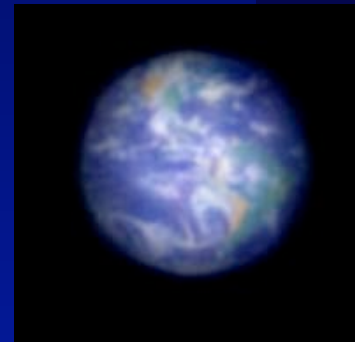


Aujourd'hui:

2- Propriétés des hypertélescopes : champ , signal et bruit



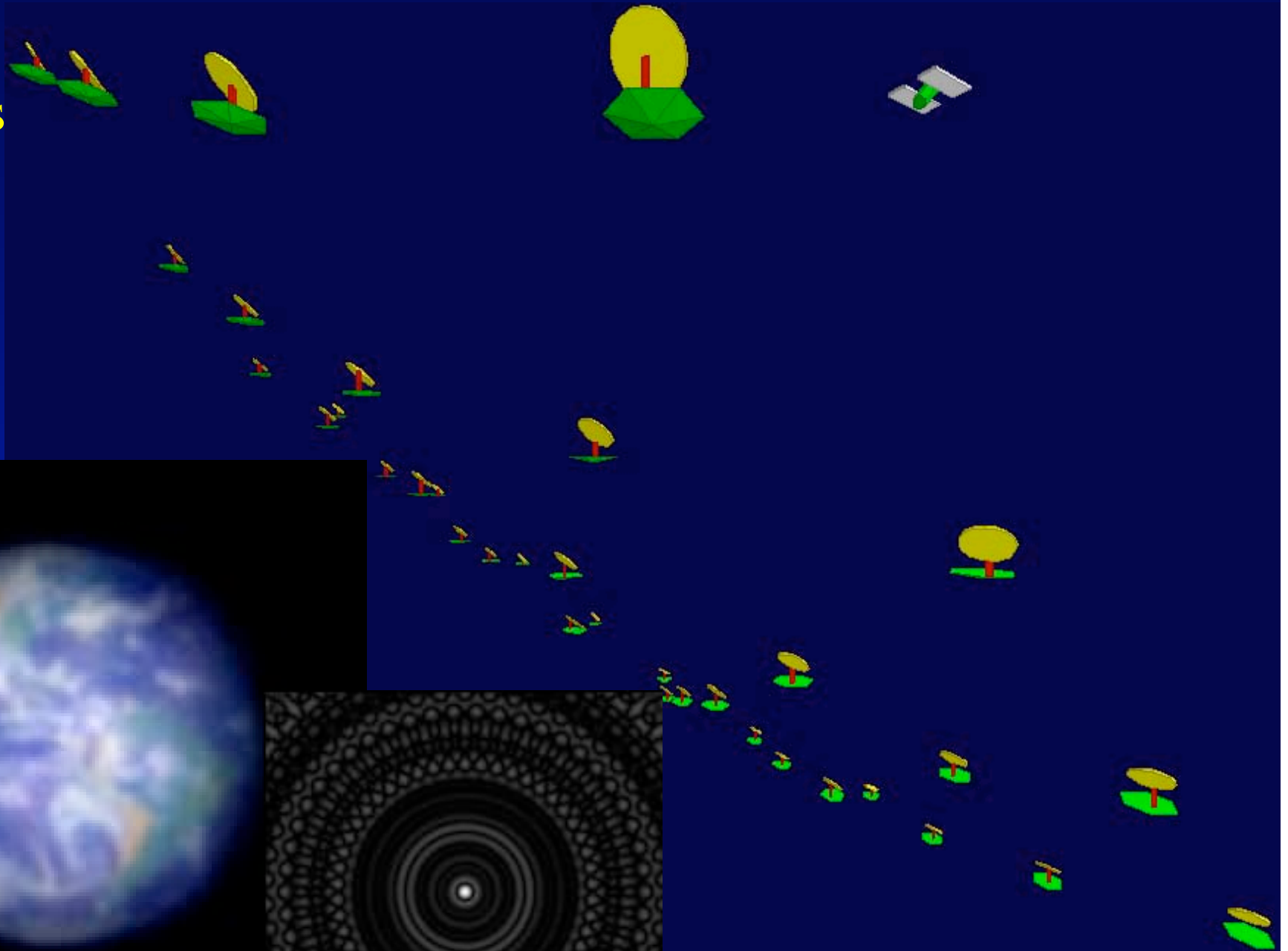
Séminaire à 15h15:

Guy Perrin , Observatoire de Paris-Meudon
"OHANA, un très grand interféromètre
optique au sommet du Mauna Kea à Hawaï"

Dans 20 ans ?

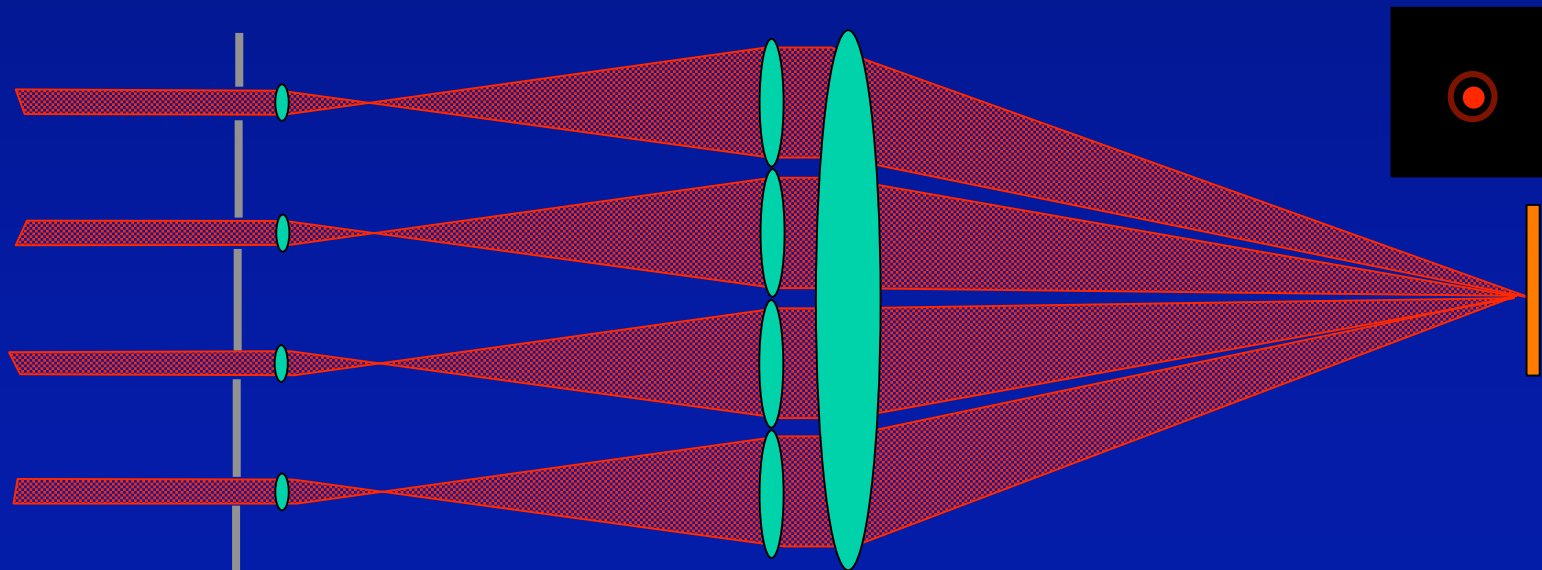
150 miroirs
de 3m
150 km

Terre à 3pc
Pose 30mn

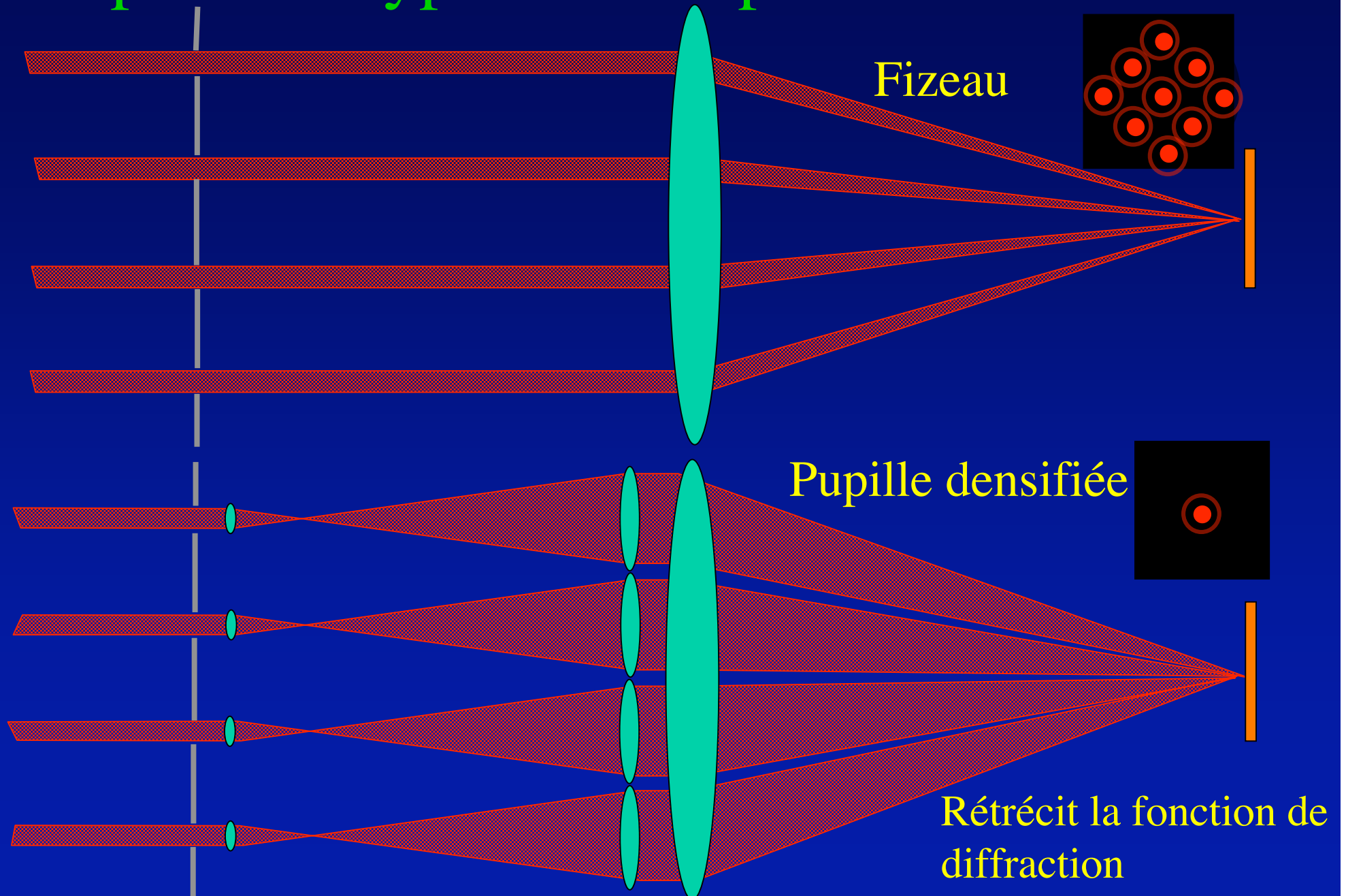


Une solution d'imagerie directe: l'interféromètre à pupille densifiée ou « hypertélescope »

