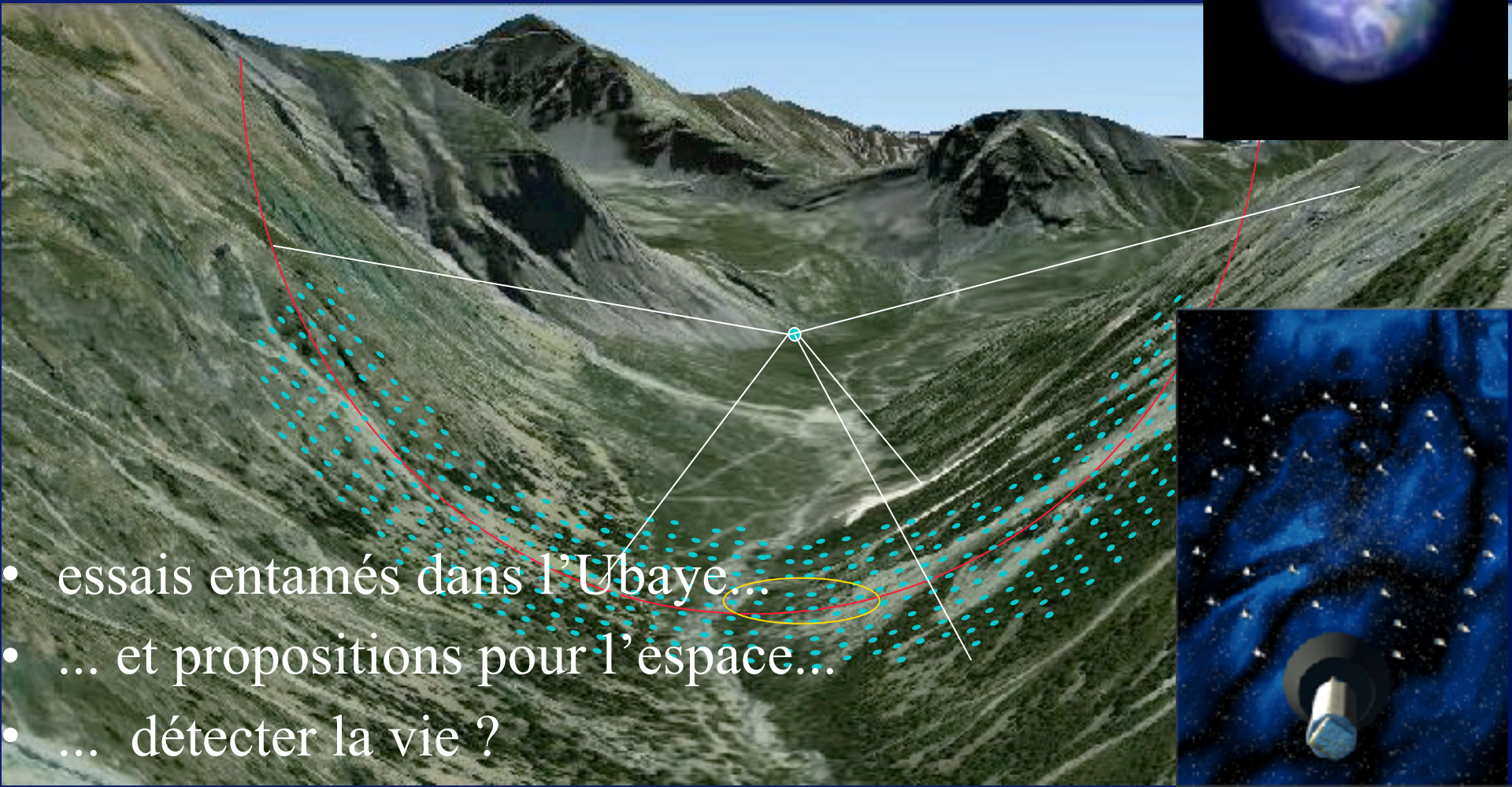


# Perspectives proches et lointaines pour les hypertelescopes: de l'Ubaye à la Lune et l'espace

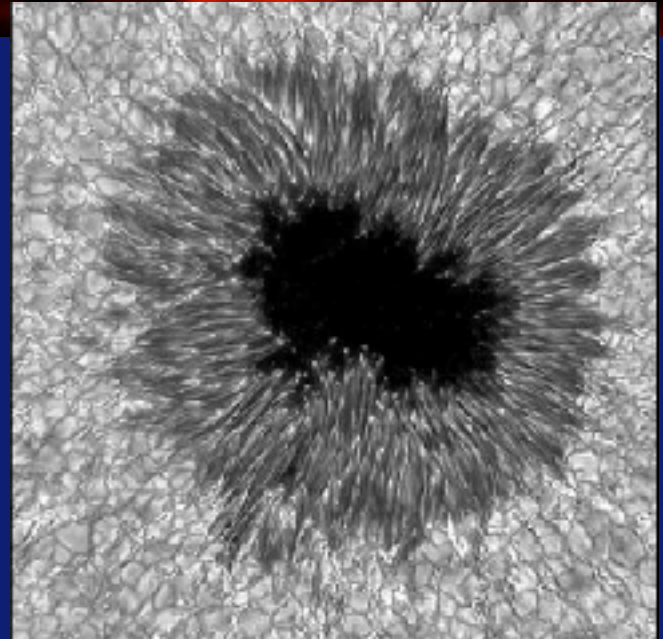
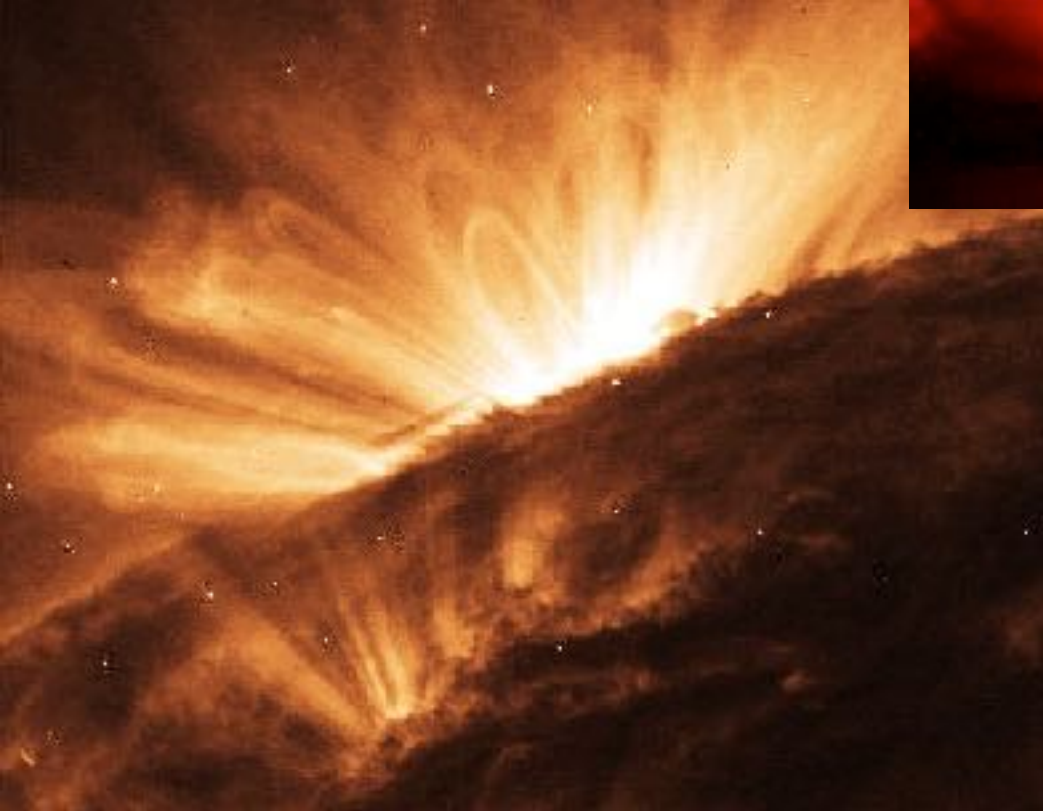
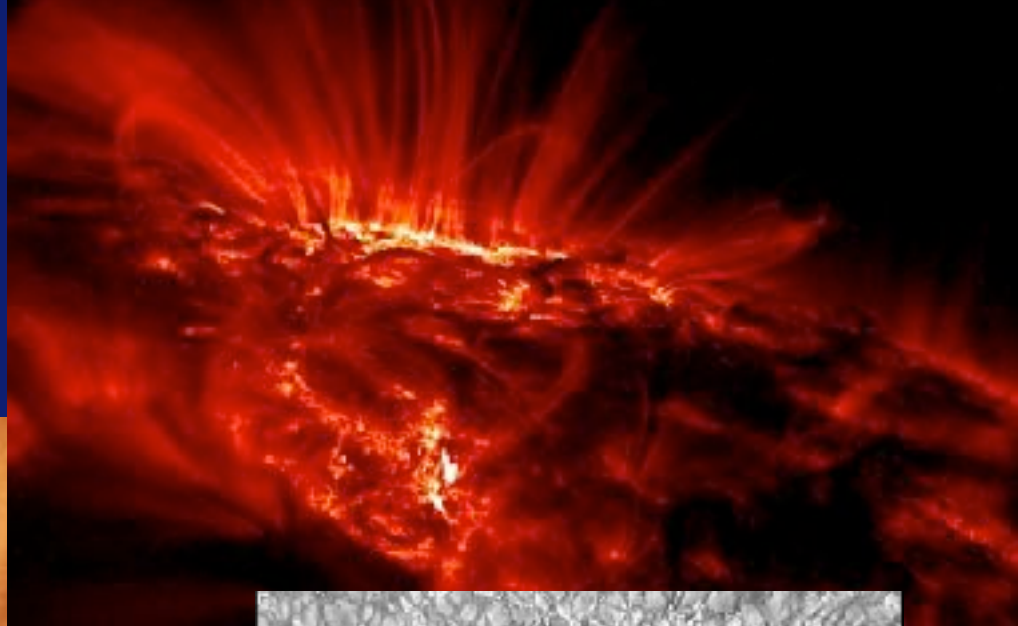
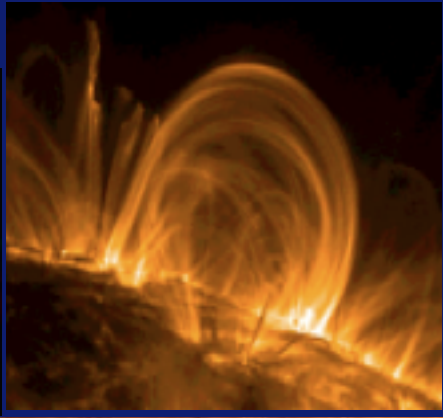
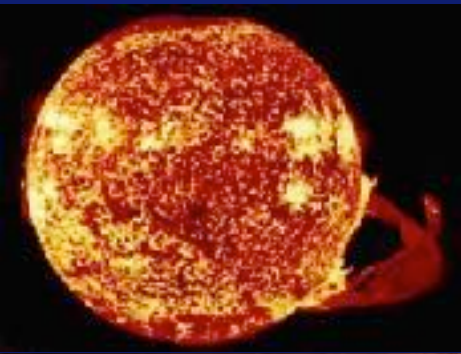
Vallon de la Moutière, Ubaye



- essais entamés dans l'Ubaye...
- ... et propositions pour l'espace...
- ... détecter la vie ?



On en rêve:  
Voir des étoiles comme on voit le Soleil ... et leurs planètes...  
et la vie



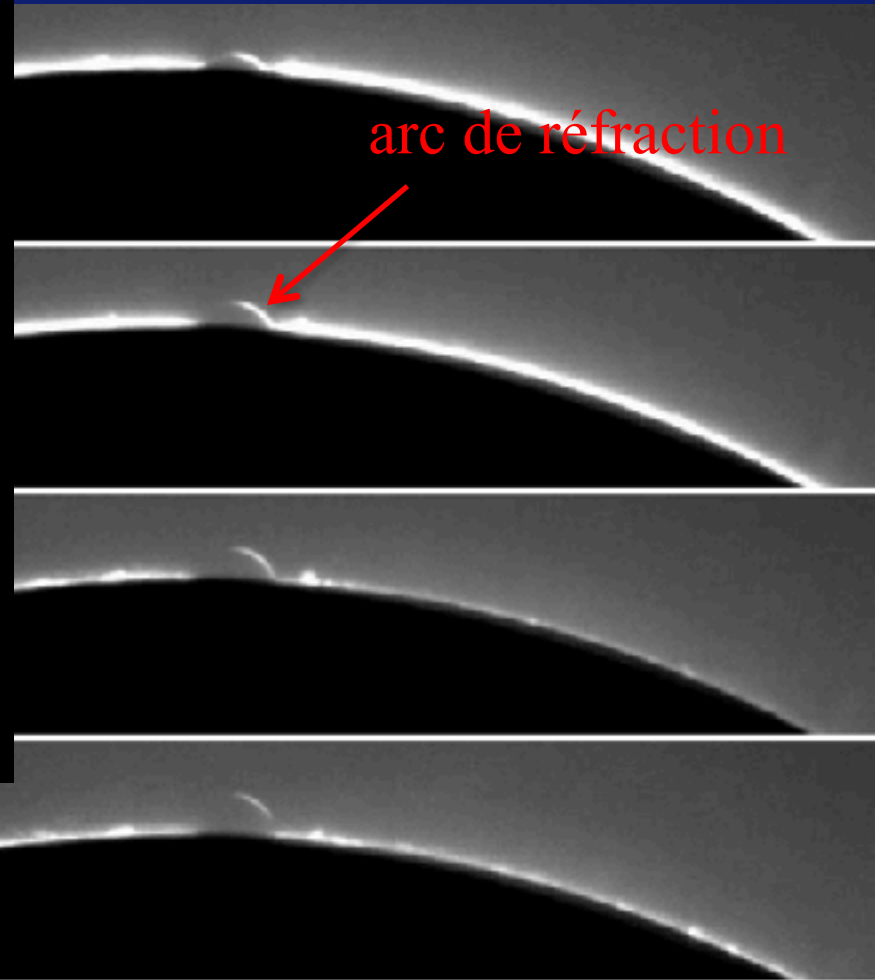
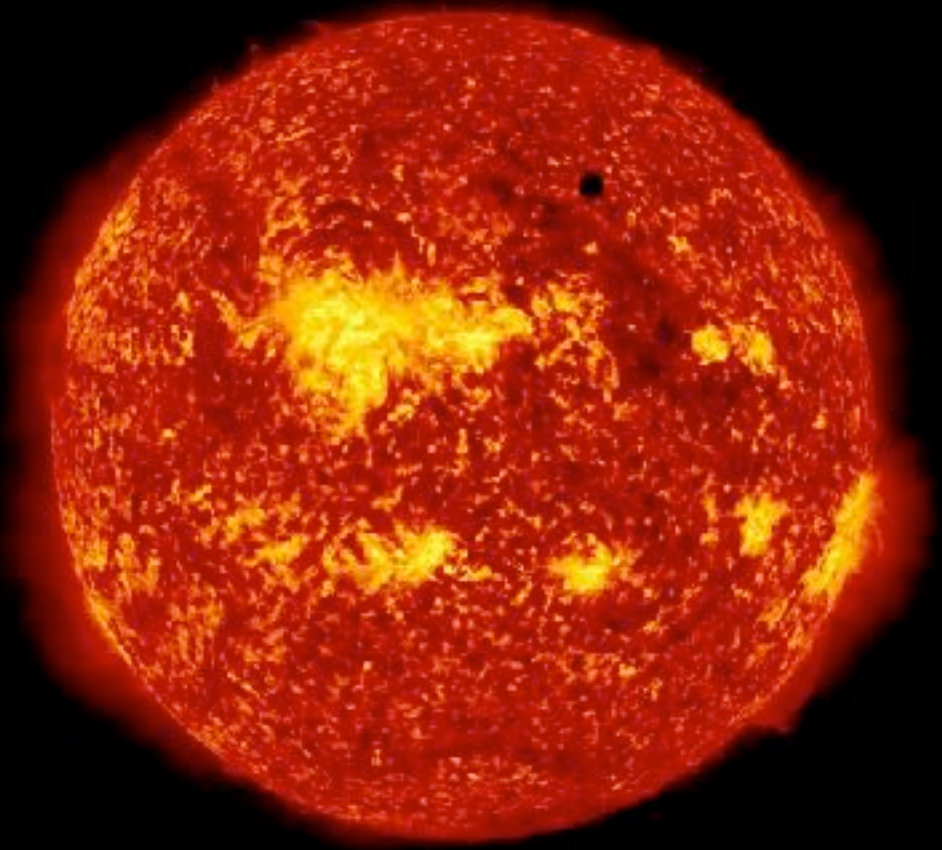
# Tornades sur le soleil: et les étoiles ?



NASA Solar Dynamics Observatory



# Transit de Venus devant le Soleil ( Rondi et al. , 2012 )



arc de réfraction

Ultra-violet 304 Angströms

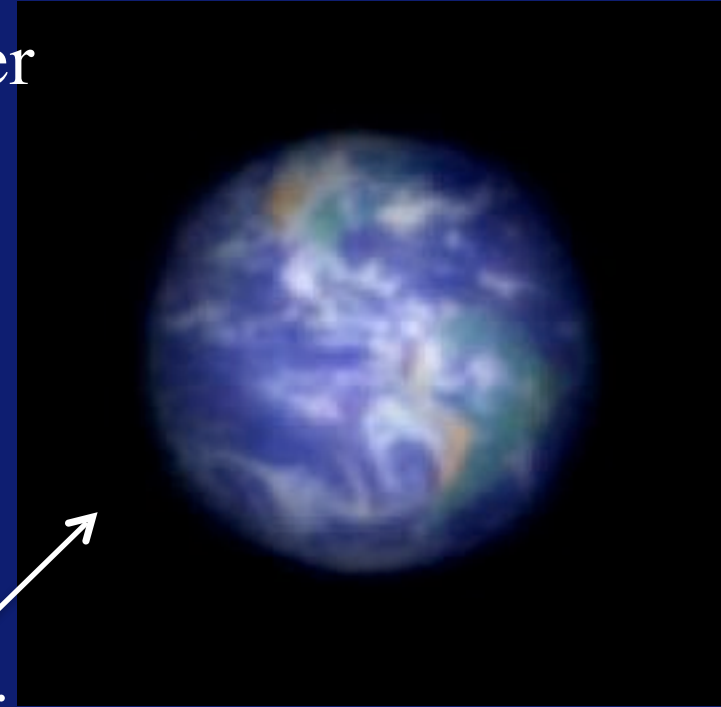


# Etoile double avec trou noir ( vue d'artiste )



# 23 siècles après Epicure, 4 après Giordano Bruno... ... et leur évocation d' « autres mondes »...

- ... il devient envisageable d'en former des images résolues...
- ... et d'y rechercher des signes de vie
- ... par exemple en observant des changements de couleur saisonniers



hypertélescope spatial de 100km:  
image directe simulée d'une exo-Terre à 10 années-lumière  
fond uniforme soustrait ( Labeyrie, Science, 1999 )



# L'étoile la plus proche héberge une exo-planète : Proxima b

- découverte confirmée en 2016 : vitesse radiale 2m/s, **sans transits**
- 4,2 années-lumière, 1,3 fois la masse terrestre, orbite 11,186 jours , 0,05 UA
- étoile Proxima Centauri: naine rouge , en zone habitable: eau liquide
- ... mais habitabilité incertaine: vent stellaire, sursauts, rayons X

Alpha Centauri A et B

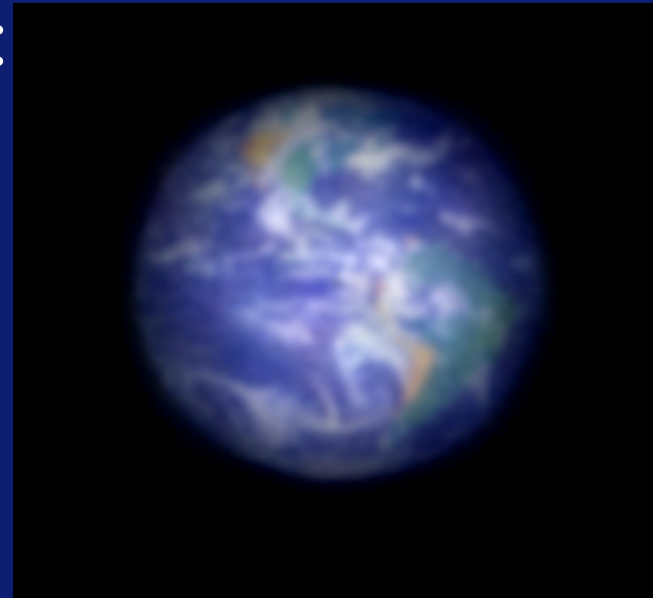
Proxima Centauri  
naine rouge



Proxima b **vue d'artiste** par ESO/M.  
Kornmesser - <https://www.eso.org/public/images/ann16056a/>, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=508690>

# Voir Proxima b ... puis ses détails ?

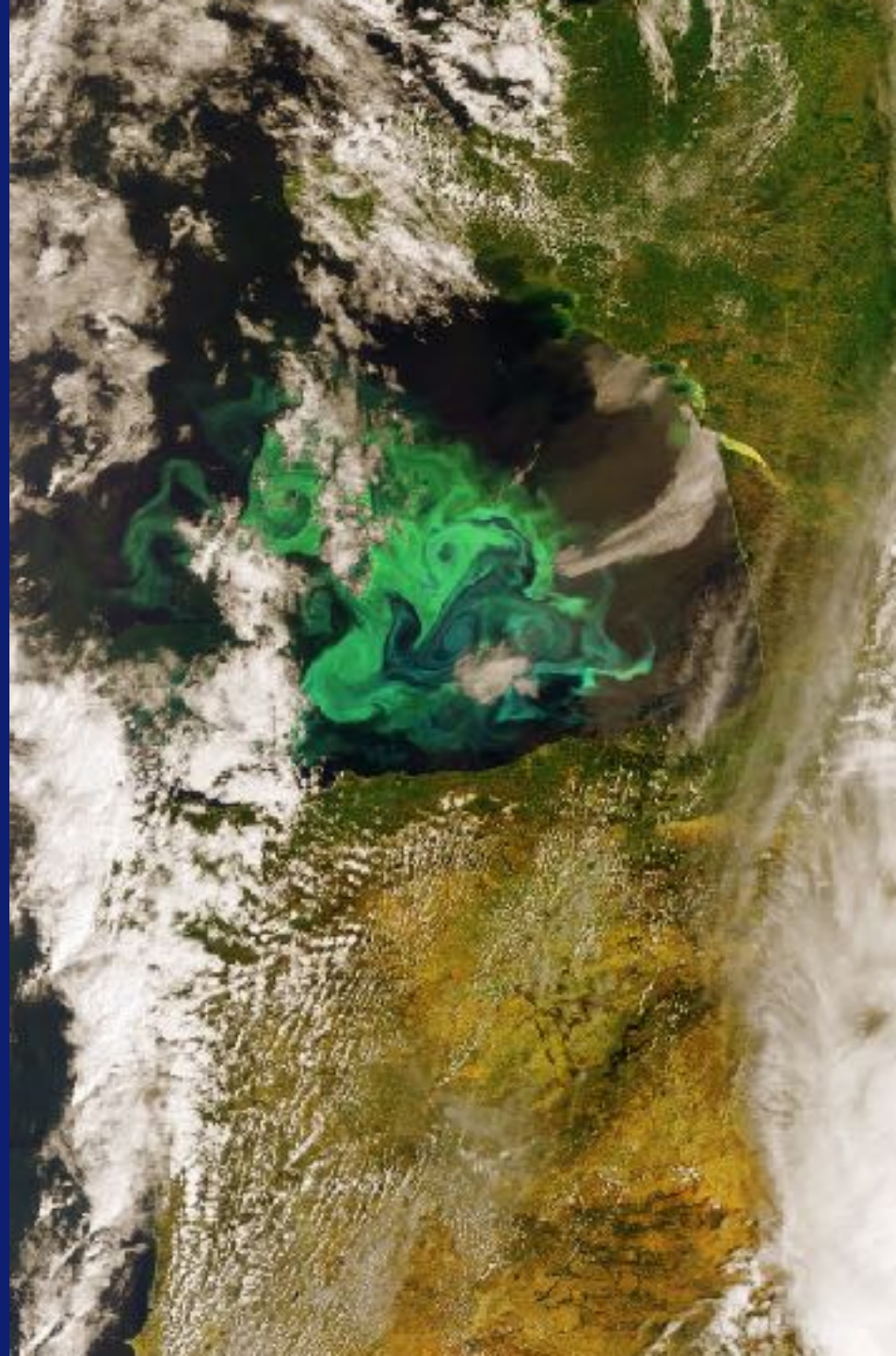
- d'abord détecter sa lumière :
  - 10 millions de fois moins lumineuse que l'étoile...
  - et si proche: éblouissement
  - Lovis et al. (2016) proposent d'associer un coronographe adaptatif + spectrographe sur un telescope VLT de 8m
    - recherche spectroscopique de bio-signatures O<sub>2</sub> etc, exo-chlorophylles...
- pour voir des détails de la planète:
  - hypertélescope de 1500m
    - pour commencer à résoudre
  - 15km pour résoudre 10x10 pixels



