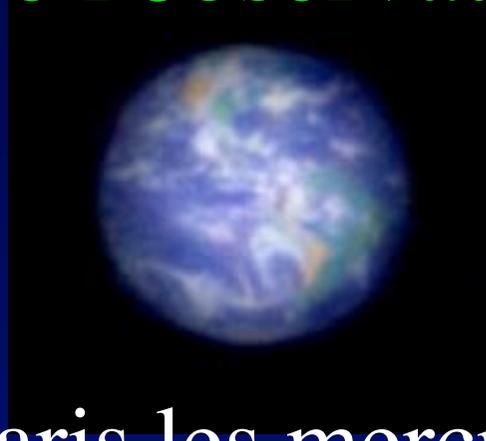


Collège de France

Chaire d' Astrophysique Observationnelle

Exo-planètes, étoiles et galaxies : progrès de l'observation



- Six cours à Paris les mercredis du 6 Avril au 1er Juin
- Détails sur www.college-de-france.fr/chaieres/chaire11/lise.html
- les fichiers .pdf des projections seront affichés

Programme

voir : www.college-de-france.fr/

- 18 Mai: Précurseur spatial pour hypertélescope
 - Séminaire: B. Lopez Interférométrie dans l'Antarctique (à confirmer)
- 25 Mai:
 - Cours:
 - Séminaire:
- 1er Juin:
 - Cours::
 - Séminaire:

Aujourd'hui :

Coronographie extrême pour la détection des
exo-Terres: les dernières idées

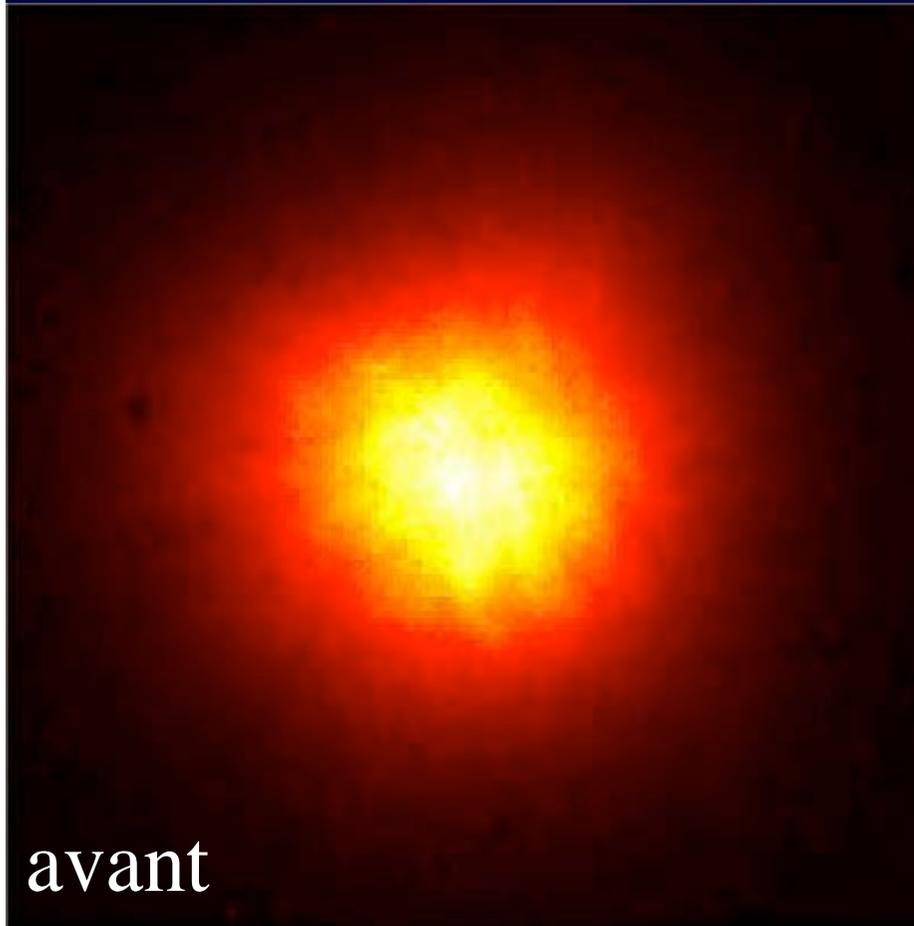
Séminaires:

Jean-Pierre Huignard, Thalès TRT

Bruno Berge, Varioptic

Alan Greenaway

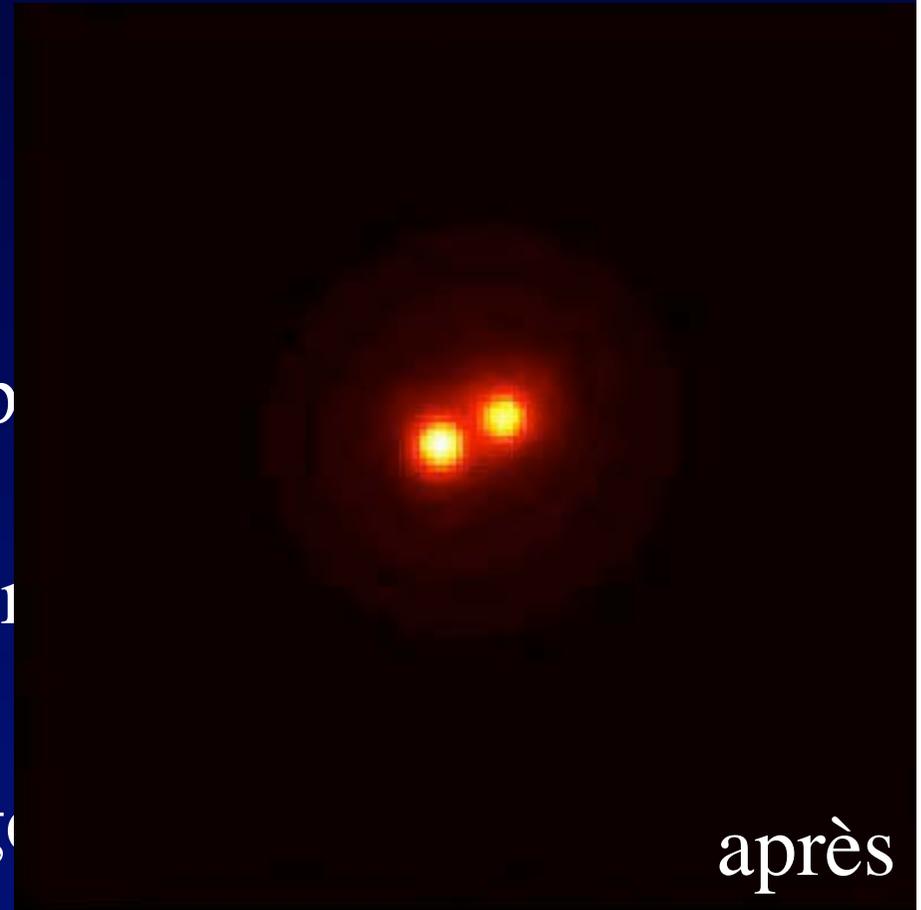
Binaire et optique adaptative



The Star HIC 59206 (uncorrected image)
(VLT KUEYEN + MACAO-VLTI)

ESO PR Photo 12b/03 (13 May 2003)

© European Southern Observatory



The Star HIC 59206 (AO corrected image)
(VLT KUEYEN + MACAO-VLTI)

ESO PR Photo 12c/03 (13 May 2003)

© European Southern Observatory



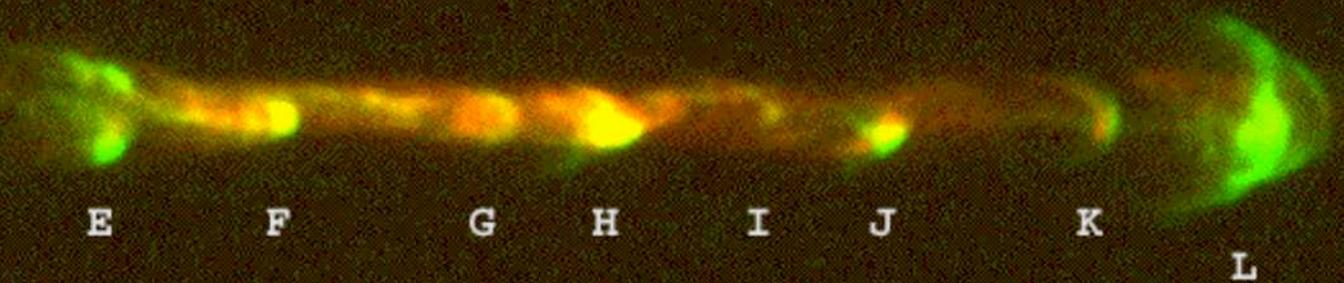
Jet d'étoile Herbig Haro

HH 111

1994.9 UT

Green: $H\alpha$

Red: [S II]



1000 AU

Compagnon: étoile ou planète?

Evidence for a co-moving sub-stellar companion of GQ Lup *

VLT-NaCo K-band

GQ Lup A

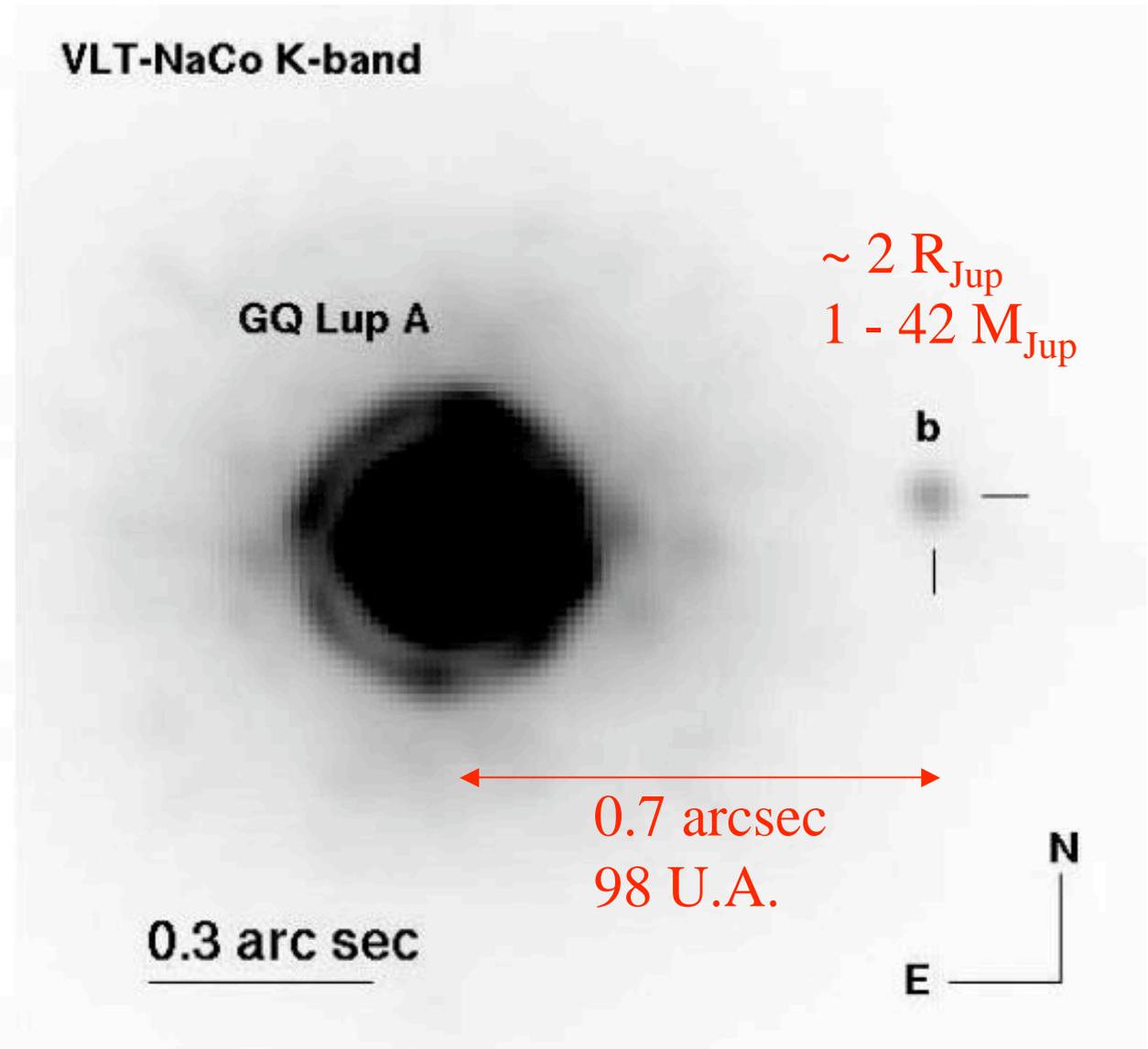
$\sim 2 R_{\text{Jup}}$
 $1 - 42 M_{\text{Jup}}$

b

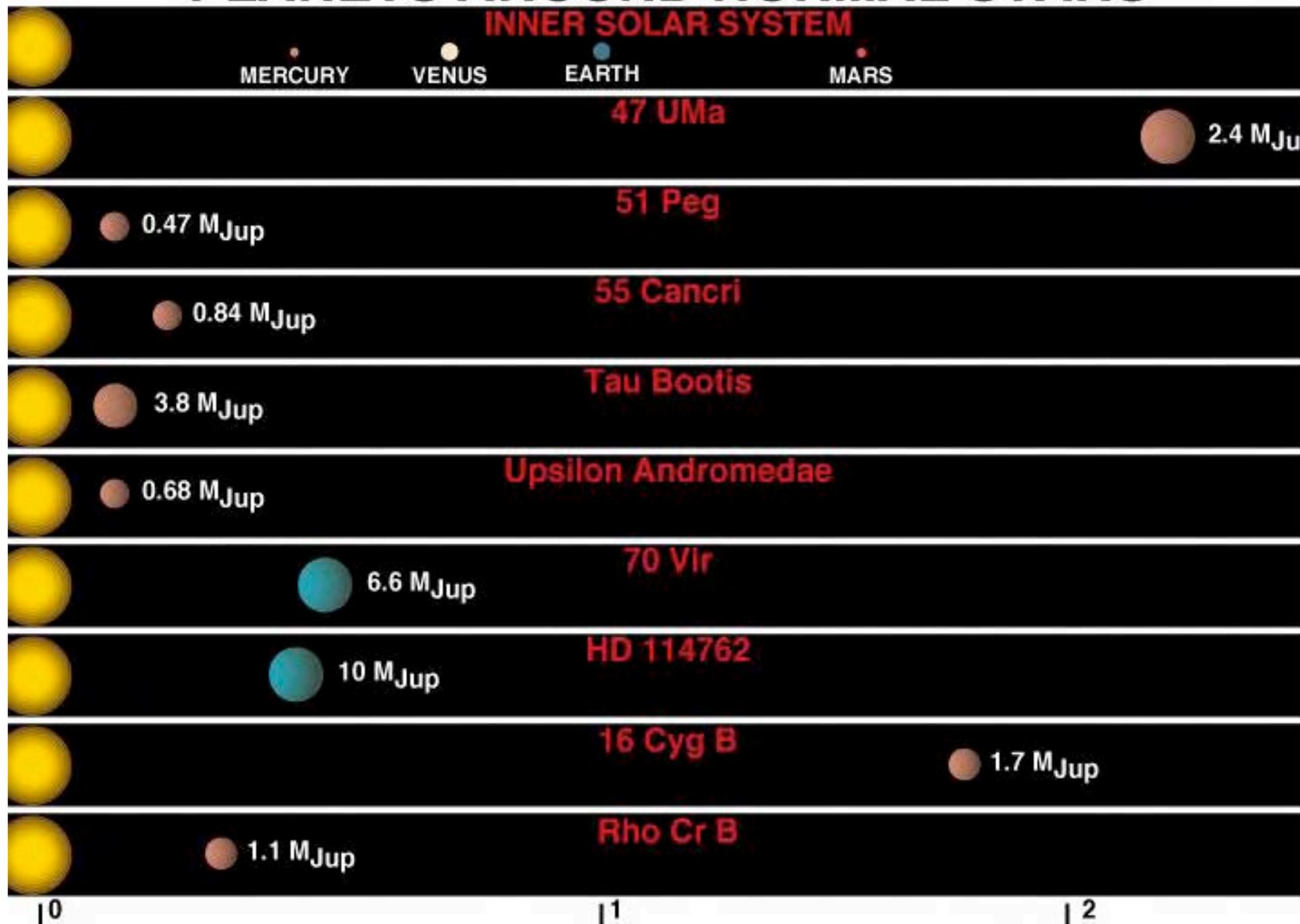
0.7 arcsec
98 U.A.

0.3 arc sec

N
E

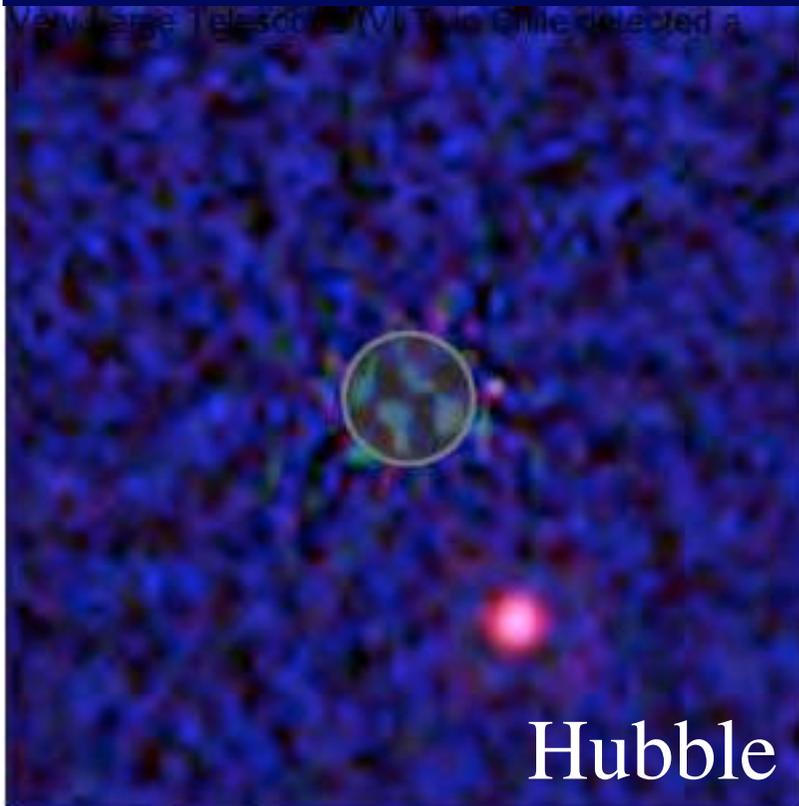


PLANETS AROUND NORMAL STARS



Planète de naine brune? (Chauvin et al., 2004)

- Vue en infra-rouge
- grâce à l'optique adaptative



A Giant Planet Candidate near a Young Brown Dwarf *
Direct VLT/NACO Observations using IR Wavefront Sensing

Exo-planètes.... ça existe



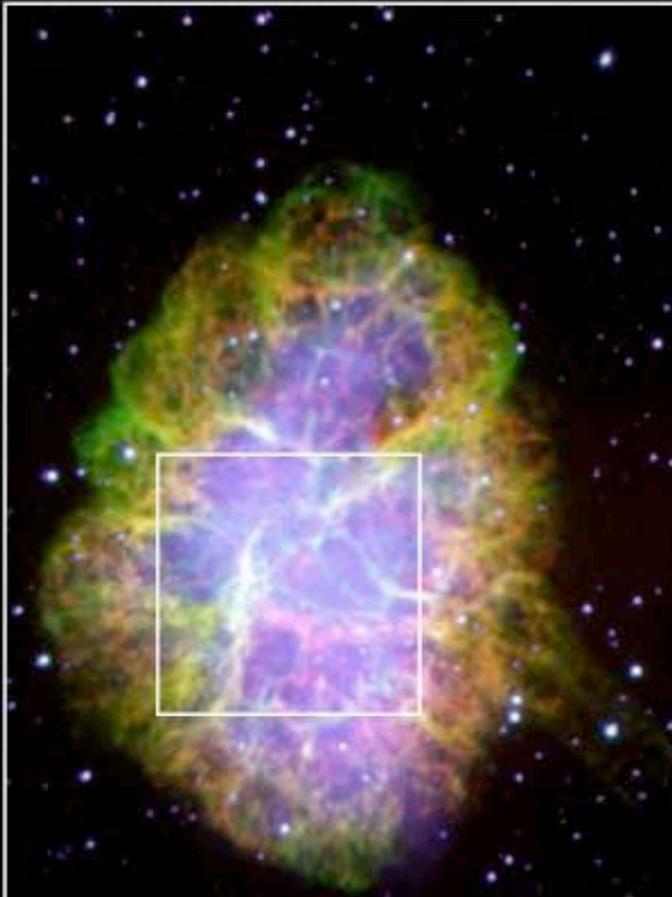
Artist's View of Planet around the Star HD 209458

NASA and G. Bacon (STScI) • STScI-PRC01-38

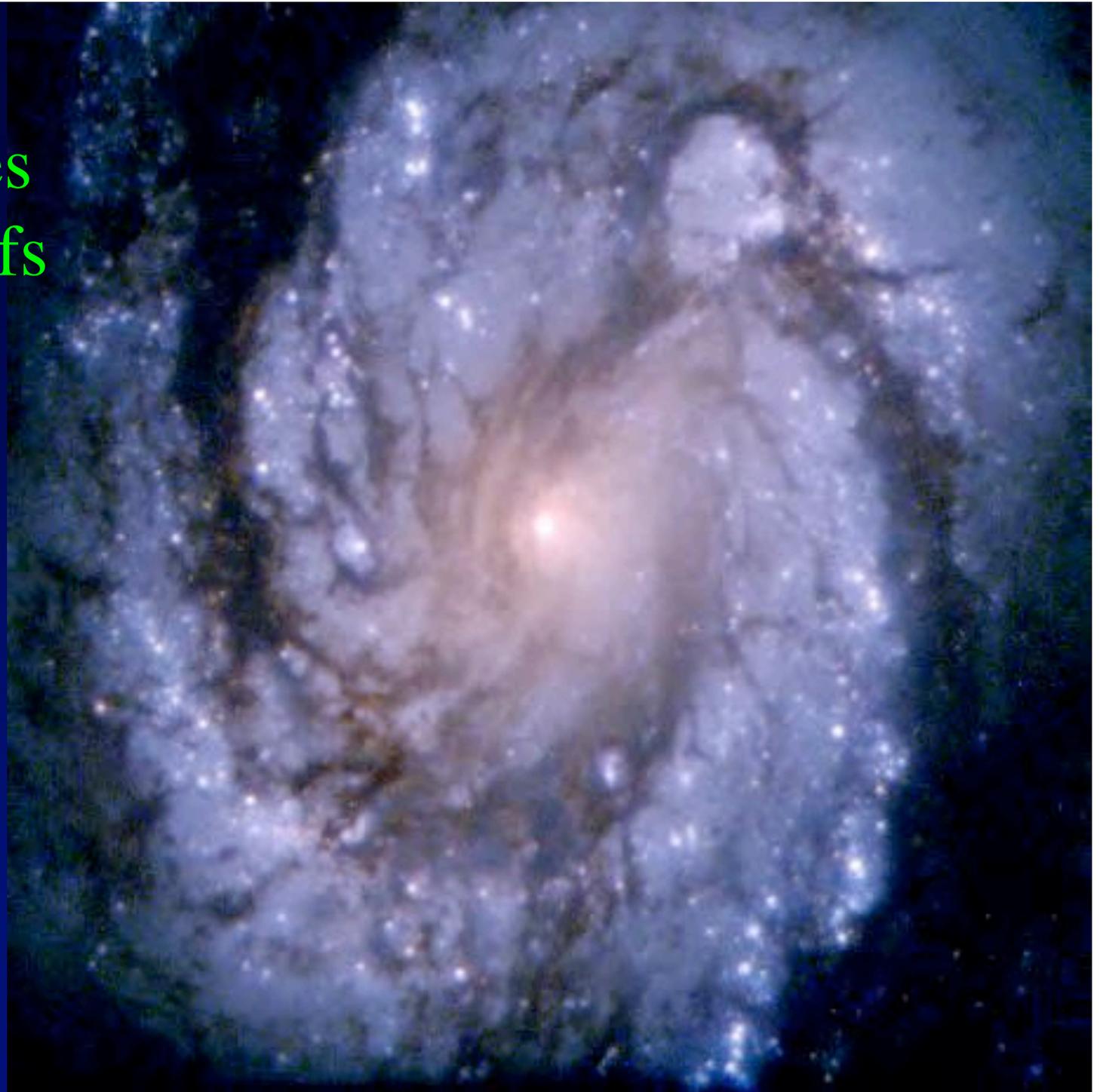
Résoudre des étoiles à neutrons ?

- 20 km à 1000 années lumières
- Dimension nécessaire: un million de kilomètres

Crab Nebula



Résoudre les noyaux actifs



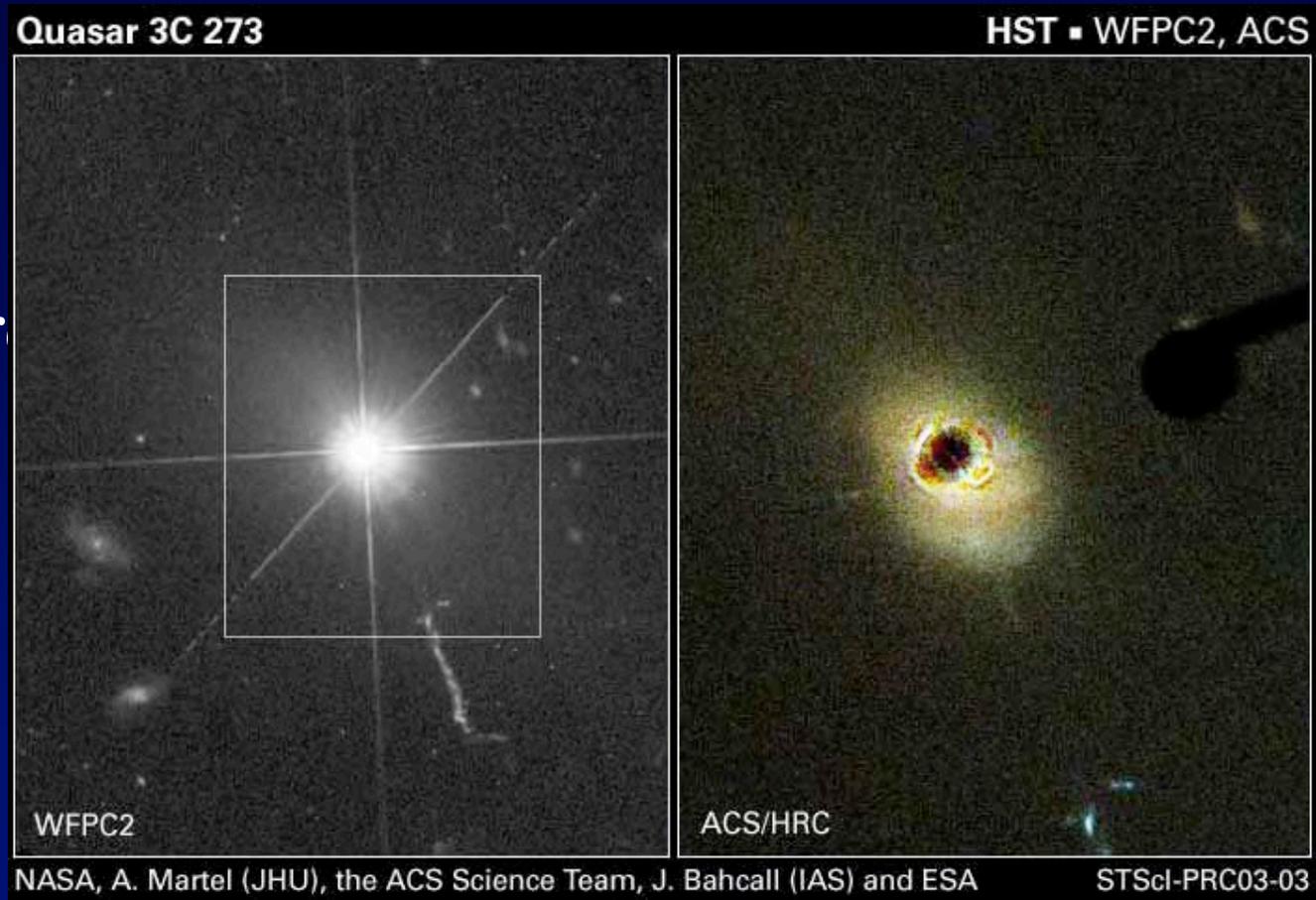
Noyau et jet de la galaxie M81

- Est-ce une illusion d'optique ?



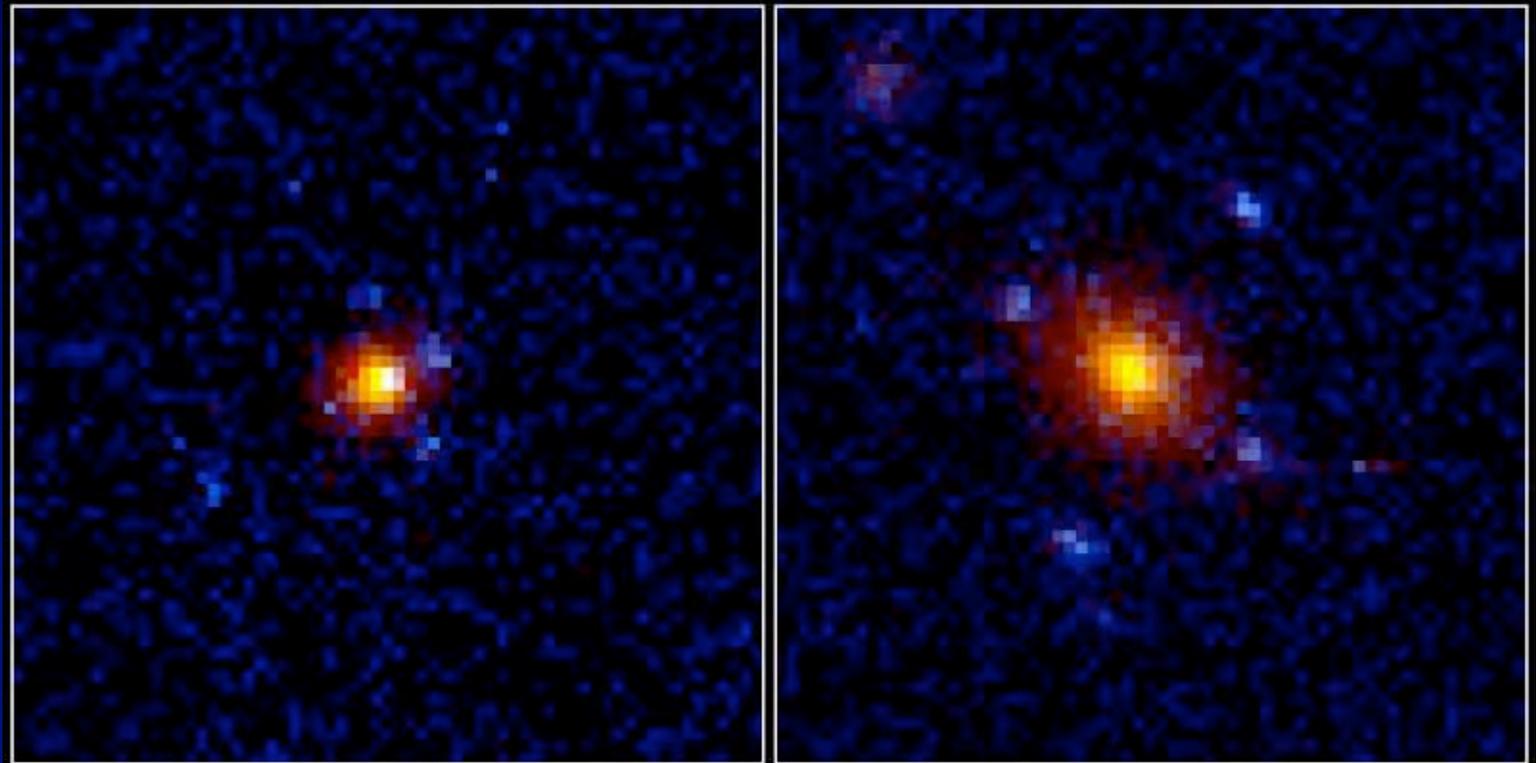
Quasars, etc...

- Record
- .



