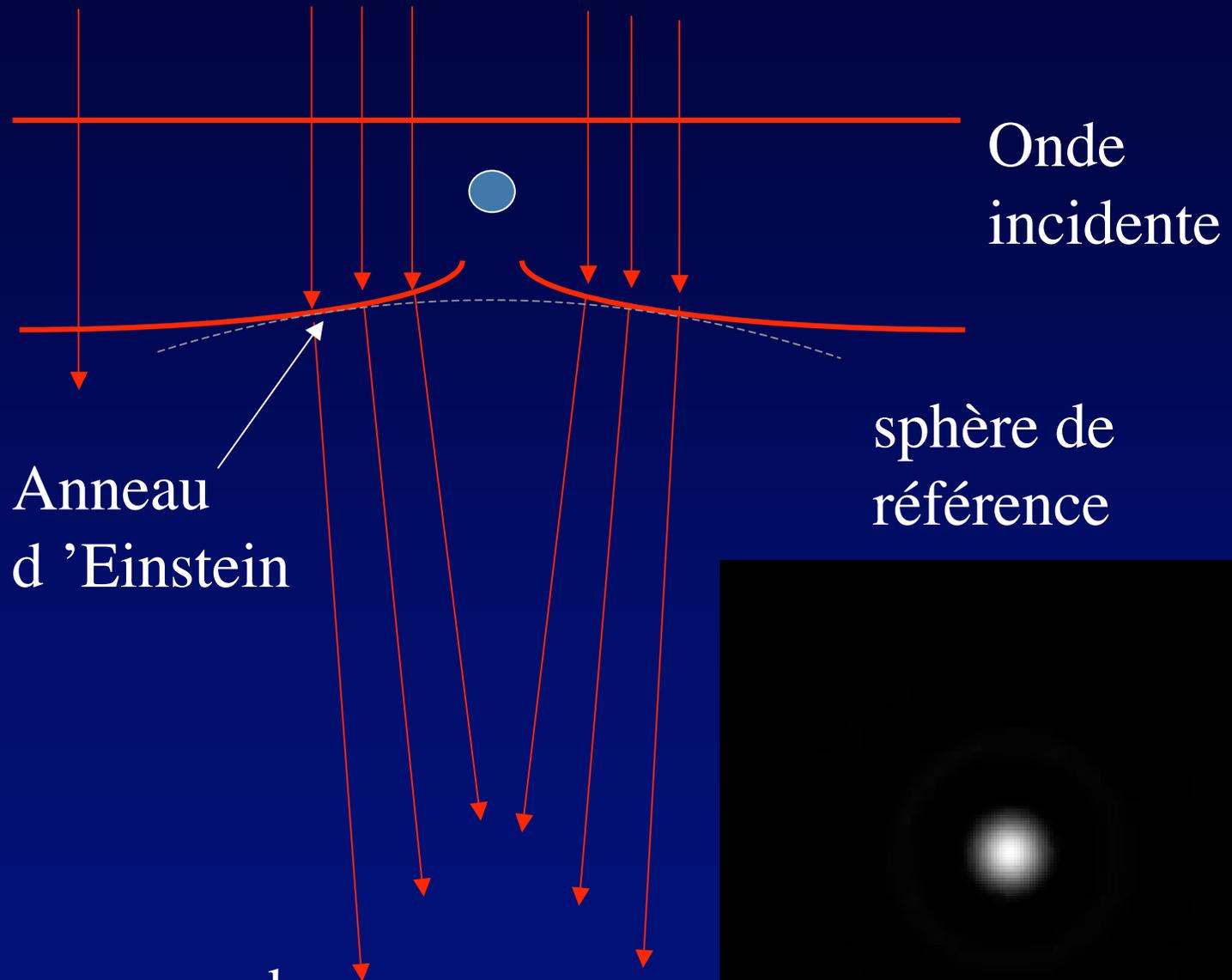


- Lentille gravitationnelle: Anneau d'Einstein et diffraction.

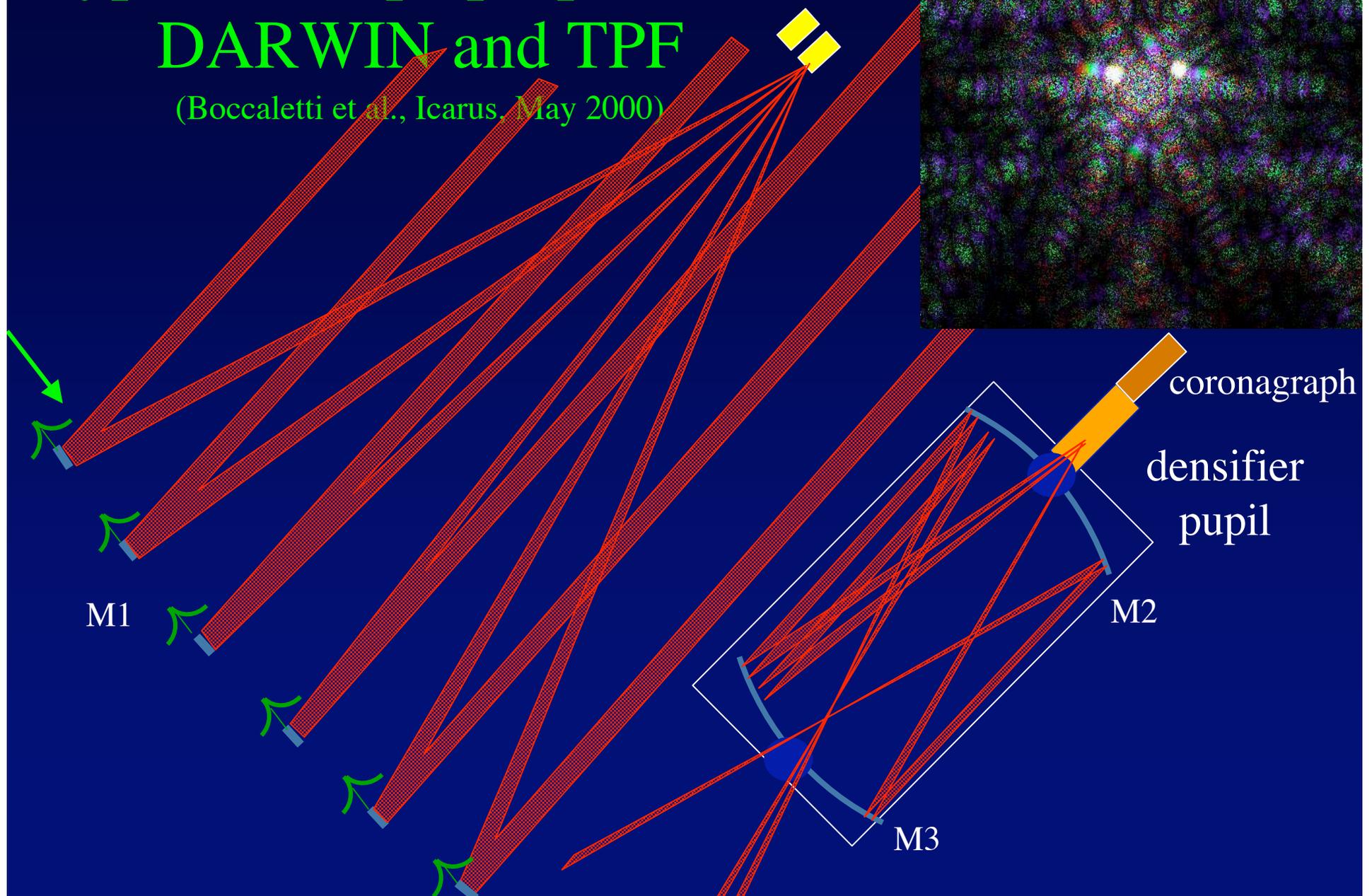
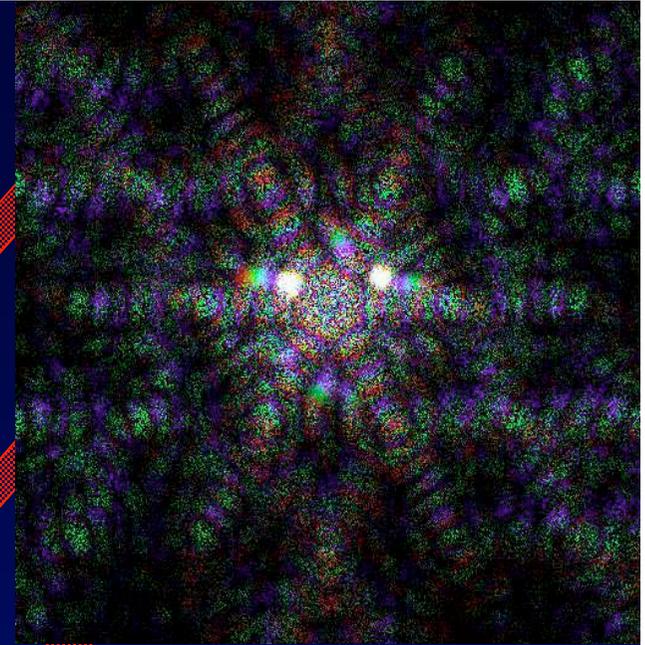


Analogie avec un grand interféromètre à ouverture annulaire



Hypertelescope proposed for DARWIN and TPF

(Boccaletti et al., Icarus, May 2000)

