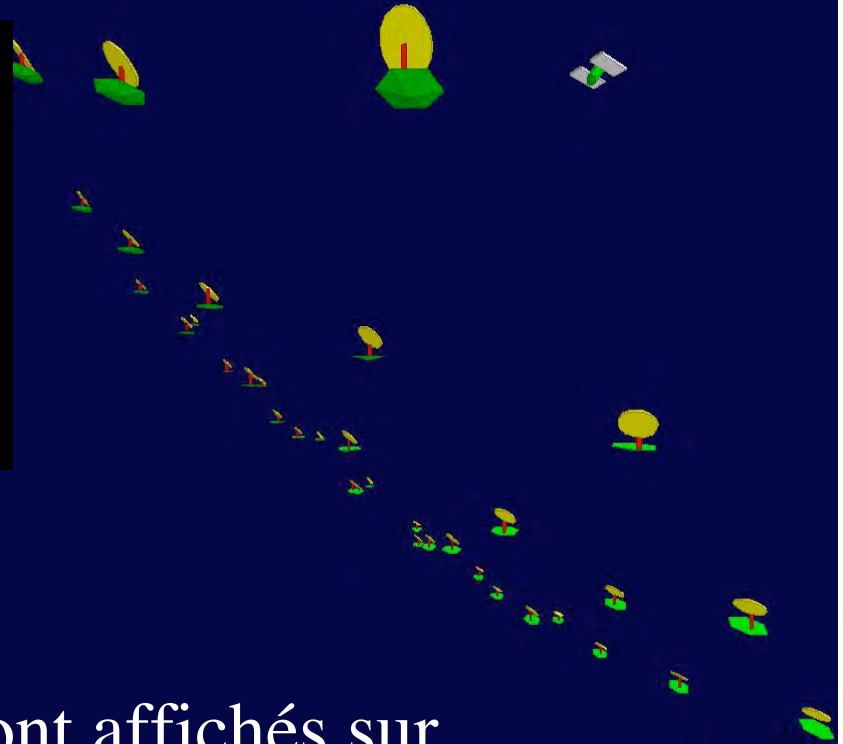
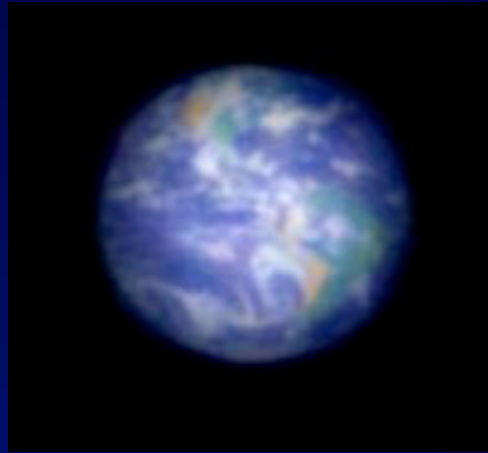


# Exo-planètes, étoiles et galaxies : progrès de l'observation



Les fichiers pdf des projections seront affichés sur  
[www.college-de-france.fr/chaire/chaire11/lise.html](http://www.college-de-france.fr/chaire/chaire11/lise.html)

Aujourd'hui:

## Comparaison des ELTs, interféromètres et hypertélescope

Séminaires:

15h Claude Aime: "Coronographie solaire par  
apodisation de pupille"

16h- 16h15 pause

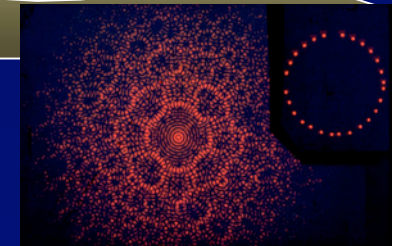
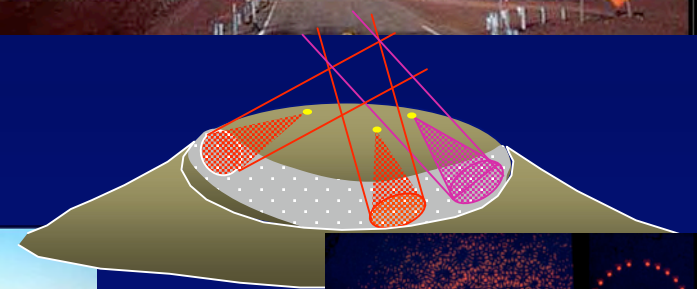
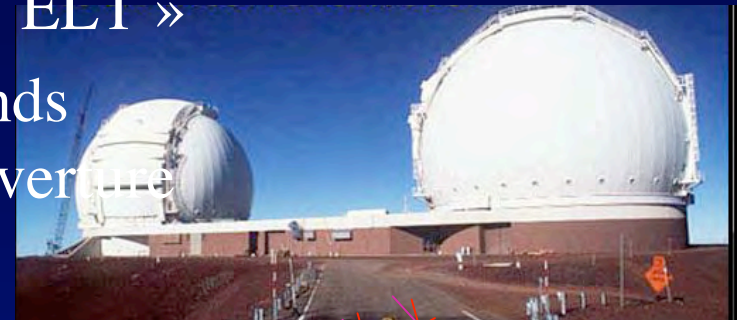
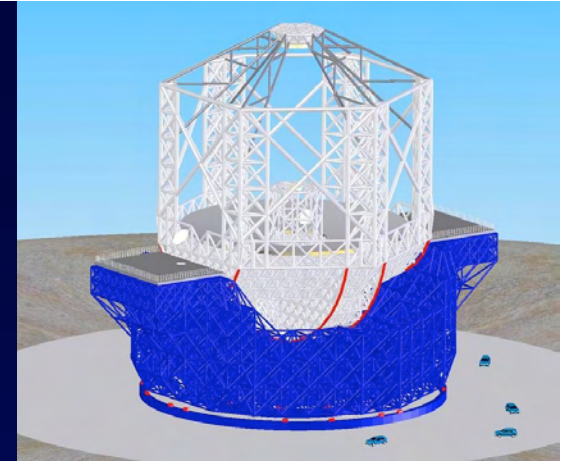
16h15 Alexis Carlotti " Apodisation par  
interférométrie"



mieux voir le ciel:

# Les quatre voies

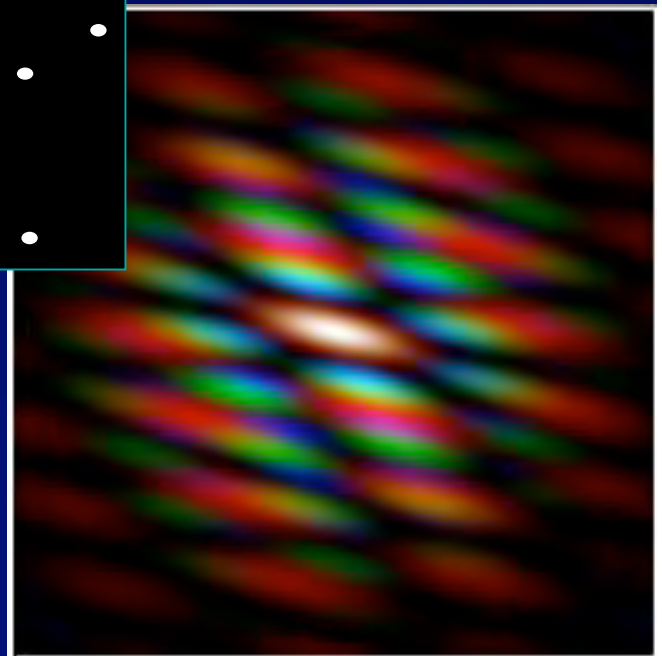
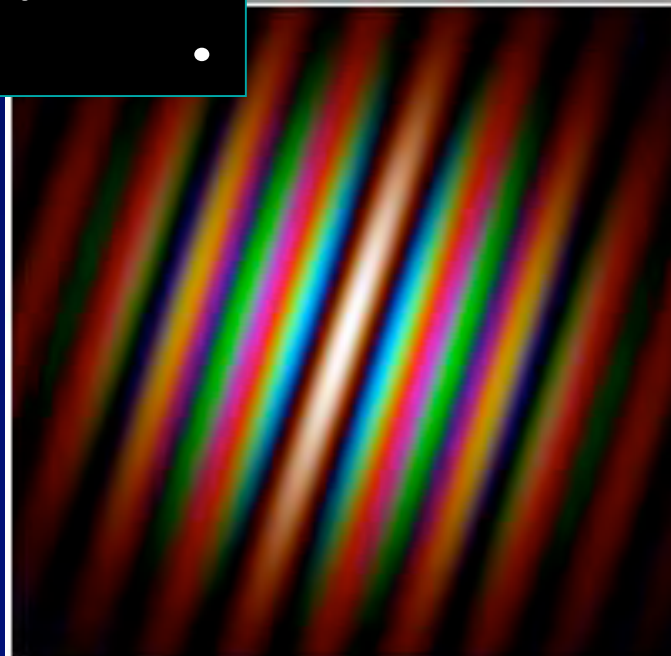
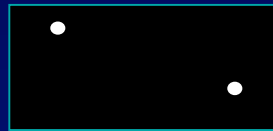
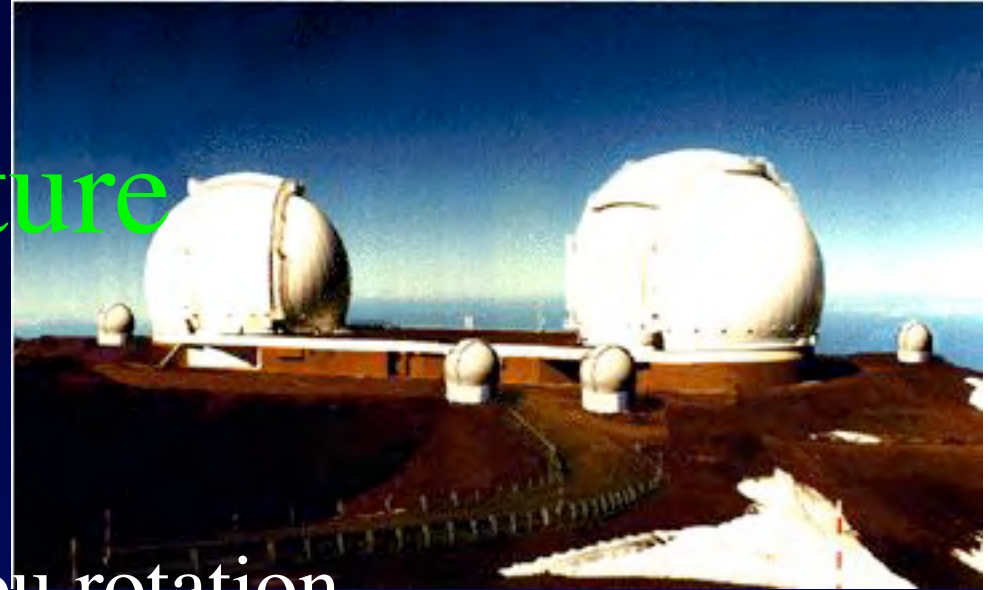
1. Miroir mosaïque compact, pointable, « ELT »
2. Interféromètre comportant quelques grands télescopes => images par synthèse d'ouverture
3. Hypertélescope => images directes, instantanées
4. Hybrides 1-3 ou 2-3





# Synthèse d'ouverture

- Paires ou triplets, etc...
- Déformation de la base ou rotation
- Image par synthèse de Fourier

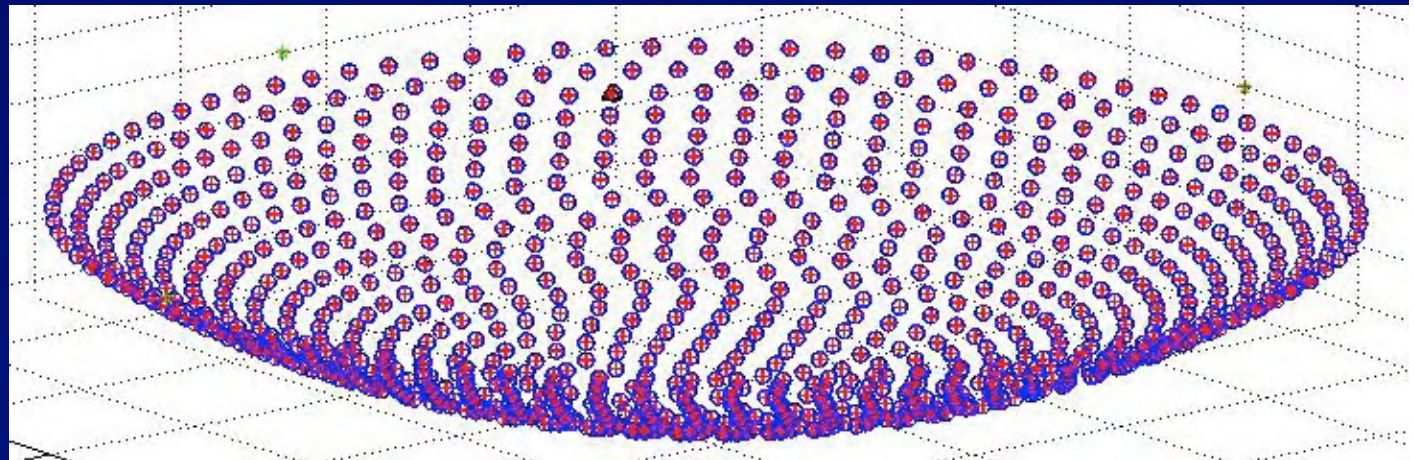




# La troisième voie : hypertélescopes

- Ouvertures nombreuses
- Petites par rapport à leur espacement

Simulation  
Luciola par  
P.L.Giscard

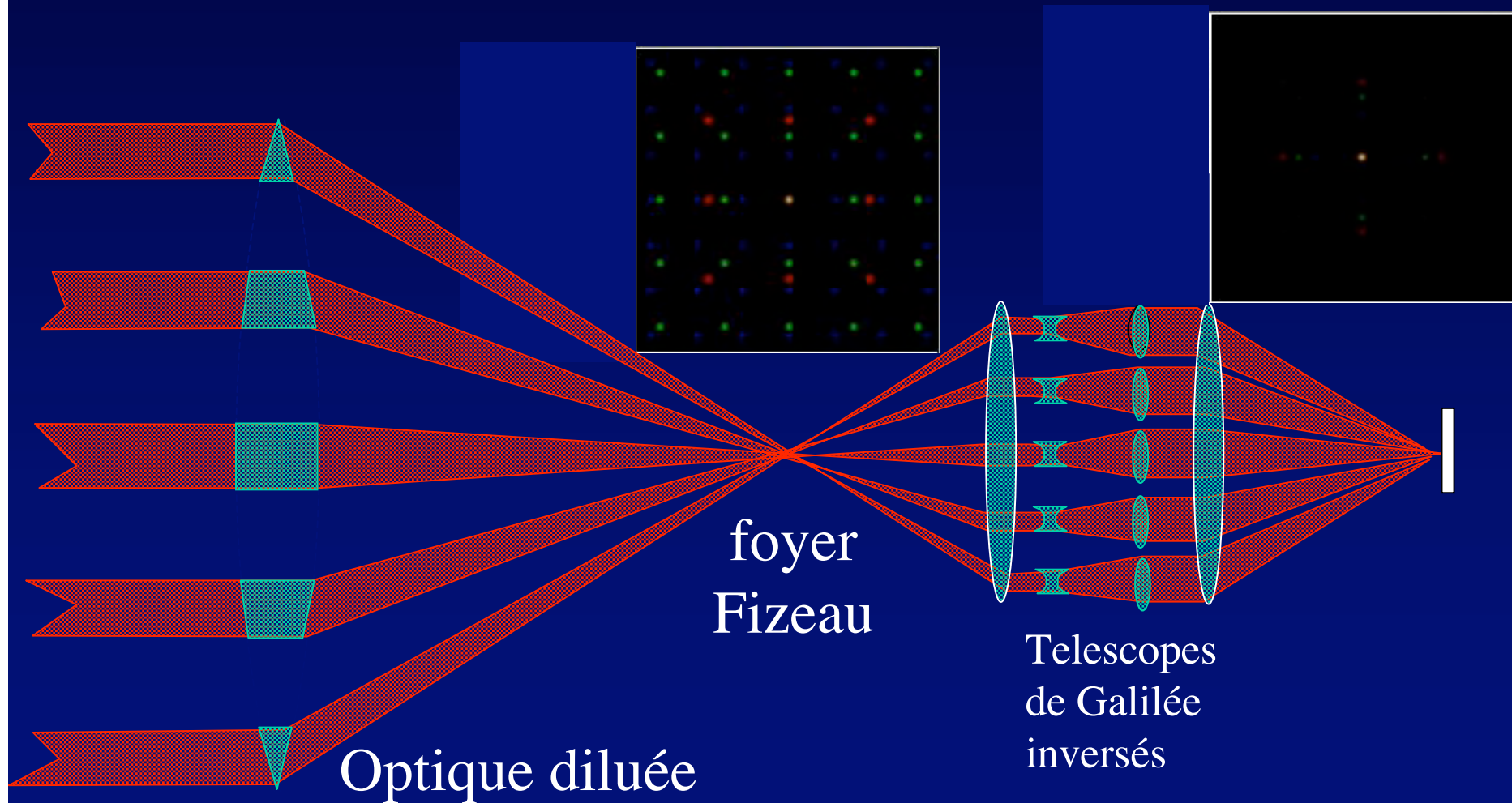


# Une nouvelle famille d'interféromètres: les hypertélescopes

- Nombreuses ouvertures, petites ou grandes
- Permet l'imagerie directe ....
- ... et la coronographie
- Vastes perspectives au sol et dans l'espace

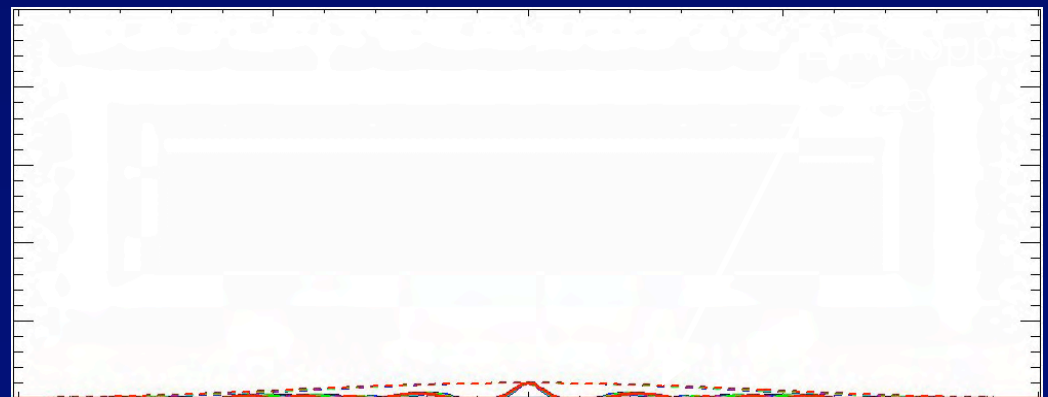
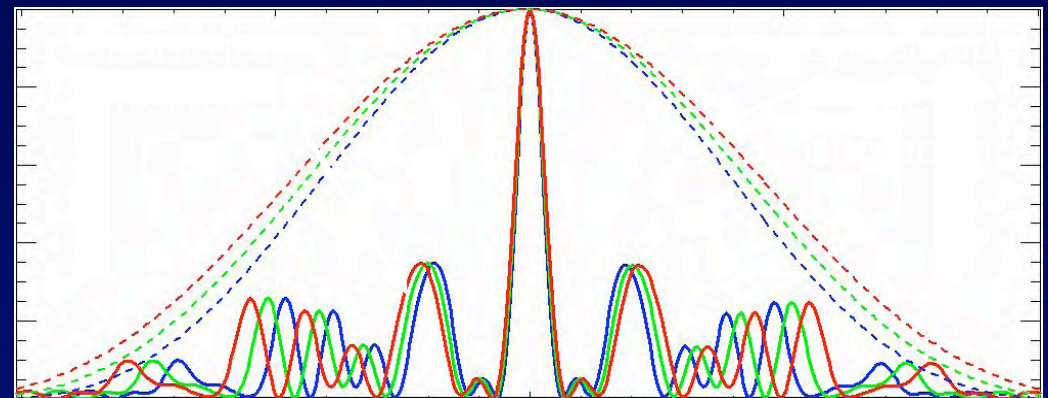
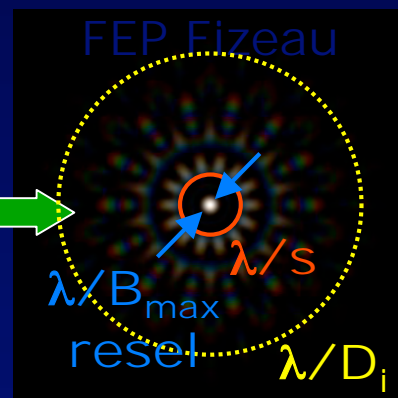
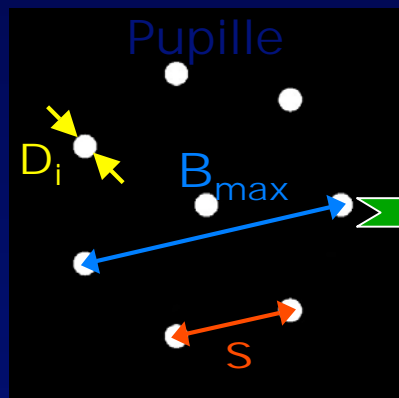
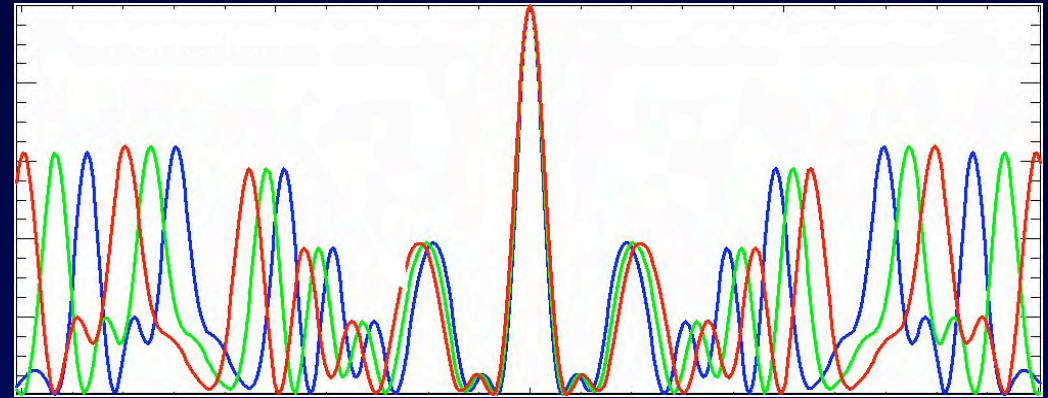
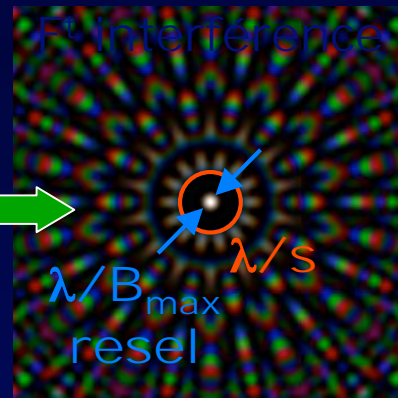
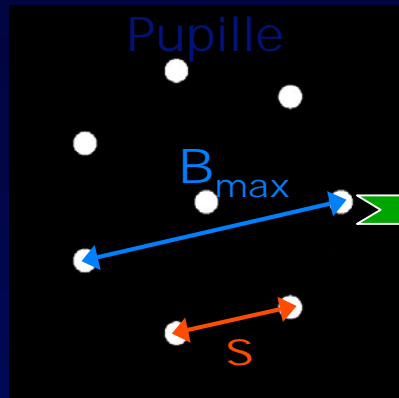
# Principe de l'hypertélescope

ou « interféromètre imageur multi-ouverture à pupille densifiée »  
(Labeyrie A&A, 1996; Lardière et al. 2007)





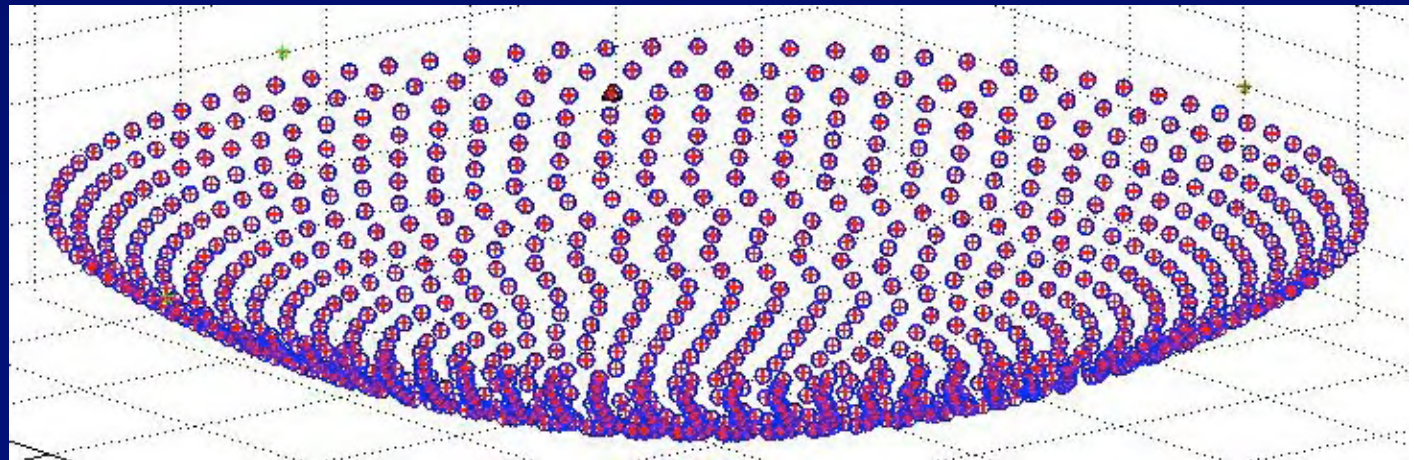
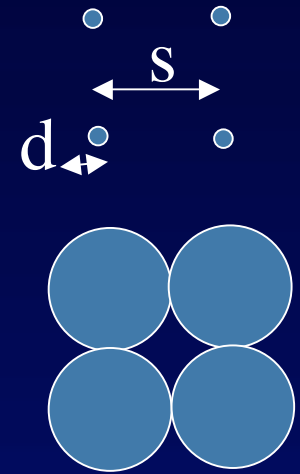
# Du Fizeau à la densification de pupille



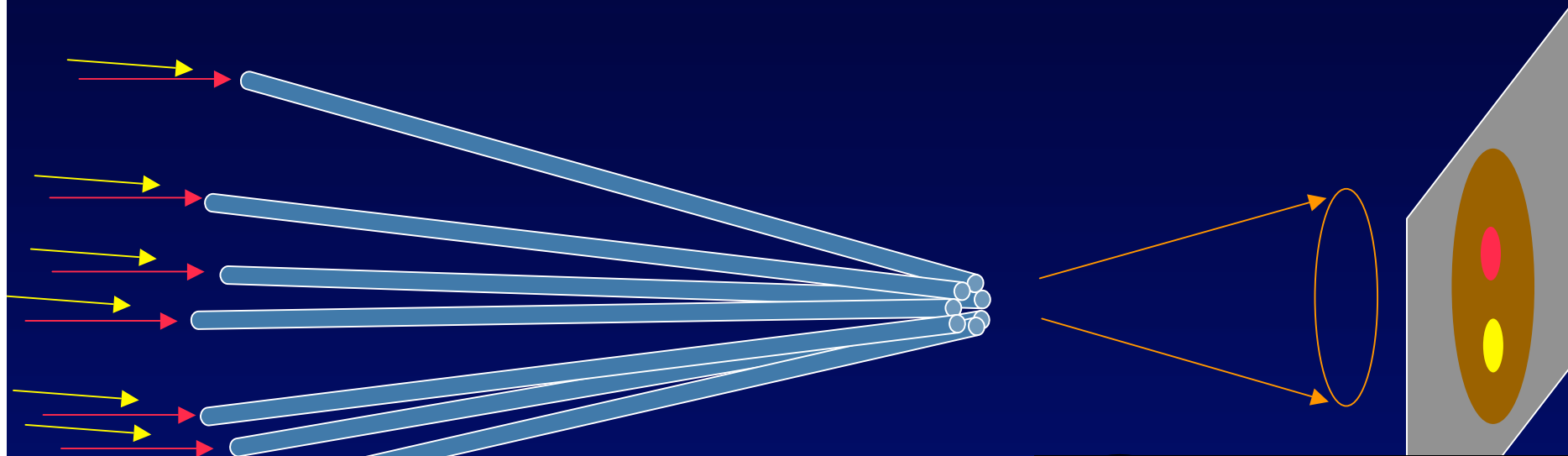
Extrait de Patru, thèse  
(2007)

# La densification de pupille est ajustable

- Depuis 1 ( cas Fizeau) jusqu'à la limite d'empiètement  $s/d$
- À densification maximale:
  - Intensification  $(s/d)^2$
  - Champ ciel d'imagerie directe ( DIF):  $\lambda/s$
  - Contenu en resels:  $\{(\lambda/s) / (\lambda/D)\}^2 = (D/s)^2 = N^2$

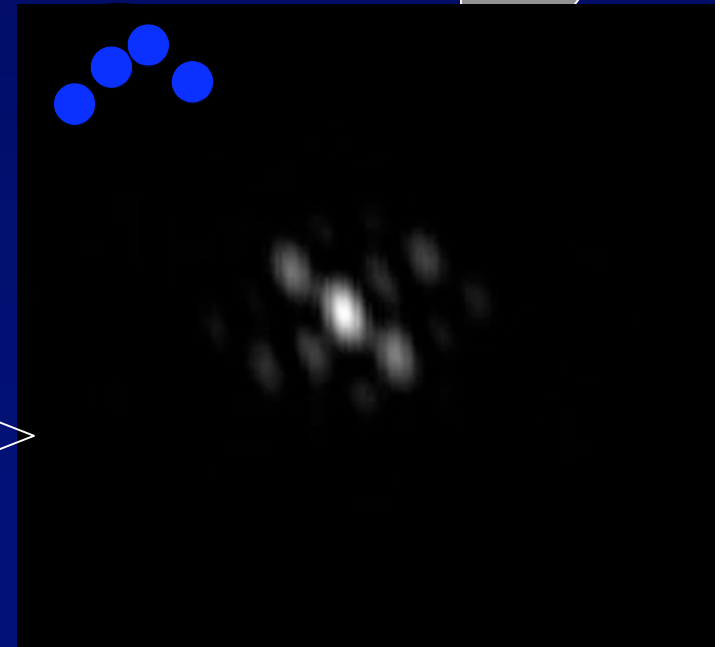


# Ca marche aussi à travers des fibres...



Étoile double

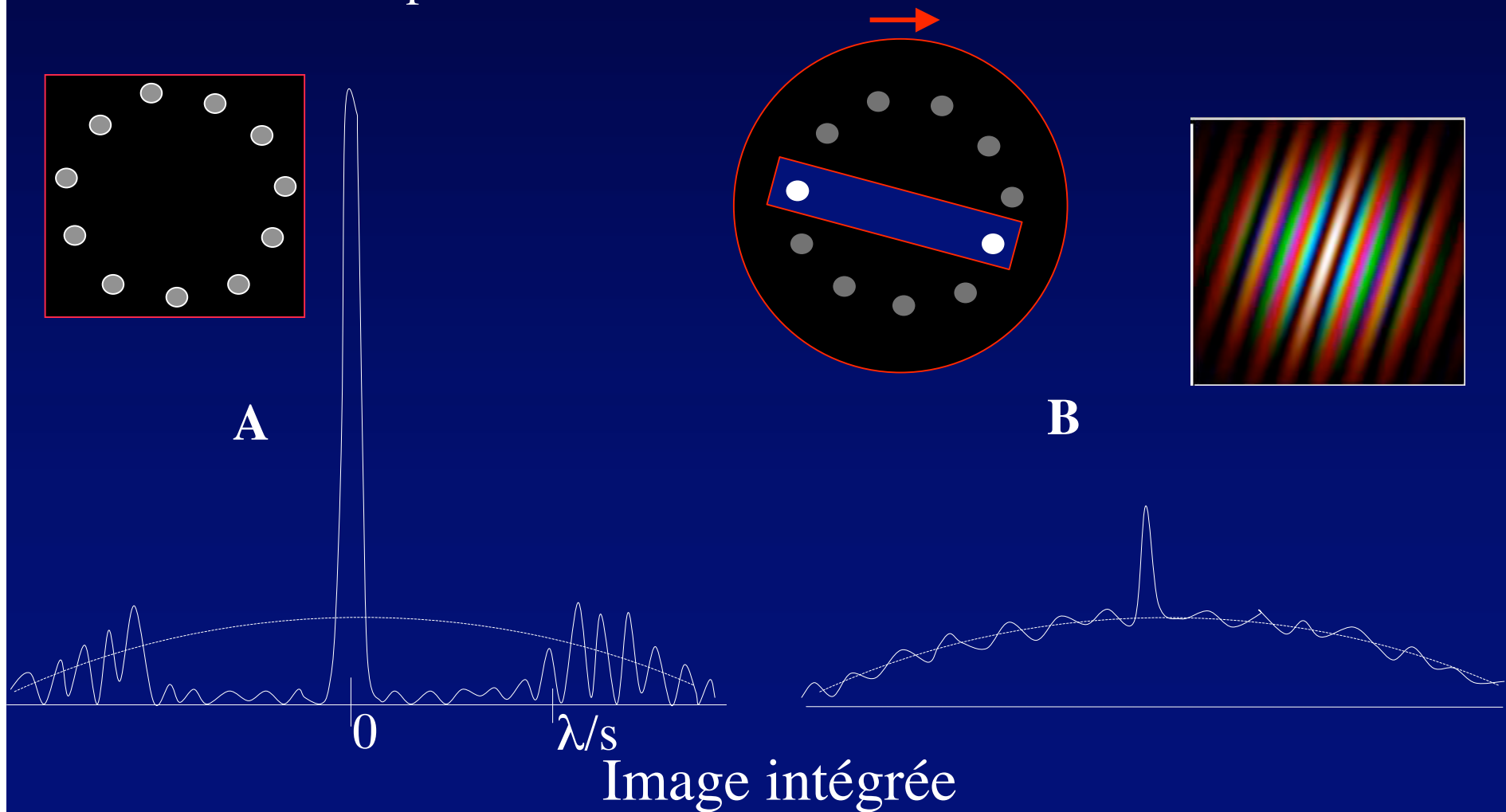
- Vérifié par Patru ( thèse, 2007) →





# Comparaison avec la synthèse d'ouverture: en masquant des ouvertures

- Gain pic/fond
- Gain bruit de photons



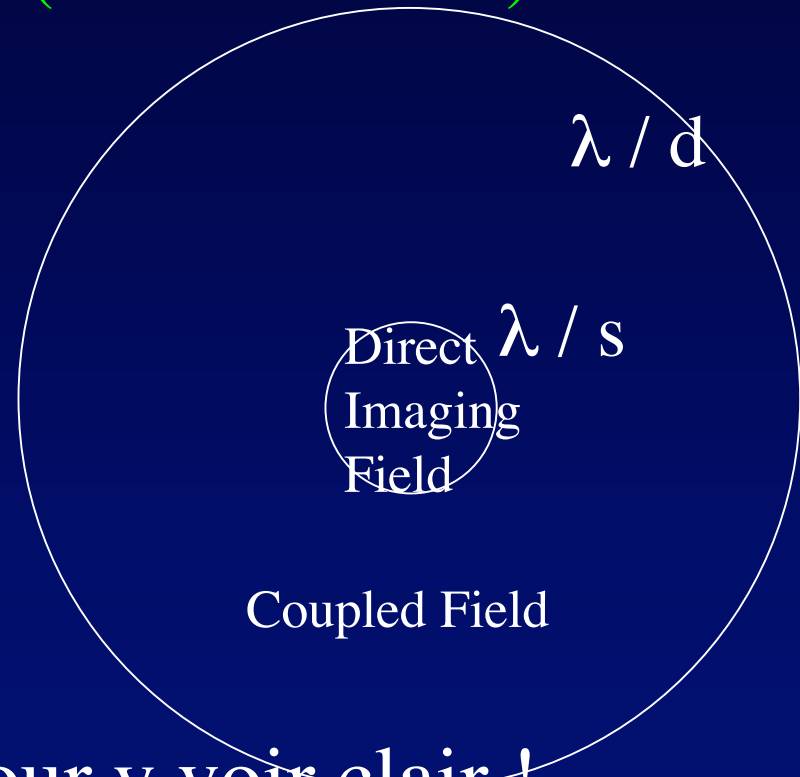
# Signal et bruit de photons

- Hypertélescope :  $\text{signal/bruit}_h = \text{sqr} (N P_t / kd)$
- Synthèse d'ouverture:  $\text{signal/bruit}_p = 2 \text{sqr} (P_t / N)$
- Gain en dynamique de l'hypertélescope  
=  $N / \{2 \text{sqr} (kd)\}$

# Champs des hypertélescopes

Lardière, Martinache & Patru ( MNRAS 2007)

- Sur le ciel
- Aussi:
  - Clean field
  - Information field
- Jouer avec les simulations pour y voir clair !





