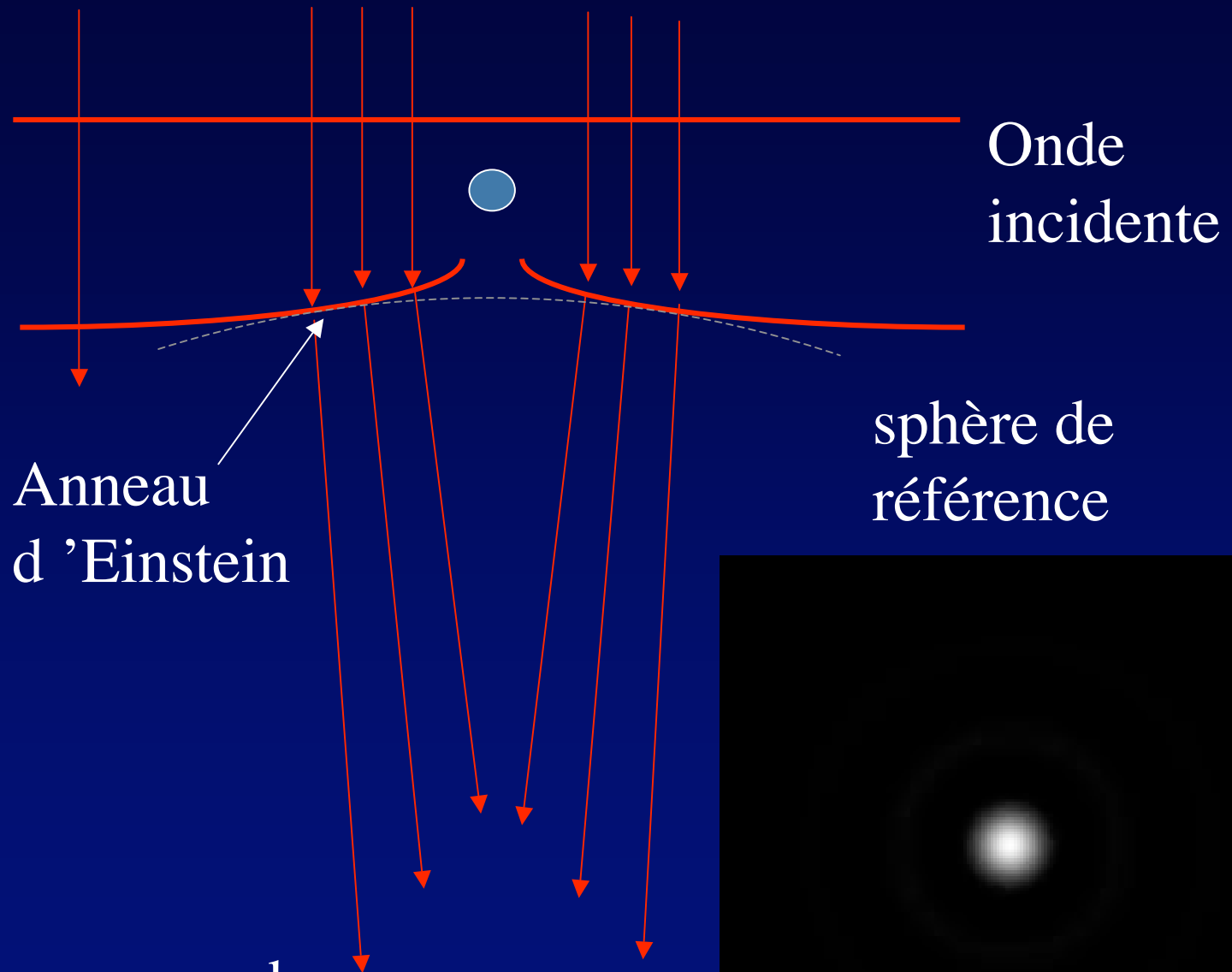


- Lentille gravitationnelle: Anneau d'Einstein et diffraction.



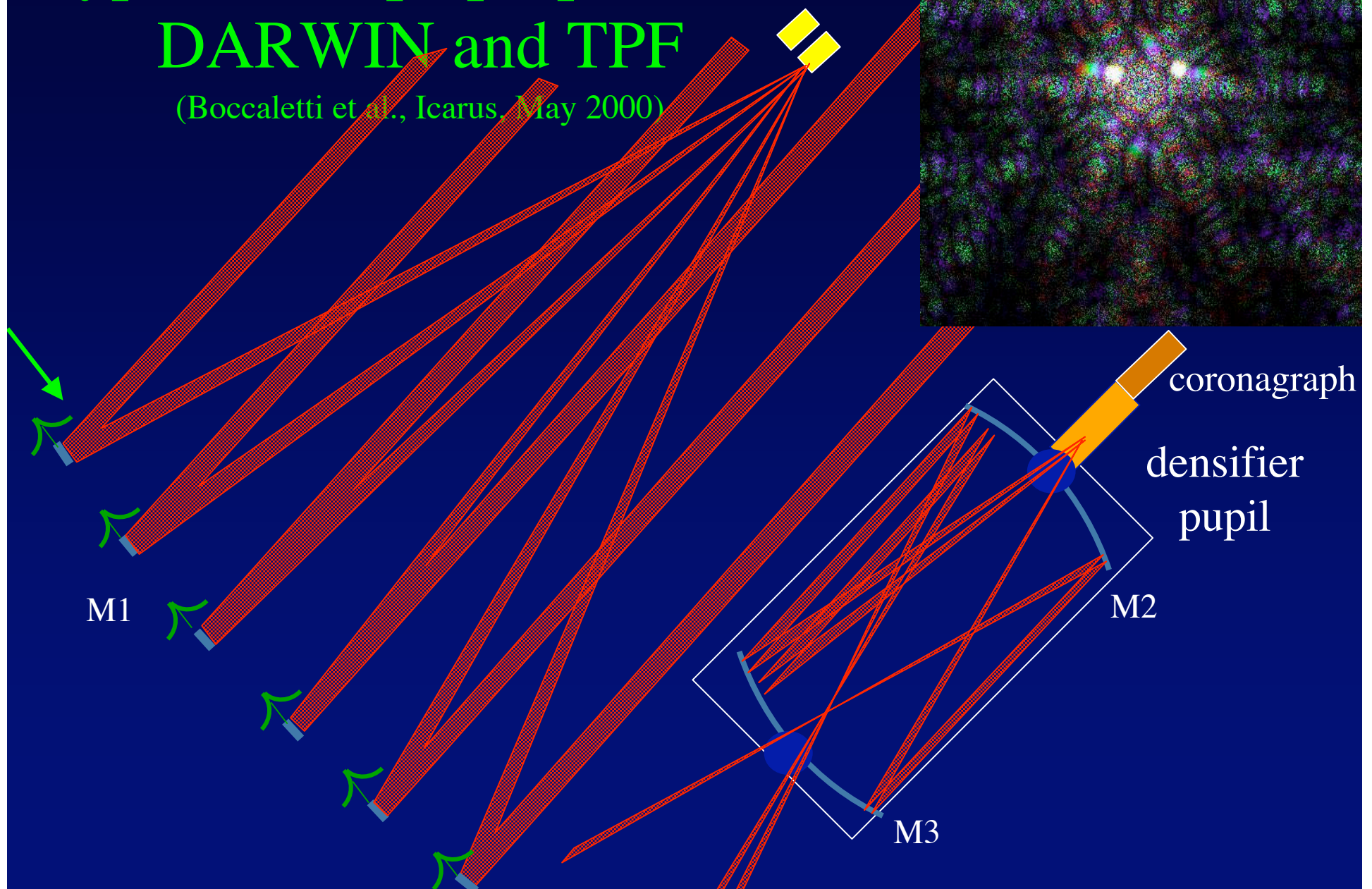
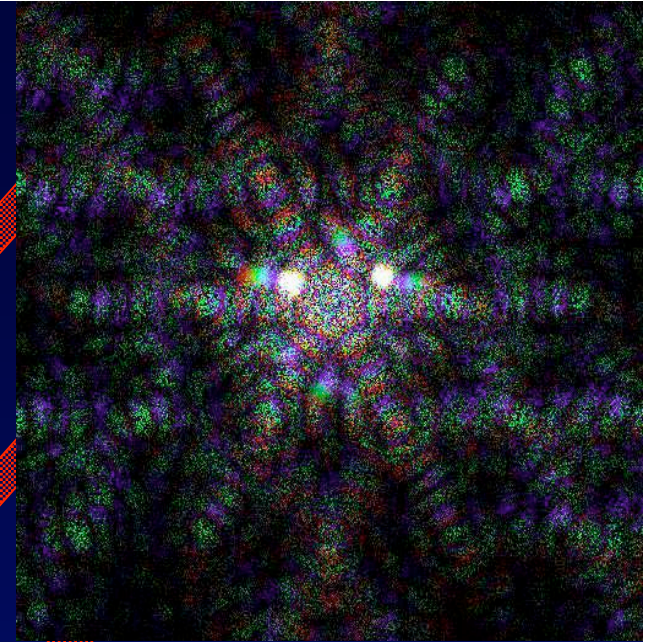
Analogie avec un grand interféromètre à ouverture annulaire



Figure de diffraction

# Hypertelescope proposed for DARWIN and TPF

(Boccaletti et al., Icarus, May 2000)

