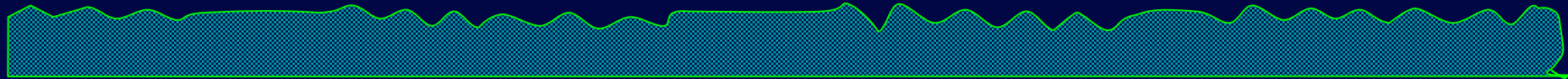
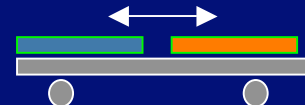


# Hologramme direct ou synthétique ?



- 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



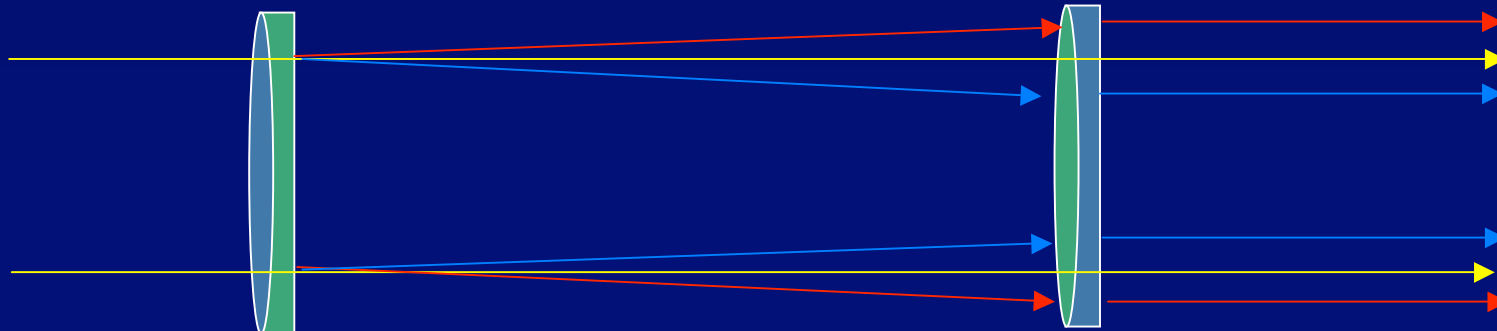
# Elargir la bande spectrale

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

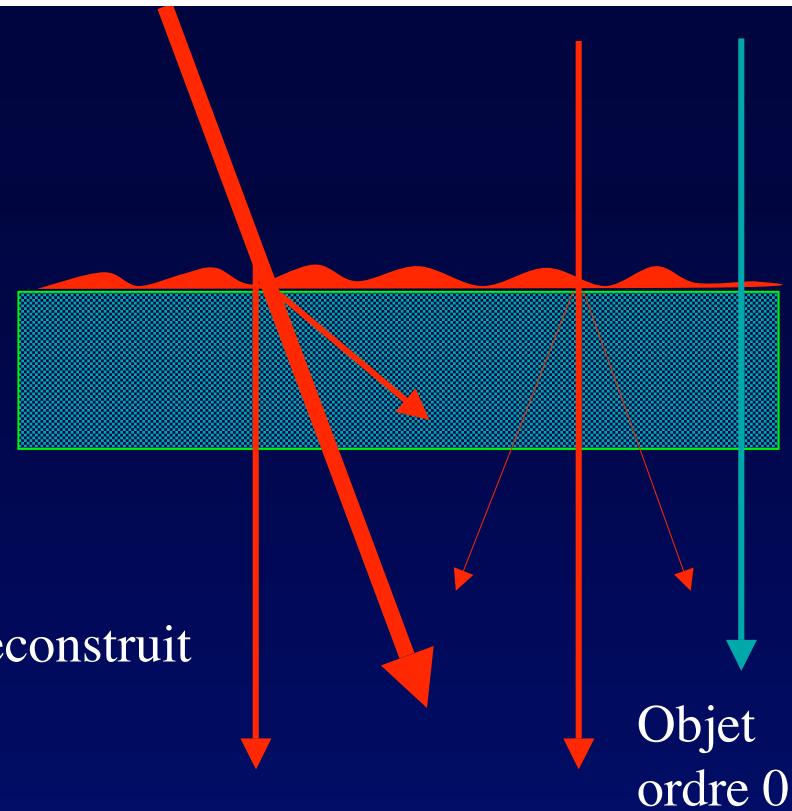


To be explored:

Achromatize with dispersed  
reference beam ?

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

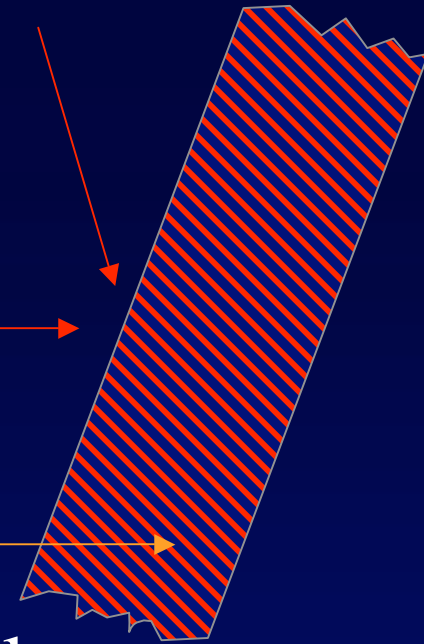
# Hologramme de phase, à faible efficacité de diffraction



- Interférence destructrice en équilibrant les amplitudes, avec déphasage  $\pi$
- 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 ?