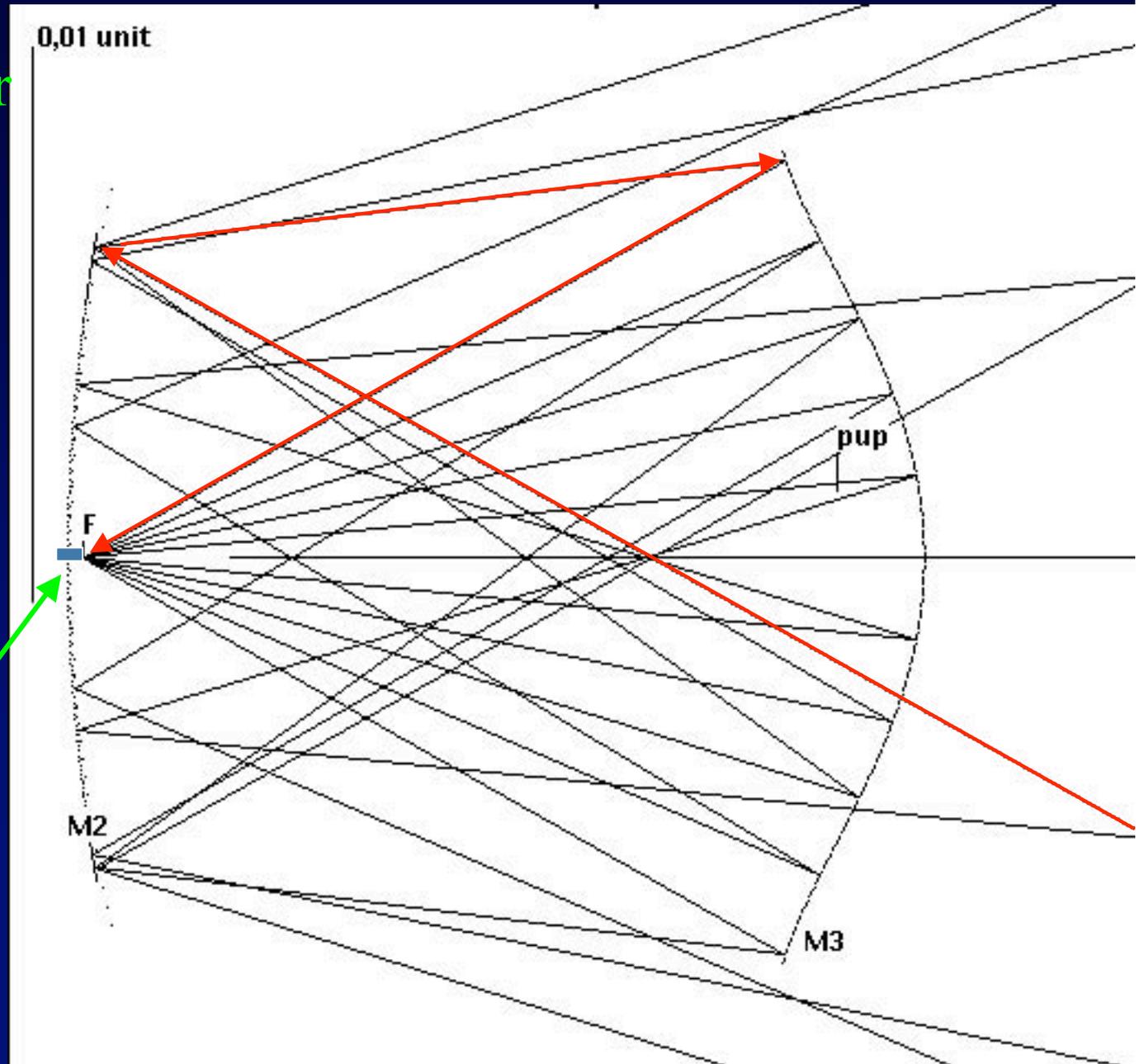


Diluted clam shell corrector, 1 km diameter

for a 100 km
Exo-Earth Imager

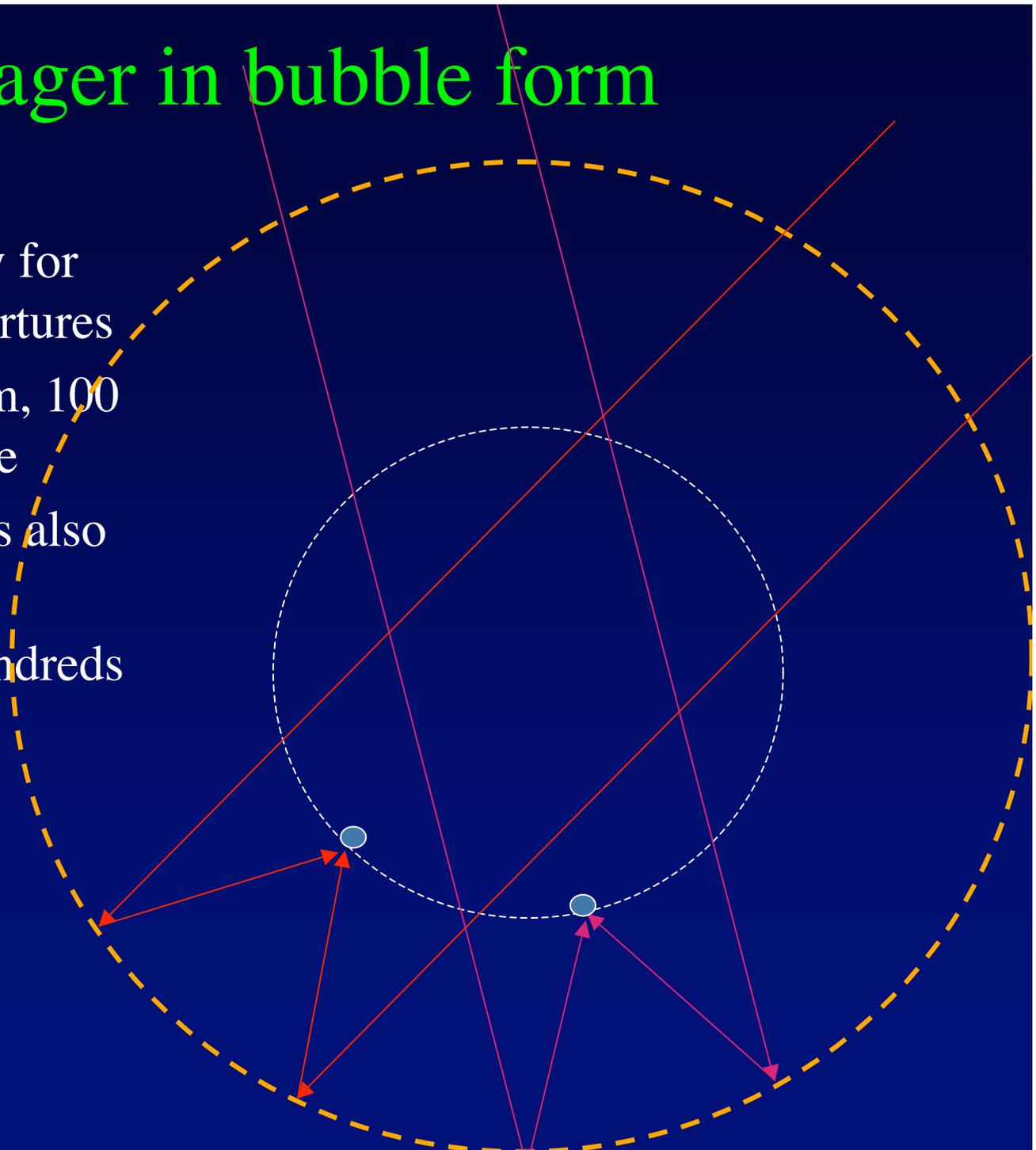
- Mirror elements smaller than 1m
- Correction of spherical aberration and coma

Pupil densifier
and coronagraph



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



Model of ultra-low mass free-flyer controlled by solar radiation pressure

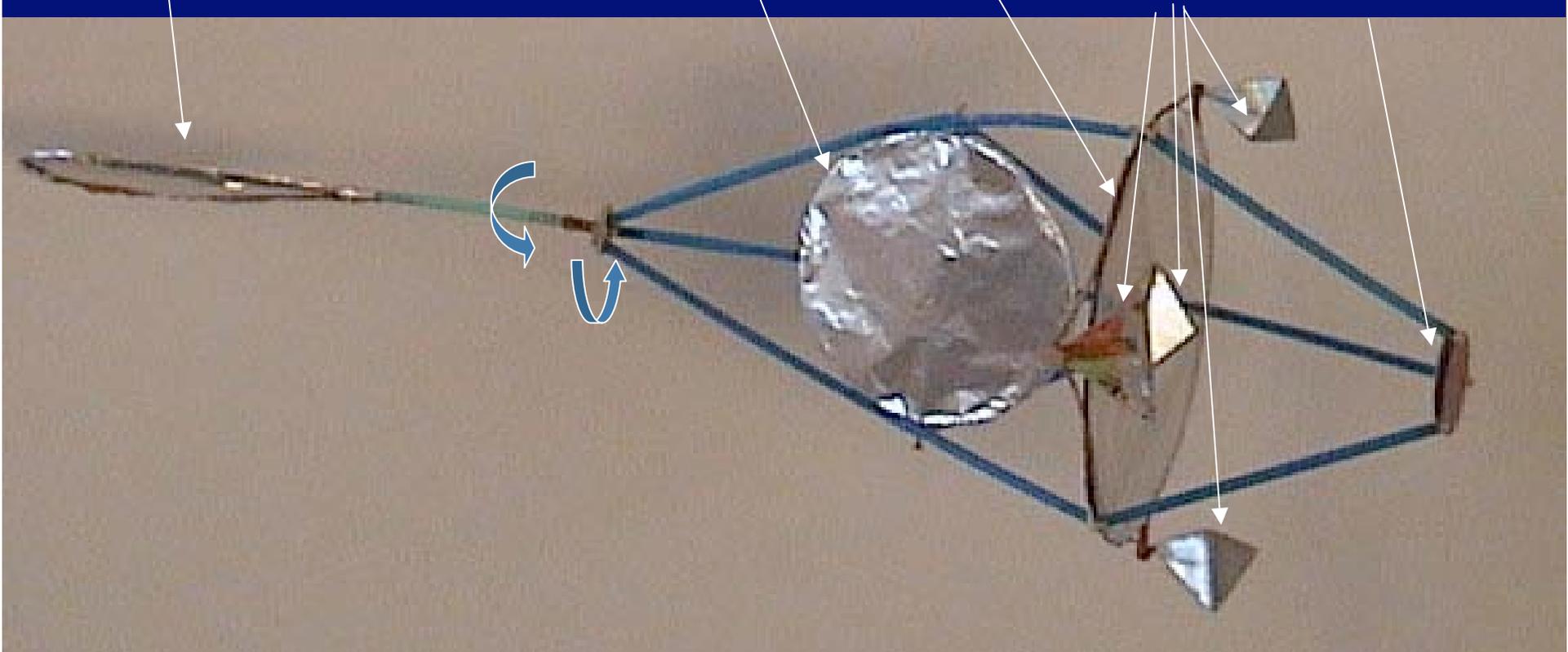
solar tail
mirror,
tiltable

Stellar
mirror
element

Solar M1
mirror

Solar
pyramid
mirrors

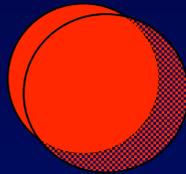
Solar M2
mirror,
tiltable



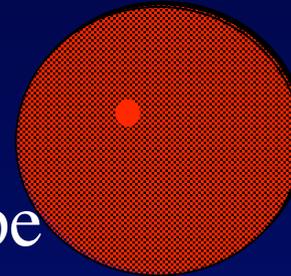
Infra-red detection: the sensitivity gain with hypertelescope coronagraphy

(Boccaletti et al.,
Riaud et al., 2003)

Pupil
nulling



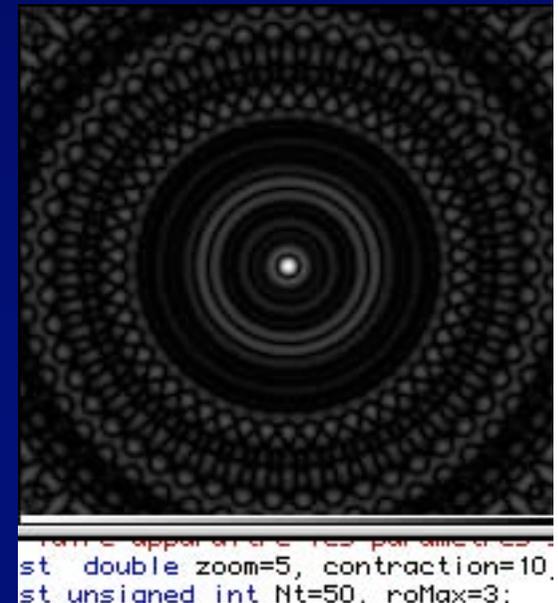
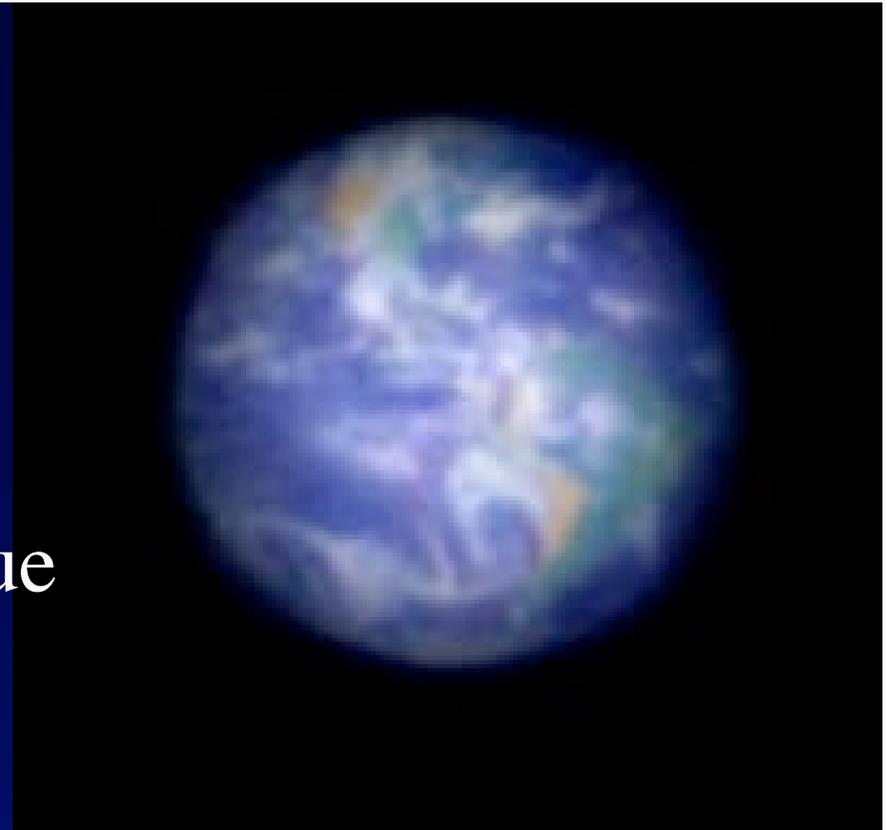
Hypertelescope
coronagraphic
image



- Pupil « nulling » mixes emission of λ/d sky patch with planet on the single detector pixel
- Image has sky and planet on distinct pixels in the hypertelescope case

Voir la vie sur des images résolues

- simulation : Terre à 3 pc, vue avec 150 éléments de 4m, diamètre 150 km
- Pose 30 mn
- La verdure réfléchit l'infrarouge proche
- Coronographe pour chaque ouverture**multi-étages** ?

