

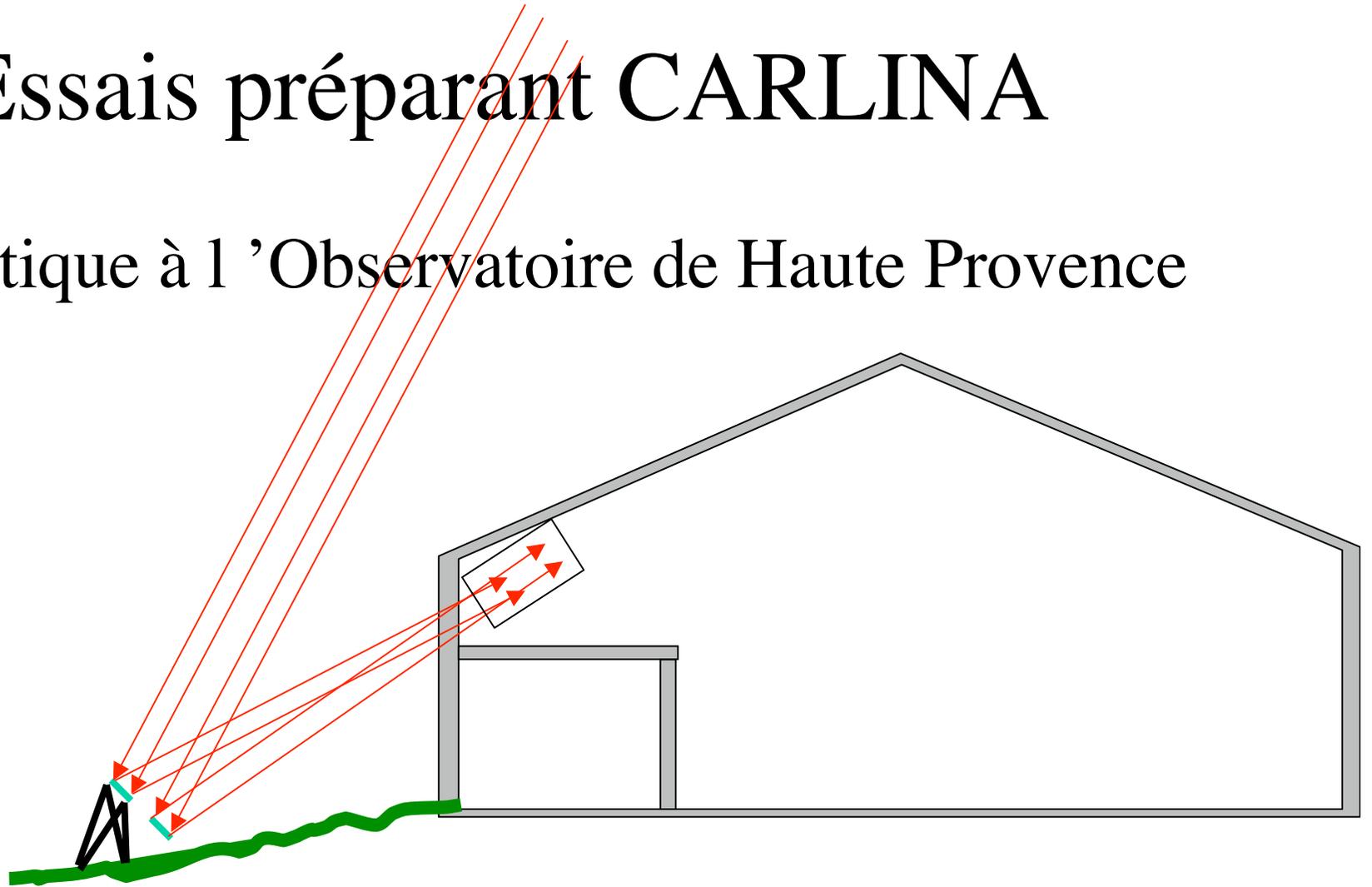
# Versions spatiales d'hyper-télescopes aux diverses échelles

- Séminaire à 15h15 par Frédéric Thévenin  
( Observatoire de la Côte d 'Azur)  
**"De nouvelles abondances stellaires pour  
mieux comprendre la Galaxie"**

- Rappel: des interféromètres aux hyper-télescopes
- Proposition à ESA et NASA d 'un hyper-télescope de 300m
- Vers une version de 100 km et plus
- Au delà ? 300,000 km pour étoiles à neutrons

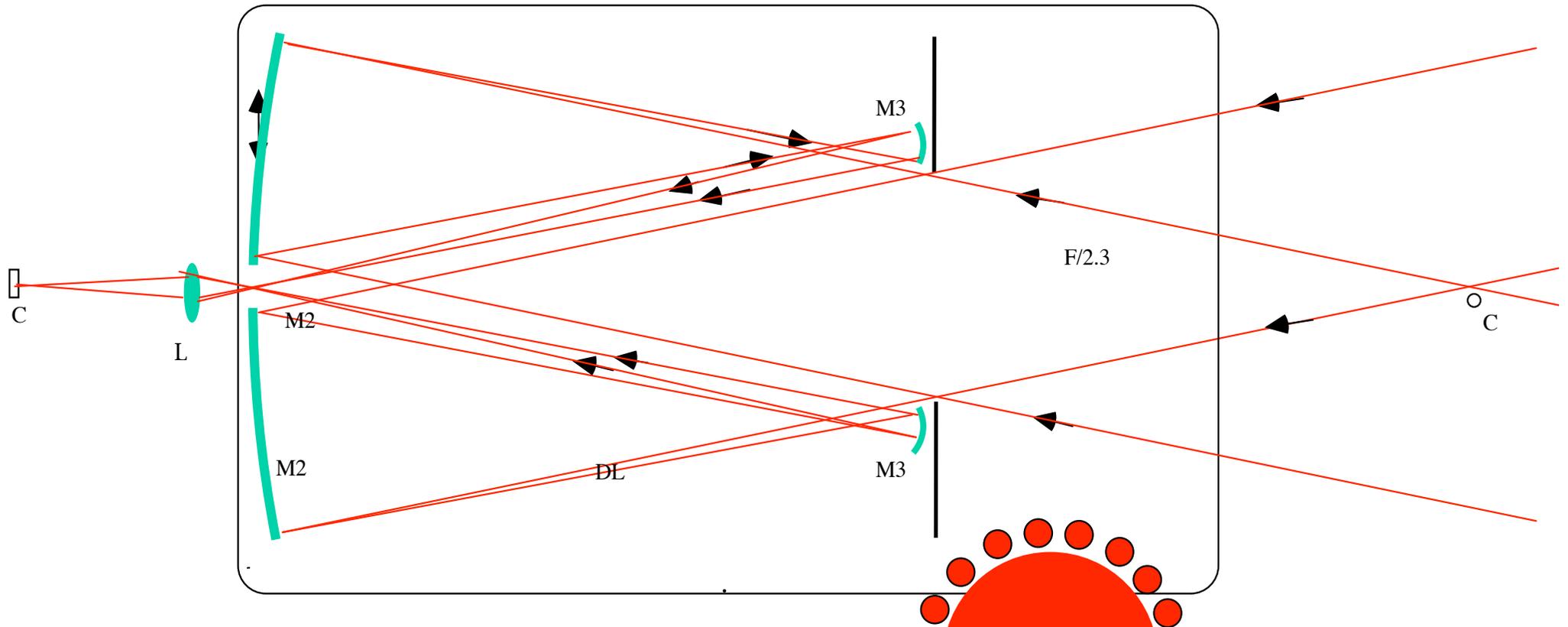
# Essais préparant CARLINA

- Essai optique à l'Observatoire de Haute Provence



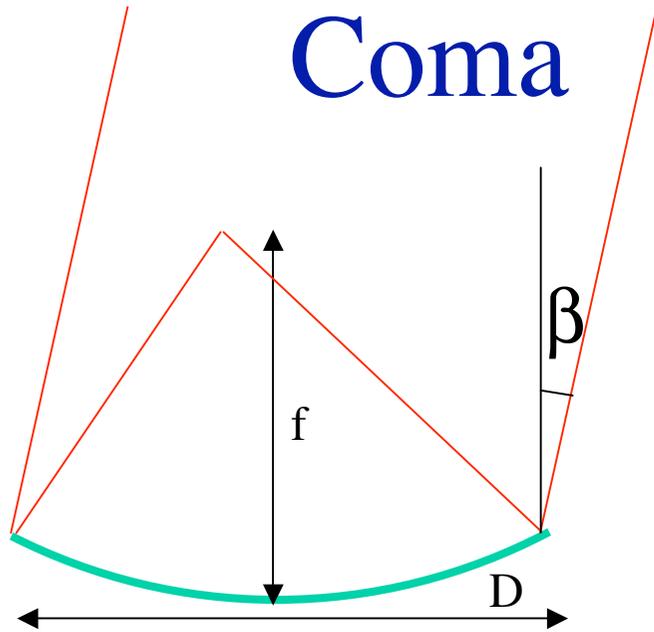
- Essai au radio-télescope d'Arécibo ?

# Combineur de faisceaux collimatés



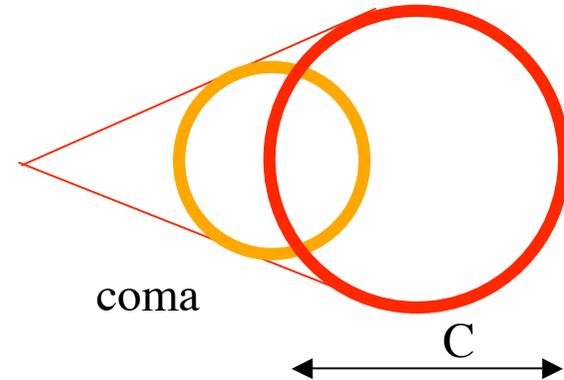
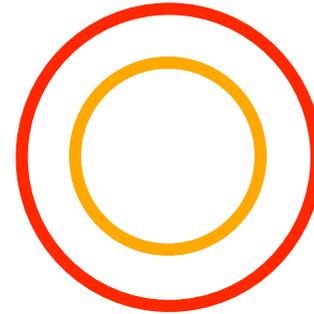
- Utilisable avec éléments M1 plans, mais.....
- Correcteur Mertz inutilisable:
  - nécessite lignes à retard
  - éclatement du point de croisement (coma)

# Coma



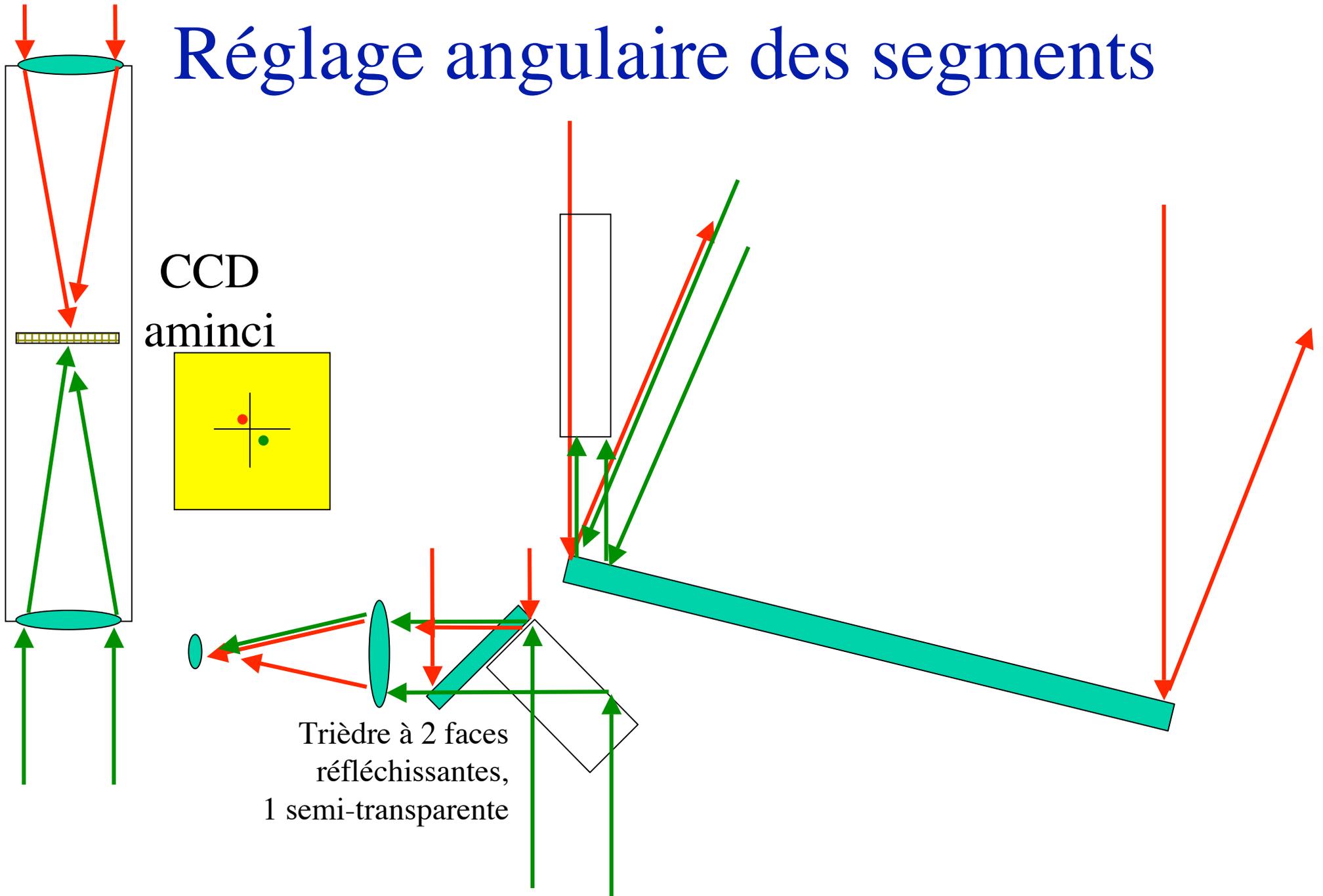
$$C = (1/16) f (D/f)^2 \beta$$

Ouverture annulaire

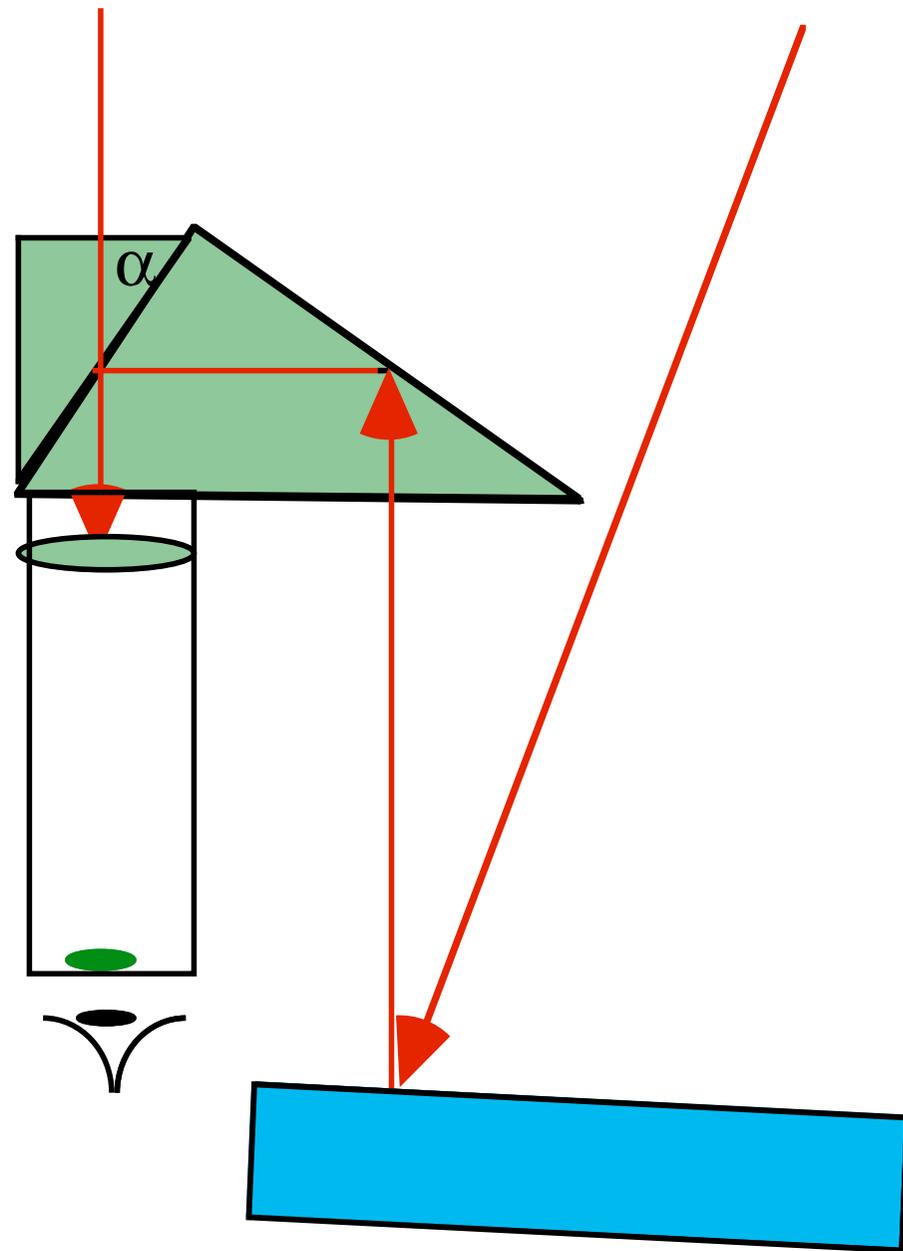


- Exemple pour Arécibo:
- distance focale 130m
- diamètre d'ouverture 60m
- demi-champ  $\beta$  3.7 degrés
- largeur de l'aigrette 0,112
- Delta 10 mm