# Limite d'encombrement du champ d'un hypertélescope

$N = A^2 / d^2$  ouvertures non-redondantes

- par “enveloppe ciel”, d'aire  $(\lambda/d)^2$  :

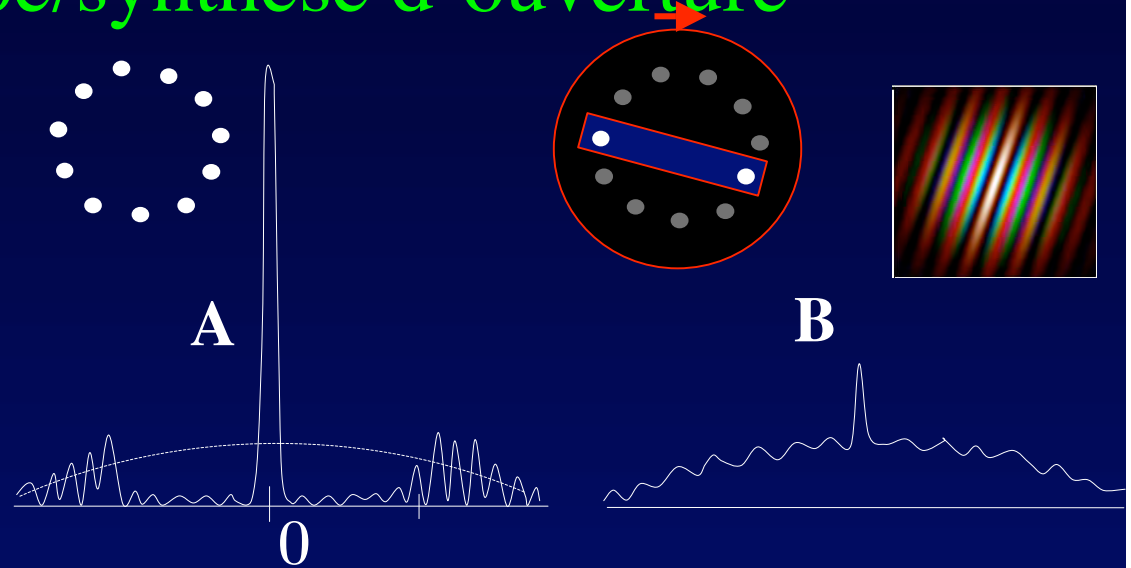
$$R = N^2 = 16 A^2 / \pi^2 d^4$$

- par seconde carrée

$$\sigma_{as} = 1.4 \cdot 10^{-9} \pi^{-3} A^2 d^{-2} \lambda^{-2}$$

- à aire constante, amélioration avec ouvertures petites et nombreuses
- Encore améliorable avec ouverture variable pendant la pose ( rotation terrestre ). Rend compétitives les ouvertures périodiques ?
- ELT dilué avec 1000 ouvertures de 1m utilisable pour cosmologie à haute résolution

# Gain en signal/bruit hypertélescope/synthèse d'ouverture



- gain par intensification du pic en  $N$  et atténuation des pieds en  $N^{-3/2}$  (Lardière 2007), voire plus par coronagraphie
- Cas limité par le bruit de photons:  
$$\text{gain} = 0,6 N^{7/4}$$
 à préciser, selon l'apodisation, coronagraphie...
- Exemple: gain  $2 \cdot 10^5$  avec 1000 miroirs de 1m, par rapport à deux de 23m

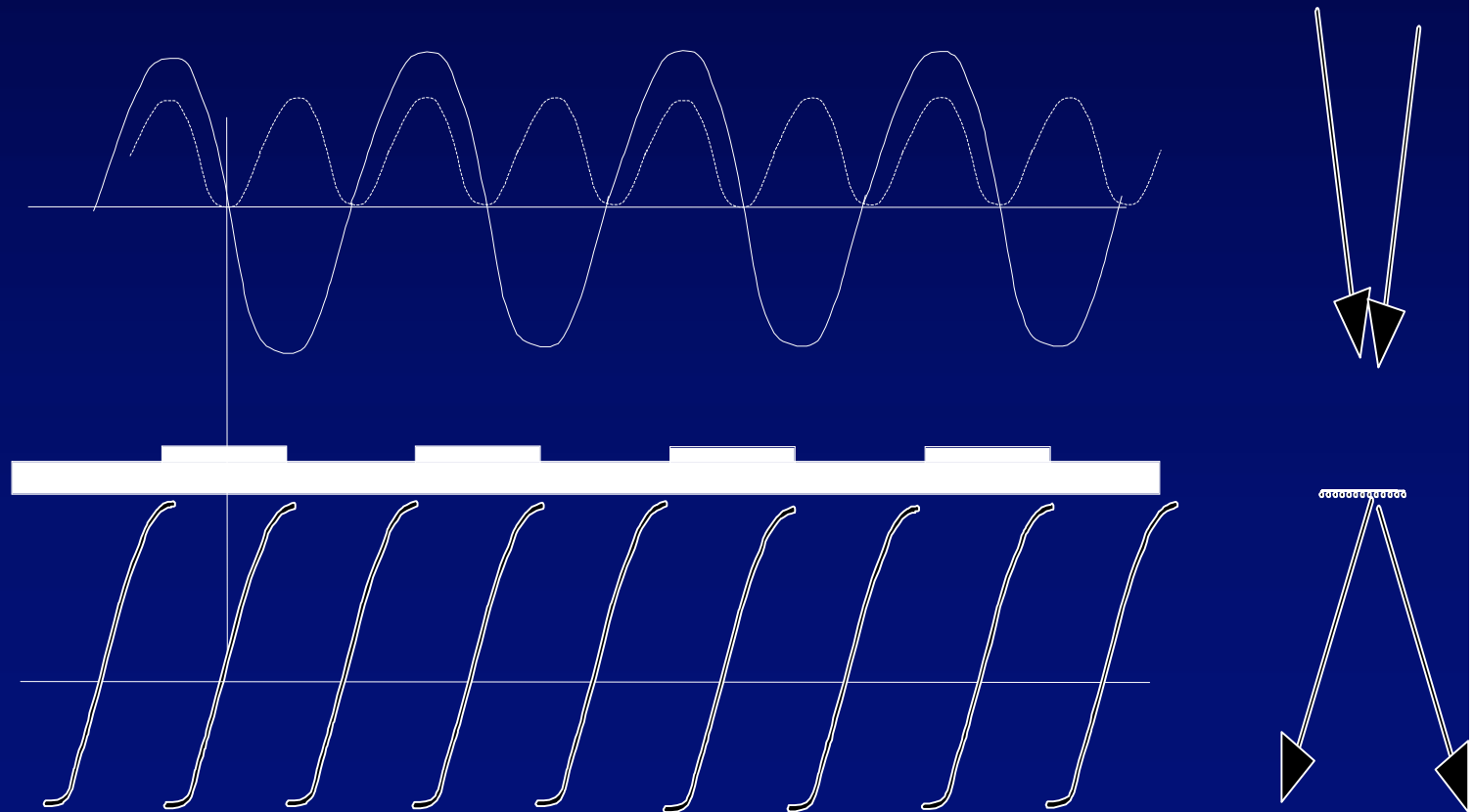
# Déplacer les ouvertures pendant la pose ?

- Lisse les pics secondaires, sans affecter le pic central
- Améliore la dynamique et la limite d'encombrement
- Rend compétitives les ouvertures périodiques ?
  - à vérifier !



# Comparer aussi la coronagraphie

- Occulteur « de phase » pour franges à deux ouvertures



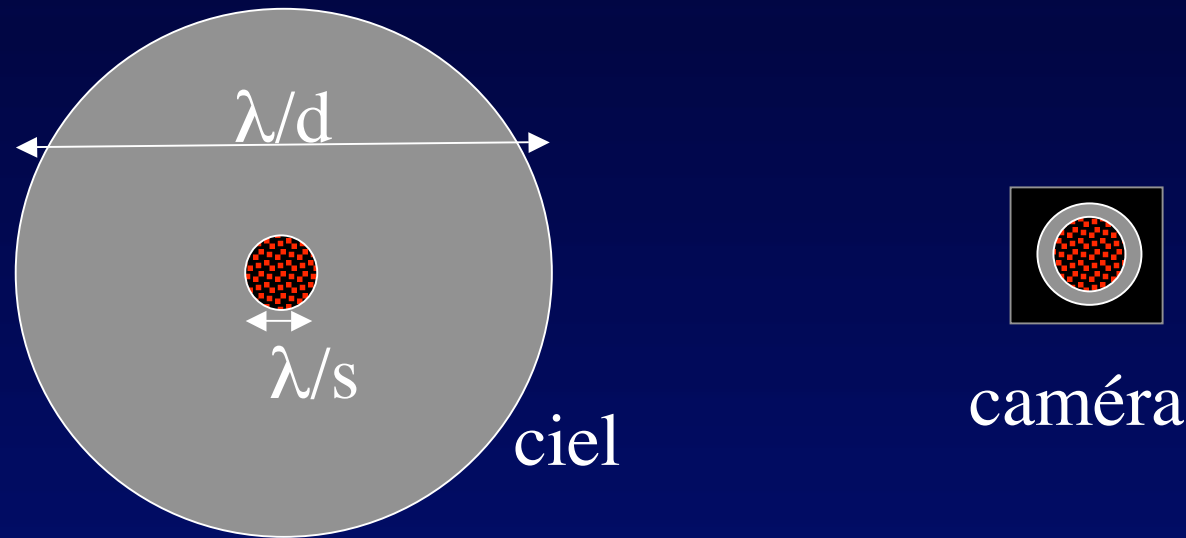
# Encombrement des champs (« field crowding »)

- Image lissée si  $N$  à  $N^2$  « resels actifs » par lobe  $\lambda/d$  ...
- ...et plus si l'ouverture varie pendant l'observation
- limite ( cas  $N^2$  ) , en resels actifs par seconde carrée  
$$= 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ Pi}^{-3} \text{ A}^2 \text{ d}^{-2} \lambda^{-2}$$
- S'améliore si  $d$  diminue a aire  $A$  constante
- Indépendant du diamètre global  $D$
- Exemple:  $N=1000$  ouvertures de 1m autorisent  $10^6$  dans 0,01 seconde carrée, soit  $10^8$  par seconde carrée  
Donc un ELT dilué convient en cela pour les champs profonds

# Etendue du champ

- Aberrations de champ des télescopes: le champ limité par la diffraction décroît pour un diamètre croissant
- pour un Fizeau, le champ est limité seulement par les aberrations: exemple  $2'$  pour  $D=30\text{m}$  (visible)
- Pour un hypertélescope complètement densifié:
  - Champ d'imagerie directe  $\lambda/s$  dans chaque lobe  $\lambda/d$
  - Lobes exploitables indépendamment
- .

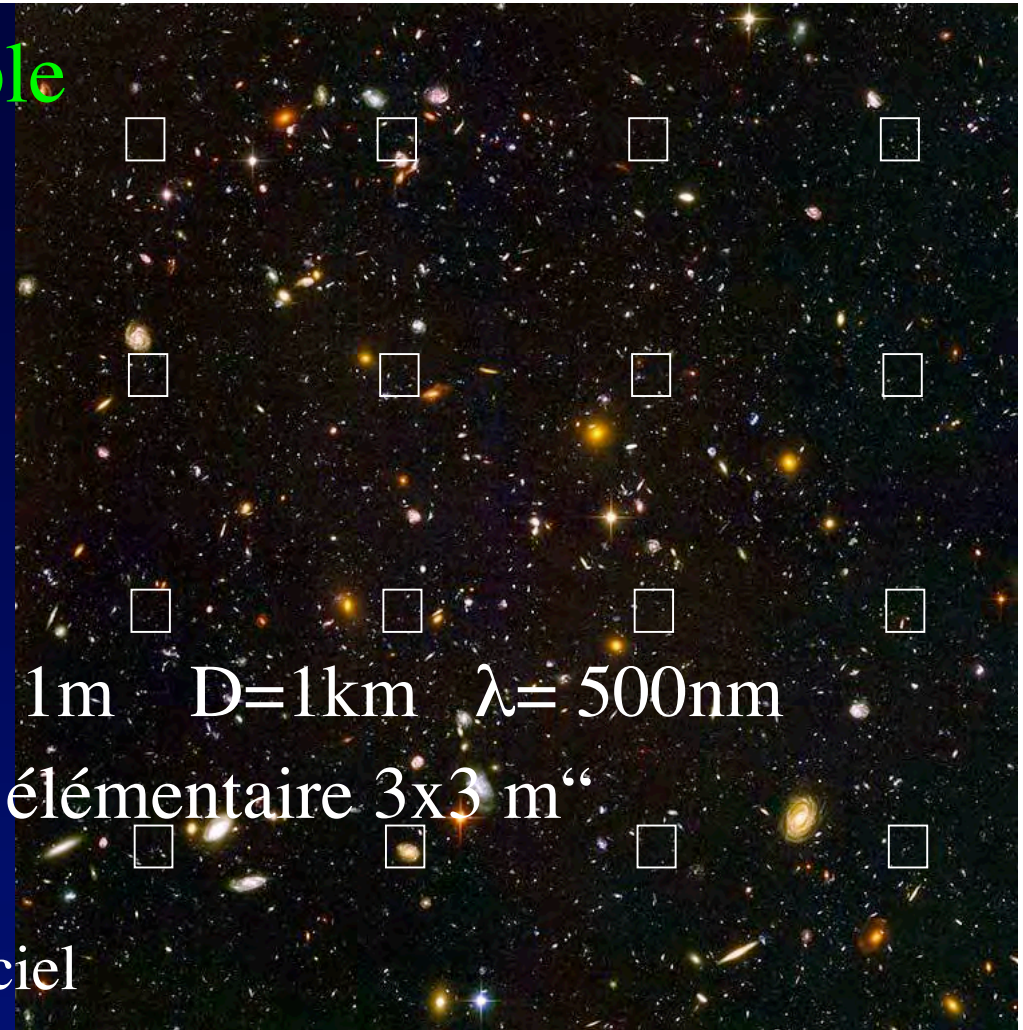
# Exploiter le champ « dilué » des hypertélescopes



- image directe obtenue dans une petite partie de l'enveloppe diffractive des sous-ouvertures...
- .... mais des enveloppes adjacentes sont exploitables en parallèle



## Champ multiple: exemple



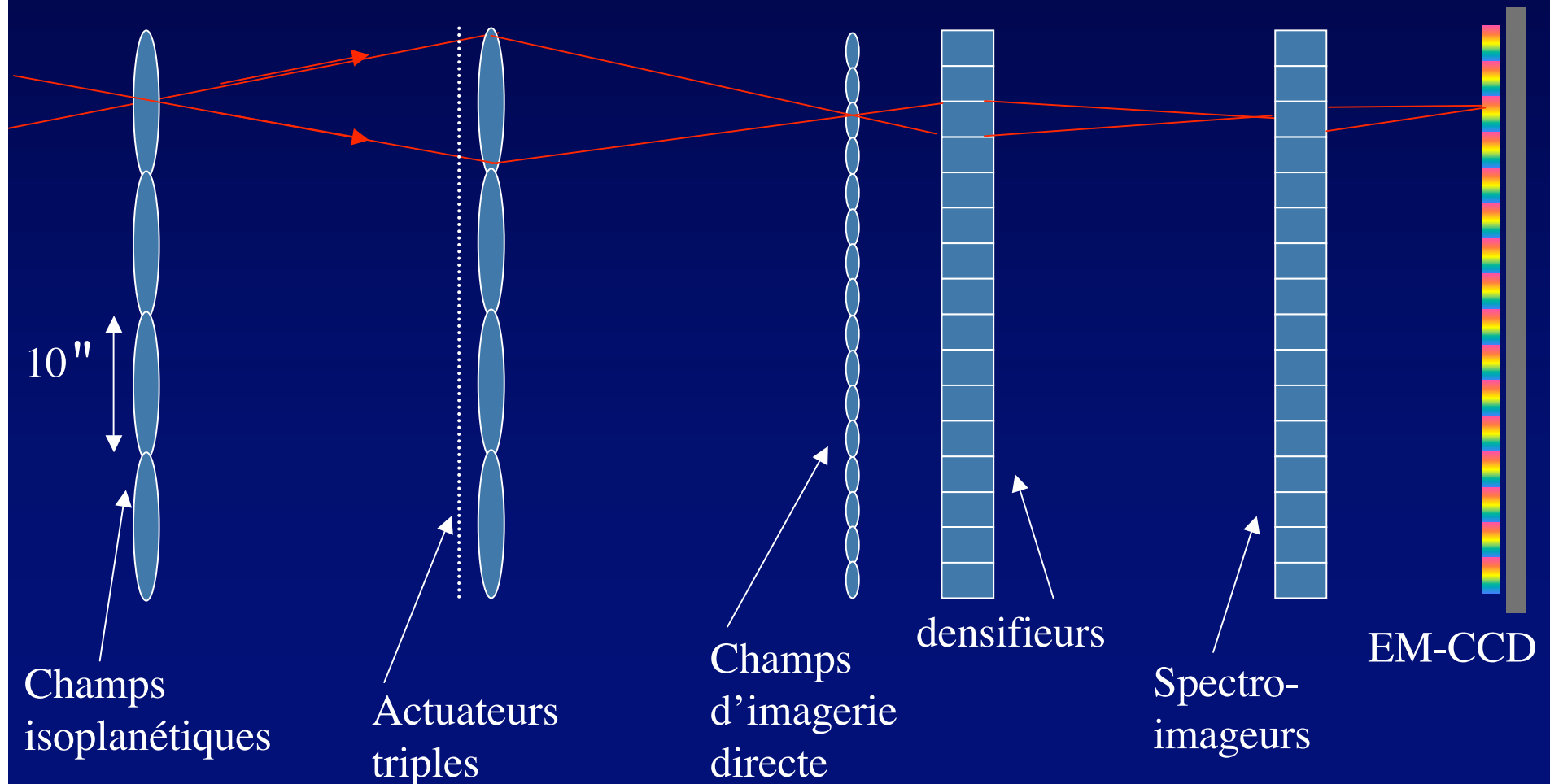
- Avec 1000 ouvertures,  $d=1\text{m}$   $D=1\text{km}$   $\lambda=500\text{nm}$
- Résolution  $0,1\text{ m}''$  , champ élémentaire  $3\times 3\text{ m}''$ 
  - Contenant  $30\times 30$  resels...
  - ... espacés de  $100\text{m}''$  sur le ciel
  - Soit 10 Mresels dans  $10\times 10''$
- champ complet restructurable avec 1000 poses décalées
- Saturation à  $10^8$  étoiles par seconde carrée...
- ....et plus si l'ouverture se déforme ( rotation terrestre)



# Hypertélescope:

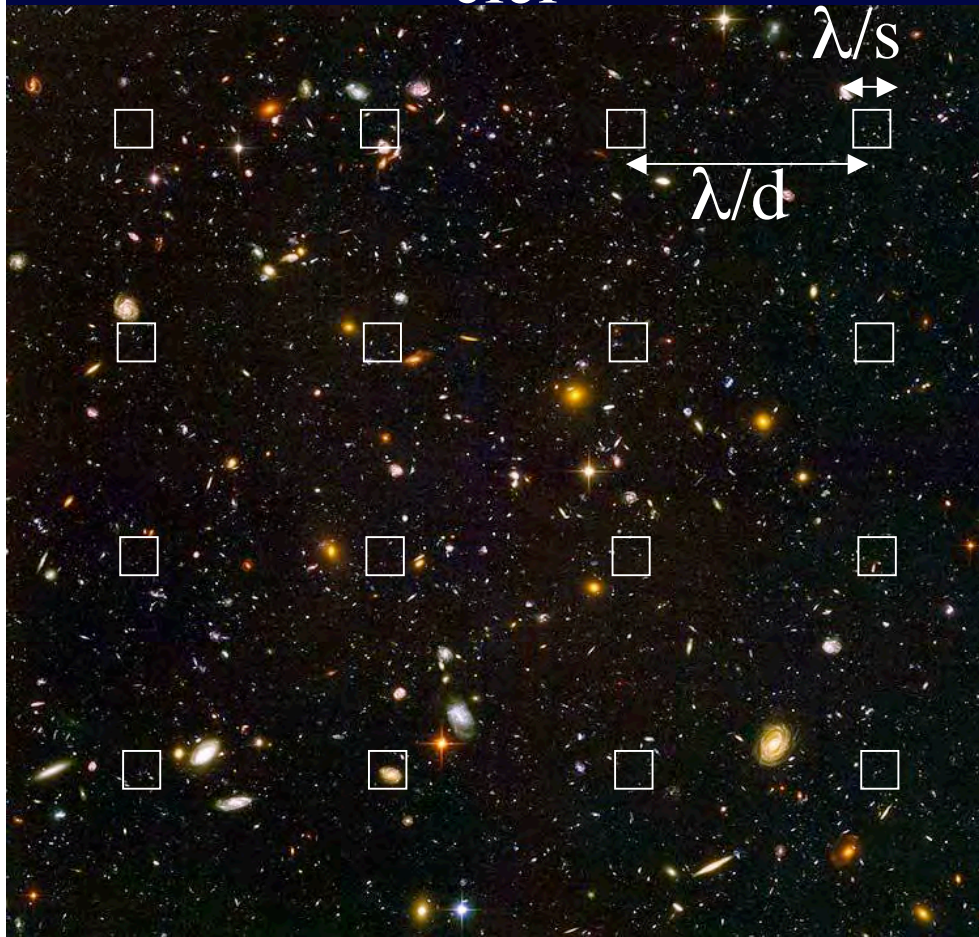
imagerie parallèle et optique adaptative

- Milliers de canaux d'imagerie directe
- Milliers d'étoiles guides simultanées, plus faibles

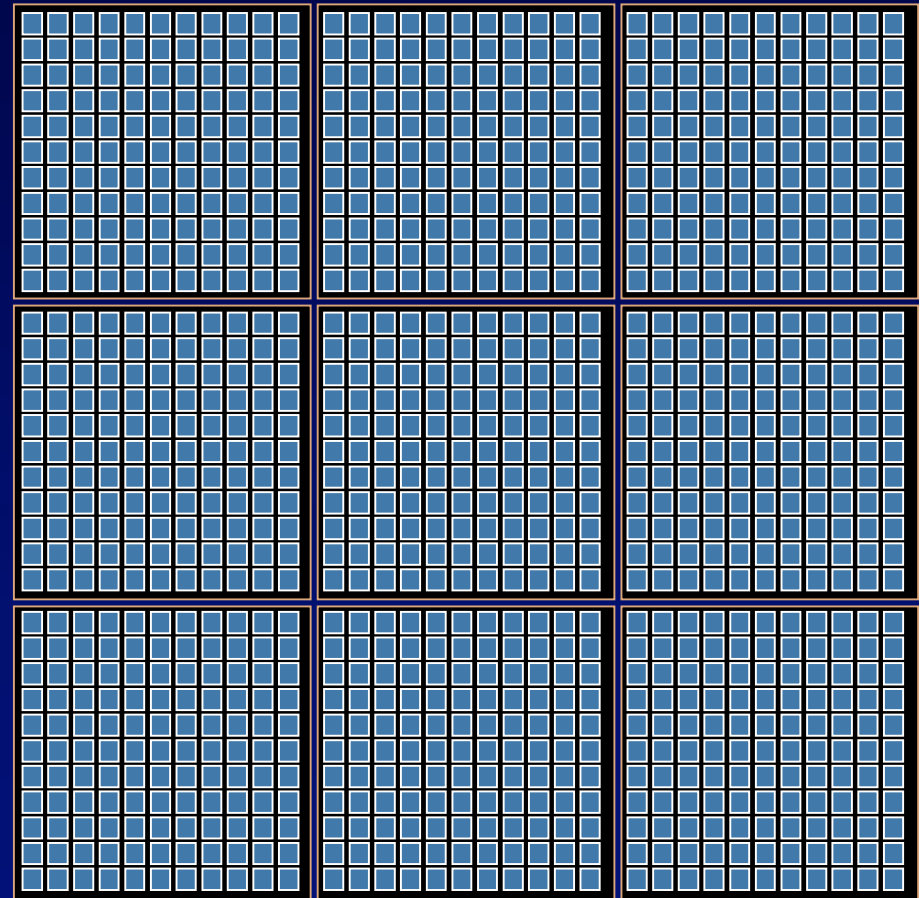


# Mosaïque de champs

ciel



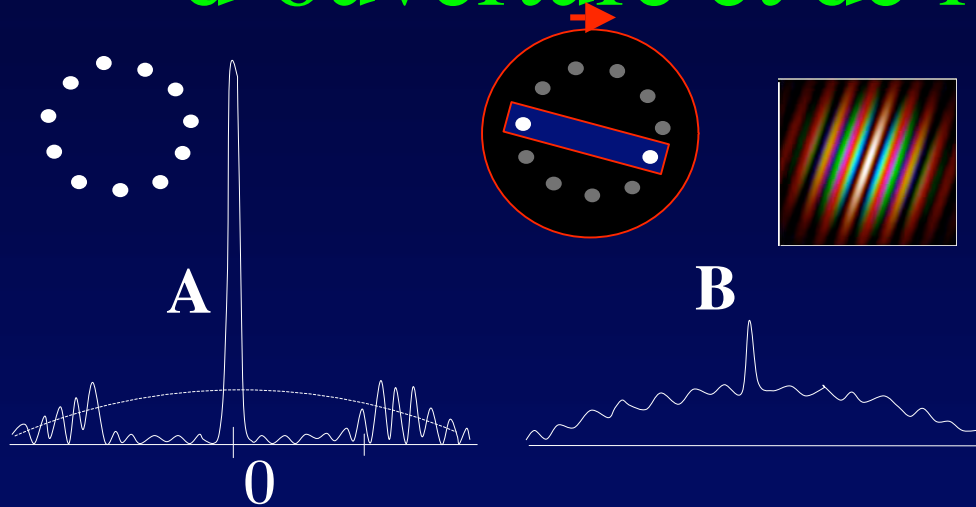
caméra



# ELT ou Hypertélescope ?

- Comparer:
  1. Encombrement des champs
  2. Magnitude limite, avec optique adaptative
  3. Etendue de champ
  4. Faisabilité , coût, etc..

