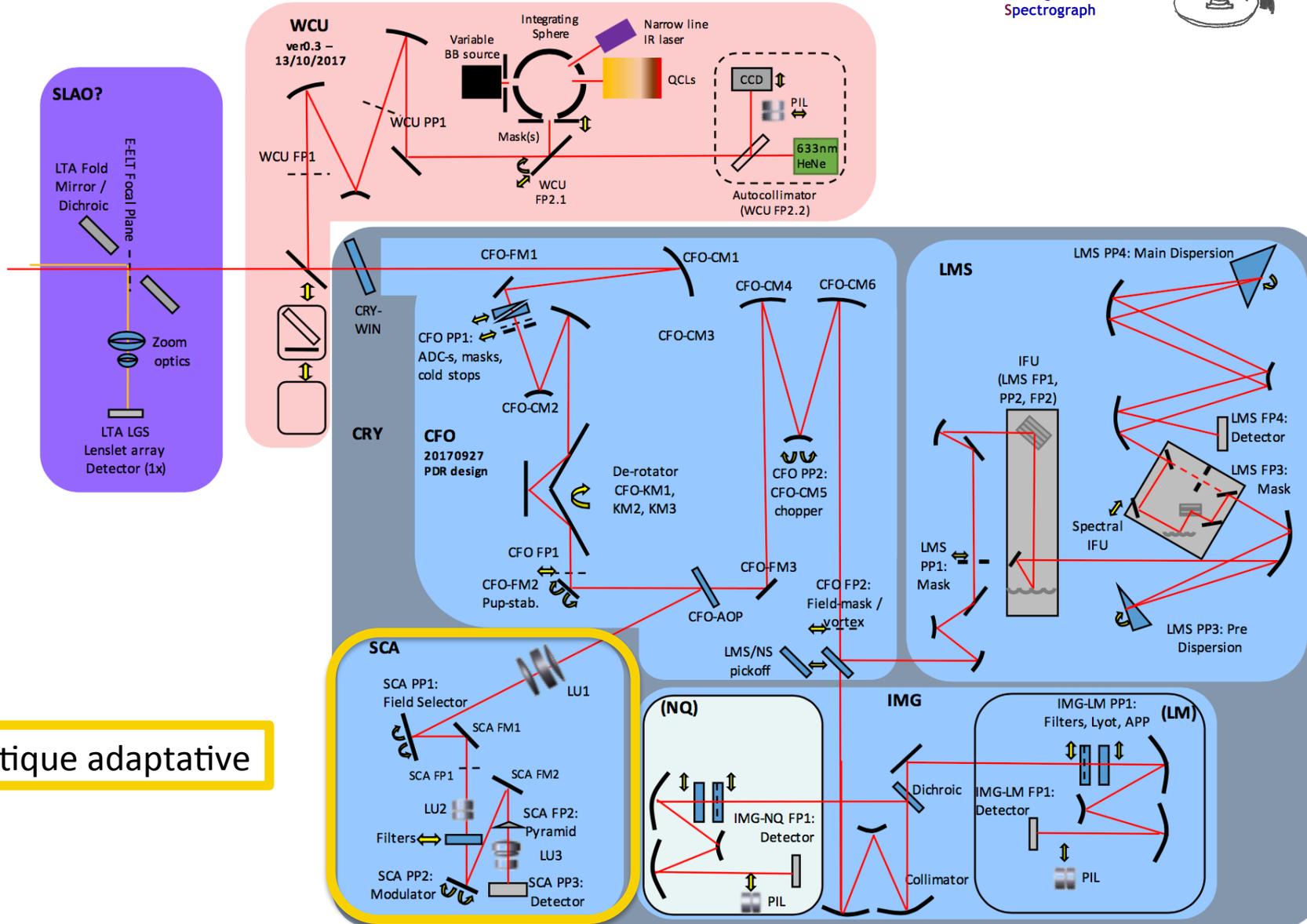
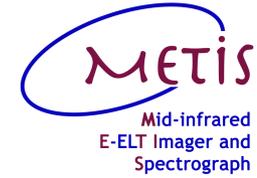


Miroir déformable, M4:
5316 contactless actuator
(6 pétales de 886 actuators)
Vitesse max, 1000Hz
Mouvement de 140 μm

Miroir primaire, M1:
798 segments hexagonaux,
1.4 metres, 50 mm d'épaisseur

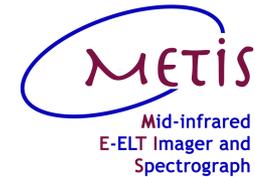
L'Extremely Large Telescope,

Le futur...

