

Versions terrestres d'hyper-télescopes:

1- évolution du projet de "Très Grand Réseau Optique » (Optical Very Large Array)

**Séminaire à 15h15: Prof. Gilbert Burki ,
Observatoire de Genève**

**"Phénomènes variables et connaissance
astrophysique"**

Un hyper-telescope: Exo-Earth Imager

150 miroirs
de 3m

150 km

Pose 30mn

Terre à 3pc

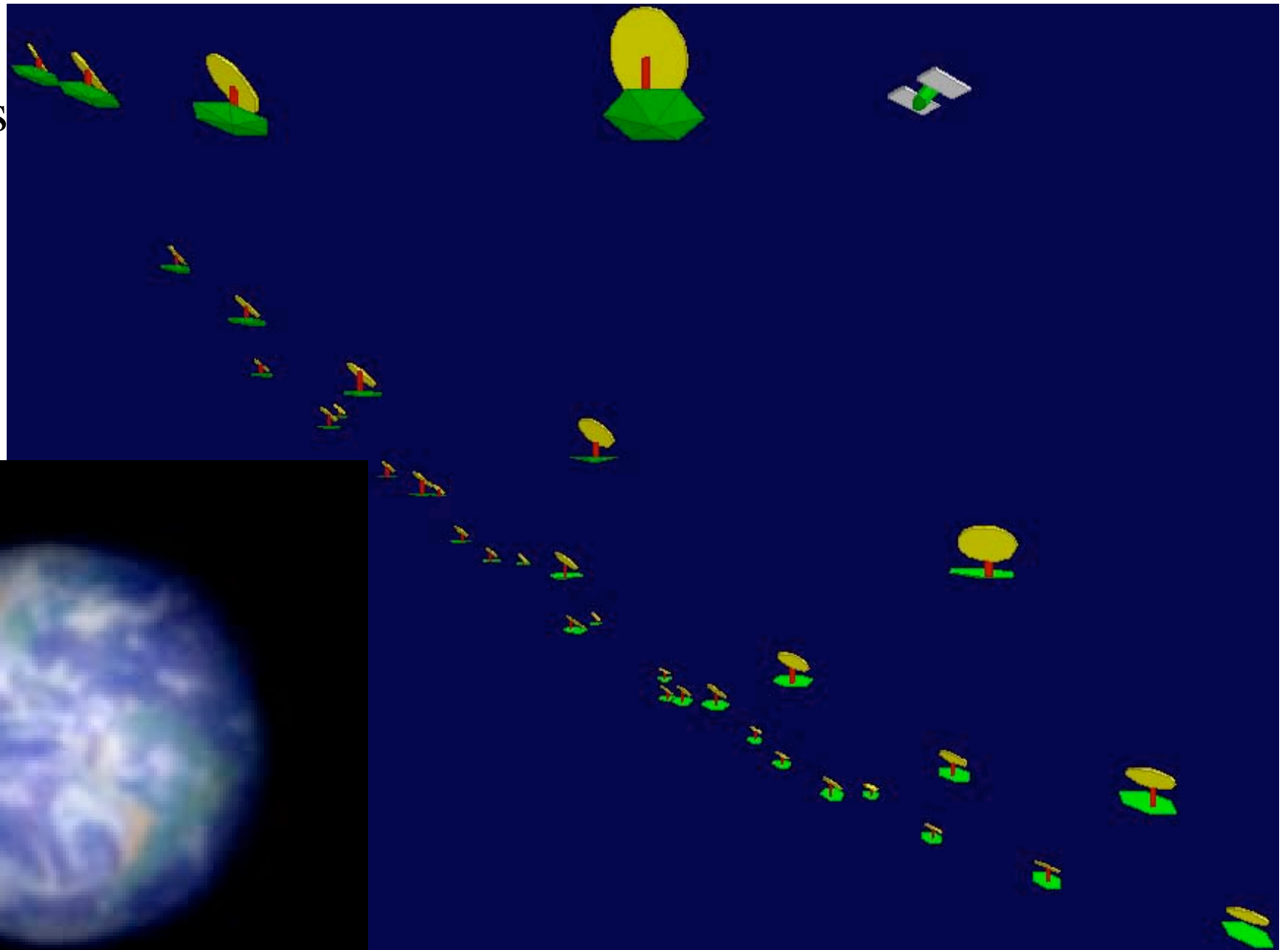
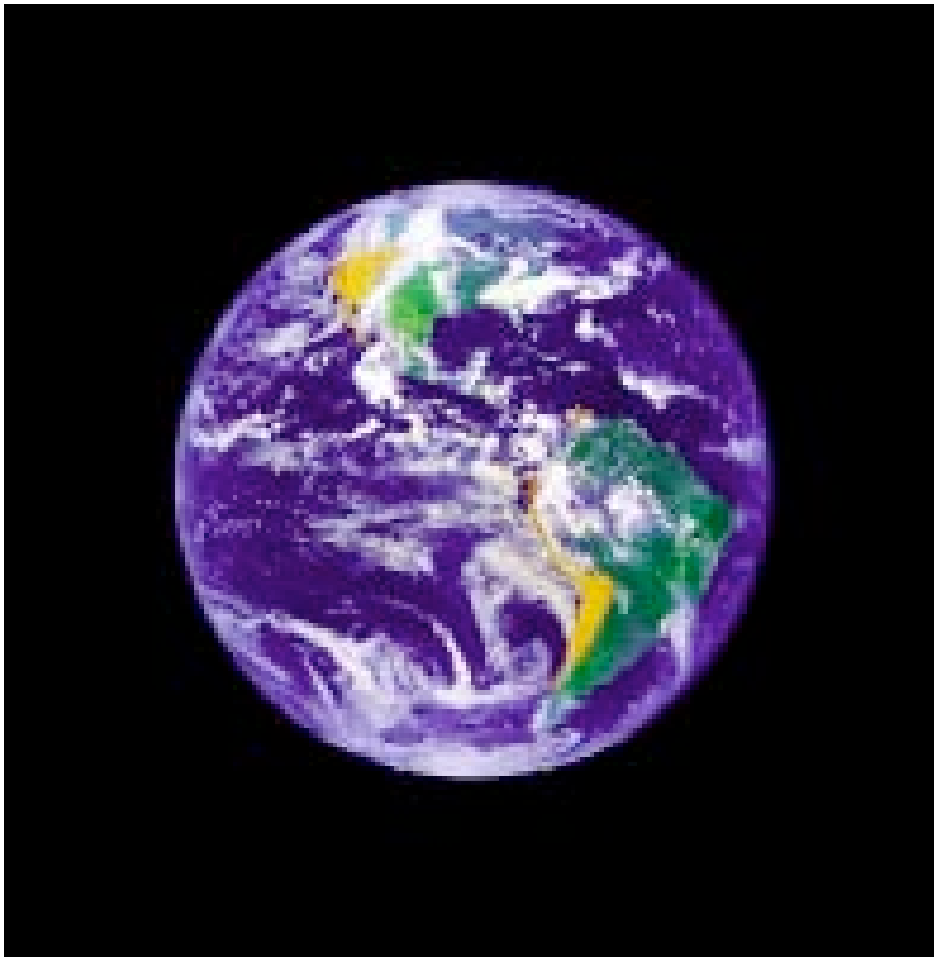


Image simulée d'une Terre vue à 10 années lumière par un hyper-telescope de 150km

150 miroirs de 3m,
pose 30mn

(Labeyrie, **Science**, 17 Septembre 1999)



objet

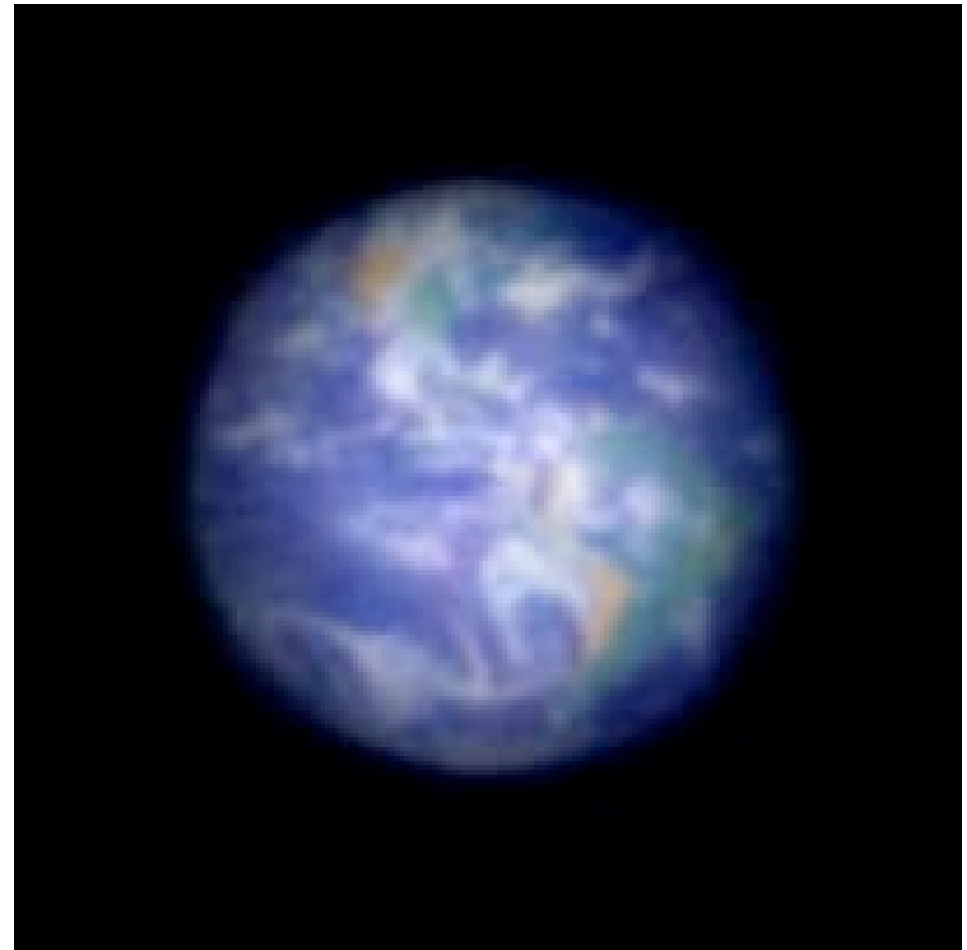
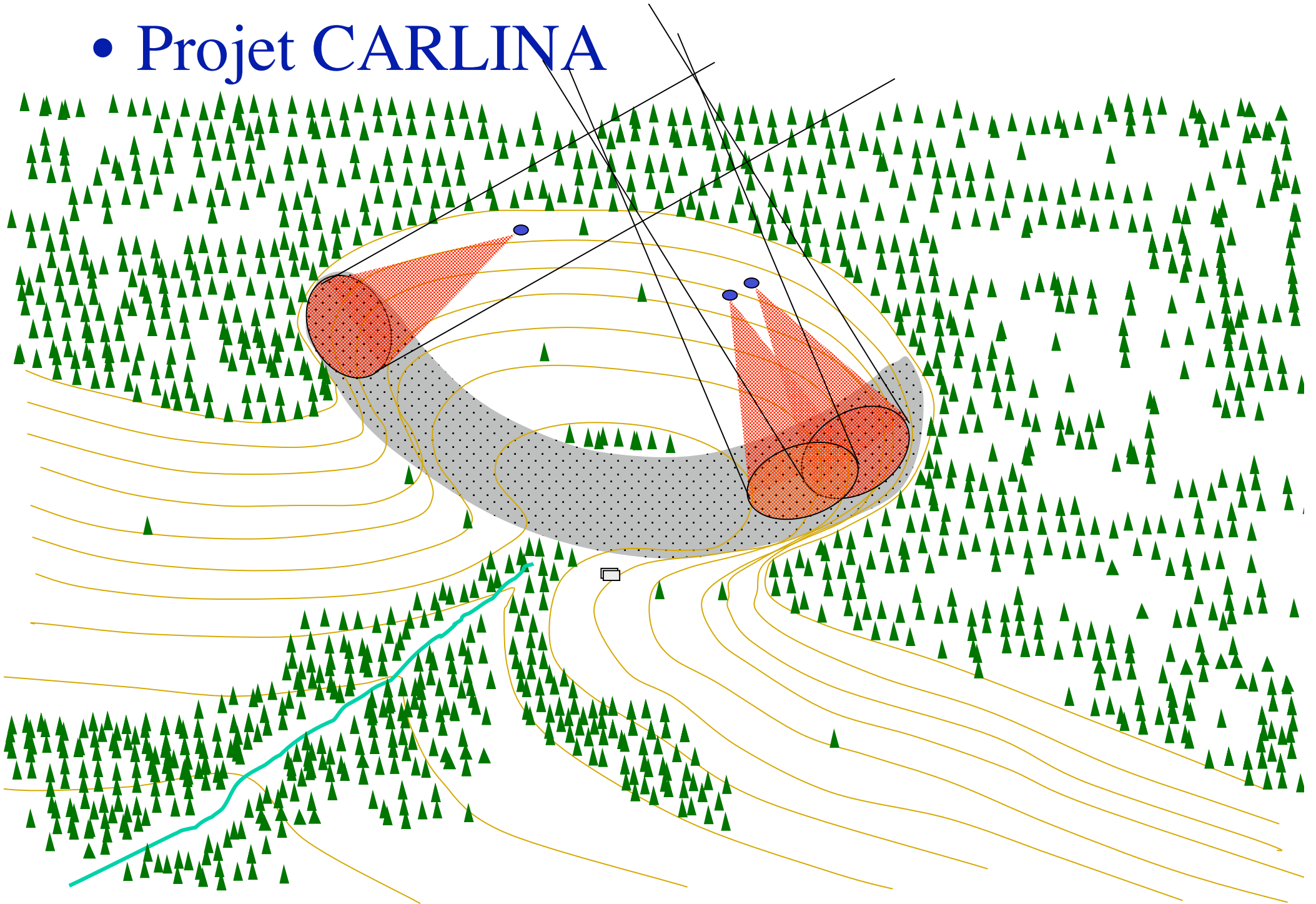
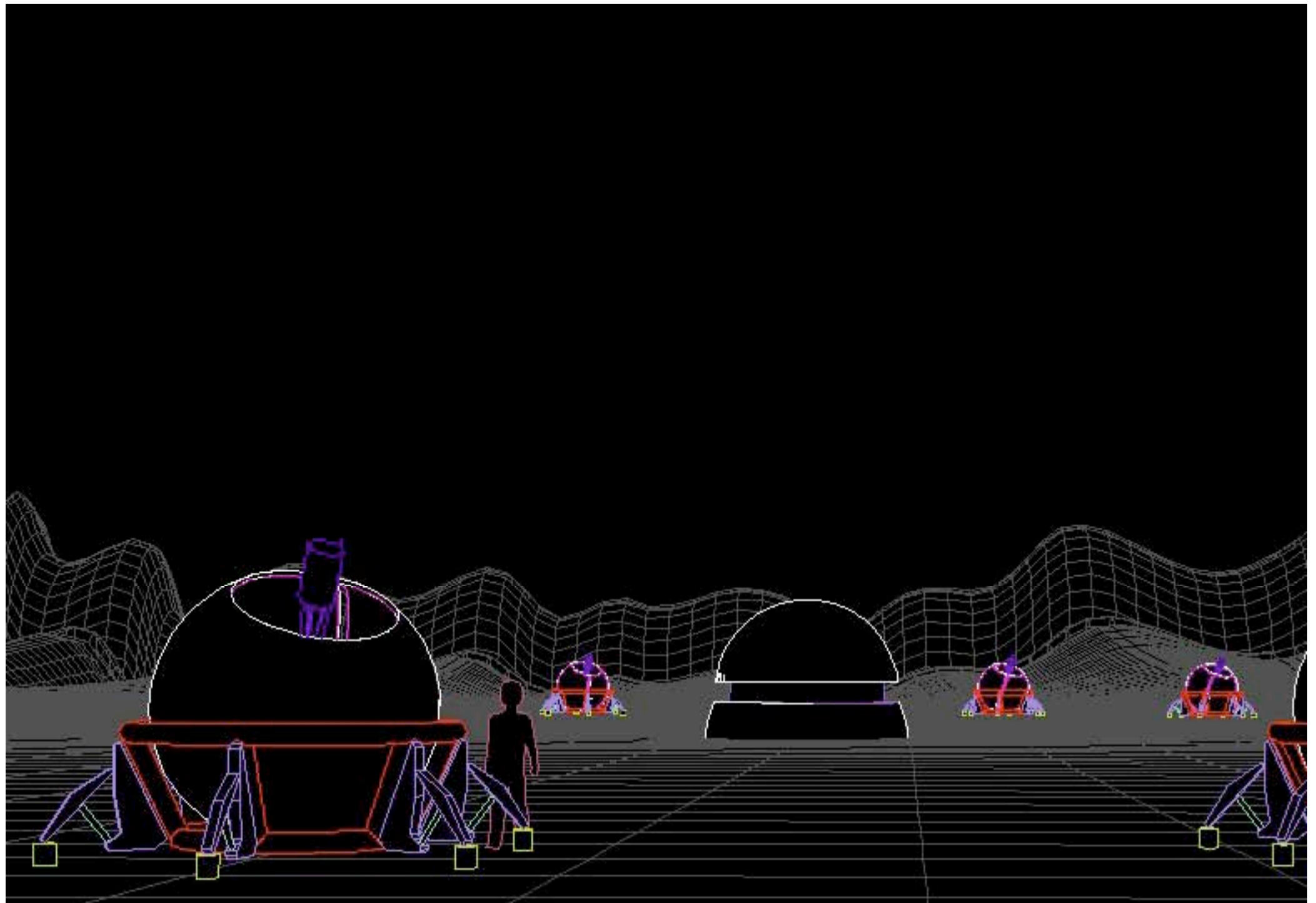