Lentilles gravitationnelles classiques (Zwicky ca. 1950)

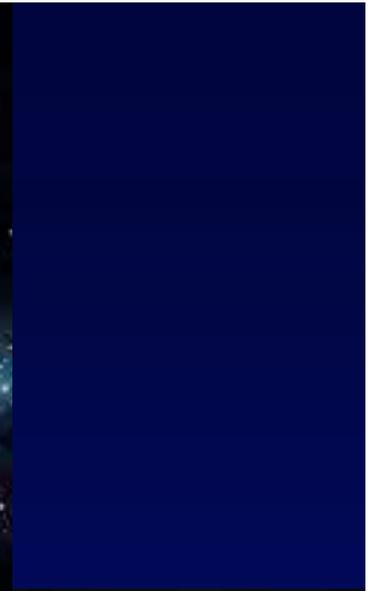
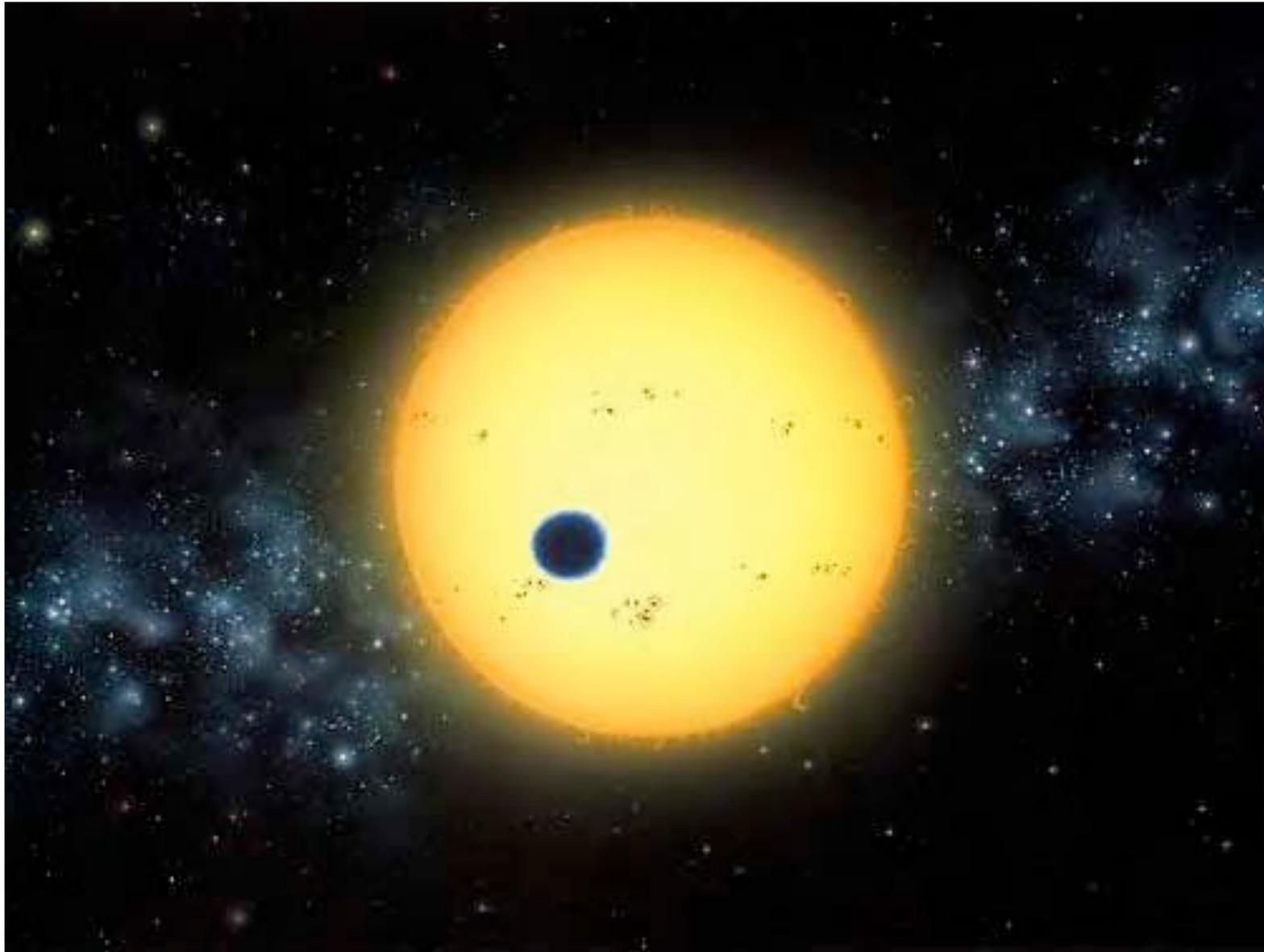
- Lointaines > 100 Mparsecs

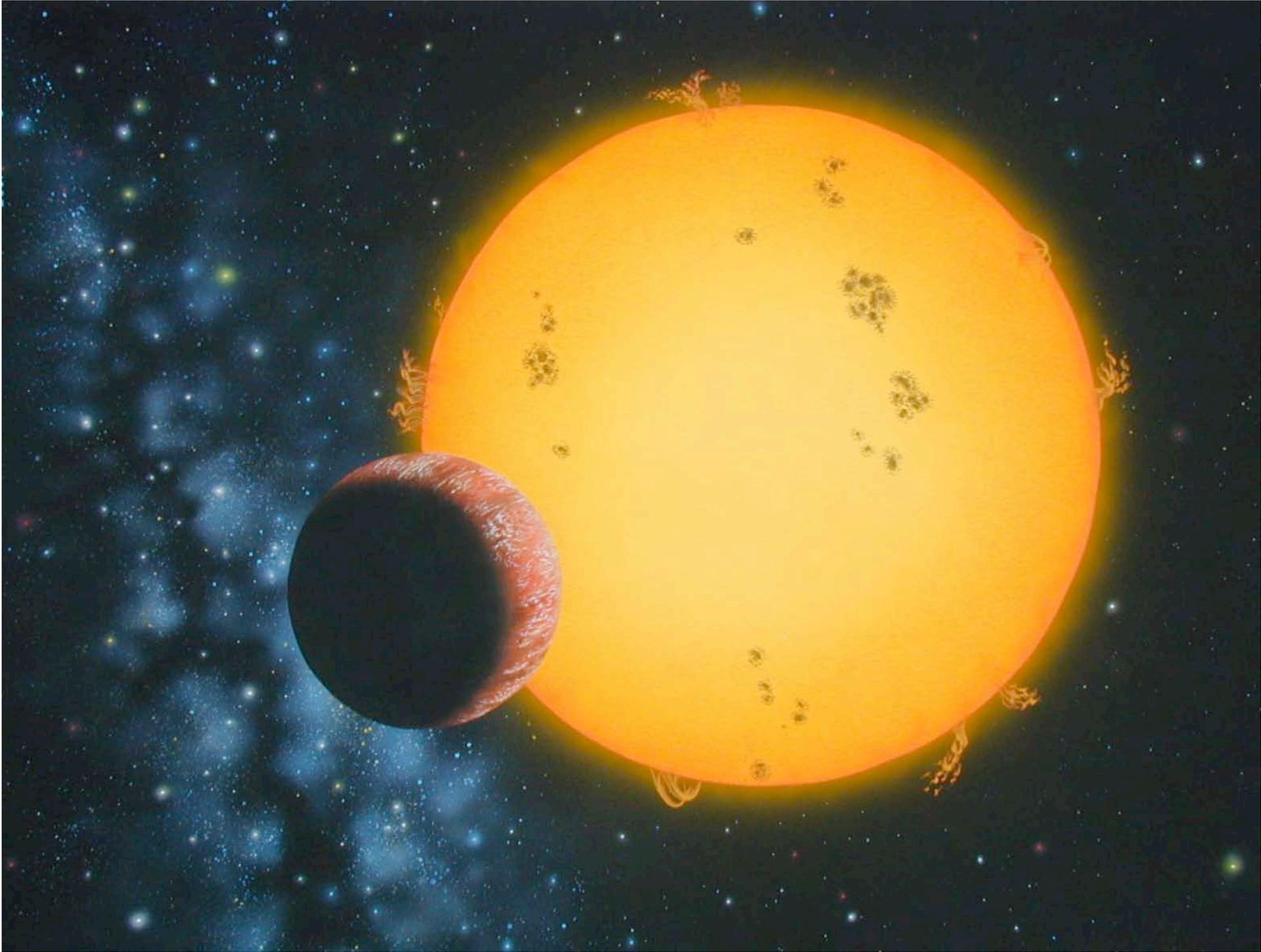


Gravitational Lenses

HST • WFPC2

PRC95-43 • ST ScI OPO • October 18, 1995 • K. Ratnatunga (JHU), NASA

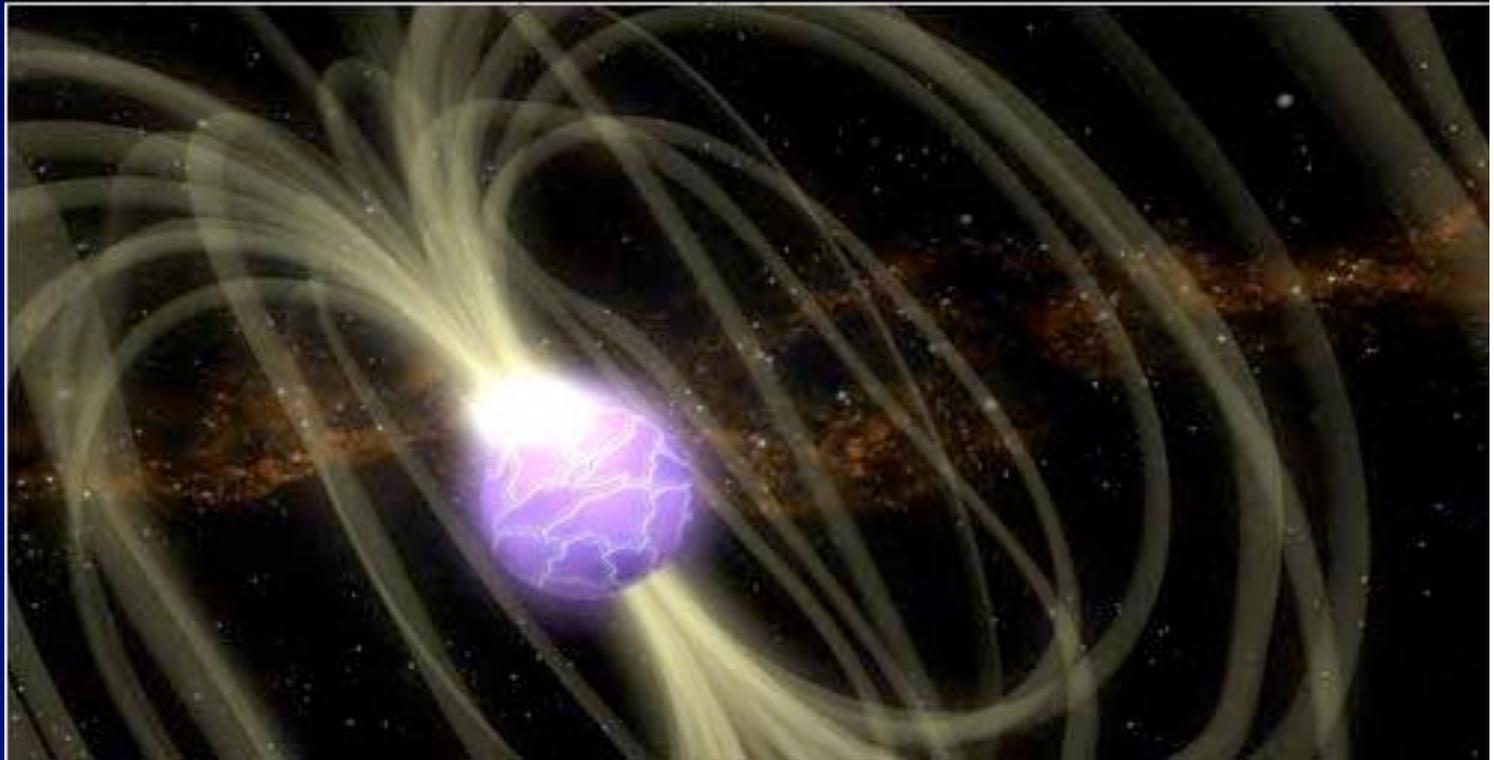




Objets compacts

- Ouverture de 100 000 km

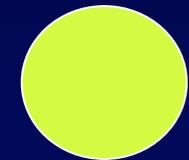
Magnétar (vue d'artiste)



Pourquoi la coronographie ?

- Voir le faible près du brillant:
 - Couronne solaire (Lyot, 1950 « Flammes du Soleil »)
 - Disques circumstellaires (Lagrange et al.) et enveloppes
 - Exo-planètes
 - environnement d 'objets ponctuels : pulsars, noyaux actifs de galaxies, sursauts gamma

De l'imagerie à très haute dynamique..... des coronographes..... pour voir quoi ?



- Le faible près du brillant
- Exemples:
 - matière circumstellaire: disques, jets, exo-planètes (luminosité relative 10^{-6} à 10^{-11})
 - noyaux actifs de galaxies, quasars
 - etc..

Voir les planètes d 'étoiles



Tache d 'Airy

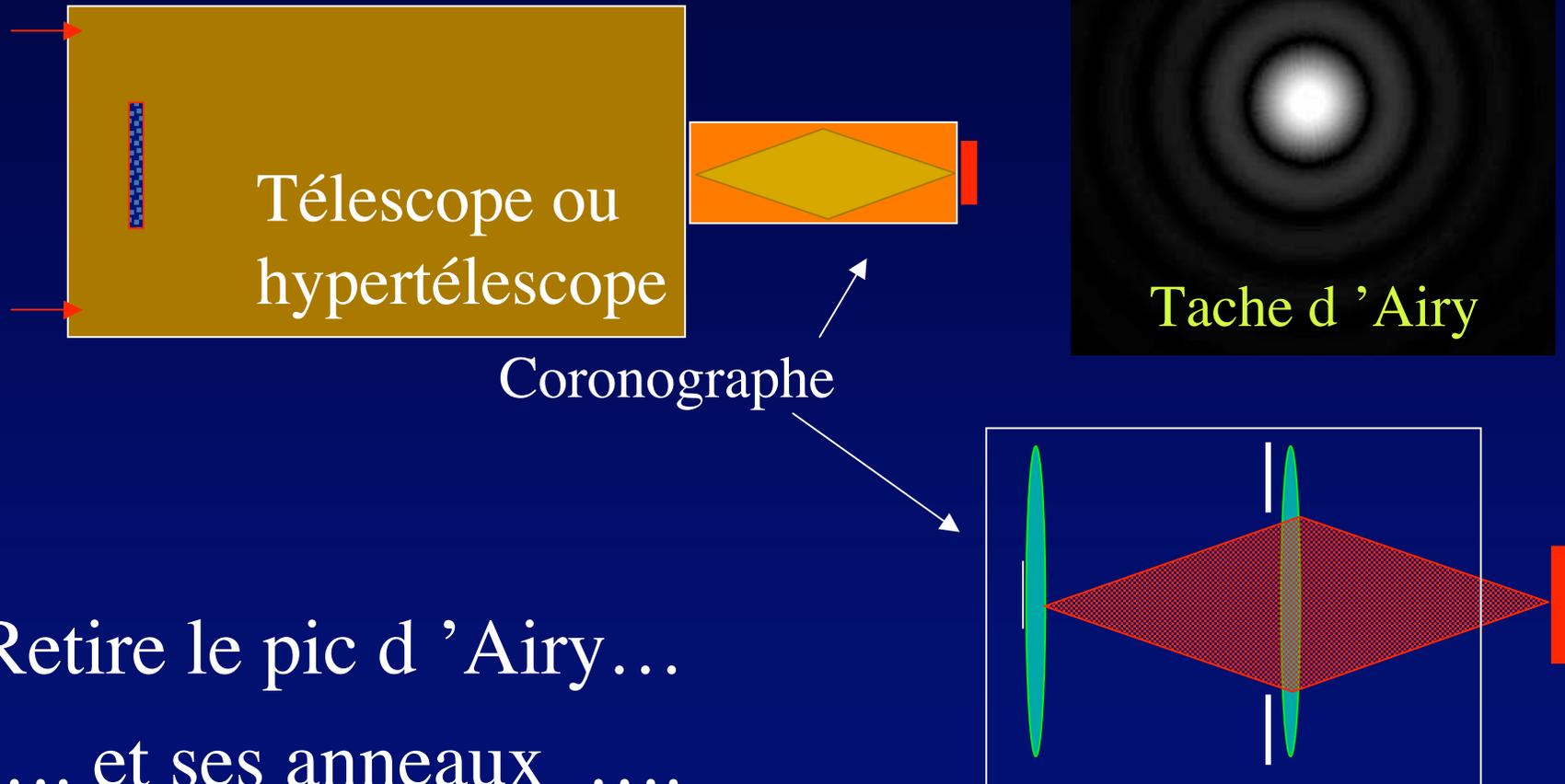
- un problème de lumière parasite plus que de résolution : $\text{contraste Terre/Soleil} = 10^{-10}$ (visible)
- Éliminer de l 'image les « éclaboussures » de lumière de l 'étoile
 - Masquer l 'image stellaire....
 - et ses anneaux de diffraction
 -et la contribution du bosselage de l 'optique....
 -et celle des hétérogénéités de transparence



Comment ?

- Nettoyer les « éclaboussures diffractives » de lumière
- En corrigeant
 - Les imperfections de l'optique
 - ou de l'atmosphère
 - Et la diffraction par les bords d'une optique parfaite : anneaux d'Airy

Principe de la coronagraphie



- Retire le pic d'Airy...
- et ses anneaux
- Sans affecter la planète

Cas d'une optique parfaite:

- Noircissement complet possible avec légère apodisation et coronographe Lyot ou Roddier (Aime et Soummer 2002)
- Voie intéressante

Cas d'une optique parfaite: noircir l'image stellaire, avec ses anneaux de diffraction



- 1- en adoucissant la transition au bord de l'ouverture: « apodisation »
 - Perte de lumière, et de résolution
- 2- en reprenant l'image focale (Lyot, Roddier, Rouan, Soummer)
- 3- par interférence avec séparatrice (J.Gay)

Résidu causé par le bosselage de l'onde :

Formule de Maréchal

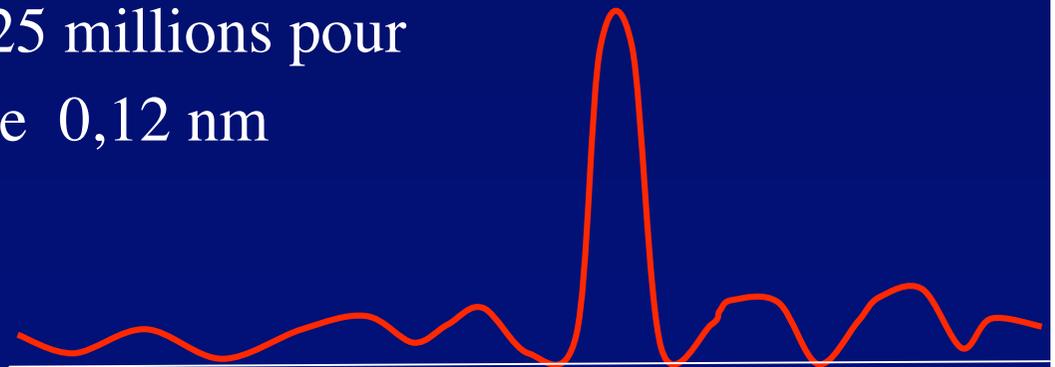
Pic/halo

$$G = N / \sigma^2$$

Nombre de bosses

Erreur de phase

- Exemple: à $\lambda = 500\text{nm}$, $G = 25$ millions pour 1000 bosses d'amplitude 0,12 nm



soit.....

un télescope bosselé (faiblement),
avec un coronographe parfait

Onde bosselée

- Onde du télescope:

$$e^{i\phi(x,y)} \quad \text{ou} \quad 1 + i\phi(x,y) \quad \text{si bosselage faible}$$

- un coronographe parfait annule le premier terme, il reste la perturbation $i\phi(x,y)$
- Transformée de Fourier symétrique, en intensité (Boccaletti et al., 2002)
- Pas de pic central car $\phi(x,y)$ est à moyenne nulle

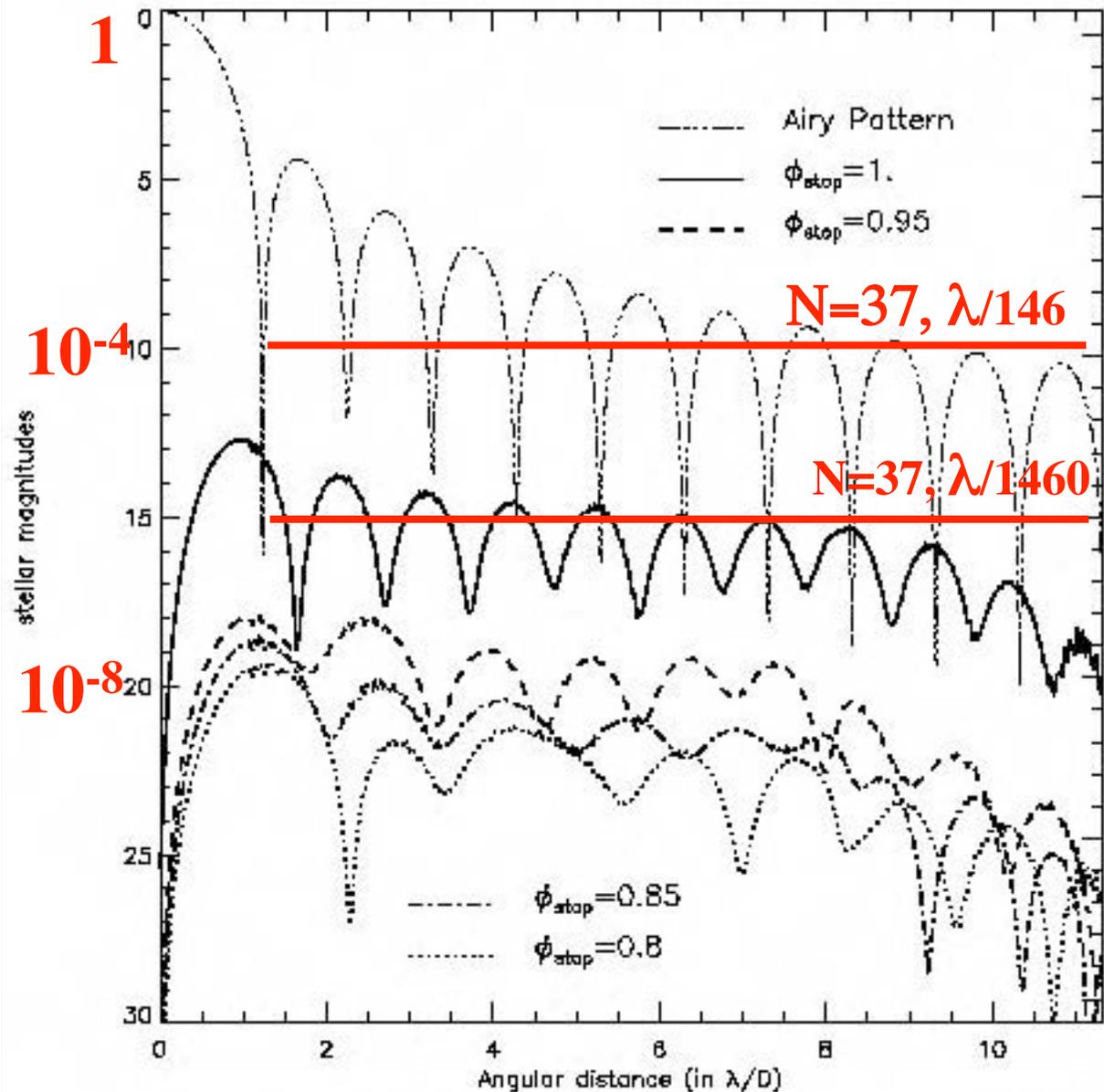
Rappel:

optique bosselée et coronographe parfait

- Si l'onde est faiblement bosselée:
$$e^{i\phi(x,y)} = 1 + i\phi(x,y)$$
 - Retire le terme constant de $1 + i\phi(x,y)$
- Rend réel $i\phi(x,y) \Rightarrow$ « ombre volante » $\phi(x,y)$
- Un coronographe parfait transforme le bosselage de l'onde en « ombre volante/ »

Coronographe 4 quadrants de D.Rouan

- Utilisable dans
l'image
hypertelescope



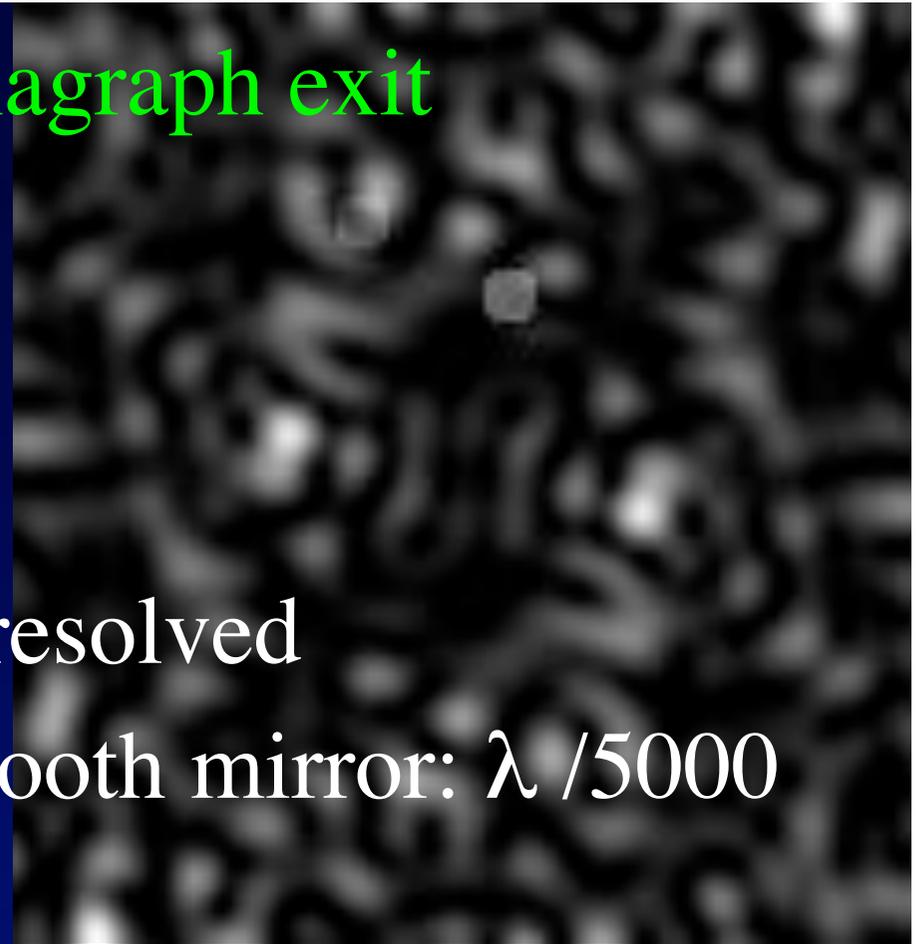
Résidu stellaire, moyenné angulairement
(Riaud et al., PASP 2001)

Après le coronographe: nettoyage cohérent et incohérent pour coronographie extrême

- Cohérent: soustraire de l'onde une copie
- Incohérent: soustraire de l'image détectée une image de référence

Star light residue at coronagraph exit

- speckled if star is little resolved
- avoidable with ultra-smooth mirror: $\lambda / 5000$
 - difficult in practice
- removable by:
 - incoherent subtraction (rotation or reference star)
 - coherent subtraction: deeper null



Nettoyage cohérent:

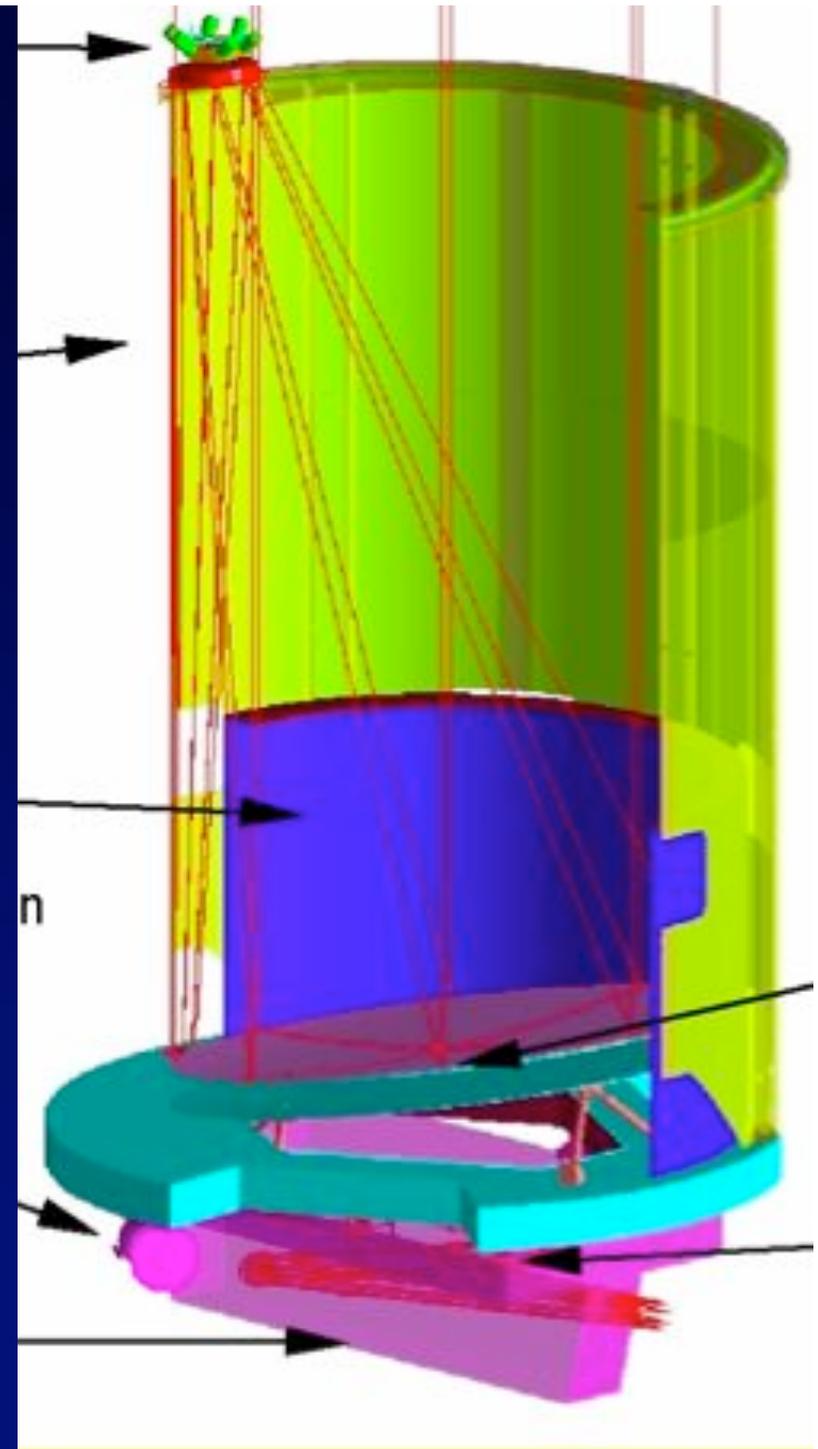
Optique adaptative avant le coronographe (Malbet et Shao, variante par Trauger et al. 2004)

- Effacer les bosses du miroir primaire
- ...en annulant les speckles l'un après l'autre
- ... de façon itérative par « essais et erreur »
- Il faut des heures pour converger

Proposition ECLIPSE

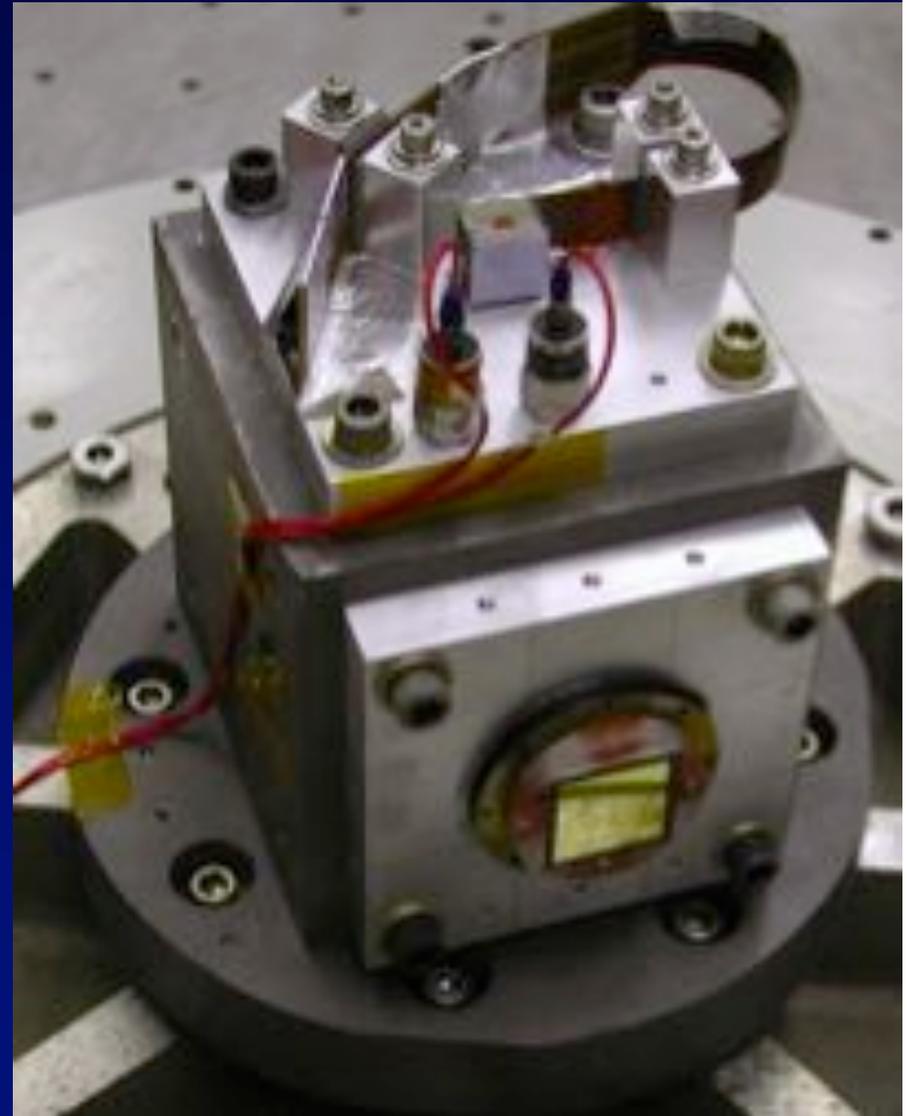
(Trauger et al., 2004)

- Télescope coronographique de 2m dans l'espace



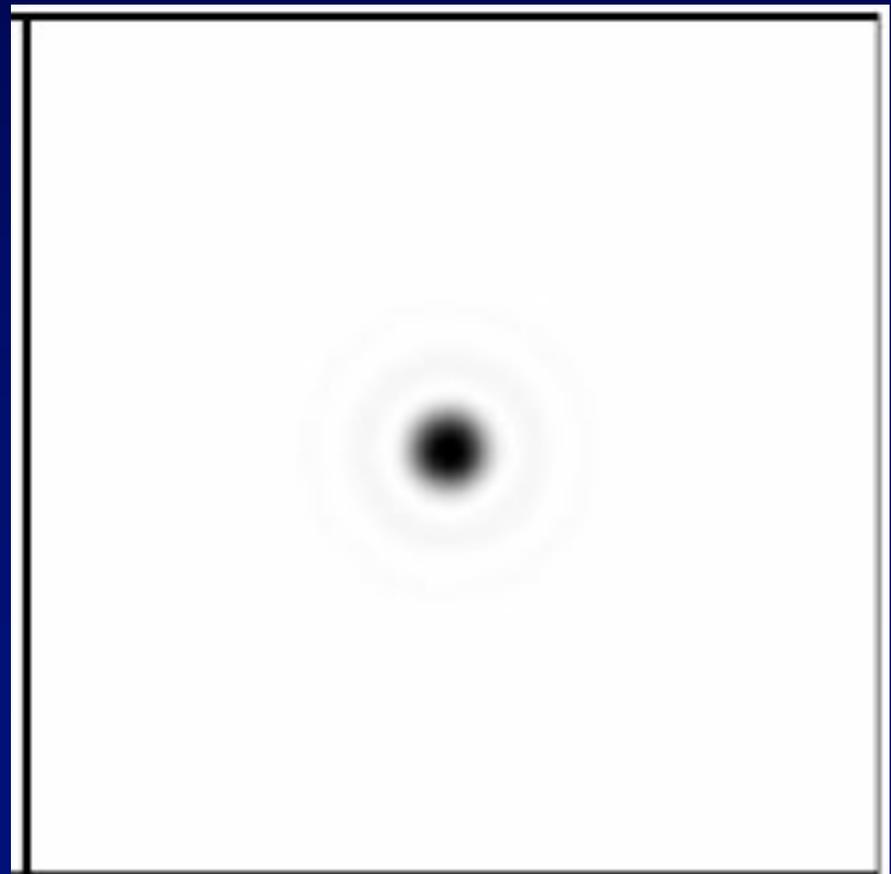
Miroir déformable à 34x34 actuateurs piézos

- Piloté avec une précision de 20 nm



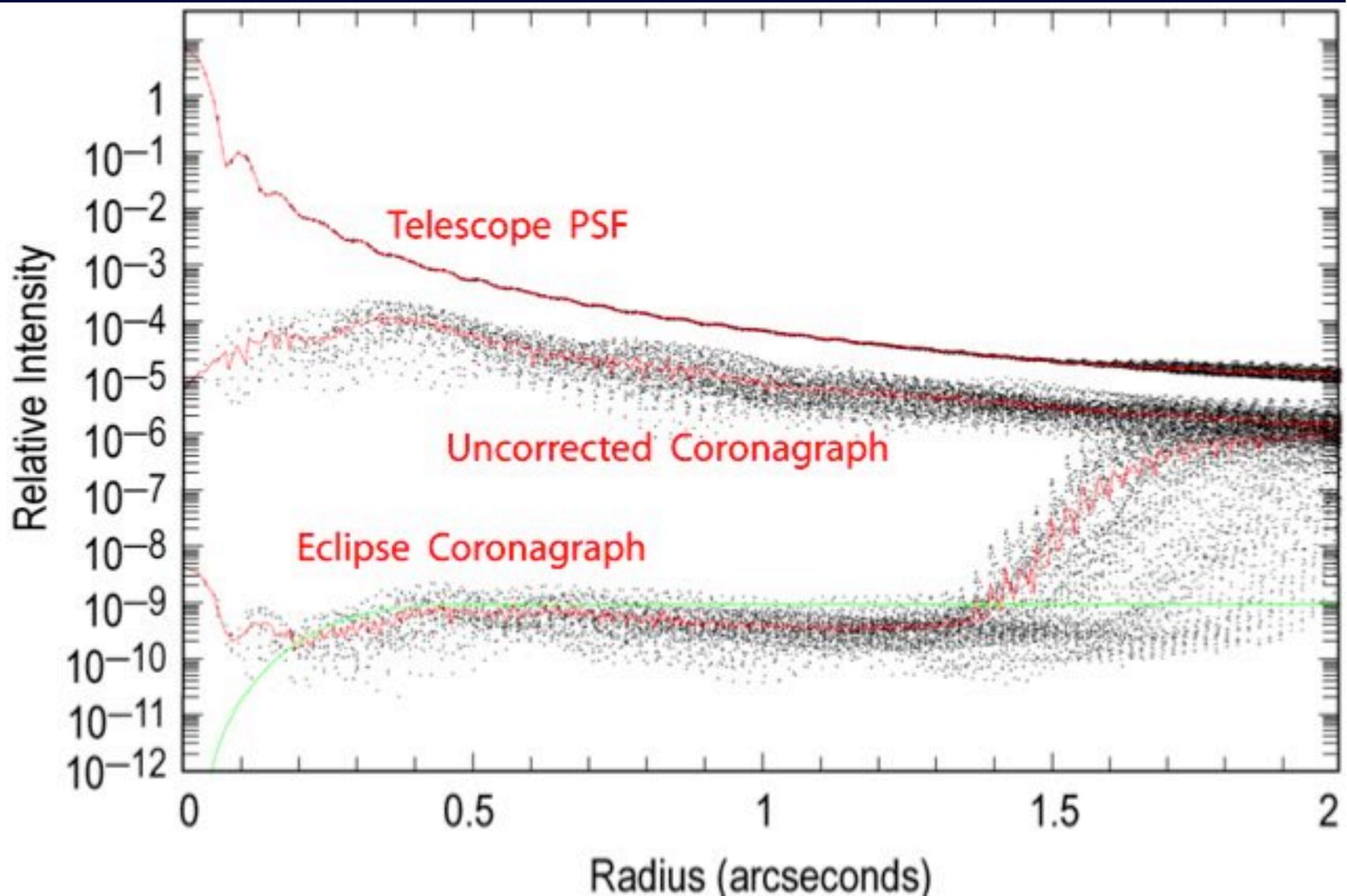
ECLIPSE (Trauger et al.)

