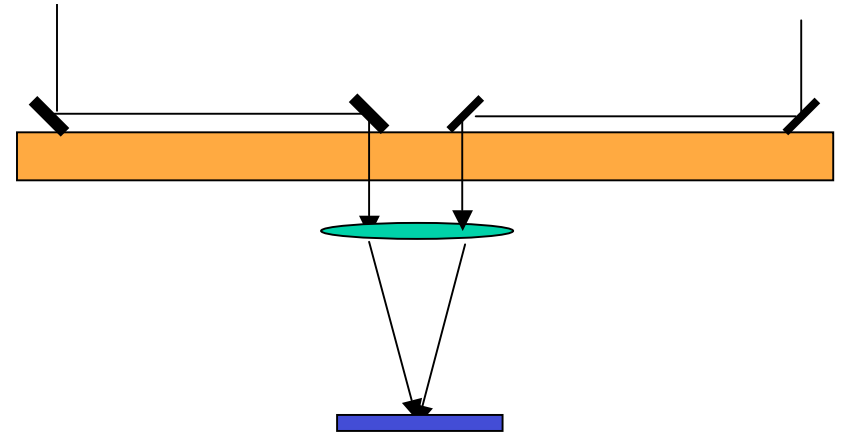
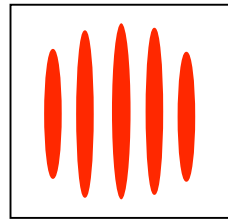


# Vers les hyper-télescopes, une nouvelle génération d'interféromètres

- Séminaire à 15h15 par Alan J. Penny  
**"The search and study of extra-solar planets"**

# Rappel de quelques étapes

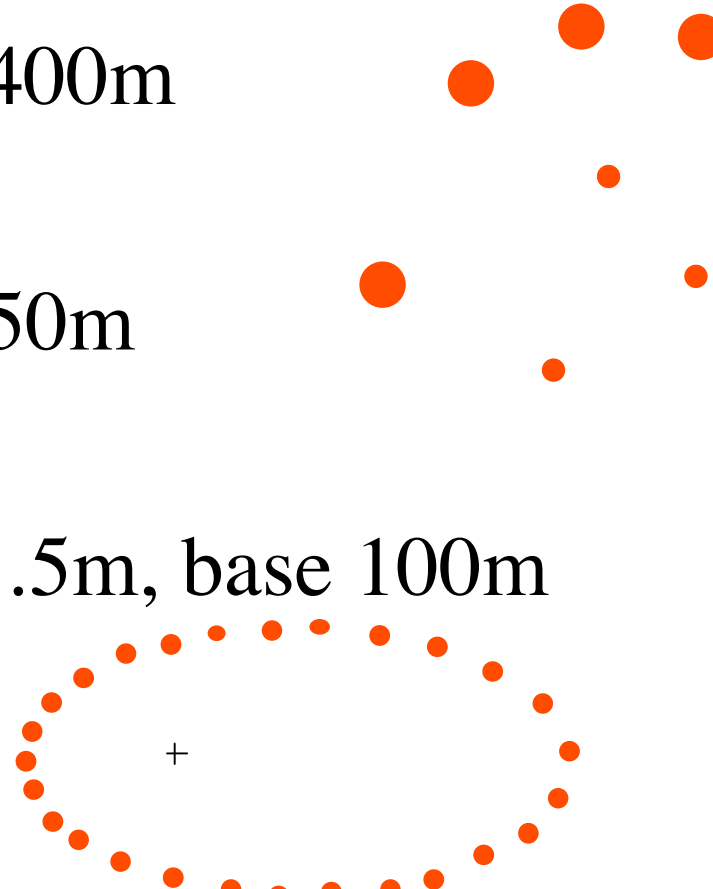


- Michelson (1930) : interféromètre à poutre de 20 pieds: résolution de Bételgeuse ...
- Hanbury Brown et Twiss ( 1965): interférométrie d'intensité
- Interféromètre à deux télescopes (Nice, 1974)
- Interféromètre Mark III au Mt Wilson ( 1980)
- GI2T à Calern: 2x1.5m, rail de 70 m
- IOTA at Mt Hopkins ( Arizona) , 2x0.4m, fibres

# Haute résolution: l'état de l'art

- Milli-seconde d'arc avec interféromètres de 100m ( GI2T, PTI, bientôt CHARA, VLTI, Keck)
- Par paires: imagerie laborieuse
- Dans l'espace:
  - projets DARWIN (ESA) et Terrestrial Planet Finder (NASA)
  - Space Technology 3 (NASA) essai base 1km

# Interféromètres en construction

- NPOI (Arizona): paire de 20cm, bases 200m
  - Palomar Testbed Int : paire de 20cm, bases 120m
  - CHARA: 6 de 1m, paires, bases 400m
  - VLTI : 4x8m + 3x1.8m , bases 150m
  - Keck : paire de 10m + paire de 1.5m, base 100m
  - GI3T => Optical Very Large Array 27 x 1.5m, 1 km
- 

# Résultats de l'interférométrie optique

- diamètres angulaires d'étoiles, résolution milli-seconde d'arc
- aplatissement
- paramètres d'étoiles binaires serrées
- matière circumstellaire
- mais: pas d'images directes aux longueurs d'onde optiques , nécessite 3 ouvertures au moins pour la synthèse de Fourier

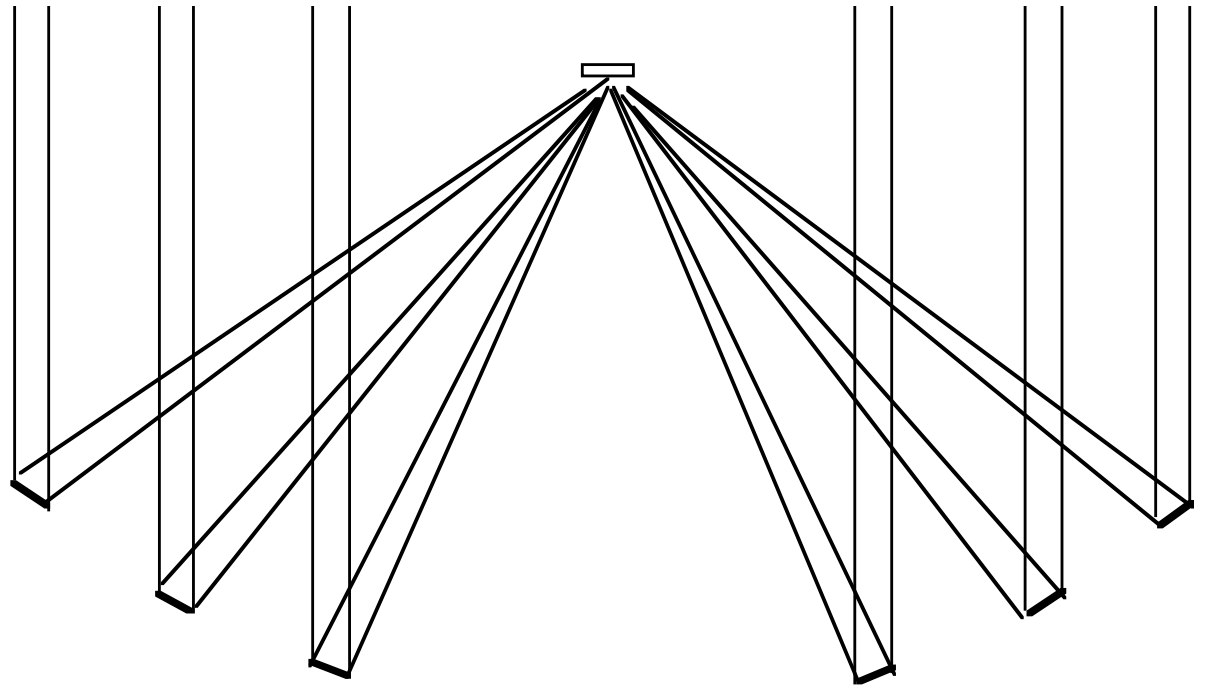
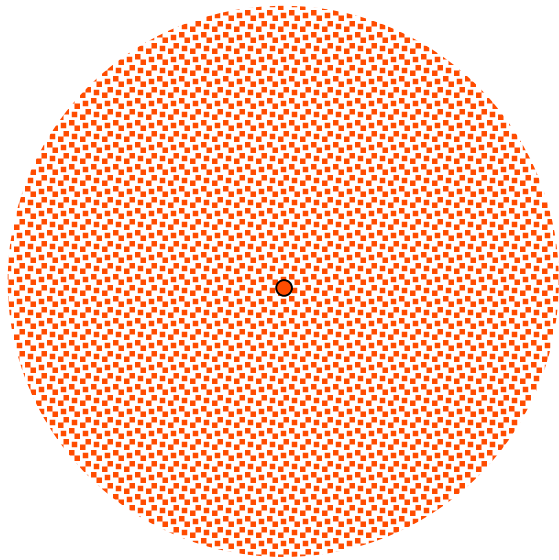
## L 'imagerie directe semblait impossible.....

- Une nouvelle approche: « imagerie à pupille densifiée » ou « hyper-télescope »
- D 'abord décrite ici en 1996
- Théorie vérifiée par simulation numérique, simulation en laboratoire, essai sur le ciel avec un hyper-télescope miniature
- Vers des télescopes dilués géants ? 150 km, 300 000 km