image brute

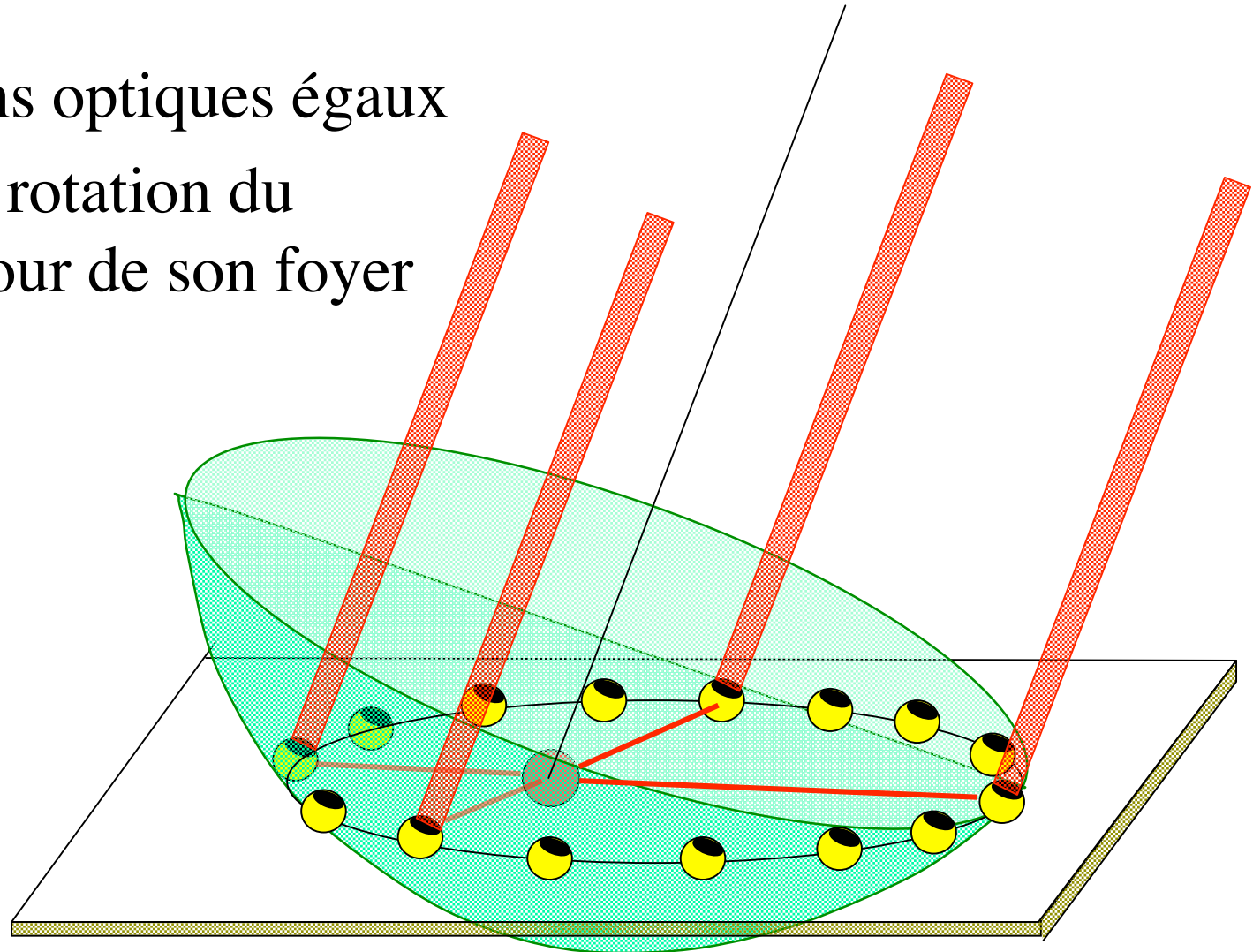
• Projet CARLINA





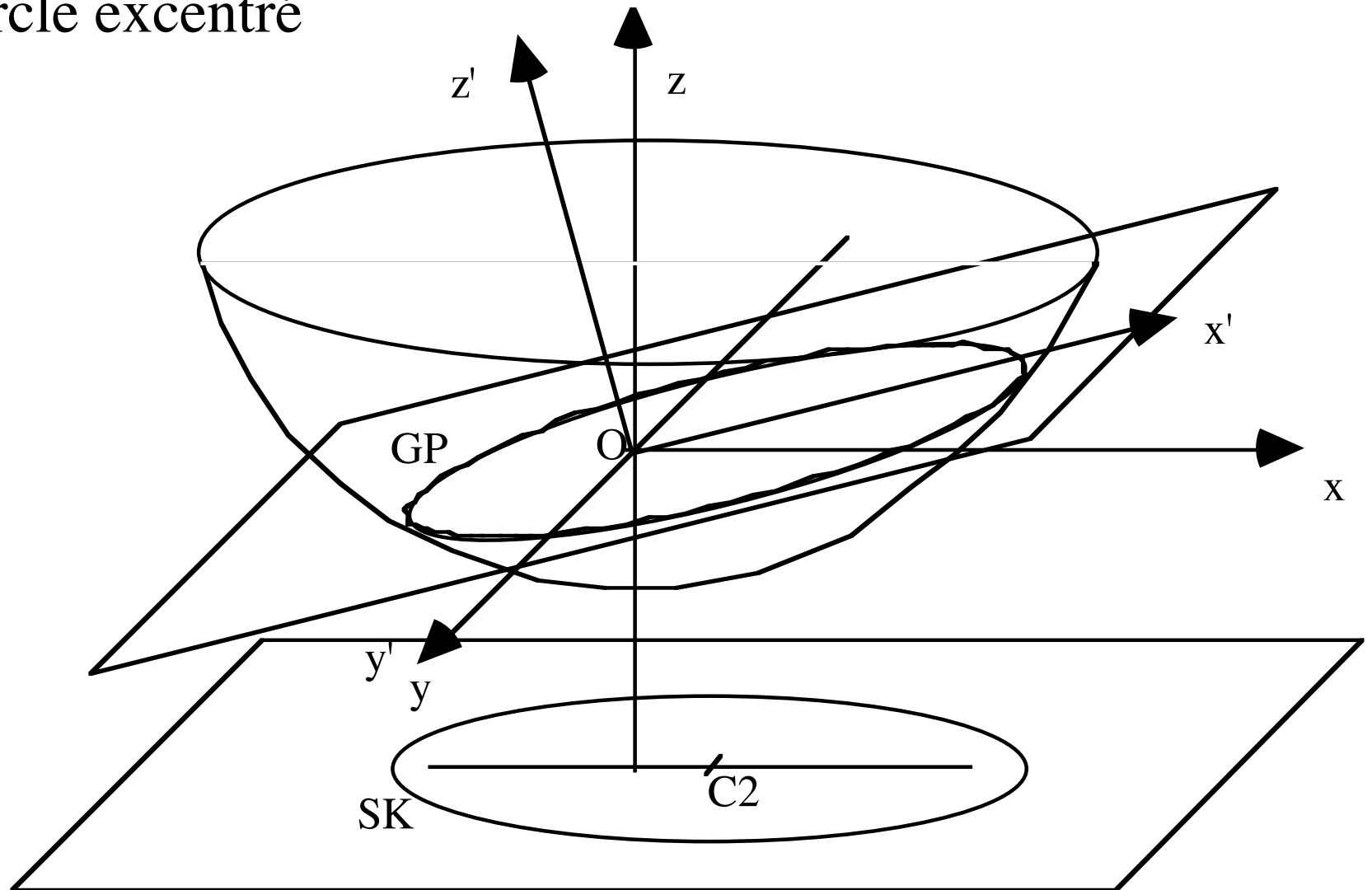
Section plane d'un paraboloïde

- Ellipse
- Lieu des chemins optiques égaux
- Déformable par rotation du paraboloïde autour de son foyer



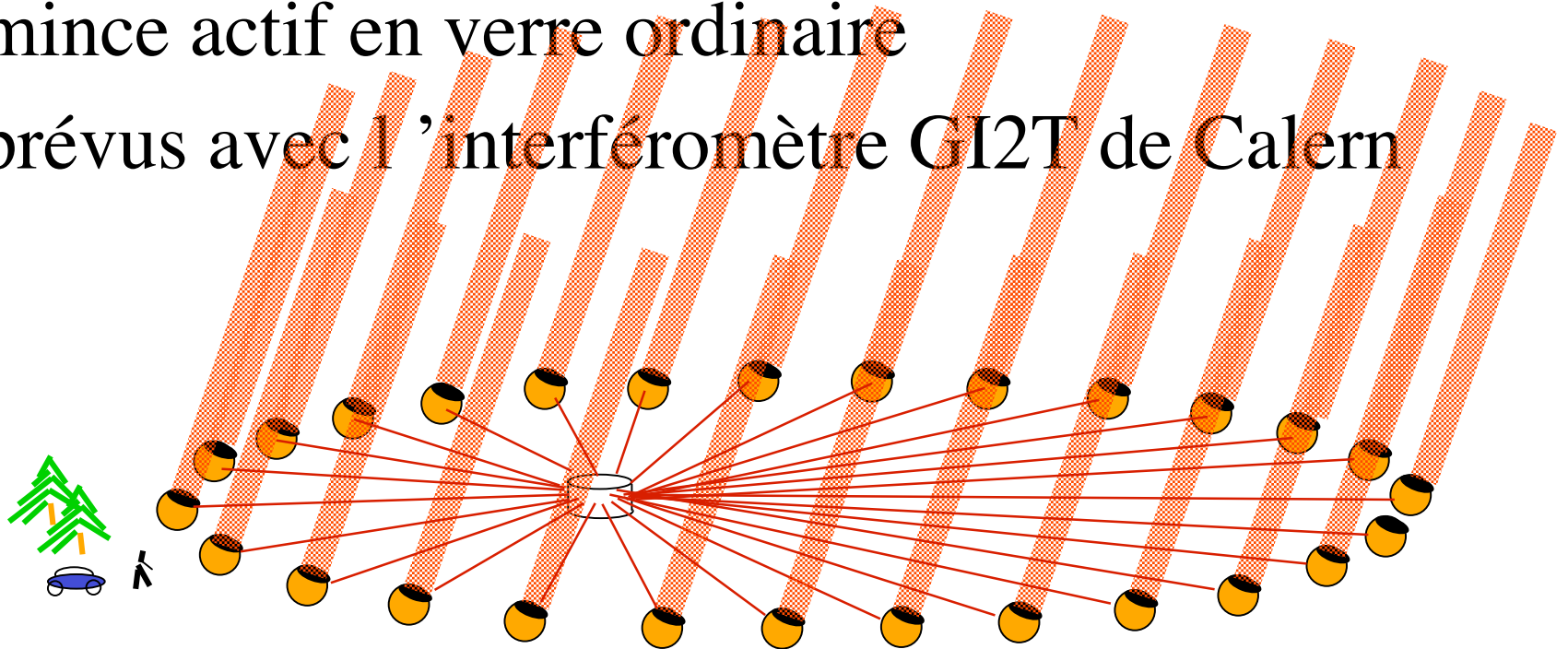
Ellipse deformable

- Vue de l'étoile, l'ellipse est un cercle excentré



Le Optical Very Large Array

- télescopes de 1.5m, mobiles par hexapodes,
- dimension 1 à 10 km
- combineur modifié pour pupille densifiée
- Construction d'un élément à Obs. Haute Provence: miroir mince actif en verre ordinaire
- Essais prévus avec l'interféromètre GI2T de Calern

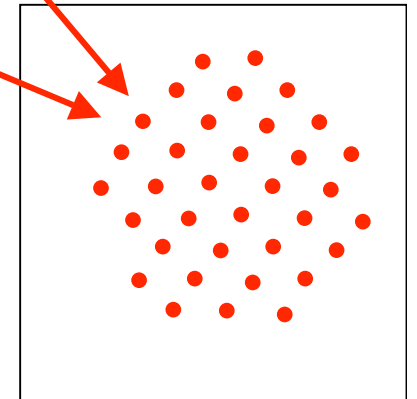
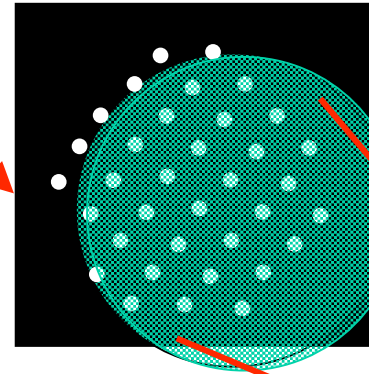