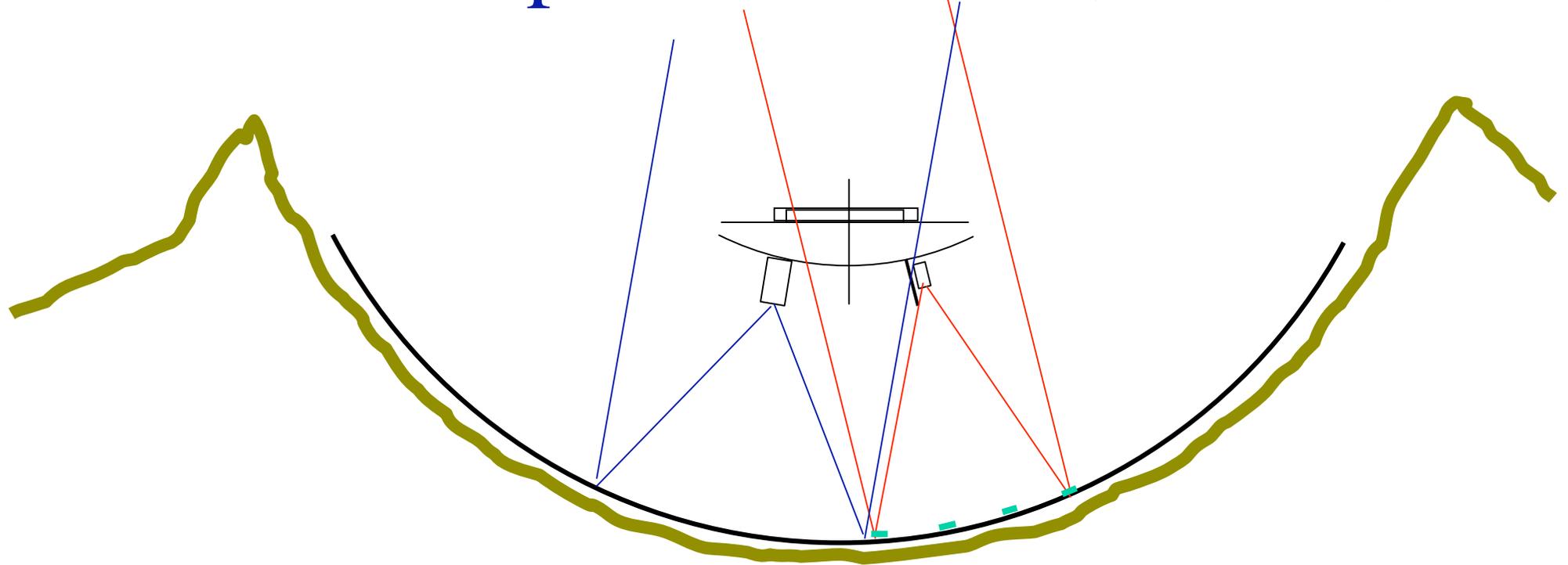
# Réglage angulaire des segments



# Viseur de réglage



# Le radio-telescope d 'Arecibo (Porto Rico)

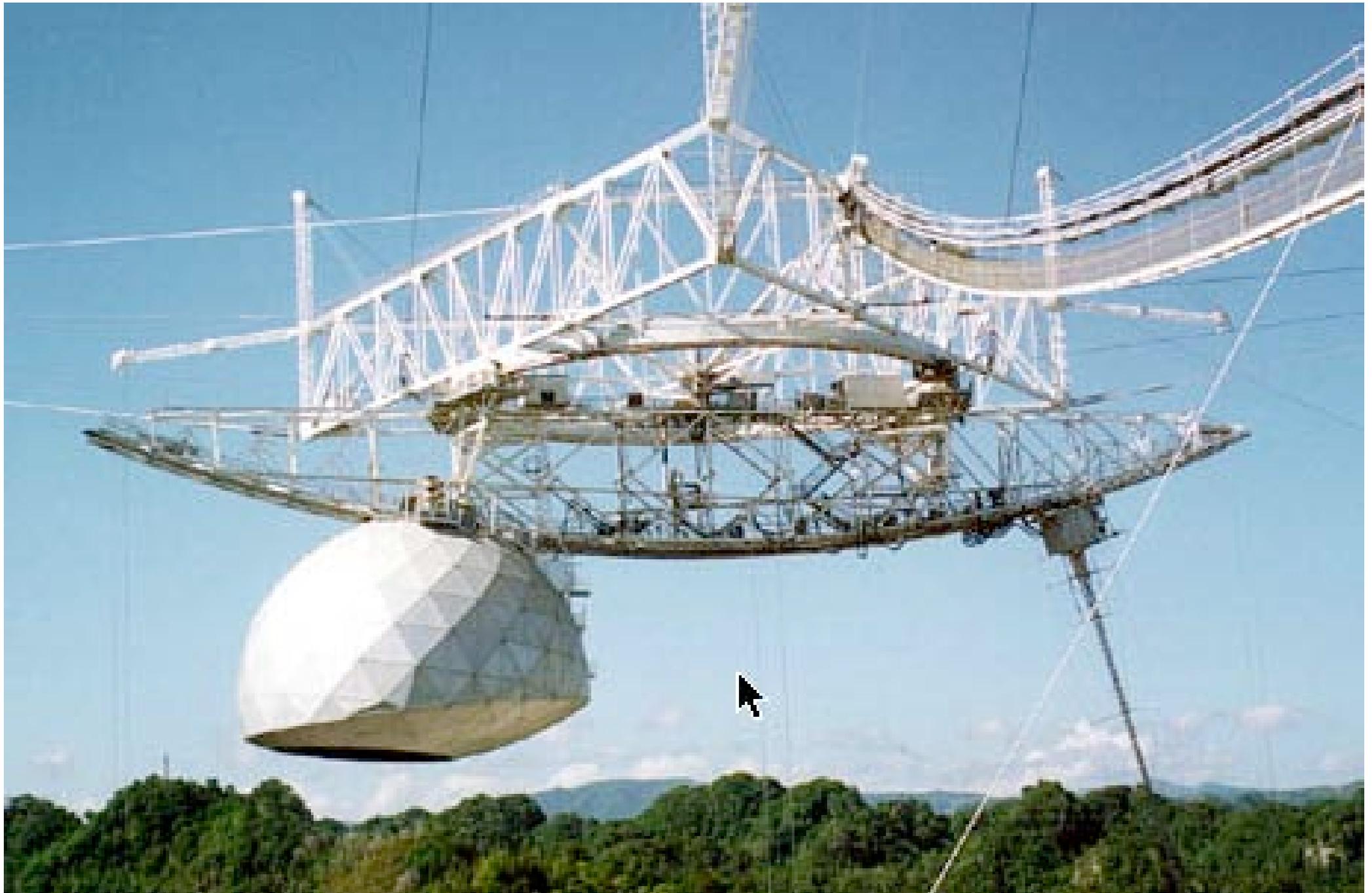


- « bol » de 305m, focale 130m
- Découverte du pulsar binaire ( prix Nobel de Hulse et Taylor)
- Plusieurs détecteurs mobiles,  $z < 20^\circ$
- Utilisable pour essais d 'hyper-télescope optique ?

# Radio-télescope d 'Arécibo ( Porto Rico)



# Rail focal orientable



# Sous le miroir



# Deuxième chariot et détecteur

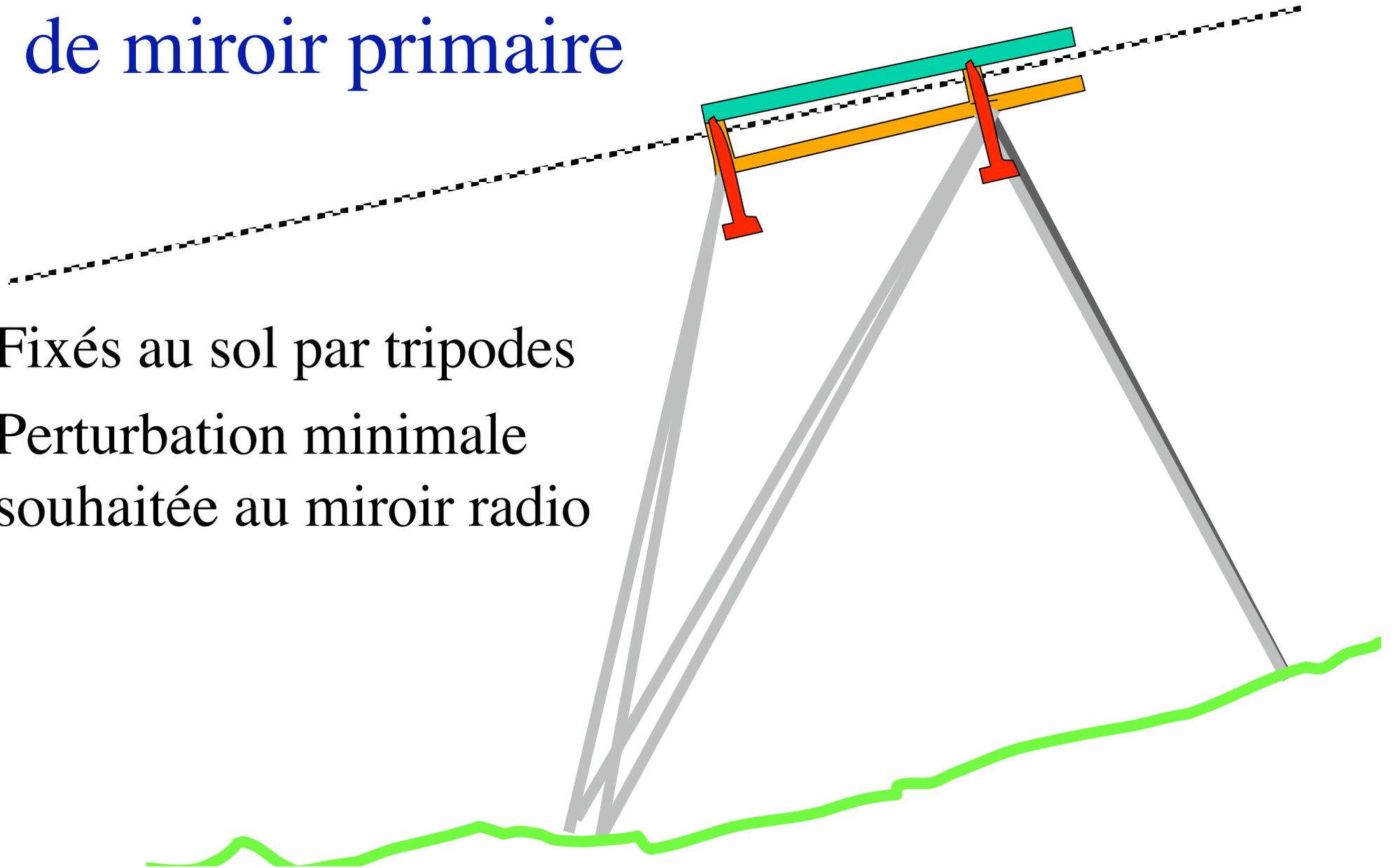


# Essais à Arecibo ?

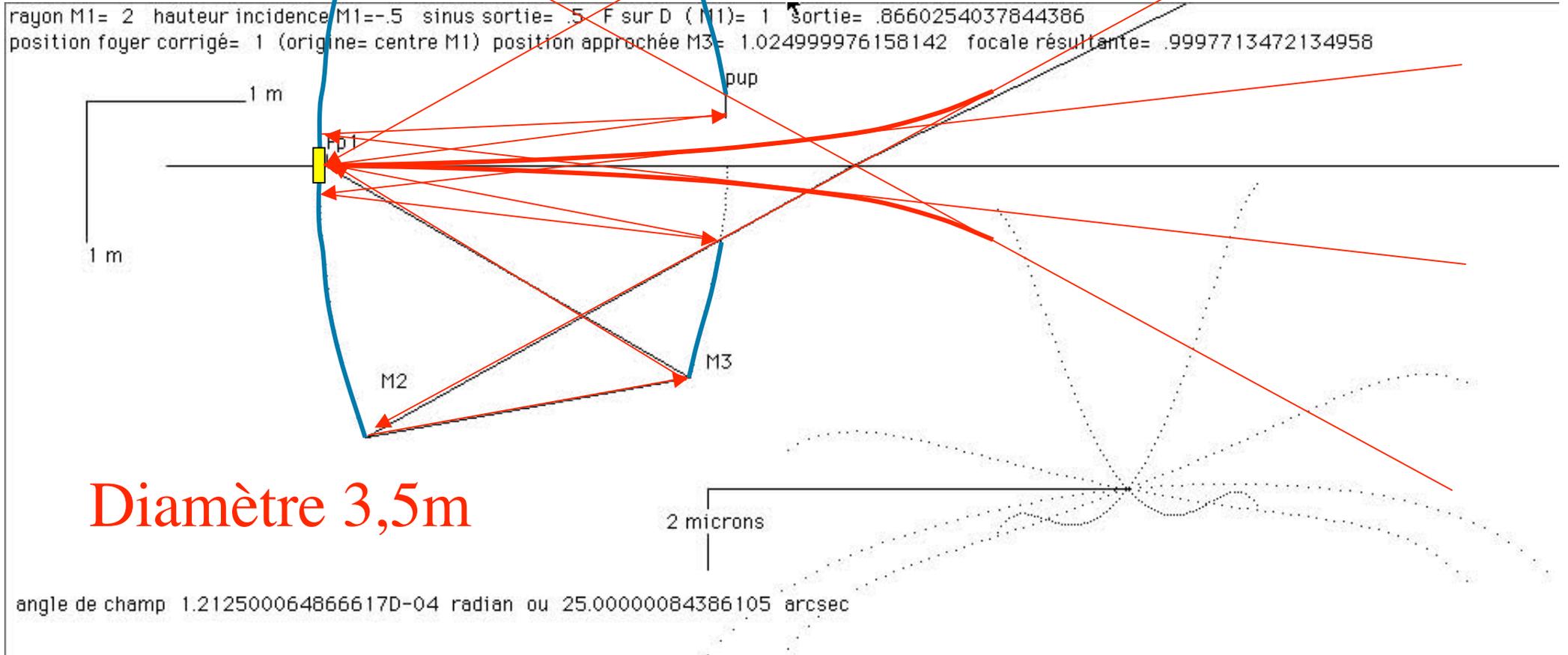
- caméra suspendue
- Utiliser le guidage existant ( précision 1mm)
- Erreurs de guidage et foyer tolérables, période 1s
- Déclinaison de  $-2^{\circ}$  à  $+38^{\circ}$  (Sirius, Algol, exclus, mais Tau Boo avec planète à  $10^{-4}$ , 3 m“)

# Montage des éléments de miroir primaire

- Fixés au sol par tripodes
- Perturbation minimale souhaitée au miroir radio



# Correcteur d'aberration à f/1 pour Arecibo



# Projets dans l'espace

# Projets d'interféromètres dans l'espace

- Poutre :

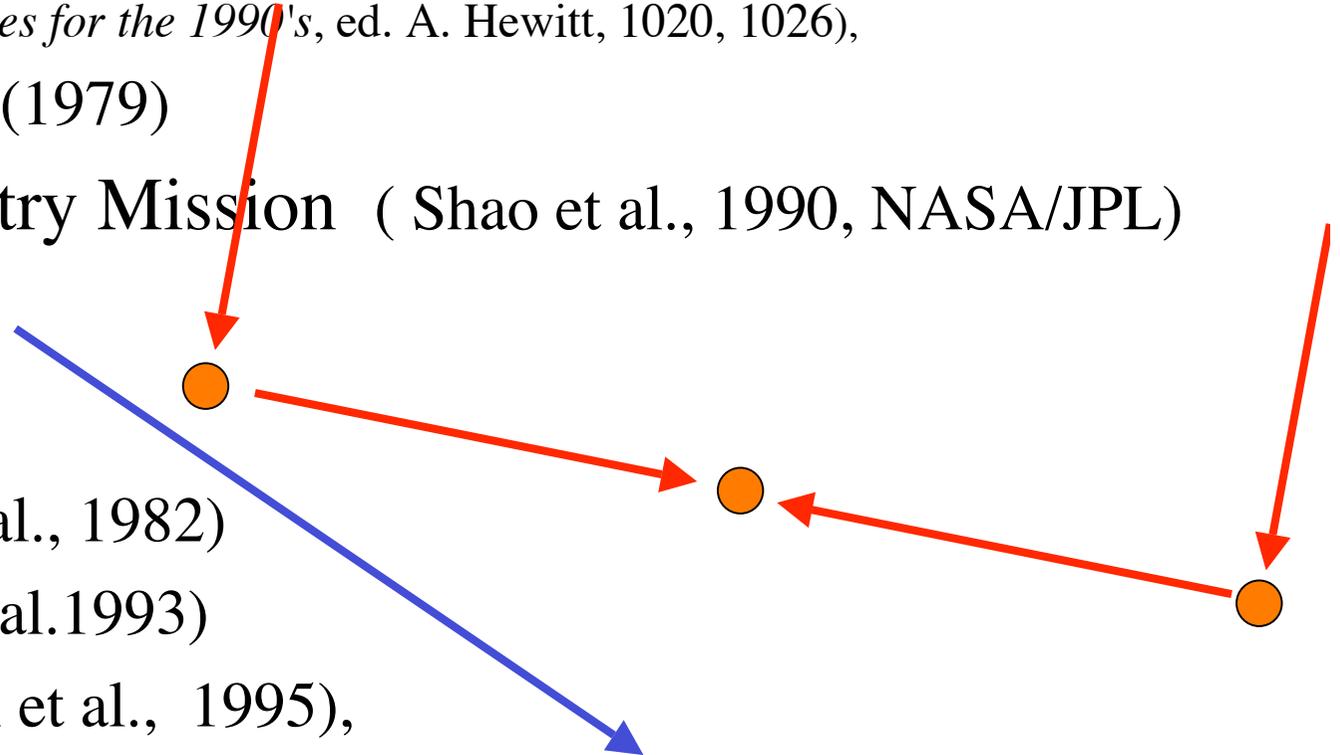
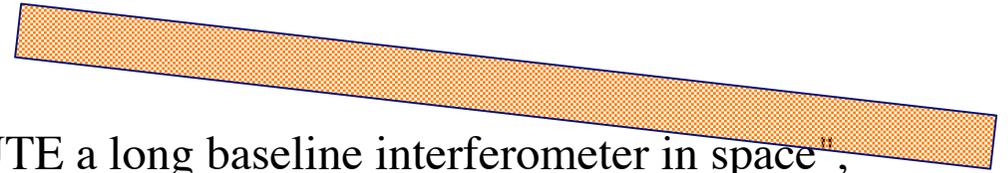
- FLUTE (Labeyrie, 1980 "FLUTE a long baseline interferometer in space", Labeyrie, A., Praderie, F., Steinberg, J., Vatoux, S. & Wouters, F., 1980, Proc. KPNO conf., *Optical and Infrared telescopes for the 1990's*, ed. A. Hewitt, 1020, 1026),
- Bracewell & McPhie (1979)
- Space Interferometry Mission (Shao et al., 1990, NASA/JPL)
- TPF (Angel et al.)