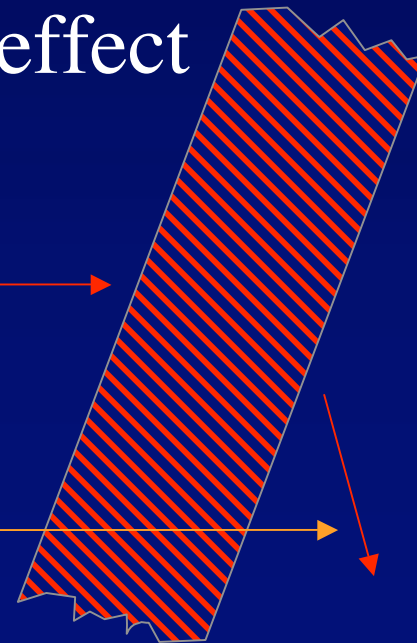
Lippmann-Bragg  
hologram



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

with  $N$  wavelengths

planet mostly transmitted

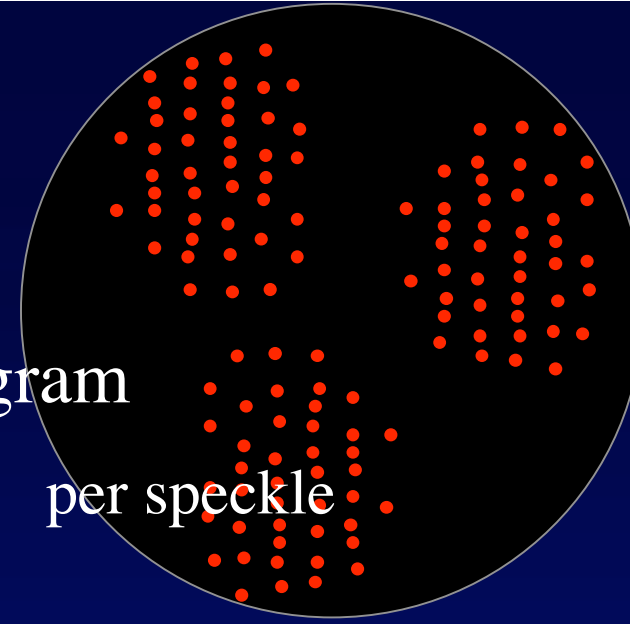


# Hologramme en couleurs pour achromatiser ?

- Avantage de principe: pas d'onde conjuguée

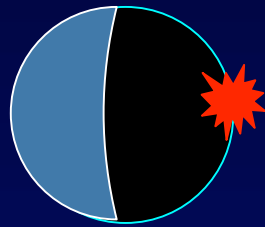


# Photon noise in hologram and limitation of nulling



- $N_h$  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



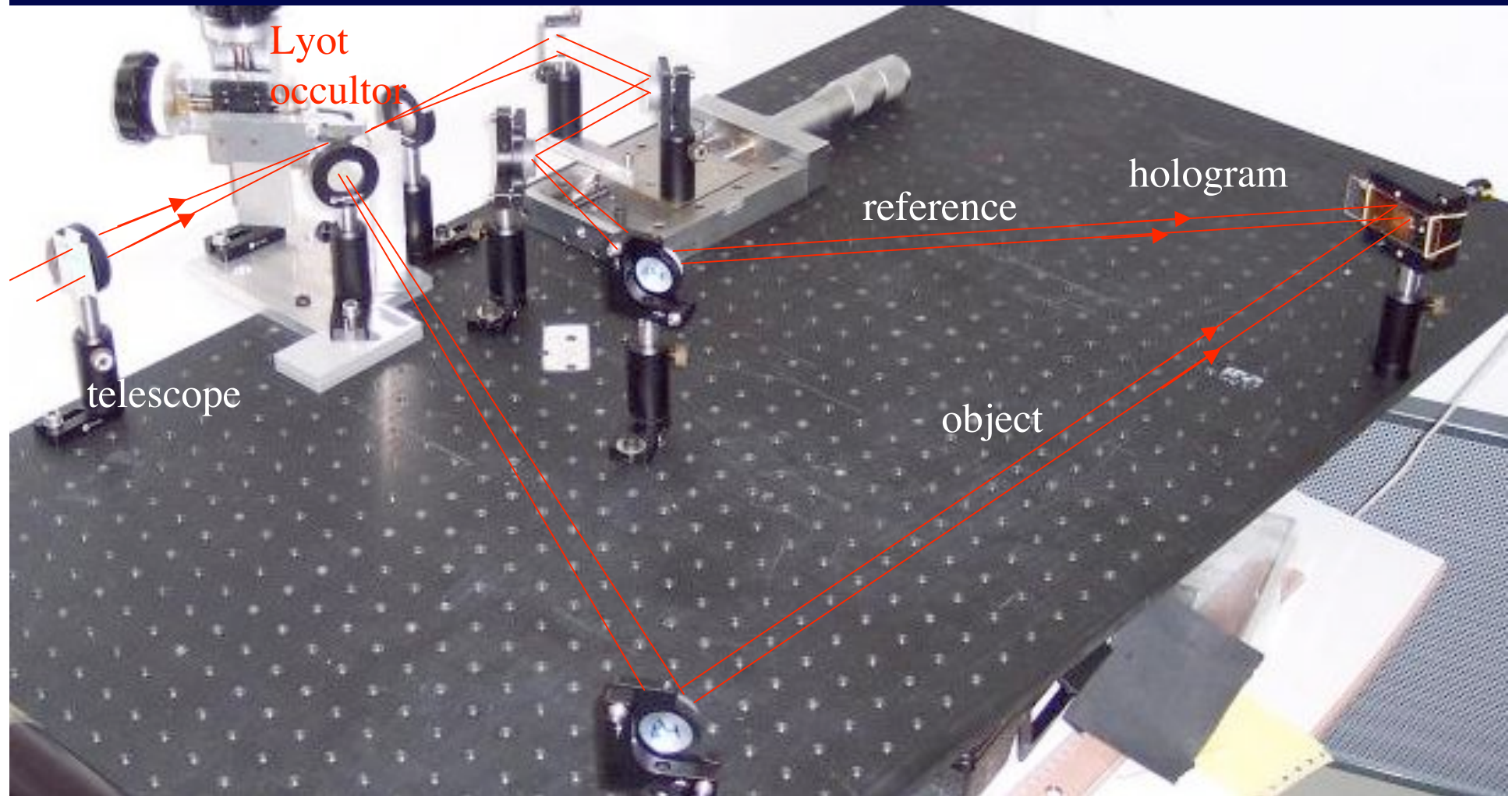
- laser source on Earth or in space, usable as artificial star
- Gives low-noise hologram in a short exposure
- refreshed when needed....
- ....the AO being frozen during the exposures



# 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)



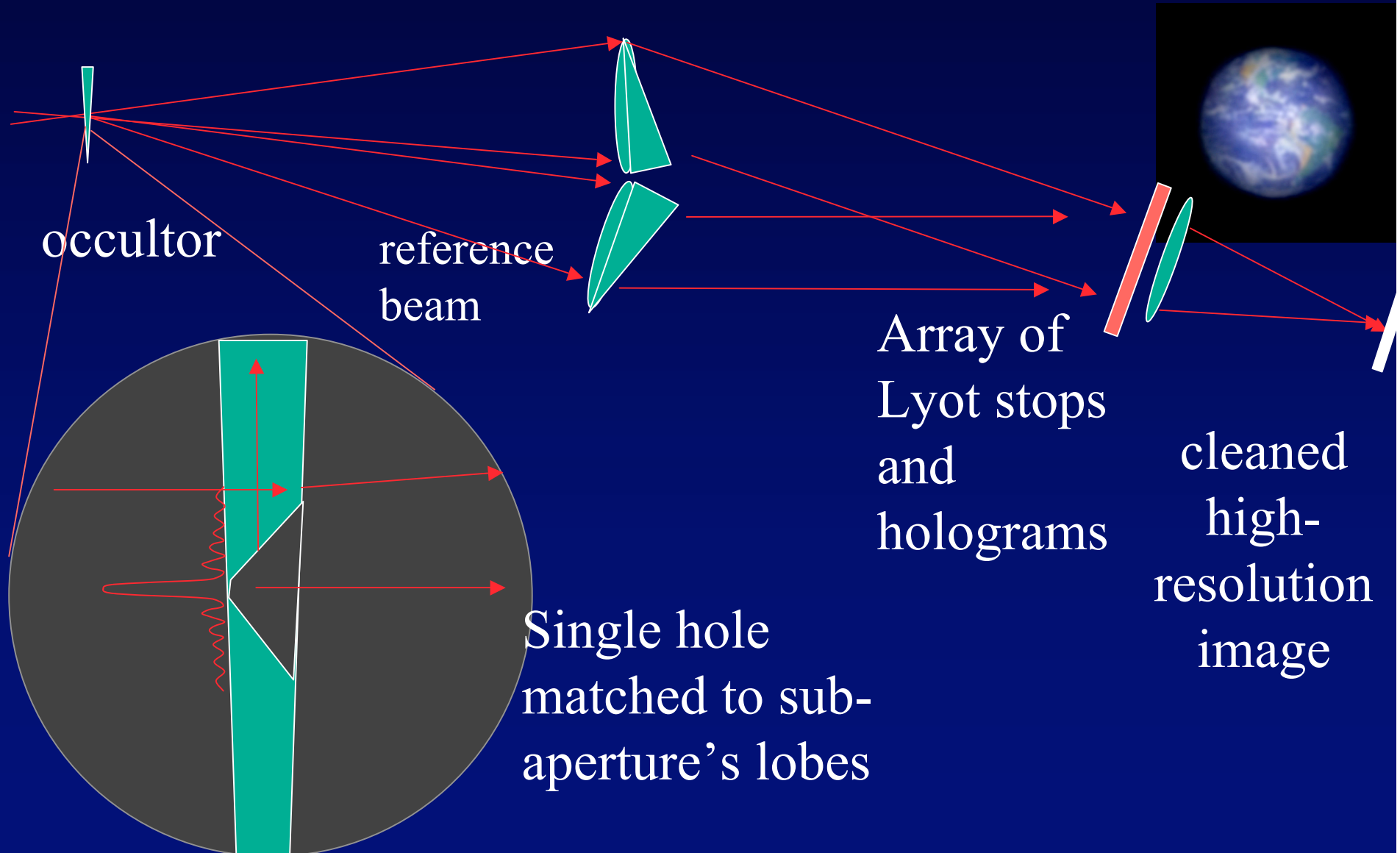
# Hologram can relax the bumpiness tolerance