Historique du projet

- Premières études en 1986, avant le concept d 'hyper-télescope
- La qualité d 'imagerie était sous-estimée
- Maintenant: optimisation pour l 'imagerie hyper-télescope
- Potentiellement plus grand que CARLINA (10 km contre 1km), mais combineur unique
- Plus complexe et coûteux , mais site plat

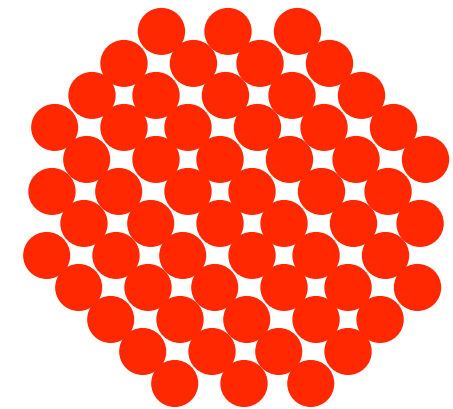
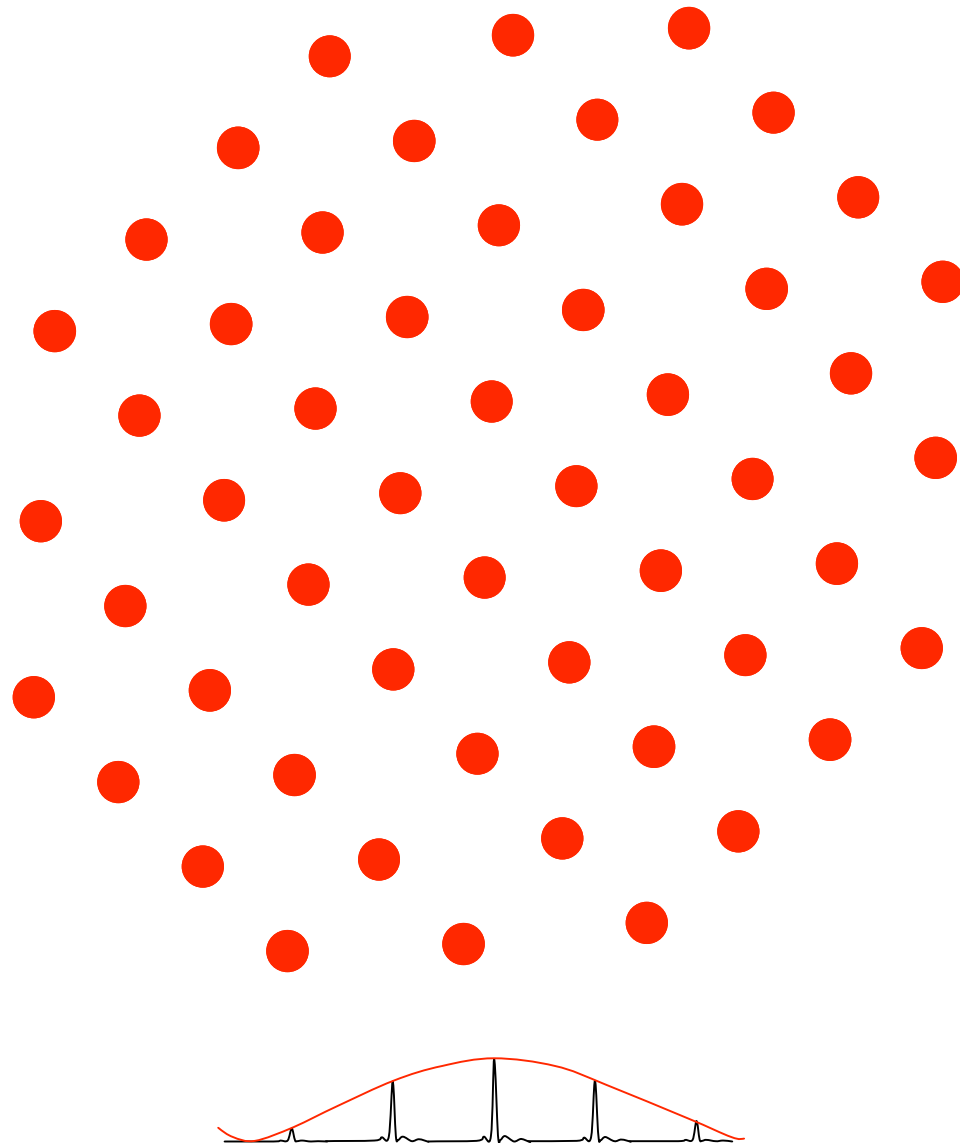
Interféromètre de Fizeau

diamètres: D et d
espacement: s



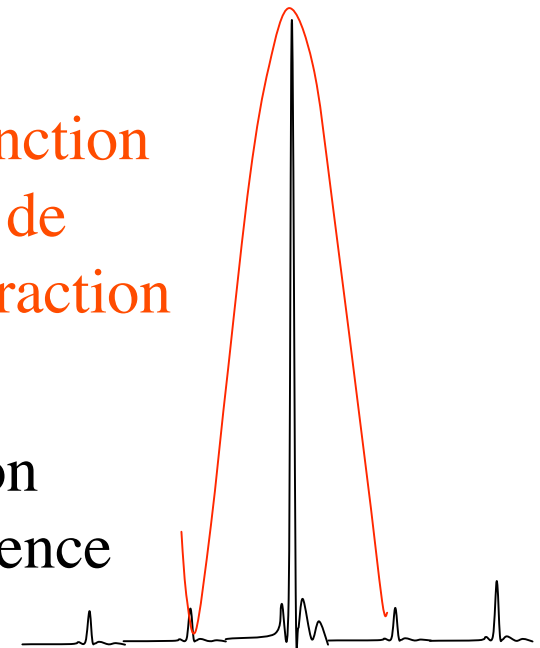
- Figure de diffraction convoluée avec l'objet
- Inutilisable si $s \gg d$ (peu d'énergie dans le pic central)
- Remède: **densifier la pupille**