# Télescope géant dilué dans l'espace...

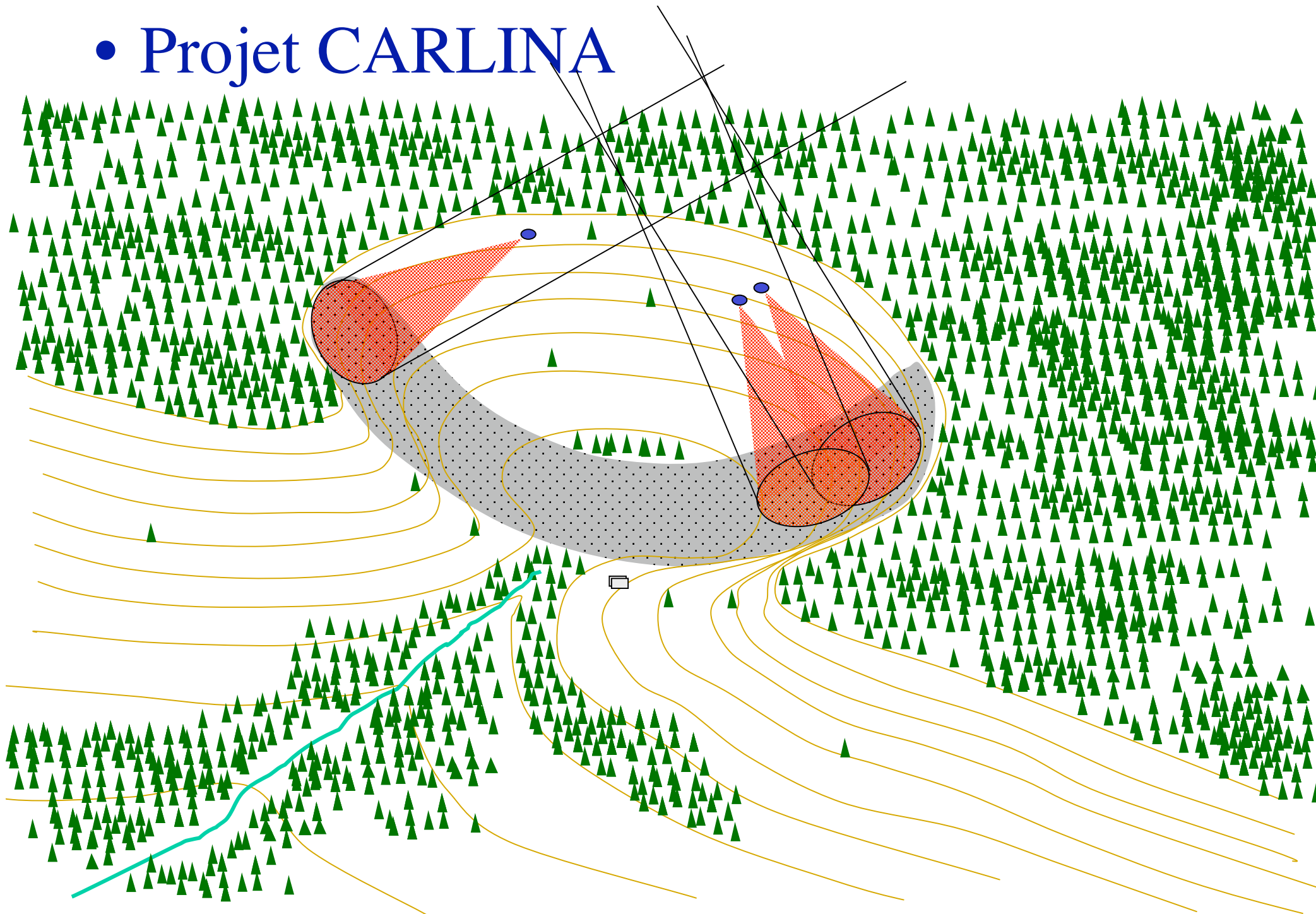
diamètre 150 km, éléments nombreux

- L' image Fizeau directe est inutilisable : la lumière va surtout dans le large halo plutôt que dans le pic d'interférence



- une solution: « l'imagerie à pupille densifiée »

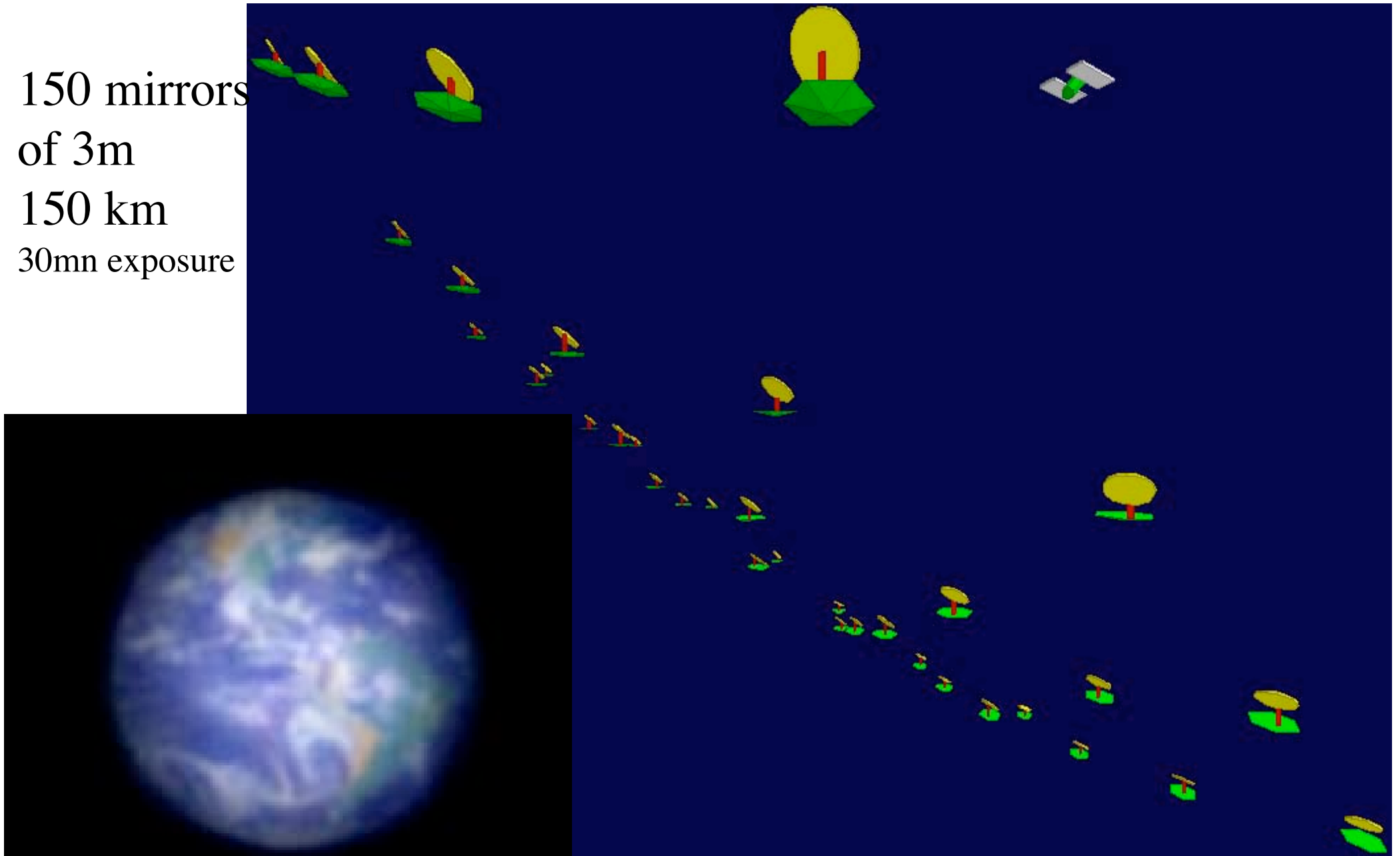
# • Projet CARLINA





# A hyper-telescope: the Exo-Earth Imager

150 mirrors  
of 3m  
150 km  
30mn exposure



# La pluralité des mondes: une vieille idée

Epicure: « Les mondes sont aussi en nombre infini, les uns semblables à celui-ci, les autres différents....L'on ne saurait démontrer que dans de tels mondes, des germes tels ceux dont naissent les animaux et les plantes, et toutes les autres choses que nous voyons, ne pourraient être contenus » ( Lettre à Hérodoté, IIIème siècle avant J.C.)

# Giordano Bruno

## Professeur au Collège de France, 1581

« Un nombre infini de soleils existent. Un nombre infini de Terres tournent autour de ces Soleils comme les sept planètes tournent autour de ces Soleils. Des êtres vivants habitent ces mondes »

Brulé à Rome le 17 Février 1600

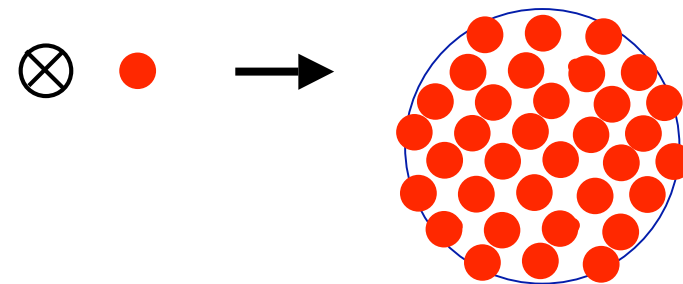
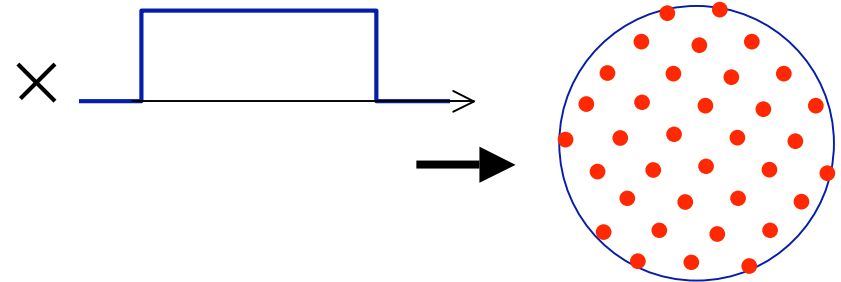
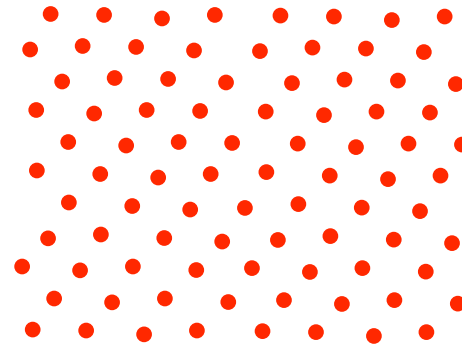
« Astrophysics is a subject where the observers generally lead and theorists follow behind »

Martin J. Rees (1997)

# Diffraction par une passoire

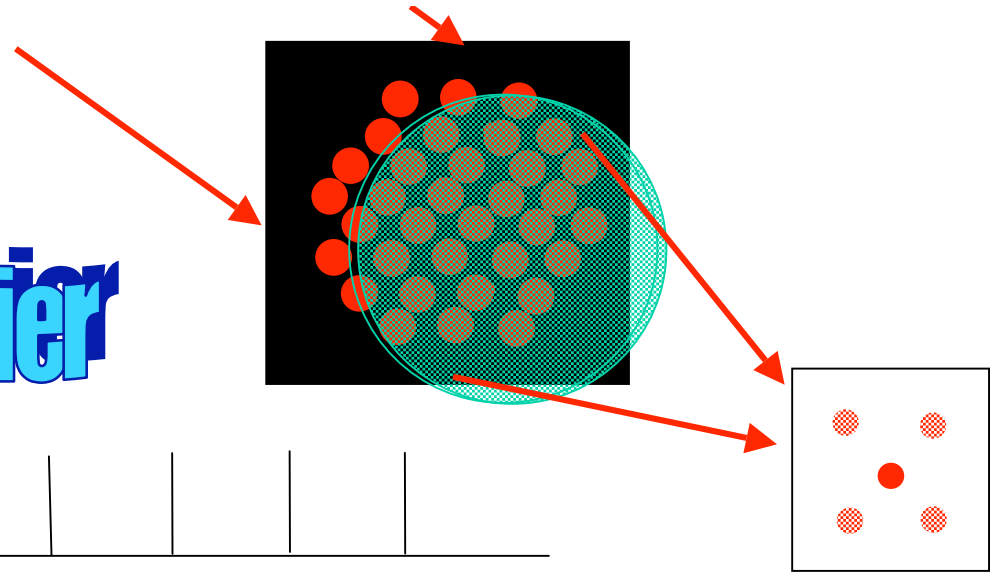
Une passoire, c'est...