- Eléments séparés:

- TRIO (Labeyrie et al., 1982)
- Etude ESA (Bély et al. 1993)
- DARWIN (Mariotti et al., 1995),

- Lune:

- Labeyrie et al. (1988) "The Optical Very Large Array and its moon-based version", Labeyrie, A., 1989, LOUISA workshop, Albuquerque, Shao et al. (1989)

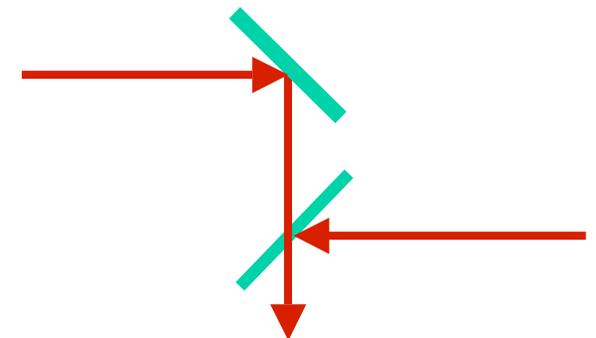
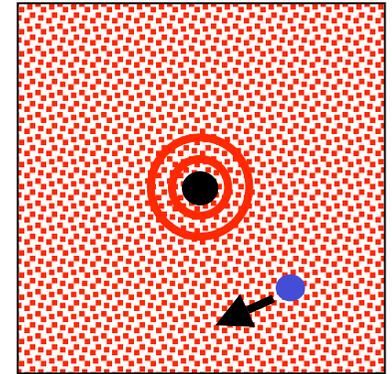


# Historique des projets pour détecter des exo-planètes

- Détection astrométrique: Van de Kamp ca. 1950
- Détection de la lumière réfléchie par coronographie et modulation: Bonneau, Josse, Labeyrie 1975 ( "Lock-in image subtraction: detectability of extra-stellar planets with the large space telescope", in *Image processing techniques in Astronomy*, D. Reidel, (Holland), 403)
- Détection Doppler: Serkowski 1975, ( réussie par Mayor et Queloz)
- Détection de l'émission thermique par « nulling » et modulation ( Bracewell & McPhie, 1979 )

# De la proposition Hubble à l'article de Bracewell & Mc Phie

- Proposition Hubble de Bonneau et al.
  - coronographe
  - modulation par rotation pour soustraire le fond
- Bracewell & McPhie (1979):
  - meilleur contraste à 10 microns ( $10^{-6}$ )
  - mais nécessite plus grande base
  - interféromètre à « teinte plate » noire
  - modulation par rotation

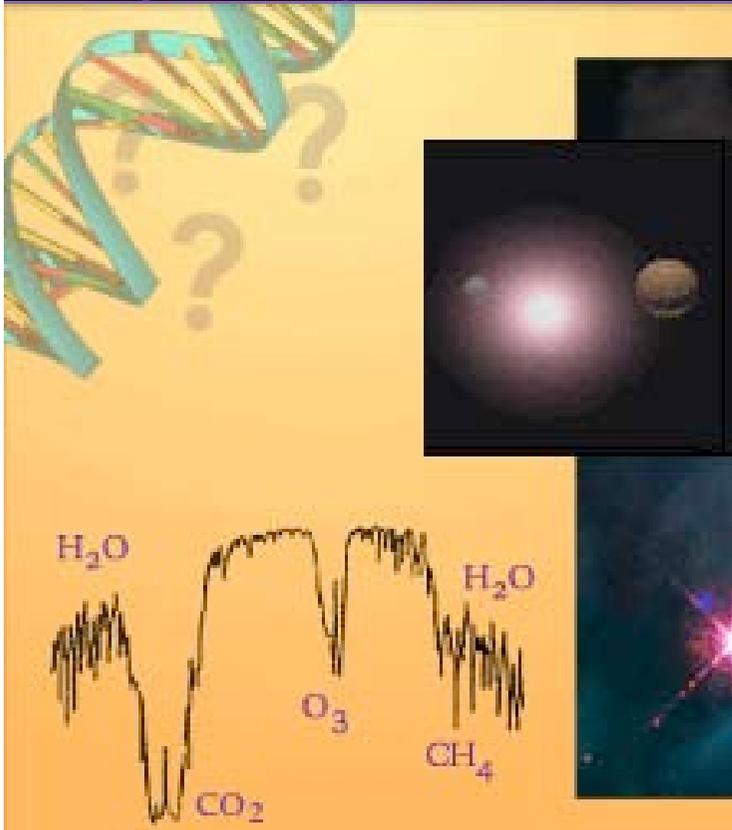


# DARWIN (Mariotti et al.)

étude par ESA & Alcatel

coll. Stockholm, Nov. 1999





- Détection infra-rouge de planètes
- Etude industrielle entamée:
  - architecture « hyper-télescope » prise en compte
  - participation de l'OSU Marseille-Provence, Meudon
  - Extension visible proposée

# NASA/JPL: essai ST-3 ( 2005?)

- Deux miroirs espacés de 1km
- Interférence
- Ouvre la voie aux grands réseaux multi-éléments
- **Aussi:**
  - Essai annoncé de « Nanosat Constellation Trailblazer »
    - Vol en formation
    - Positionnement par GPS local

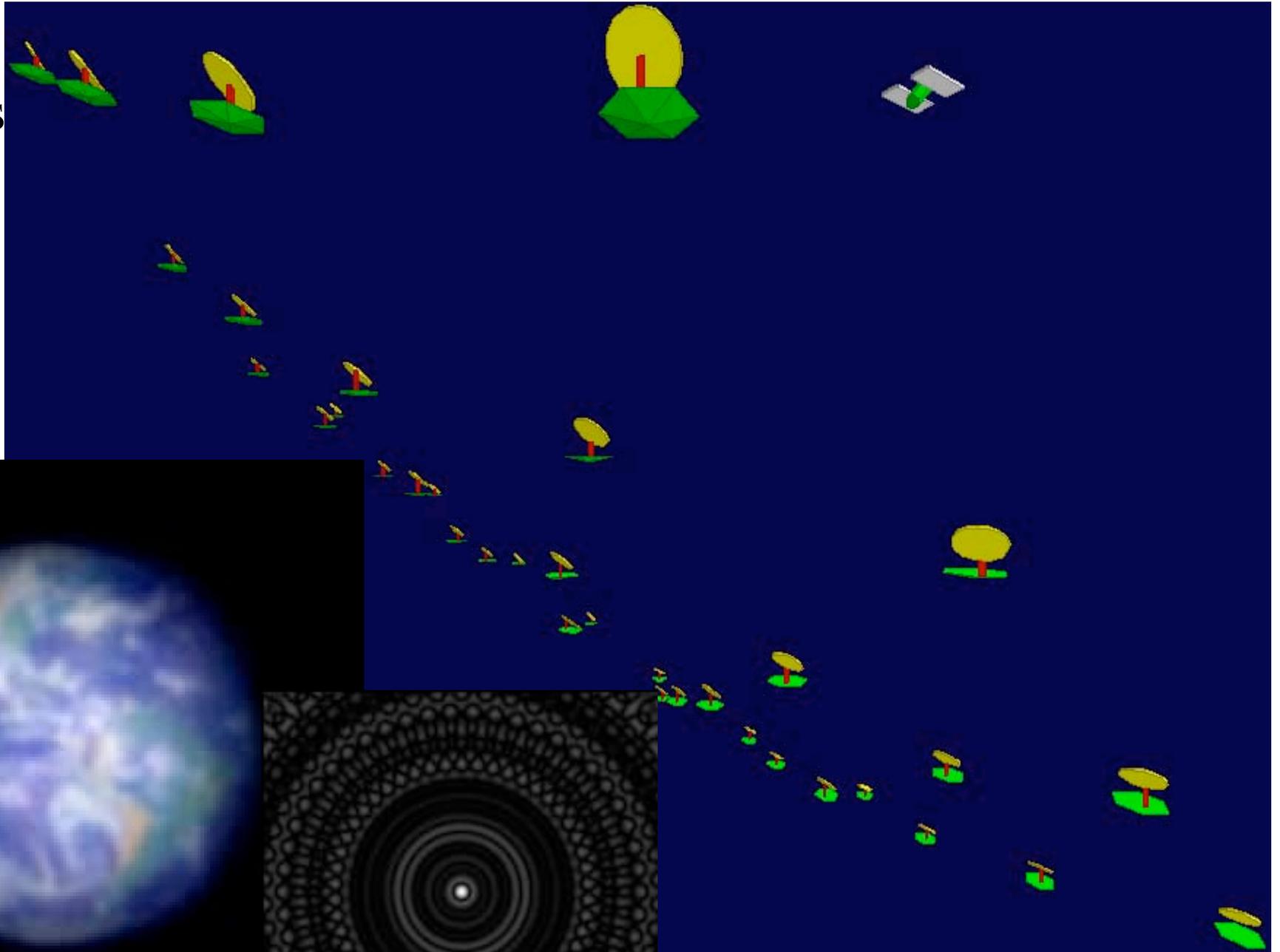
# Concepts récents

- Hyper-télescope: concepts Exo-Earth Discoverer (<1km) et Exo-Earth Imager (> 100km)
  - Architecture hyper-telescope
  - Optique type Mertz, diluée
  - Stations focales multiples
  - Option: voiles solaires actionnant les éléments de miroir
  - Précurseurs de « Moth Eye Interferometer »

# Un hyper-telescope: Exo-Earth Imager

150 miroirs  
de 3m  
150 km

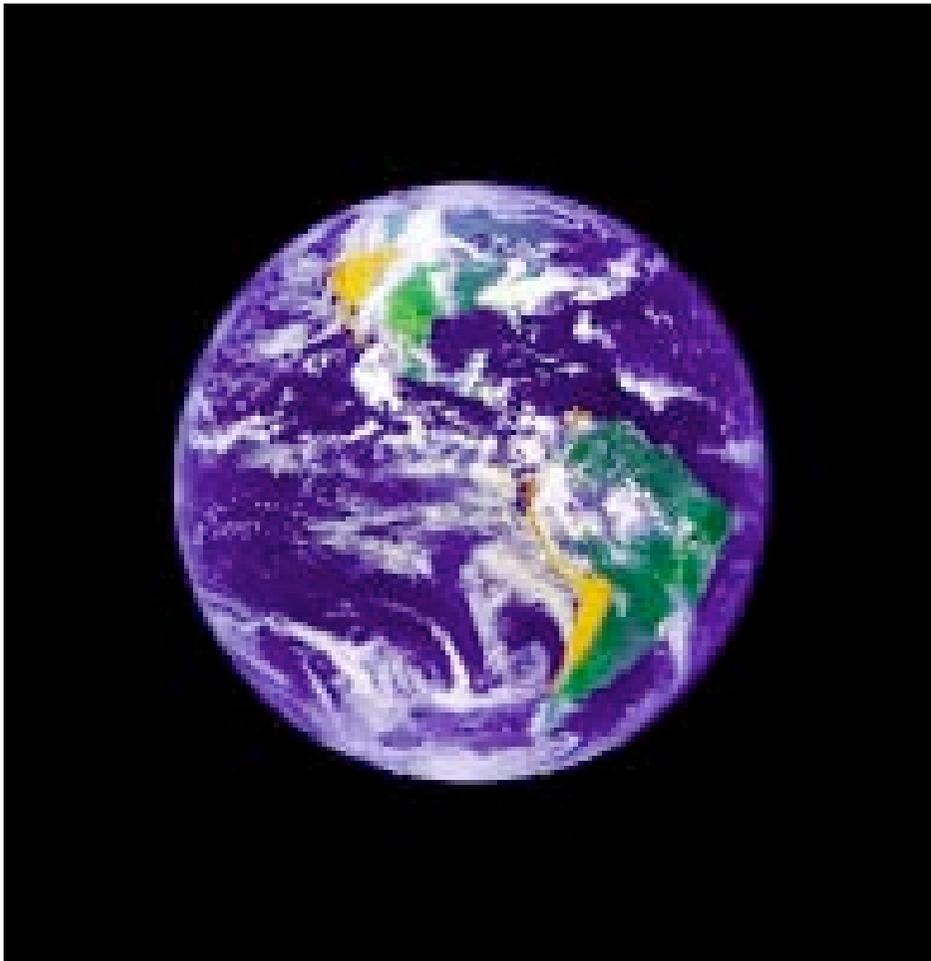
Terre à 3pc  
Pose 30mn



# 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

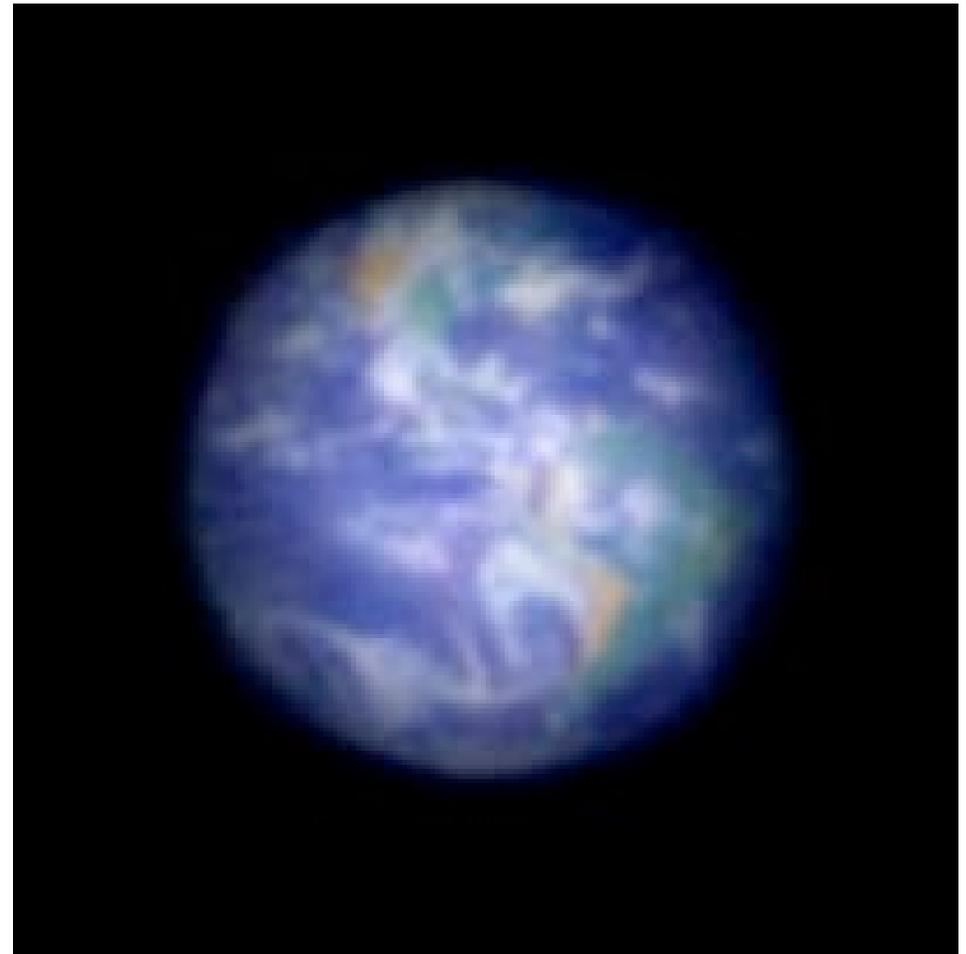


image brute

# Descriptions

"Resolved imaging of extra-solar planets with future 10-100 km optical interferometric arrays", Labeyrie, A., 1996, A&AS Ser. **118**, 517-524

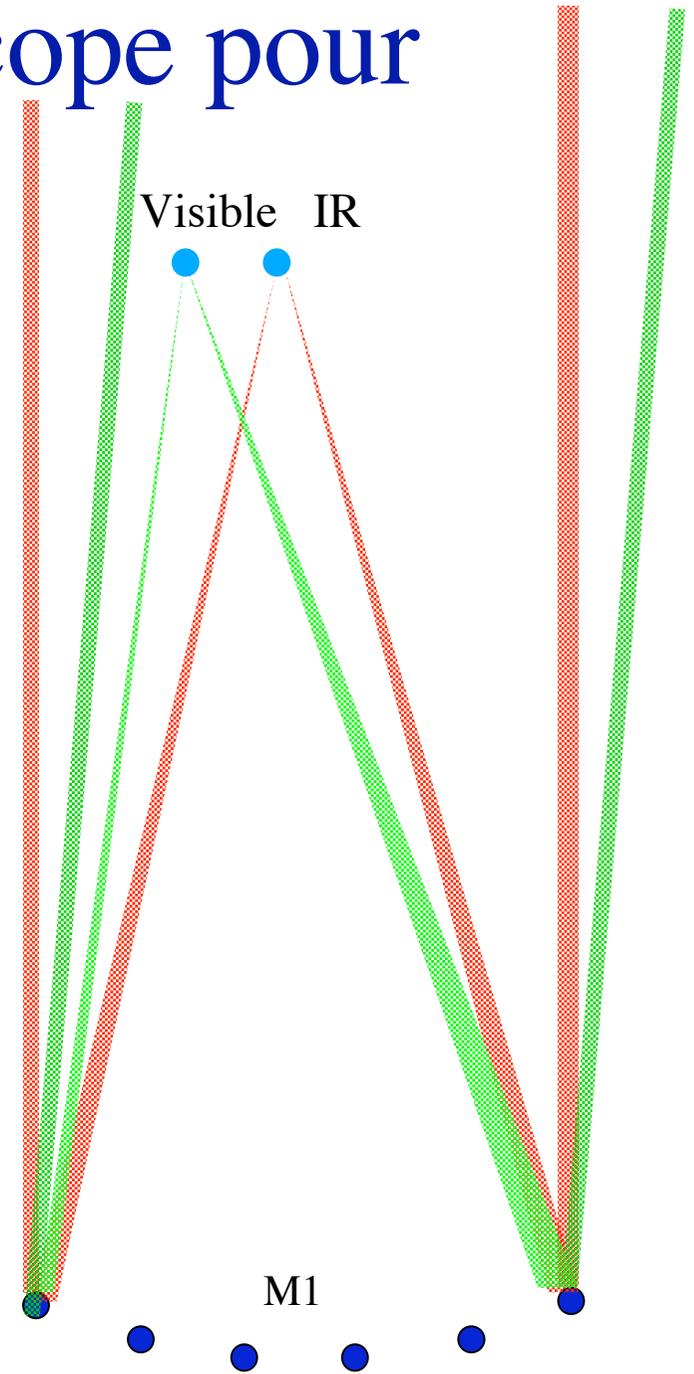
"Direct searches: imaging, dark speckle and coronagraphy", Labeyrie, A., 1998, NATO ASI'98 in *Planets outside the solar system*, 5-15 may, Cargèse, Corse

Exo-Earth Imager for exo-planet snapshots with resolved detail", Labeyrie, A., conf. proc. *Working on the Fringe*, Dana Point, USA, may 1999, PASP

- **Précurseur d 'hyper-télescope**: proposition EPICURUS à l 'ESA
  - Janvier 2000, non sélectionnée
  - 36 miroirs de 20cm, diamètre 300m
  - téléchargeable ( 8.8 Mb) à <ftp://obshpx.obs-hp.fr/arnold/f2f3esaproposal.pdf>

