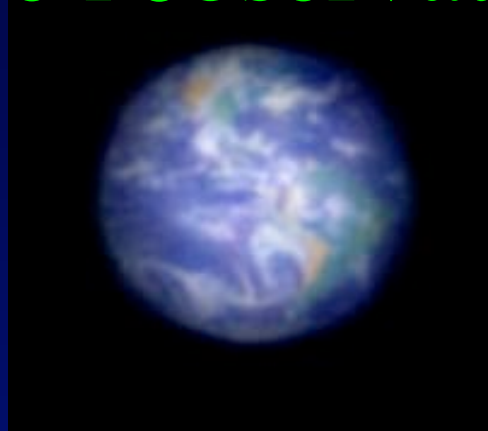


Collège de France

Chaire d' Astrophysique Observationnelle

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



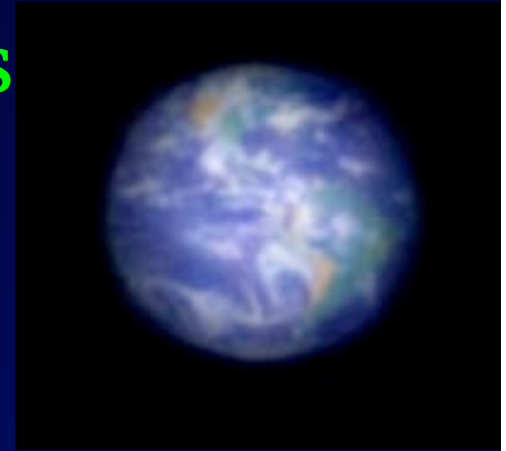
- Cours à Paris les mercredis du 31 Mars au 26 Mai
- Détails sur [www.college-de-france.fr/chaieres/chaire11/lise.html](http://www.college-de-france.fr/chaieres/chaire11/lise.html)
- les fichiers des projections seront affichés sur [www.oamp.fr/lise](http://www.oamp.fr/lise)

# Programme

affiché sur: [www.college-de-france.fr/](http://www.college-de-france.fr/)

- 5 Mai
  - Coronographie extrême pour rechercher des exo-Terres: atténuation holographique des résidus stellaires
  - Séminaire: Tim Hawarden UK Astronomy Technology Centre, Edimbourg  
" GISMO: A Giant Far-IR and Sub-millimeter space Observatory"
- 12 Mai:
  - Coronographie extrême pour rechercher des exo-Terres: atténuation holographique des résidus stellaires ( suite)
  - Séminaire: Michel Mayor, Observatoire de Genève  
" Les planètes extra-solaires: Qu'a-t-on appris au vu de leurs propriétés statistiques ?"
- 19 Mai :
  - Mise en cohérence et en phase des interféromètres et hypertélescopes: la méthode des tavelures dispersées
  - Séminaire: Pierre Kervella, Observatoire Européen Austral  
"Premières observations de Céphéides avec l'interféromètre du VLT »
- 26 Mai
  - Mise en cohérence et en phase des interféromètres et hypertélescopes: la méthode des tavelures dispersées ( suite)
  - Séminaire: à préciser

Aujourd'hui : Coronographie extrême pour  
rechercher des exo-Terres: atténuation  
holographique des résidus stellaires



Séminaire à 17h30: Tim Hawarden, UK

Astronomy Technology Centre, Edimbourg

« GISMO: A Giant Far-IR and Sub-  
millimeter space Observatory »

# Exo-planètes.... ça existe



Artist's View of Planet around the Star HD 209458

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



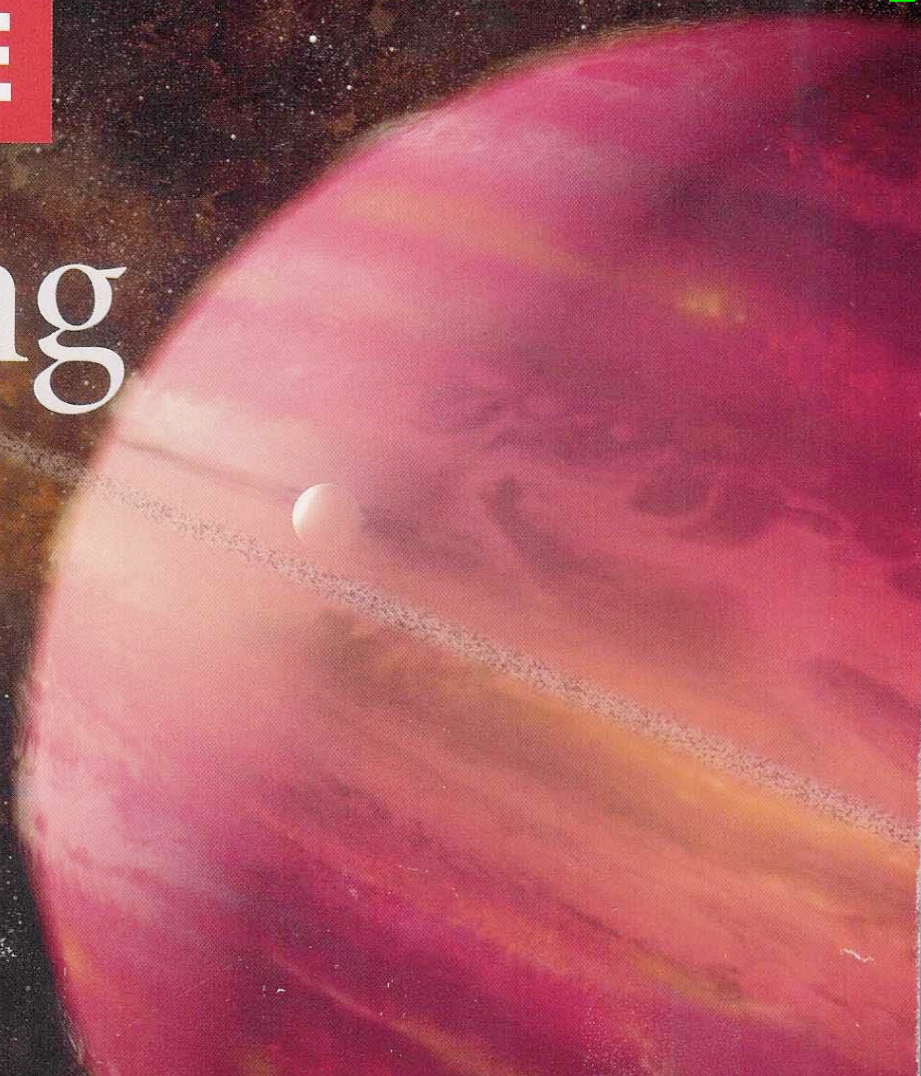
# SKY & TELESCOPE

APRIL 2004

## Picturing Other Worlds

The race to  
photograph  
planets orbiting  
nearby stars

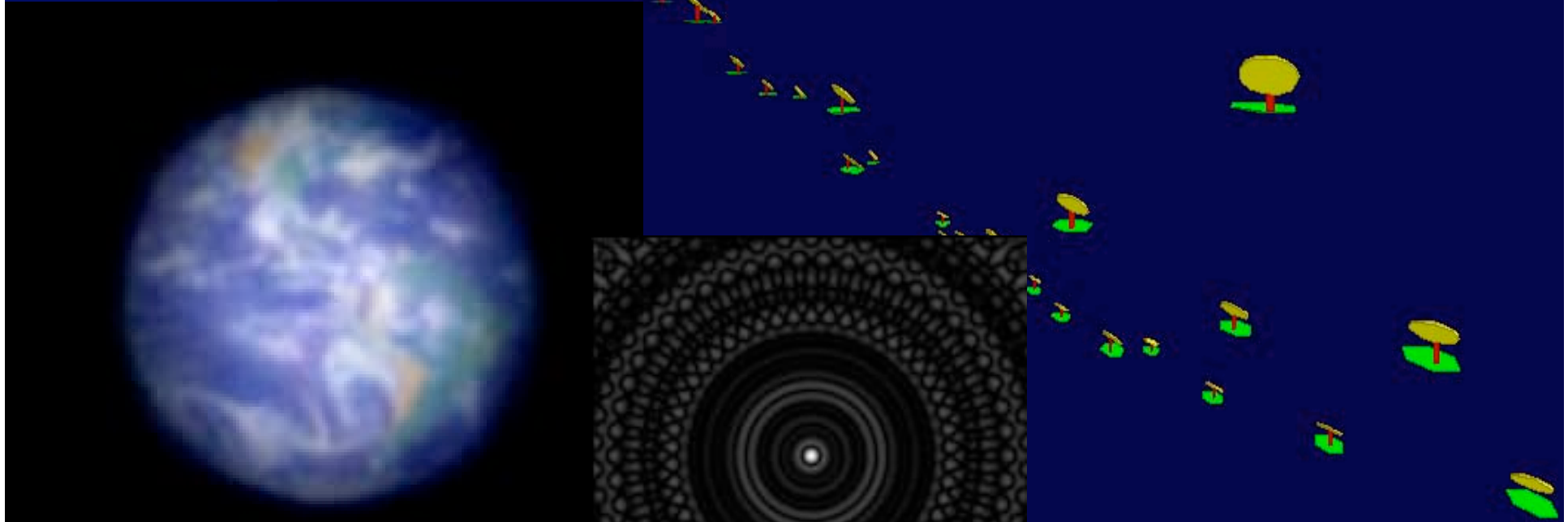
Photographier les  
planètes des étoiles  
proches



# Dans 20 ans ? Exo-Earth Imager

150 miroirs  
de 3m  
150 km

Terre à 3pc  
Pose 30mn





# Récente décision NASA pour le projet Terrestrial Planet Finder:

## lancer TPF C puis TPF 1

- TPF C :
  - télescope coronographique de 4 x 6m
  - visible
- TPF 1 :
  - Interféromètre
  - vol en formation
  - infra-rouge 10 microns
  - collaboration avec ESA

## Rappel:

# Méthodes pour détecter des exo-Terres

- **Visible:** coronagraphie extreme avec telescope  $> 2m$   
( Bonneau et al. 1975, Moutou et al. 1998 , Nisenson et al.2002 )

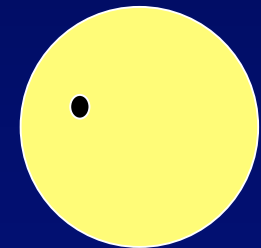
- **Infra-rouge :**

- Nulling interferometer ( DARWIN, TPF)

- **Ou:** interféromètre imageur coronagraphique  
(hypertélescope coronagraphique)

- **Transits:**

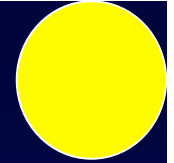
- photométrie
- image d 'étoile résolue avec Exo-Earth Discoverer



- spectroscopie Doppler et astrométrie de l 'orbite reflex de l 'étoile (Mayor & Queloz 1997, Shao et al. 1997)
- Lentille gravitationnelle : quelques cas, non confirmables



# Detecter la lumière d'exo-Terres



- Essentiel pour la recherche spectroscopique de vie, mais difficile
  - faible luminosité relativement à l'étoile
    - $10^{-9}$  à  $10^{-11}$  dans le visible, soit  $\Delta m = 25$  à  $30$
    - $10^{-6}$  dans l'infra-rouge thermique (10 microns)  
(Bracewell 1978)
- Mais assez de photons avec quelques mètres carrés d'ouverture
  - Exemple: 6 photons/s si  $m_v = 26$ ;  $D = 3\text{m}$ ;  $\Delta\lambda = 100\text{ nm}$   
(visible)
- Faisable dans le visible avec la «coronagraphie extreme »

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



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

# Origines de la coronographie stellaire

- Inutilisable au sol sans optique adaptative
- Proposition à la NASA pour le télescope Hubble ( Labeyrie 1974)
  - exo-Terre détectable: Bonneau, Josse & Labeyrie, 1975  
(affiché sur [www.oamp.fr/lise/publis/bonneauetalHST.pdf](http://www.oamp.fr/lise/publis/bonneauetalHST.pdf))
- Instrument HST/ Faint Object Camera construit par l'ESA
- Rendu inopérant par le défaut de fabrication du miroir de HST
- Coronographie adaptative au sol:
  - Clampin et al., Lagrange et al., Mouillet et al.