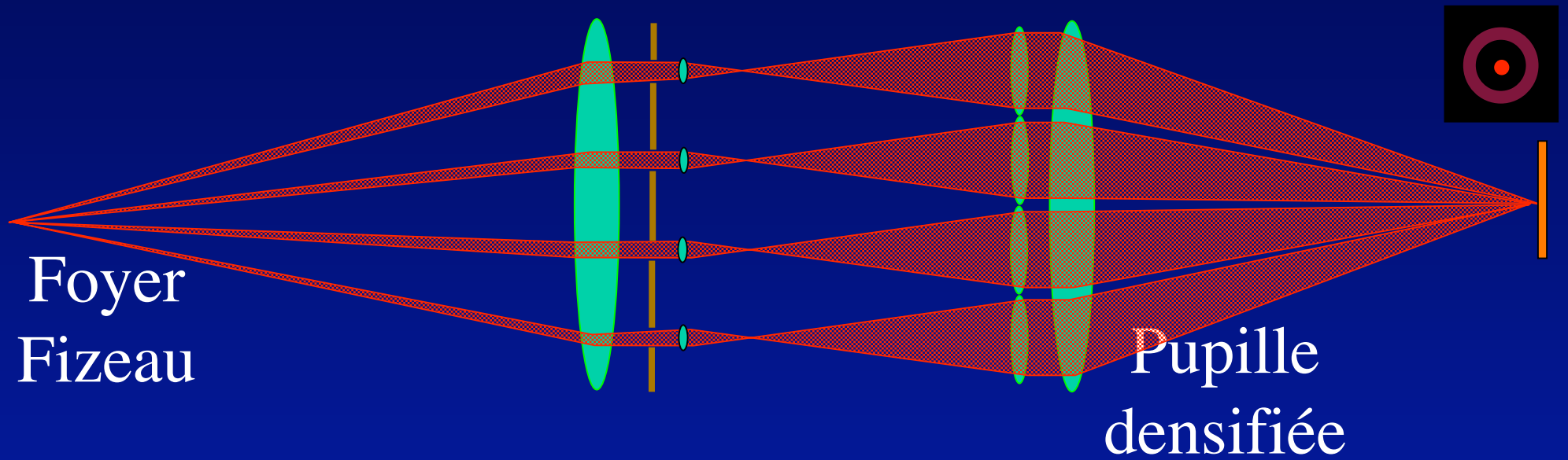
- Forme une image avec des ouvertures très diluées
- Améliore l'efficacité des interféromètres



Principe de l'hyper-télescope



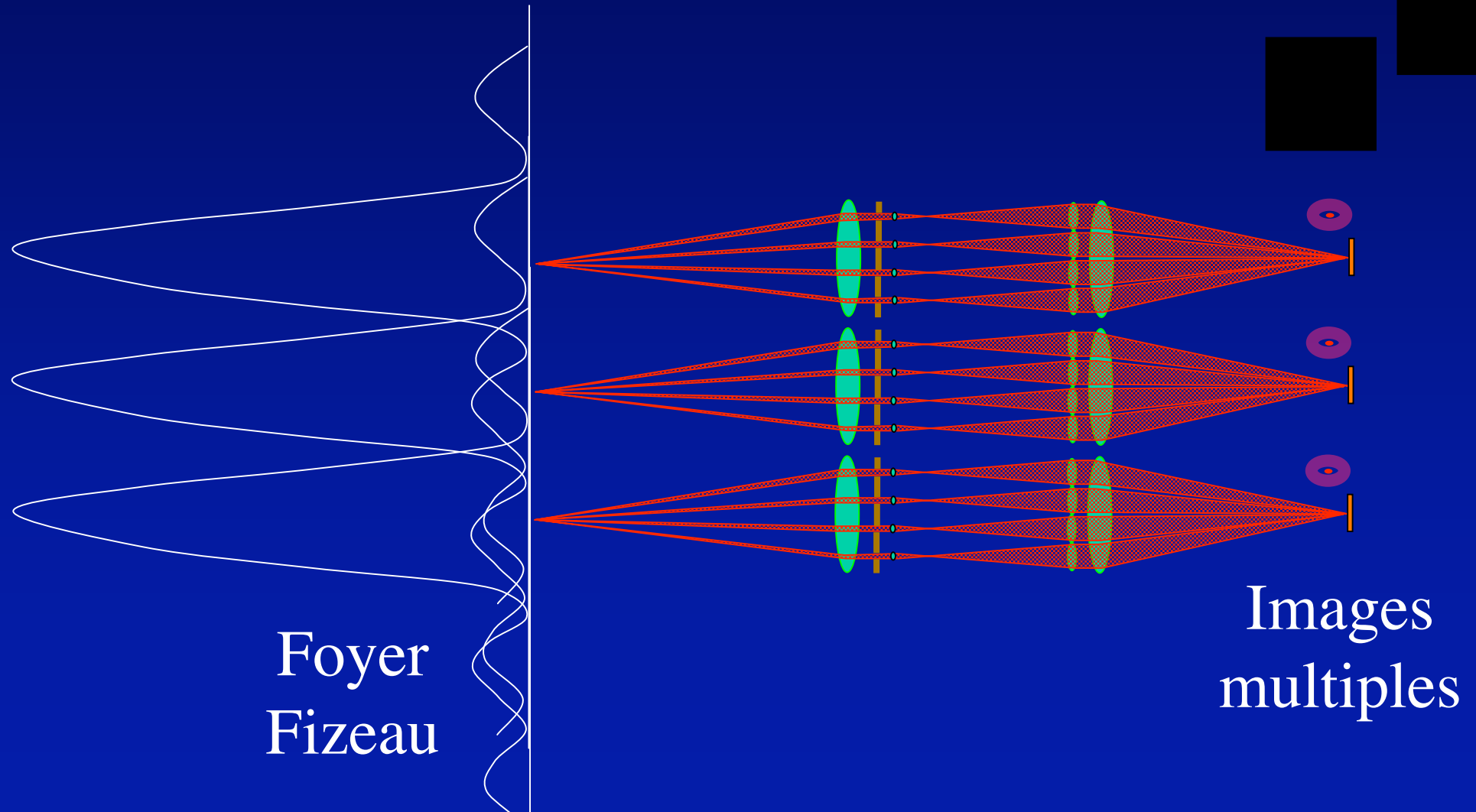
Densifieur de pupille



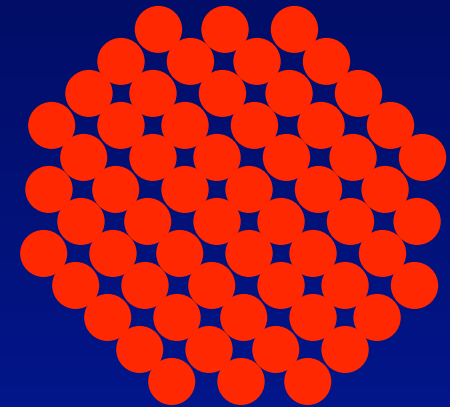
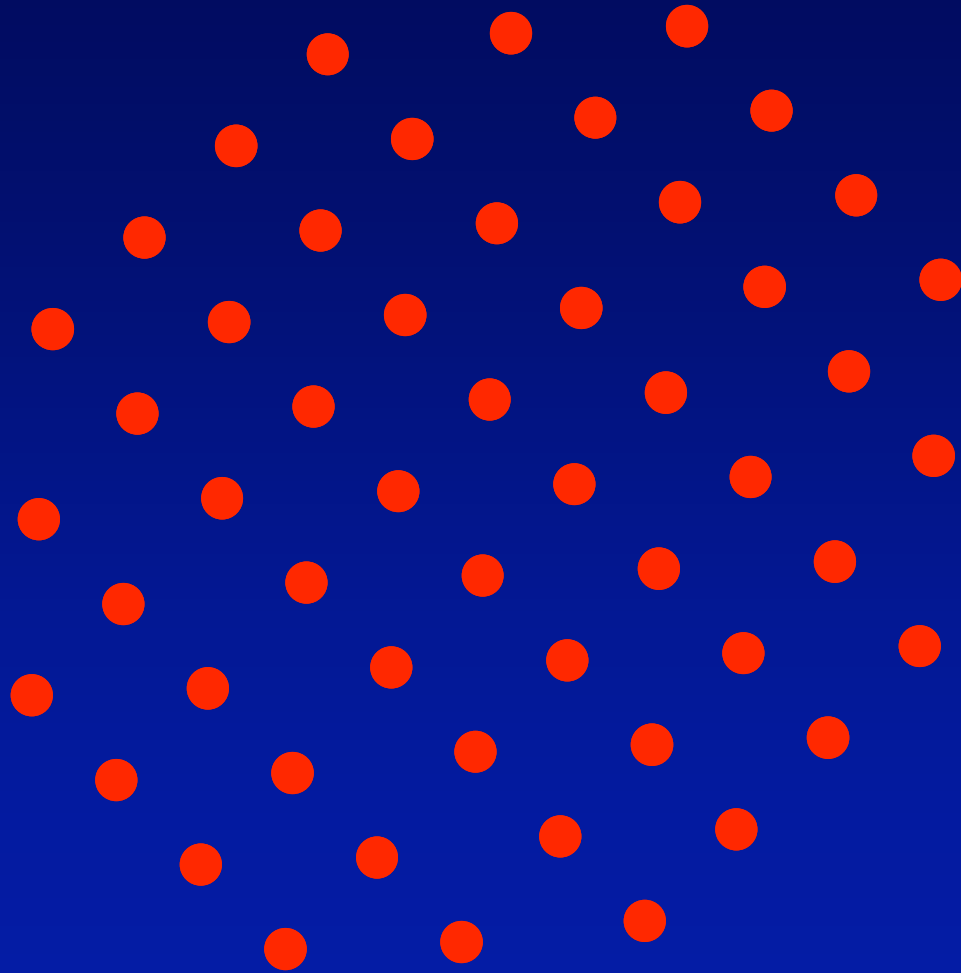
- Addition cohérente des sous-images

Densifieur multiple

- Sépare les images au foyer d'un Fizeau
- Forme plusieurs images a haute résolution