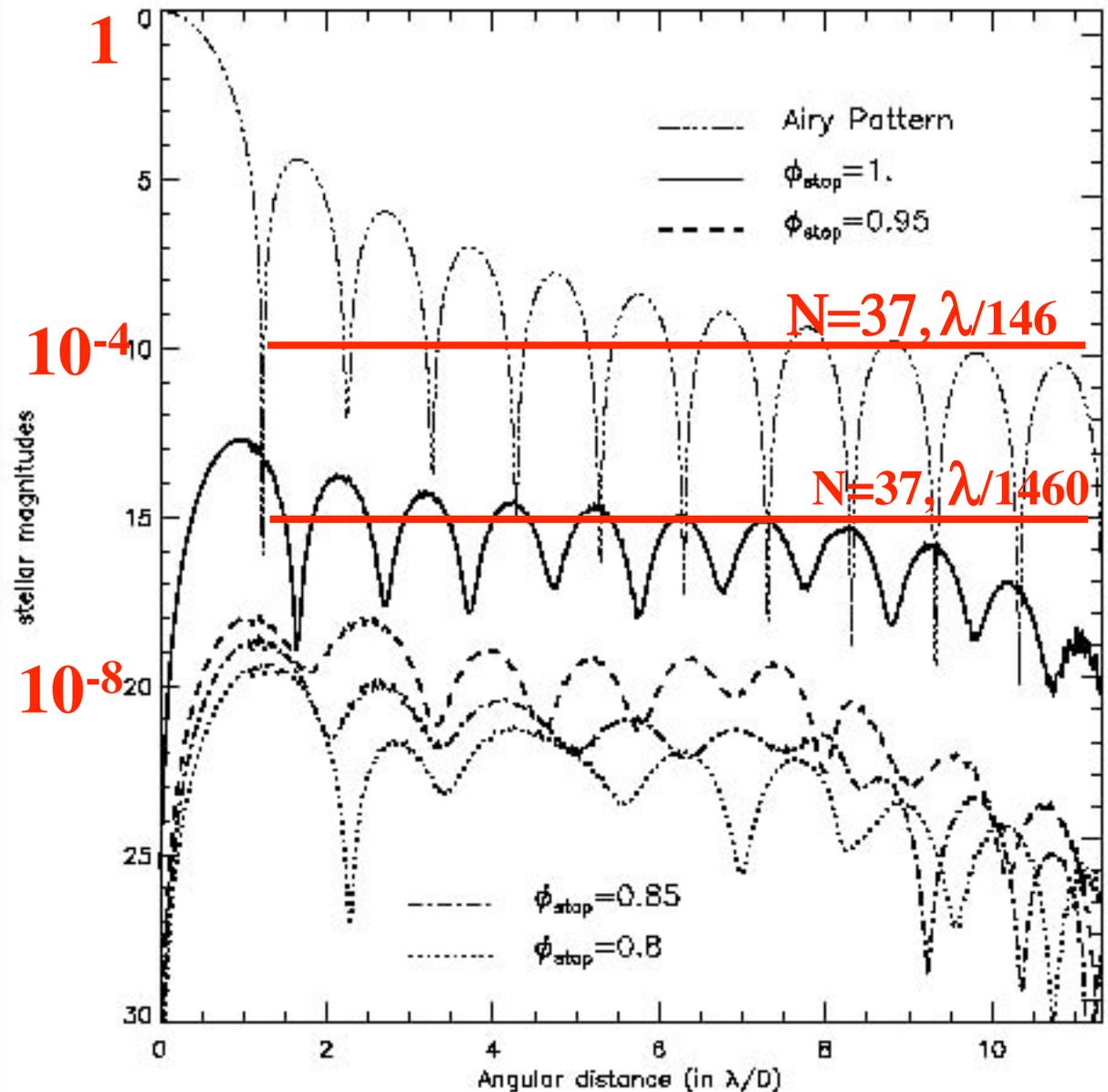


Pourquoi la coronographie ?

- 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

Coronographe 4 quadrants de D.Rouan

- Utilisable dans
l'image
hypertelescope



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

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

Un « mange-franges » à N ouvertures:

Senseur d'onde par « tavelures dispersées »

(thèse en cours de V.Borkowski)

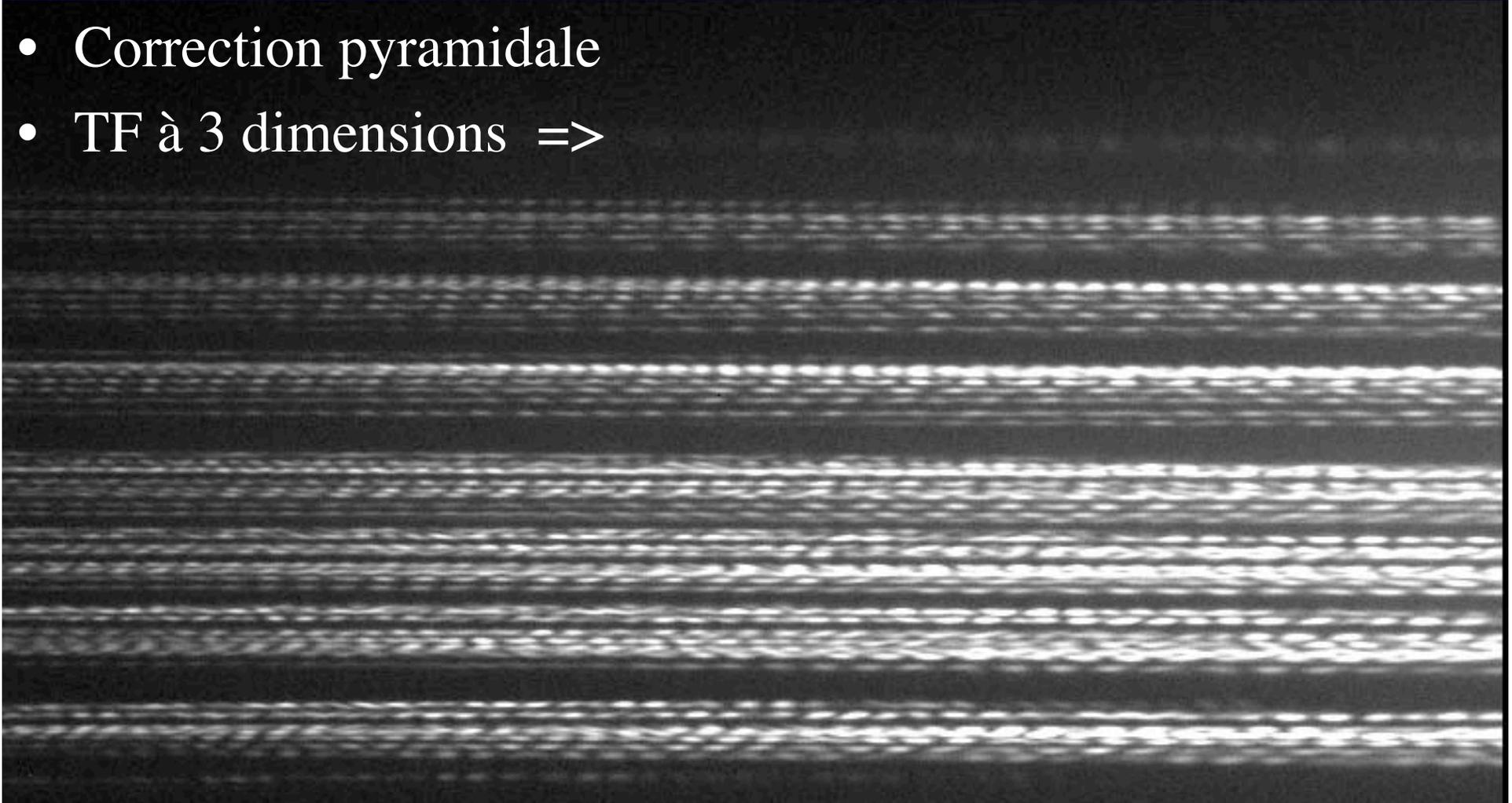
- Bonne sensibilité, utilisable pour coronagraphie adaptative (Borkowski et al. en préparation)
- Utilisable pour ouvertures redondantes
- théorème de Martinache: le cube de sortie est l'autocorrélation 3D de la surface d'onde (fonction binaire de u, v, δ) (Martinache, en préparation)
- Généralisable pour apodisation ? $A(u, v, \delta)$
- Essais entamés sur montage

amplitude

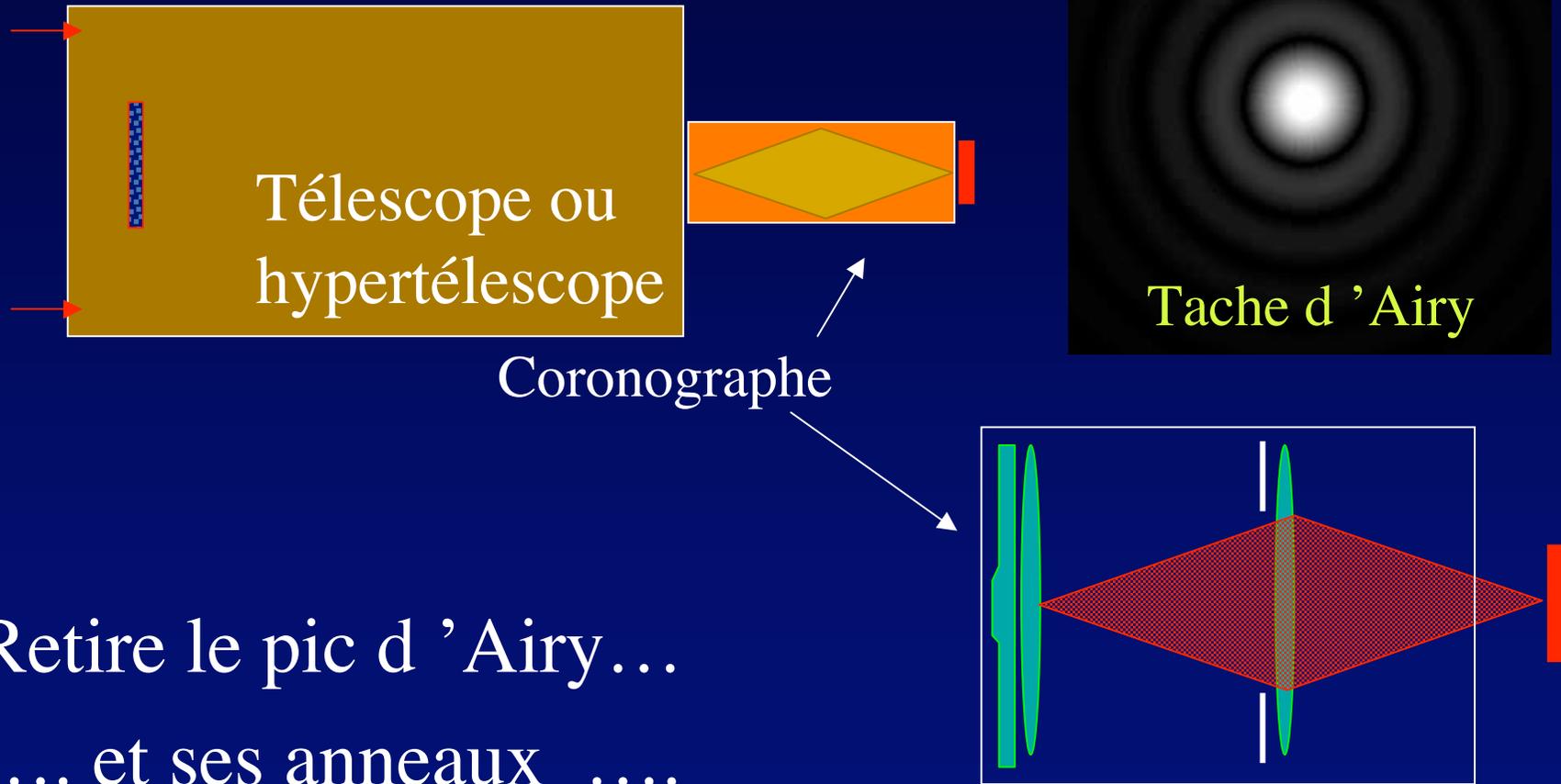
Senseur de piston à « speckles dispersés »

(thèse en cours de V.Borkowski)

- Spectre de chaque speckle \Rightarrow image (x, y, λ)
- Correction pyramidale
- TF à 3 dimensions \Rightarrow



Principe de la coronographie



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

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)

Cas d'une optique parfaite:

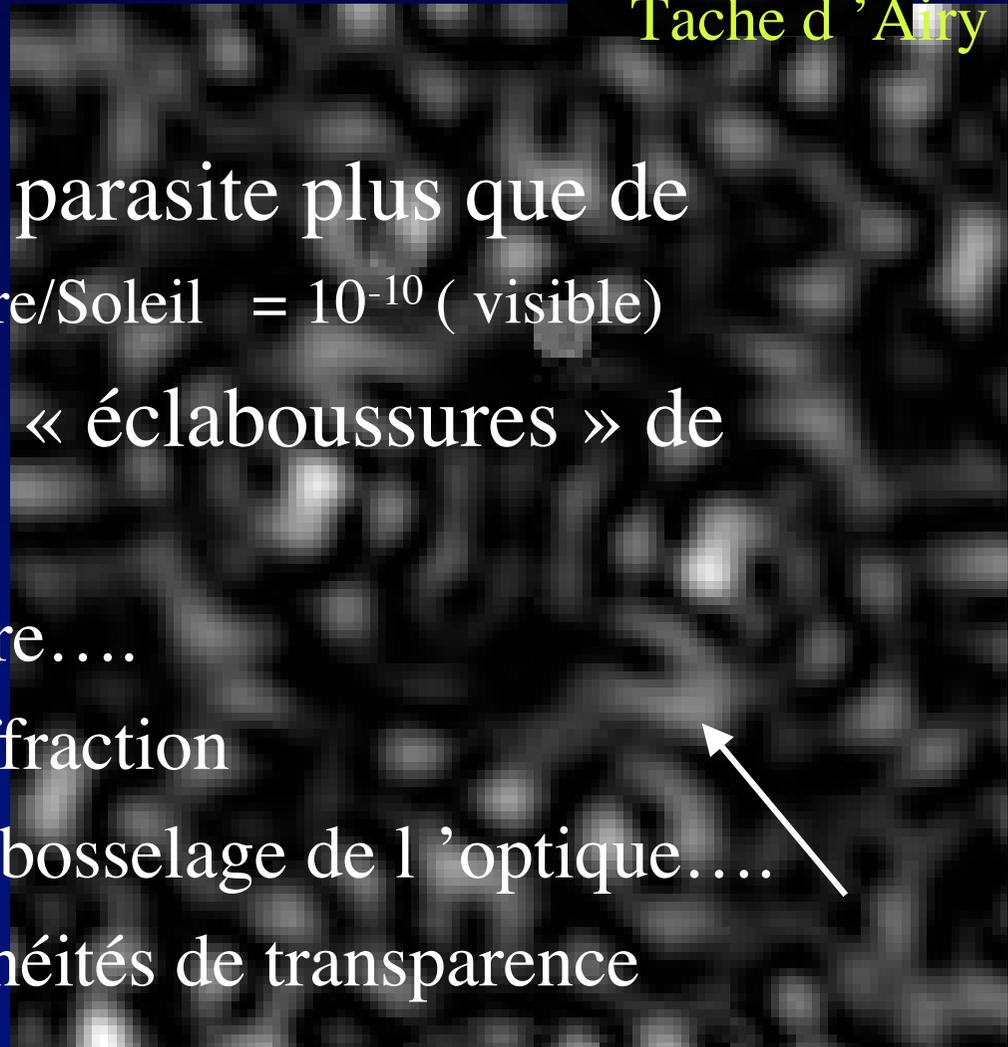
- Noircissement complet possible avec légère apodisation et coronographe Lyot ou Roddier (Aime et Soummer 2002)
- Voie intéressante