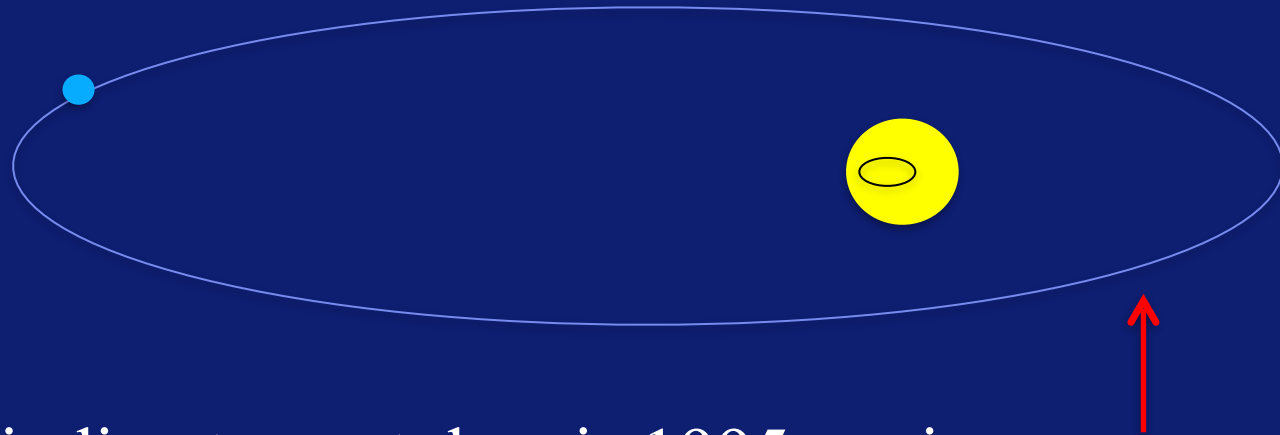


# Signatures of exo-life

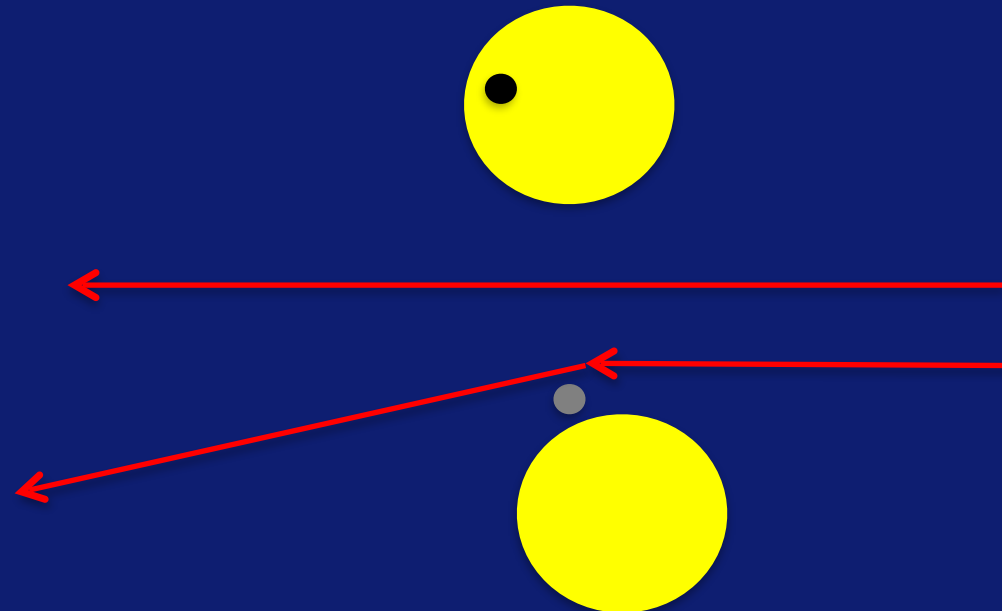
- Examples:
  - marine algal bloom
  - indian summer color change
- fast varying



# Exo-planètes



- 3200 découvertes indirectement depuis 1995, mais non résolues
- par spectroscopie: effet Doppler-Fizeau...
- ... ou photométrie :
  - transits périodiques
  - effet de lentille gravitationnelle



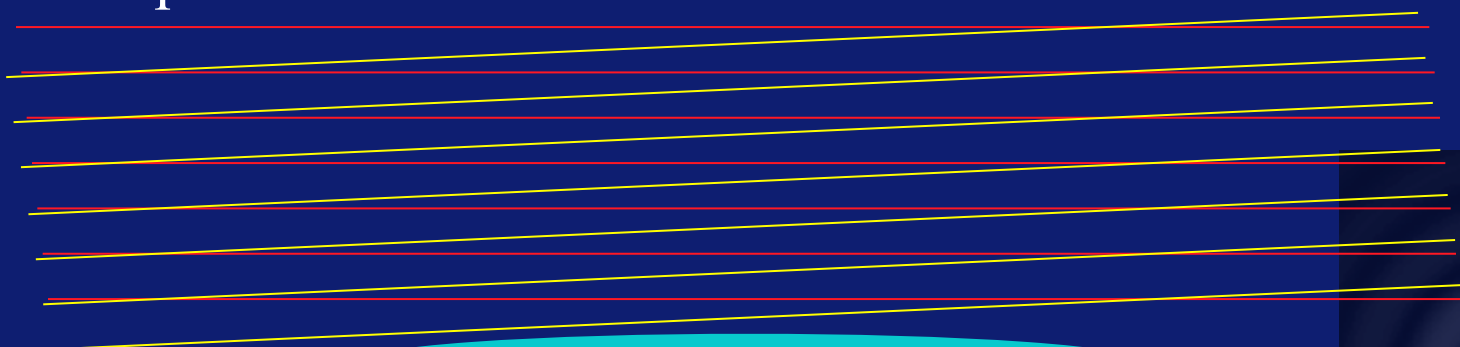


# Pourquoi agrandir les télescopes ?

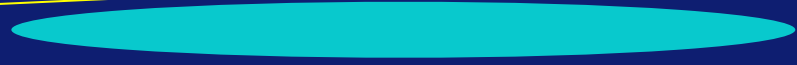
... gagner en luminosité et résolution



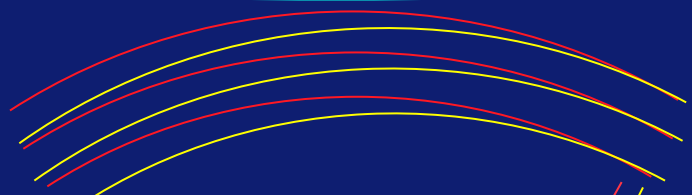
ondes planes



lentille



ondes sphériques



taches de diffraction  
d'Airy

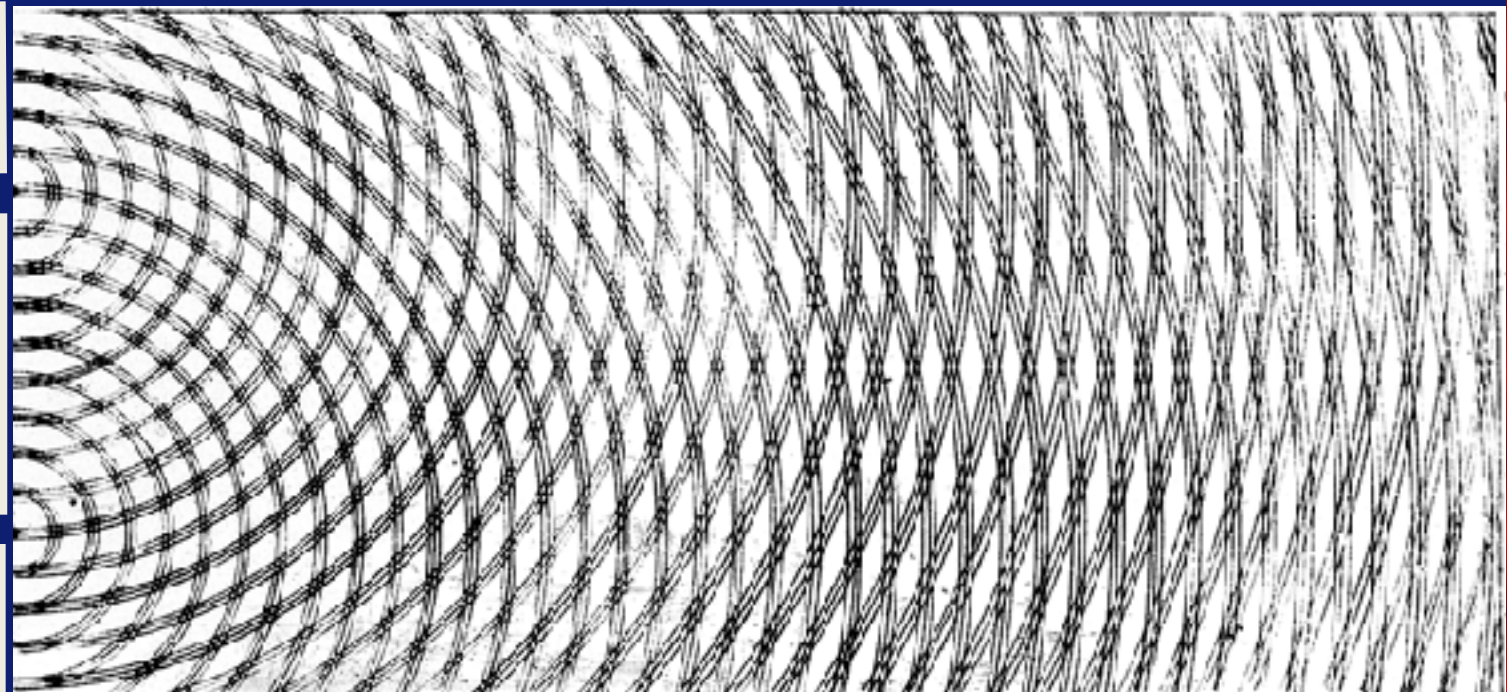
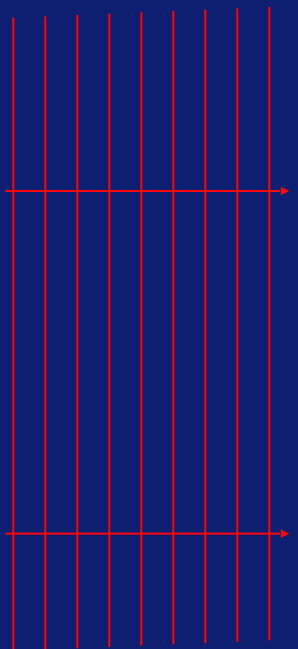
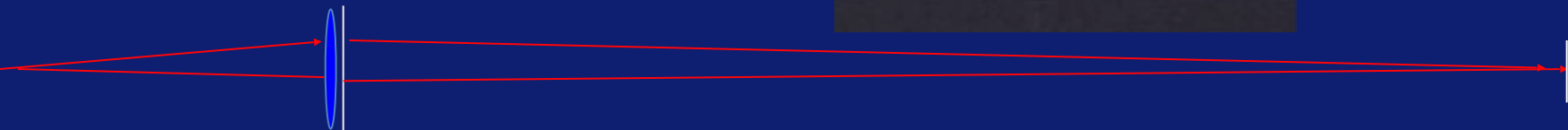
caméra



# Interférences d'Young (ca. 1810)

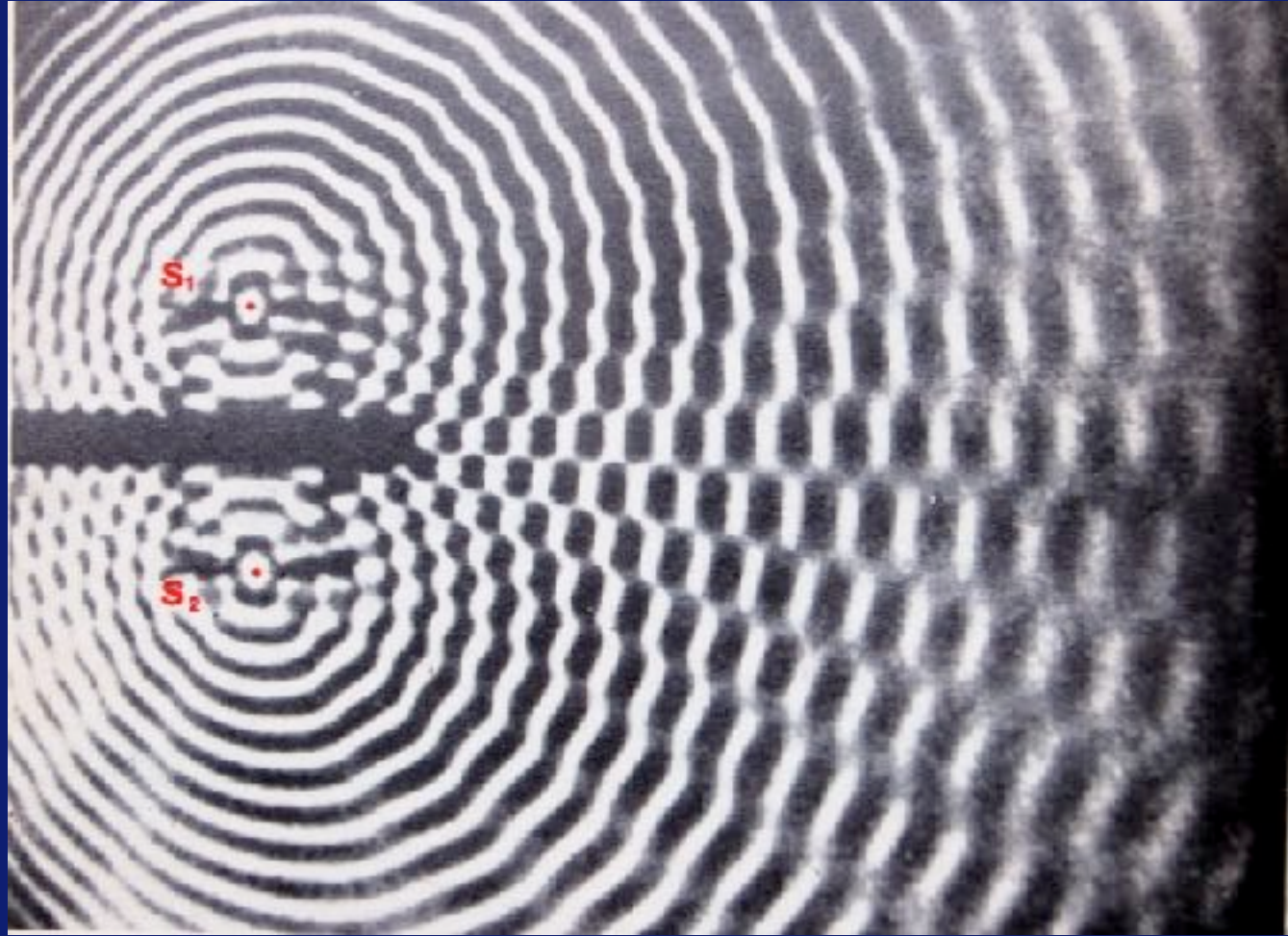


Franges d'Young





# Interférence de vagues sur de l'eau



- la lumière est aussi une vibration ...
- ...qui peut former des images par interférence



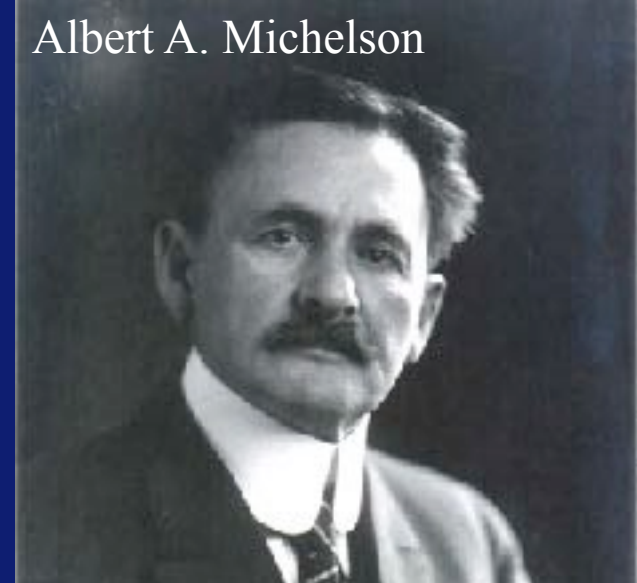
Augustin  
Fresnel

Hippolyte Fizeau



E. Stephan

Albert A. Michelson



Il manquait aux pionniers:

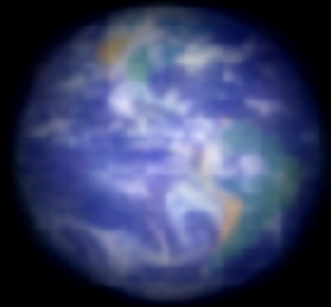
- des outils théoriques
- les ordinateurs, logiciels, caméras, asservissements, etc...
- l'accès à l'espace





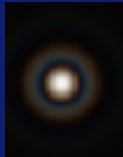
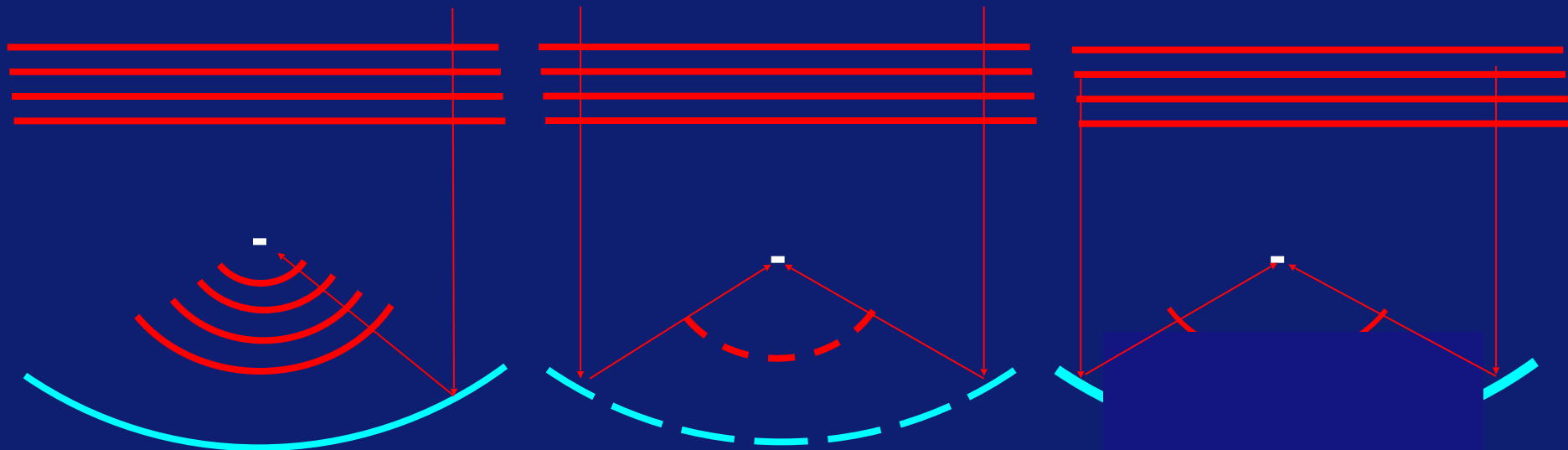
# Avaient-ils imaginé les perspectives de l'interférométrie ?

- ... centaines d'ouvertures
- ... imagerie directe à haute résolution
- il manquait les moyens techniques:
  - mise en phase adaptative, caméras, asservissements, ordinateurs, etc...

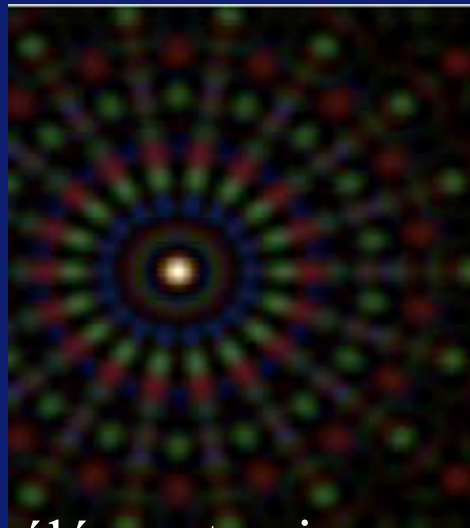




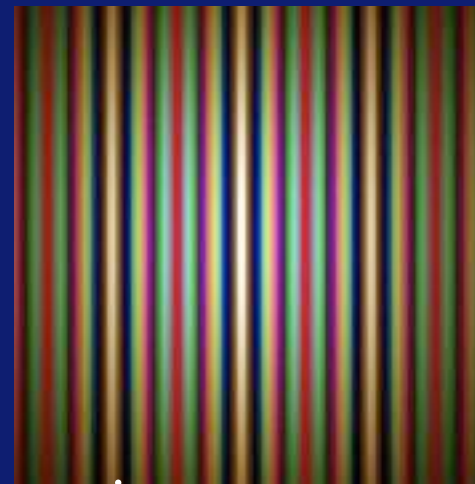
# L'interféromètre, miroir géant du pauvre



Tache de diffraction d'Airy



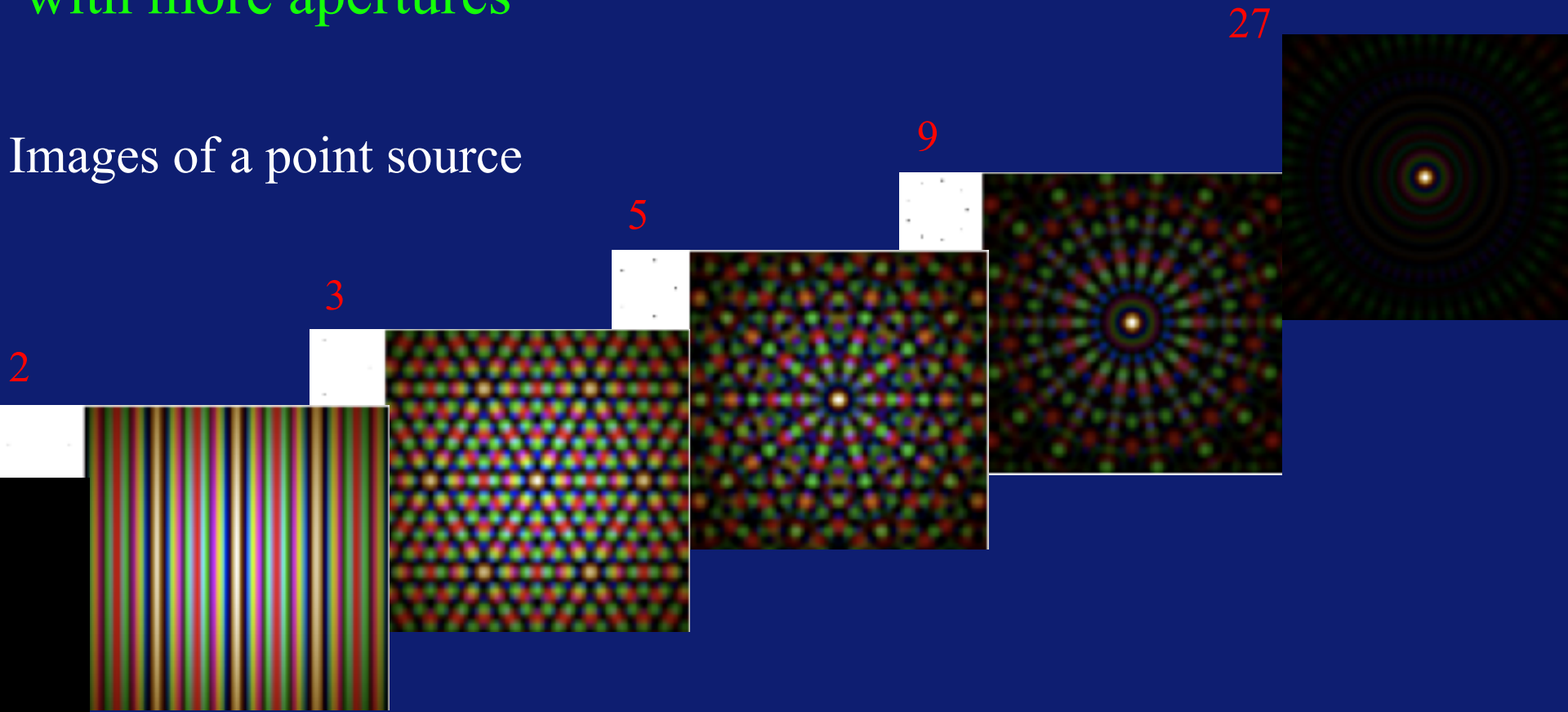
Interféromètre Fizeau



- Marche encore avec deux éléments : image dégradée, mais sans perte de résolution