# Sensibilité comparée de la synthèse d'ouverture et de l'hypertélescope

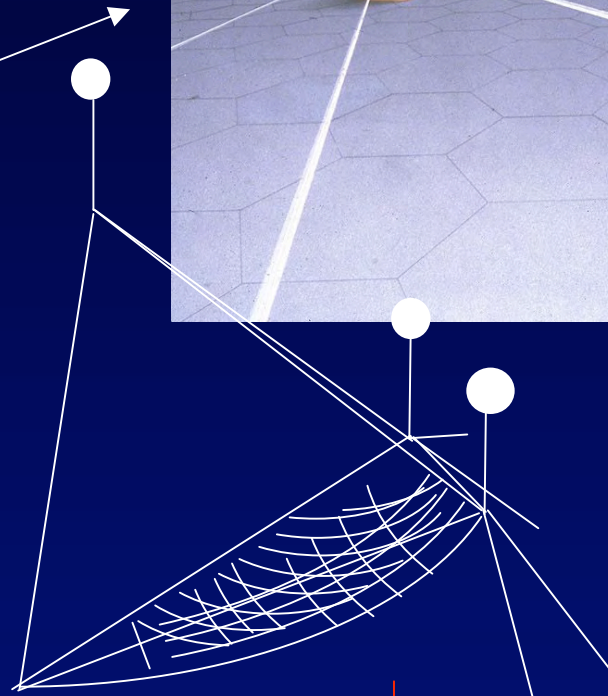
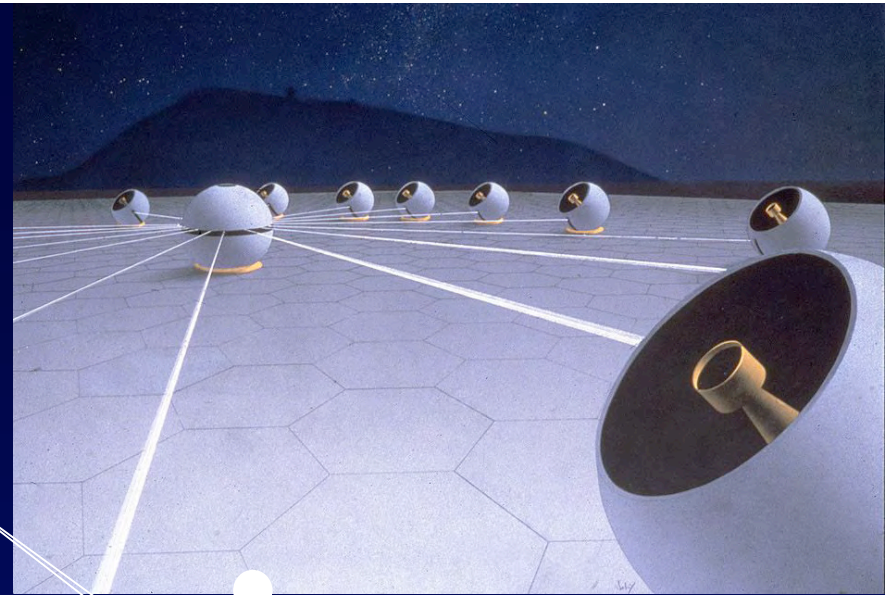


- Gain en dynamique ( les ouvertures étant cophasées):  
$$N / \{2 \text{ sqr} ( k_d)\}$$
  - Exemple: Un hypertélescope ayant  $N=1000$  ouvertures de 1,4m, avec  $k_d = 0,01$ , **détecte des compagnons 5 000 fois plus faibles** que la synthèse d'ouverture avec une paire de télescopes de 32m
  - À surface collectrice égale 2000 m<sup>2</sup>, et même durée d'observation



# architectures hypertelescope

- plat
- parabololoïde
- sphérique



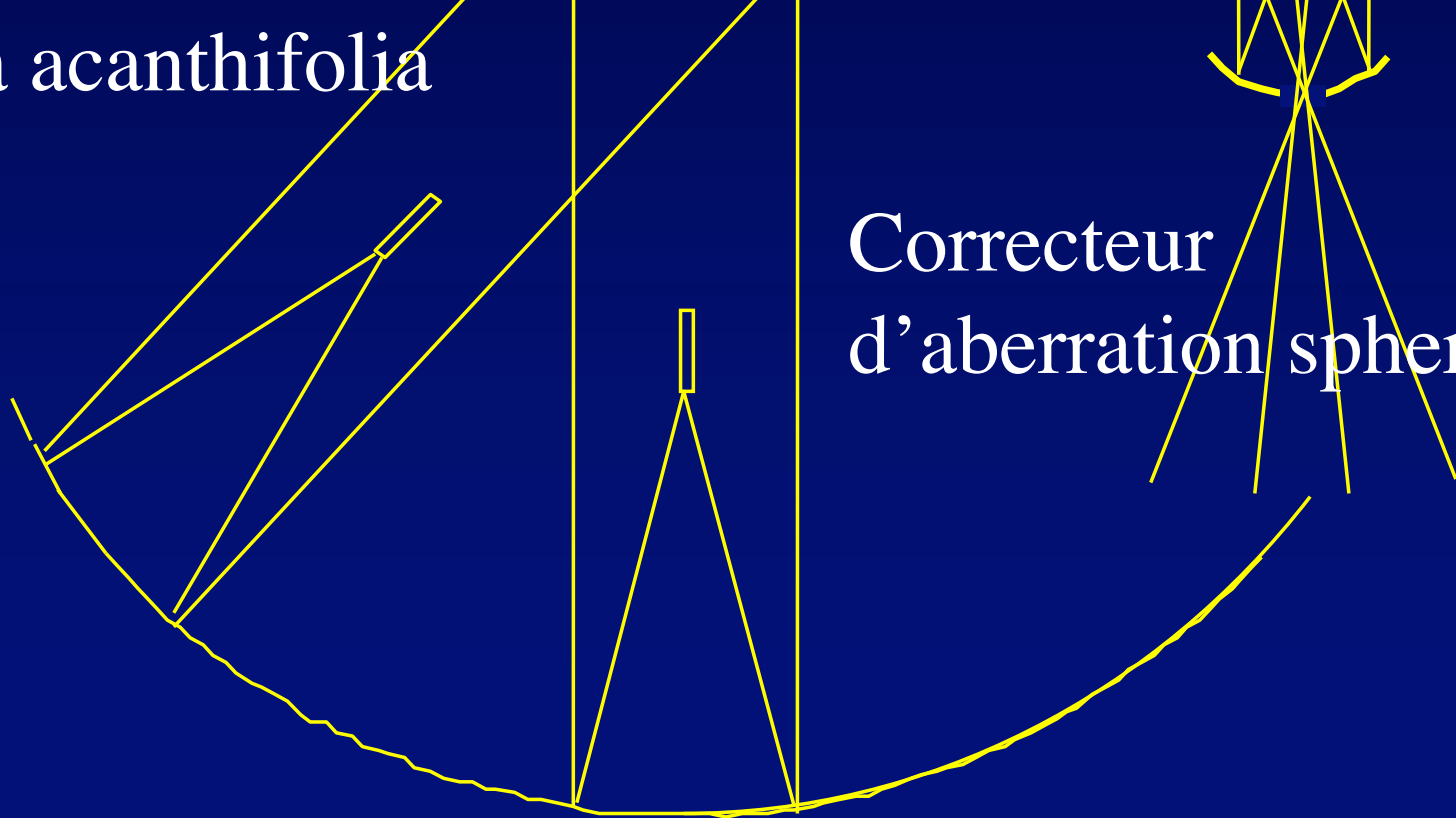
Carlina  
acanthifolia





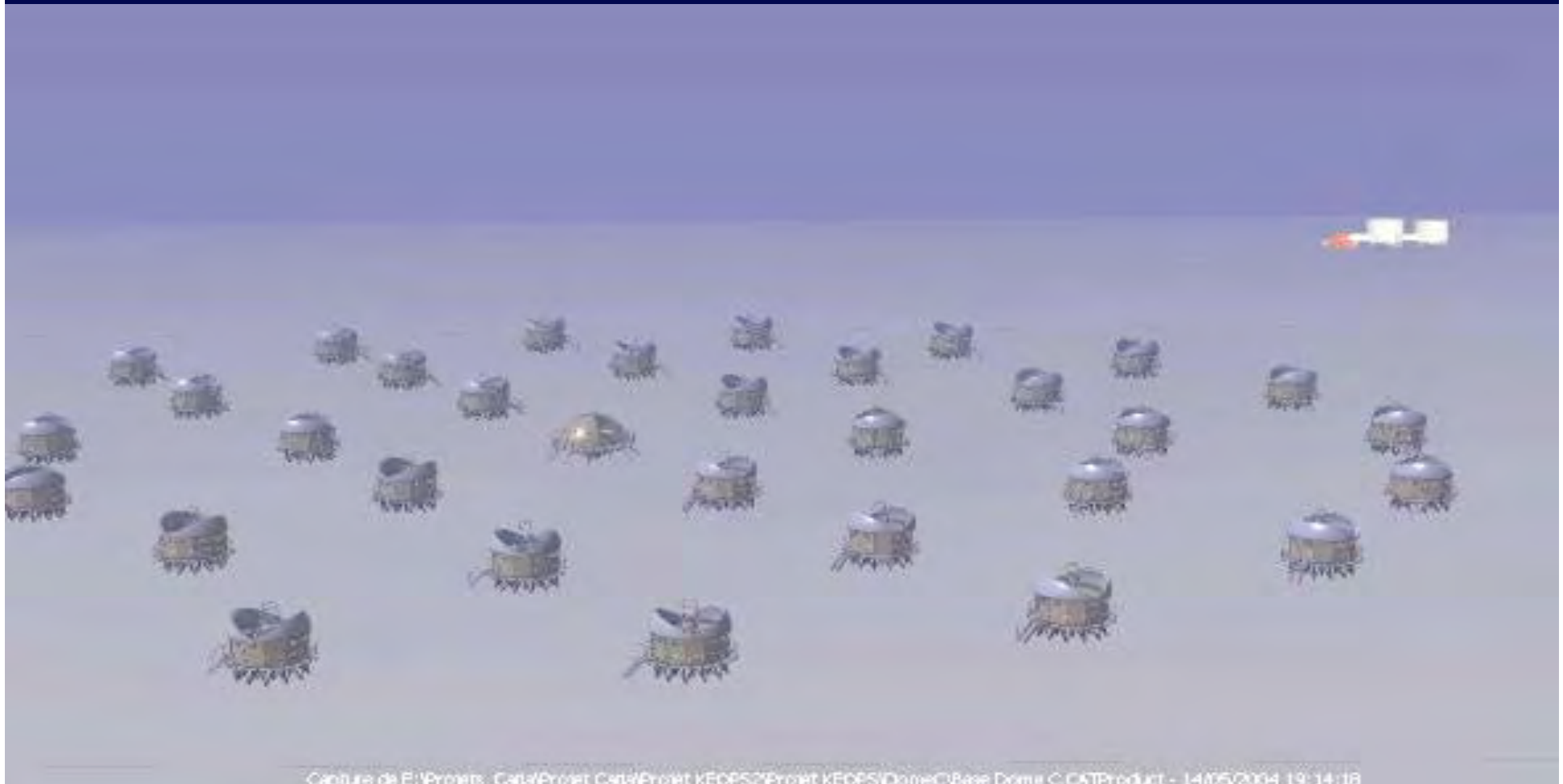
CARLINA  
hypertélescope  
au sol

Carlina acanthifolia



# Hypertélescope plat pour Dome C ?

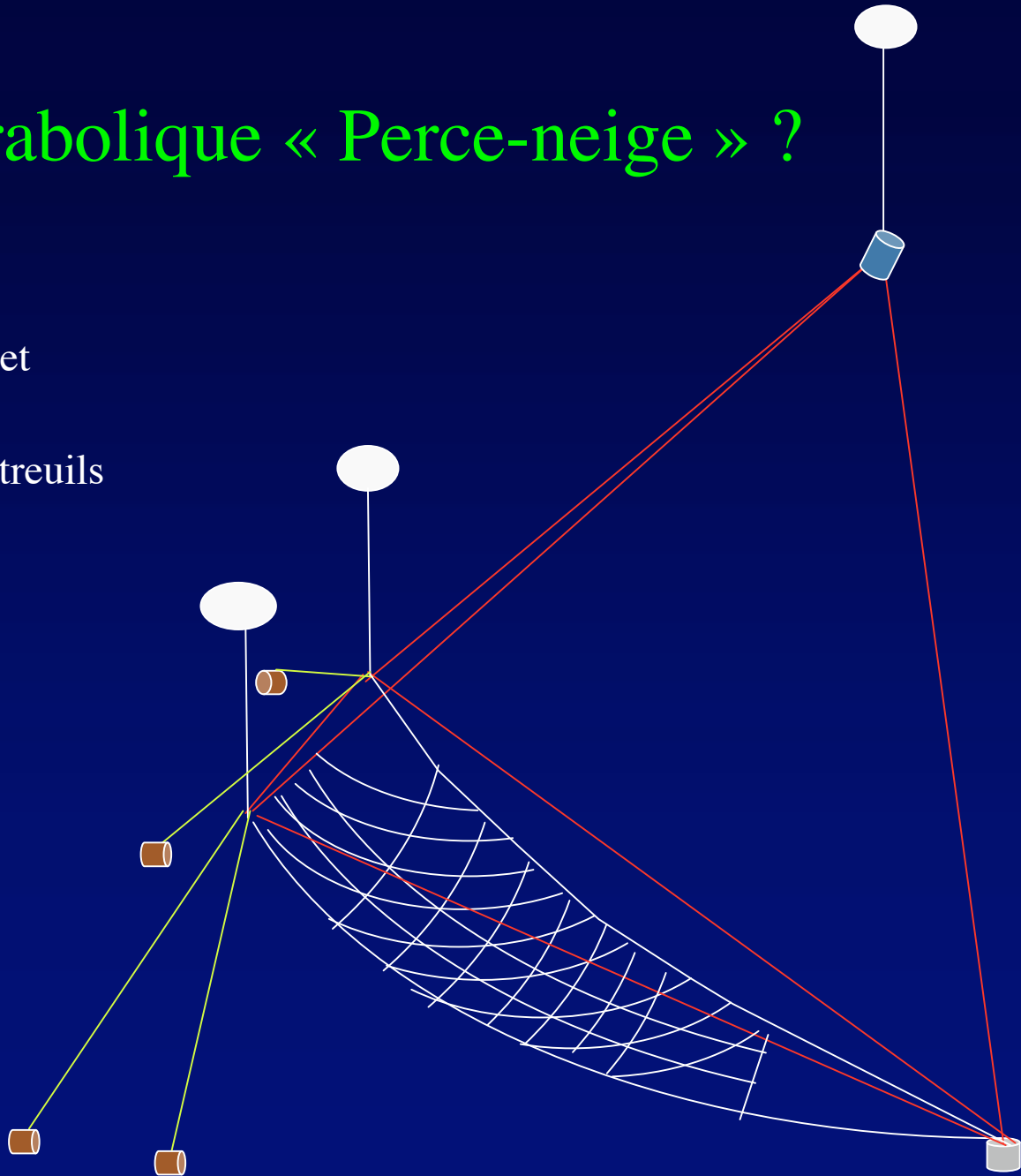
## Proposition « KEOPS » (Vakili et al. 2004)



# au Dôme C : hypertélescope parabolique « Perce-neige » ?

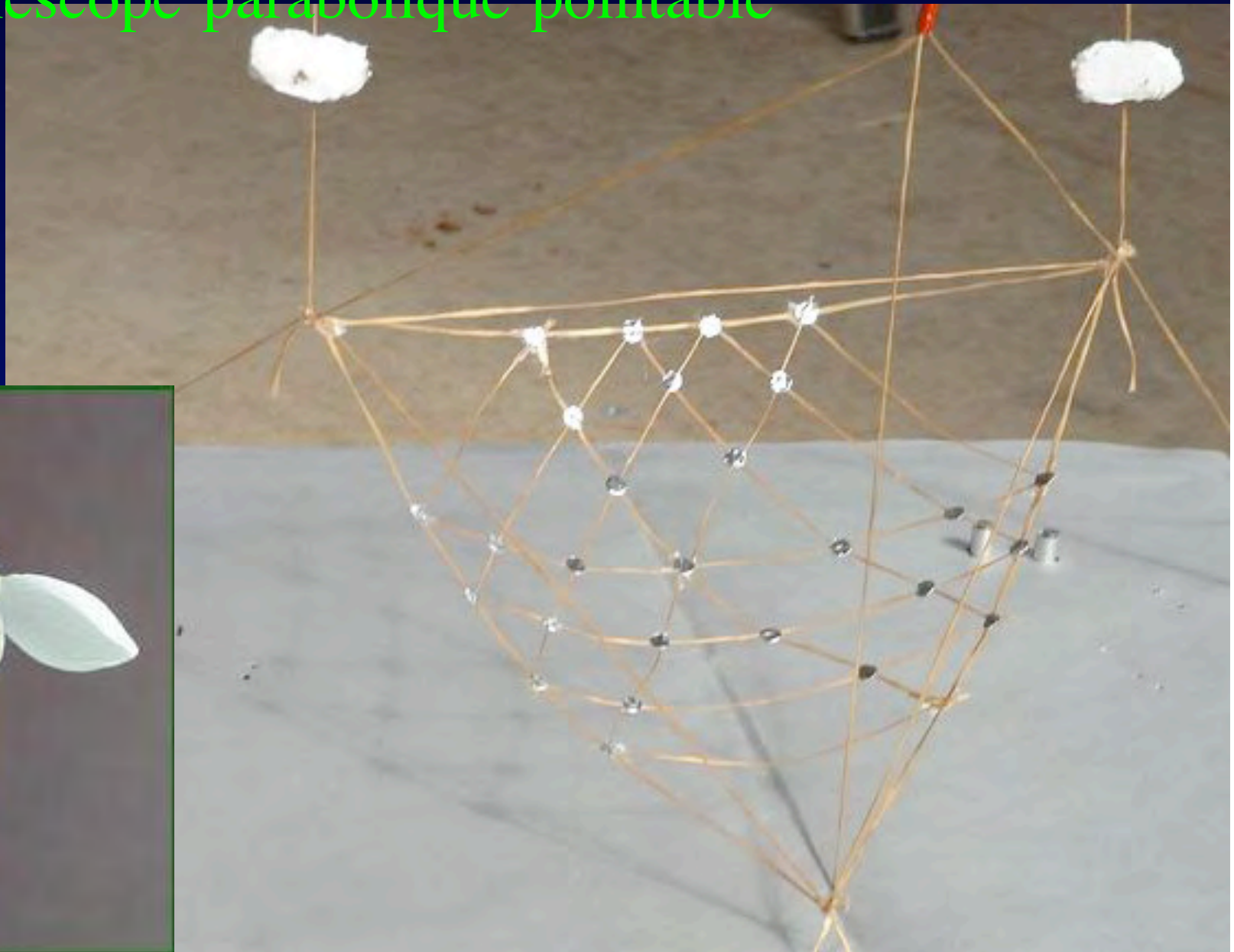
suspendu à 3 ballons

- miroirs actifs aux nœuds du filet
- Paraboloïde à F/1
- pointé globalement par 2 ou 3 treuils
- Dimension 1 km ?



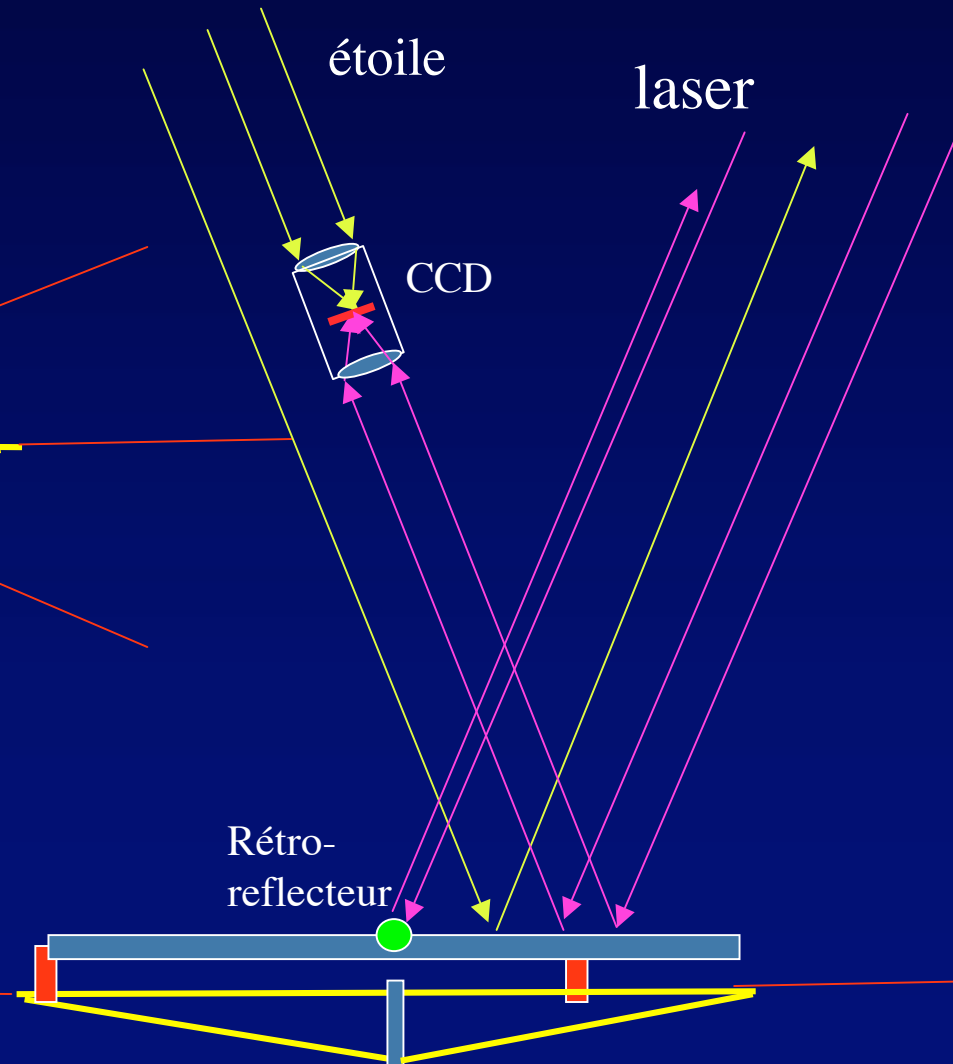
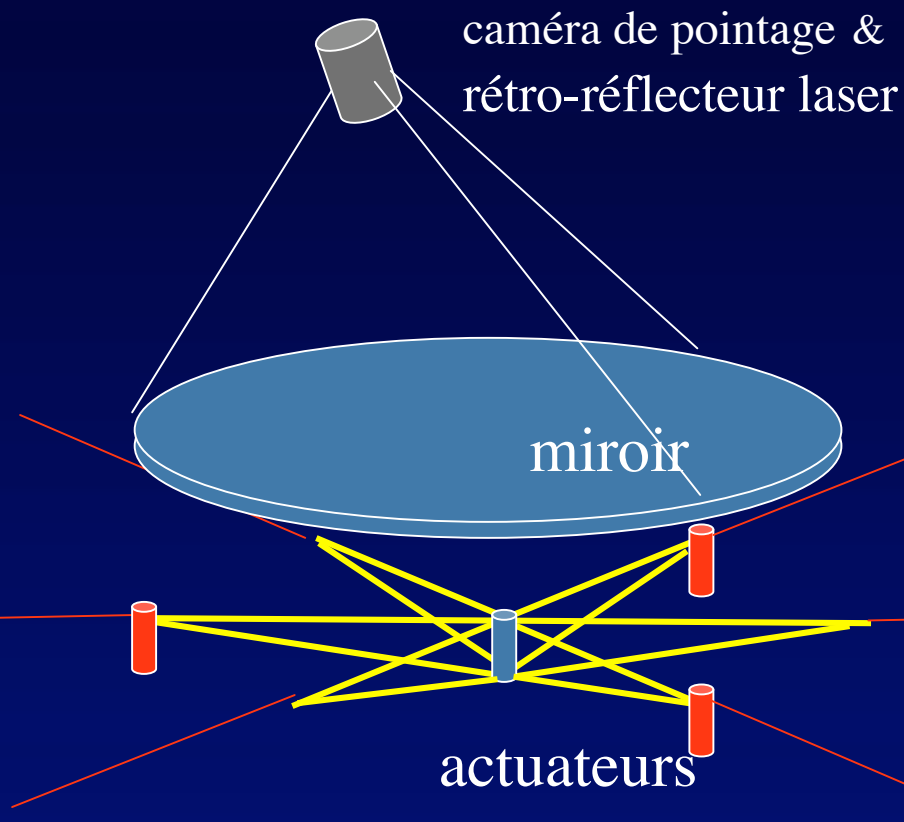
# Maquette de Perce-neige

## hypertélescope parabolique pointable





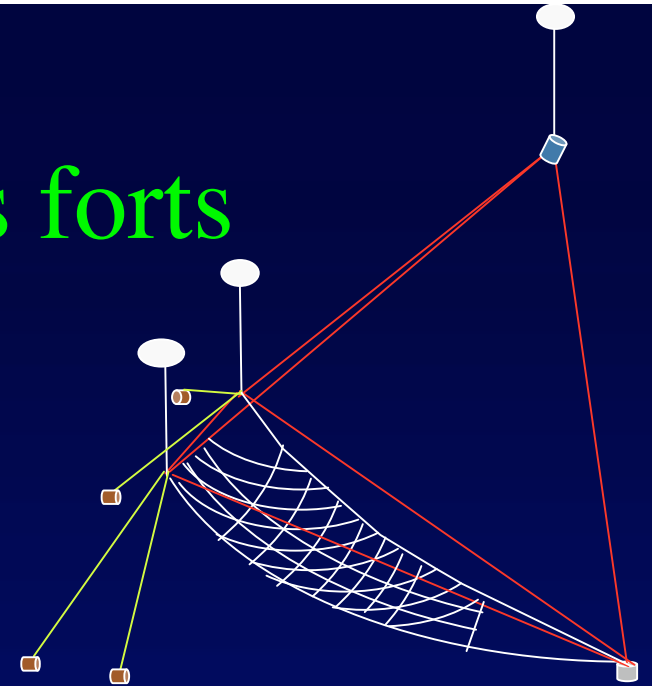
# Miroirs et actuators de Perce-neige



- 3 actuateurs
- course : centimètres ?

# Perce-Neige au Dôme C:

## Points durs et points forts



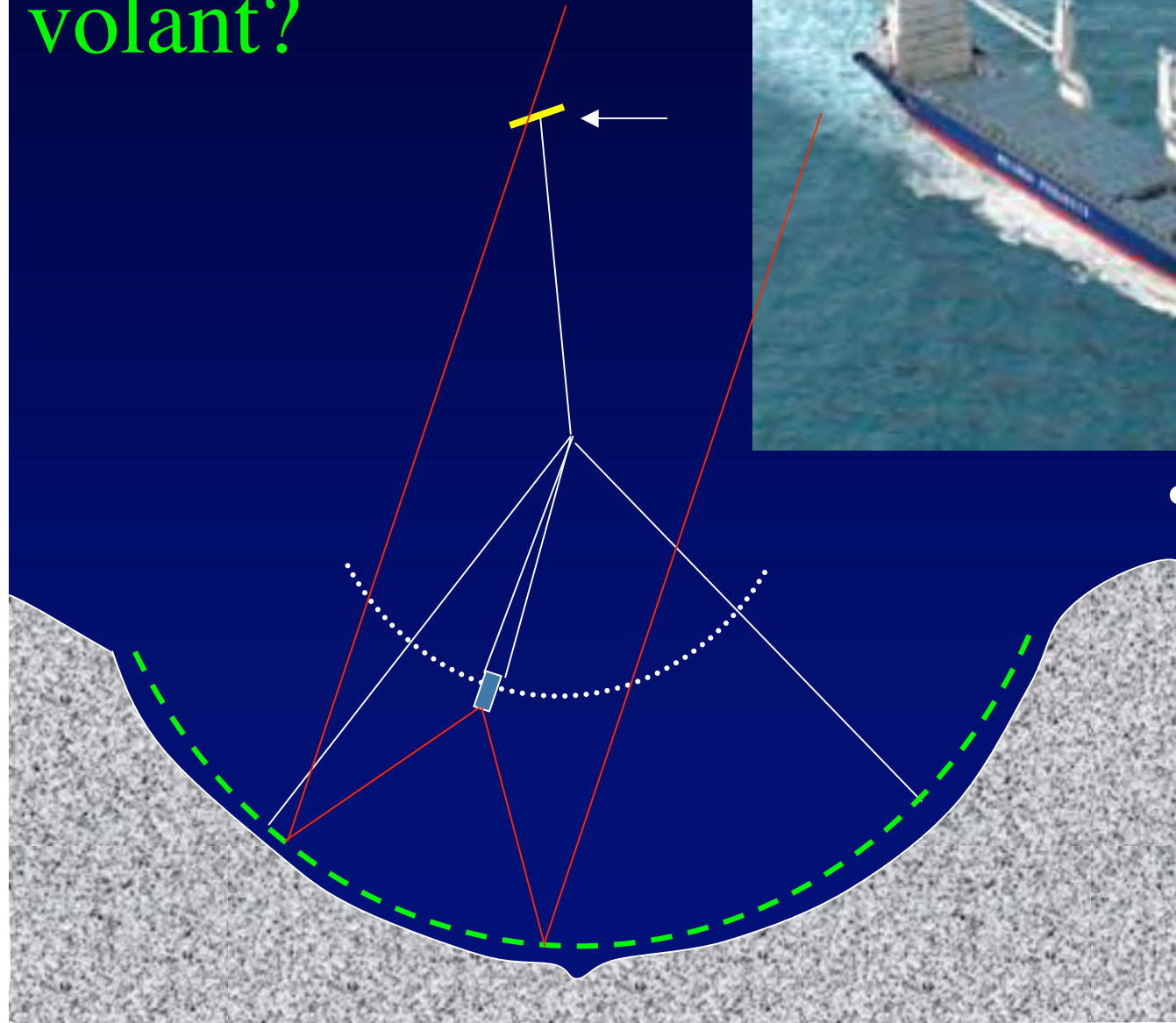
- Calculer les flexions du hamac en fonction de la hauteur pointée
- Nécessite un vent très faible
- Givrage des câbles : comment l'éviter ? À coups de laser ?
- Pollution et vibrations: remplacer le générateur Diesel par une pile à combustible !
- **Les miroirs sont au-dessus de la couche turbulente**



hypertélescopes Carlina:  
Ballon ou cerf-  
volant?



actuateurs



- SkySails a expérimenté un cerf-volant **actif** remorquant un cargo

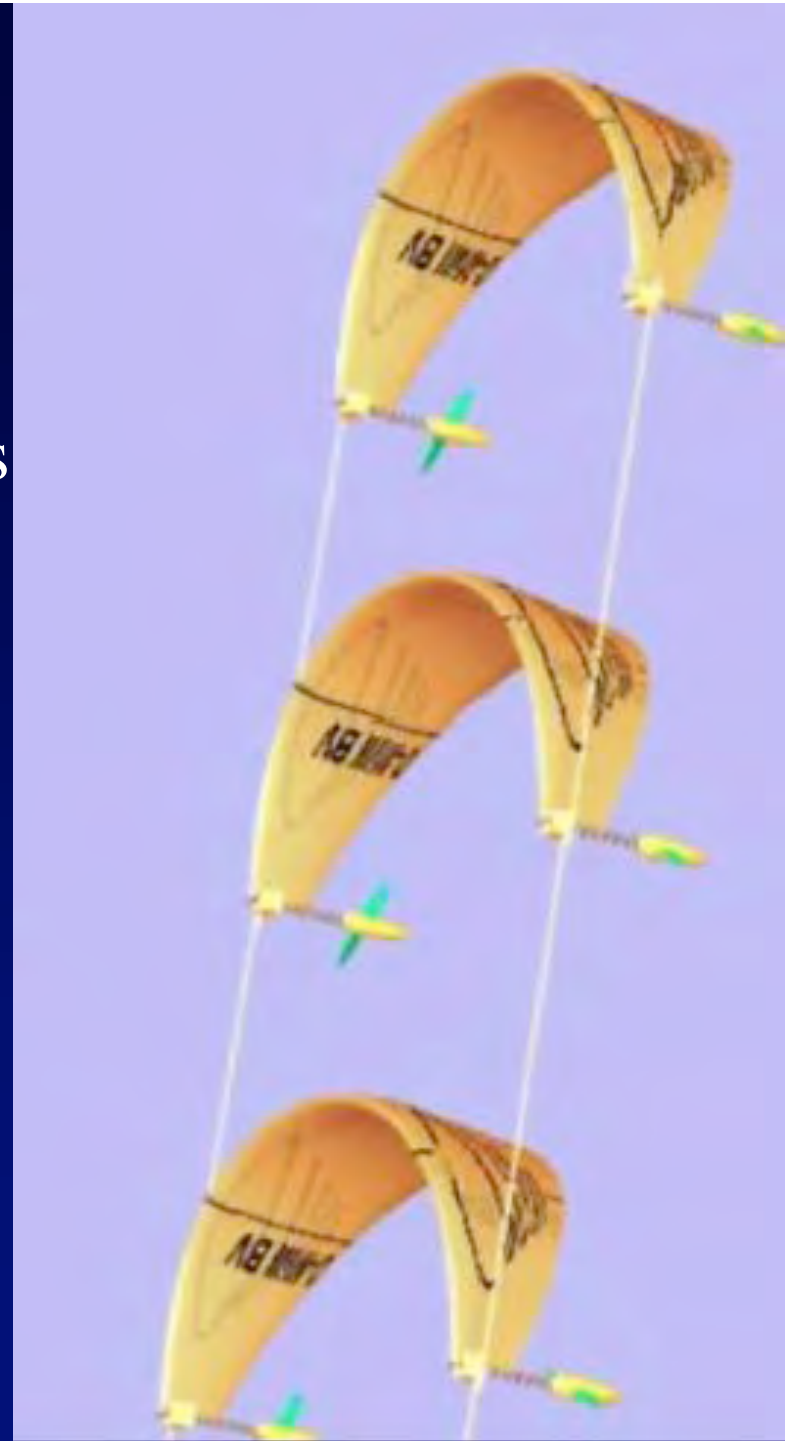
# ballon ou cerf-volant?