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



Résidu causé par le bosselage de l'onde :

Formule de Maréchal

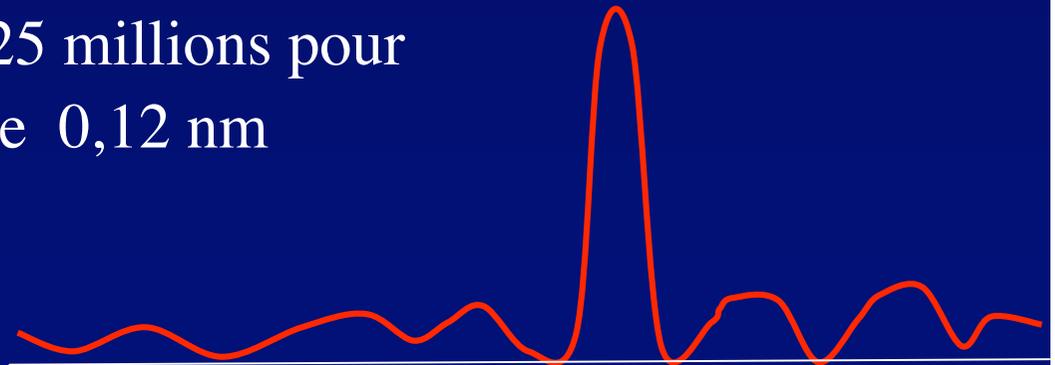
Pic/halo

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

Nombre de bosses

Erreur de phase

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



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/ »

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

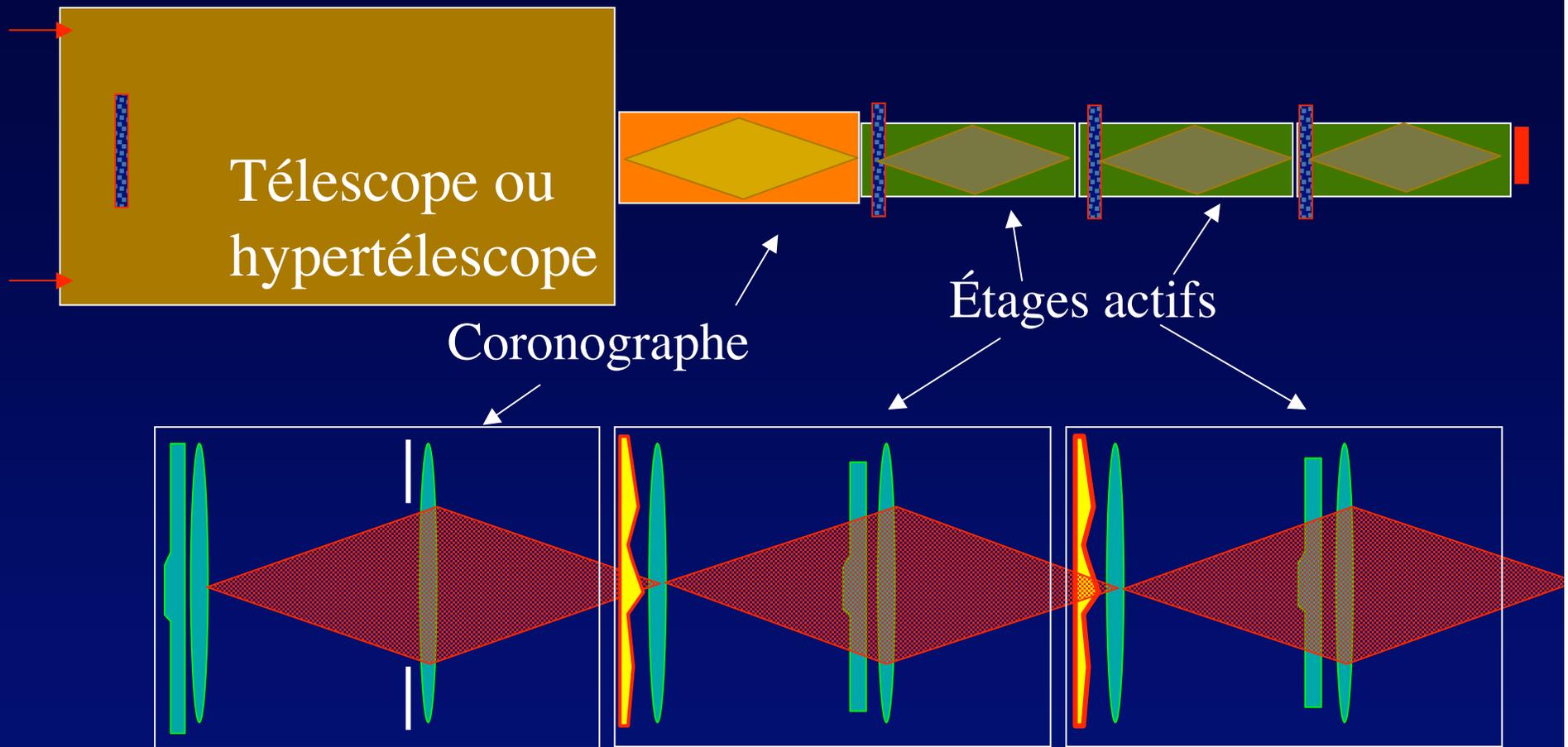
Senseur d ' onde: pré- ou post-coronographe ?

- R. Angel me dit que la sensibilité est la même, si le bruit de photon limite => à confirmer
- Mais en post-coronographe:
 - la dynamique du détecteur est mieux utilisée
 - les résidus intrinsèques du coronographe sont pris en compte (tous les coronographes ne sont pas parfaits)

Nettoyage adaptatif des résidus stellaires après le coronographe

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

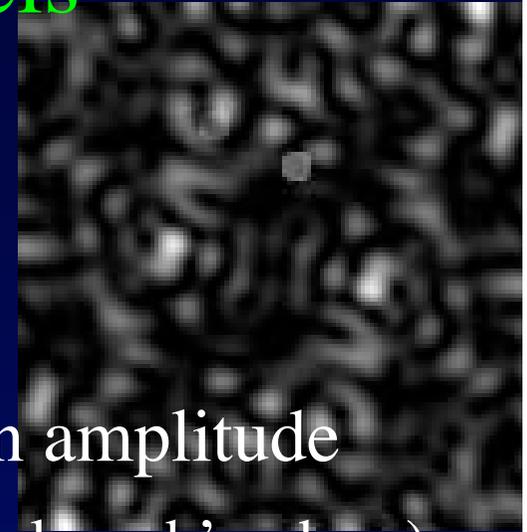
Coronographe et étages actifs



Exo-planètes: visible ou infra-rouge thermique ?

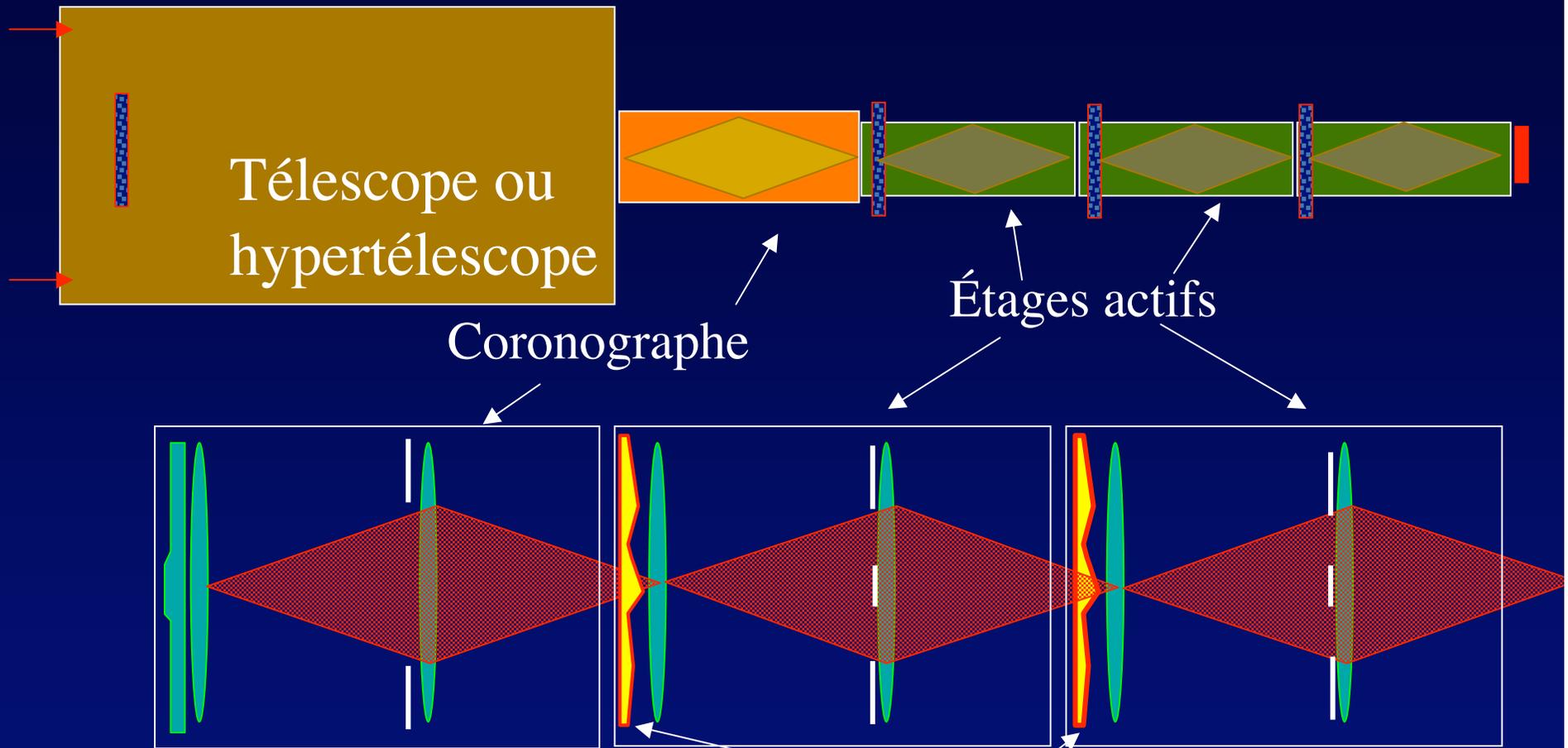
- Résolution: une ouverture de quelques mètres suffit dans le visible, mais pas à 10 microns
- Contraste planète/étoile (exo-Terre) :
 - visible 10^{-10}
 - infra-rouge 10^{-6}
- Nécessite des raffinements: lesquels ?