# Une architecture hyper-telescope pour DARWIN/TPF ?

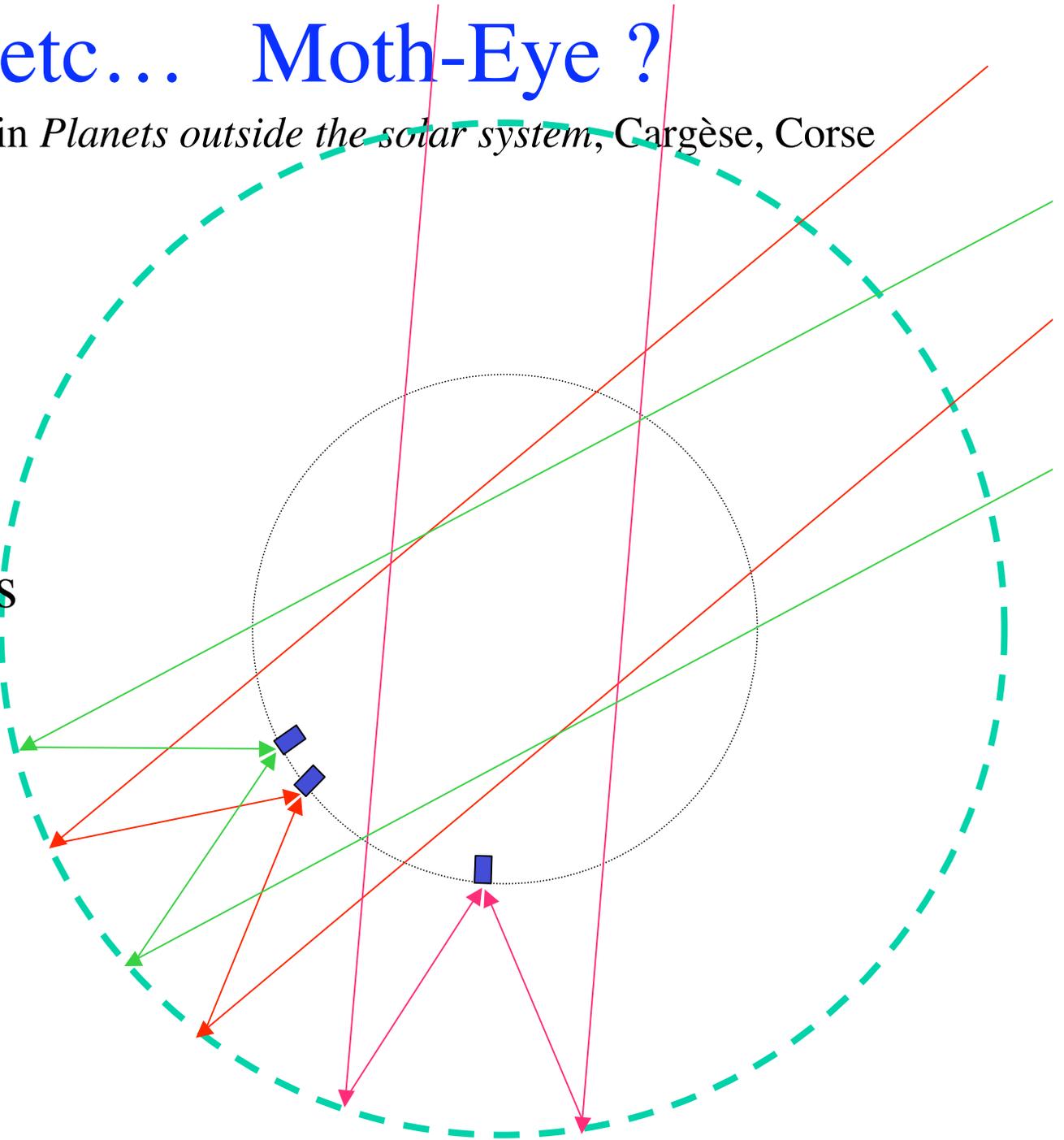
- Miroir M1, sphérique, dilué
- Au moins 18 ou 36 elements
- Alimente plusieurs stations focales
- Correcteur de champ et densifieur de pupille dans chaque station
- A F/2, diamètre du correcteur est 1% de M1
- Imagerie nécessite plus de free-flyers, mais plus petits et simplifiés



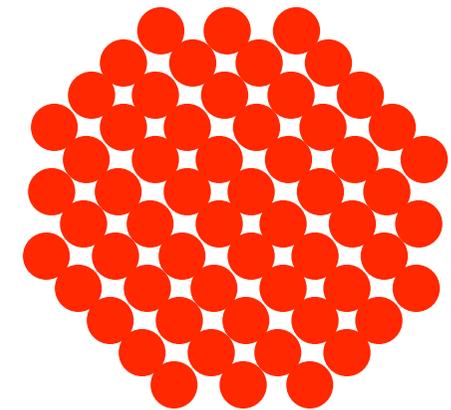
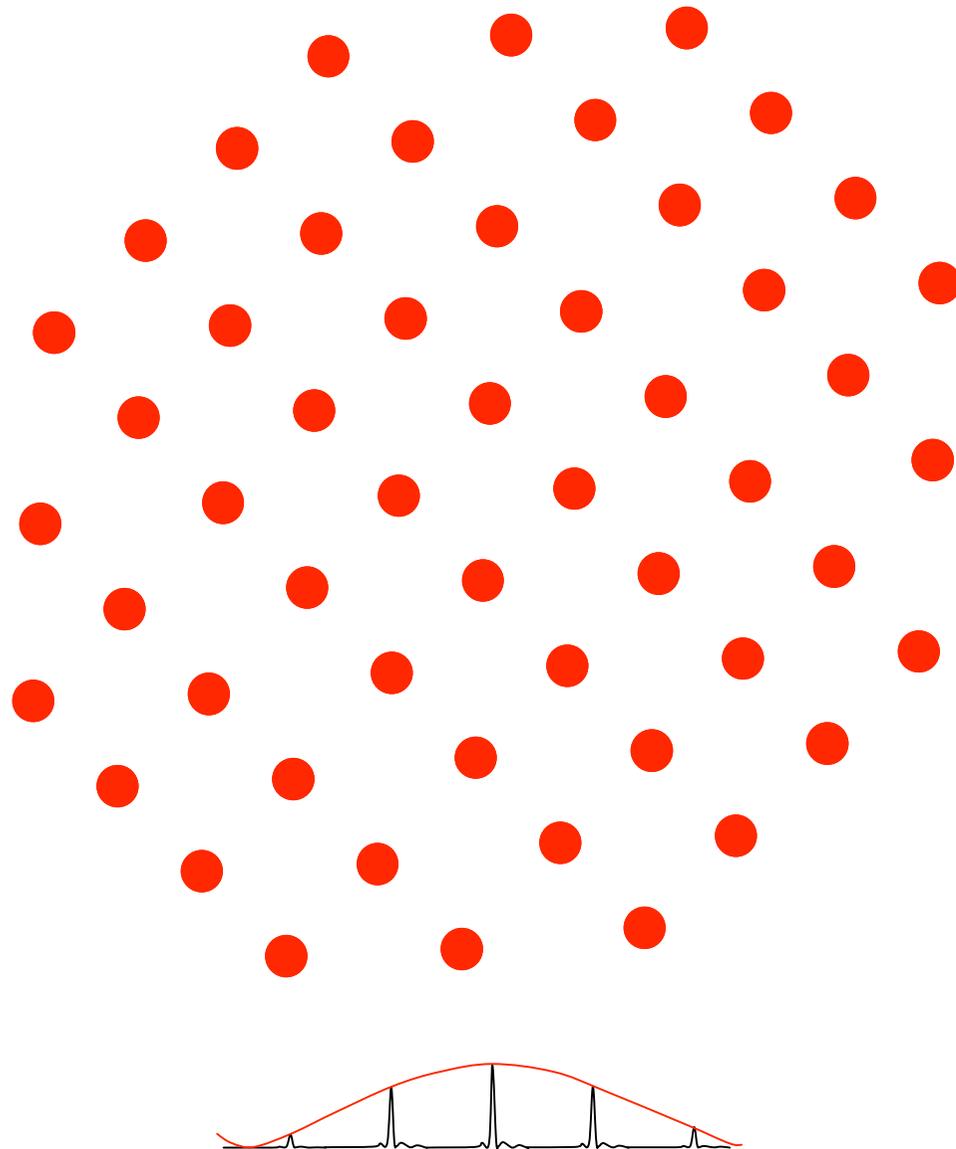
# Après EED, EEI, etc... Moth-Eye ?

Labeyrie, A., 1998, NATO ASI 98 in *Planets outside the solar system*, Cargèse, Corse

- Panoramique
- Sphère diluée fixe, stations focales mobiles
- Partage des miroirs => économie

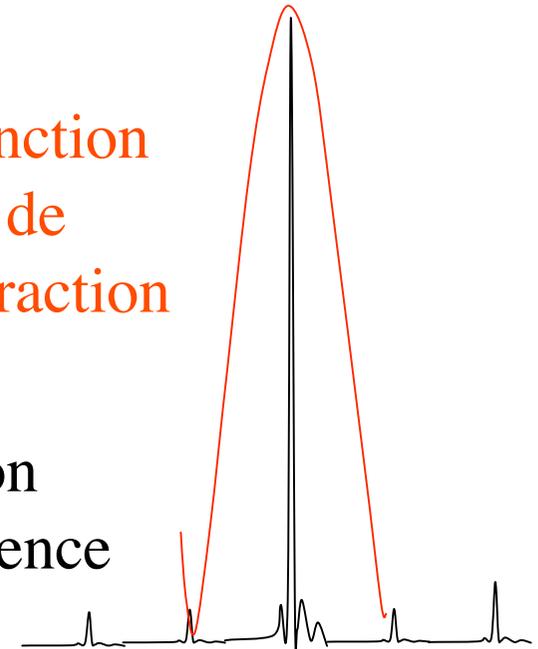


# Densifier la pupille pour intensifier l'image

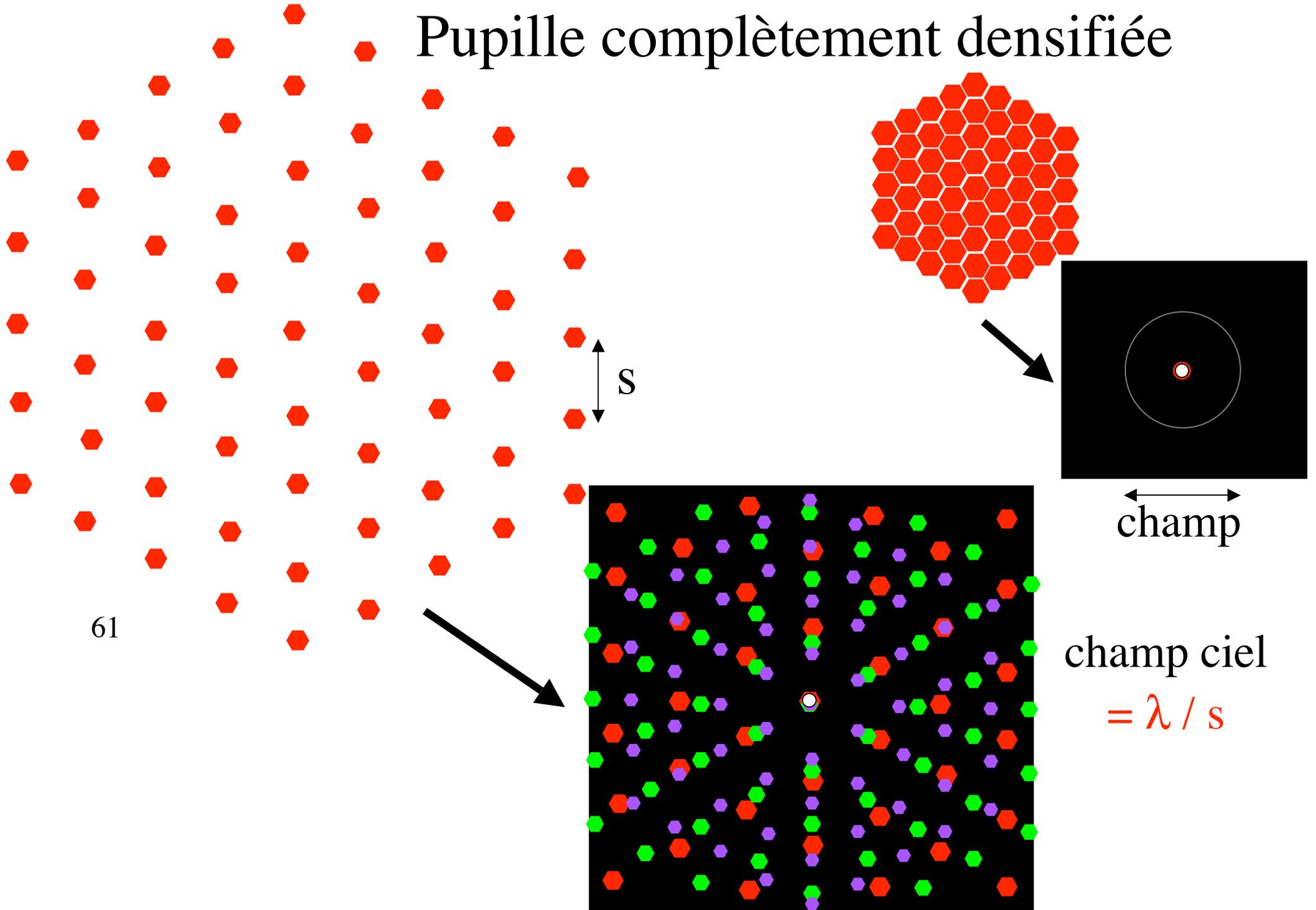


Fonction  
de  
diffraction

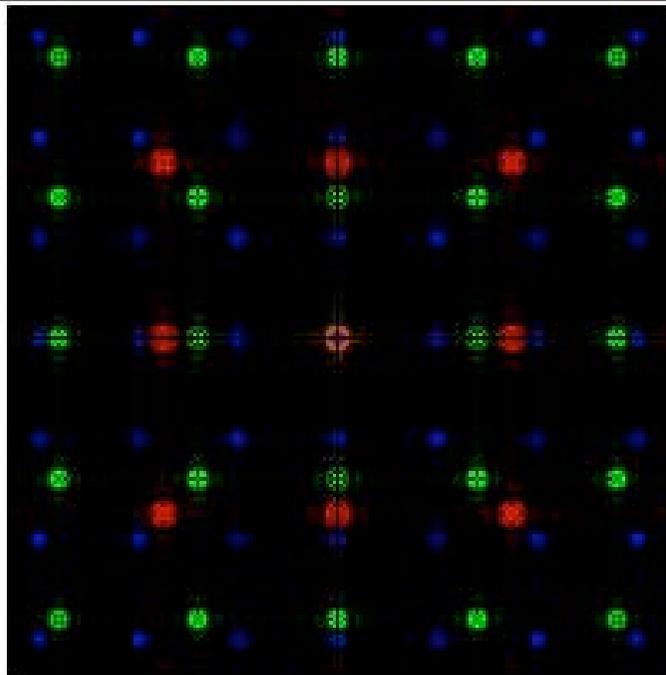
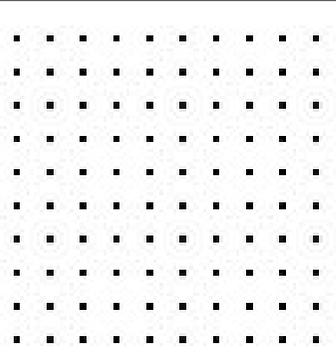
Fonction  
d'interférence



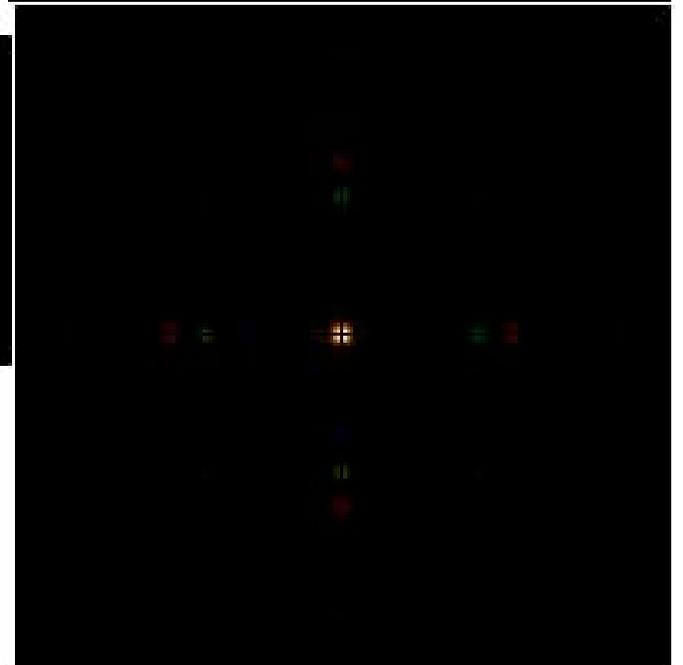
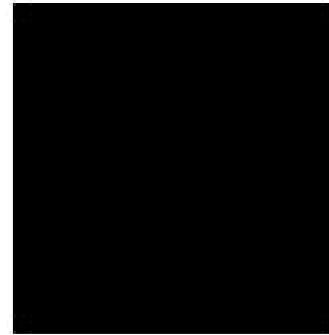
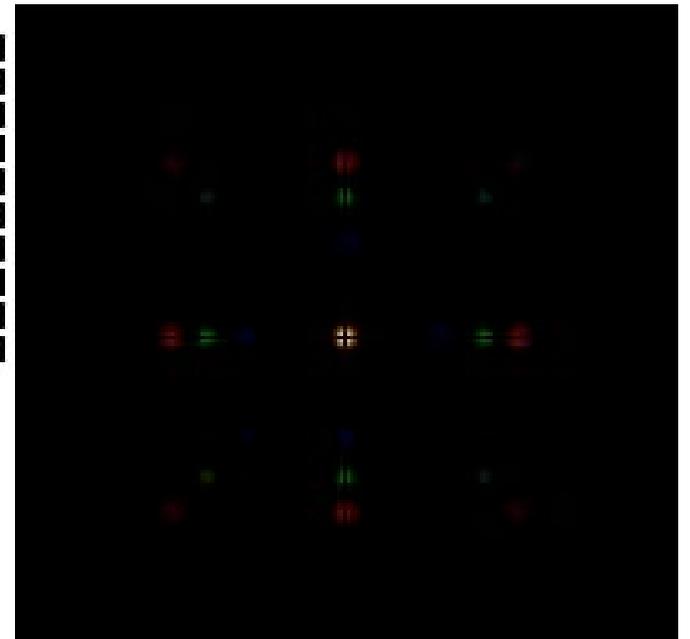
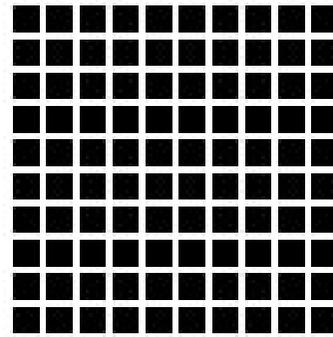
# Pupille complètement densifiée