- 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

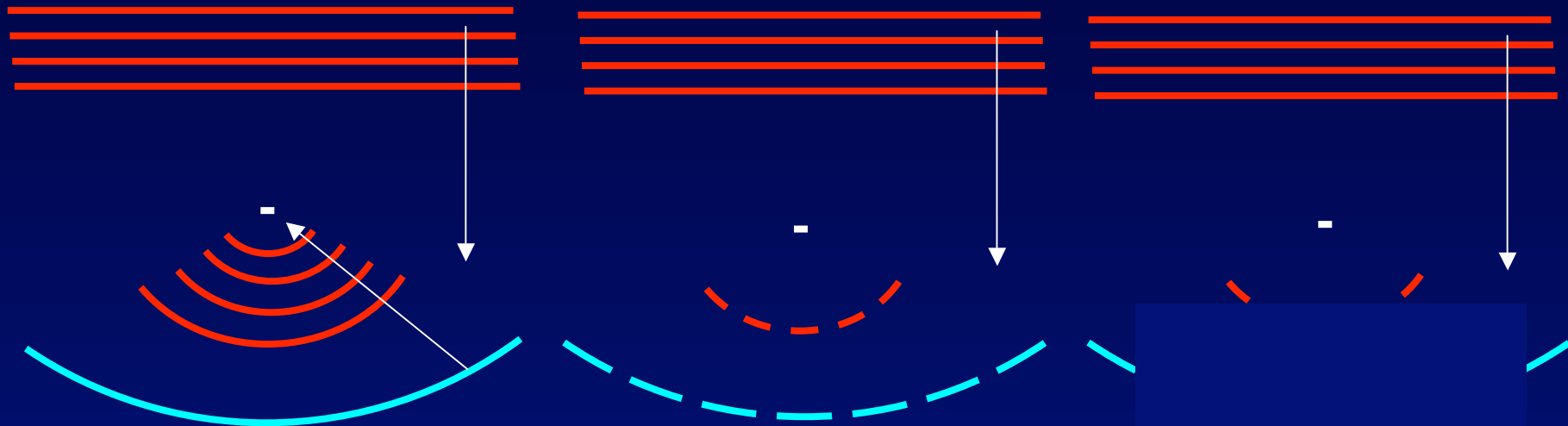
Better than « incoherent » or « post-detection » subtraction of stellar residue (initially proposed for HST by Bonneau et al., 1975 posted at [www.oamp.fr/lise/BonneauEtAlHST.pdf](http://www.oamp.fr/lise/BonneauEtAlHST.pdf) )

- 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

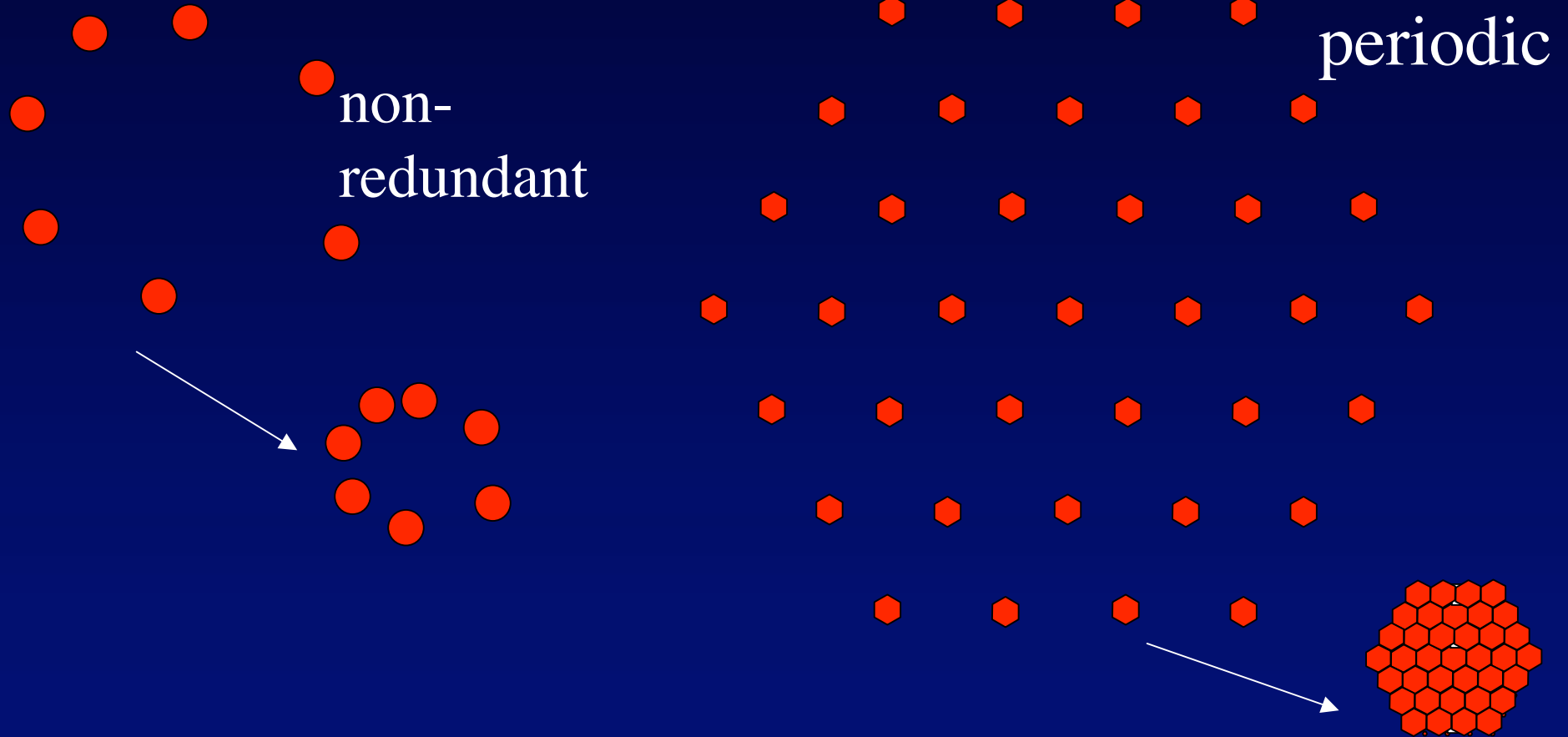
1. Synthèse d'ouverture par paires ou triplets
2. Imagerie directe avec ouverture multiple:
  - Combinaison Fizeau
  - Combinaison hypertélescope

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)