- Un réseau infini de Diracs
- Multiplié par un grand disque
- Convolué par un petit disque

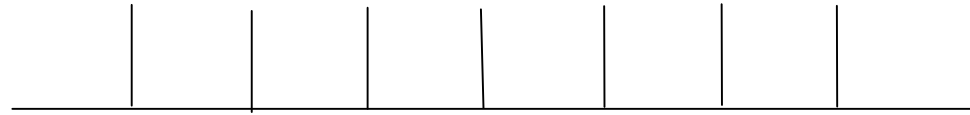


# Diffraction éloignée:

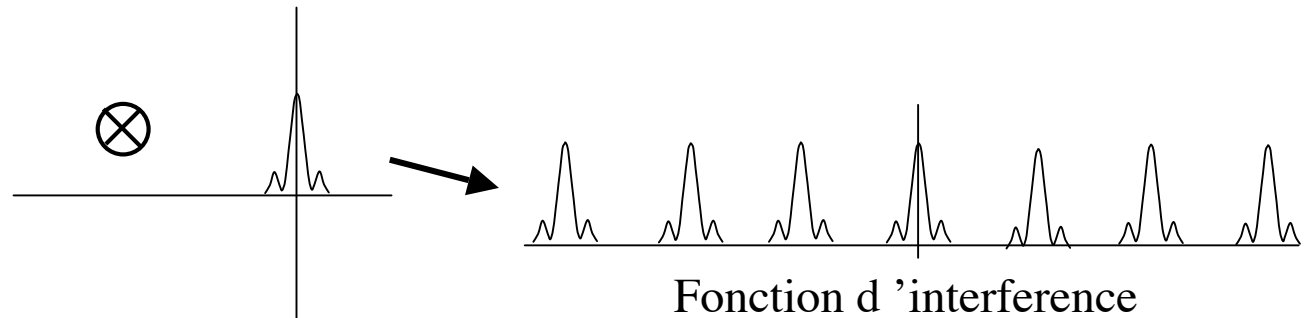
## Transformation de Fourier



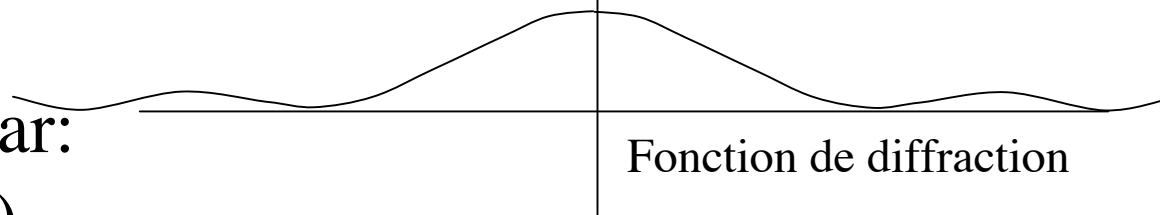
- Réseau Dirac:



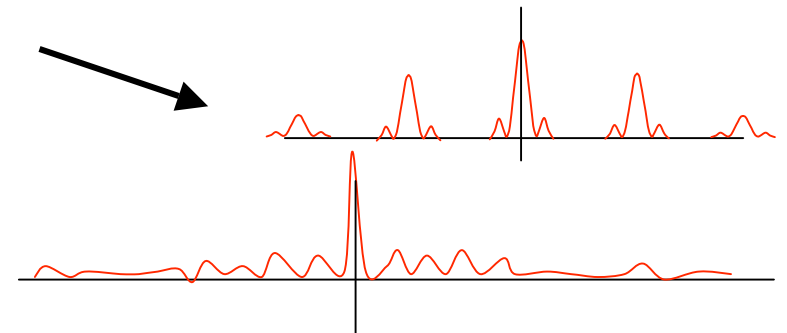
- Convolué avec:  
(Airy étroit)



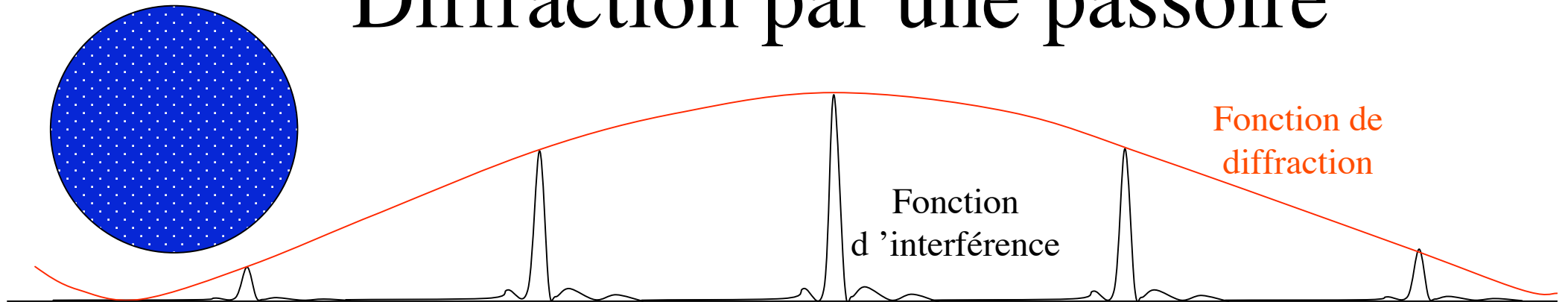
- Multiplié par:  
(Airy large)



passoire non périodique

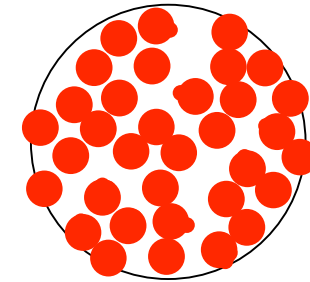


# Diffraction par une passoire

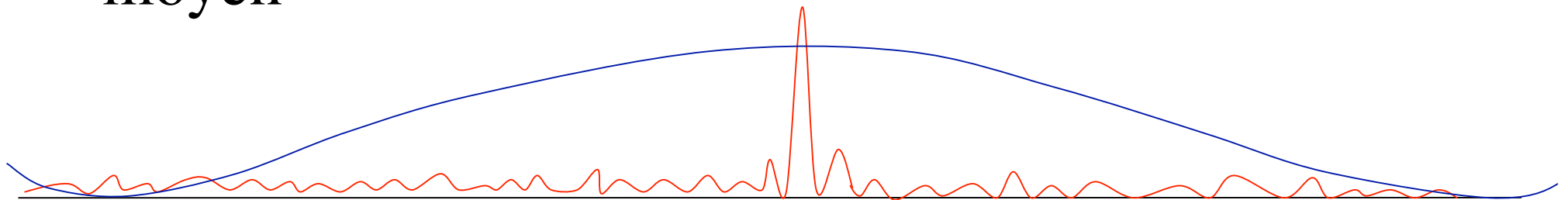


- « Planche de fakir » Dirac, multiplié par ouverture, convolué avec sous-ouverture,
- TF  $\Rightarrow$  fakir Dirac, convolué avec Airy étroit, multiplié par large enveloppe,
- Nombre de sous-ouvertures/diamètre = finesse

# Cas d'une passoire aléatoire



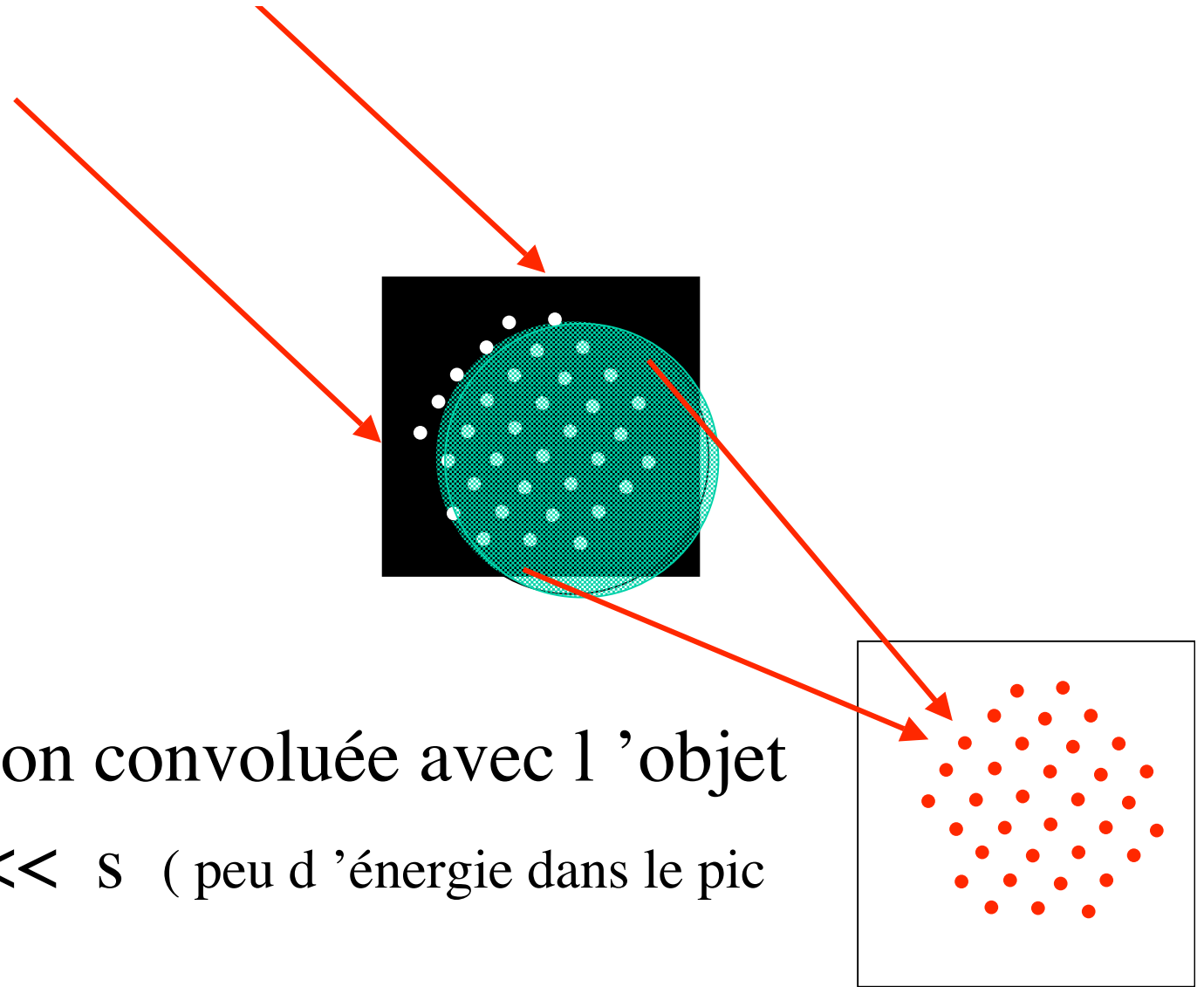
- Pic unique et fond aléatoire de speckles dans la fonction d'interférence
- pic central  $N$  fois plus intense que le halo moyen