# La détection coronographique d 'exo- Terres est devenue un argument pour les projets de très grands télescopes au sol

- Concerne aussi les hypertélescopes sol et espace
- Mais la turbulence exige une correction adaptative très poussée, difficile au sol



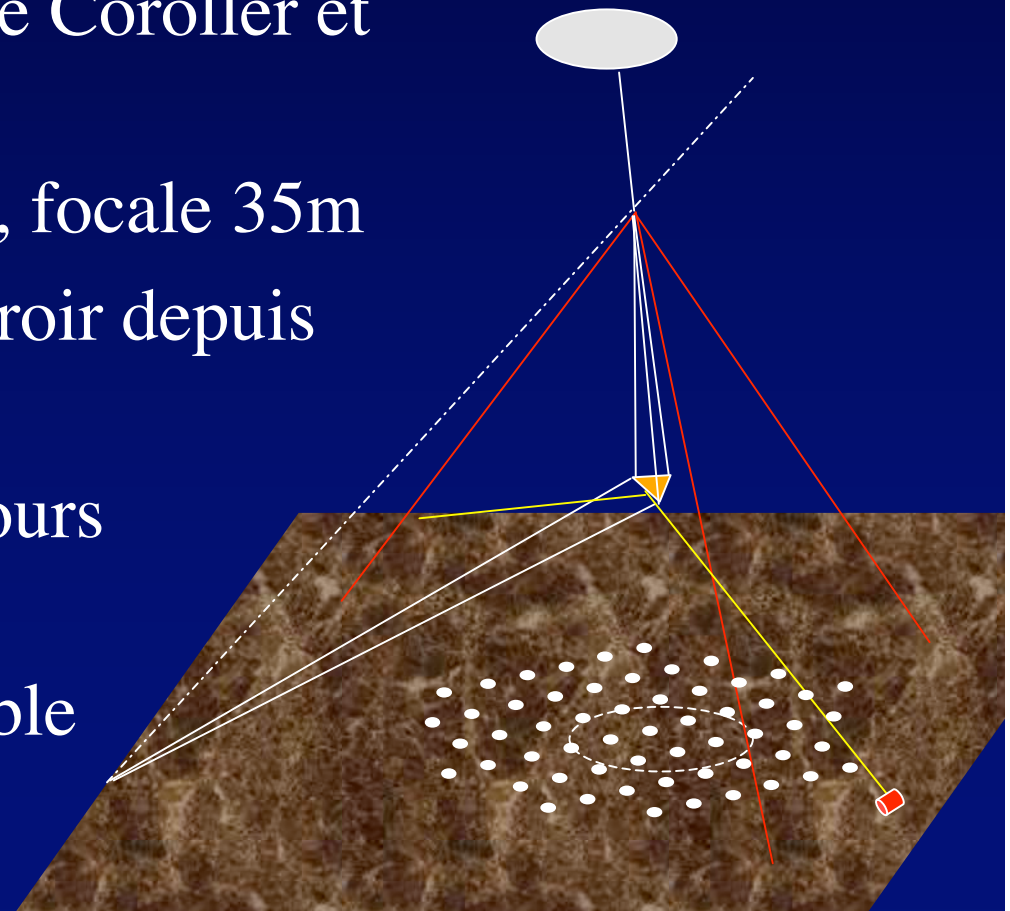
# ESO: Over Whelmingly Large telescope (OWL)

- Diamètre 100 m, surface 7 000 m<sup>2</sup>
- Magnitude 35 à 38, avec optique adaptative
- Étude en cours

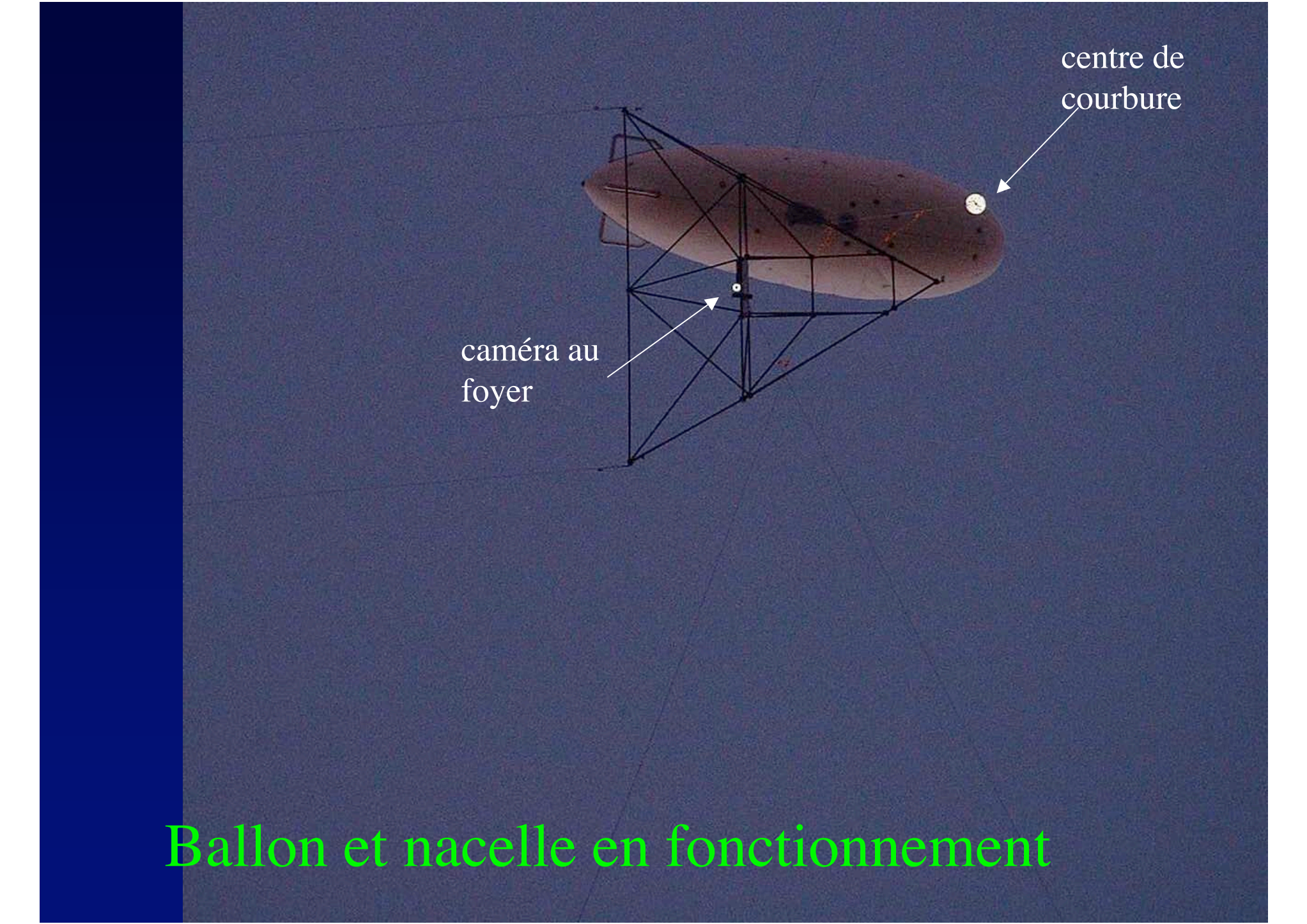


# Prototype Carlina à l'Observatoire de Haute Provence

- 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
- Fonctionne avec un seul miroir depuis 3/2004
- Éléments additionnels en cours d'installation
- Déménageable et extrapolable