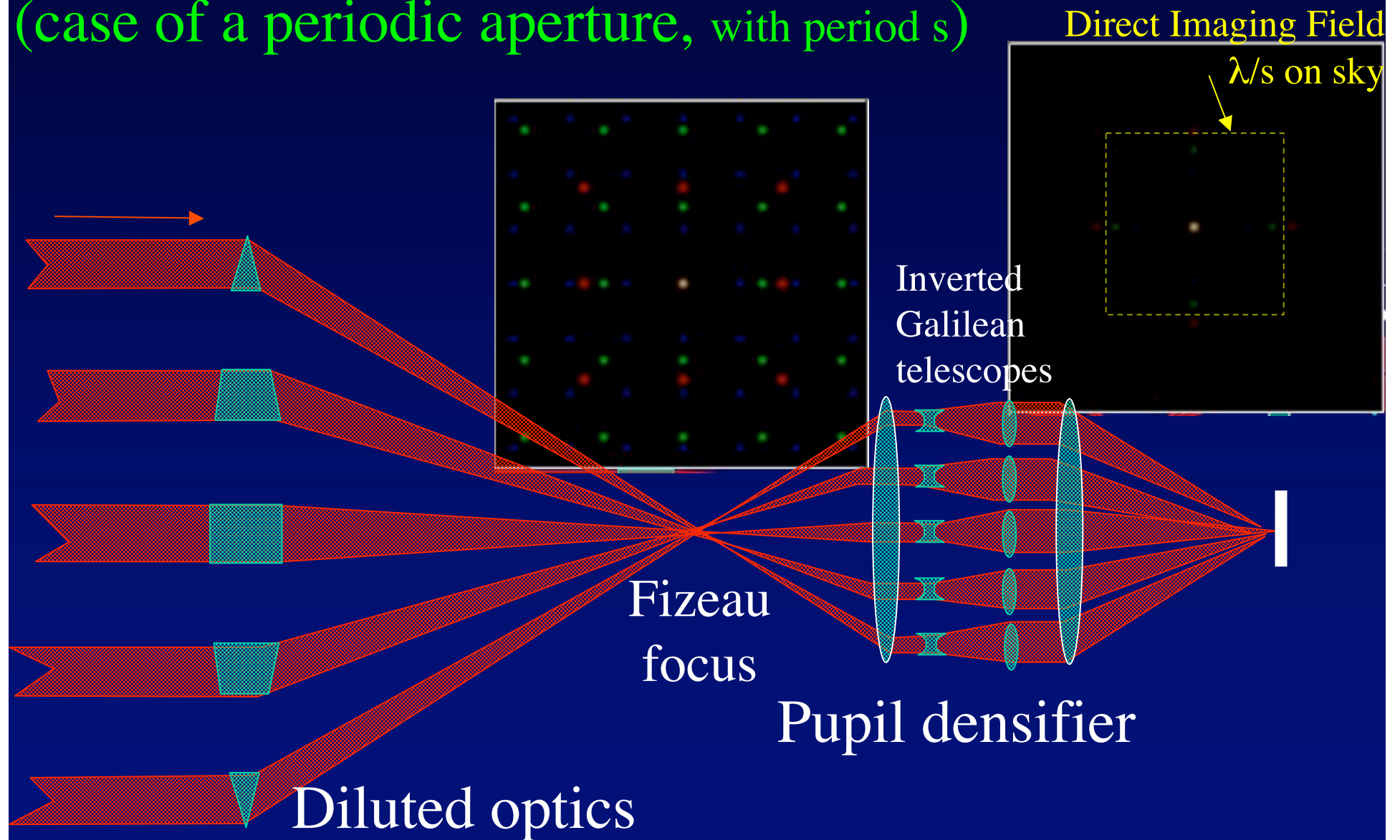


- Densify the pupil
- Preserve the center's pattern



# Principle of hypertelescopes

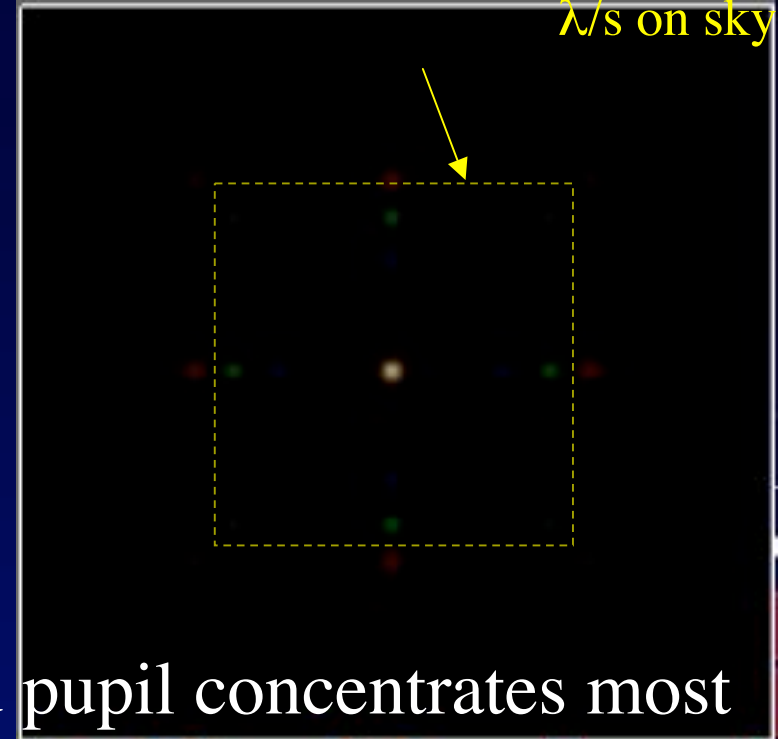
(case of a periodic aperture, with period  $s$ )



# Properties of hypertelescopes

Direct Imaging Field

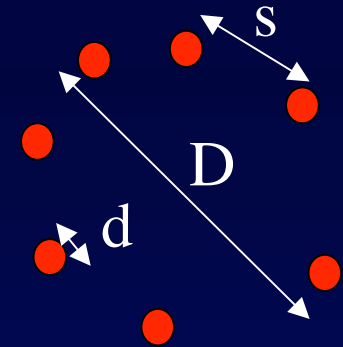
$\lambda/s$  on sky



- 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

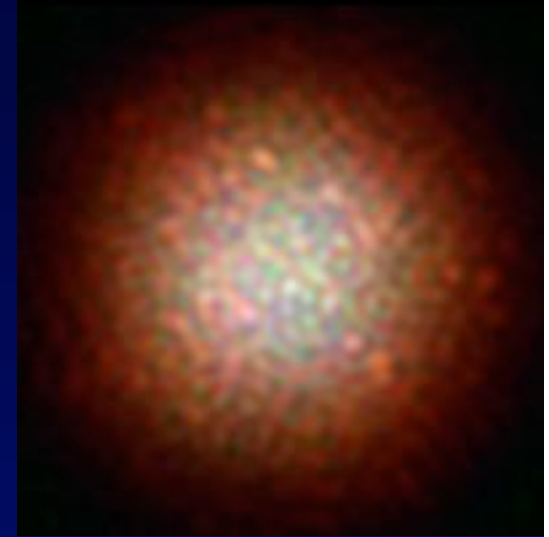
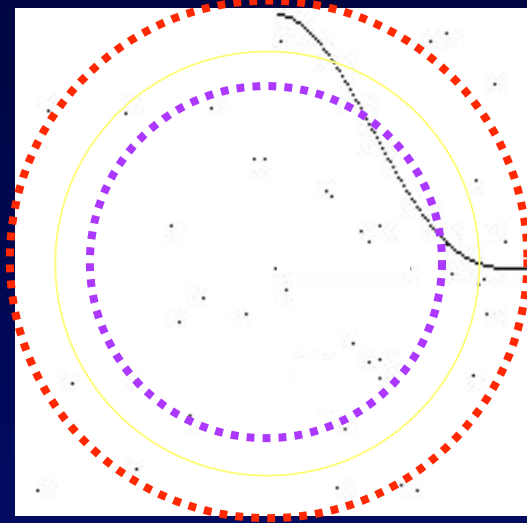
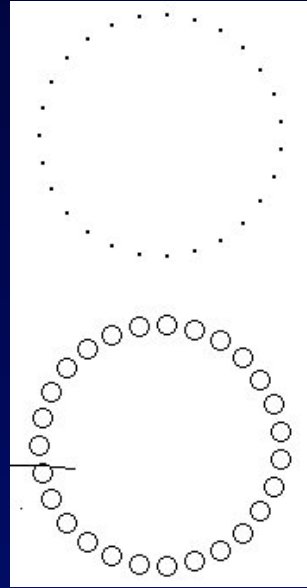
# Properties of hypertelescopes