- cerf-volant parapente
- finesse 10: tire à 0,1 radian du zenith
- vent  $> 5\text{m/s}$  ( 18km/h)... a son altitude
- plus stable
- pilotable électroniquement
- plus économique qu'un ballon



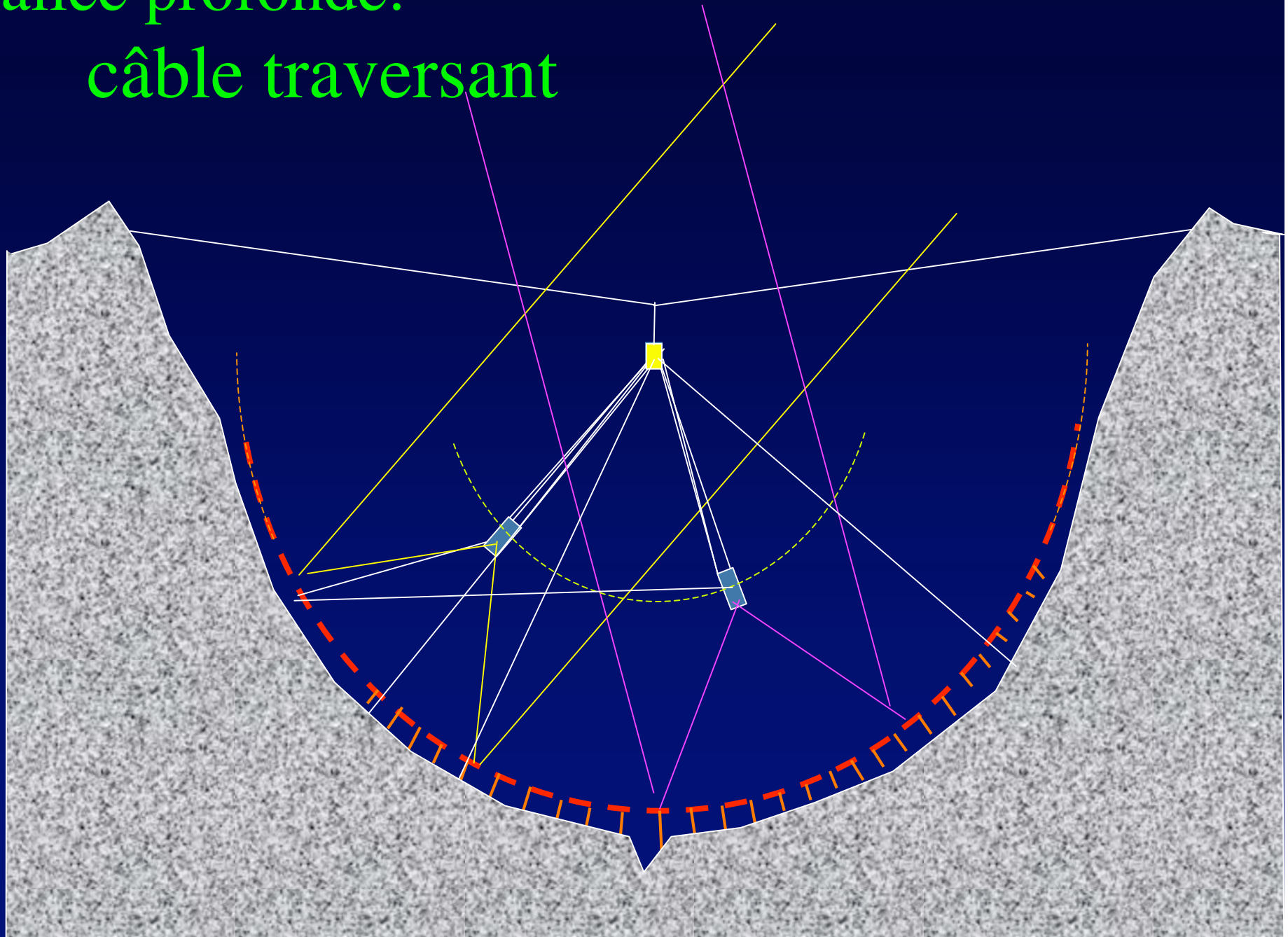
# Cerfs-volants étagés

- Meilleure stabilité passive
- Utilisés en 1914-18 pour porter des observateurs d'artillerie
- Proposé pour éoliennes à haute altitude ( Ippolito, 2005)

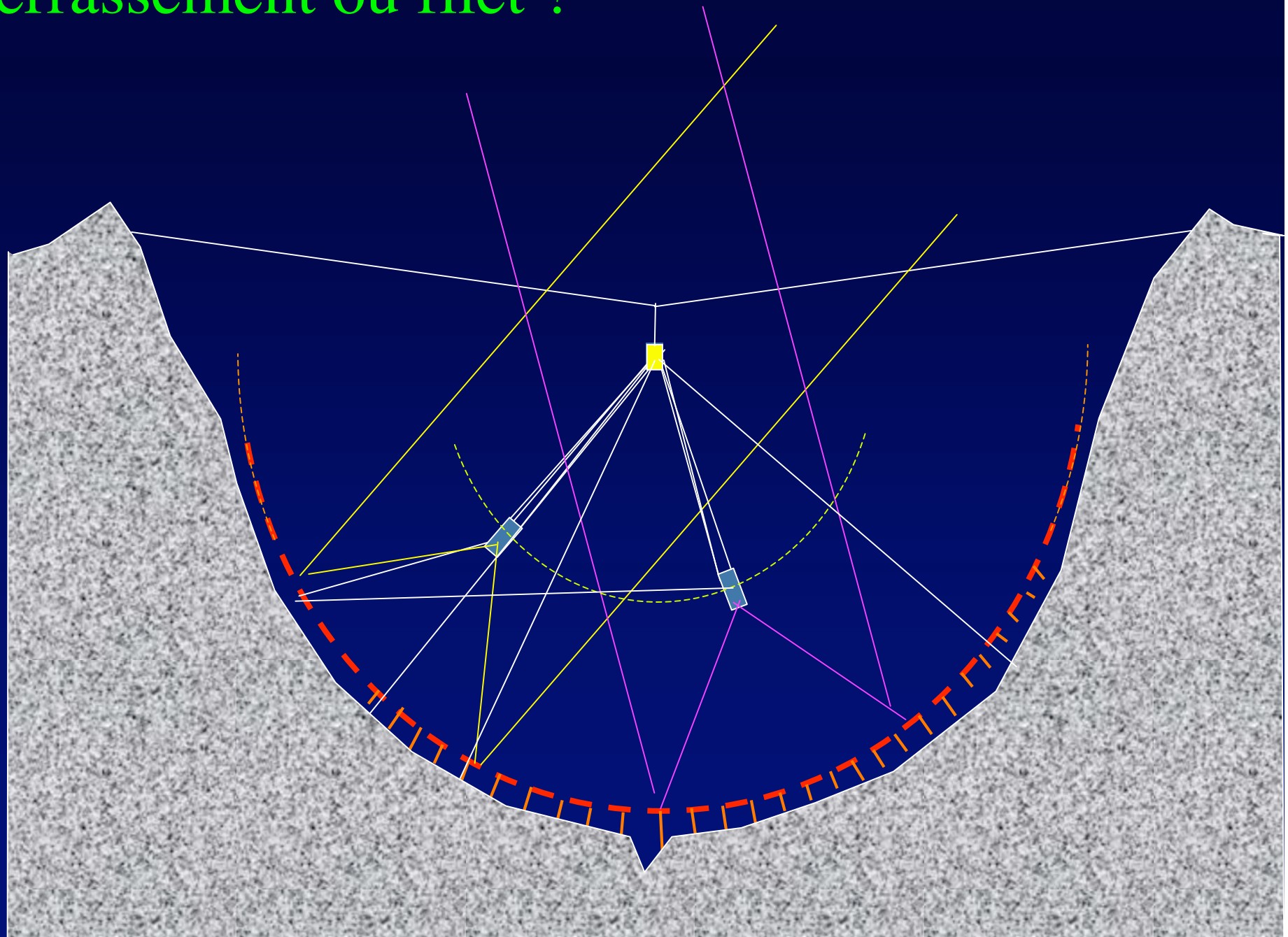




# Vallée profonde: câble traversant

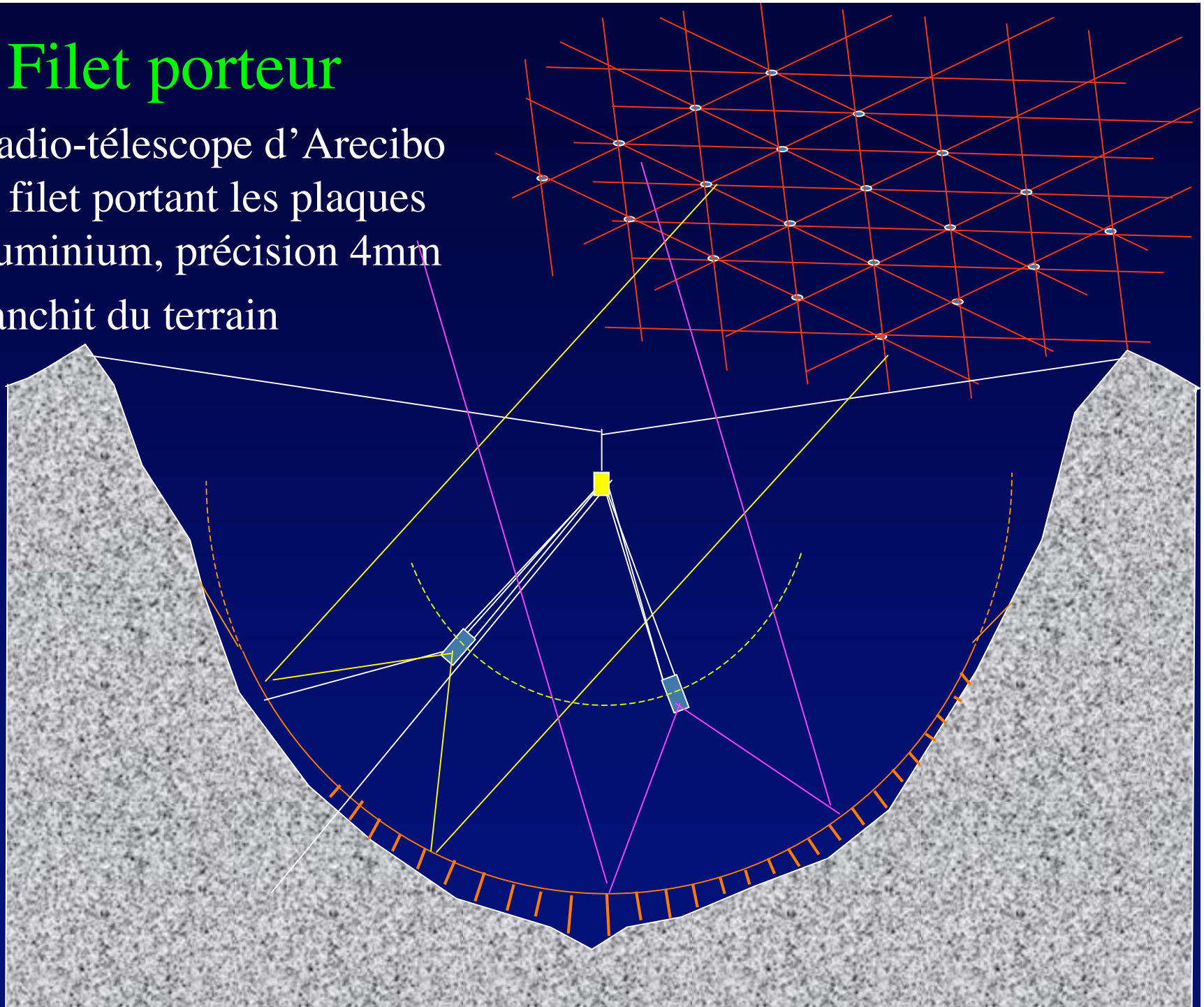


# Terrassement ou filet ?

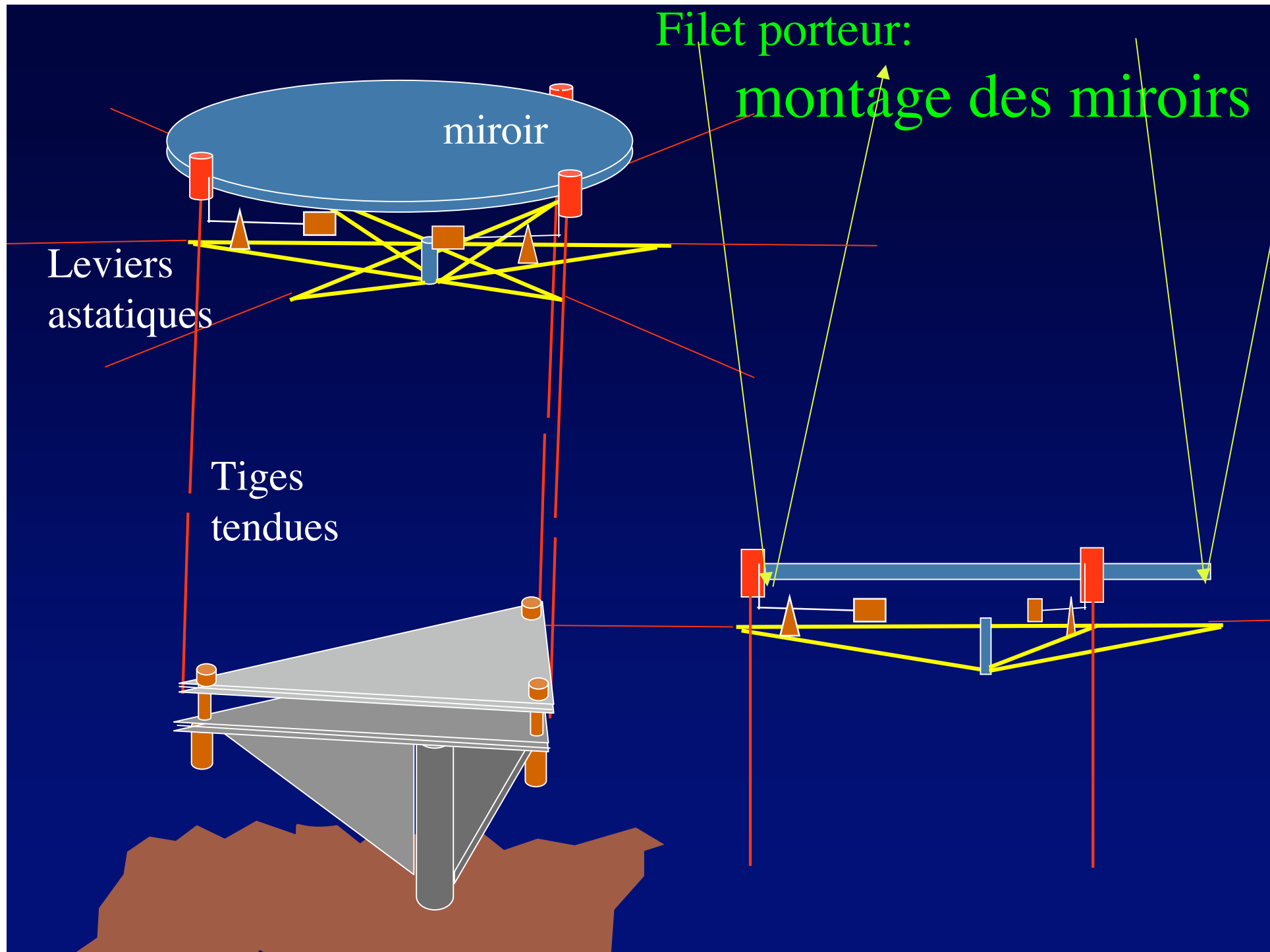


# Filet porteur

- Le radio-télescope d'Arecibo a un filet portant les plaques d'aluminium, précision 4mm
- affranchit du terrain







Miroirs sur filet:  
petit essai





# Alpes du Sud - vallon du Rabioux



© 2007 Europa Technologies  
Image © 2007 TerraMetrics  
© 2007 Cnes/Spot Image

© 2007 Google™

468 m

Pointeur lat 44.648939° long 6.459950° élév. 1631 m Mise au point ||||| 100%

Altitude 2.16 km



# Massif des Trois Evêchés





# Queyras





# Vallouise



© 2007 Cnes/Spot Image  
© 2007 Europa Technologies

© 2007 Google™

98 m

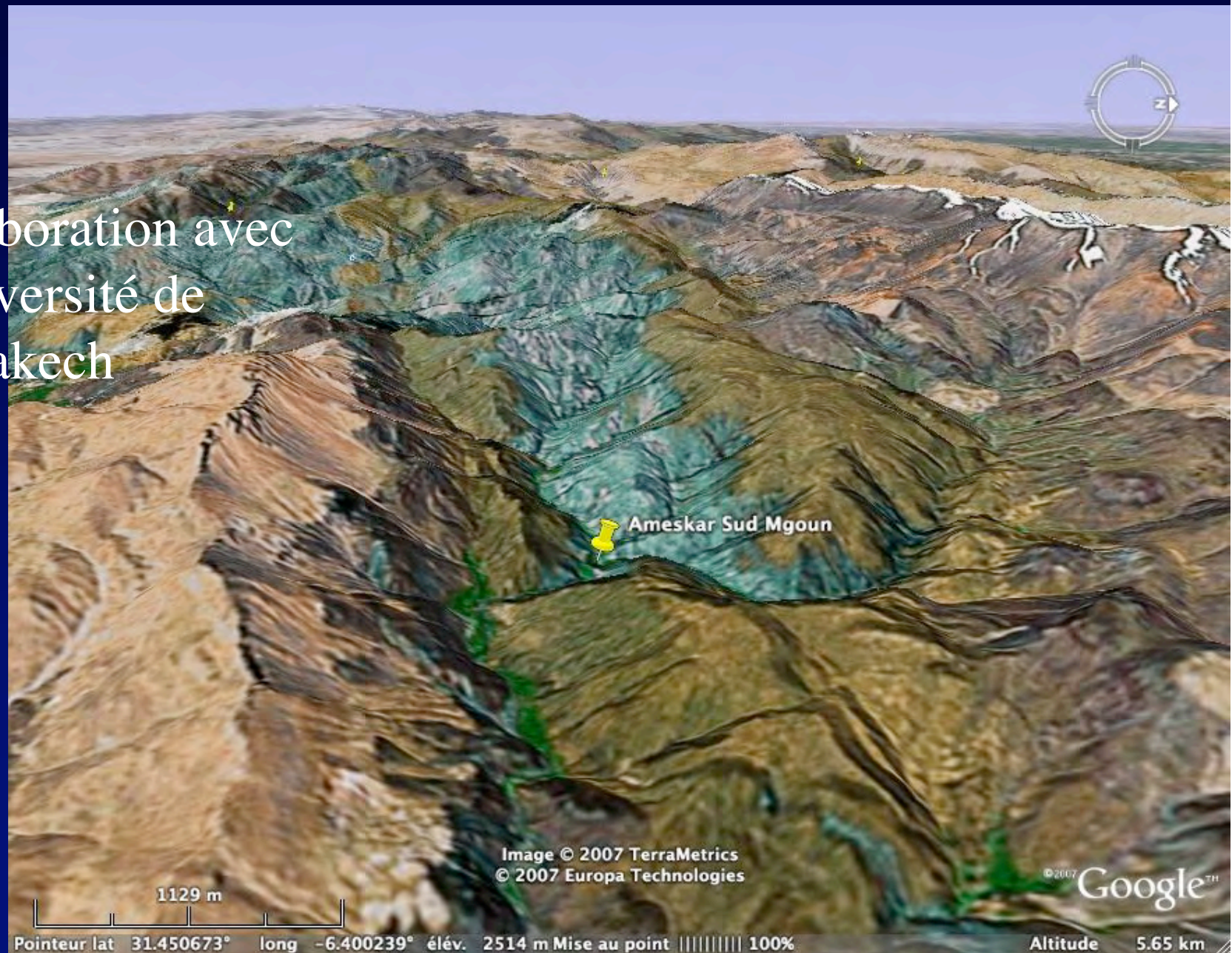
Pointeur lat 44.836638° long 6.435686° élév. 1364 m Mise au point ||||| 100%

Altitude 1.75 km



# Haut Atlas Marocain

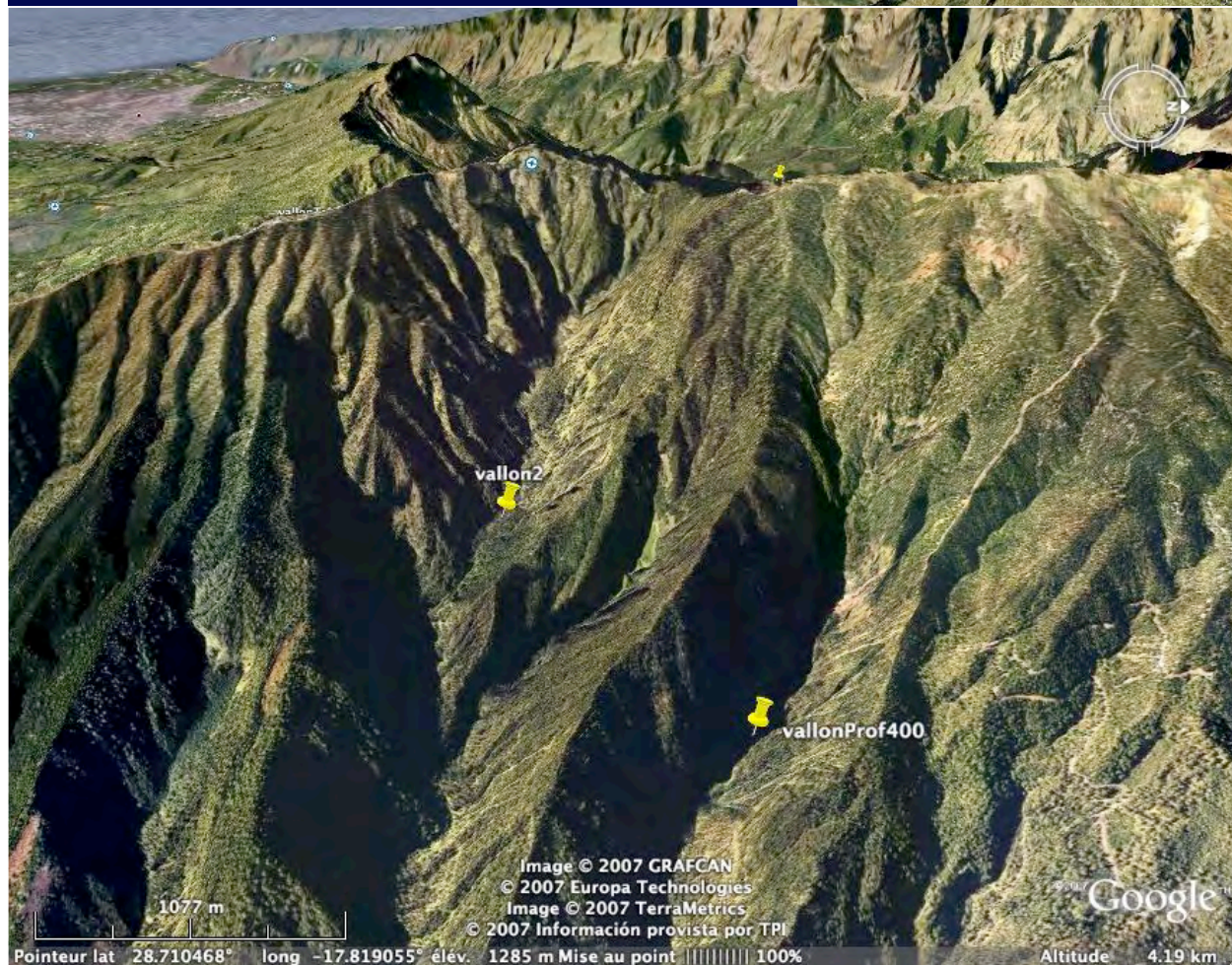
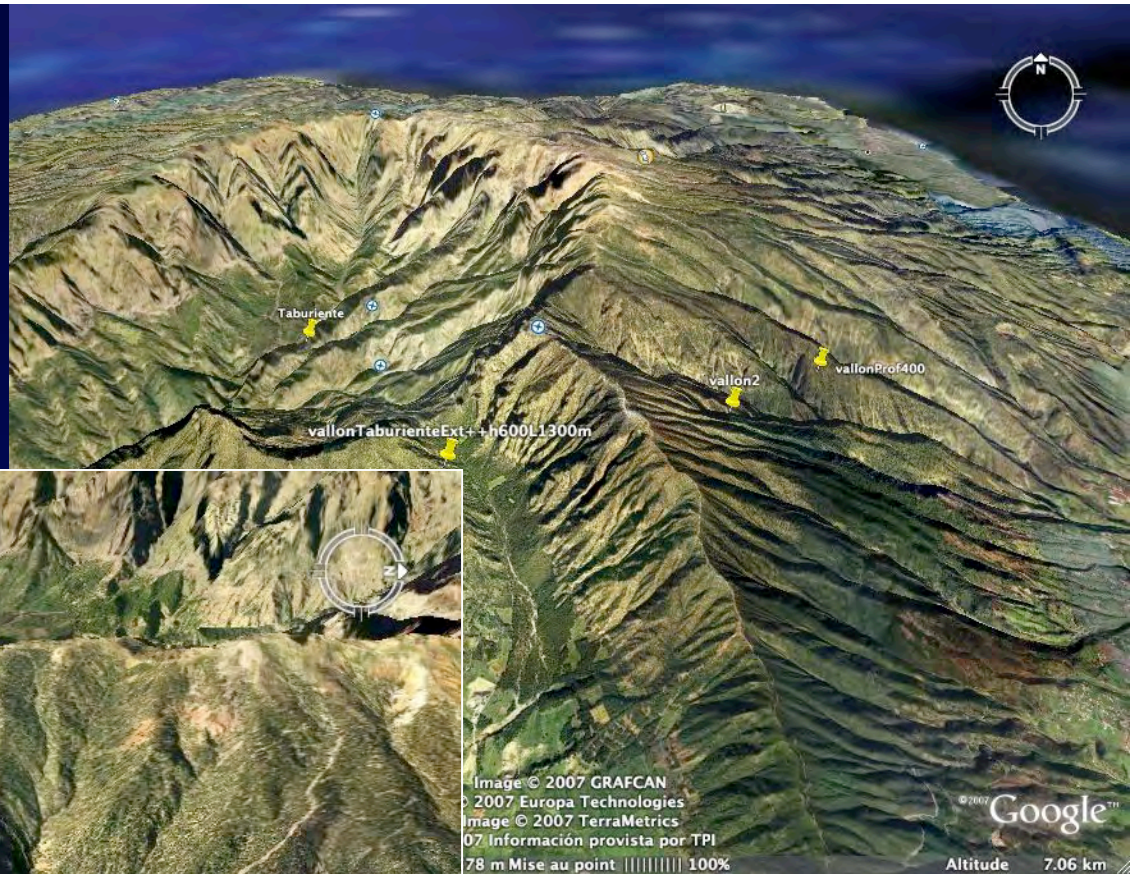
- Collaboration avec l'Université de Marrakech





# La Palma, Canaries

## « Caldera del Taburiente »



- Vent nocturne suffit pour cerf-volant ?
- Vent à 12 000m particulièrement faible 15m/s



# Nord du Thibet

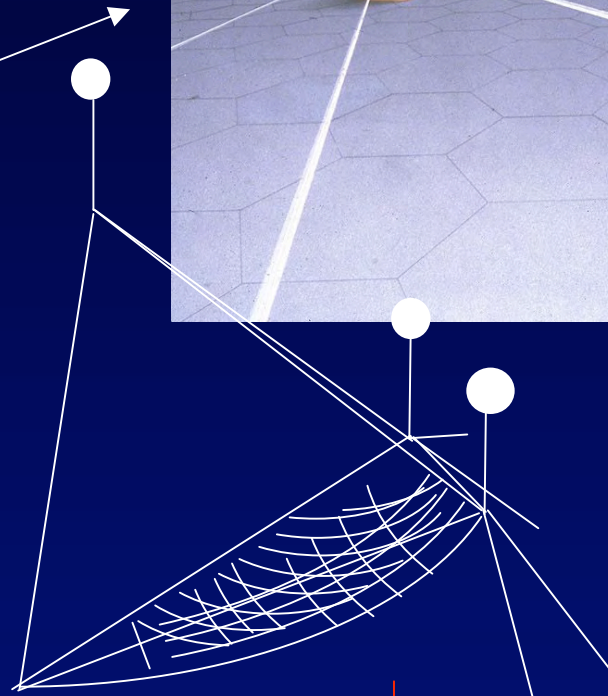
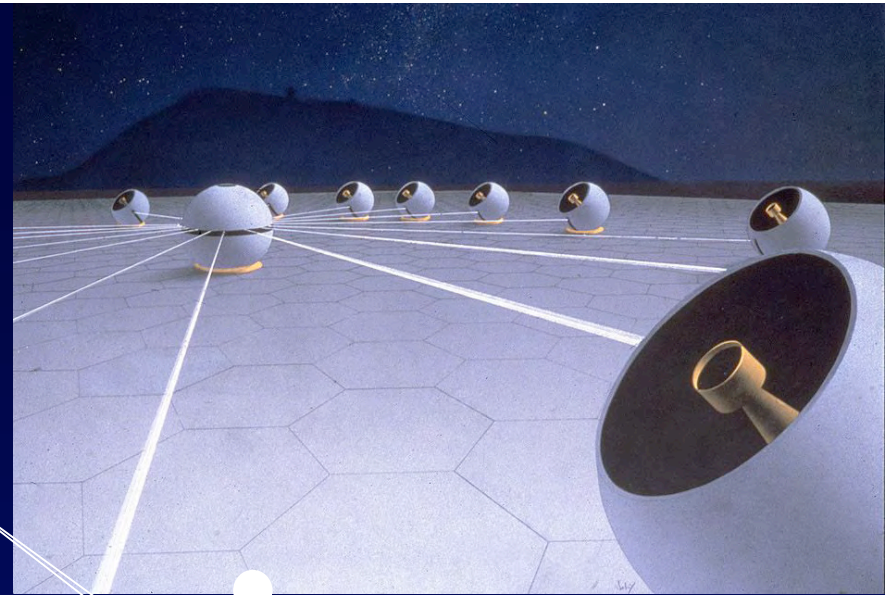
- Nombreux sites...
- ...peu accessibles ?



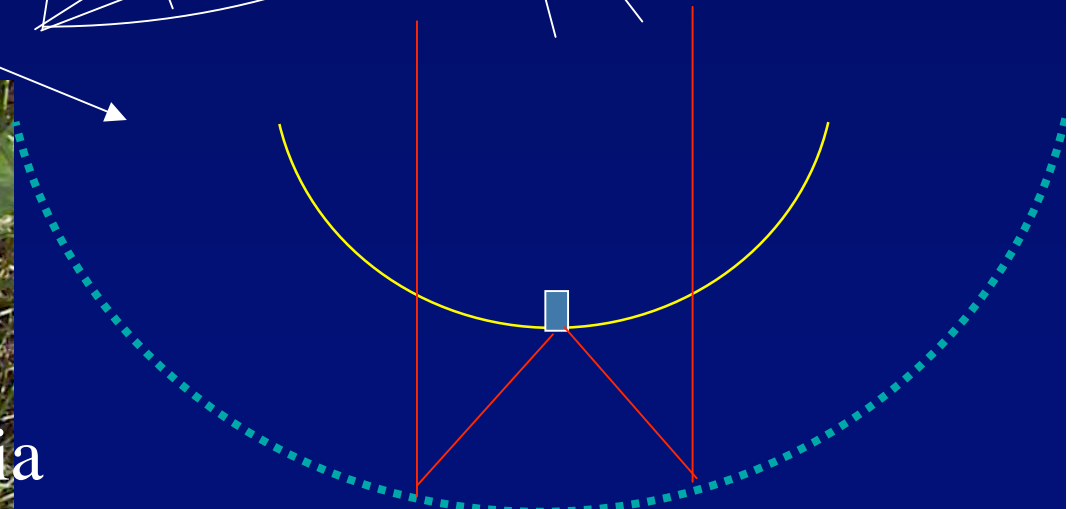


# architectures hypertelescope

- plat
- parabololoïde
- sphérique



Carlina  
acanthifolia





# Et la phase ?

- Commencer par observer en speckle...
- Puis mettre de l'optique adaptative
- Il faut alors mesurer les erreurs de piston

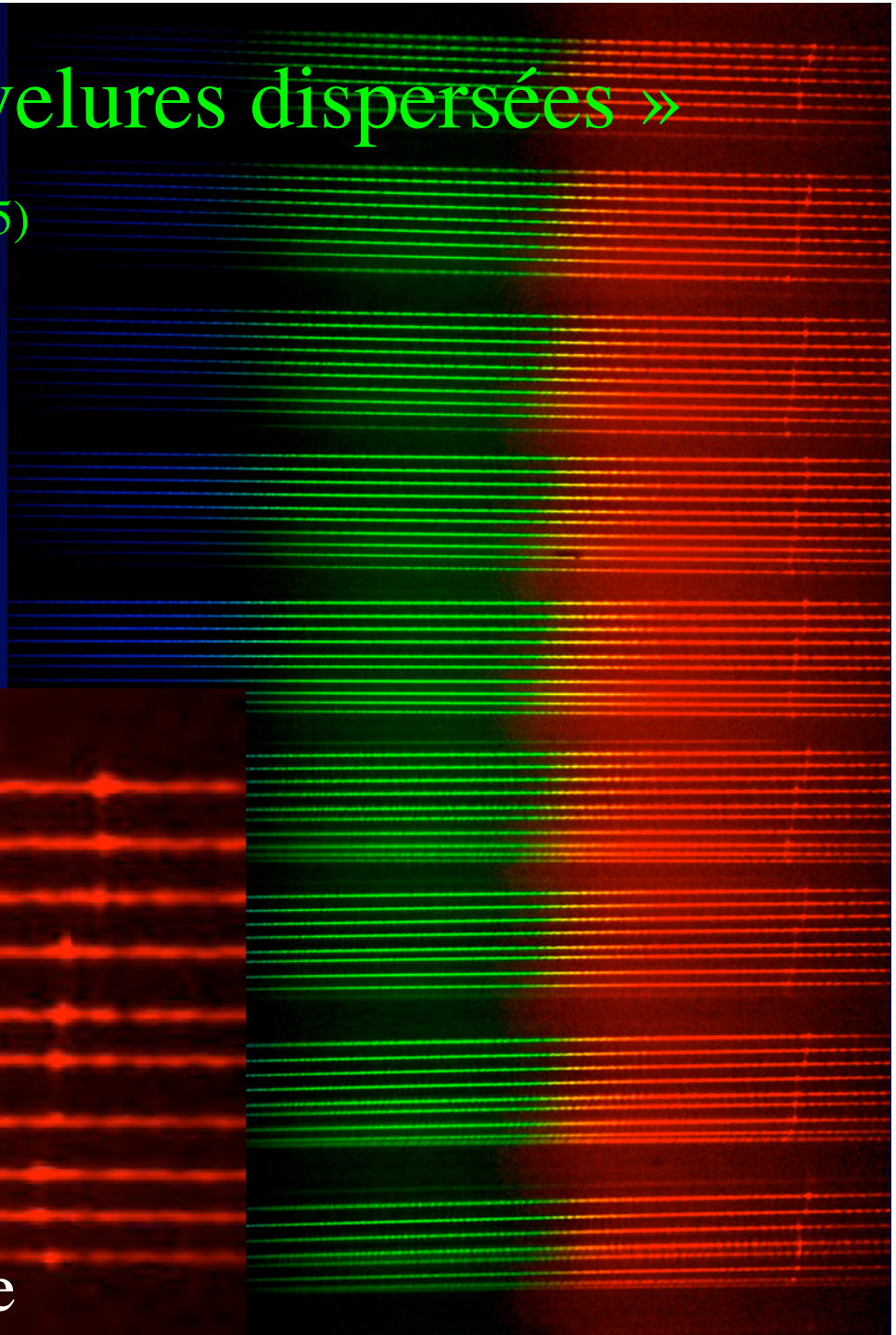
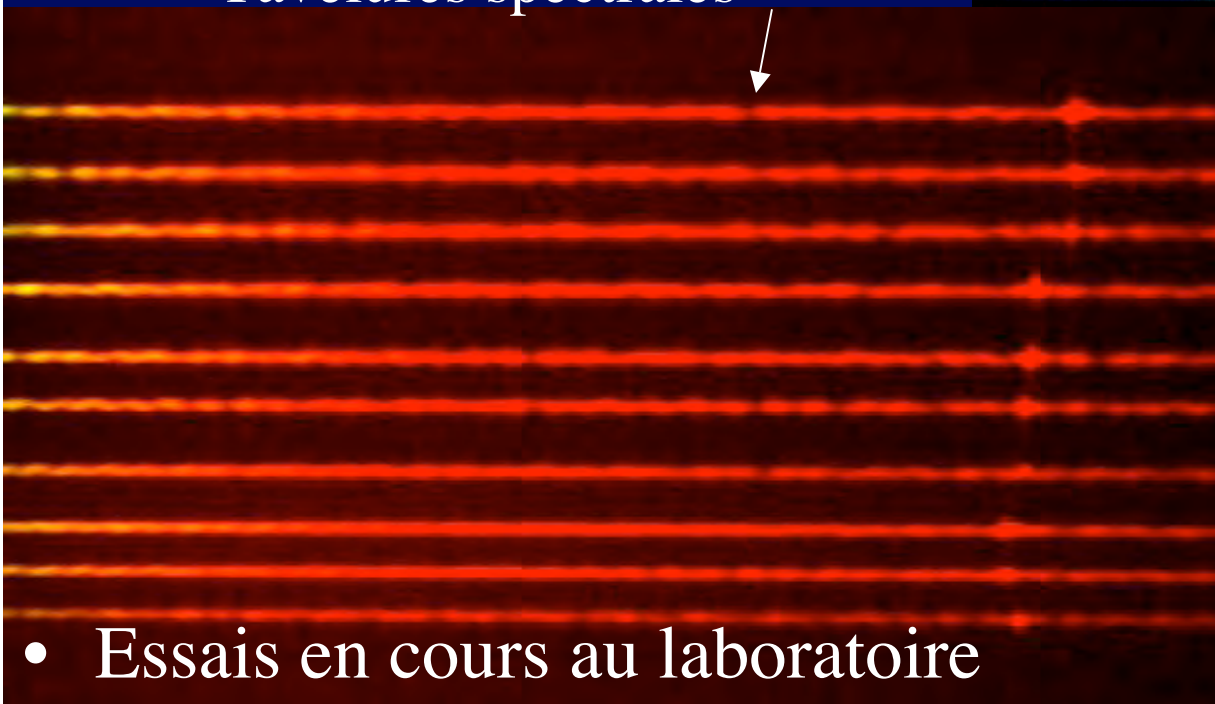
# Senseur de piston à « tavelures dispersées »