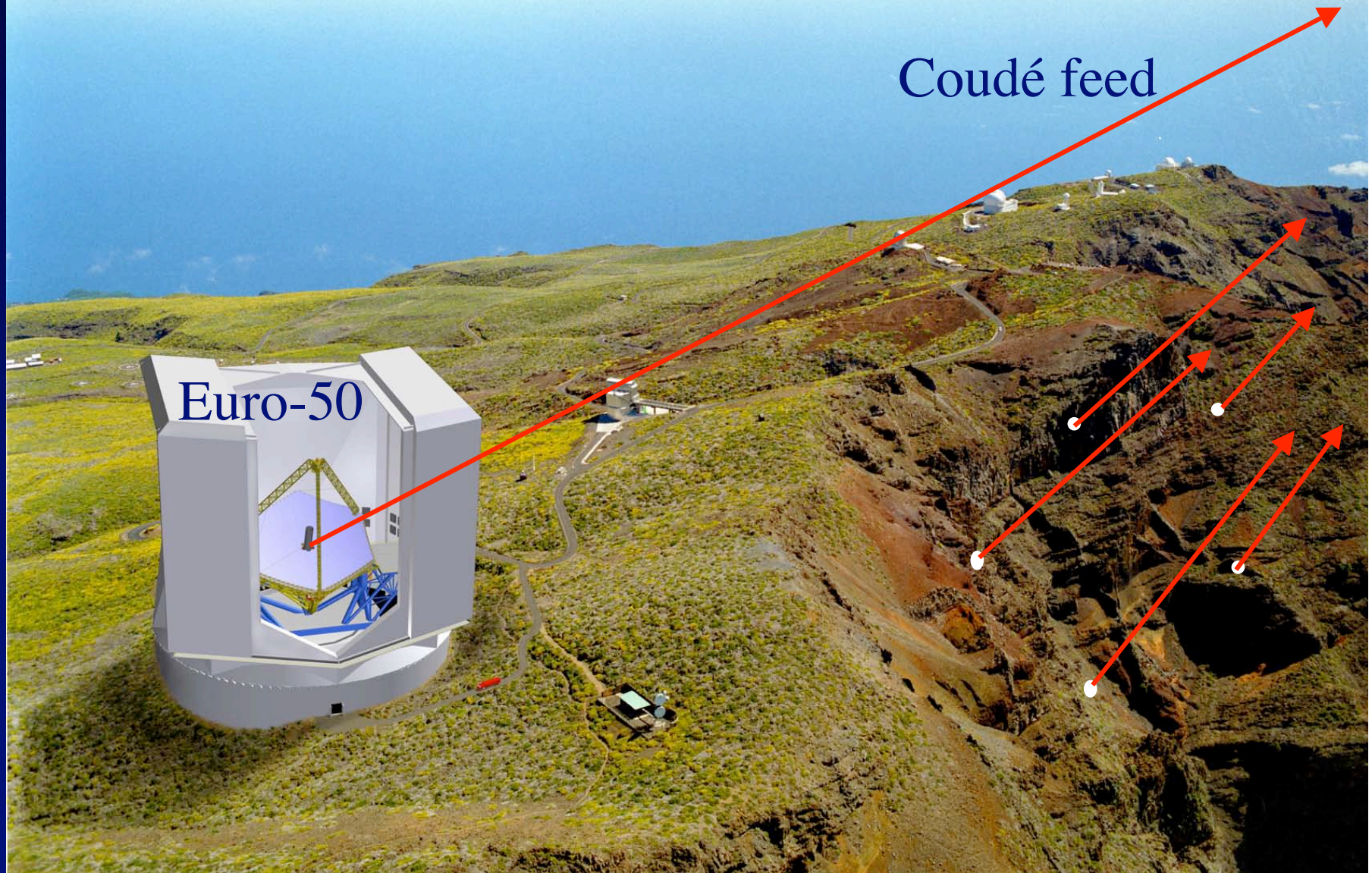
caméra au  
foyer

centre de  
courbure

Ballon et nacelle en fonctionnement



# Roque de las Muchachos, Canarias

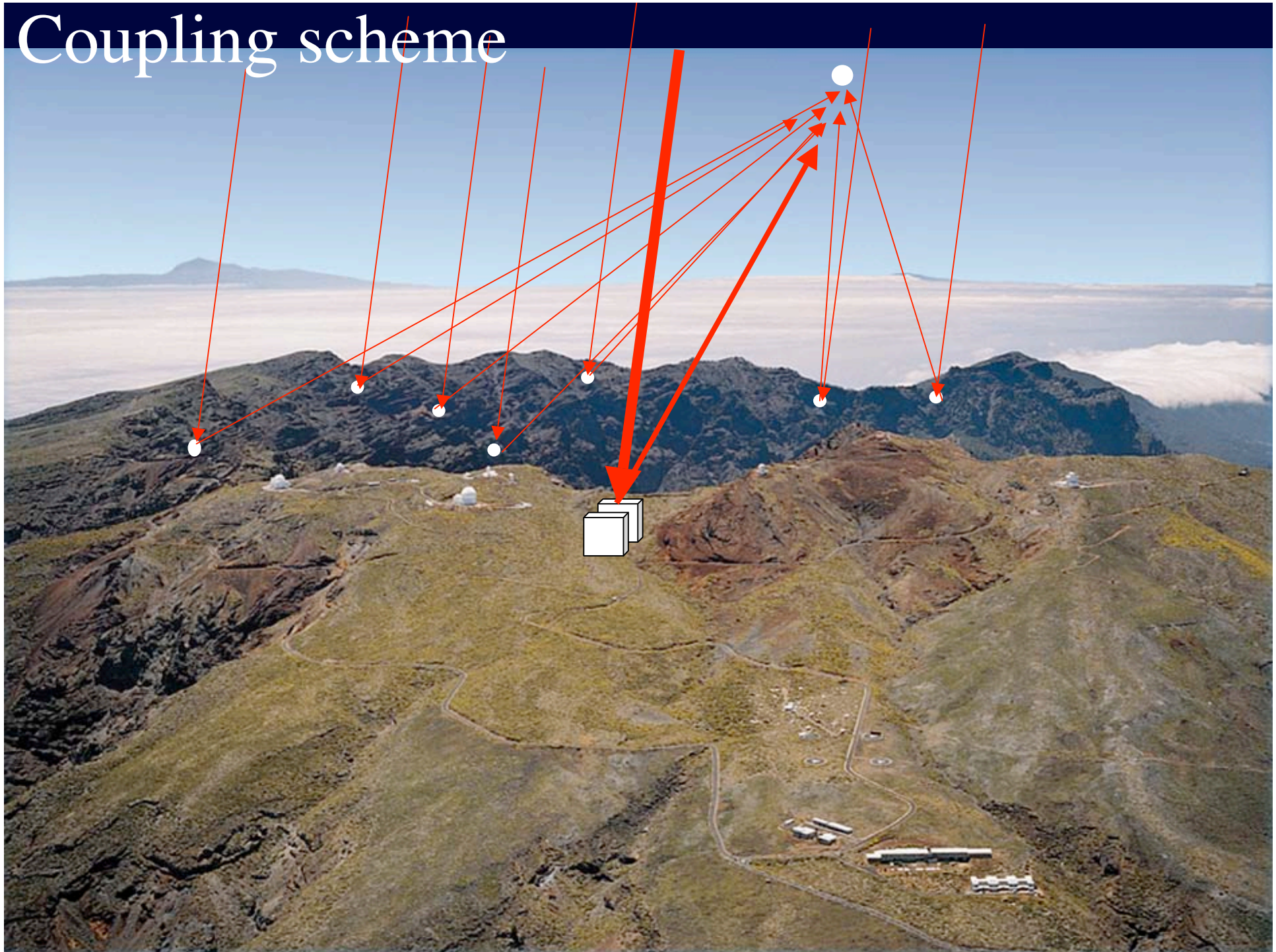


Coudé feed

Euro-50



# Coupling scheme





# Exo-Earth Discoverer:

a hypertelescope version proposed for DARWIN/TPF

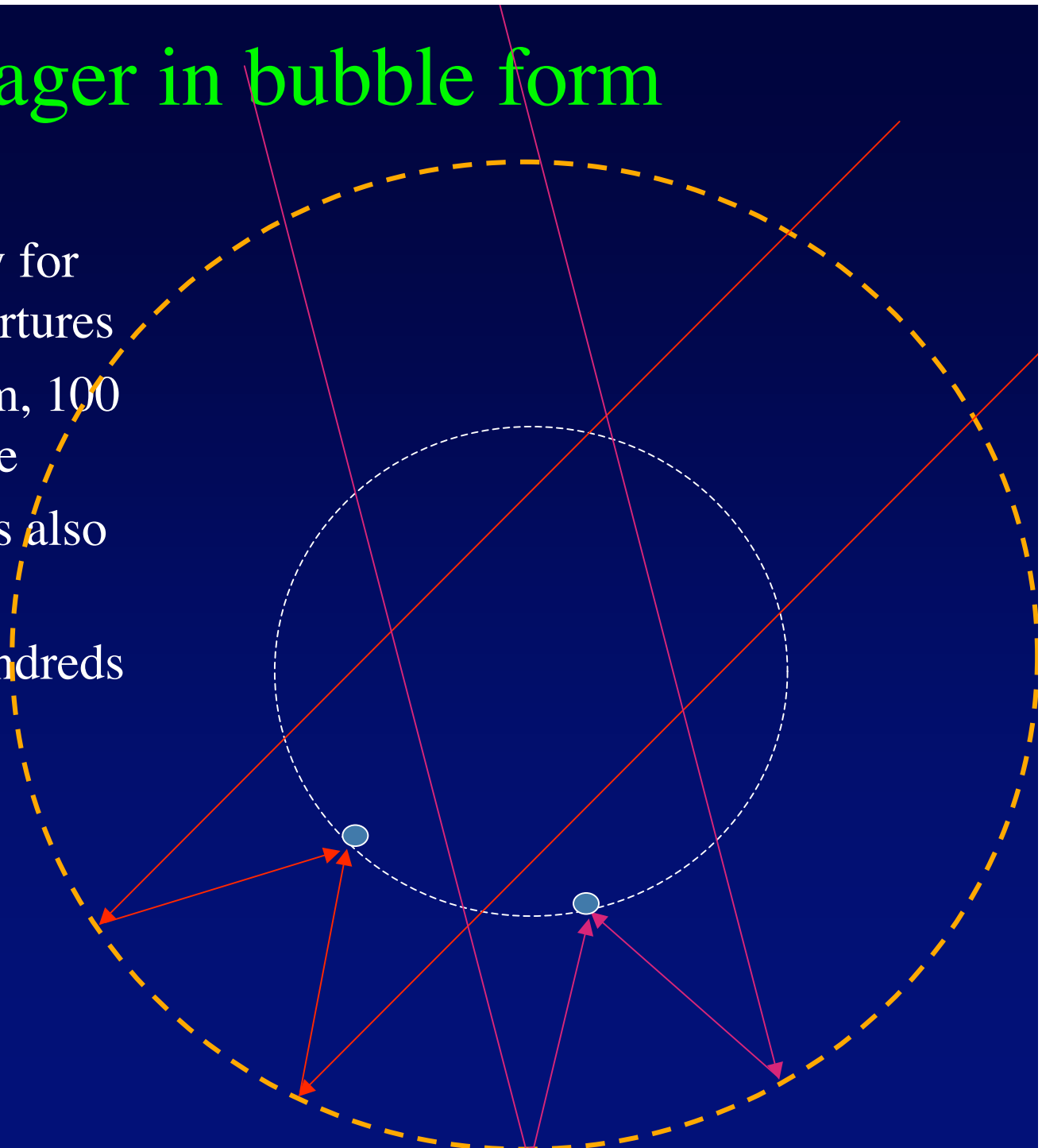
100 -1000m flotilla of 37 mirrors, 0.8m size



artist concept by Boeing /SVS

# 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



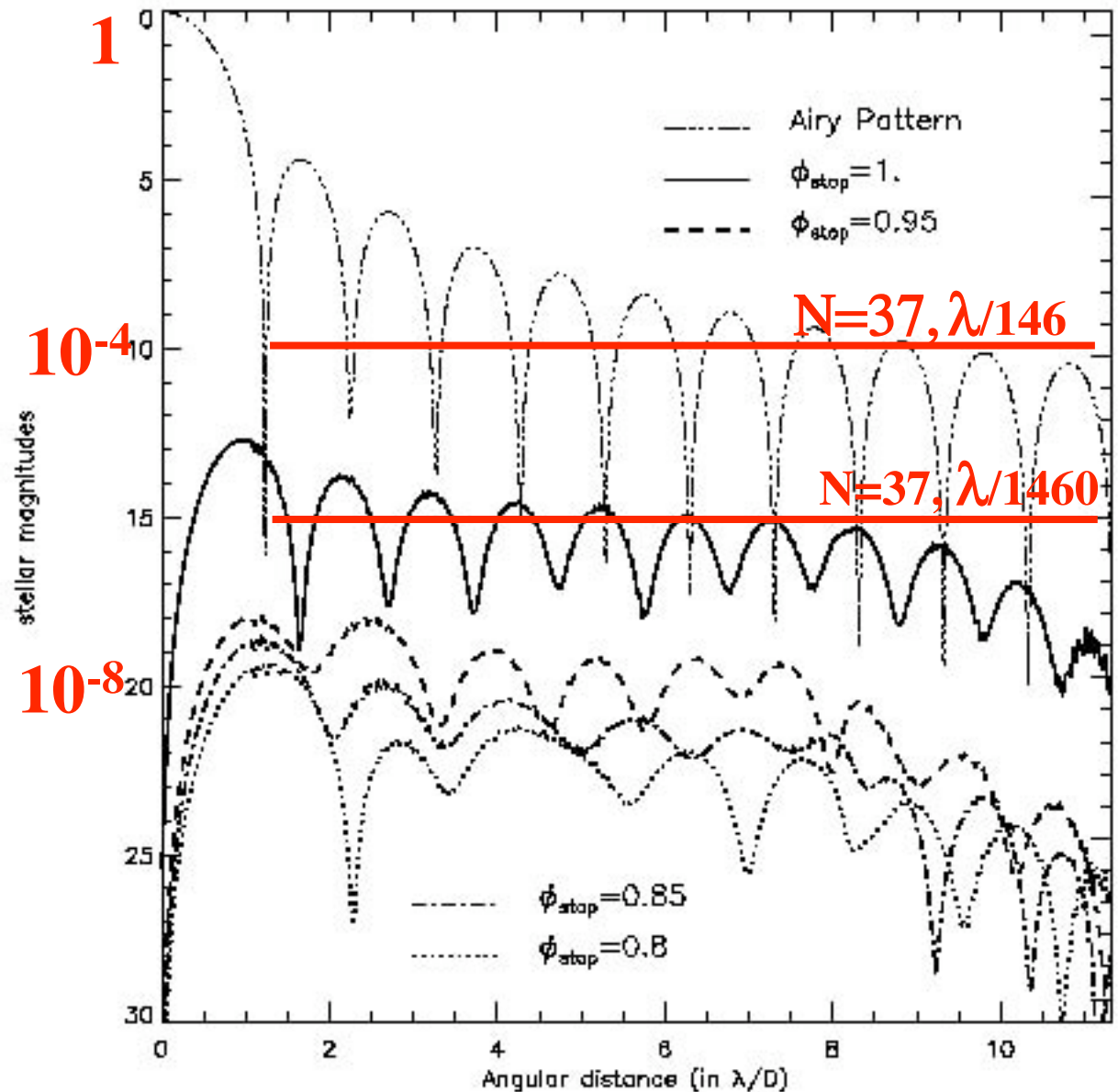
# Nouveaux coronographes

- Gay et Rabbia: Coronographe Interférentiel Achromatique
- Roddier & Roddier: pastille déphasante
- Rouan: déphaseur à 4 quadrants
- Nisenson : « Apodized square aperture »
- Aime et Soummer: Lyot apodisé
- Étude comparative pour ESA: Quirrenbach et al.  
2004



# Coronographe 4 quadrants de D.Rouan

- Utilisable dans  
l'image  
hypertelescope



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

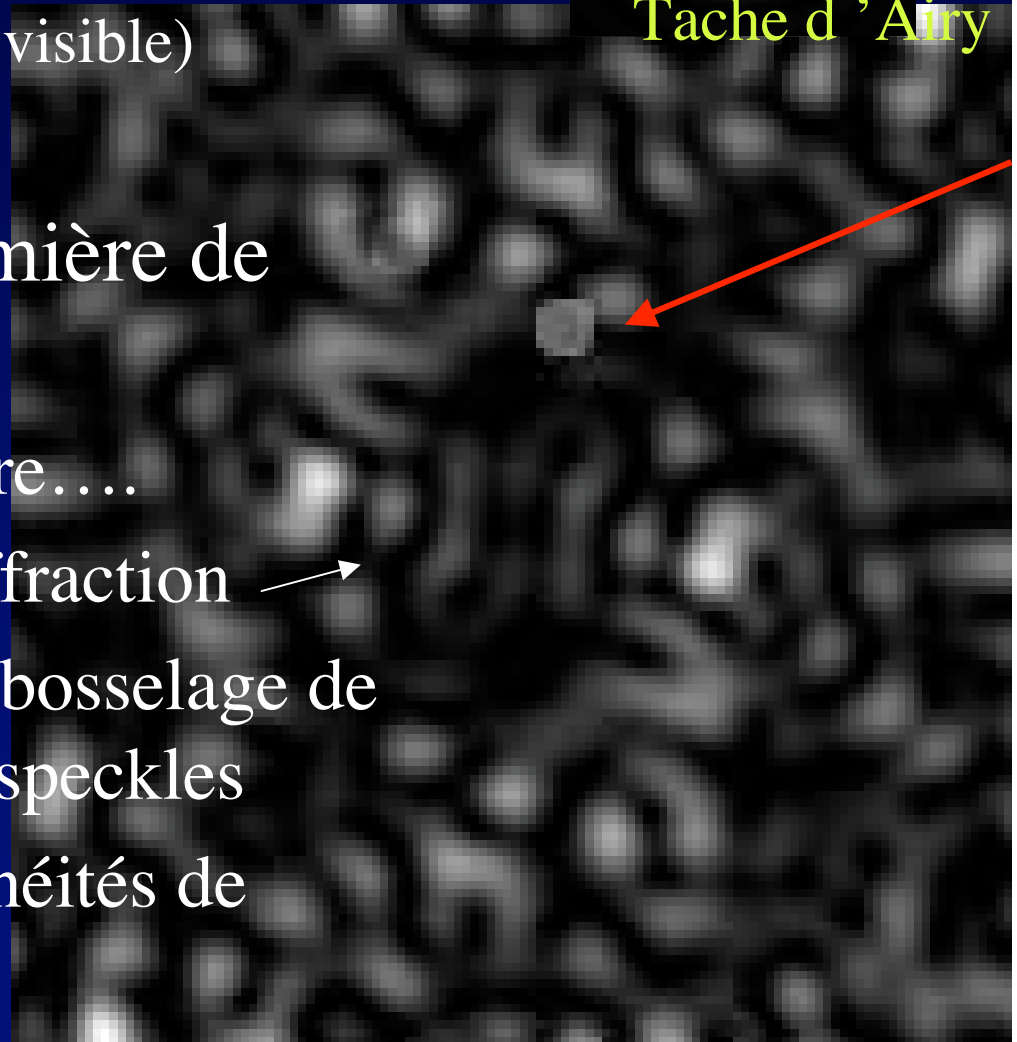
# Voir les planètes d 'étoiles

- un problème de lumière parasite :  
contraste Terre/Soleil =  $10^{-10}$  ( visible)



Tache d 'Airy

- 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 : tavelures ou speckles
  - .....et celle des hétérogénéités de  
transparence



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

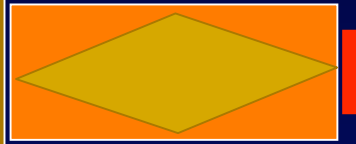


Tache d'Airy

- 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)