Densifier la pupille pour intensifier l'image

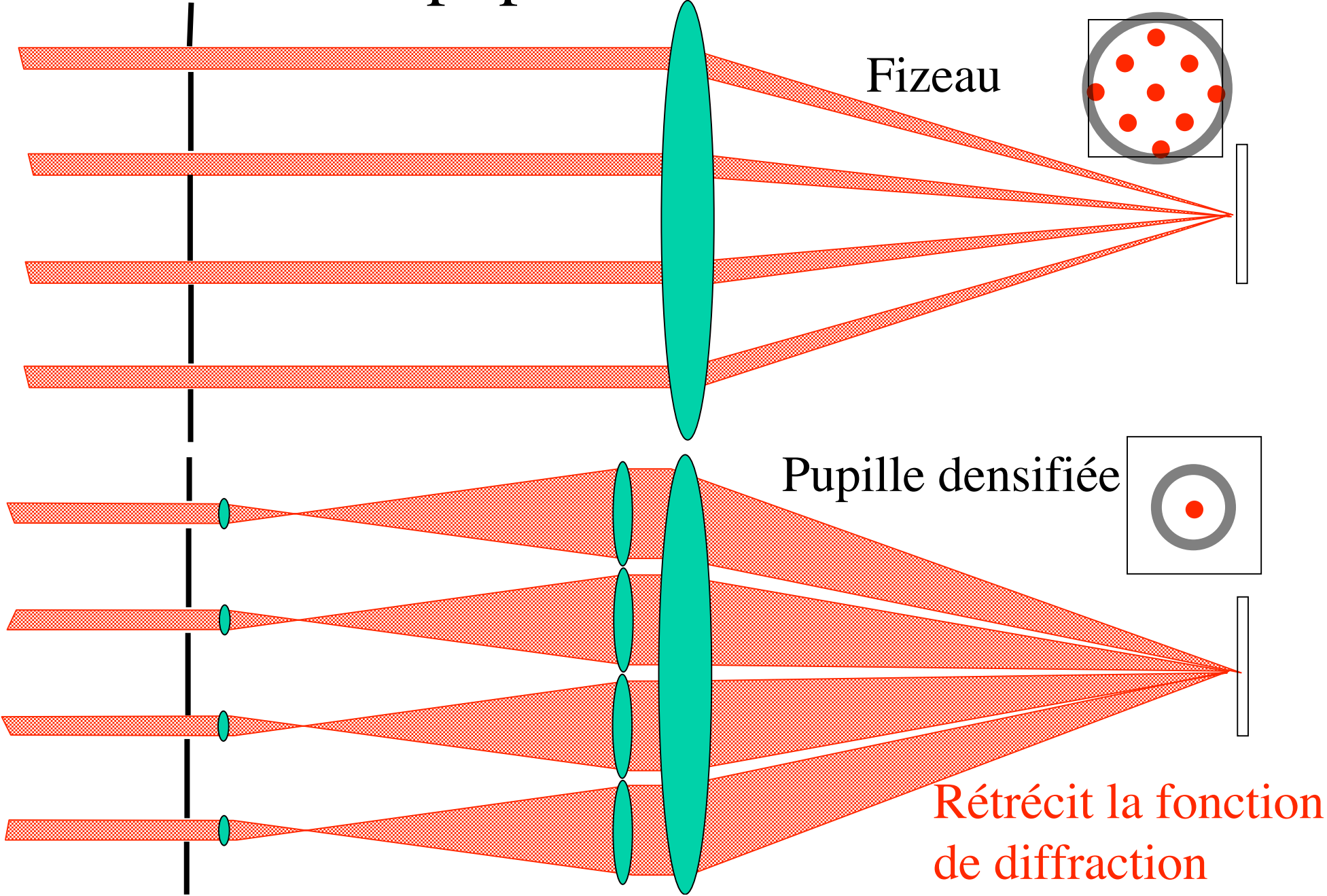


Fonction
de
diffraction

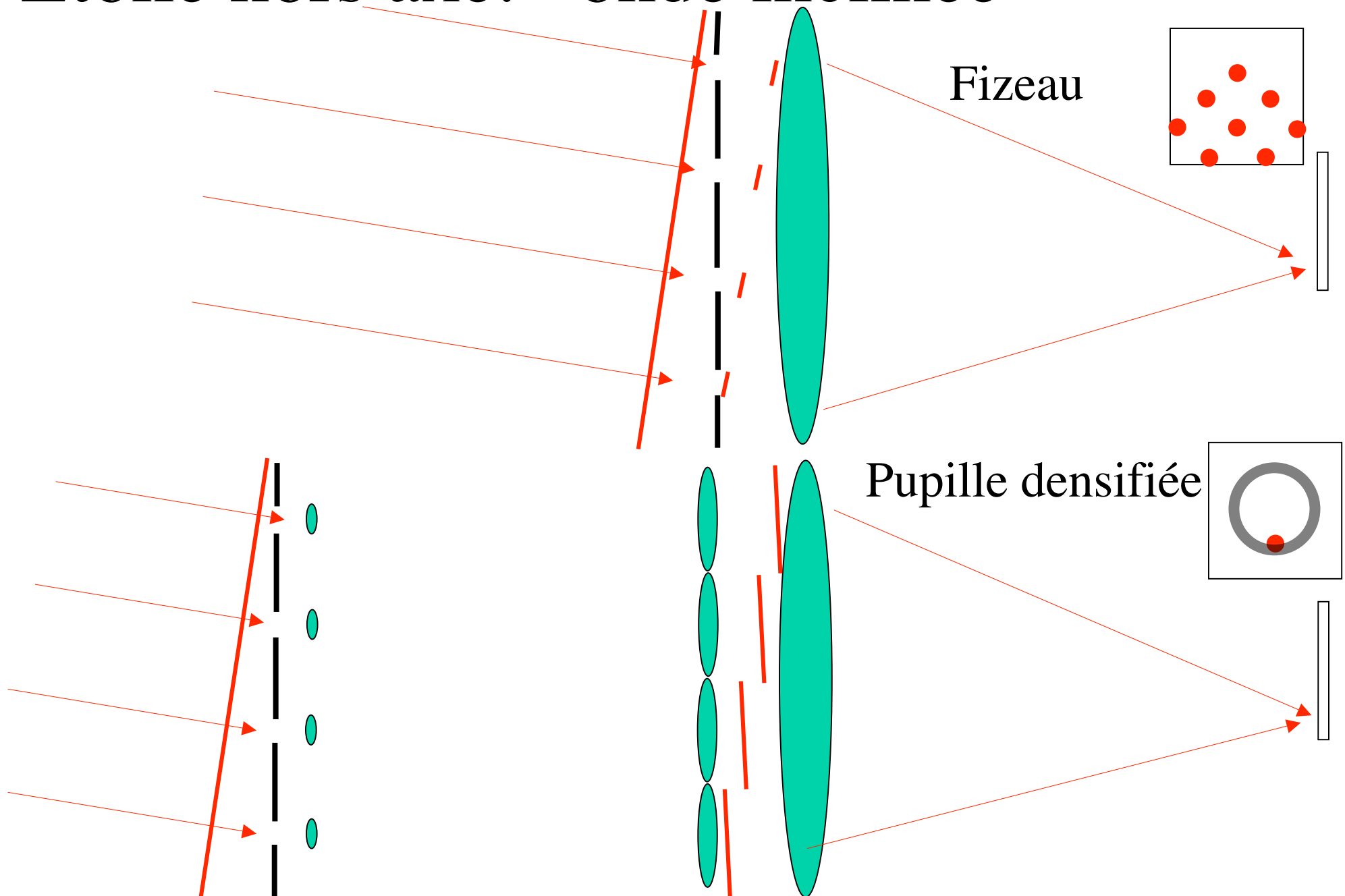
Fonction
d'interférence



Densification de pupille



Etoile hors axe: onde inclinée



Effet de la densification de pupille

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

ouverture « fakir Dirac » disque

TF \updownarrow

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

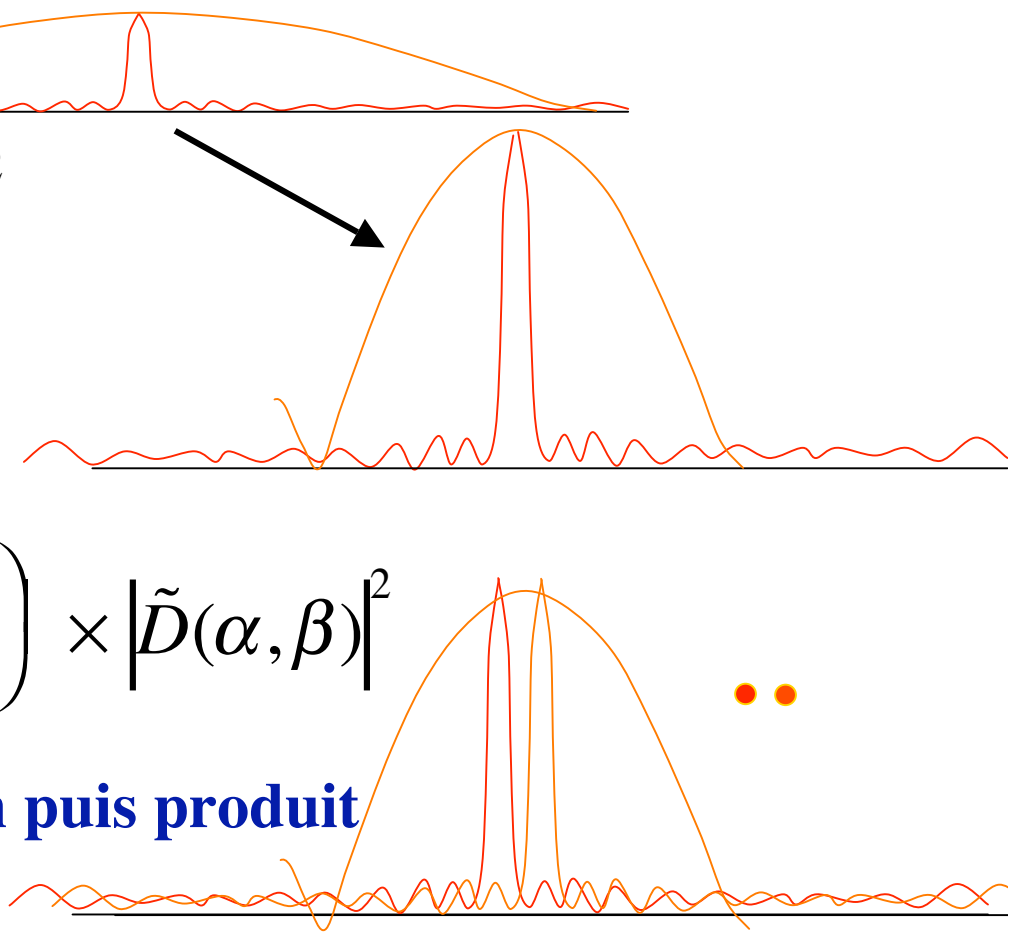
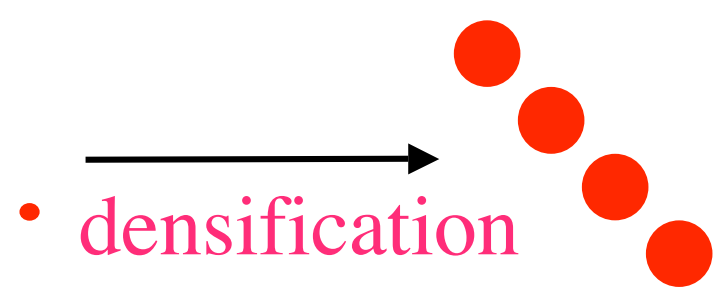
$$|\tilde{O}(\alpha, \beta)|^2 = |\tilde{F}(\alpha, \beta)|^2 \times |\tilde{D}(\alpha, \beta)|^2$$

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

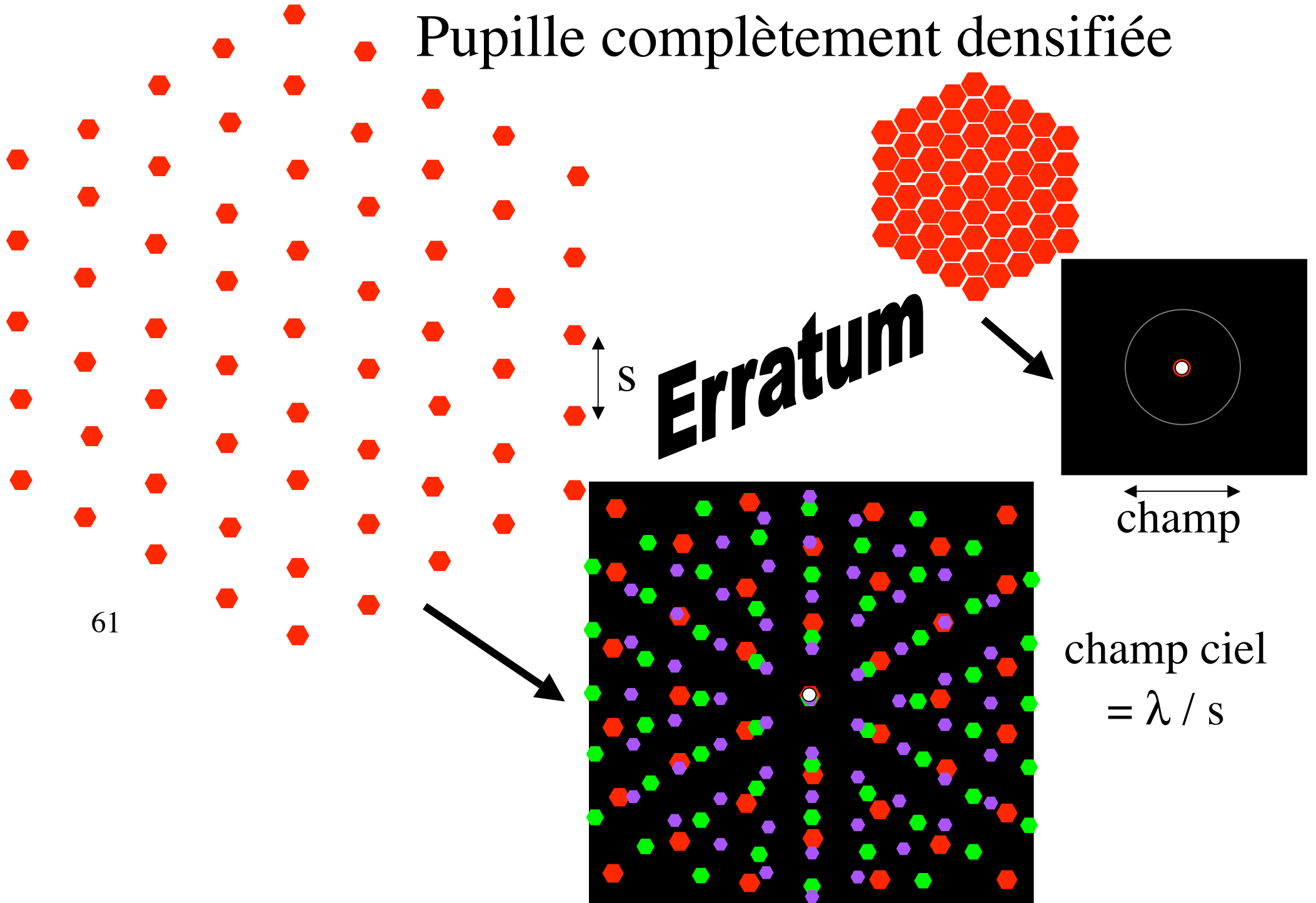
si $D \gg d$, l'enveloppe est fixe

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

Image pseudo-convoluée: convolution puis produit

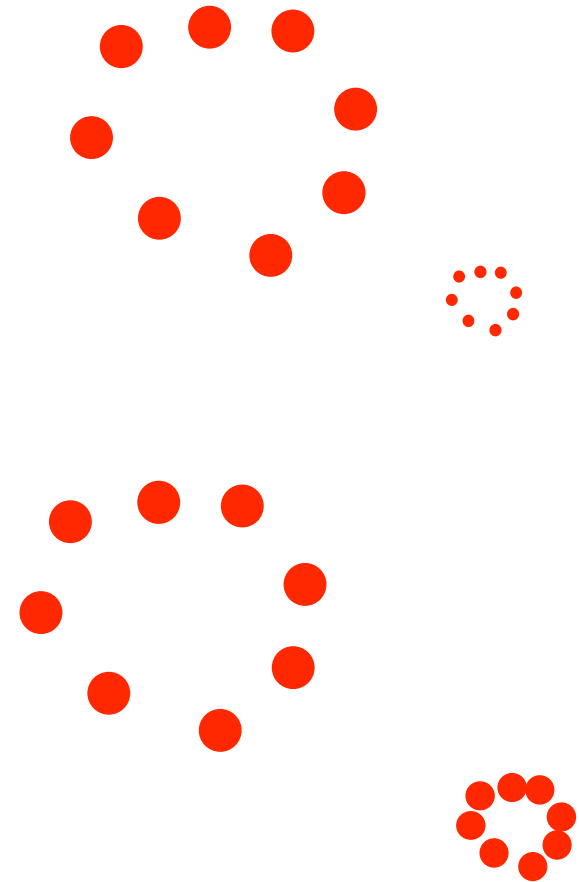


Pupille complètement densifiée

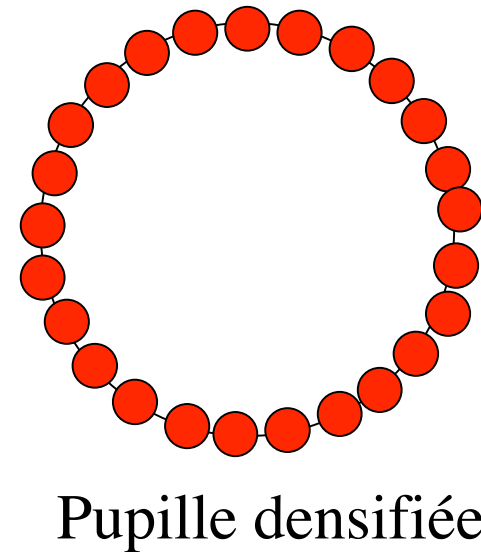
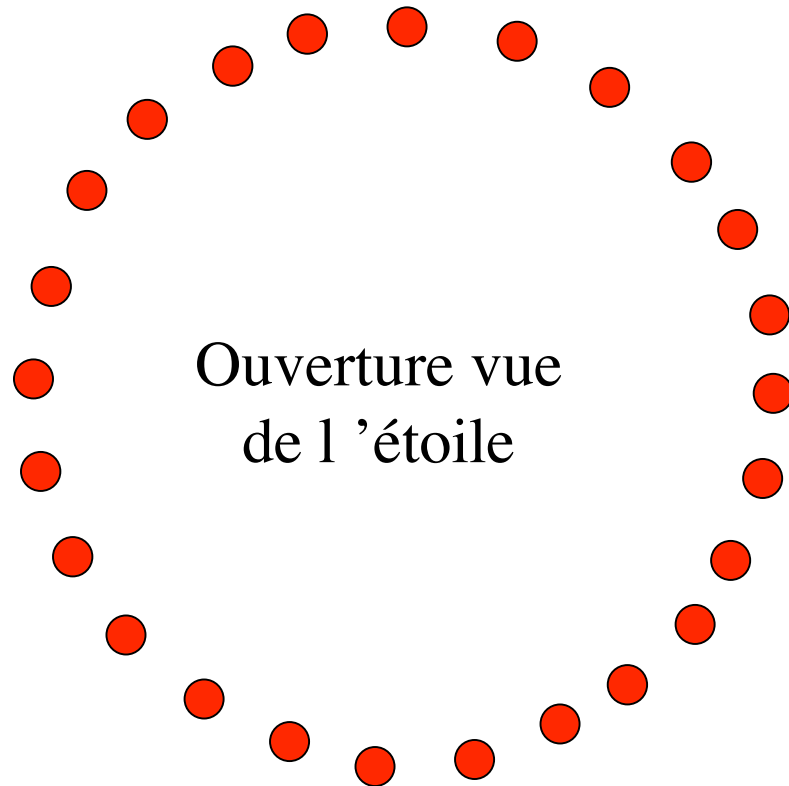


Reformuler la « règle d 'or des interféromètres imageurs »

- **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 »