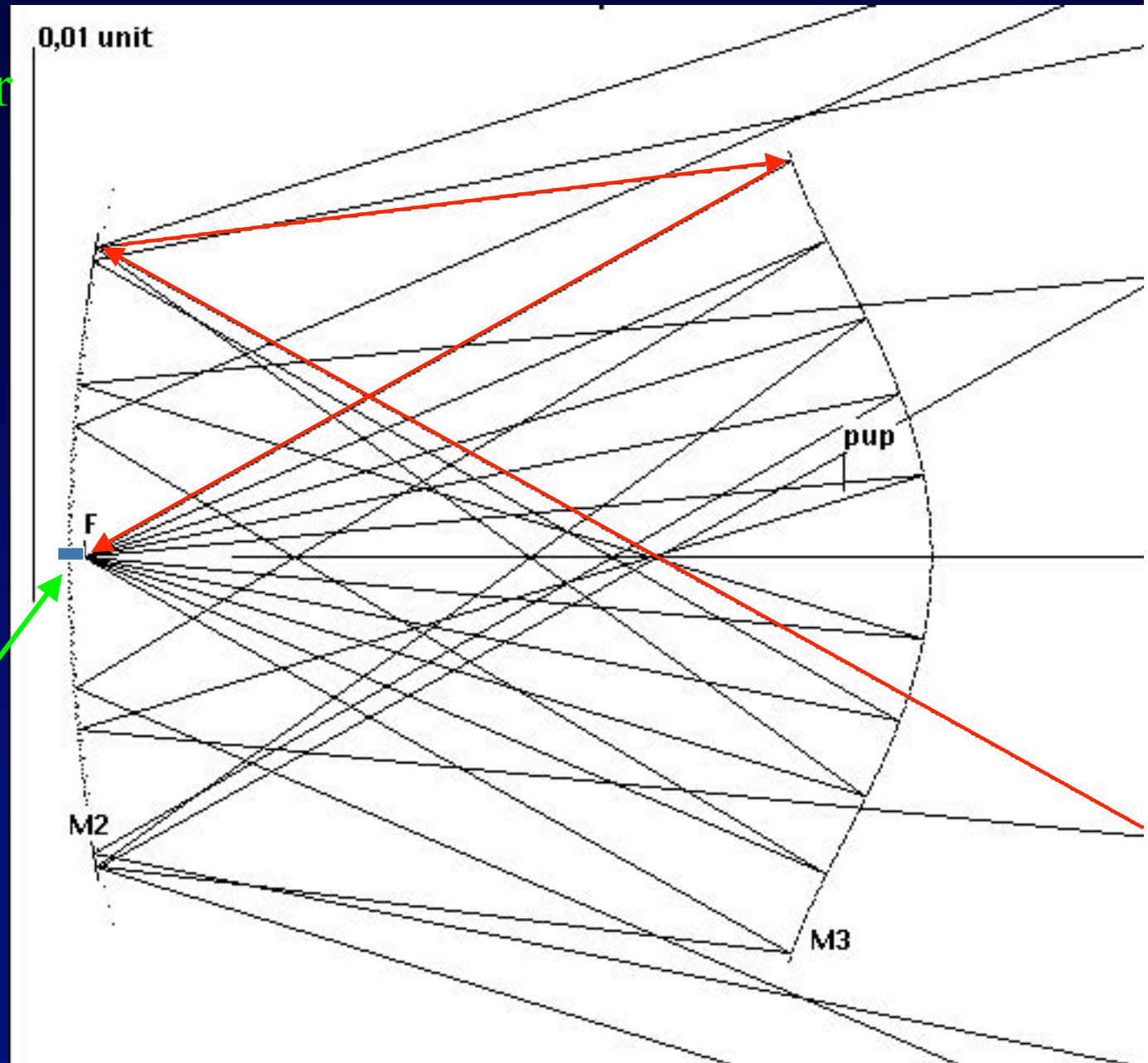


# Diluted clam shell corrector, 1 km diameter

for a 100 km  
Exo-Earth Imager

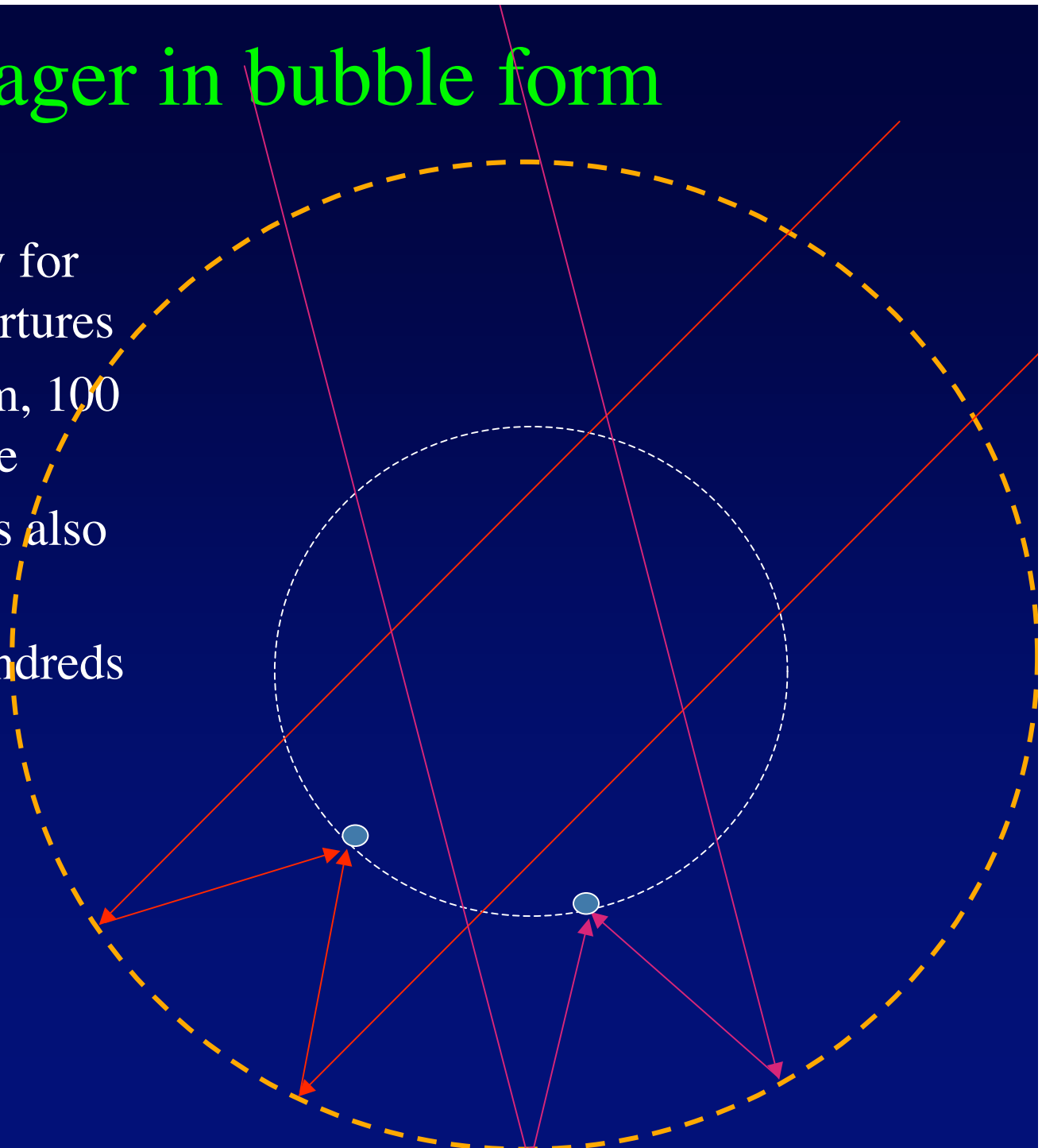
- Mirror elements smaller than 1m
- Correction of spherical aberration and coma

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

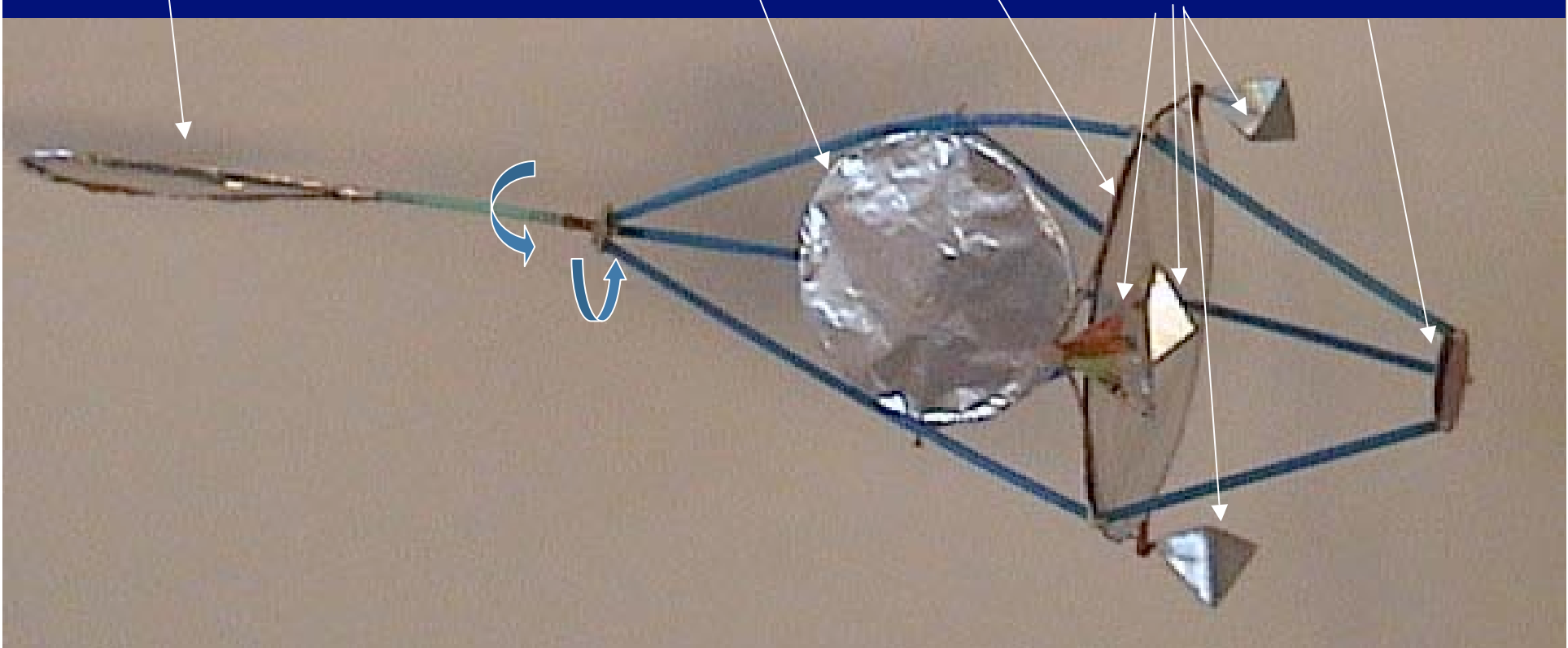
solar tail  
mirror,  
tiltable

Stellar  
mirror  
element

Solar M1  
mirror

Solar  
pyramid  
mirrors

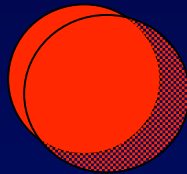
Solar M2  
mirror,  
tiltable



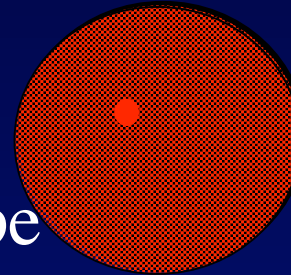
# Infra-red detection: the sensitivity gain with hypertelescope coronagraphy

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

Pupil  
nulling



Hypertelescope  
coronagraphic  
image

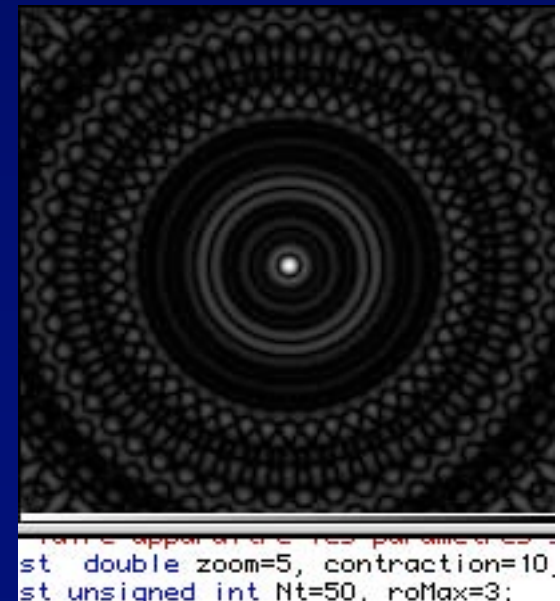
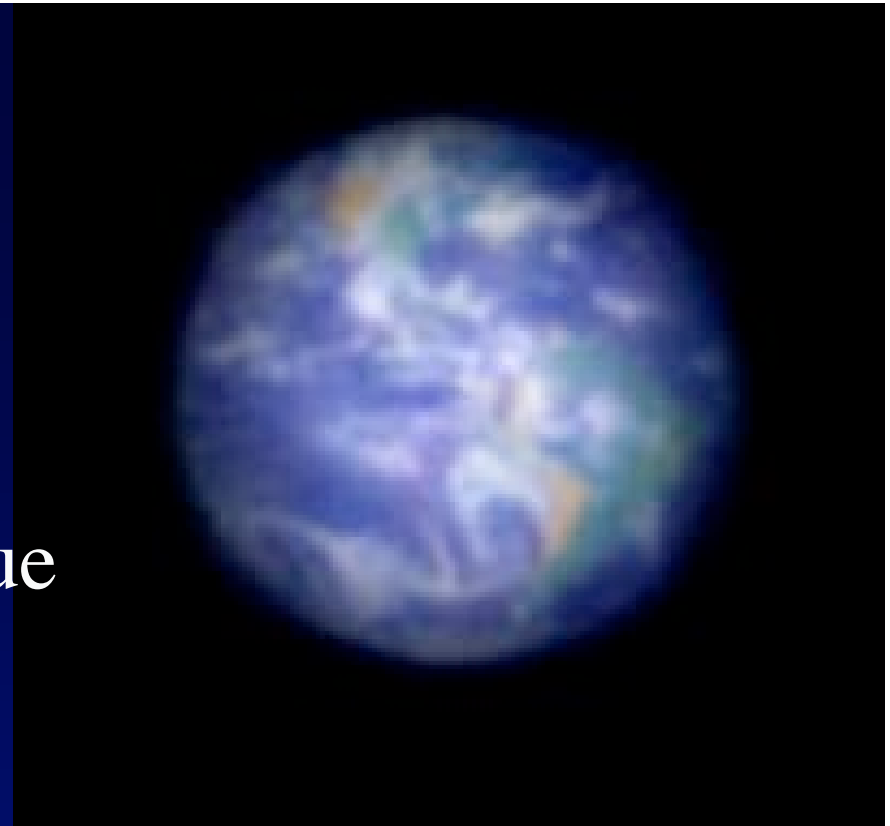


- Pupil « nulling » mixes emission of  $\lambda/d$  sky patch with planet on the single detector pixel
- Image has sky and planet on distinct pixels in the hypertelescope case