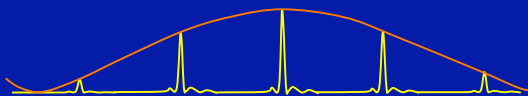


Densifier la pupille intensifie l'image



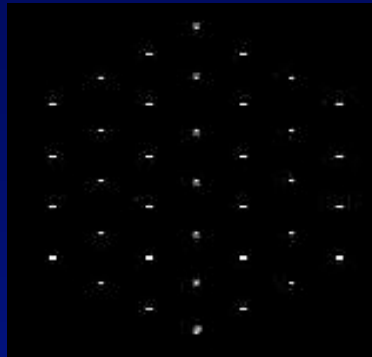
Fonction de
Diffraction

Fonction
d'interference



Pupil Densifier: Principle

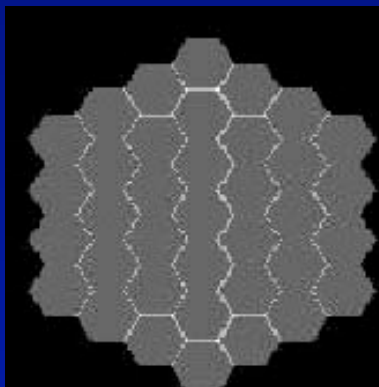
Diluted
Entrance
aperture



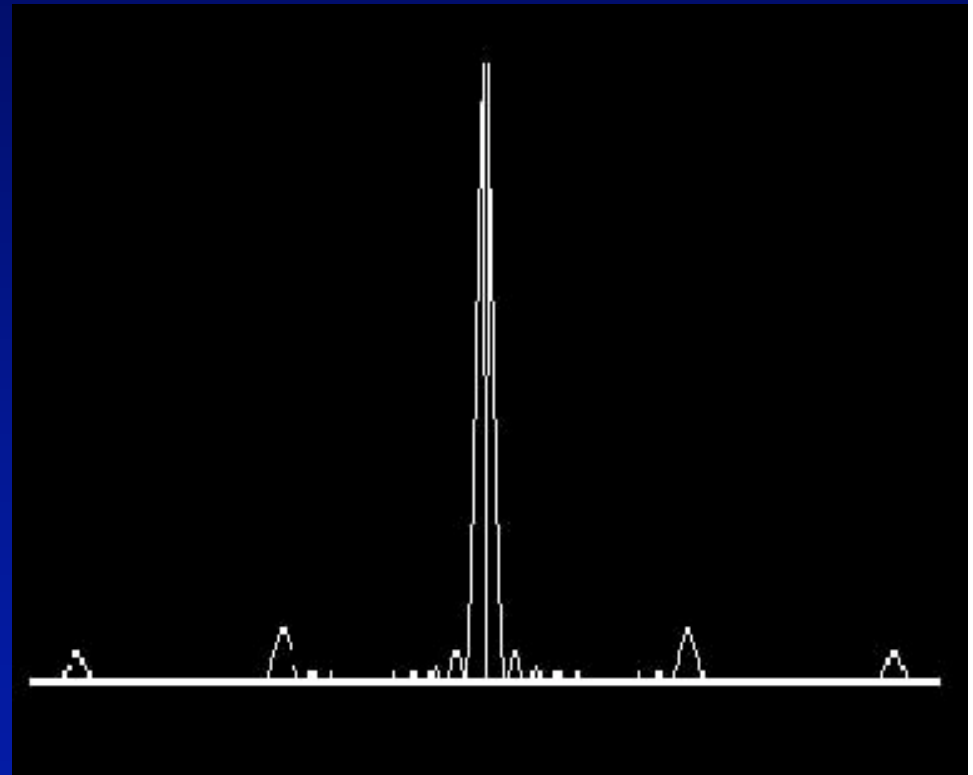
→
Fizeau spread
function



Densified
Pupil

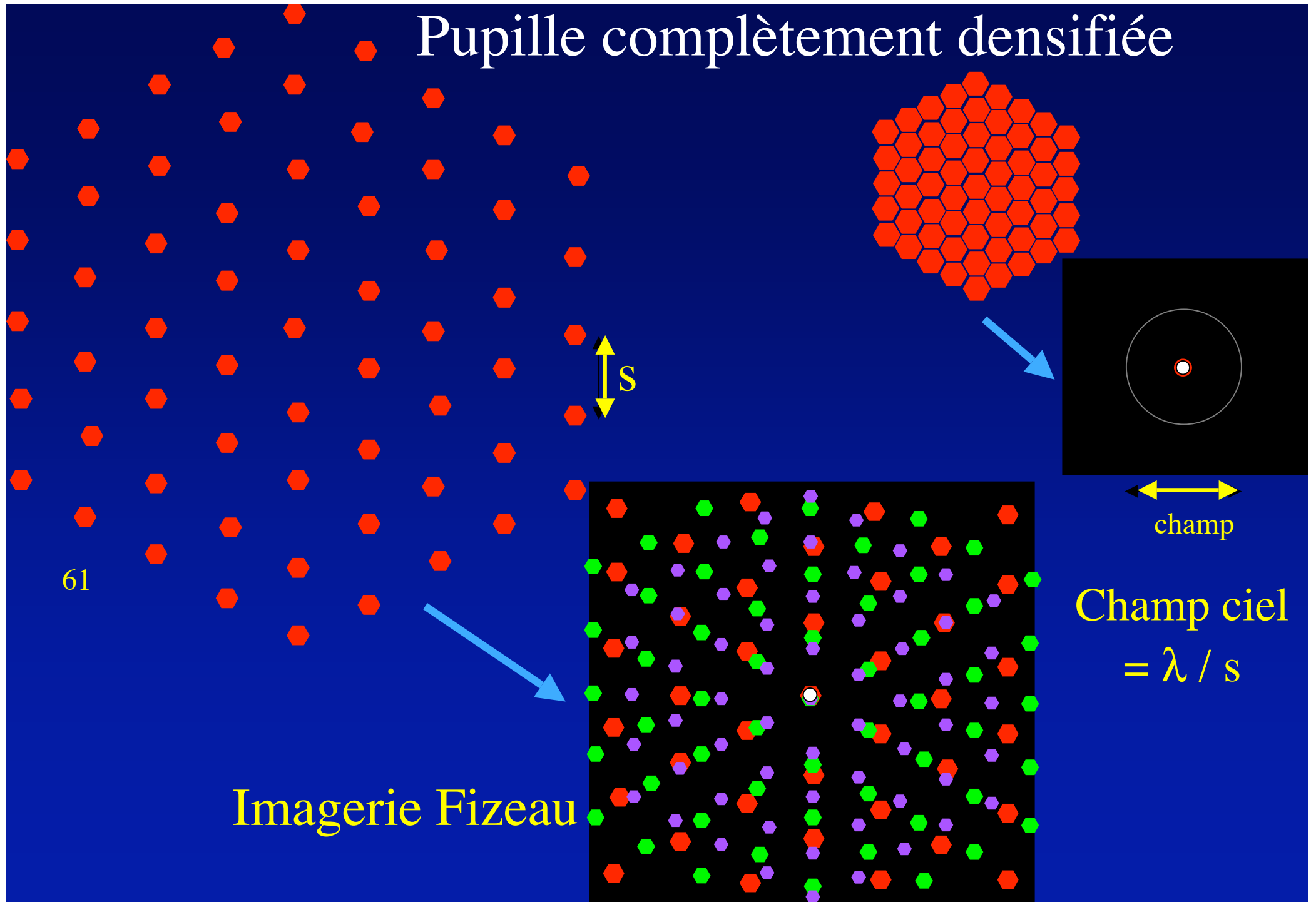


→
Intensification
of peak
Field reduction



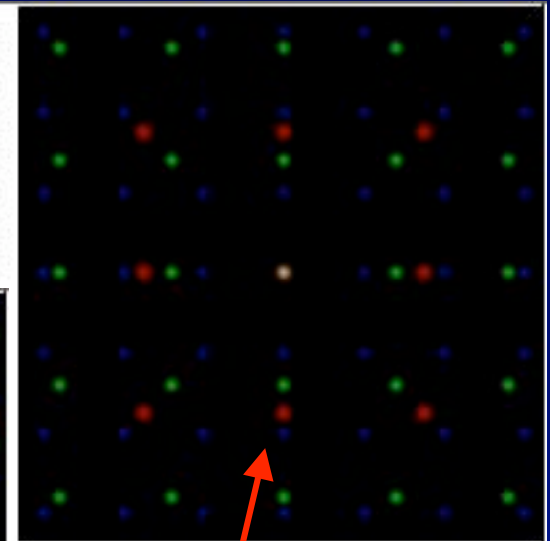
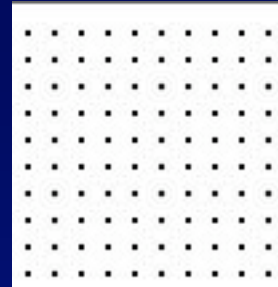
- Image is intensified with respect to Fizeau array
- Direct imaging becomes possible with highly diluted arrays

Pupille complètement densifiée

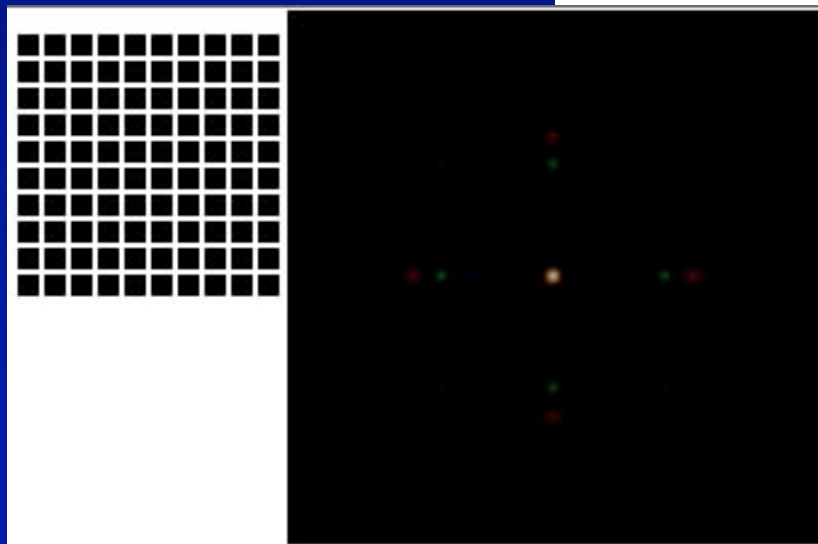
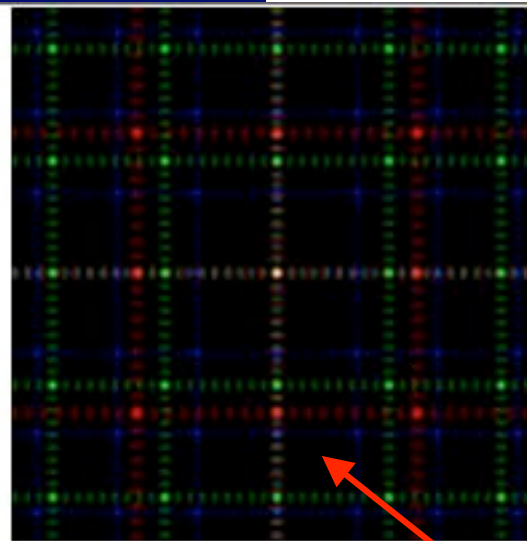
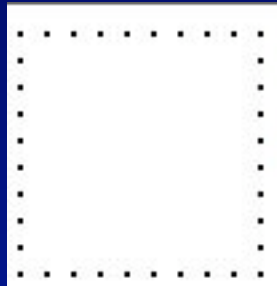


Figures de diffraction calculées (3 couleurs)