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  $\lambda/d$   
maximal number of stars =
  - $N^2$  for non-redundant apertures
  - $N$  for periodic apertures

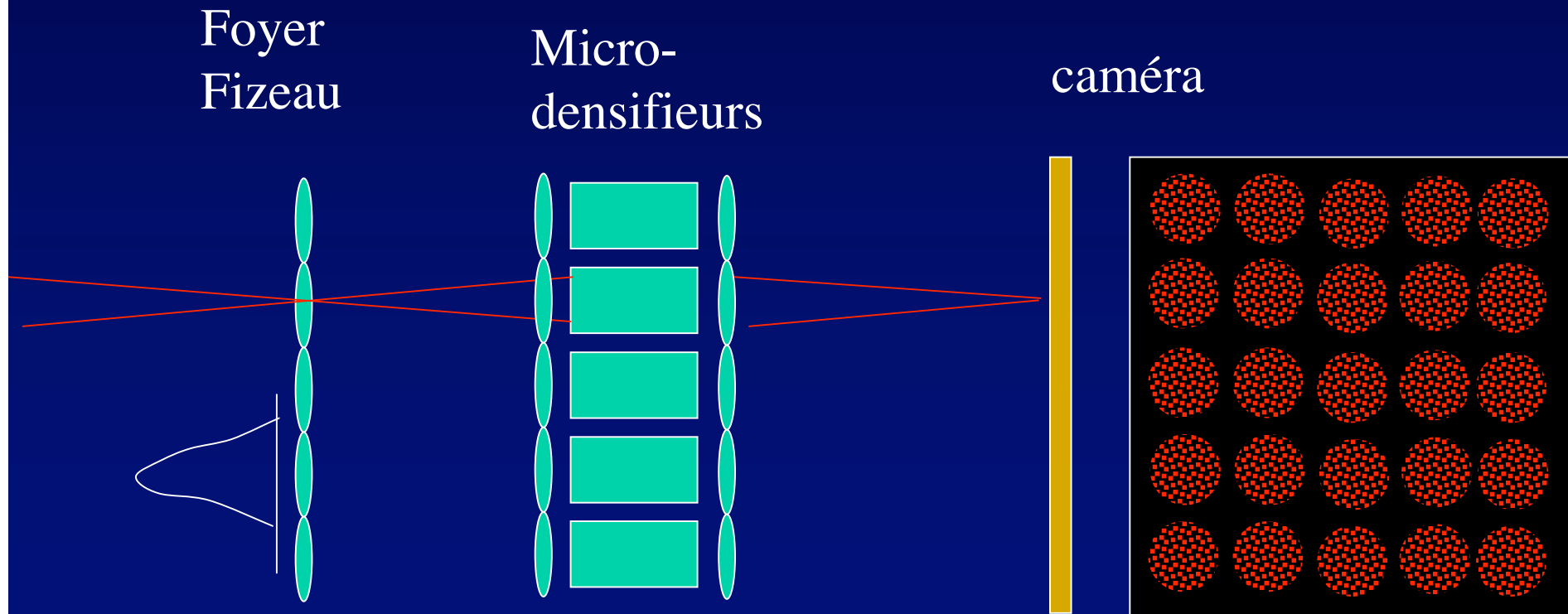
# Encombrement



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

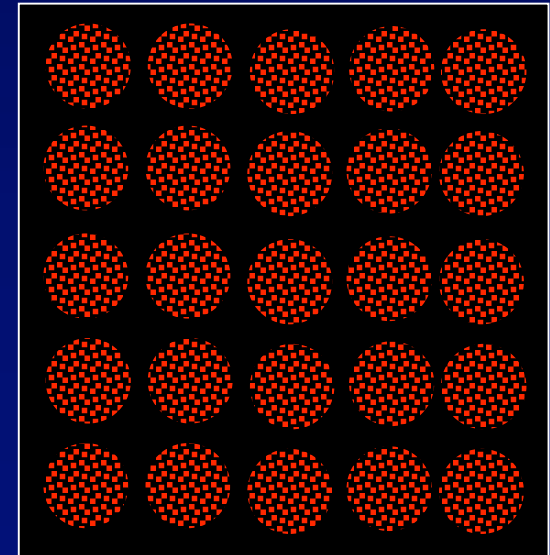
# Observer plusieurs « lobes » $\lambda/d$

...avec une mosaïque de micro-densifieurs



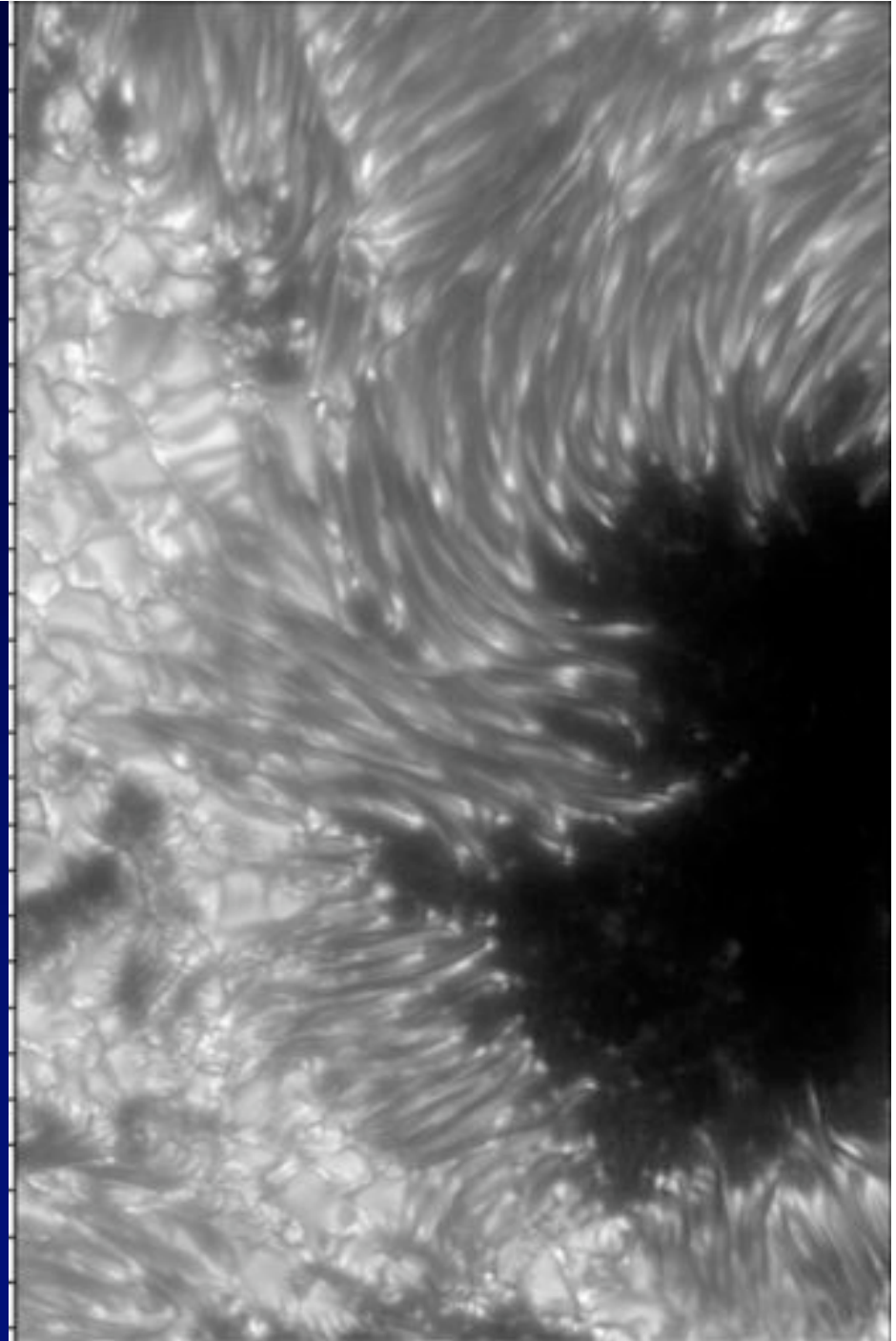
# Quelle étendue de champ mosaïque ?