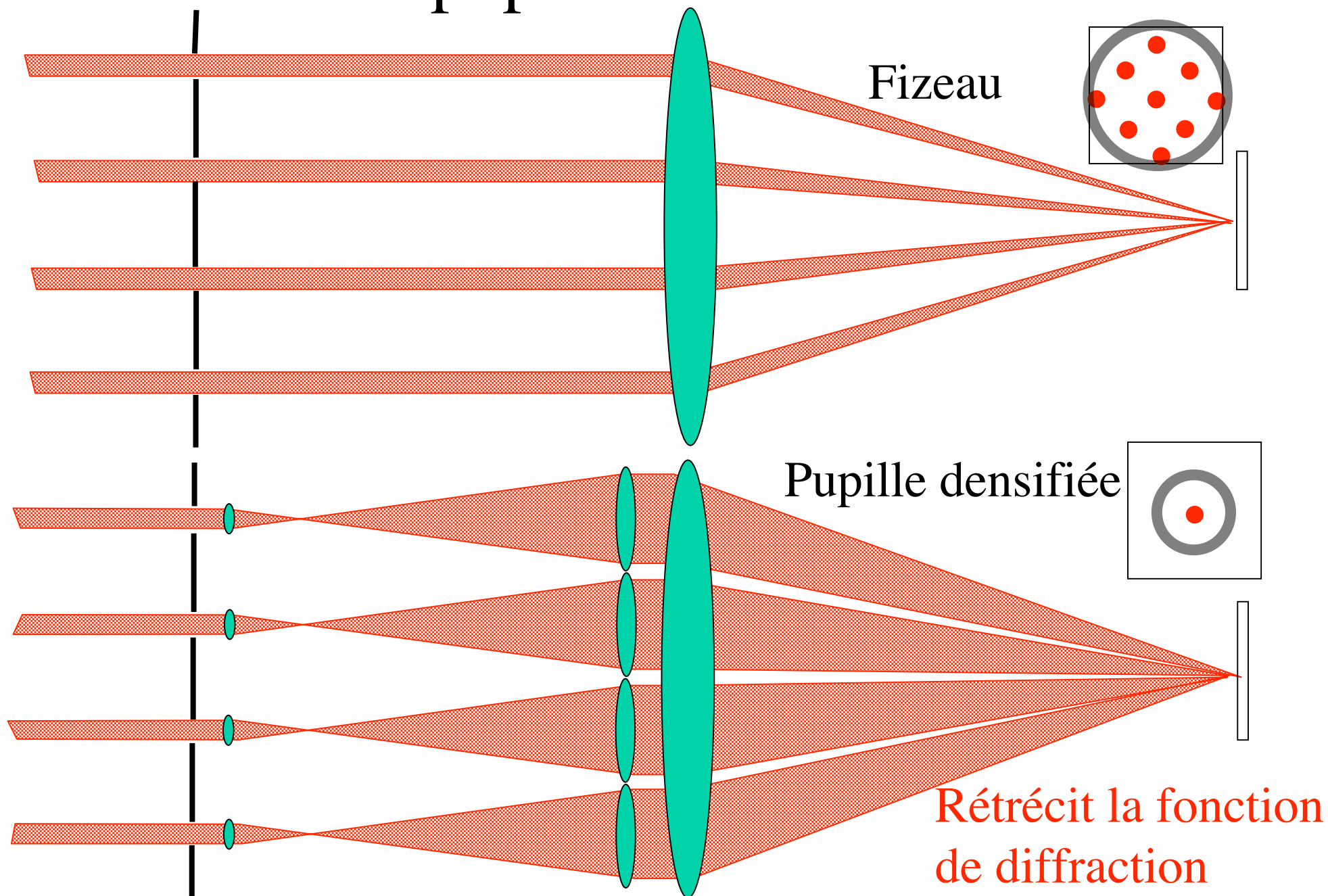
# Interféromètre de Fizeau

diamètres: D et d  
espacement: s

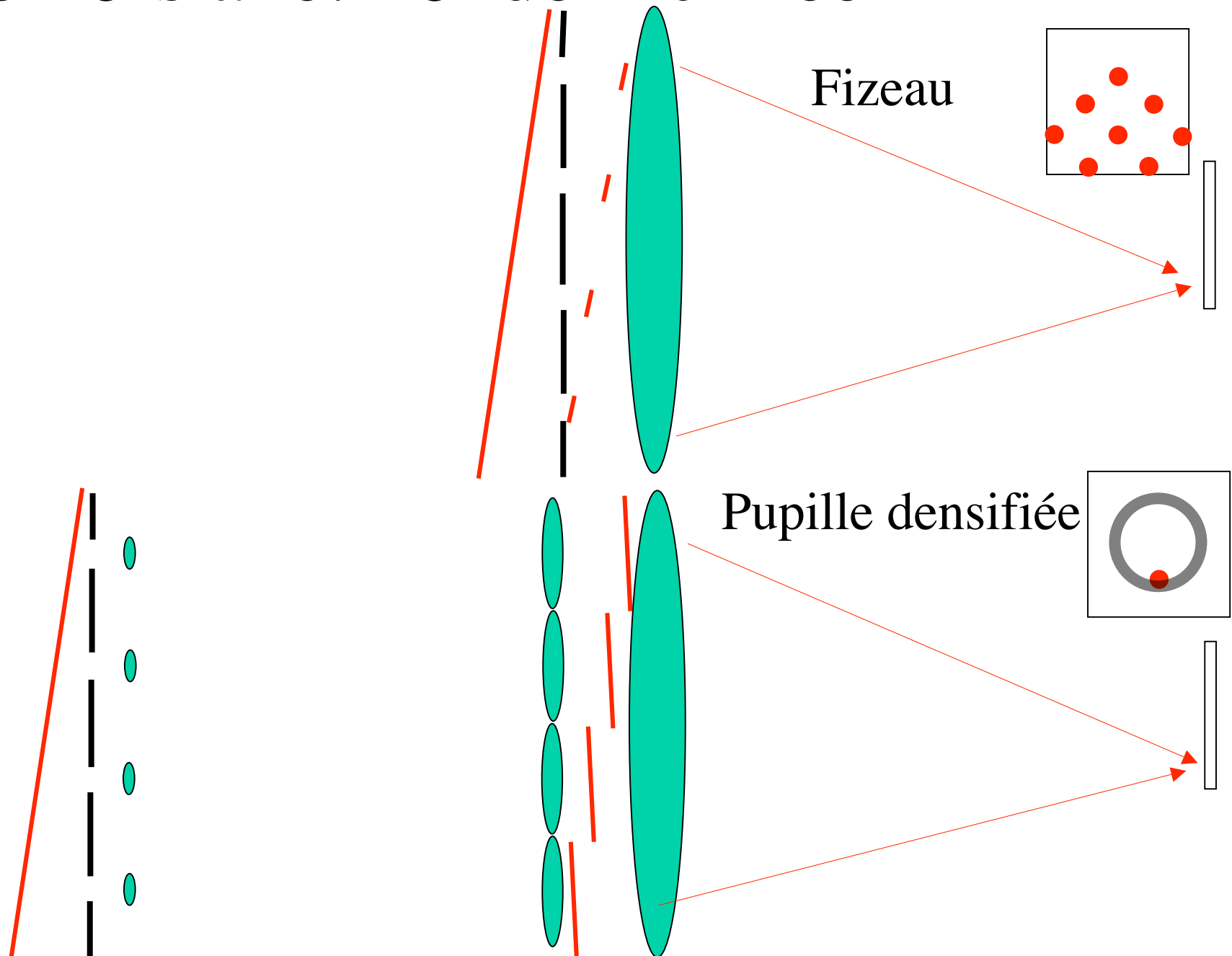


- Figure de diffraction convoluée avec l'objet
- Inutilisable si  $d \ll s$  (peu d'énergie dans le pic central)
- Remède: **densifier la pupille**