- Occulteur Lyot « adouci »



ECLIPSE

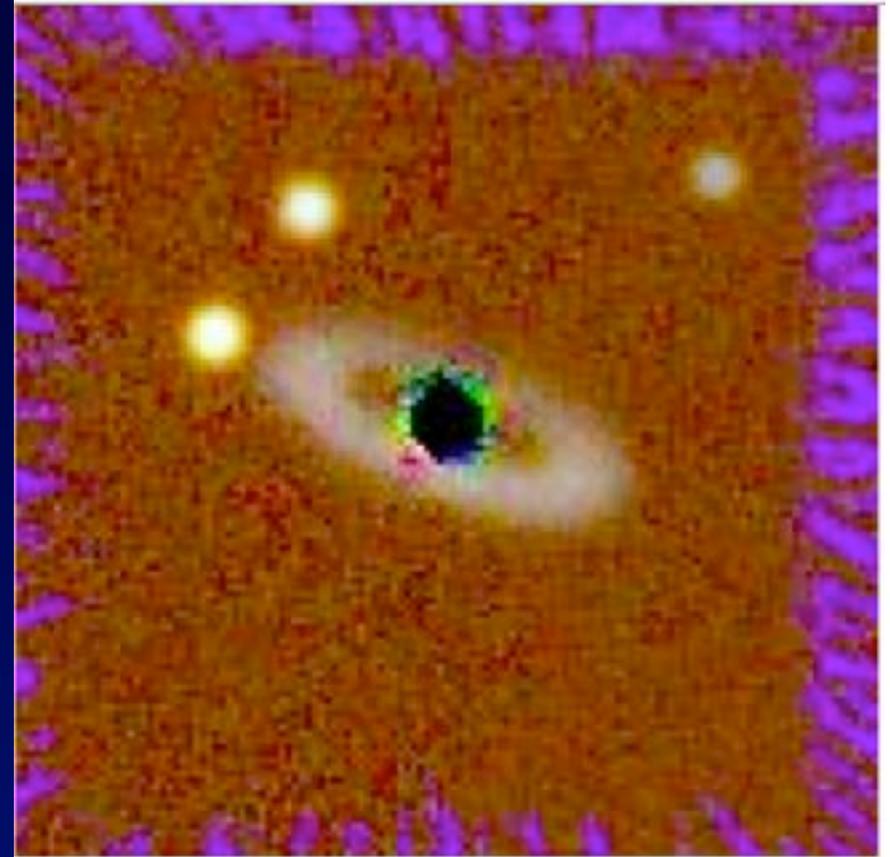
- Résultats en laboratoire



Proposition ECLIPSE

détection simulée de Jupiters

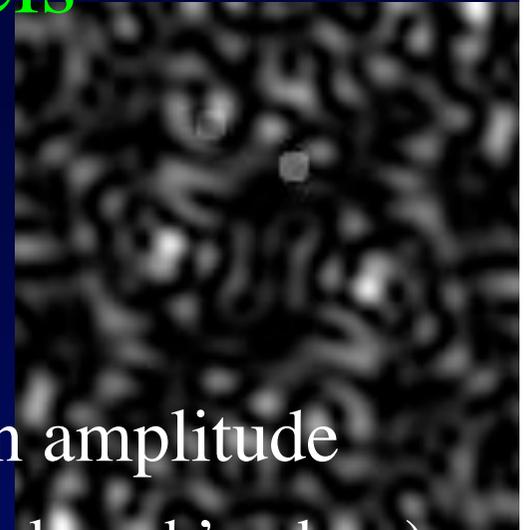
- Visible
- 10^{-9}



Nettoyage adaptatif des résidus stellaires en aval

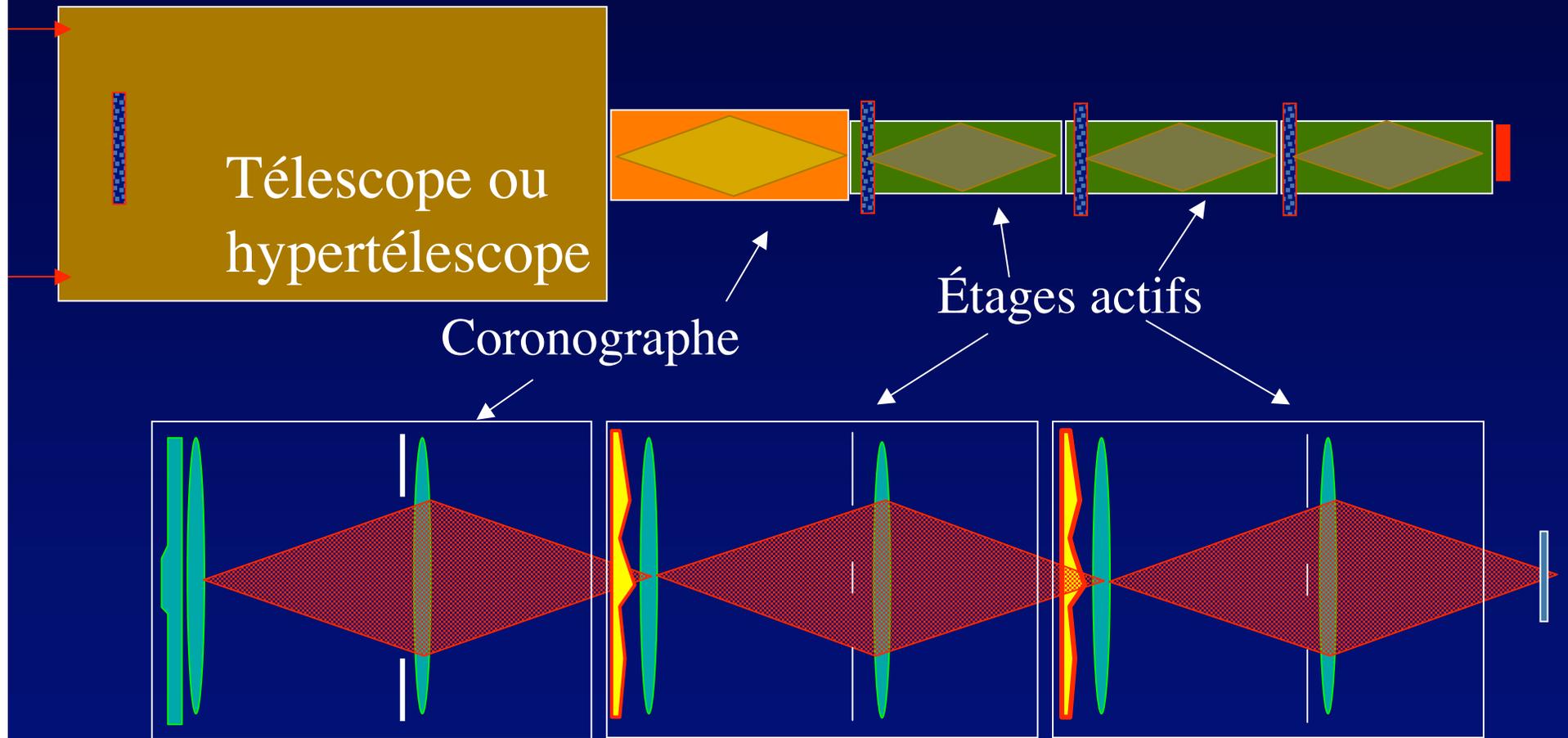
- Relache les tolérances avant le coronographe (bosselage, nombre d'actuateurs)
- plusieurs voies :
 - Mise en phase des speckles et filtrage, multi-étages (Labeyrie 2002) & version holographique (Lyon, en préparation)
 - Annulation par Mach-Zehnder (Codona & Angel, 2004)
 - Annulation holographique (Labeyrie et Le Coroller, 2004)

Mettre en phase les speckles résiduels

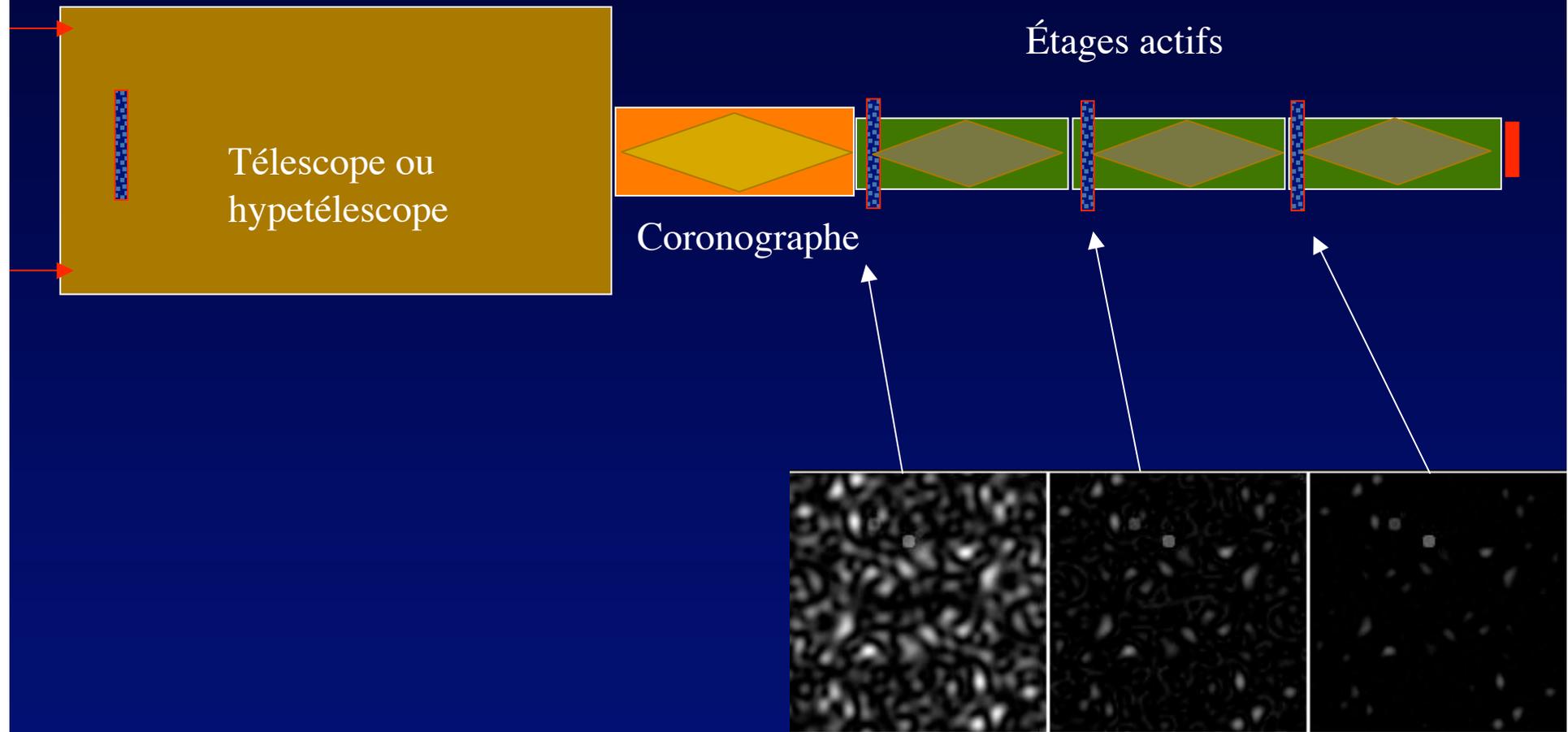


- pupille de sortie: le bosselage est traduit en amplitude réelle à moyenne nulle (exploitable pour l'analyse d'onde...)
- Image avec speckles, sans pic central, intensité centro-symétrique
- **Mise en phase** => pic central dans la pupille, **masquable**
- Formation d'une image relayée, nettoyée

Coronographe et étages actifs additionnels

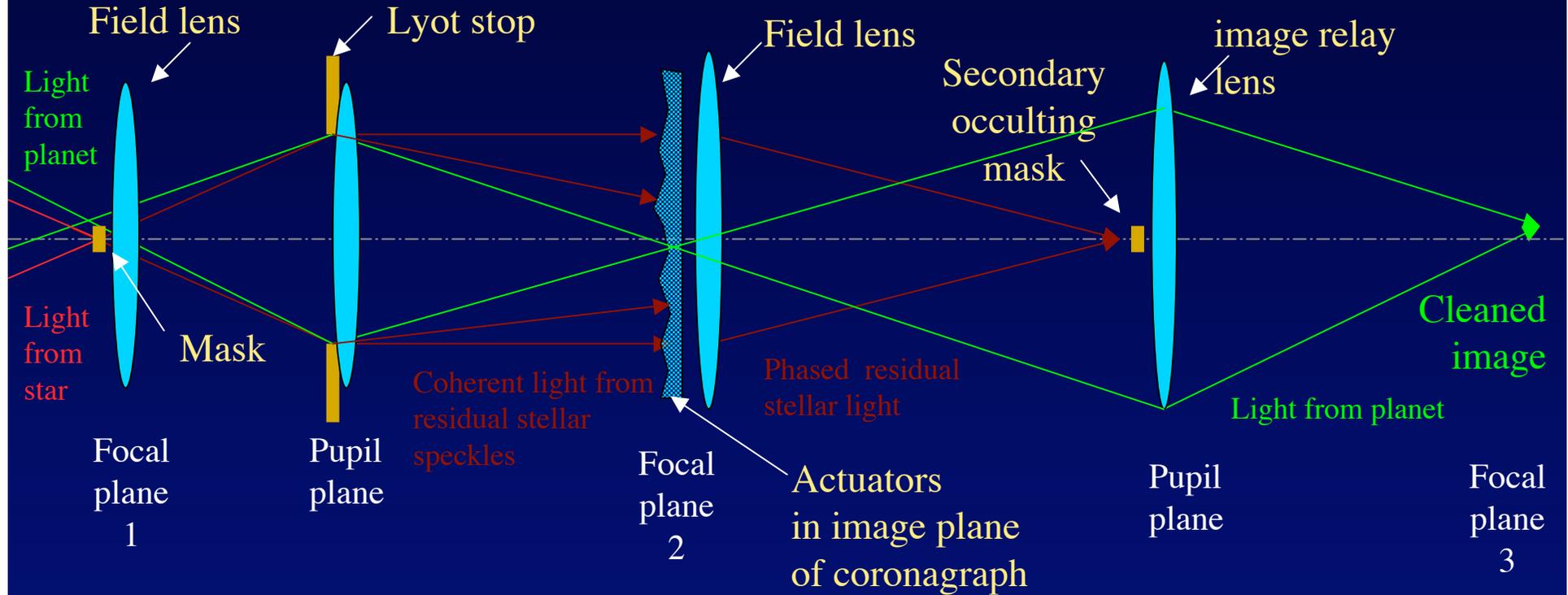


Coronographe et étages actifs



- Atténuation 7 à 10 par étage
- Planète non affectée

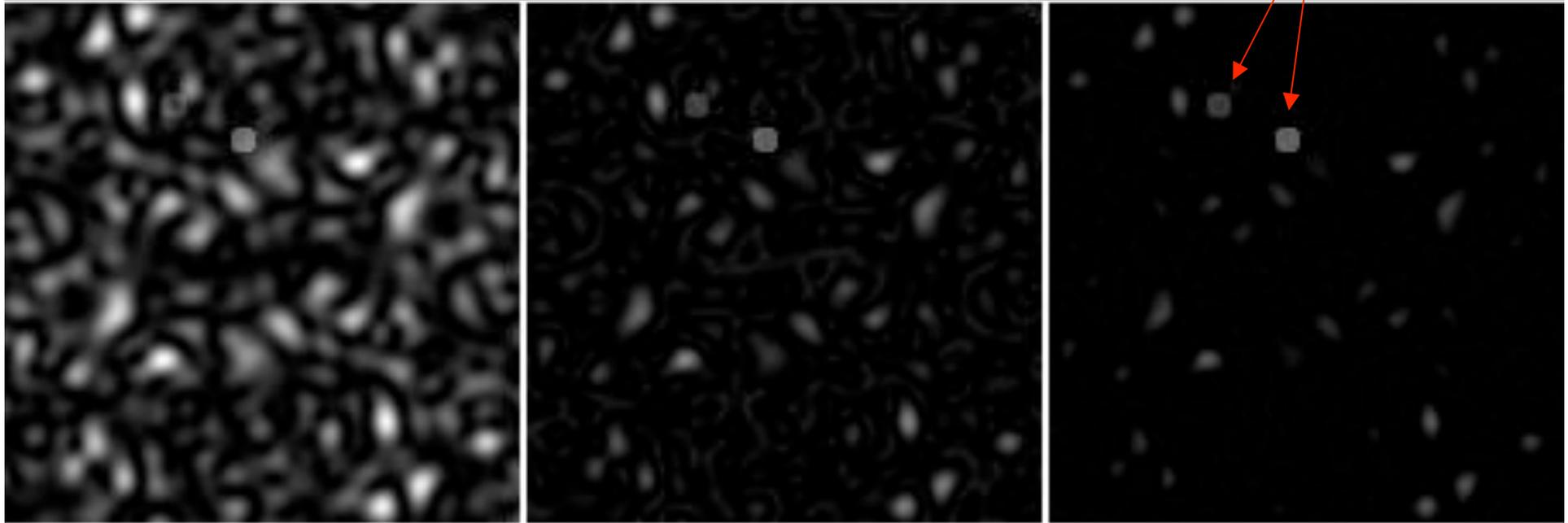
Multi-stage stellar coronagraphy for detecting planets in the visible



- Residual stellar speckles phased (analyzer not shown)
- Interference peak in the far field, masked
- Cleaned relayed image of planet(s)
- Cascadable until few stellar photons left

Simulations

planètes



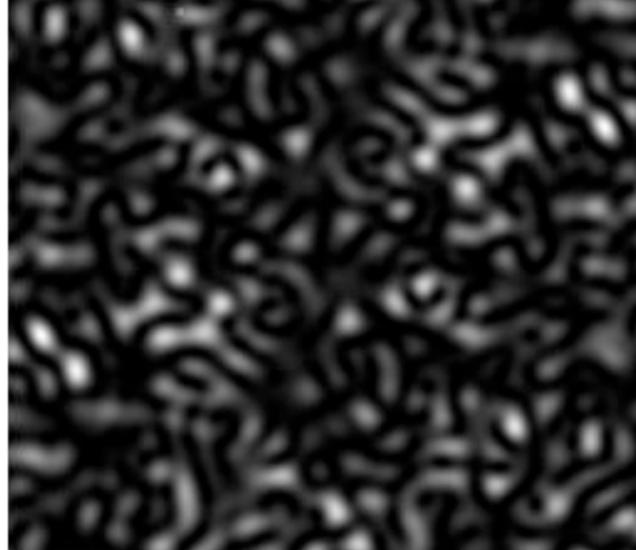
résidu moyen 1

0,17

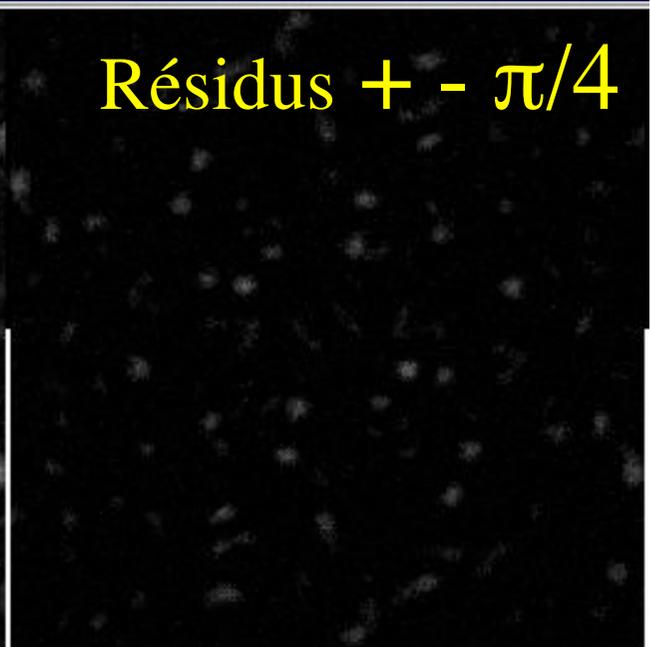
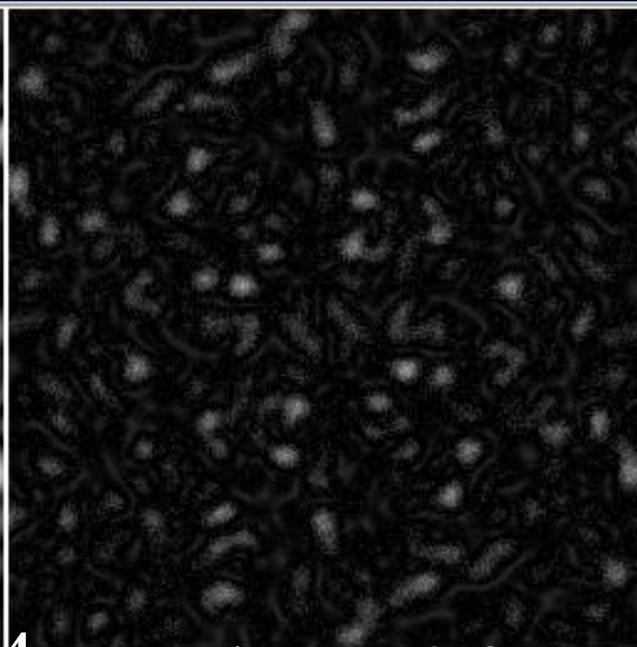
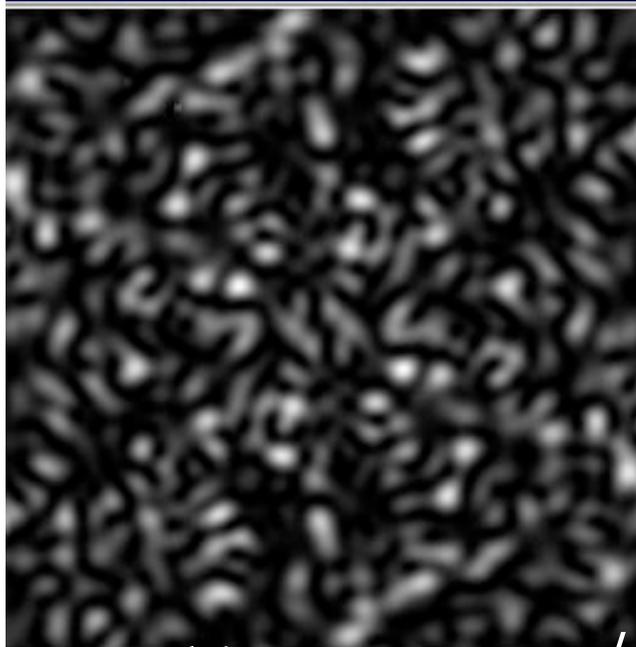
0,02

- Coronographe 1 supposé parfait, mamelonnage $\ll \lambda/4$
- Étages suivants: masque Roddier dans la pupille
- Gain à chaque étage 7 à 10

Effet des résidus de la phase annulée



Résidus 0

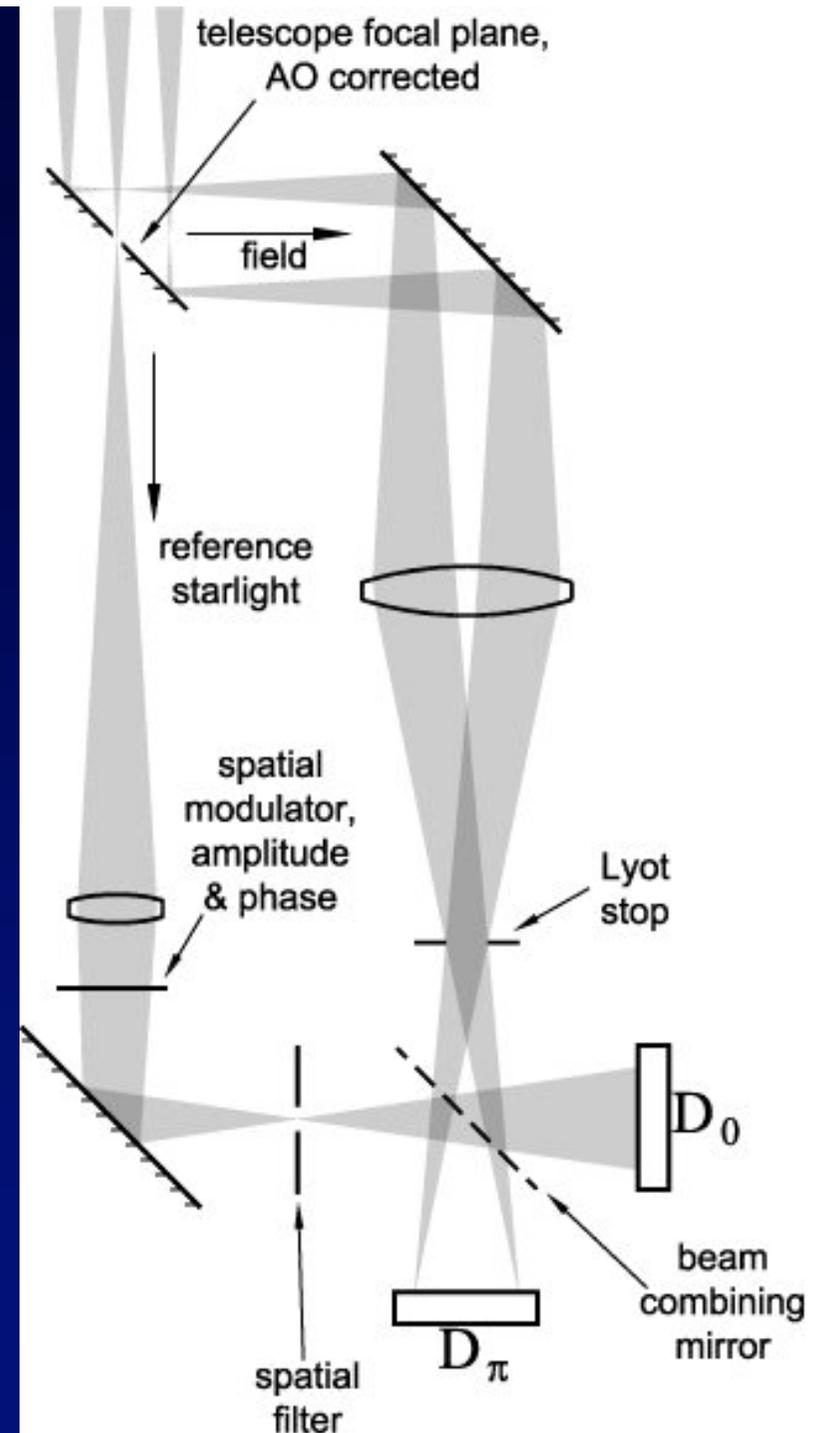


Résidus $\pm \pi/4$

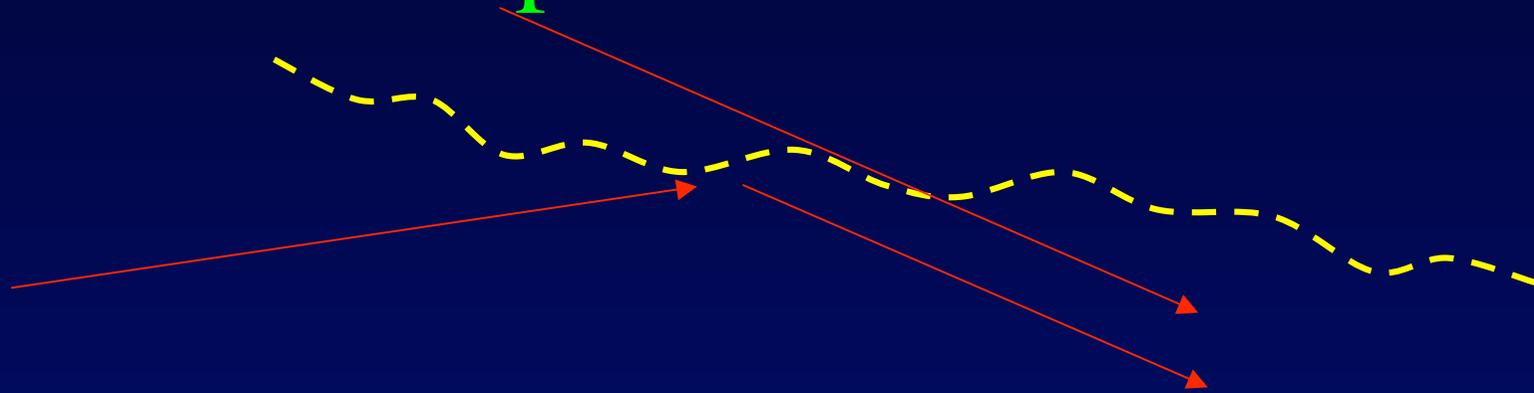
- Tolérance $\pm \pi/4$ pour étages 2,3,.. etc..

Nulling the stellar residue: 2- Mach-Zehnder interferometer (Codona & Angel 2004)

- Uses the rejected star light...
- ... to make a copy of the stellar residue...
- ...and subtract it with a beam splitter

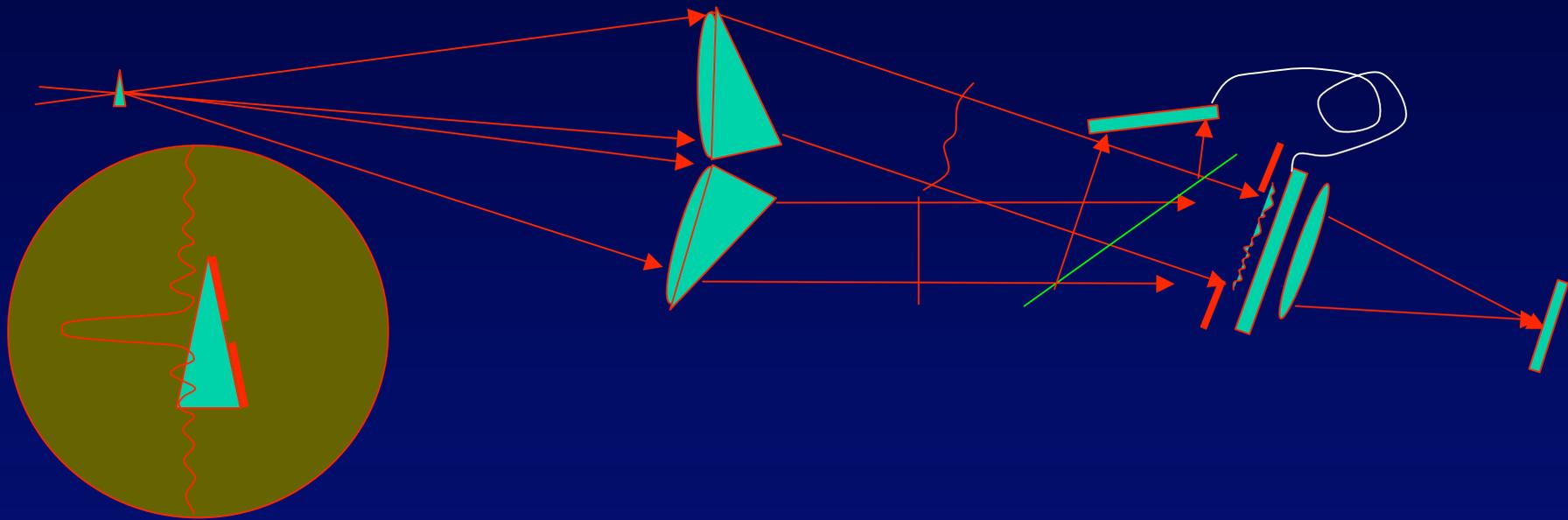


Faire une copie de l'onde résiduelle pour l'annuler

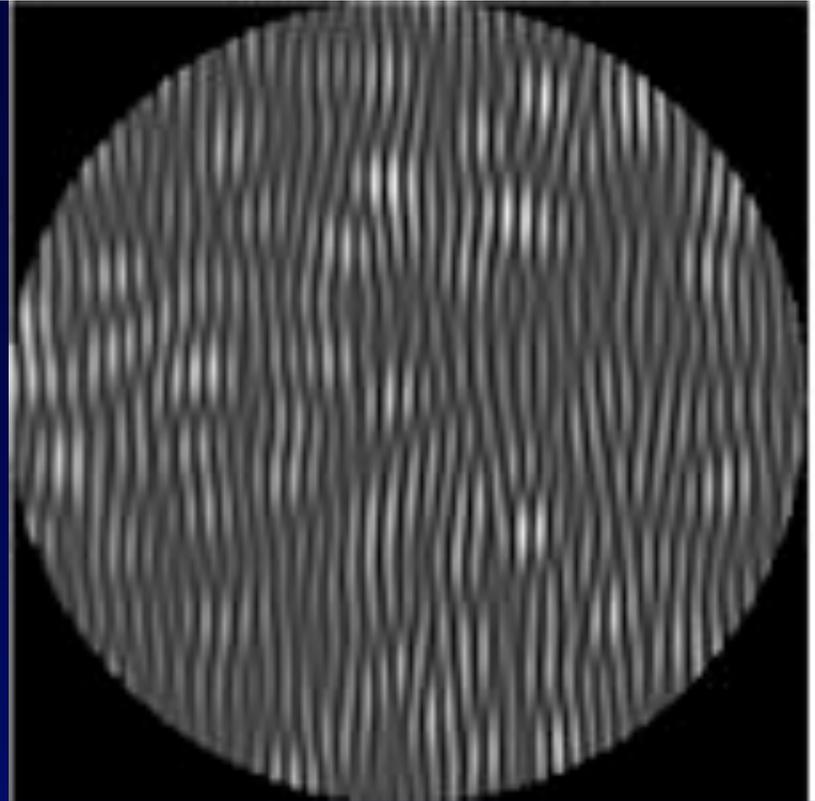


- A partir d'une onde plane venant de la même étoile...
- En sculptant son module et sa phase...
- Avant de la mélanger avec l'onde résiduelle au moyen d'une séparatrice