Ouverture périodique 10x10, diluée



Périodique lacunaire

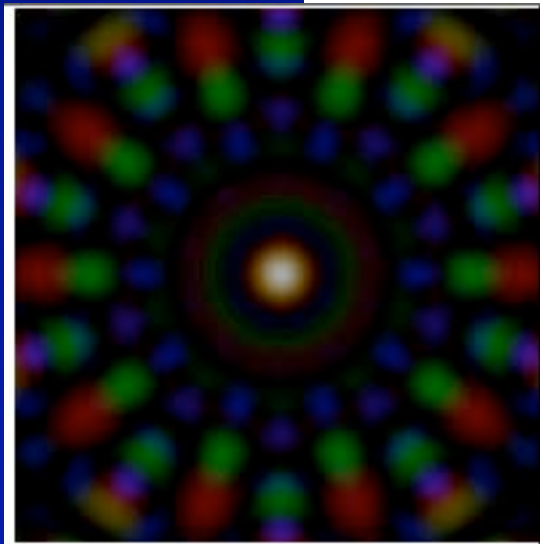
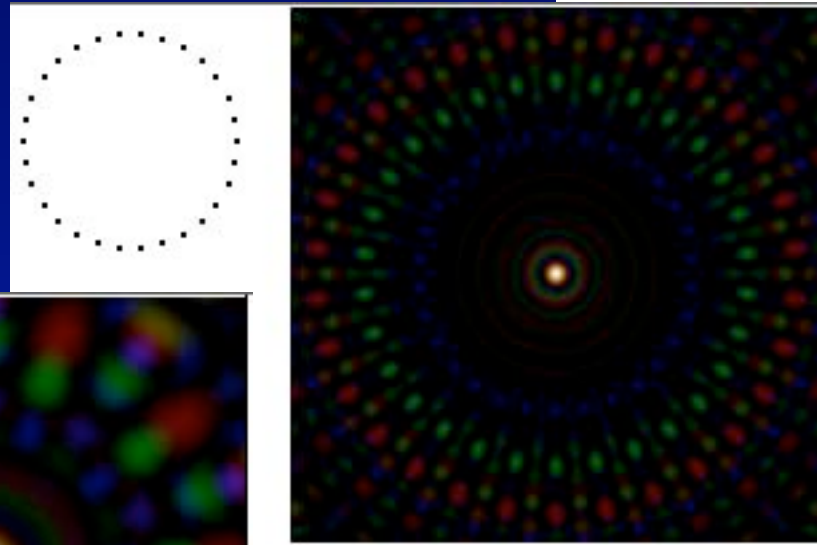
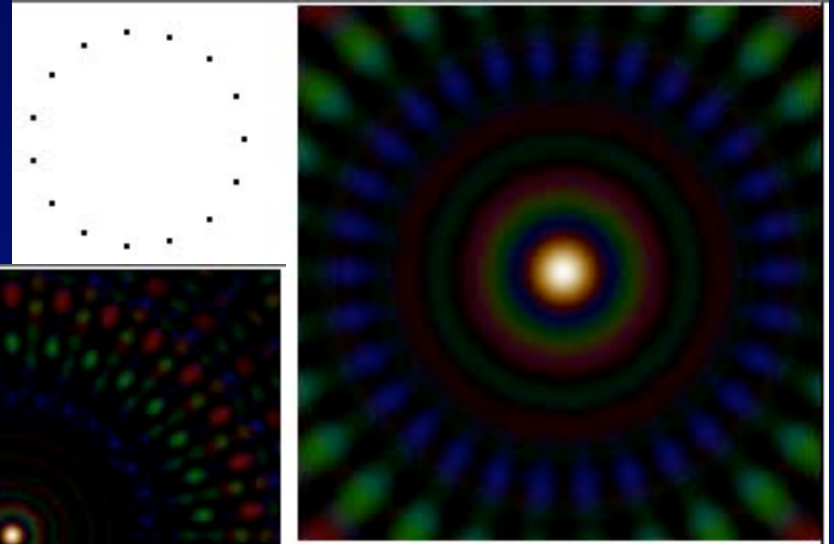


Ouverture dense

Ordres diffractés par le réseau:
pics dispersés

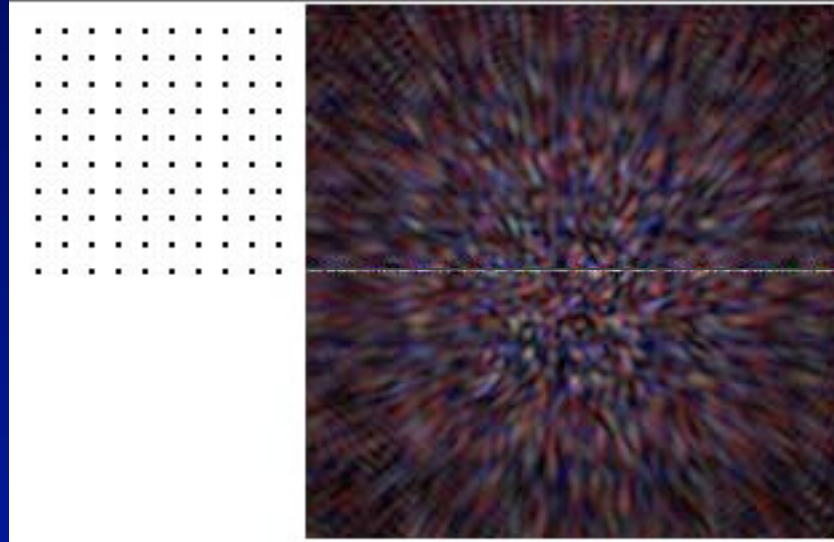
Figures de diffraction calculées

Ouvertures non périodiques



Pas d'ordres diffractés: pics secondaires atténués

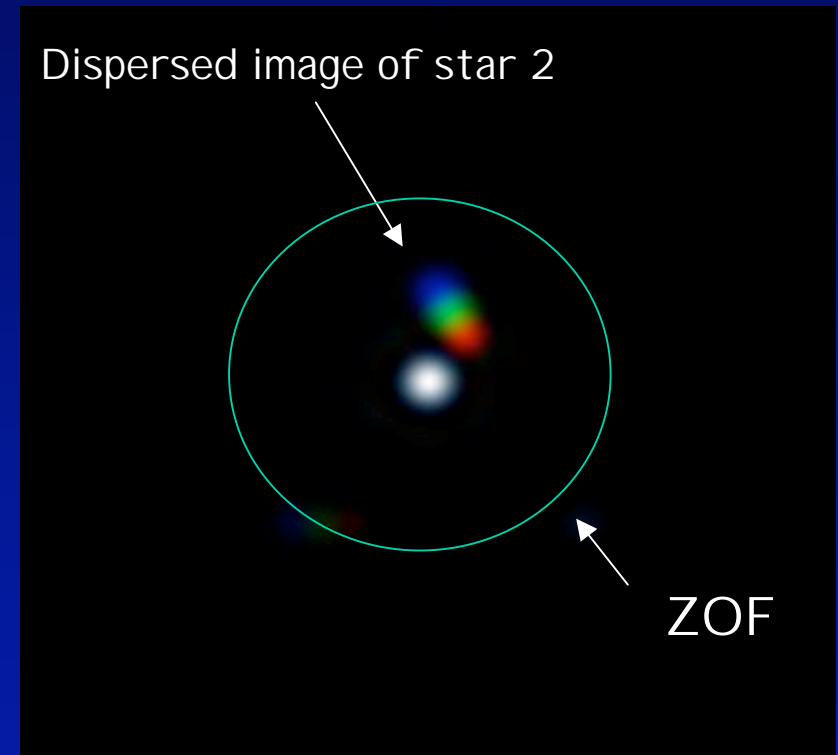
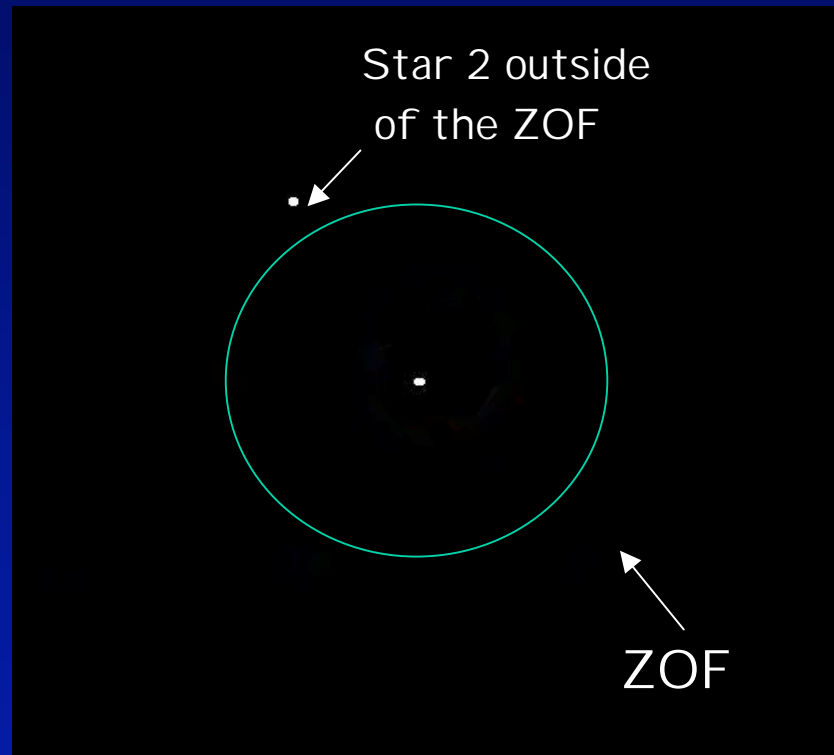
Figures de diffraction calculées



Ouverture non phasée (30 longueurs d'ondes)

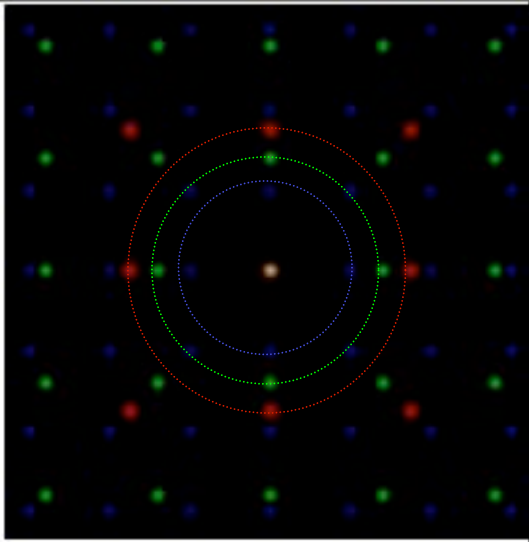
Imaging beyond the Zero-Order Field

Zero-Order Field : $ZOF = \lambda / s$



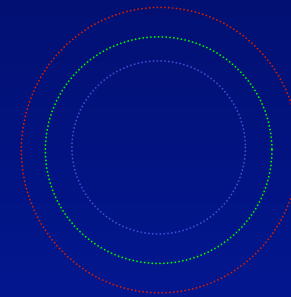
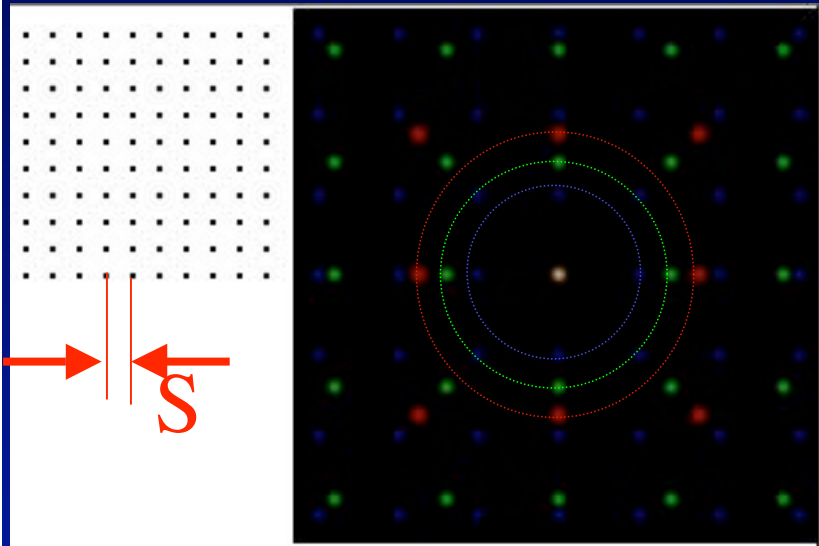
- Planets outside ZOF have a dispersed image in ZOF
- Extended image can be reconstructed if :
 - fewer than πN active pixels in object (OK for exo-planets)
 - multi- λ camera (ex : STJ, ... Courtès optics)

Champ « replié », pour une ouverture périodique, éventuellement lacunaire



- Convolution de la fonction d'interférence
- Fenêtrage par l'enveloppe diffractive
- Les étoiles extérieures apparaissent par leur pics d'ordre supérieur
- Leur dispersion est correctible (spectro-imageur....)