# Densification de pupille

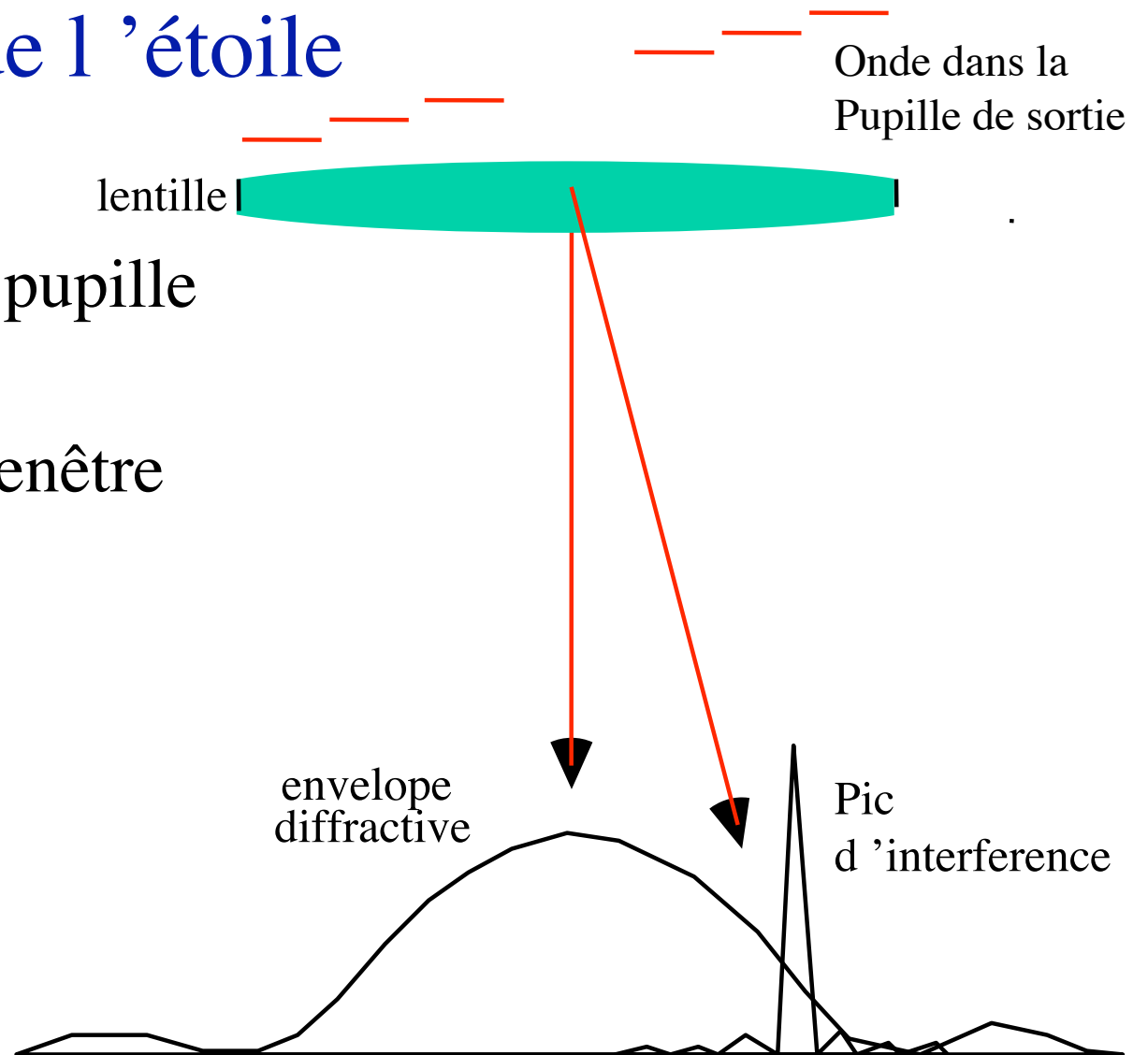
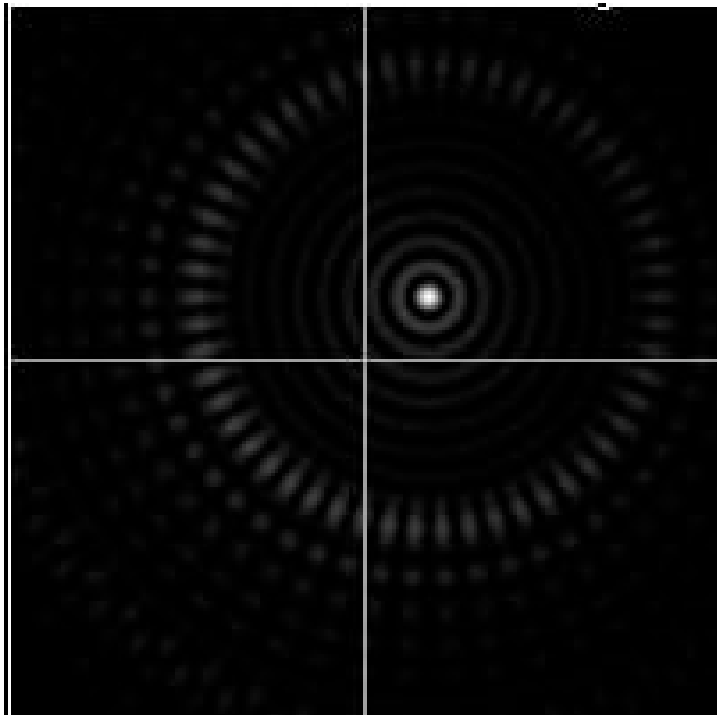


# Etoile hors axe: onde inclinée



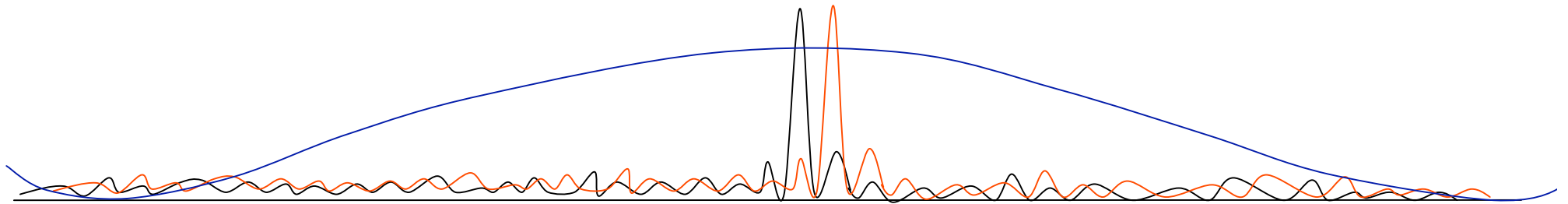
# invariance de la fonction d'interference par déplacement de l'étoile

- Onde en escalier dans la pupille de sortie
- image décalée dans la fenêtre

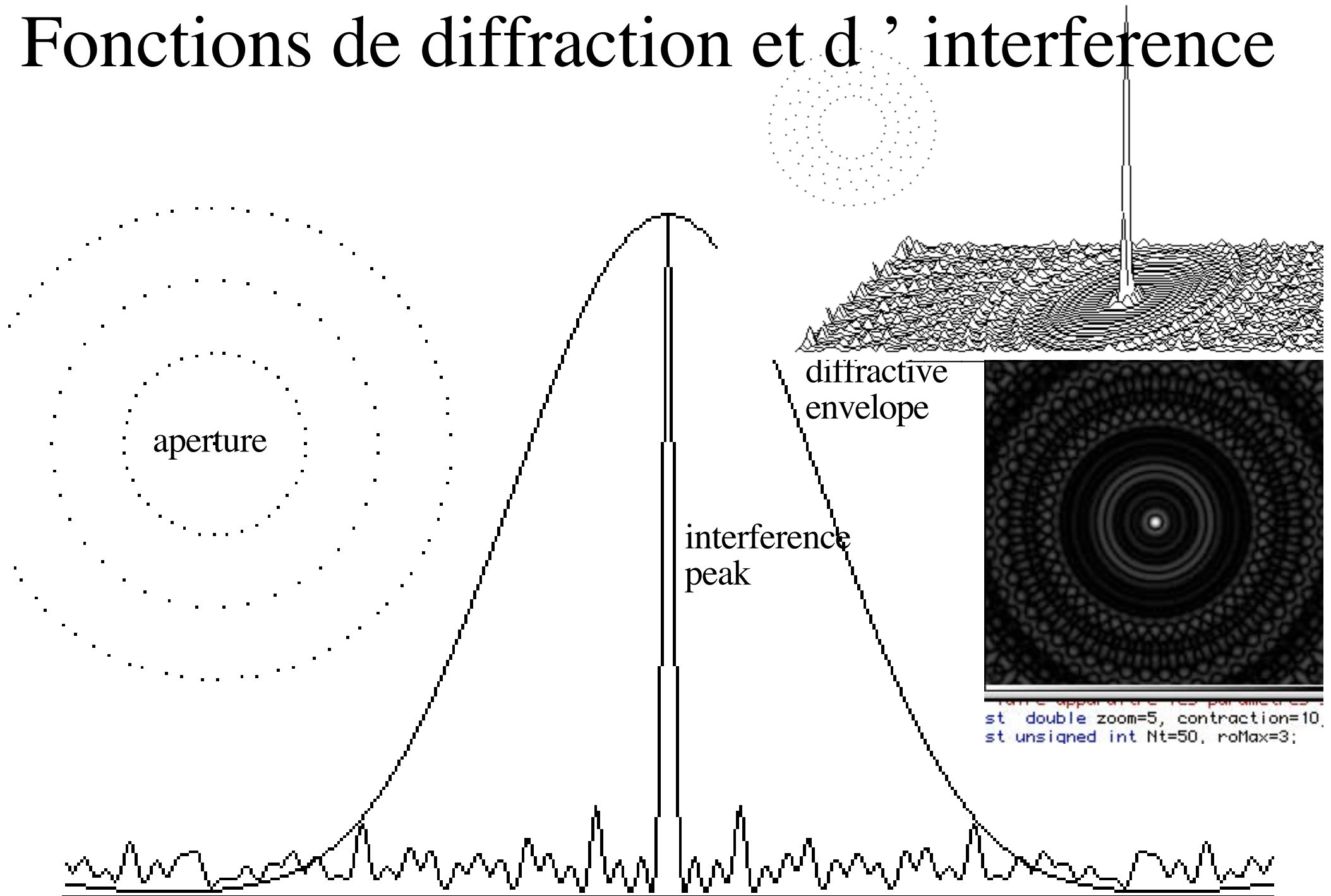


# Étoile double, objet étendu

- Convolution de l'image par la fonction objet

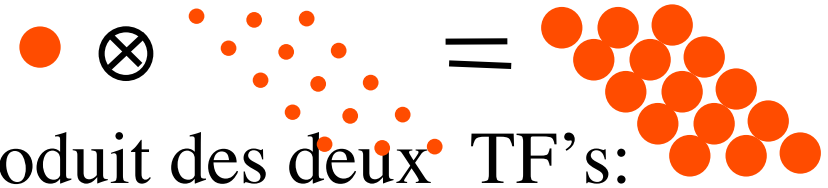


# Fonctions de diffraction et d'interférence



# point de vue de Fourier

- ouverture multiple considérée comme une convolution



- image de source ponctuelle est le produit des deux TF's:
  - pic de diffraction large
  - figure d'interference avec ~~speckles et pic étroit (si phasé)~~
- Densifier la pupille rétrécit l'enveloppe diffractive, intensifie le pic  

The graph shows a horizontal axis with a series of small, regular oscillations. A single, much larger and sharper peak is superimposed on these oscillations, centered in the middle.
- Déplacer la source déplace la figure d'interference
- Objet étendu: convolution avec la figure d'interference, effet de fenêtre de la fonction de diffraction

# Effet de la densification de pupille

$$O(x, y) = F(x, y) \otimes D(x, y)$$

ouverture « fakir Dirac » disque

TF  $\updownarrow$

$$\tilde{O}(\alpha, \beta) = \tilde{F}(\alpha, \beta) \times \tilde{D}(\alpha, \beta)$$