( Labeyrie, Borkowski, Martinache, 2005)



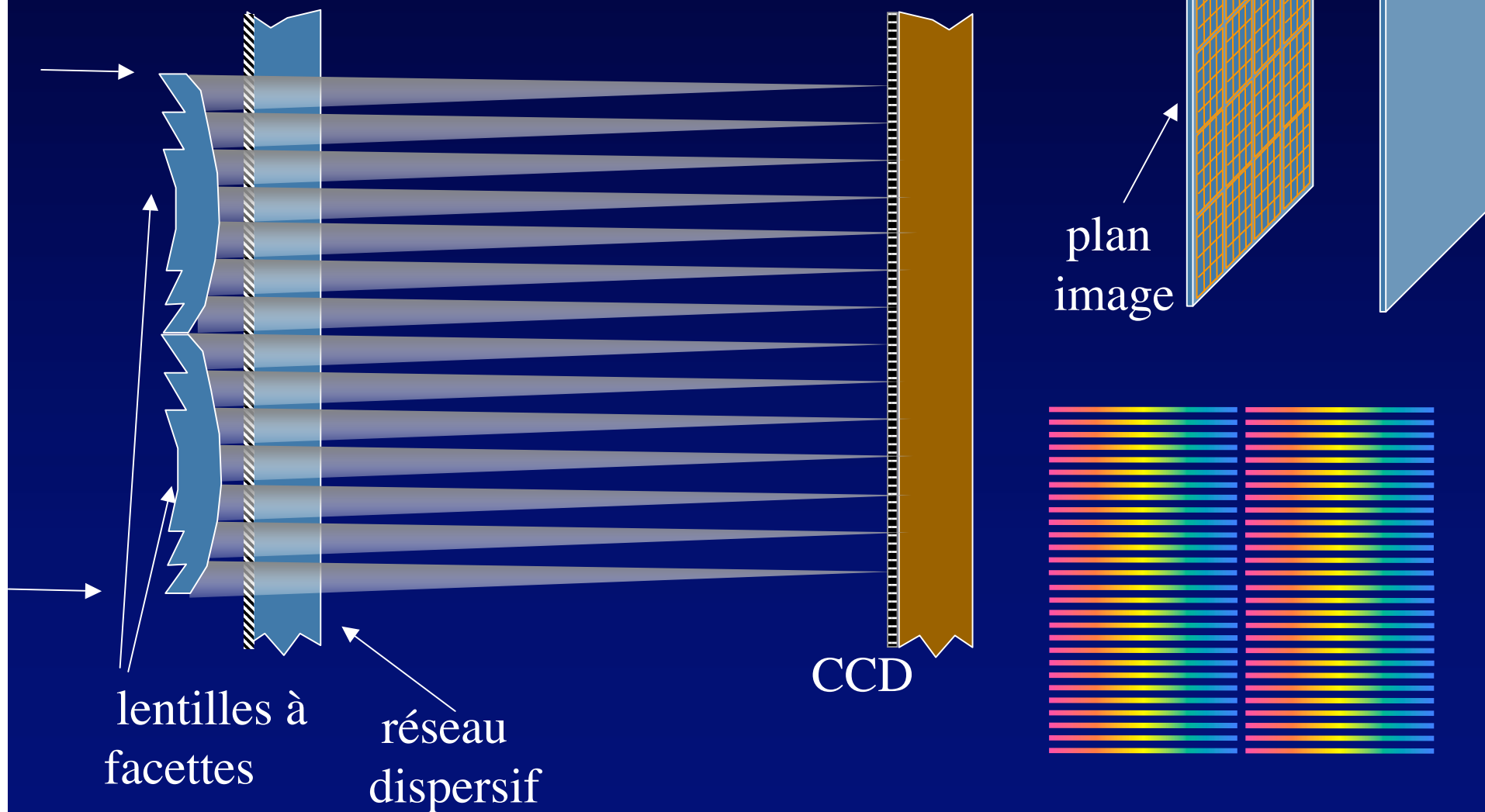
9+1 ouvertures  
non redondantes

Tavelures spectrales



- Essais en cours au laboratoire

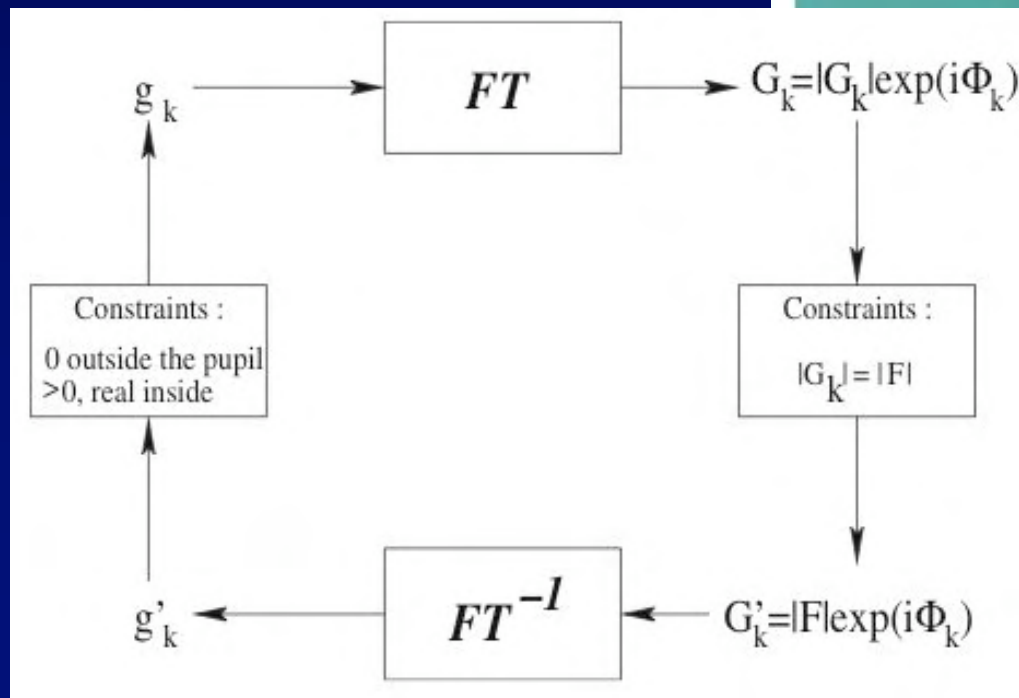
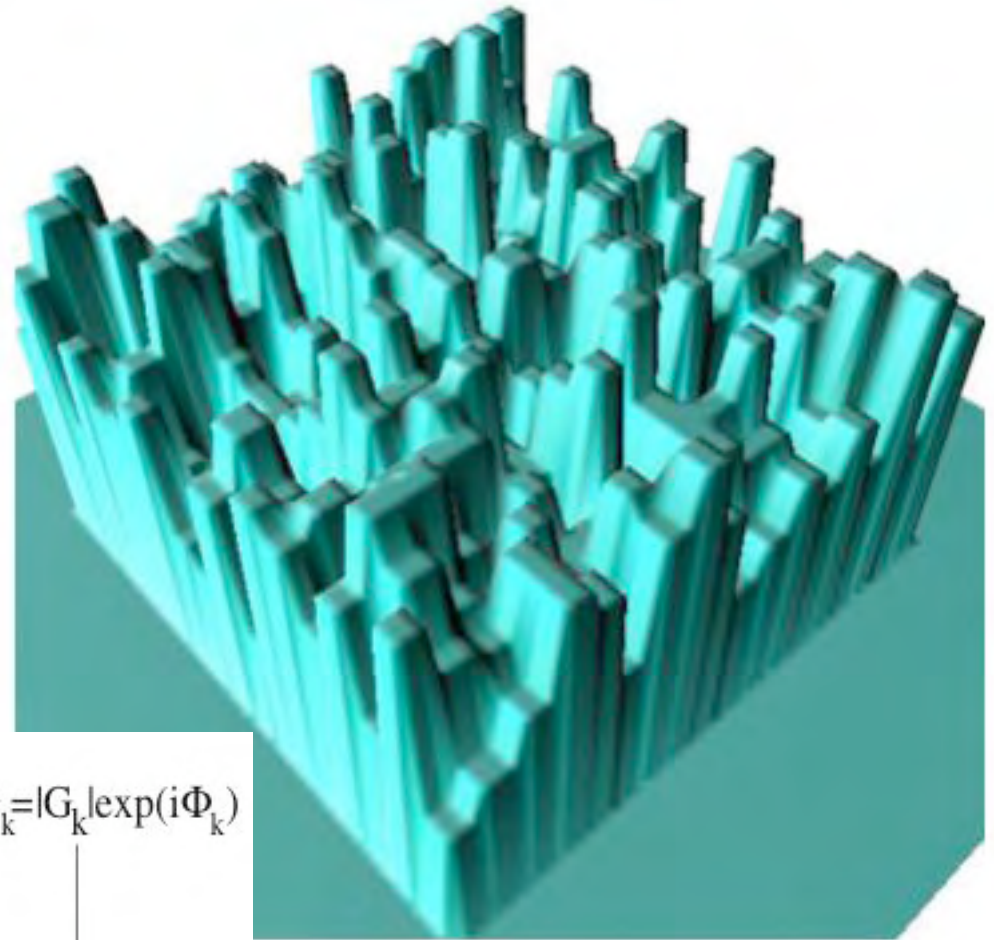
# Après les « image-slicers », TIGRE, etc... spectro-imageur à mini-prismes



# Onde mesurée par tavelures dispersées

(simulation numérique par Martinache 2004)

- > il faut 200 photons/ouverture avec 32 canaux spectraux



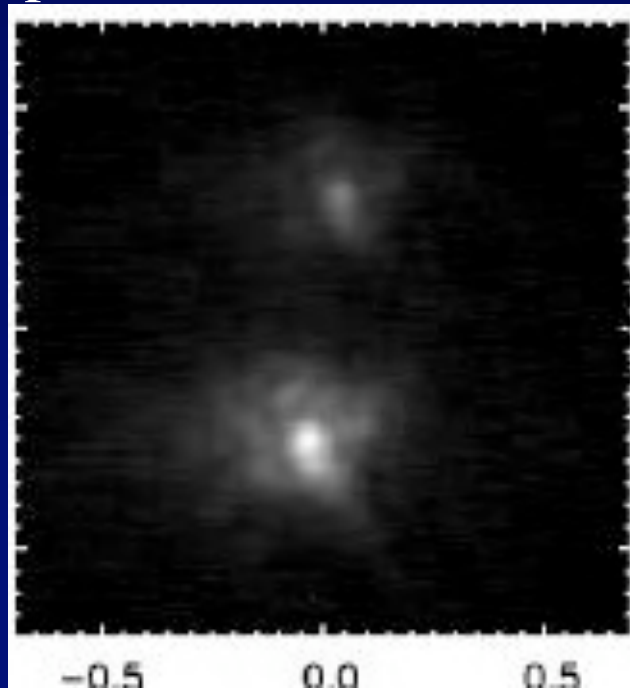


# Etoile Laser

« Until the early 1990s, the Starfire Optical Range .... was one of the U.S. Air Force's most closely guarded secrets.... »

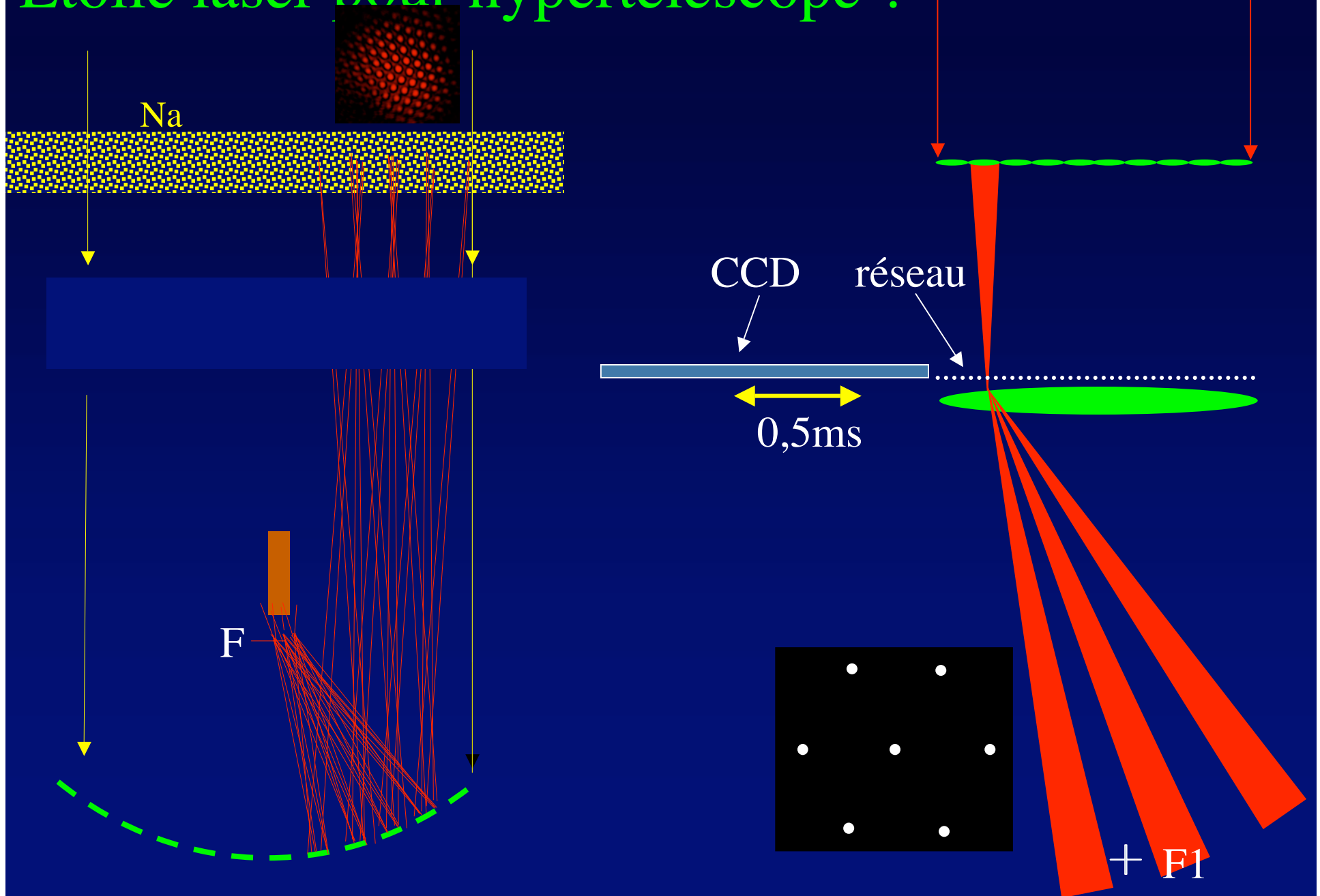
<http://138.238.143.191/astronomy/Chaisson/AT405/HTML/AT40503.htm>.

- fonctionne en infra-rouge  
au Keck ( Van Dam et al., 2006)
- Mais inutilisable pour ouvertures  
diluées



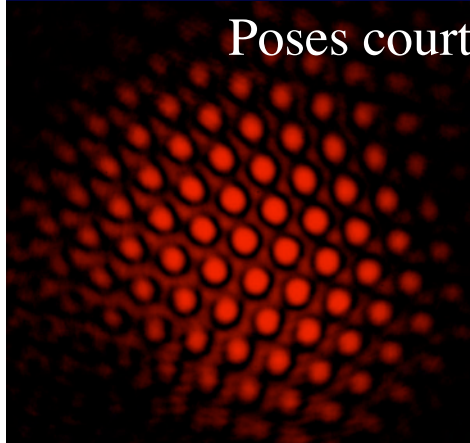
Noyau galactique double

# Etoile laser pour hypertélescope ?

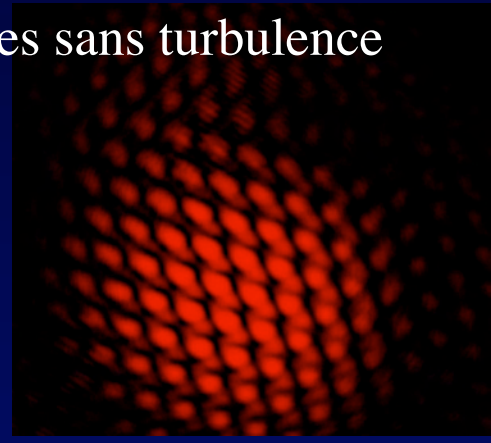


# Simulateur d'étoile guide laser pour ouverture diluée

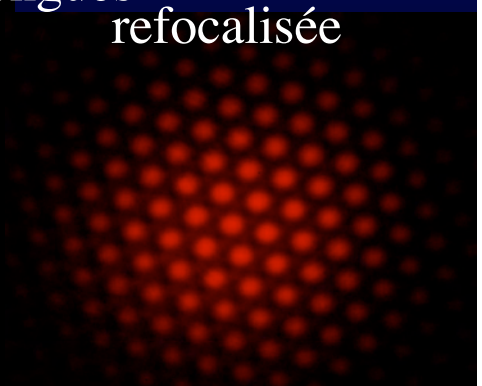
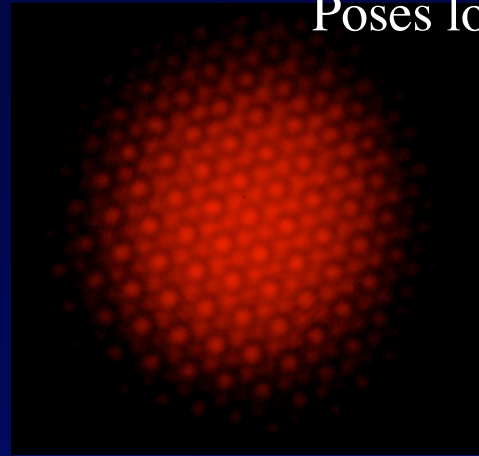
Poses courtes sans turbulence



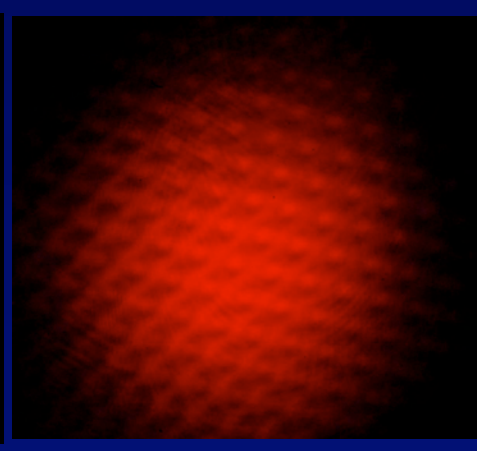
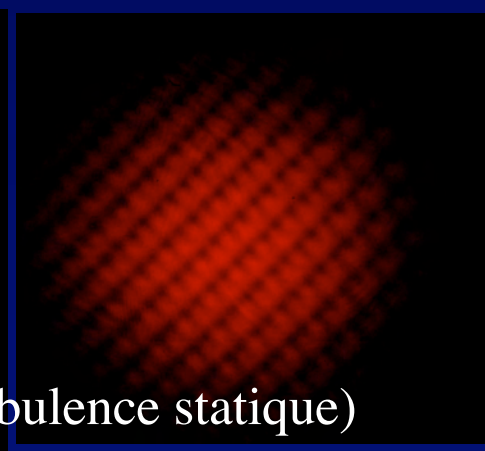
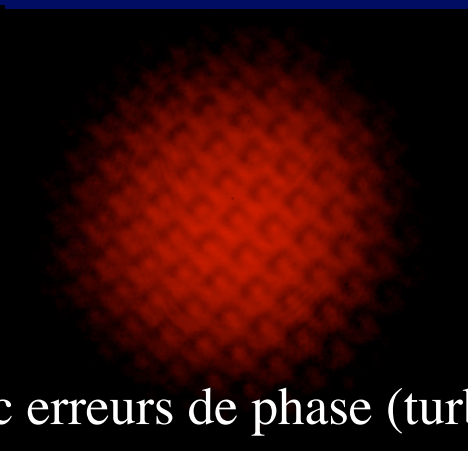
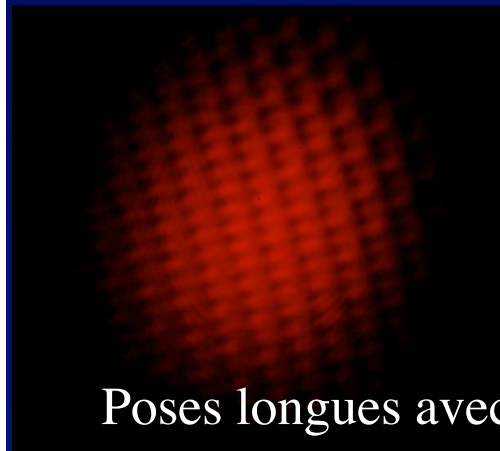
Poses courtes sans turbulence



Poses longues  
refocalisée

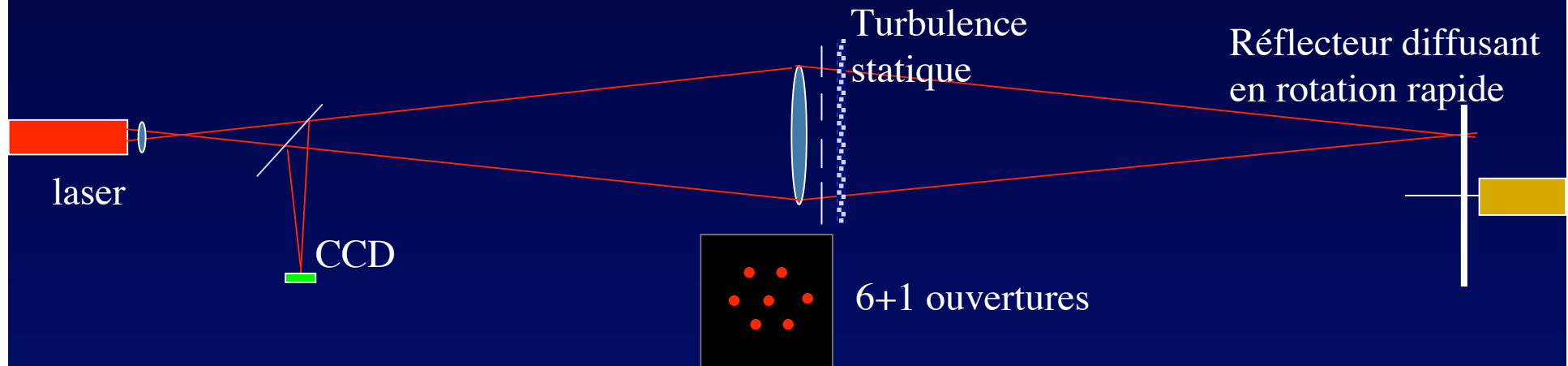


Poses longues avec erreurs de phase (turbulence statique)



- L'information sur les déphasages semble récupérable
- Préciser la théorie

# Simulateur d'étoile guide laser pour ouverture diluée



- Retour rendu incohérent par diffuseur tournant
- Compléter avec ouvertures additionnelles



# Hypertélescope et laser: points à préciser

- Vérifier la détermination des phases
- Exploiter plusieurs strates dans la couche de sodium ?
- Evaluer la puissance laser nécessaire
- Déborder du champ isoplanétique ?

# Conclusion terrestre

- En principe, un hypertélescope a 1000 miroirs de 1m est plus performant...
  - qu'un ELT de 30m
  - que deux ELTs de 23m exploités en synthèse d'ouverture
- Même pour les galaxies lointaines
- Defis pratiques :
  - Equiper un bon site concave
  - valider le senseur de piston à laser



Aujourd'hui:

Concept d'hypertélescope dans l'espace ( suite)

Séminaire à 18h:

Anthony Meilland (Observatoire de la Côte d'Azur)

« Apport du VLTI à l'étude des étoiles  
chaudes actives »





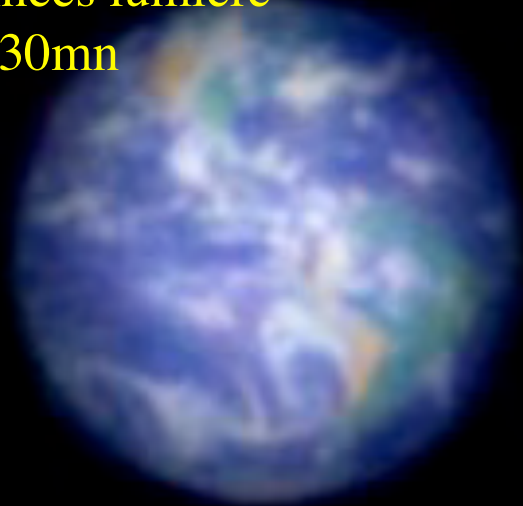
# Dans 20 ans ? Exo-Earth Imager

150 miroirs de 3m  
150 km

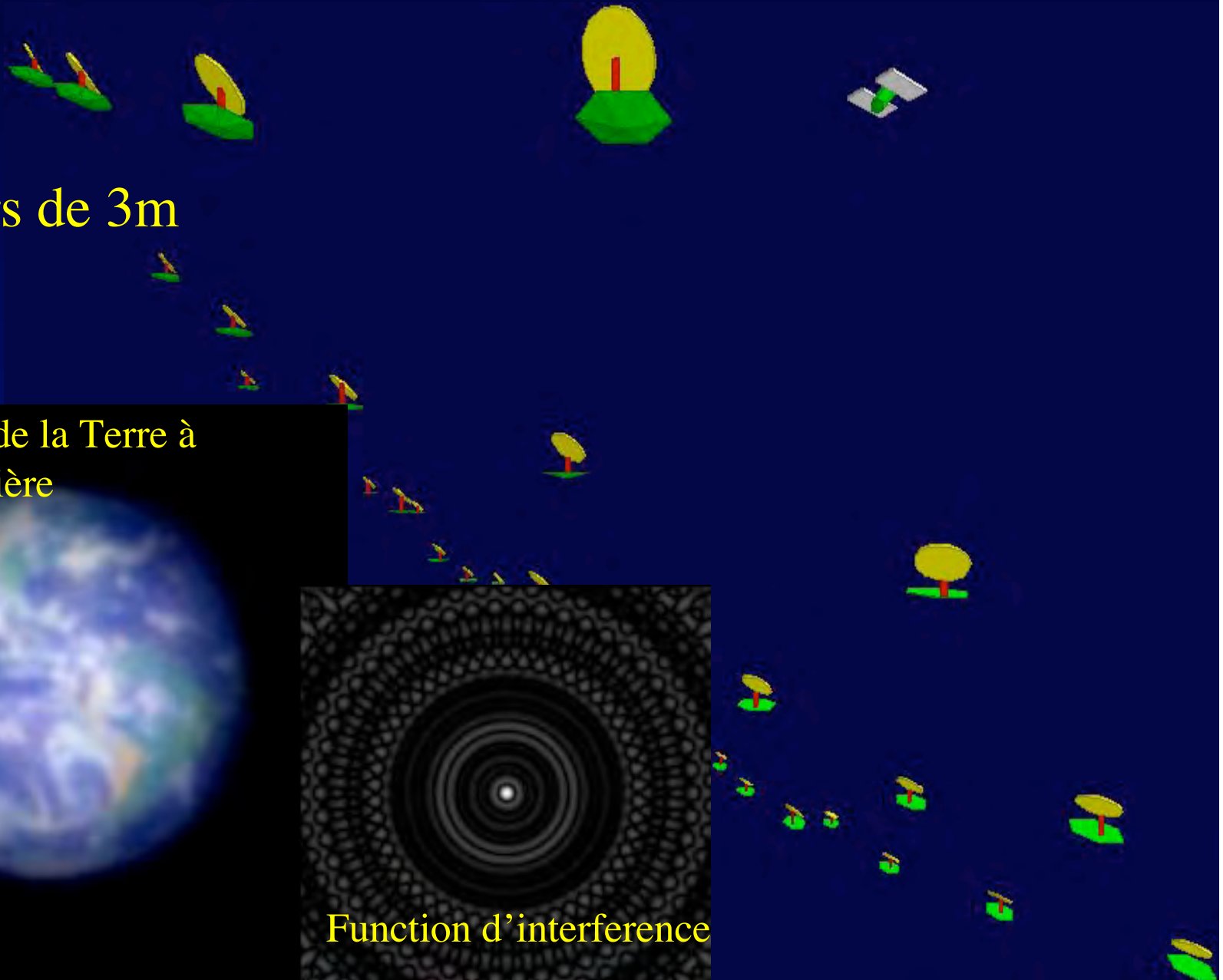
Simulation:

Image directe de la Terre à  
10 années lumière

Pose 30mn



Function d'interference



# L'espace élimine des problèmes...

- De sites
- D'atmosphère turbulente
- De support mécanique, structure
- De limitation en dimension
- ... et en crée de nouveaux
  - il faut apprendre à piloter finement les éléments
  - rayons cosmiques, neutrons solaires, météorites...
  - cout plus élevé ?

# Interféromètres dans l'espace: le vol en formation, une étape cruciale

- Nécessaire pour les grandes bases
- Pourrait simplifier les systèmes
- .... ou les compliquer....
- ESA et NASA veulent s'y mettre pour plusieurs usages ( LISA, MAXIM...)





# Etude entamée des vols en formations

- ESA + Surrey + Astrium:
  - PROBA + SNAP2
  - Durée de vie 1 an
- .

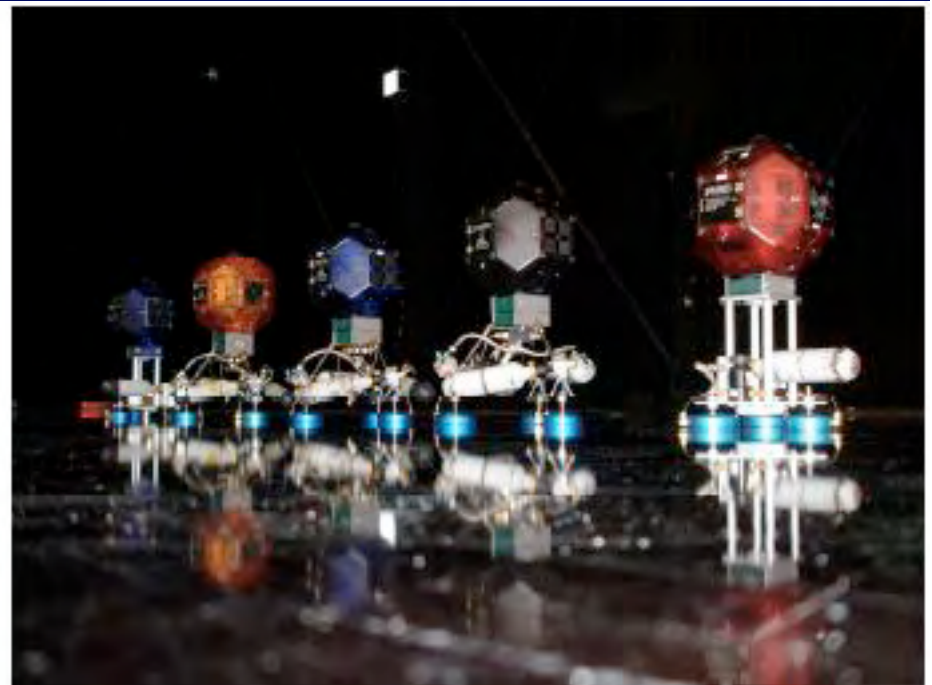
L'ESA vient de lancer un appel à propositions ...