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

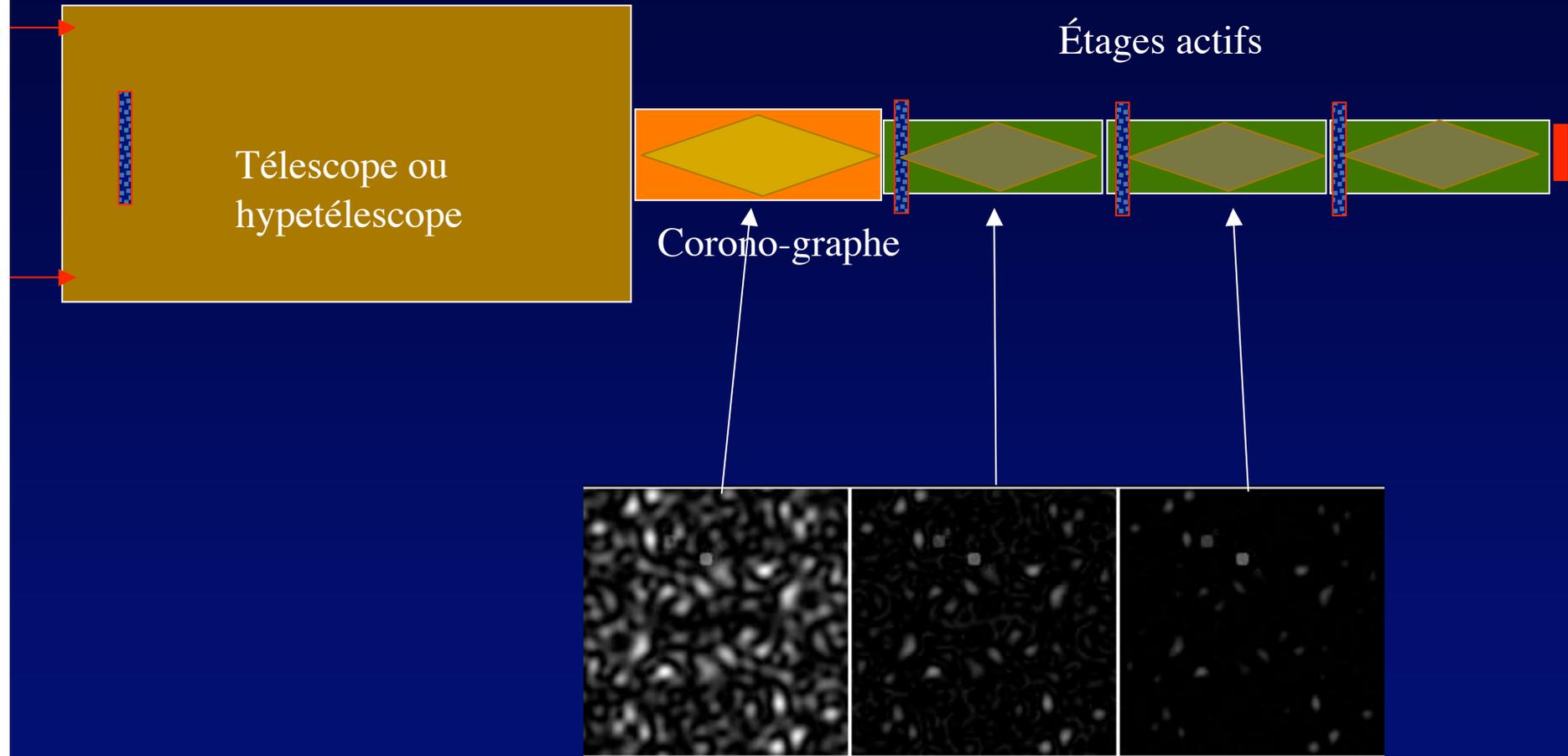
Coronographe et étages actifs additionnels



- Étage actif:
 - Mise en phase des speckles résiduels
 - Engendre un pic d'interférence
 - Annulé par masque opaque ou de phase

Lame déformable

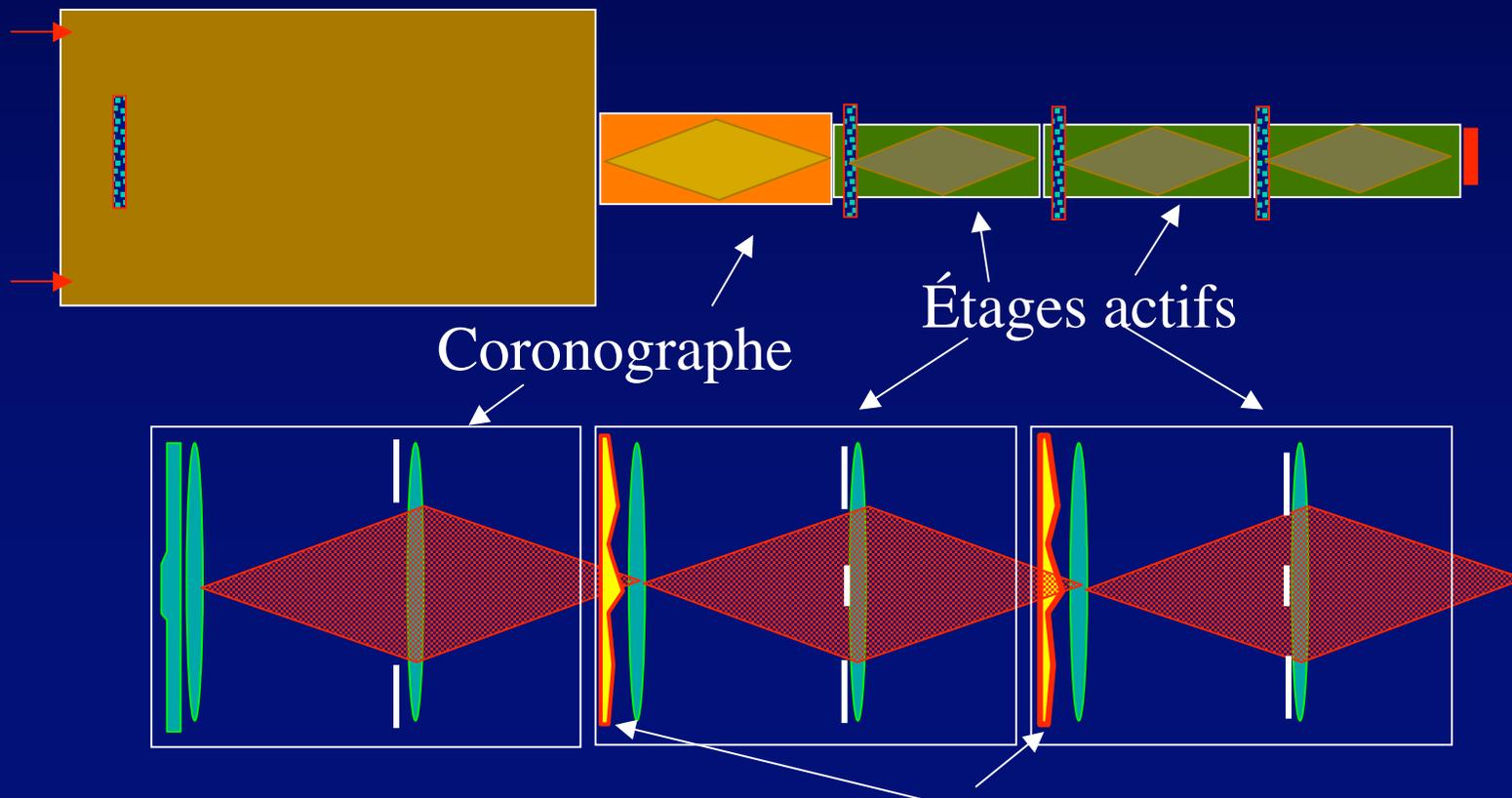
Coronographe et étages actifs additionnels



- Atténuation 7 à 10 par étage
- Planète non affectée

Pourquoi la planète est peu affectée

- Le pic planète couvre un seul actuateur des relais actifs: il est globalement déphasé
- Le masque pupillaire des relais actifs dégrade peu la planète (effet d'obstruction centrale)



Vue de près: deux exemples

Sortie coro

Relai 1

Relai 2

- Atténue les speckles brillants, allume les noirs

planètes

Sortie coro

Relai 1

Relai 2

Effet des résidus de la phase annulée

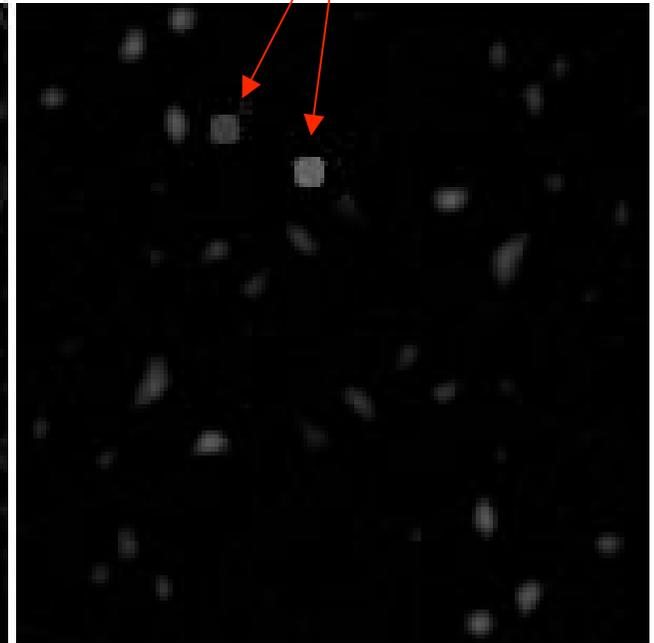
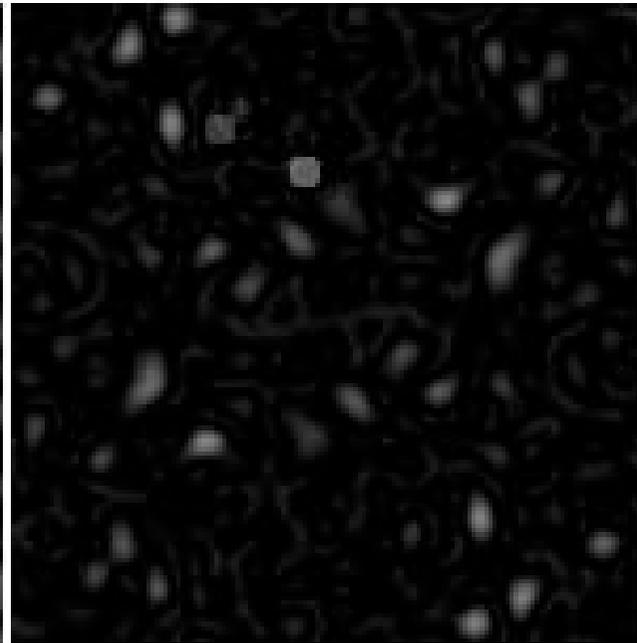
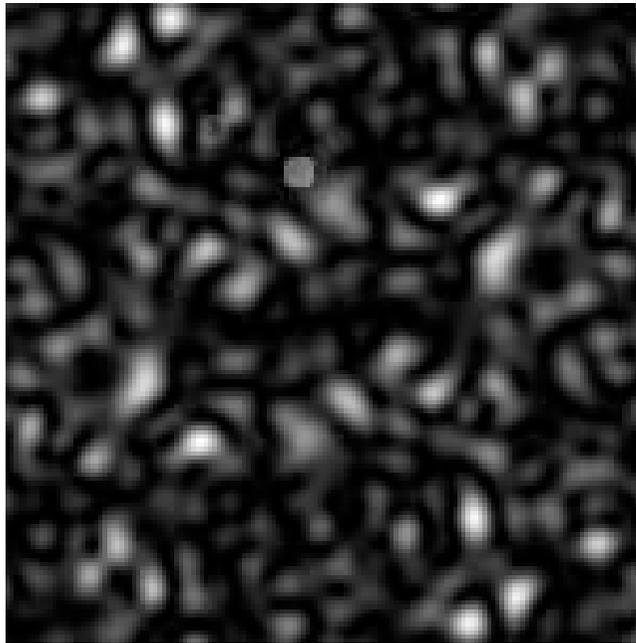
Résidus ϕ

Résidus $\pm \pi$

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

Simulations

planètes



résidu moyen 1

0,17

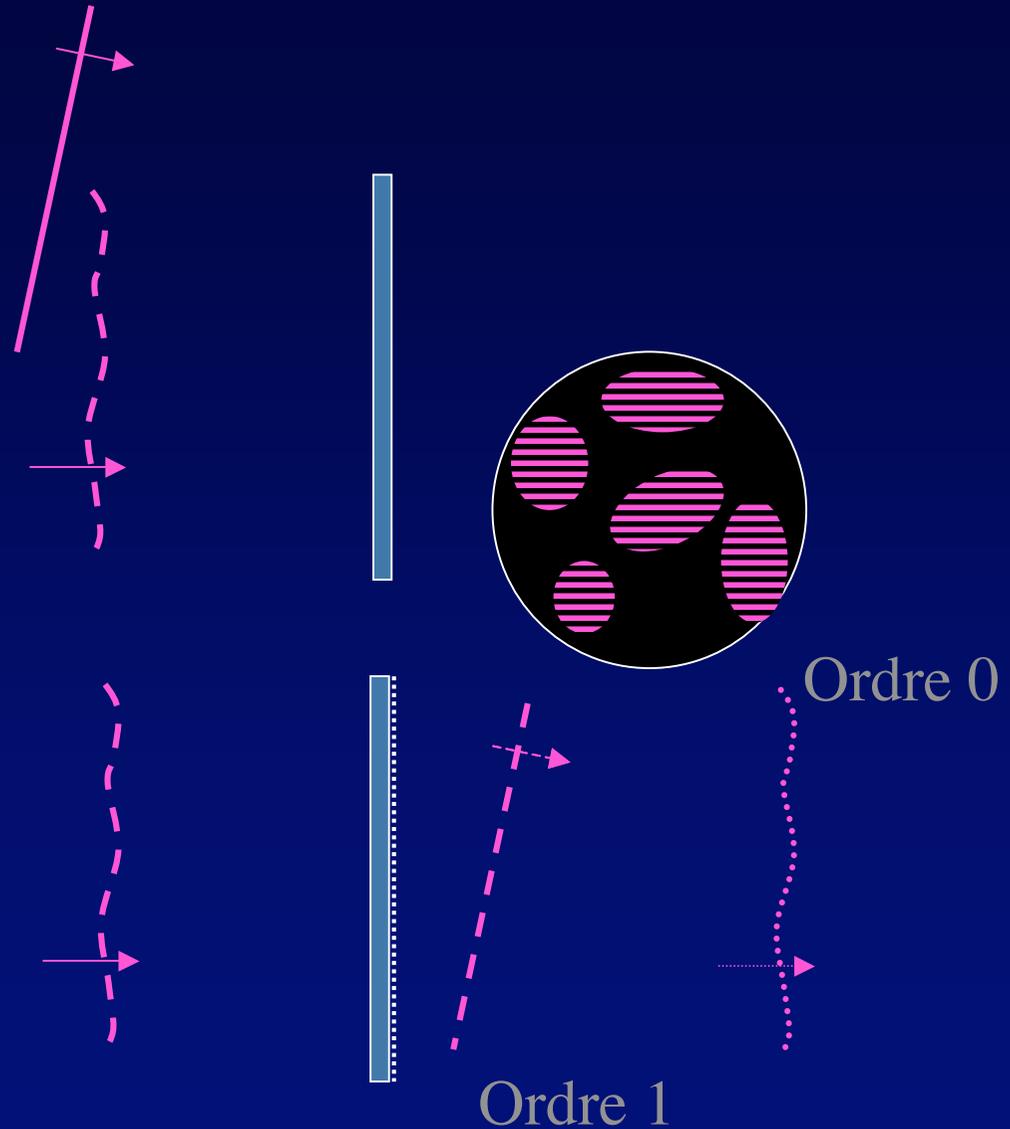
0,02

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

hologramme phaseur ? (R.Lyon, A.L.)