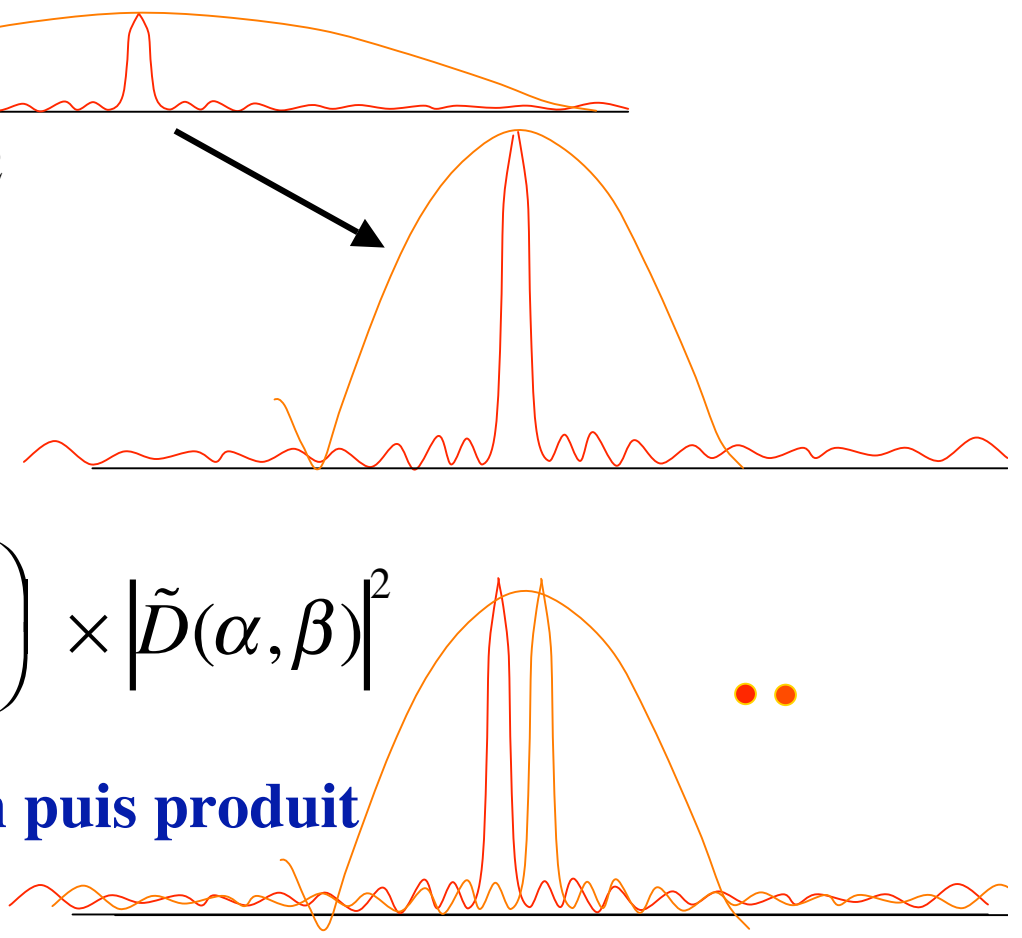
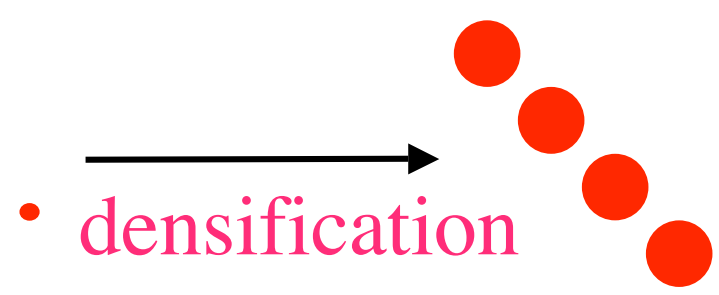
$$|\tilde{O}(\alpha, \beta)|^2 = |\tilde{F}(\alpha, \beta)|^2 \times |\tilde{D}(\alpha, \beta)|^2$$

image étoile résolue  $S(\alpha, \beta)$  interference diffraction

si  $D \gg d$ , l'enveloppe est fixe

$$|\tilde{O}(\alpha, \beta)|^2 = \left( |\tilde{F}(\alpha, \beta)|^2 \otimes S(\alpha, \beta) \right) \times |\tilde{D}(\alpha, \beta)|^2$$

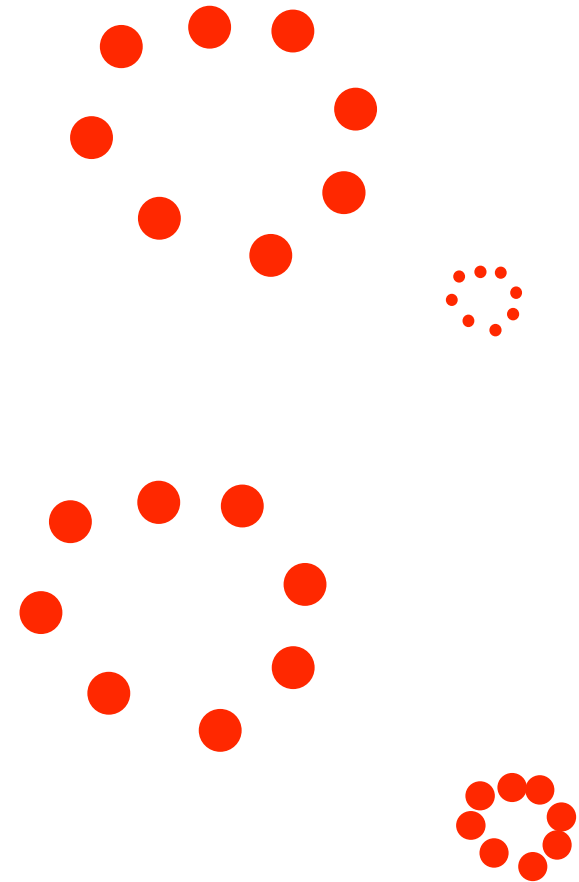
**Image pseudo-convoluée: convolution puis produit**





# Reformuler la « règle d 'or des interféromètres imageurs »

- **Initialement:** « tout interféromètre imageur a une pupille de sortie identique à la pupille d 'entrée , à l 'échelle près »      ou:      « tout interféromètre imageur est un Fizeau »
- **Maintenant:** « tout interféromètre imageur a une pupille de sortie où les centres des sous-pupilles sont disposés comme dans la pupille d 'entrée »



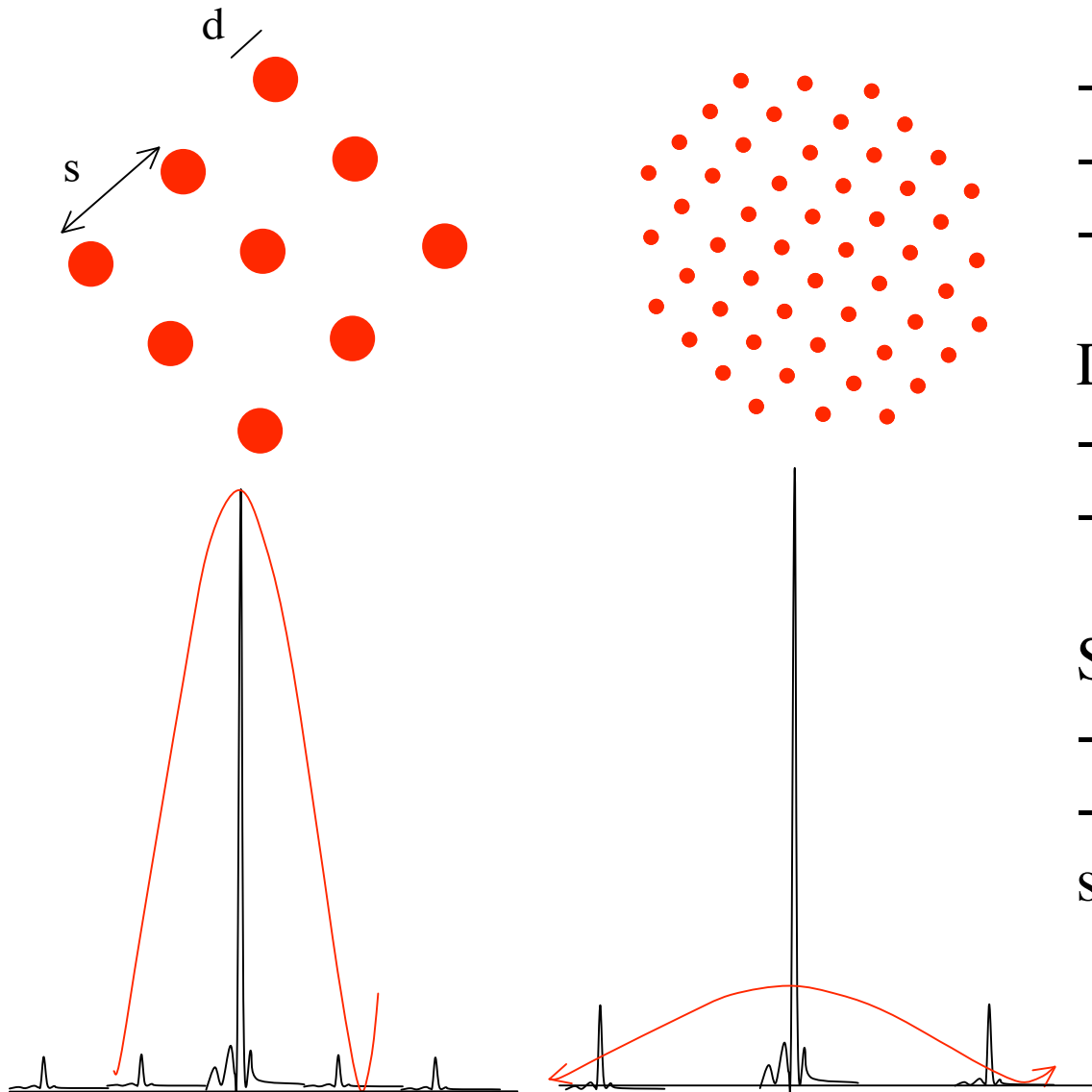
# Propriétés de l'interféromètre à pupille densifiée

- La fonction de diffraction est rétrécie
- La convolution avec l'objet subsiste **pour la fonction d'interférence**
- L'image est intensifiée (facteur 10 millions pour EEI)
- Le champ est rétréci (champ ciel =  $\lambda/d$  pour ouverture périodique)
- Si  $N$  s'accroît indéfiniment (à diamètre  $D$  et surface collectrice constants)  
l'image devient identique à celle du télescope circonscrit, mais atténuée dans le rapport des surfaces collectrices

# A surface collectrice et diamètre donnés : faut-il accroître le nombre de sous-ouvertures ?

- Oui car rien ne change, sauf le champ qui s'agrandit
- Contraste étoile/fond de ciel invariant
- Cas d'ouvertures infiniment petites:
  - champ infini (aux aberrations près)
  - image identique à celle d'un télescope plein de même diamètre, atténuée dans le rapport des surfaces collectrices