# 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** ?



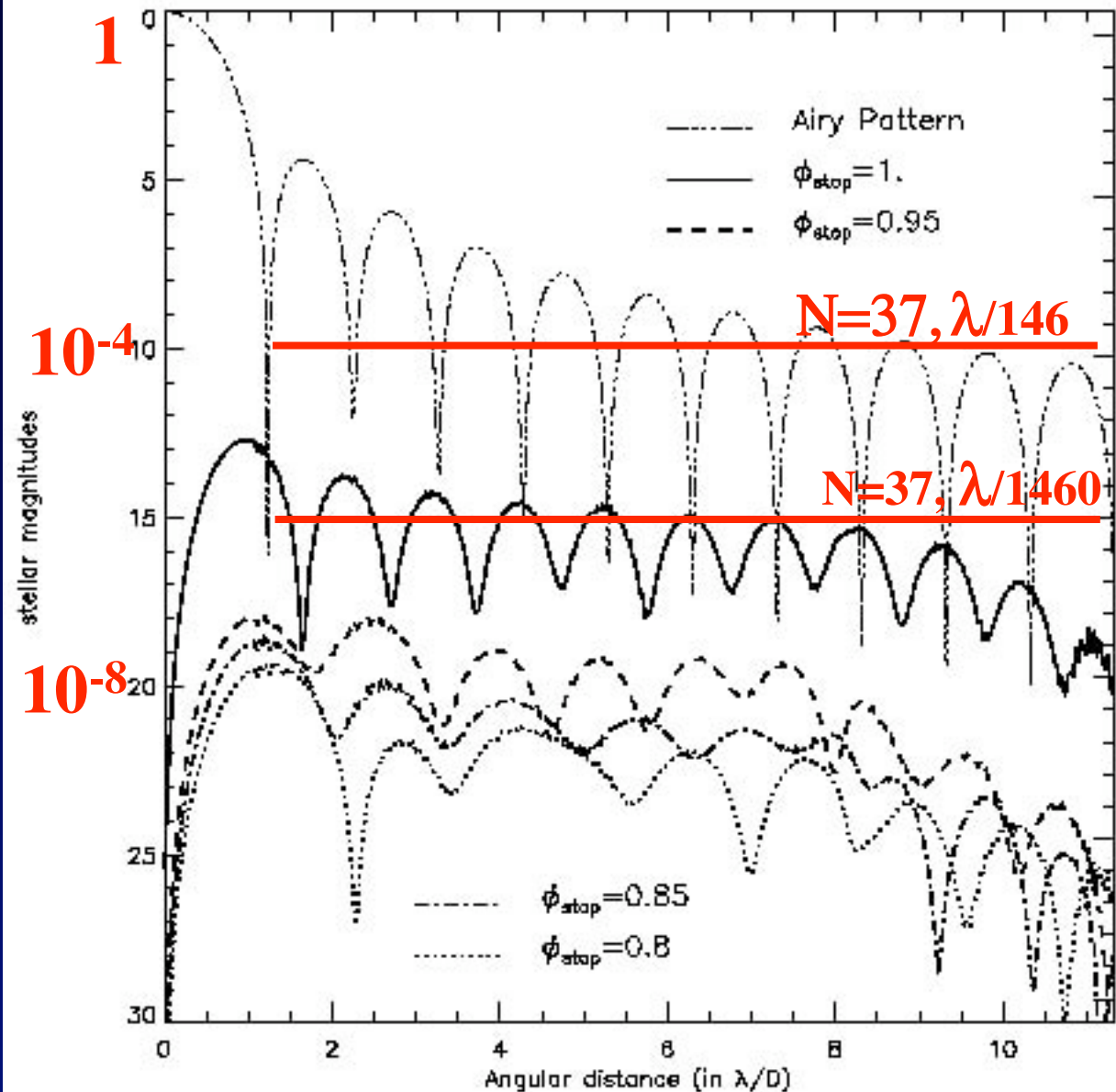
# Pourquoi la coronographie ?

- 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)

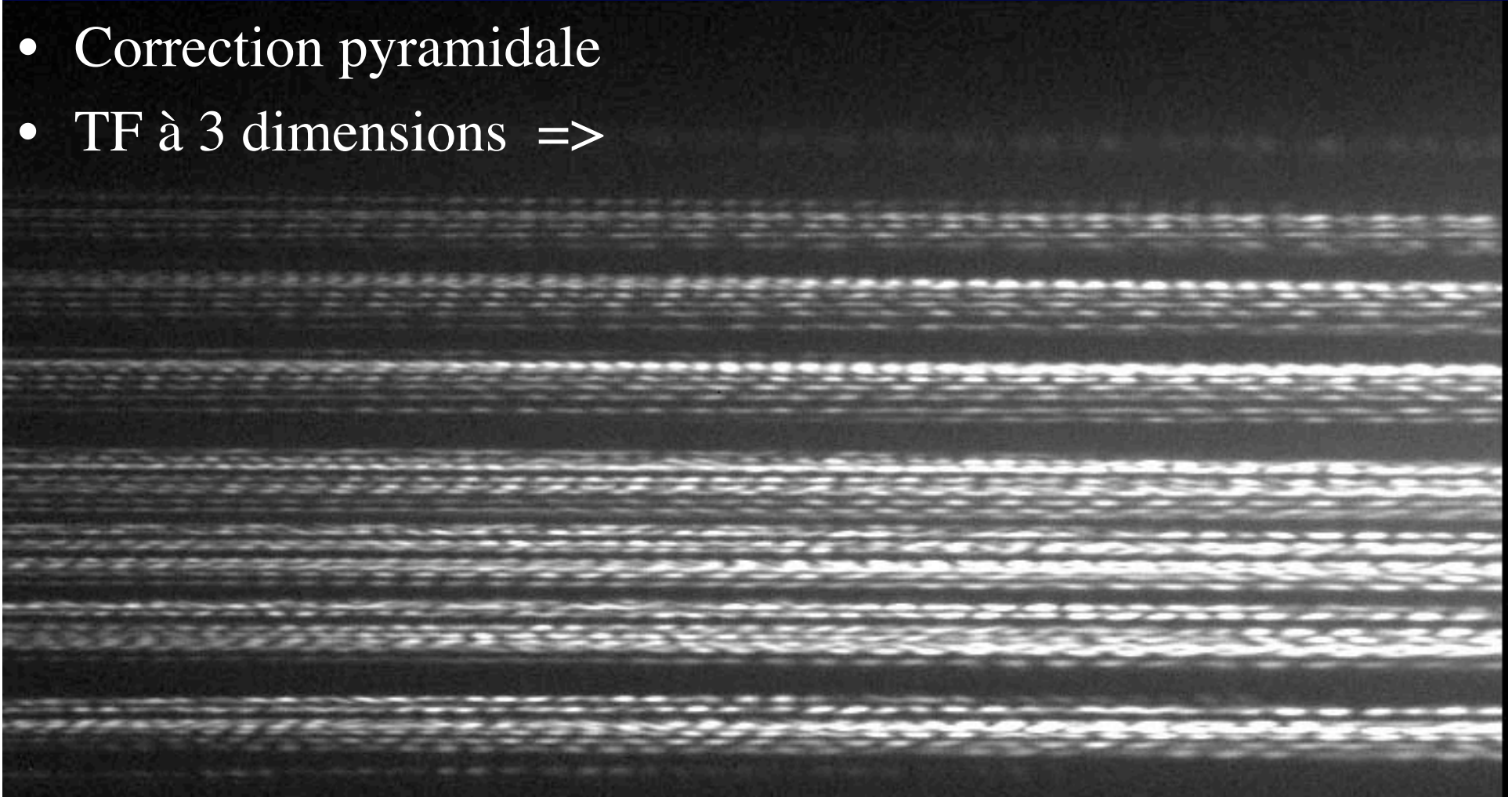
- Bonne sensibilité , utilisable pour coronagraphie adaptative (Borkowski et al. en préparation)
- Utilisable pour ouvertures redondantes
- théorème de.Martinache: le cube de sortie est l 'autocorrélation 3D de la surface d 'onde ( fonction binaire de  $u,v, \delta$ ) ( Martinache , en préparation)
-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

amplitude

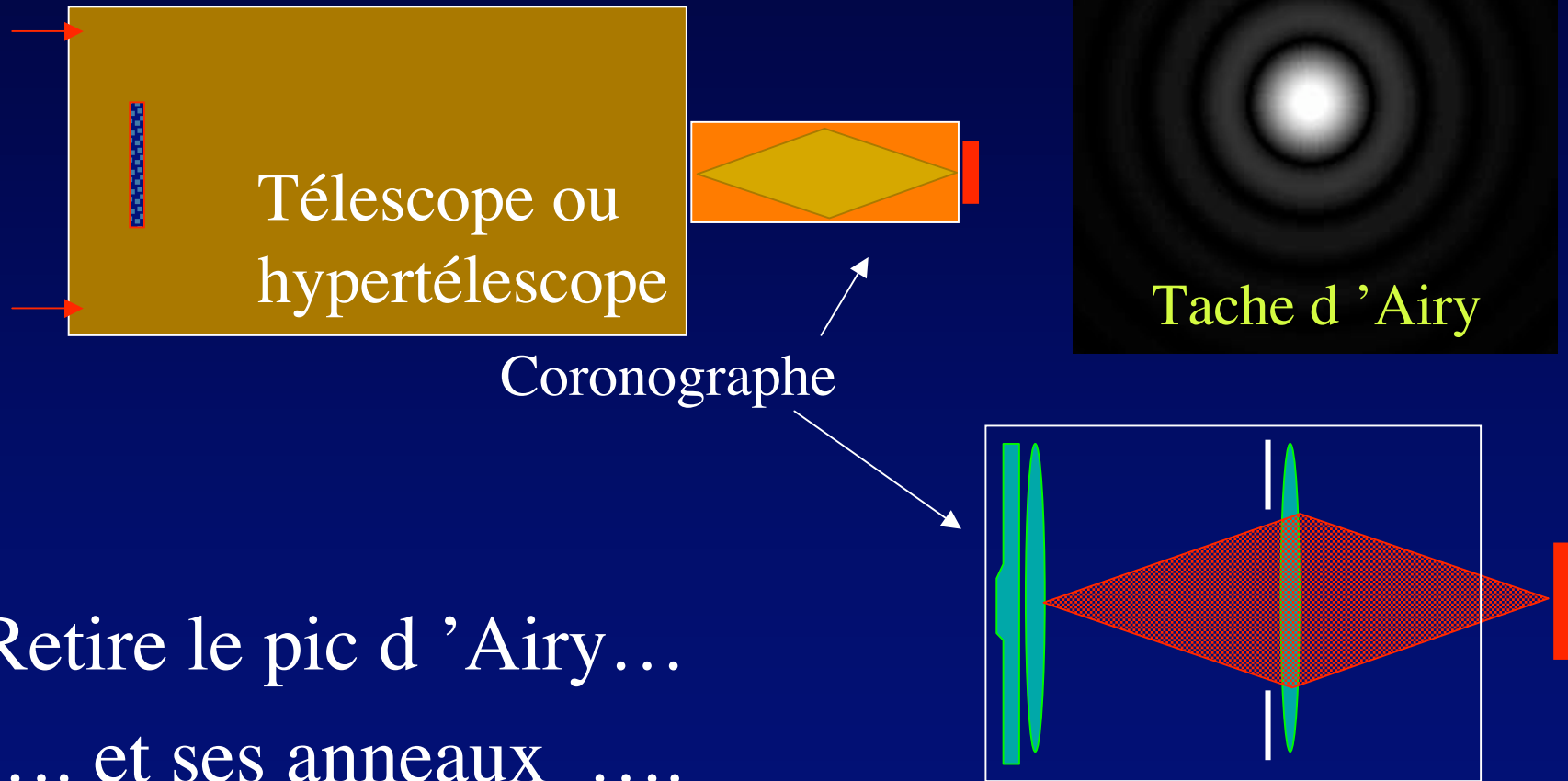
# Senseur de piston à « speckles dispersés »

(thèse en cours de V.Borkowski)

- Spectre de chaque speckle  $\Rightarrow$  image  $(x, y, \lambda)$
- 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

