

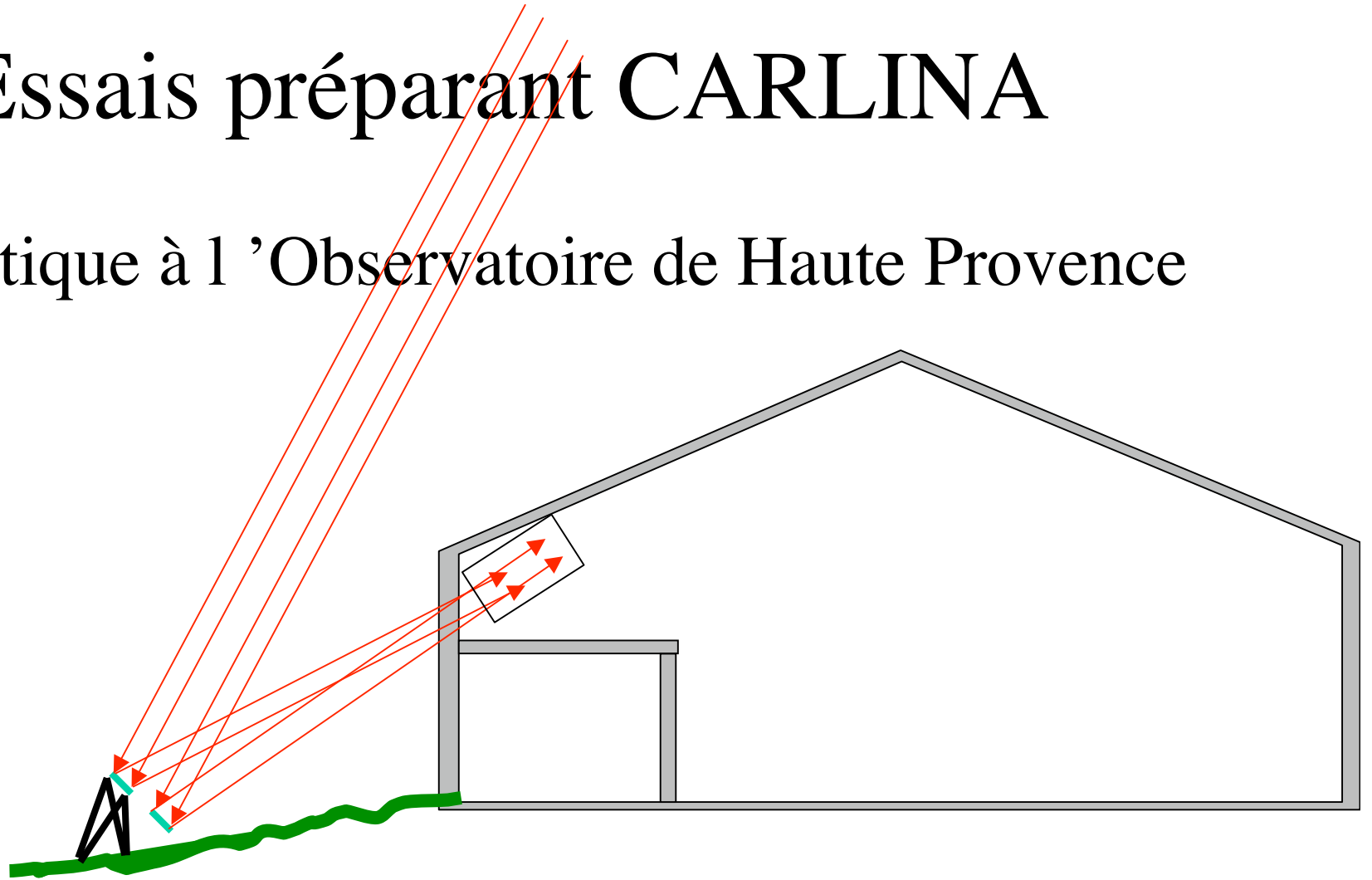
Versions spatiales d'hyper-télescopes aux diverses échelles

- 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

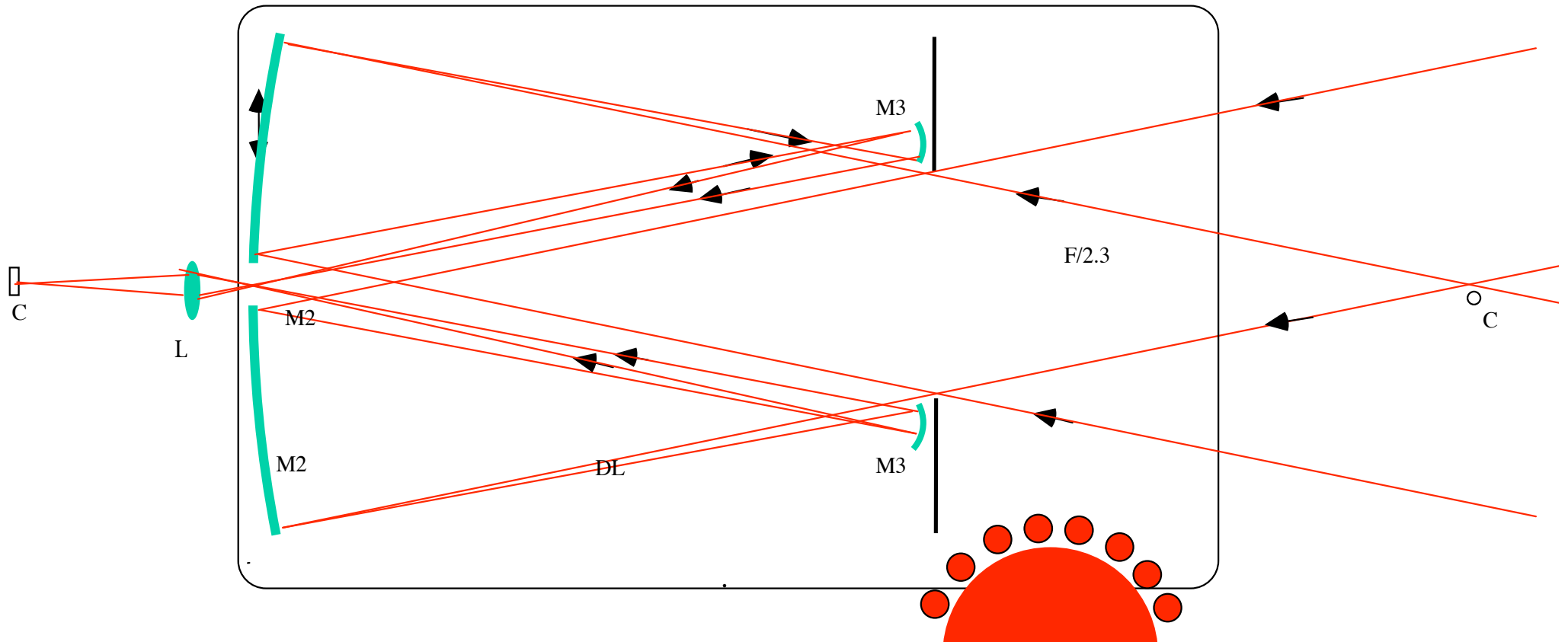
Essais préparant CARLINA

- Essai optique à l'Observatoire de Haute Provence



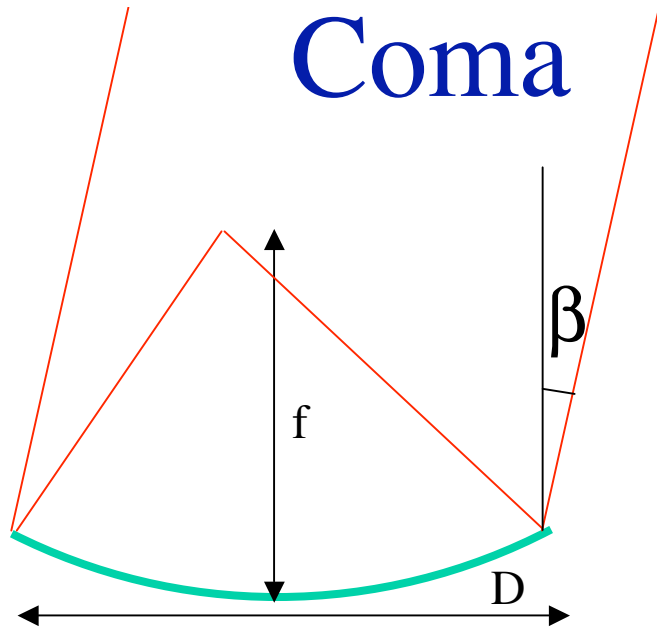
- Essai au radio-télescope d'Arécibo ?

Combineur de faisceaux collimatés



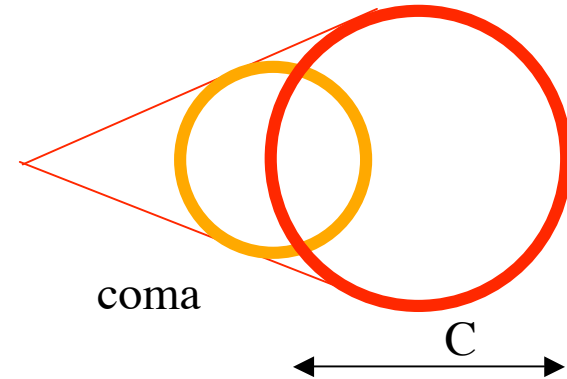
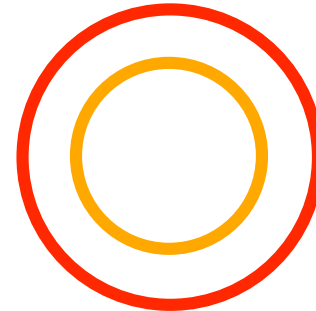
- Utilisable avec éléments M1 plans, mais.....
- Correcteur Mertz inutilisable:
 - nécessite lignes à retard
 - éclatement du point de croisement (coma)

Coma



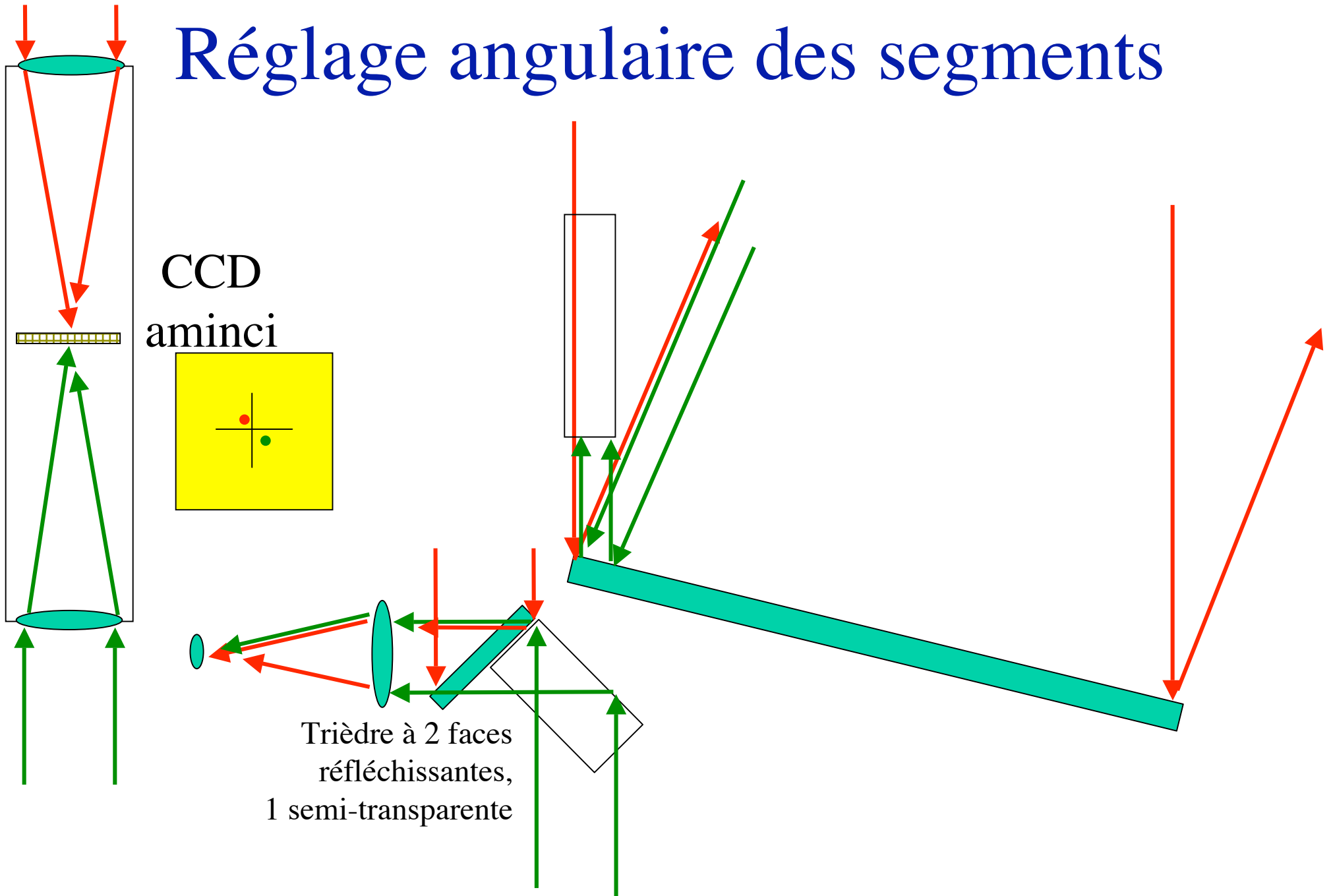
$$C = (1/16) f (D/f)^2 \beta$$

Ouverture annulaire

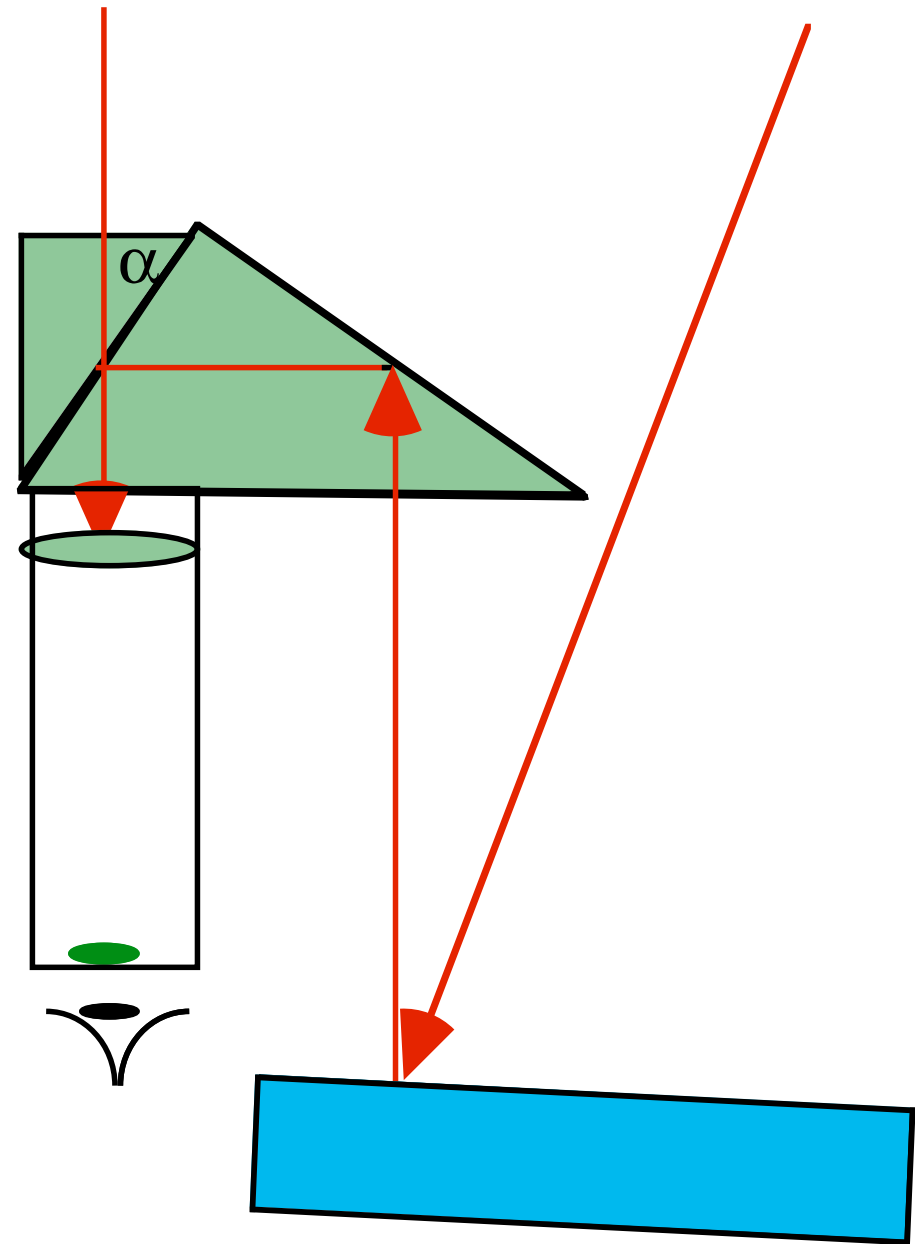


- Exemple pour Arécibo:
- distance focale 130m
- diamètre d'ouverture 60m
- demi-champ β 3.7 degrés
- largeur de l'aigrette 0,112
- Delta 10 mm