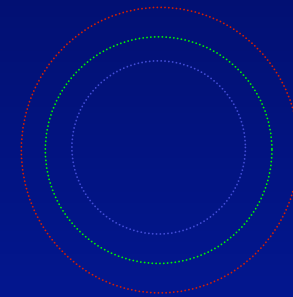
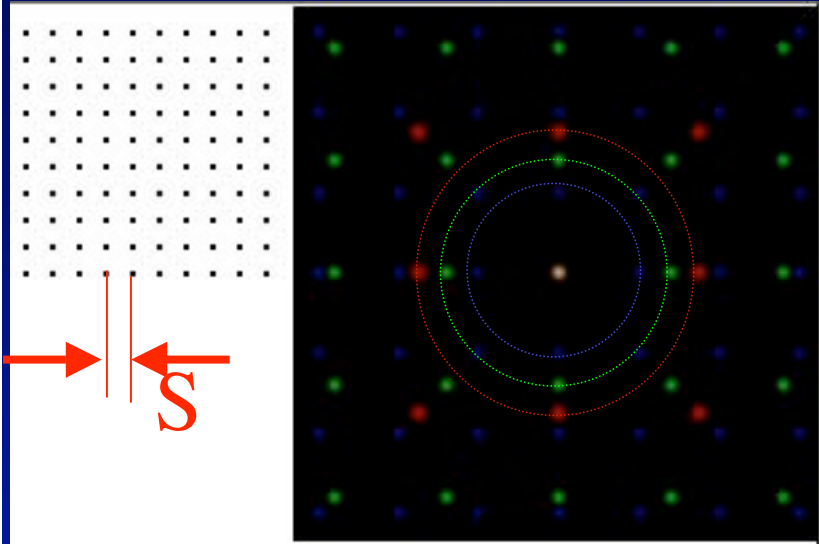
Champ « replié » d'une ouverture périodique: limitation par l'encombrement



- Espacement des pics sur le ciel : λ / s
- Nombre maximum de pics dans la fenetre : πN avec N ouvertures
- Même limitation pour interféromètre de Fizeau
- Relaché à $N(N-1)/2$ si l'ouverture est peu redondante


Sources ponctuelles et étendues

(fond de ciel, étoile)



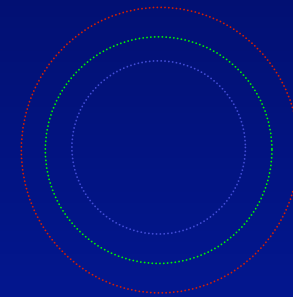
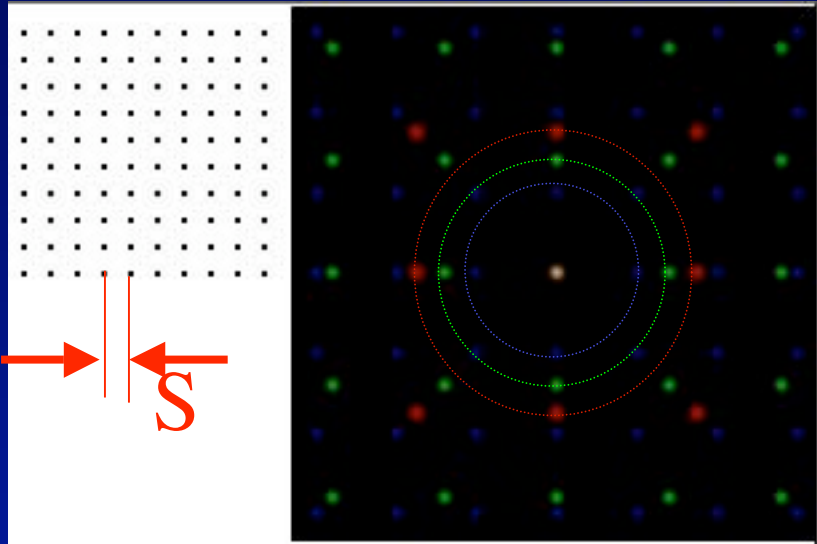
- L'image du fond de ciel est identique à l'addition incohérente des sous-images
- L'image de l'étoile ponctuelle s'ajoute
- Etoile détectable si

Etapes pour la recherche de vie extra-solaire

- Détecter des exo-planètes (Mayor et Queloz, 1995)
- Les distinguer de leur étoile mère 
- Analyse spectroscopique de l'atmosphère :
H₂O, CO₂, O₂, O₃, CH₄ et analogues de chlorophylles
- Indicateurs de photosynthèse: coloration non minérale, variation saisonnière

Cas de l'imagerie exo-planétaire

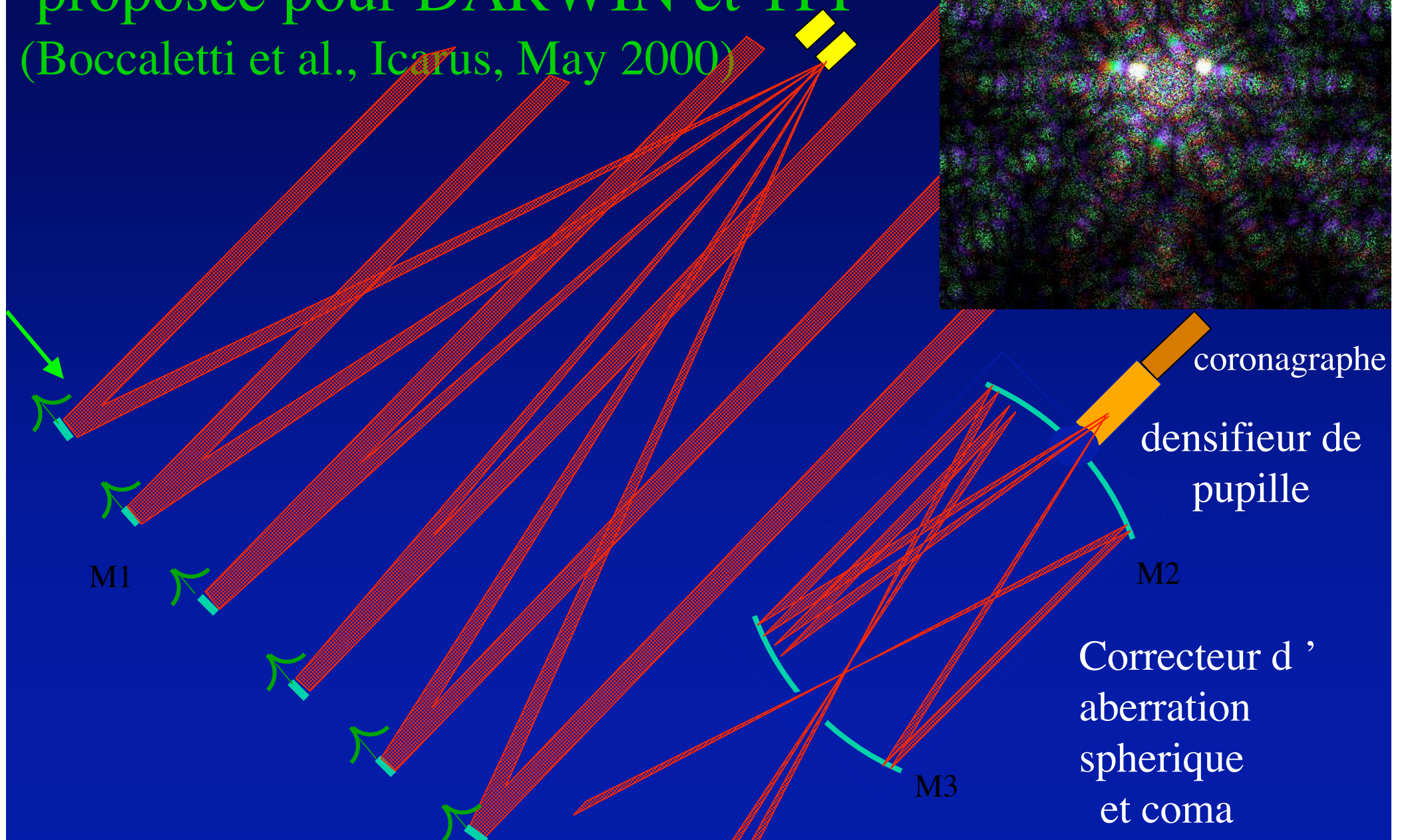
(version hypertélescope proposée pour DARWIN et TPF)



- Résidu coronagraphique de l'étoile
- Infra-rouge:
 - émission thermique des miroirs, bruit thermique du détecteur
 - se comportent comme le fond de ciel engendré par l'émission thermique zodiacale

architecture hyper-telescope

proposée pour DARWIN et TPF
(Boccaletti et al., Icarus, May 2000)



concept d'hypertélescope

proposé par les chercheurs de LISE (étude NASA en cours)