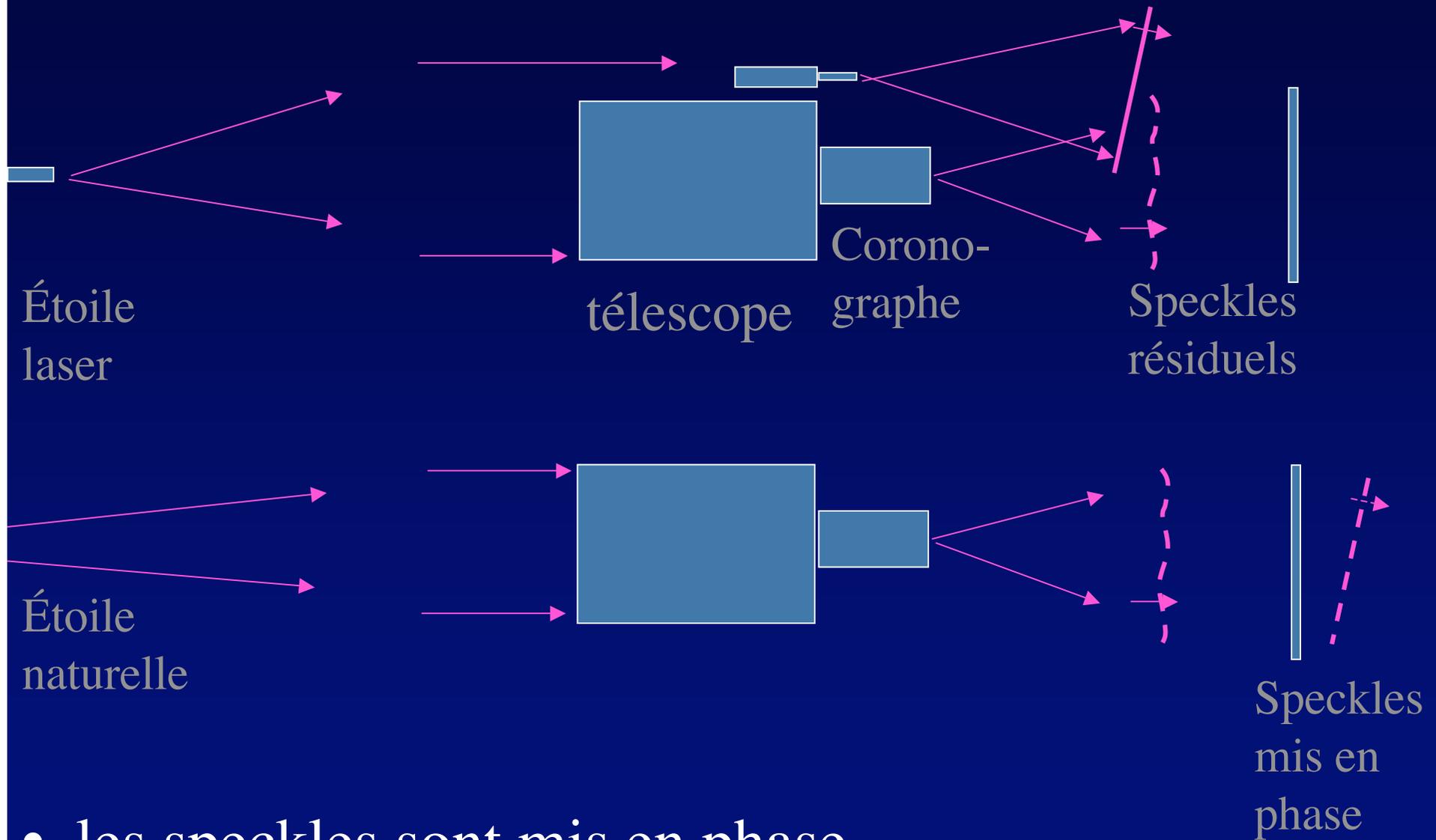
enregistrement

reconstruction



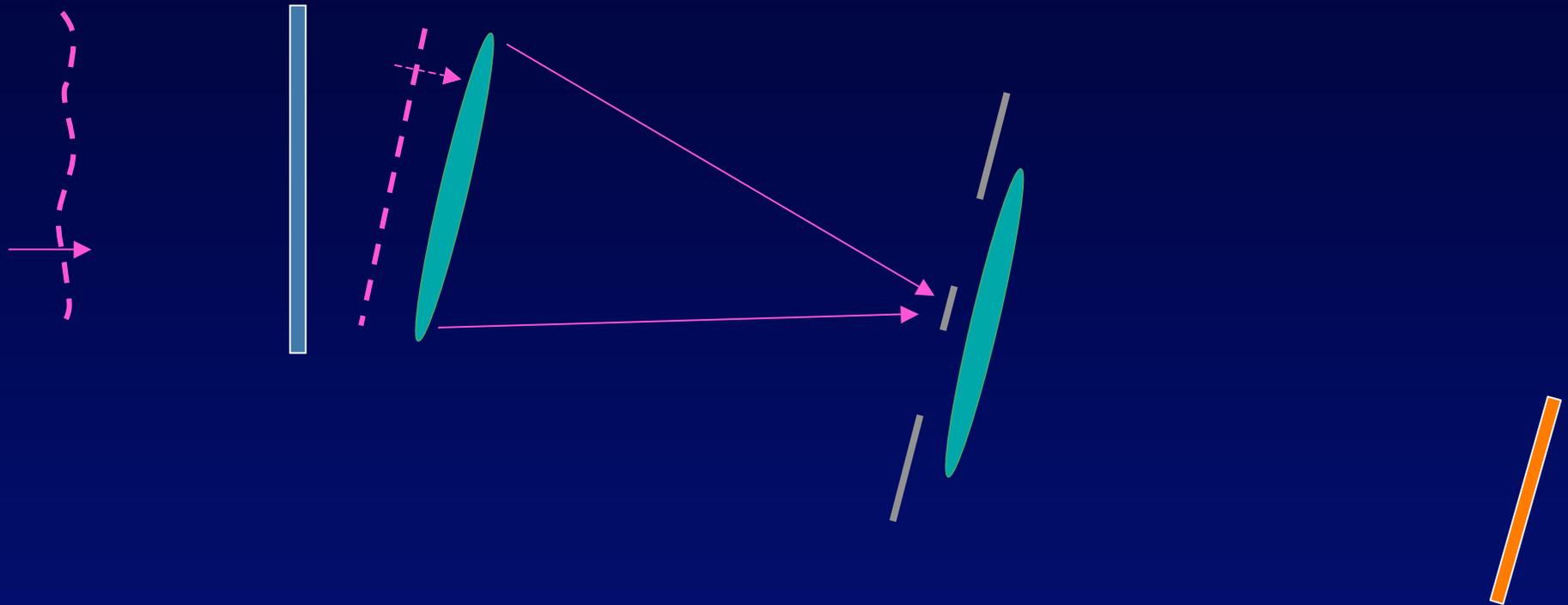
- les speckles sont reconstruits, et mis en phase

enregistrement de l'hologramme avec une étoile laser



- les speckles sont mis en phase

Espace: phaseur holographique adaptatif ?



- Suivre les dérives lentes des speckles ?
 - mise à jour périodique en repointant l'étoile laser
 - Nécessite hologramme ré-inscriptible
 - exemple: couches photo-conductrice et thermoplastique entre électrodes transparentes)

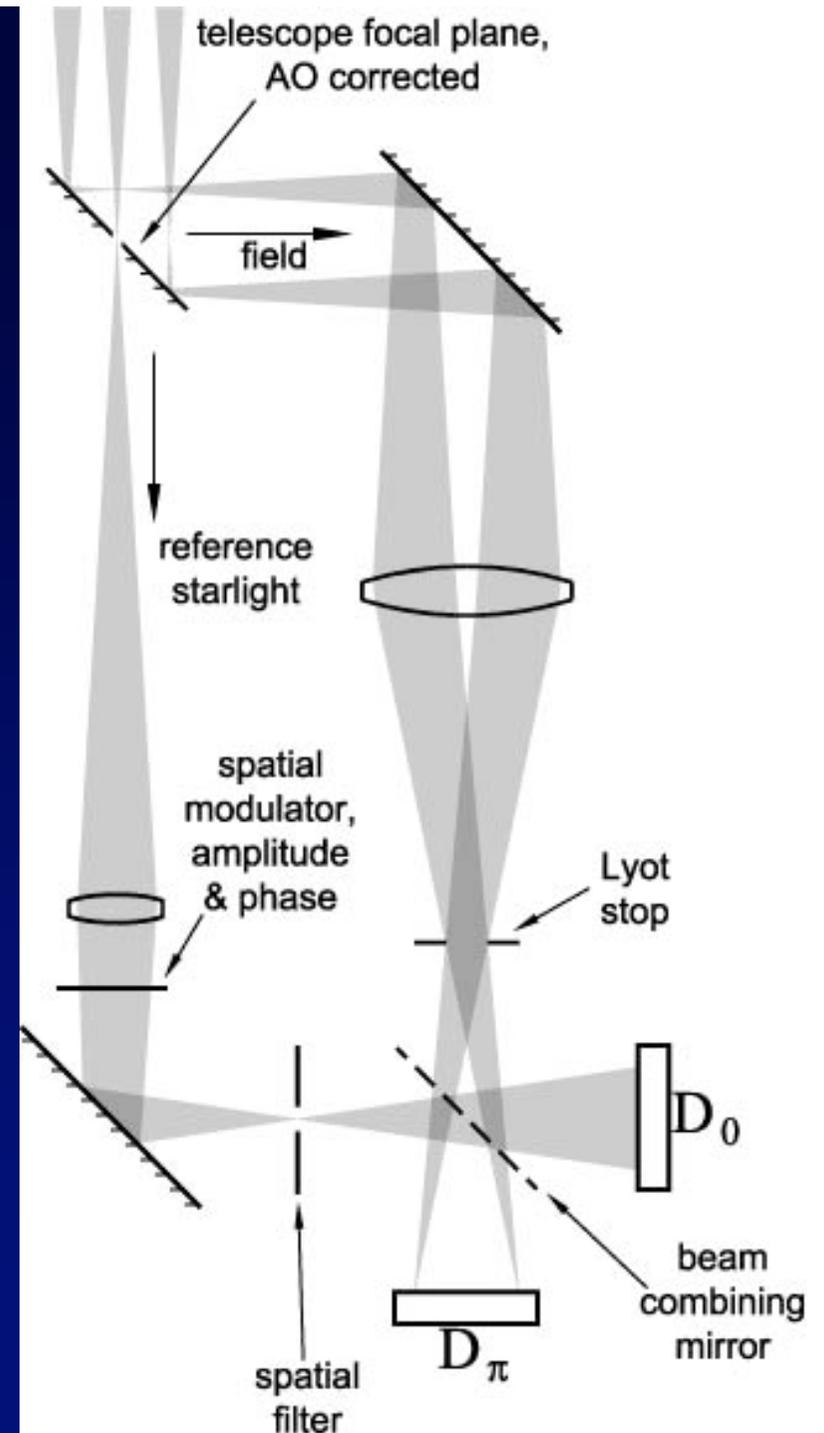
Simulations d'atténuation holographique par Rick Lyon (NASA/GSFC)

- et essais effectués par lui sur plaques photopolymères Aprilis
- amélioration possible : noircissement holographique complet en un seul étage

Puis...une idée de R. Angel
(encore une !)