# Figures de diffraction calculées

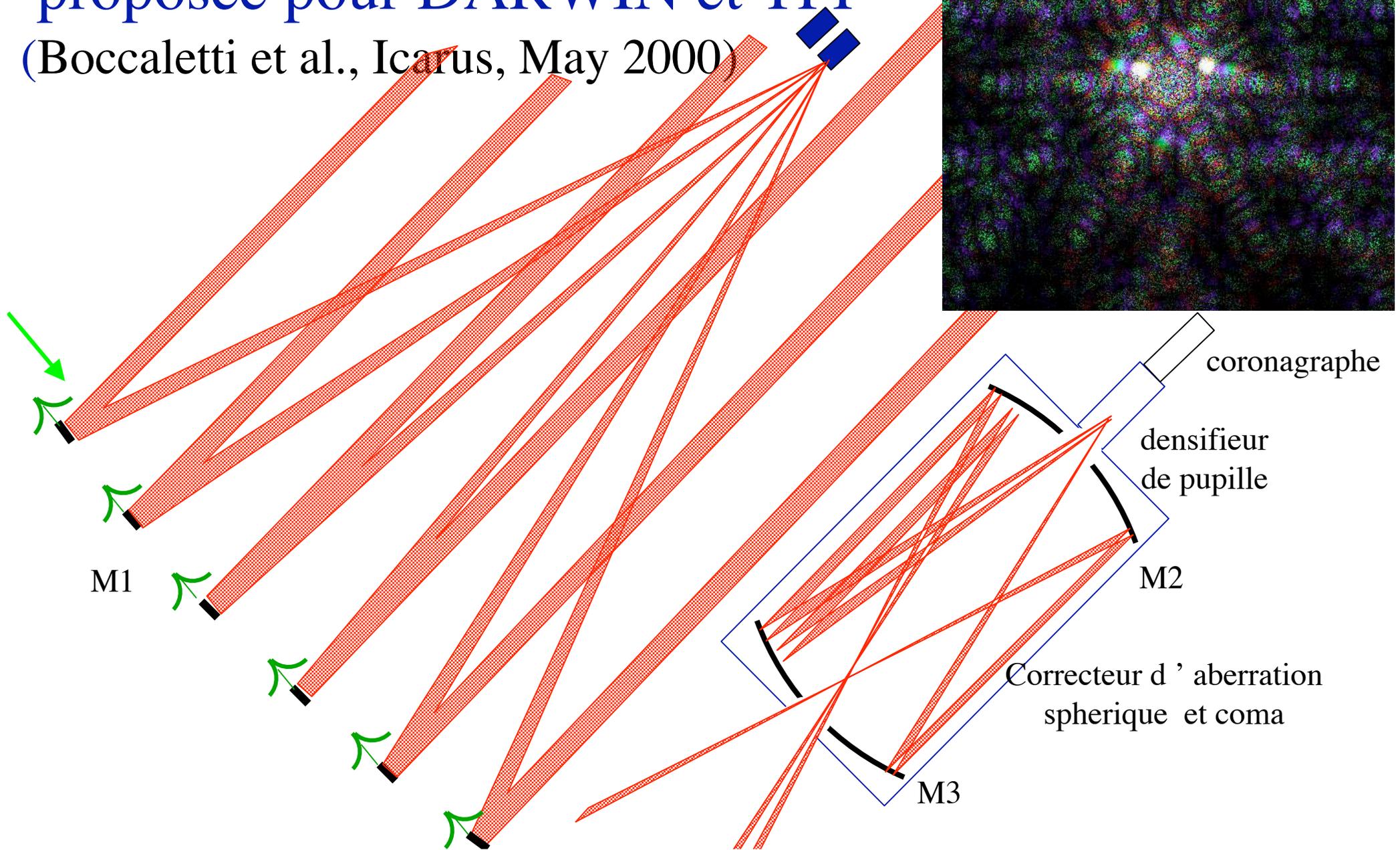


Ouverture diluée



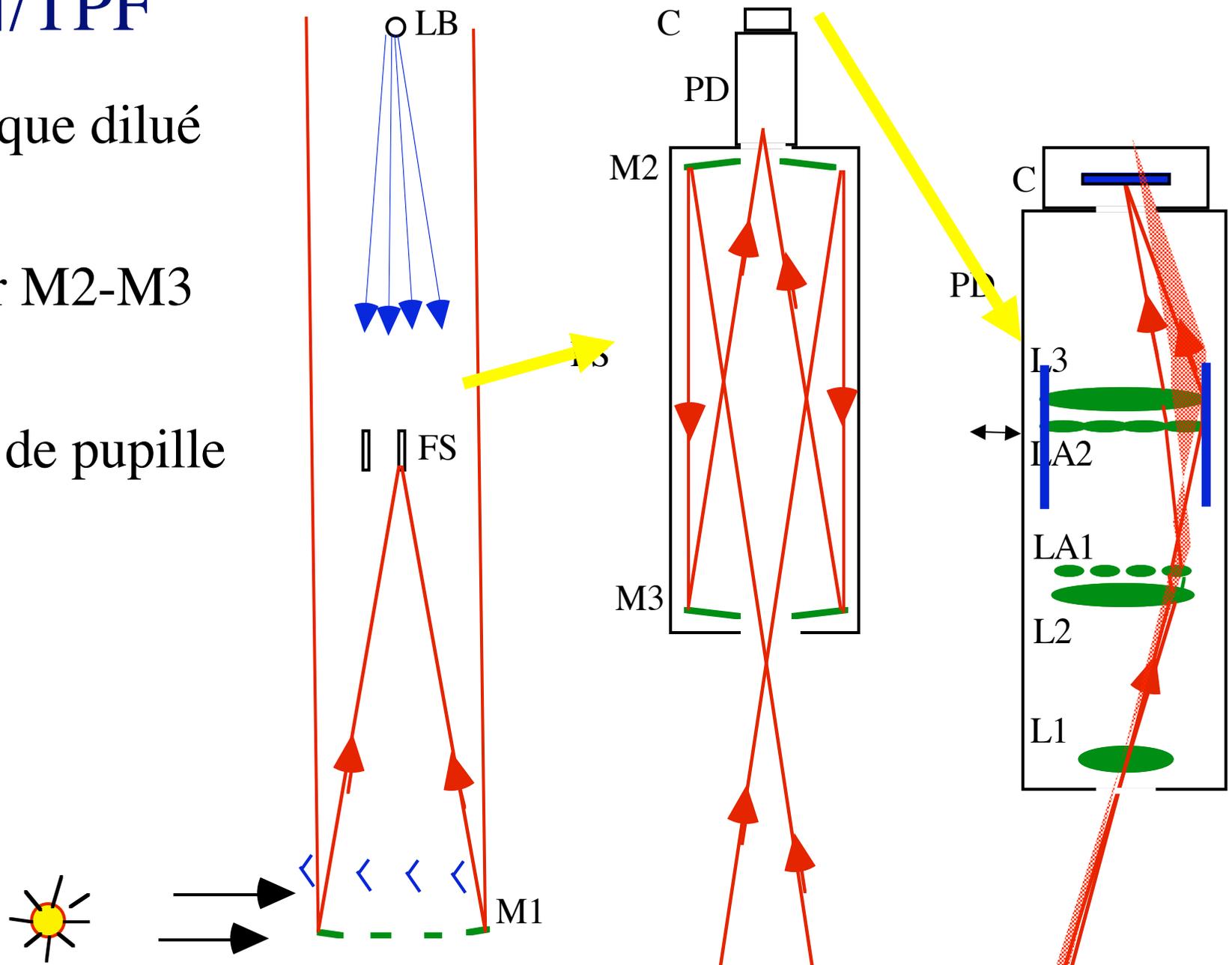
Ouverture dense

# architecture hyper-telescope proposée pour DARWIN et TPF (Boccaletti et al., Icarus, May 2000)



# Optique de EED, EEI, aussi proposée pour DARWIN/TPF

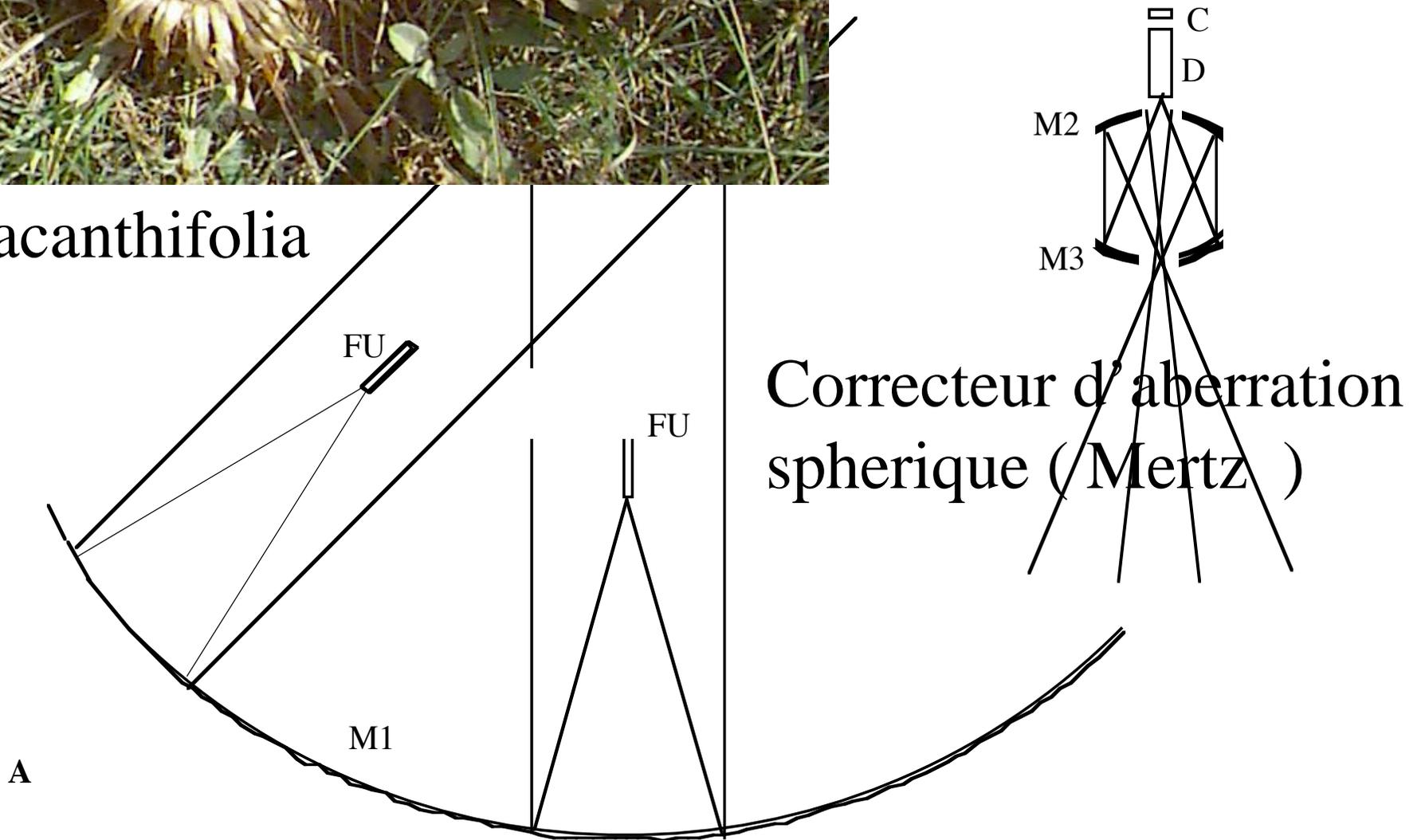
- M1 sphérique dilué
- Correcteur M2-M3
- densifieur de pupille



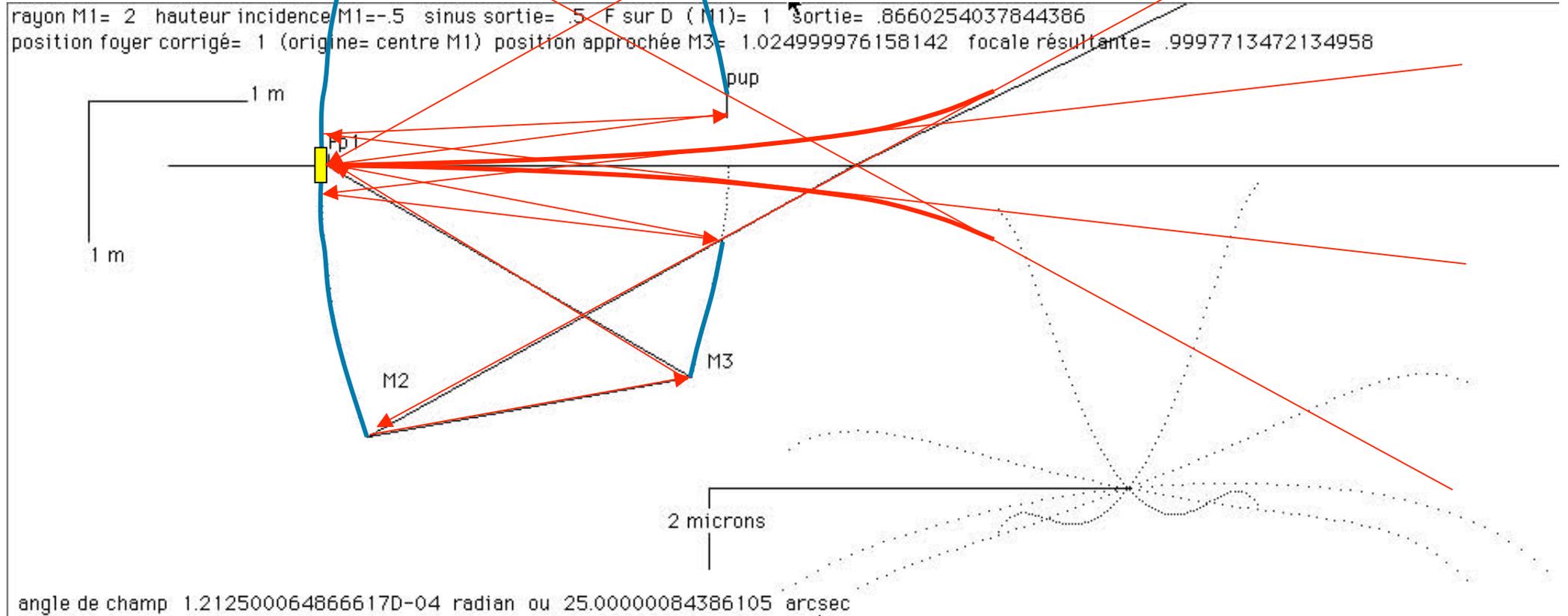


CARLINA, un hyper-telescope au sol

Carlina acanthifolia



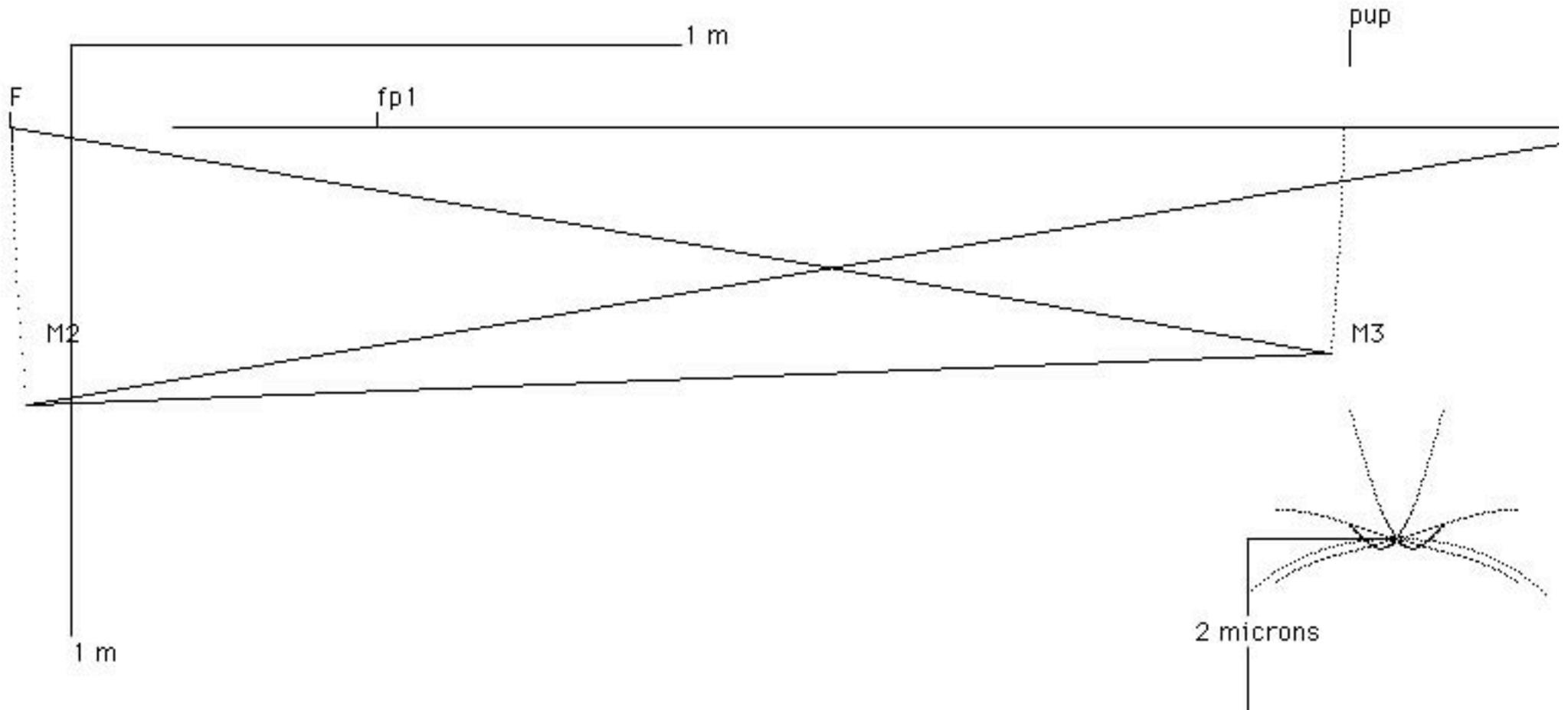
# Correcteur d'aberration à f/1



- Diamètre 3,5m pour pupille 100m
- très sensible à F/D

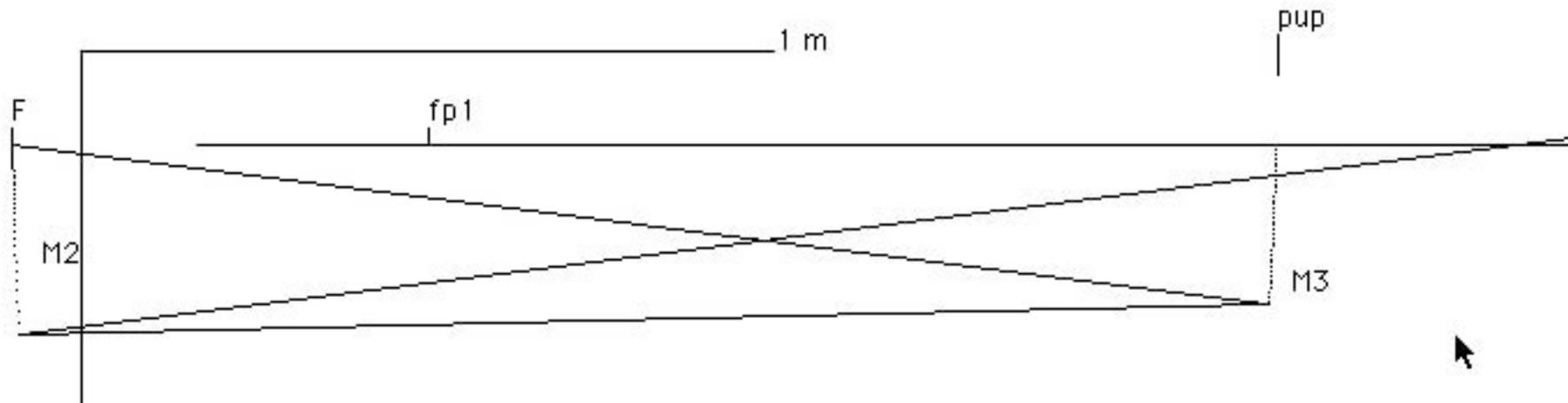
# Correcteur à F/3: 0,5% du diamètre de M1

rayon M1= 12 hauteur incidence M1=-1 sinus sortie= .166666716337204 F sur D (M1)= 3 sortie= 2.9580398008745  
position foyer corrigé= 5.99399995803833 (origine= centre M1) position approchée M3= 6.015799999237061 focale rési