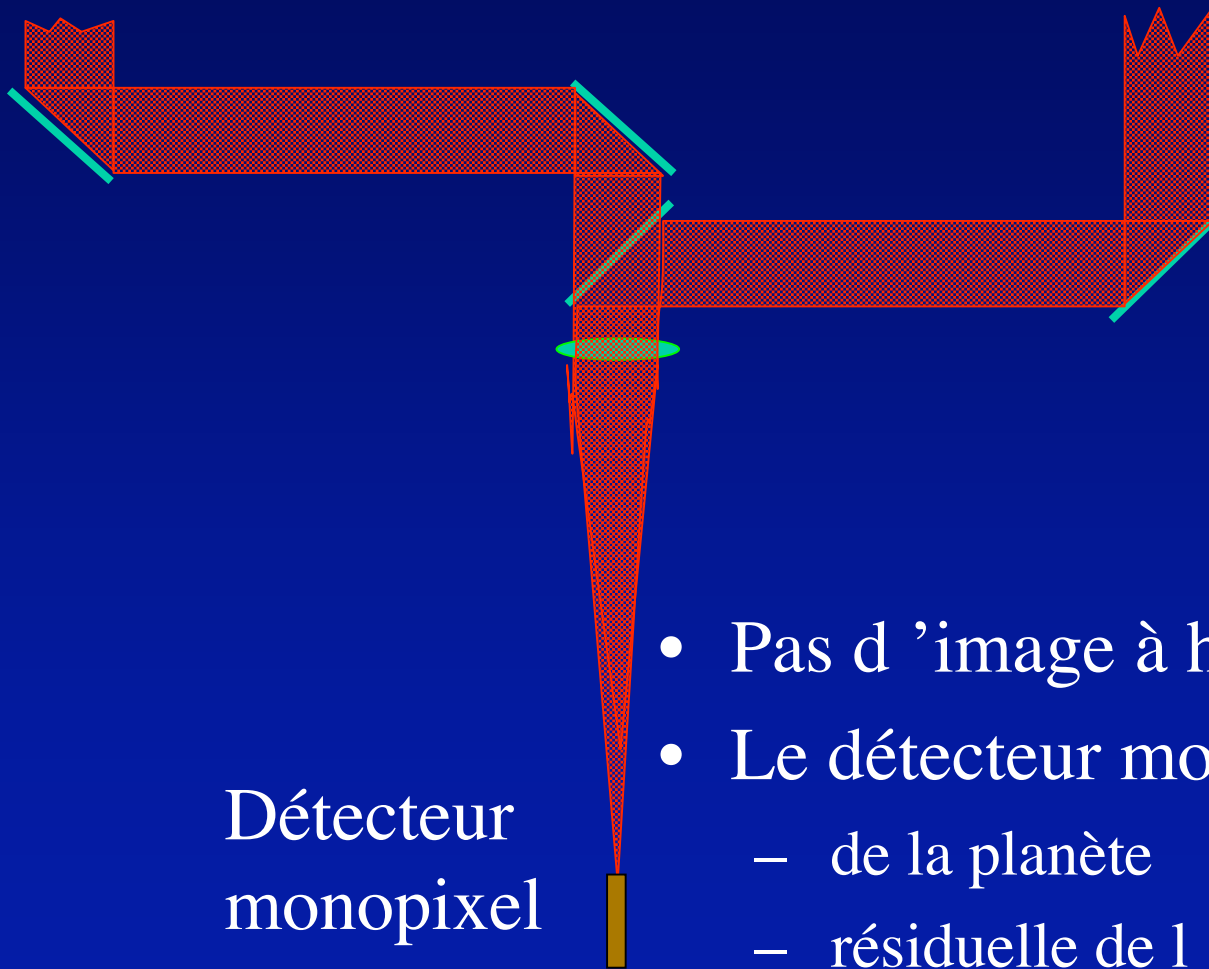
vue d'artiste par Boeing /SVS



Artist's Rendering of the Single Array Element



Comparaison avec le noircissement par séparatrice (version initiale de DARWIN et TPF)



Détecteur
monopixel

- Pas d 'image à haute résolution
- Le détecteur monopixel mélange la lumière:
 - de la planète
 - résiduelle de l 'étoile
 - du fond de ciel, collectée dans λ / d

Sensibilité comparée des hypertélescopes et interféromètres à séparatrice (de Bracewell)

- Signal zodiacal:
 - les contributions des ouvertures s'ajoutent en intensité dans les deux cas
 - $N_h L_z (\lambda/d_h)^2 d_h^2 (\pi N_h)^{-1} = (1/\pi) L_z \lambda^2$
 - $N_B L_z (\lambda/d_B)^2 d_B^2 \tau_B = N_B \tau_B L_z \lambda^2$
- le facteur $1/\pi$ résulte des πN_h resels dans le champ hypertélescope

Sensibilité comparée des hypertélescopes et interféromètres à séparatrice

- **signal exo-zodiacal** (petite nébulosité, diamètre angulaire ϕ) :
 - $N_h L_{ez} \phi^2 d_h^2 (\pi N_h)^{-1} = (1/\pi) N_h^{-1} L_{ez} \phi^2 S_h$
 - $N_B L_{ez} \phi^2 d_B^2 \tau_B = \tau_B L_{ez} \phi^2 S_B$

Sensibilité comparée des hypertélescopes et interféromètres à séparatrice

- Contamination de l'étoile:

- $I_s G_h^{-1} N_h d_h^2$ (G_h est le gain par resel)

- $I_s G_B^{-1} N_B d_B^2$ (G_B est le gain total)

Sensibilité comparée des hypertélescopes et interféromètres à séparatrice

- Fond total:

- $F_h = (1/\pi) L_z \lambda^2 + (1/\pi) L_{ez} \phi^2 d_h^2 + I_s G_h^{-1} N_h d_h^2$

- $F_B = N_B \tau_B L_z \lambda^2 + N_B \tau_B L_{ez} \phi^2 d_B^2 + I_s G_B^{-1} N_B d_B^2$

- contraste de la planète, en l'absence de bruit de photons

- $C_h = I_p N_h d_h^2 F_h^{-1}$

- $C_B = I_p N_B d_B^2 \tau_B F_B^{-1}$

Sensibilité comparée des hypertélescopes et interféromètres à séparatrice

- signal /bruit de photons (pose T_h et T_B):
 - $SNR_h = I_p N_h d_h^2 F_h^{-1/2} T_h^{1/2}$
 - $SNR_B = \tau_B I_p N_B d_B^2 F_B^{-1/2} T_B^{1/2}$
- Gain en temps d'observation :
 - $T_B T_h^{-1} = N_h^2 d_h^4 N_B^{-2} d_B^{-4} \tau_B^{-2} F_B F_h^{-1}$

exemple: detection infra-rouge d'une Terre à 10 parsecs

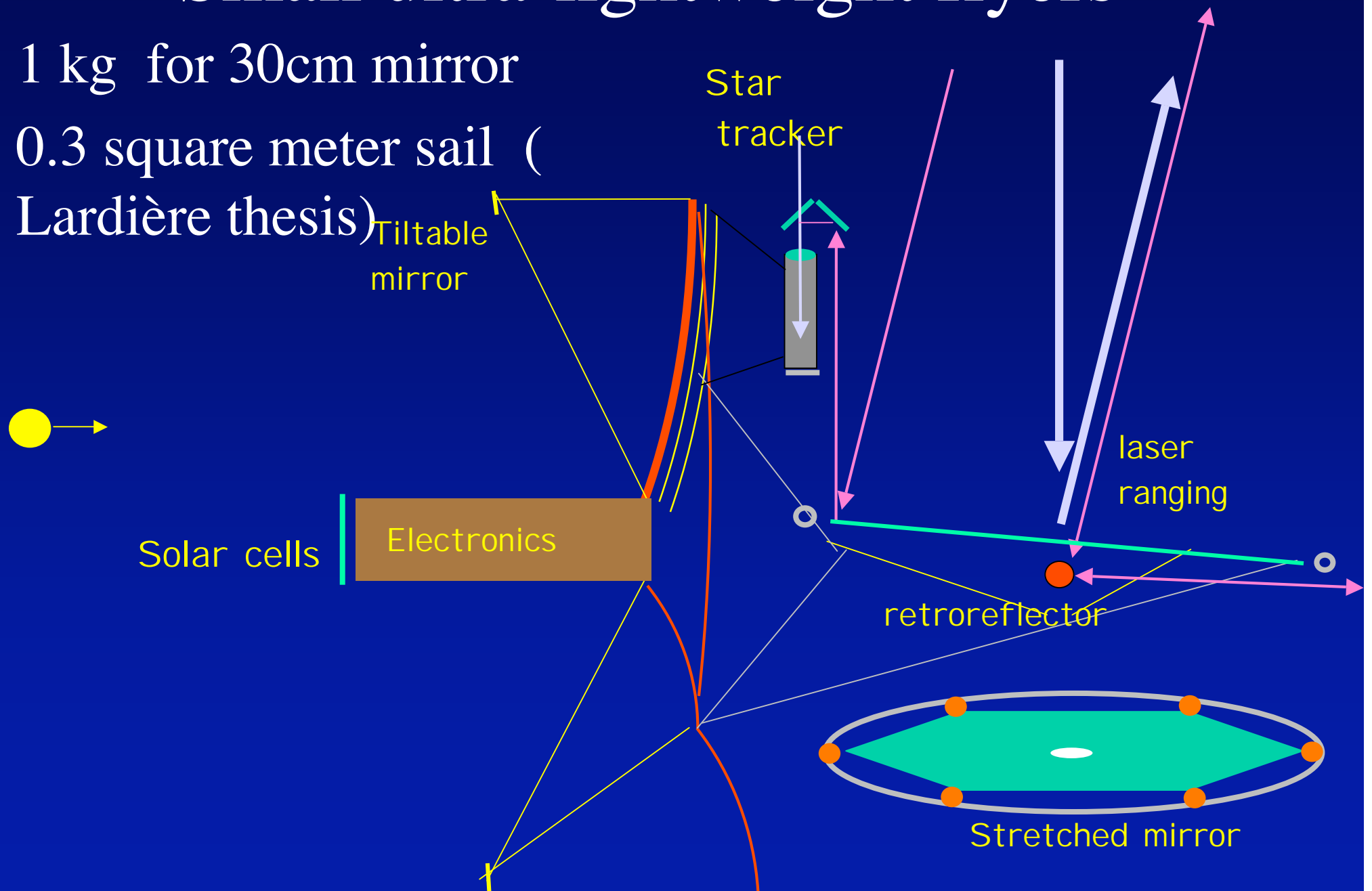
- 50,000 photons par heure et metre carré d' ouverture (bande 4 microns a 10 microns).
- detection 160 fois plus rapide avec un hypertelescope à 37-elements de 0.9m qu'avec un interferomere à séparatrice à 6 éléments de 2.2m (même surface 30 m²)
- Suppose étoile 10^6 fois plus lumineuse que la planète , zodiacal $7.6 \cdot 10^{-6}$ Watt. m⁻². steradian⁻¹ ; exo-zodiacal 10 fois plus intense dans un disque de 0.7 arc-second .
- $G=5000$, erreurs piston 97 nm RMS. Efficacité quantique 10% , bruit de photons pur