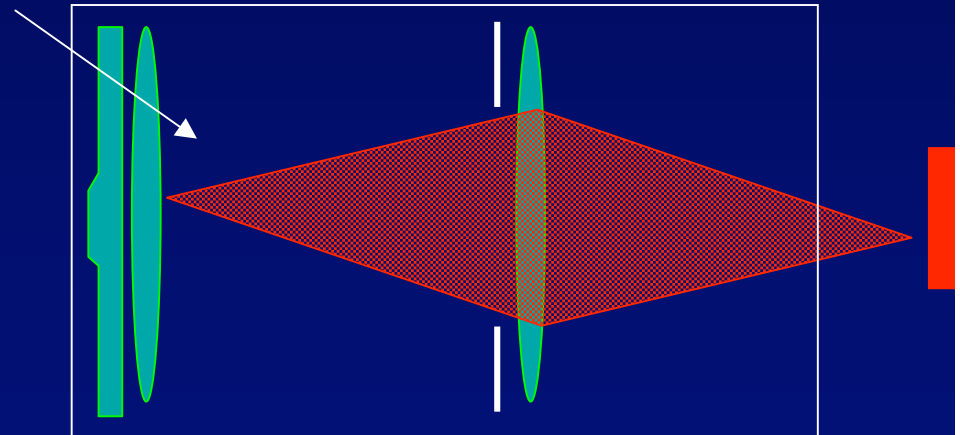
# Principe du coronographe de Lyot

Télescope ou  
hypertélescope



Tache d'Airy

Coronographe



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



# Cas d 'une optique parfaite, non bosselée:

- Noircissement complet possible avec légère apodisation et coronographe Lyot ou Roddier ( Aime et Soummer 2002)
- Voie intéressante..... si le bosselage n 'est pas limitant

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

# télescope bosselé ( faiblement), avec un coronographe parfait

Onde bosselée

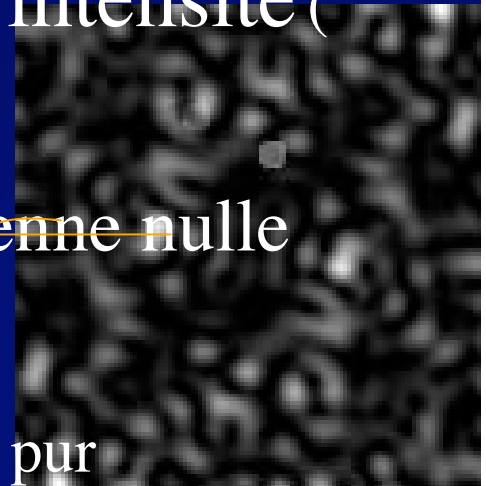
- Onde du télescope:

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

- 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)

- pic central effacé car  $\phi(x,y)$  est à moyenne nulle
- anneaux effacés
- il reste des speckles, symétriques si bosselage pur

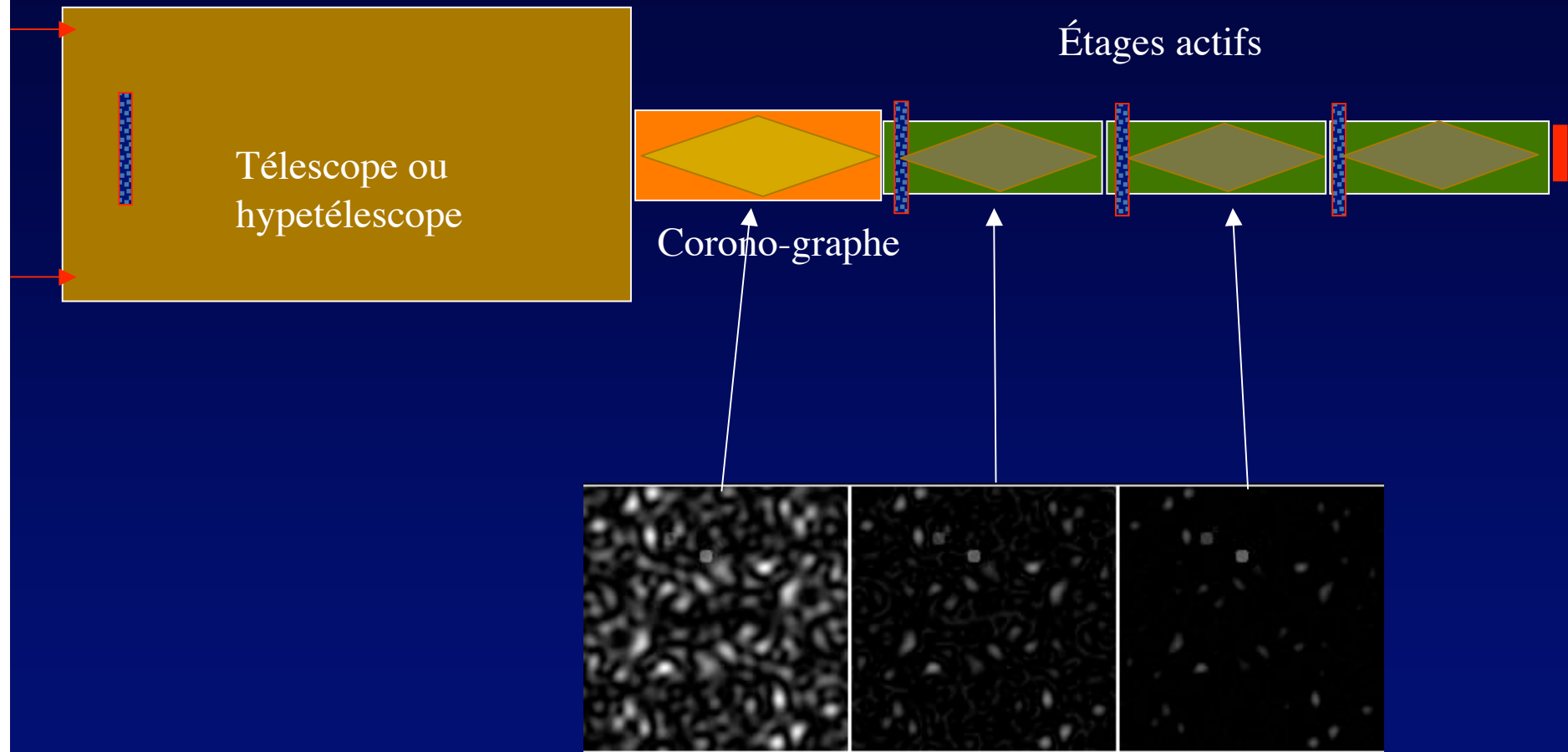


Annuler interférométriquement les résidus stellaires: :

## 1- Speckles mis en phase et filtrés

- Mise en phase crée dans la pupille un pic d'interférence....
- .... qu'élimine un masque central....
- ... en affectant peu la planète

# Coronographe et étages actifs additionnels



- Atténuation 7 à 10 par étage
- Planète non affectée

# Vue de près: deux exemples

Sortie coro

Relai 1

Relai 2

- Atténue les speckles brillants, allume les noirs

planètes

Sortie coro

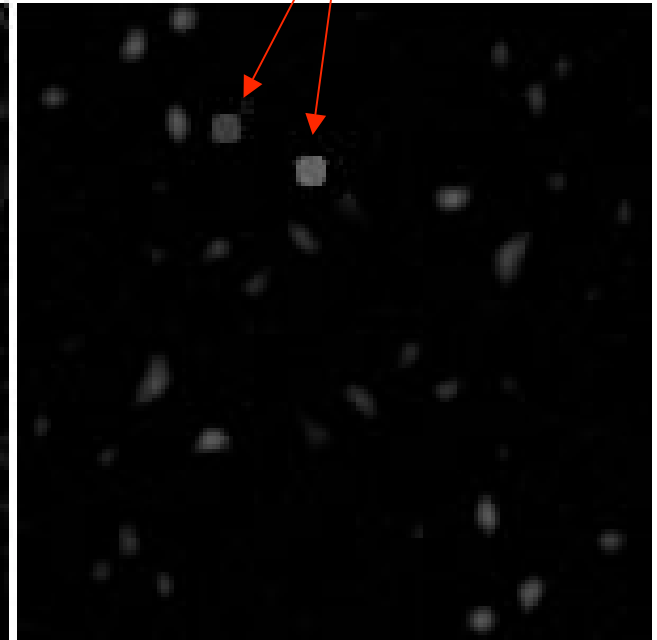
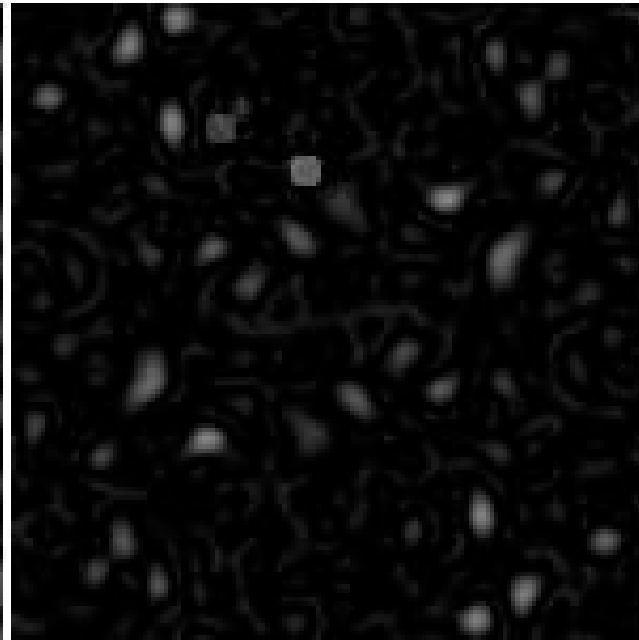
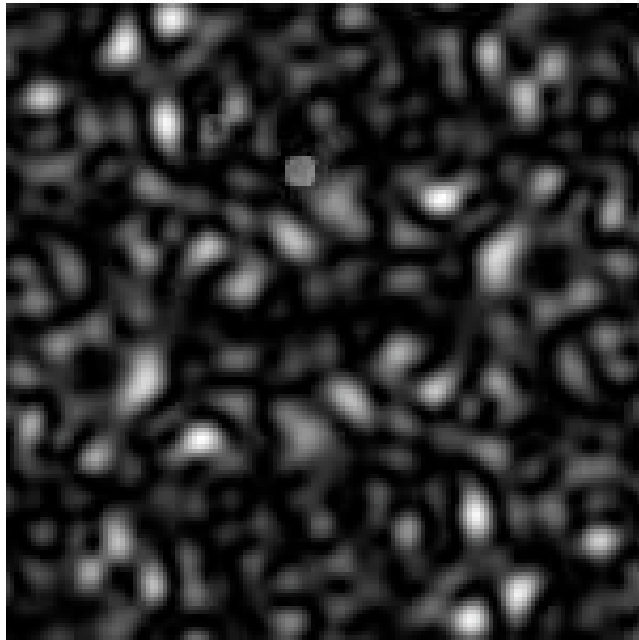
Relai 1

Relai 2



# 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

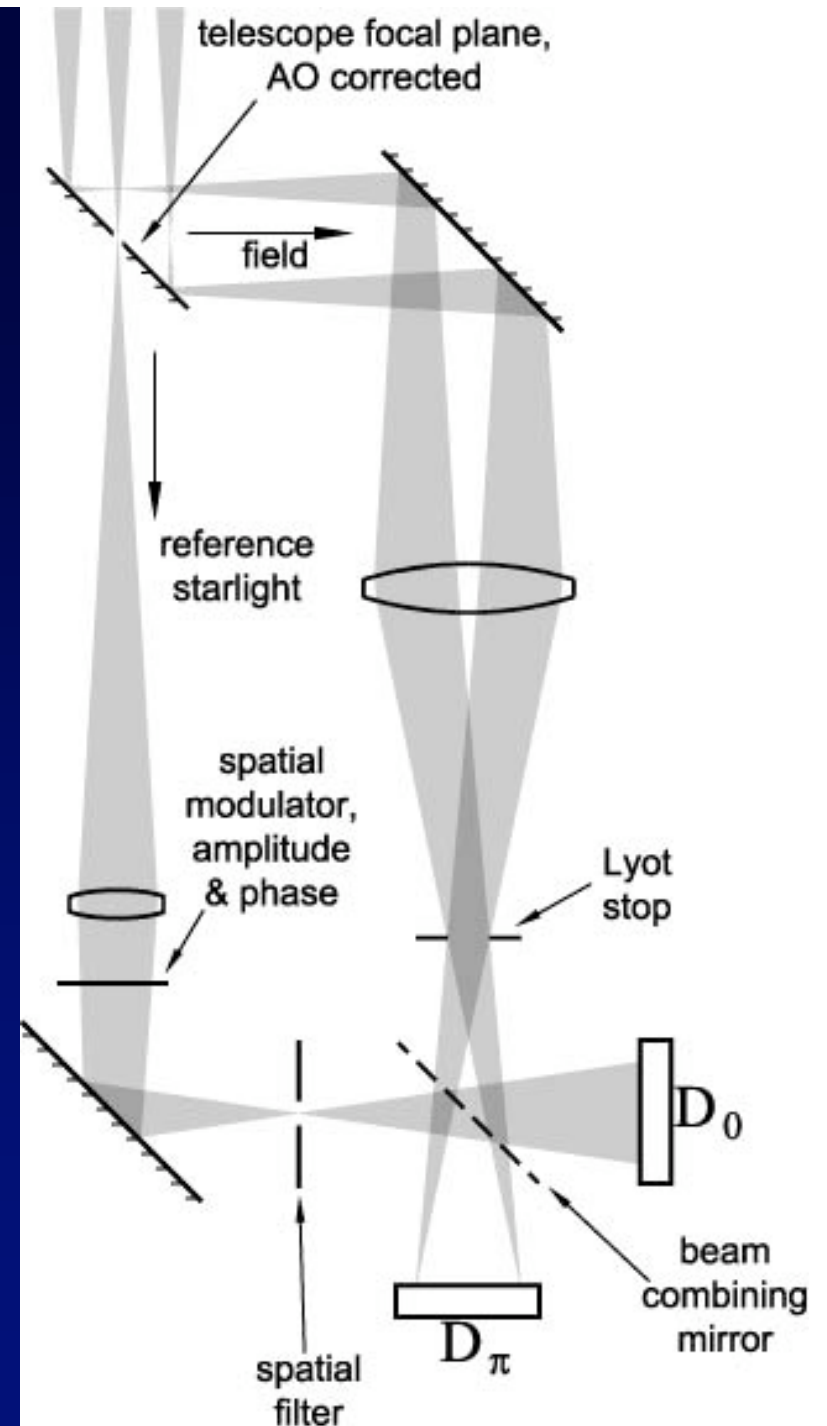
# Annuler interférométriquement les résidus stellaires:

## 2- interférométrie active

- Idée de R. Angel:  
soustraire une copie du résidu stellaire (  
Codona & Angel, Ap.J. 2004)

# 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 ?



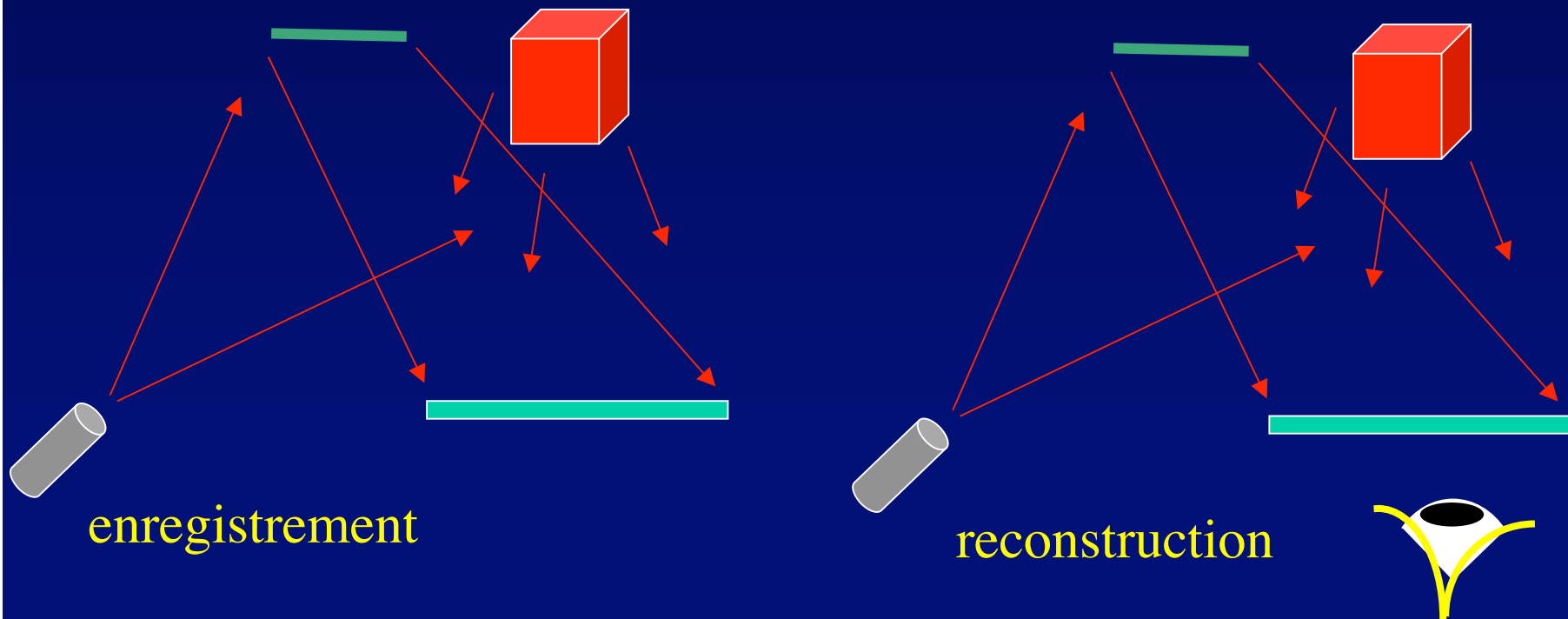
# Annuler les résidus stellaires:

## 3- coronographe avec hologramme

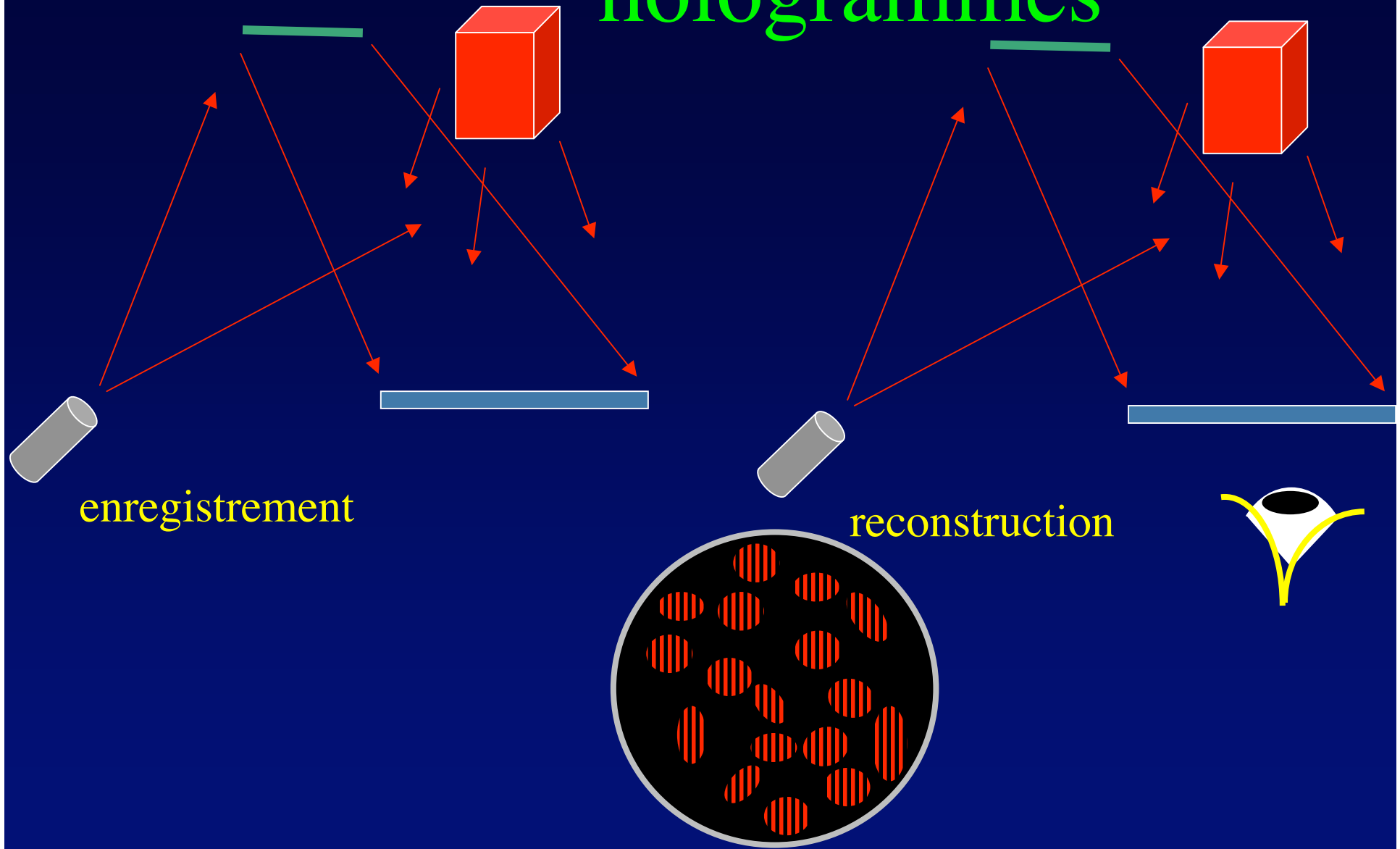
- L'hologramme enregistre les résidus....
- ....puis les soustrait interférométriquement
- .... Sans affecter la planète

# 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 en déphasant de  $\pi$



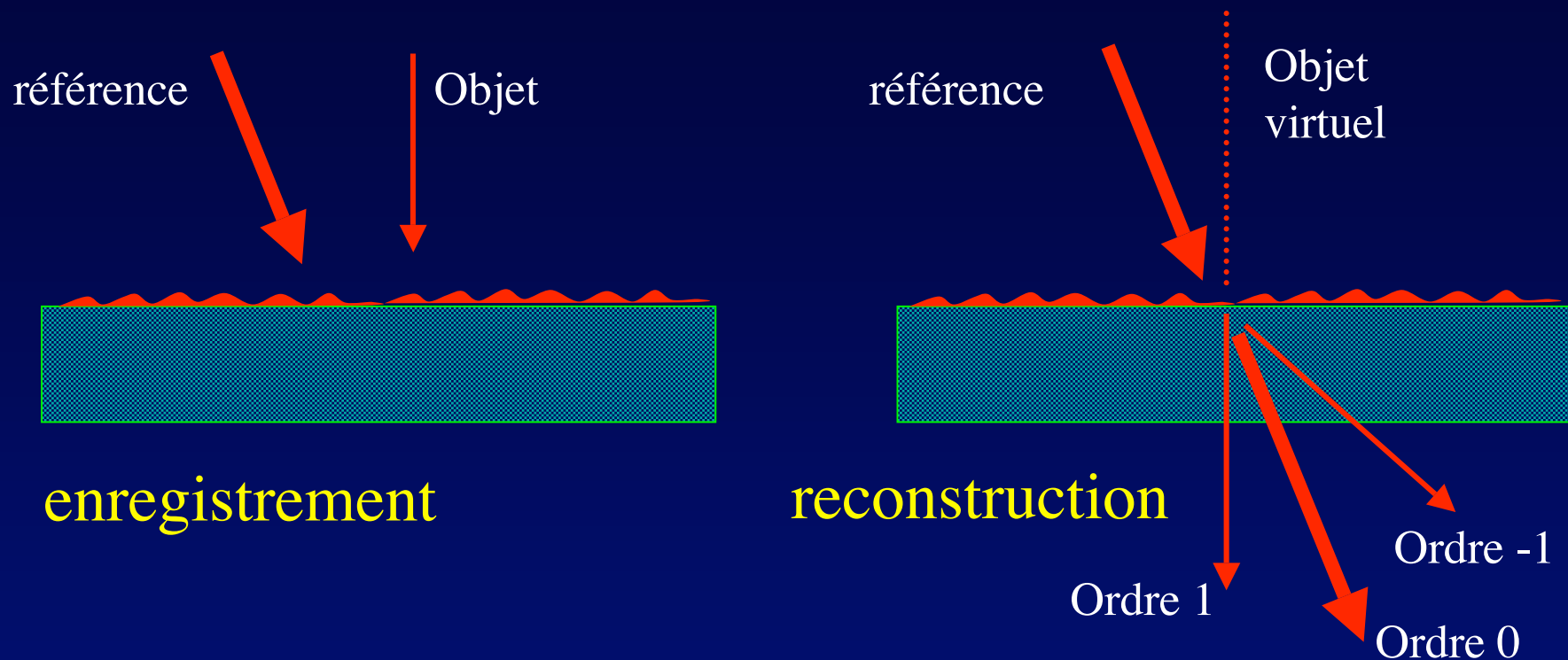
# hologrammes



- Hologramme = speckles frangés

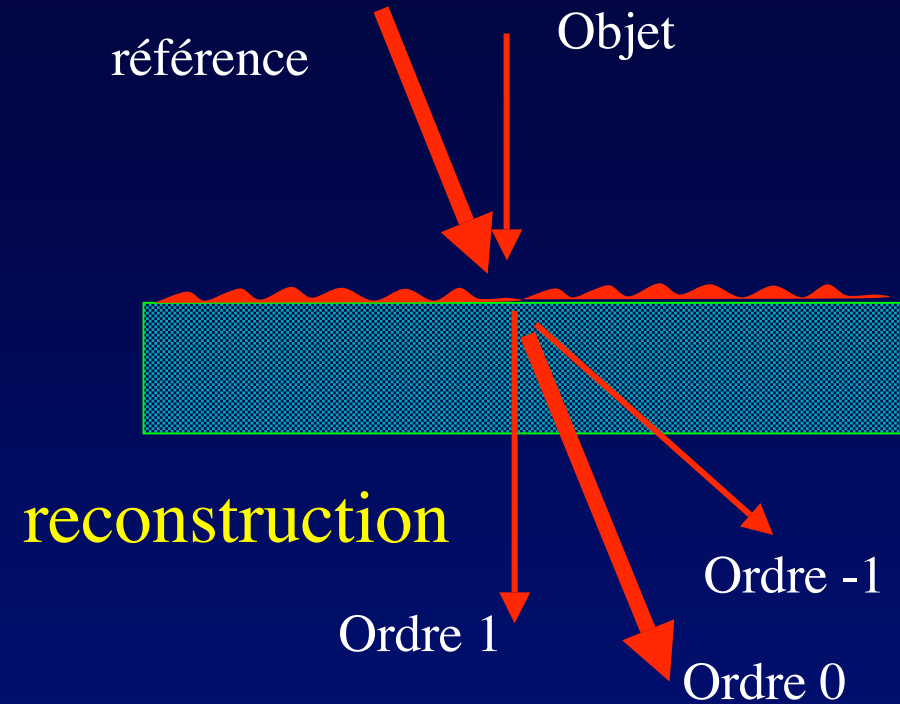
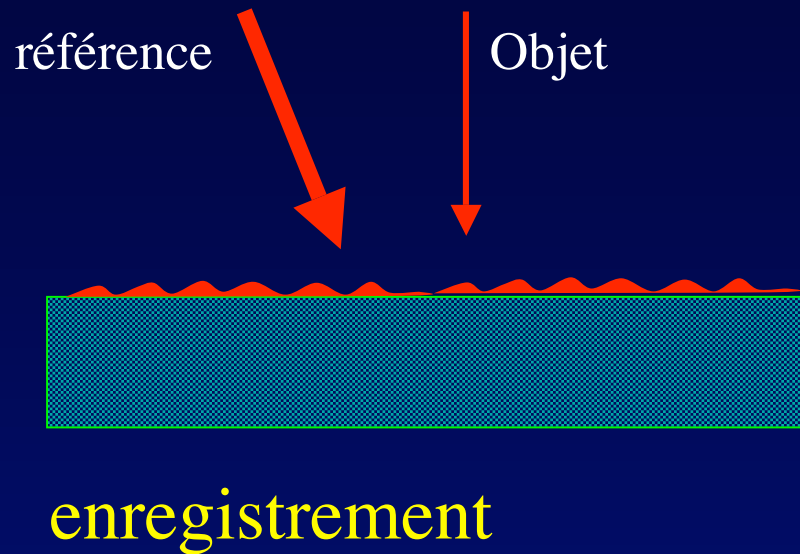