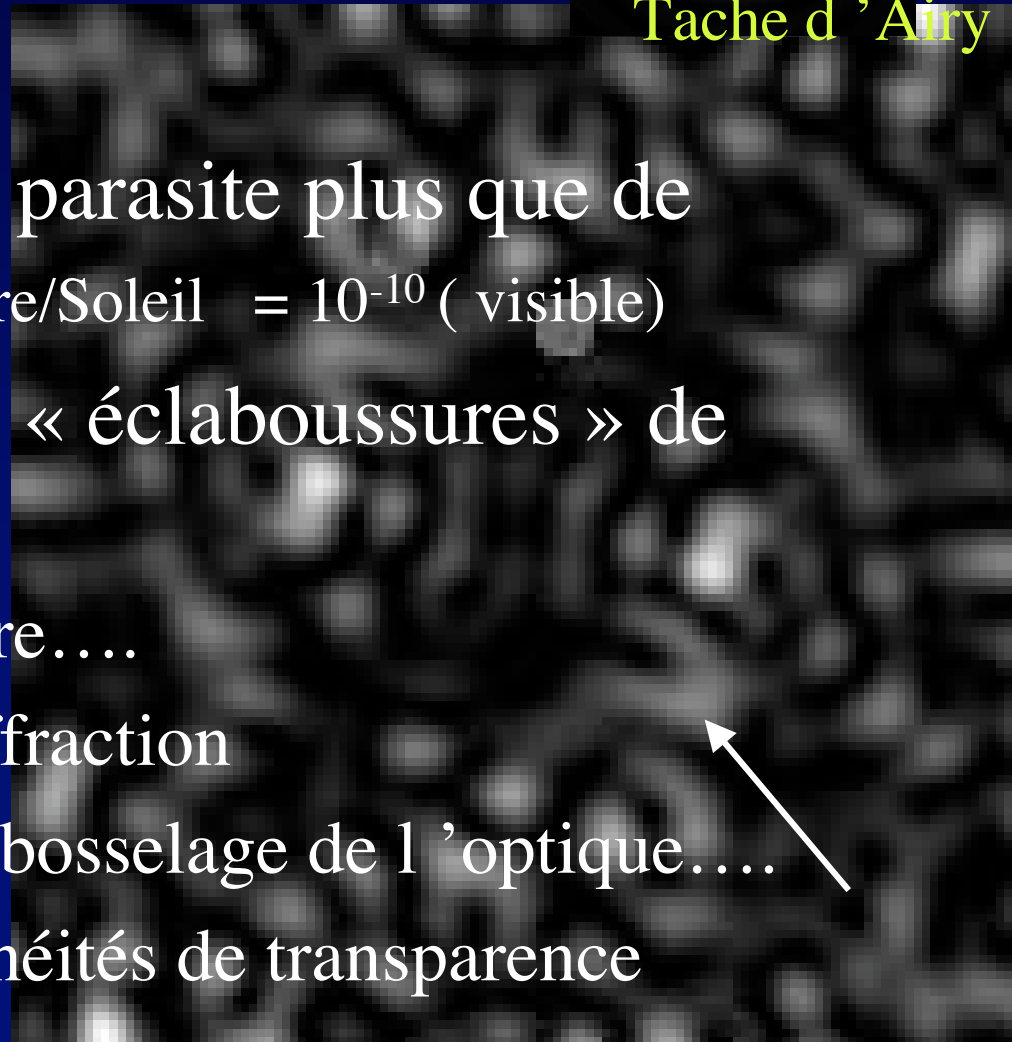


# Voir les planètes d 'étoiles



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

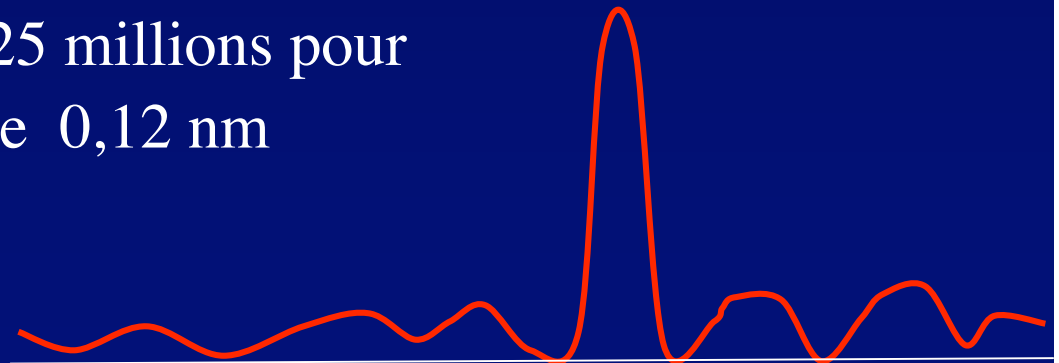
Pic/halo

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

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:

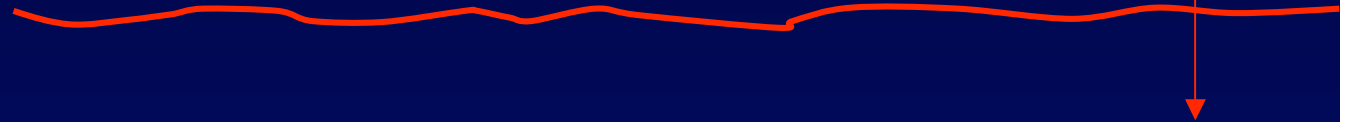
$$e^{i\phi(x,y)} = 1 + i\phi(x,y)$$

- 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

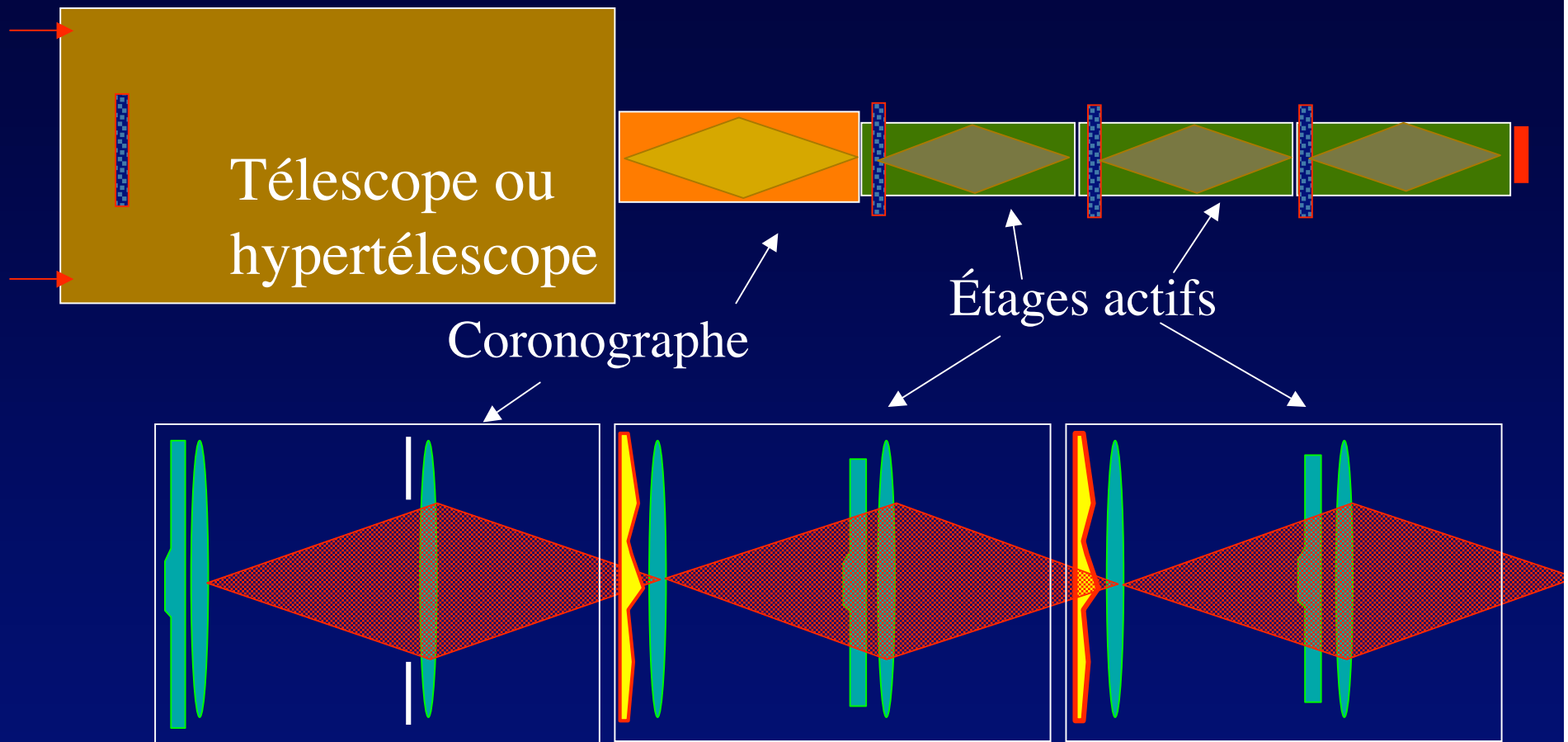
# Senseur d ' onde: pré- ou post-coronographe ?

- 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

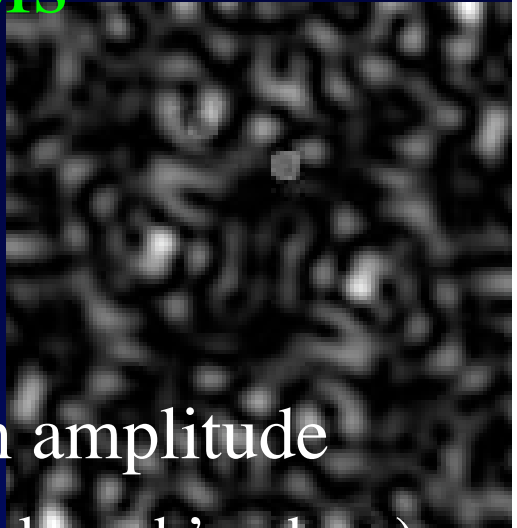




# Exo-planètes: visible ou infra-rouge thermique ?

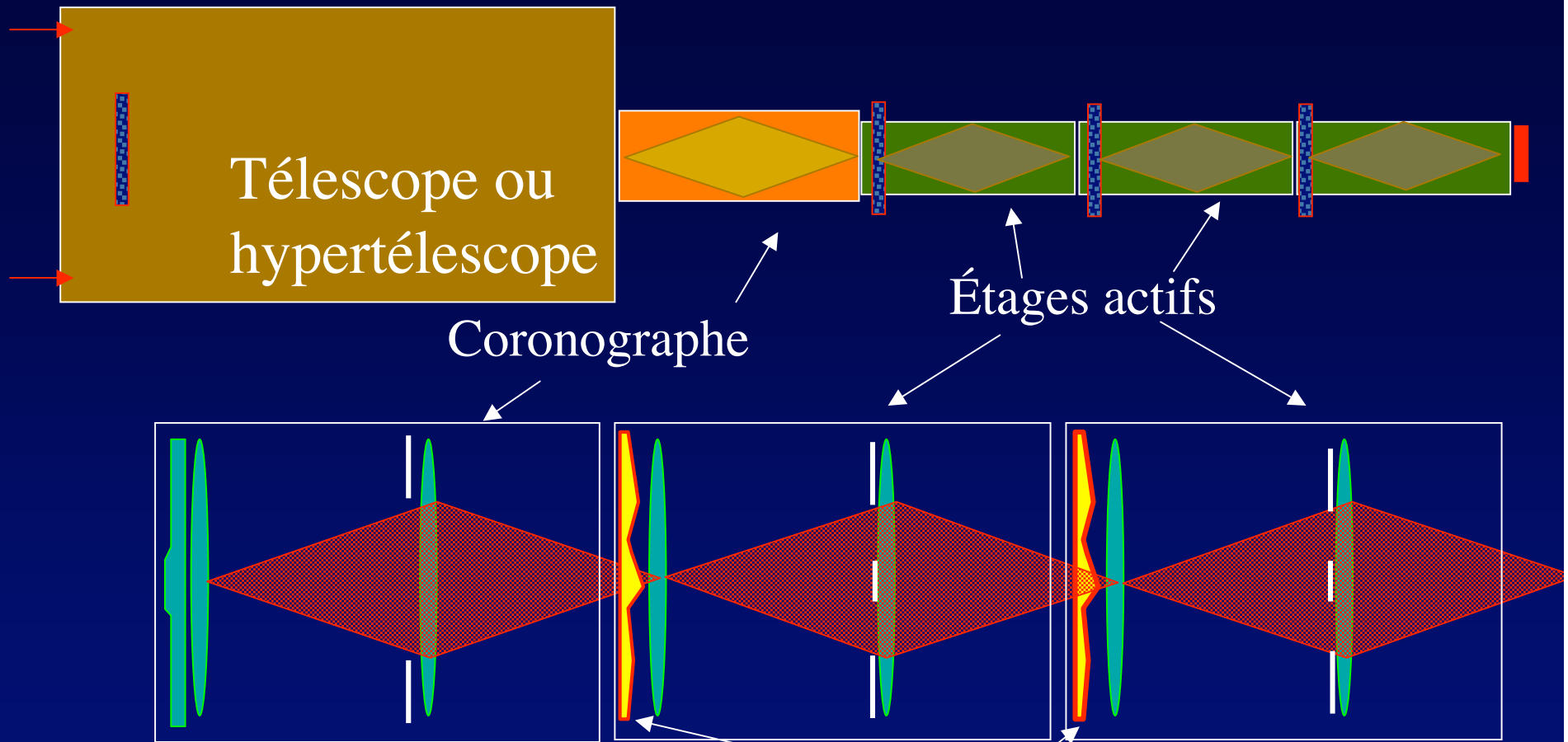
- Résolution: une ouverture de quelques mètres suffit dans le visible, mais pas à 10 microns
- Contraste planète/étoile ( exo-Terre) :
  - visible  $10^{-10}$
  - infra-rouge  $10^{-6}$
- Nécessite des raffinements: lesquels ?