# Augmentation de N à diamètre et aire constants



- constance de  $s/d$
- élargit le halo de diffraction
- pic invariant

Densification de pupille de sortie:

- intensifie le pic
- diminue le champ

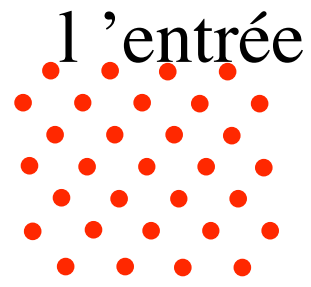
Si N augmente infiniment:

- même image que télescope géant
- atténuée dans le rapport des surfaces collectrices

# Champ d'un hyper-telescope

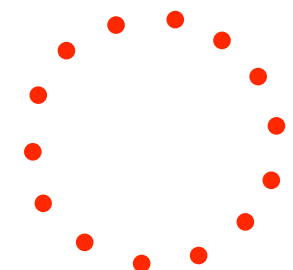
(ouverture diluée, nombreux éléments, pupille densifiée)

- Ouverture d'entrée: version « éclatée » de la pupille de sortie
- Champ s'élargit avec  $N$ , décroît avec la redondance:  
si la pupille de sortie est remplie, avec un pavage dilué à



avec  $pxp=N$  elements, l'image a  $pxp$  pixels résolus  
si  $N$  tend vers l'infini, même image qu'avec  
télescope plein, atténuée en  $N(d/D)^2$

- Si pupille annulaire

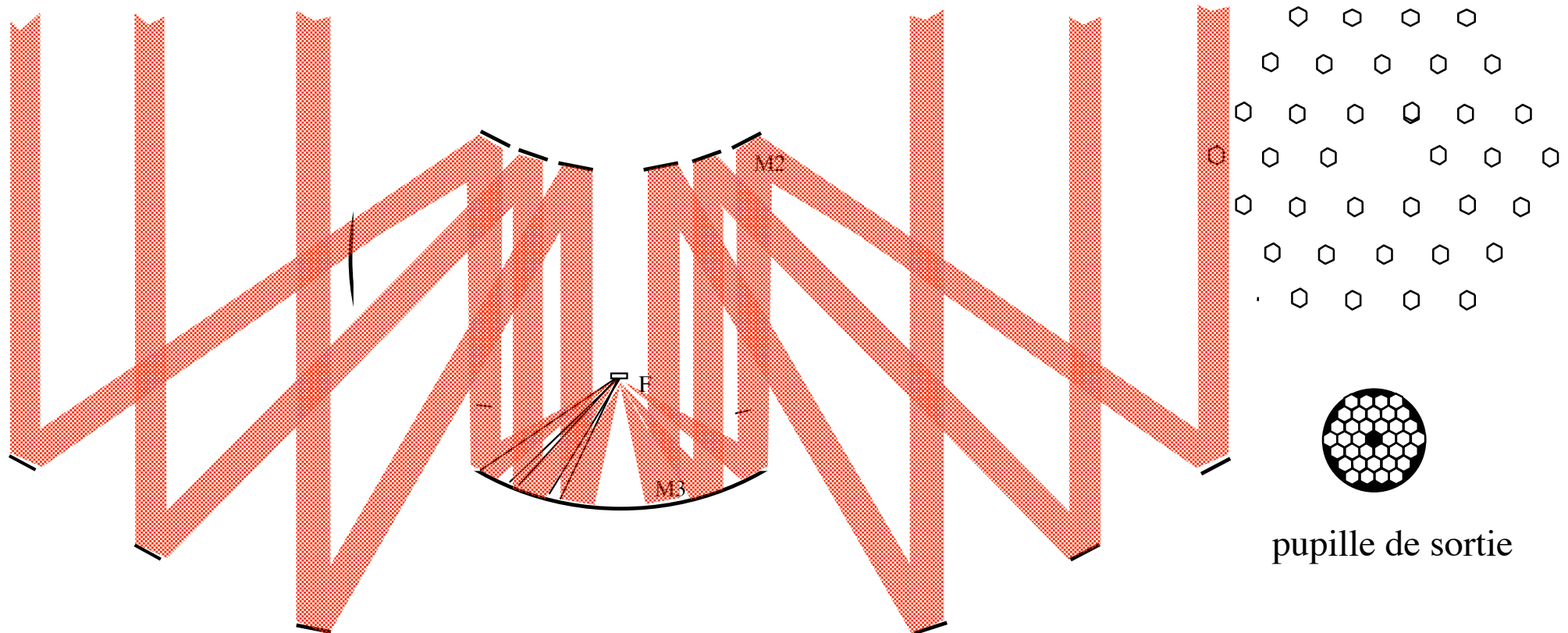


Plus de pixels résolus (jusqu'à  $N \times N/10$ ), mais pieds plus intenses

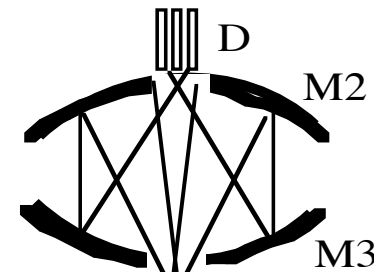
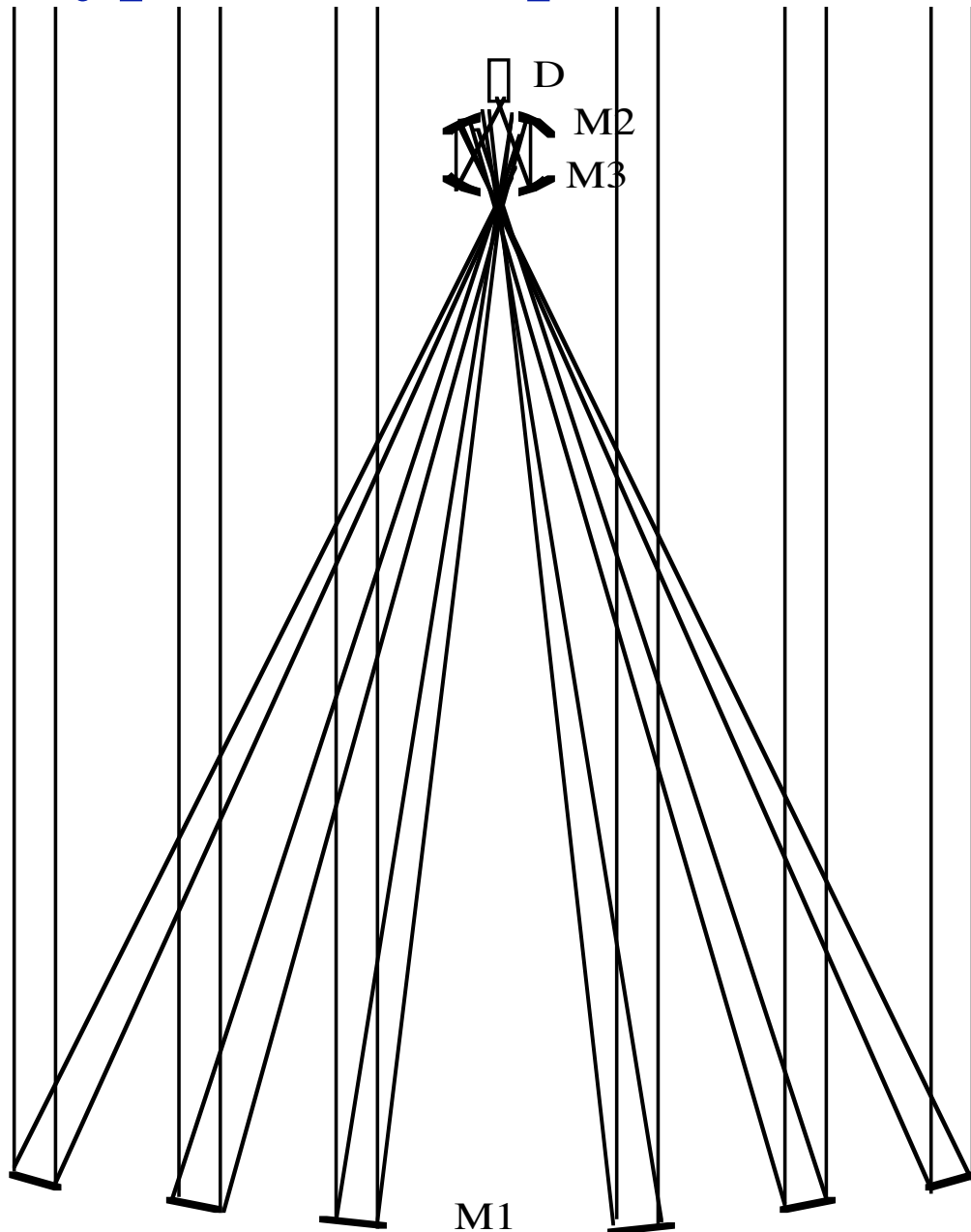
- triple anneau semble optimal pour imagerie résolue d'exoplanètes

# hyper-telescope: schéma de principe

- Extension de la poutre de Michelson
- Ouverture: invariance de la disposition des centres
- Effet de fenêtre limitant le champ