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

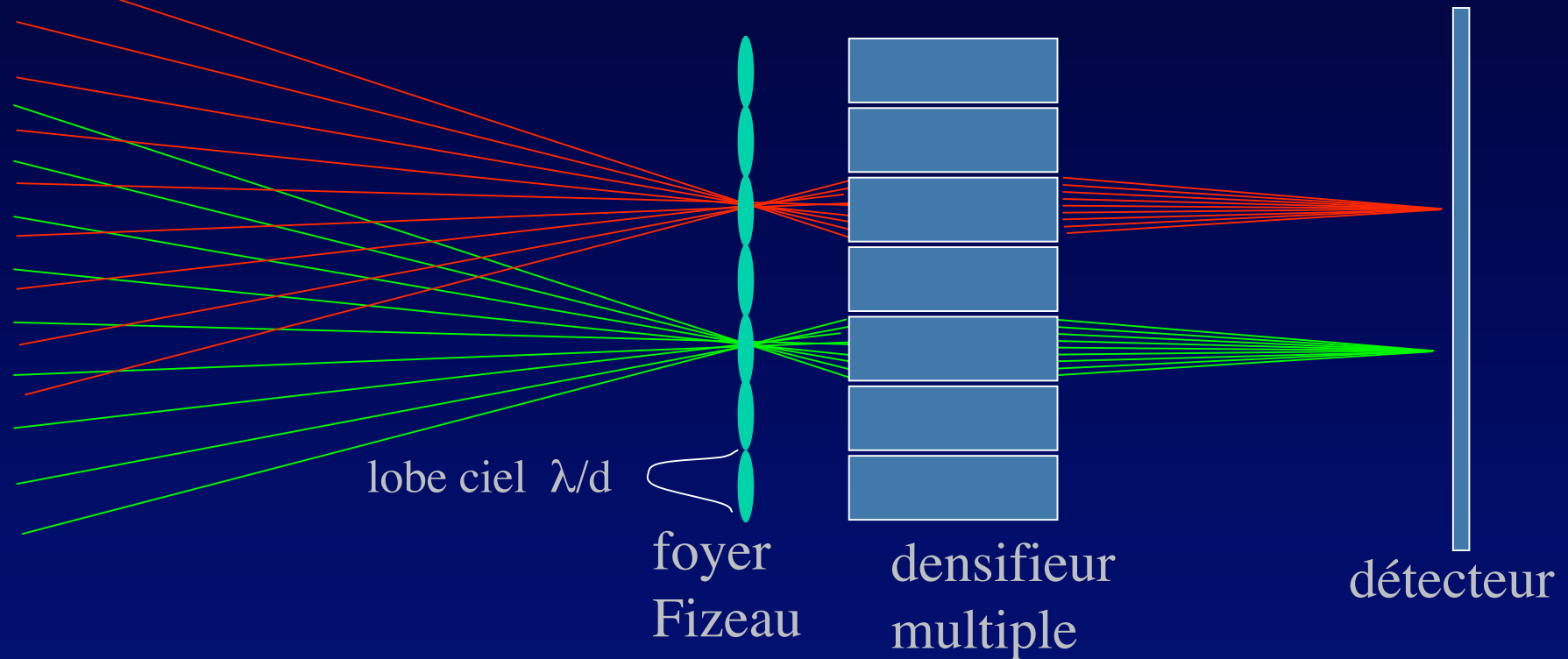


# Filaments des taches solaires

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



# cosmologie avec OWL éclaté: champ multiple



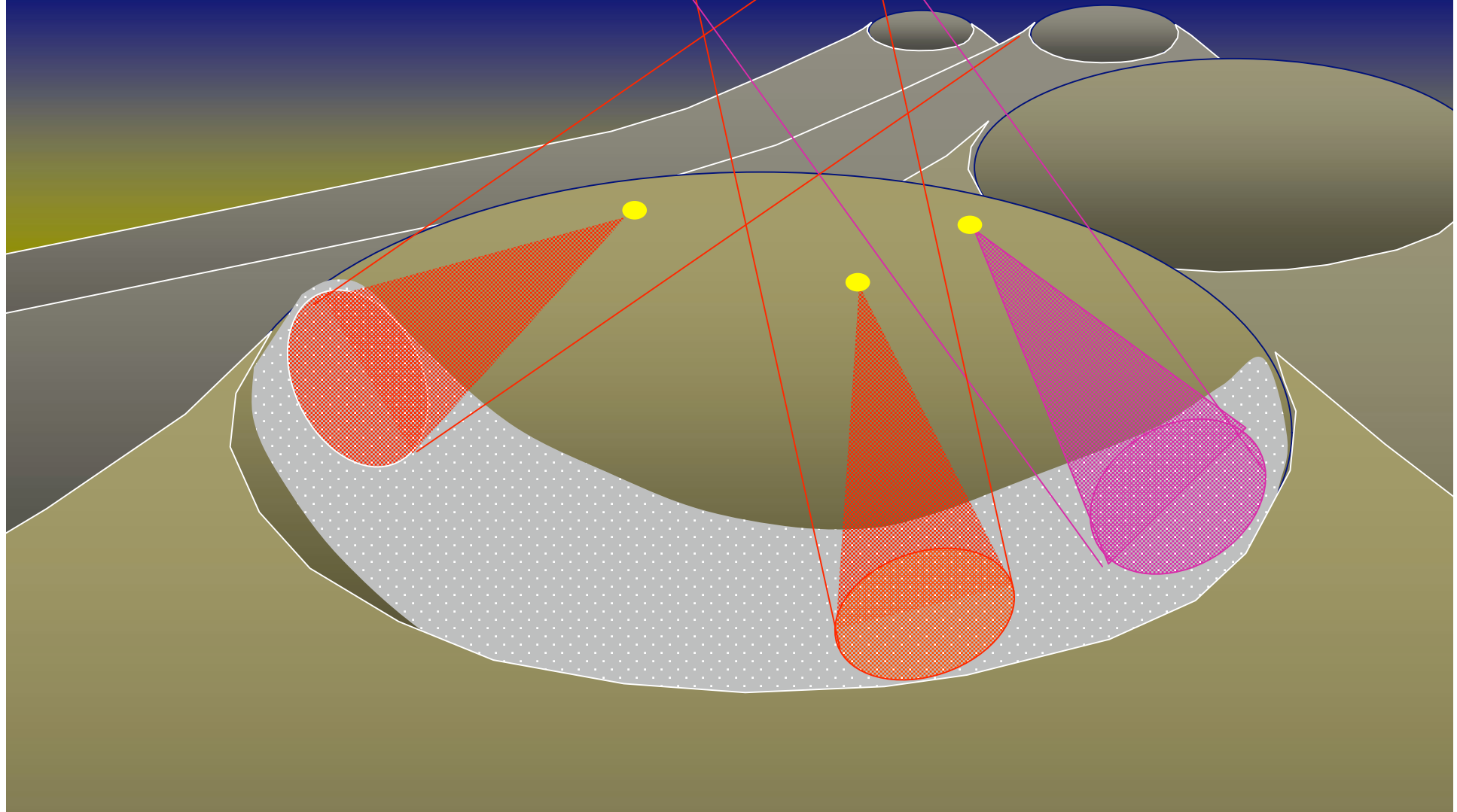
- Optique intégrée pour 1 000 x 1 000 densifieurs
- Poses décalées pour reconstruction mosaïque