# Hologramme



- Onde objet enregistrée par les interférences
  - Module codé par le contraste des franges
  - Phase codée par leur position
  - Les franges enregistrées diffractent comme un réseau

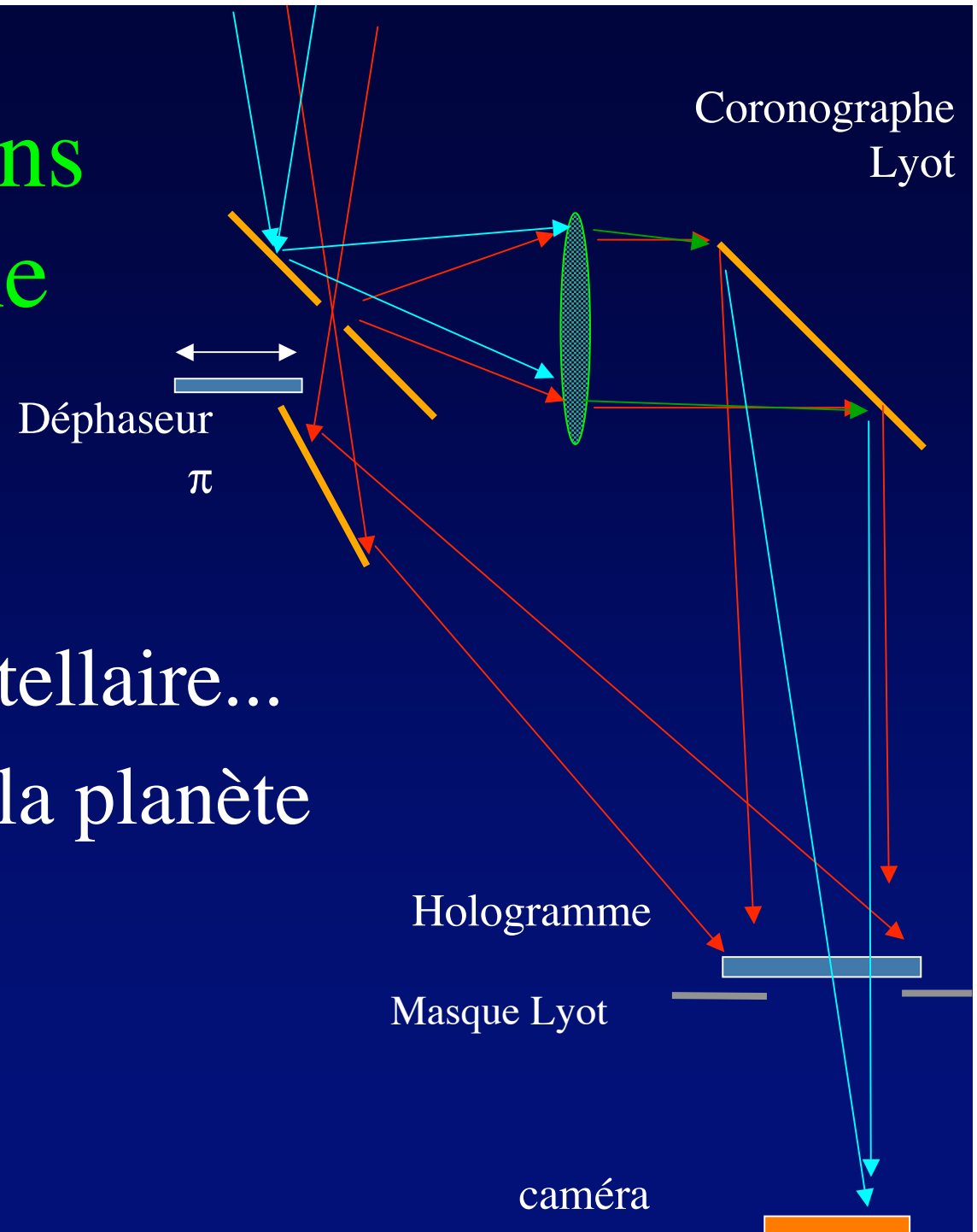
# Interférométrie holographique



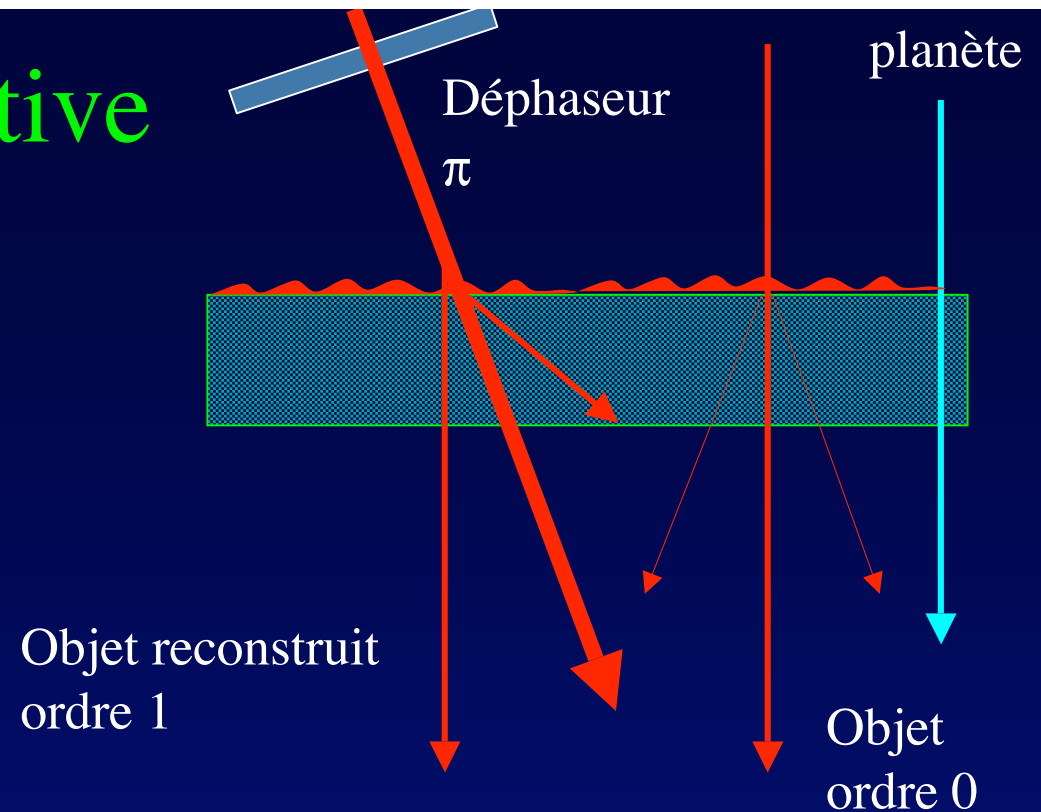
- l'objet est démasqué pendant la reconstruction
- Il interfère avec son image reconstruite

# Hologramme dans un coronographe

- Détruit le résidu stellaire...
- ..en affectant peu la planète



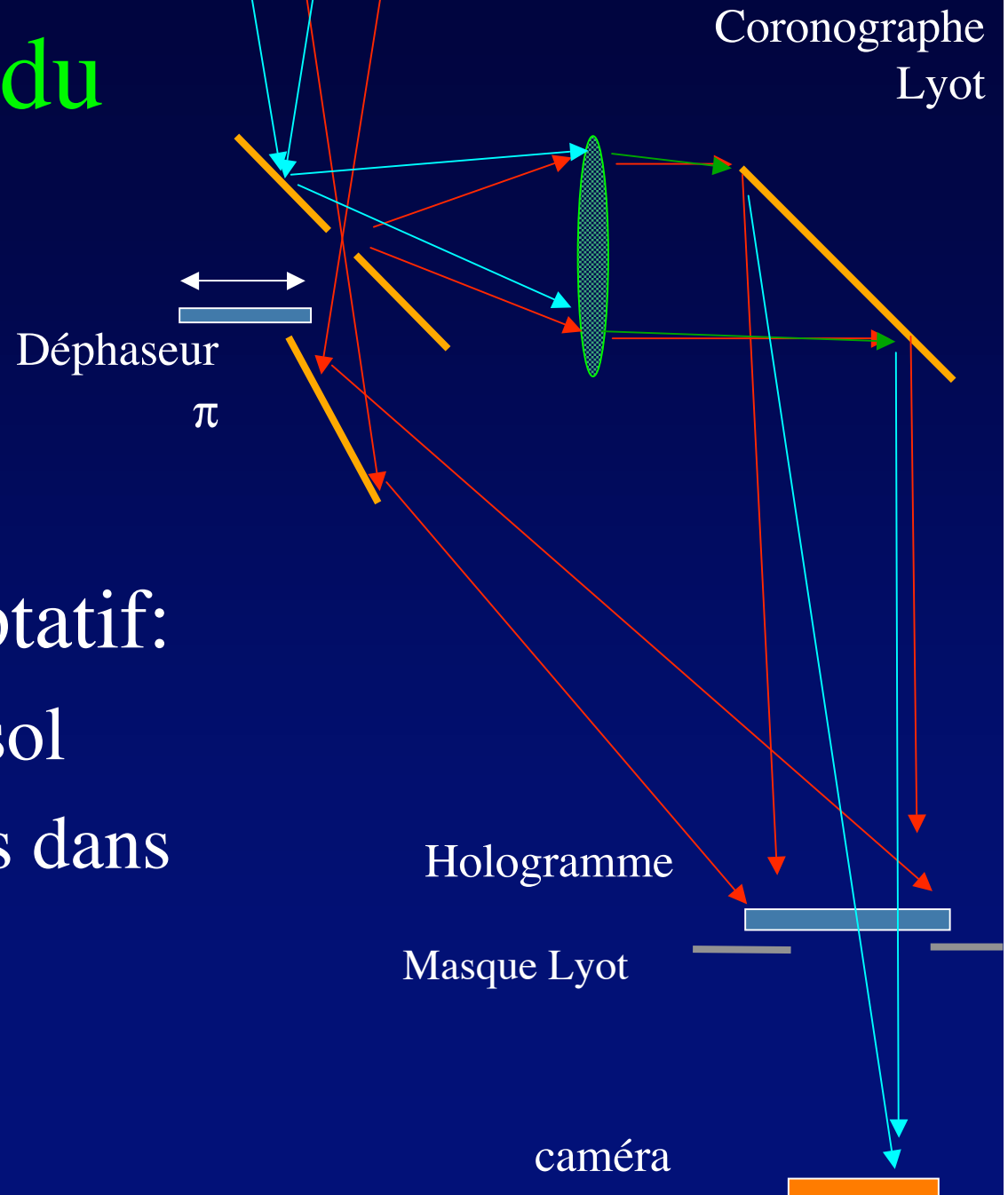
# Interférence destructive



- si le faisceau de référence est plus intense....
- ...l'hologramme est peu contrasté....
- ....et la planète est peu atténuée (elle n'est pas enregistrée car incohérente avec le faisceau de référence stellaire)

# Suivre la dérive du bosselage ?

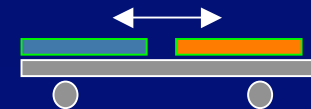
- Hologramme adaptatif:
  - Milliseconde au sol
  - Minutes ou heures dans l'espace