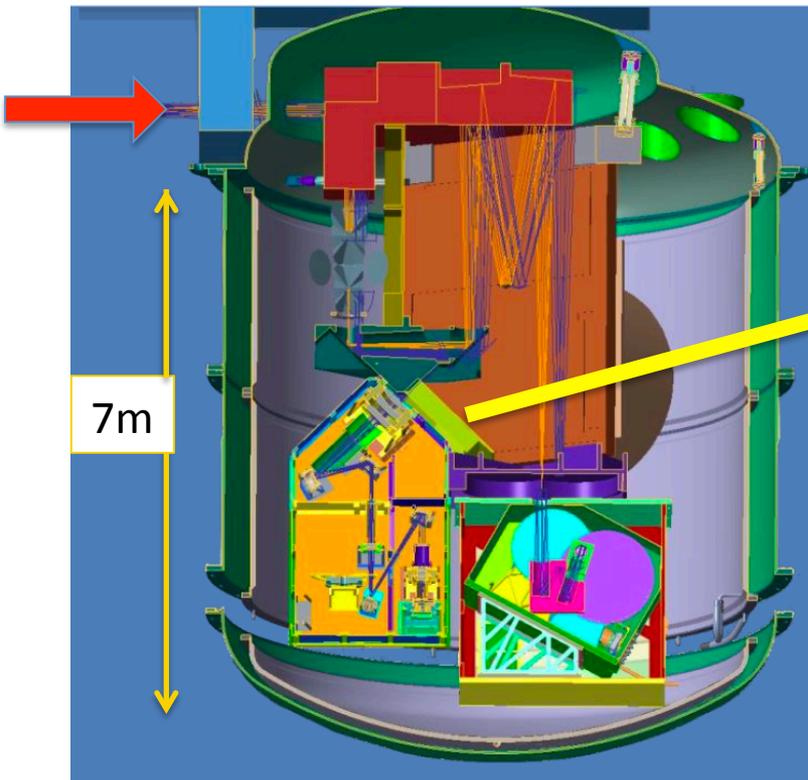


Optique adaptative

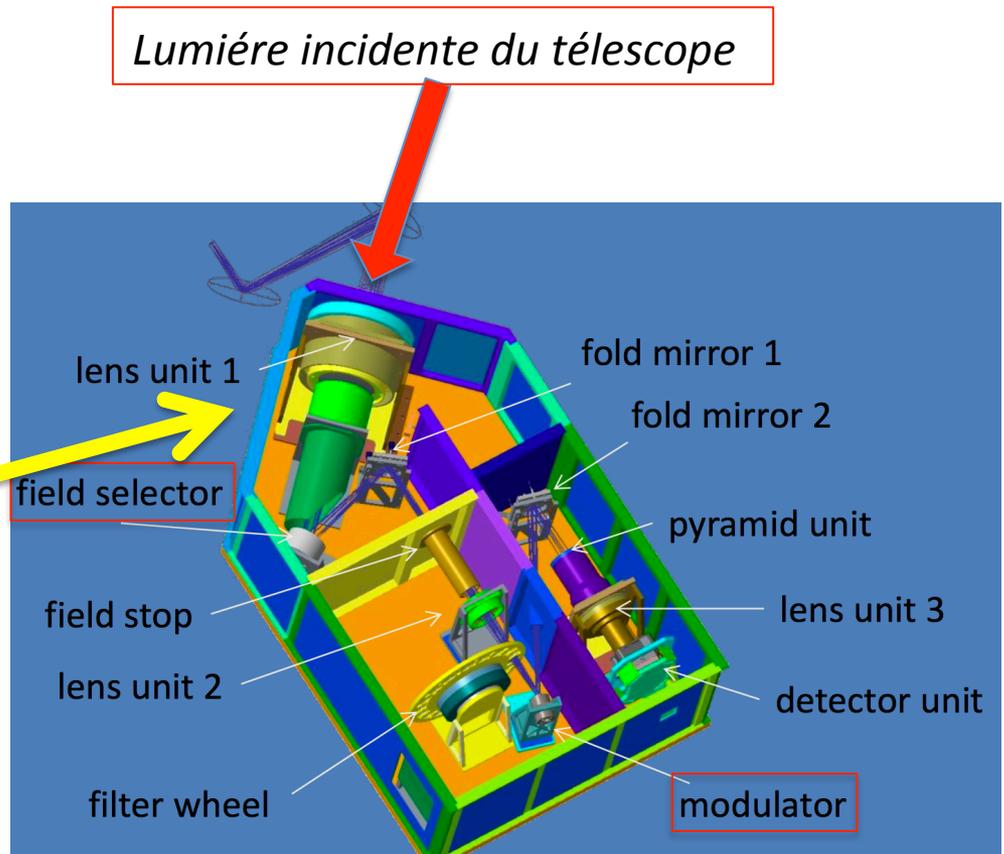
L'Extremely Large Telescope, Optique adaptative



Le futur...



METIS - cryostat



Optique adaptative



Notre liste de courses mise à jour:

#0- Un **très gros** telescope

#1- En **infrarouge proche moyen** !