# 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

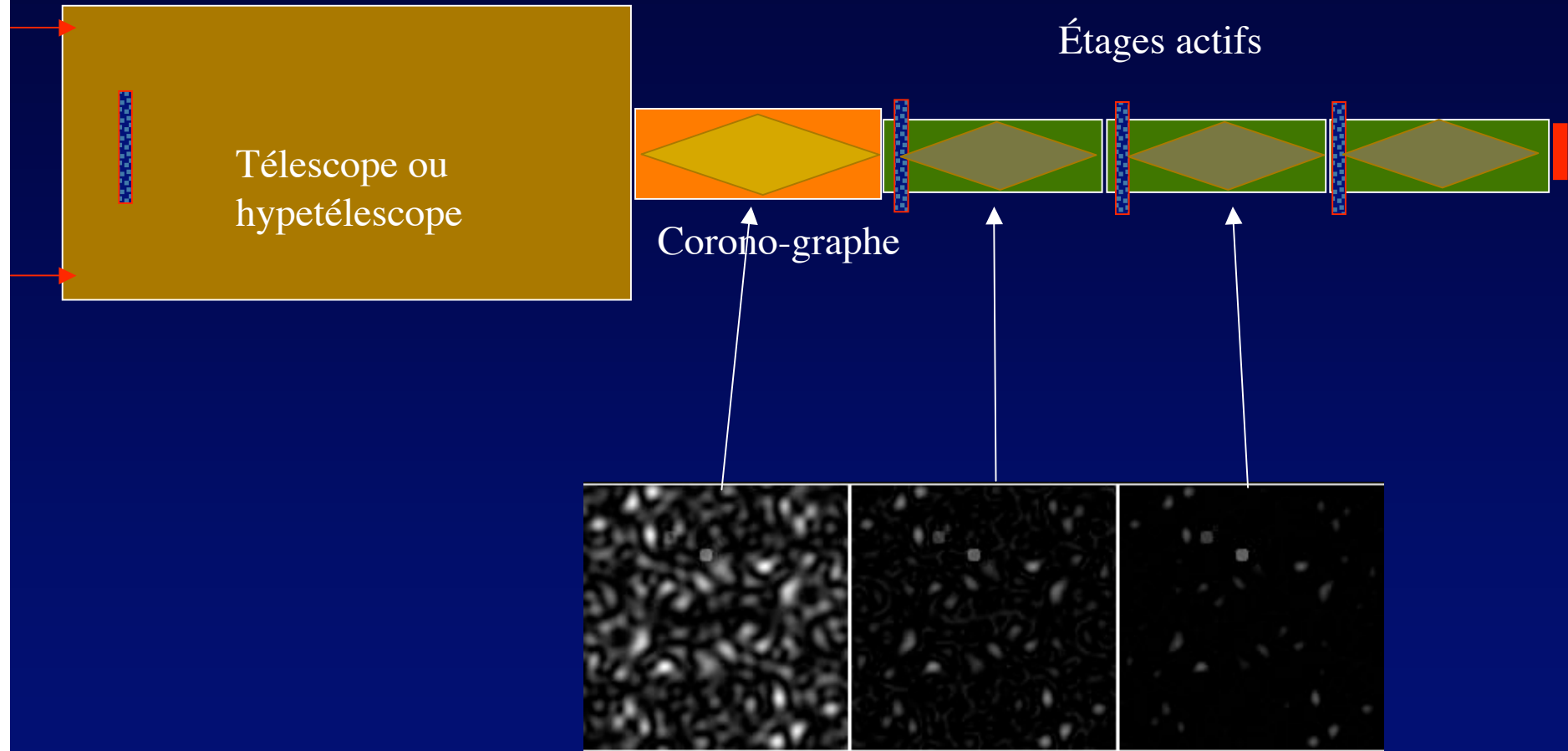
# Coronographe et étages actifs additionnels



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

Lame déformable

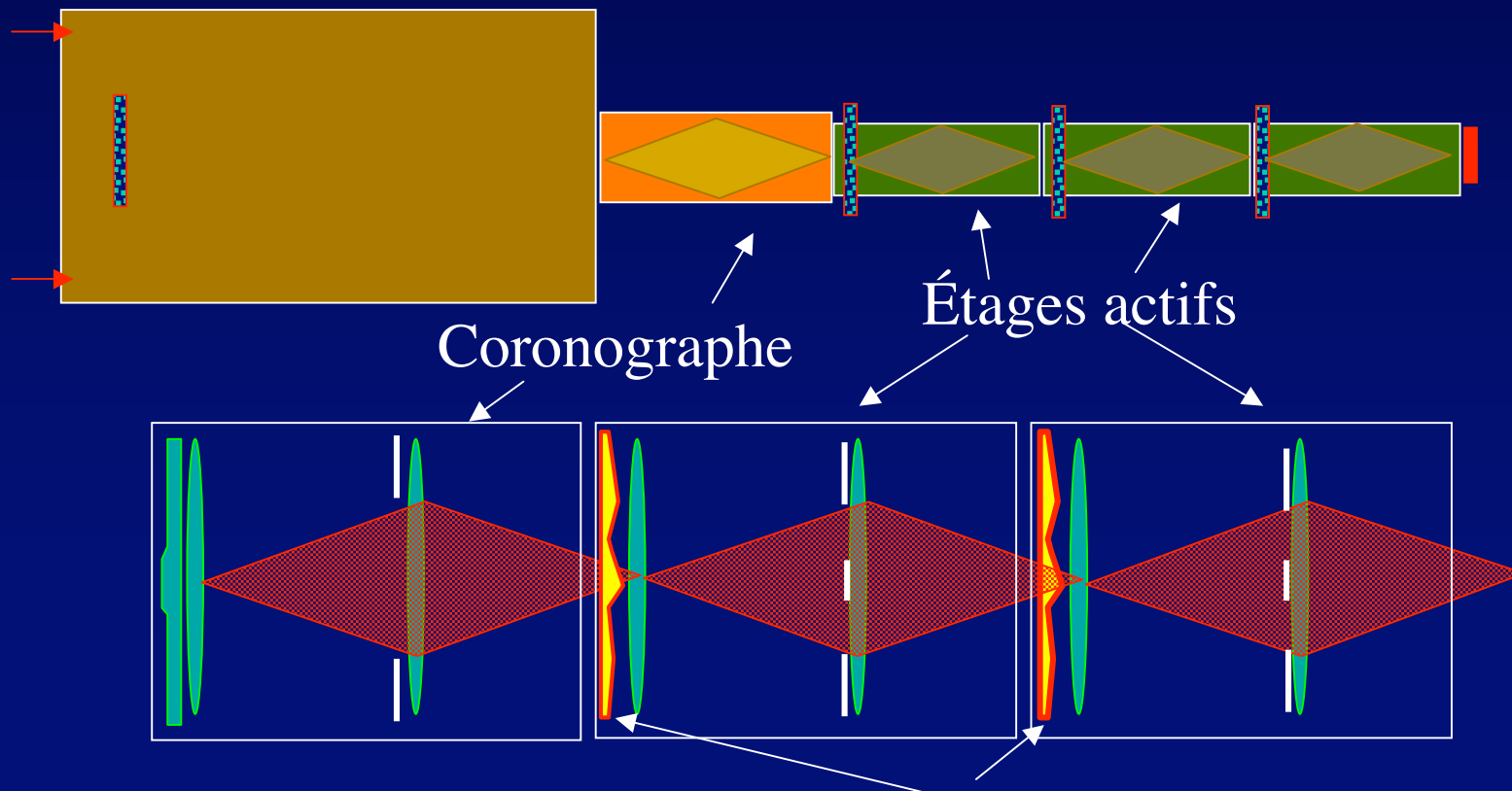
# Coronographe et étages actifs additionnels



- 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  $\phi$

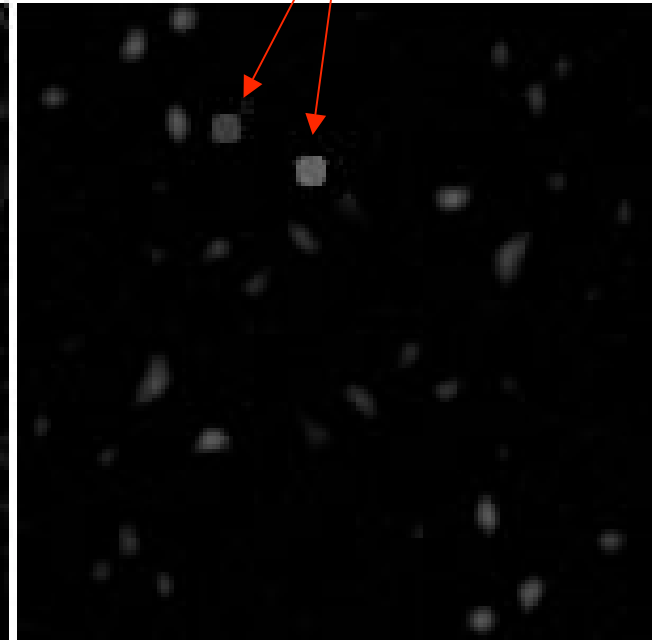
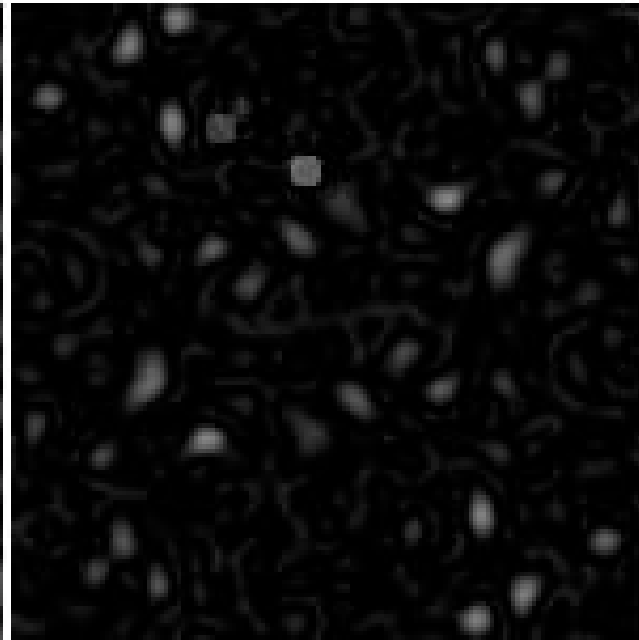
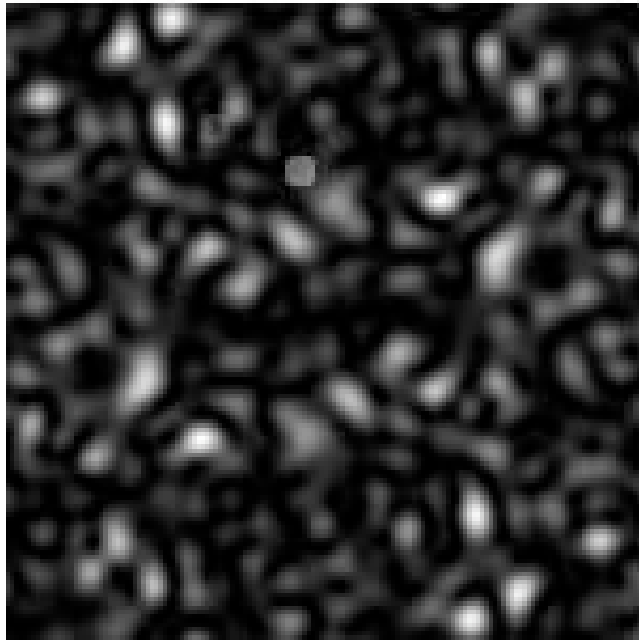
Résidus  $\pm \pi$