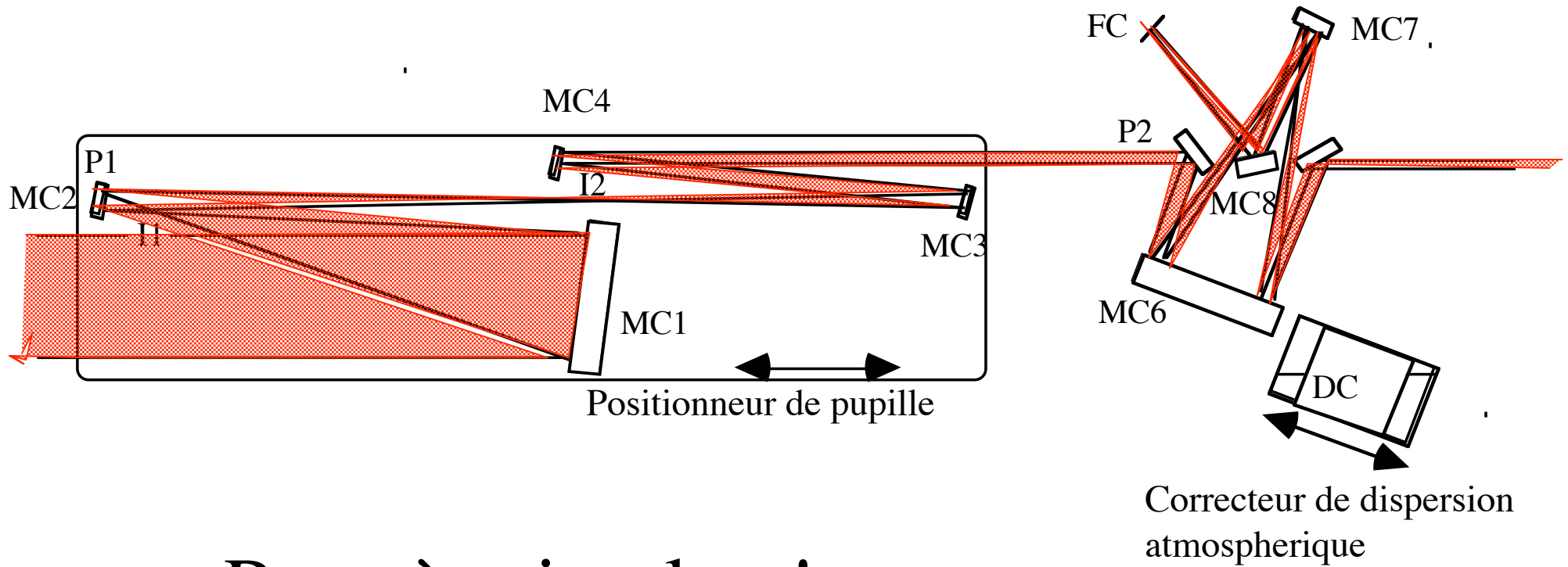


Densifier la pupille de OVLA



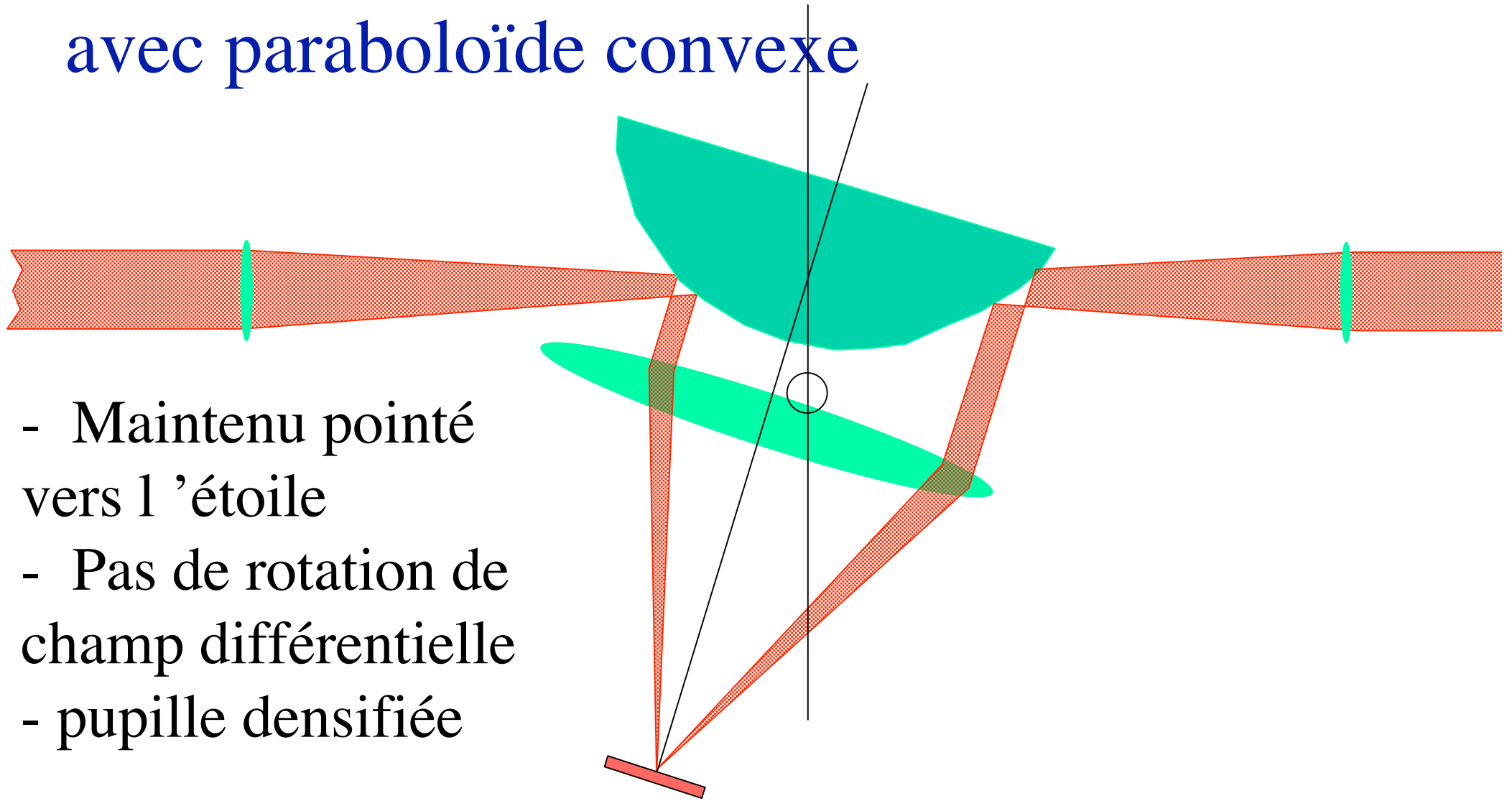
- Respecter la disposition des centres
- Nécessite un déplacement en azimuth des télescopes pendant l'observation

Combineur OVLA



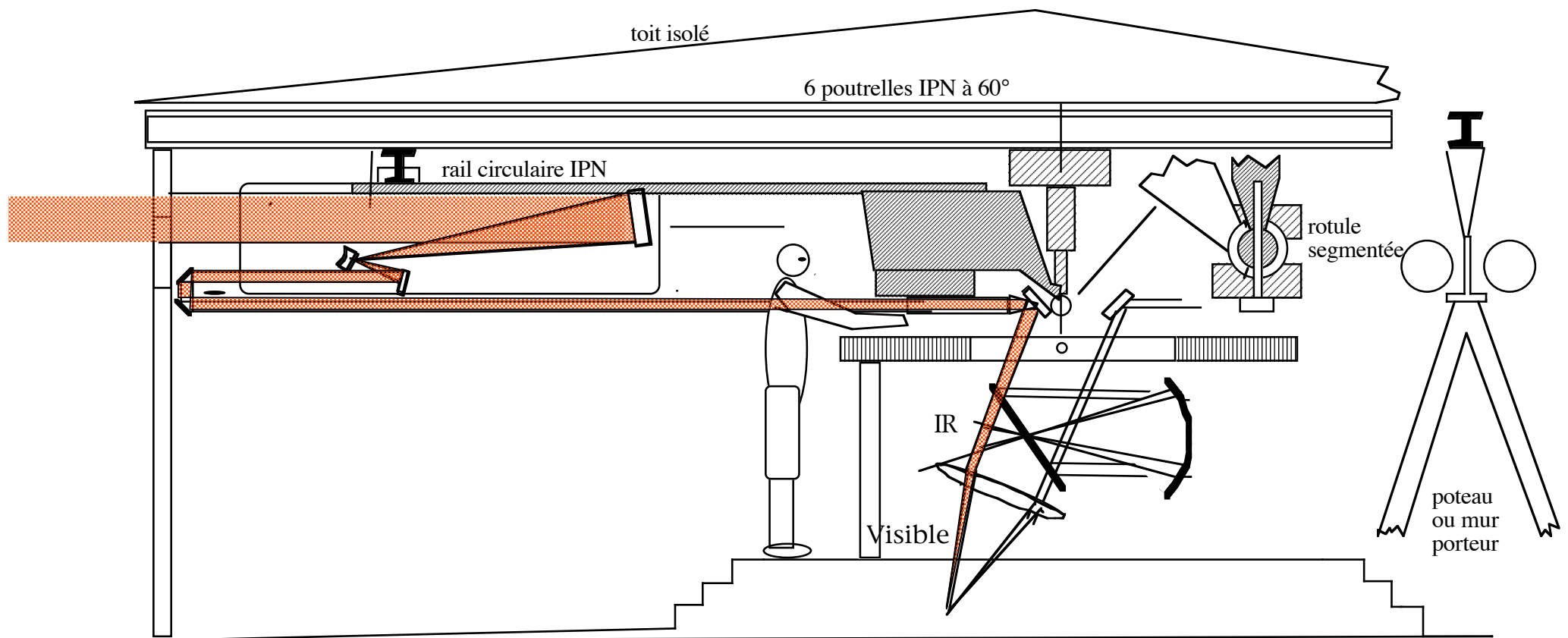
- Pas très simple !

Combineur OVLA avec paraboloïde convexe

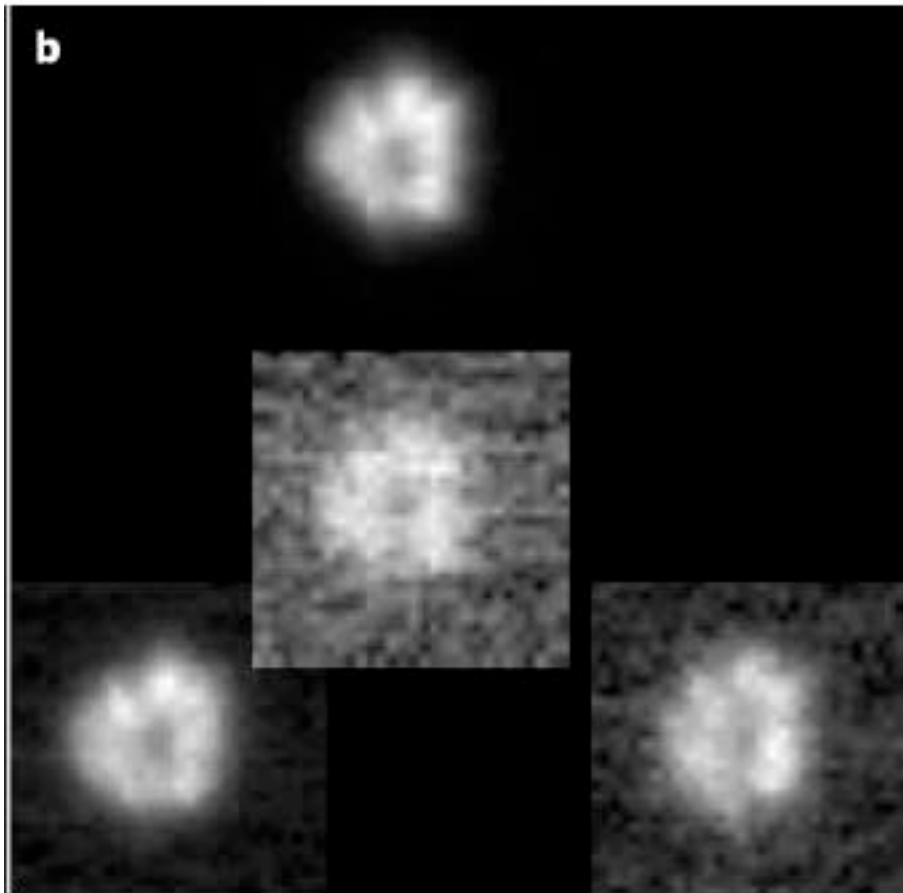


- Maintenu pointé vers l'étoile
- Pas de rotation de champ différentielle
- pupille densifiée

combineur OVLA



Optique adaptative

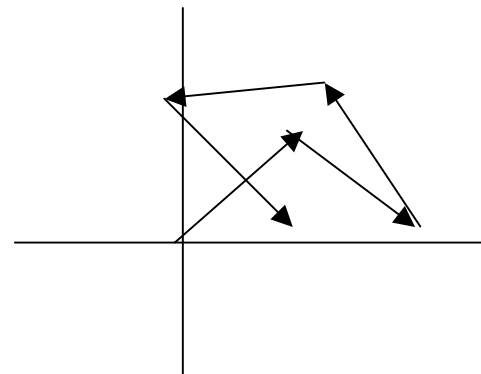
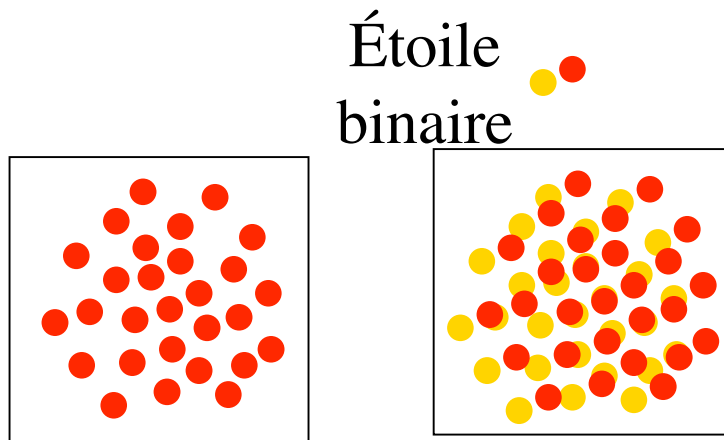
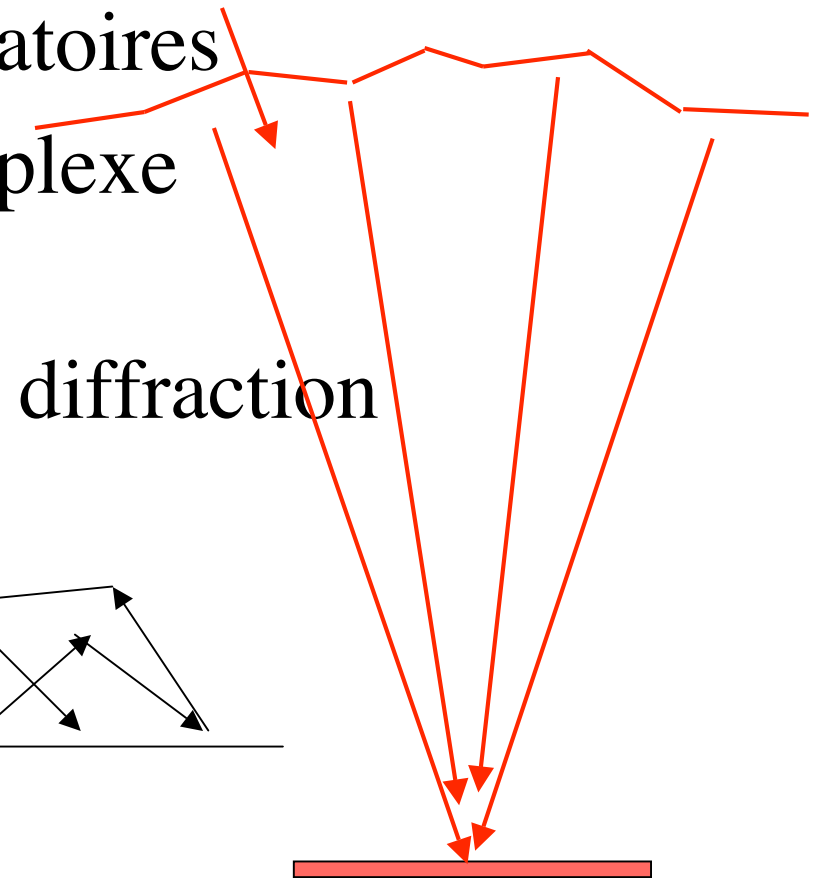
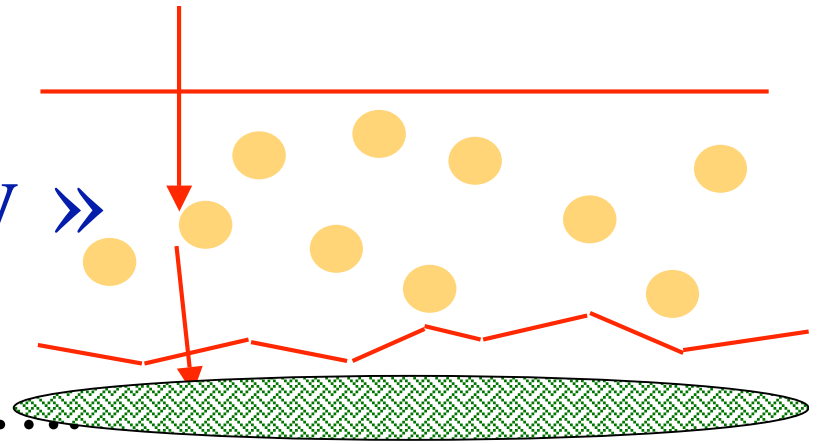


Ragazzoni et al, Nature, 2000

Faire avec la turbulence:

1- « speckle interferometry »

- Juste retirer le masque de Fizeau
- addition de vibrations à phases aléatoires
- Marche aléatoire dans le plan complexe
> resultat chaotique
- Intensité variable dans la figure de diffraction