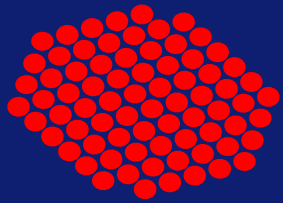
# Fizeau interference: from fringes to direct images with more apertures

Images of a point source



- The peak/halo ratio improves with more apertures

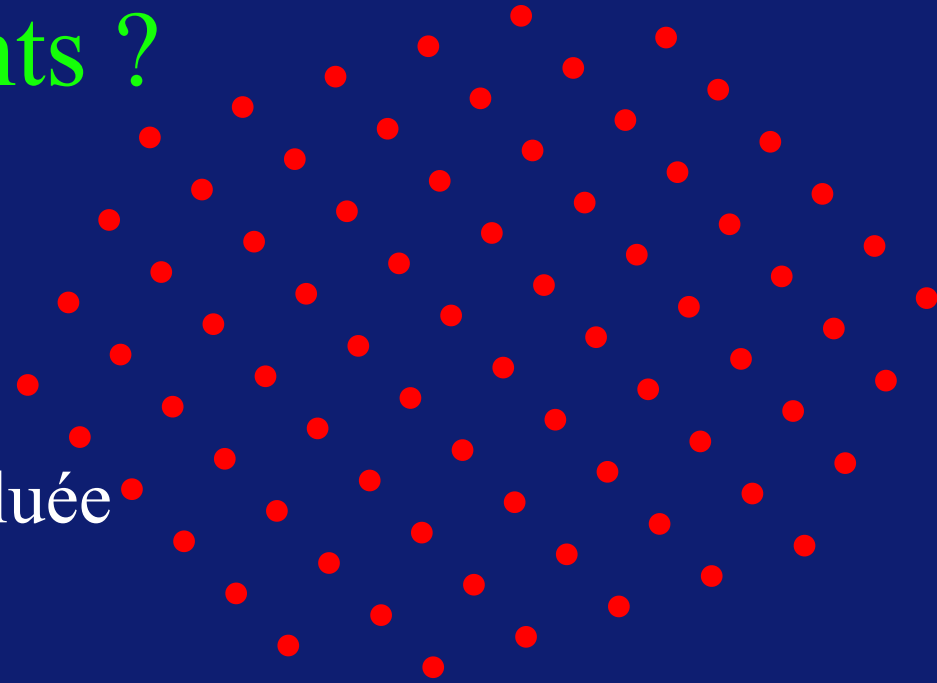
# Miroir mosaïque: vaut-il mieux le diluer en écartant les segments ?



mosaïque

jointive

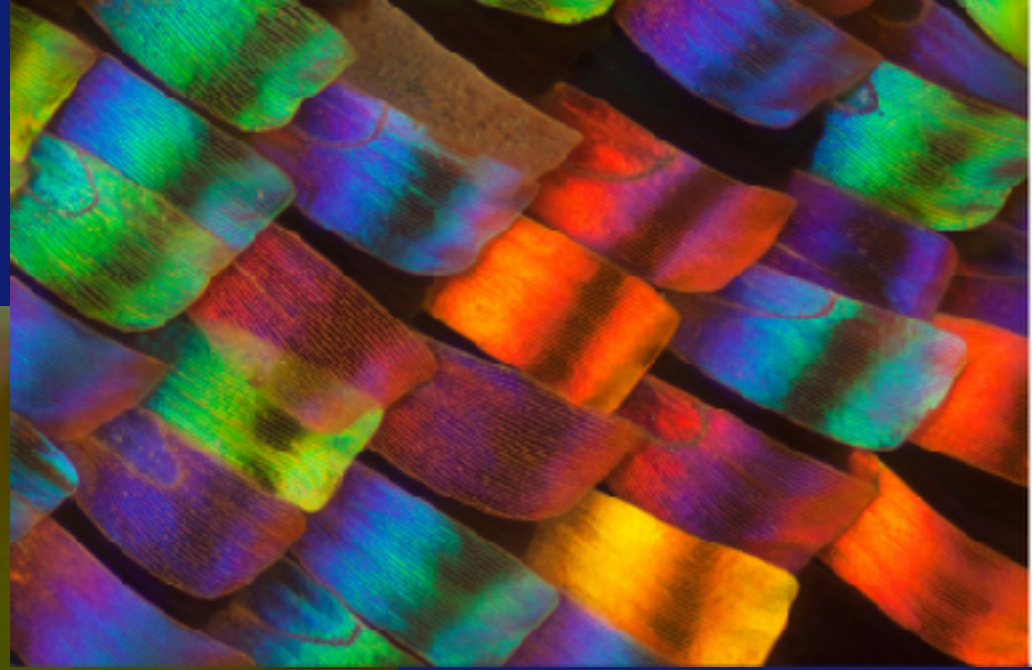
diluée



- même luminosité d'image si la pupille est densifiée
- le diamètre accru de la mosaïque diluée améliore la résolution ....
- mais limite le diamètre apparent maximal des objets observables ....
- ... sauf sur amas , avec optique multi-champ

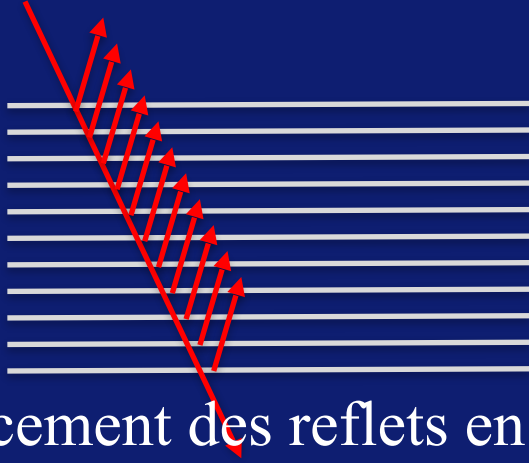


# Interférences volantes



*Chrysidia ripheus*,  
Madagascar

# Interférences volantes



- renforcement des reflets en phase
- sélectif en longueur d'onde ( effet Lippmann-Bragg)





# Grand interféromètre à deux télescopes (GI2T)

Observatoire de Calern 1976-2007



spectre de  $\gamma$  Cass  
avec  
interférences  
(Mourard et al.,  
Nature 1989)



précurseur du VLT au Chili



Groupes de télescopes, couplés pour l'interférométrie:  
il faut plus d'ouvertures pour obtenir des images directes

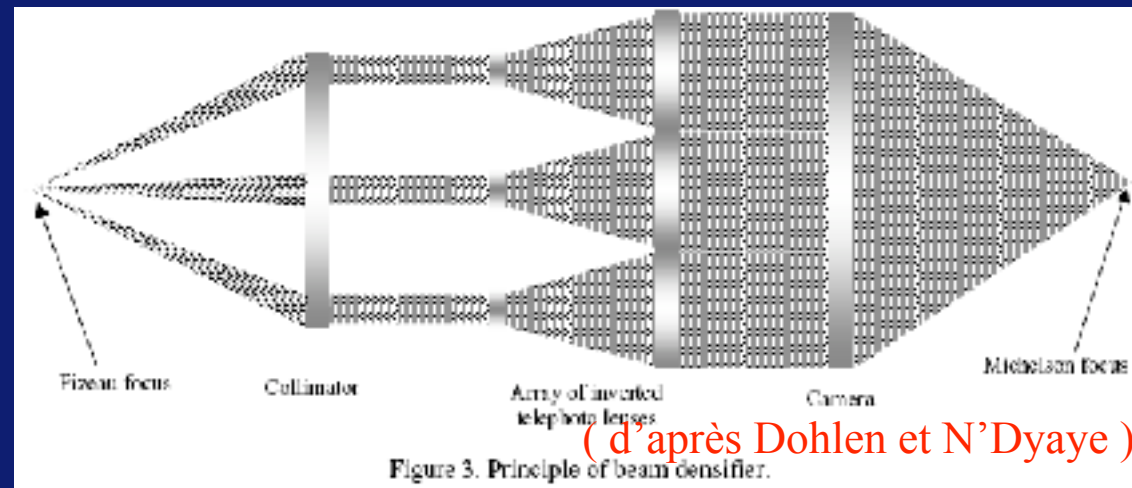
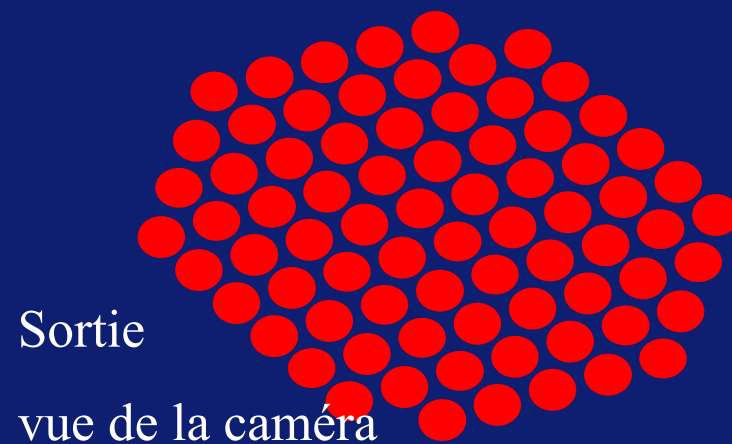
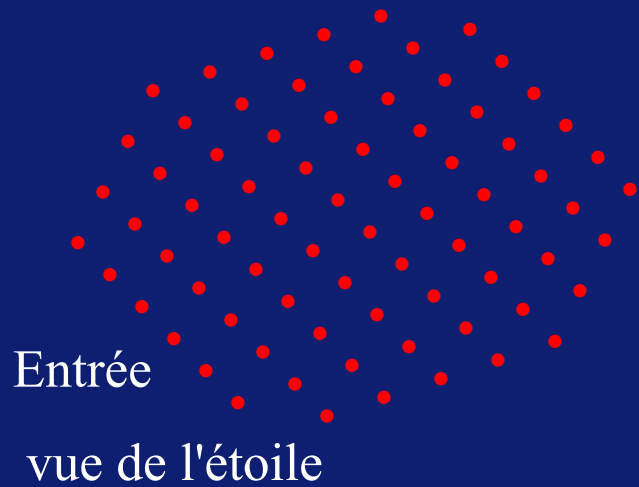
CHARA, Mt Wilson

6 télescopes de 1m



VLTI, Chili  
4 télescopes de 8m

# Améliorer l'interféromètre de Fizeau: densifier la pupille pour une image plus lumineuse (Labeyrie 1996)

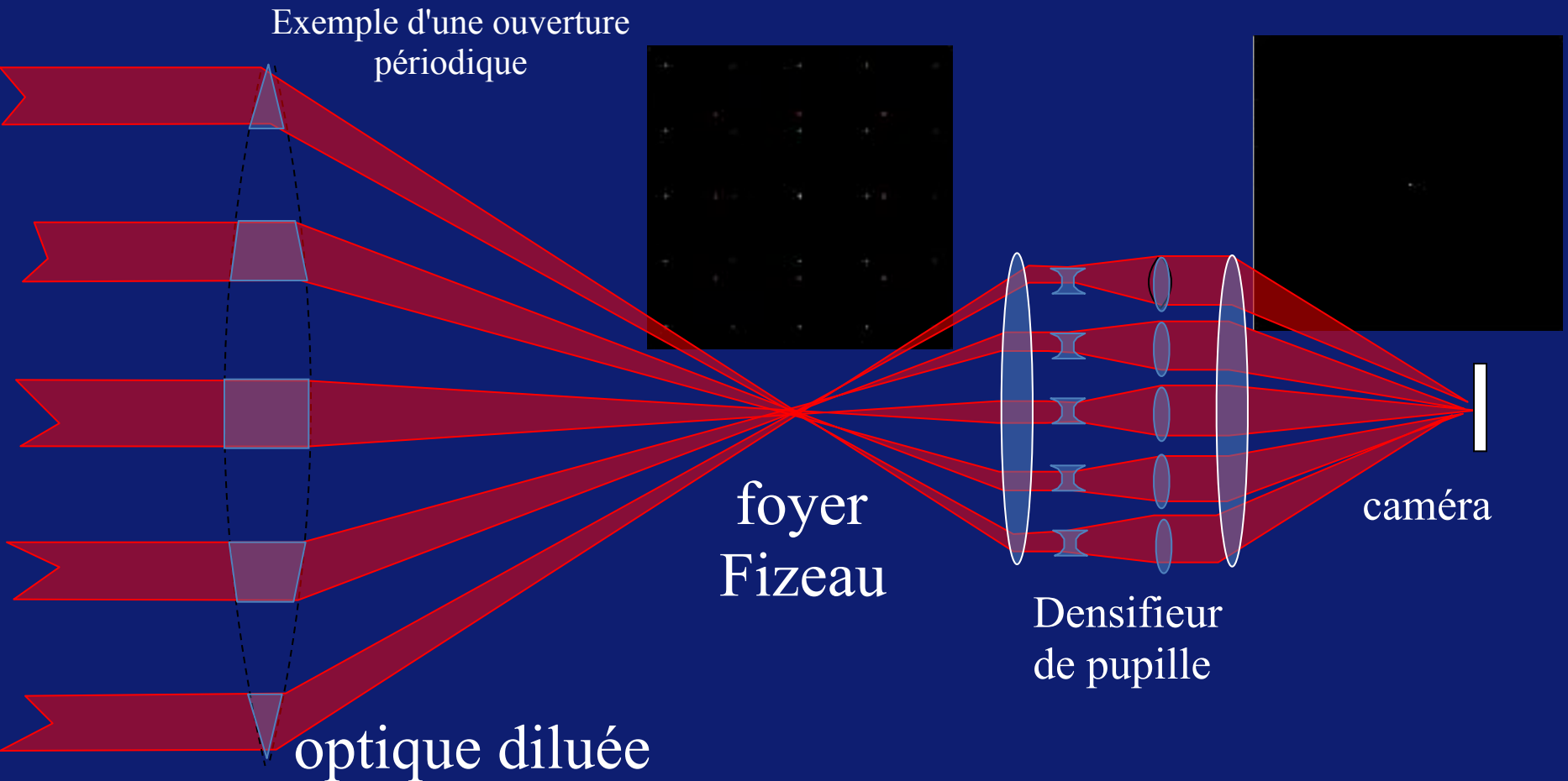


- rétrécit le halo de diffraction
- concentre sa lumière dans le pic d'interférence
- intensifie l'image qu'il forme

# Principe de l'hypertélescope

ou « interféromètre imageur multi-ouverture à pupille densifiée »

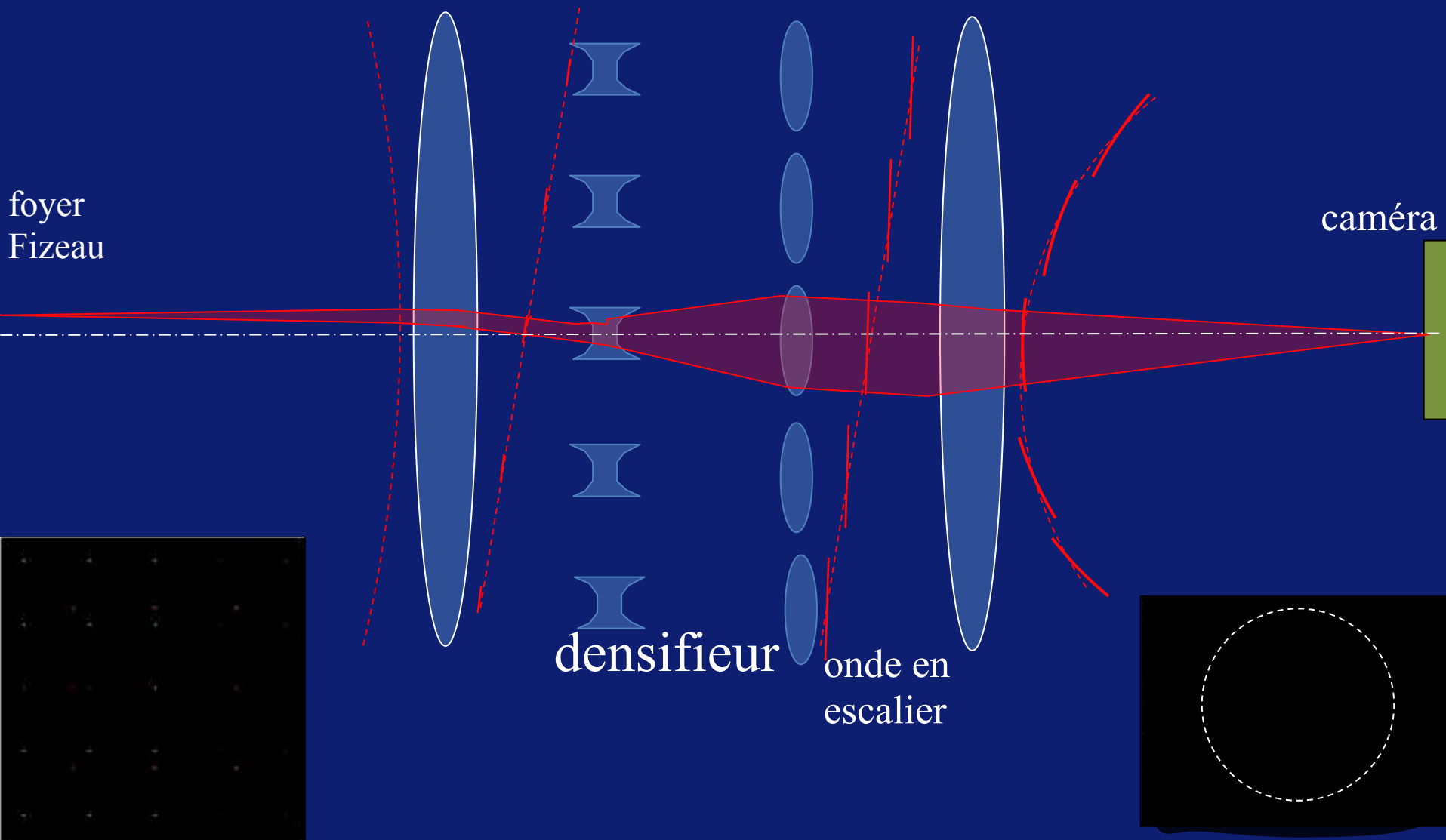
(Labeyrie A&A, 1996)



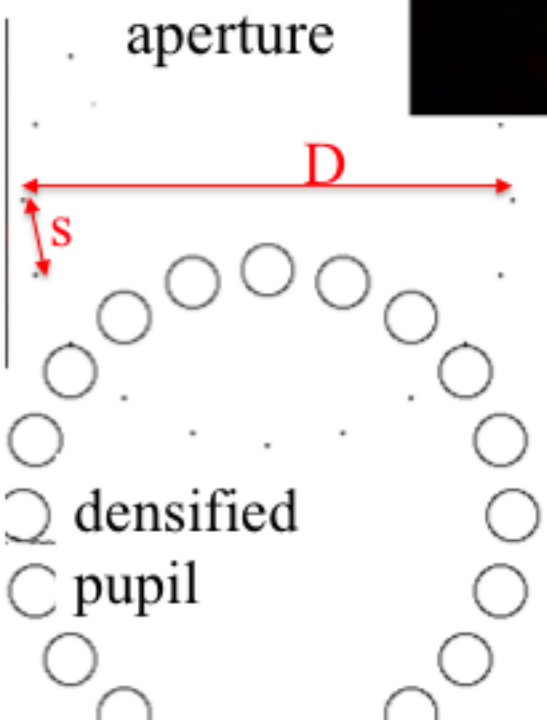
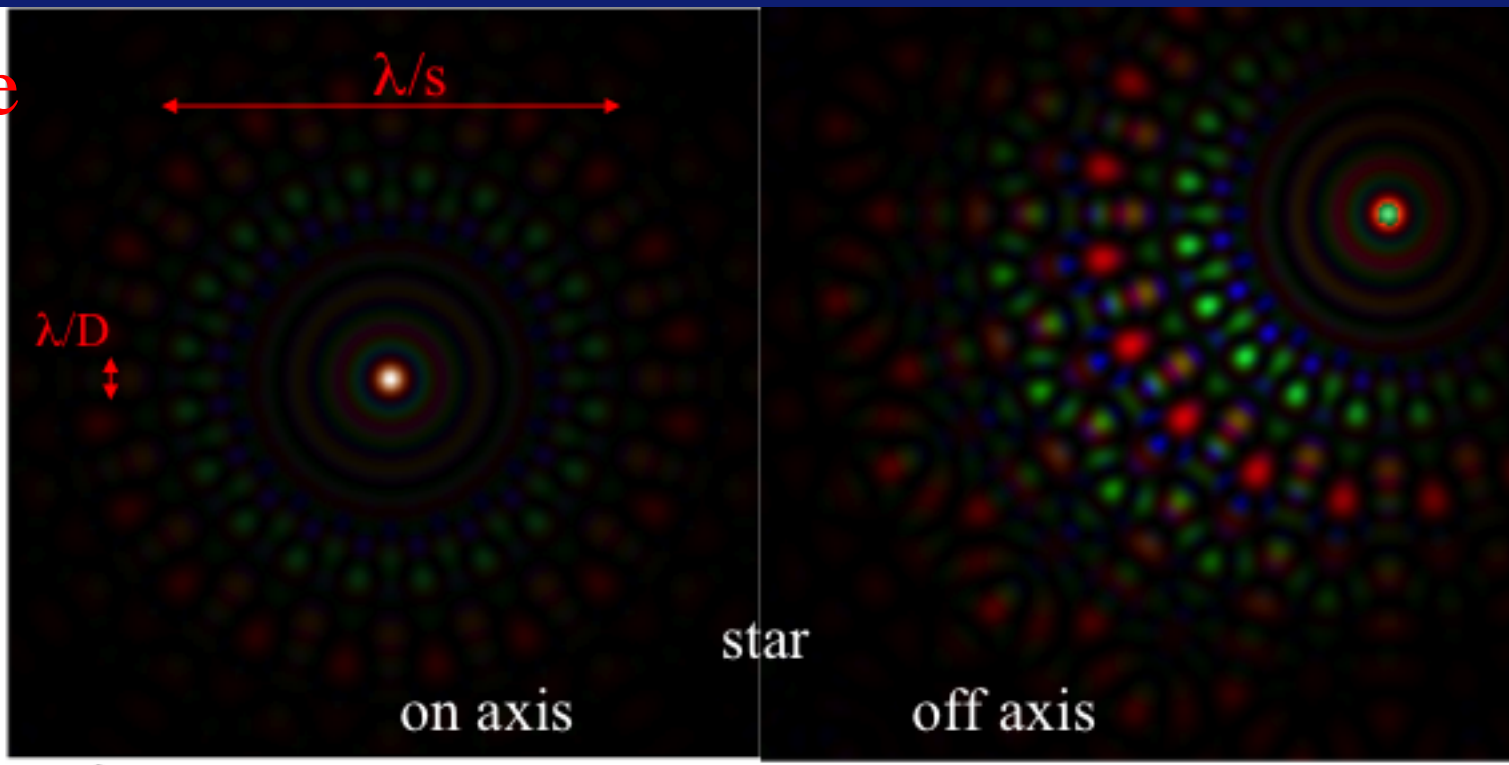


# Etoile en dehors de l'axe

- son image est décalée plus que l'enveloppe...
- ... et en sort éventuellement : limitation du « champ d'imagerie directe »



# Image of a point source



## Hypertelescope's Direct Imaging Field

# Limitations théoriques



- resels actifs dans l'image directe:  $< N^2$  avec  $N$  ouvertures
- champ d'imagerie directe:  $\lambda/s$  (  $s$  espacement des sous-ouvertures ) agrandissable par déconvolution de Mary ( 2012)

Limitations pratiques:      dimension de méta-ouverture

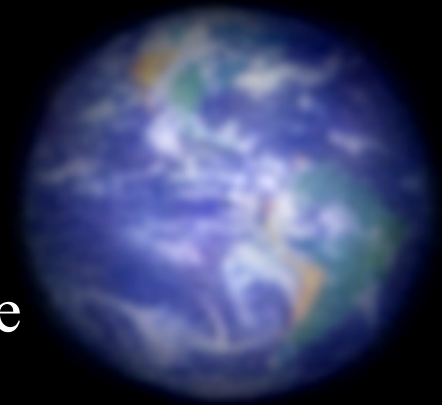
- Terre: 1 km avec drone focal, 10km avec lignes à retard
- espace: 100,000km ?