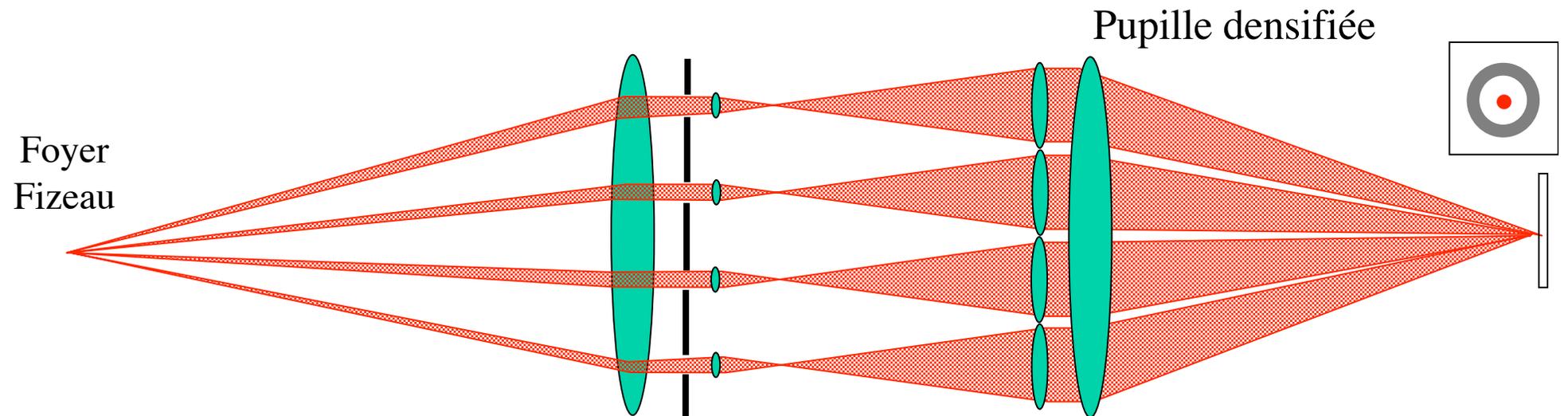


# Correcteur à F/4: 0,25% du diamètre de M1 ( 2,5m pour 1000m)

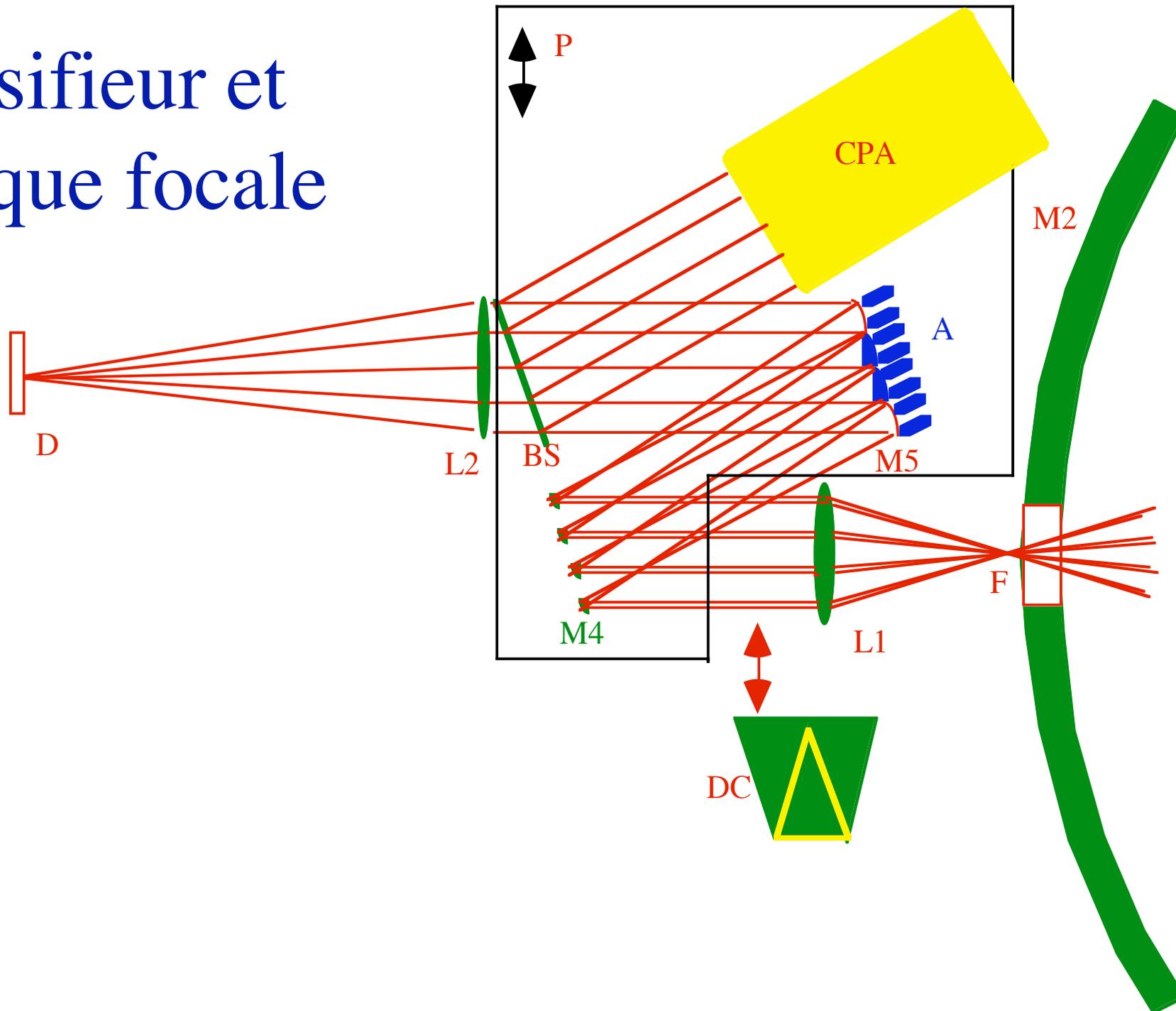
rayon M1= 16 hauteur incidence M1=-1 sinus sortie= .125 F sur D ( M1)= 4 sortie= 3.968626966596886  
position foyer corrigé= 7.99399995803833 (origine= centre M1) position approchée M3= 8.01220035552978



# Densifieur de pupille



# Densifieur et optique focale



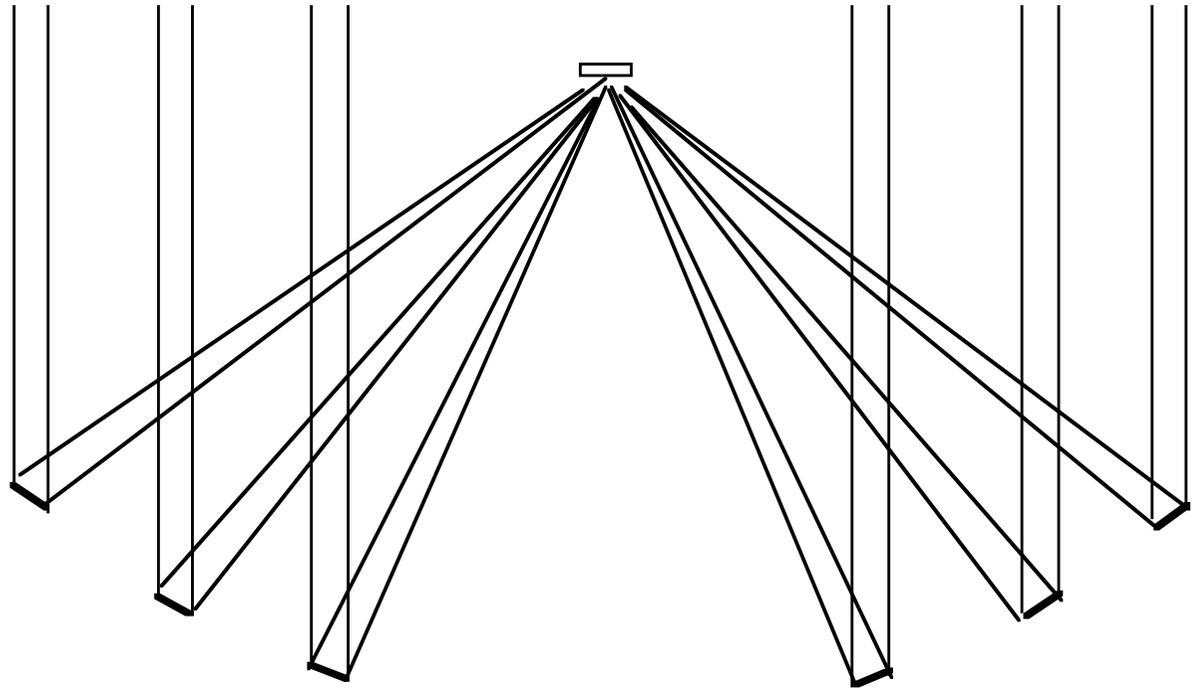
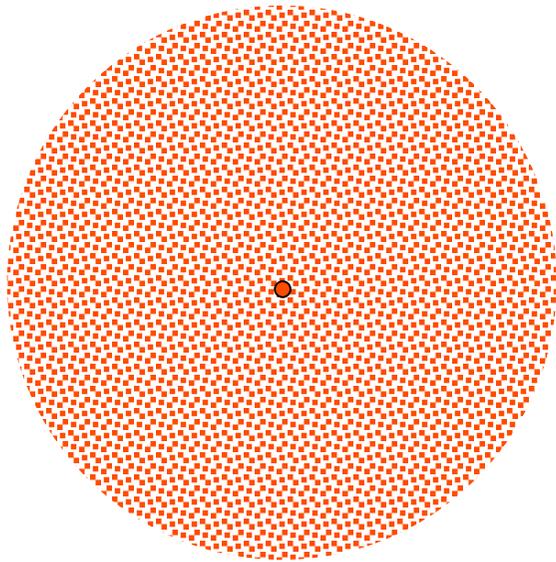
# Mise en phase

- Station focale dédiée pour étoile guide
- Ou balise laser au centre de courbure de M1
- Suppose correcteurs parfaits

# Télescope géant dilué dans l'espace...

diamètre 150 km, éléments nombreux

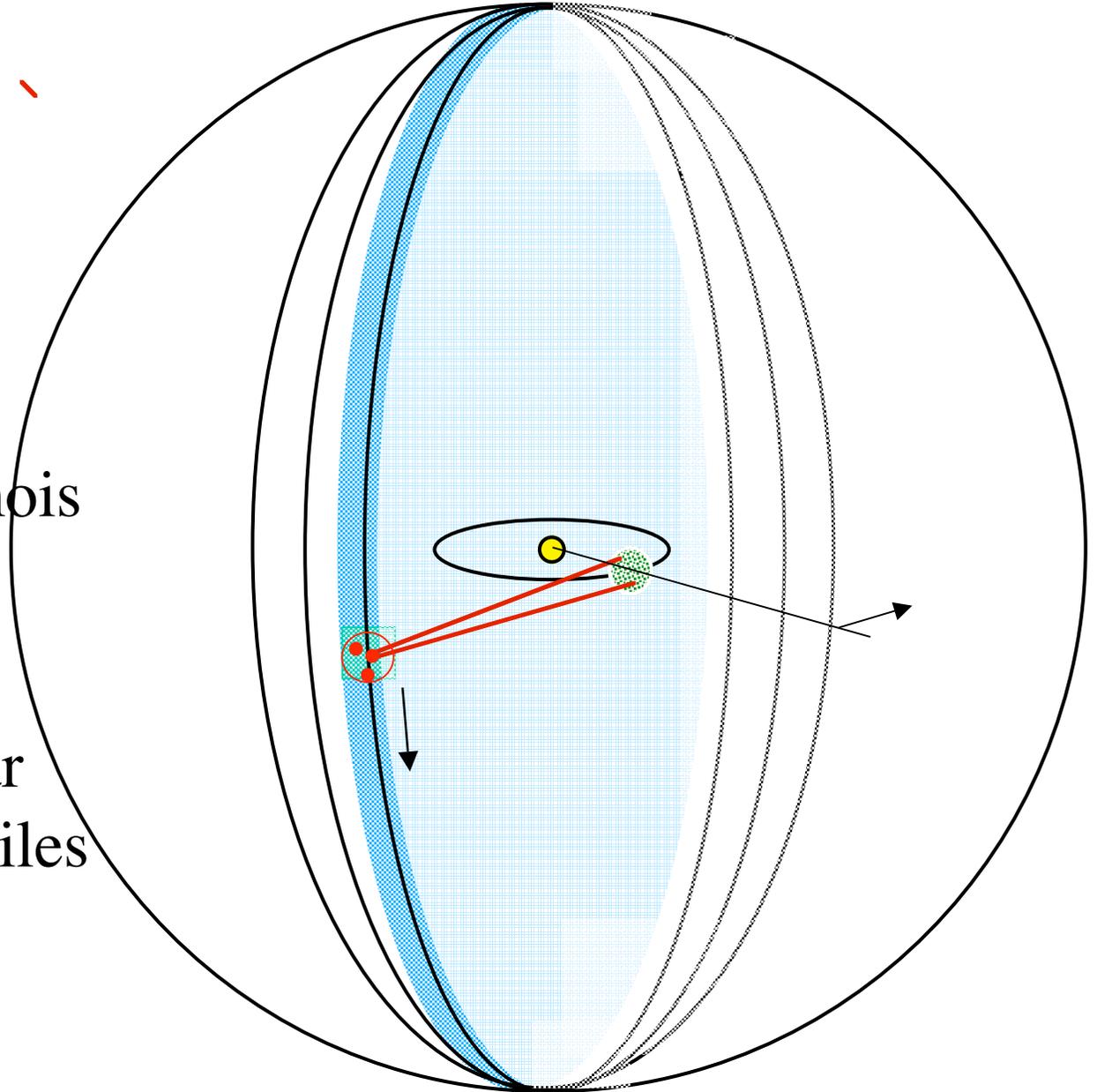
- L' image Fizeau directe est inutilisable : la lumière va surtout dans le large halo plutôt que dans le pic d'interférence



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

# Couverture céleste

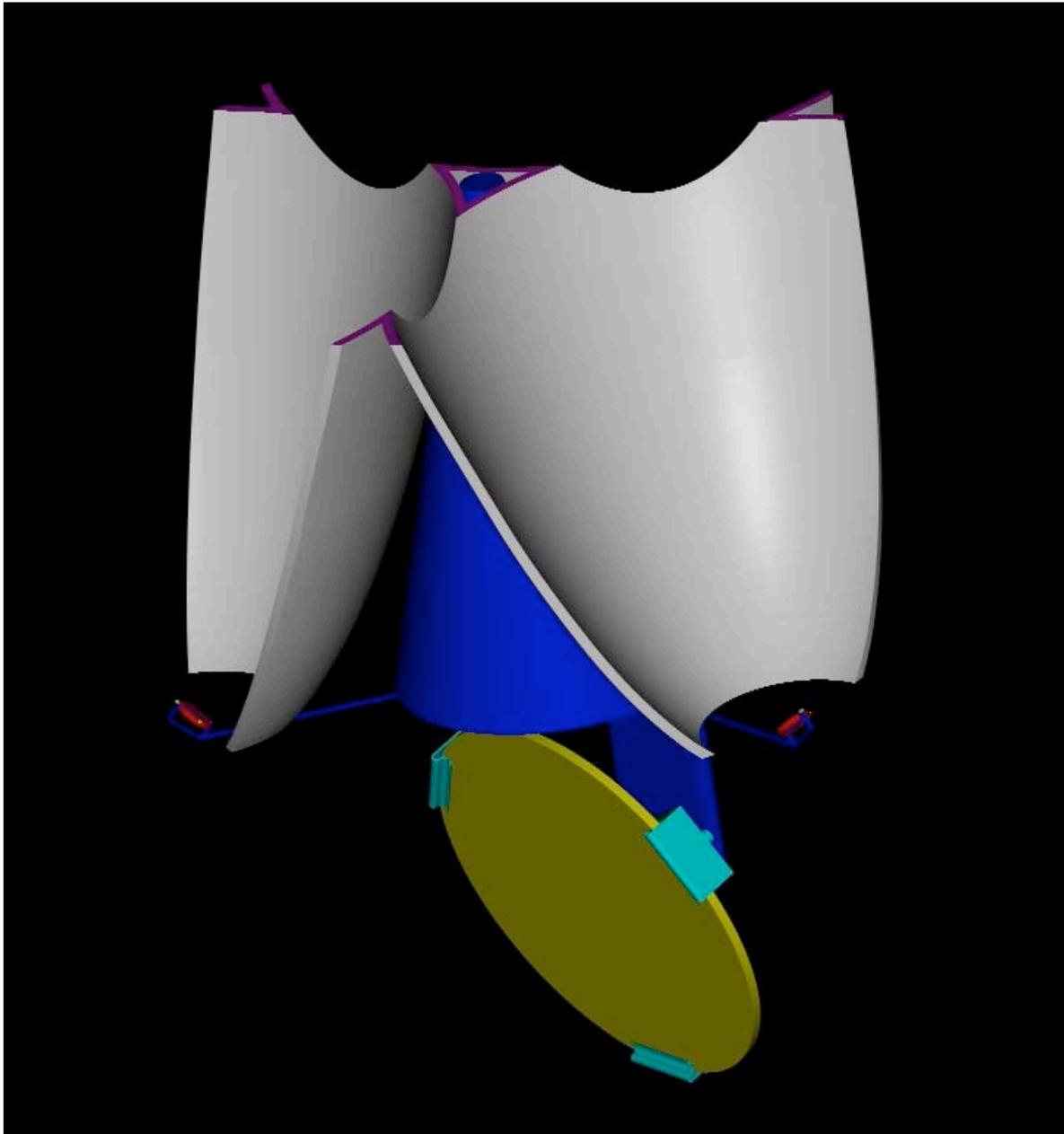
- Rotation globale lente (semaine) et precession (année)
- Balayage du ciel en 6 mois
- Accès aux étoiles du champ primaire ( $8^\circ$ ) par les stations focales mobiles (propulsion ionique)



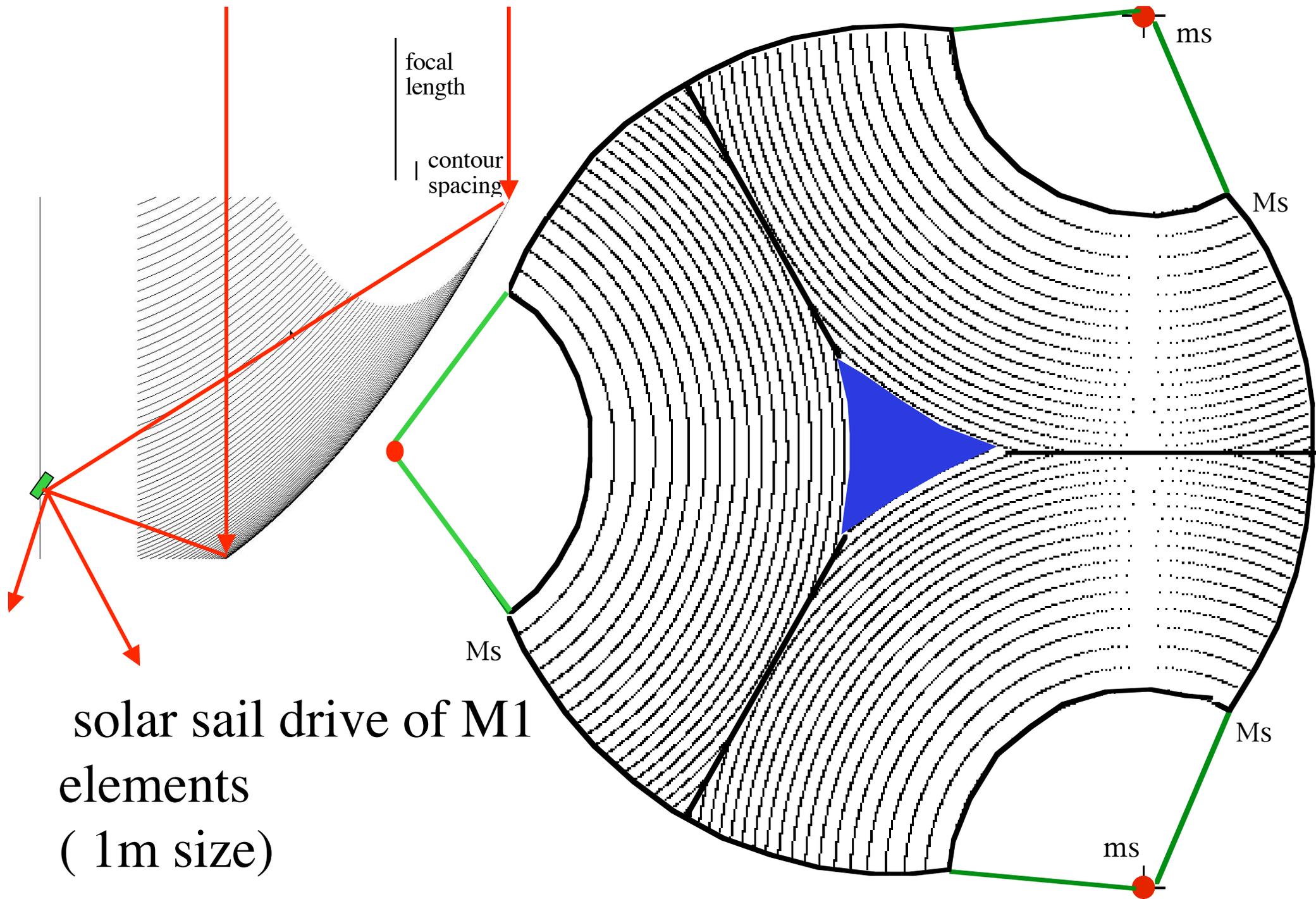
# L 'enjeu des micro-satellites

- NASA/JPL: projet Nanosat Constellation Trailblazer ( lancement 2005 ?)
- A surface d 'ouverture donnée, D donné:
  - Le champ s 'élargit avec des éléments plus nombreux
  - Performance autrement inchangée
  - Favorise la voie des micro-satellites
  - Dimension optimale définie par le coût du propulseur, électronique, etc...