Hologramme dans un coronographe

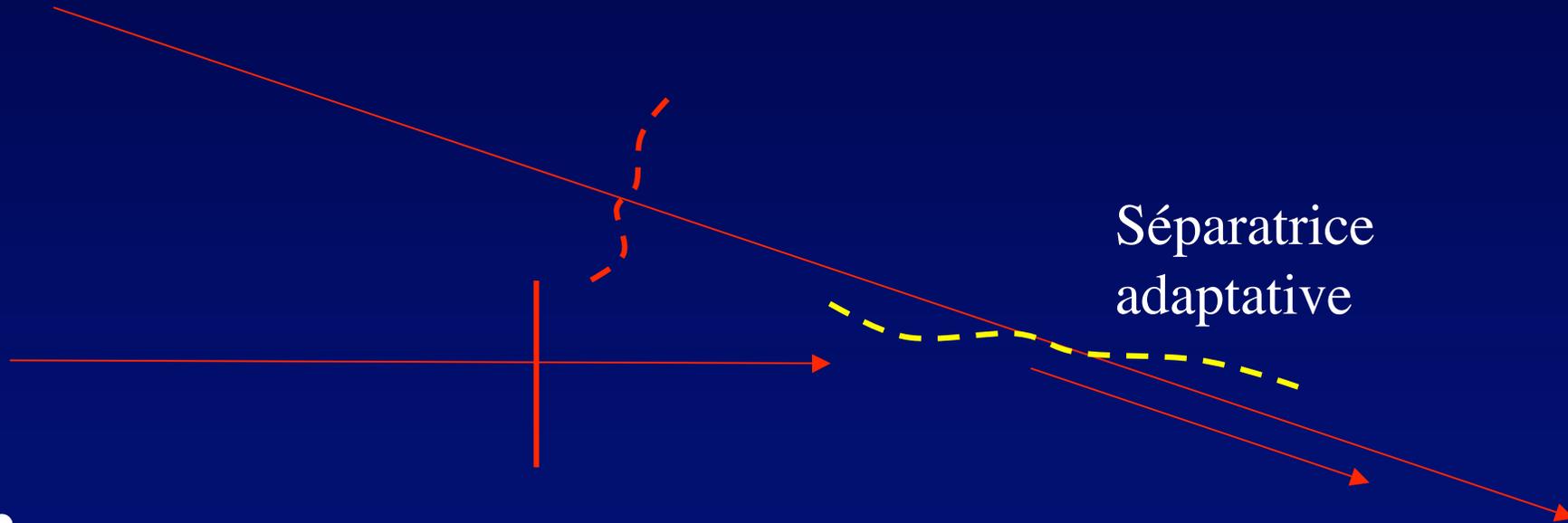
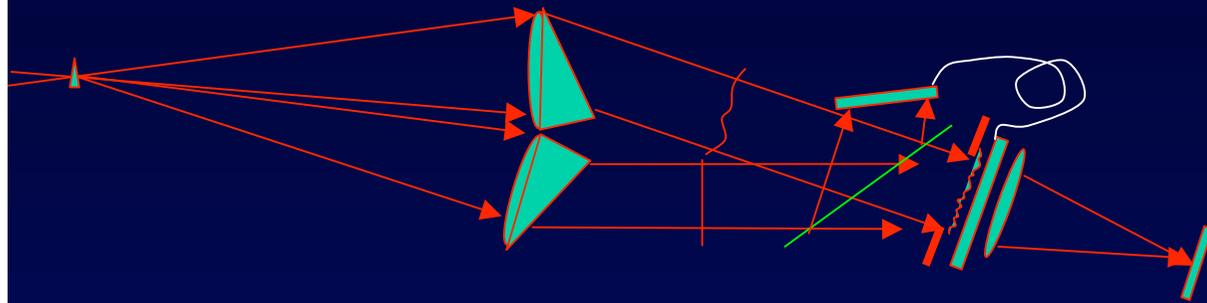


Nulling the stellar residue: 3- coronagraph with hologram



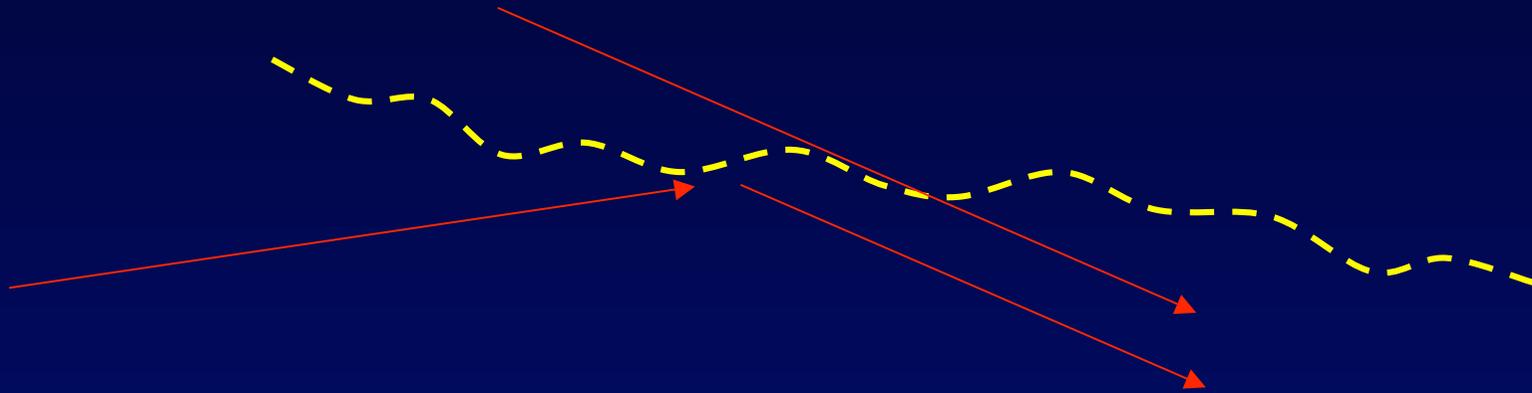
- stellar residue recorded by hologram
- then subtracted interferometrically...
- without affecting the planet

Hologramme dans un coronographe



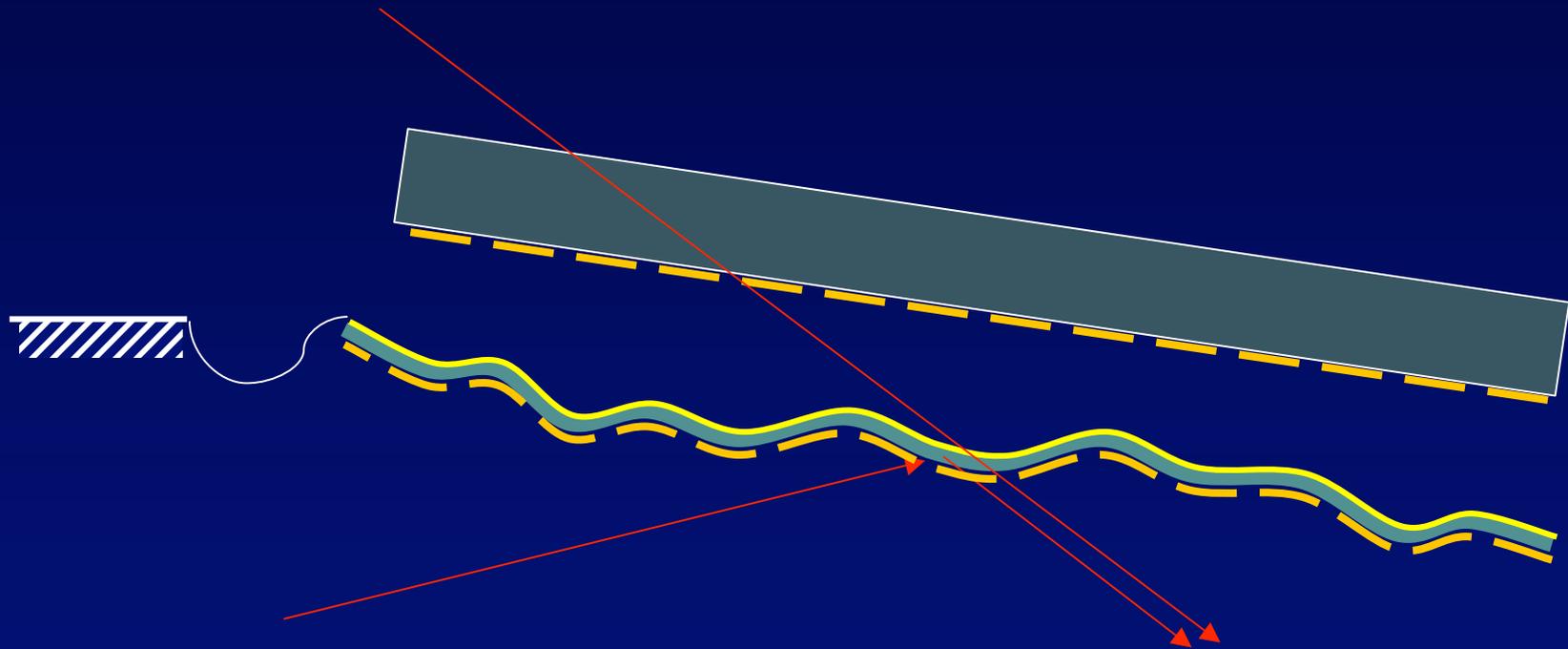
Séparatrice
adaptative

Séparatrice doublement adaptative ?



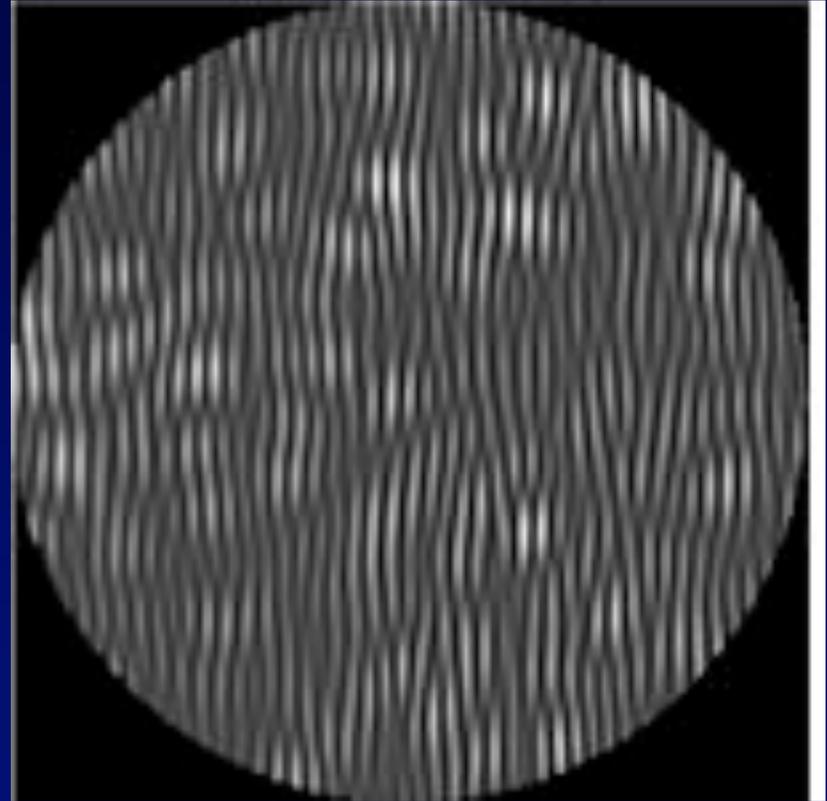
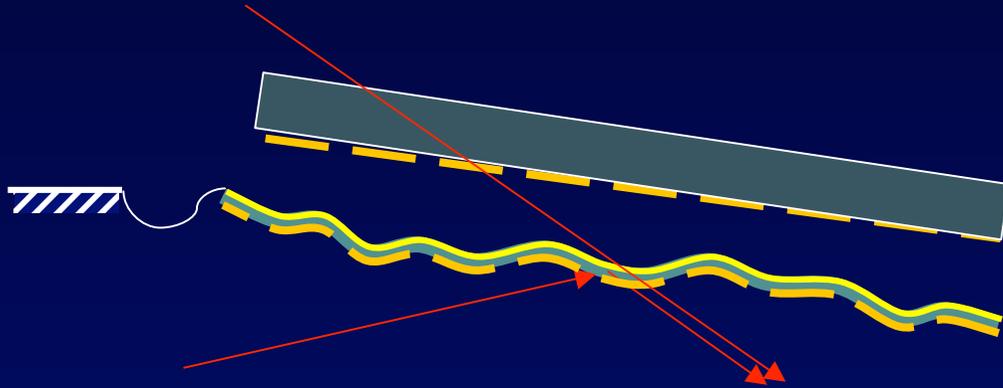
- En déformation pour définir la phase locale de l'onde réfléchie, sans affecter l'onde transmise
- En réflectivité pour définir son module local

Exemple de séparatrice doublement adaptative (à inventer !)



- Membrane déformable, à réflectivité variable
- Deux séries d'électrodes pilotent la forme et la réflectivité

Mesurer la phase et le module à corriger: comment ? quel analyseur d'onde ?



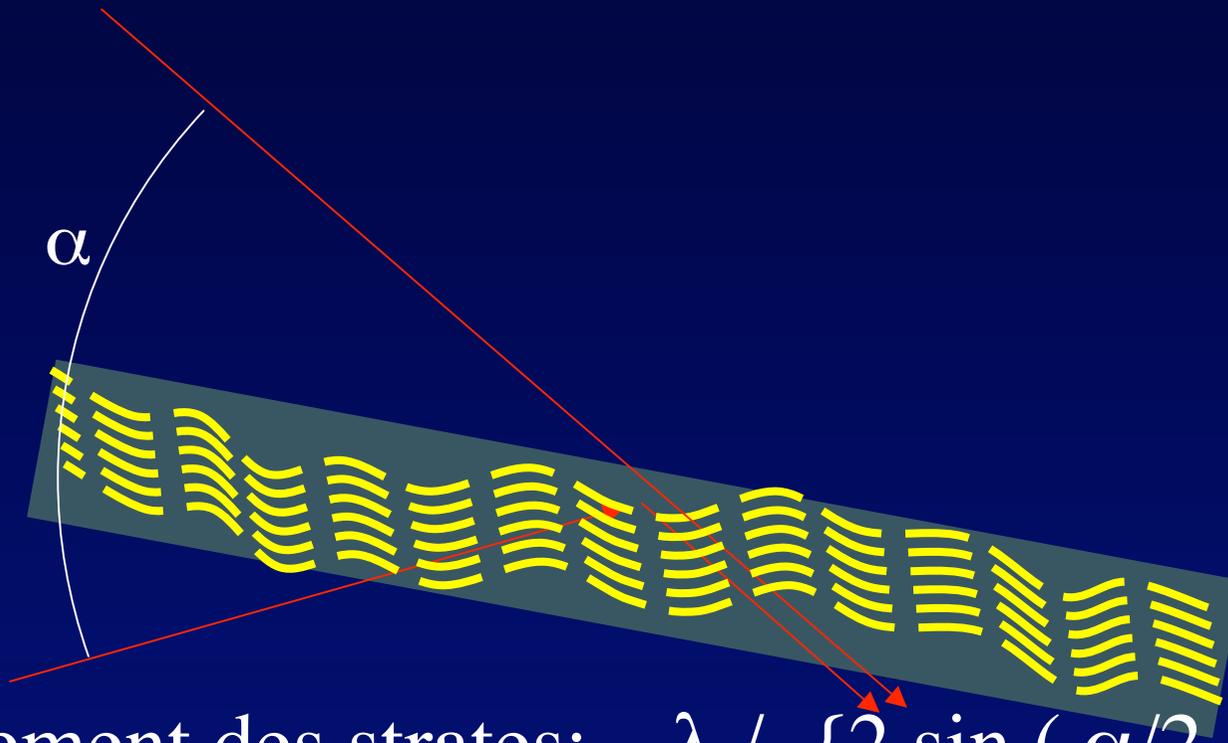
- Il suffit d'enregistrer les franges...
- ... en mettant une caméra à la place de la séparatrice déformable

Mesurer et corriger à la fois



- Matériau photosensible
- Matérialisant la frange centrale blanche
- Sous forme d'une couche réfléchissante

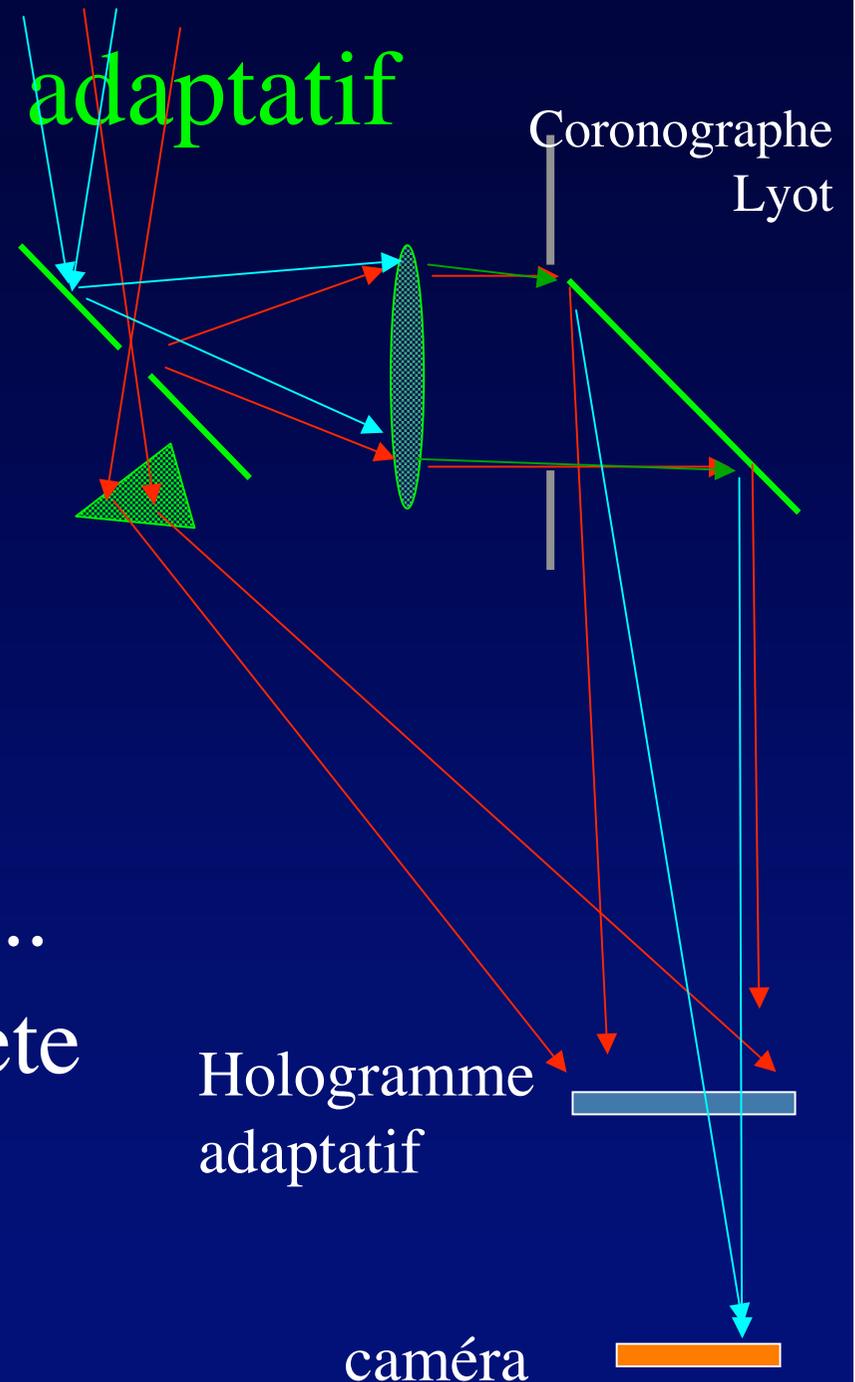
Strates en lumière monochromatique

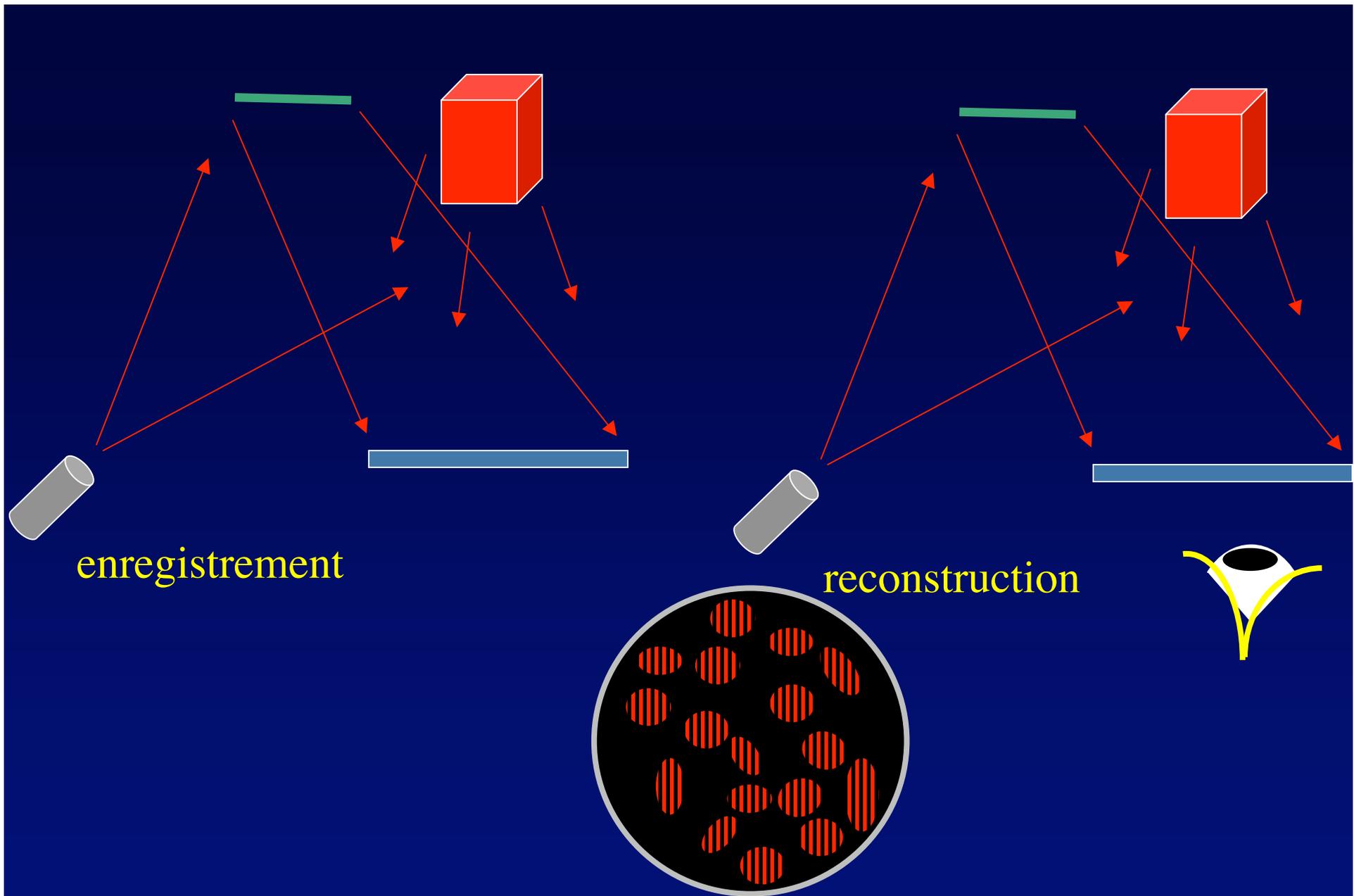


- Espacement des strates: $\lambda / \{2 \sin (\alpha/2)\}$
- Forment une séparatrice à « effet Bragg »
- Sélective en longueur d'onde
- Multiplexable pour élargir la bande spectrale

nettoyeur holographique adaptatif

- Hologramme dynamique « gelable »
- Détruit le résidu stellaire...
- ..en affectant peu la planète

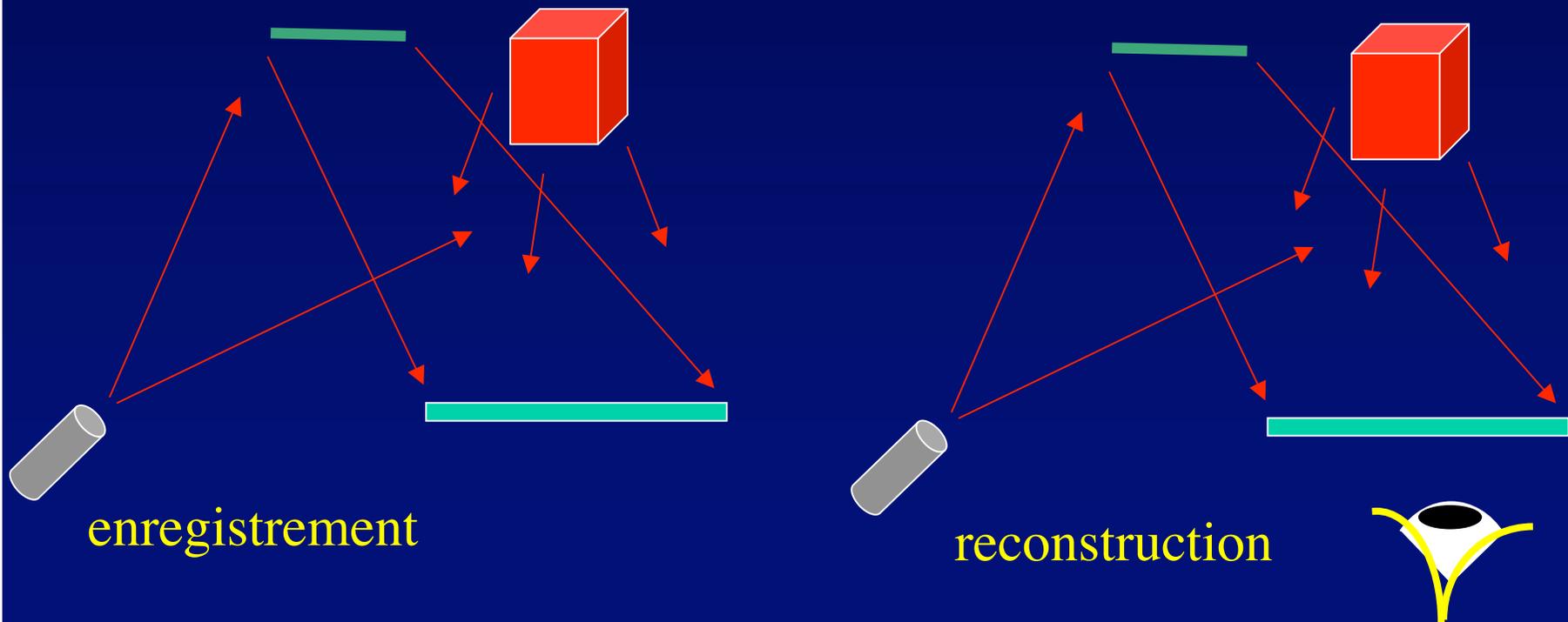




- Hologramme = speckles frangés

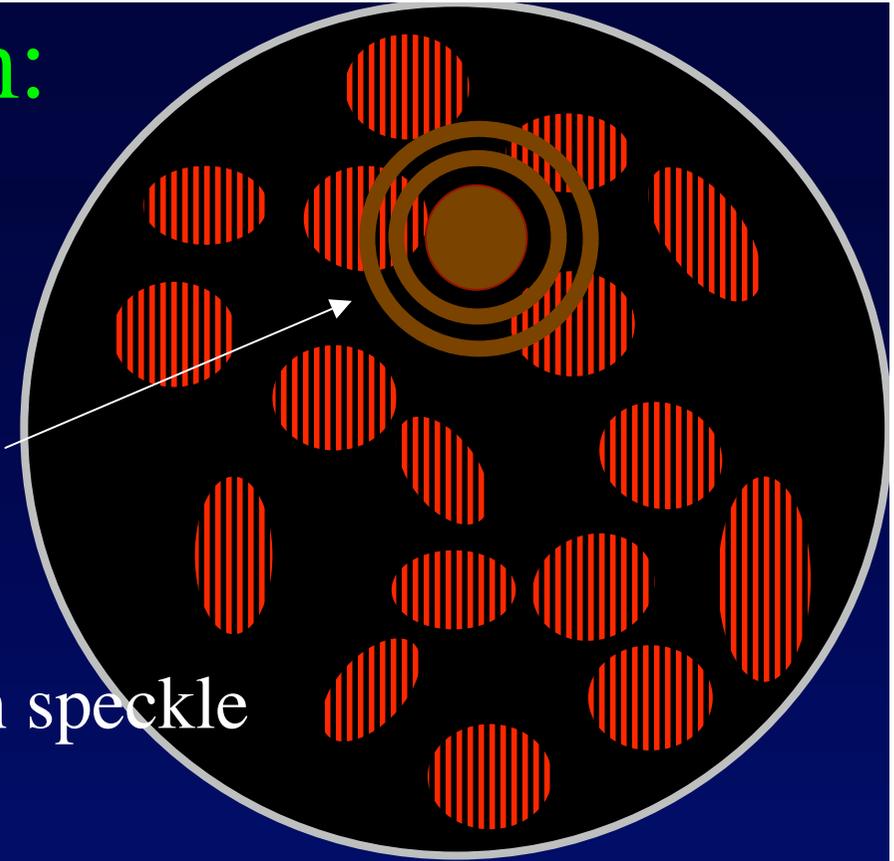
Hologramme annulant les résidus d'étoile

- Utilise le principe de l'interférométrie holographique: interférence d'un objet réel et d'un objet reconstruit
- Ici, annuler avec un faisceau de référence déphasé de π



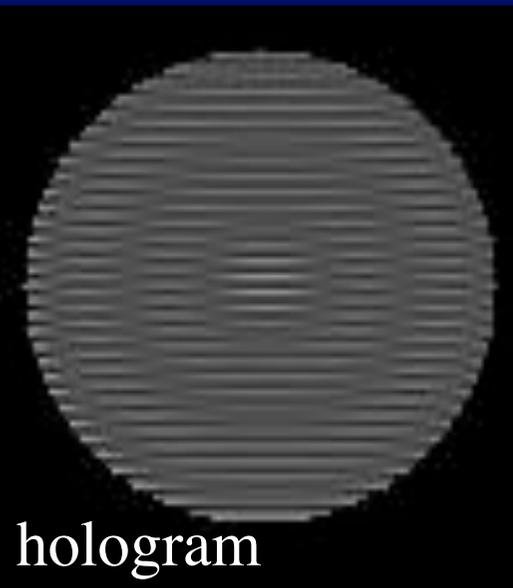
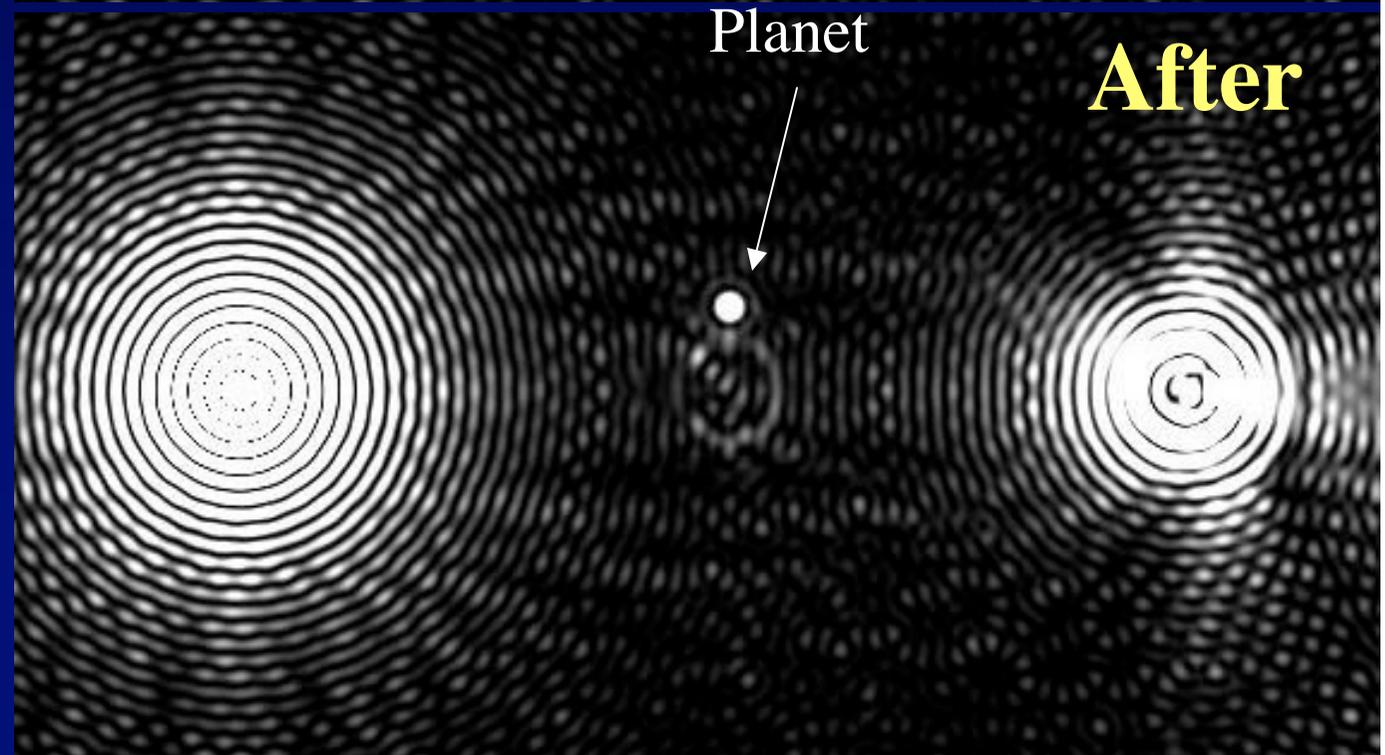
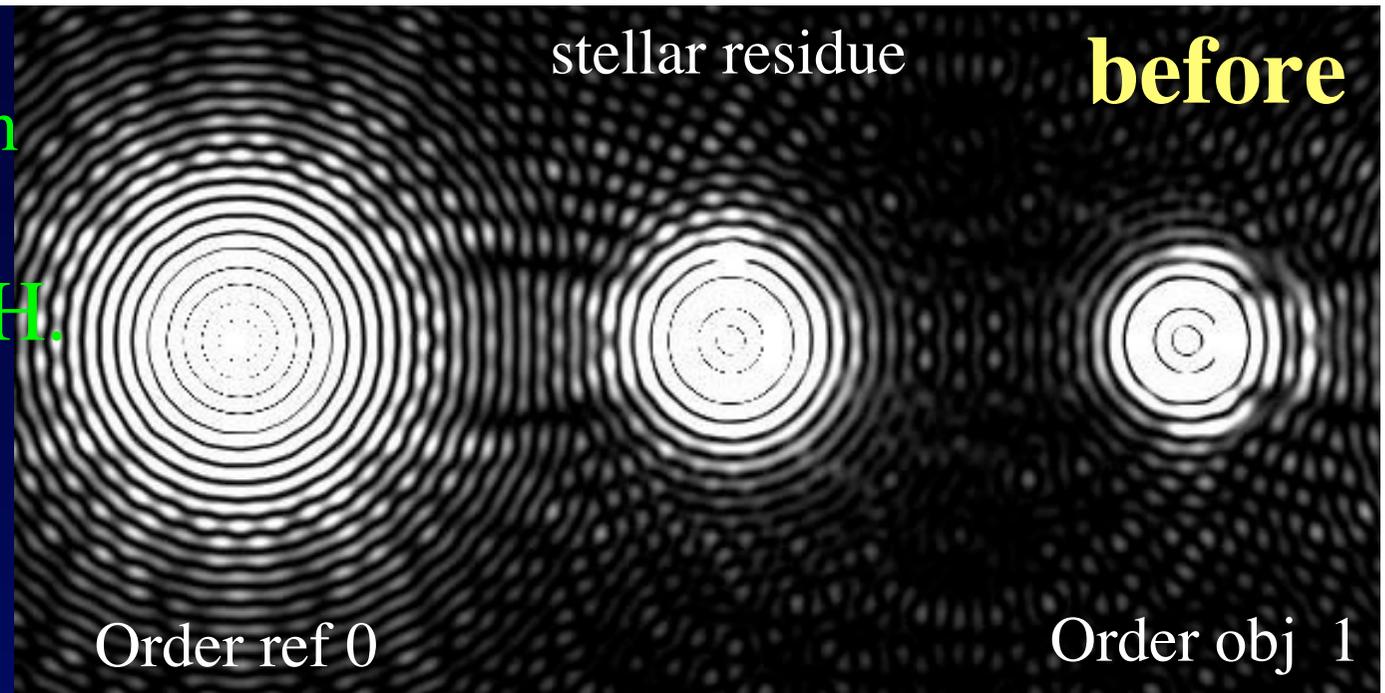
Cleaning with hologram: how it works

planet



- ... fringes recorded within each speckle
- ...become a dark grid ...
- ...masking the fringes...
- ...but not the planet
- this is holographic interferometry
 - fully destructive if $\gamma = -1/2$
 - also works with phase hologram

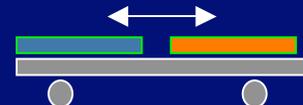
Lyot coronagraph
and hologram:
Simulation by H.
Le Coroller
(Coroller et al., in
preparation)



Hologramme direct ou synthétique ?