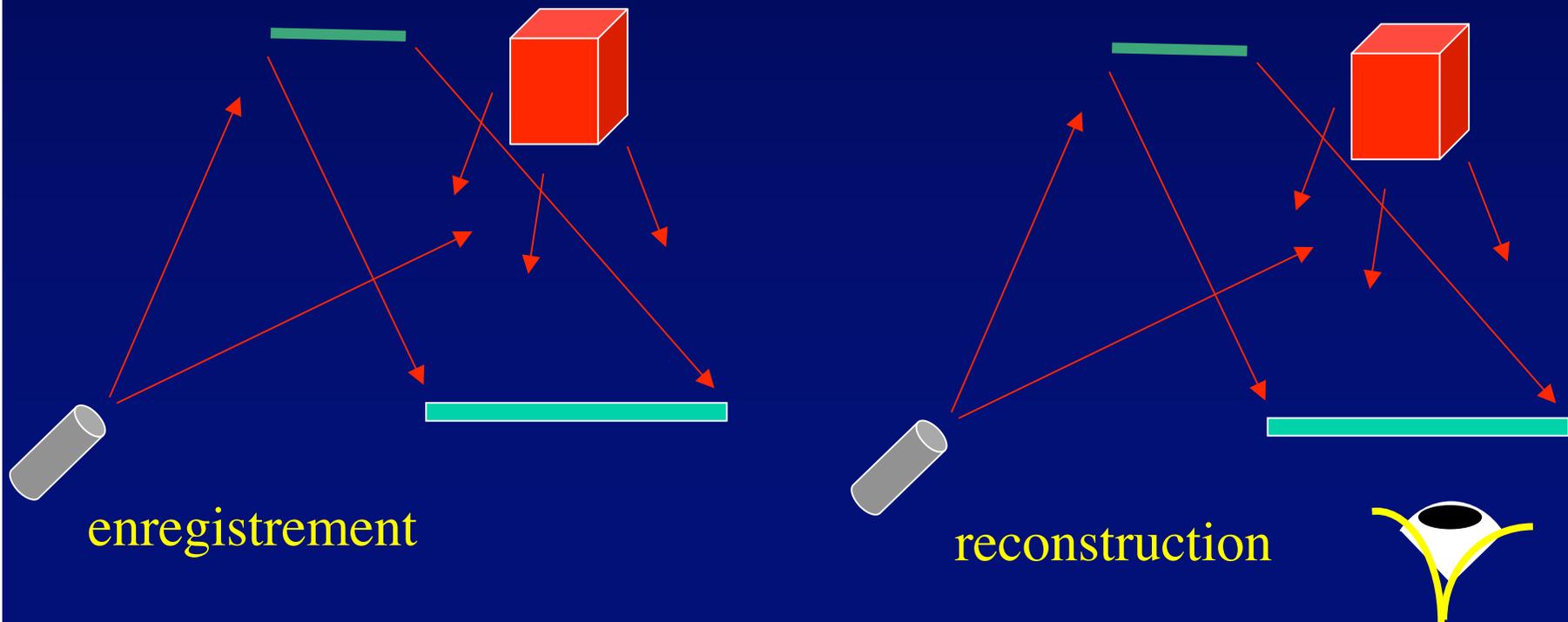
Interféromètre Mach-Zehnder pour annuler activement les résidus stellaires

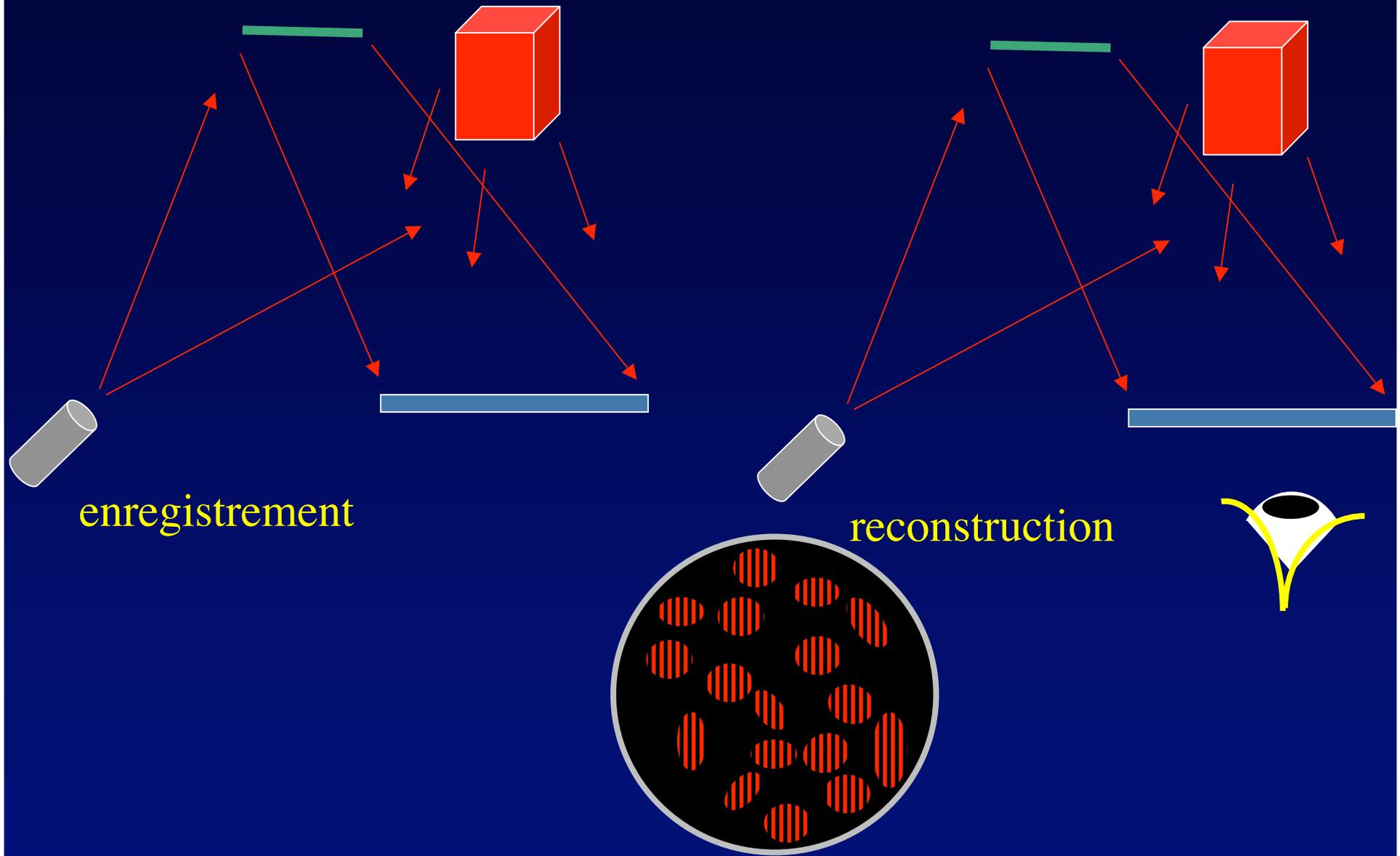
- Correction de l'amplitude et la phase
- Senseur d'onde avant ou après le coro (même sensibilité selon Angel)
- Canaux spectraux multiples, séparés ?



Prendre le meilleur des méthodes de Lyon et d'Angel:
hologramme annulant les résidus d'étoile

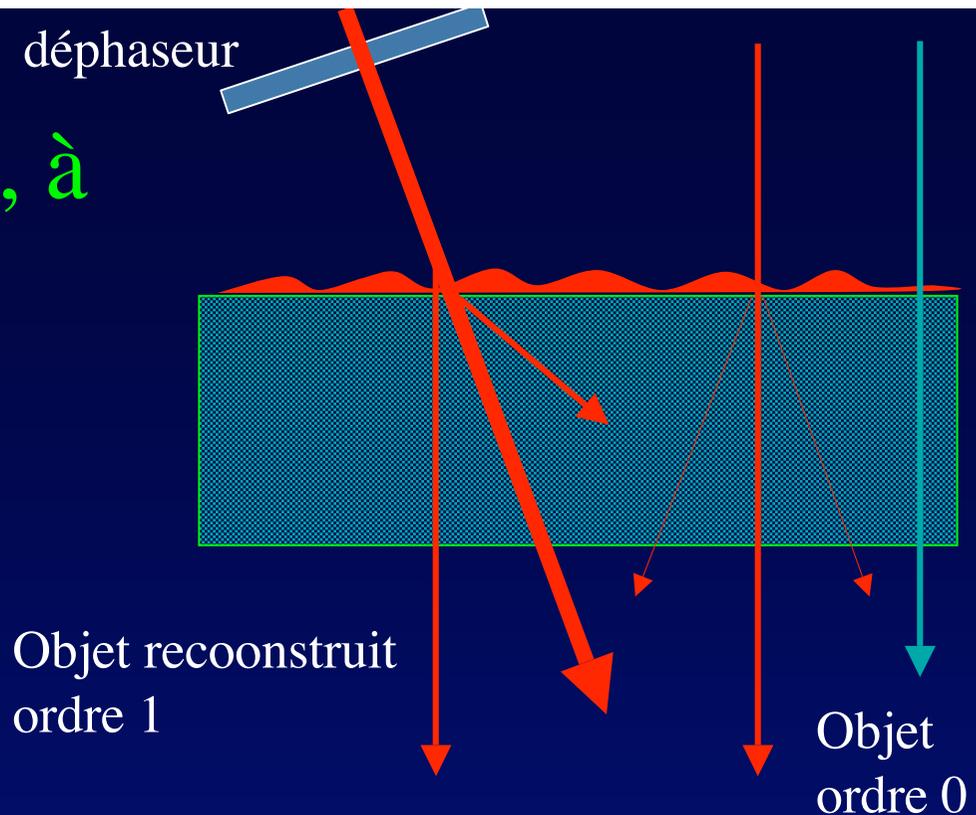
- Utilise le principe de l'interférométrie holographique: interférence d'un objet réel et d'un objet reconstruit
- Ici, annuler avec un faisceau de référence déphasé de π





- Hologramme = speckles frangés

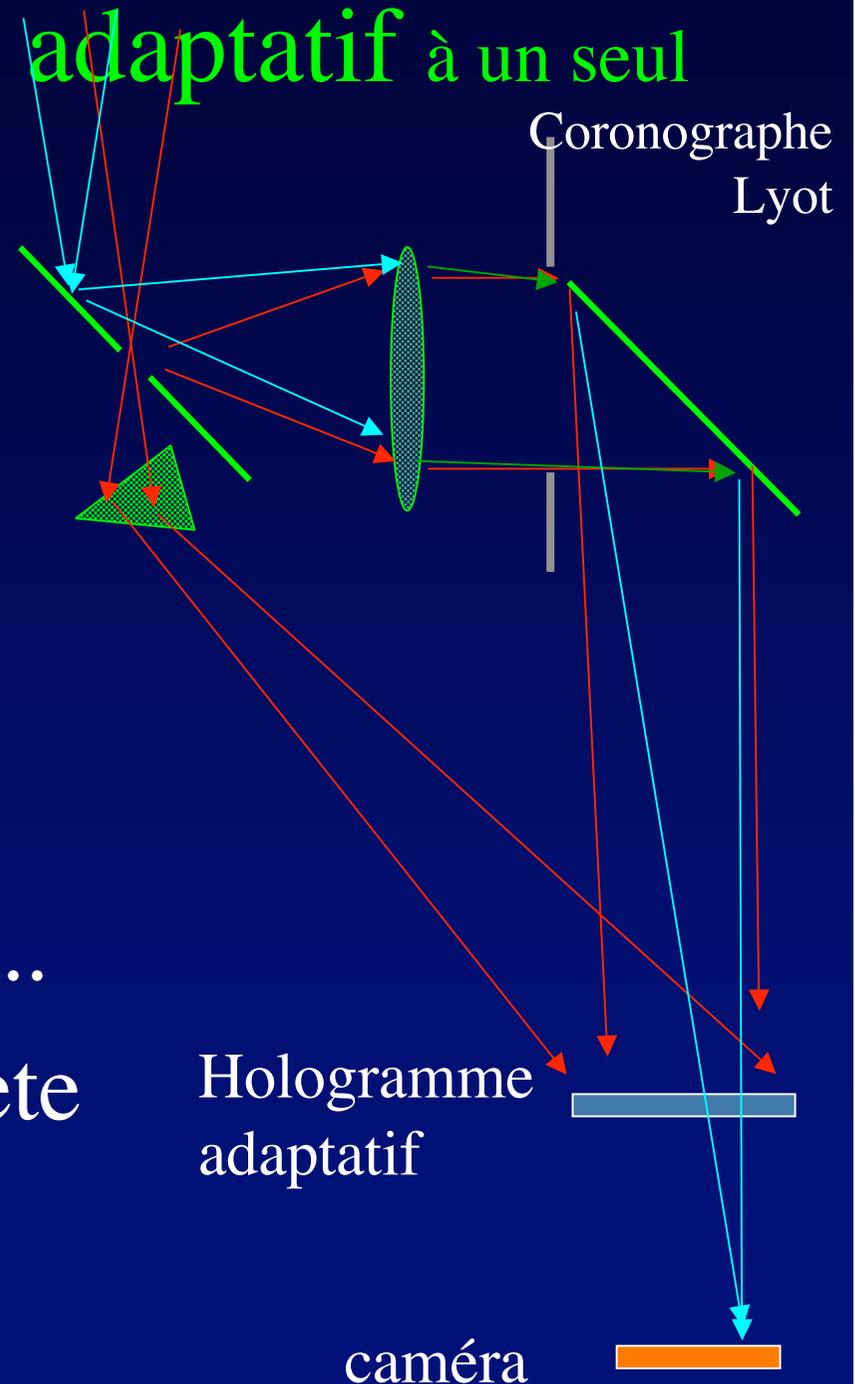
Hologramme de phase, à faible efficacité de diffraction