#2- Une **optique adaptative** avec un bon miroir déformable (qui va vite)
+ un capteur de front d'onde plus sensible

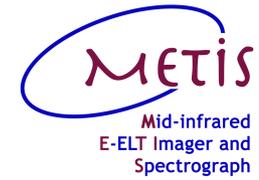
#3- ~~Un~~ **Deux coronographes** bien efficaces

#4- Des **traitement d'images avancés** et des lignes de codes

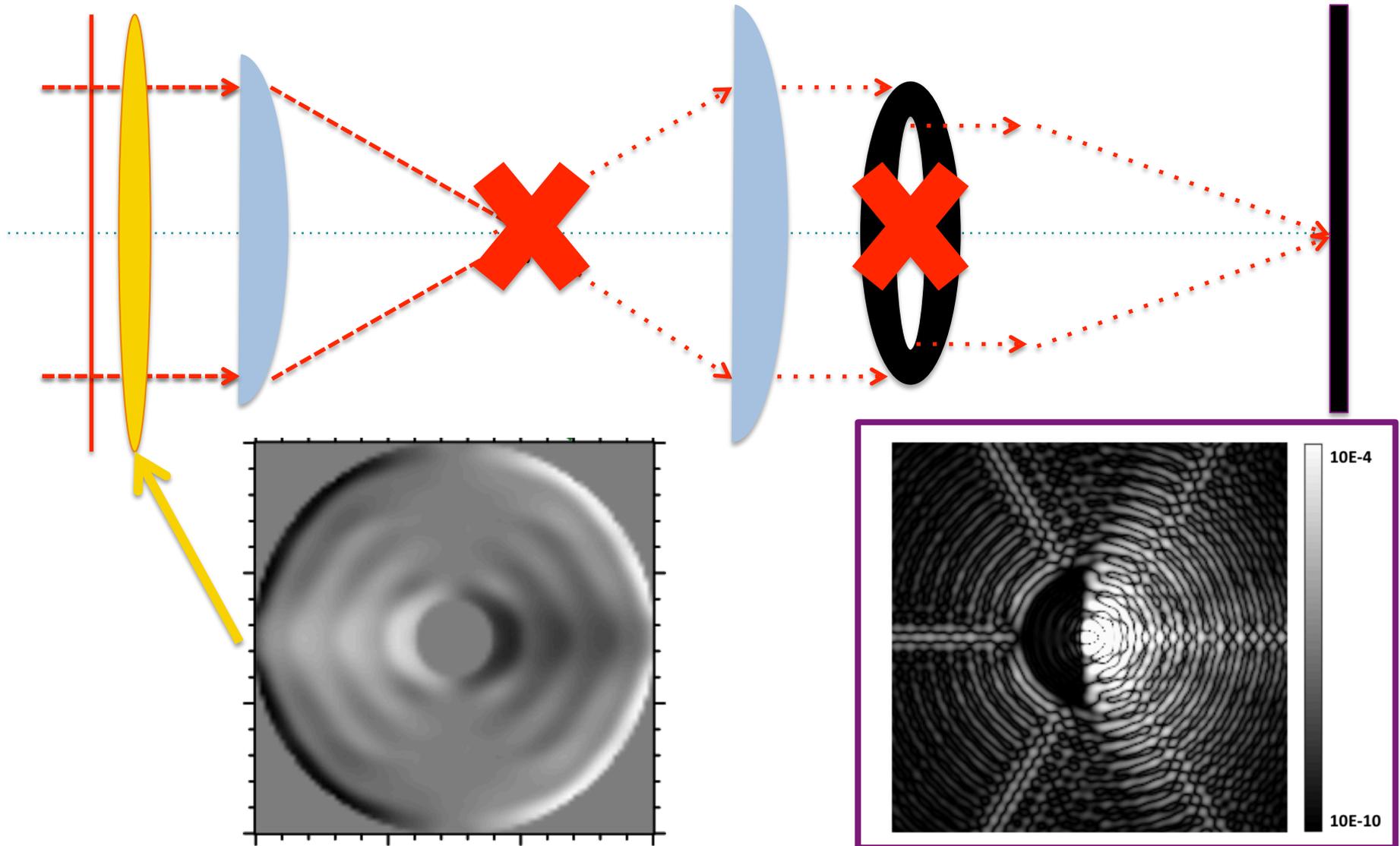
#5- Des **gentils** astronomes

METIS à l'ELT

1er type de coronographe

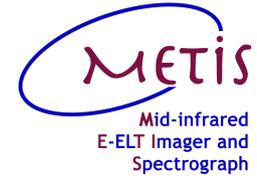


Le futur...