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



# Simulations

planètes



résidu moyen 1

0,17

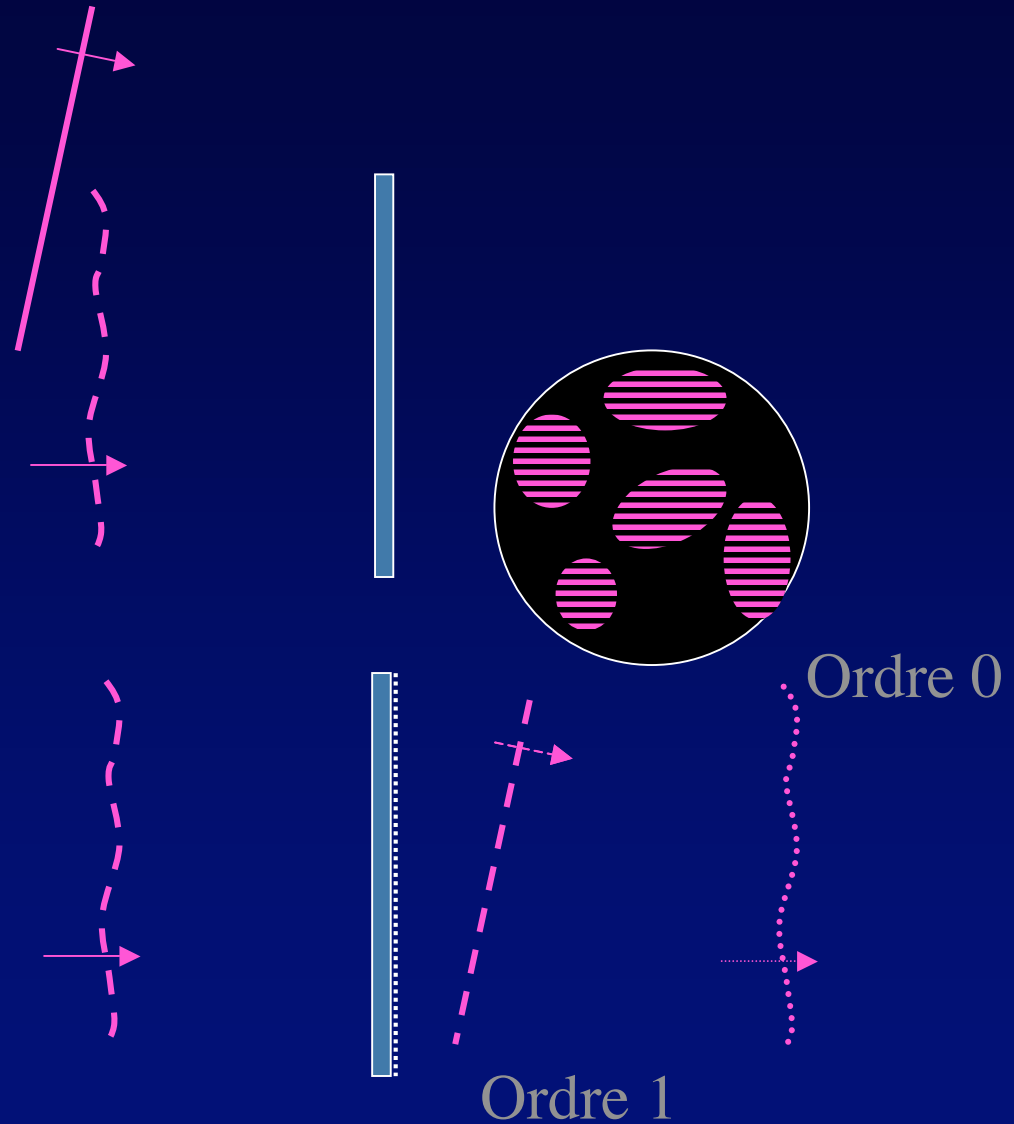
0,02

- 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.)

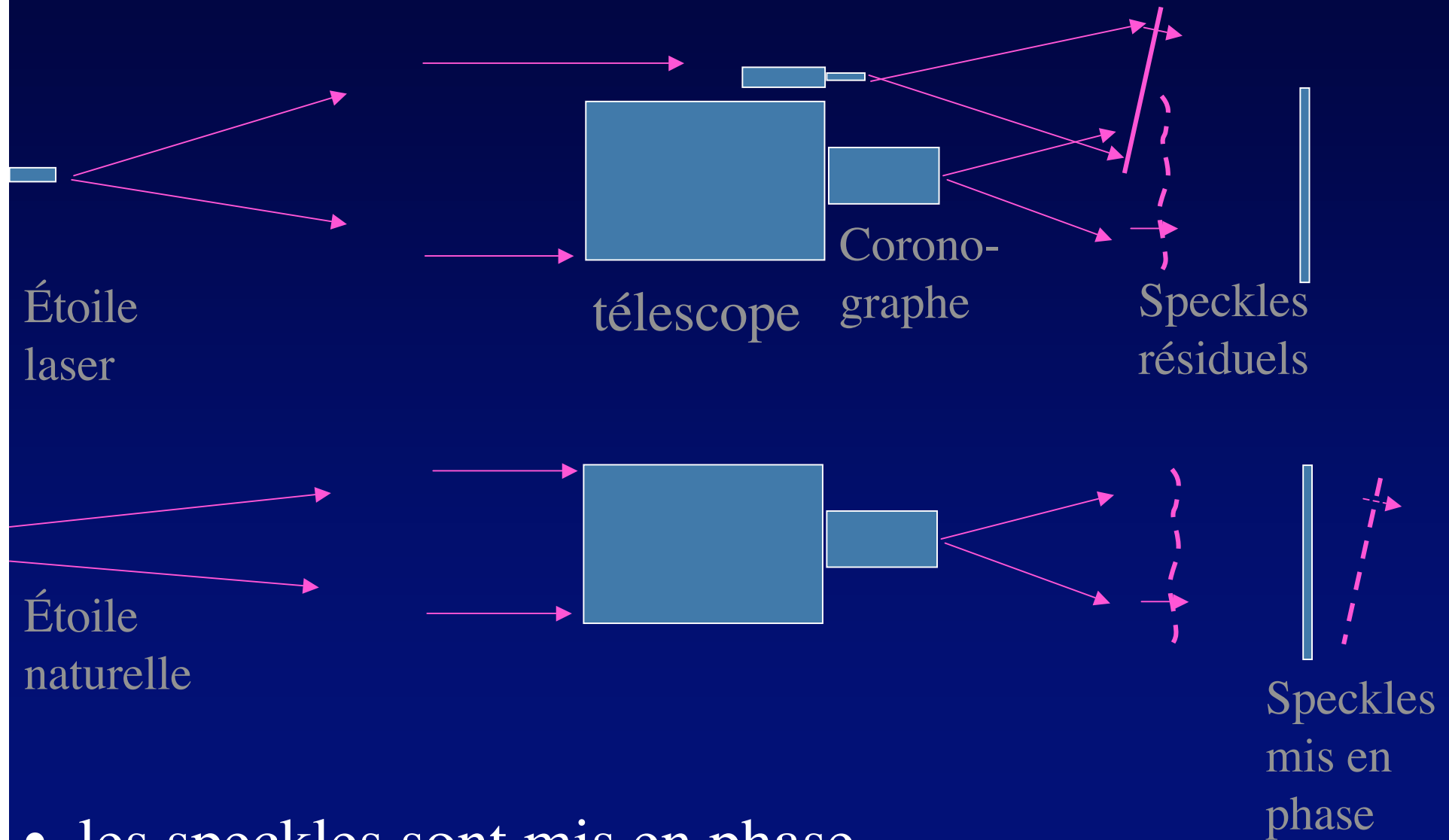
enregistrement

reconstruction

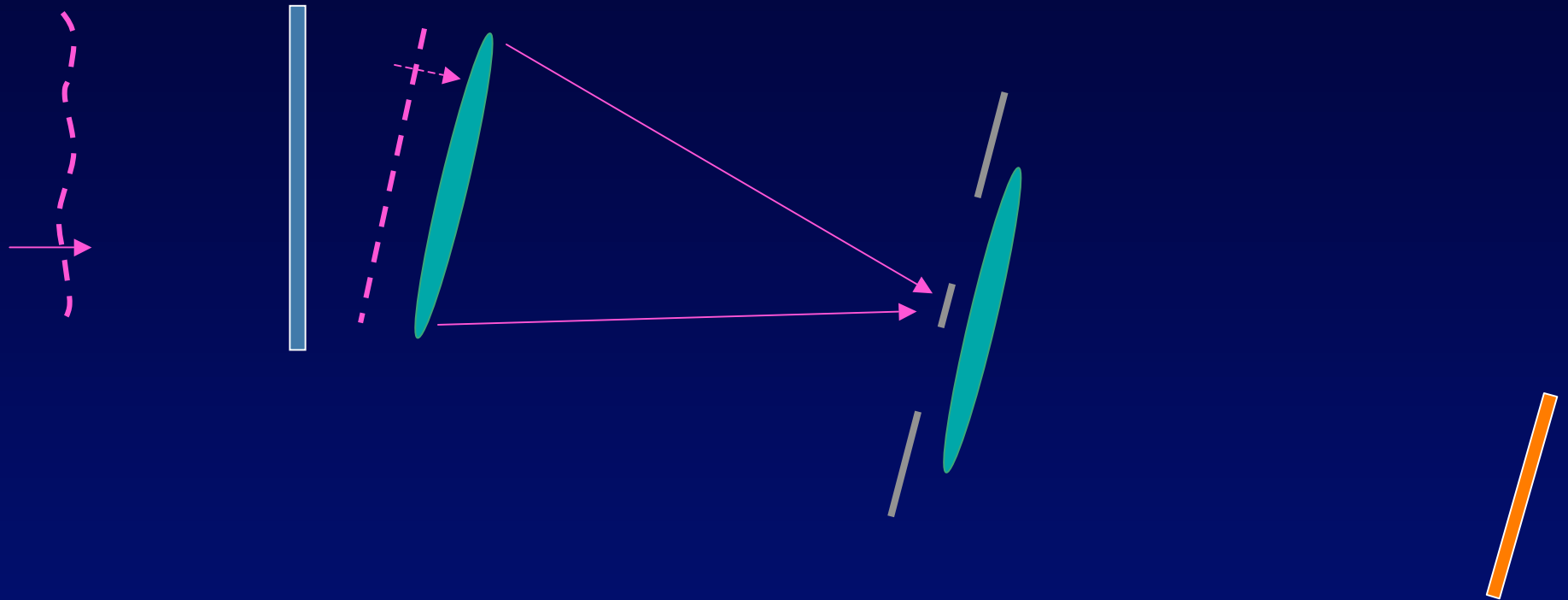


- les speckles sont reconstruits, et mis en phase

# enregistrement de l'hologramme avec une étoile laser



# 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)

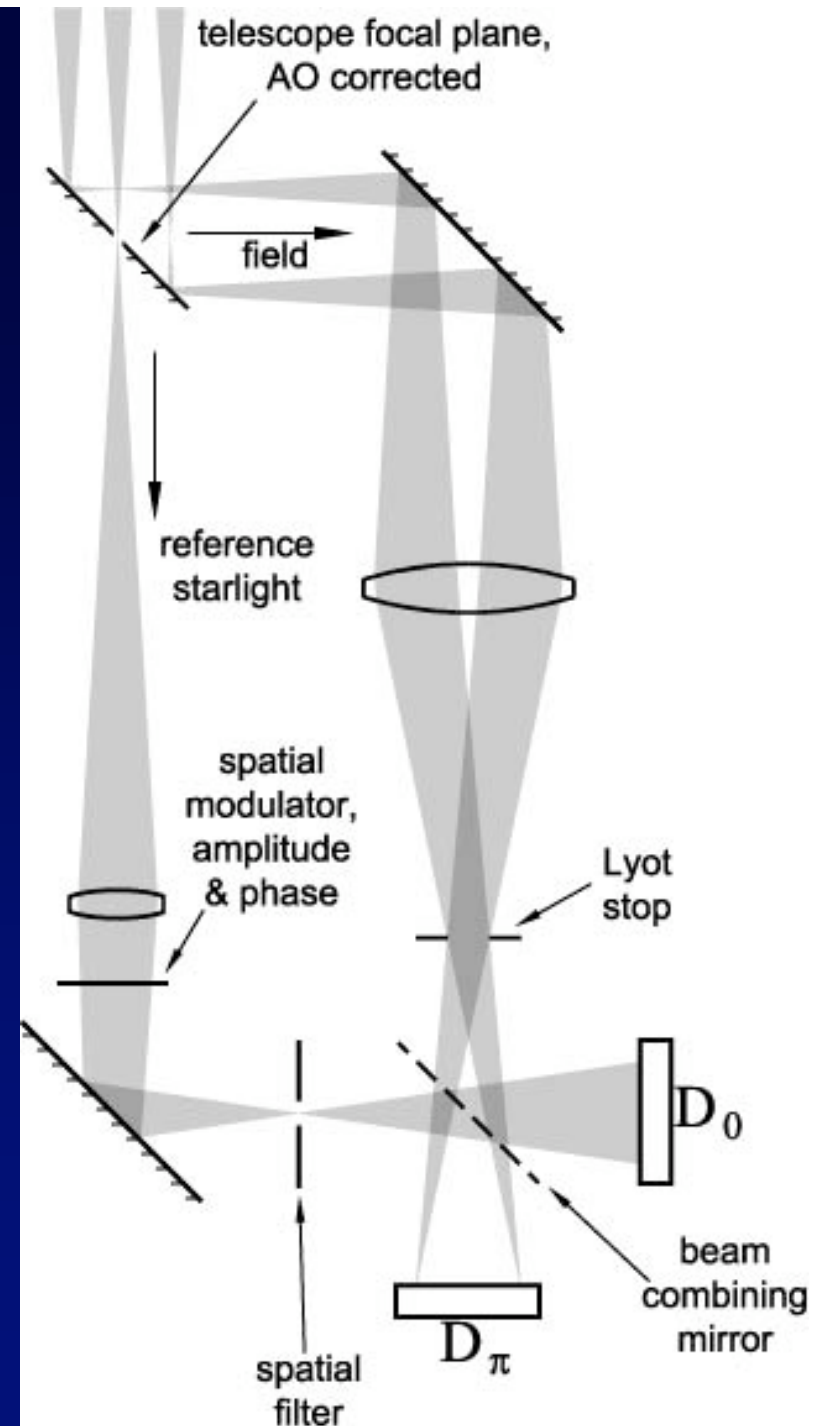
# Simulations d'atténuation holographique par Rick Lyon (NASA/GSFC)

- ..... 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 !)