Dimension possible d'un CARLINA

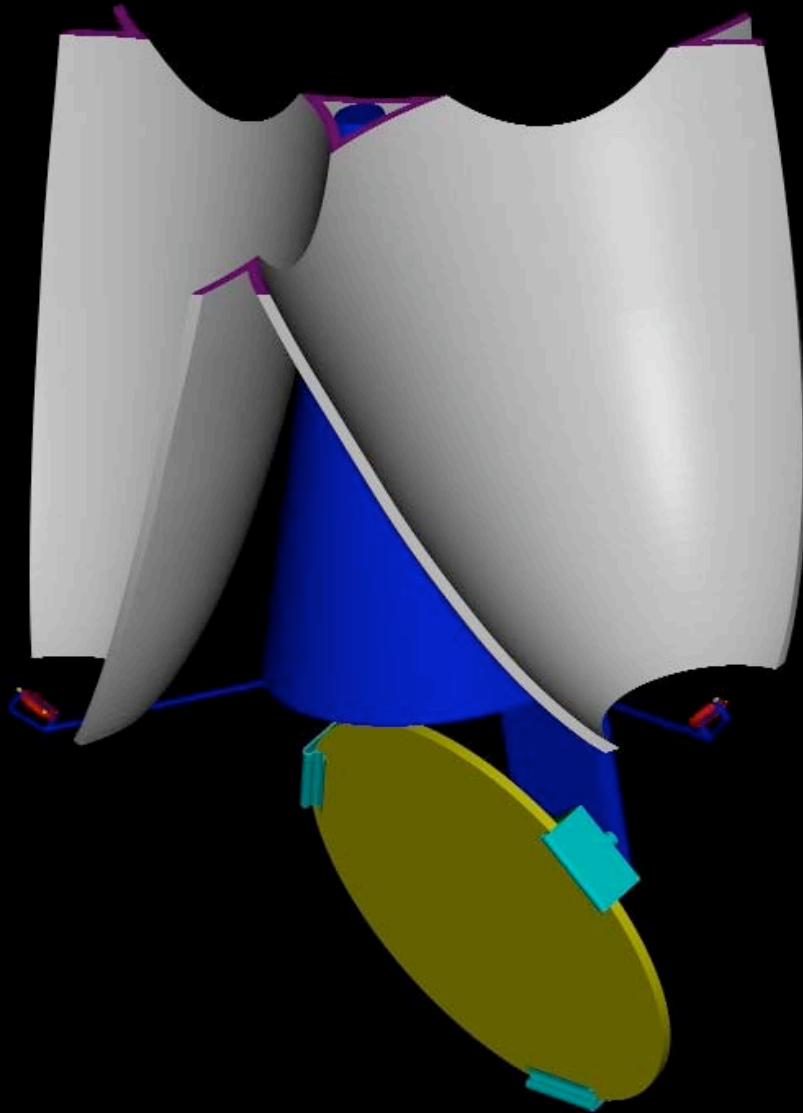
- Exemple: pupille de 1000m a $f/2$
- Miroirs de 1m tous les 10m ? (1 hectare/km²)
- Nécessite vallée large de 5600m pour $\pm 45^\circ$
(champ moyen)
- Profondeur 1170m, orientation Est-Ouest
- Correcteur de 8m ? Miroirs membrane M2 et M3
(pupilles 8mm sur M3 si éléments M1 de 1m)
- Rechercher les sites possibles

Small ultra-lightweight flyers

- 1 kg for 30cm mirror
- 0.3 square meter sail (Lardière thesis)



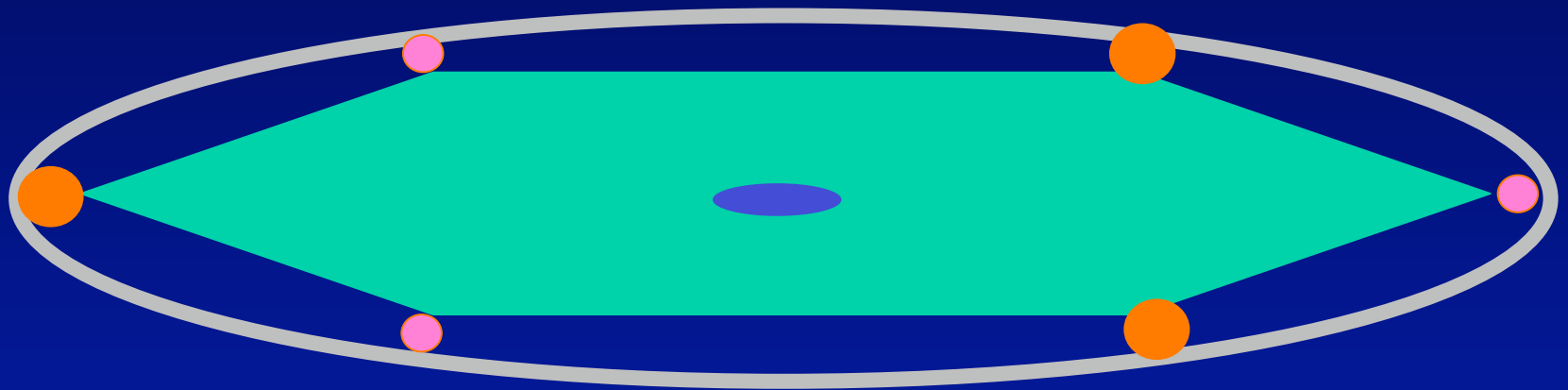
Eléments de miroir actionnés par des voiles solaires?



- Petit miroir orientable ou micro-miroirs dans l'image solaire
- Lent mais durable et peu coûteux ?
- Voile servant aussi d'ombrelle, mais trop proche pour 30°K ?
-

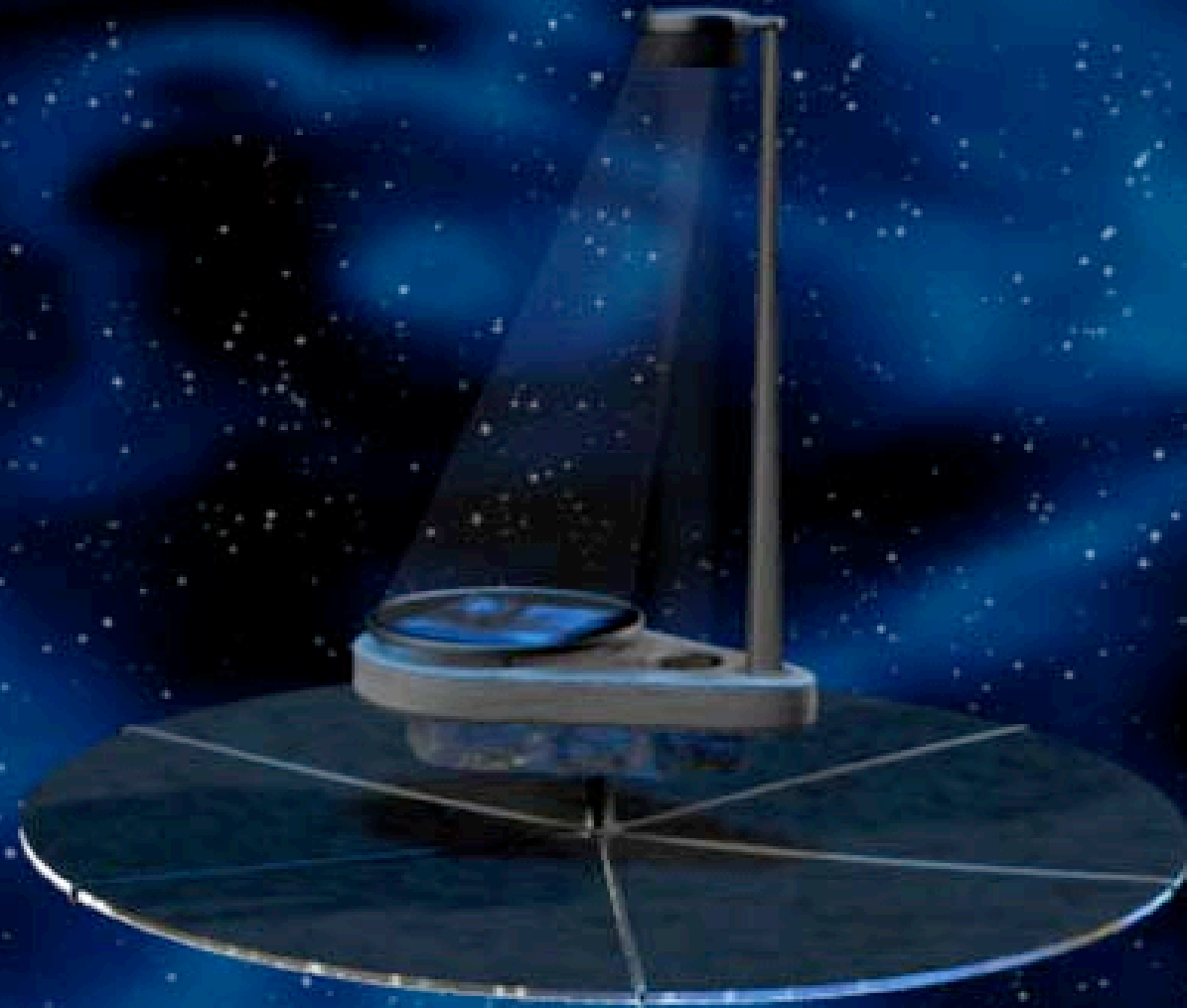
Stretched membrane mirrors

(Angel et al.)



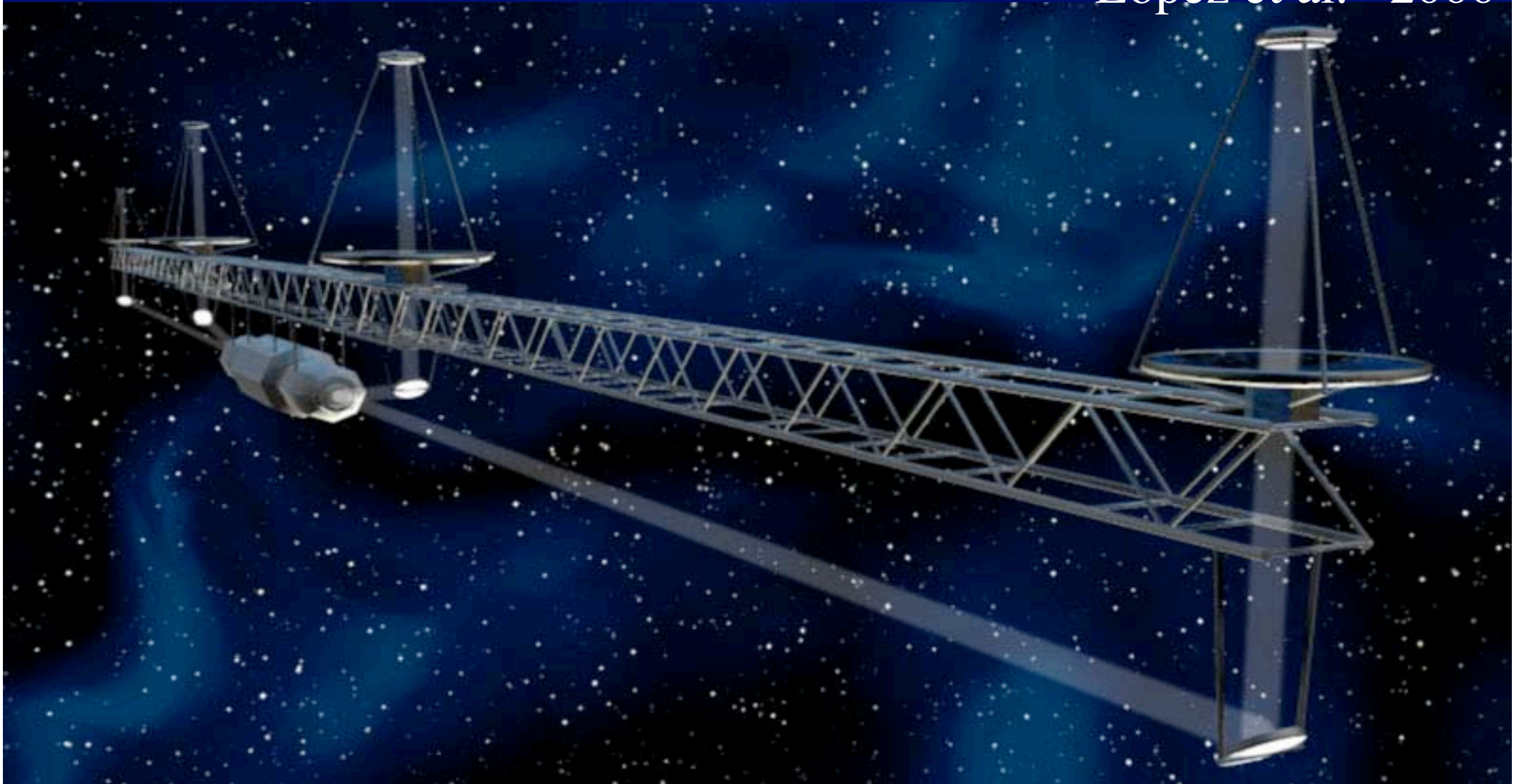
- Silicon carbide or nitride membrane, bi-concave (63 microns concavity for 60cm diameter, $R=800m$)
- Tensioned in frame, 3 points or 6 with triplet of actuators
- Ion-figured