# Éléments de miroir actionnés par des voiles solaires?

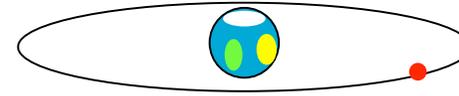


- Petit miroir orientable ou micro-miroirs dans l'image solaire
- Lent mais durable et peu coûteux ?
- Voile servant aussi d'ombrelle, **mais trop proche pour 30°K ?**
-



solar sail drive of M1  
elements  
( 1m size)

# Orbites compatibles avec propulsion solaire



- Faible force solaire :  $P/c = 8$  microNewton par metre carré de voile
- Doit dépasser les forces de marée ( gradient de gravité)
- Definit la dimension maximale de la flotille

$$l_{\max} = \frac{P d^3}{2 c m M} = \frac{P}{2 c m \omega^2} = \frac{P T^2}{8 \pi^2 c m}$$

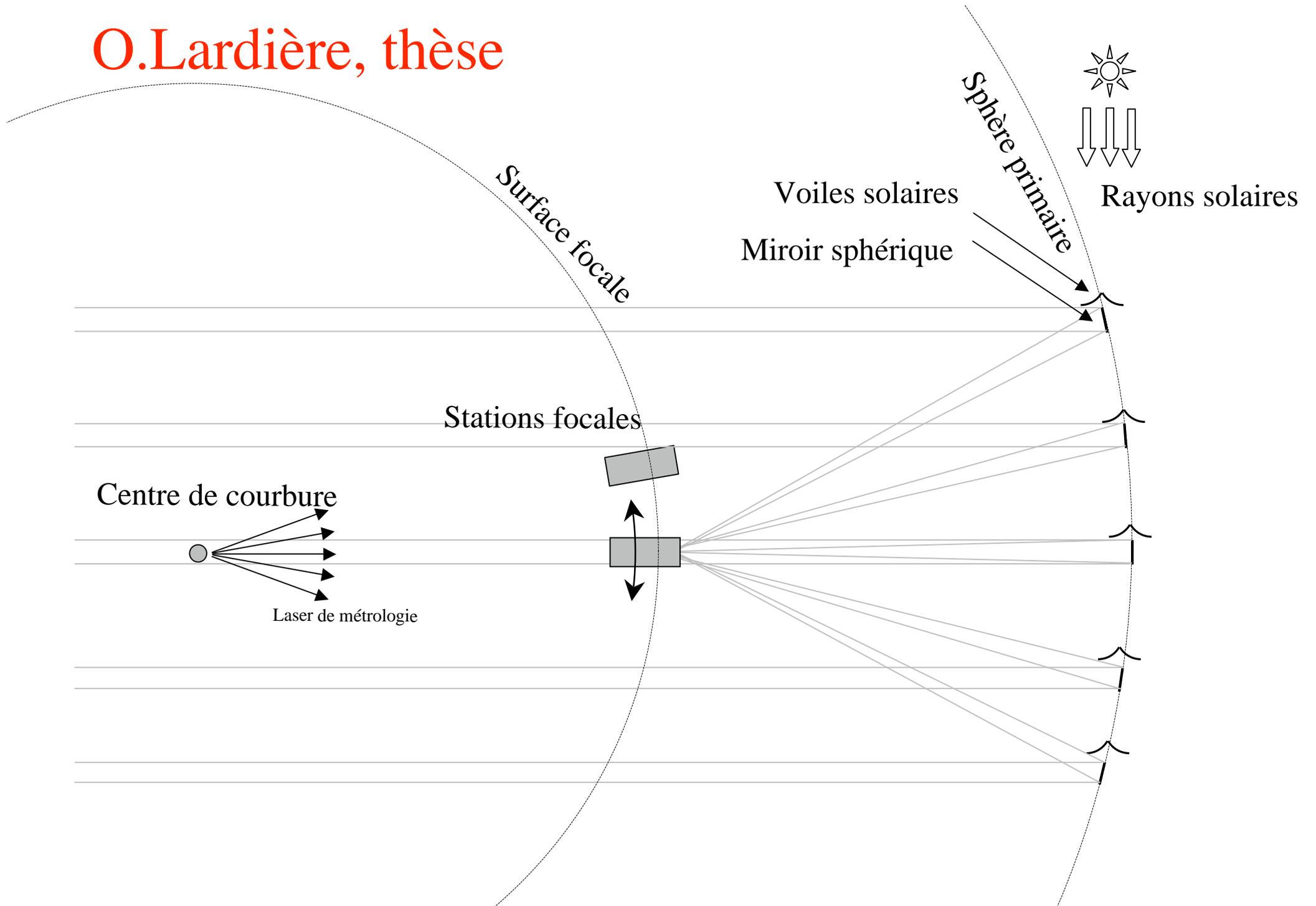
Solar illumination (W/m<sup>2</sup>)

Orbital period (s)

Mass of free-flyer

- Avec une voile de 1m et masse 10kg :
  - 100m en orbite geo-stationnaire
  - 1km a 80,000 km de la Terre

# O.Lardière, thèse



O.Lardière, thèse

## Accélérations nécessaires :

- Mise en phase :

$$a_{cor} = 5.10^{-7} \text{ m.s}^{-2}$$

*pour une correction de 10nm en 0.2s*

Balayage du ciel :

$$a_{prec.} = 5.10^{-11} \text{ m.s}^{-2}$$

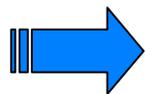
*pour  $R_c = 1200\text{m}$*

$$a_{rot.} = 4.10^{-7} \text{ m.s}^{-2}$$

- Effets de marée :

$$a_{marée.} = 1.10^{-6} \text{ m.s}^{-2}$$

*par hectomètre de base  
pour des free-flyers de 1kg  
en orbite géostationnaire*



« Earth-trailing orbit » ou L2 pour les grandes bases.

O.Lardière, thèse

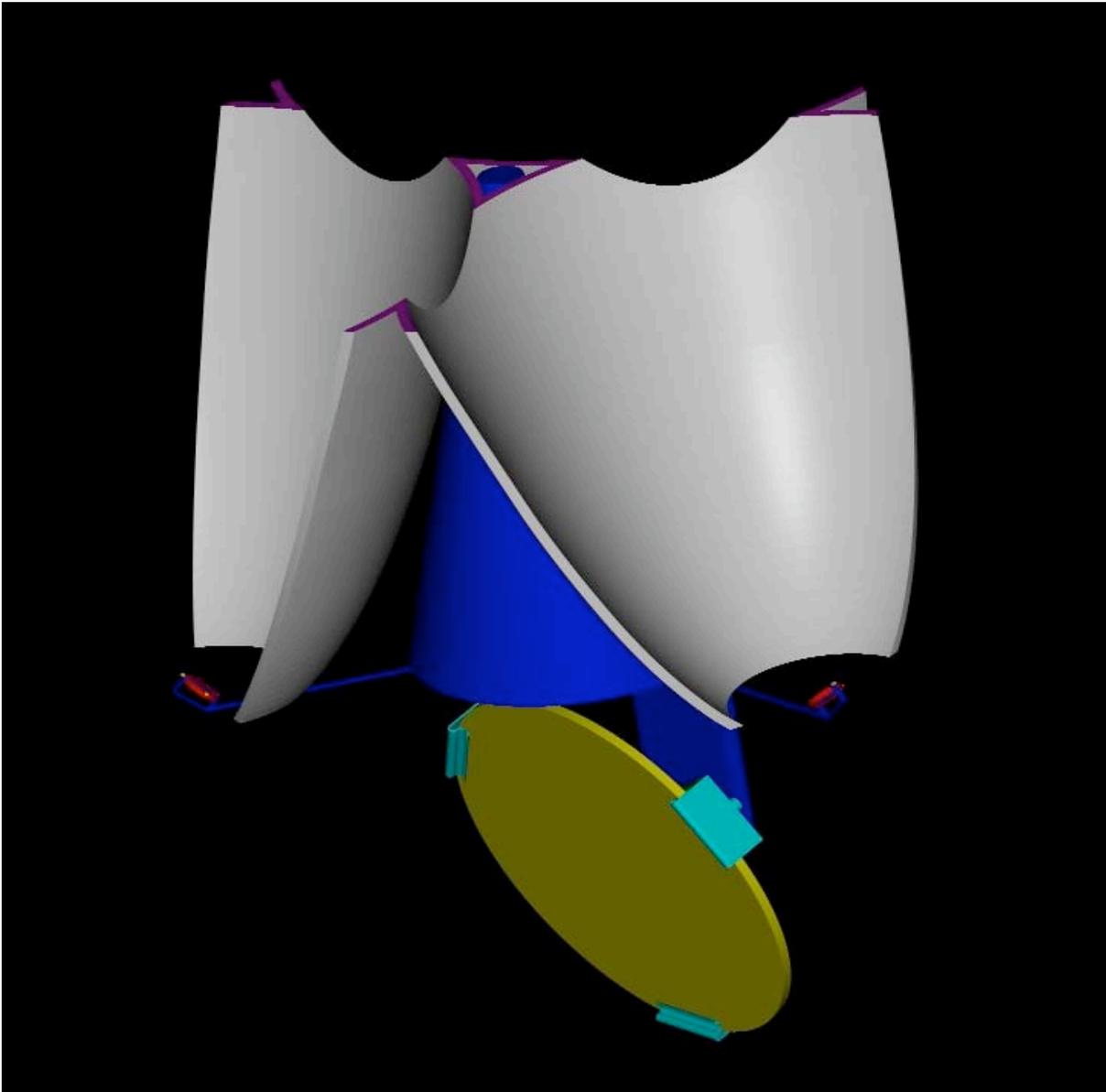
➔ **Voiles solaires** pour le balayage du ciel (*lent et continu*)  
et la mise en phase des *free-flyers* (*précise*) :

- *autonomie infinie*
- *légères*
- *forces et moments faibles : 0 à  $10^{-6}$  N(.m)*
- *réponse linéaire*
- *protègent la charge utile du soleil*

➔ **Propulseurs ioniques** pour le pointage rapide  
des stations focales (*tolérant*) :

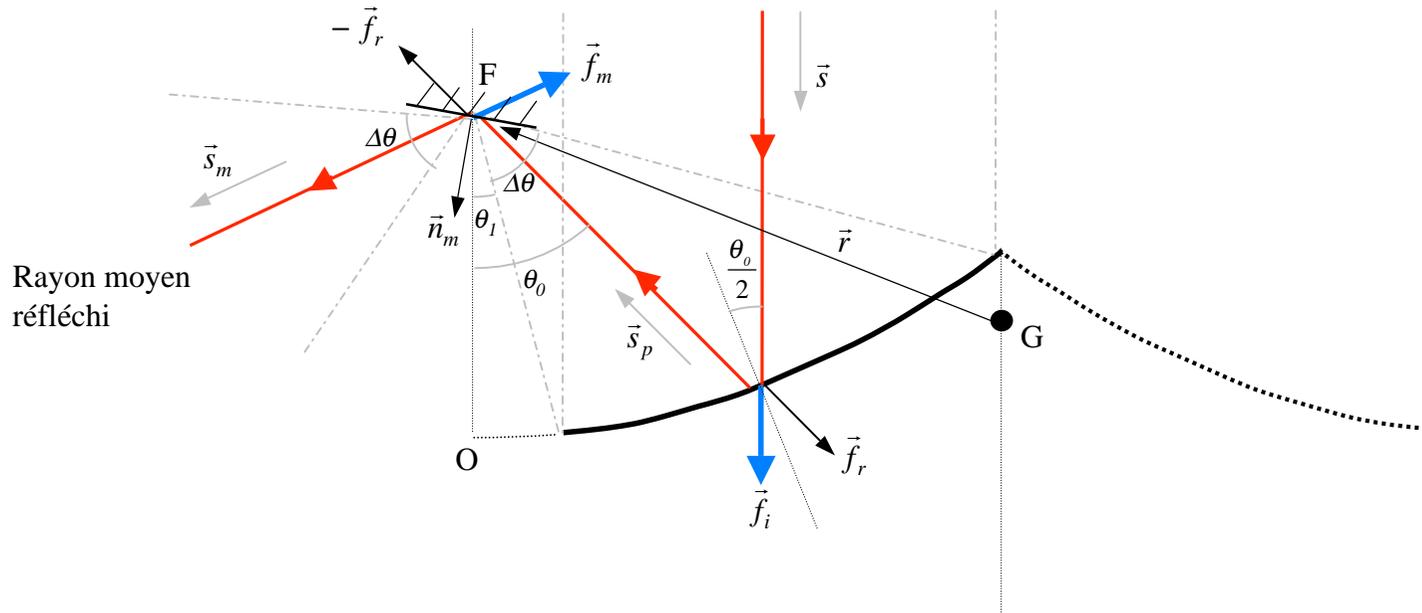
- *plus puissants*
- *autonomie limitée*

# Élément à voile solaire



Masse :  $0,3 \text{ kg}$   
Moment d'inertie :  $0,05 \text{ kg.m}$   
Surface de voile :  $0,25 \text{ m}^2$

3 voiles paraboliques hors d'axe  
avec miroirs plans orientables au foyer



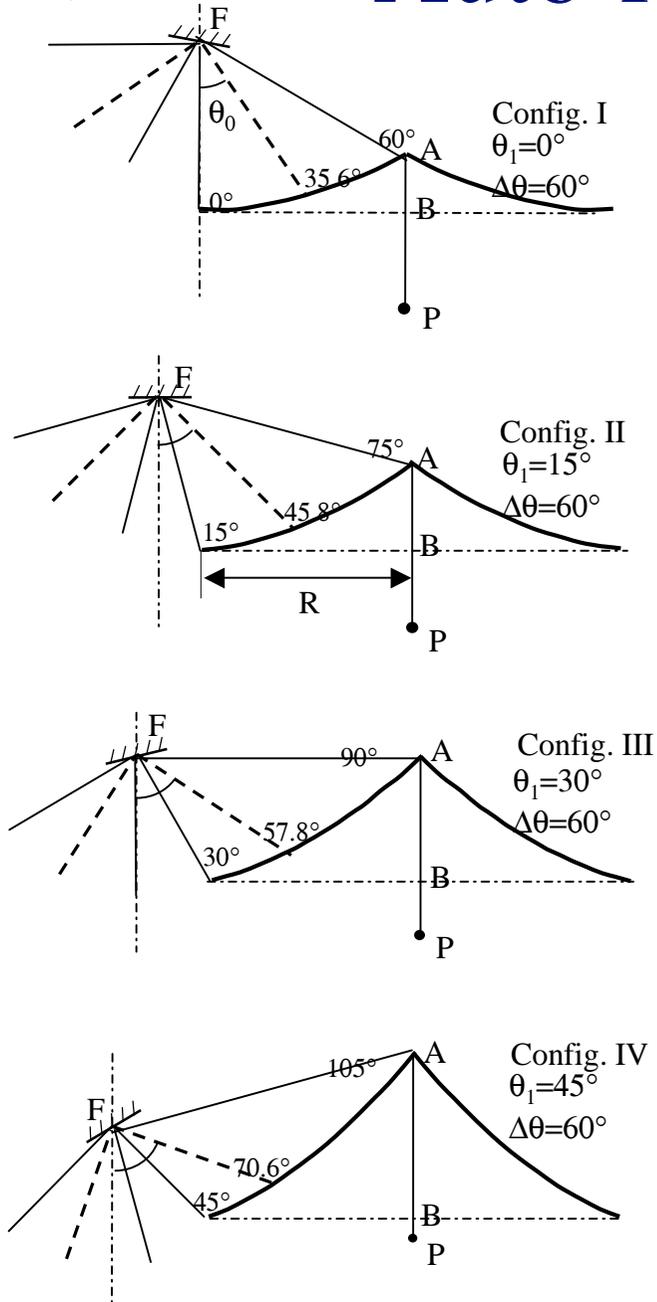
Force résultante :

$$\vec{F} = F_0 \left[ \begin{array}{c} 3 \\ 1 \\ 1 \end{array} \right] \vec{s} - \sum_{j=0}^2 \vec{s}_{mj} \sqrt{\quad}$$