- Direct: nécessite matériau d'enregistrement
 - « temps réel »
 - très sensible
 - éventuellement blocable
 - Difficile problème de photochimie !
- Synthétique: caméra et miroir déformable pour hologramme de phase **On sait faire !** En continu avec séparatrice ou en alternance avec un support mobile



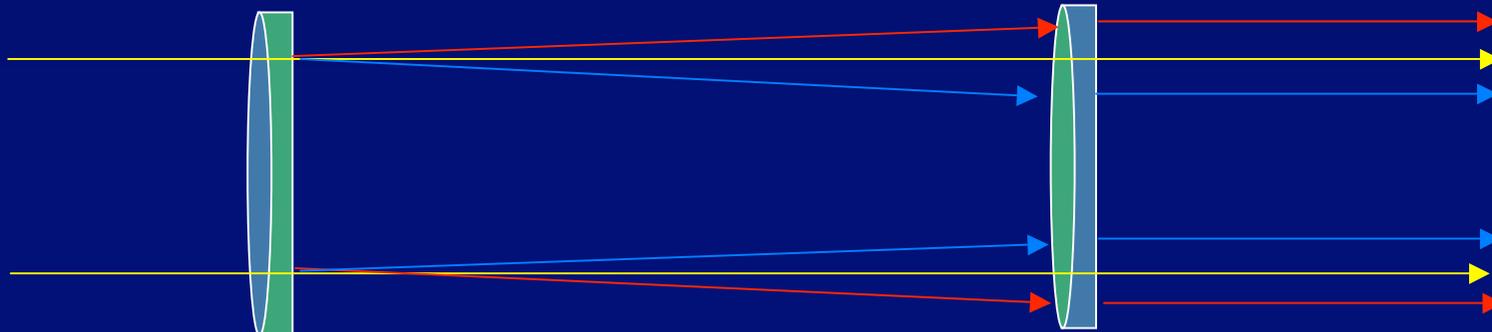
Elargir la bande spectrale

Bosselage

$\phi(x,y)$

amplitude

- Onde dans la première pupille: $1 + i(2\pi/\lambda) \delta(x,y) + a(x,y)$
- Si $\phi(x,y) \gg a(x,y)$ speckles rouges identiques aux bleus, mais plus étalés
- Aussi pour les franges de l'hologramme
- donc achromatisable avec un correcteur de Wynne

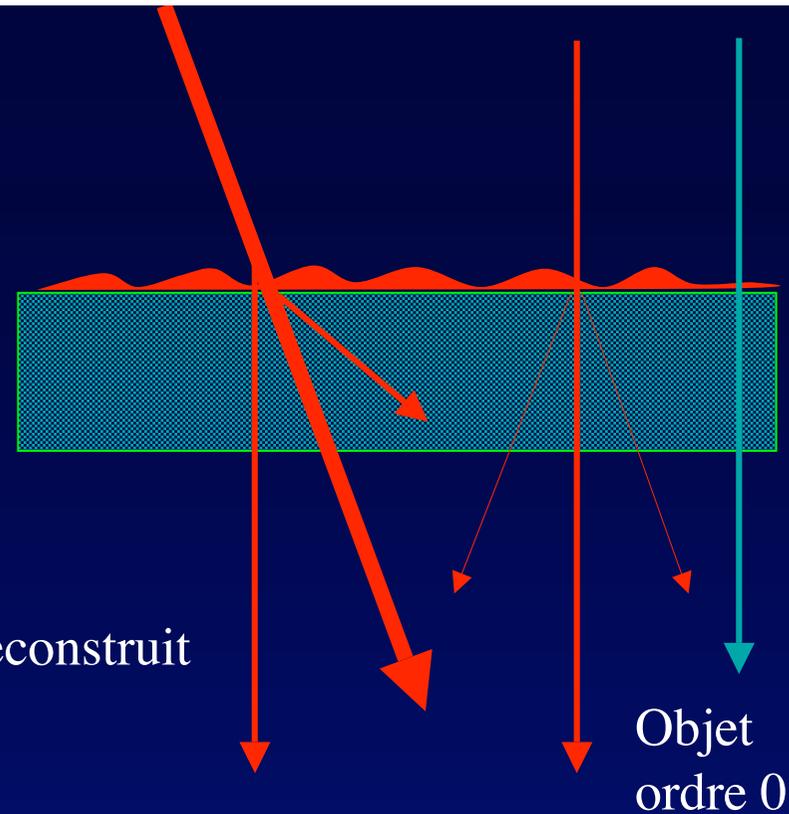


To be explored:

Achromatize with dispersed
reference beam ?

- May be usable since the pupil speckles are nearly wavelength-invariant...
- ...under some conditions

Hologramme de phase, à faible efficacité de diffraction



- Interférence destructrice en équilibrant les amplitudes, avec déphasage π
- Un hologramme faible convient si le faisceau de référence est plus intense....
- ...et la planète est peu atténuée

Cleaning with hologram: achromatize with color hologram ?

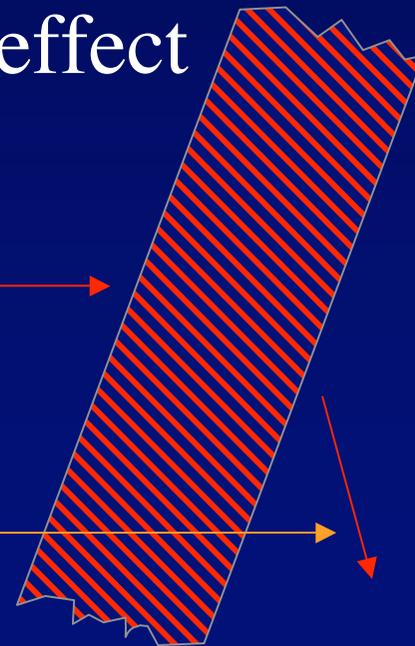
Lippmann-Bragg
hologram



- Standing waves recorded in thick film
- spectral selectivity through Bragg effect
- diffractive efficiency as N^{-2}

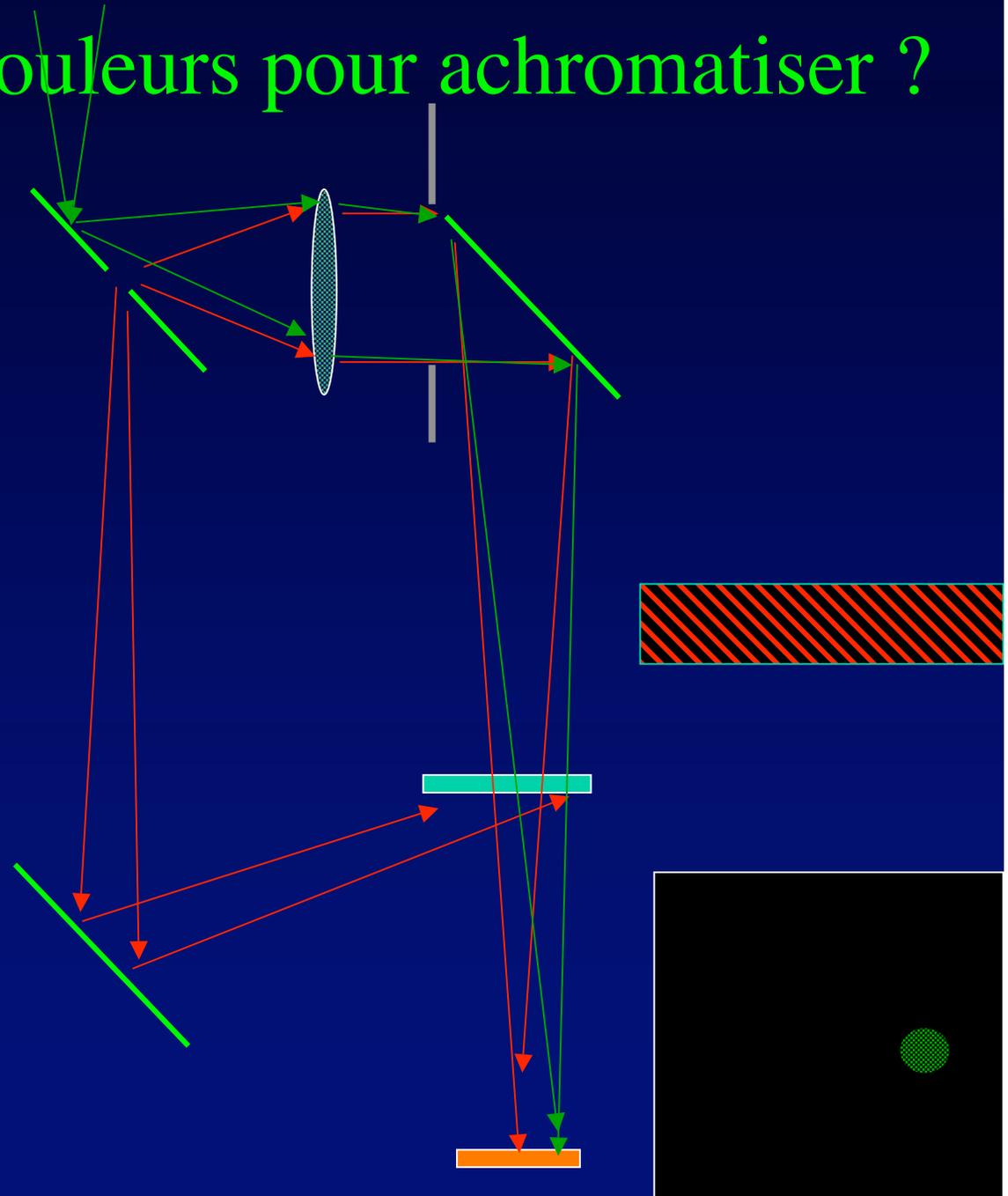
with N wavelengths

planet mostly transmitted

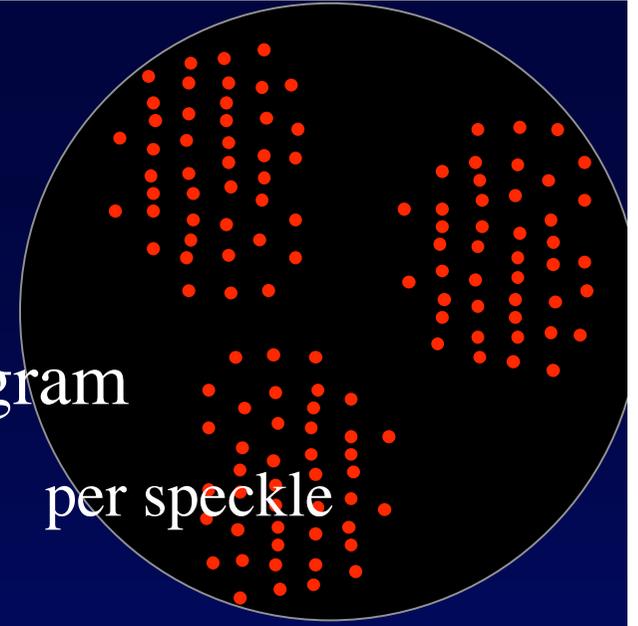


Hologramme en couleurs pour achromatiser ?

- Avantage de principe: pas d'onde conjuguée

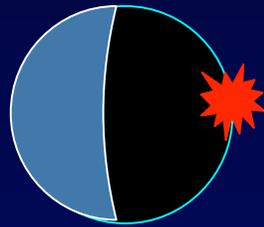


Photon noise in hologram and limitation of nulling



- N_h photons per speckle to inscribe hologram
 - Amplitude of reconstructed beam = N_h per speckle
 - relative fluctuation of amplitude = $N_h^{-1/2}$
 - ...which equals the relative residue of the reconstructed beam ...
 - ... hence the intensity attenuation = N_h^{-1}
- N_o photons per speckle during the science exposure
- Nulling residue = $N_o N_h^{-1}$...
 - ... **leaves 1 photon per speckle** if same exposure times for recording and science
 - Exposure must be long enough to have several photons in the planet peak

laser star for recording low-noise hologram



Earth

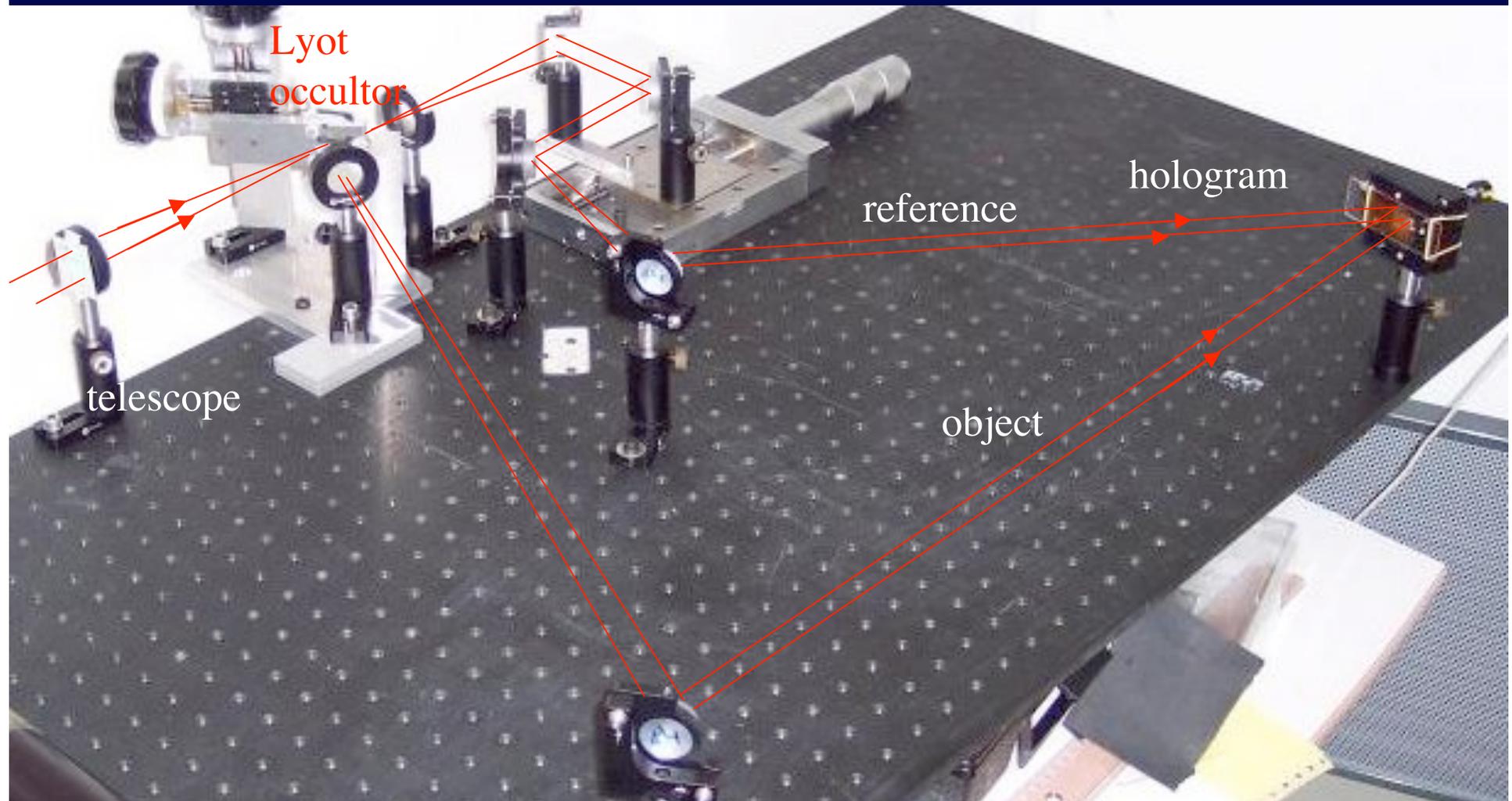


- laser source on Earth or in space, usable as artificial star
- Gives low-noise hologram in a short exposure
- refreshed when needed....
-the AO being frozen during the exposures

Reaching the theoretical nulling gain with hologram

- Deep nulling if:
 - Low-noise hologram (recorded with laser star)
 - Little resolved star, accurately guided
- in practice: gain 100 or 10,000 ?
- 1,000 can suffice for 10^{-10} planet

Laboratory version (F.Martinache , in preparation)



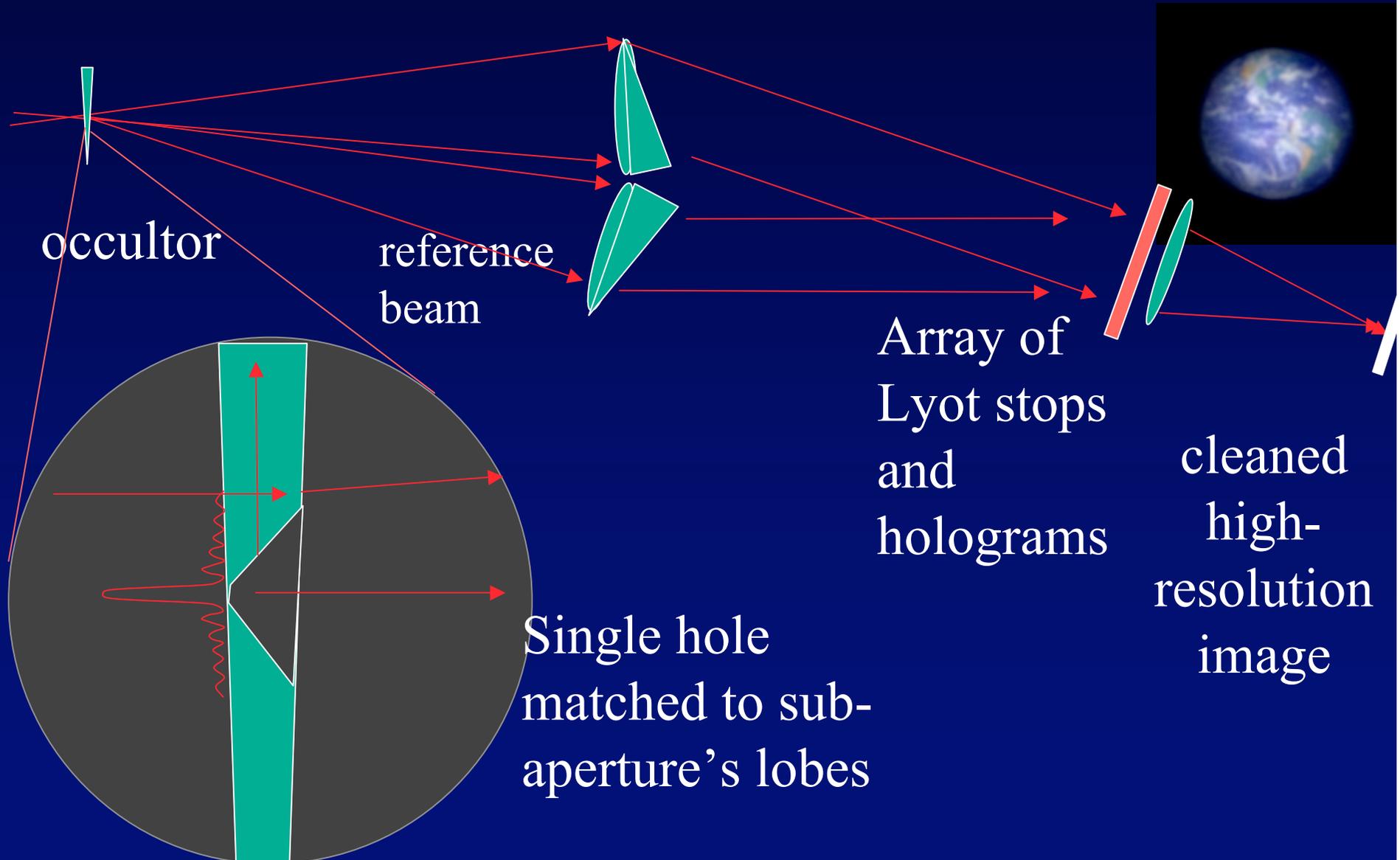
Hologram can relax the bumpiness tolerance

- three correction levels to be harmonized:
 - Mirror polishing : $\lambda/10$ or $\lambda/1000$?
 - adaptative optics : $\lambda/100$ or $\lambda/5000$?
 - Hologram: attenuate star residue 10 or 1000 times ?
 - Possibility of several hologram stages
- Best sharing depends on available components

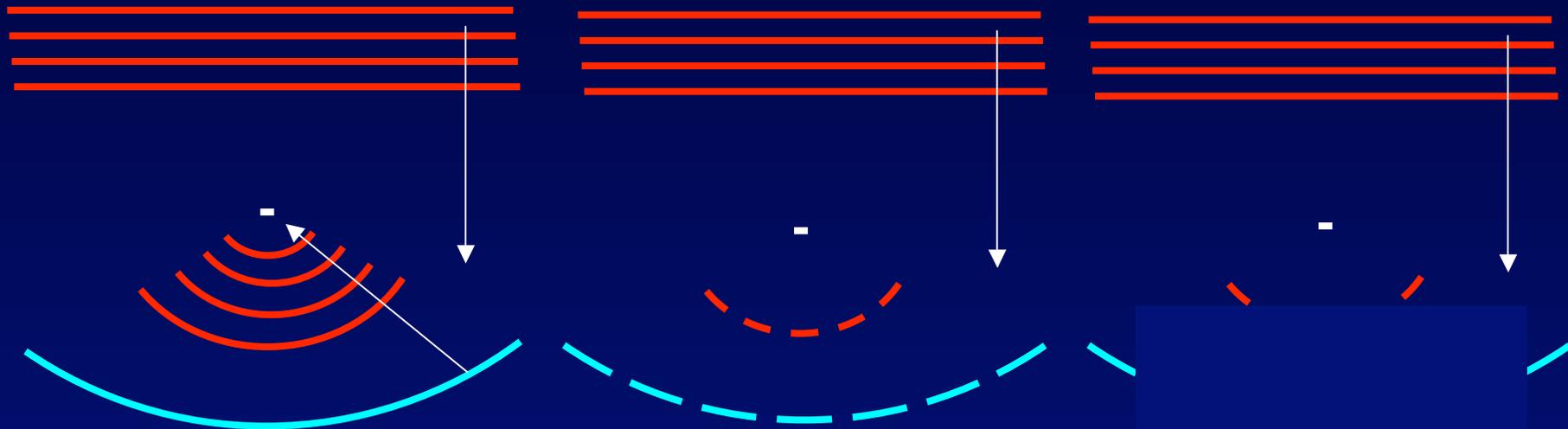
Better than « incoherent » or « post-detection » subtraction of stellar residue (initially proposed for HST by Bonneau et al., 1975 posted at www.oamp.fr/lise/BonneauEtAlHST.pdf)

- Principle of incoherent subtraction :
 - subtract exposures with and without planet
- Residue $N_0^{1/2}$
- coherent subtraction is better
 - Leaves a single photon per speckle....
 - And even less if low-noise hologram inscribed with a bright laser star

Low-resolution coronagraph with hologram for EEI



Interféromètre



- Marche encore avec deux éléments : image dégradée, mais sans perte de résolution

Trois étapes vers l'imagerie à haute résolution

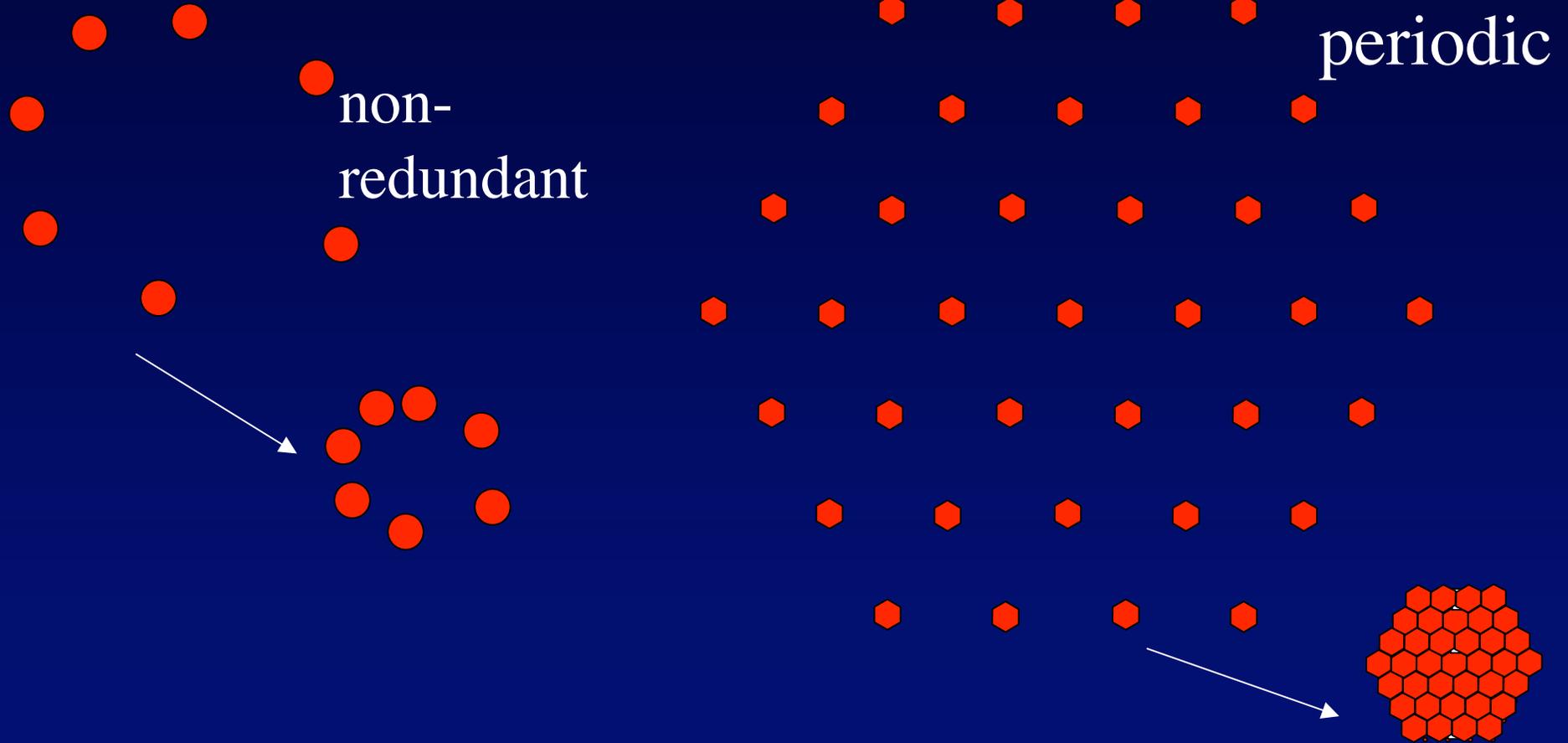
1. Synthèse d'ouverture par paires ou triplets
2. Imagerie directe avec ouverture multiple:
 - Combinaison Fizeau
 - Combinaison hypertélescope

L'imagerie directe est plus sensible en présence de « fond de ciel »

L'hypertélescope est encore plus sensible si le détecteur est imparfait (seuil, etc..)

Principle of hypertelescopes

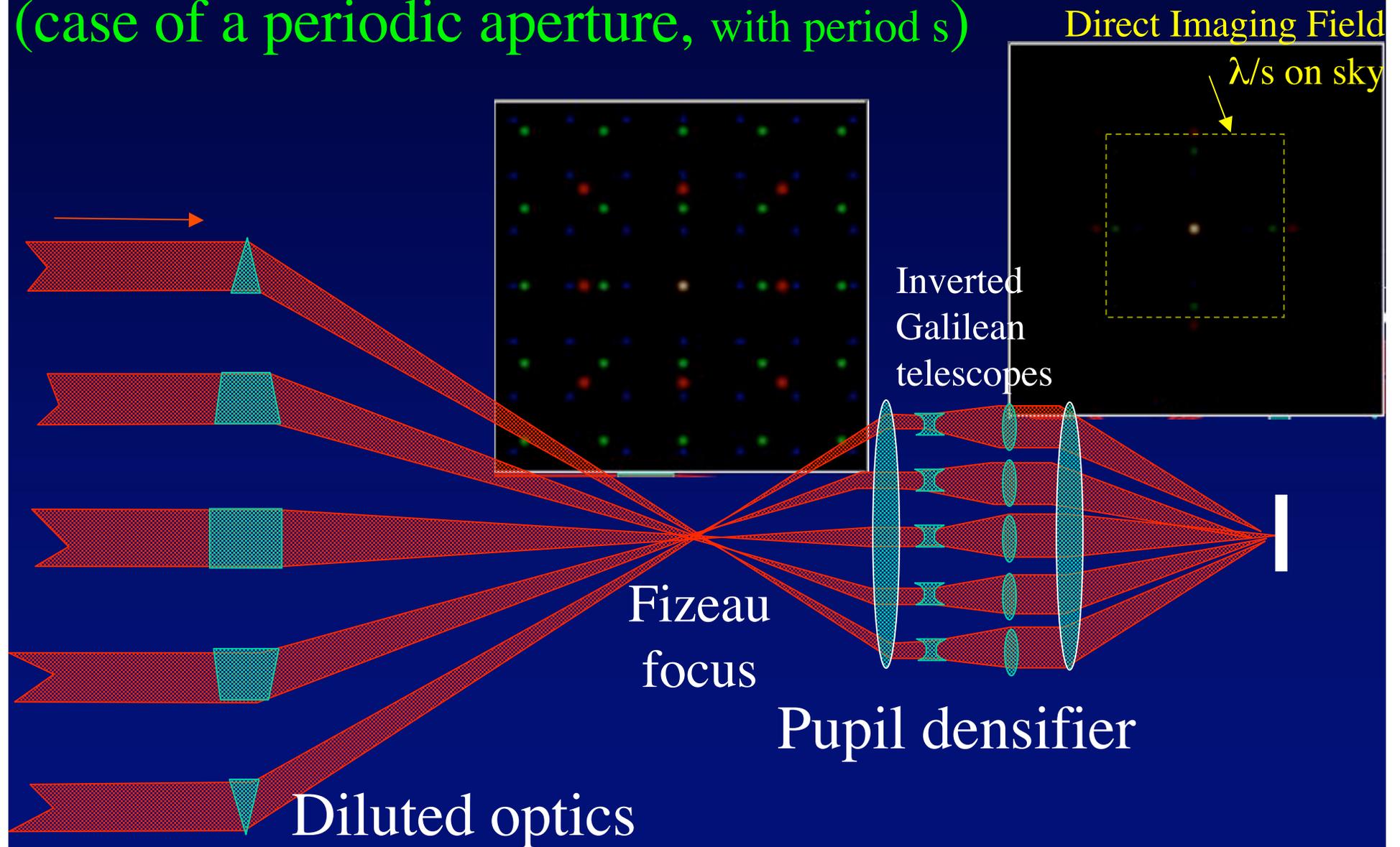
(Labeyrie A&A, 1996)



- Densify the pupil
- Preserve the center's pattern

Principle of hypertelescopes

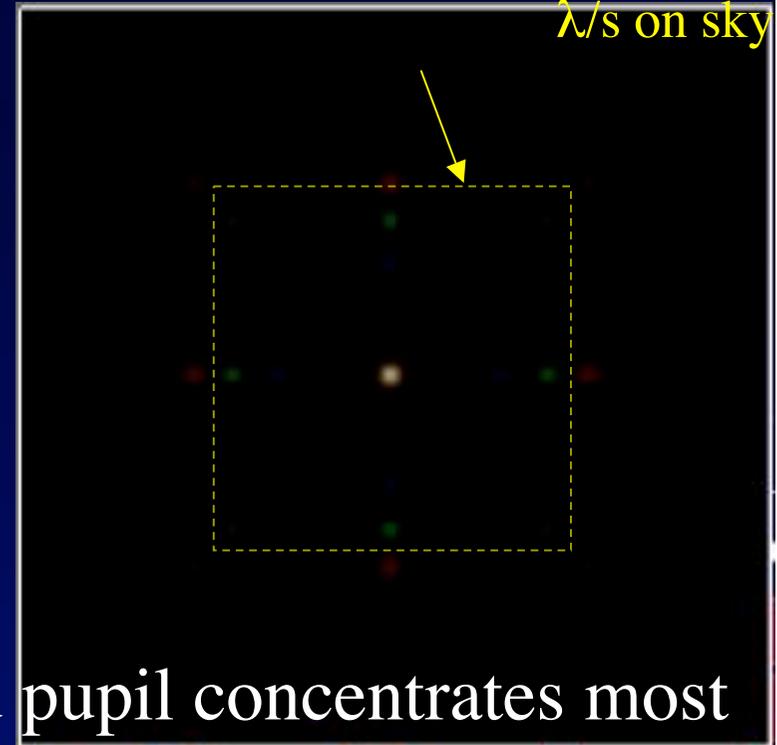
(case of a periodic aperture, with period s)



Properties of hypertelescopes

Direct Imaging Field

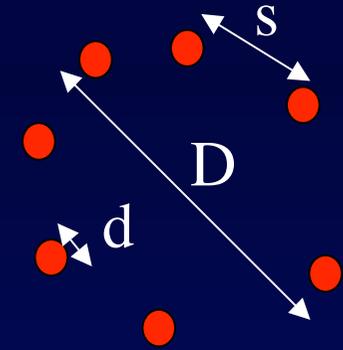
λ/s on sky



- Luminosity gain: fully densified pupil concentrates most light in the central peak (10^8 gain for Exo-Earth Imager)
- Point source image is a product of interference and diffraction functions
 - Interference function is convolved with object
 - Diffraction function is a broader nearly fixed envelope

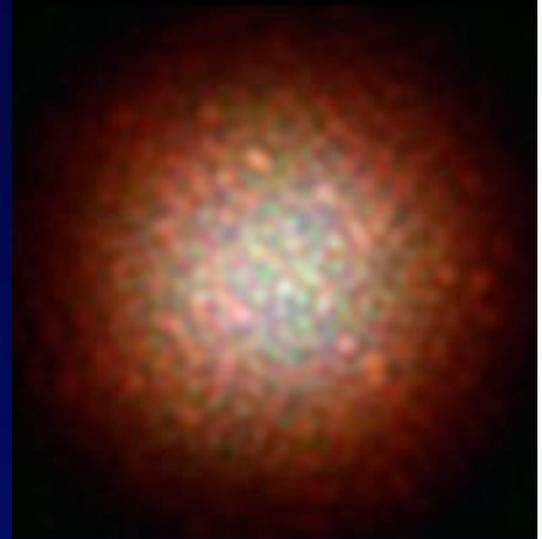
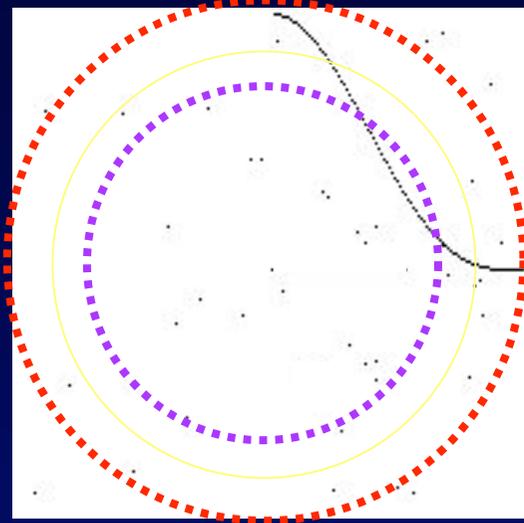
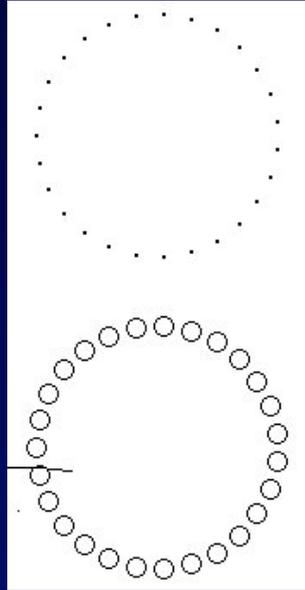
Properties of hypertelescopes