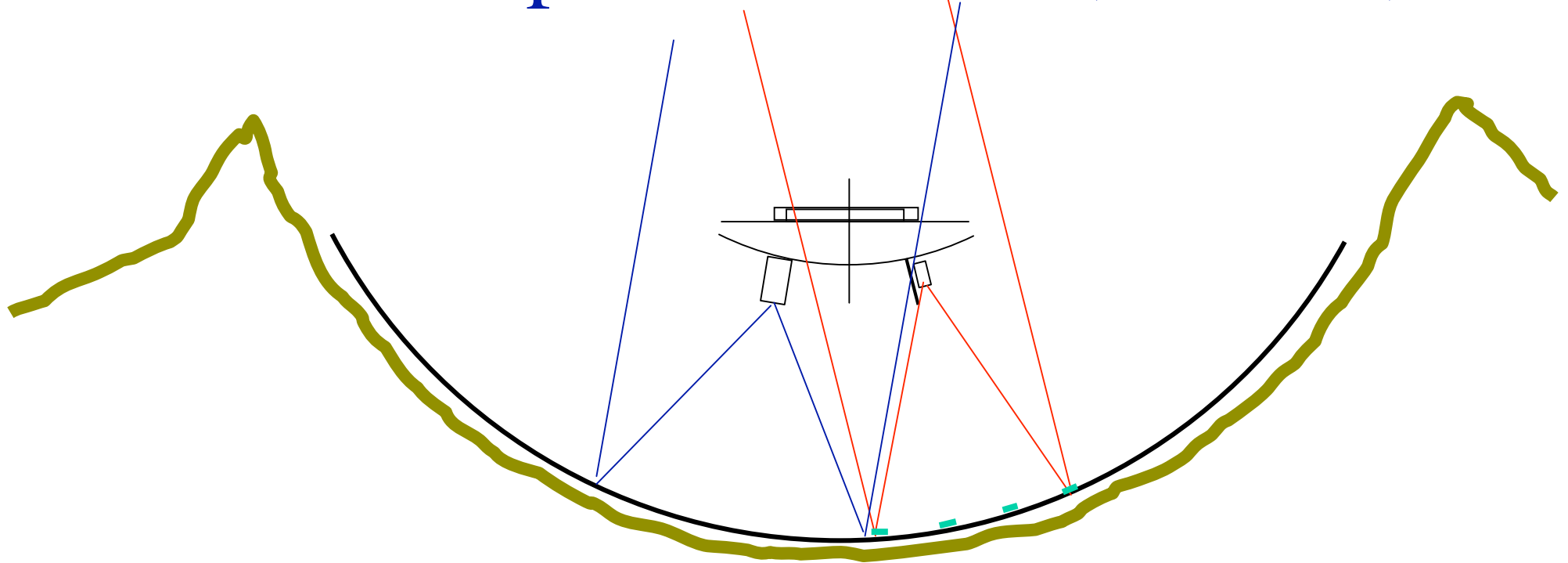
Réglage angulaire des segments



Viseur de réglage



Le radio-telescope d 'Arecibo (Porto Rico)

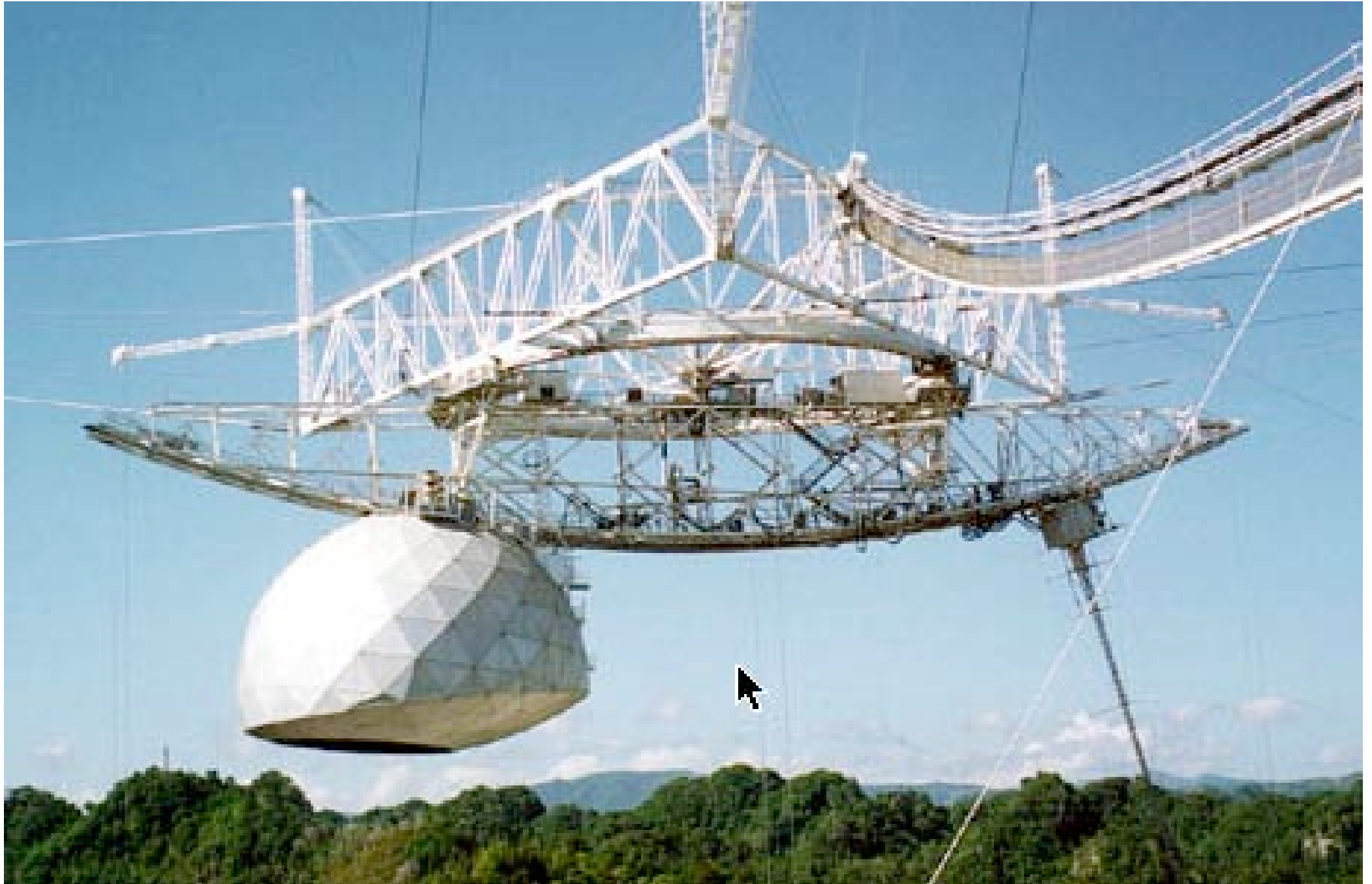


- « bol » de 305m, focale 130m
- Découverte du pulsar binaire (prix Nobel de Hulse et Taylor)
- Plusieurs détecteurs mobiles, $z < 20^\circ$
- Utilisable pour essais d 'hyper-télescope optique ?

Radio-télescope d 'Arécibo (Porto Rico)



Rail focal orientable



Sous le miroir



Deuxième chariot et détecteur

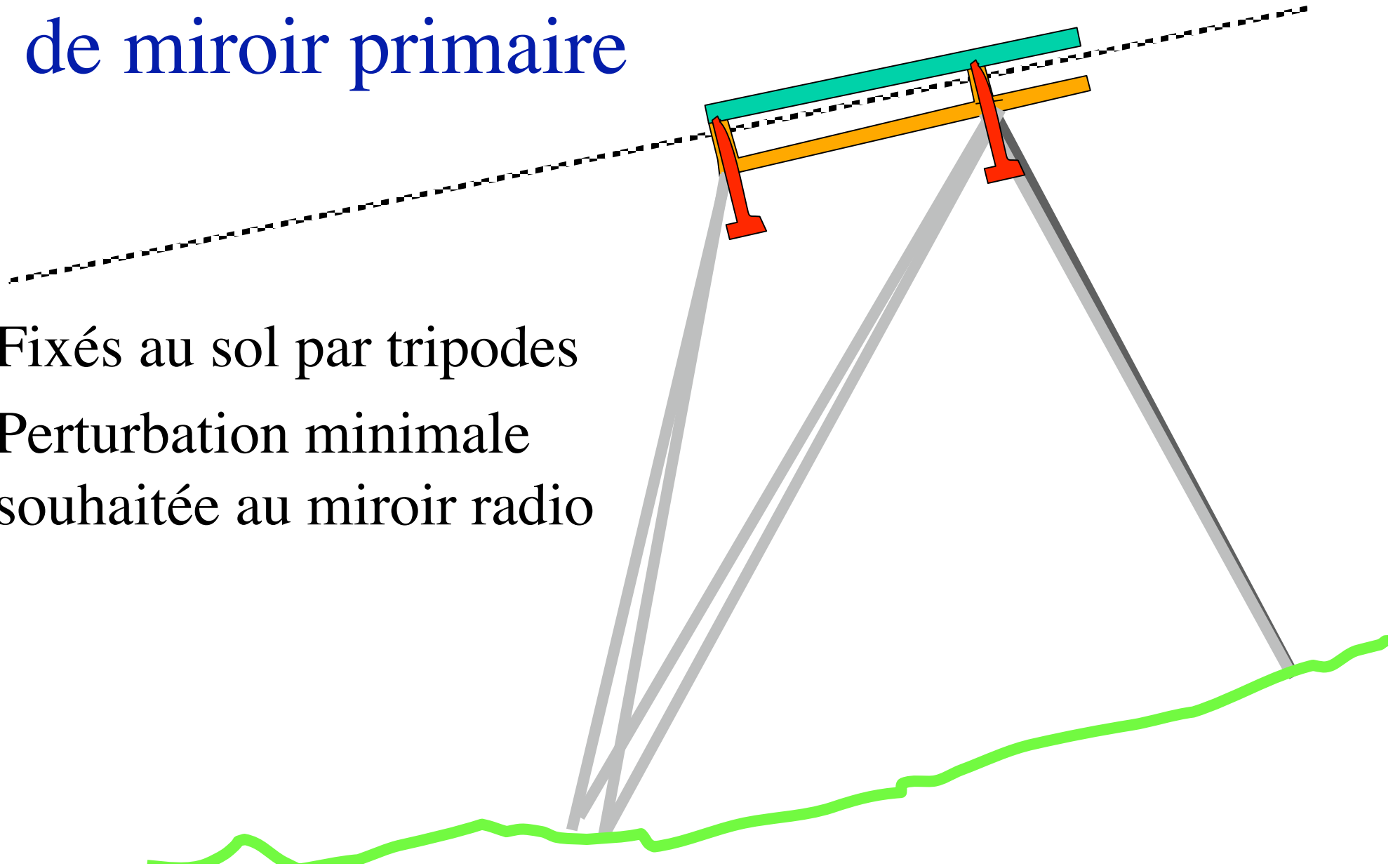


Essais à Arecibo ?

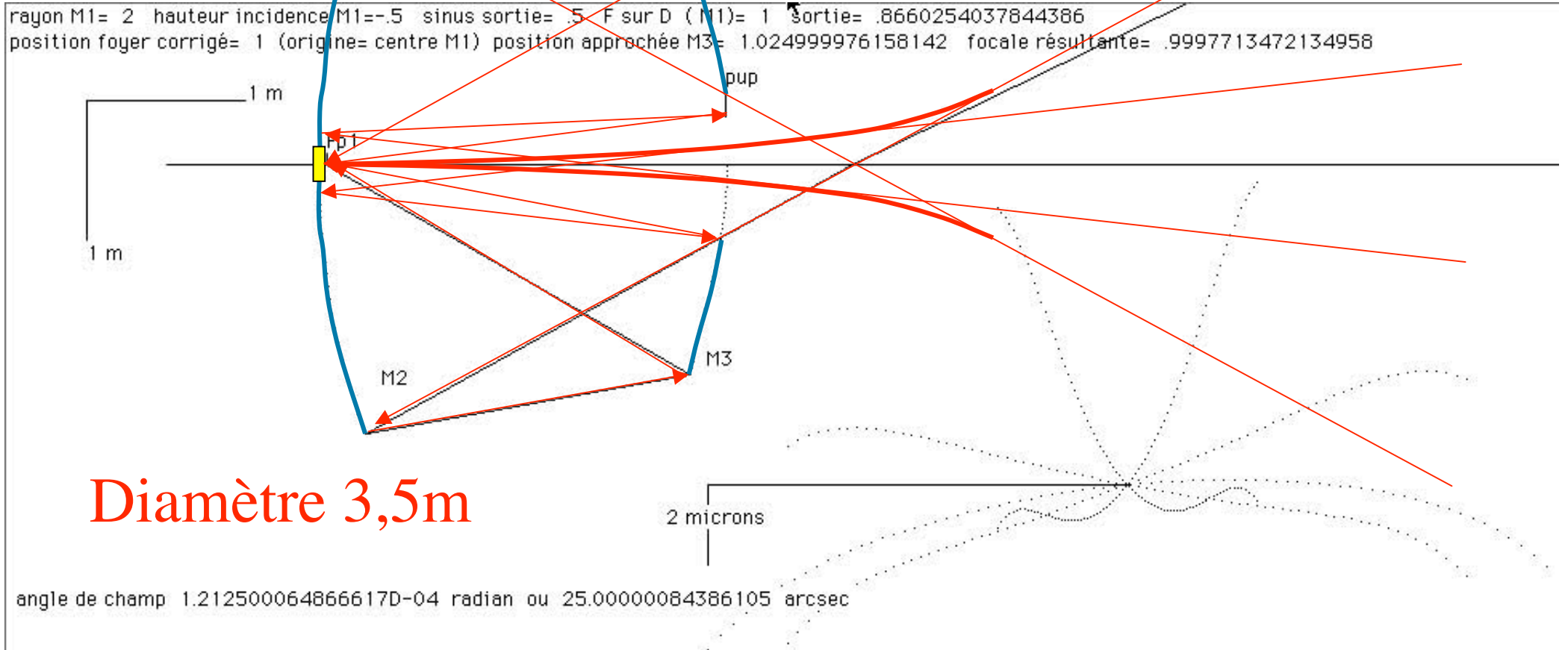
- caméra suspendue
- Utiliser le guidage existant (précision 1mm)
- Erreurs de guidage et foyer tolérables, période 1s
- Déclinaison de -2° à $+38^{\circ}$ (Sirius, Algol, exclus, mais Tau Boo avec planète à 10^{-4} , 3 m“)

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 :

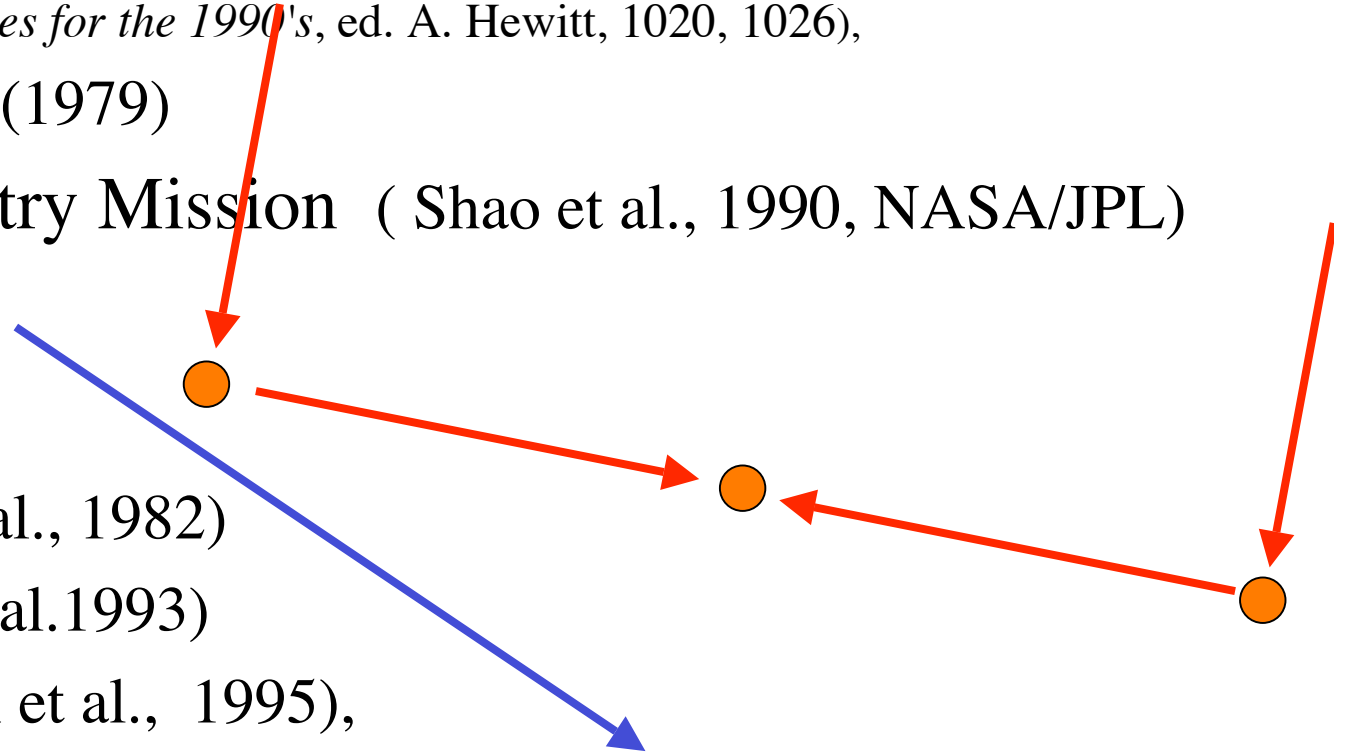
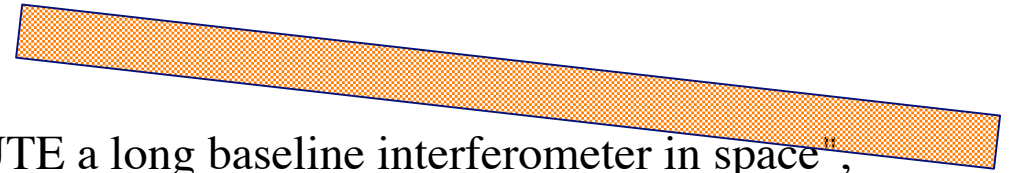
- FLUTE (Labeyrie, 1980 "FLUTE a long baseline interferometer in space", Labeyrie, A., Praderie, F., Steinberg, J., Vatoux, S. & Wouters, F., 1980, Proc. KPNO conf., *Optical and Infrared telescopes for the 1990's*, ed. A. Hewitt, 1020, 1026),
- Bracewell & McPhie (1979)
- Space Interferometry Mission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