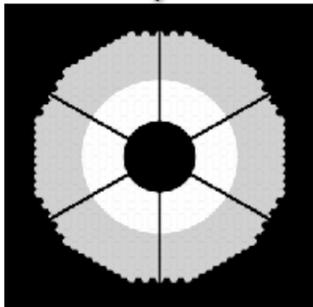
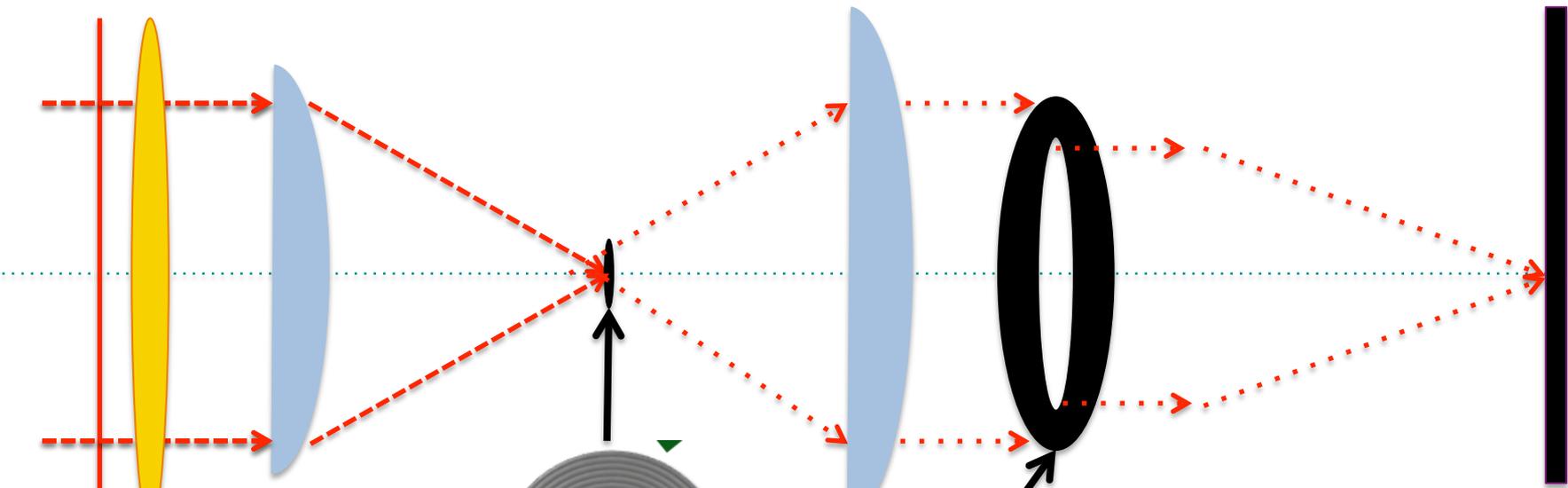


METIS à l'ELT

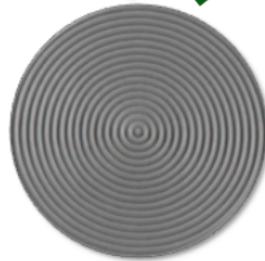
2nd type de coronographe



Le futur...



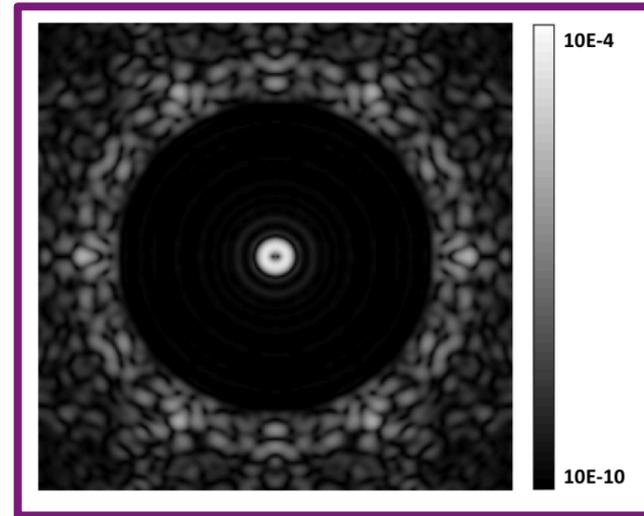
Ring apodizer (RAP)



Vortex masque (AGPM)



Lyot stop (RLS)





Notre liste de courses mise à jour:

#0- Un trés gros telescope

#1- En infrarouge proche moyen !

#2- Une optique adaptative avec un bon miroir déformable (qui va vite)
+ un senseur de front d'onde plus sensible

#3- ~~Un~~ Deux coronographes bien efficaces

#4- Des traitement d'images avancés et des lignes de codes – en cours –

#5- Des gentils astronomes ;-)

Rendez-vous en 2020 ou 2030

ou peut-être 2034

ou 2040 ...

2042 ?



Merci !