## Proposition Luciola

- 100 miroirs de 25cm sur 1km, F/3
- Parabolique initialement
- Augmentable et sphérisable
- Coronographe exo-planétaire
- Ultra-violet, visible et infra-rouge 10 microns

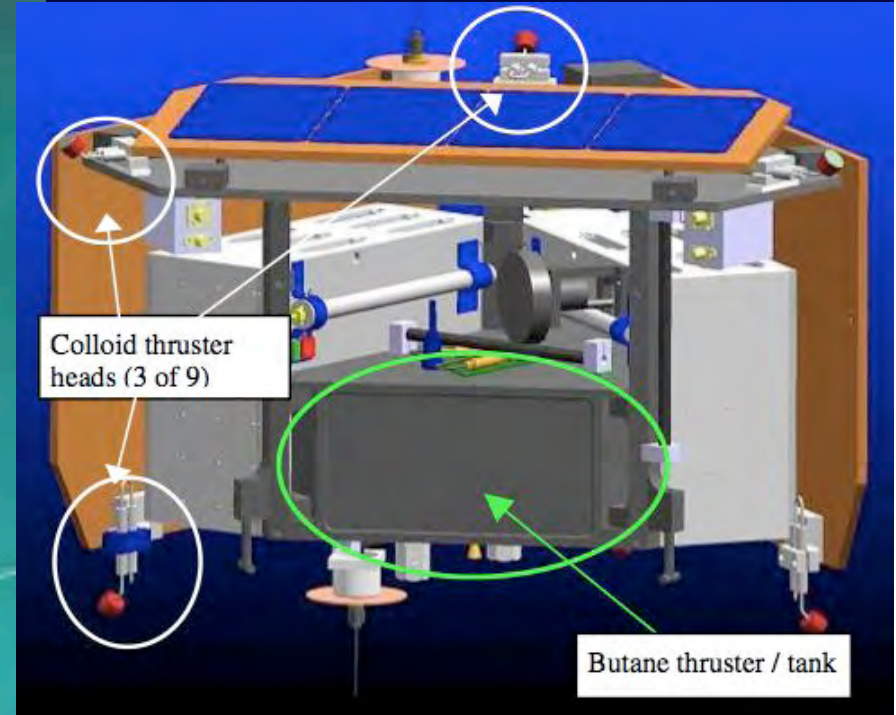
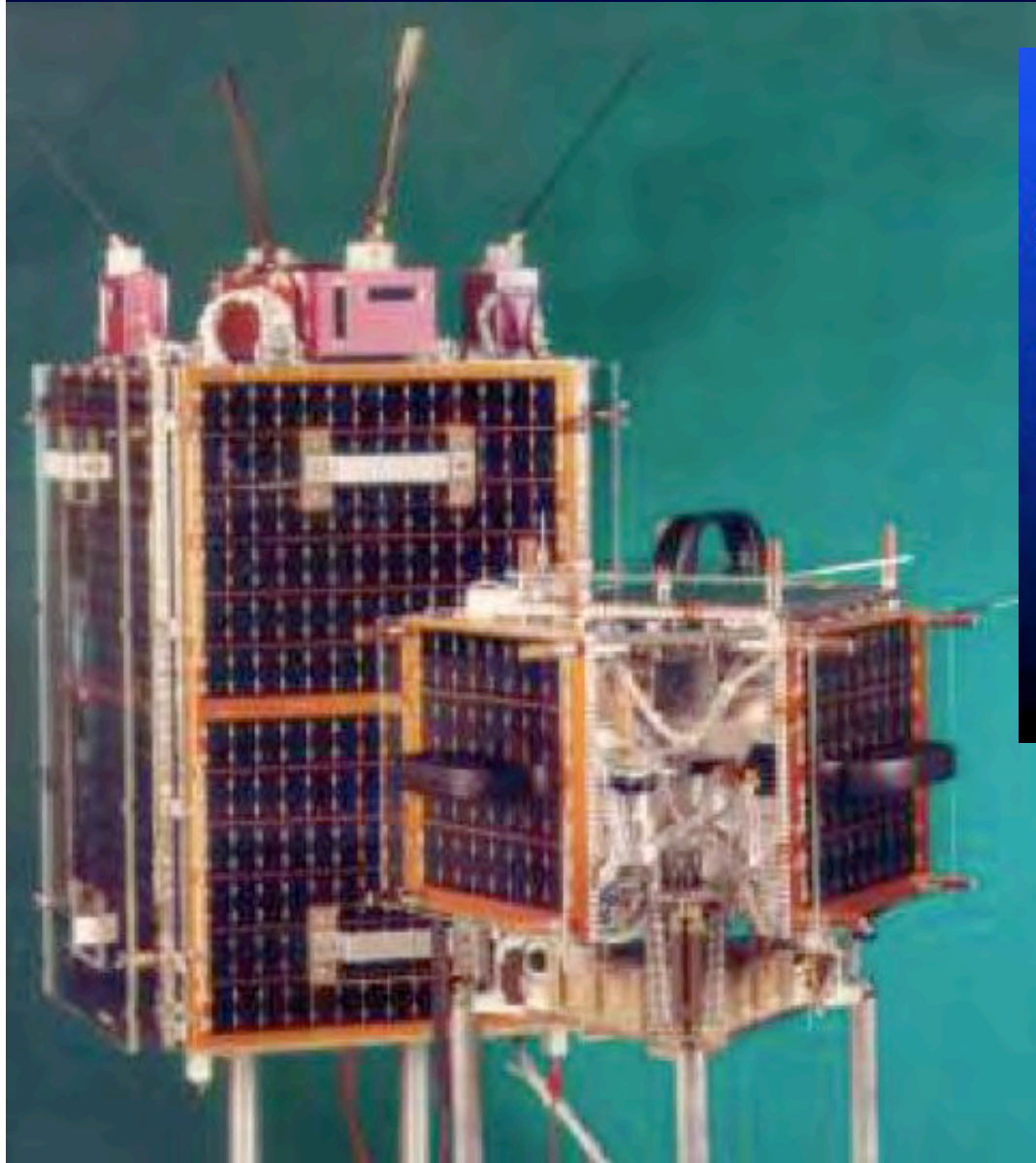
# Simulation de pilotage de vol en formation (NASA)

- En cours au sol
- Prévu sur International Space Station





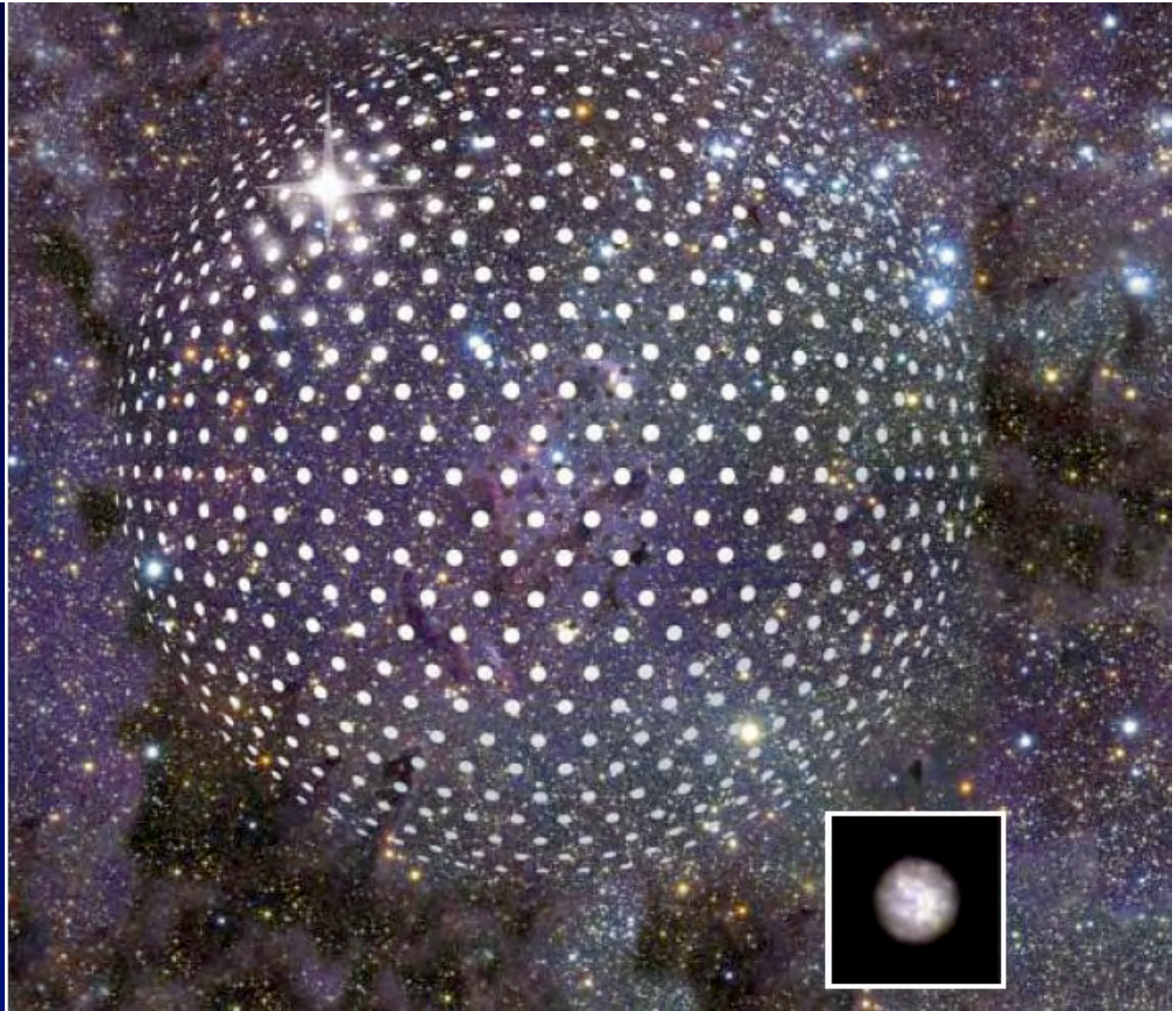
# Test prévu par ESA: PROBA + SNAP





# Exo- Earth Imager

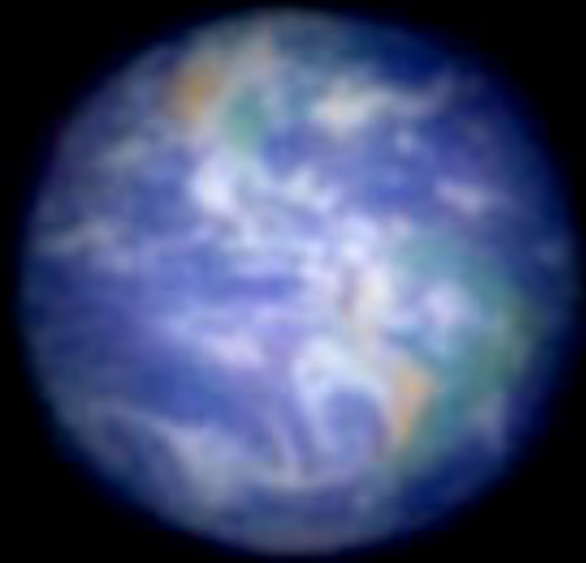
( vue  
d'artiste )



- Labeyrie, Pour la science ( 2006)

# Voir la vie sur des images résolues

- simulation : Terre à 10 années-lumière, vue avec 150 éléments de 4m, diamètre 150 km
- Poses 30 mn
- La verdure réfléchit l'infrarouge proche
- Coronographe extrême pour chaque ouverture



Terre



Planète X



# Quels actuateurs ?

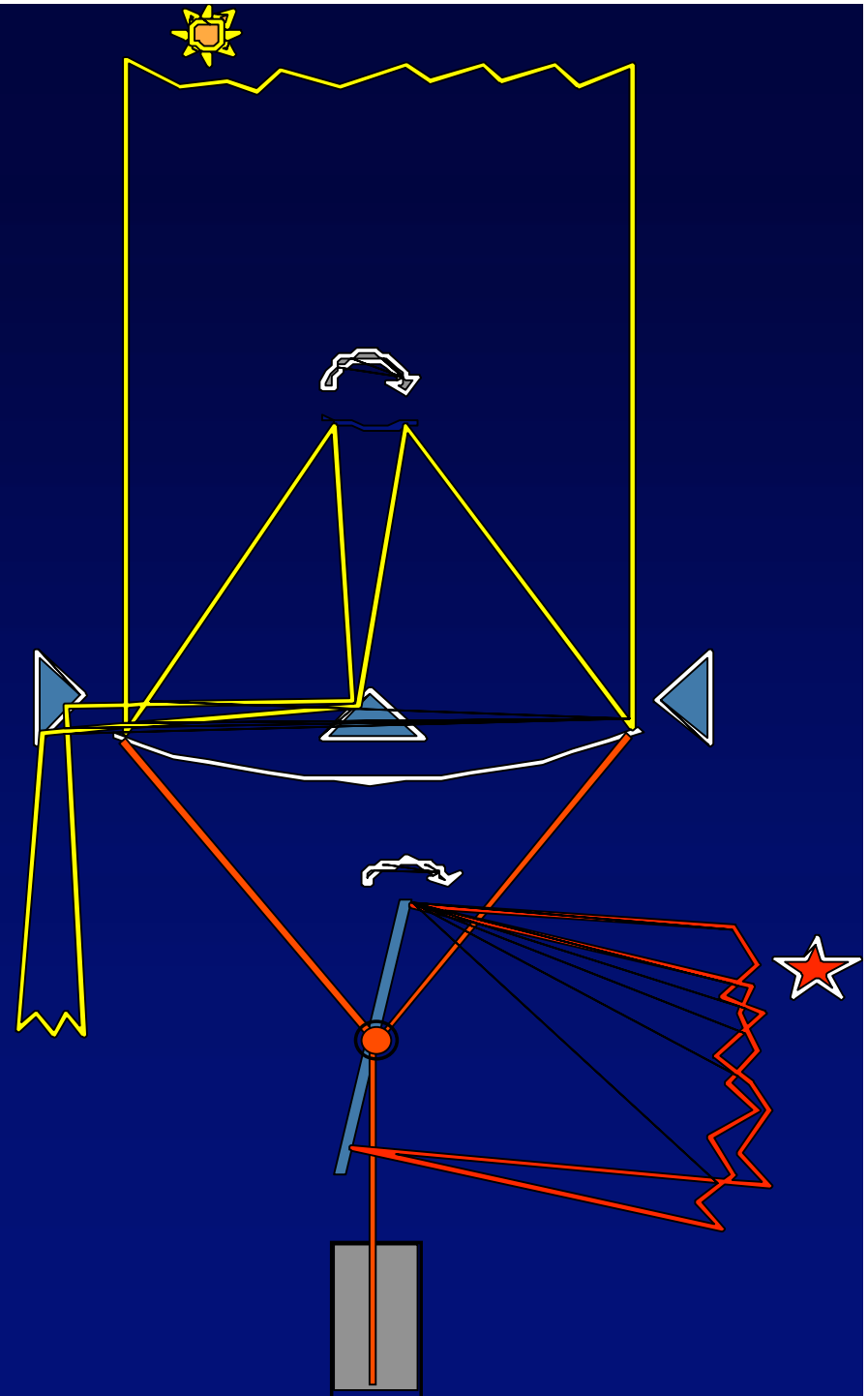
- Il faut lancer de la masse pour bouger ....
- .... ou de la lumière
- Il suffit de tourner pour tourner en sens inverse
- ...ou de s'appuyer sur un gyroscope

# Propulseurs ioniques

- FEEPs qualifiés par l'ESA... jusqu'à la Lune
- Forte impulsion spécifique, longue durée
- Mais: risque de pollution des miroirs ?
- Intéressant pour les satellites focaux

# Luciola: pilotage solaire ?

- Auto-pointage vers le soleil
- Pilotage en translation et orientation

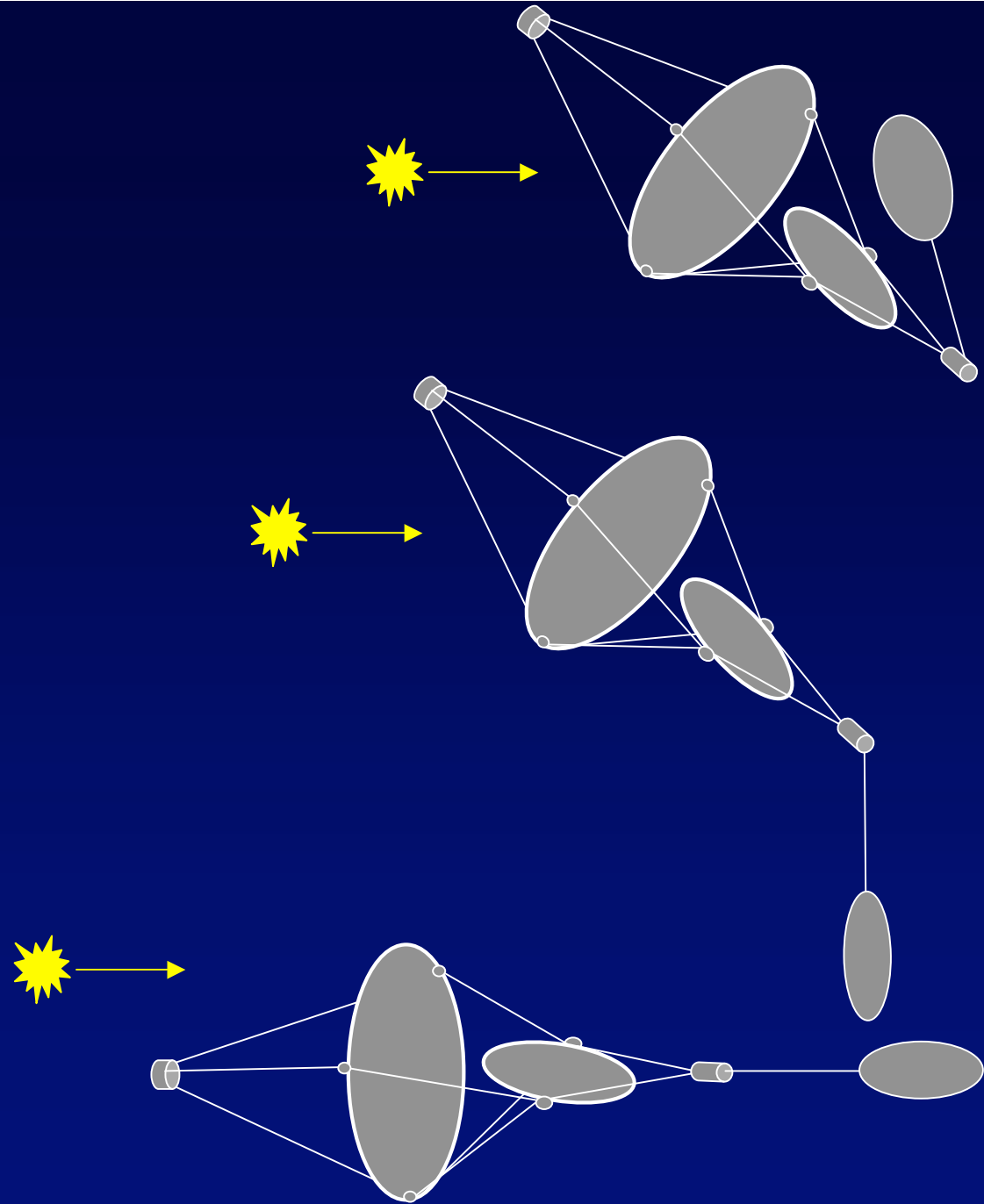




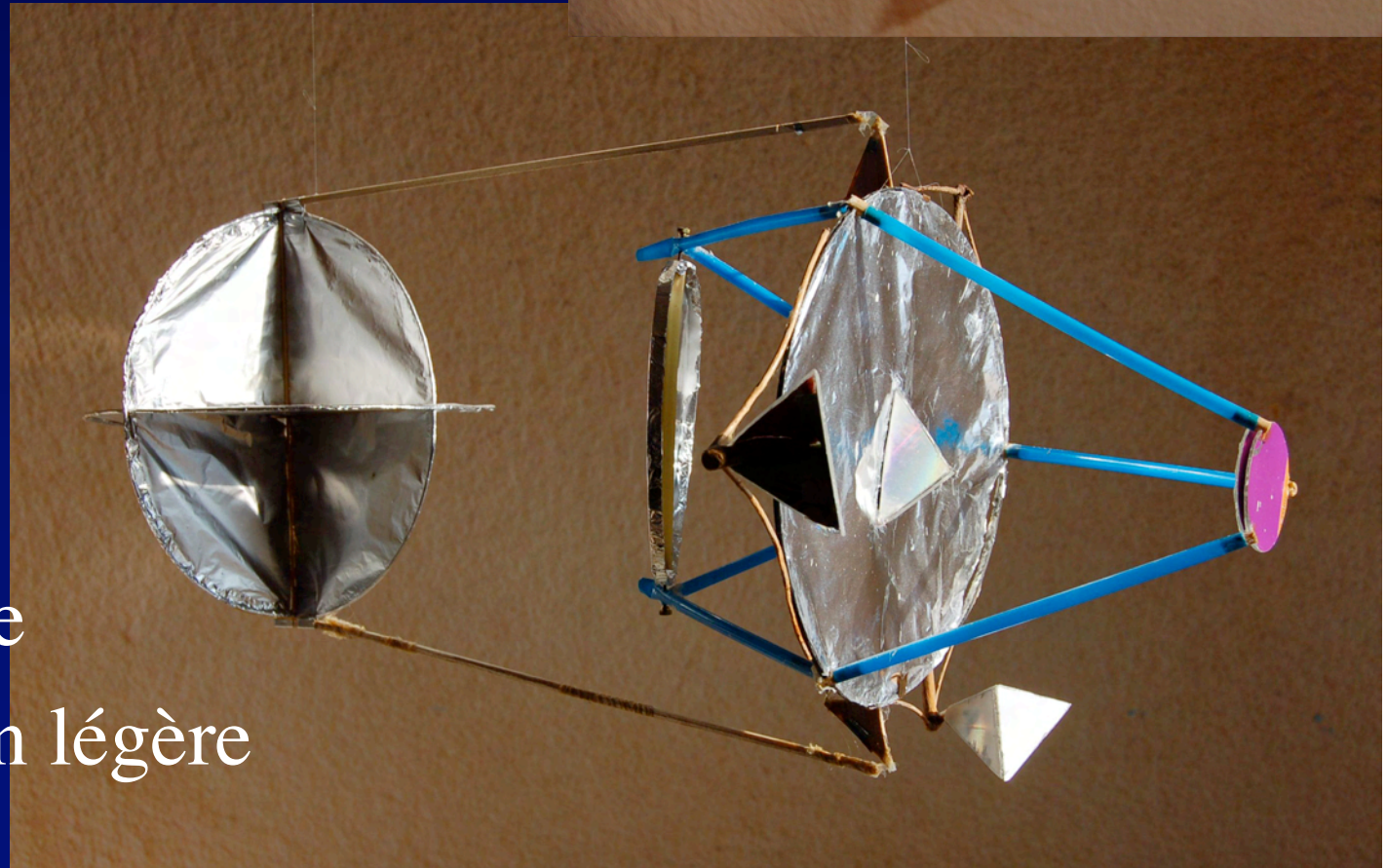
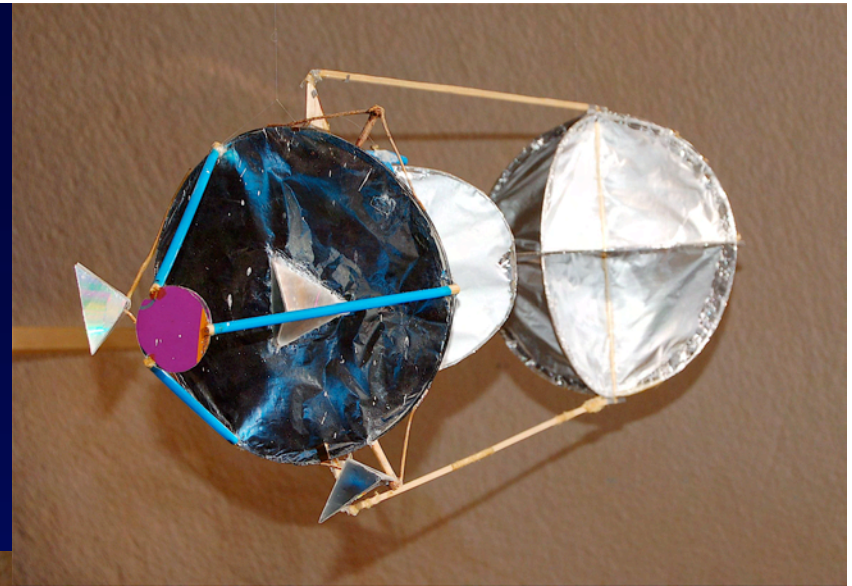
# Auto-pointage



$$J_1 \ddot{\theta}_1 + f.(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + C.(\theta_1 - \theta_2) = 0$$
$$J_2 \ddot{\theta}_2 + f.(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + C.(\theta_2 - \theta_1) = 0$$

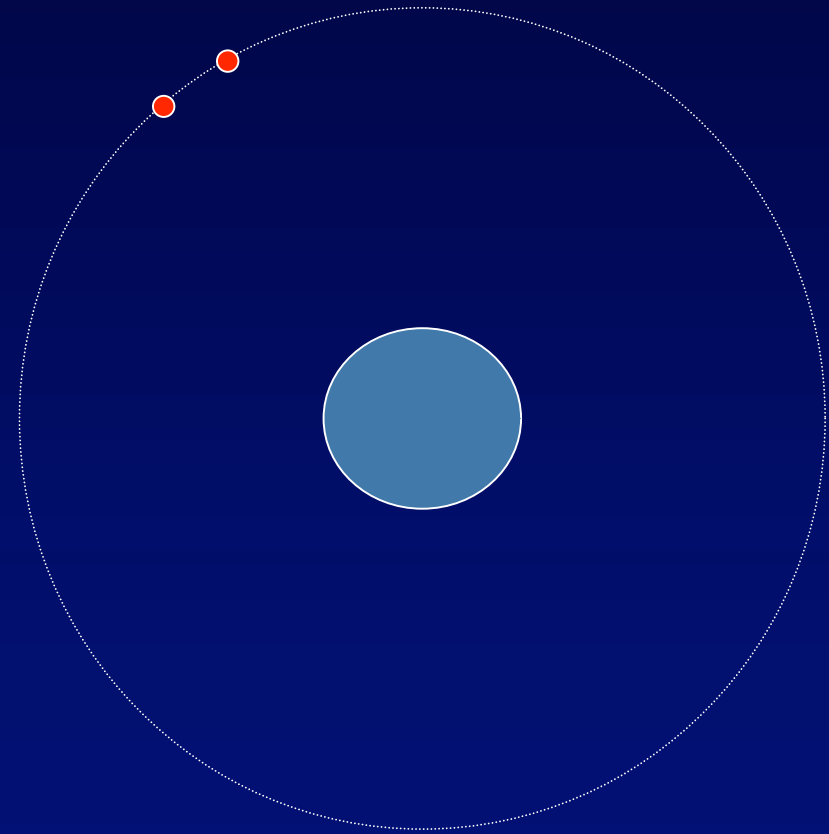
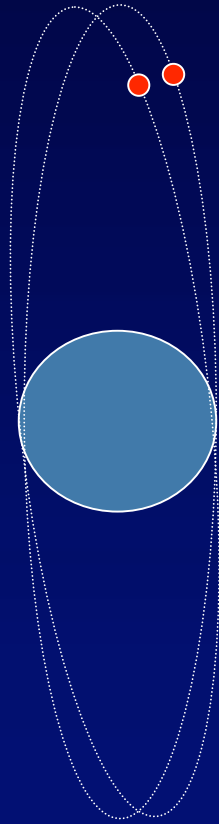


# Hypertélescope spatial de première génération: Luciola



- Voile solaire
- Construction légère

# Gradient de gravité et dimension des voiles





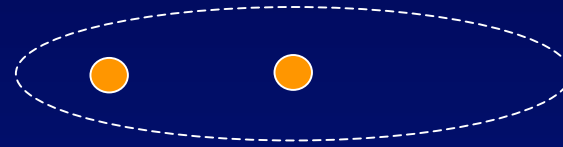
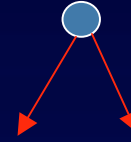
# Orbites préférées:

## Point de Lagrange L1 de Terre-Soleil

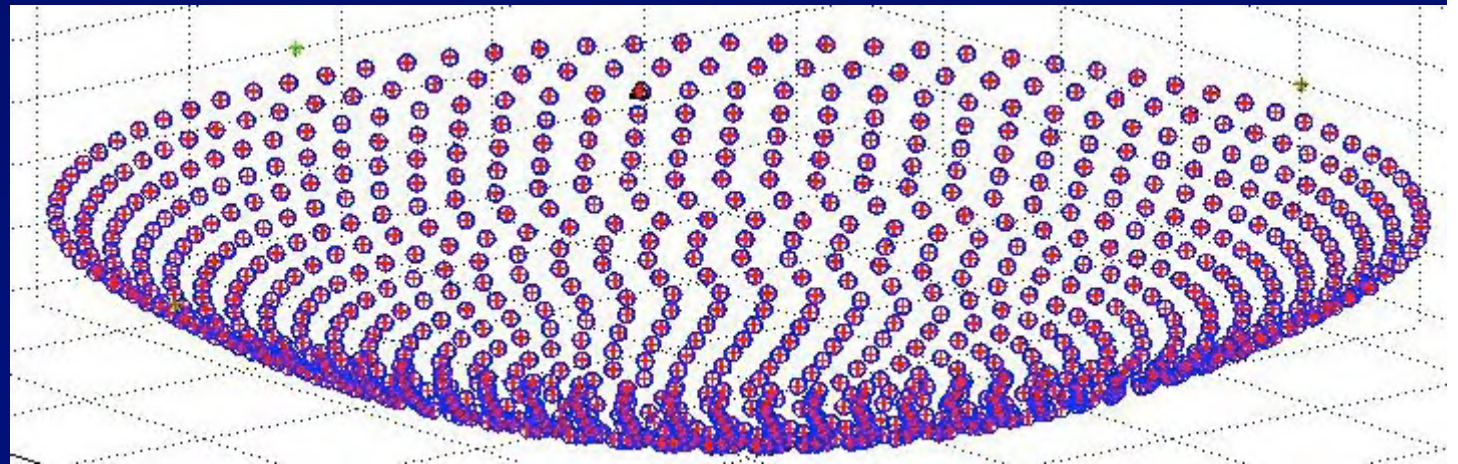


- SOHO s'y trouve depuis longtemps
- Microgravité très uniforme, stabilité transverse
- Léger décalage vers le soleil compense la pression de radiation

# Luciola

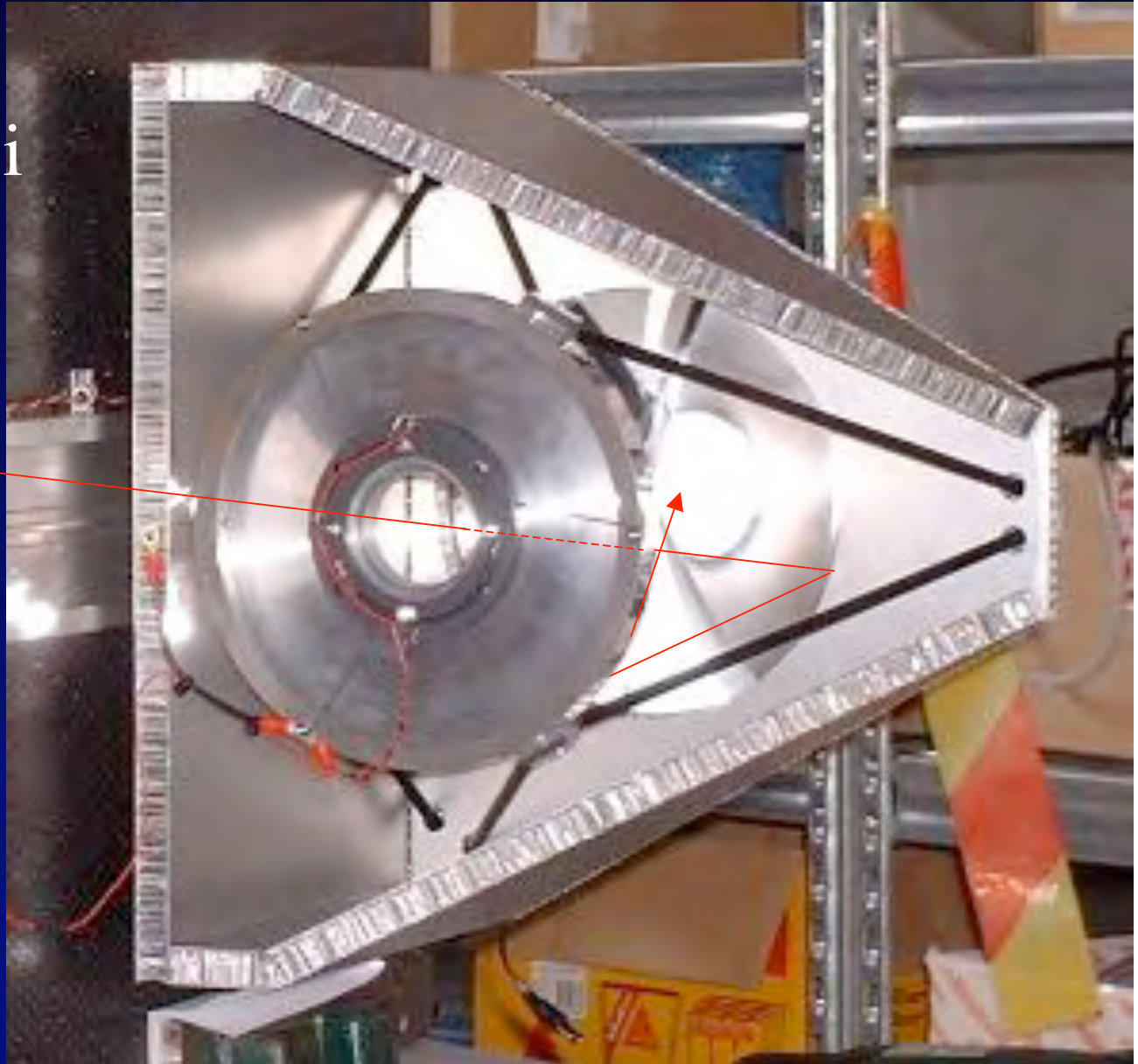


- 16



# Correcteur d'aberration sphérique de Carlina 1

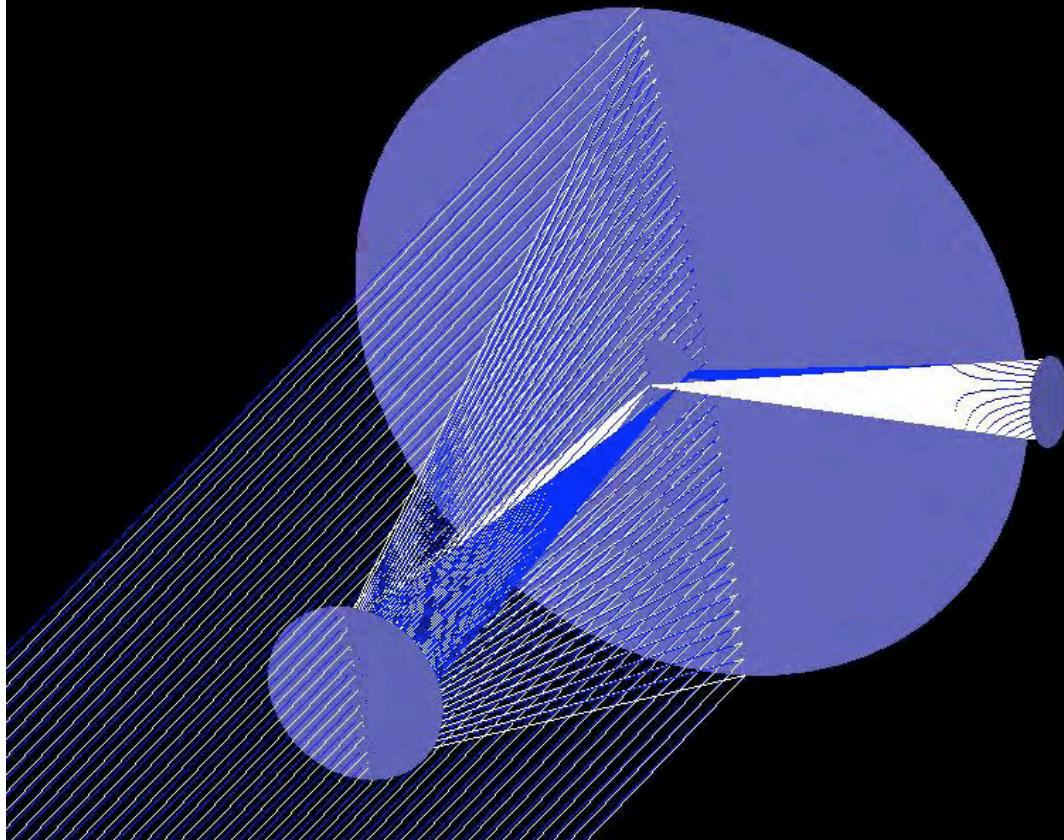
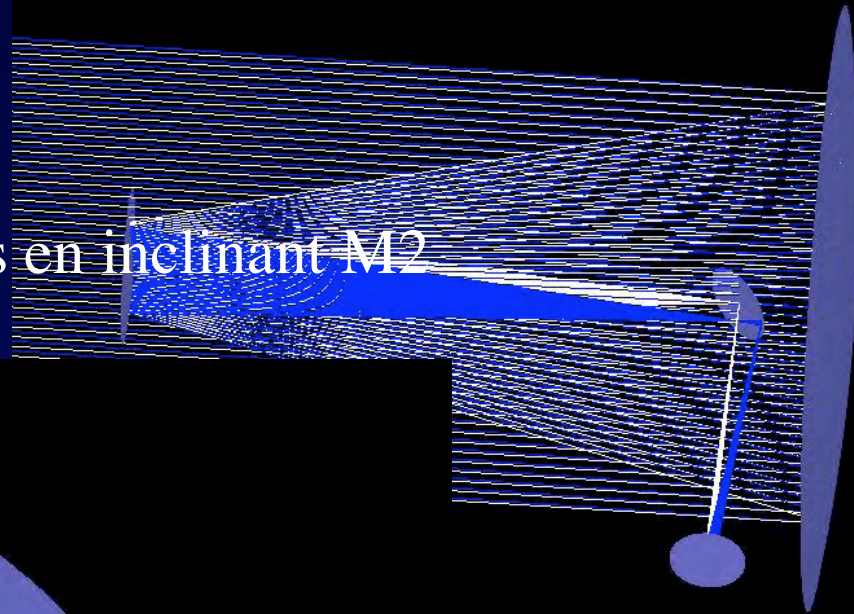
- Convient aussi pour l'espace