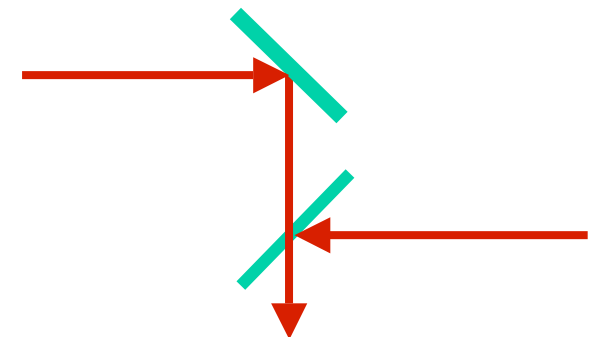
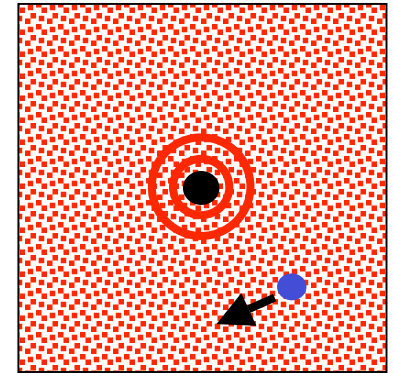


Historique des projets pour détecter des exo-planètes

- 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

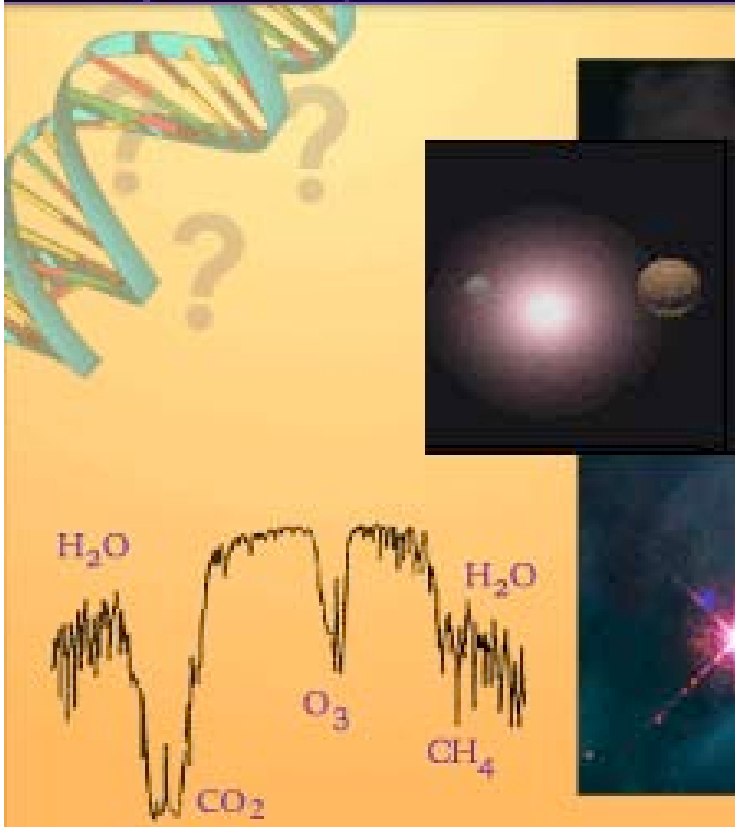
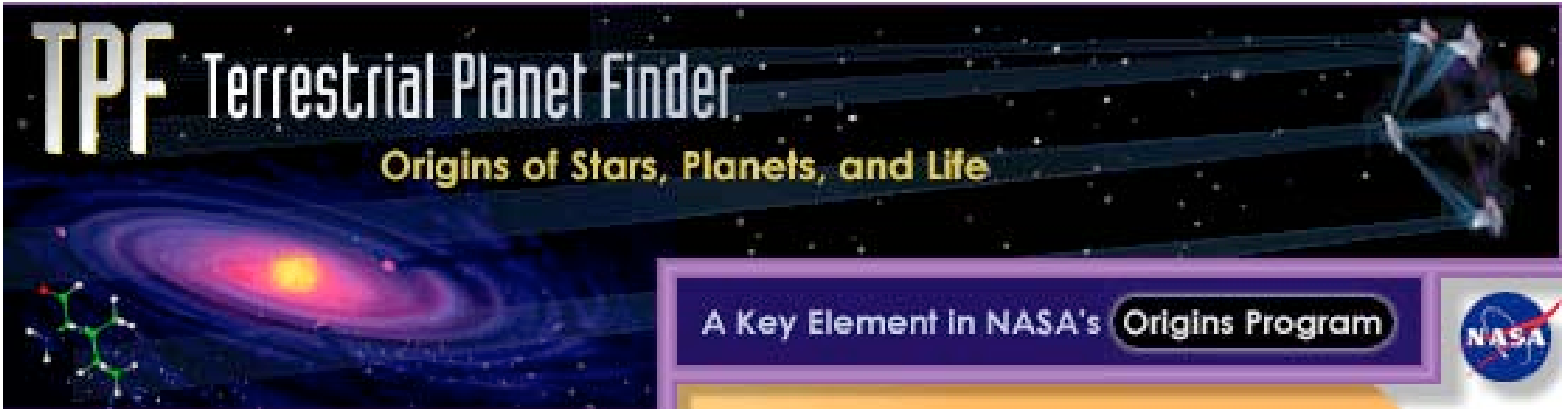


DARWIN (Mariotti et al.)

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

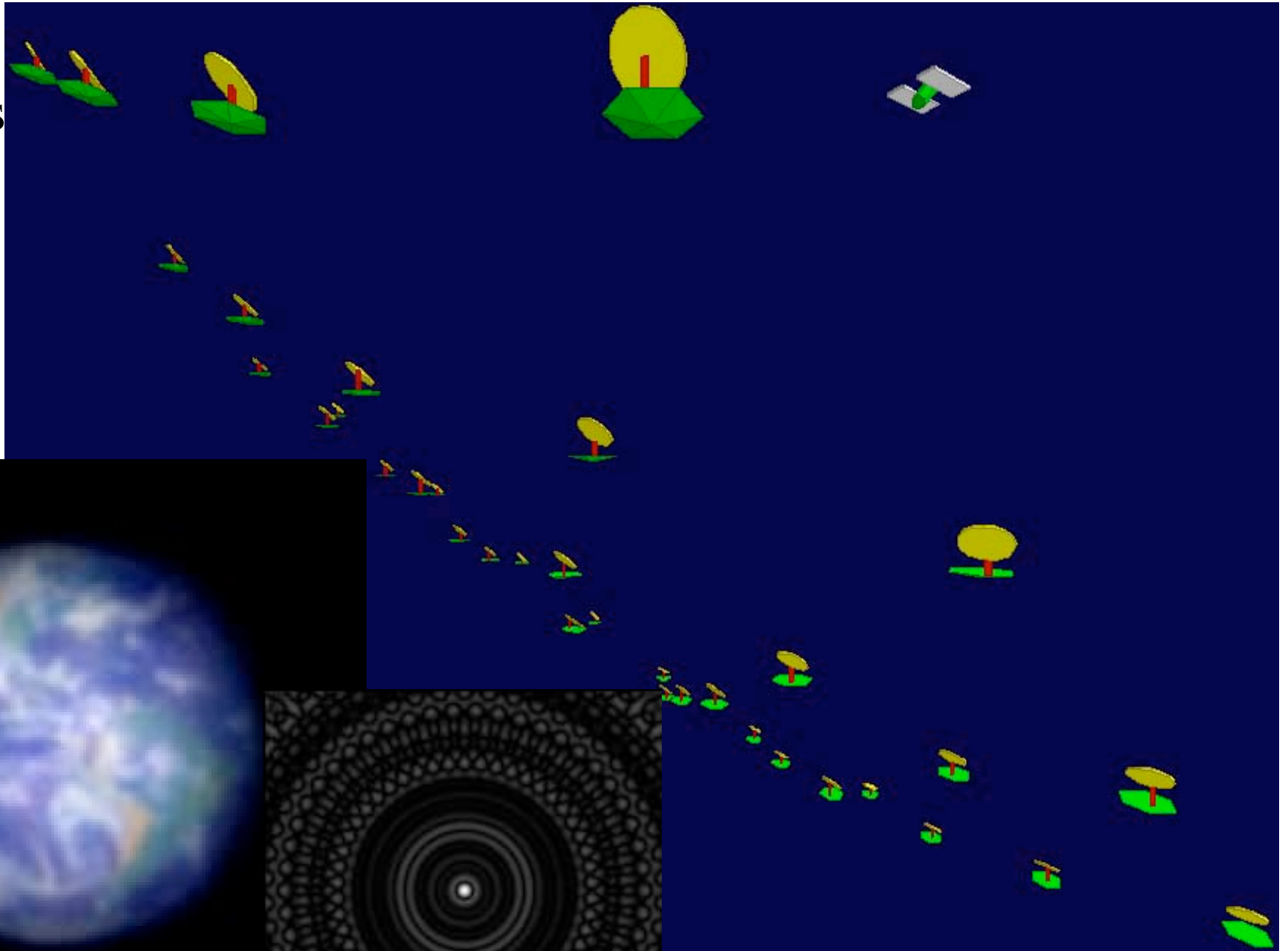
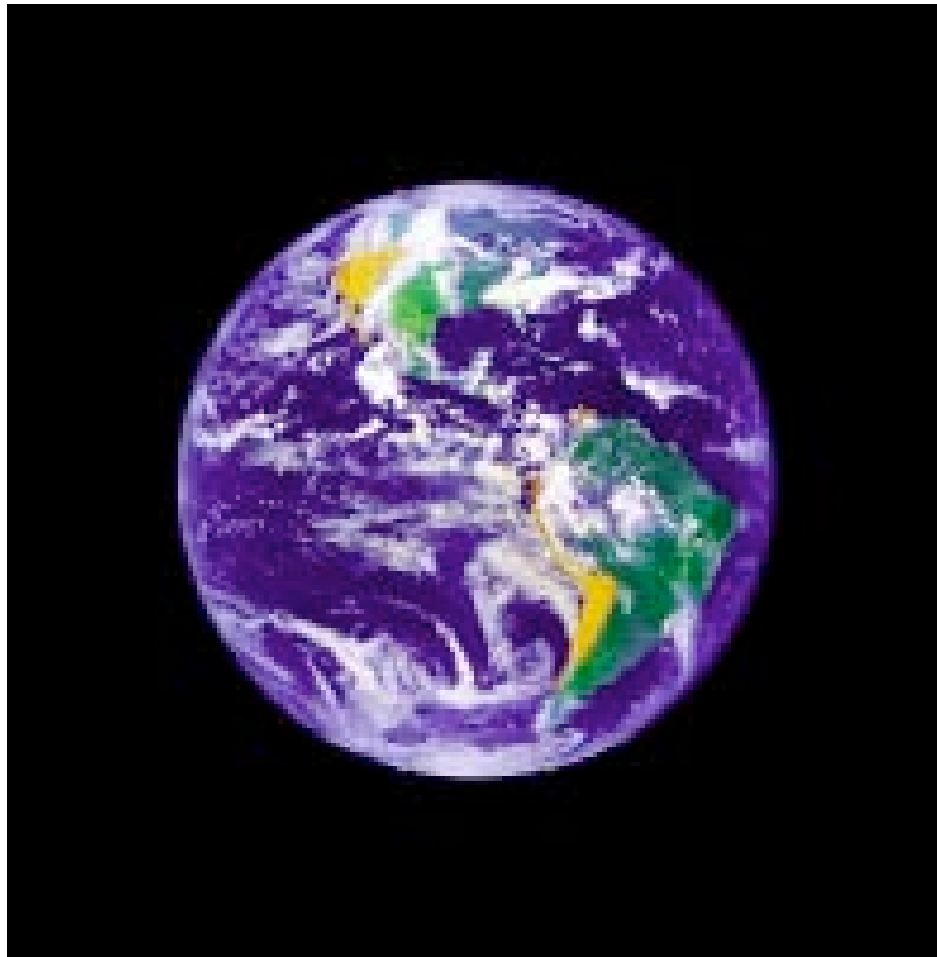


Image simulée d'une Terre vue à 10 années lumière par un hyper-telescope de 150km

150 miroirs de 3m,
pose 30mn

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



objet

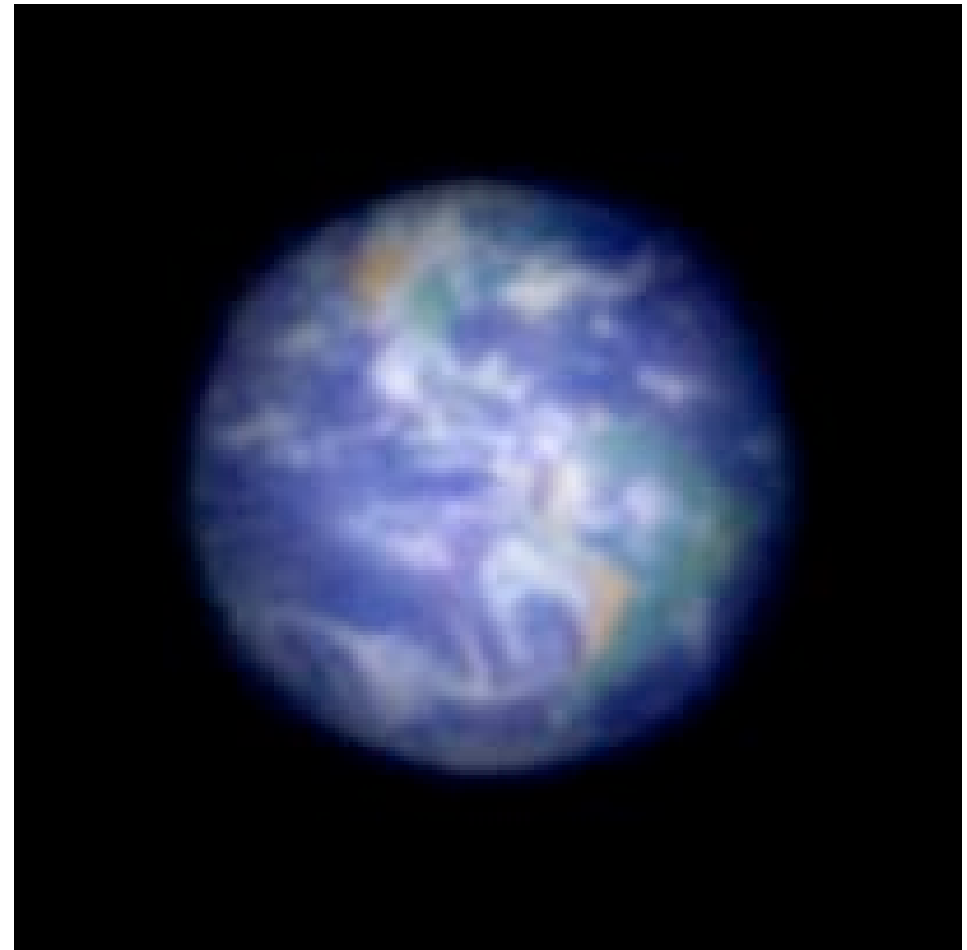


image brute

Descriptions

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

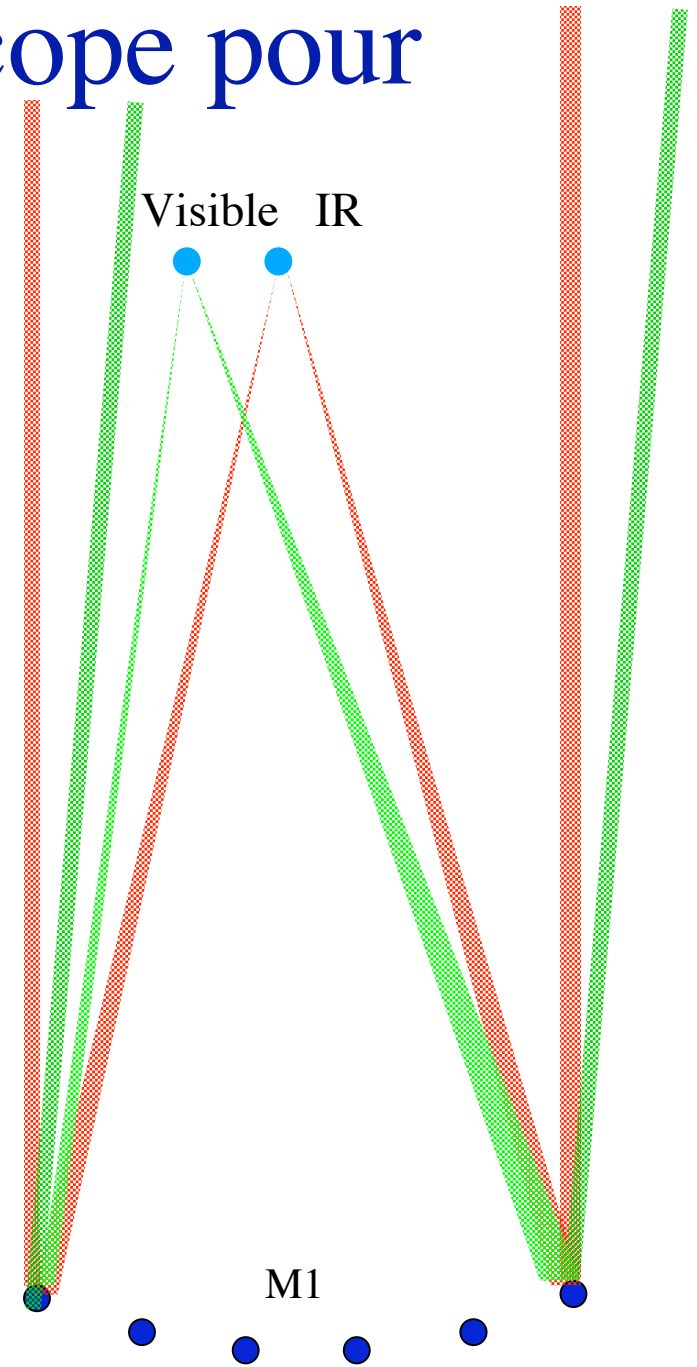
"Direct searches: imaging, dark speckle and coronagraphy", Labeyrie, A., 1998, NATO ASI'98 in *Planets outside the solar system*, 5-15 may, Cargèse, Corse

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 ?