Apodized Square Aperture artist rendering

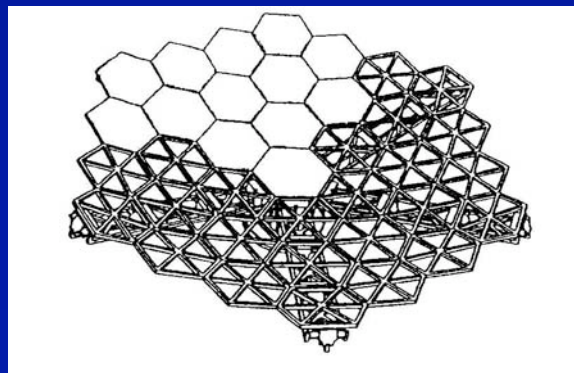
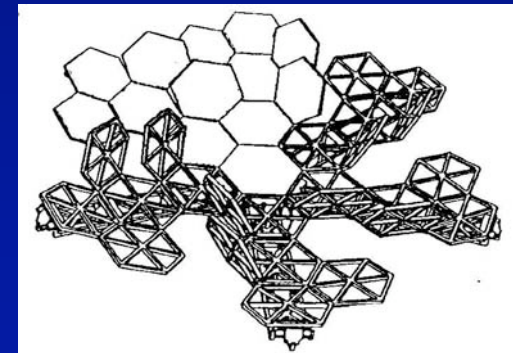
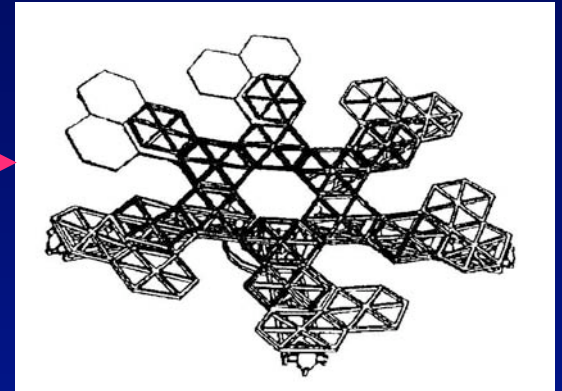
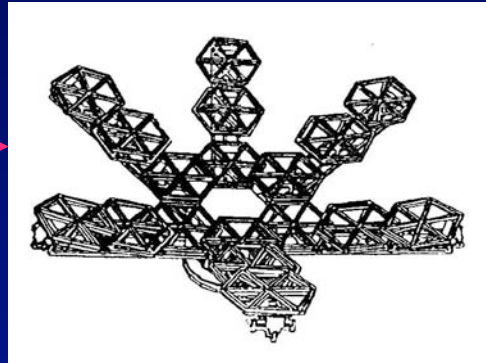
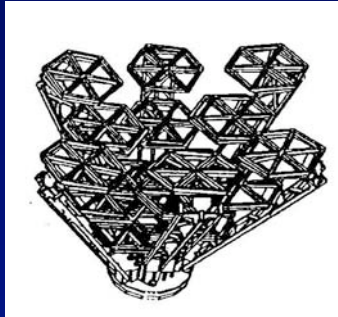
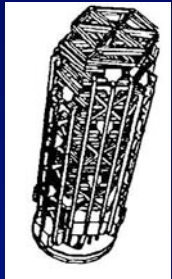


Artist's Conception of Redundant Linear Array

Lopez et al. 2000



Deployable Reflector: “Starburst”*



- Up to 3 ring segmented reflector
- Maximum deployed diameter: 23 m
- Inefficient package for deployed diameters $>10\text{m}$

*Mikulas, M. et. al.: *Deployable Concepts for Precision Segmented Reflectors*, JPL D-10947, June 1993.

Concept Exo-Earth Imager

- hyper-télescope 300 km, 150 éléments en 3 anneaux
- avec coronographe
- forte densification de pupille : 10 000

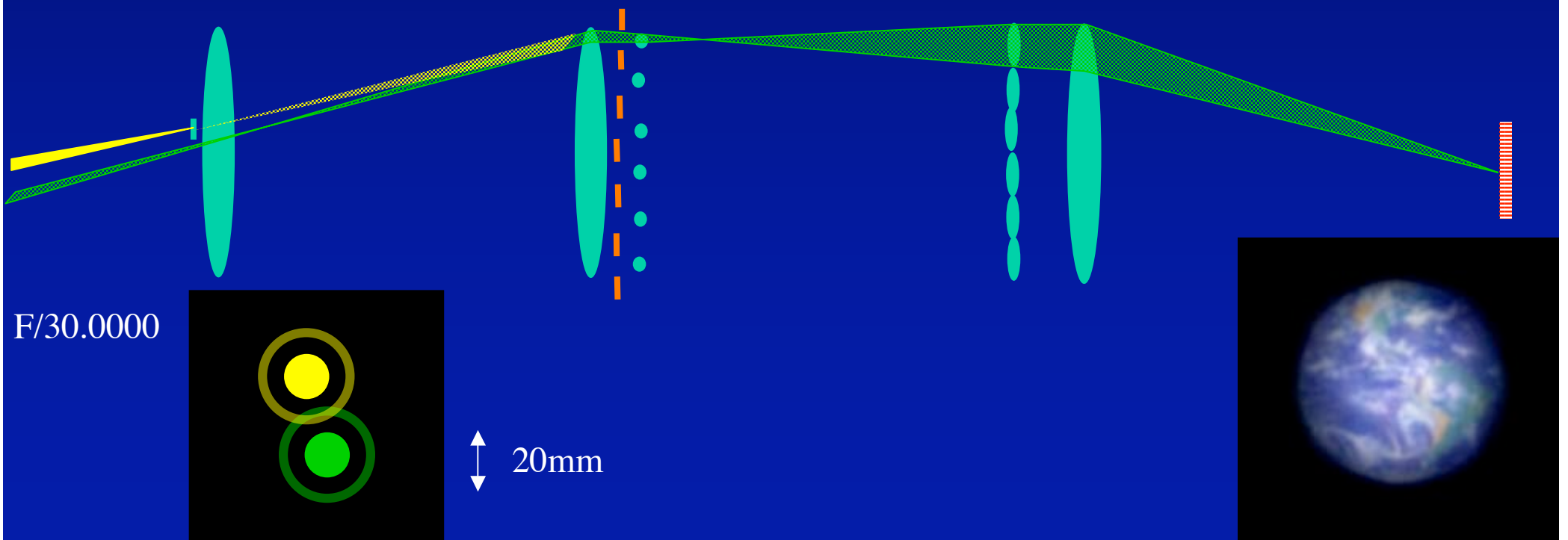


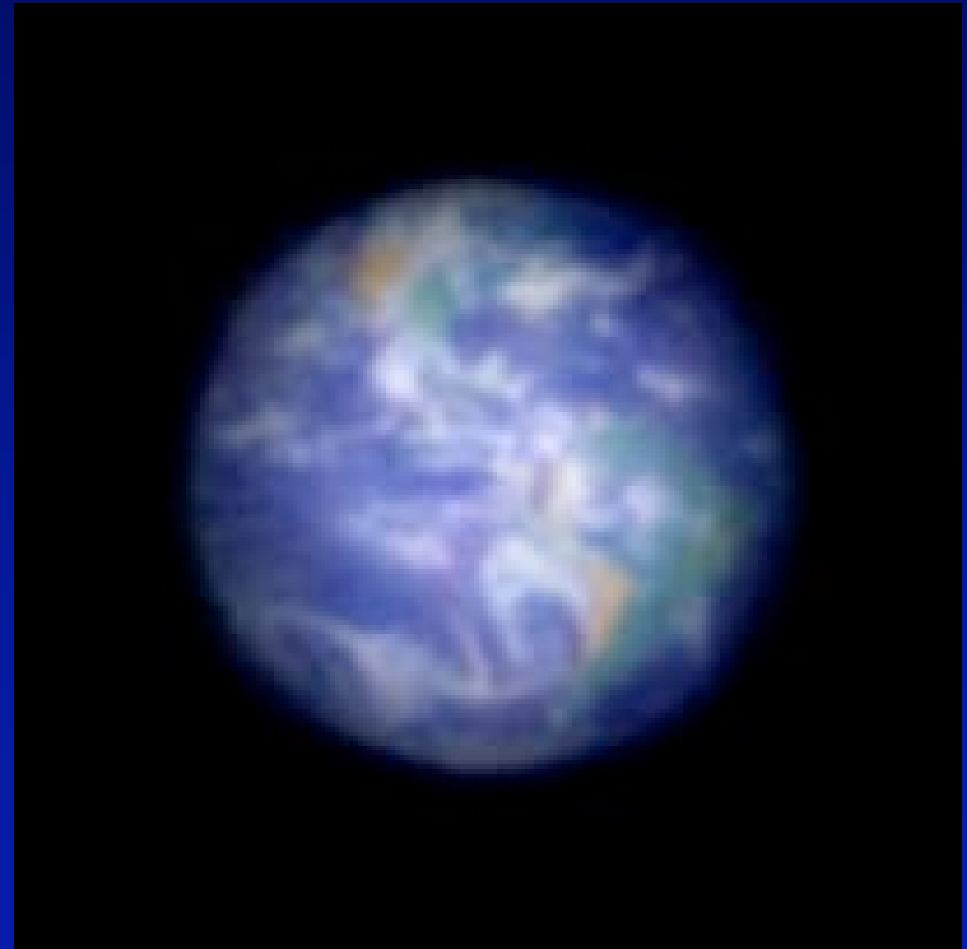
Image simulée d'une Terre vue à 10 années lumière par un hyper-telescope de 150km

150 miroirs de 3m,
pose 30mn

(Labeyrie, *Science*, 17 Septembre 1999)



objet



image