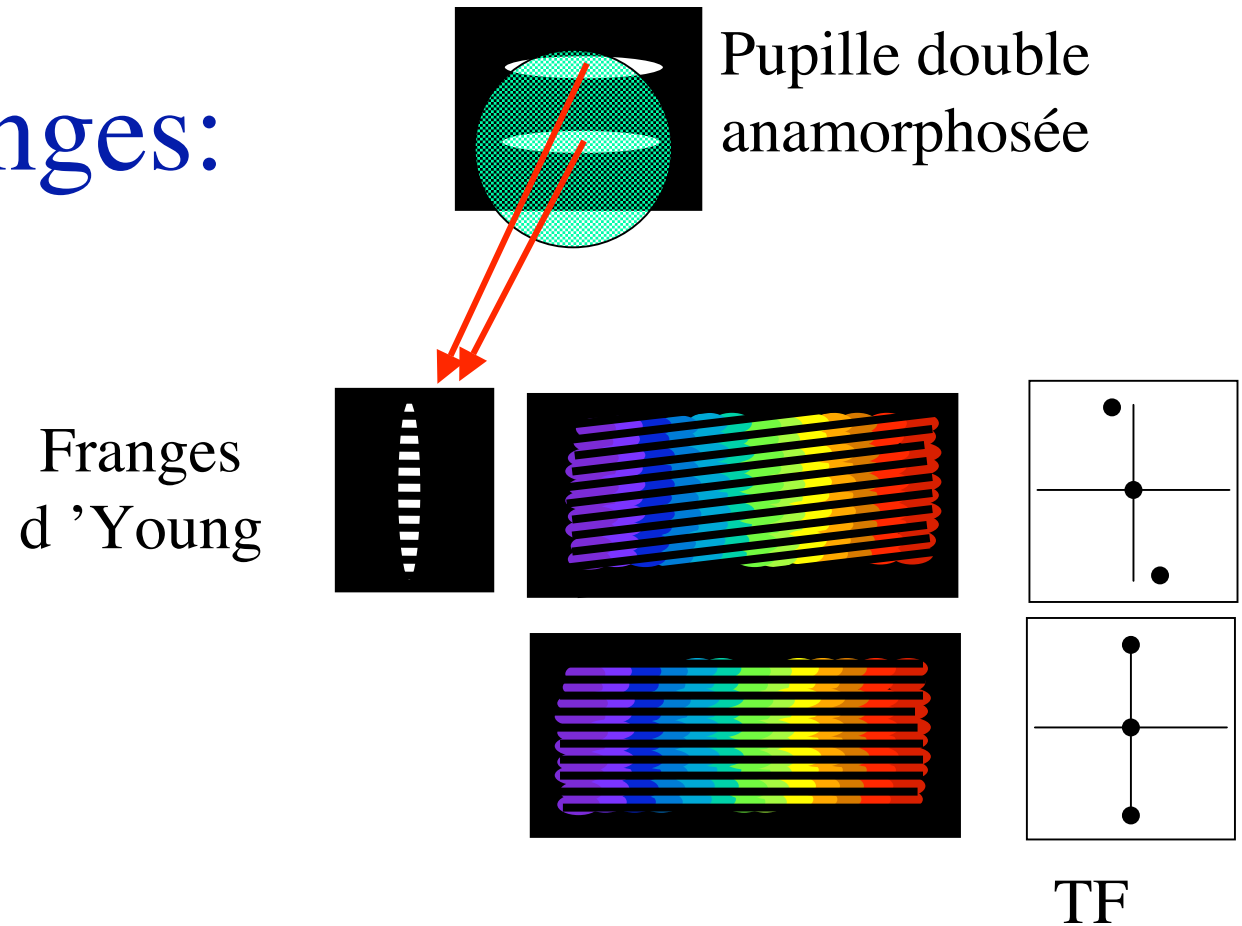


Faire avec la turbulence:

2- Optique adaptative

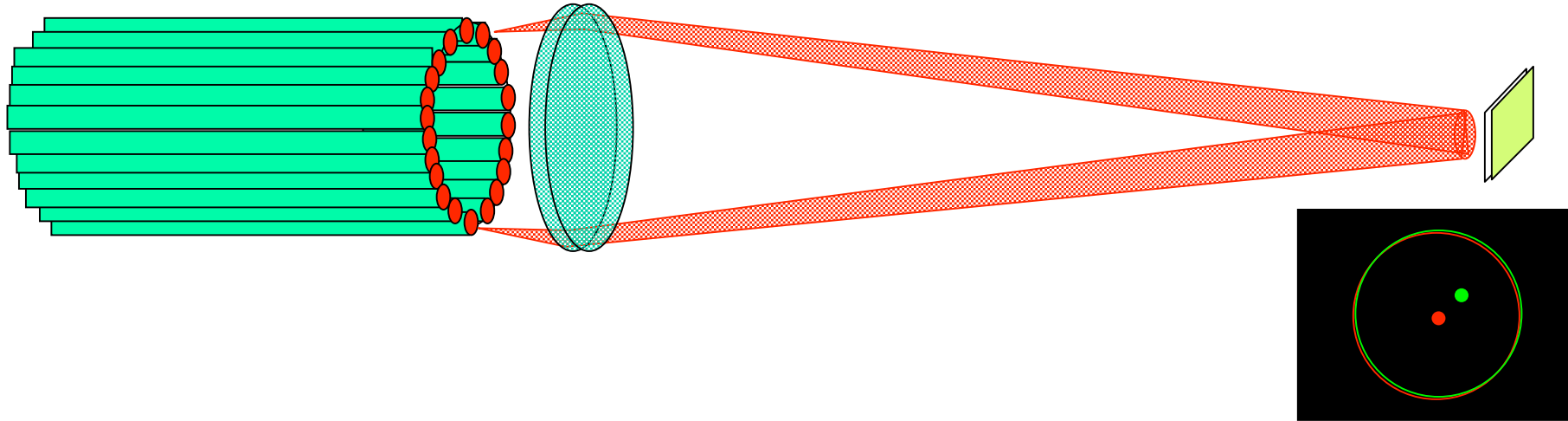
- « Speckle Interferometry » utilisable sur OVLA
- Mais l'optique adaptative peut faire mieux
- Nécessite un analyseur d'onde perfectionné

Trouver les franges: methode spectrale



- Transformée de Fourier pour extraire le signal de chemin optique
- information de phase aussi dans les pics
- version automatisée sur GI2T (Koechlin et al.)

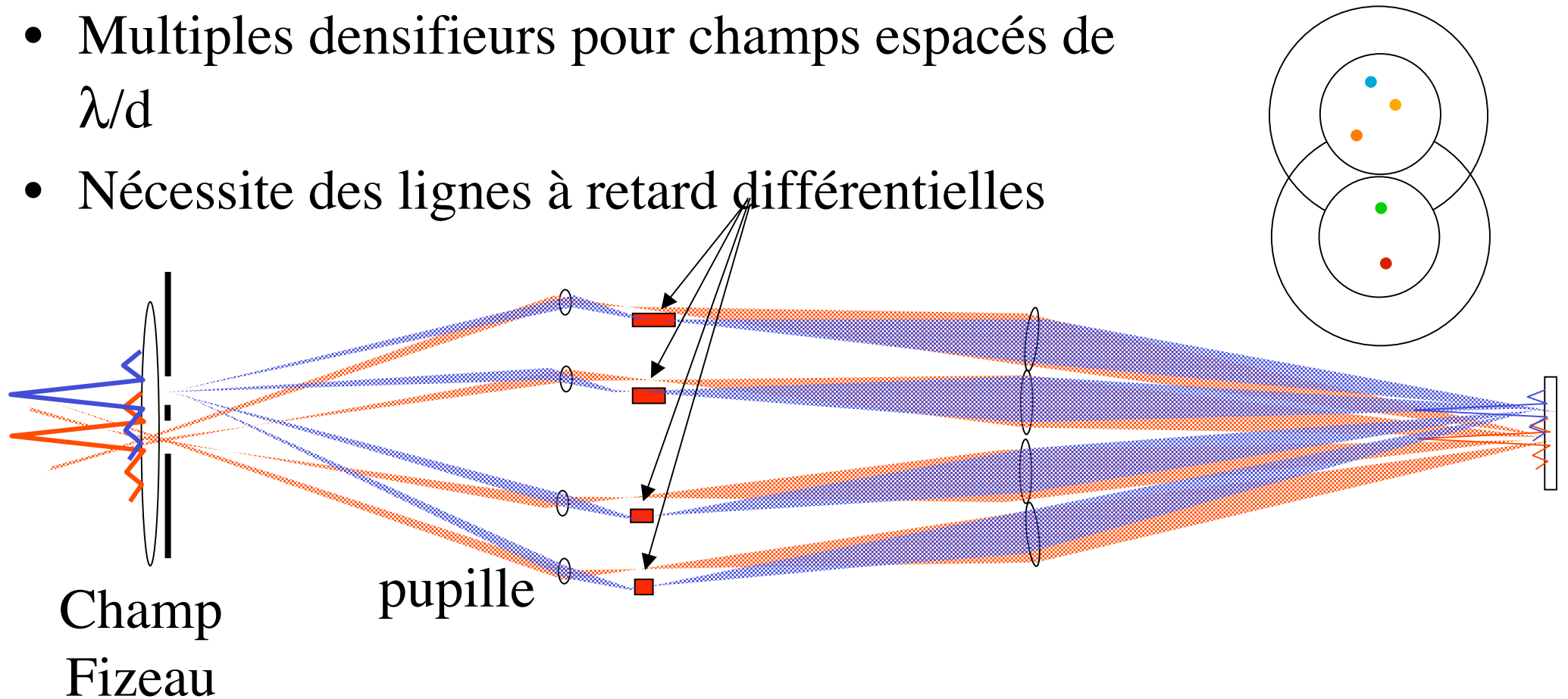
Combineur à fibres ?



- Peut donner une image directe par effet de pupille densifiée
- Peu intéressant s'il n'évite pas les lignes à retard

Champ multiple avec un hyper-telescope

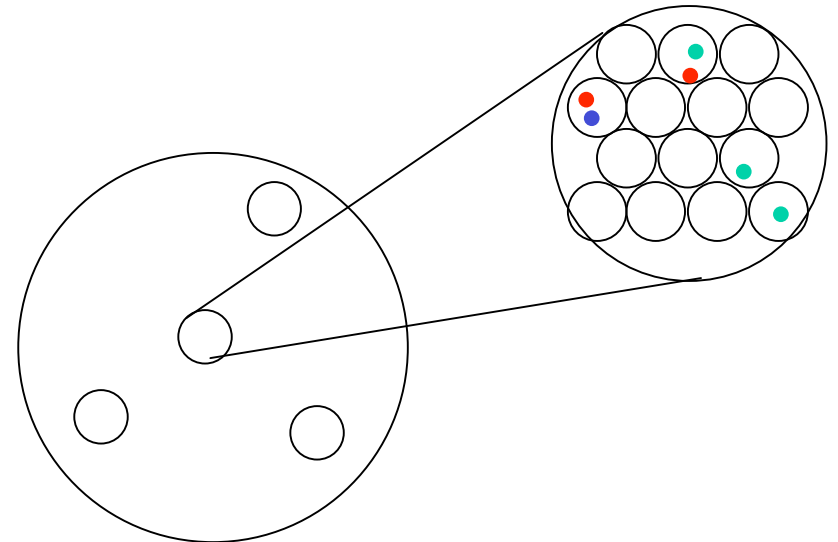
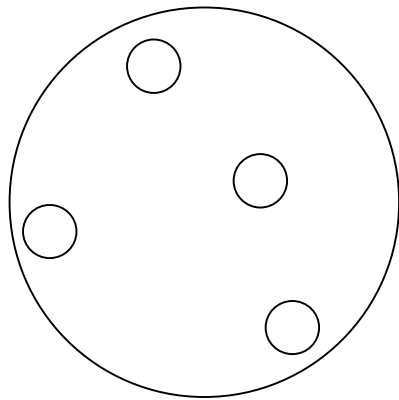
- Étage Fizeau, puis densifieur
- Multiples densifieurs pour champs espacés de λ/d
- Nécessite des lignes à retard différentielles



aussi: stations focales multiples possibles avec un miroir primaire sphérique
Pas avec OVLA !

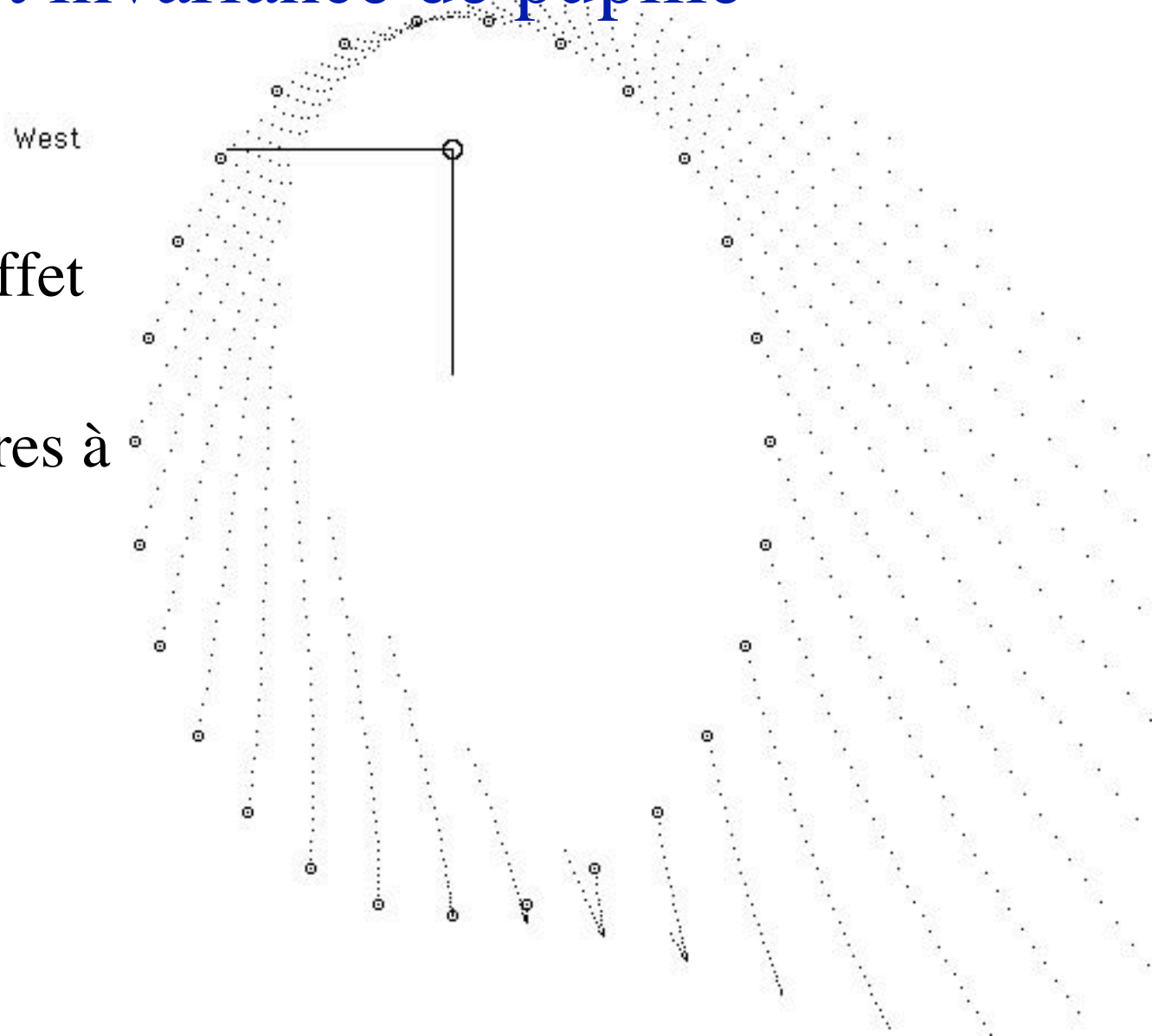
3 façons de regagner du champ

- Plusieurs combineurs (pas avec OVLA)
- Plusieurs densifieurs dans chaque combineur
- Plusieurs images dans chaque densifieur



Deplacement des telescopes pour égalité des chemins optiques et invariance de pupille