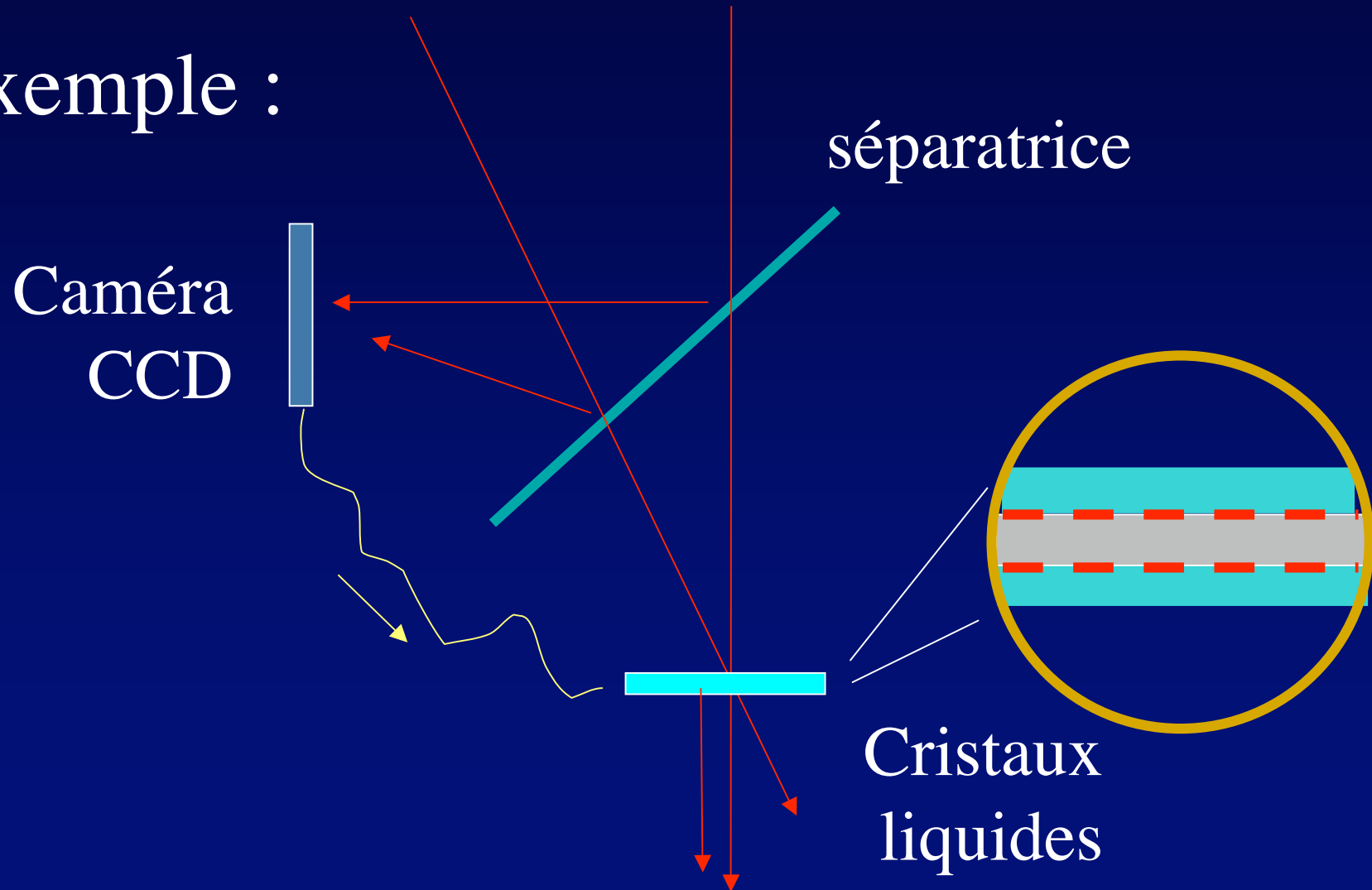
# Hologramme direct ou synthétique ?

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

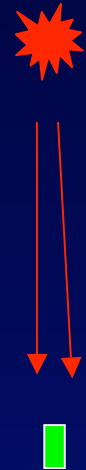
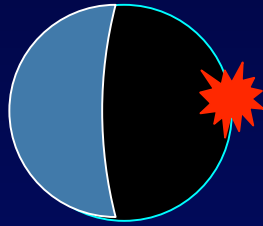


# Hologramme synthétique avec modulateur spatial de lumière

- Exemple :

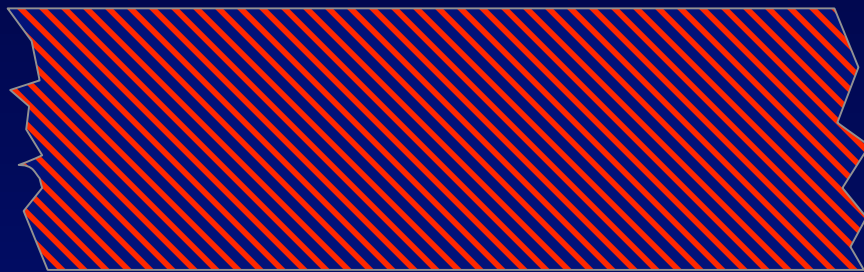


# enregistrement de l'hologramme avec une étoile laser



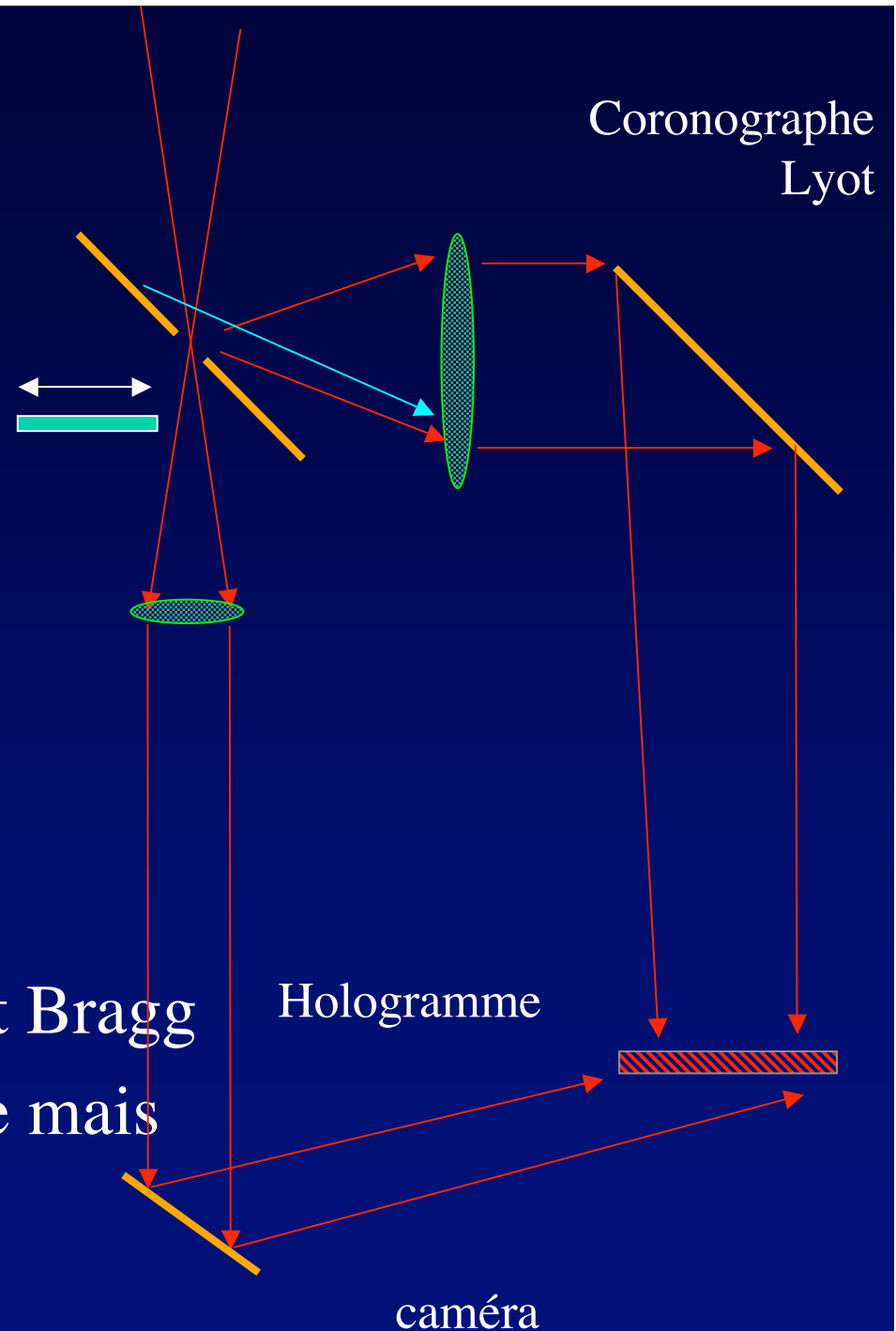
- Source laser au sol ou dans l'espace utilisable comme étoile artificielle
- Hologramme à faible bruit, rafraichissable toutes les heures
- Convient si l'optique active primaire est blocable

# Hologramme en couleurs pour achromatiser ?



Hologramme Lippmann-Bragg

- Strates dans milieu épais
- Sélectivité spectrale par effet Bragg
- efficacité de diffraction faible mais suffisante





une autre piste:

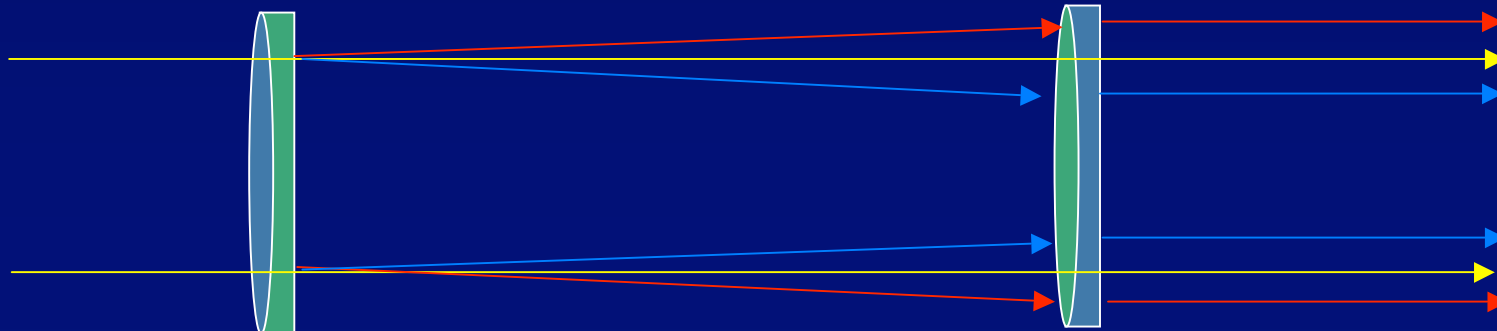
## achromatisation approchée

Bosselage

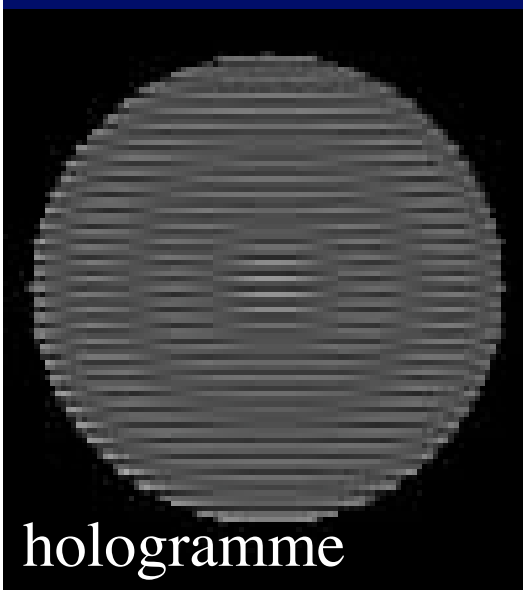
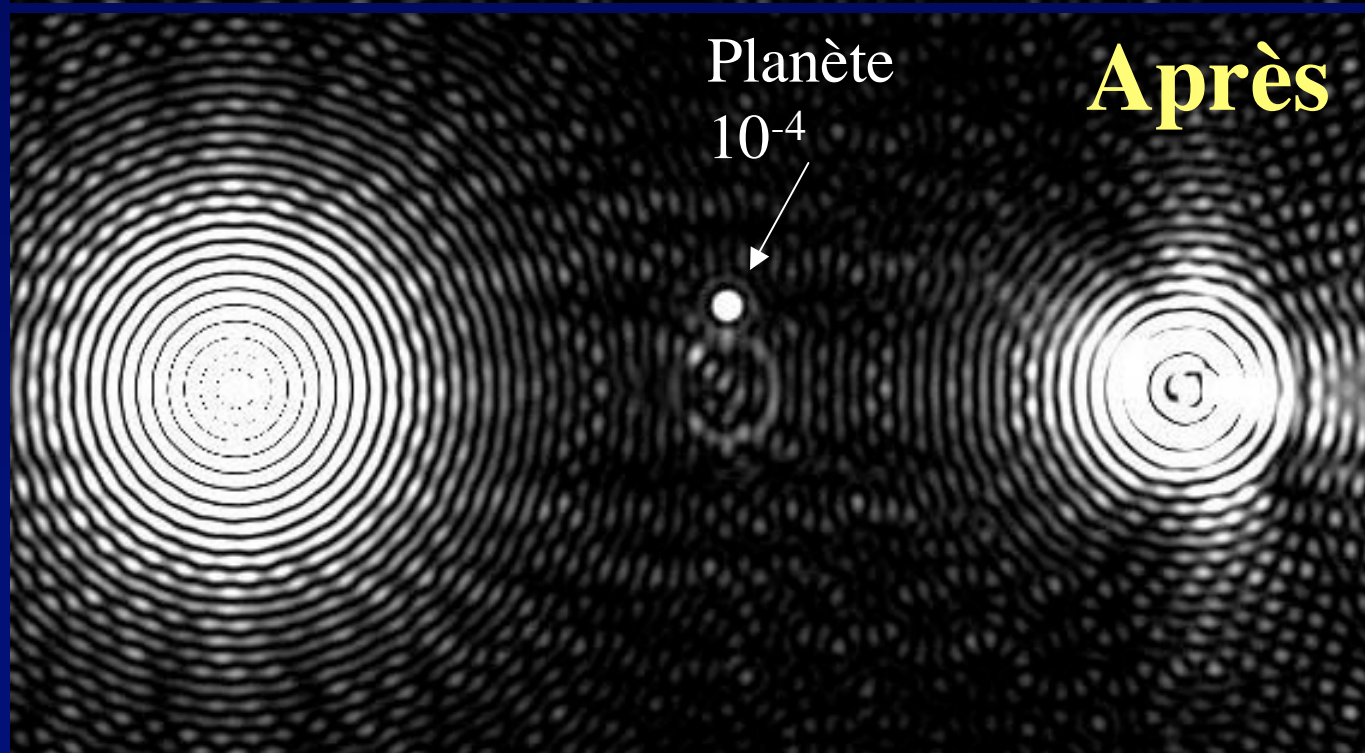
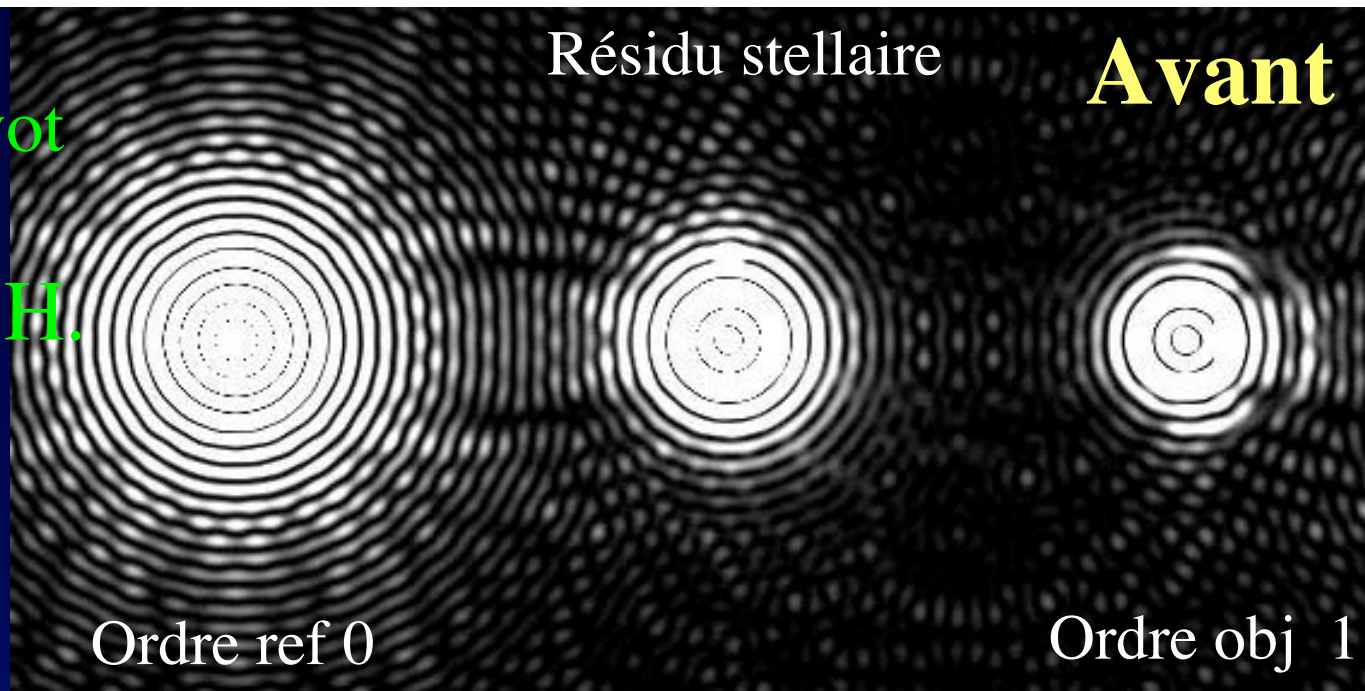
$\phi(x,y)$

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



Coronographe Lyot  
et Hologramme:  
Simulation par H.  
Le Coroller  
(Coroller et al., en  
préparation)

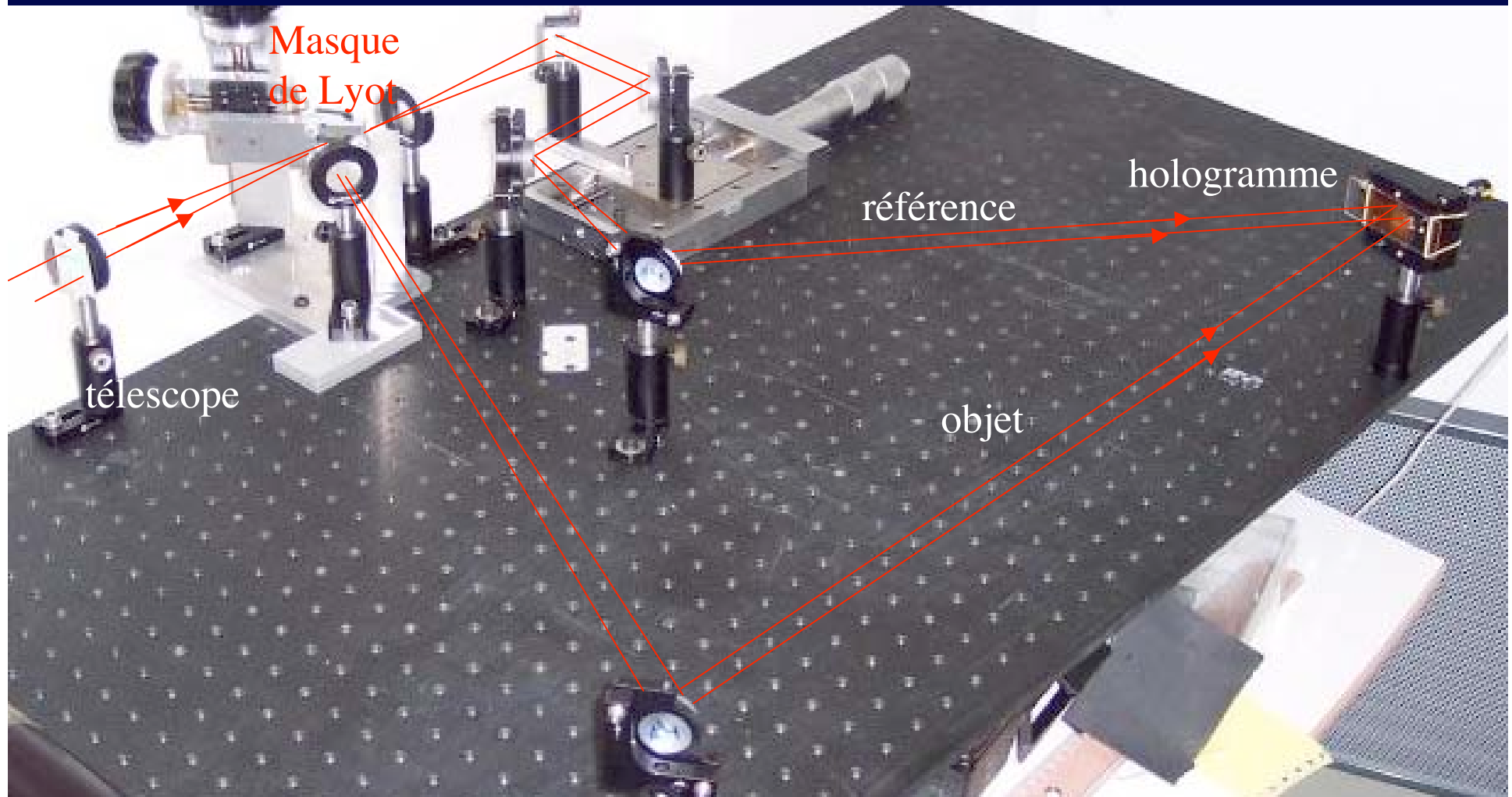


Coronographe avec hologramme:

## Simulation numérique de H. Le Coroller

- Pas encore de bosselage sur l'onde, mais...  
.... speckles engendrés par le bord  
pixellisé de la pupille
- Il manque aussi le bruit de photons

# Simulateur par F.Martinache ( essais en cours)

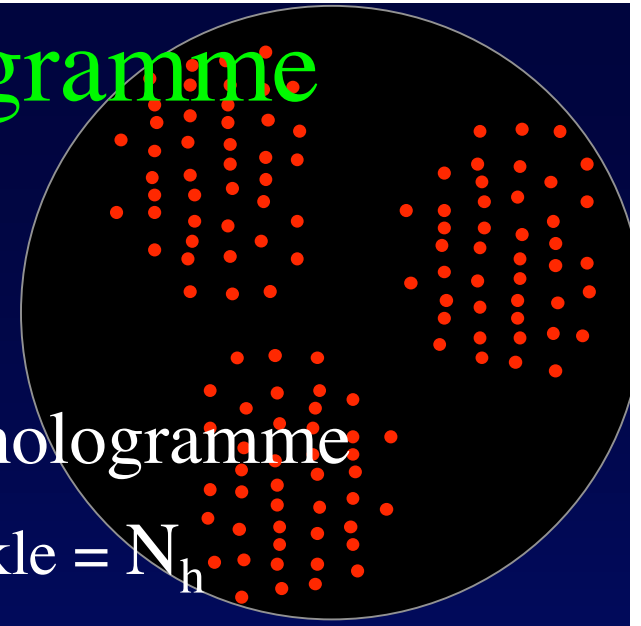




# Gain de détection avec un hologramme

- Le noircissement de l'étoile est profond si:
  - Hologramme peu bruité ( enregistré avec source laser)
  - Étoile très peu résolue, guidage très précis
- En pratique: gagner 100 ou 10,000 ?
- 1,000 pourrait suffire pour planète à  $10^{-10}$

# Bruit de photons dans l'hologramme et limite de noircissement



- $N_h$  photons par speckle pour inscrire l'hologramme
  - Amplitude du faisceau reconstruit par speckle =  $N_h$
  - Fluctuation relative d'amplitude =  $N_h^{-1/2}$
  - ...qui est égale au résidu relatif du faisceau reconstruit...
  - ... soit atténuation  $N_h^{-1}$  en intensité
- $N_o$  photons par speckle pendant la pose d'observation
  - Résidu de noircissement =  $N_o N_h^{-1}$  ...
  - ... soit 1 photon par speckle si les poses d'enregistrement et d'observation sont d'égale durée, quelconque
- Poser assez pour avoir quelques photons dans le pic planète

# Meilleur que la soustraction post-détection du résidu stellaire

- Principe de la soustraction incohérente :
  - poses avec et sans planète, soustraction ( Bonneau et al., 1975)
- Résidu en  $N_0^{1/2}$
- Moins favorable que la soustraction cohérente
  - un seul photon par pose, de durée quelconque
- Encore moins favorable avec étoile laser....
  - .... car la soustraction cohérente devient parfaite

# Proposition d 'O.Guyon: ( Guyon , 2004, soumis à Ap.J.) carte de la cohérence et son complément

- Mesure de cohérence locale en déphasant l 'onde de référence
- Comparaison de sensibilité à faire

# Quel rapport avec « dark speckle analysis » ? ( Méthode des tavelures noires )

- analyse post-détection de tavelures fluctuantes
- cartographie l'absence de tavelures noires
- probablement moins sensible



# Partage des rôles: tolérance de polissage, optique adaptative et hologramme

- Trois niveaux de correction à harmoniser:
  - Polissage du miroir:  $\lambda/10$  ou  $\lambda/1000$  ?
  - Optique adaptative :  $\lambda/100$  ou  $\lambda/5000$  ?
  - Hologramme: atténuer les résidus d'étoile 10 ou 1000 fois ?
- Le meilleur partage dépend fortement des composants

# Conclusion

- Il est possible et utile de rattraper les défauts du télescope avec un hologramme dans le coronographe
- L'hologramme est une forme d'optique adaptative corrigeant à la fois la phase et le module
- La tolérance de forme du télescope,  $\lambda / 100$  ou  $\lambda / 1000$ , s'en trouve relâchée
- Cette forme de coronographie extrême semble permettre la recherche d'exo-Terres dans le visible
- difficile au sol, mais peut-être dans l'infrarouge proche

# Articles

- [Www.oamp.fr/lise/publis/bonneauetalhst.pdf](http://www.oamp.fr/lise/publis/bonneauetalhst.pdf)
- [Www.oamp.fr/lise/publis/labeyriebackaskog.pdf](http://www.oamp.fr/lise/publis/labeyriebackaskog.pdf)
- [Http://sci.esa.int/conferences/nextsteps2003](http://sci.esa.int/conferences/nextsteps2003)
- [Www.oamp.fr/lise/publis/labeyriecoroholo.pdf](http://www.oamp.fr/lise/publis/labeyriecoroholo.pdf)