- 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

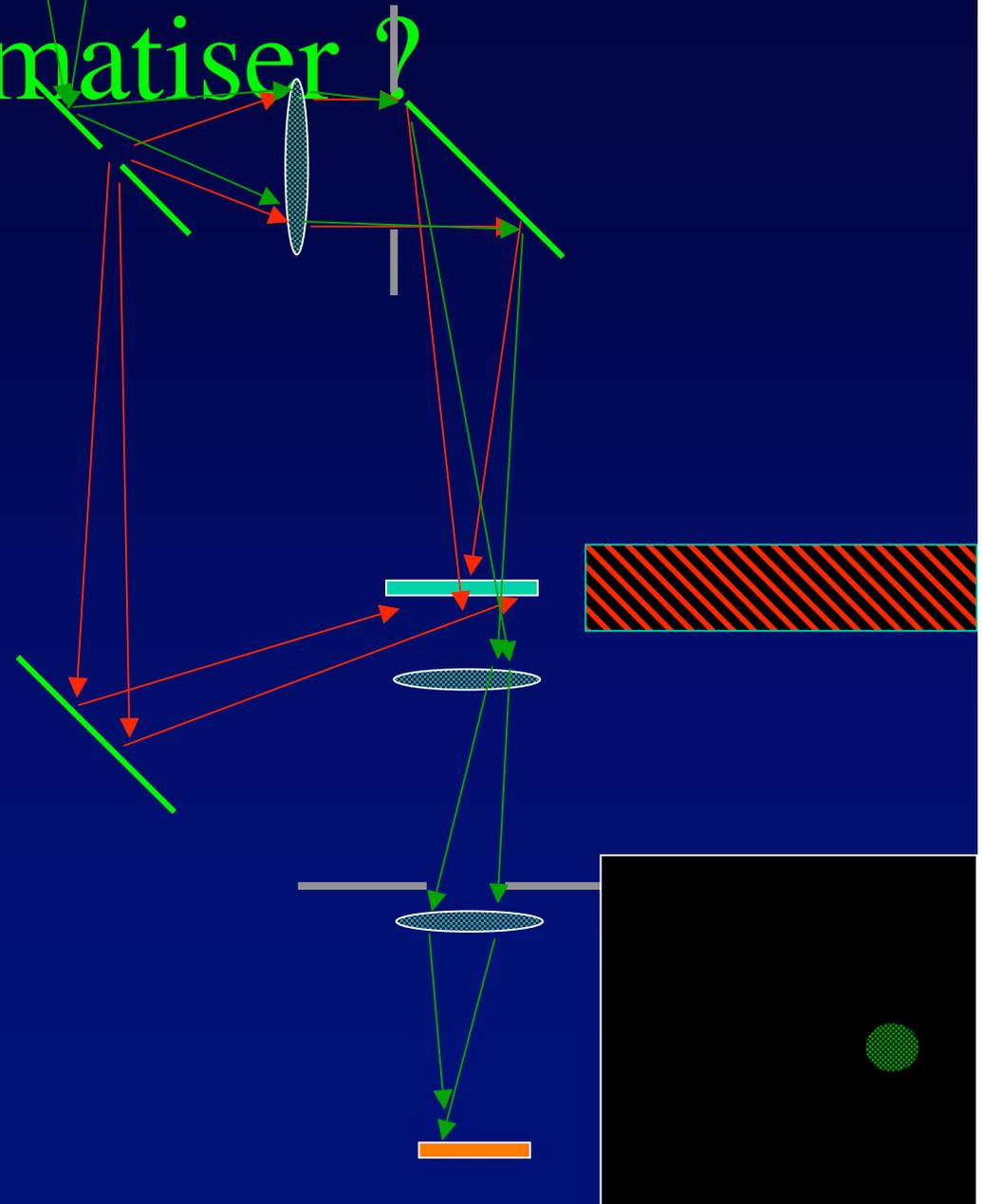
nettoyeur holographique adaptatif à un seul étage

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



Hologramme en couleurs pour achromatiser ?

- Possible en principe, mais perte d'efficacité de diffraction
- Matériau à sensibilité amplifiée ?



Dans l'espace:

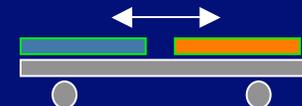
correcteur statique pour mettre en phase les speckles ? (Nisenson 2003)

- Spécifié par observation d'une étoile de référence
- Et fabriqué à bord ?
- À comparer avec les solutions actives
 - miroir déformable, cristaux liquides, etc...
- Aussi : hologramme correcteur ?
 - mais si la planète tombe sur un speckle noir ? ... alors elle va dans l'ordre zero

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

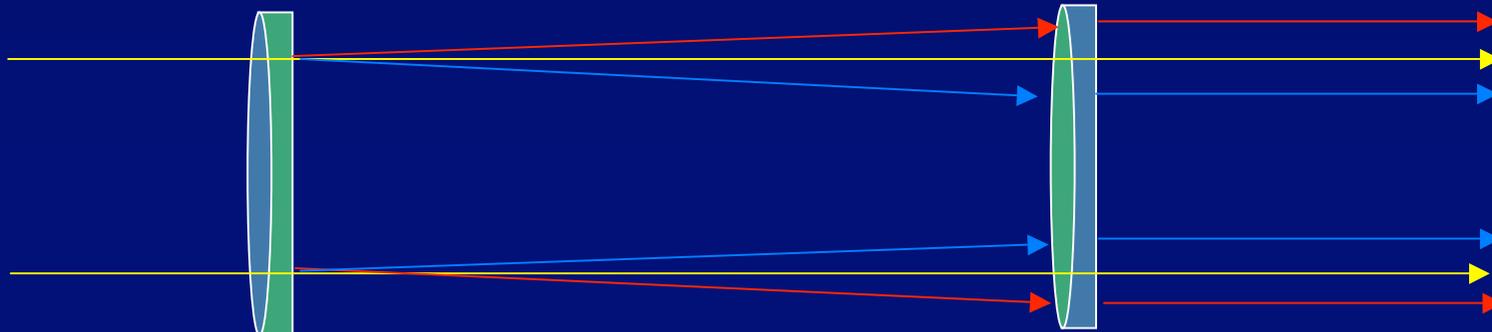
Bosselage

$\phi(x,y)$

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



- Absorbant ?
- 2 miroirs axicon (Guyon 2003)
- Contraste de phase ?
- Pupilles diluées: lacunes ?

Apodiser pour améliorer le coronographe

(Nisenson (2000) , Aime et Soummer (2002)

- Absorbant ?
- 2 miroirs axicon (Guyon 2003)
- Contraste de phase ?
- Pupilles diluées: lacunes ?

Apodiser pour améliorer le coronographe

(Nisenson (2000) , Aime et Soummer (2002)

Apodisation par contraste de phase (Martinache et al., en préparation)

- Principe:
 - faible déformation du miroir primaire $< \lambda/4$
 - Pastille déphasante $\pi/2$ au foyer
 - \Rightarrow ombrage dans la pupille relayée
 - Planète peu affectée

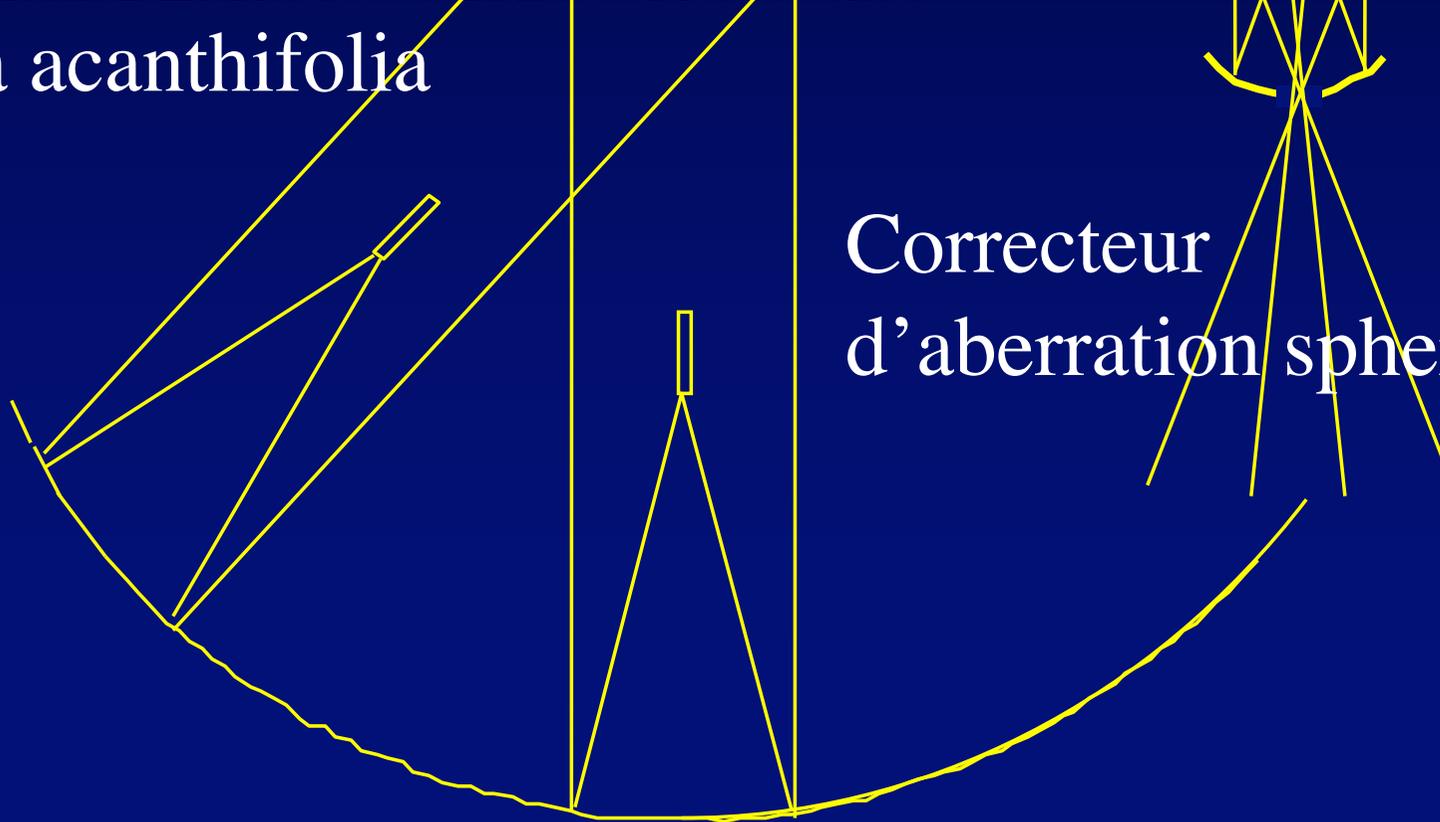
hypertélescope riche: apodisation par lacunes (Le Coroller & Labeyrie, en préparation)

- Principe:
 - Hypertélescope « riche » 37 à 1000 miroirs
 - Retirer des ouvertures vers les bords



CARLINA
hypertélescope
au sol

Carlina acanthifolia



Correcteur
d'aberration sphérique

Hypertélescope: apodisation par densification inhomogène (Labeyrie, en préparation)

- Principe:
 - Hypertélescope « riche »
 - Dilater davantage les ouvertures vers les bords

Senseur de phase par caméra

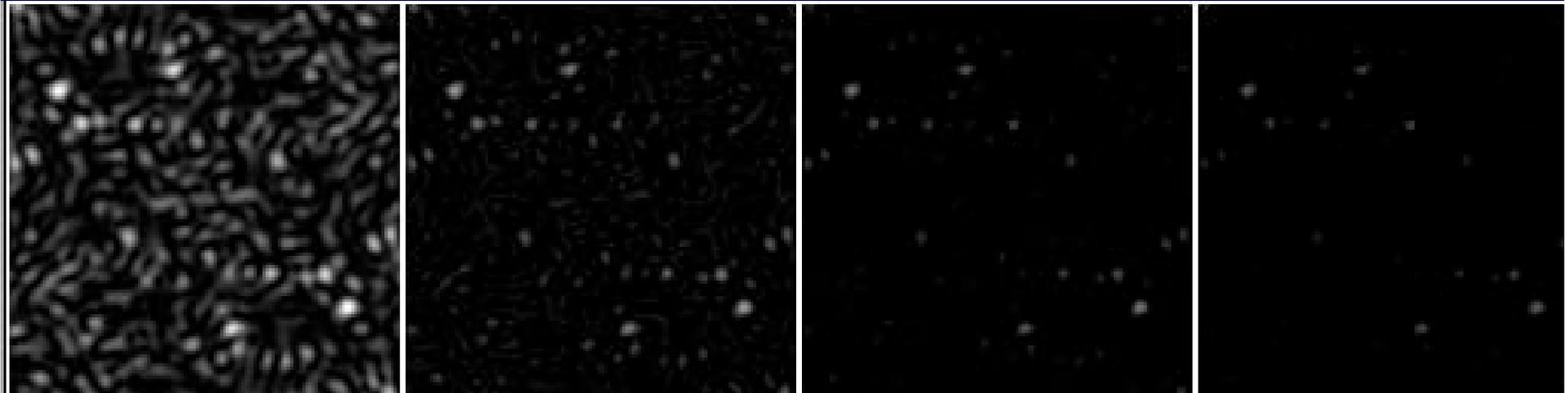
- dans le dernier étage, la caméra science peut-elle guider ?
- Et une image formée avec la lumière rejetée par les masques ?
- À explorer

Achromatiser un coronographe multi-étage

- Hologramme de Bragg par réflexion: sélectivité spectrale
- Nécessite laser multi-lambda
- Aussi: correcteurs de Wynne
 - Dans la TF d'une fonction réelle, l'échelle est proportionnelle à λ .



Un coronographe actif à plusieurs étages pour la recherche d'exo-Terres



En conclusion

- Plusieurs possibilités d'analyse d'onde
- Achromatisation : quelques possibilités à explorer