# hypertelescope CARLINA kilométrique

10,000 miroirs de 1m, étalés sur 5 km

Imagerie mag. 38, cosmologie

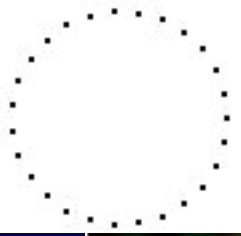


imagerie directe vs. synthèse d'ouverture:  
gain en sensibilité  
en présence de fond de ciel

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

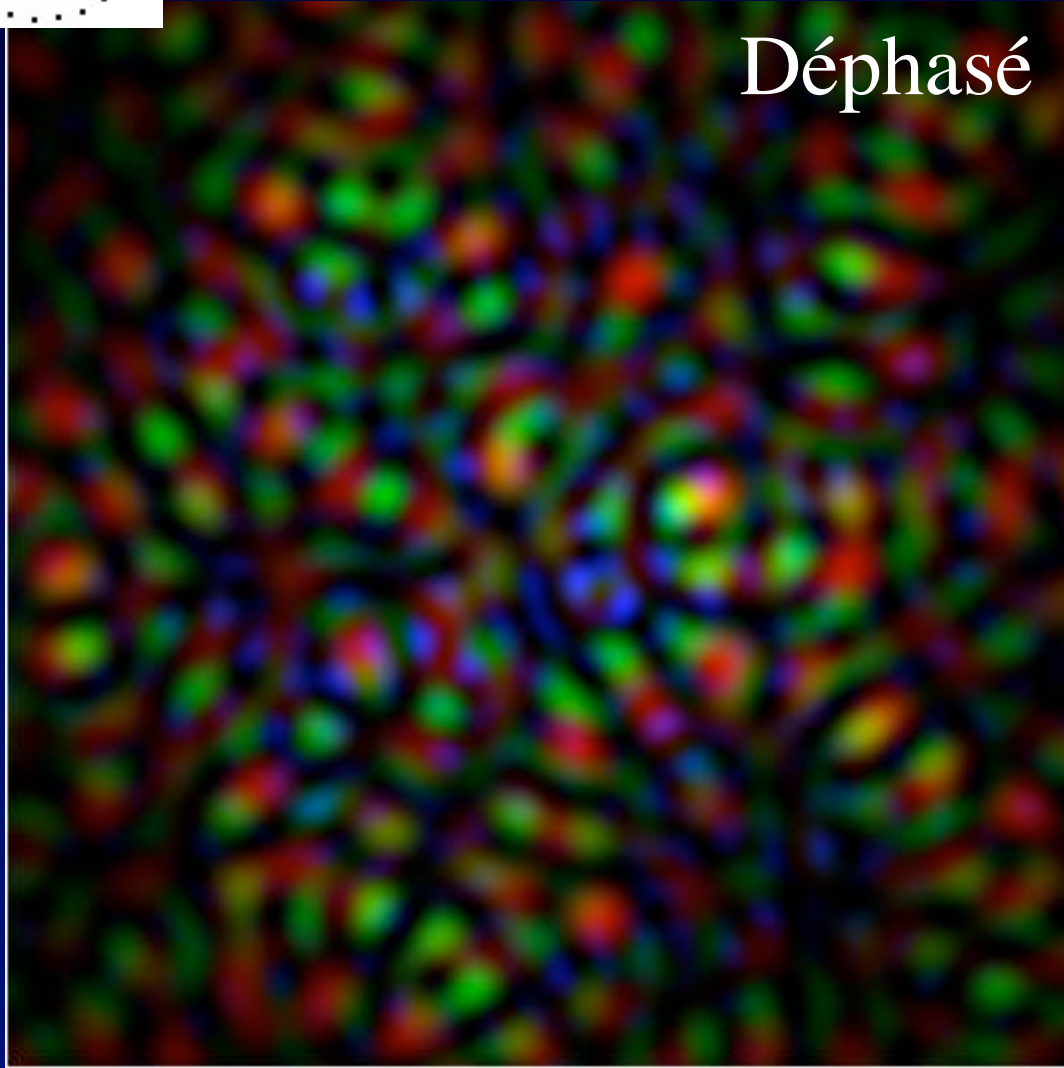
# Le gain supplémentaire en sensibilité de l'hypertélescope, si le détecteur est imparfait