# Etapes des hypertélescopes

- essais en cours d'un prototype "Ubaye Hypertelescope"
- avant-projet proposé de "Extremely Large Hypertelescope" ( ELHyT) de 1km, sur Terre
- Versions spatiales proposées à NASA et ESA
- <https://lise.oca.eu/IMG/file/WhitepaperProposalHypertelescope.pdf>

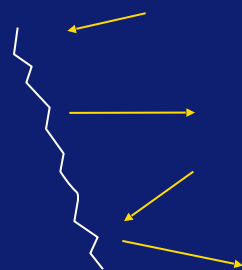
image simulée d'une exo-Terre  
à 10 années-lumière  
hypertélescope de 100km



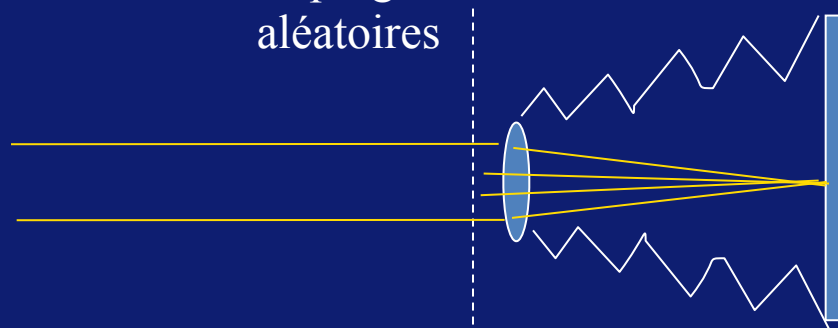
Petite expérience pour montrer aux enfants:

# Images Fizeau d'un amas d'étoiles simulé sans turbulence

amas d'étoiles simulé  
(aluminium froissé)

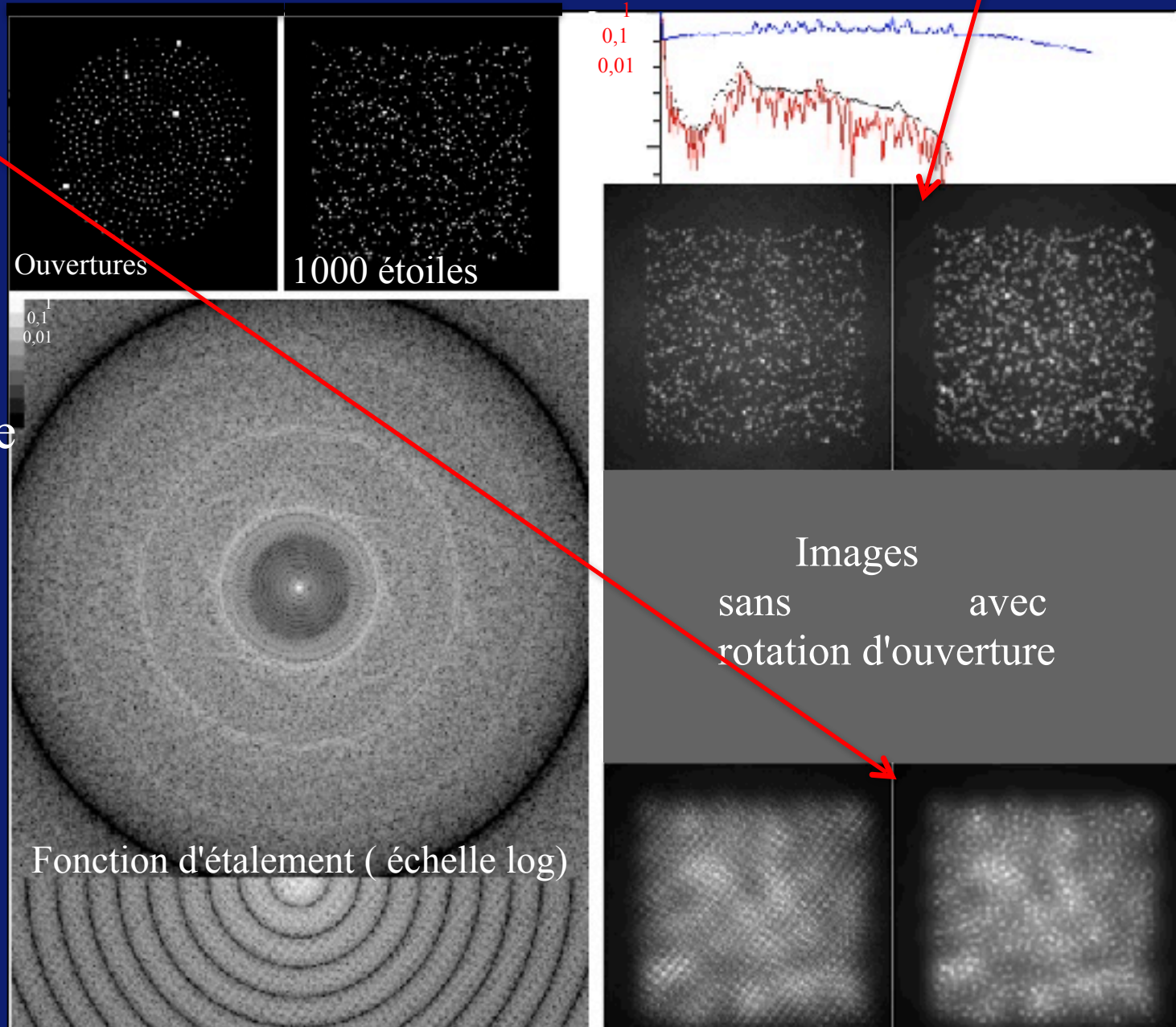


trous  
d'épingle  
aléatoires



- l'image est voilée par un halo...
- ... s'améliore avec le nombre d'ouvertures ...
- halo causé par la diffraction des petites ouvertures, et qui prélève de l'énergie ...
- ce qu'évite le montage « hypertélescope »

# simulation d'imagerie Fizeau: comparaison avec 605 petites ouvertures ou 6 grandes, à surface collectrice et méta-diamètre identiques



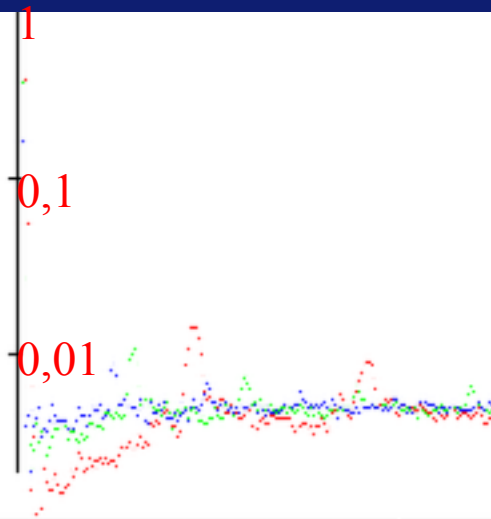
• Meilleure image avec petites ouvertures



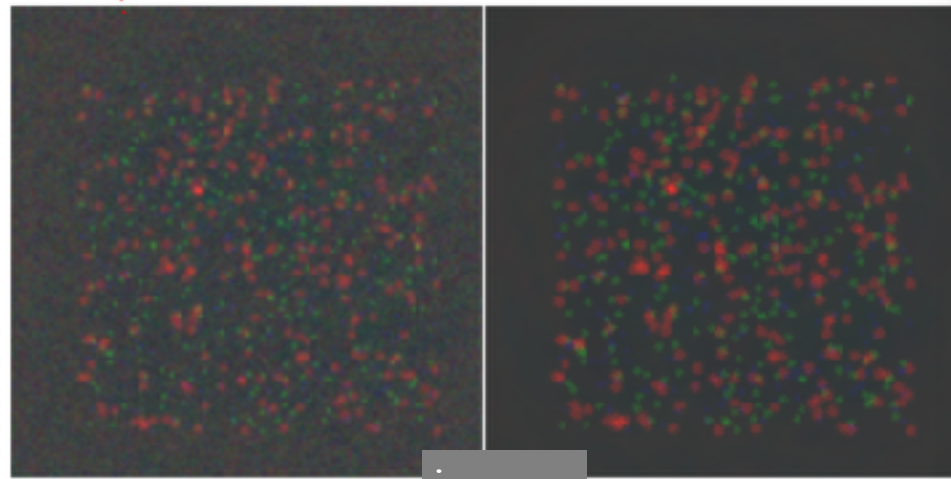
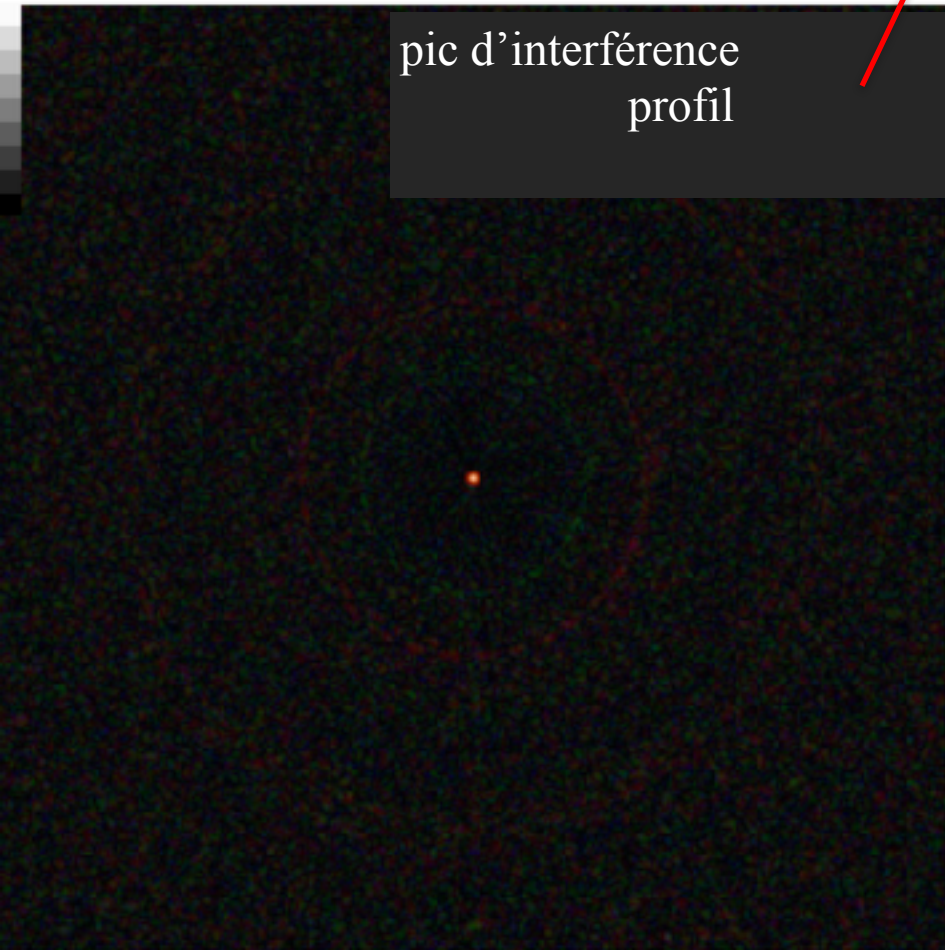
# Image Fizeau d'un amas d'étoiles

310 ouvertures

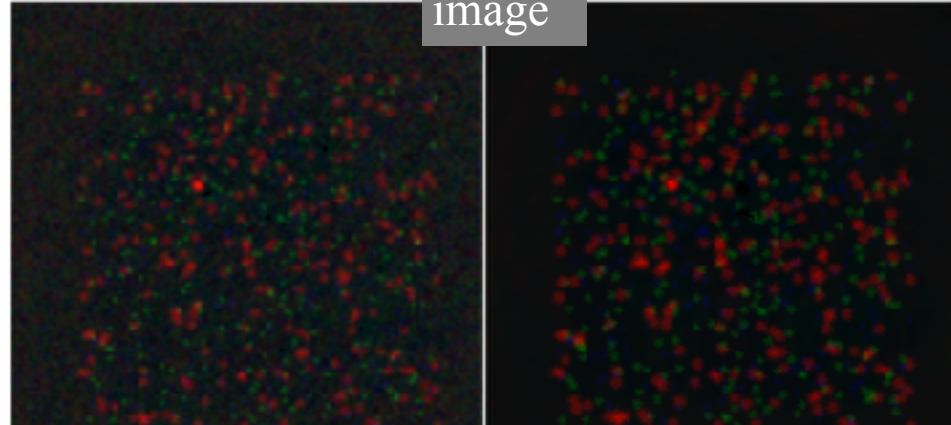
750 étoiles



pic d'interférence  
profil



image



# Fizeau image simulée: cas limite: 30 ouvertures et 1000 étoiles

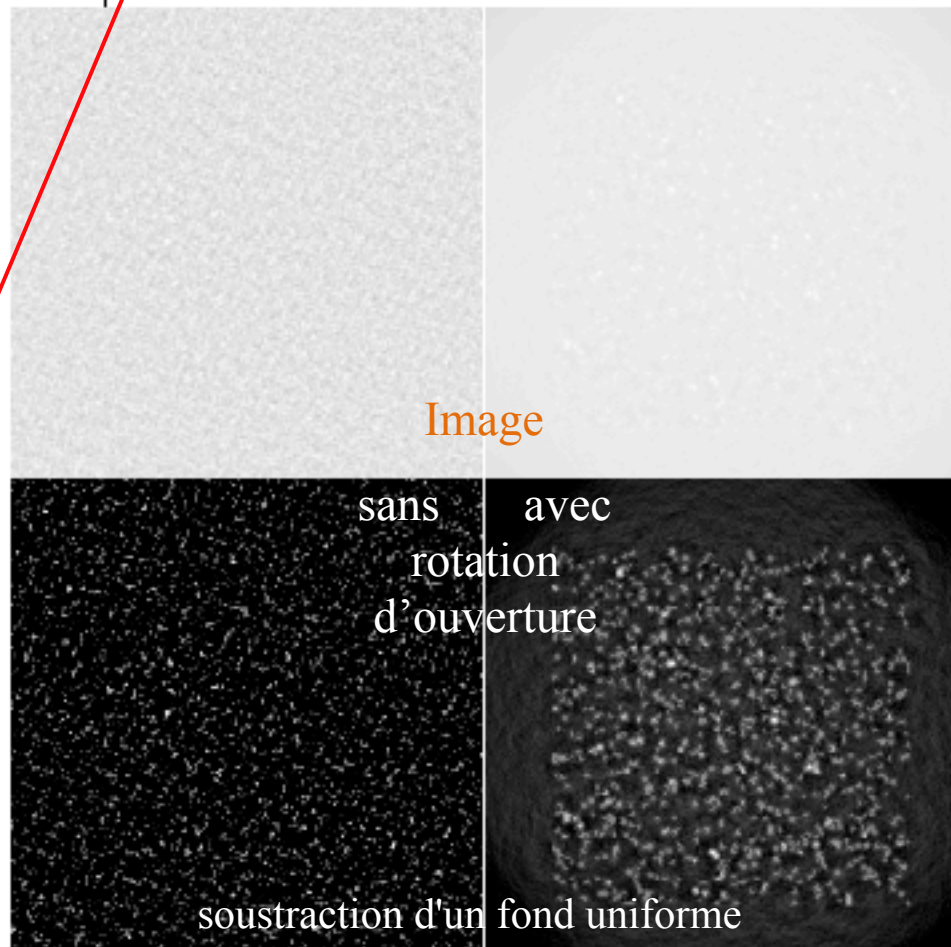
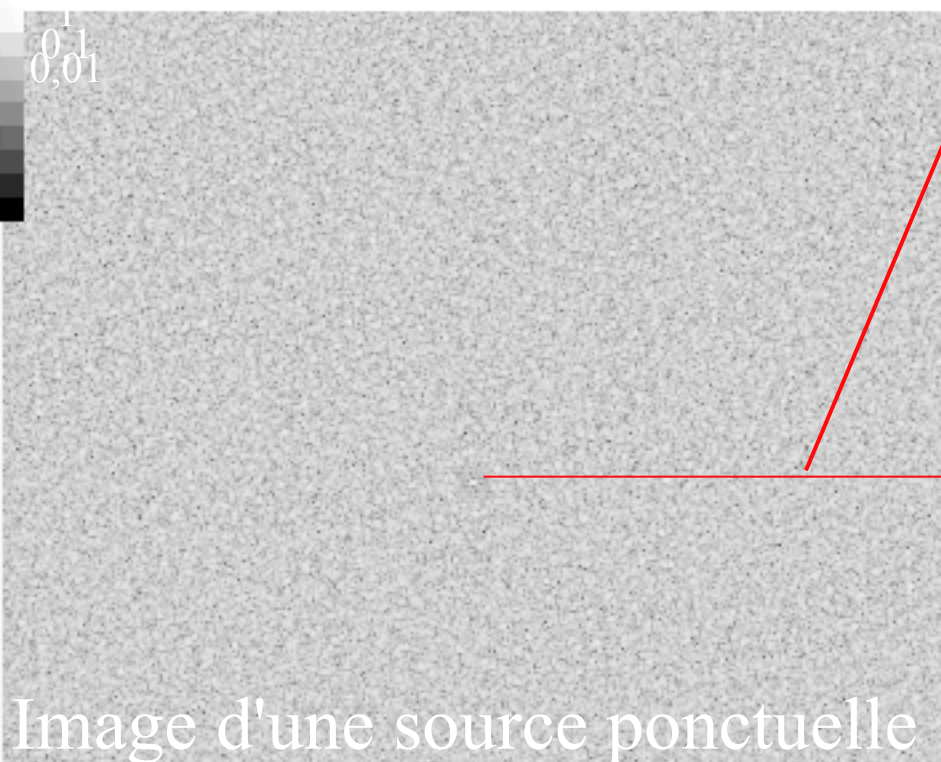
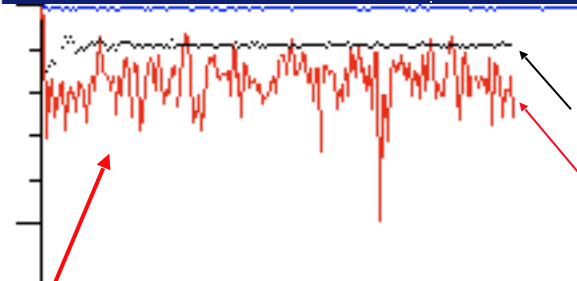
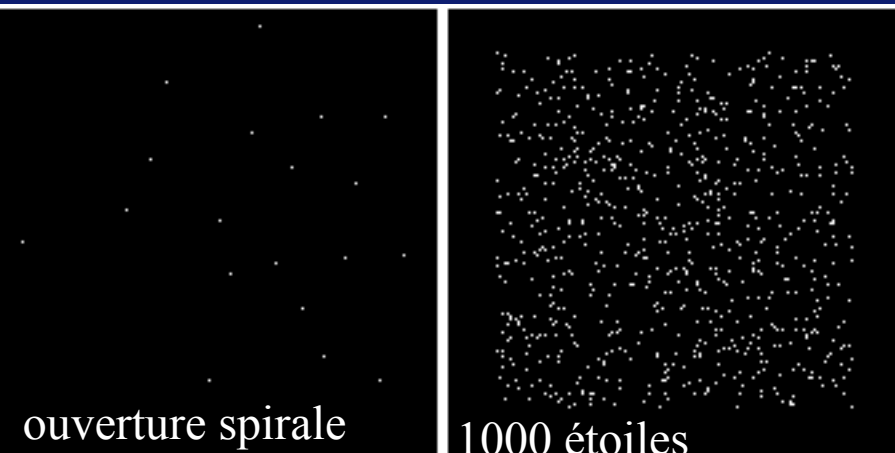
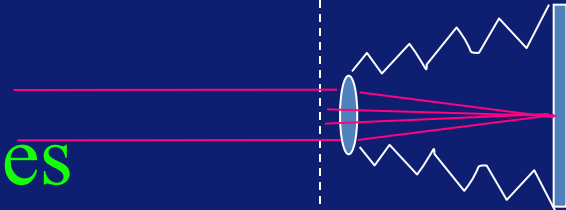
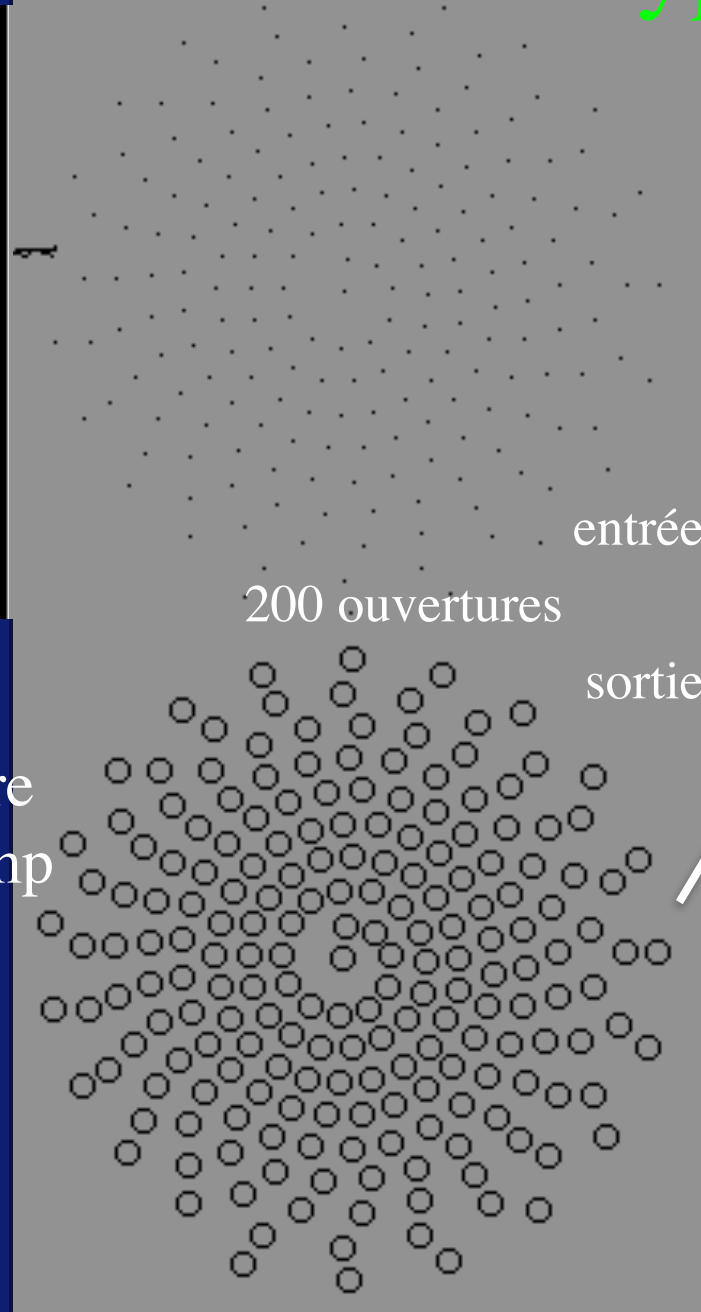