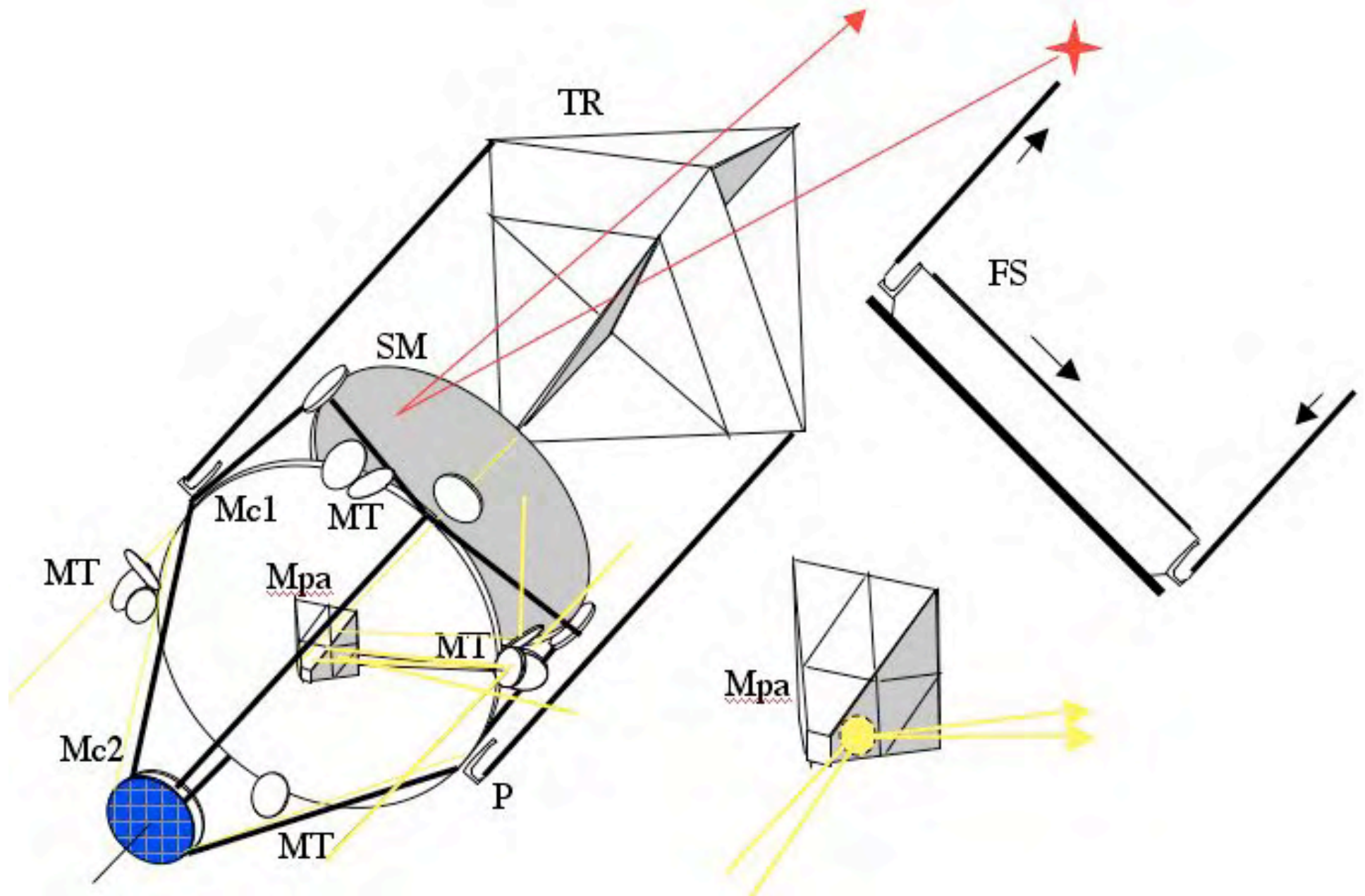


# Propulseur solaire

- Télescope Cassegrain léger
- Sorties latérales commutables en inclinant M2

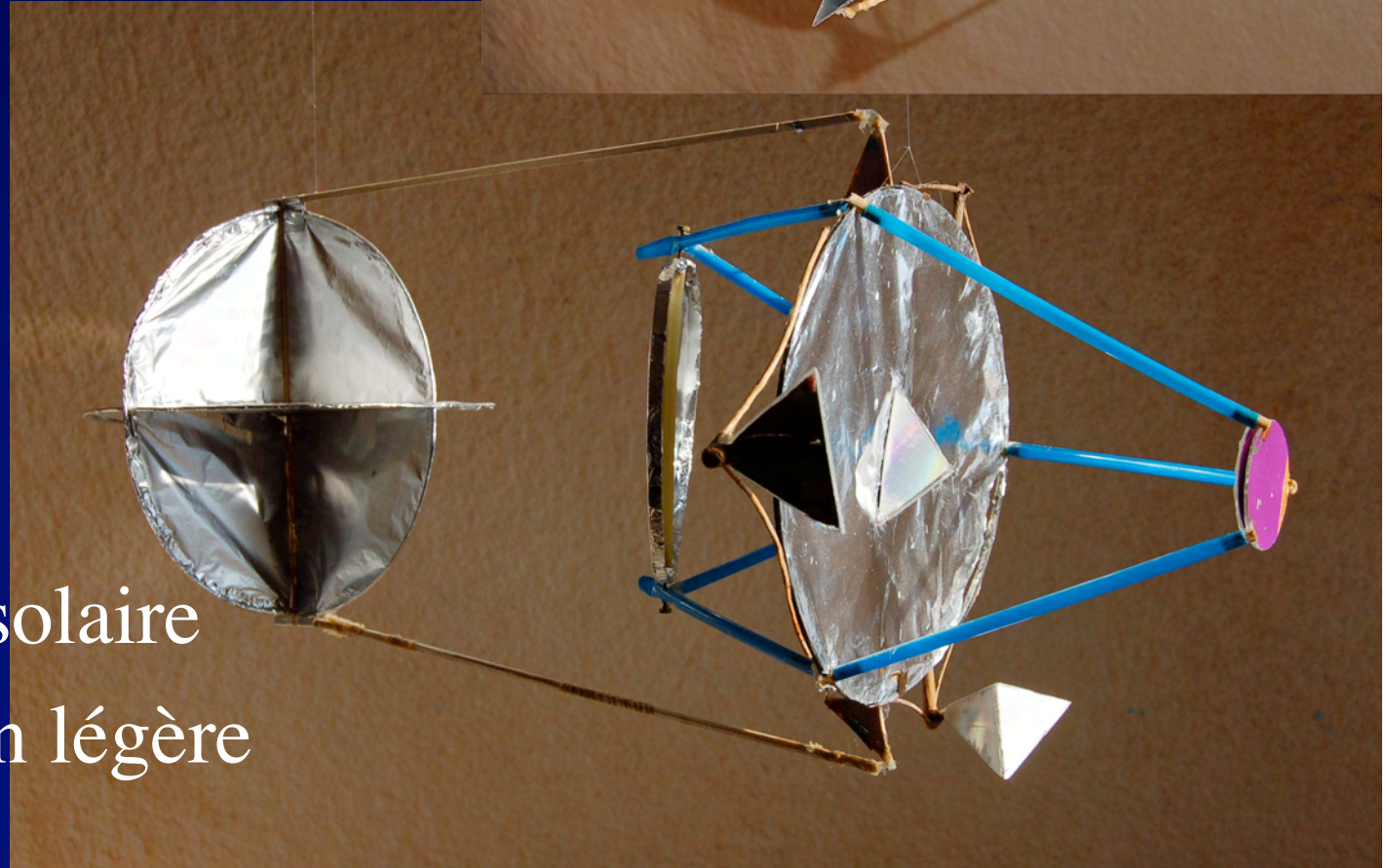
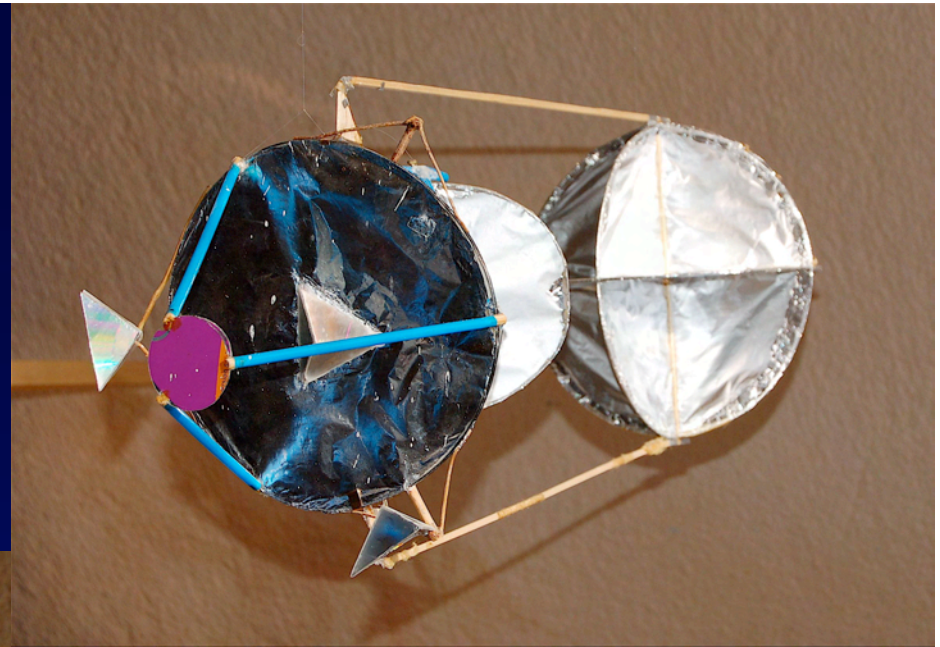


# Propulseur solaire





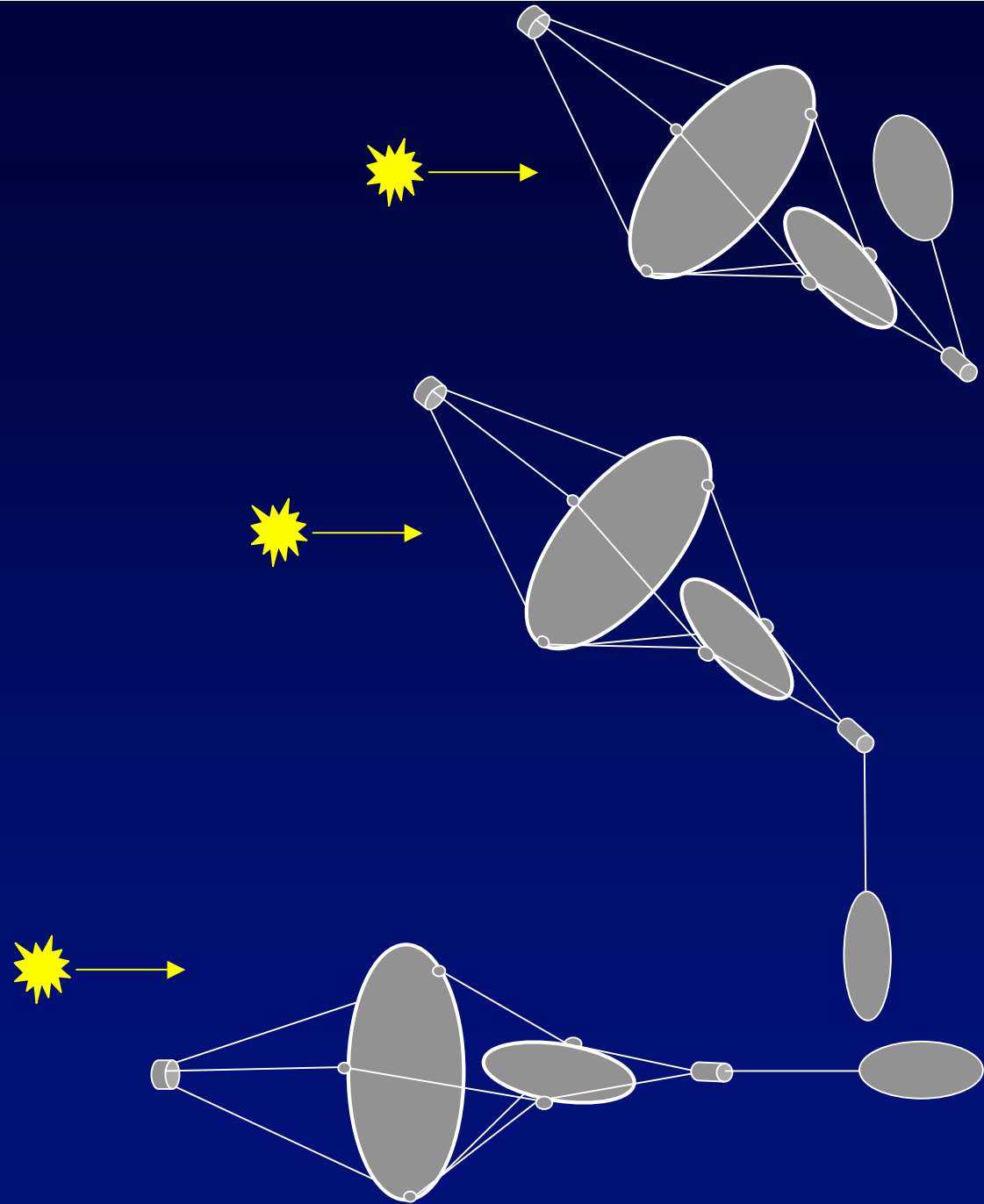
# Maquette



- Propulseur solaire
- Construction légère



# Redressement



# Miroir de Carlina-1 à l'Observatoire de Haute Provence



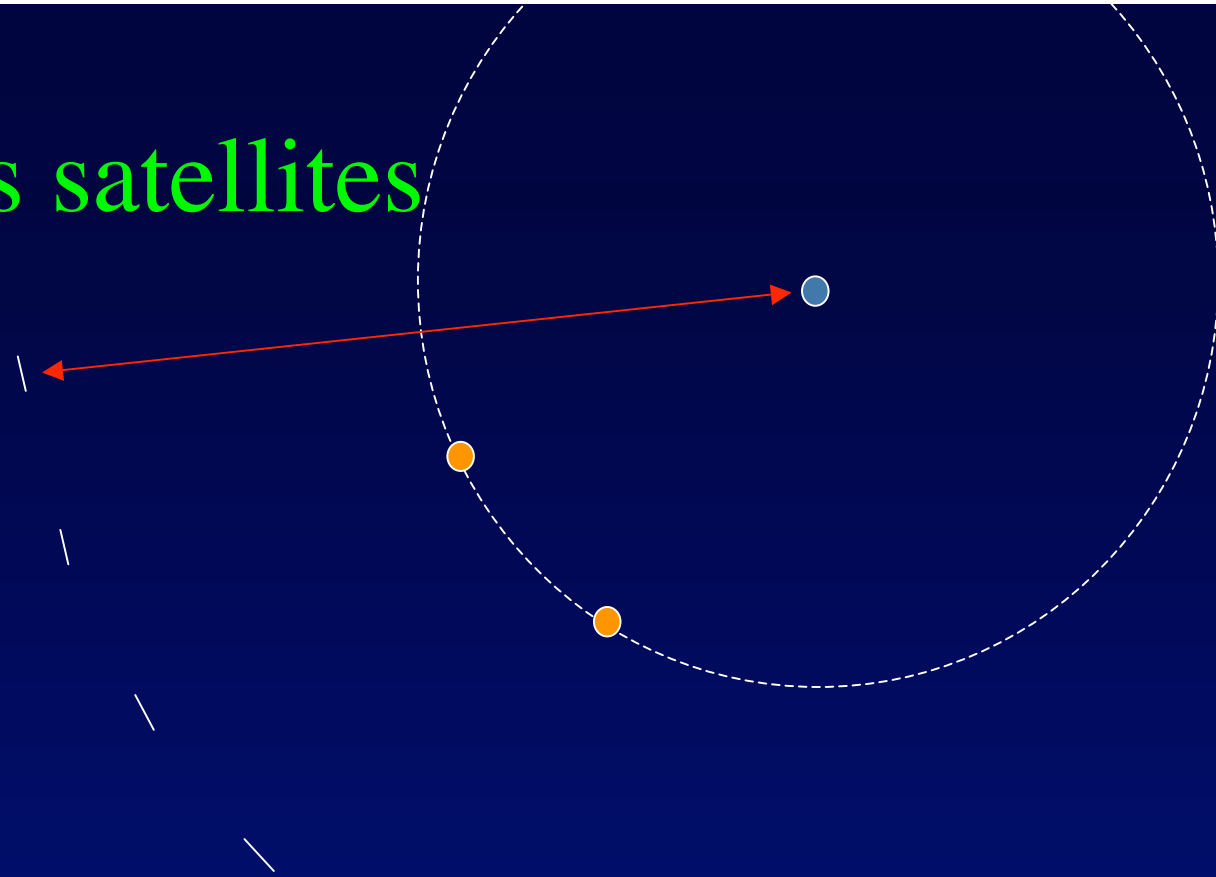


# Procédure de réglage des miroirs primaires

1. positionnement transverse par rapport au fond d'étoiles ( précision 1cm)
2. Égalisation des distances ( précision 1mm)
3. Réglage des inclinaisons ( précision 0,01 rad)
4. Corrections fines d'après les franges laser (précision 100nm)
5. Positionner le(s) optique(s) focale(s) par rapport au fond d'étoiles, et distance



# Repérage des satellites



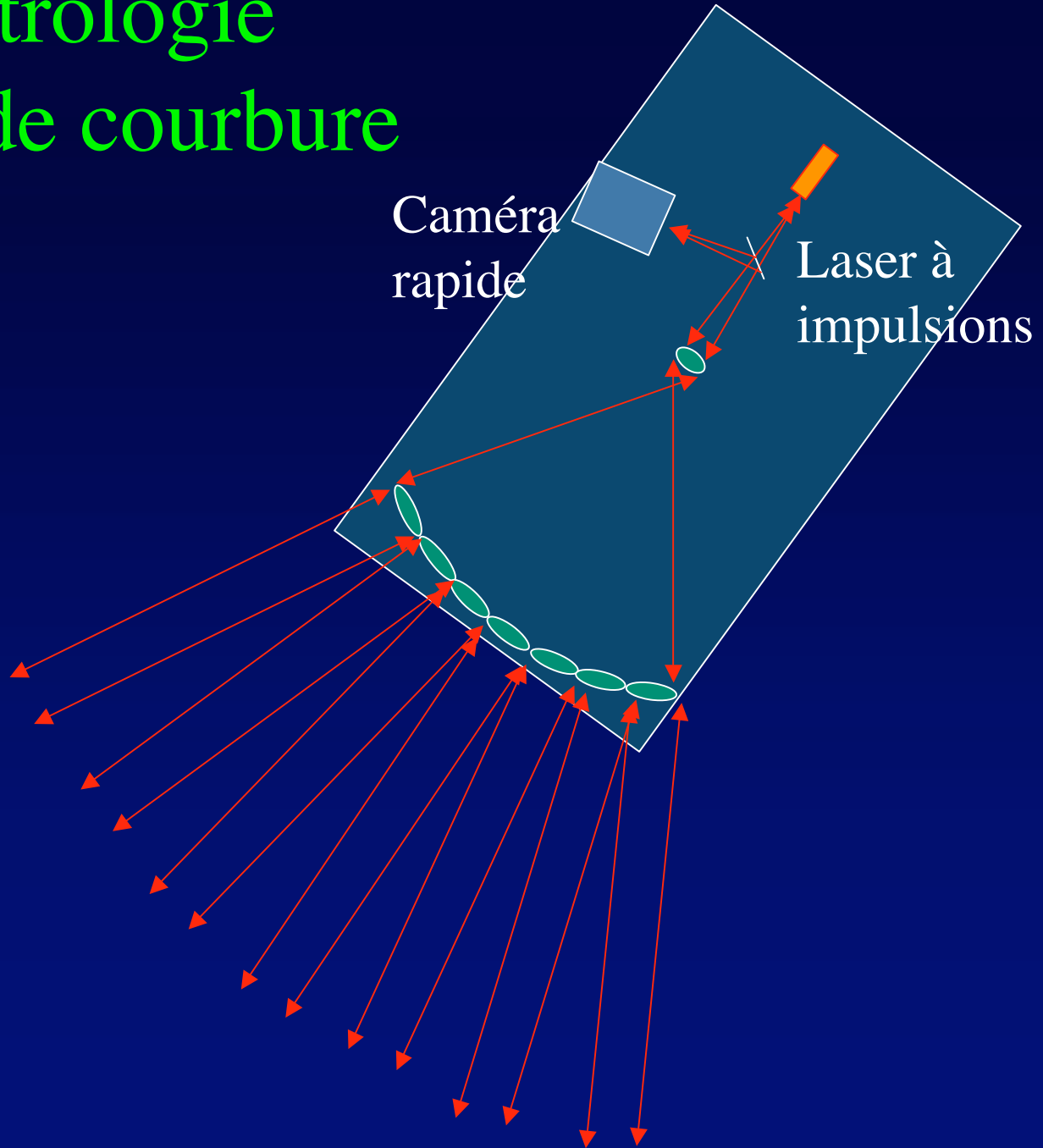
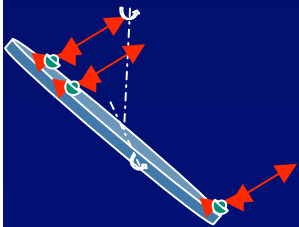
- GPS local , précision 20 cm: insuffisant
- Impulsions « lucioles » de diodes laser
  - Précision 1mm
- Comptage de franges laser:
  - Précision 1 nm

# Satellite de métrologie au centre de courbure

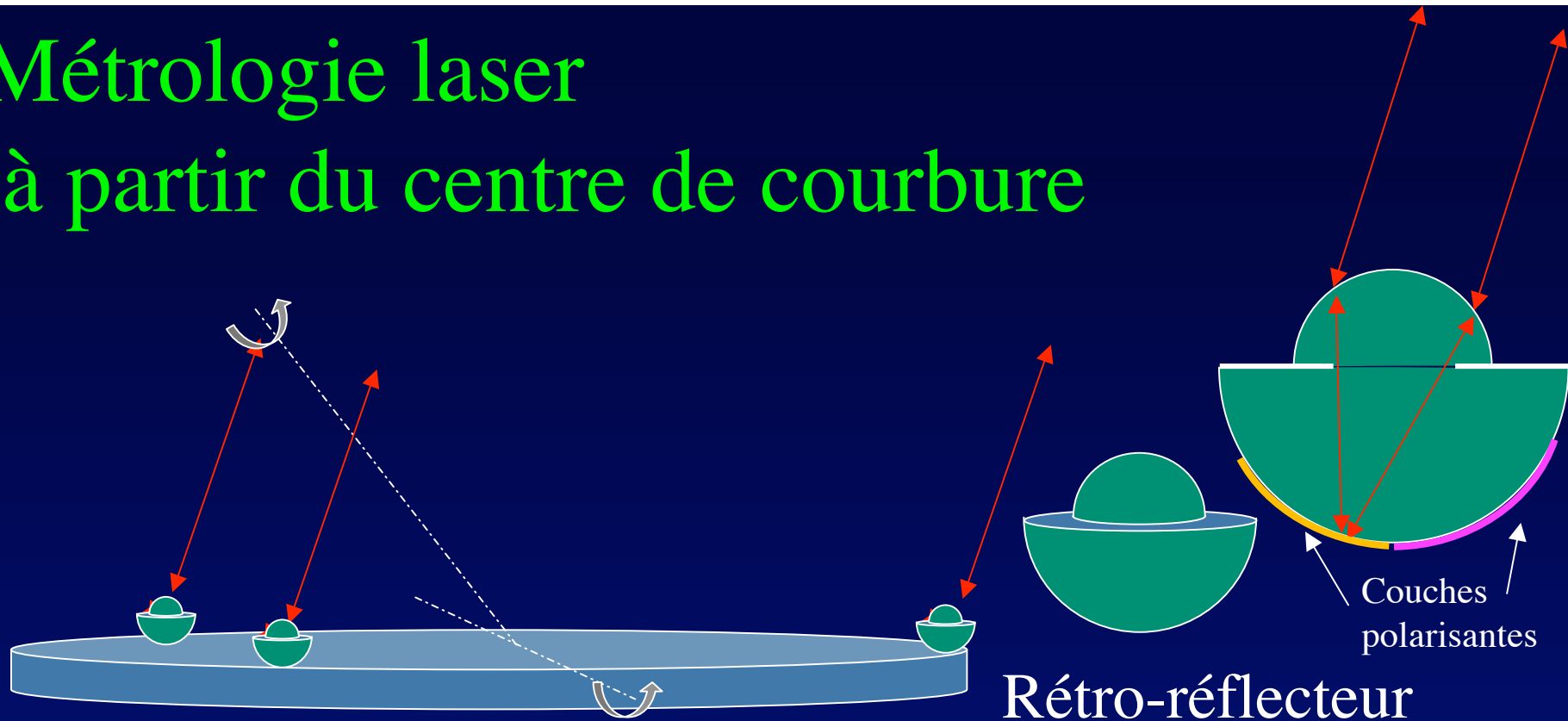
Caméra  
rapide

Laser à  
impulsions

un faisceau laser par  
miroir



# Méetrologie laser à partir du centre de courbure

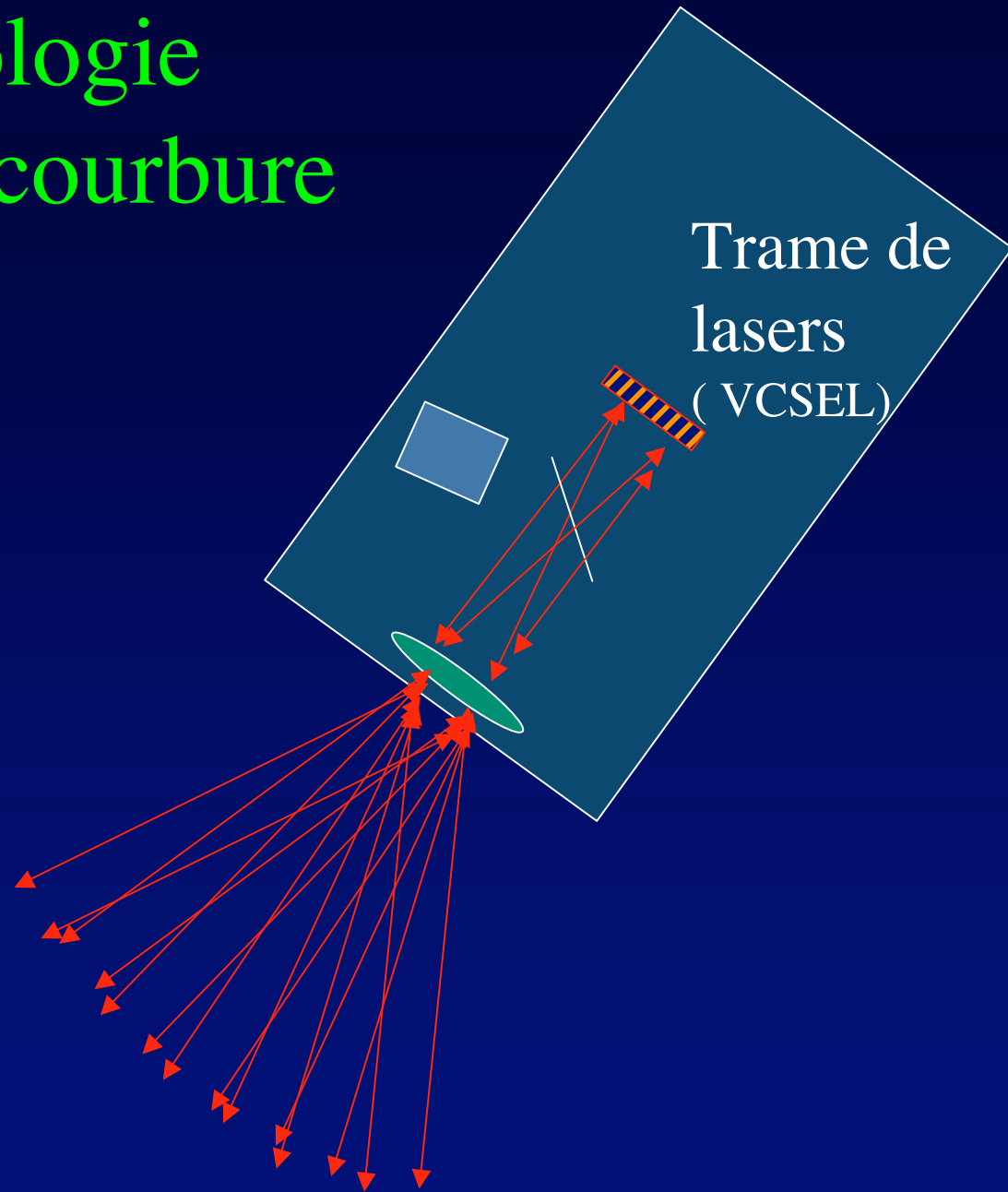


- temps de vol d'impulsions laser mesuré pour:
  - distance grossière ( 1mm)
  - orientation grossière des segments ( 0,01 radian)
- interférence polychromatique pour:
  - orientation précise ( 1 micro-radian)
  - distance précise( 100 nm)



# Satellite de métrologie au centre de courbure

Variante à comparer

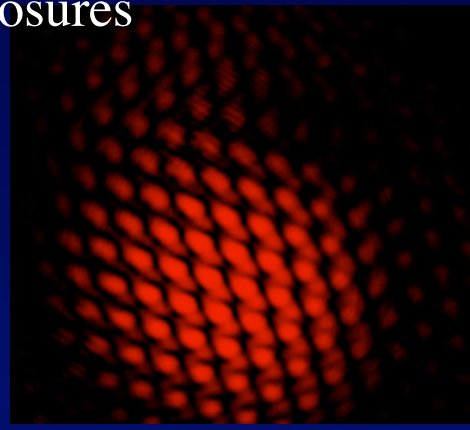
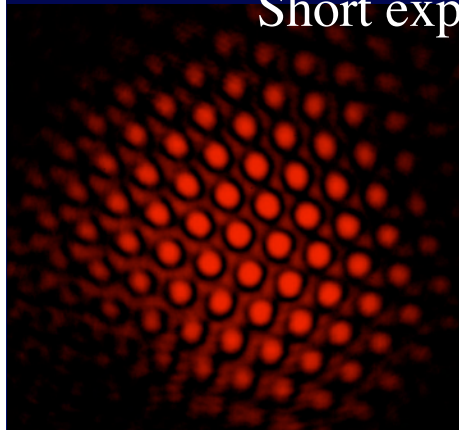