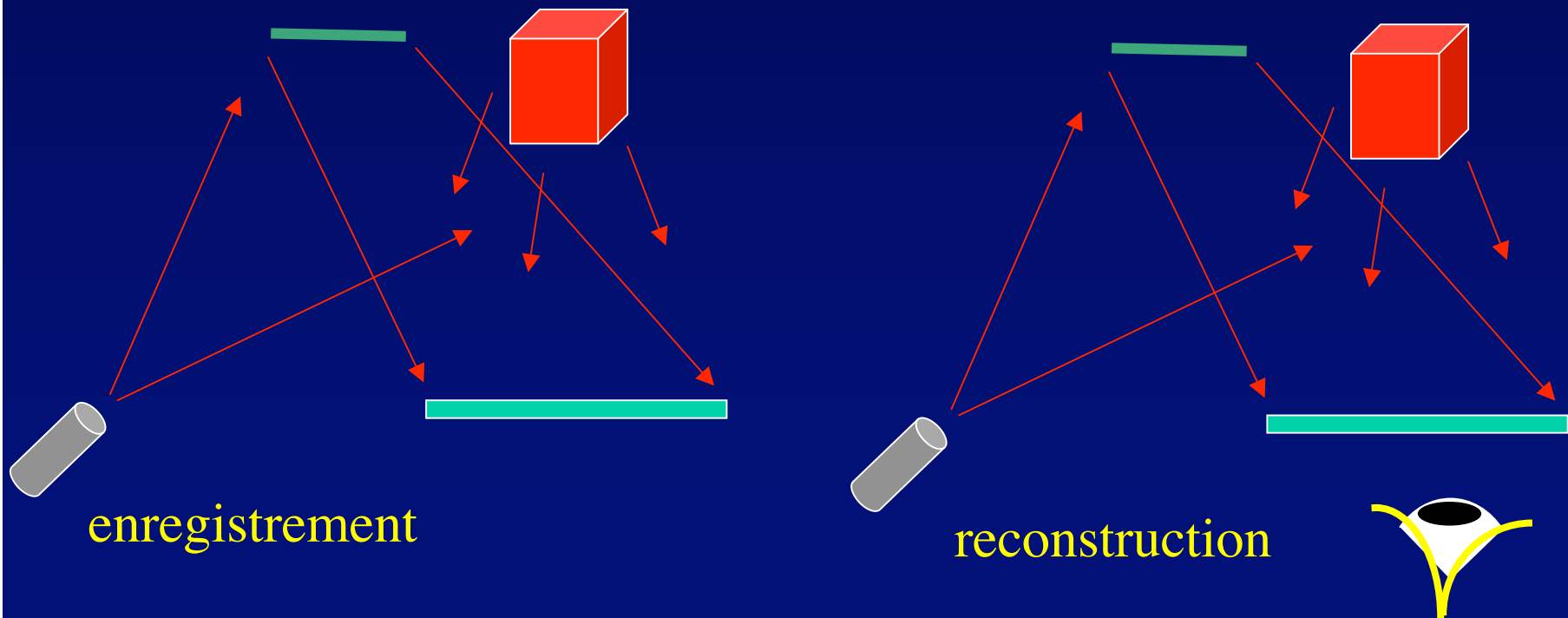
## Interféromètre Mach-Zehnder pour annuler activement les résidus stellaires

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

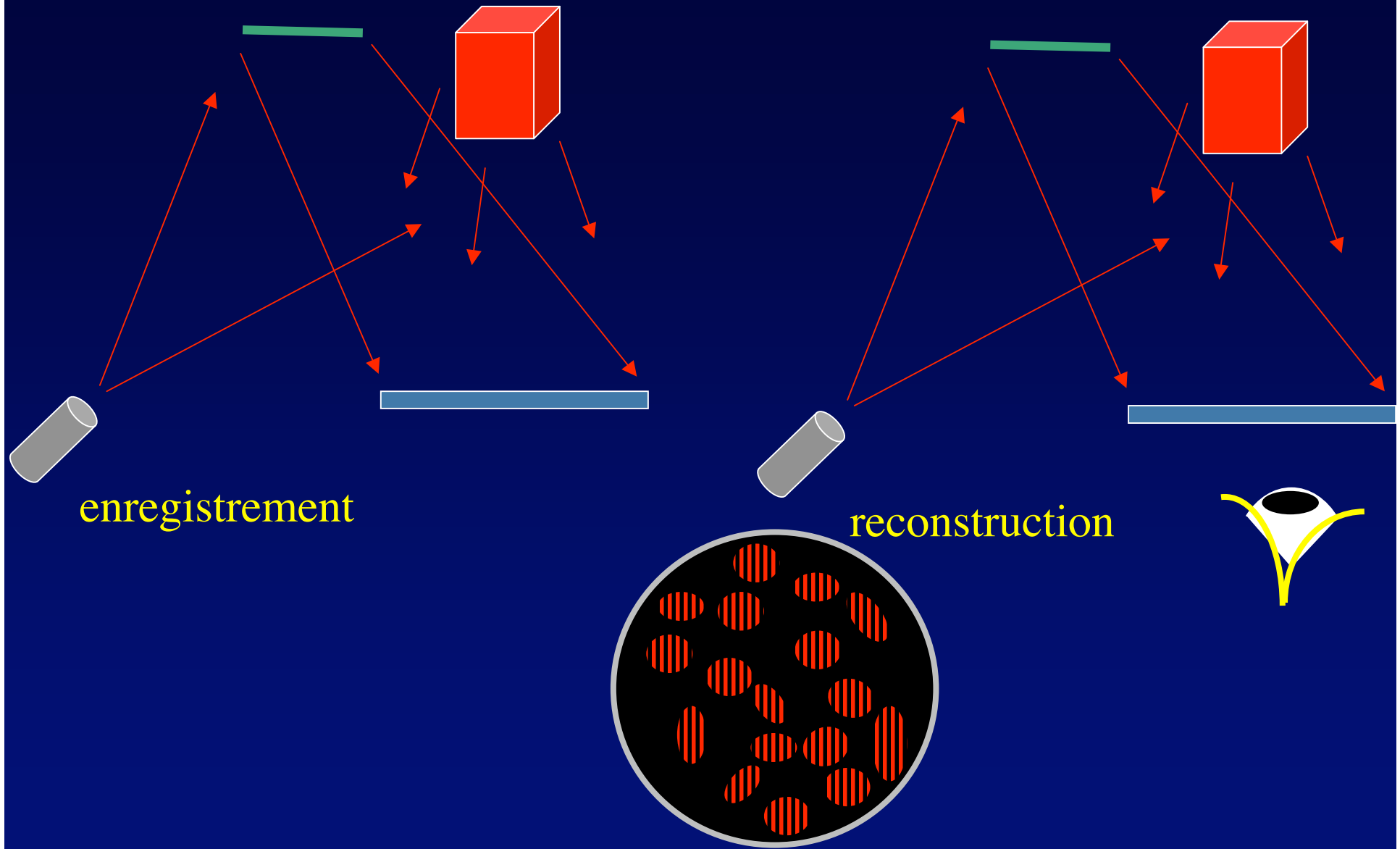


Prendre le meilleur des méthodes de Lyon et d'Angel:  
**hologramme annulant les résidus d'étoile**

- 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  $\pi$

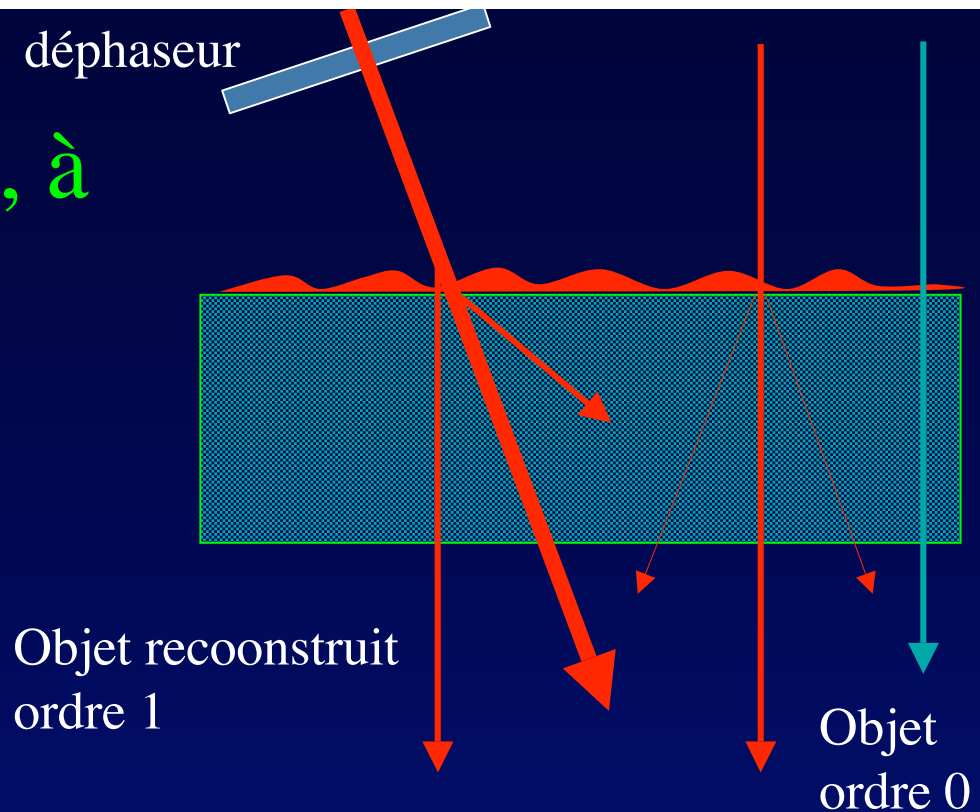






- Hologramme = speckles frangés

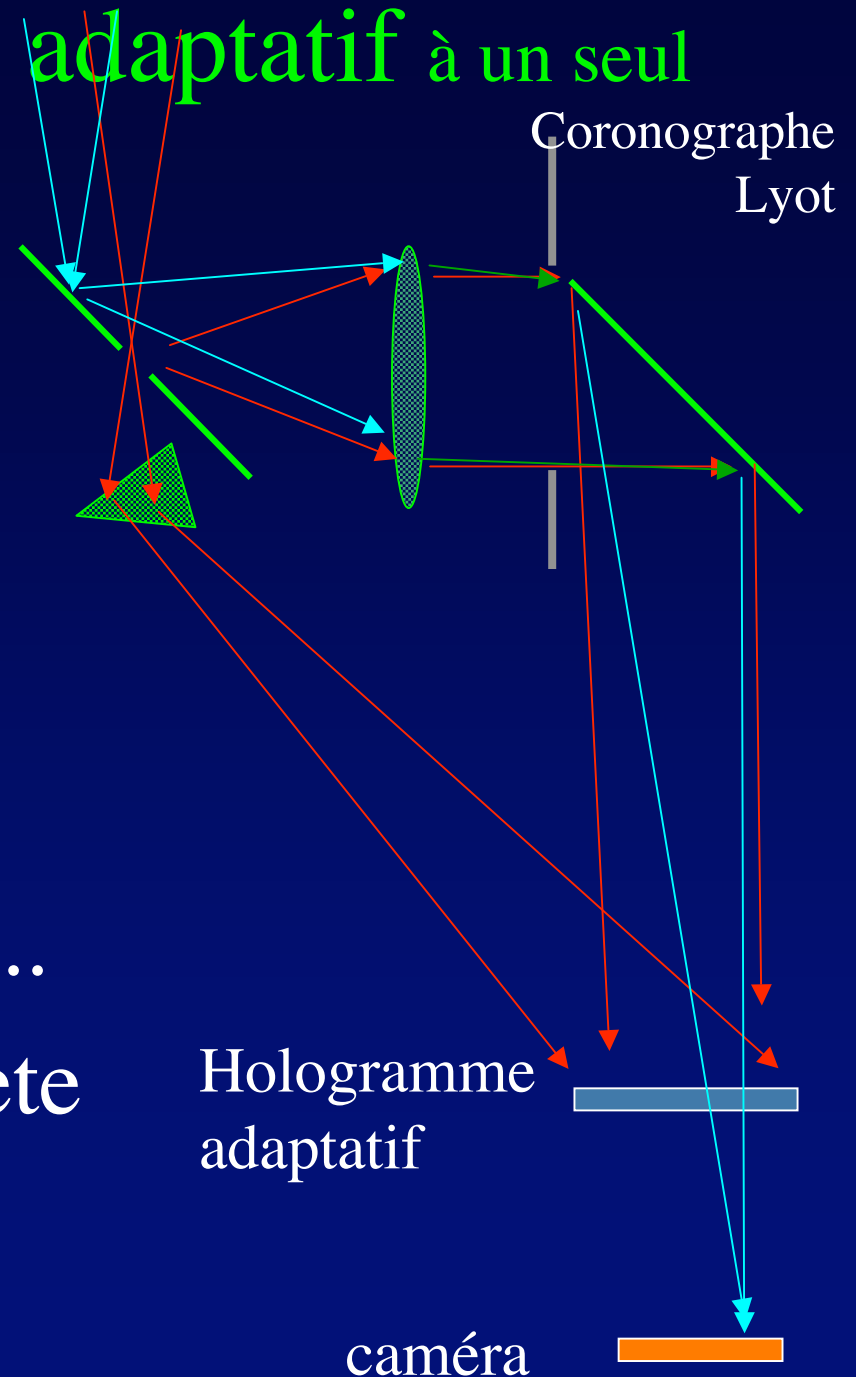
## Hologramme de phase, à faible efficacité de diffraction