Image d'une source ponctuelle

# Image à pupille densifiée: hypertélescope



amas de 18 étoiles



entrée

200 ouvertures

sortie

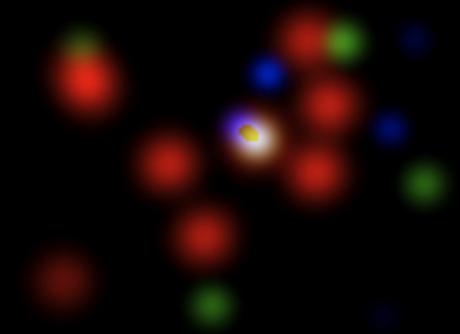


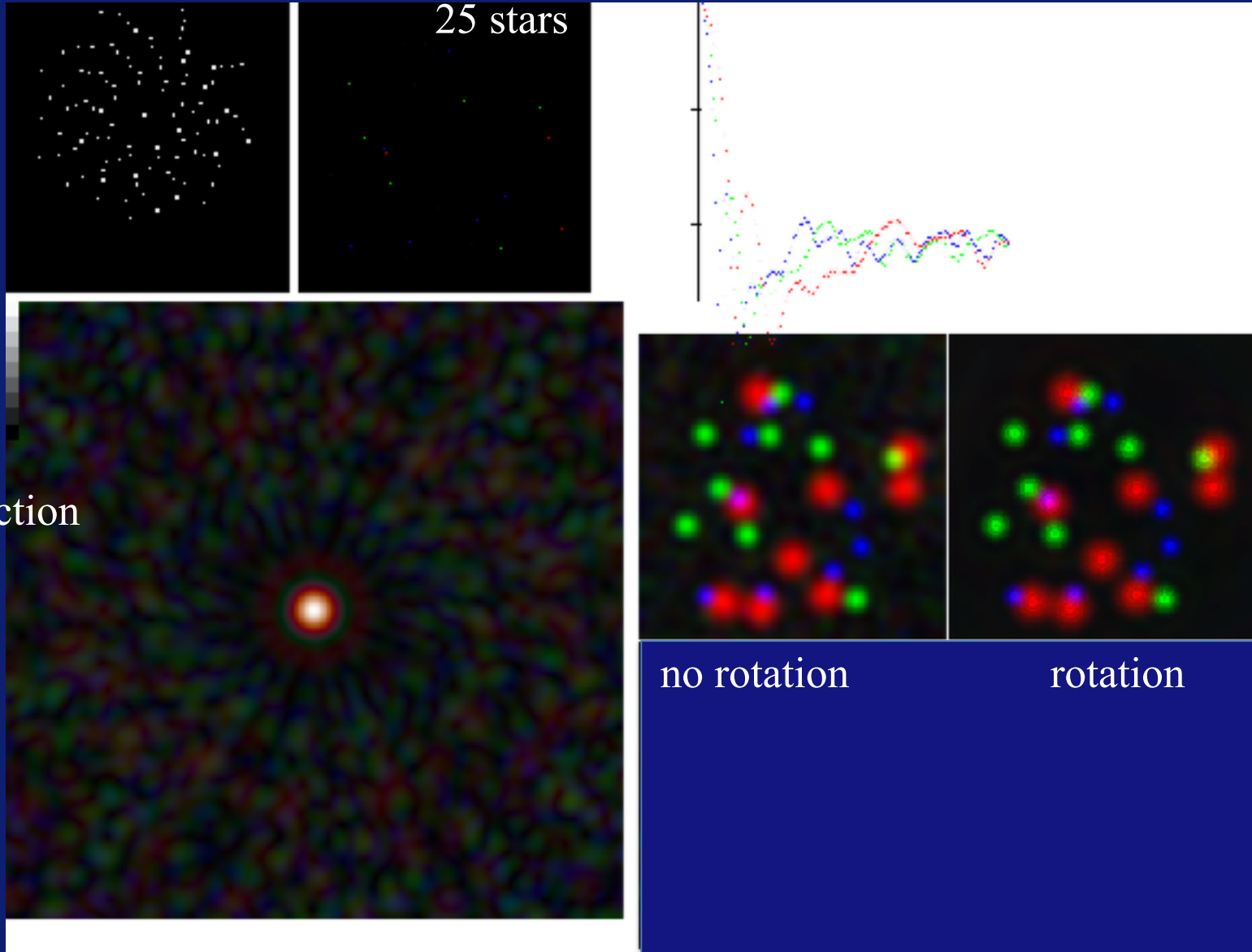
image directe

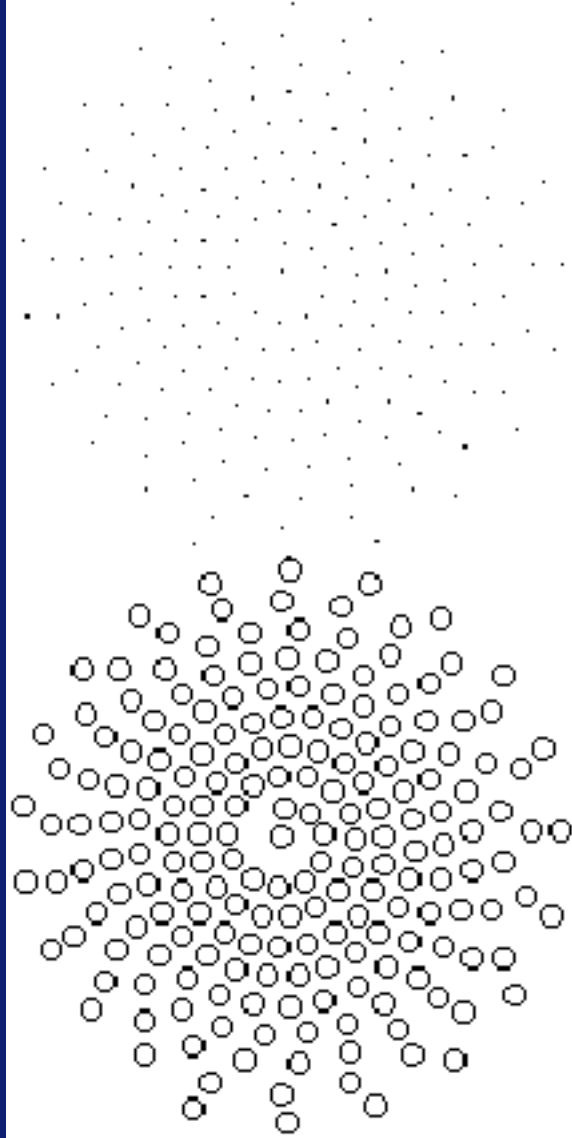
- Concentre la lumière  
...et rétrécit le champ



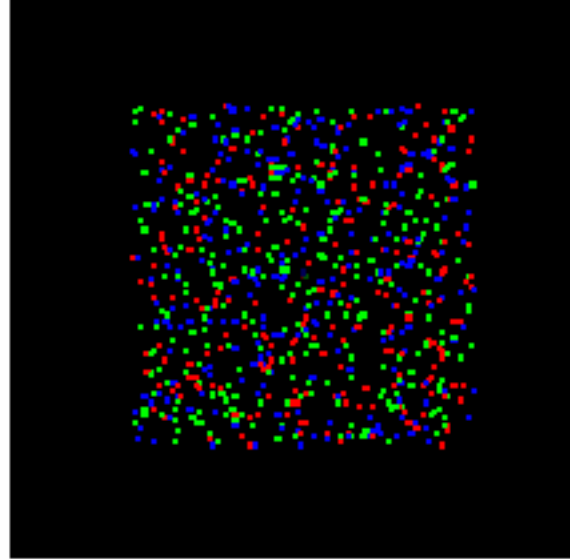
# Long exposure with aperture rotation

- improves if few apertures

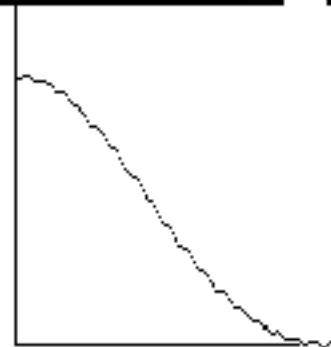
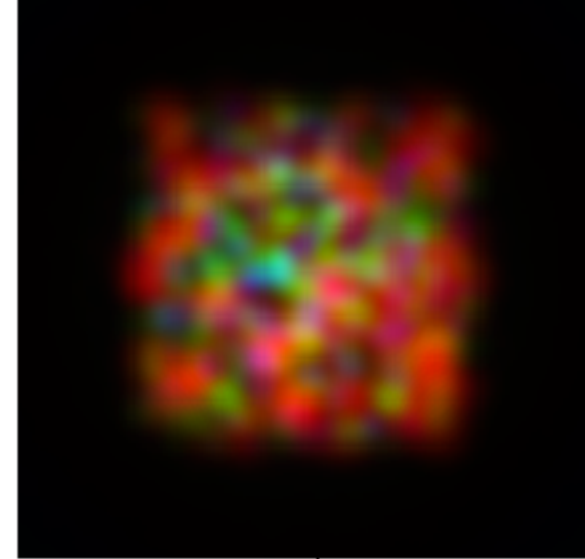




200 ouvertures  
densification 40x



800 étoiles

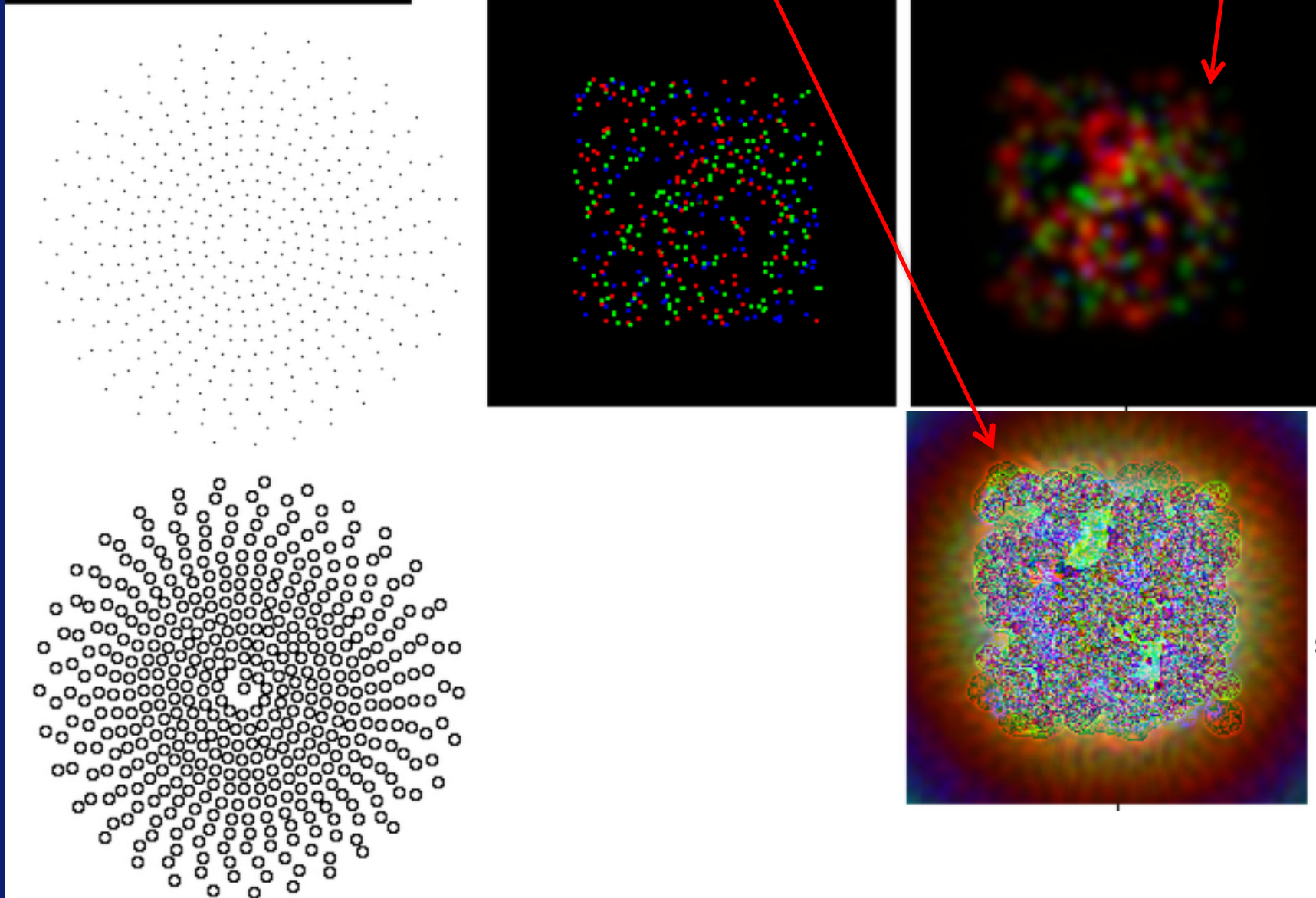


448 ouvertures, 448 étoiles densification 40x

images:

surexposée 100x, montrant le bord du halo diffractif

normale

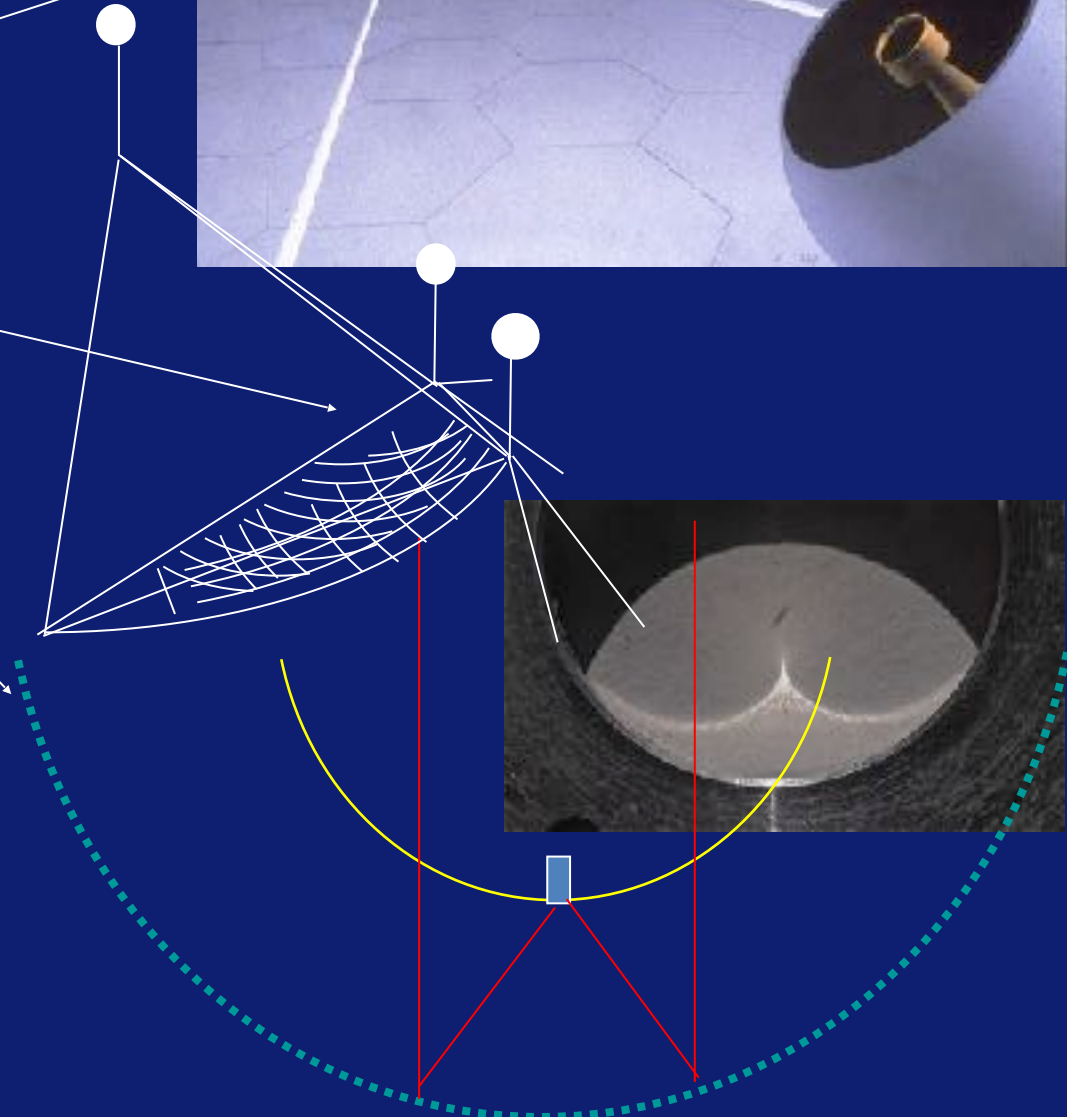




# Architectures d'hypertélescopes

- plat
- parabolique orientable
- sphérique ou parabolique actif statique "Carlina"
- 

proposé:  
Optical Very Large Array



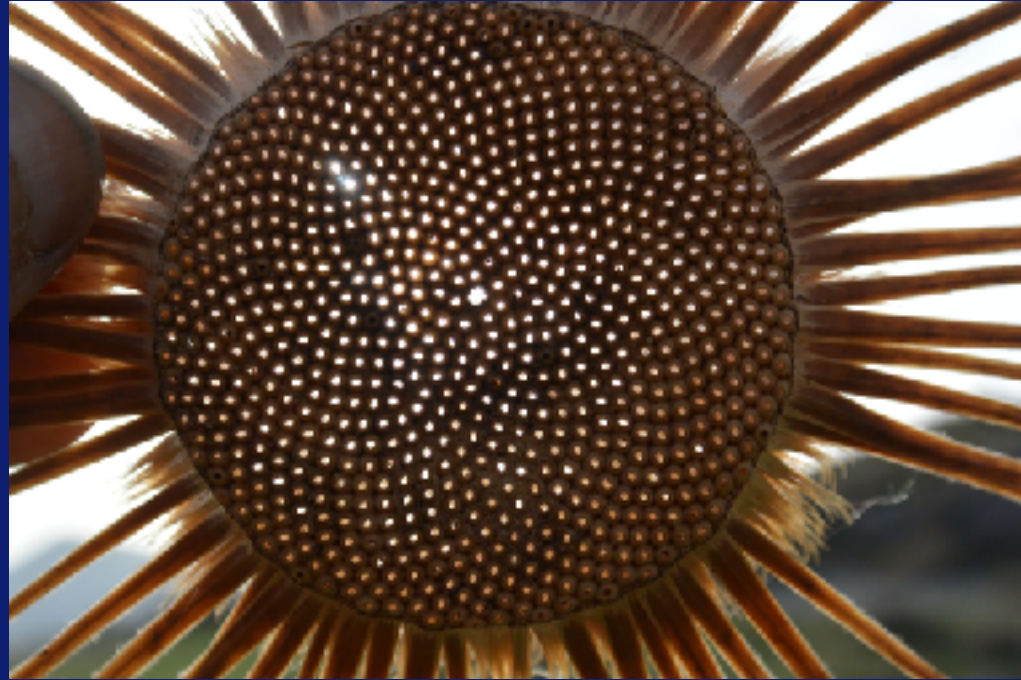
Carlina  
acanthifolia



*Carlina acanthifolia*: la fleur qui prête son nom à l'hypertelescope sphérique

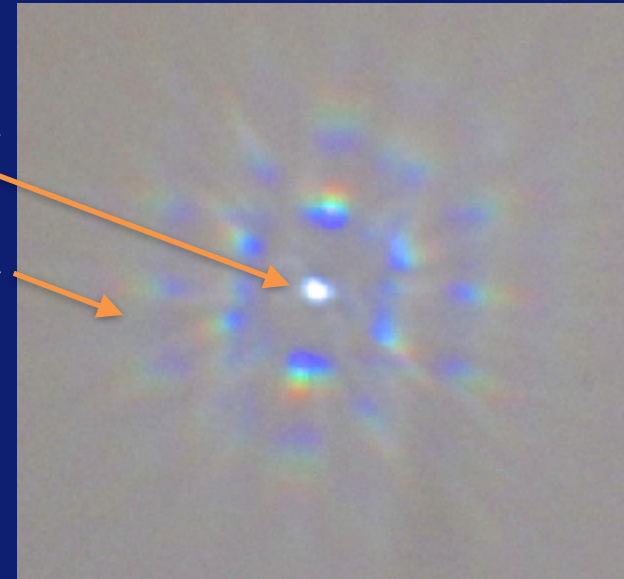


# Squelette hivernal de fleur Carline et sa figure de diffraction Fizeau



pic d'interférence

halo diffractif, débordant largement de l'image



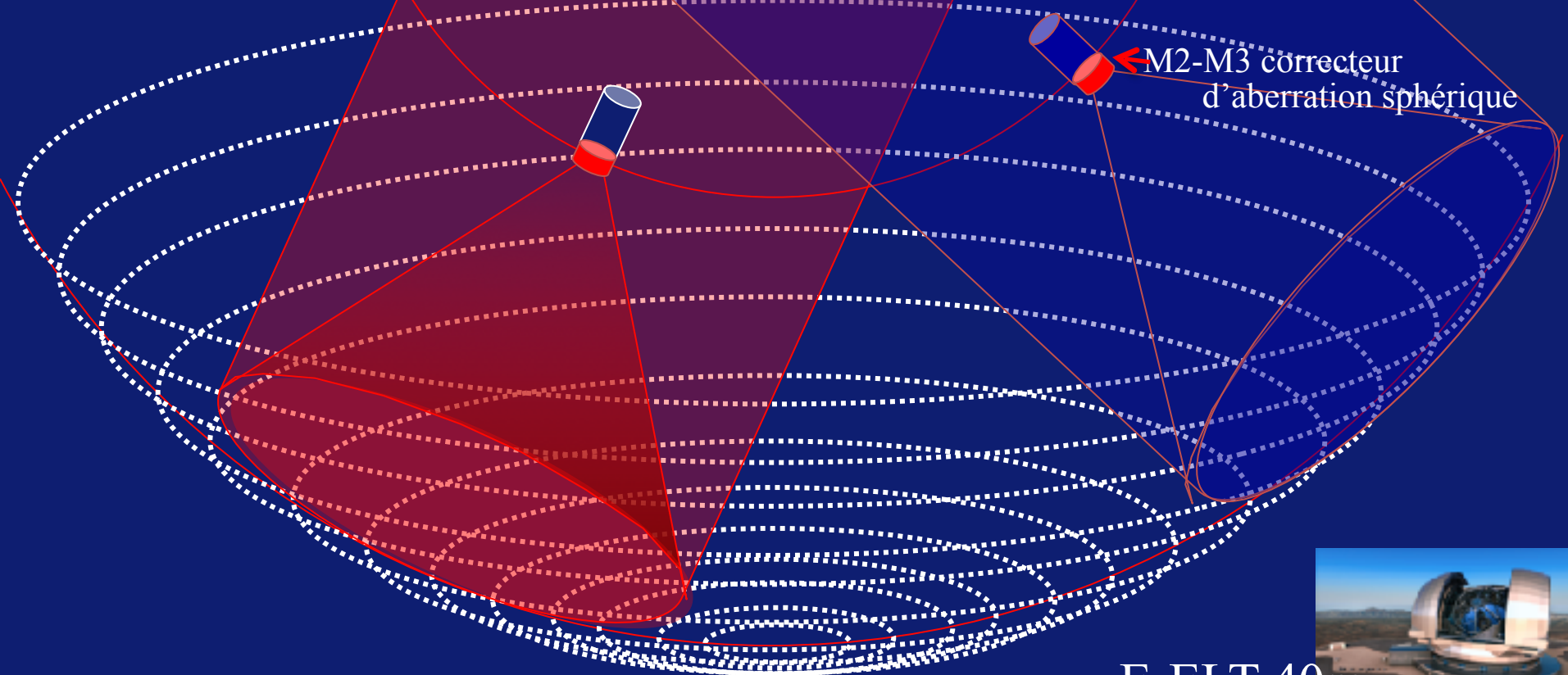


# Hypertélescope sphérique: un télescope géant dilué

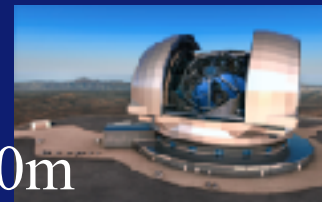
- nombreux miroirs fixes
- sans lignes à retard, mais correcteur d'aberration sphérique M2-M3
- une ou plusieurs nacelles focales mobiles...
- ... portées par câbles.... ou drones ?