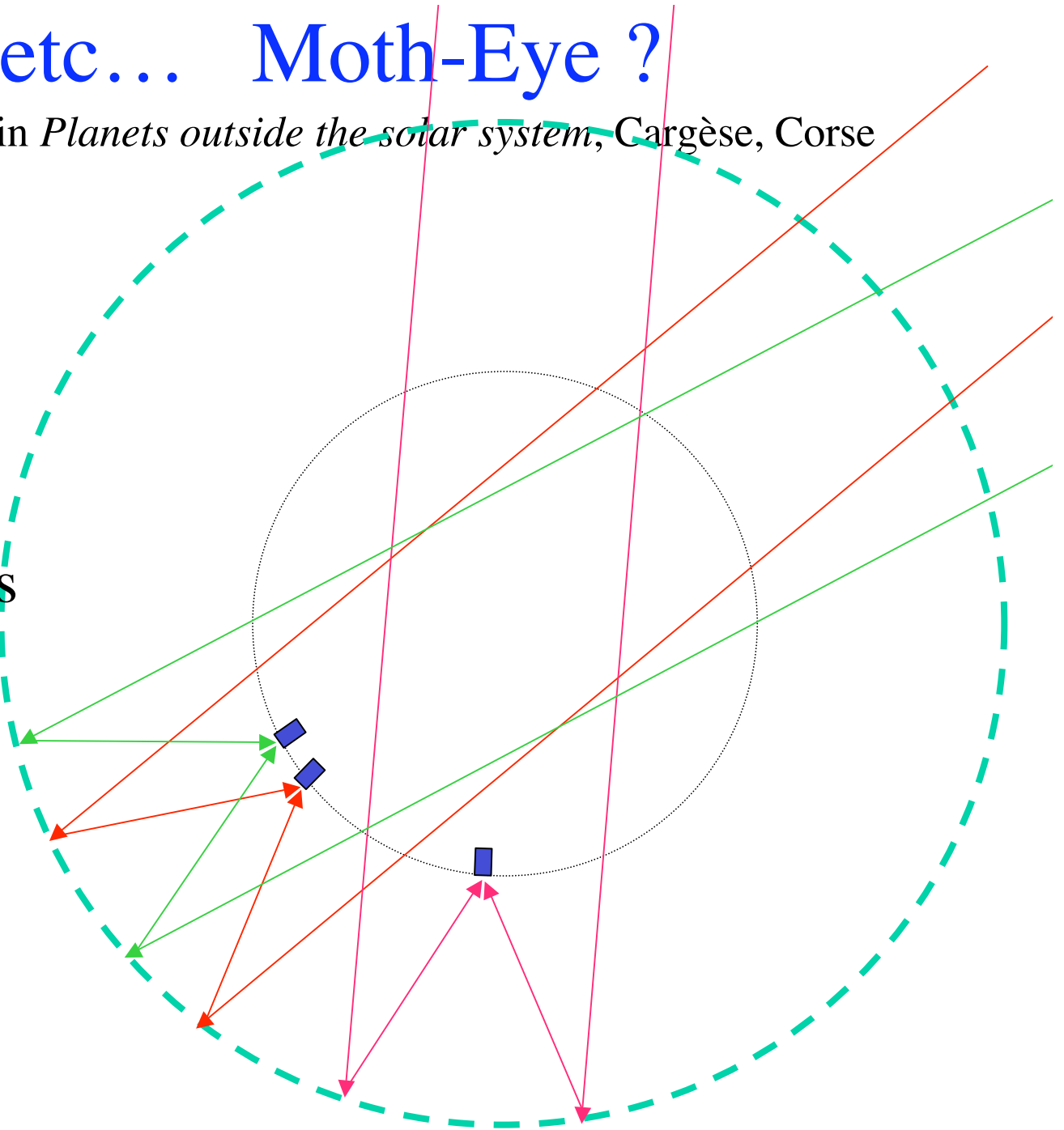
- Miroir M1, sphérique, dilué
- Au moins 18 ou 36 elements
- Alimente plusieurs stations focales
- Correcteur de champ et densifieur de pupille dans chaque station
- A F/2, diamètre du correcteur est 1% de M1
- Imagerie nécessite plus de free-flyers, mais plus petits et simplifiés



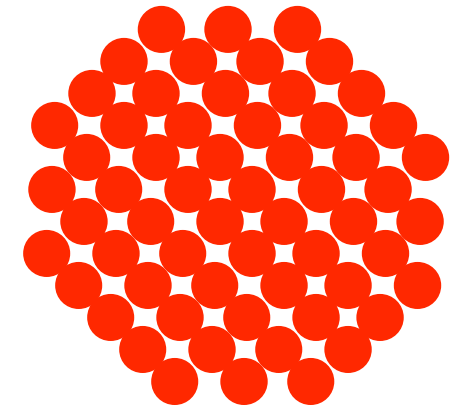
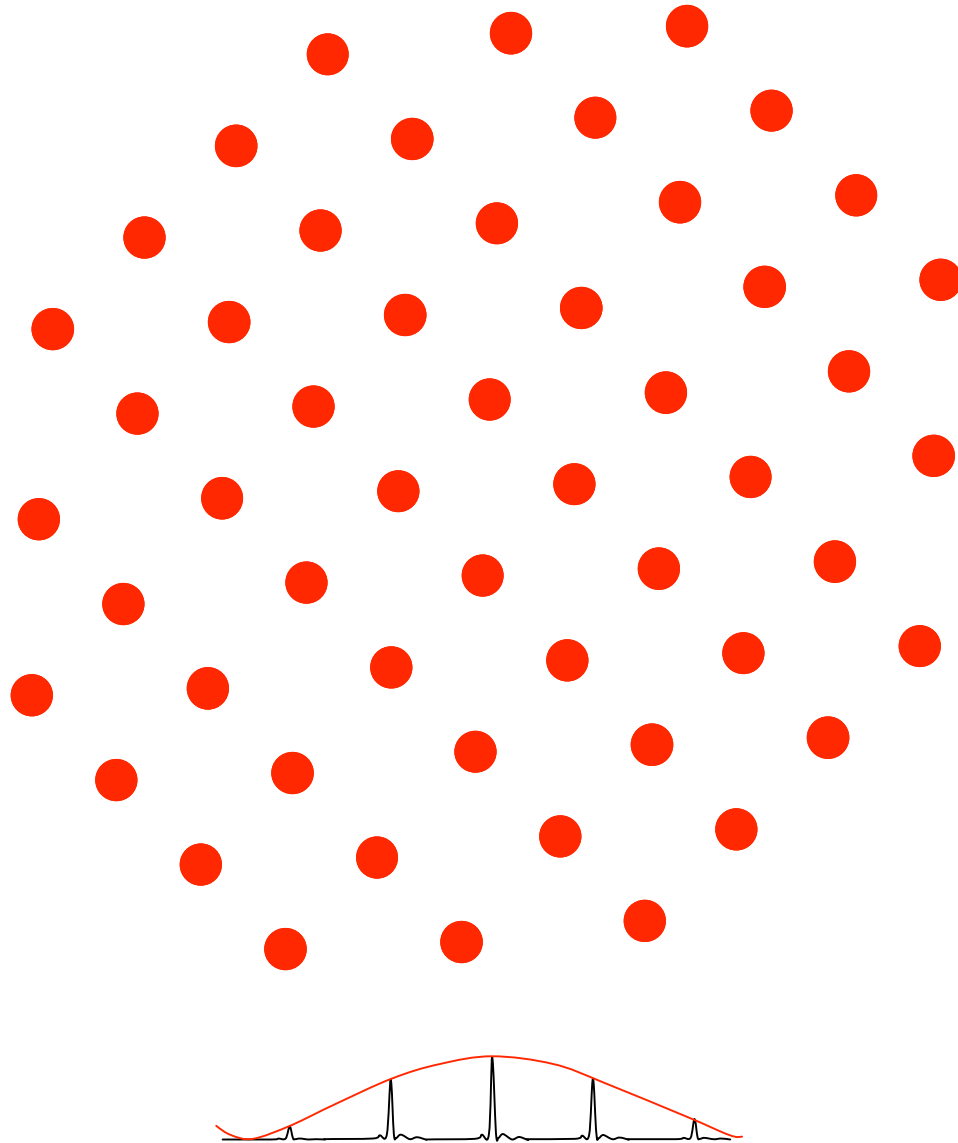
Après EED, EEI, etc... Moth-Eye ?