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

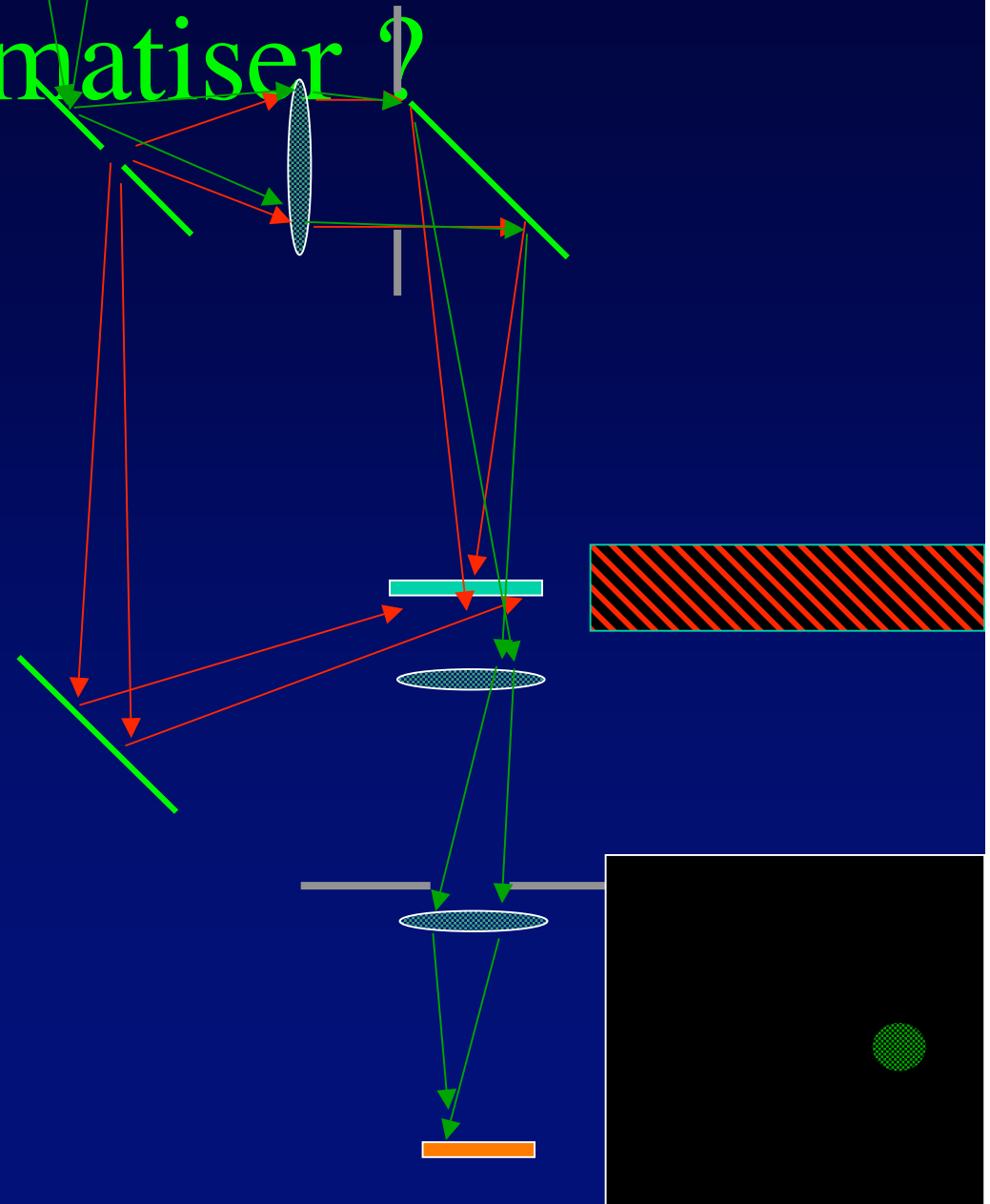
# nettoyeur holographique adaptatif à un seul étage

- 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 ?

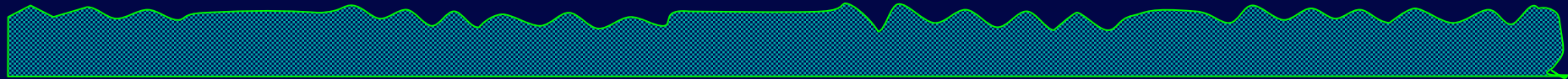


Dans l'espace:

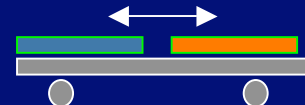
correcteur statique pour mettre en phase les speckles ? ( Nisenson 2003 )

- 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

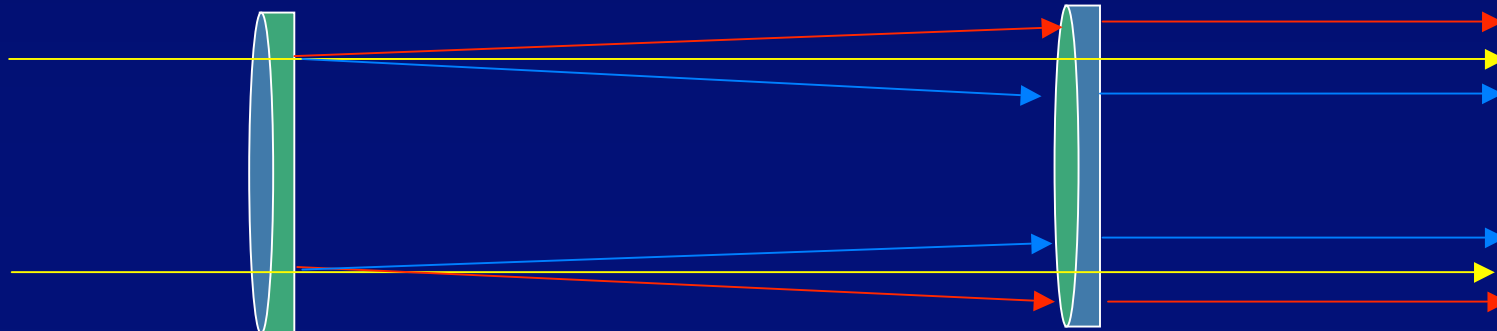
Bosselage

$\phi(x,y)$

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

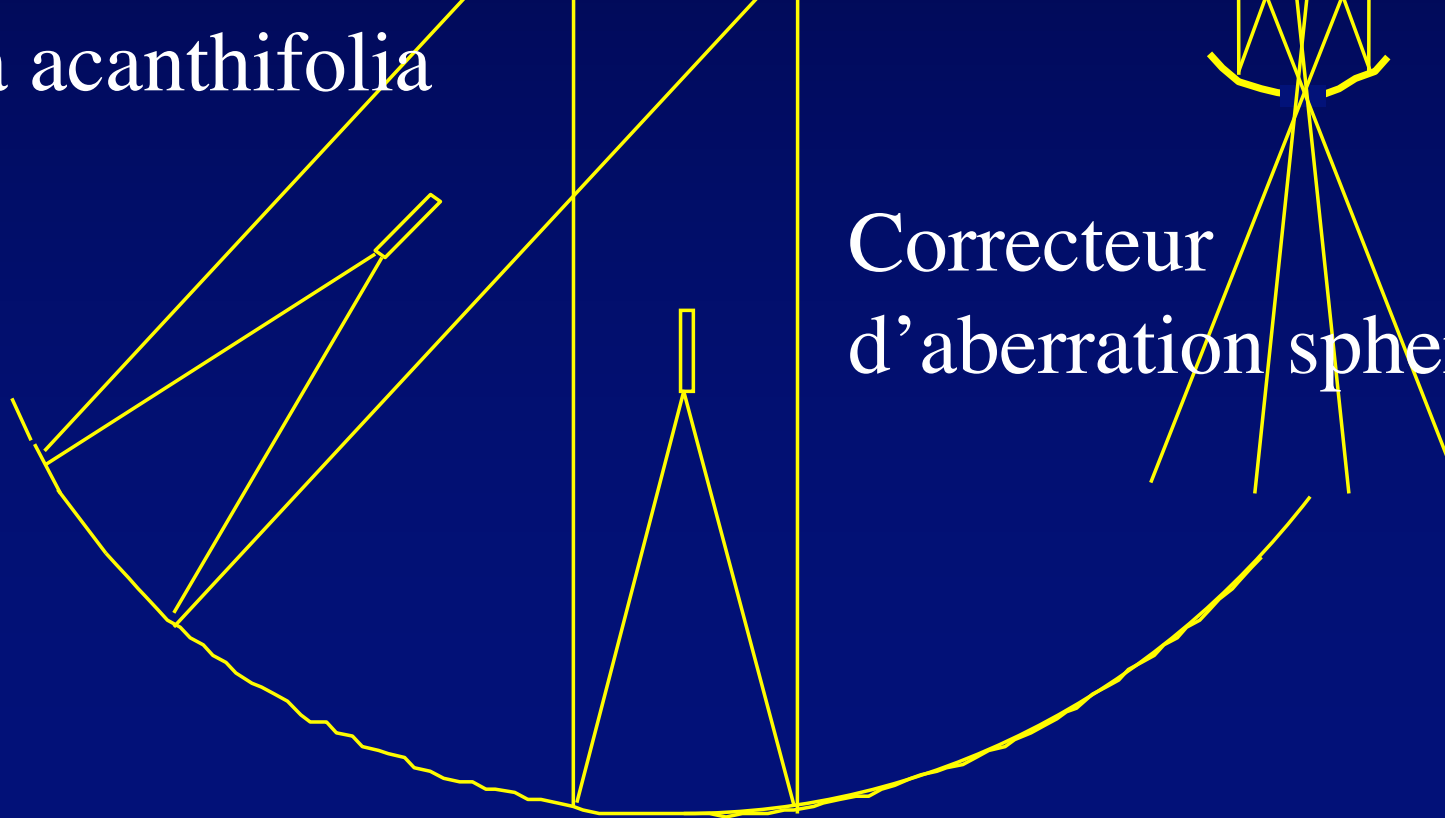
# hypertélescope riche: apodisation par lacunes (Le Coroller & Labeyrie, en préparation)

- 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

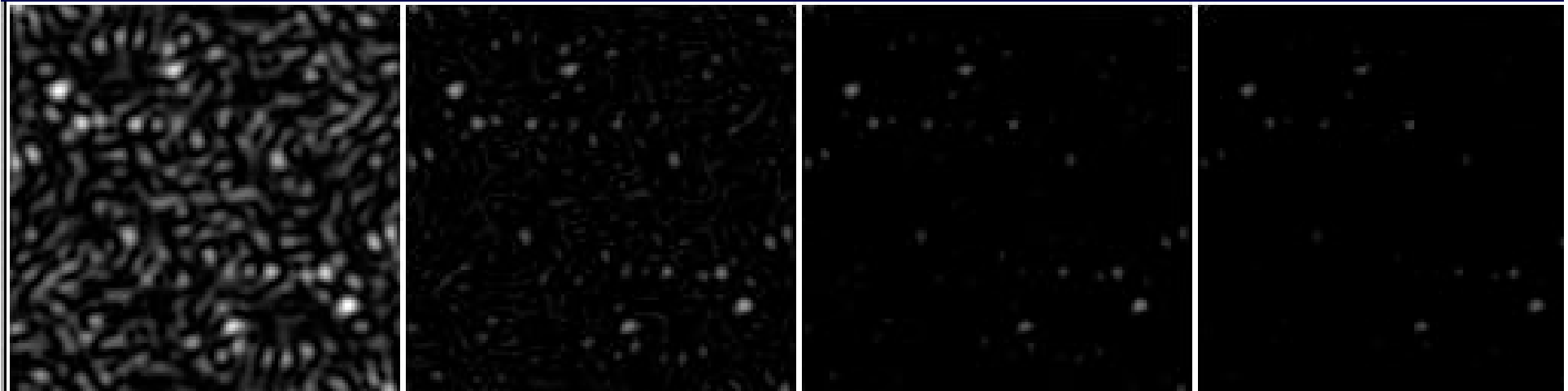
# Achromatiser un coronographe multi-étage

- 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  $\lambda$ .





# 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