M3 asphérique

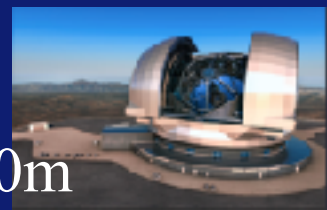
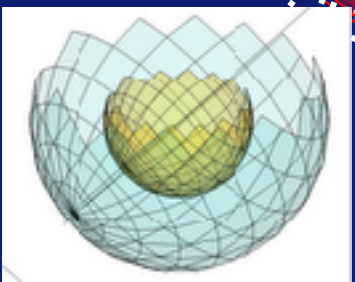
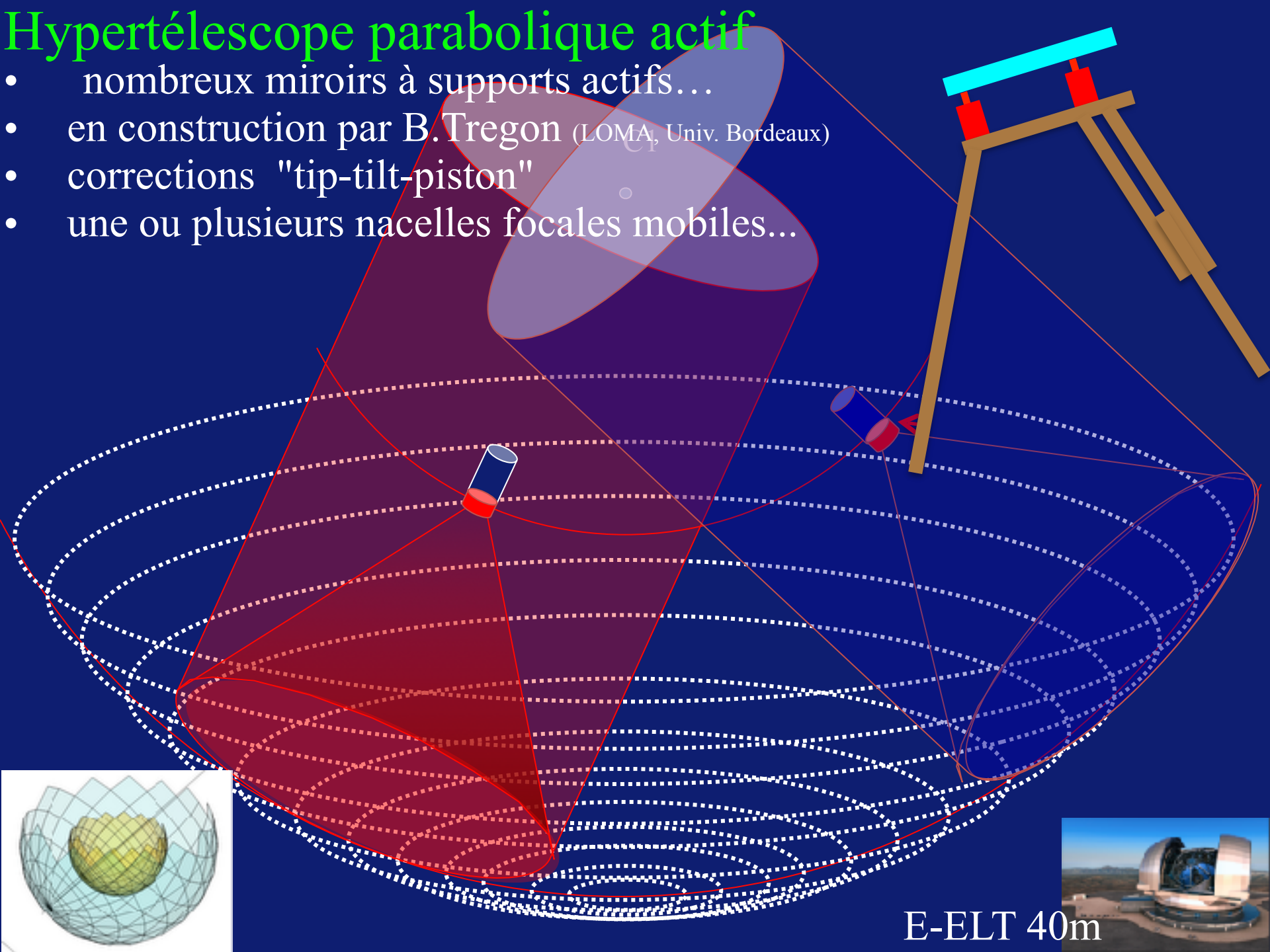


E-ELT 40m



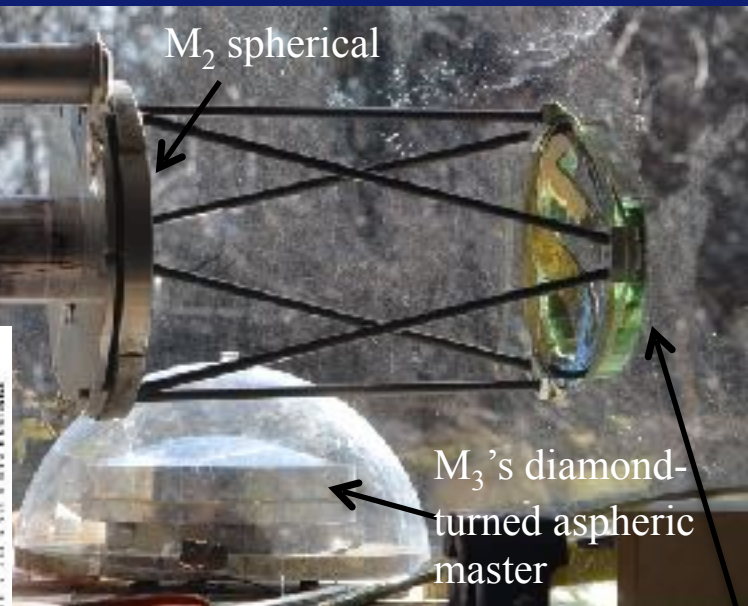
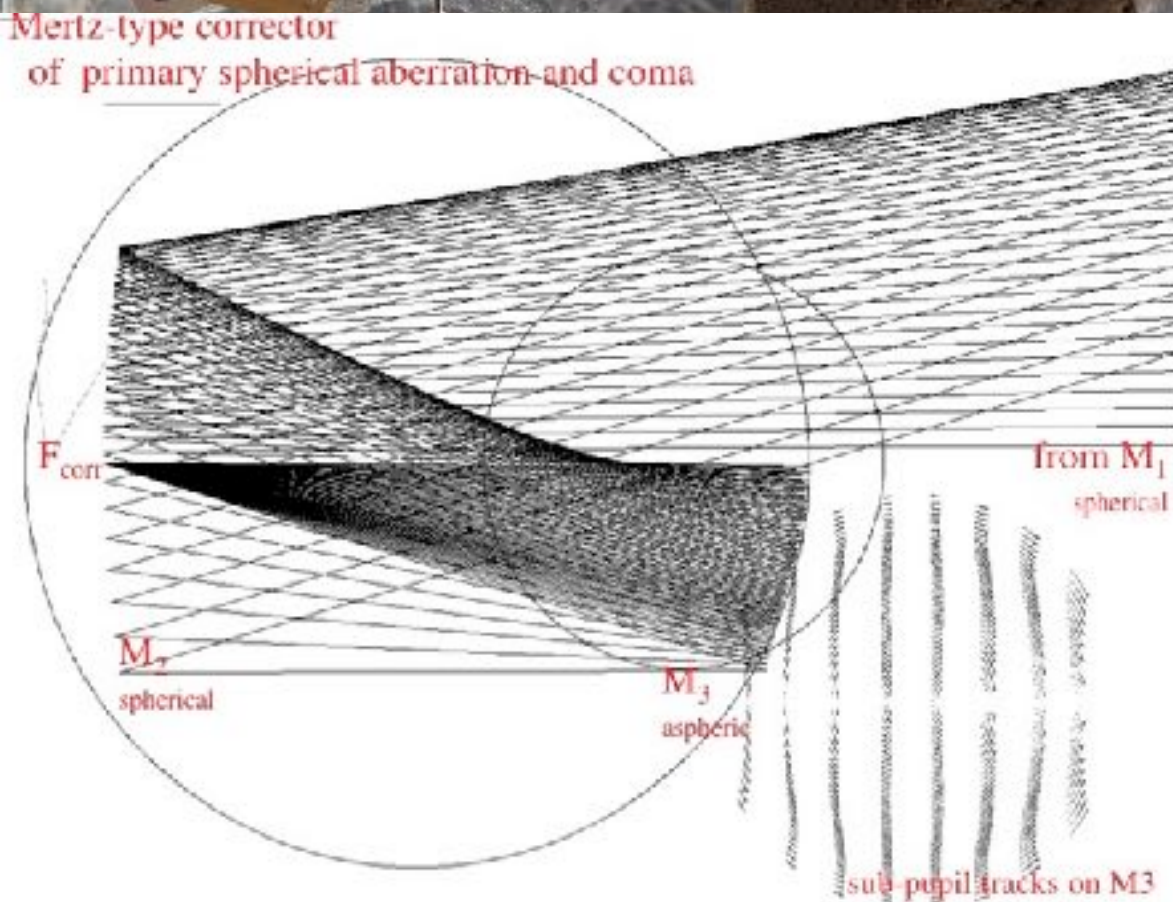
# Hypertélescope parabolique actif

- nombreux miroirs à supports actifs...
- en construction par B. Tregou (LOMA, Univ. Bordeaux)
- corrections "tip-tilt-piston"
- une ou plusieurs nacelles focales mobiles...



E-ELT 40m

# Correcteur d'aberration sphérique





# Miroir asphérique ajouré,

- corrige l'aberration sphérique du méta-miroir primaire de 57m à  $f/1.75$  ( $f_1 = 101\text{m}$ )
- taillé par tournage diamant et répliqucation



# Construction en Chine du radiotélescope FAST

- diamètre 500m
- déformation parabolique active



# Pupille homothétique : s'accommoder de sa dérive pour la densifier

- densifieur suiveur de pupille ...
- sur un dôme équatorial ...
- confocal avec M1





# We build it : « Ubye hypertelescope »

- following a smaller prototype at Haute-Provence ( Le Coroller et al. 2014)...
- under test:
  - science version in a high valley of the Ubye range (southern Alps)
  - meta-aperture diameter up to 200m, initially 57m



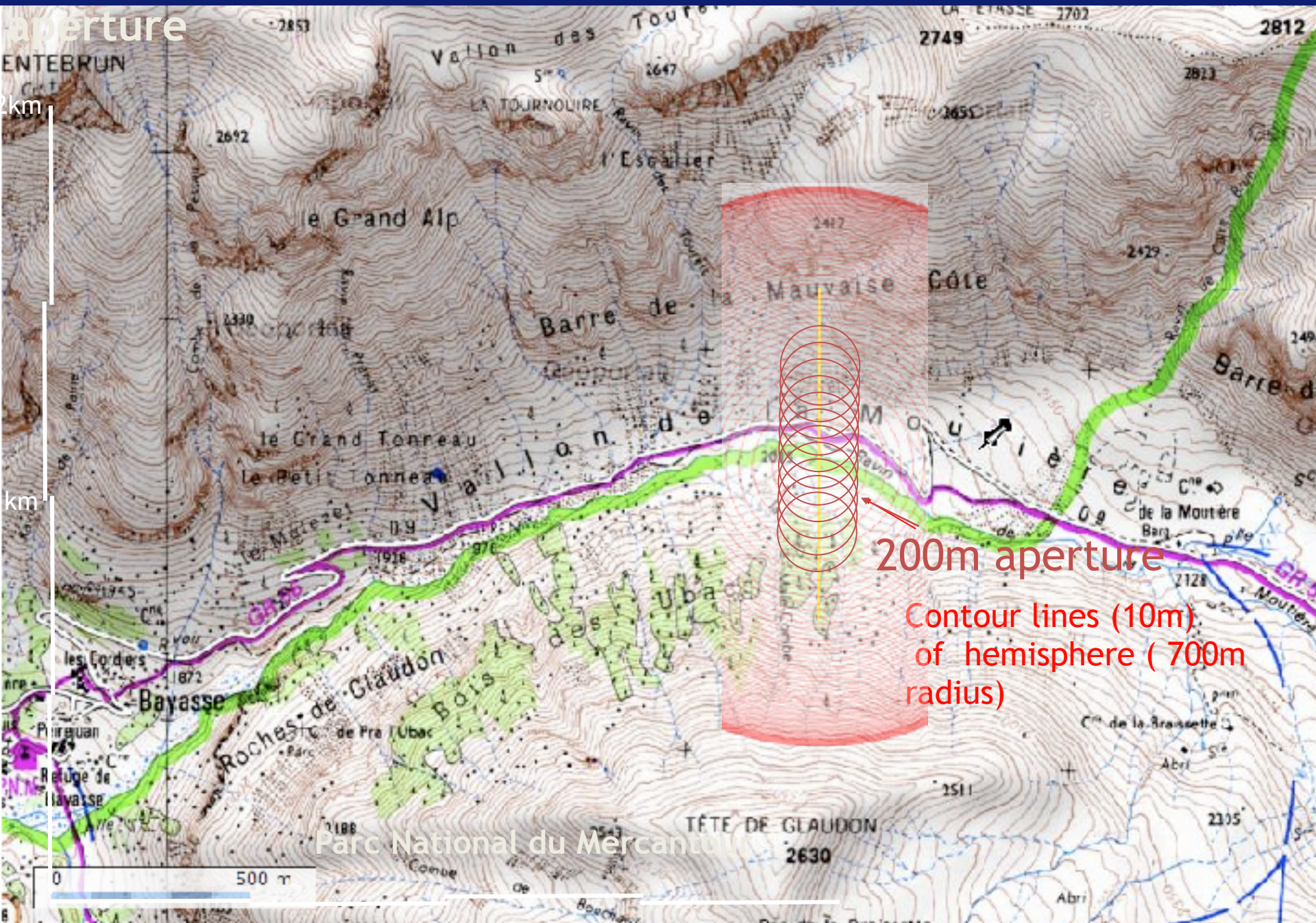


# Ubaye hypertélescope : nesting a sphere for a 200m

aperture

2 km

2 km



200m aperture

Contour lines (10m)  
of hemisphere (700m  
radius)

Parc National du Mercantour

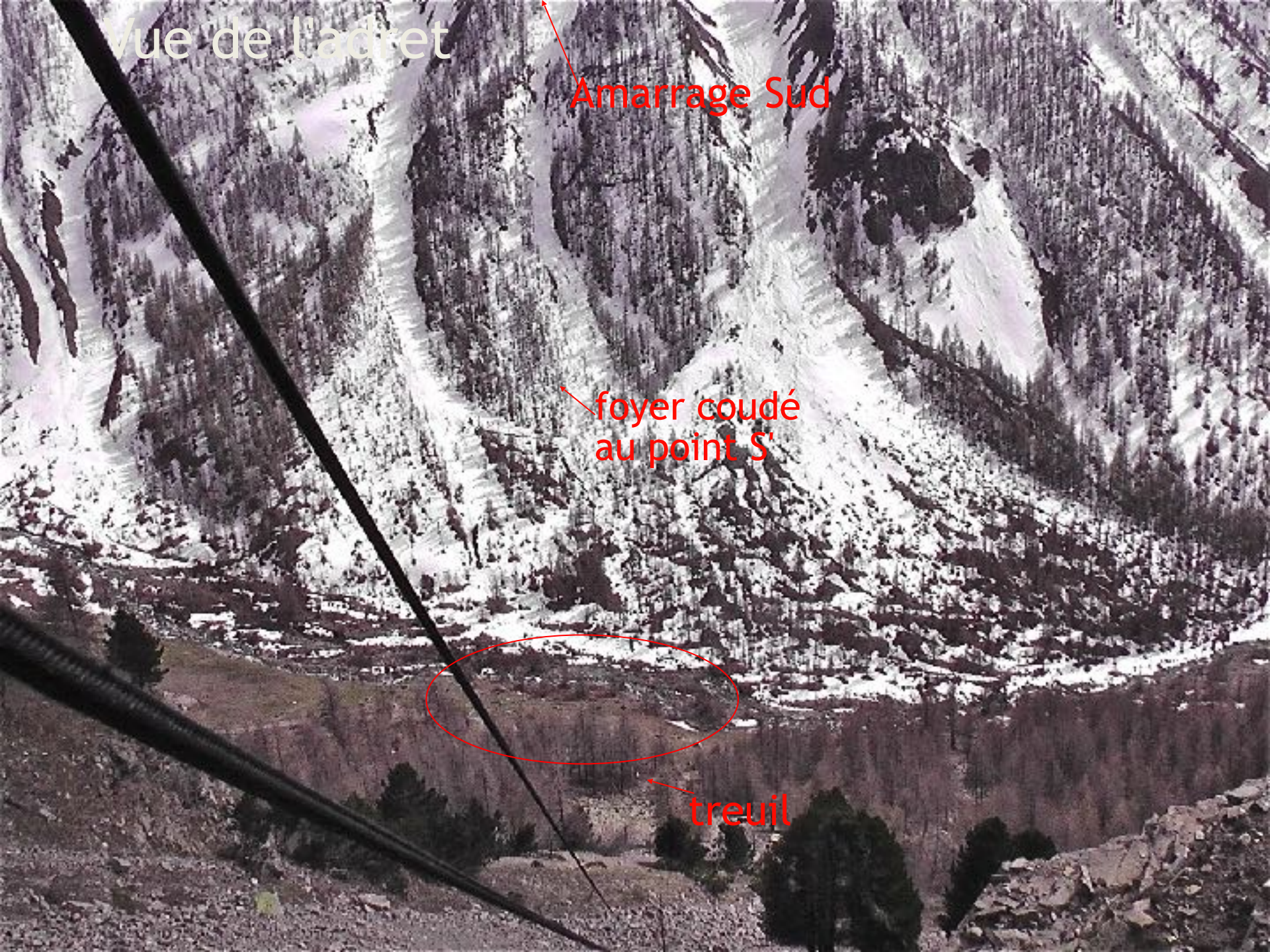


Vue de l'adret

Amarrage Sud

foyer coudé  
au point S'

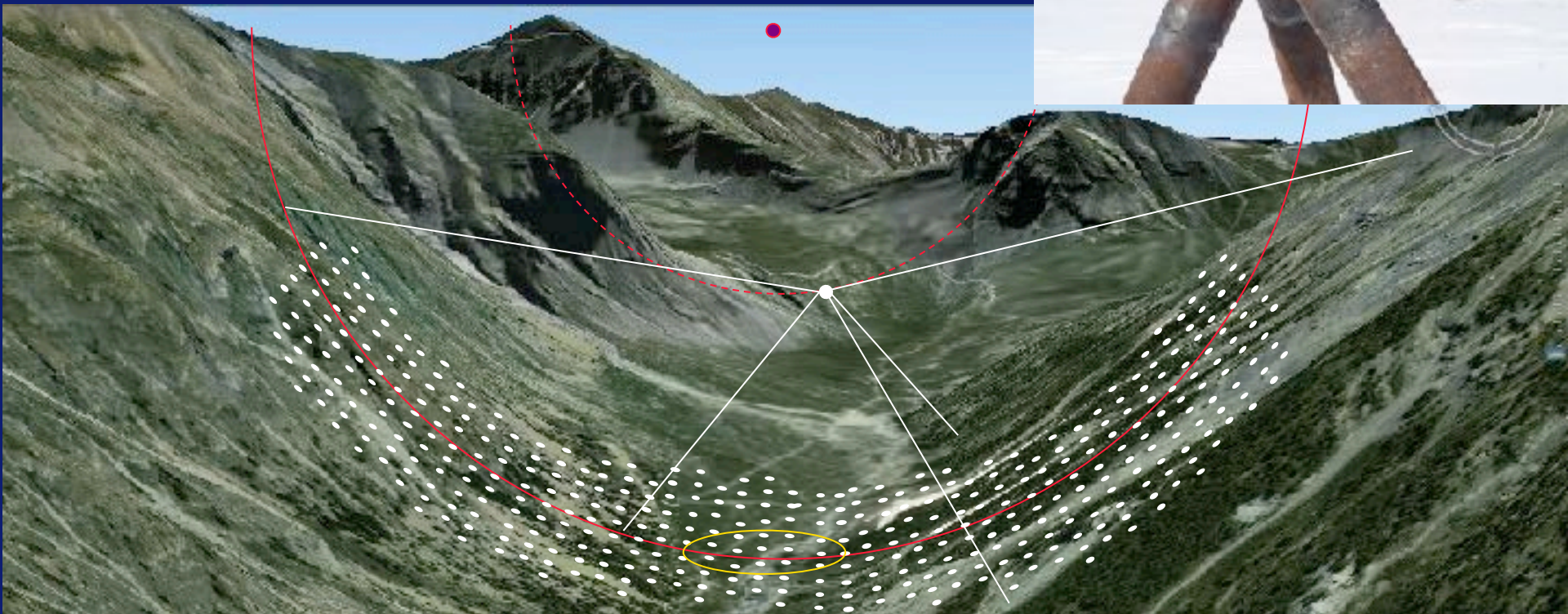
treuil





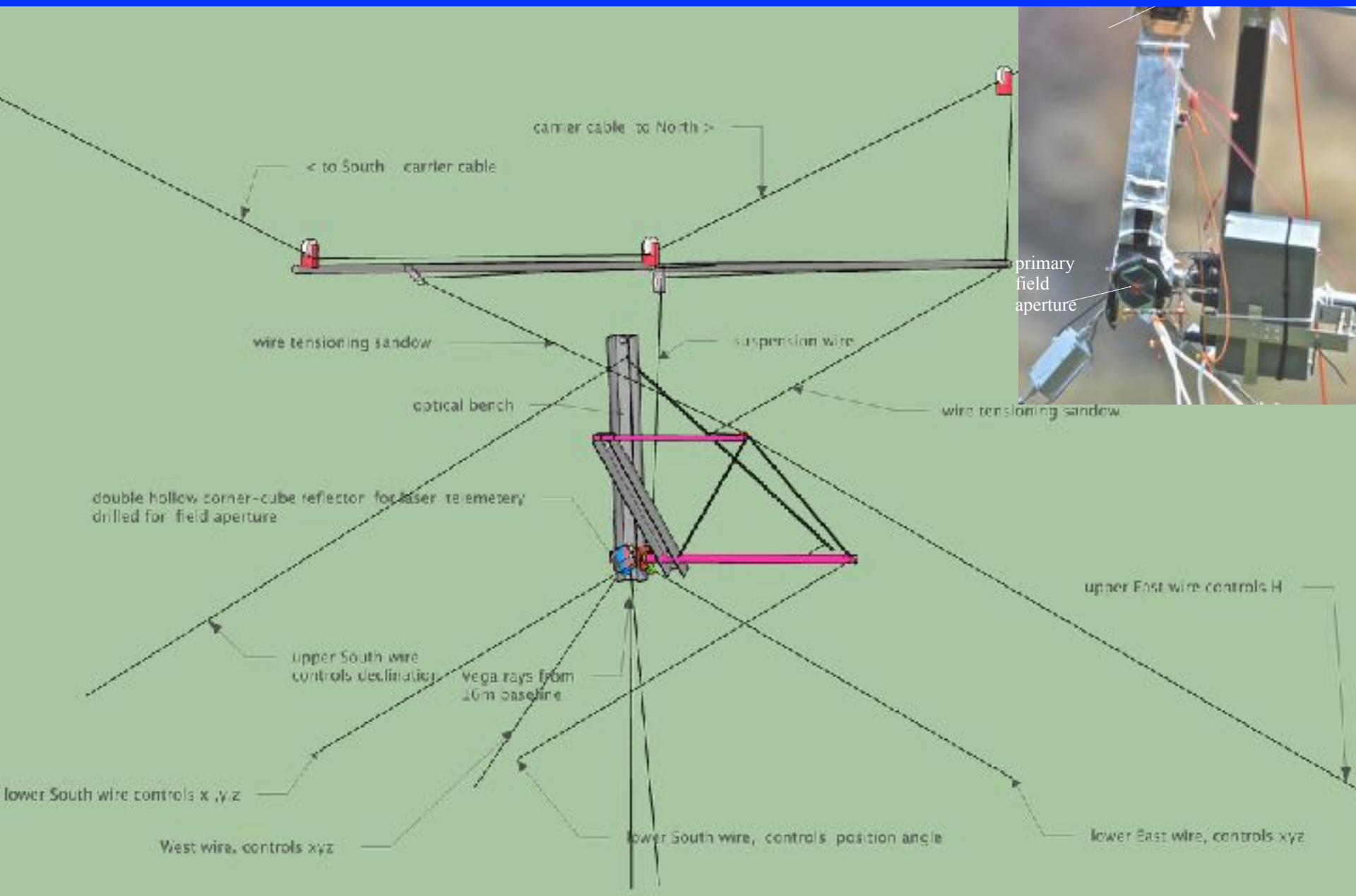
# Prototype d'architecture Carlina: « Hypertélescope Ubaye »

Vallon de la Moutière, Ubaye



- câble de 800m, Kevlar 6mm
- ... pendulant pour la poursuite horaire...
- ... nacelle focale guidée par 6 haubans actifs

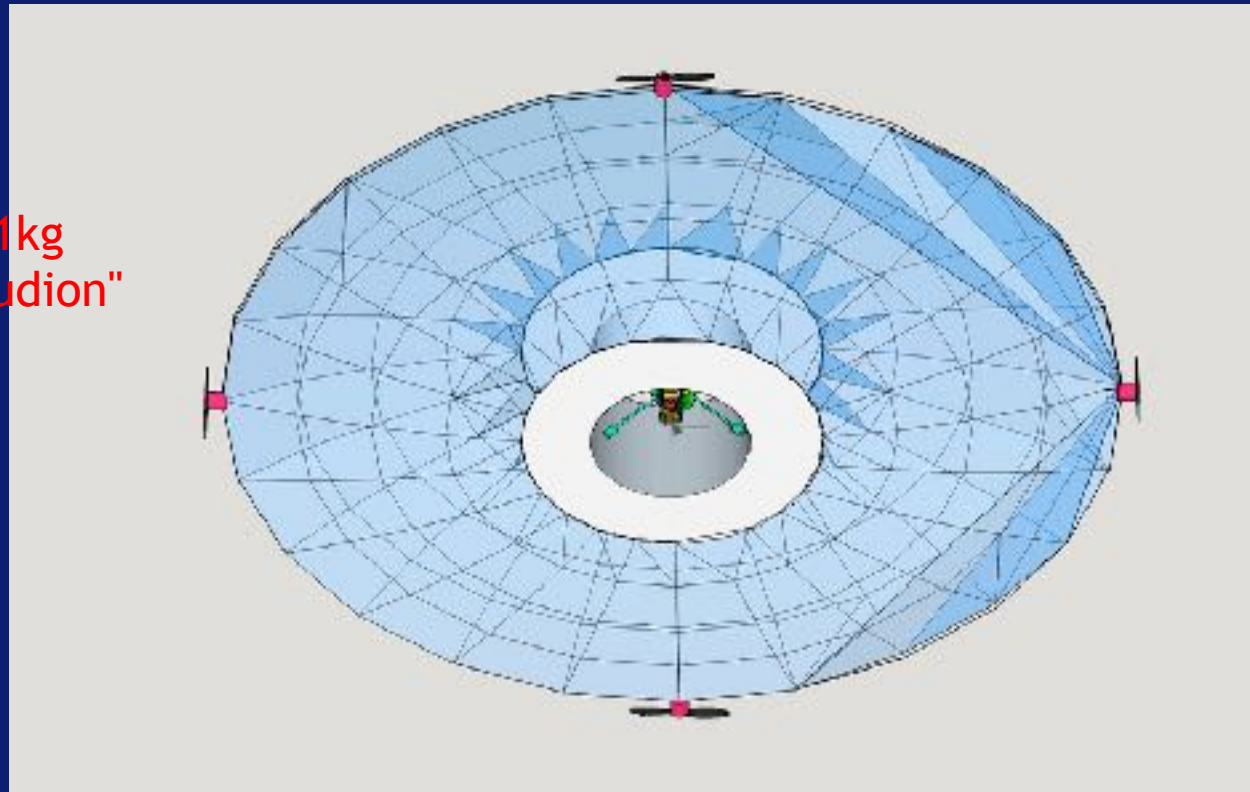
# Pilotage de la nacelle





# Drone ou ballon focal ?

- volume  $1\text{m}^3$  pour charge  $1\text{kg}$
- compenser l'instabilité «ludion»