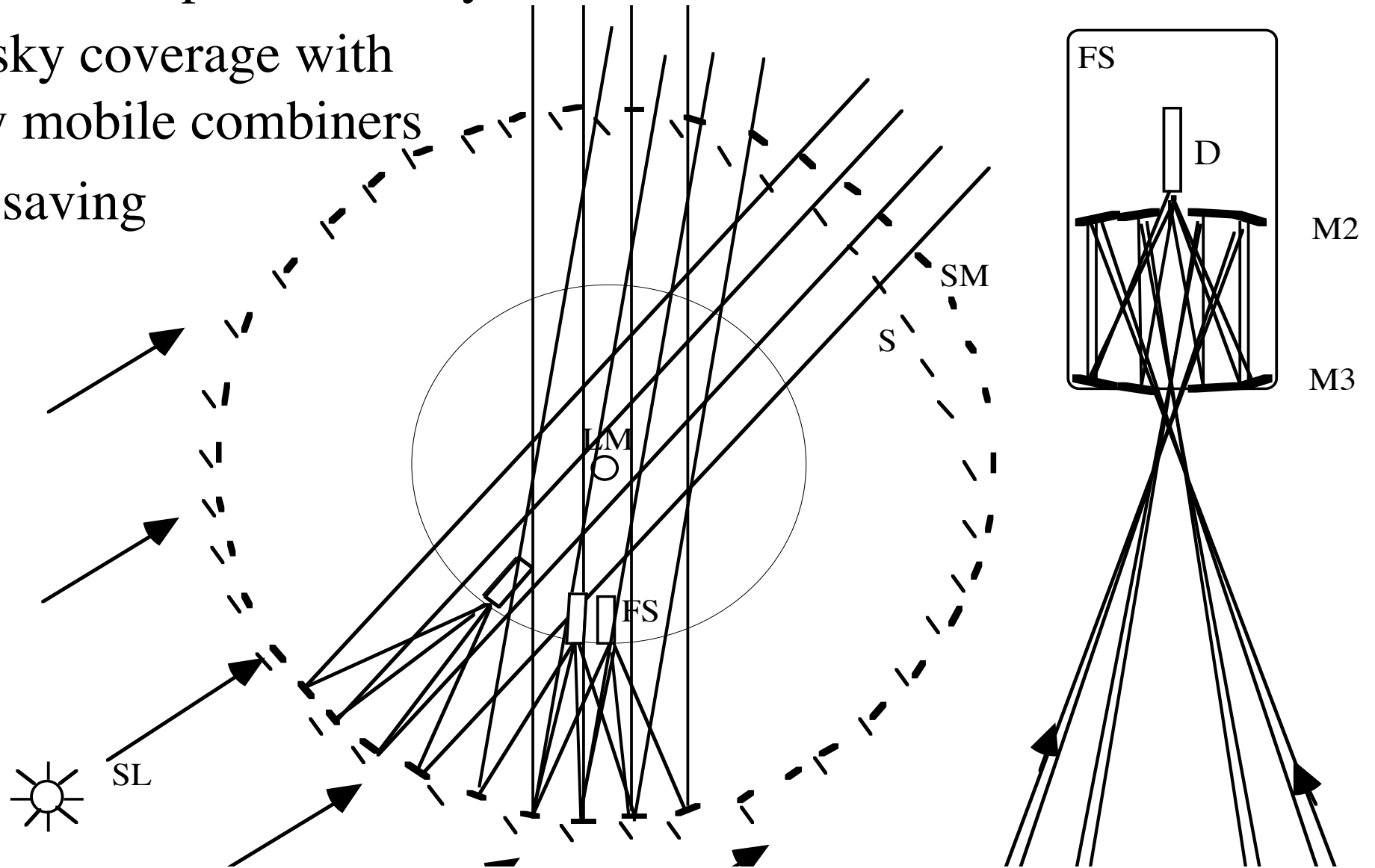
# Hyper-telescope à réseau sphérique



- Correcteur d'aberration sphérique
- Convient pour des réseaux géants
- Plusieurs stations focales

# Towards the « bubble » or Moth-Eye Interferometer

- Extends the spherical array
- Full sky coverage with many mobile combiners
- cost saving

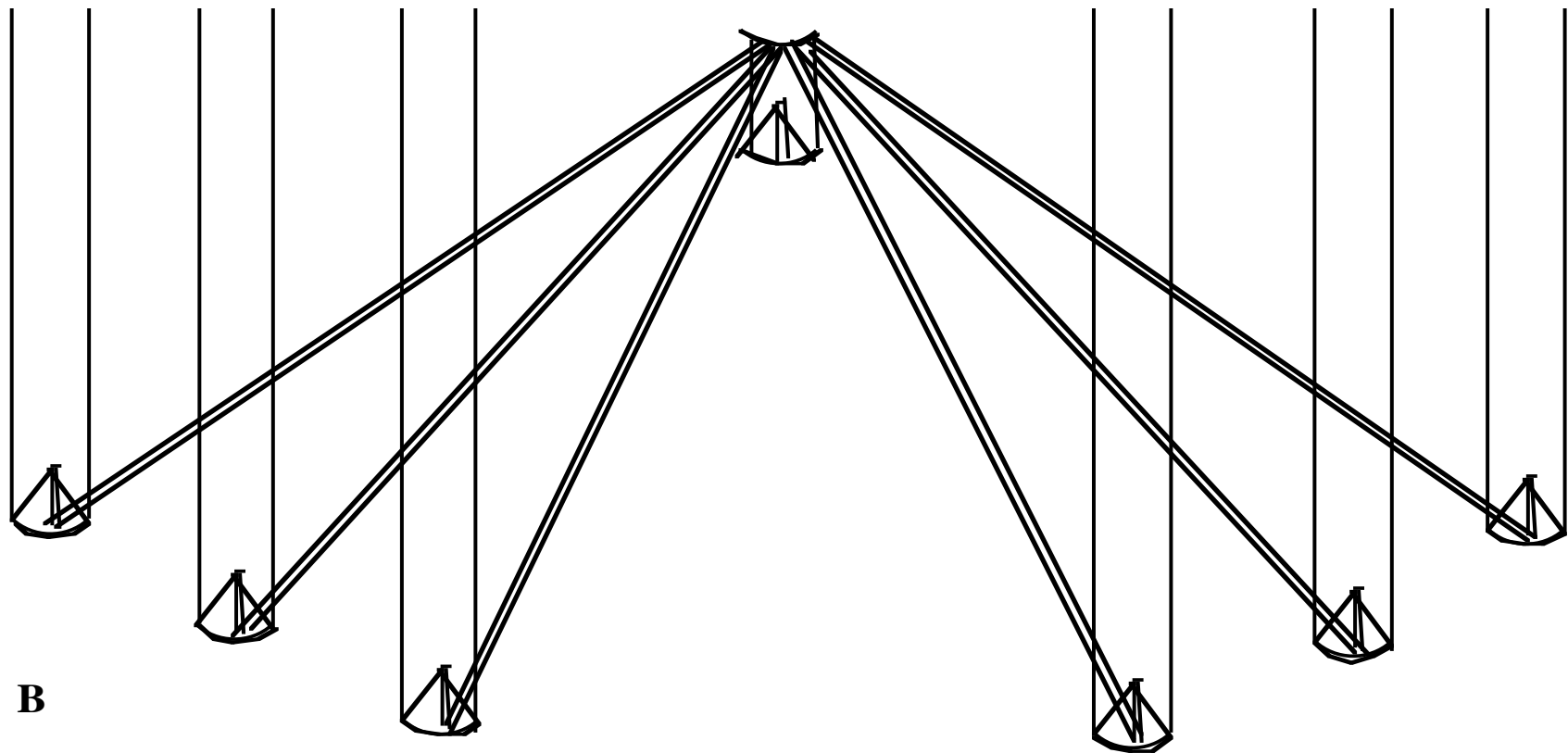






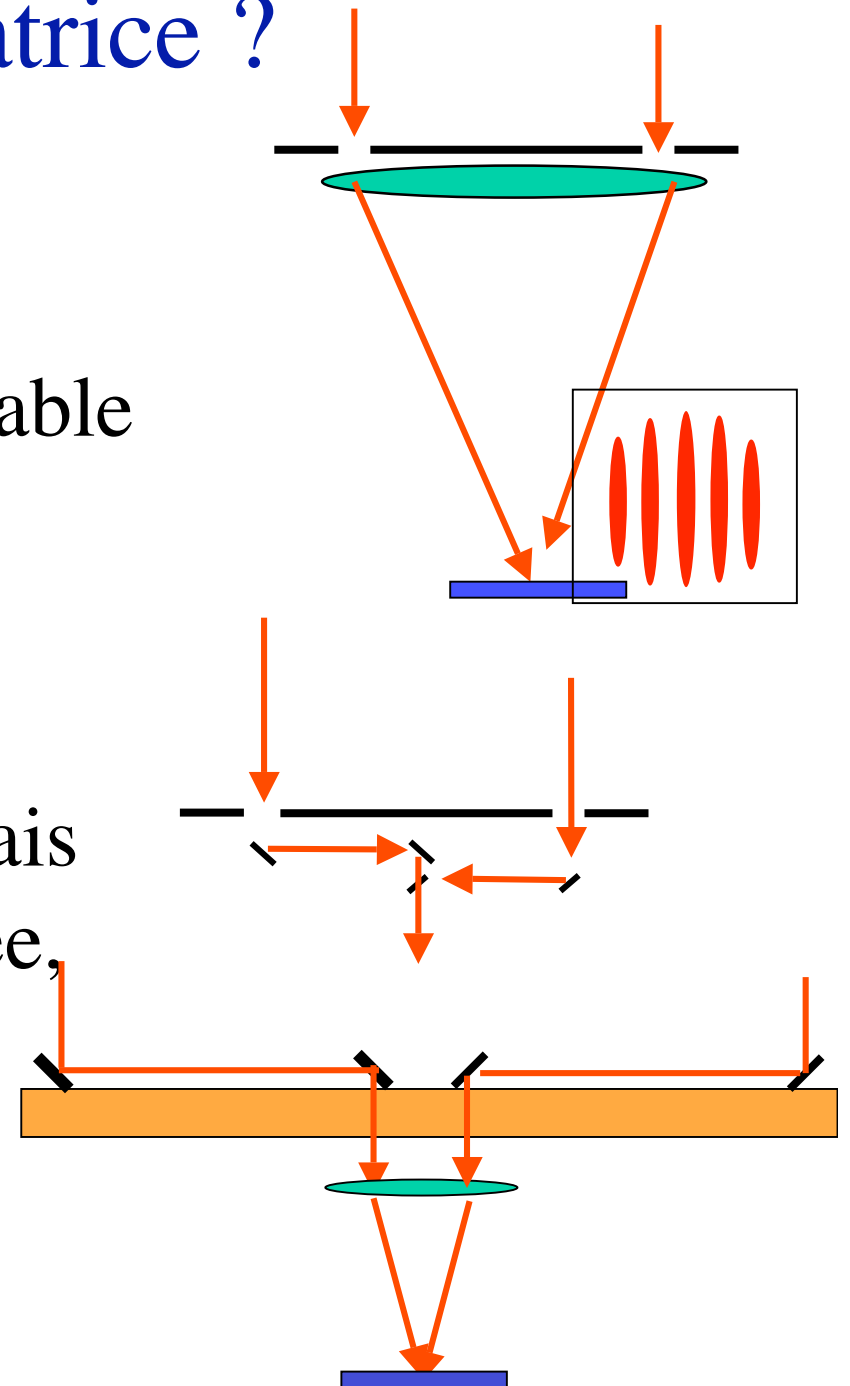
# Hyper-télescope dont les éléments sont des télescopes

- Convient pour de grands éléments, avec bases modérées



# Combineur Fizeau ou séparatrice ?

- Fizeau adéquat pour ouvertures nombreuses, mais devient inutilisable avec forte dilution
- Séparatrice **inutilisable** pour ouvertures nombreuses ( $> 6$ ), « teinte plate » d'interférence, mais convient pour ouverture très diluée, pas d'image
- La pupille densifiée est un cas intermédiaire



# Quelques adresses utiles:

- [www.college-de-france.fr](http://www.college-de-france.fr)
- [Www.obs-hp.fr/~labeyrie](http://Www.obs-hp.fr/~labeyrie)
- Hra
- lawson