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

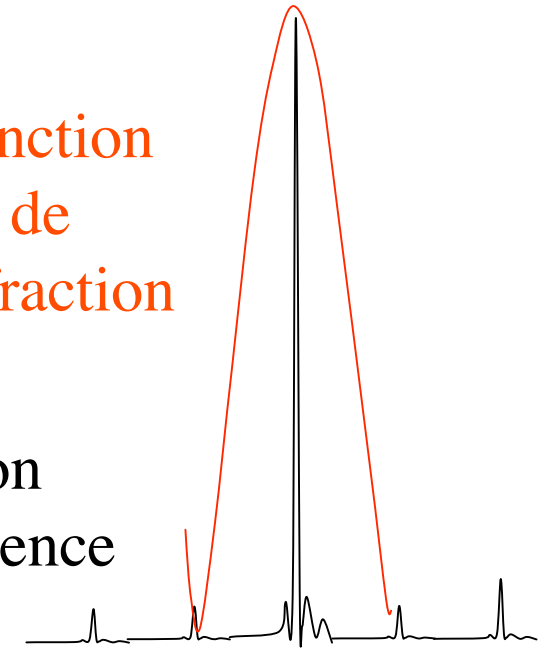


Densifier la pupille pour intensifier l'image

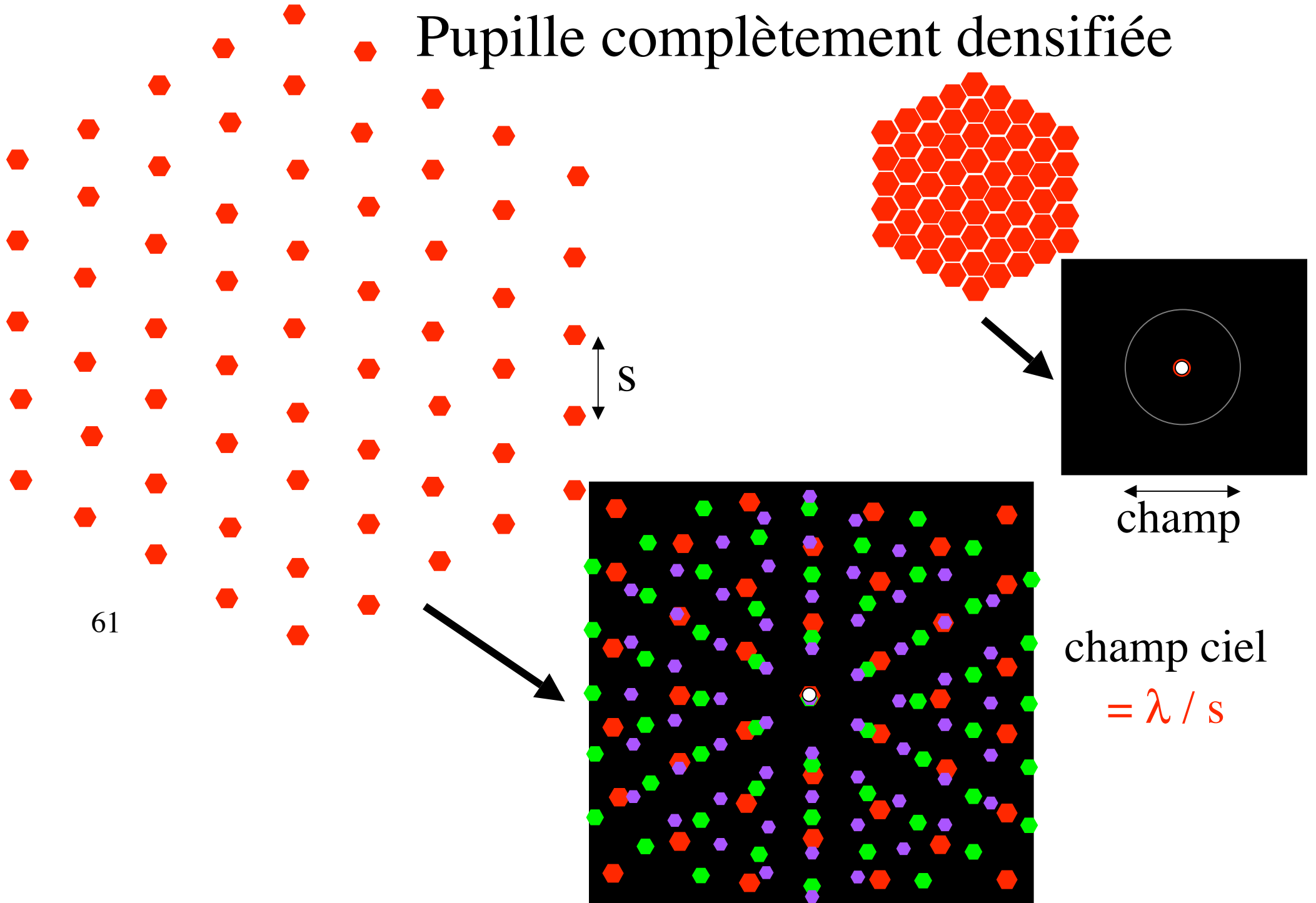


Fonction
de
diffraction

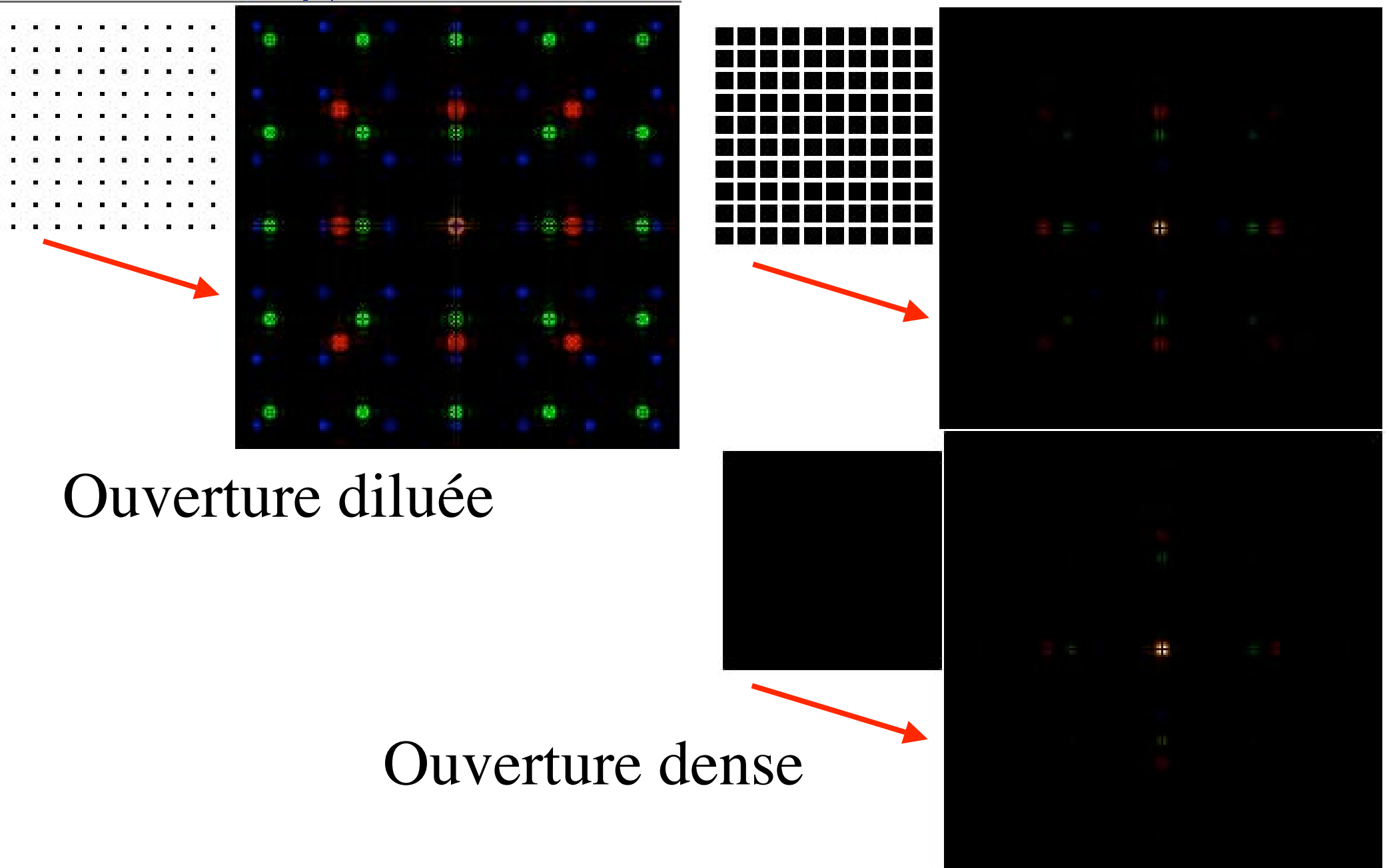
Fonction
d'interférence



Pupille complètement densifiée



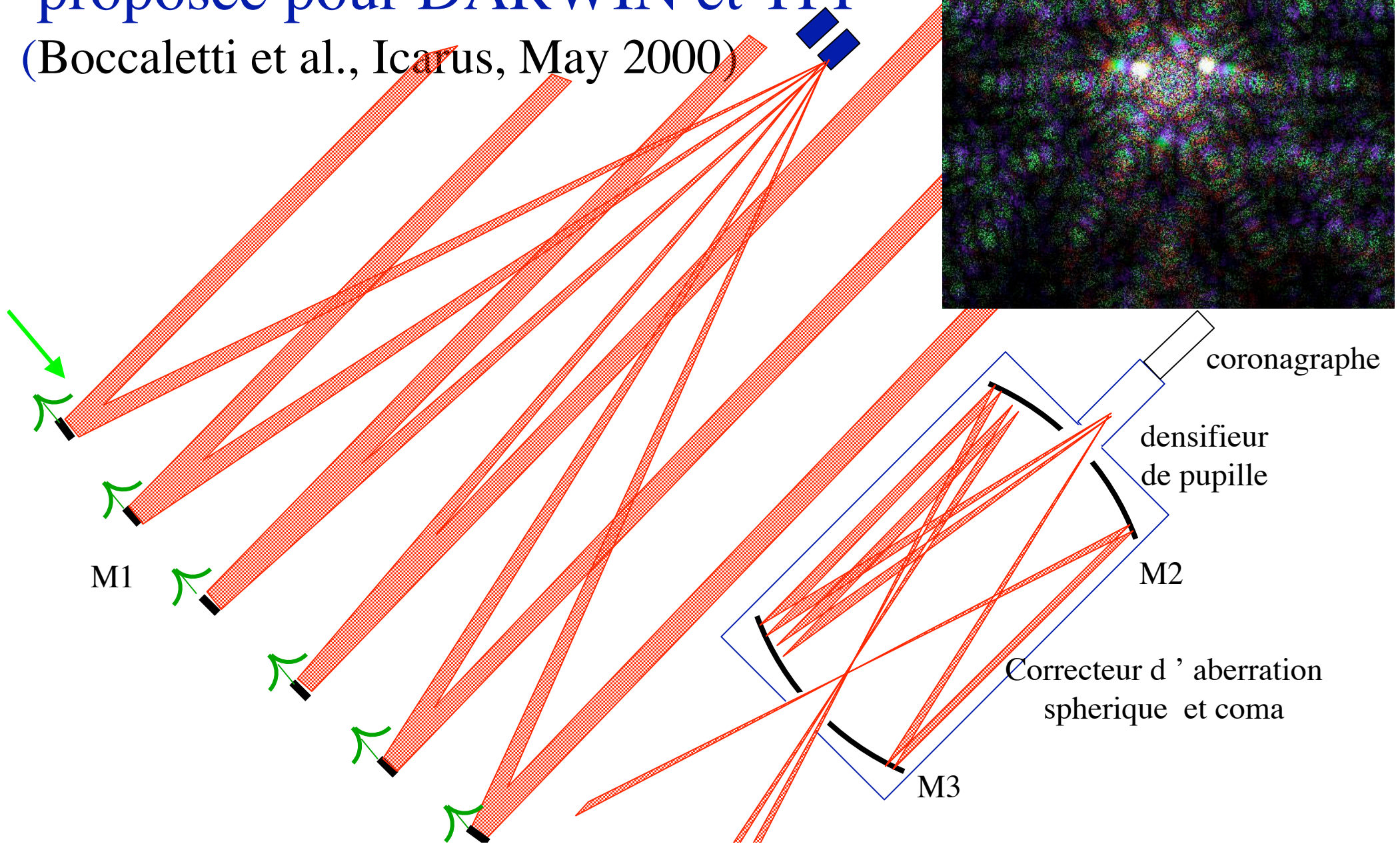
Figures de diffraction calculées



Ouverture diluée

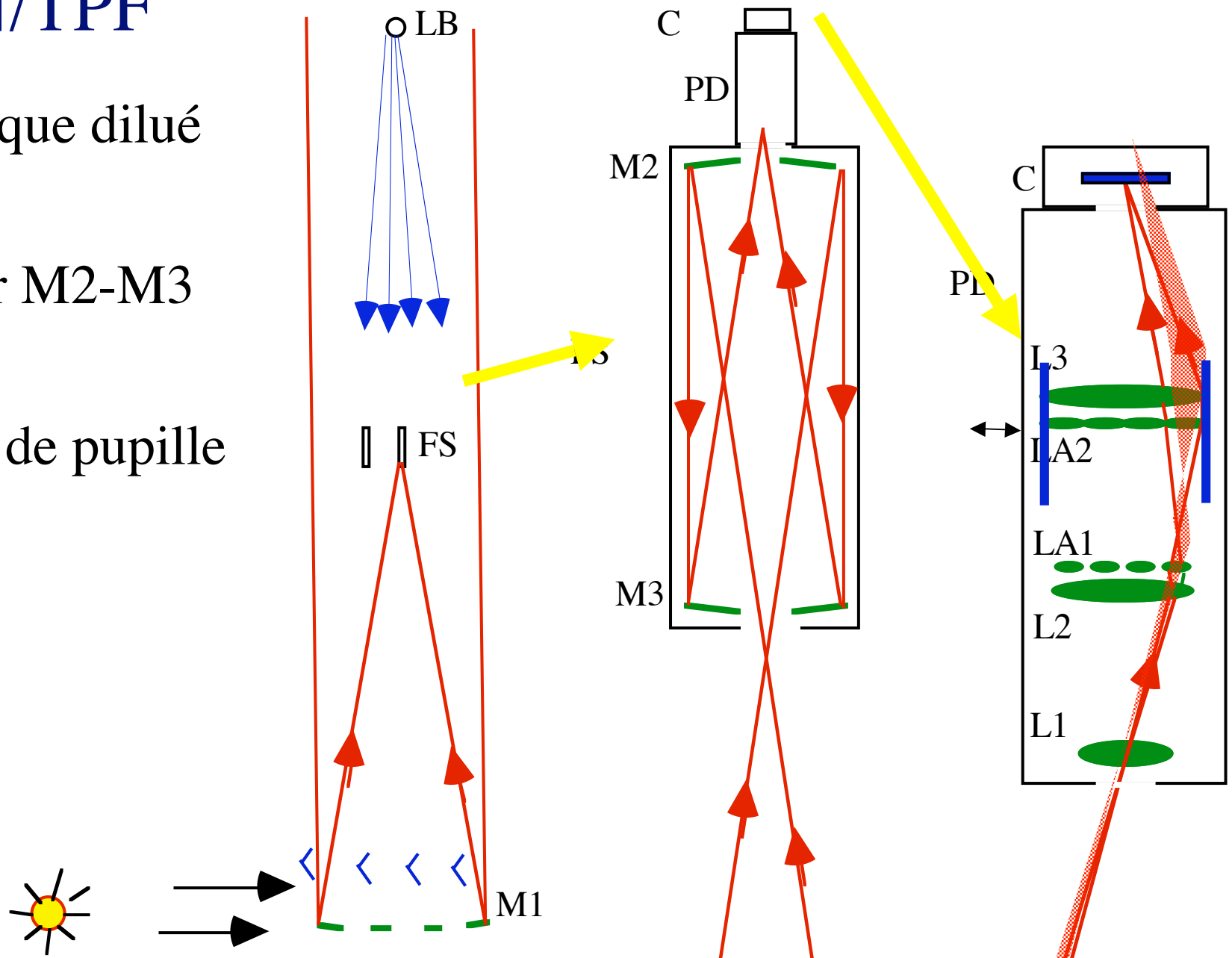
Ouverture dense

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



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

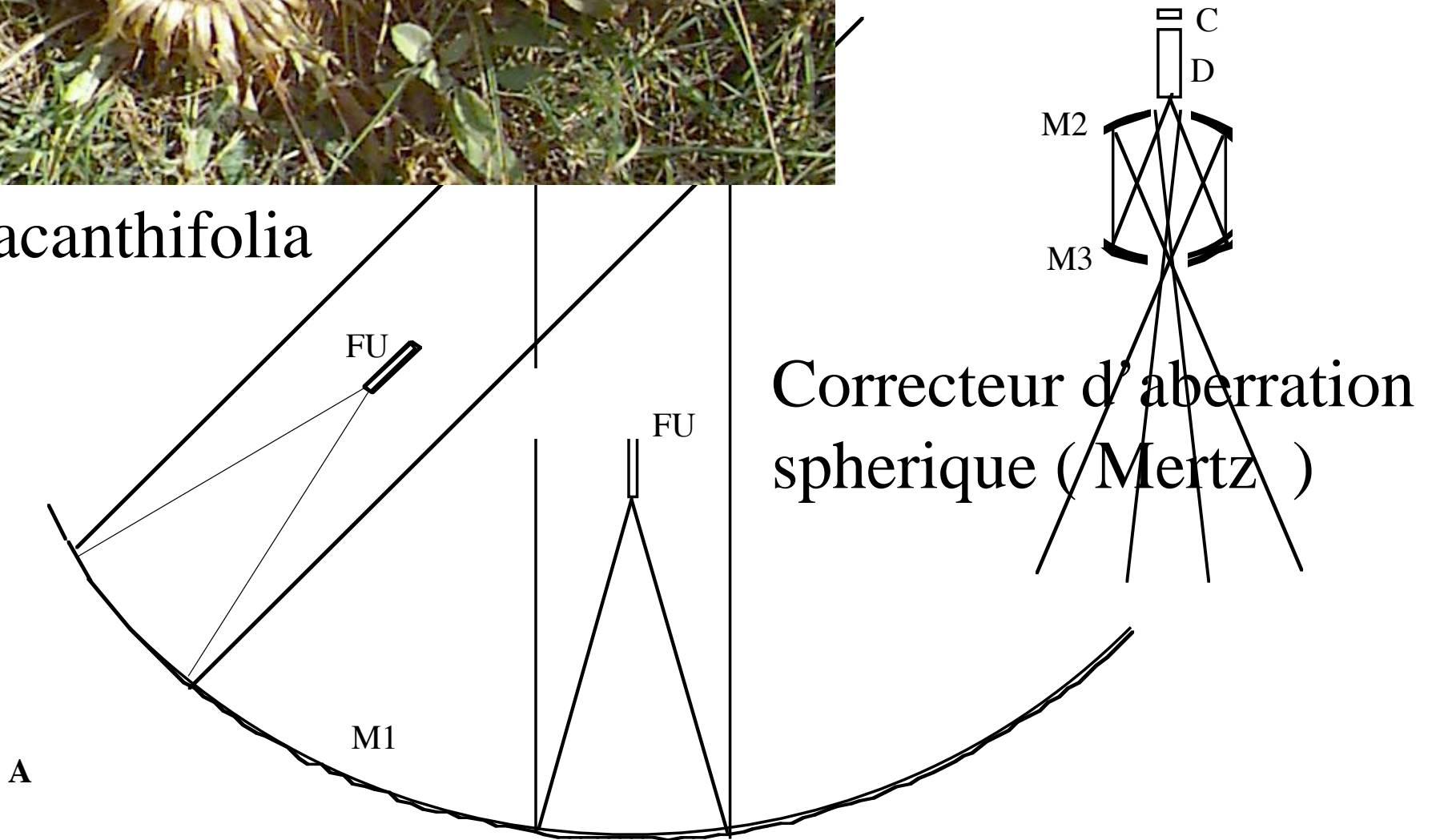
- M1 sphérique dilué
- Correcteur M2-M3
- densifieur de pupille



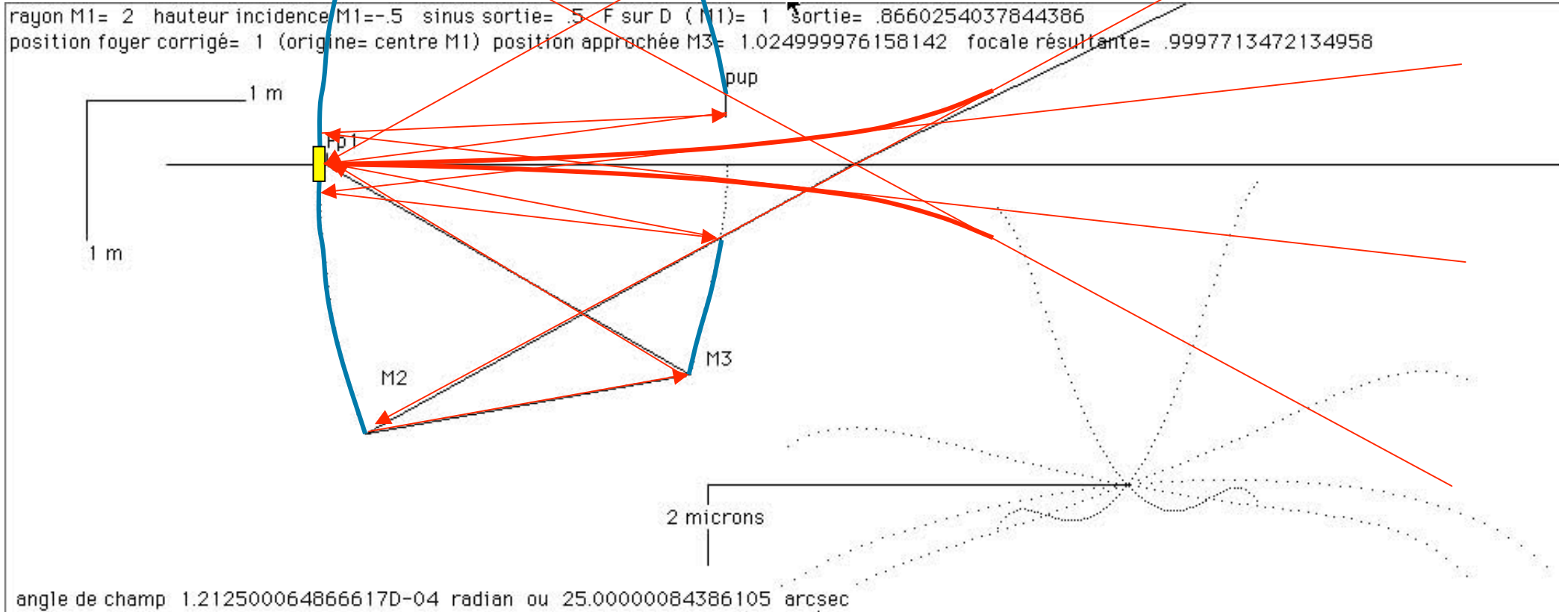


CARLINA, un hyper-telescope au sol

Carlina acanthifolia



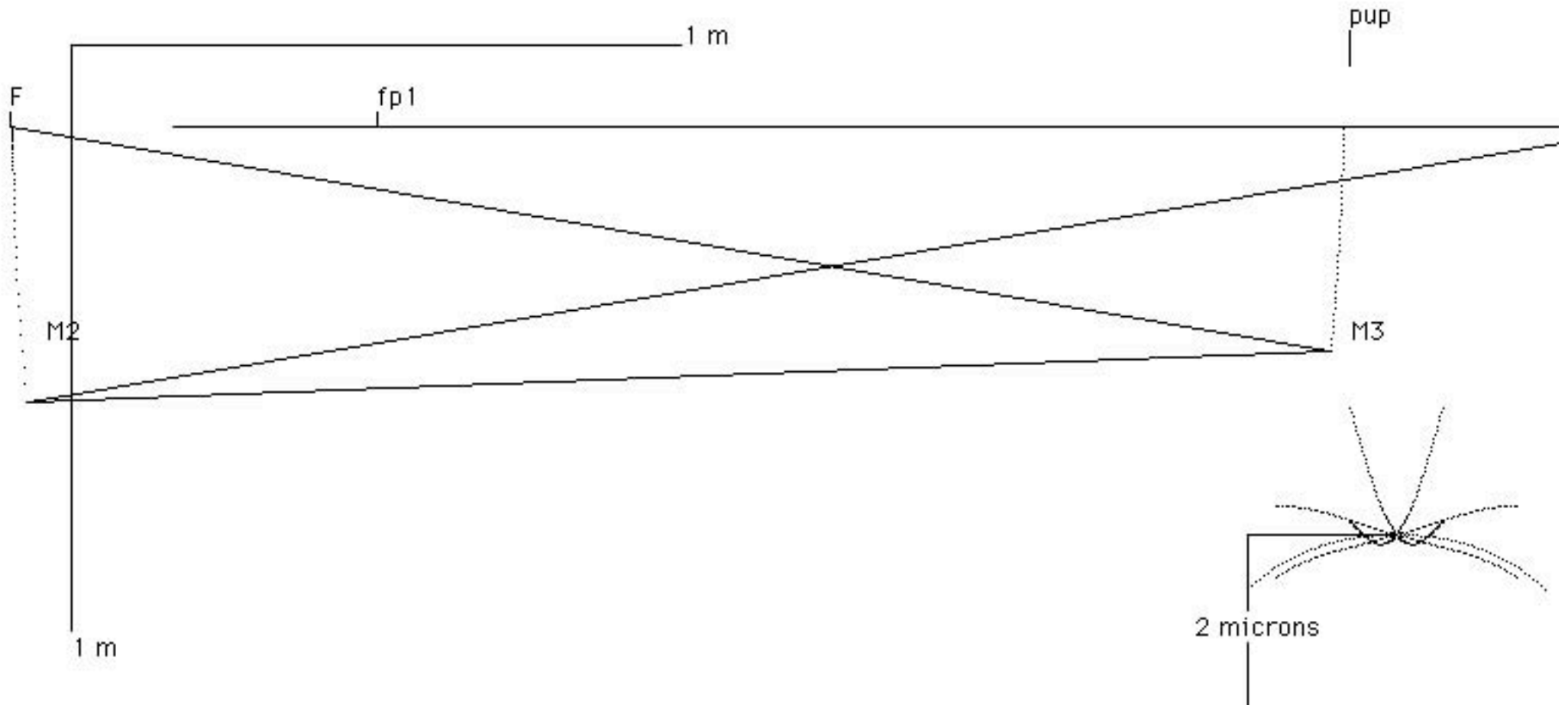
Correcteur d'aberration à f/1



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

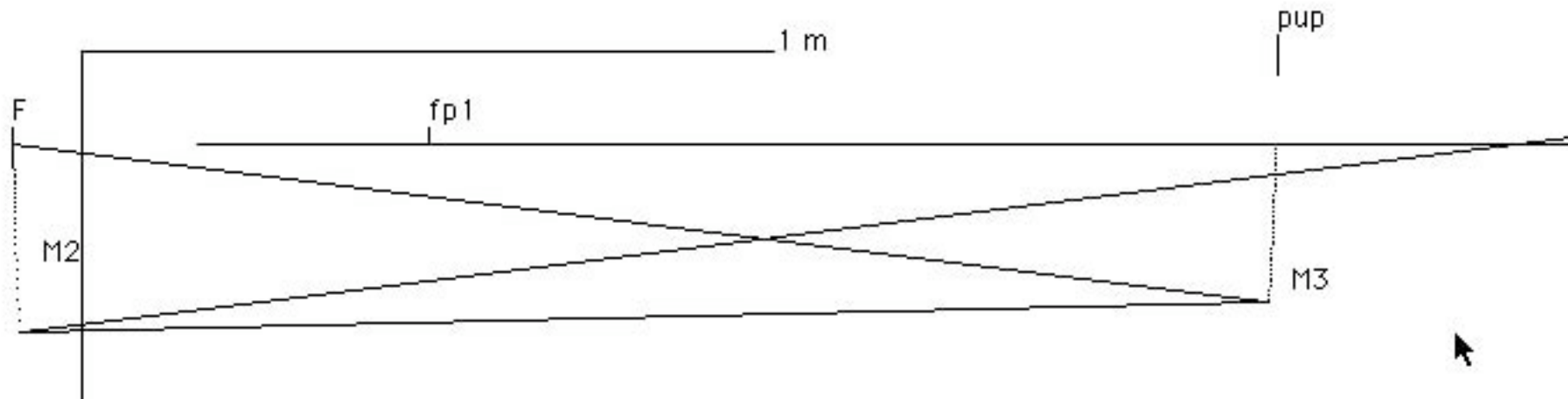
Correcteur à F/3: 0,5% du diamètre de M1