- un drone engendre de la turbulence...
- ... et nécessite une plate-forme xyz pour un positionnement précis
- **un ballon plat** est pilotable par vent faible en contrôlant le volume et l'attitude
  - actuateurs pour volume and centre de gravité
  - aussi hélices pour centrage fin xy



# Focal gondola and drive

- driven for tracking star image...
- ...by 6 wires and computerized winches





# Aligning one mirror





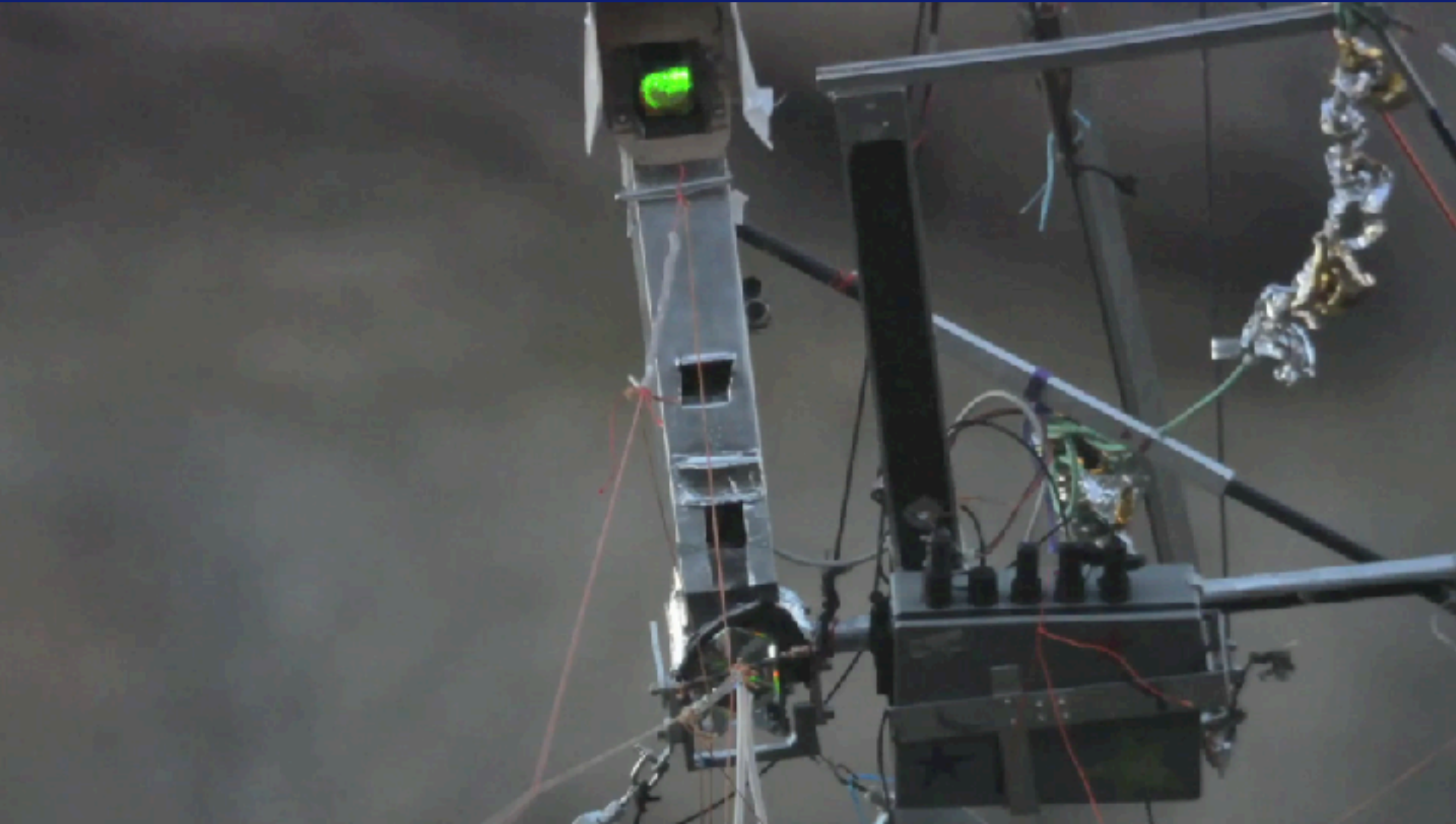
# Foyer coudé dans l'ubac



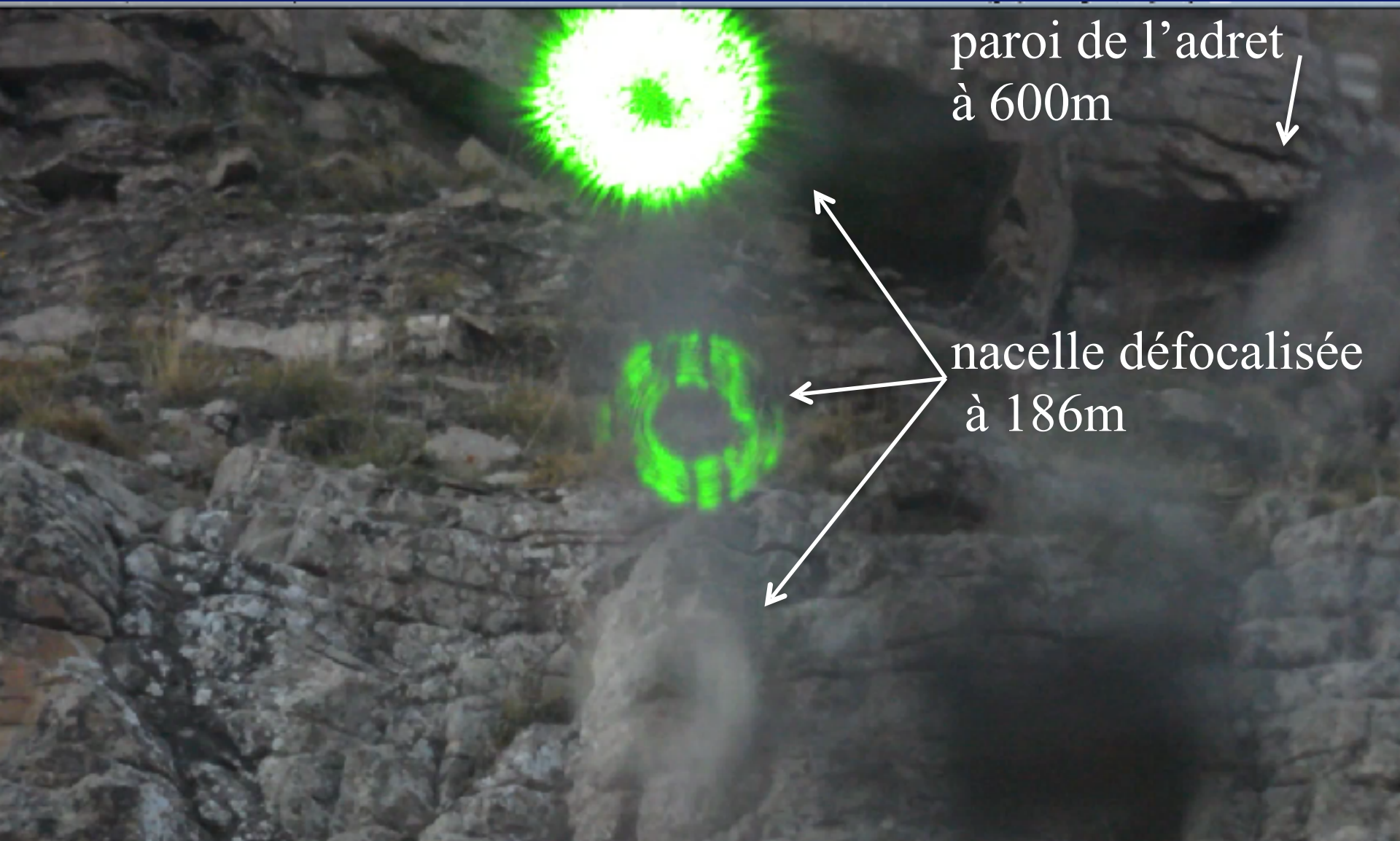


# Nacelle focale vue du foyer coudé, au télescope

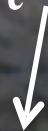
Observation par Denis Mourard, Wassila Dali-Ali & Antoine Labeyrie



# Nacelle focale vue au télescope



paroi de l'adret  
à 600m



nacelle défocalisée  
à 186m

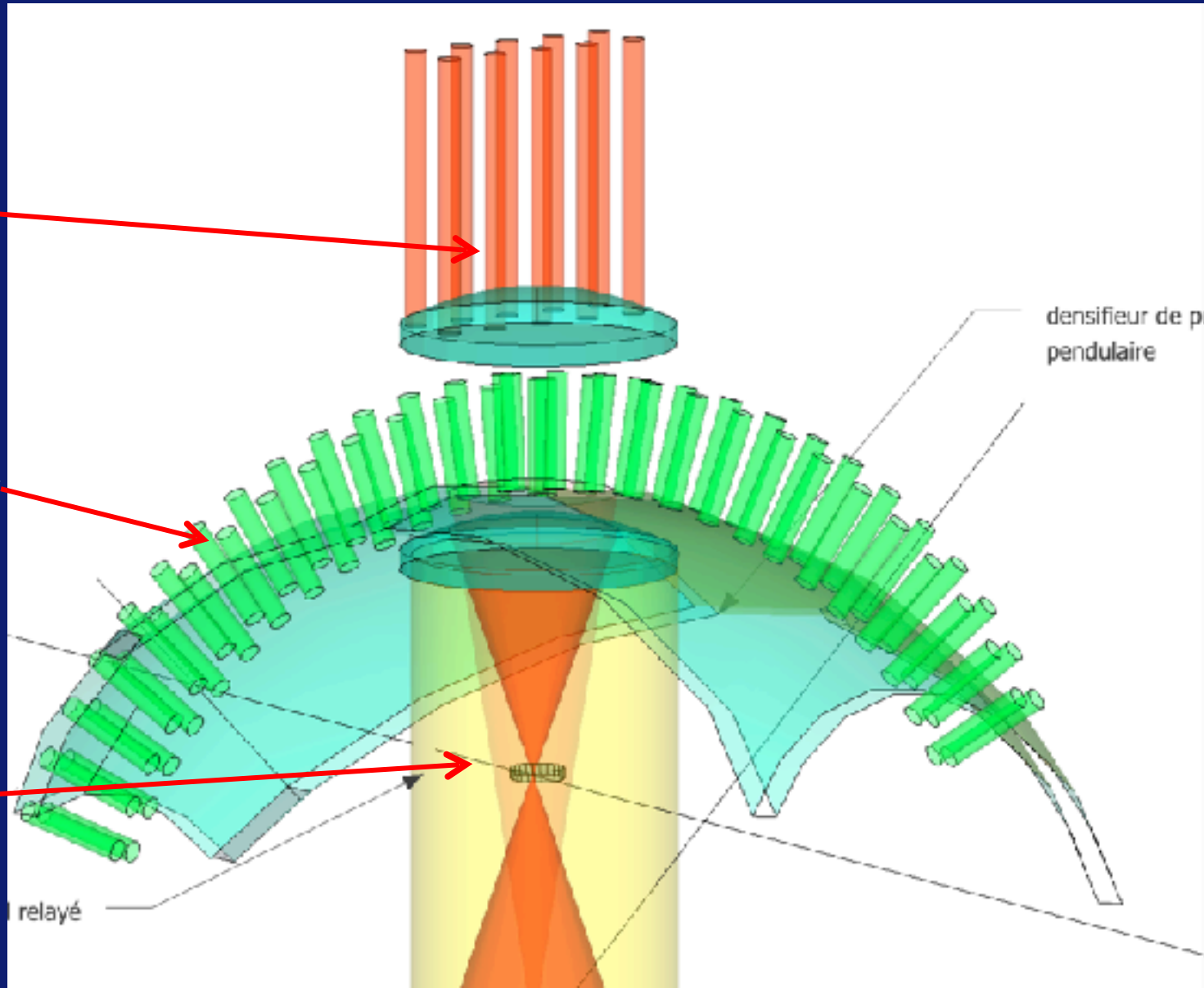


# Densifieur accommodant la dérive pupillaire

pupille  
densifiée

dôme densifieur  
pendulaire  
homothétique de M1

foyer F1 et  
lentille de  
champ

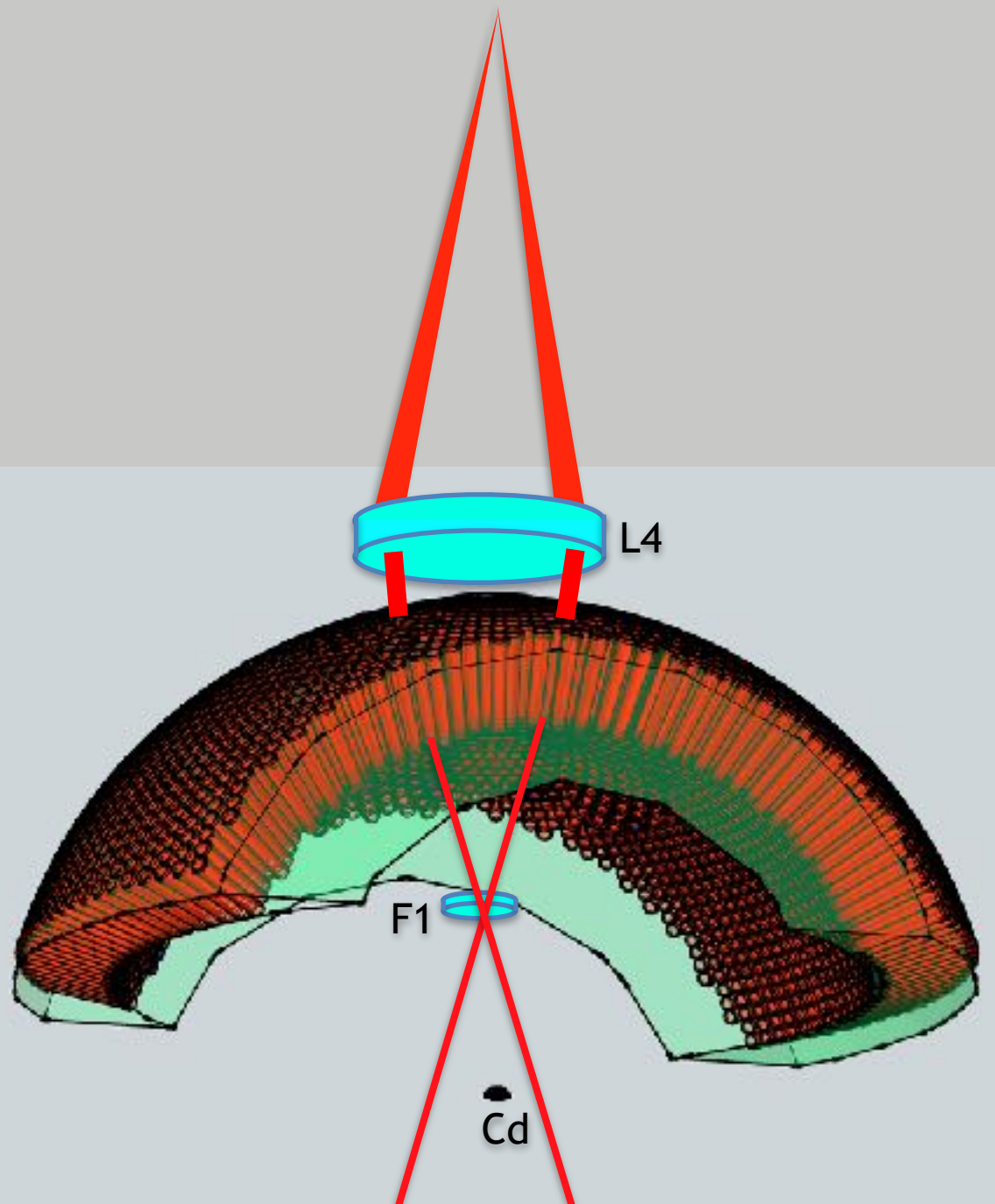


densifieur de p  
pendulaire

relayé



# Dôme densifieur de pupille



# Focal optics, equatorially driven relative to the densifier dome

- For pupil drift accommodation:
- dome is kept at a fixed attitude relative to horizon
  - main optics tracks the star's celestial motion

pupil densifier  
dome on "virtual  
pier"