N apertures
total collecting area A



- Sky diameter of Direct Imaging Field :
 - $\text{DIF} = \lambda s^{-1} = \lambda D^{-1} N^{1/2} = \lambda d^{-1} D^{-1} A^{1/2}$
- Becomes infinite if d decreases to zero, at constant collecting area $A = N d^2$
 - Hypertelescope with very many apertures behaves as a giant telescope of diameter D , with image attenuated as $A D^{-2}$
- Field crowding limit on extended objects per diffraction lobe λ/d
maximal number of stars =
 - N^2 for non-redundant apertures
 - N for periodic apertures

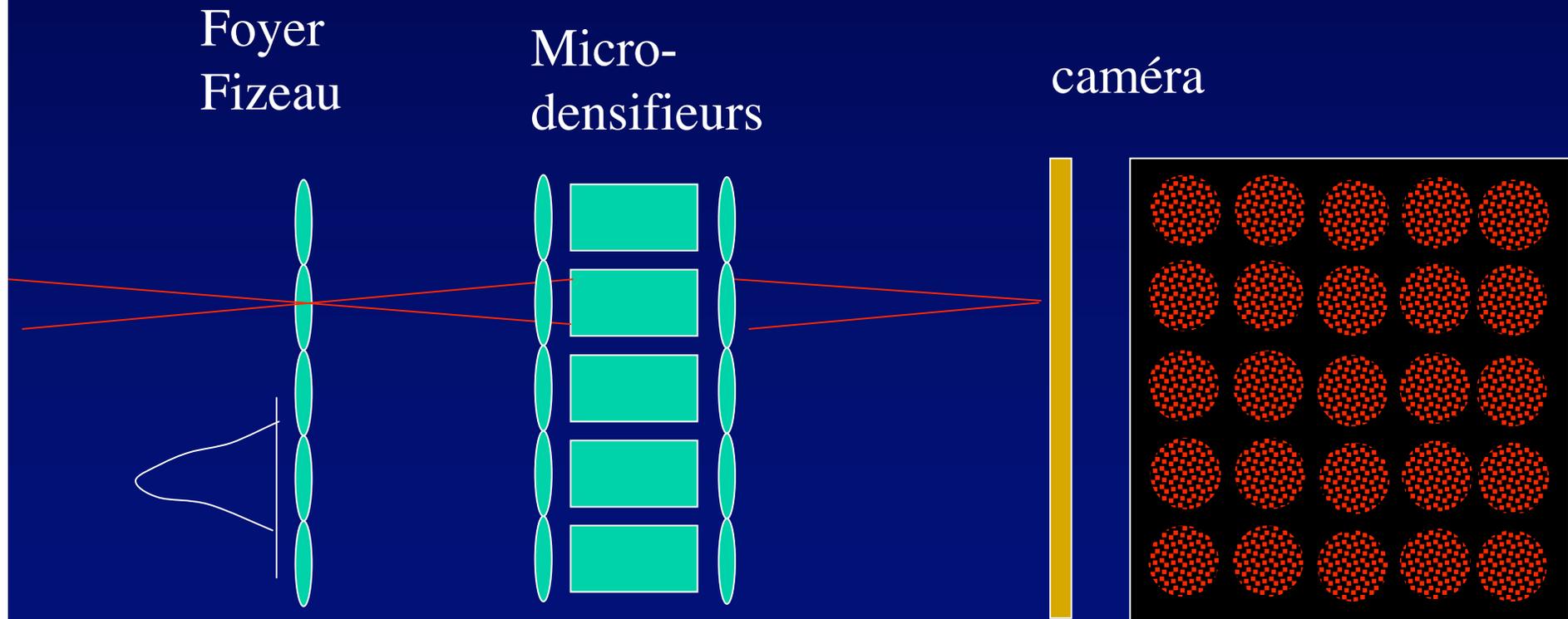
Encombrement



- 27 ouvertures, non-redondantes
- 101 étoiles, blanches, égales intensités, dont 16 dans le champ bleu

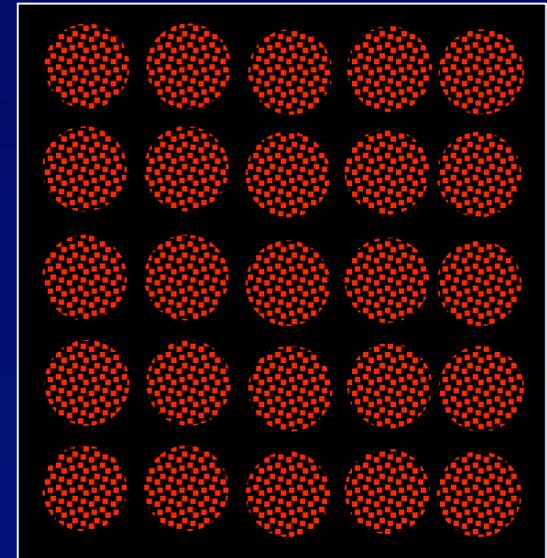
Observer plusieurs « lobes » λ/d

...avec une mosaïque de micro-densifieurs



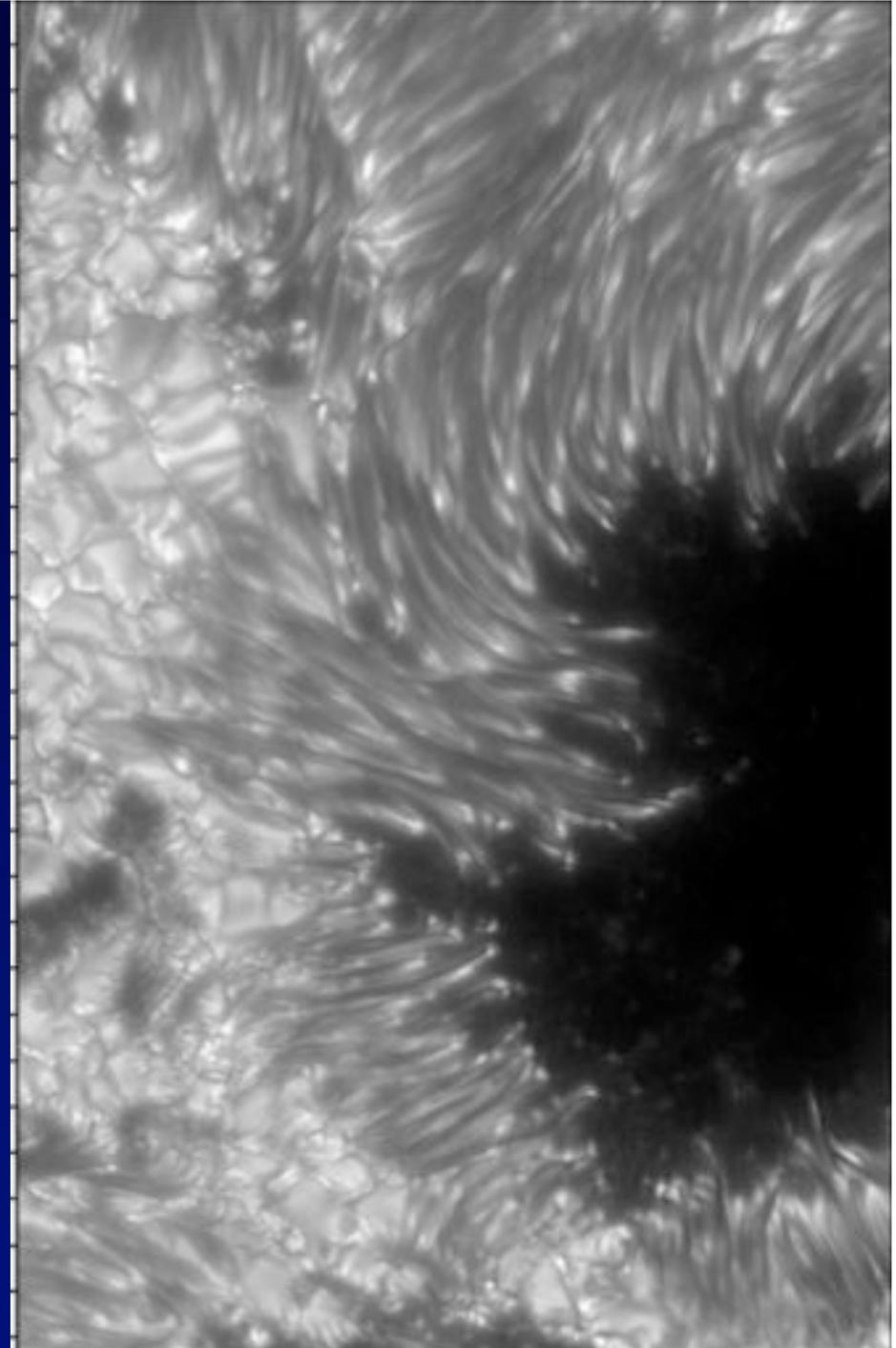
Quelle étendue de champ mosaïque ?

- pour $d = 25$ cm: lobes de $0,5''$...
- ... soit 80 microns au foyer primaire
- Sur 4 mm: 50×50 champs élémentaires...
- pouvant contenir chacun 100×100 resels actifs si il y a 100 ouvertures non redondantes

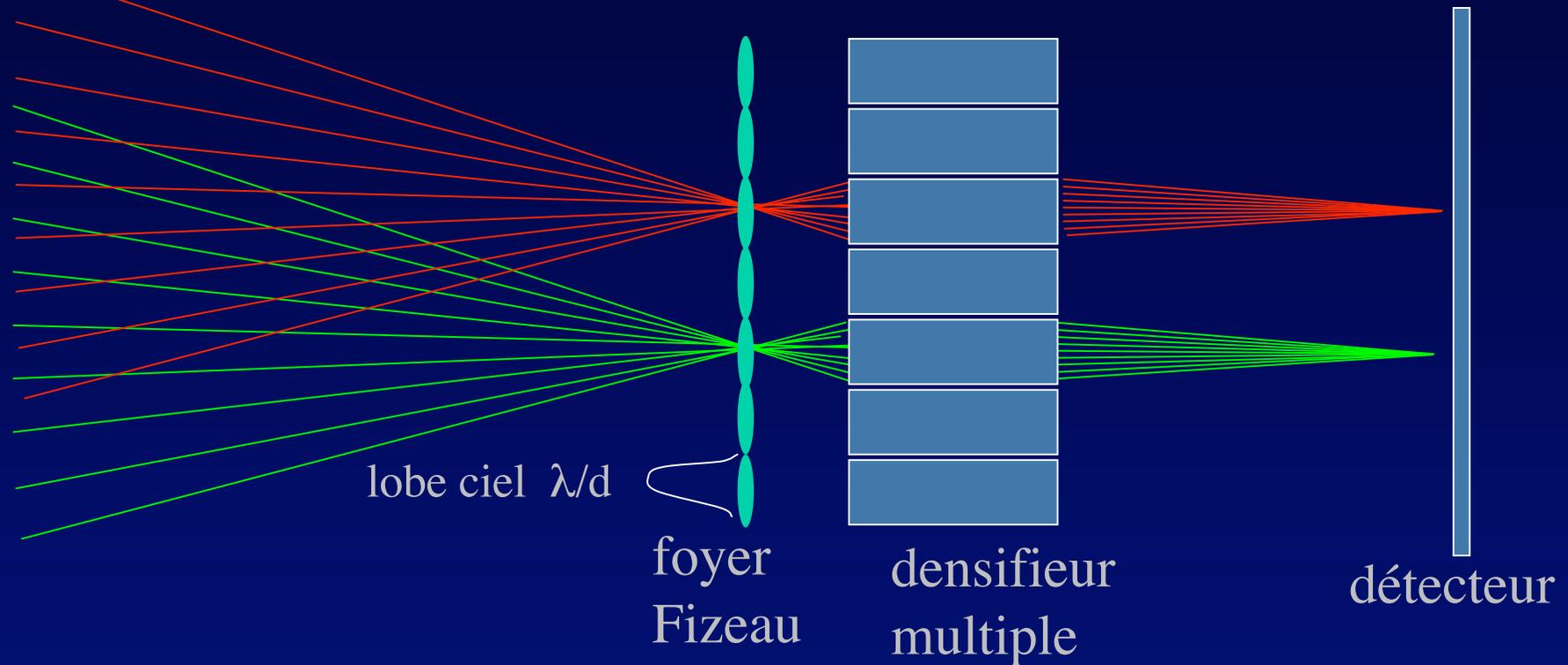


Filaments des taches solaires

- « serpents à dos noir et tête brillante »
- Télescope suédois de 1 m
- Avec optique adaptative à 15 actionneurs
- & sélection d'images
- Résolution 0 "16



cosmologie avec OWL éclaté: champ multiple

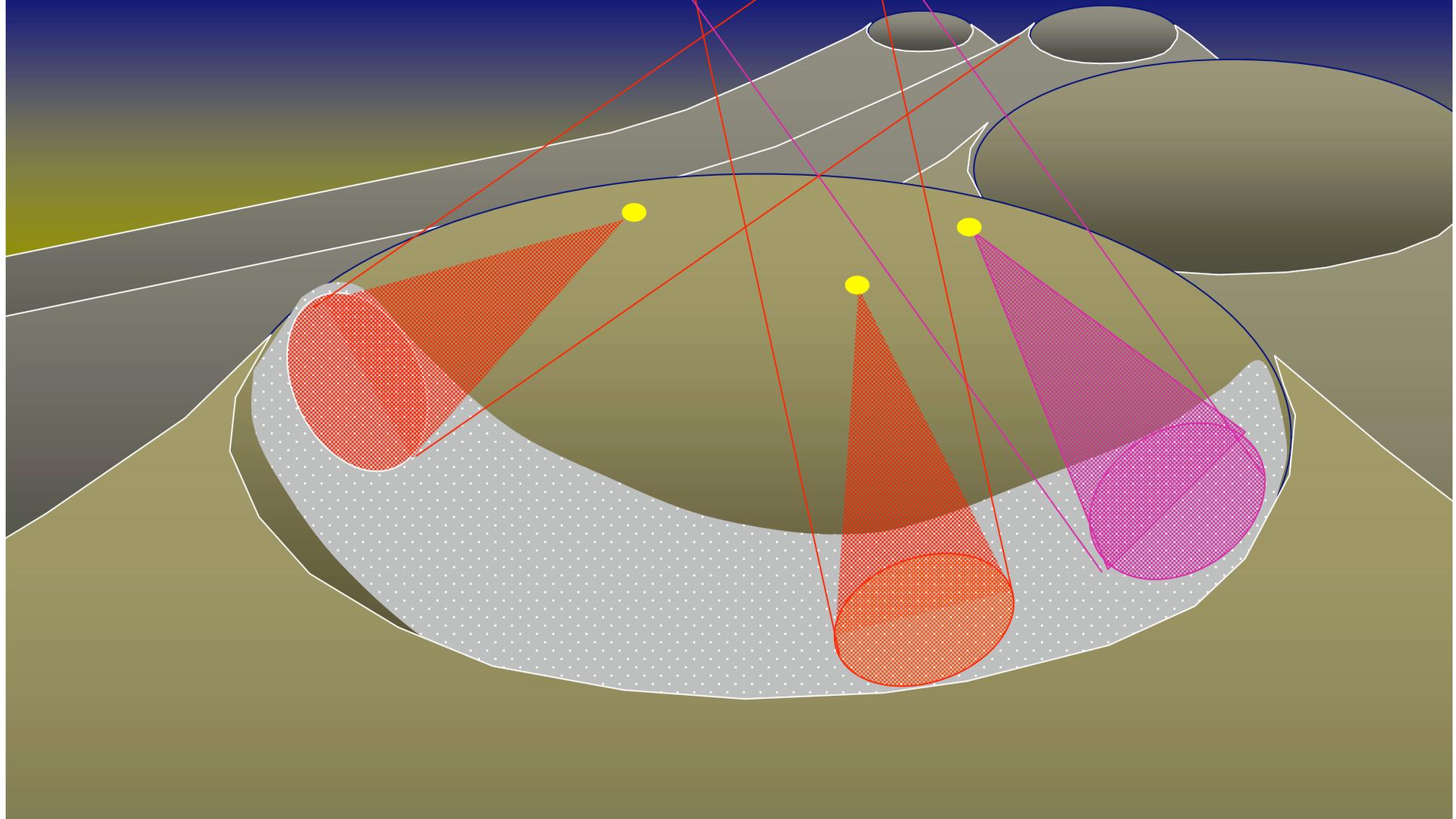


- Optique intégrée pour 1 000 x 1 000 densifieurs
- Poses décalées pour reconstruction mosaïque

hypertelescope CARLINA kilométrique

10,000 miroirs de 1m, étalés sur 5 km

Imagerie mag. 38, cosmologie

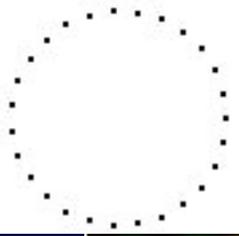


imagerie directe vs. synthèse d'ouverture:
gain en sensibilité
en présence de fond de ciel

- mesure de visibilité des franges avec une paire d'ouvertures: contamination par le fond de ciel sur le lobe λ/d
- Le pic de l'image hypertélescope sépare en grande partie le signal du fond de ciel contenu dans le lobe

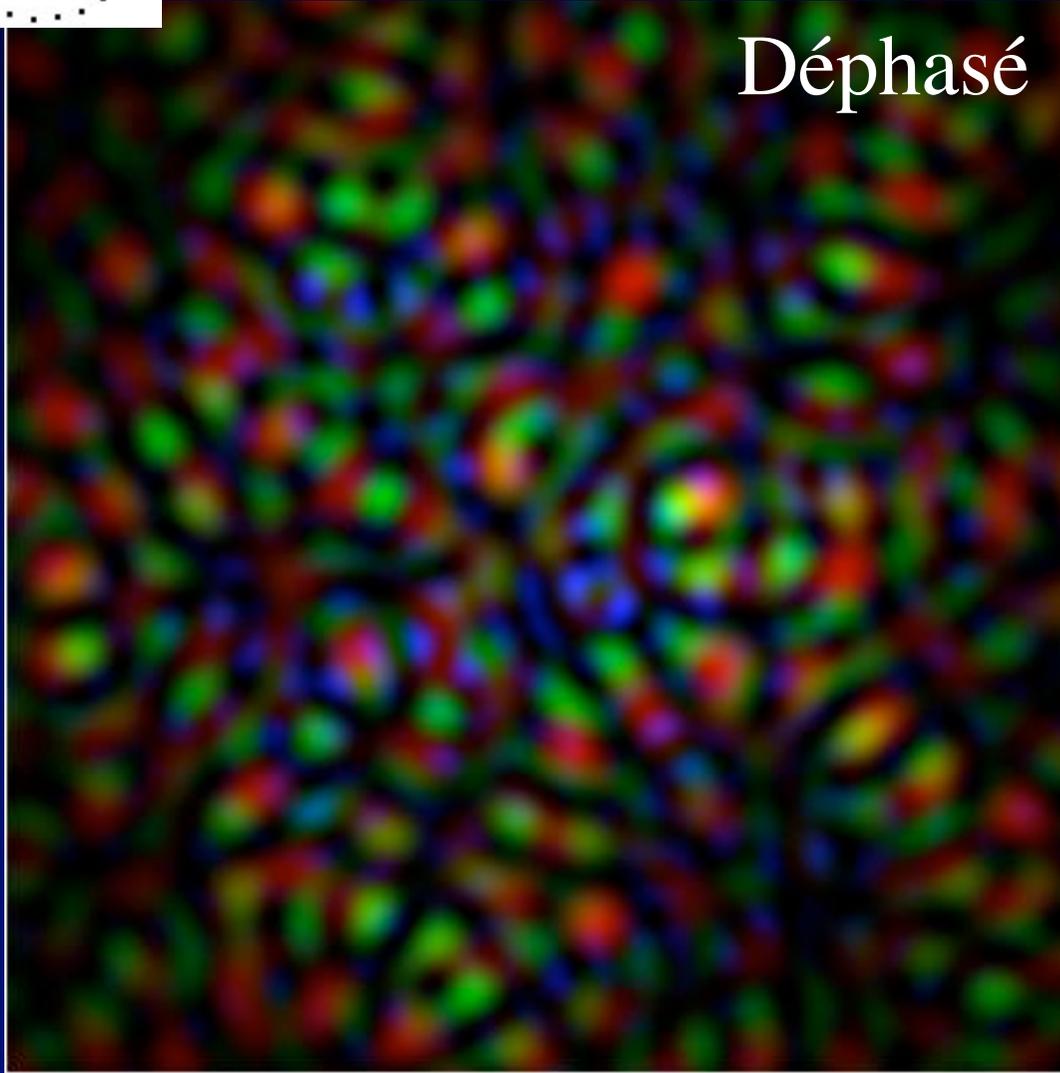
Le gain supplémentaire en sensibilité de l'hypertélescope, si le détecteur est imparfait

- la densification de pupille intensifie l'image
- .. en rétrécissant le halo de pics secondaires
- Sensibilité accrue si le détecteur n'est pas limité par le bruit de photons
- ... et économie de pixels

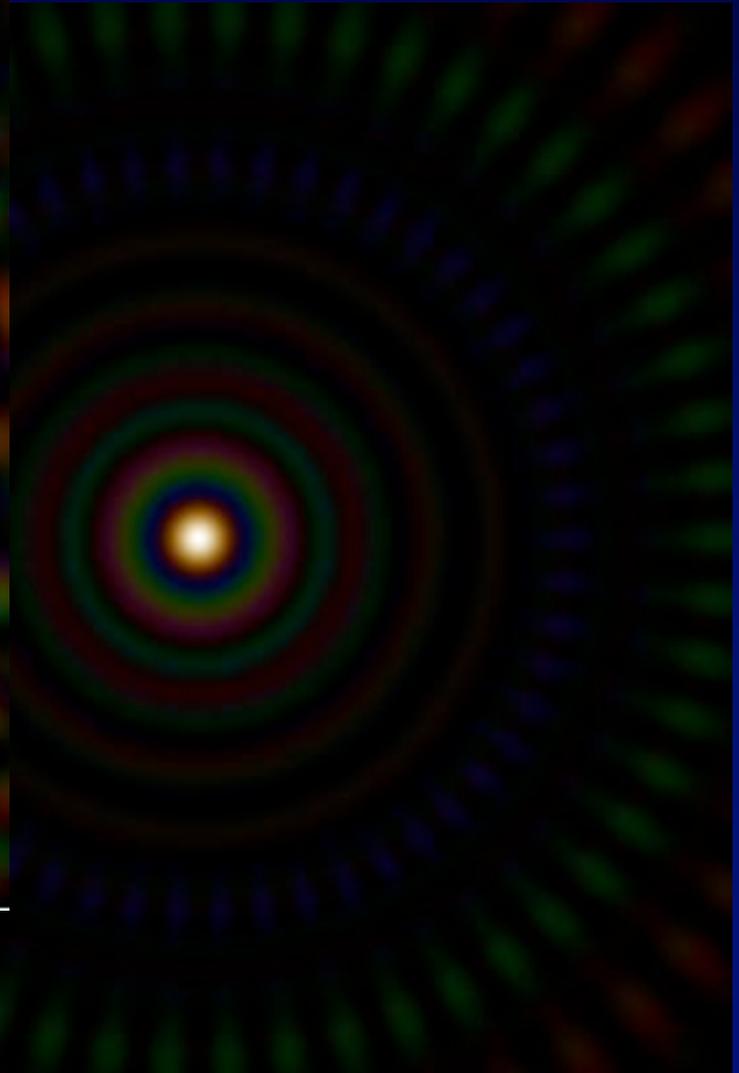


27 ouvertures en cercle

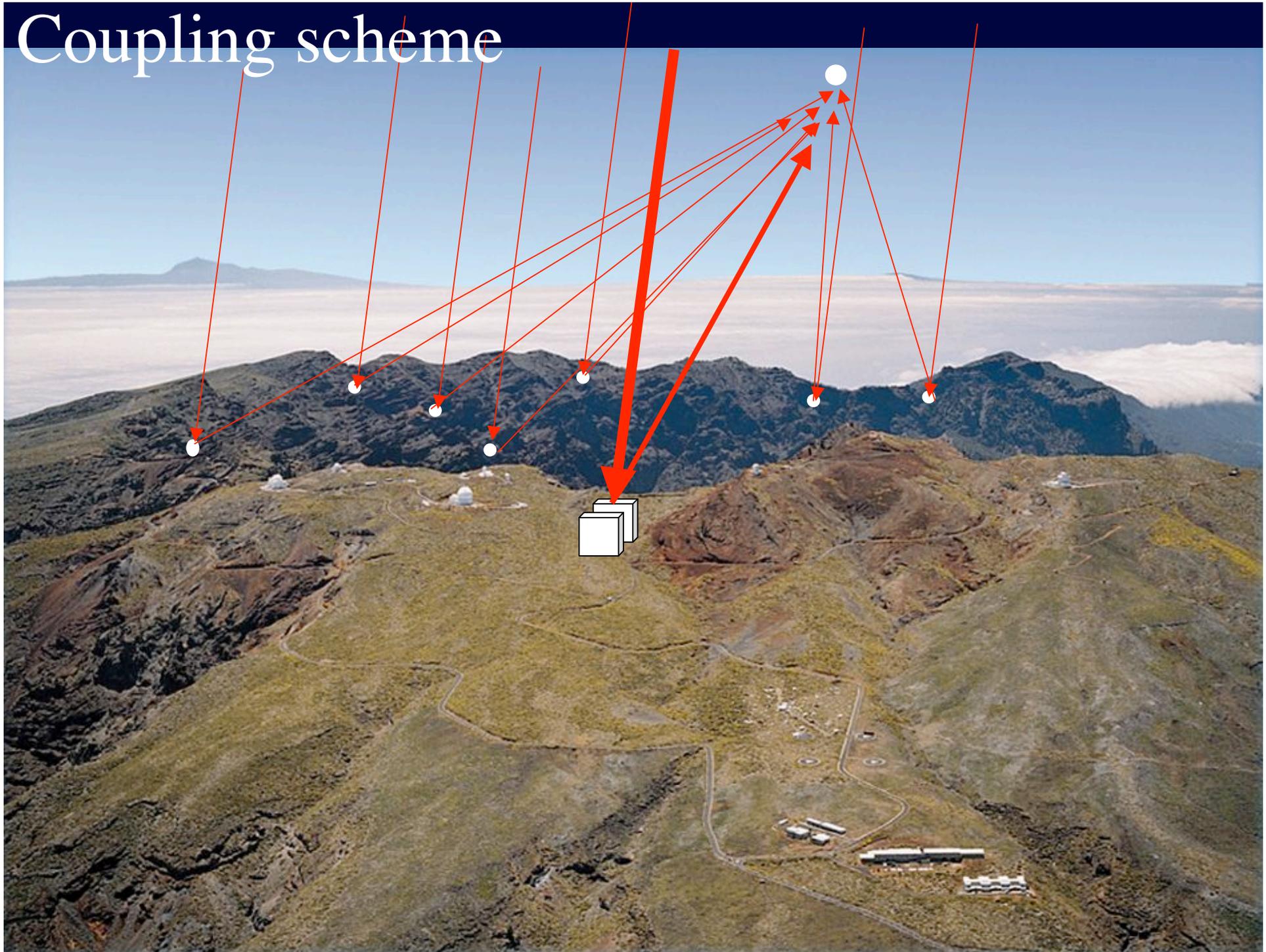
Déphasé



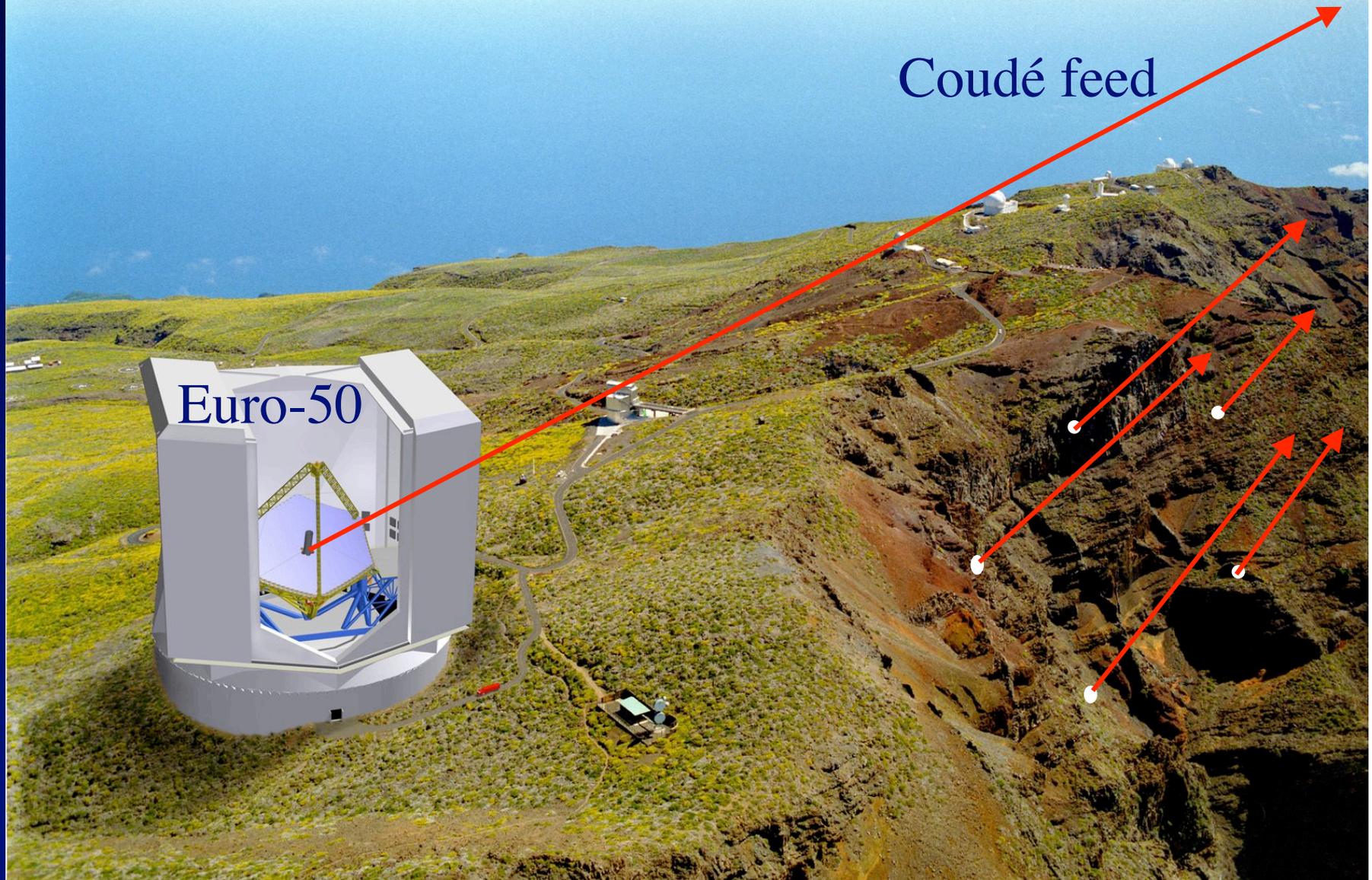
En phase



Coupling scheme



Roque de las Muchachos, Canarias



Euro-50

Coudé feed

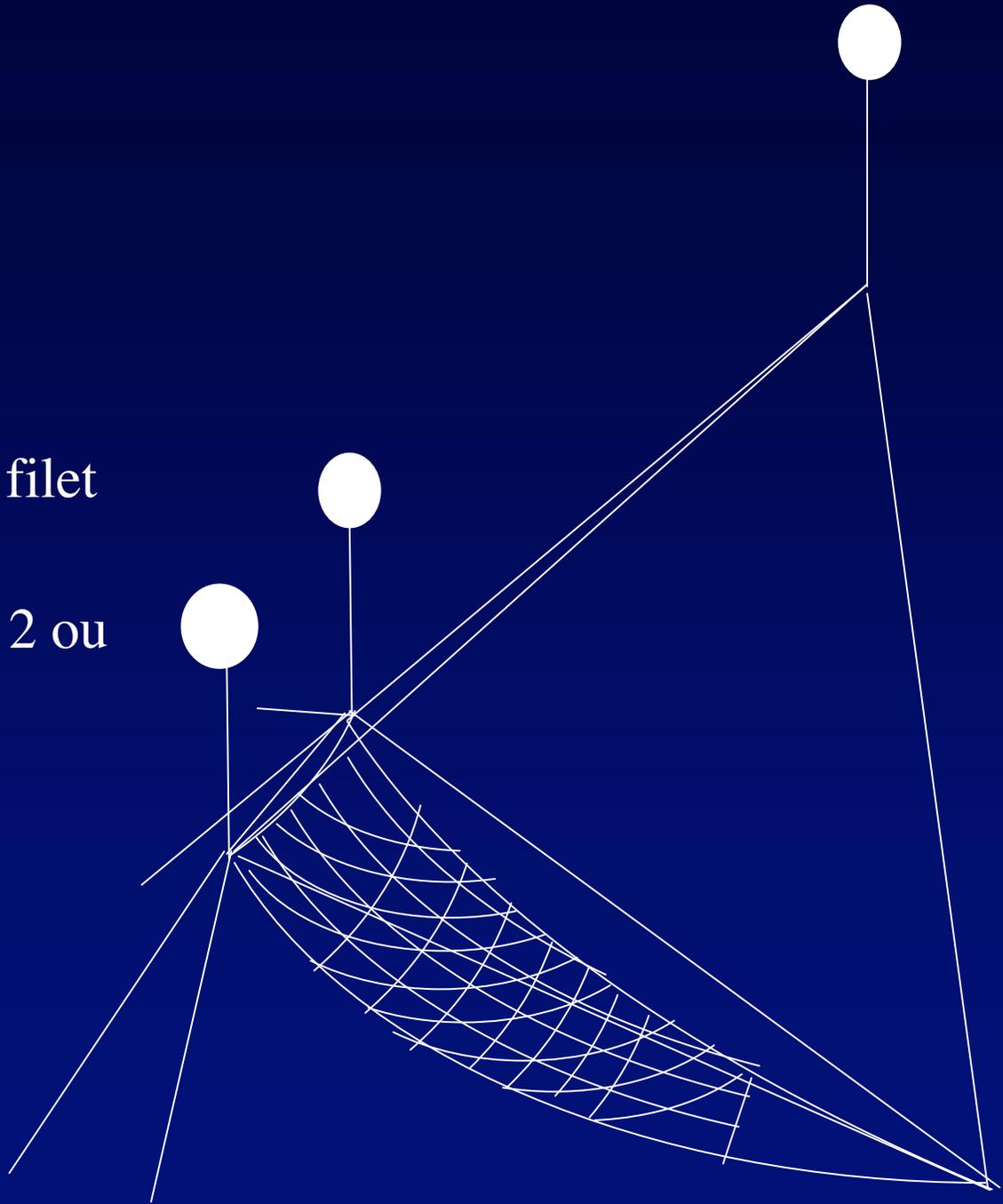
Interféromètre dans l'Antarctique ? Proposition « KEOPS » (Vakili et al. 2004)