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

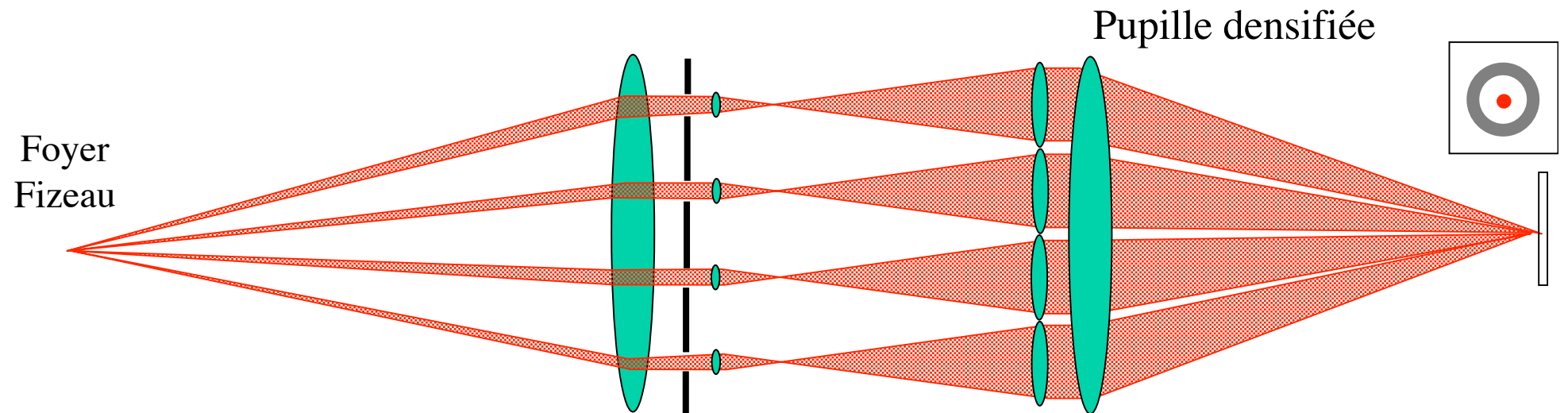


Correcteur à F/4: 0,25% du diamètre de M1 (2,5m pour 1000m)

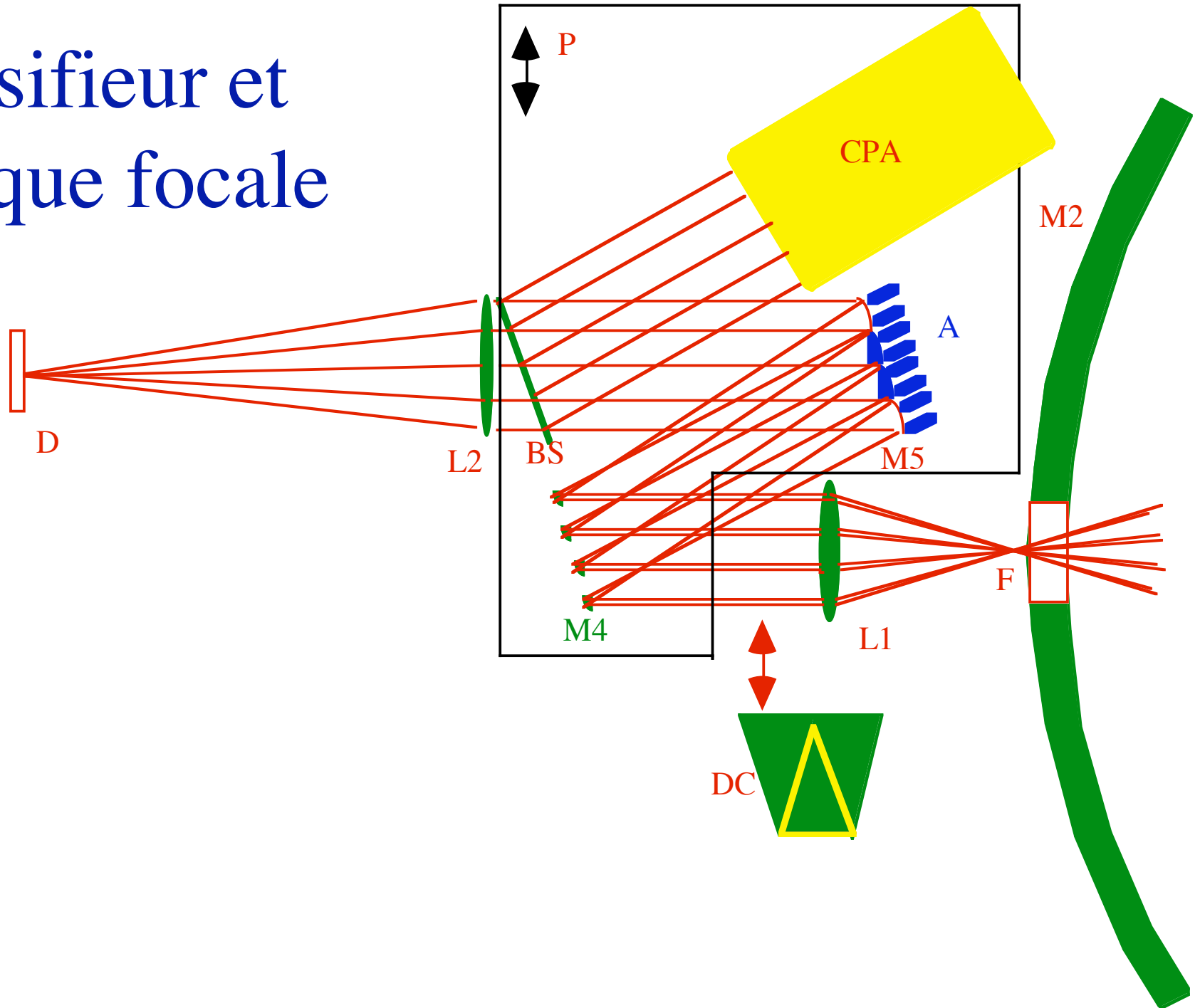
rayon M1= 16 hauteur incidence M1=-1 sinus sortie= .125 F sur D (M1)= 4 sortie= 3.968626966596886
position foyer corrigé= 7.99399995803833 (origine= centre M1) position approchée M3= 8.01220035552978



Densifieur de pupille



Densifieur et optique focale



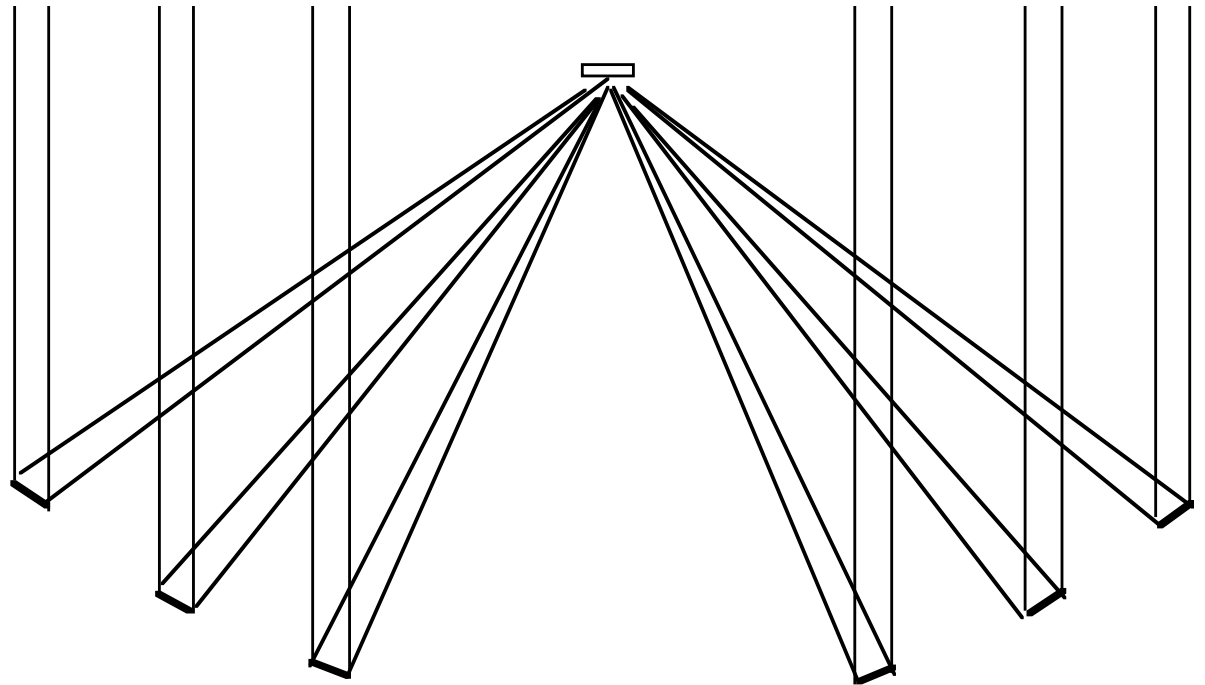
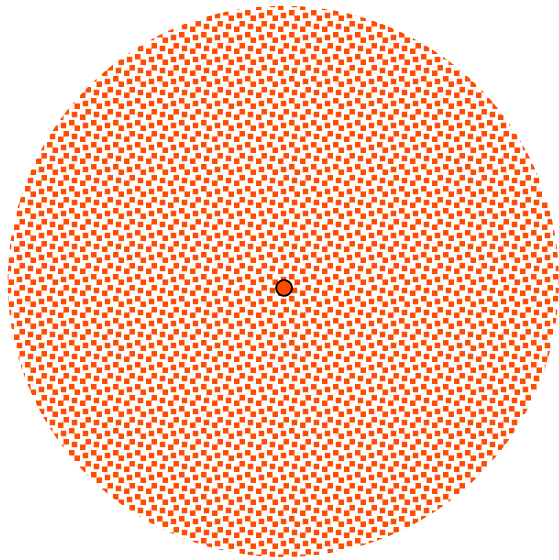
Mise en phase

- 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

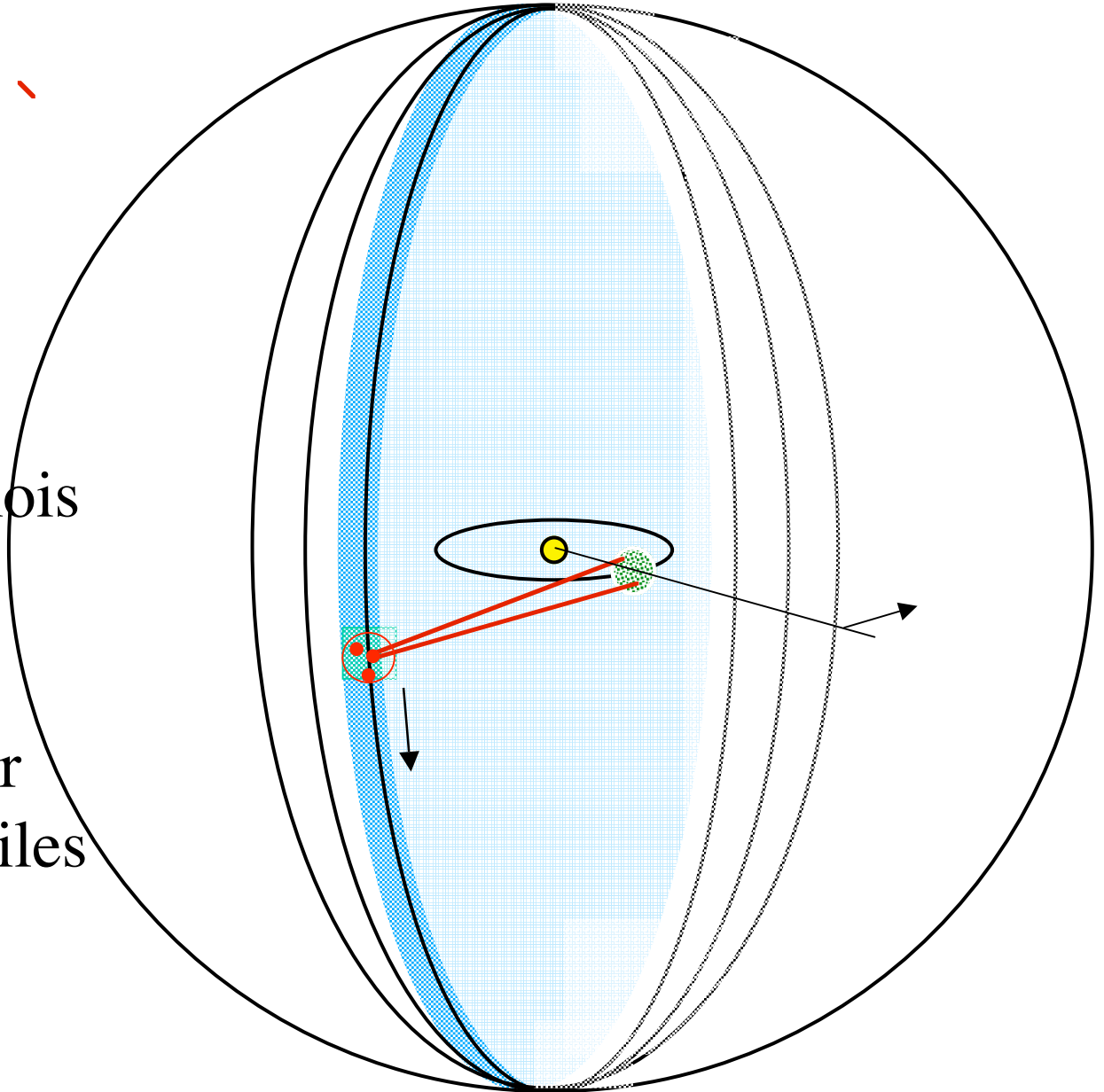
- L' image Fizeau directe est inutilisable : la lumière va surtout dans le large halo plutôt que dans le pic d'interférence



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

Couverture céleste

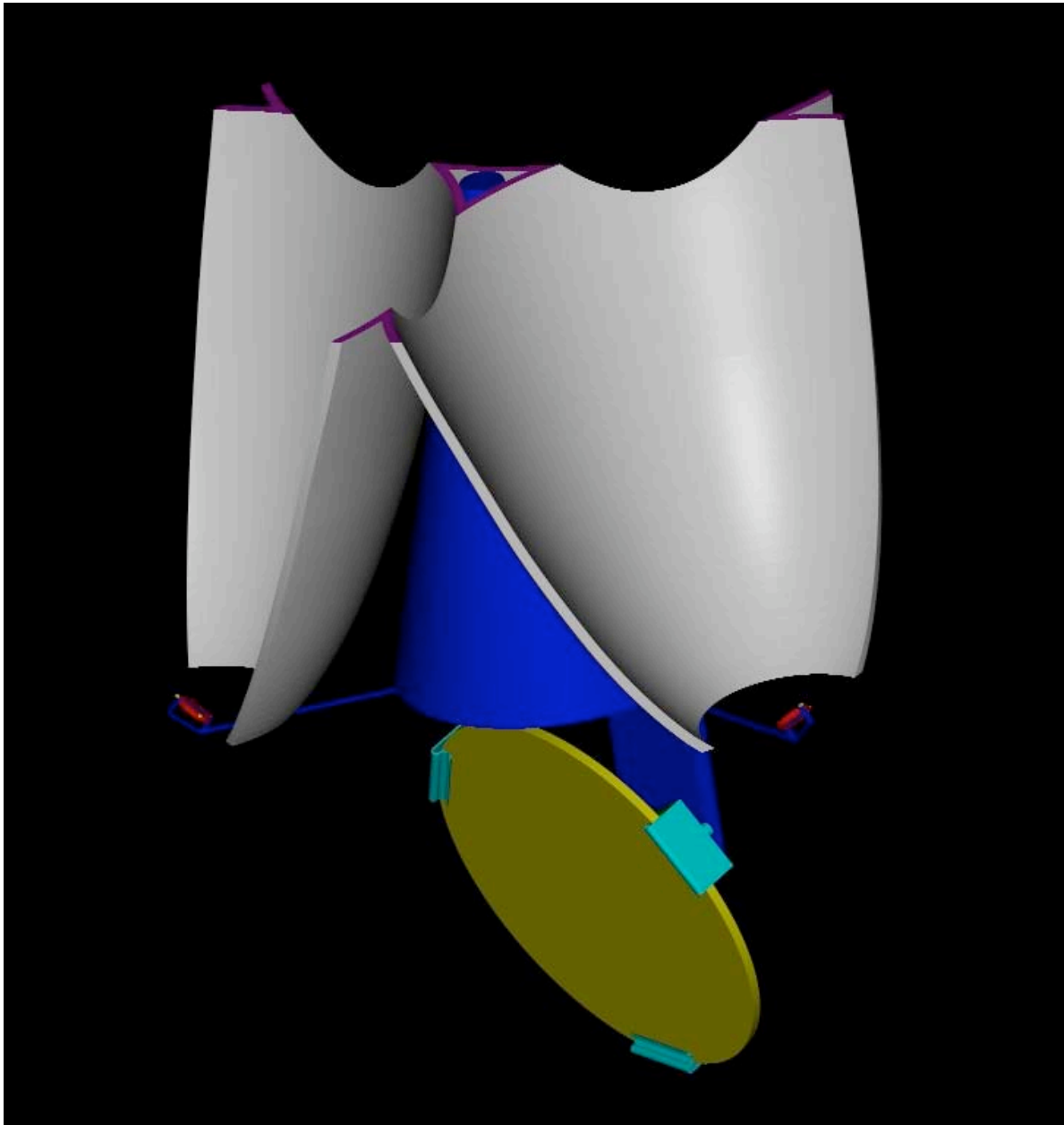
- Rotation globale lente (semaine) et precession (année)
- Balayage du ciel en 6 mois
- Accès aux étoiles du champ primaire (8°) par les stations focales mobiles (propulsion ionique)