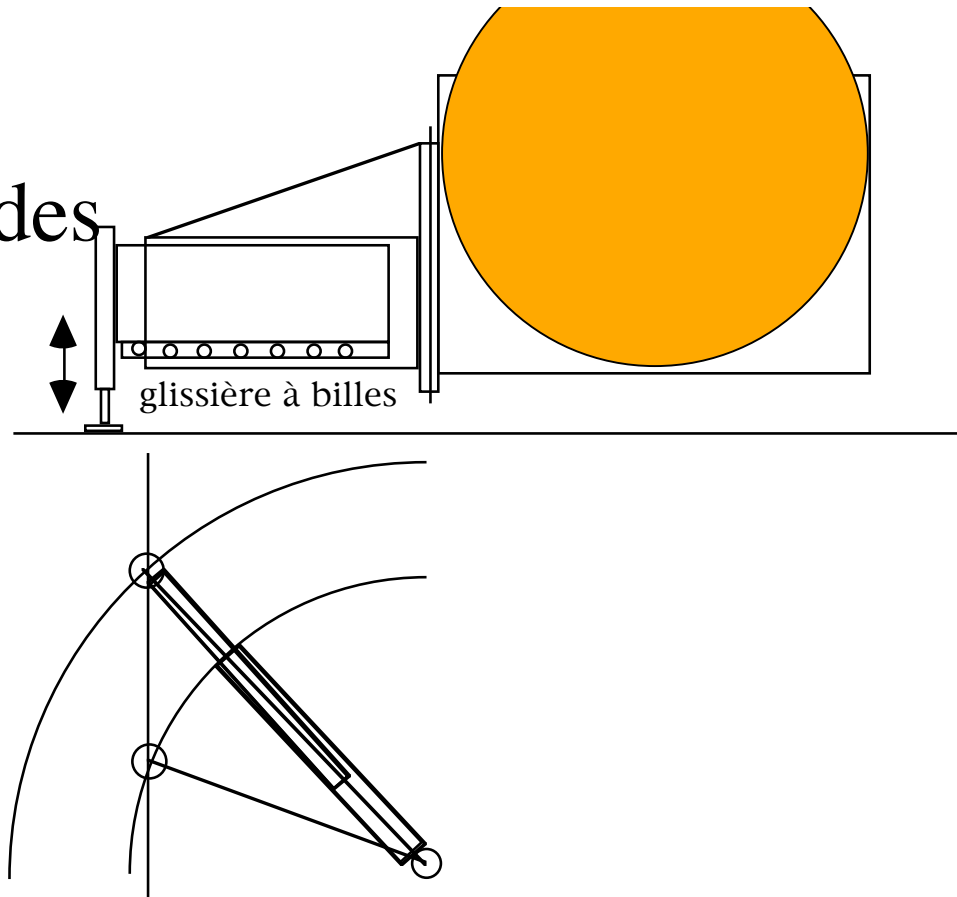
- Le mouvement des telescopes corrige l'effet de la rotation terrestre
- Tracé pour $H=-2$ heures à $H=0$, à latitude 45° , declination 0°



Le problème des translateurs

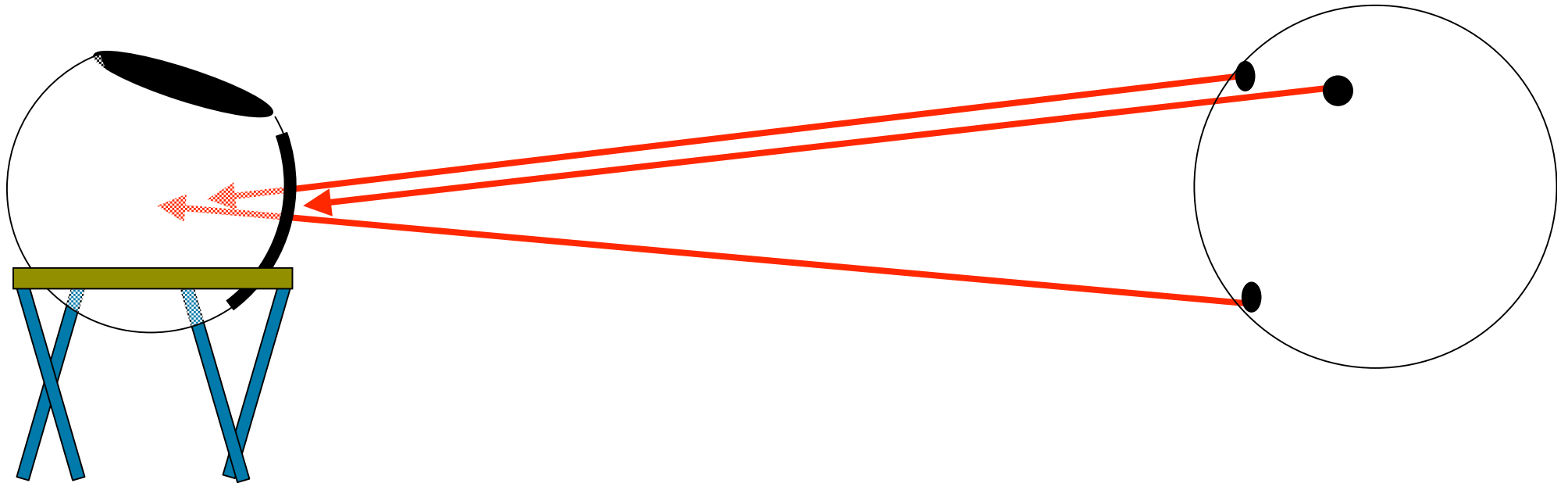
- Le déplacement radial et azimuth exclue des rails
- Pattes robotiques ? étude entamée
- Le défi:
 - précision
 - vibrations
 - coût modéré
- Mesure des positions pour asservissement:
 - GPS pour centimètre
 - GPS optique pour 0,1 mm

translateurs hexapodes



- Permet mouvement x,y, évite lignes à retard
- Doit tolérer le défaut de planéité du site (pentes 2%)
- Marche sur des plots ? Ou le sol brut ?
- Erreurs de position mesurées par laser de métrologie, corrigées par optique adaptative

Mesure de position



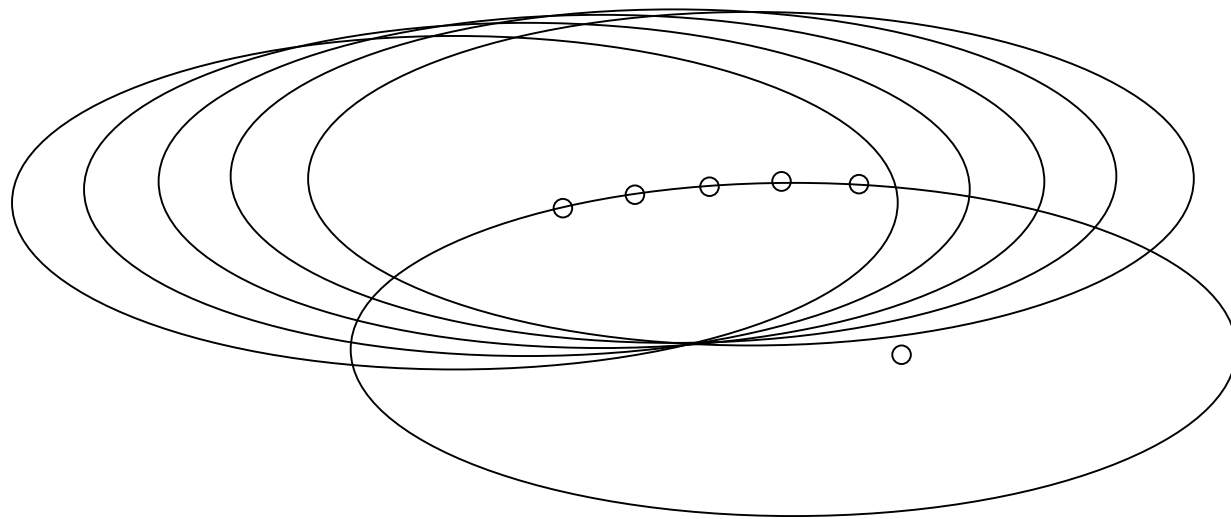
- 3 sources laser polychromatiques, cohérentes
- Comptage de franges

Asservissement de la géométrie

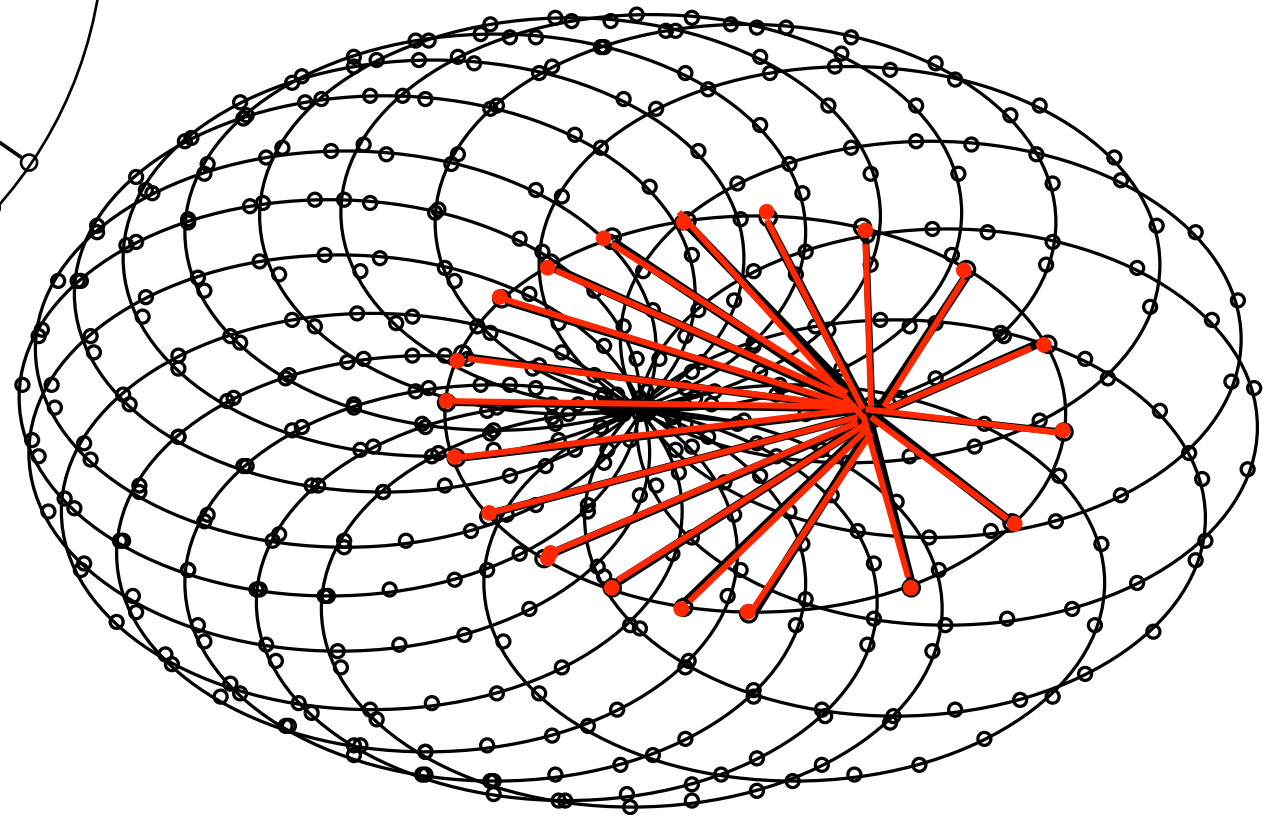
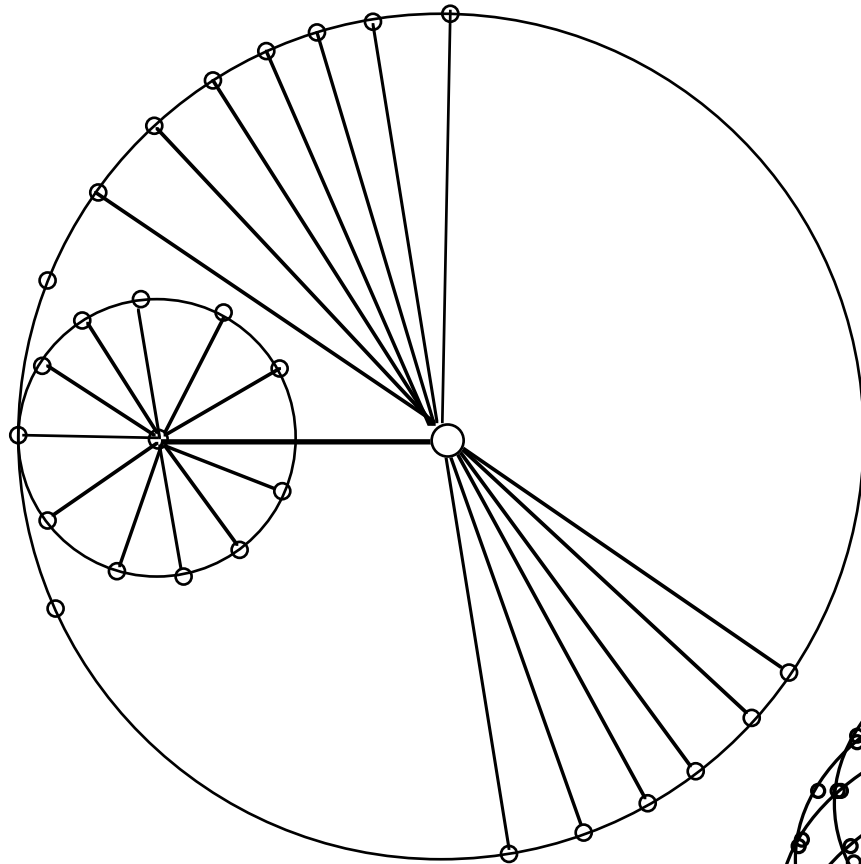
- Positionnement mécanique précis à 0,01- 1 mm
- Mesure de cohérence sur 1 'étoile
- Mesure de phase sur 1 'étoile
- Optique adaptative
- Magnitude limite: $m_v = 15-20$