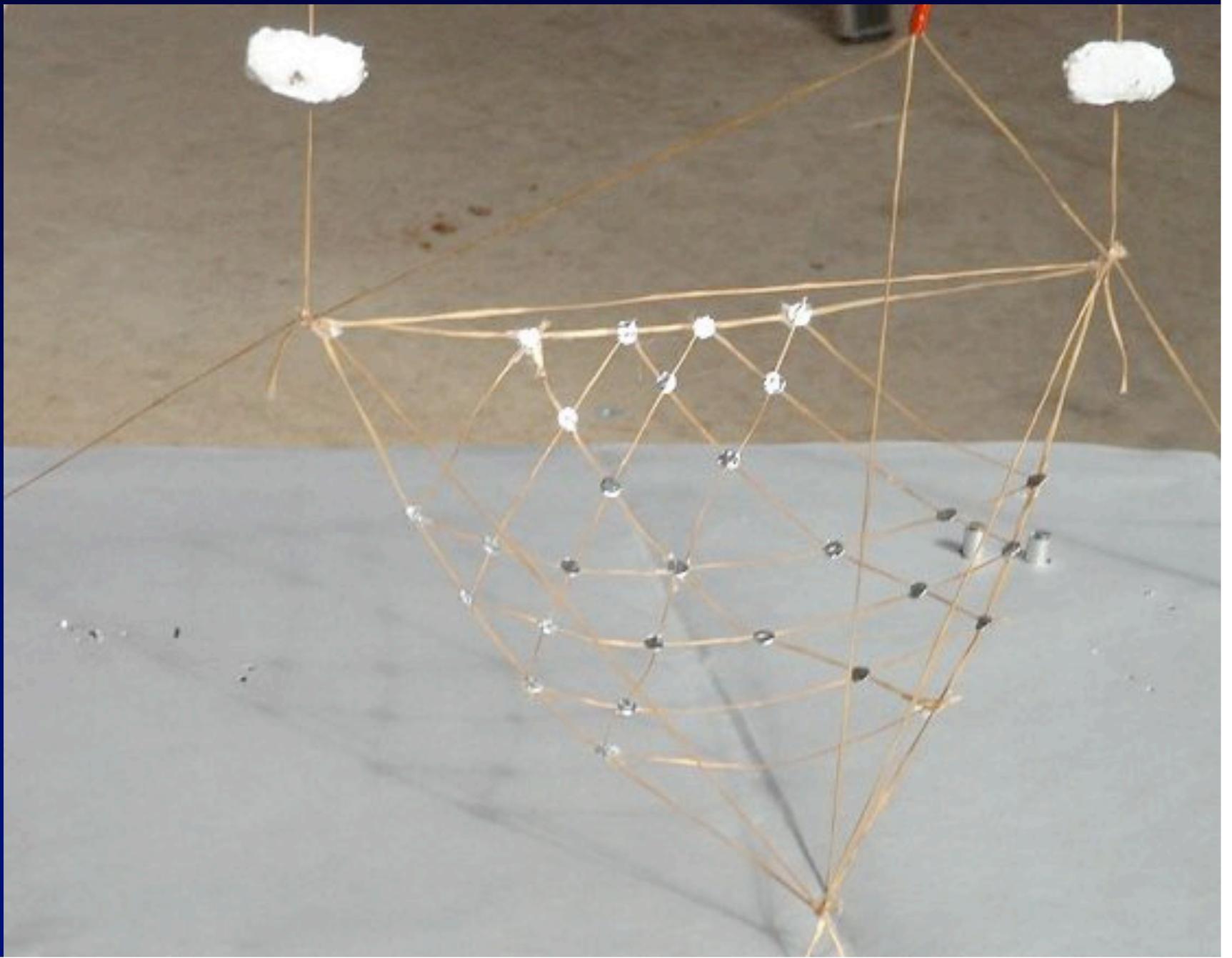


Projet KEOPS (Vakili et al. 2004)

Hypertélescope au Dôme C (Antarctique)

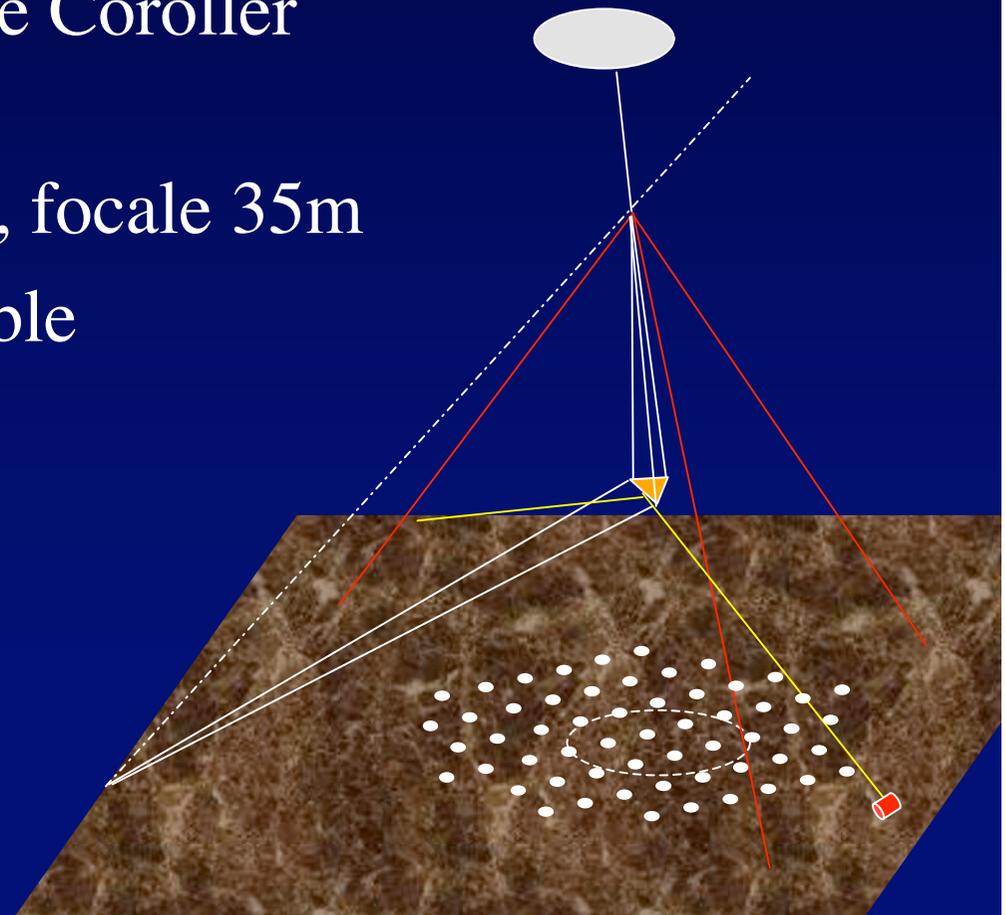
- suspendu à 3 ballons
- Miroirs aux nœuds d'un filet
- Forme parabolique $F/1$
- Globalement pointé par 2 ou 3 treuils
- Dimension 1 km ?





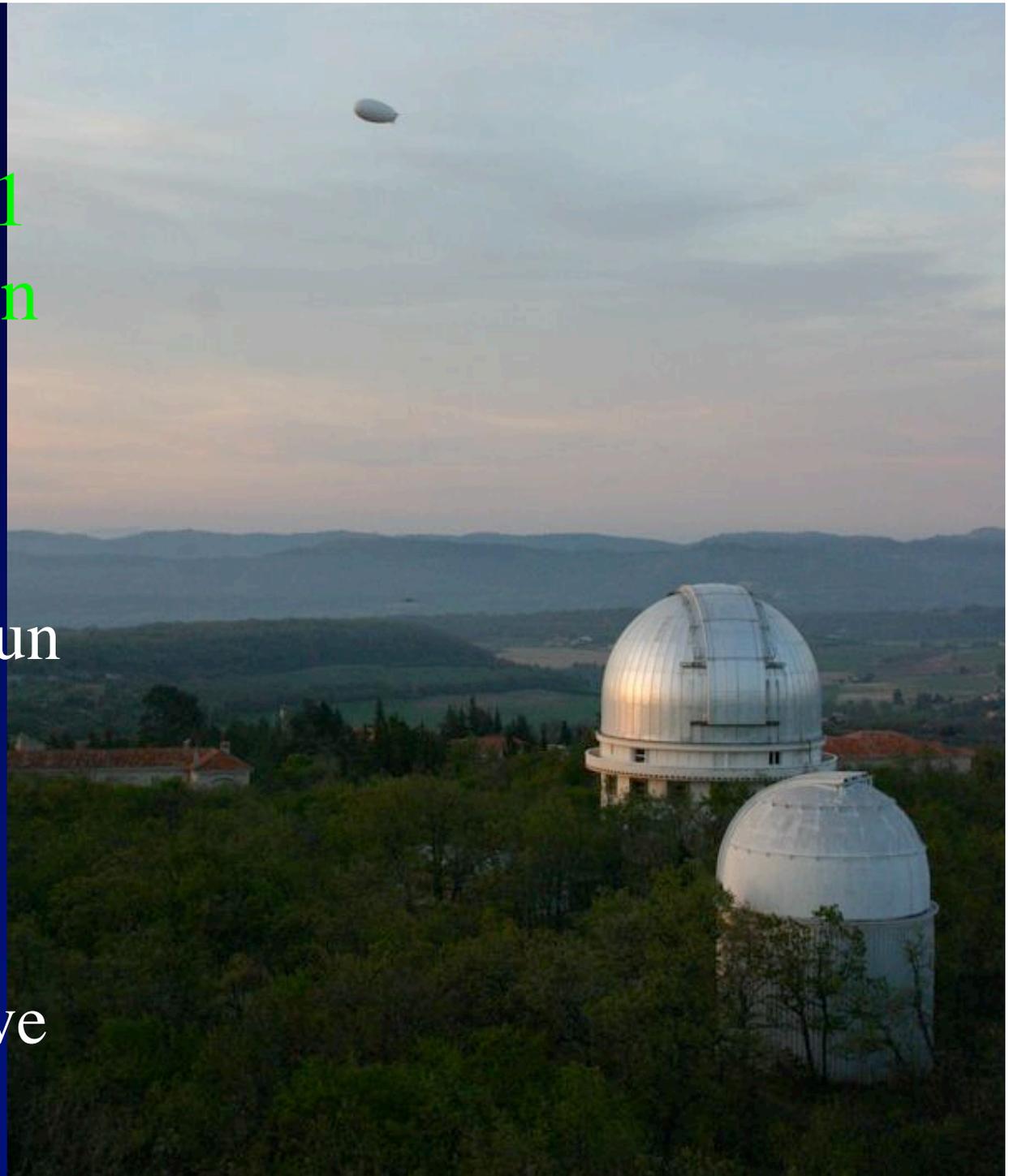
Prototype Carlina 1 à l'Observatoire de Haute Provence

- Étudié et construit en 2 ans par H. Le Coroller et J. Dejonghe (Le Coroller et al., A&A 2004)
- Ouverture diluée de 17,5 m, focale 35m
- Déménageable et extrapolable



Equiper Carlina 1 pour l'observation solaire ?

- Déménager vers un bon site solaire (Canaries)
- ouverture 18 m
- Optique adaptative



Equiper Carlina 1 pour l'observation solaire ?

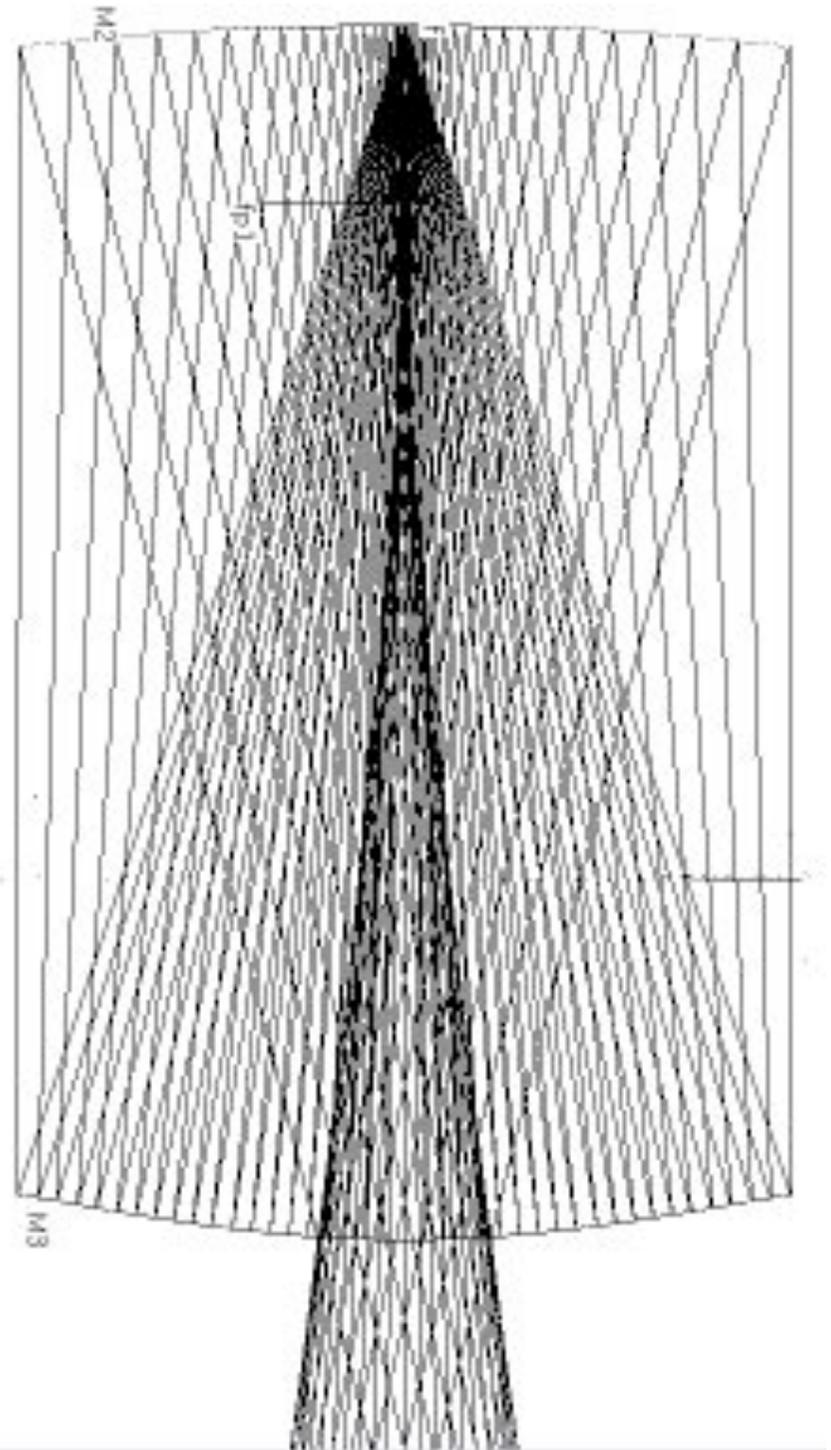


- 10 à 100 ouvertures pour images riches
- « Snap-shots » (instantanés) de structures à courte vie (1 h)

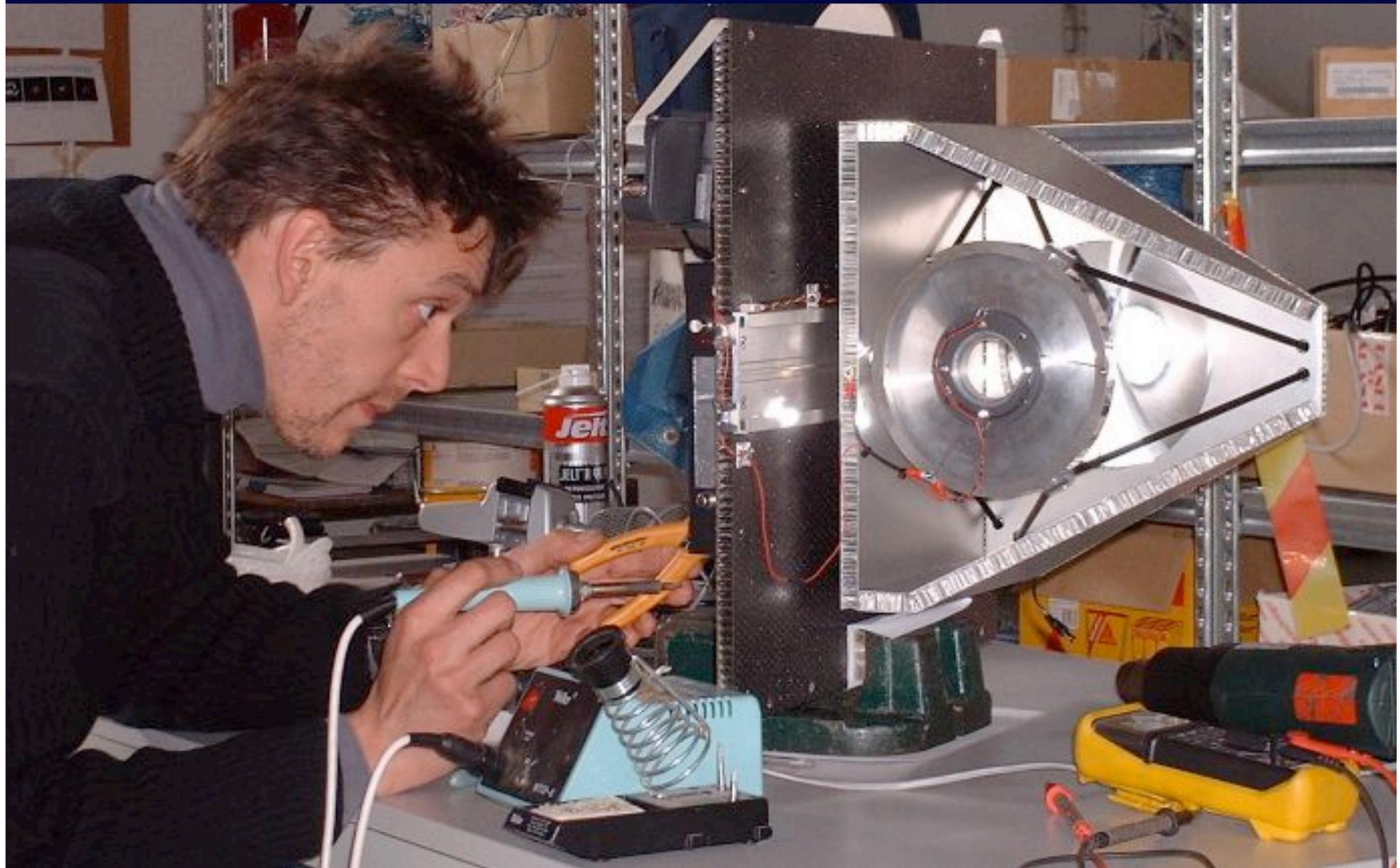
Miroir élémentaire et viseur de Carlina 1



Corriger l'aberration sphérique

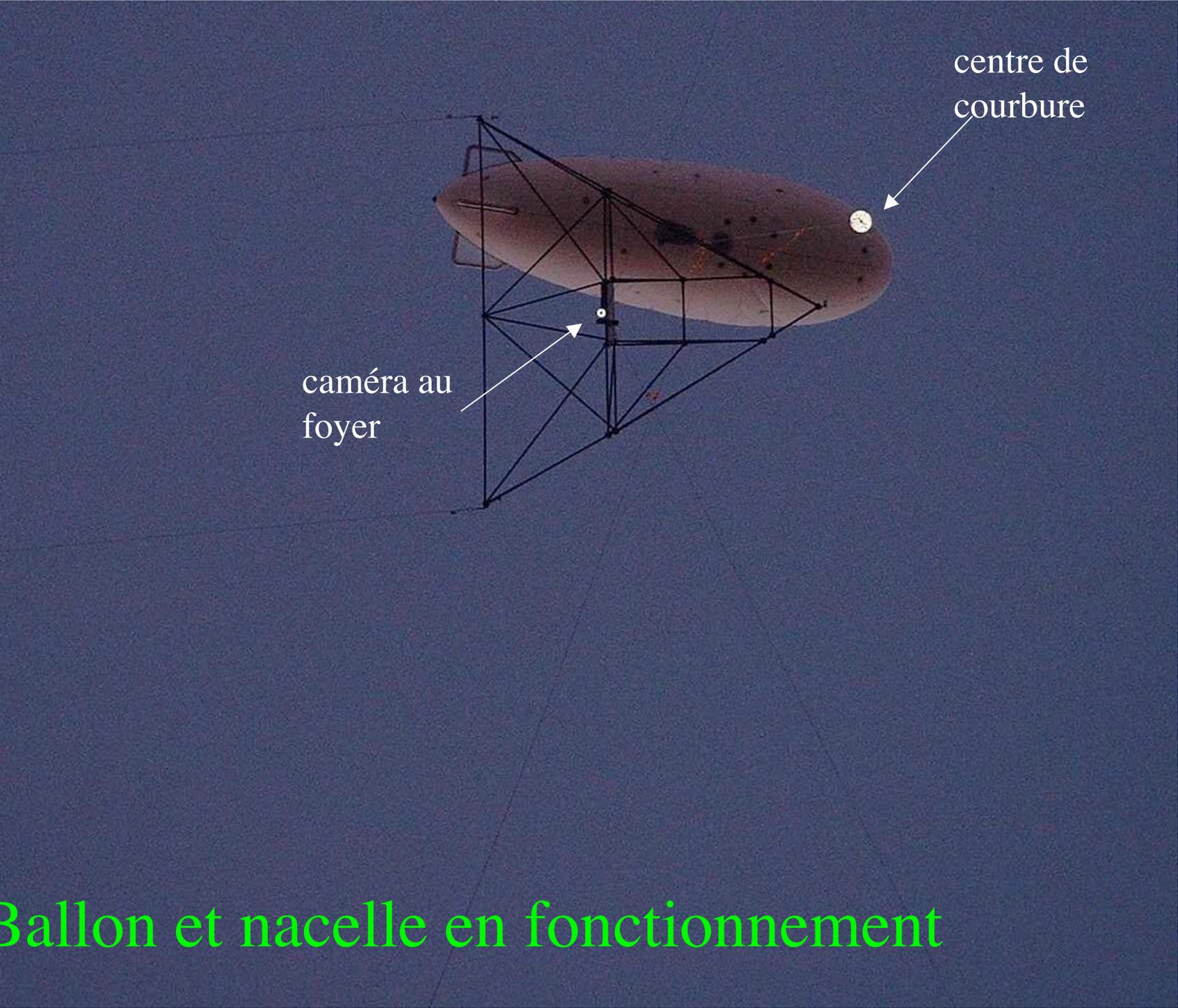


Ajout d'un correcteur de Mertz



Nacelle focale avec correcteur de Mertz





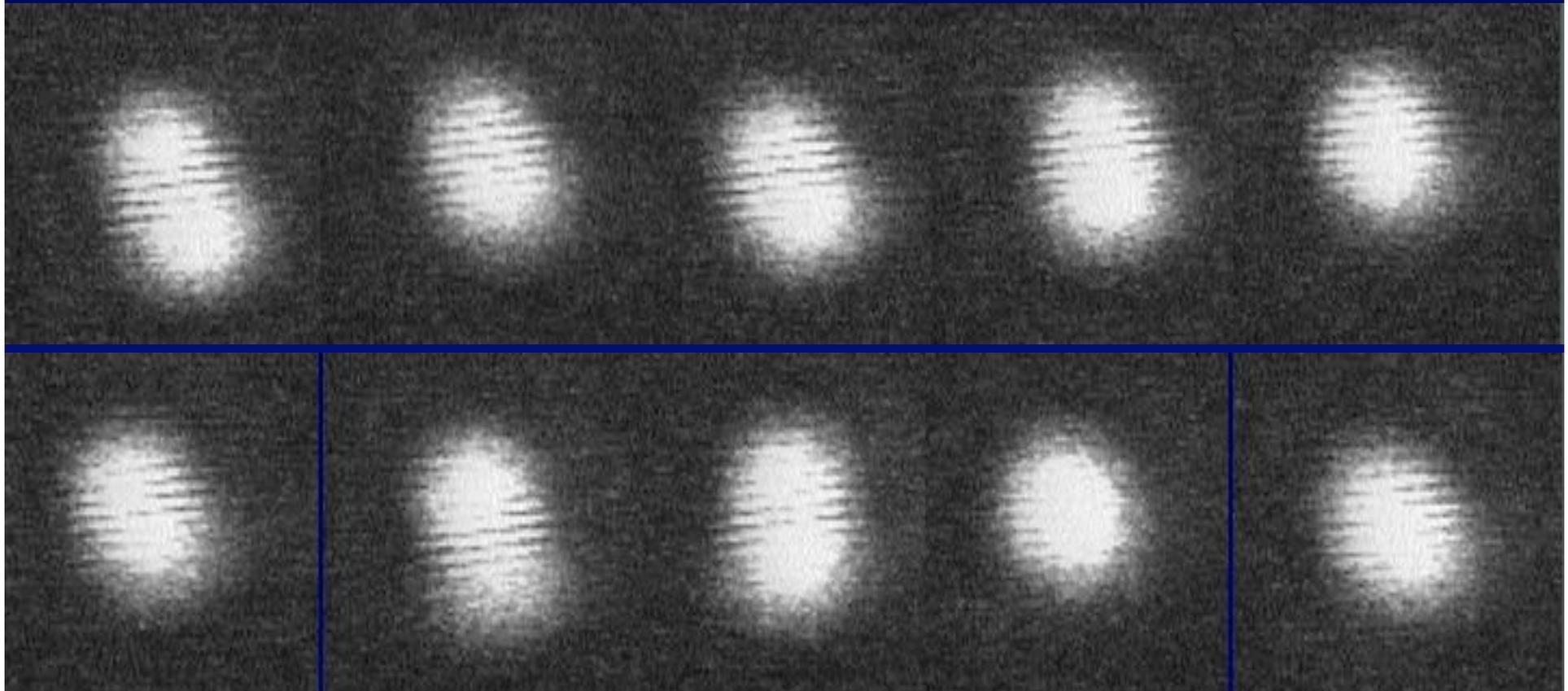
caméra au
foyer

centre de
courbure

Ballon et nacelle en fonctionnement

Franges du prototype Carlina 1

- Véga, 2 ouvertures de 5 cm, espacées de 40cm
- Séquence toutes les 20 millisecondes



La suite de Carlina 1: Carlina 2 à Calern



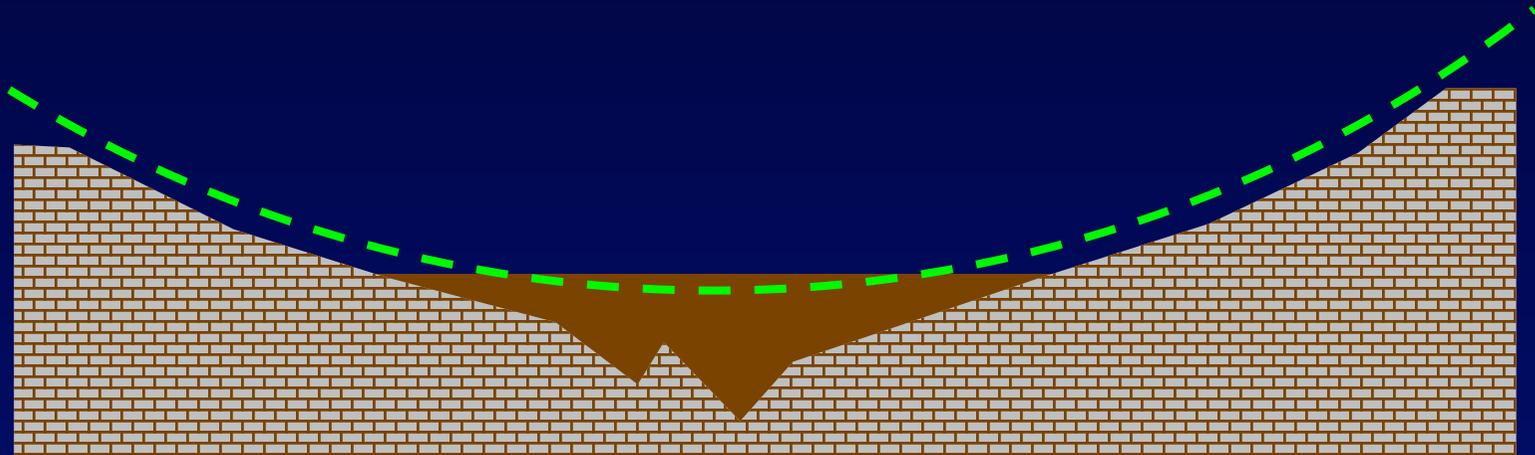
Construction d'un Carlina 2 à l'observatoire de Calern

(Alpes Maritimes)

- Avantages:
 - communauté d'interférométristes
 - Accès facile
 - Turbulence assez bonne pour l'Europe
 - Calcaire stable (données clinométriques de Laclare et al.)
- Inconvénients:
 - Dolines trop petites, pas assez pentues

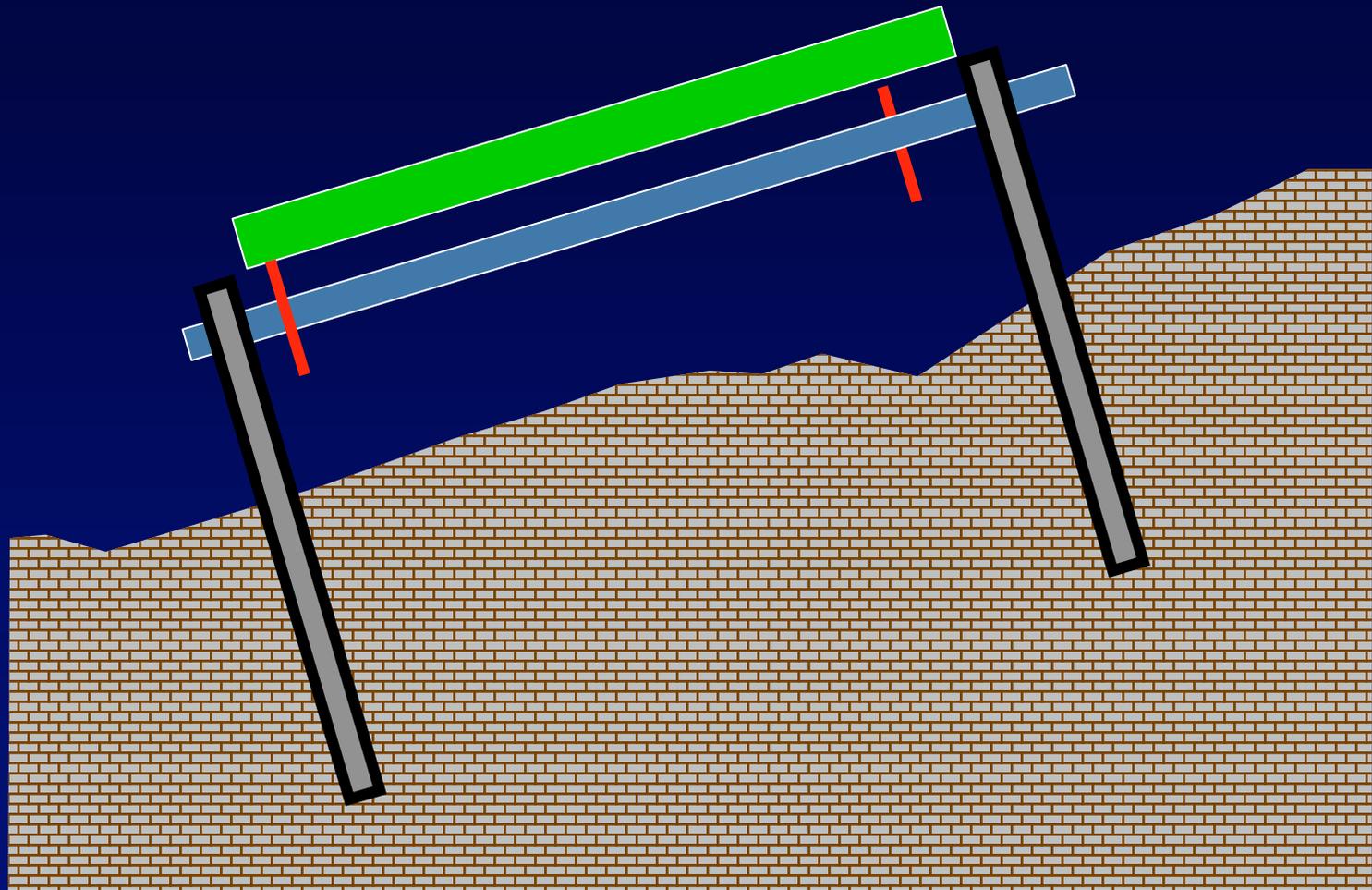


Implantation dans une doline



- Supports compacts
- Fond argileux inutilisable ?
- Distance zénithale limitée par la pente au bord

Ancrage dans le calcaire

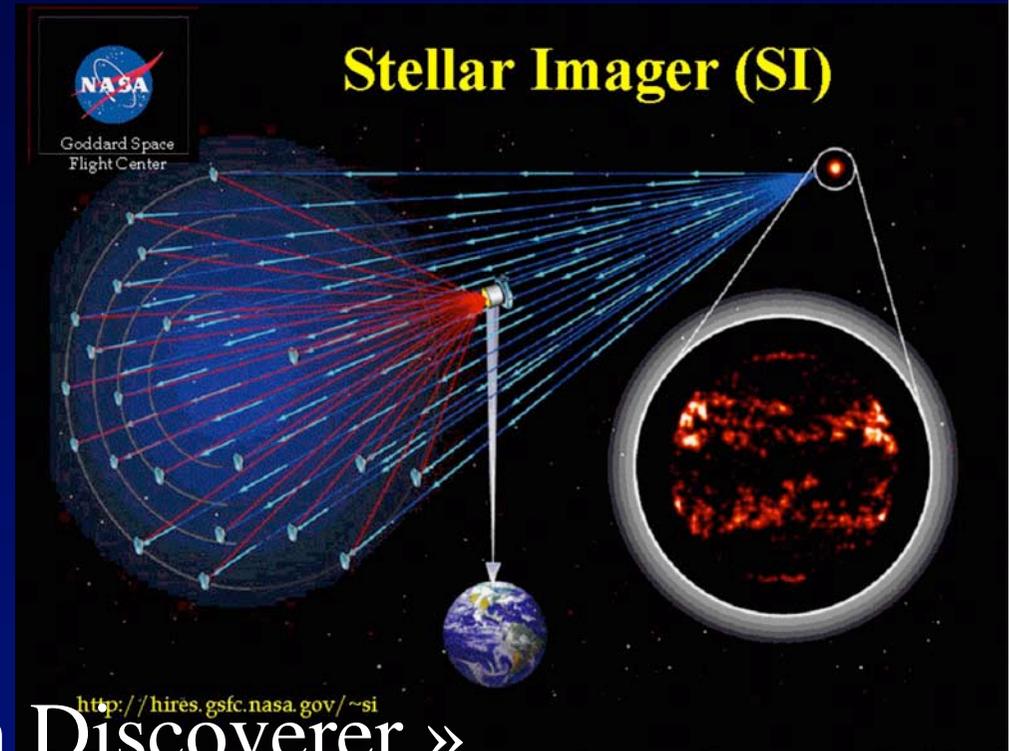


- 3 tubes en carbone 30 mm, pour miroirs de 250 mm
- Collage epoxy, dans forage par tube diamanté

The *Stellar Imager (SI)*: An Ultra-High Angular Resolution UV/Optical Observatory

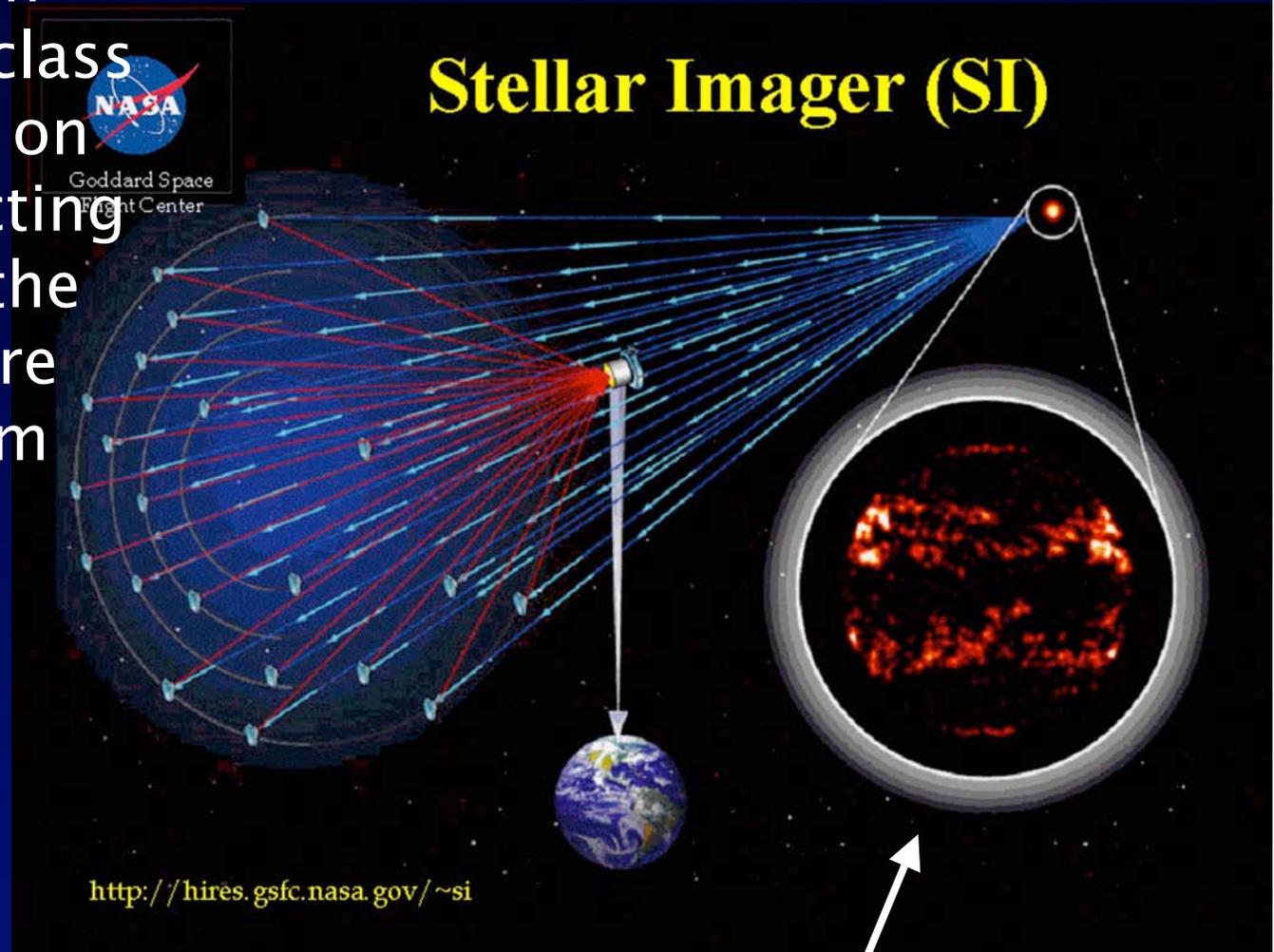
(Carpenter et al. 2004)

<http://hires.gsfc.nasa.gov/~si/>



- Analogue à « Exo-Earth Discoverer »
- primaire sphérique, formule optique non précisée
- Densification de pupille « envisagée »

Fizeau design with
>20 one-meter-class
spherical mirrors on
"mirrorsats" directing
light to a hub at the
prime focus, where
image-plane beam
combination is
performed.