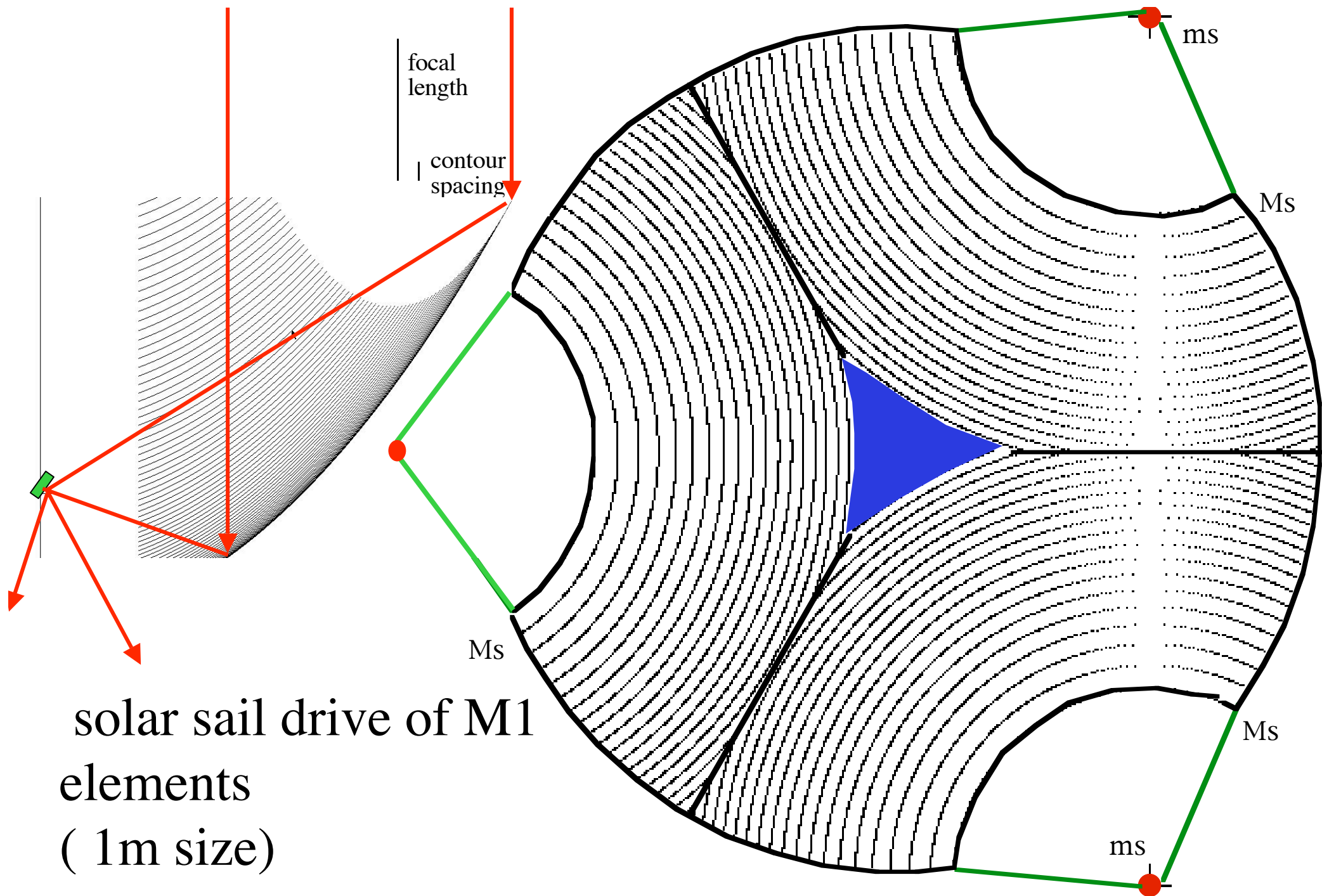
L 'enjeu des micro-satellites

- 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...

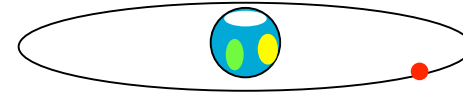
Éléments de miroir actionnés par des voiles solaires?



- 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 ?**
-



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

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

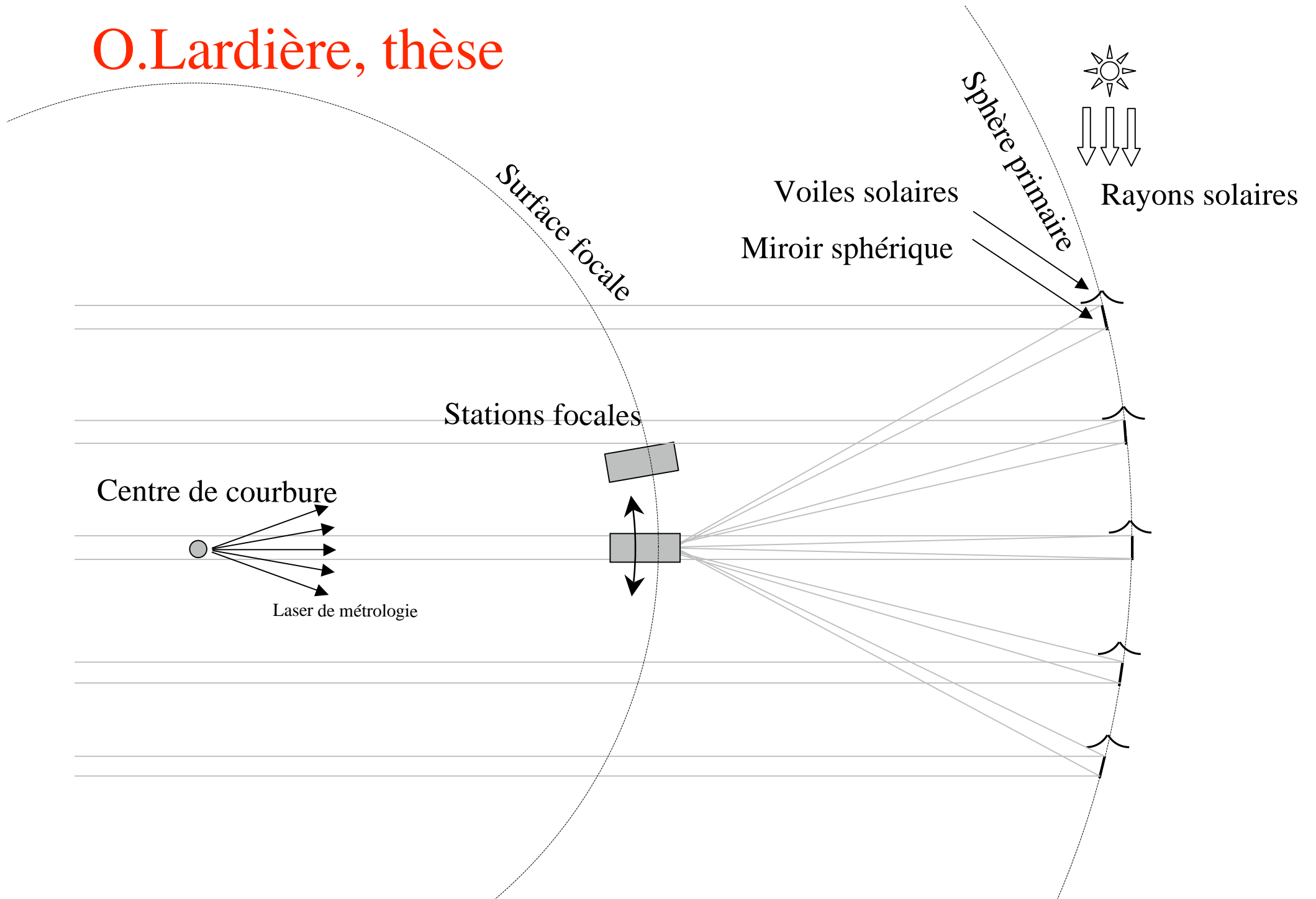
Solar illumination (W/m²)

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 :

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

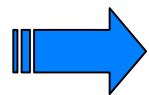
pour $R_c = 1200\text{m}$

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

- 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

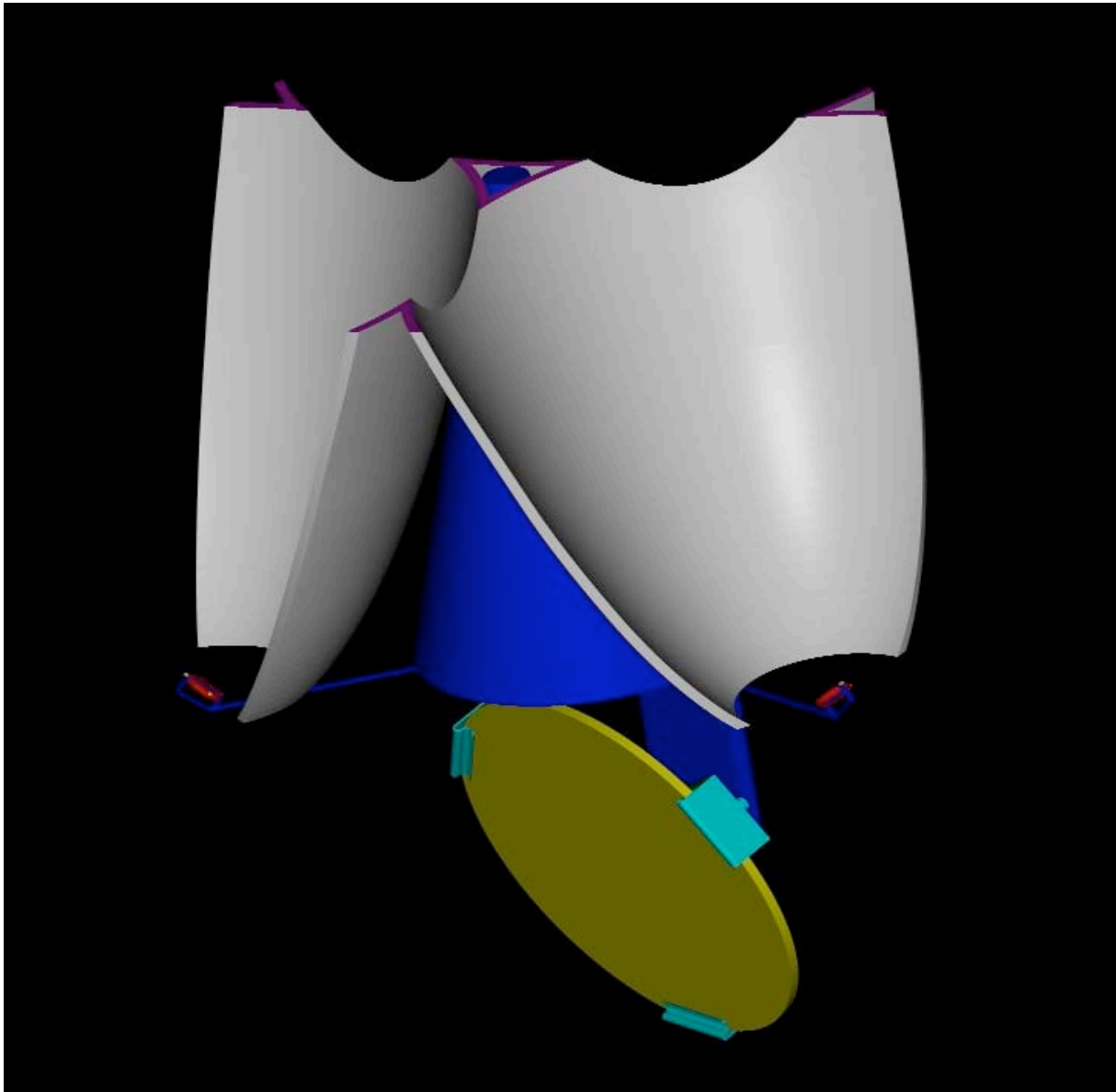
➔ **Voiles solaires** pour le balayage du ciel (*lent et continu*)
et la mise en phase des *free-flyers* (*précise*) :

- *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*) :

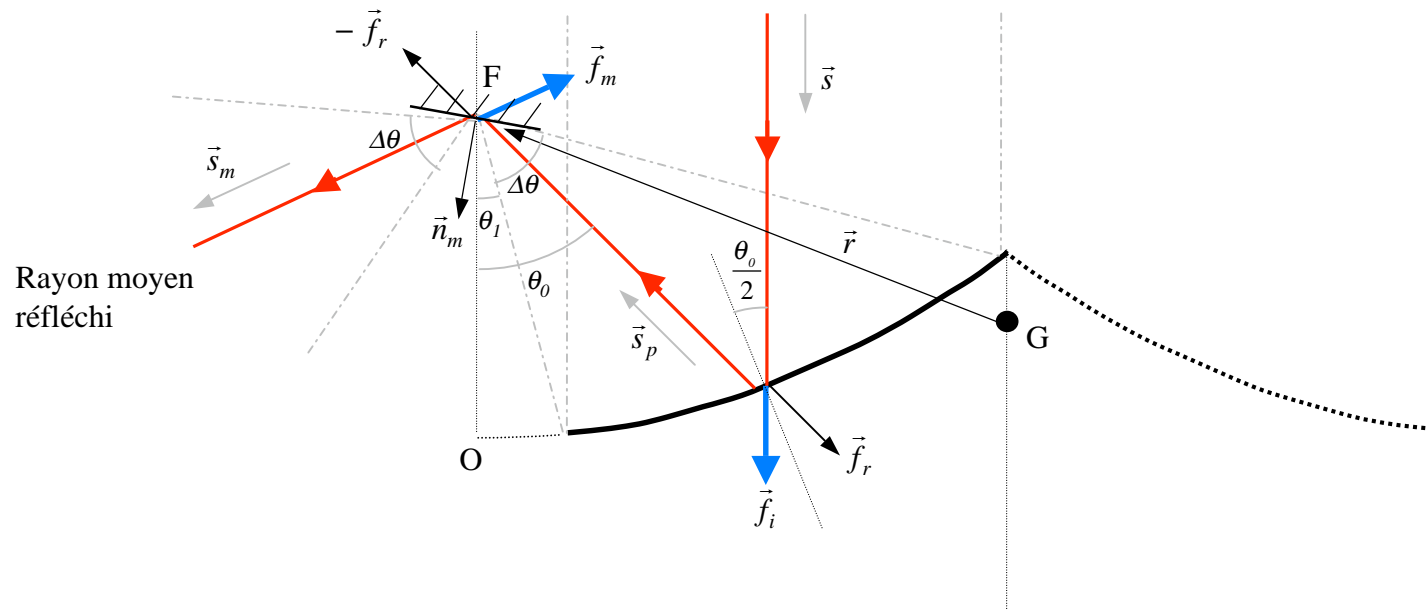
- *plus puissants*
- *autonomie limitée*

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



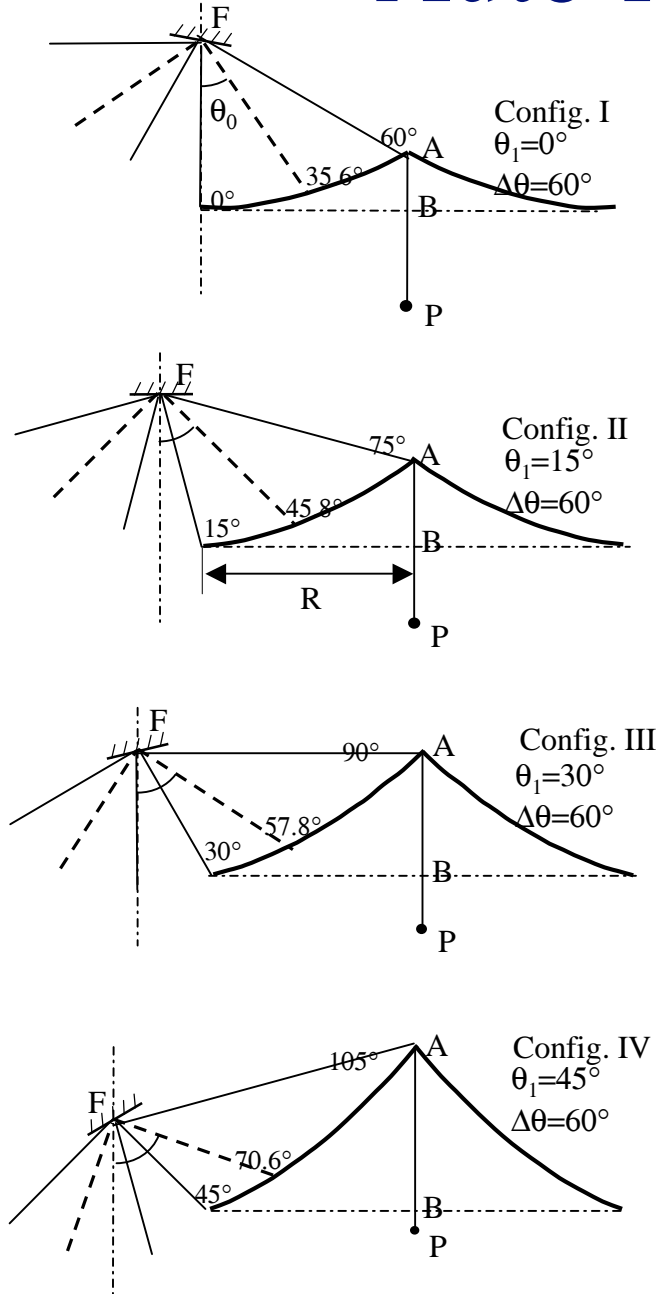
Force résultante :