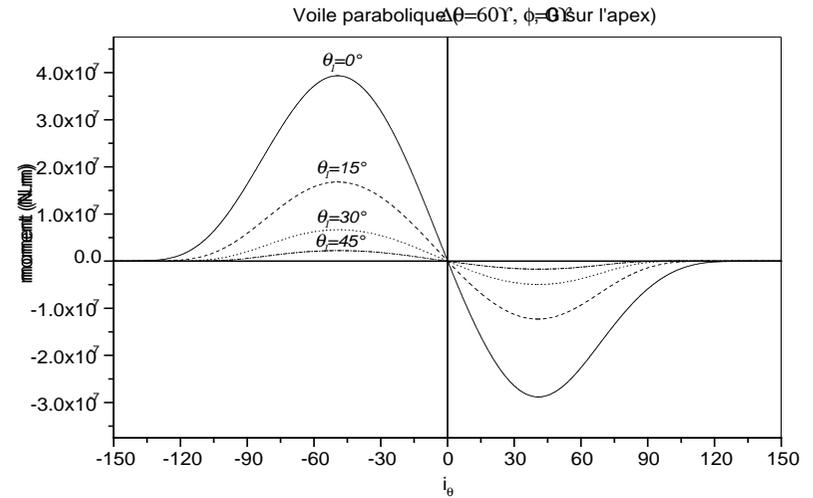
Moment résultant :

$$\vec{M} = -F_0 \sum_{j=0}^2 \vec{r}_j \mid \vec{s}_{mj}$$

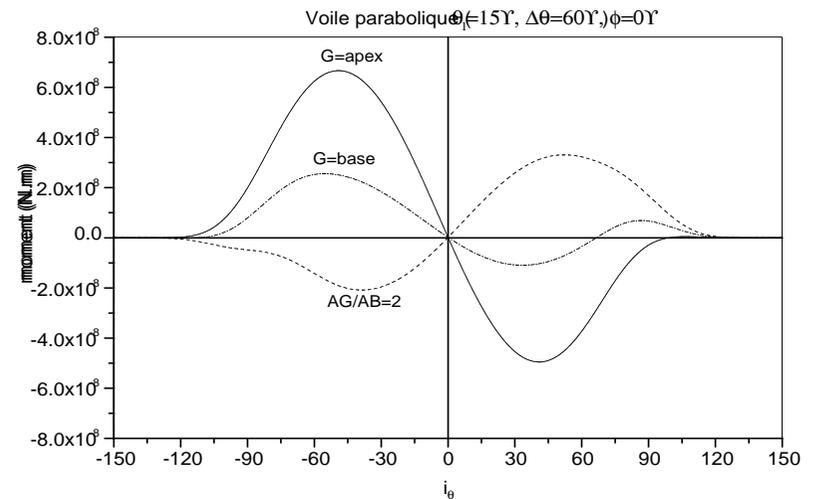
# Auto-redressement



Moment redresseur vs. « ouverture »



Moment redresseur vs. position du centre de masse



Inclinaison maxi. avant chavirement	$\pm 100^\circ$
Couple maxi. de redressement	$5 \cdot 10^{-8} \text{ N.m}$
Raideur du redressement ( $K$ )	$5 \cdot 10^{-8} \text{ N.m.rad}^{-1}$
Période d'oscillation ( $T$ )	6200s
Couple d'amortissement disponible ( $M_m$ )	$2,1 \cdot 10^{-7} \text{ N.m}$
Nombre de freinages nécessaires ( $n$ )	1
Durée d'amortissement ( $T_a$ )	3100s
Force résultante suivant la direction anti-solaire ( $F$ )	$1,14 \cdot 10^{-6} \text{ N}$
Dérive accumulée pendant l'amortissement	1.5m
Temps de remontée vers les autres éléments.	4300s

*Tableau 1 : Valeurs numériques caractérisant le redressement d'un élément de 1Kg à 3 voiles solaires paraboliques ( $\theta_1=15^\circ$ ,  $\Delta\theta=60^\circ$ ) de  $0.25\text{m}^2$ , après un basculement des voiles de  $40^\circ$  par rapport au soleil.*

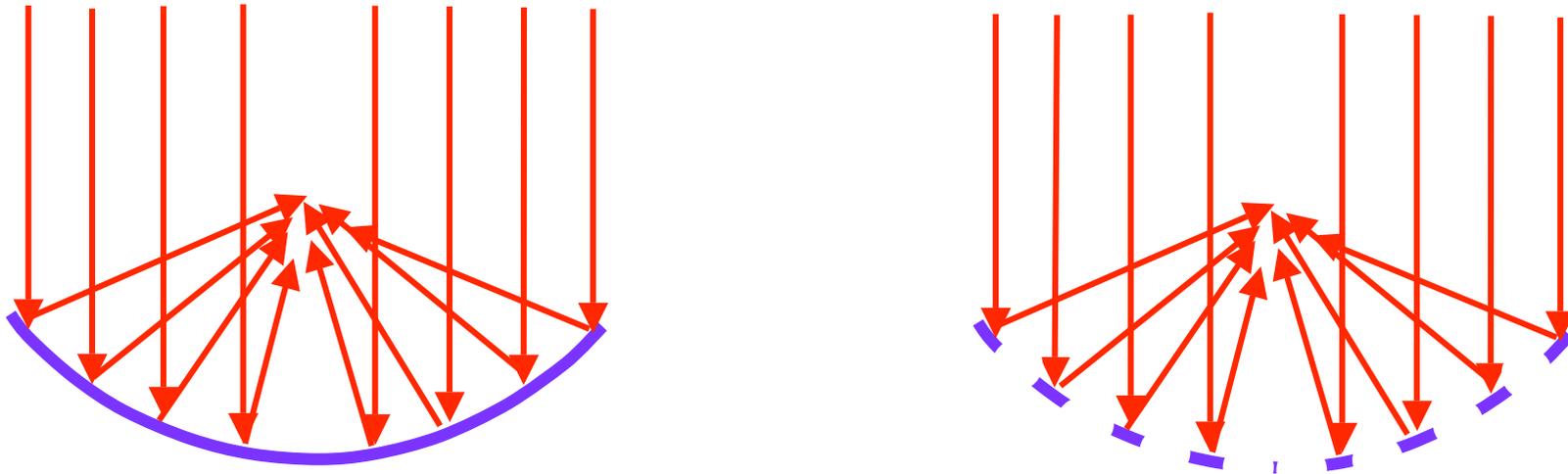
# Science

- Résolution 0,1 milliseconde d 'arc ( visible)  
(1 microseconde potentiellement pour EEI de 100 km)
- Champ élémentaire 10 millisecondes
- Imagerie stellaire résolue et circumstellaire
- Noyaux actifs de galaxies, quasars
- Objets ultra-faibles, grands contrastes avec coronographe

# Modes d 'observation

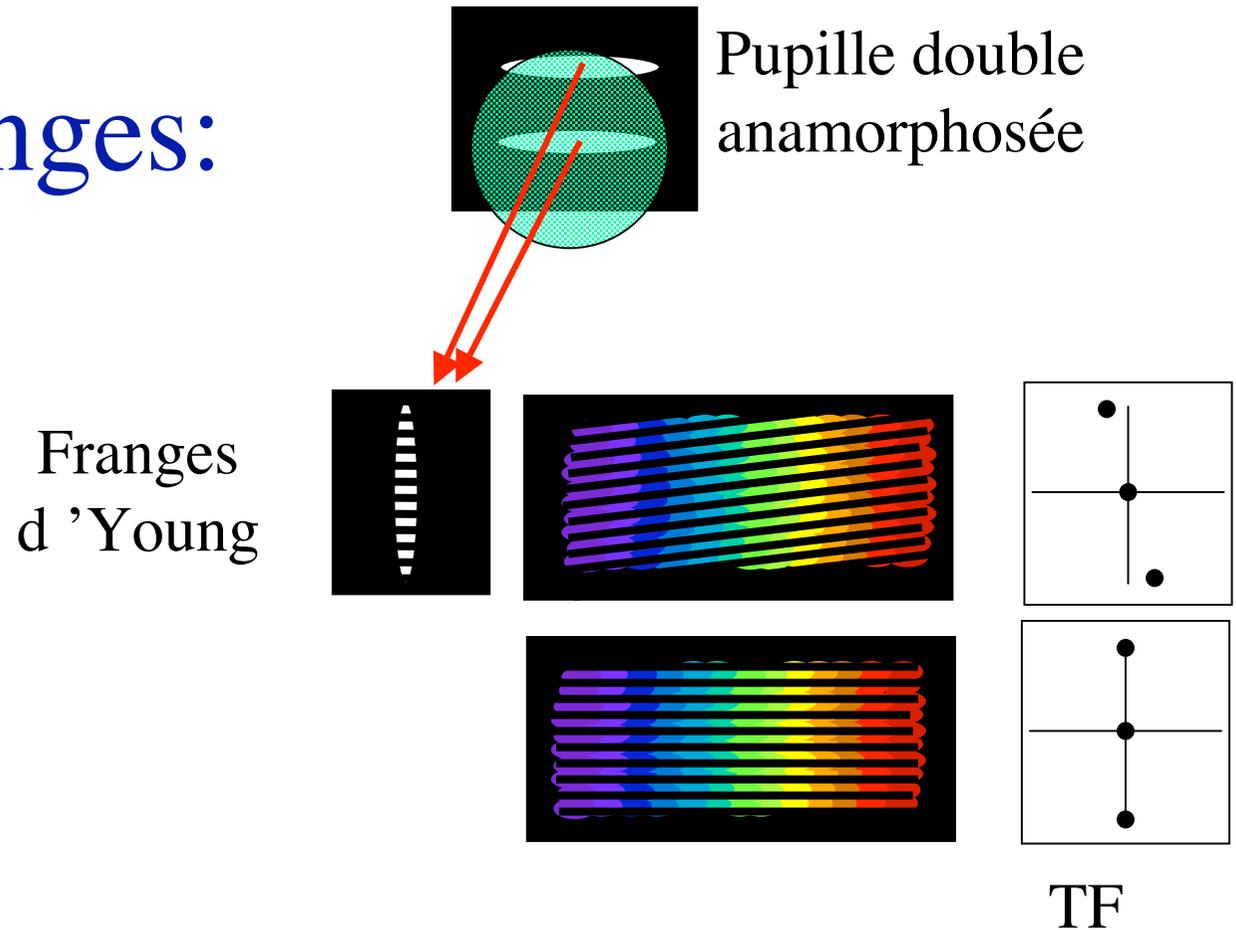
- imagerie directe
- Stations focales spécialisées:
  - visible
  - infra-rouge
  - ultra-violet
  - coronographie
  - Astrométrie champ  $8^\circ$

# mise en cohérence et en phase



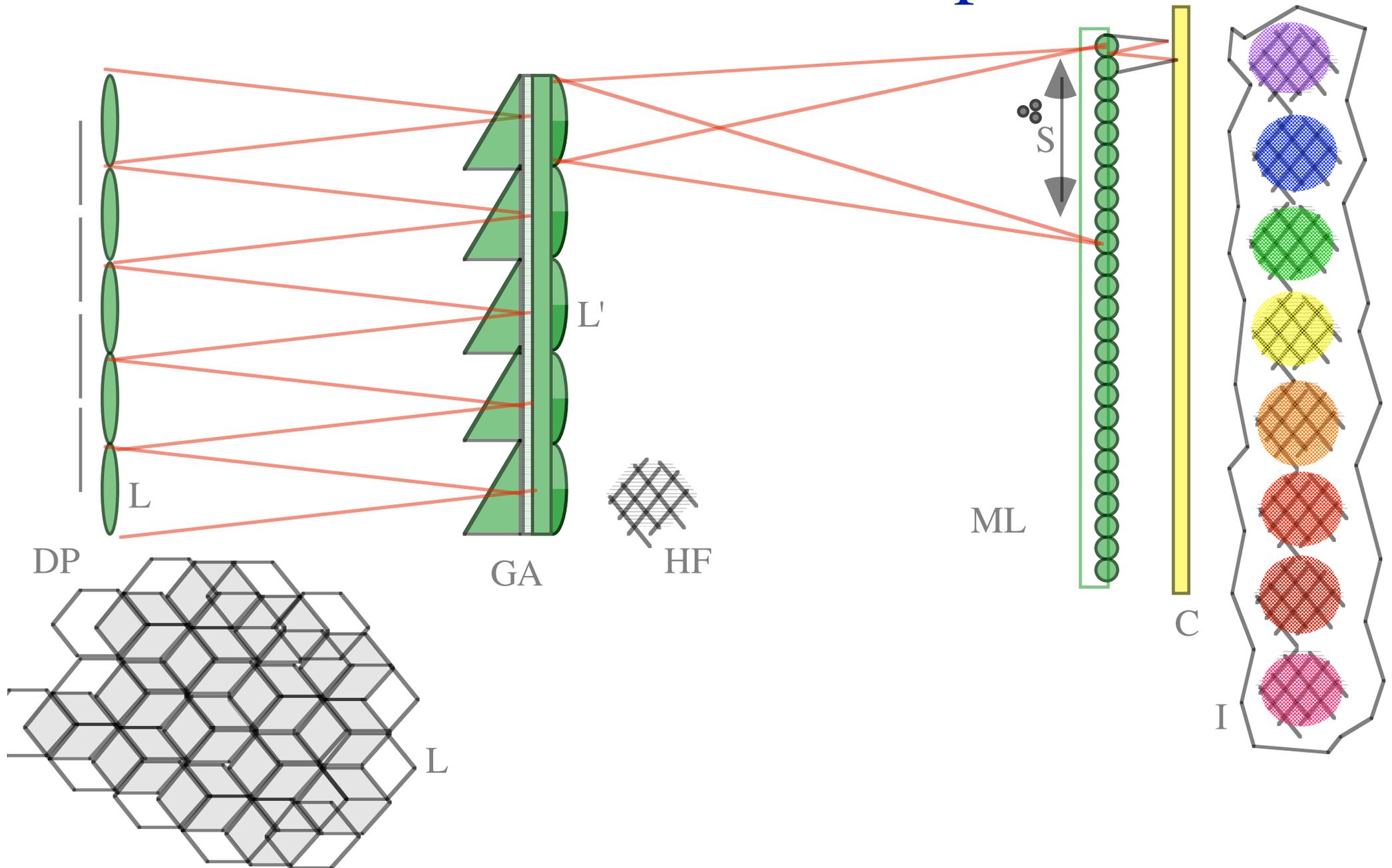
- Facilité dans l'espace: stabilité, isoplanétisme
- Longueur de cohérence  $\lambda^2/d\lambda$
- Tolerance de phase : tolérance de Rayleigh  $\lambda/4$  ,  
moins pour coronagraphie
- techniques de l'optique adaptative non directement applicables à des éléments d'onde séparés

# Trouver les franges: methode spectrale

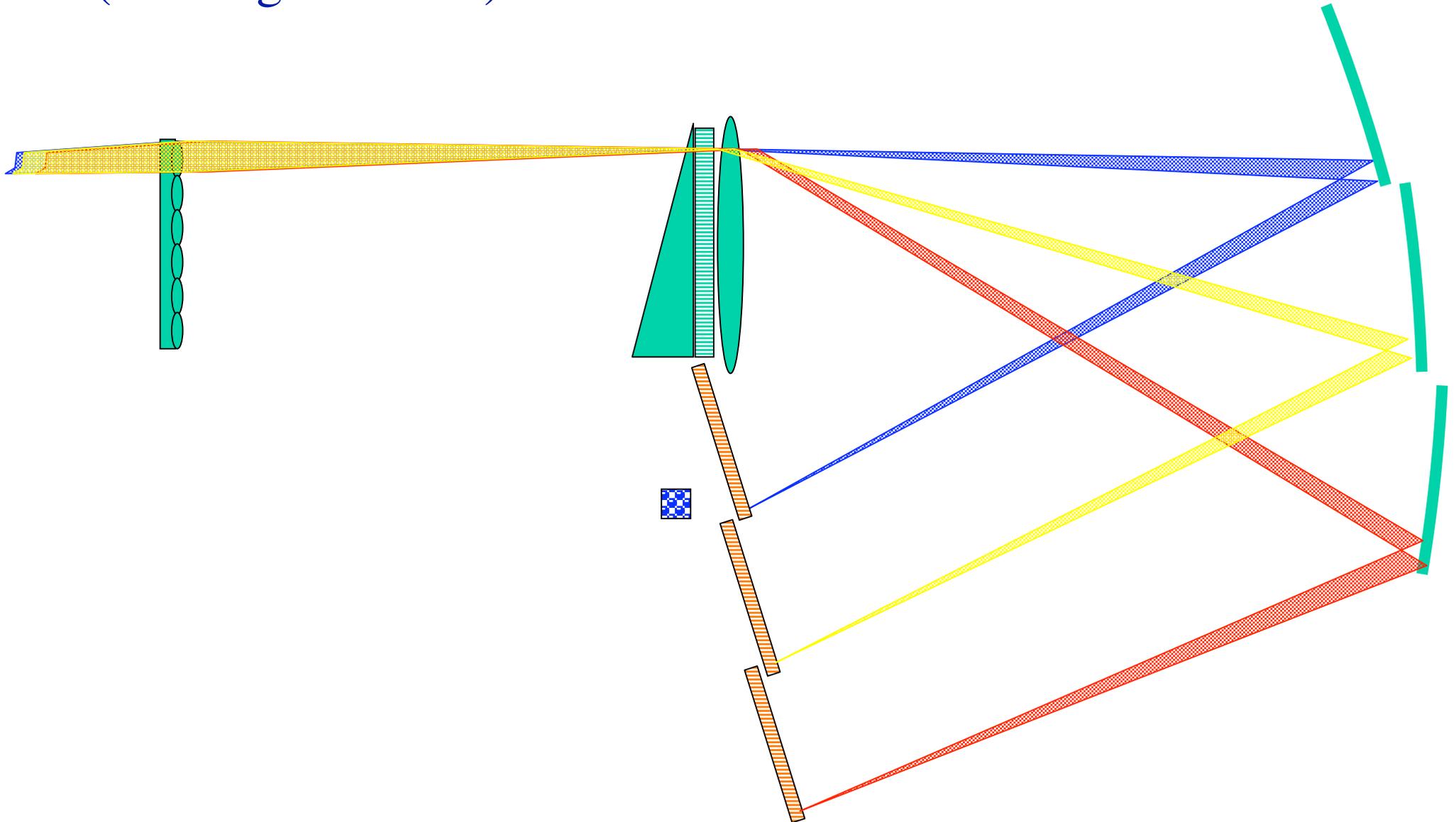


- Transformée de Fourier pour extraire le signal de chemin optique
- information de phase aussi dans les pics
- version automatisée sur GI2T ( Koechlin et al. )

# Mise en cohérence et phase



# Extension de l'analyseur de Shack-Hartmann mesure de piston et inclinaisons en lumière polychromatique ( montage Courtès)



# Quelle dimension maximale pour un hyper-télescope spatial ?

- Limitations:
  - mise en phase
    - Pas de limitation avec laser ?
    - limité par la magnitude d 'une étoile guide non-résolue
  - nombre de photons par élément résolu
    - Exemple: pulsar optique ou étoile à neutrons:
      - Diamètre pulsar du Crabe: 20km soit  $10^{-14}$  radian à 300 parsecs
      - Résolu avec 50.000 km de base
      - $M_v=18$  => assez de photons pour 20x20 pixels
      - Suppose pulsar « nu » ( hors bande d 'absorbtion ? )

# Conclusions

- Perspectives prometteuses....
- Impact prévisible considérable pour la science:
  - astrophysique
  - Exo-biologie
  - Exo-civilisations
- A quelle échelle de temps ?
  - Possibilité d 'expansion rapide après ST-3 et maîtrise du pilotage

# Quelques adresses :

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