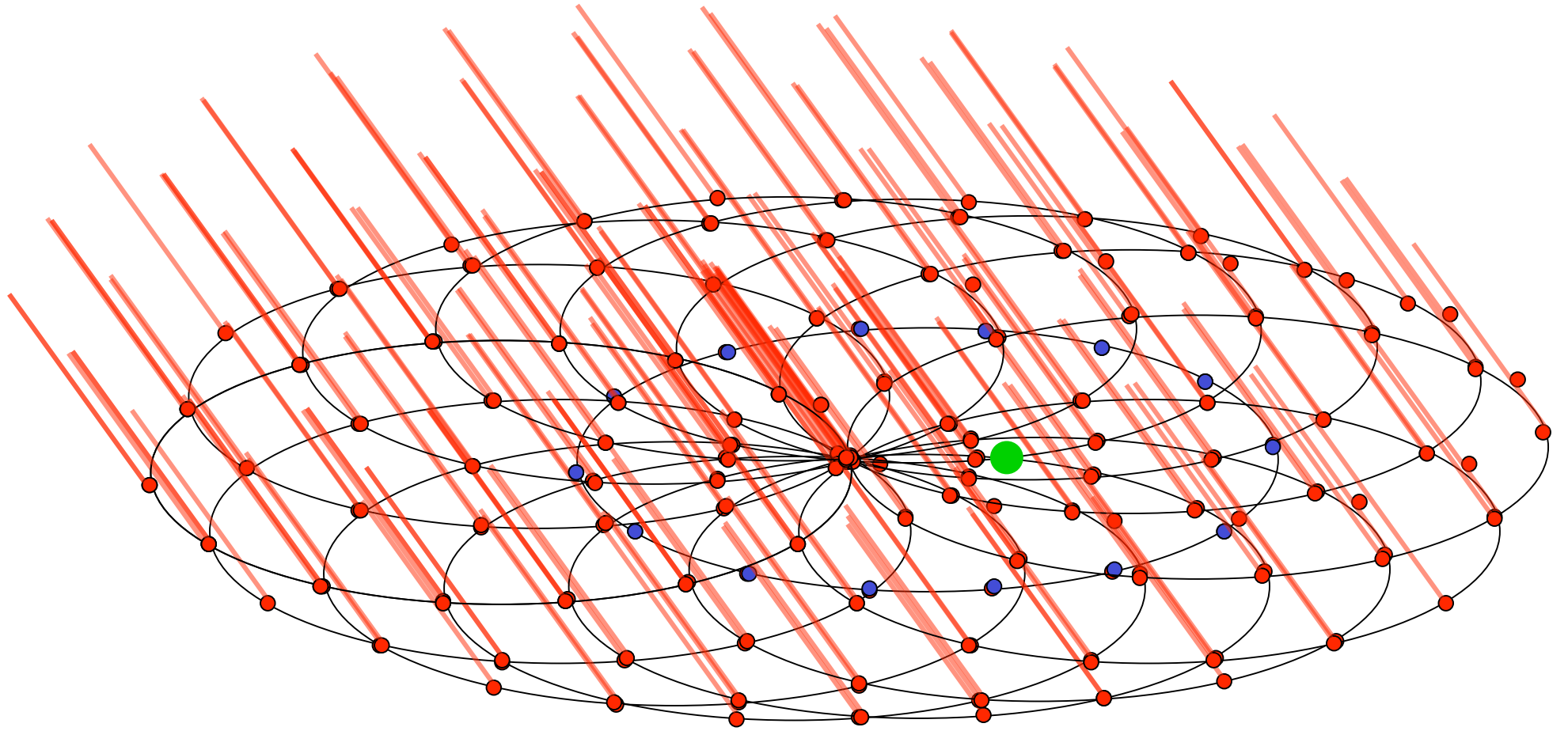
Mieux remplir l'ouverture d'OVLA

- Un seul anneau donne un pic d'interférence atténué au profit des anneaux de diffraction
- Plusieurs anneaux ou grille améliorent l'image d'objets diffus

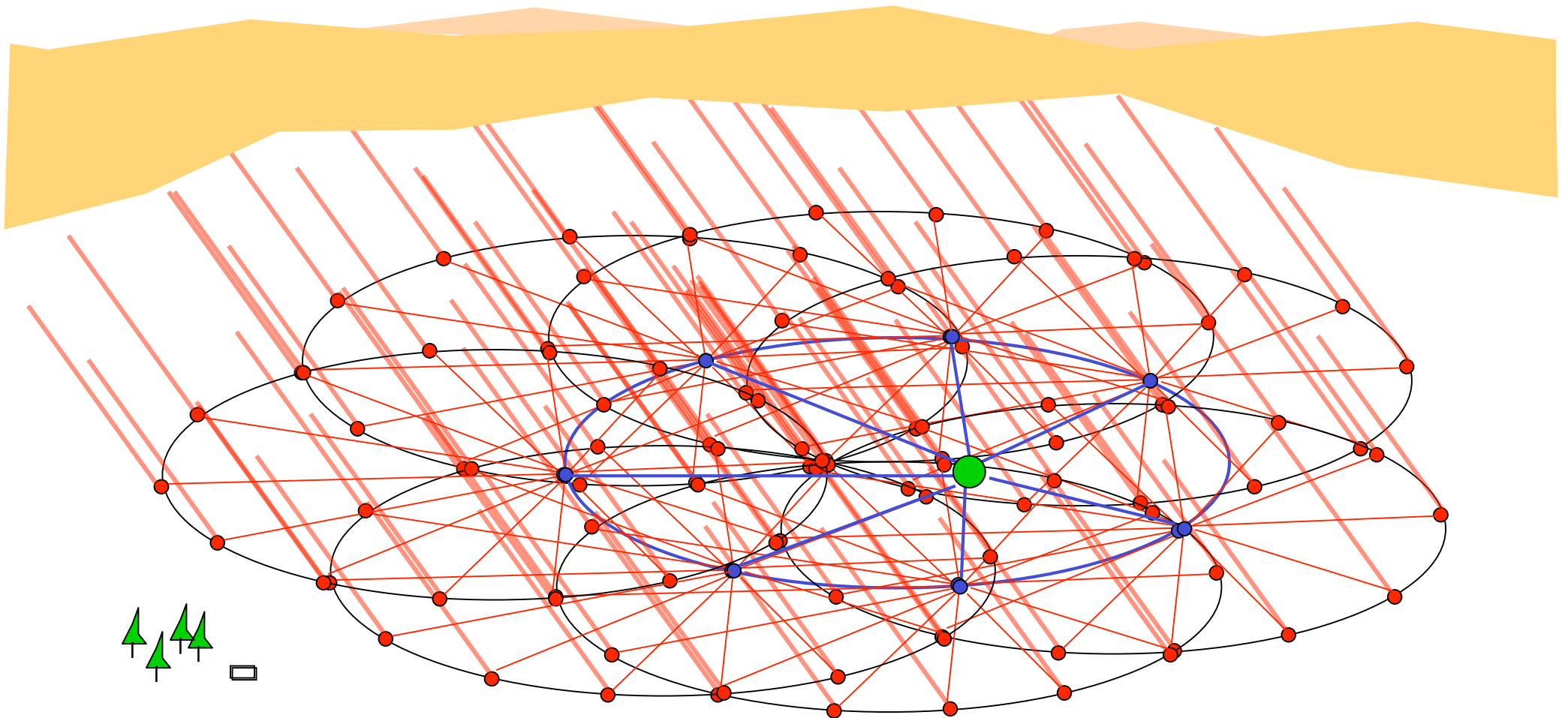


Anneaux multiples

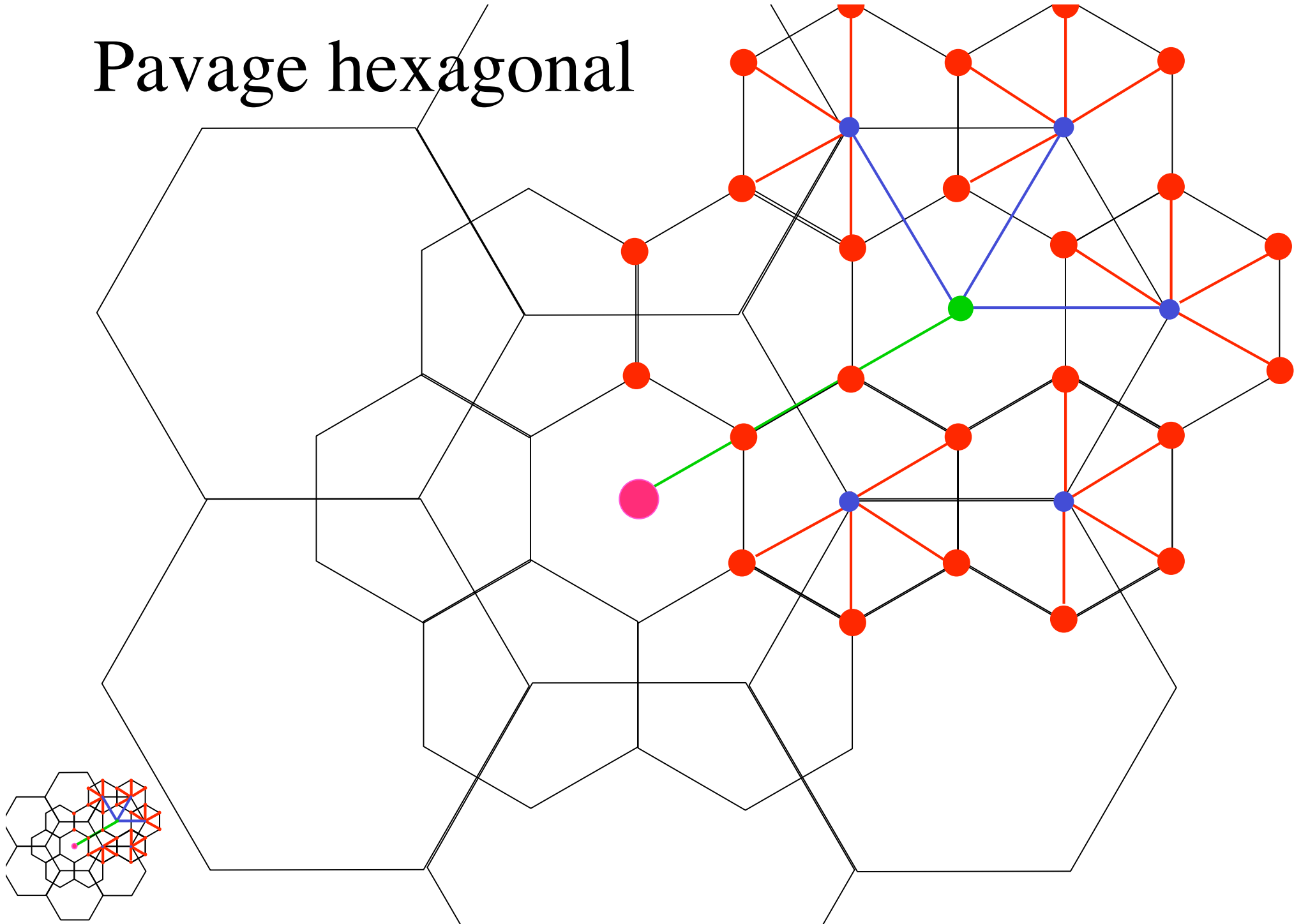




Hiérarchie d'ellipses téléscopes et sous-combisseurs mobiles



Pavage hexagonal

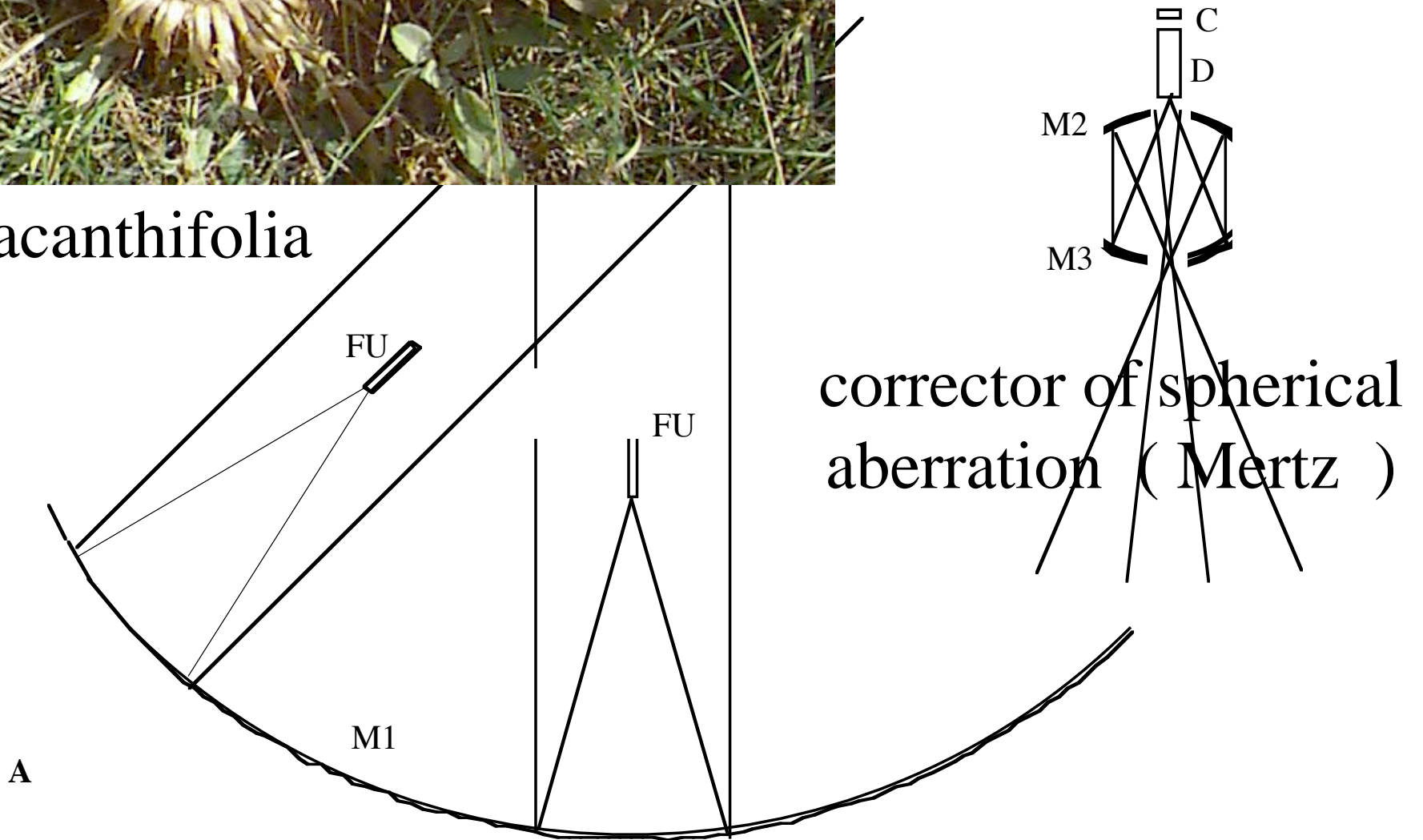




CARLINA

a ground-based
hyper-telescope

Carlina acanthifolia



Quelques adresses :

- Programmes cours : www.college-de-france.fr
- OVLA: Www.obs-hp.fr/~lardiere
- OVLA: Www.obs-hp.fr/~dejonghe
- Projets sol et espace: Www.obs-hp.fr/~labeyrie

Articles

- **Theorie de l'imagerie à pupille densifiée:**
Labeyrie, A., »Resolved imaging of extra-solar planets with future 10-100km optical interferometric arrays » , Astron.Astrophys. Suppl. Series, 118, 517-524 , 1996.
- Labeyrie, A., « Direct searches: imaging, dark speckle and coronagraphy » in *Planets outside of the solar system: theory and observations*, p.261-279, J.M.Mariotti and D.Alloin (eds.), 1999, Kluwer

- **Interféromètre spatial:**
- Boccaletti et al. , Icarus ,Mai 2000.

- Labeyrie "Standing waves and pellicle: a possible approach to very large space telescopes", Labeyrie,A. Astron. Astrophys., 77, ppL1-L2, 1979.
- Labeyrie 1999, Napa Workshop on Ultra-Light Space Optics Challenge ULSOC
- Warrant, E., Bartsch,K. and Günthe, C. "Physiological optics in the humming-bird hawkmoth: a compound eye without ommatidia", J. Exp.Biology (in press)