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

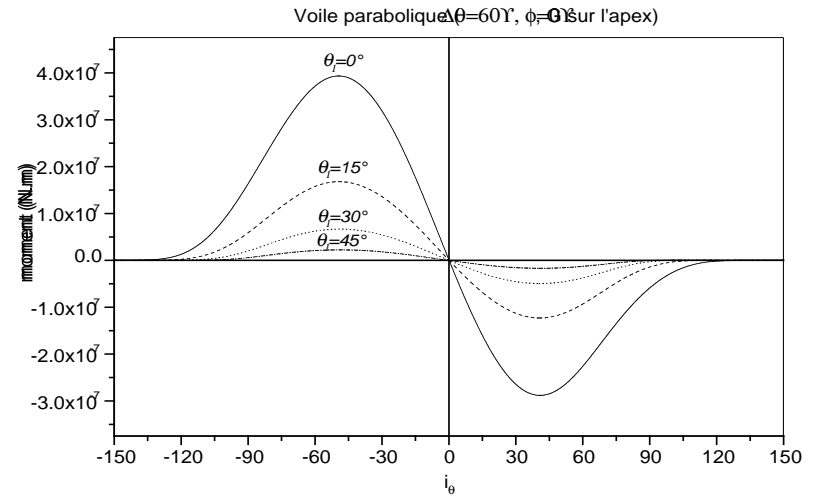
Moment résultant :

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

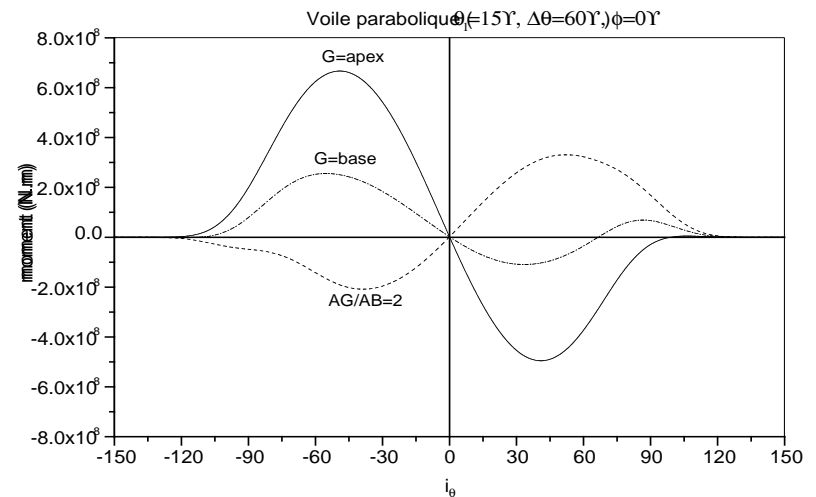
Auto-redressement



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 0.25m^2 , après un basculement des voiles de 40° par rapport au soleil.

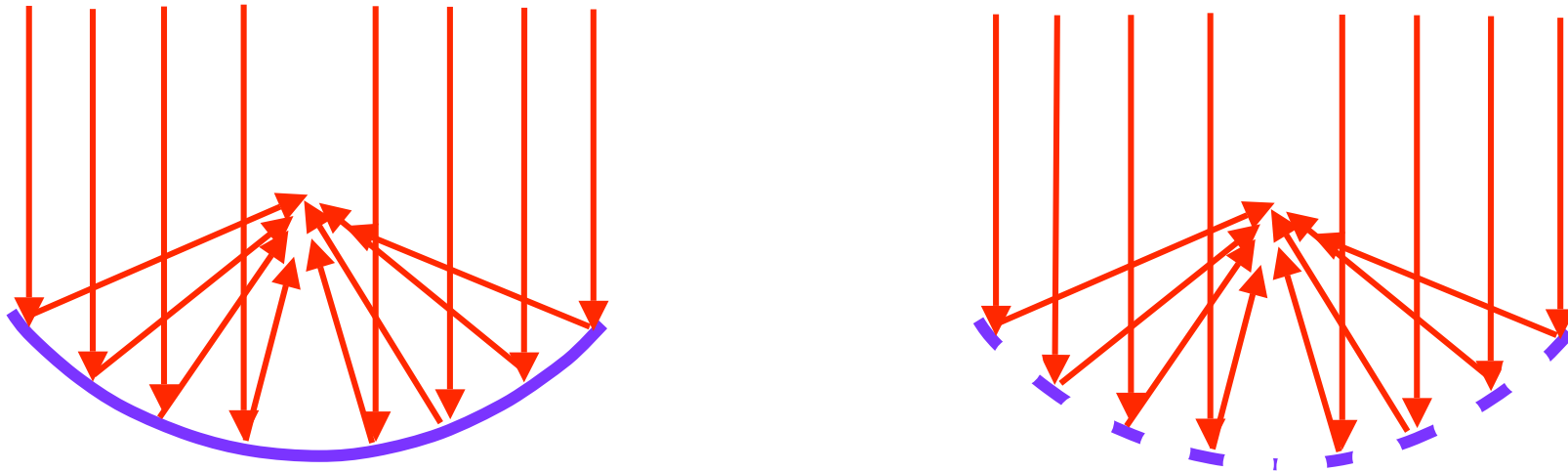
Science

- 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

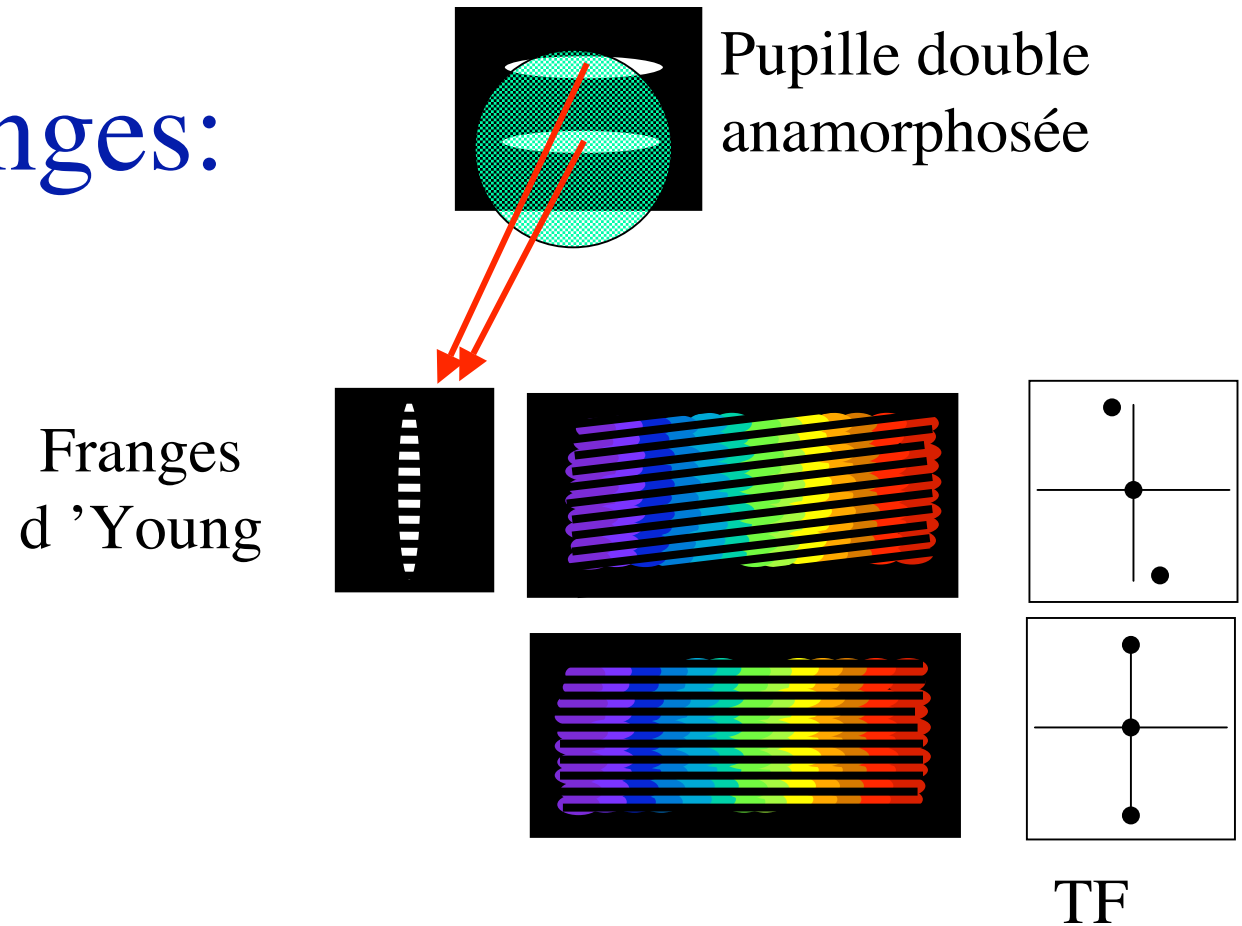
- imagerie directe
- Stations focales spécialisées:
 - visible
 - infra-rouge
 - ultra-violet
 - coronographie
 - Astrométrie champ 8°

mise en cohérence et en phase



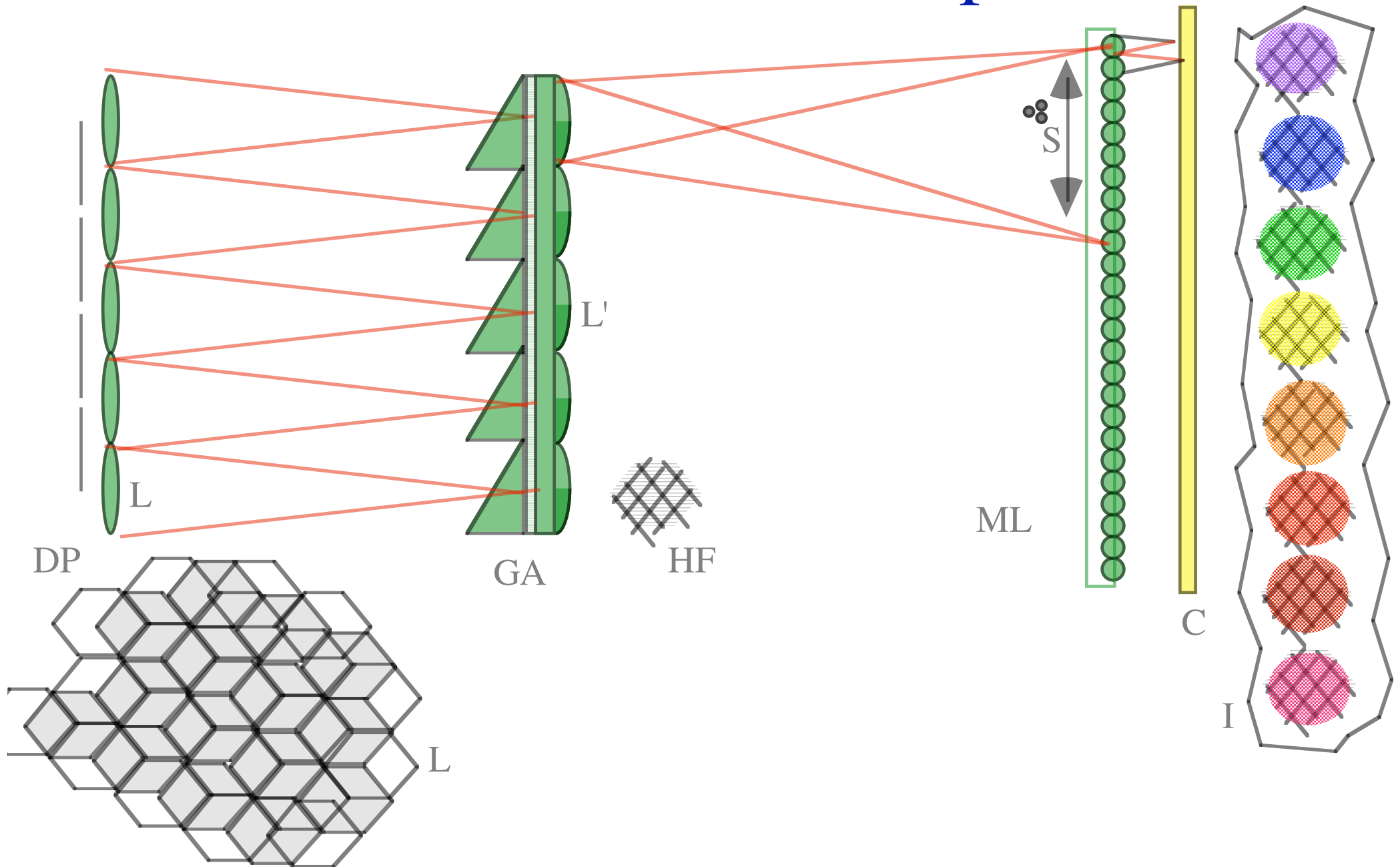
- Facilité dans l'espace: stabilité, isoplanétisme
- Longueur de cohérence $\lambda^2/d\lambda$
- Tolerance de phase : tolérance de Rayleigh $\lambda/4$,
moins pour coronagraphie
- techniques de l'optique adaptative non directement applicables à des éléments d'onde séparés

Trouver les franges: methode spectrale

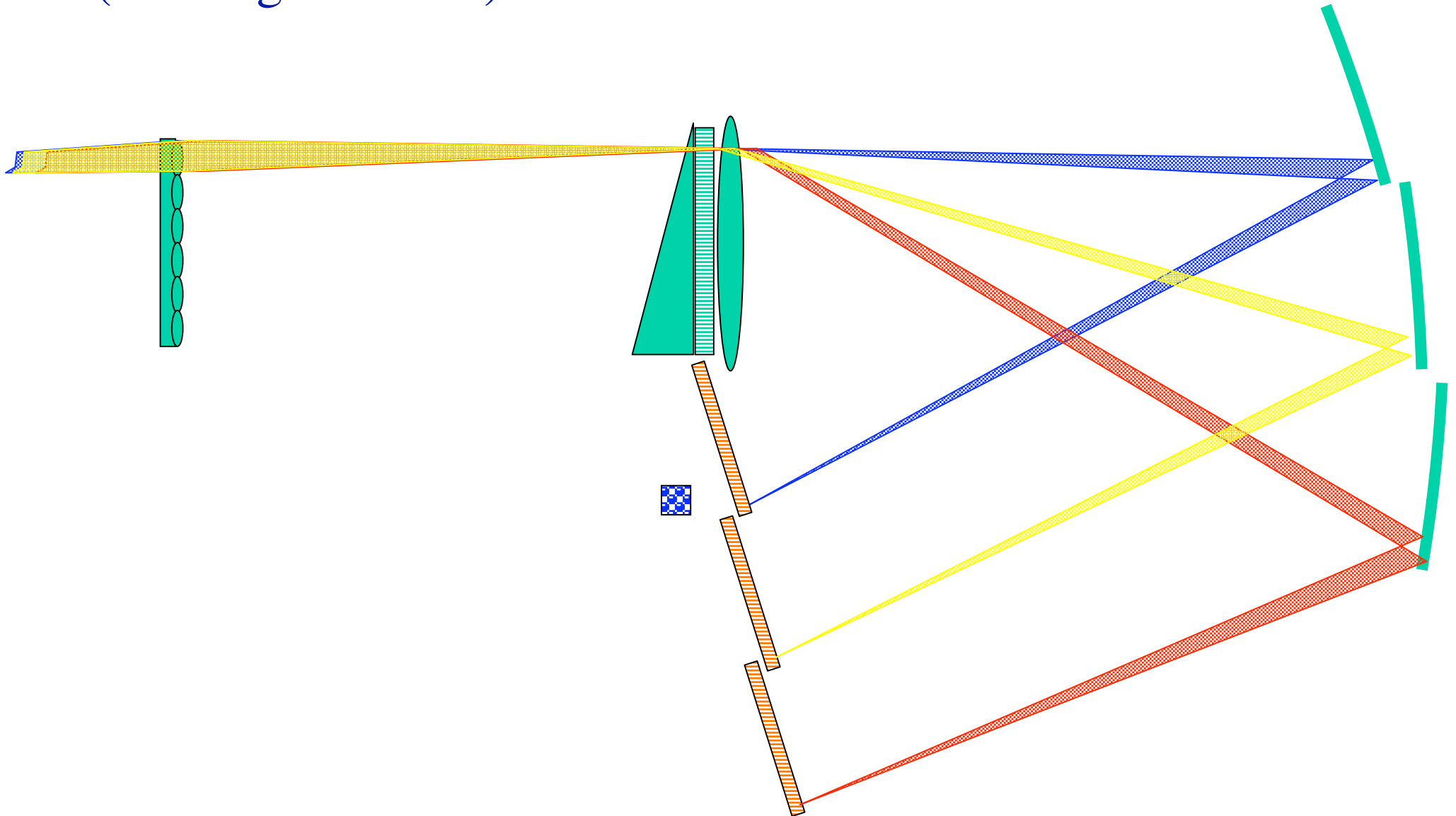


- Transformée de Fourier pour extraire le signal de chemin optique
- information de phase aussi dans les pics
- version automatisée sur GI2T (Koechlin et al.)

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
- 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)