# Exploiter les interférences entre faisceaux laser rétro-réfléchis

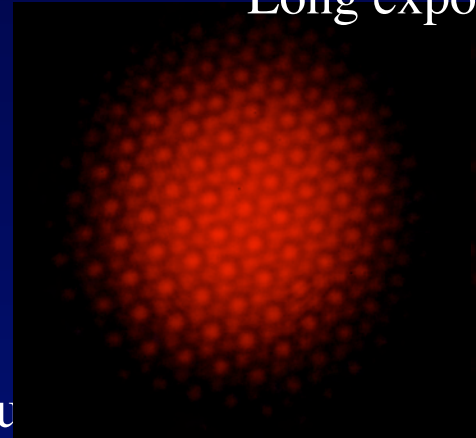
- Trois possibilités:
  1. Par triplets, franges « nid d'abeille »
  2. Avec onde de référence => carte des erreurs de piston
  3. Par analyse des « speckles dispersés »

# Interférences exploitables dans les faisceaux réfléchis

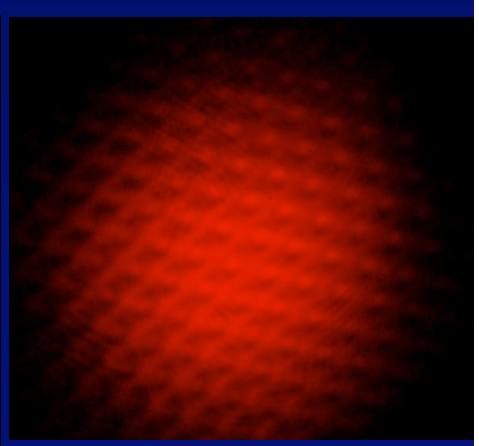
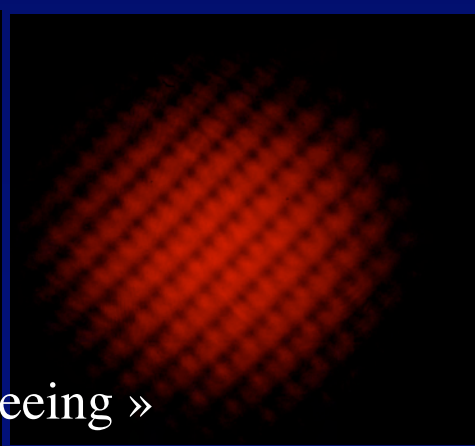
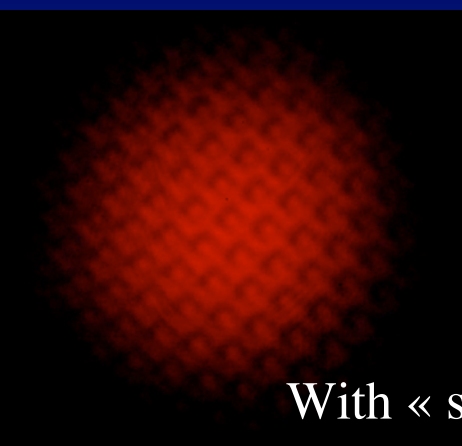
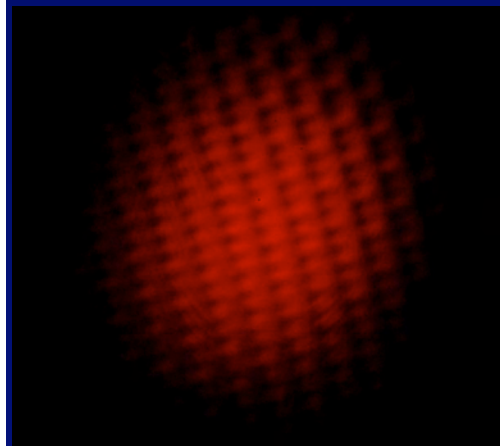
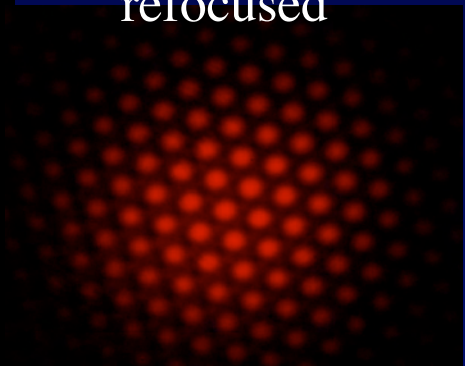
Short exposures



Long exposures



refocused

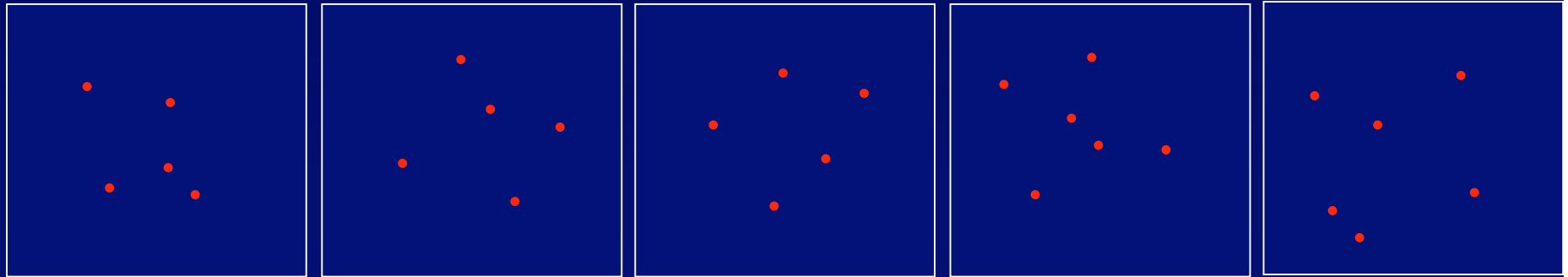


With « seeing »

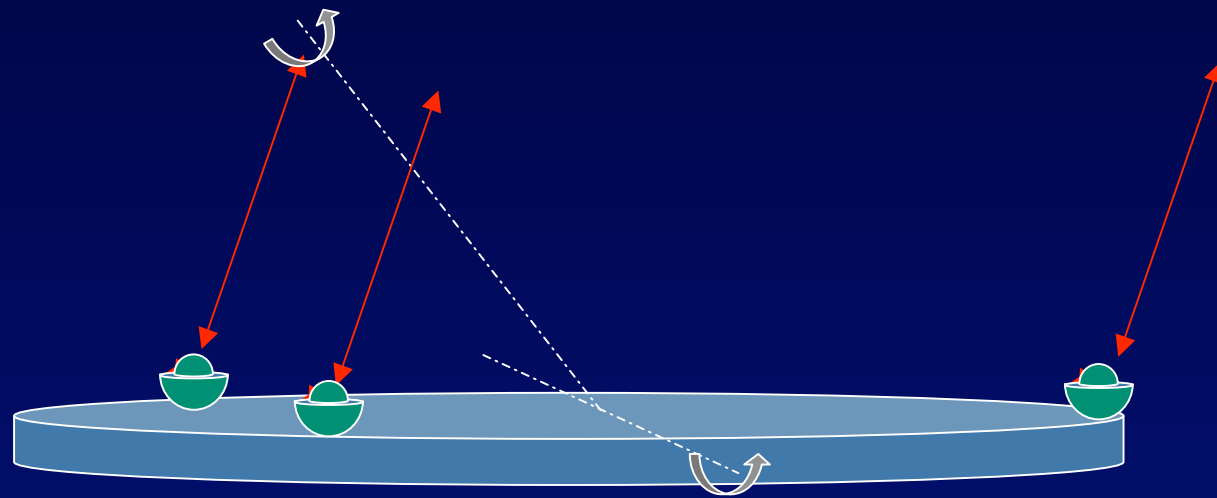


# Chronométrage des retours laser: lequel est lequel?

- Identification par caméra ultra-rapide ?

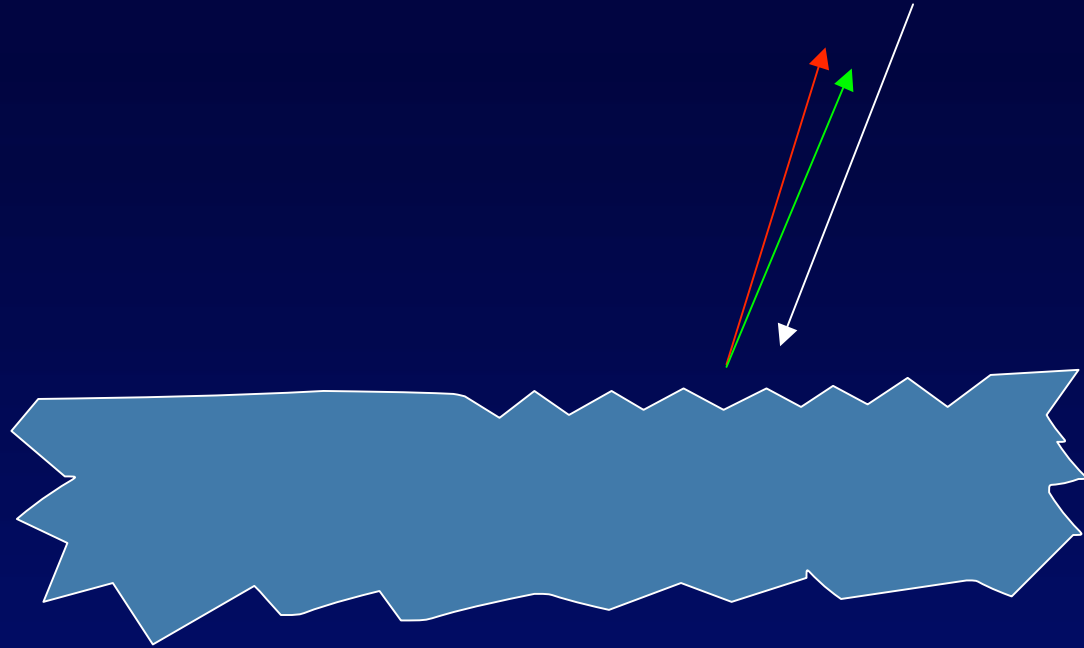


# Métrie



- Identification des rétro-rélecteurs par filtrage spectral ?

# Métrologie



- Rétro-réflecteur ou réseau circulaire « rétro-blazé » ?
- Polarisant pour identification de l'azimuth ?

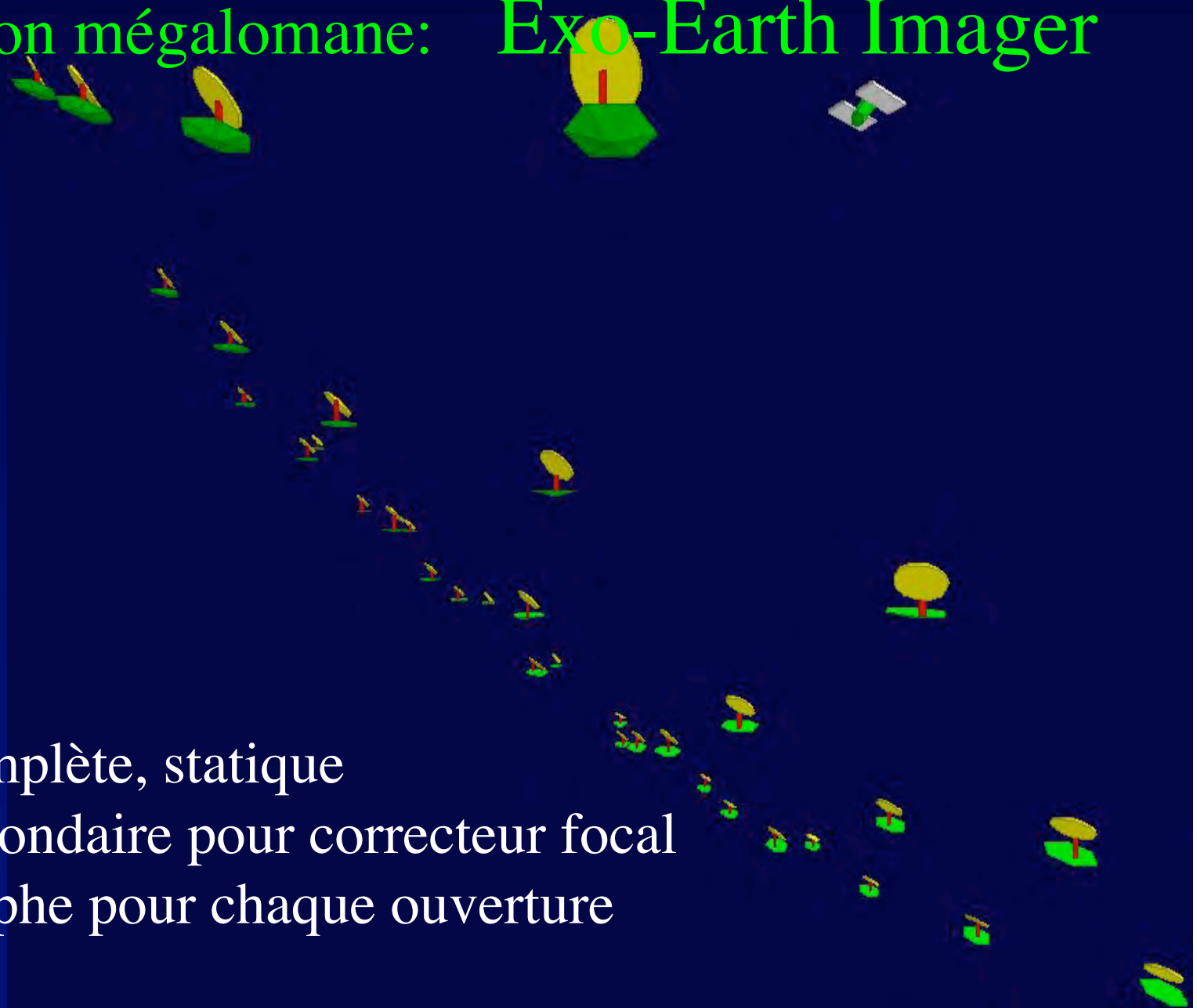


# Positionner au point de Lagrange L1 ou L2 ou trailing orbit ?

- Micro-gravité homogène, faible gradient
- Léger décalage vers le soleil compense la pression de radiation moyenne

Après des versions modestes (Luciola) et moyennes:

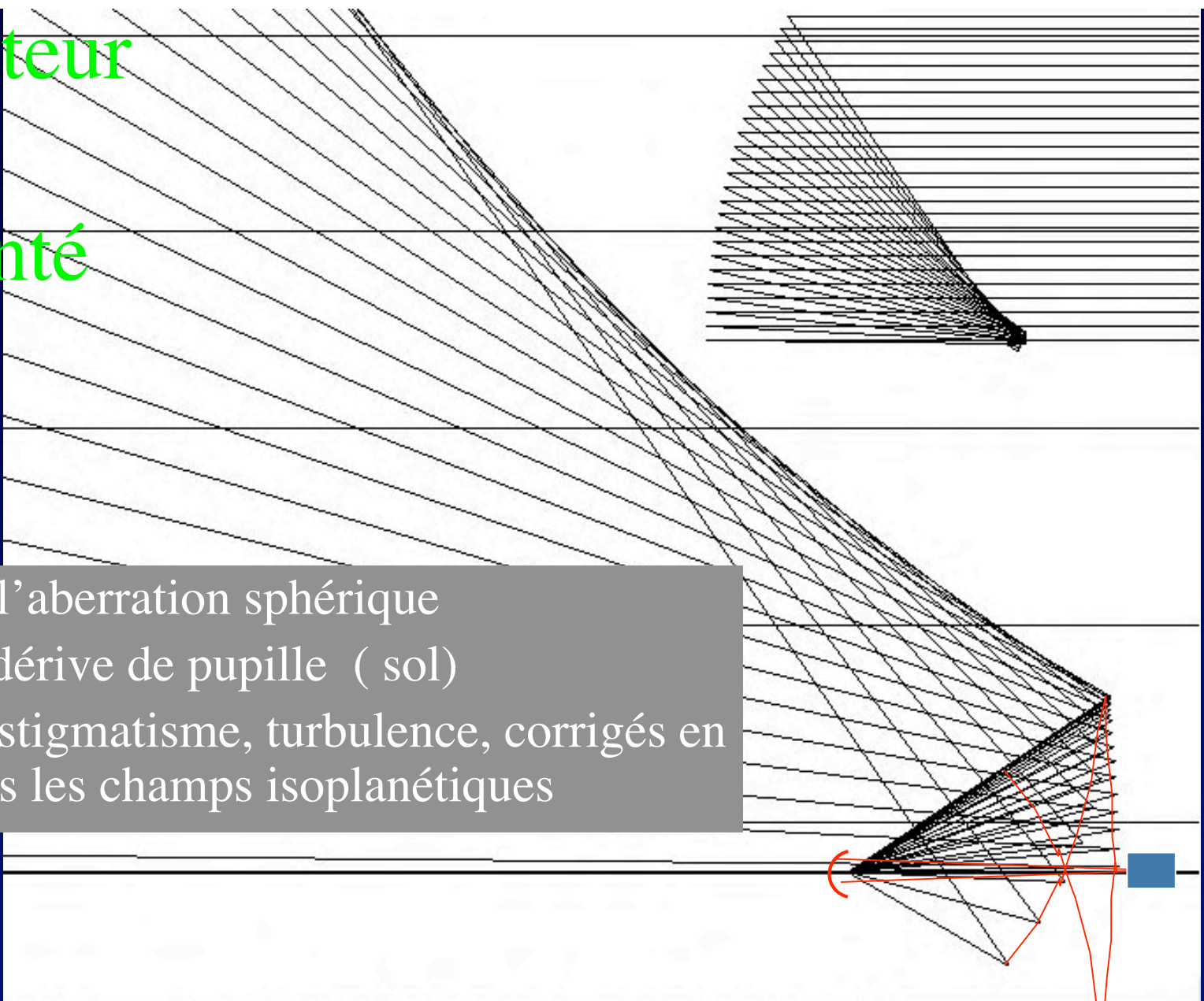
la version mégalomane: Exo-Earth Imager



- sphère complète, statique
- flotille secondaire pour correcteur focal
- coronographe pour chaque ouverture

# Correcteur focal segmenté

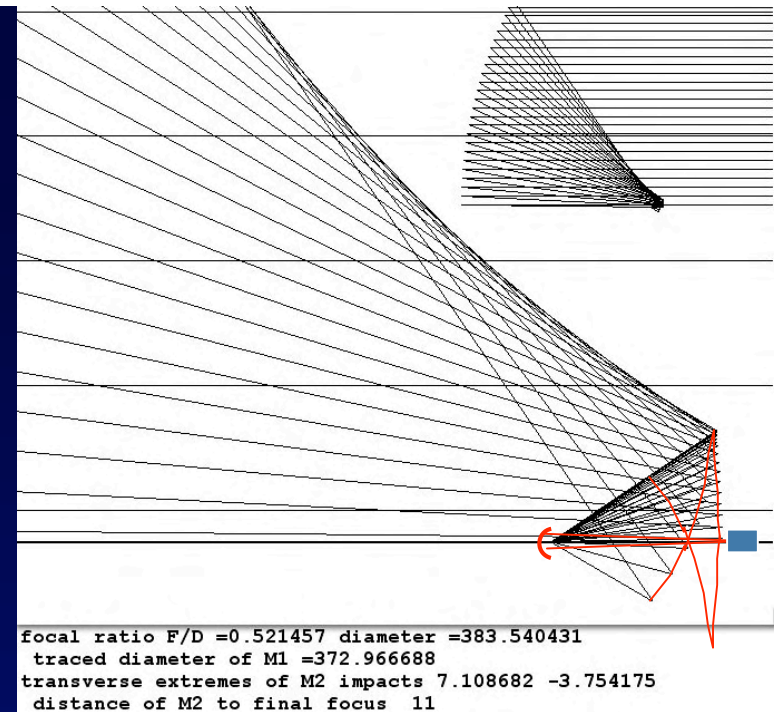
- Corrige l'aberration sphérique
- suit la dérive de pupille (sol)
- Coma, astigmatisme, turbulence, corrigés en aval dans les champs isoplanétiques



focal ratio  $F/D = 0.521457$  diameter = 383.540431  
traced diameter of M1 = 372.966688  
transverse extremes of M2 impacts 7.108682 -3.754175  
distance of M2 to final focus 11



# Faisabilité d'un miroir « alphoïde »

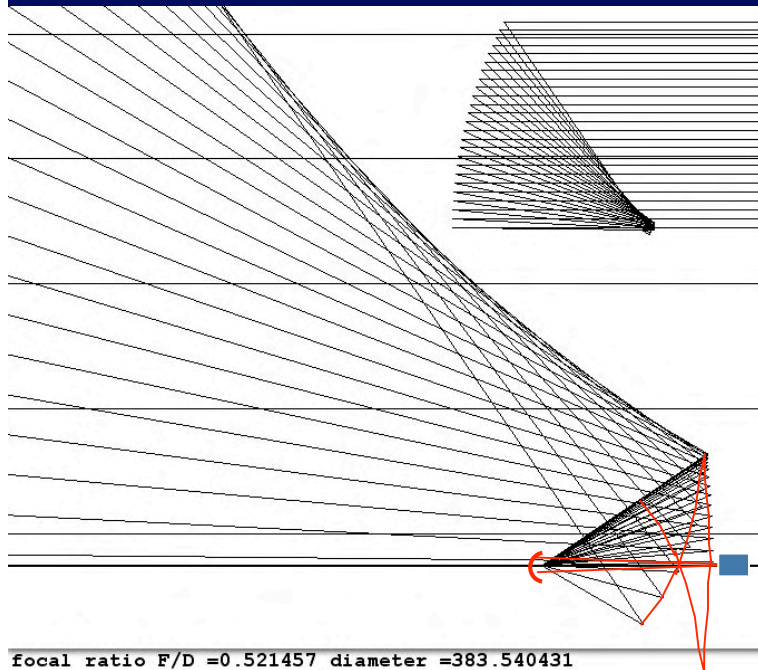


- Segmenté dilué, déformable pour pupille dérivante ?
- Diabolo semi-transparent ? efficacité 22%
- Réflexion angulairement sélective:  
couches Bragg-achromatisées par empilement

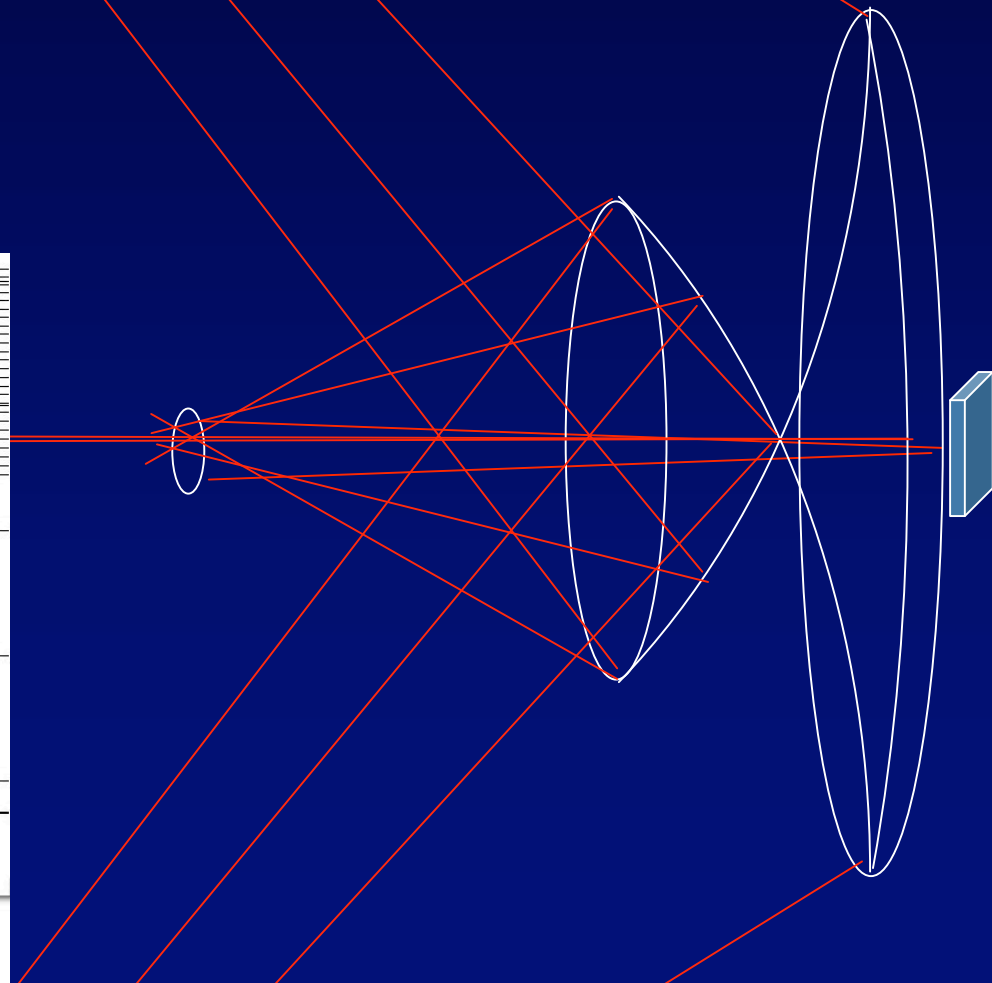
# Variante de correcteur Mertz dilué pour CARLINA à F/1

- tracé par routine de Mertz: corrige ab. sphérique et coma
- M2 au meilleur foyer, replié, plus petit, à segments mobiles (mécanisme « oursin » pour suivre les pupilles)
- M3 petit et monolithique
- à préciser & comparer aux versions Mertz classique, Dohlen, etc....

# Correcteur compact en forme de méduse ?



focal ratio F/D = 0.521457 diameter = 383.540431  
traced diameter of M1 = 372.966688  
transverse extremes of M2 impacts 7.108682 -3.754175  
distance of M2 to final focus 11



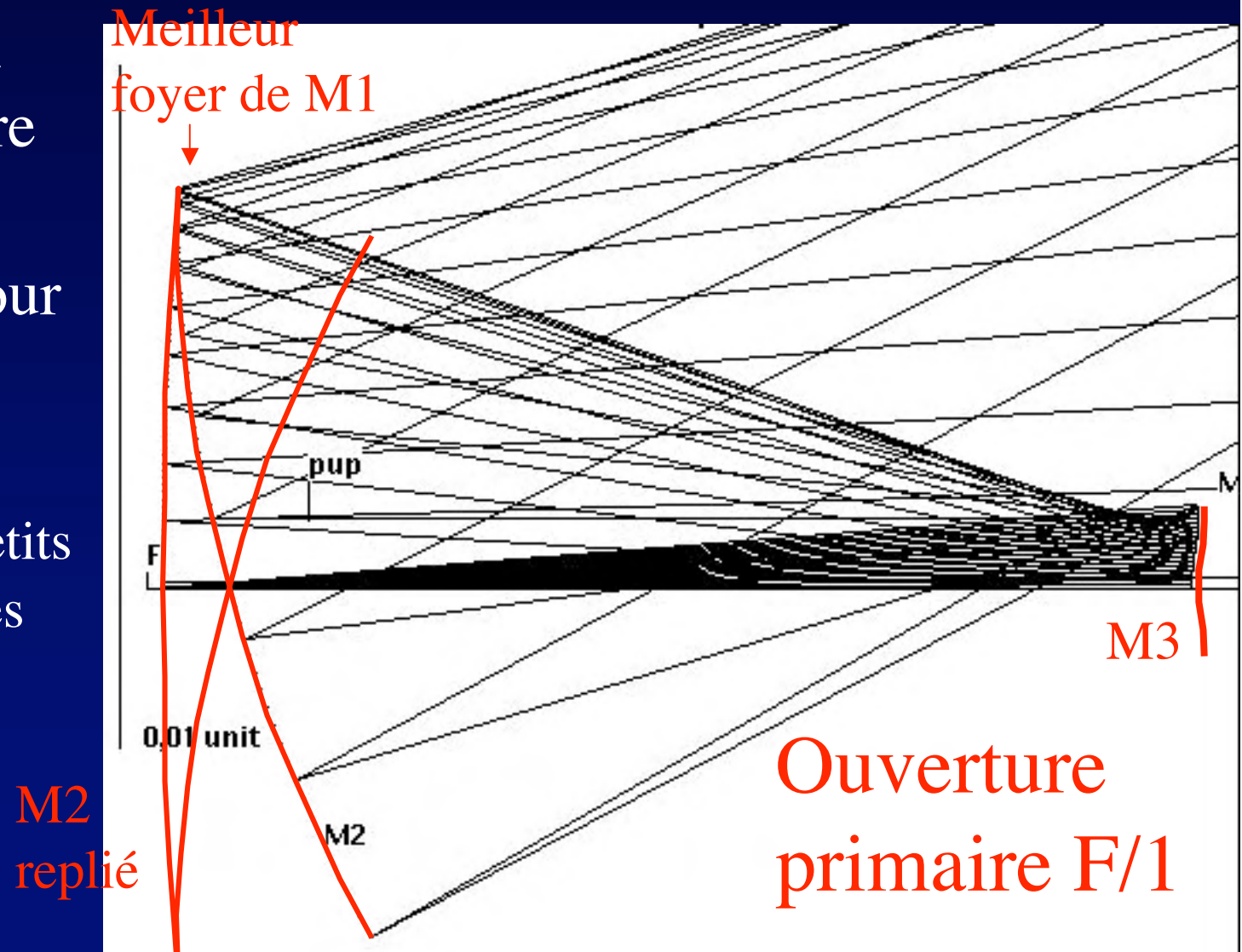


# Surface primaire: parabolique ou sphérique ?

- parabolique:
  - pas de correcteur focal
  - coma: une seule station focale
  - pointage global ou déformation hors axe
- sphérique:
  - Miroirs identiques
  - Métrologie simplifiée, au centre de courbure
  - Plusieurs stations focales, chacune avec correcteur focal encombrant ( flotille pour EEI)

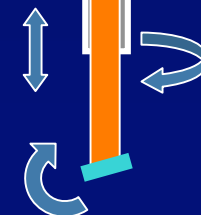
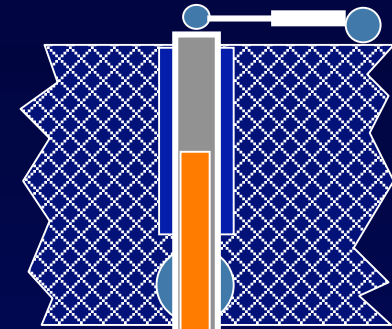
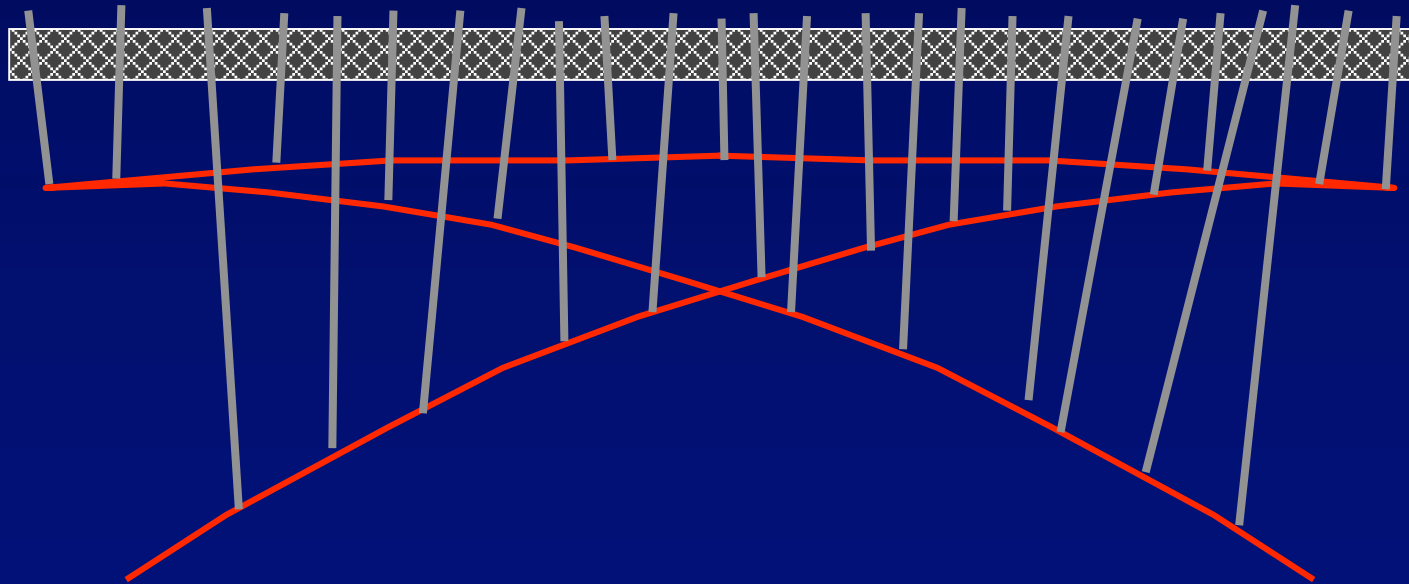
# Correcteur dilué d'aberration sphérique et coma

- Exemple : à F/1, diamètre 1% de M1
- Soit 20 m pour 2km
- Suivi des faisceaux: petits miroirs mobiles (mécanisme « oursin »)



# Nacelle avec « oursin »

- Miroirs de quelques millimètres
- Positionnement par « épines » télescopiques
- Diamètre jusqu'à 20 m ? ( pour ouverture 2 km )





# Conclusion

- Proposition à ESA en cours
- Le concept Luciola s'est simplifié
- Il reste des incertitudes techniques:
  - Miroirs ultra-légers
  - Charges électrostatiques perturbant l'équilibre solaire
- Qualifier en laboratoire:
  - la propulsion solaire
  - La métrologie
- Essais en orbite nécessaires