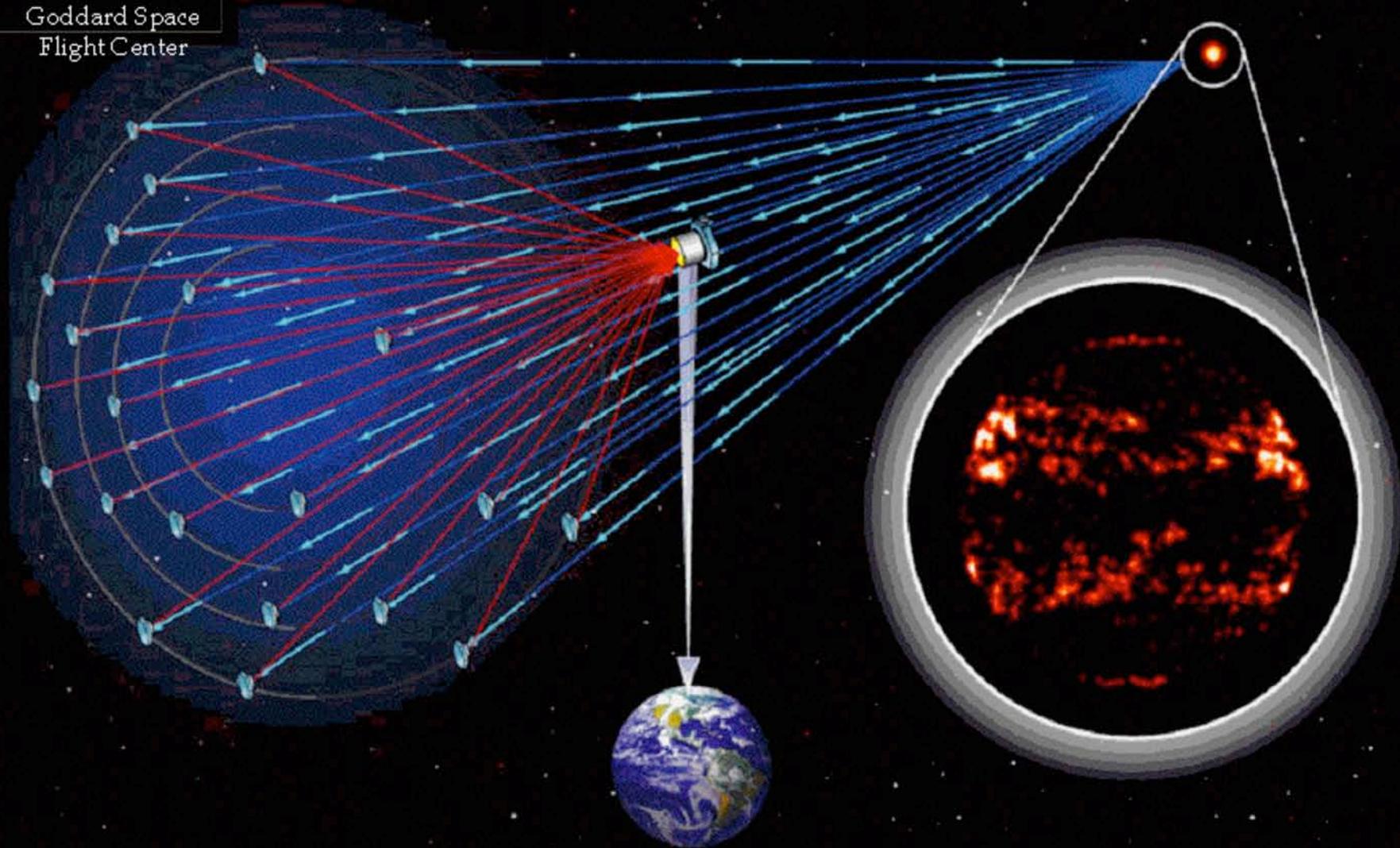


simulated
interferometric image in
the light of CIV (1550 A)
of a sun-like star at 4pc



Goddard Space
Flight Center

Stellar Imager (SI)



<http://hires.gsfc.nasa.gov/~si>

Carpenter et al. 2004

Simulations d'imagerie stellaire avec SI

rotations(step size): 0 (0)

24 (15deg)

elements

6

in

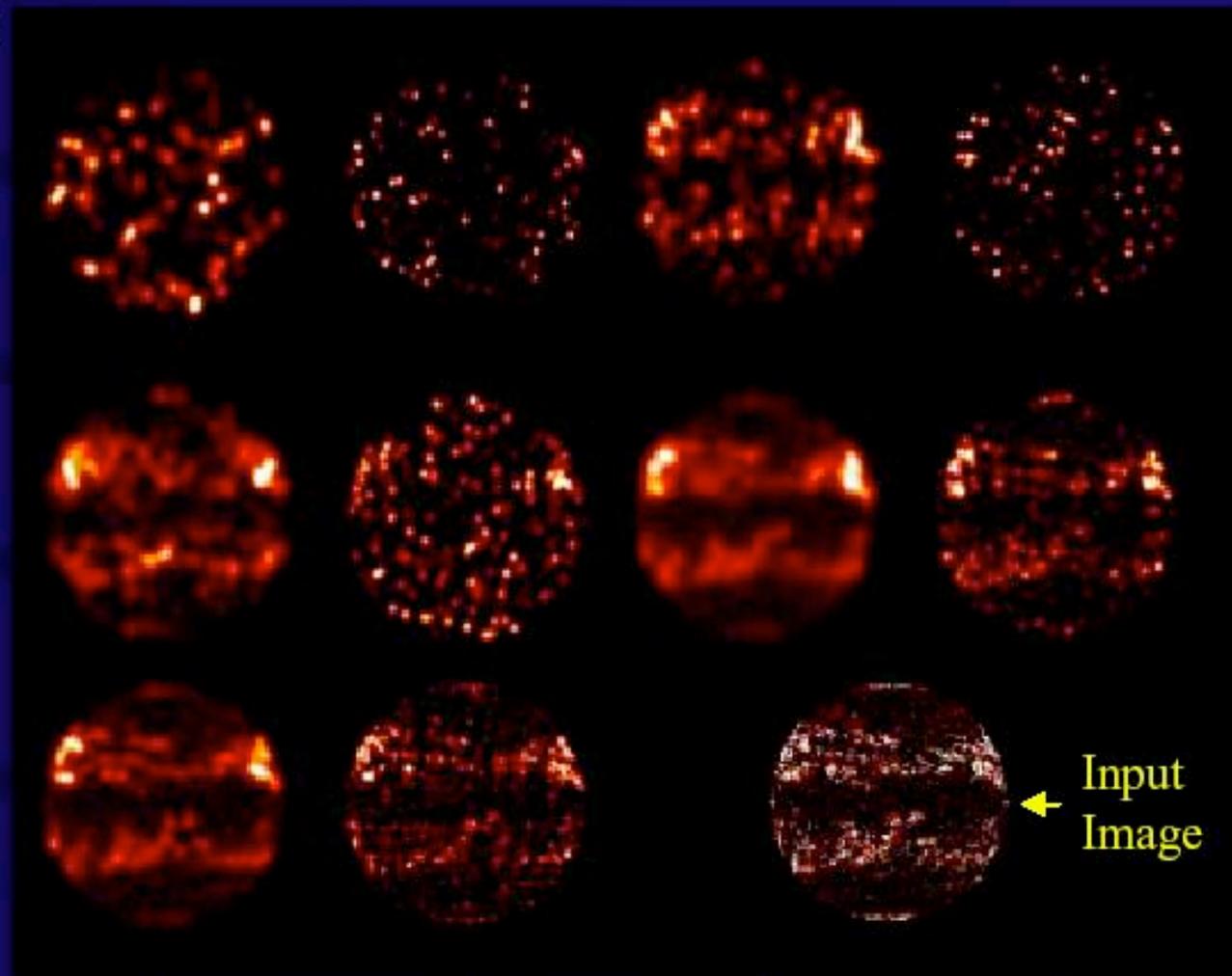
12

d

ed

30

ne



Input Image

Baselines: 250 m

500 m

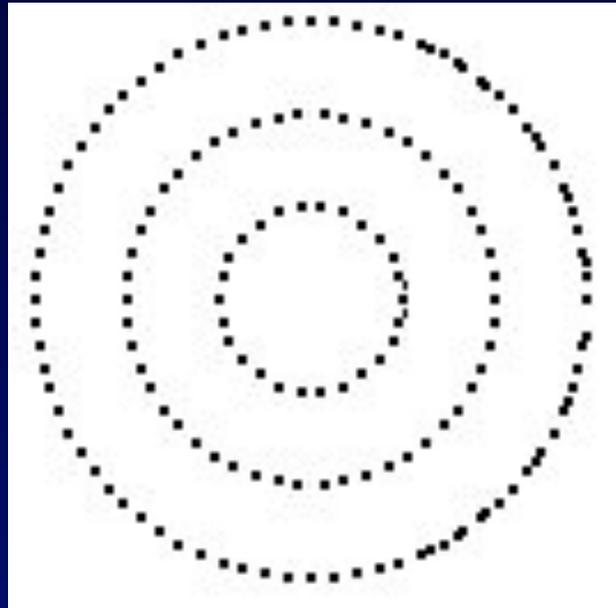
250 m

500 m

“Snapshots” (no rotations)

(24 array rotations)

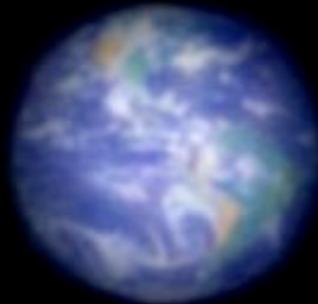
Exemple d'ouverture riche



Anneaux de 26,76
& 74 ouvertures

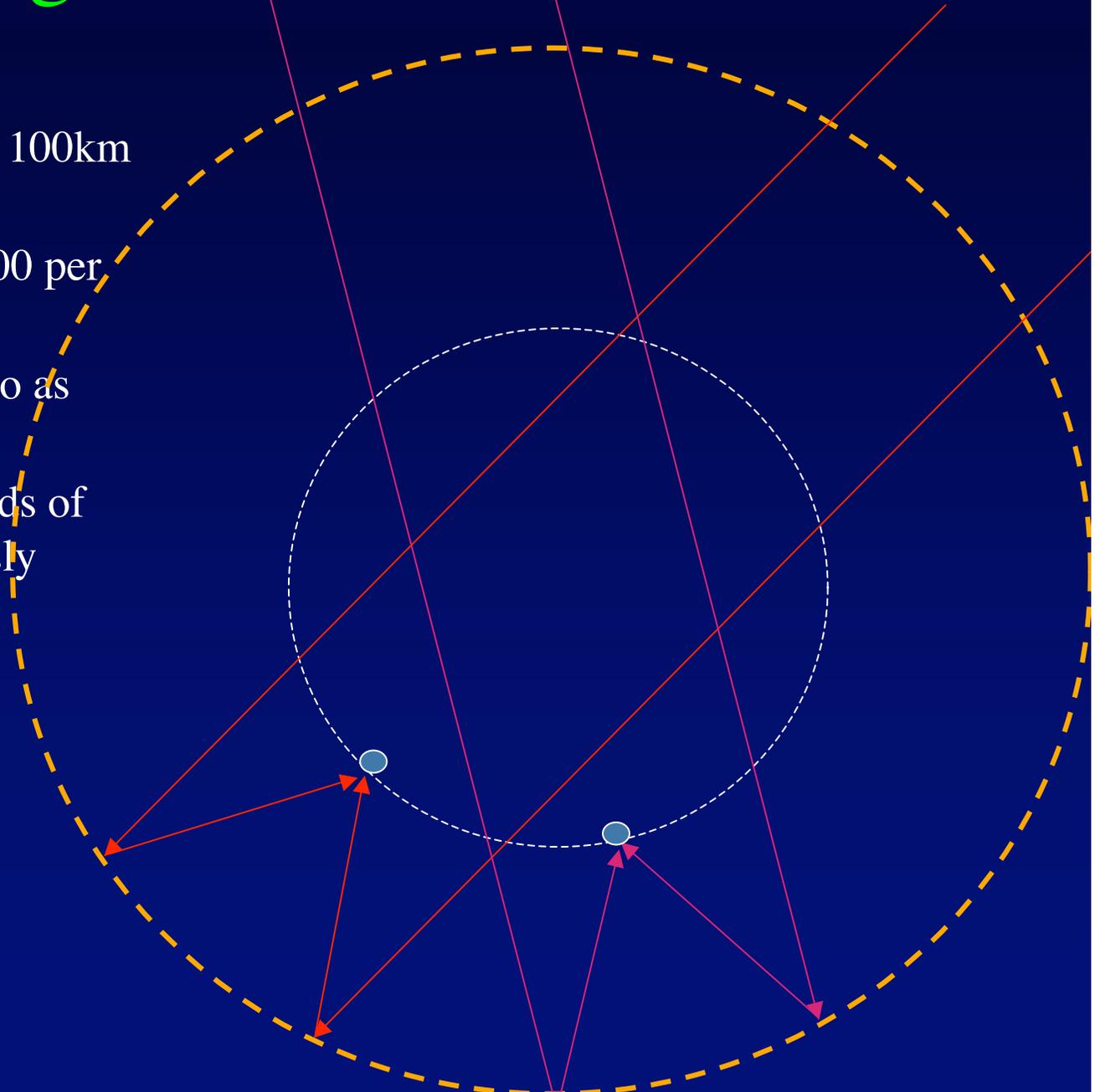
Fonction d'étalement
Contraste atténué: gamma 0,5

- Pas de « crowding »
avec objet de 20x20
resel

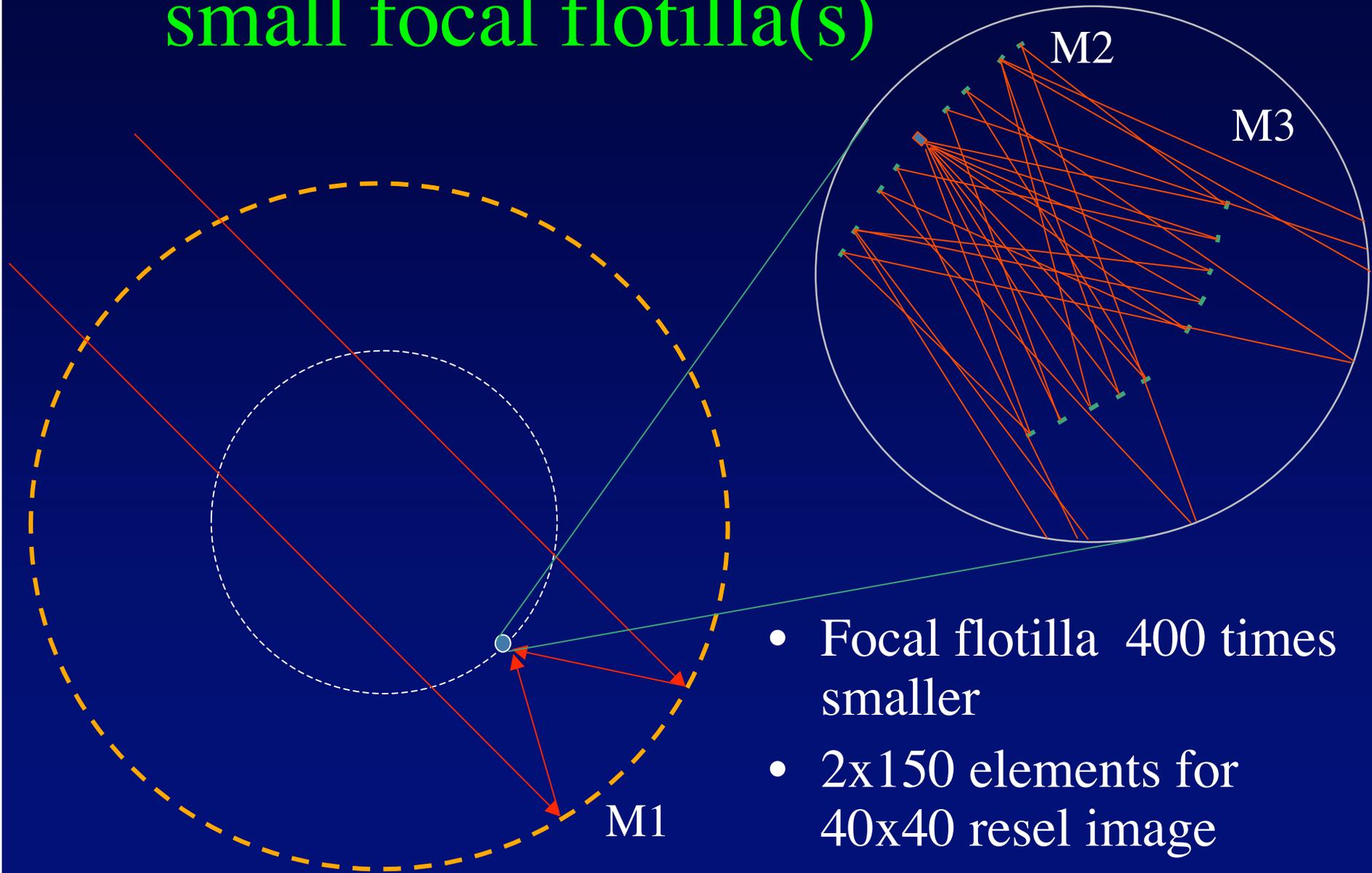


Exo-Earth Imager in bubble form

- 400 km bubble array for 100km effective apertures
- 10,000 mirrors of 3m, 100 per effective aperture
- 1-km diluted flotillas also as focal correctors
- Static observing, hundreds of exo-Earths simultaneously



Large primary flotilla and small focal flotilla(s)



- Focal flotilla 400 times smaller
- 2x150 elements for 40x40 resel image

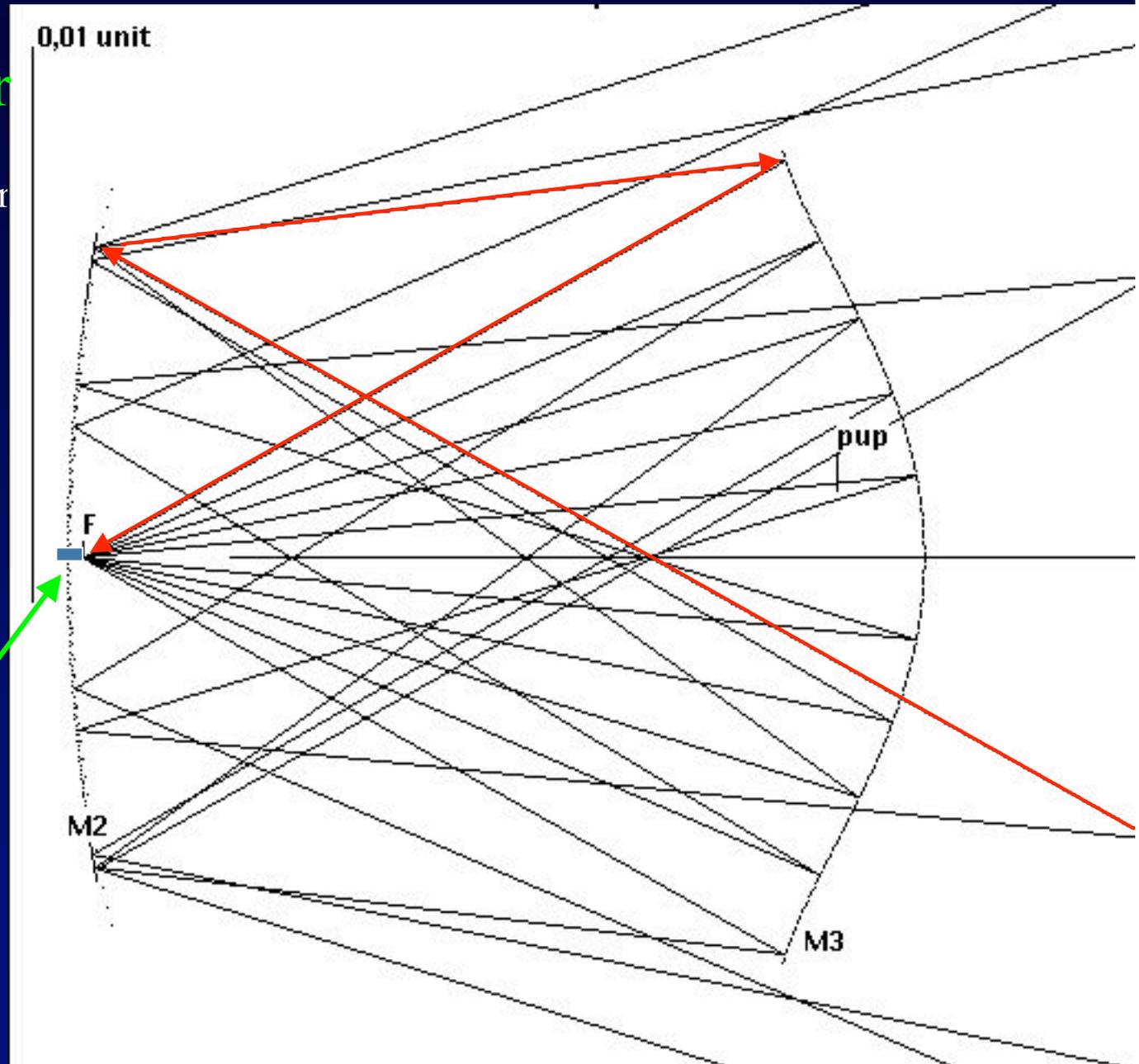
Diluted clam shell corrector, 1 km diameter

for a 100 km

Exo-Earth Imager

- Mirror elements smaller than 1m
- Correction of spherical aberration and coma

Pupil densifier
and coronagraph

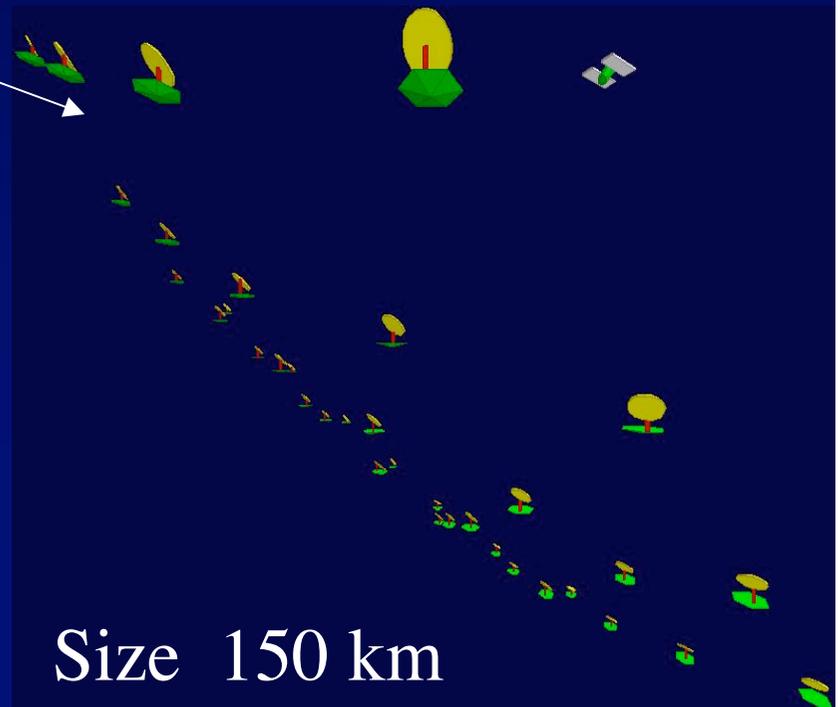


Hypertelescopes and exo-Earth coronagraphy

Long term: Exo-Earth Imager



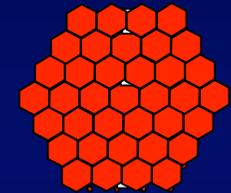
Earth at
3 parsecs



Size 150 km

For coronagraphy:
periodic hypertelescopes
fully densified

37 element aperture
proposed for « Exo-Earth
Discoverer » version of
TPF/DARWIN



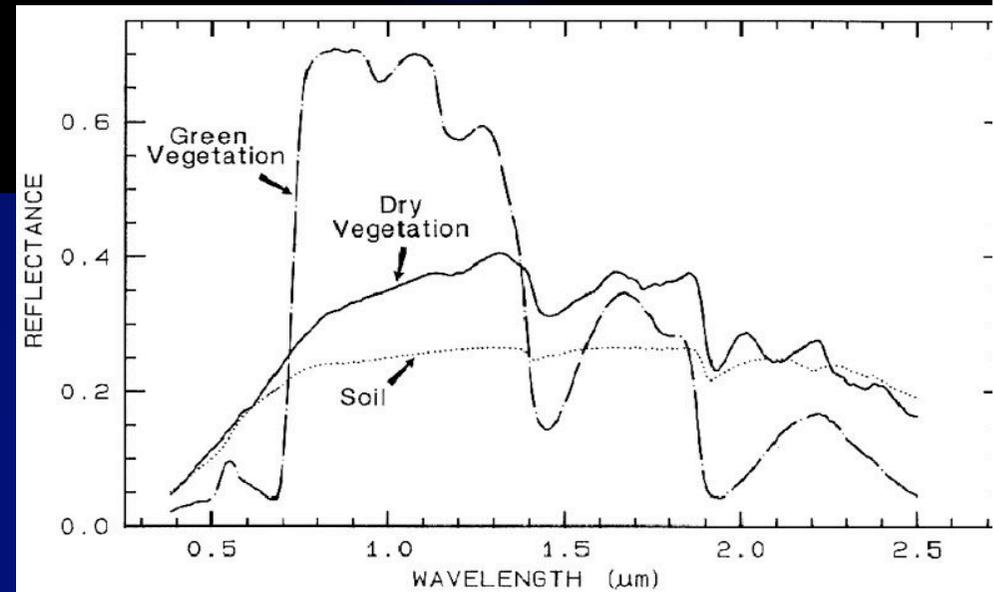
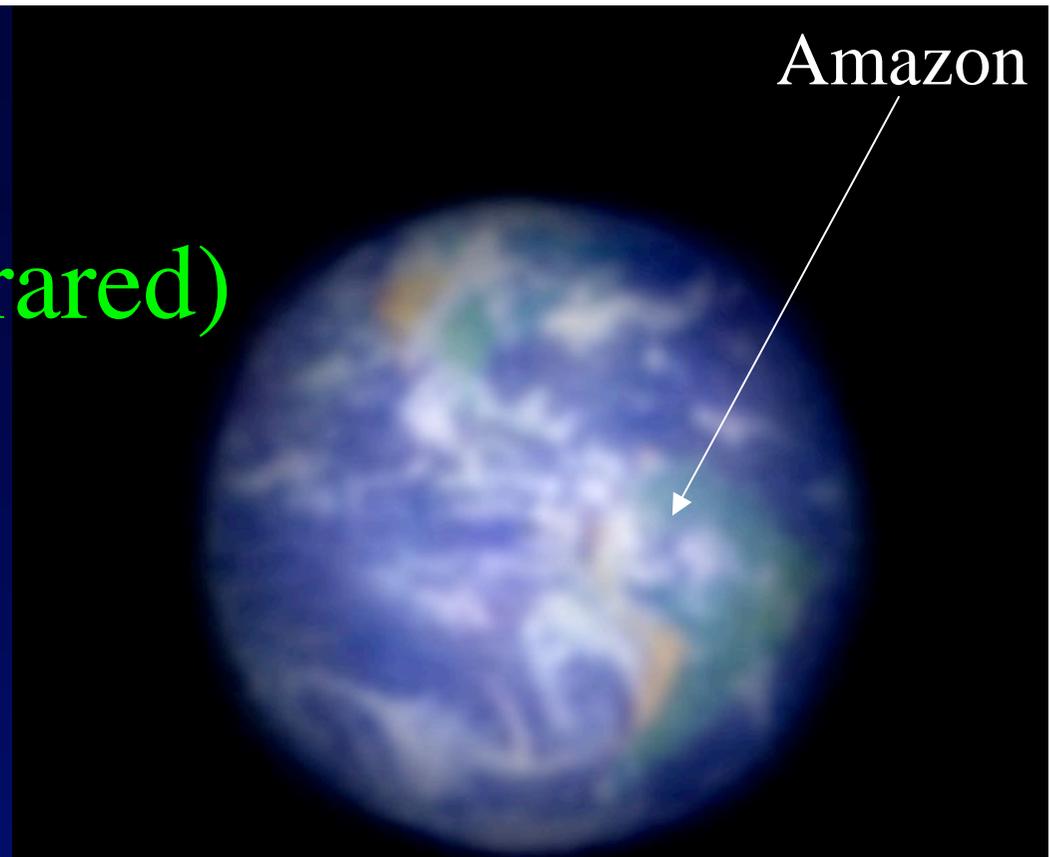
- Filled exit pupil , usable for coronagraphy like a conventional aperture
- Strong redundancy, improves dynamic range of image and coronagraphy

Atmospheric spectral features indicative of life

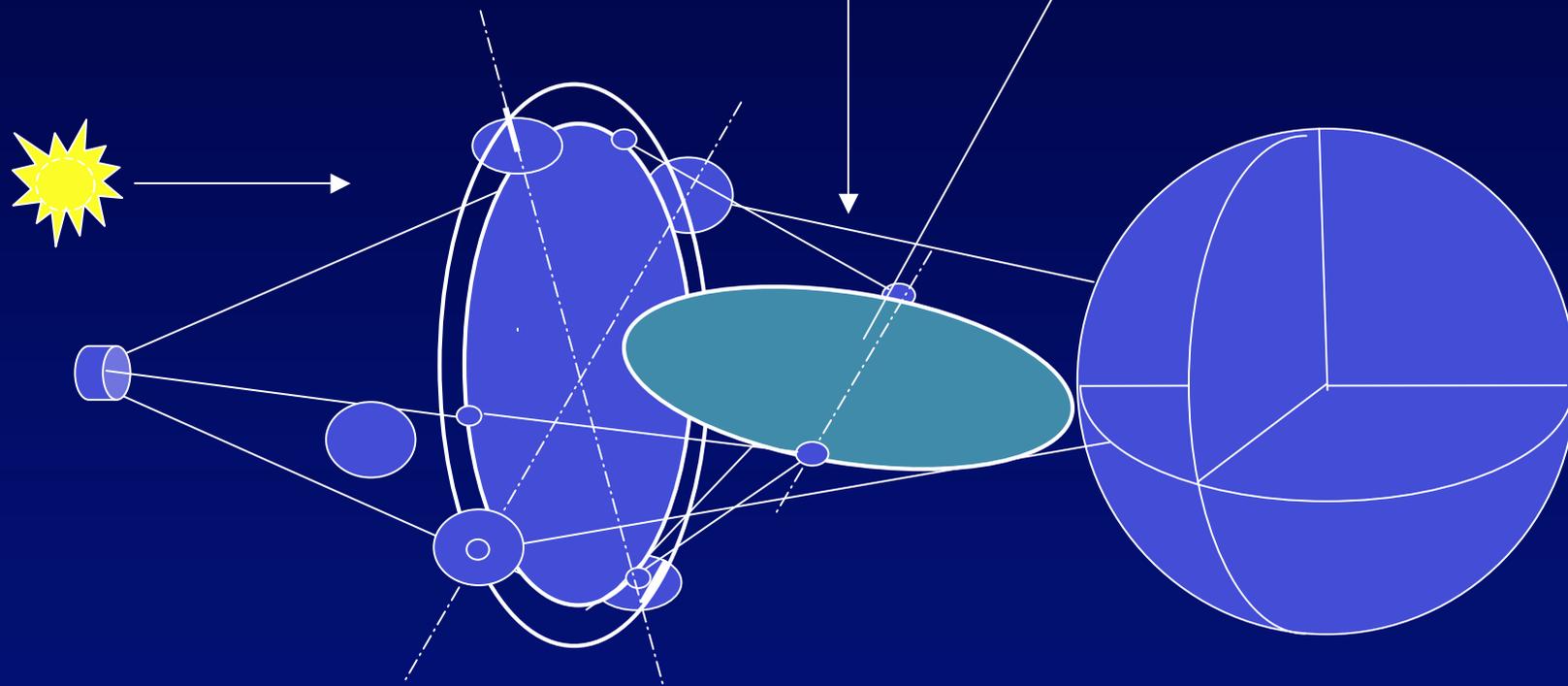
- O₂, O₃, CO₂, H₂O
- How conclusive ? O₂ can be produced from H₂O by photo-dissociation, under mineral catalysis

Detecting life from forests (actually infrared)

- Can be any color
- Seasonal variations discriminate against mineral colors: phase advance of annual photosynthetic cycle with respect to temperature cycle
- Very few minerals have sharp « edge »: e.g. Cinnabar (very low abundance)



Éléments de précurseur spatial: Luciola



- Piloté par voile solaire

Conclusions

- Les méthodes coronographiques s'appliquent aux hypertélescopes
- éventuellement dans chaque sous-pupille avant combinaison
- Pourraient produire des images résolues d'exo-Terres