- 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

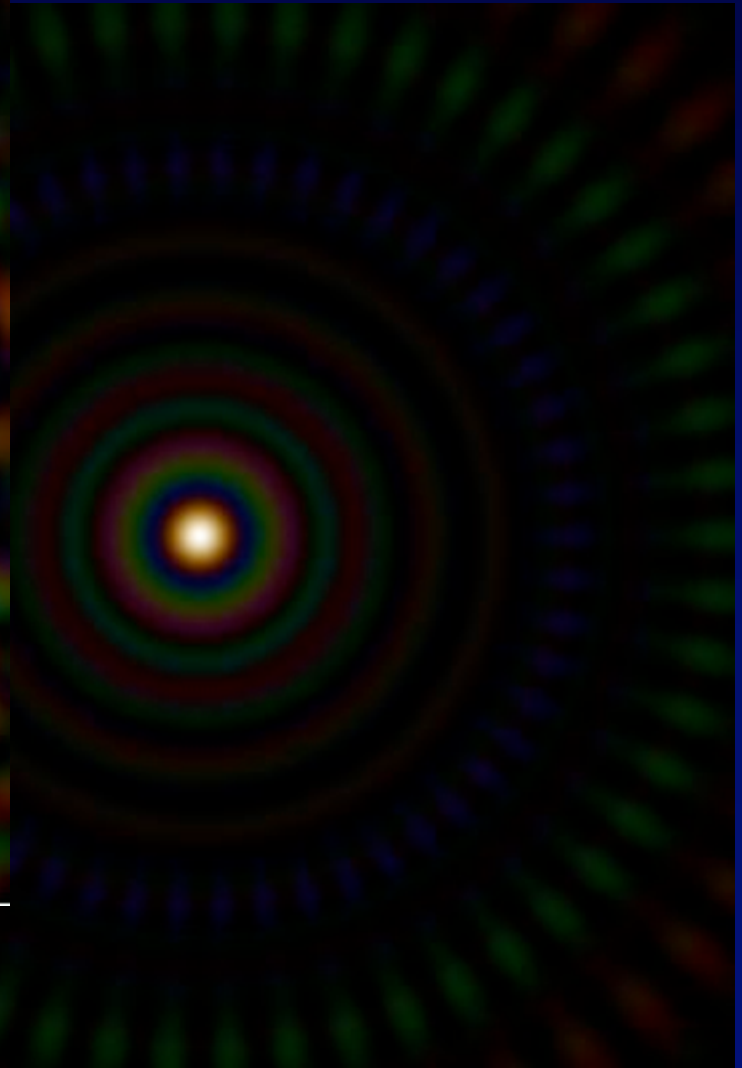


# 27 ouvertures en cercle

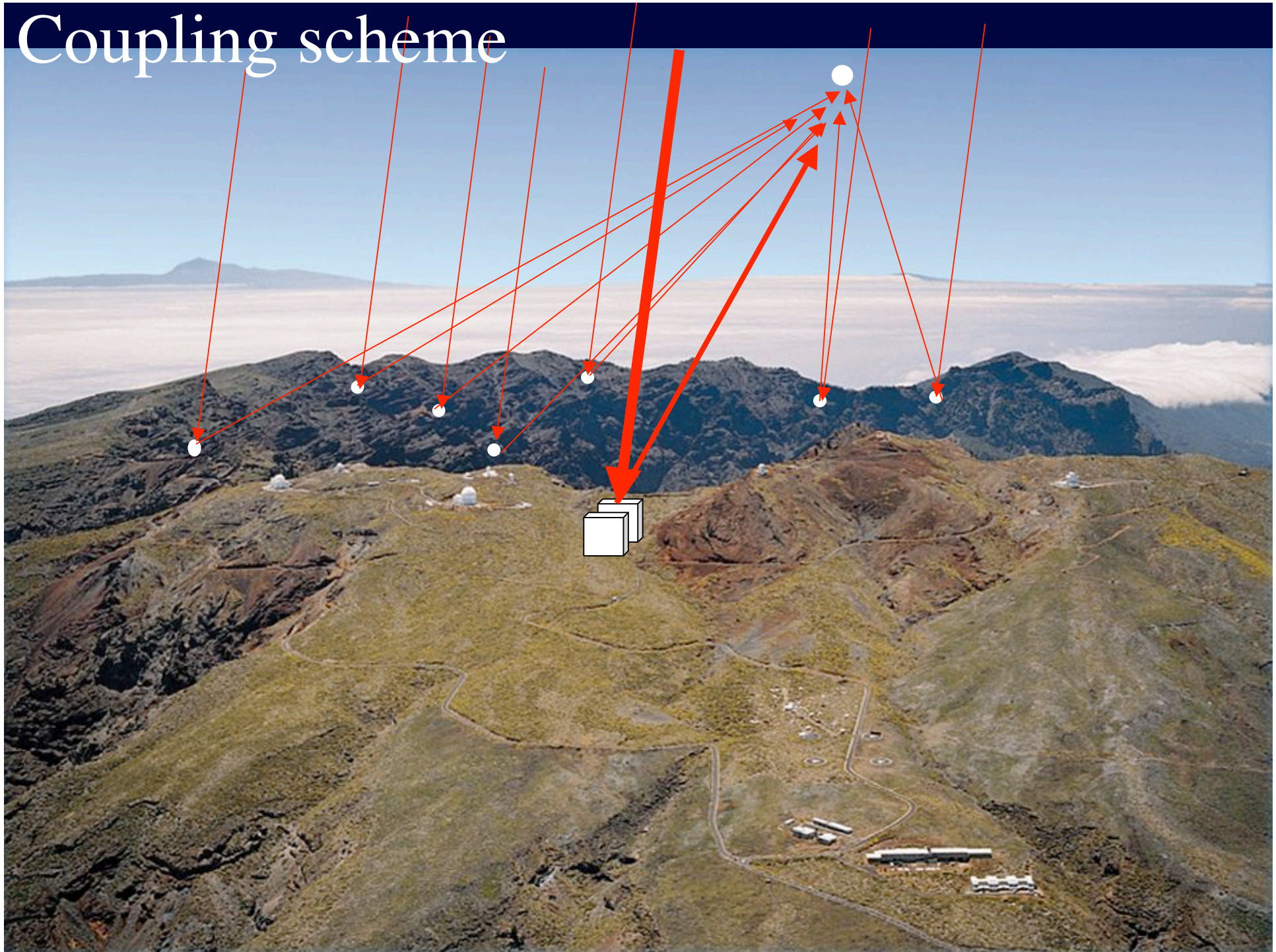
Déphasé



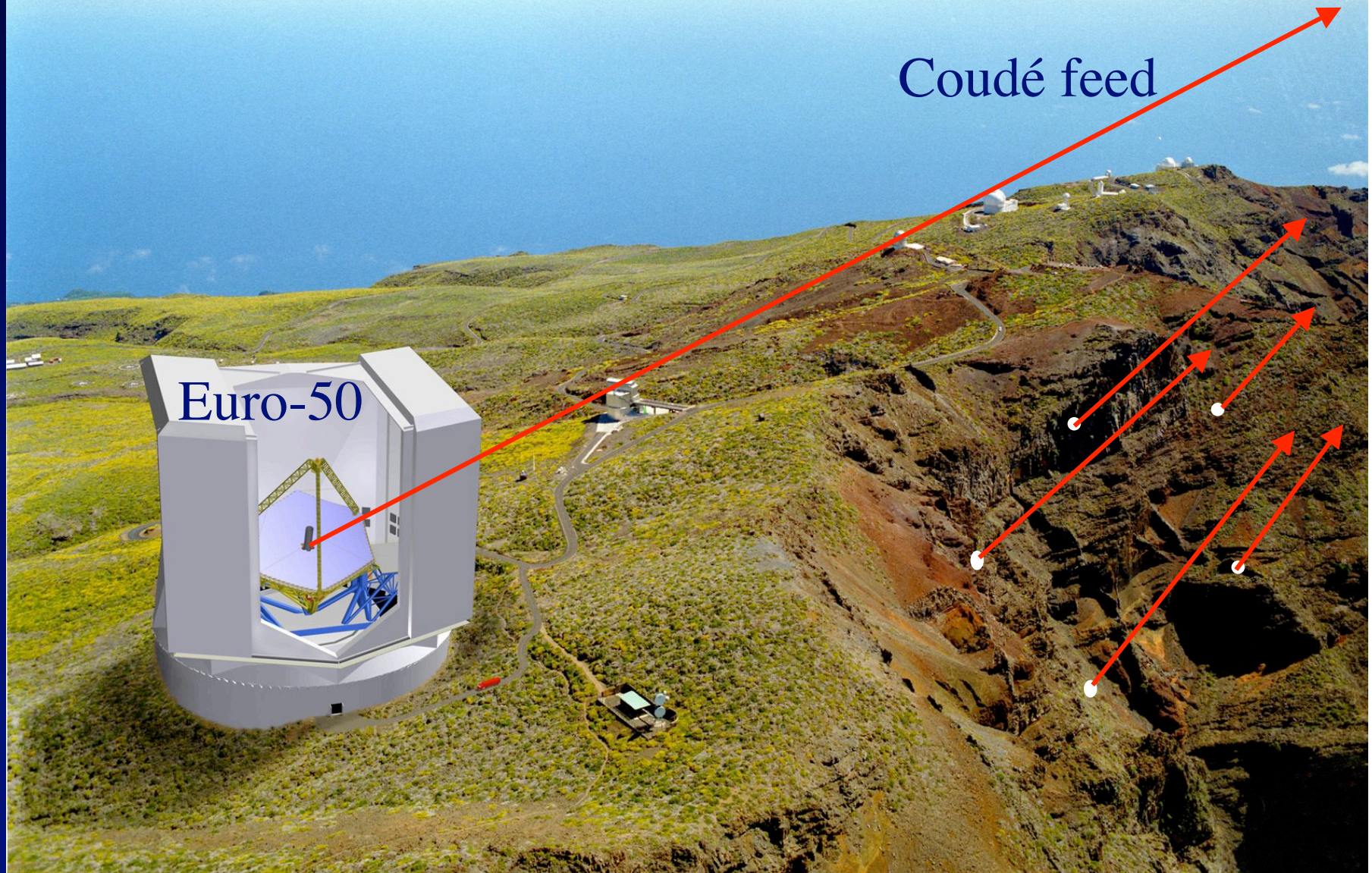
En phase



# Coupling scheme



# Roque de las Muchachos, Canarias



Coudé feed

Euro-50

# 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 ?