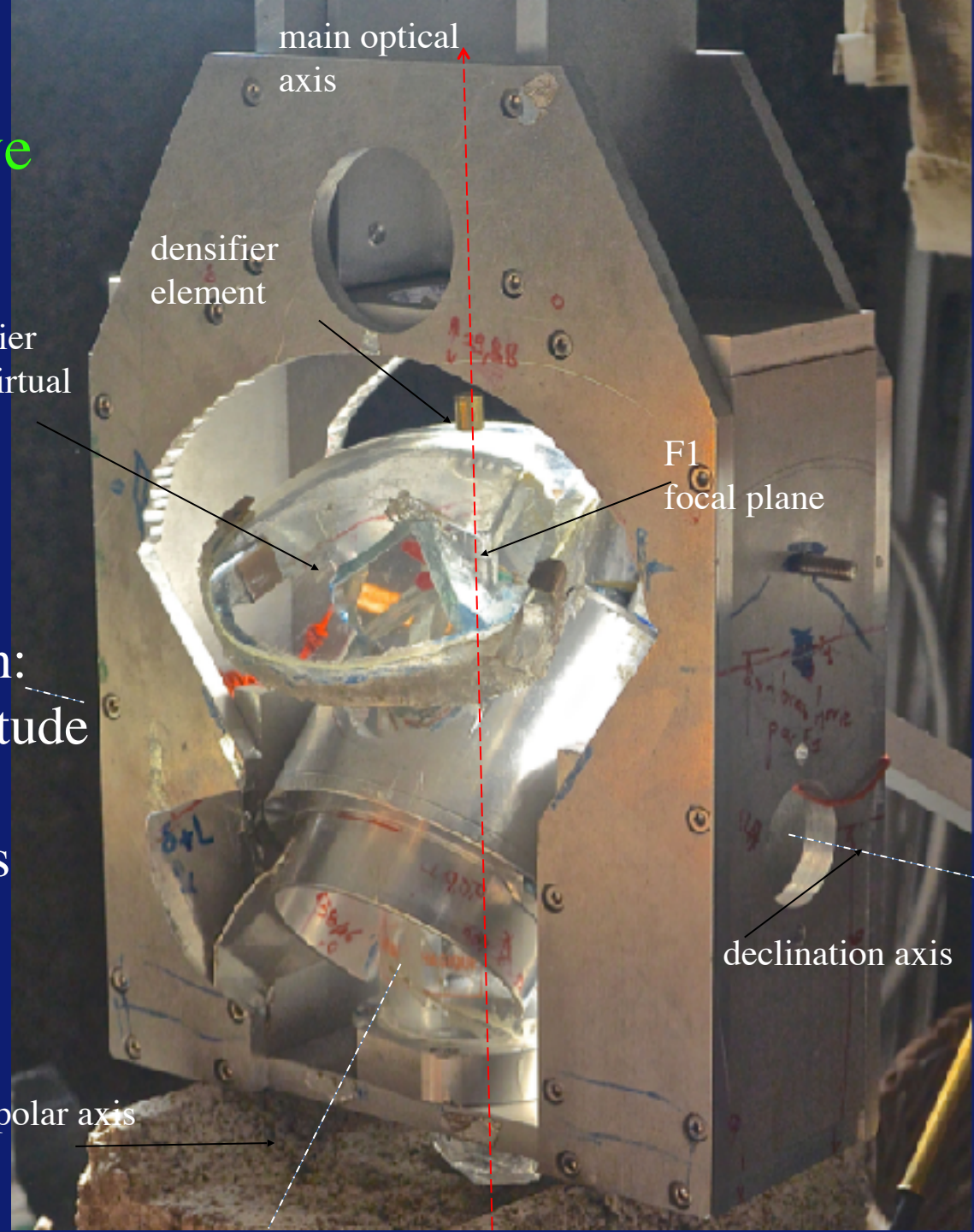
polar axis

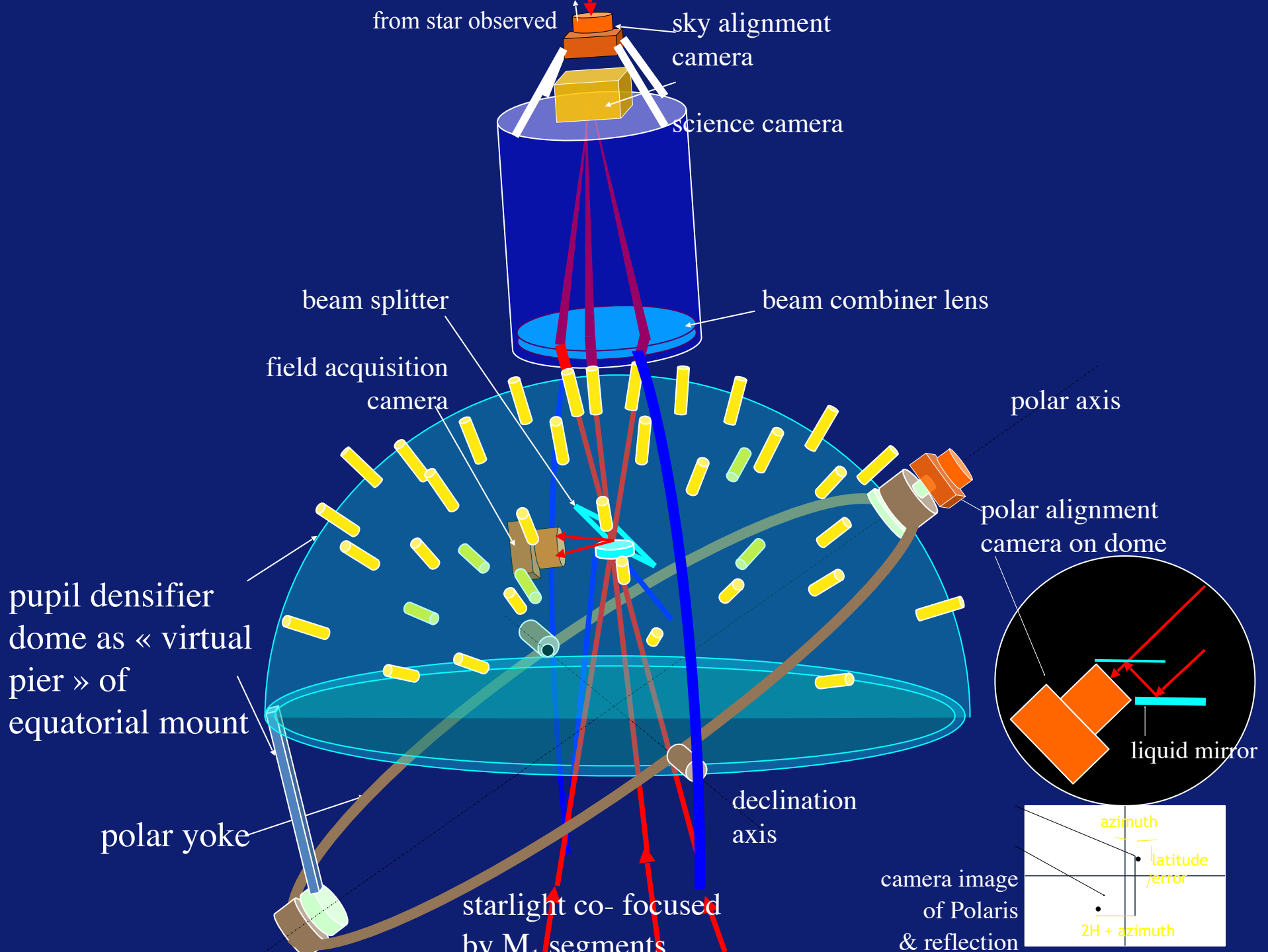
main optical  
axis

densifier  
element

F1  
focal plane

declination axis



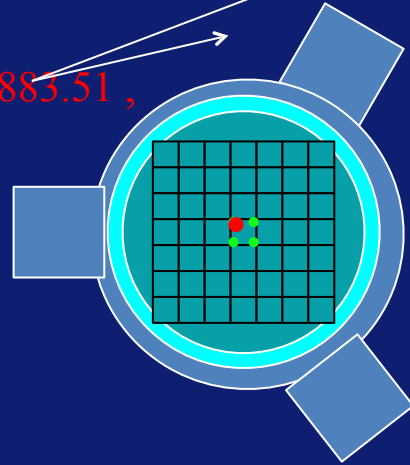




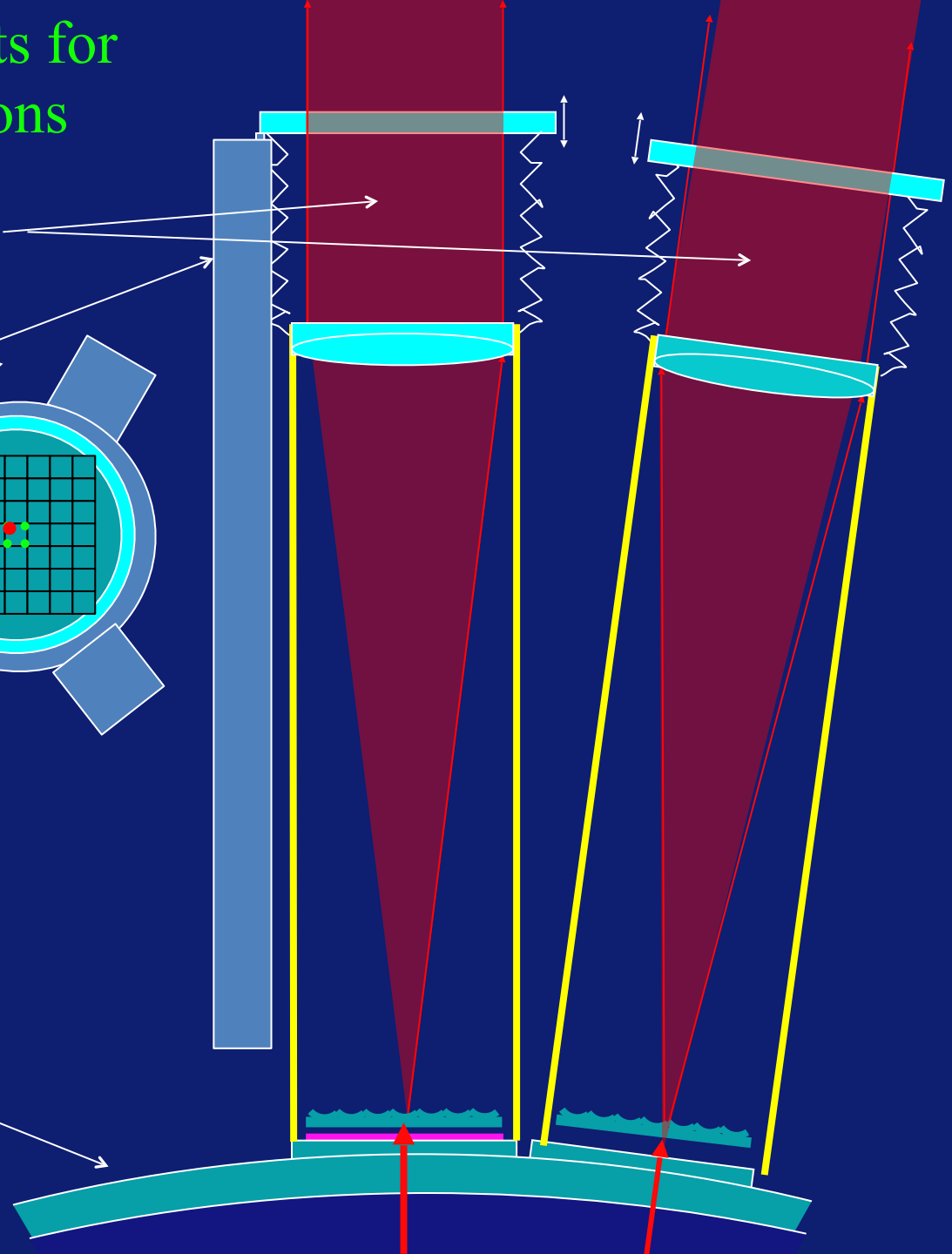
# Adaptive densifier elements for tip-tilt and piston corrections

immersion fluid

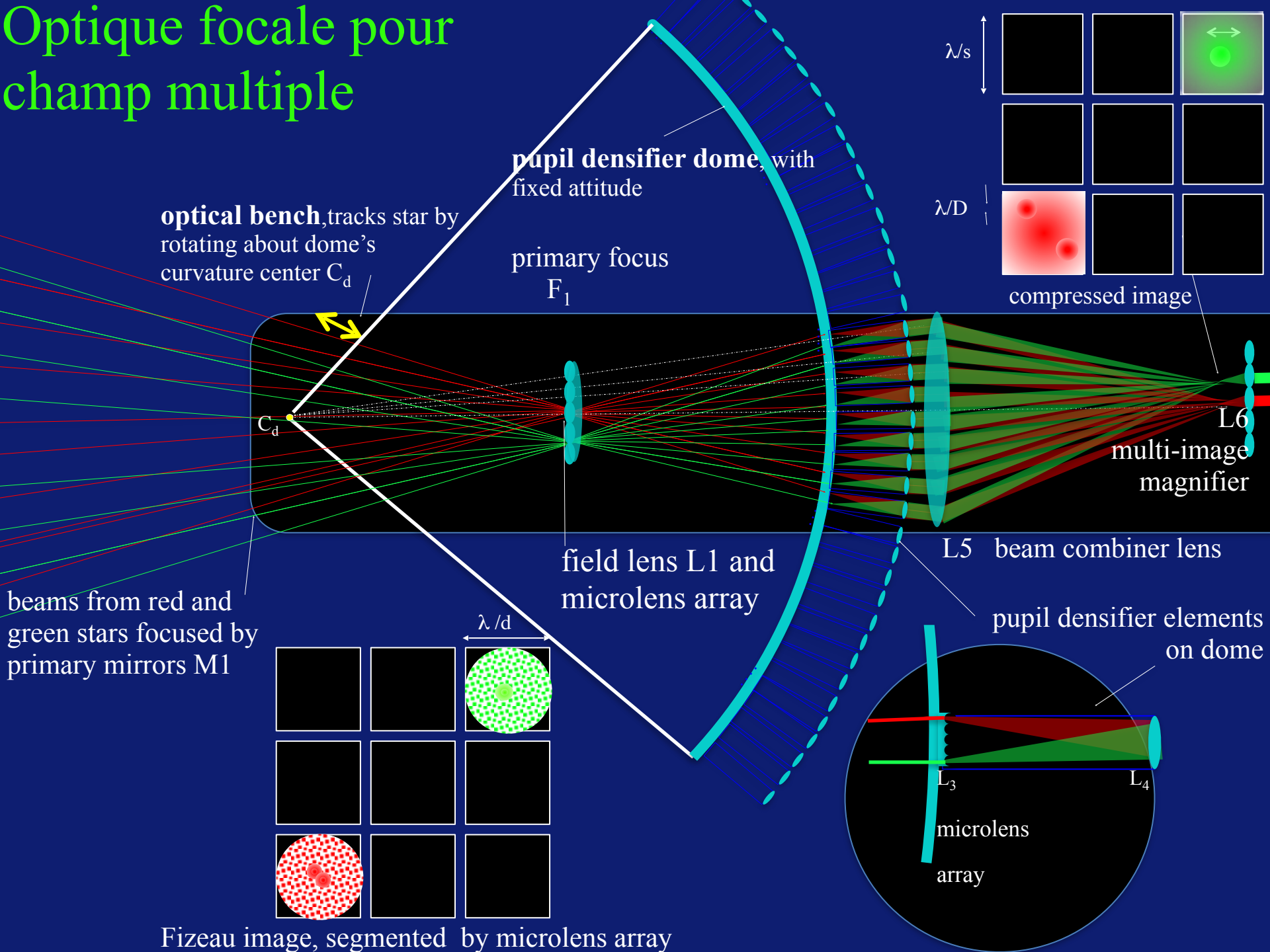
3 piezo-actuators PI 883.51,  
3x3x18mm 15 $\mu$  travel



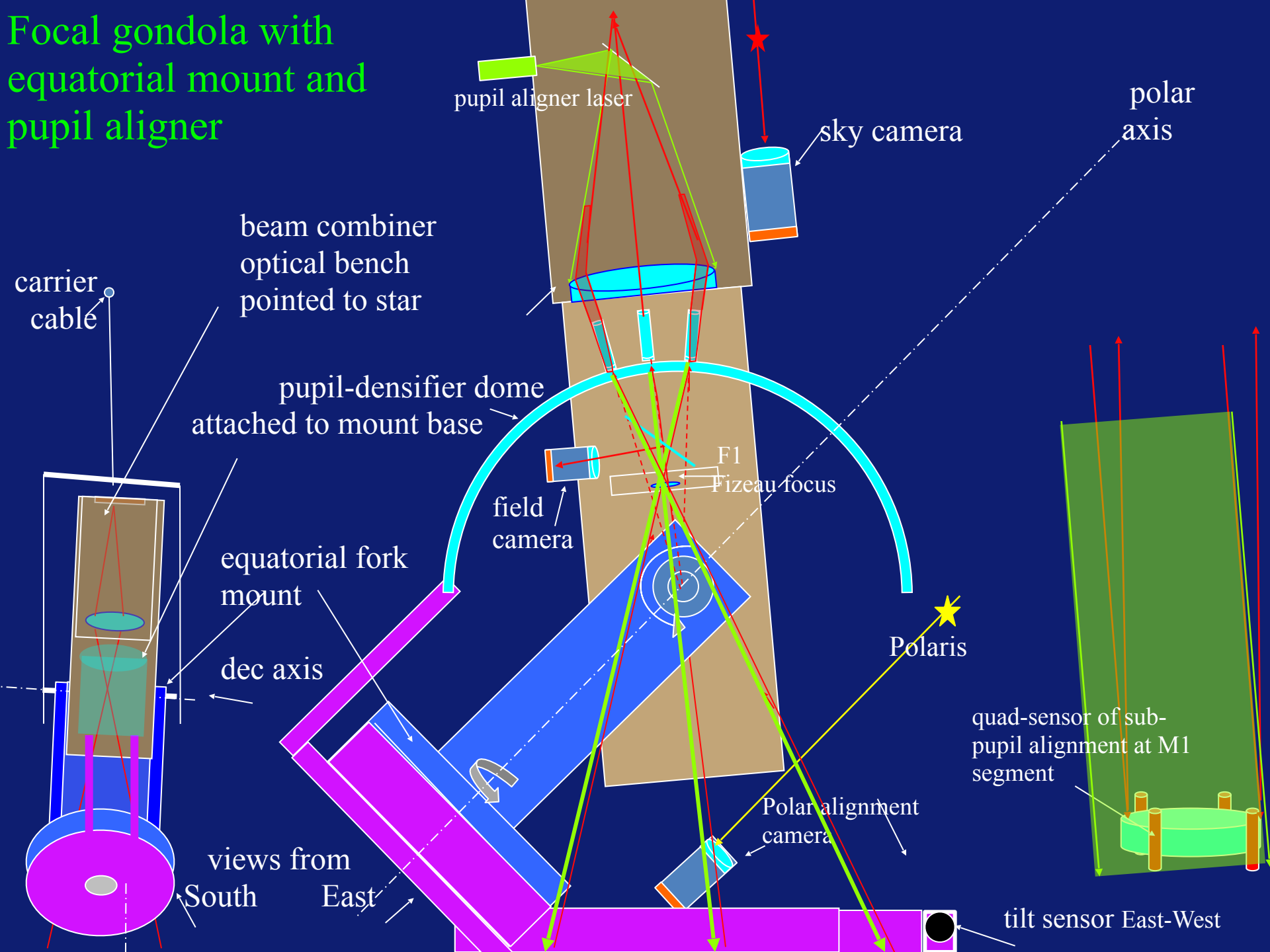
dome lens



# Optique focale pour champ multiple



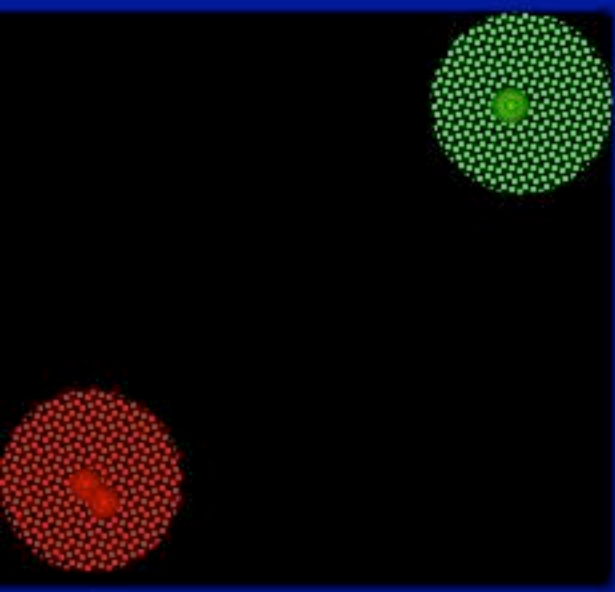
# Focal gondola with equatorial mount and pupil aligner



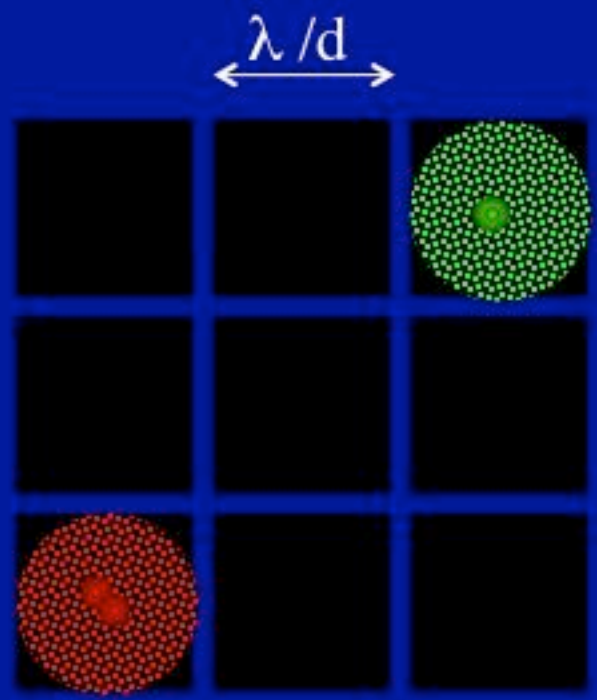


# Dividing the primary Fizeau image into a multi-field hypertelescopic image

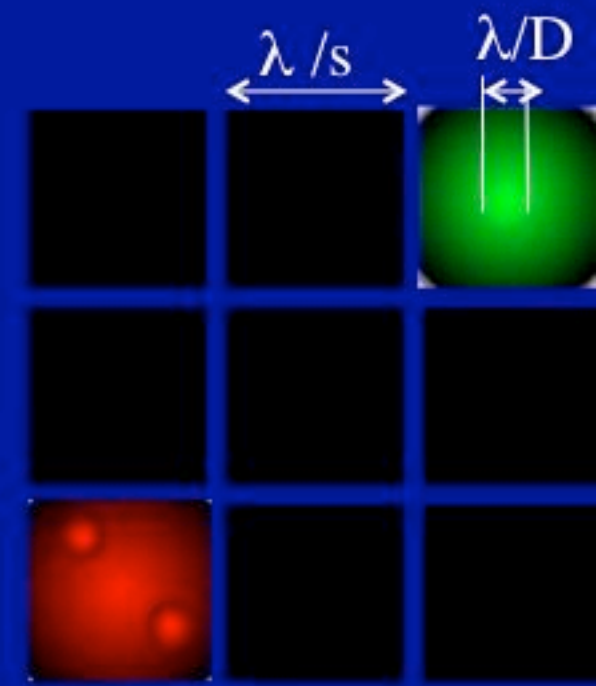
sub-aperture size  $d$   
sub-aperture spacings  $s$   
meta-aperture size  $D$



Fizeau image of simple and binary star

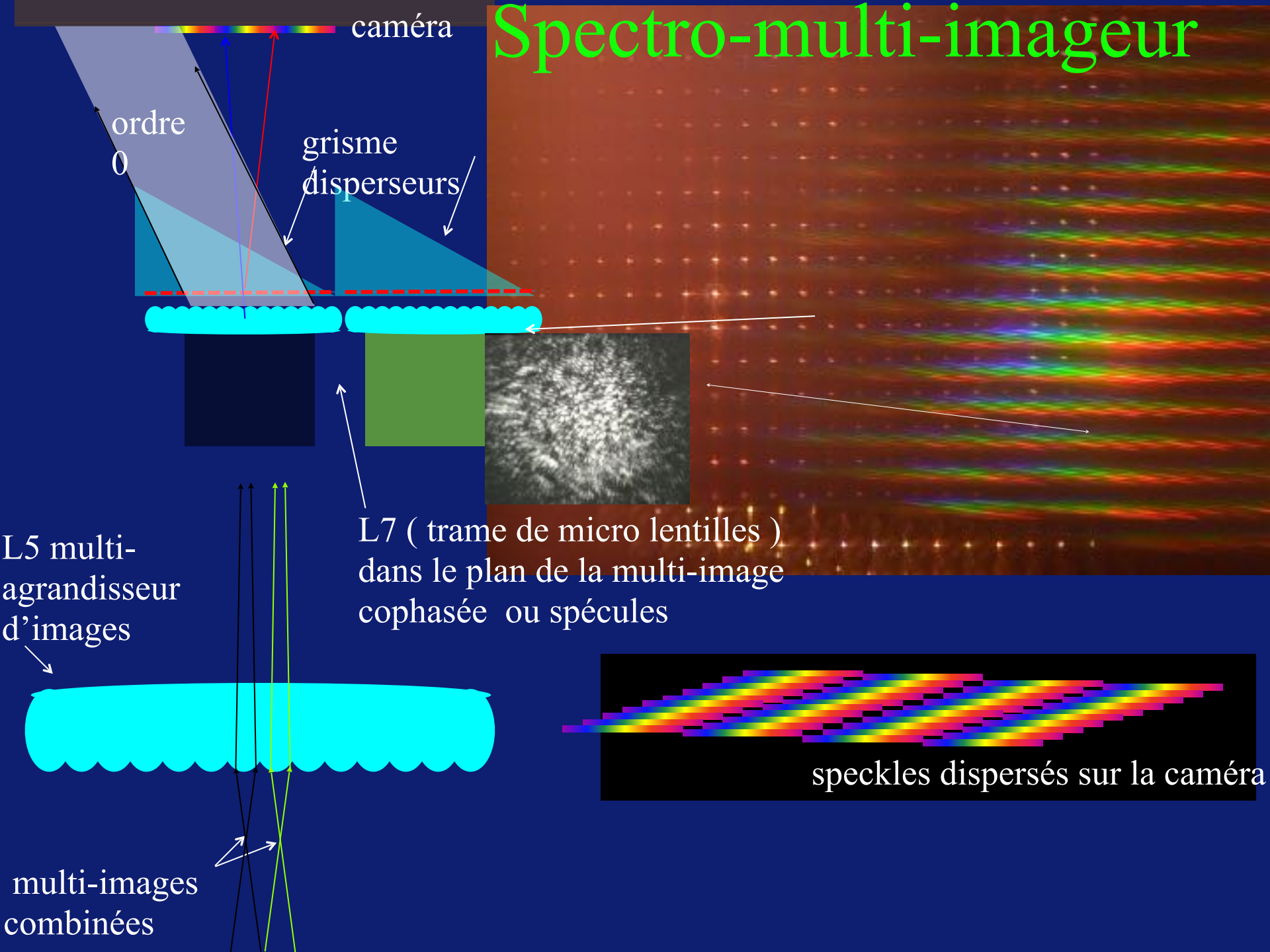


Fizeau field sliced with microlens array



hypertelescopic direct multi-field image, with missing gaps

# Spectro-multi-imageur



caméra

ordre  
0

grisme  
disperseurs

L5 multi-  
agrandisseur  
d'images

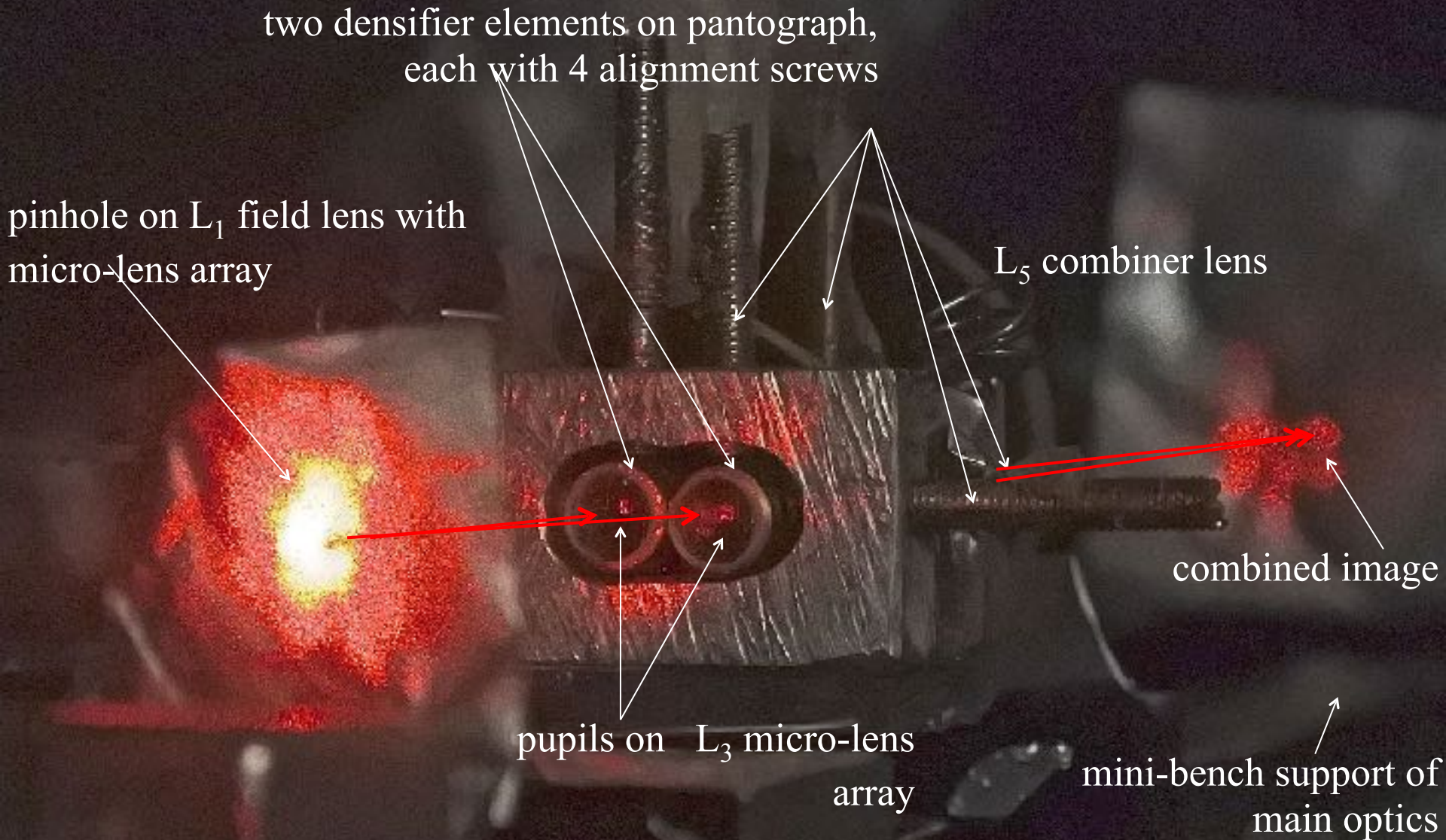
L7 (trame de micro lentilles)  
dans le plan de la multi-image  
cophasée ou spécules

multi-images  
combinées

speckles dispersés sur la caméra



# Lab testing of pupil densifier with multi-field arrangement





# Viseurs auxiliaires près du miroir central

viseur amovible de réglage d'inclinaison du miroir

laser d'alignement du train coudé

télémetre laser

miroir M1

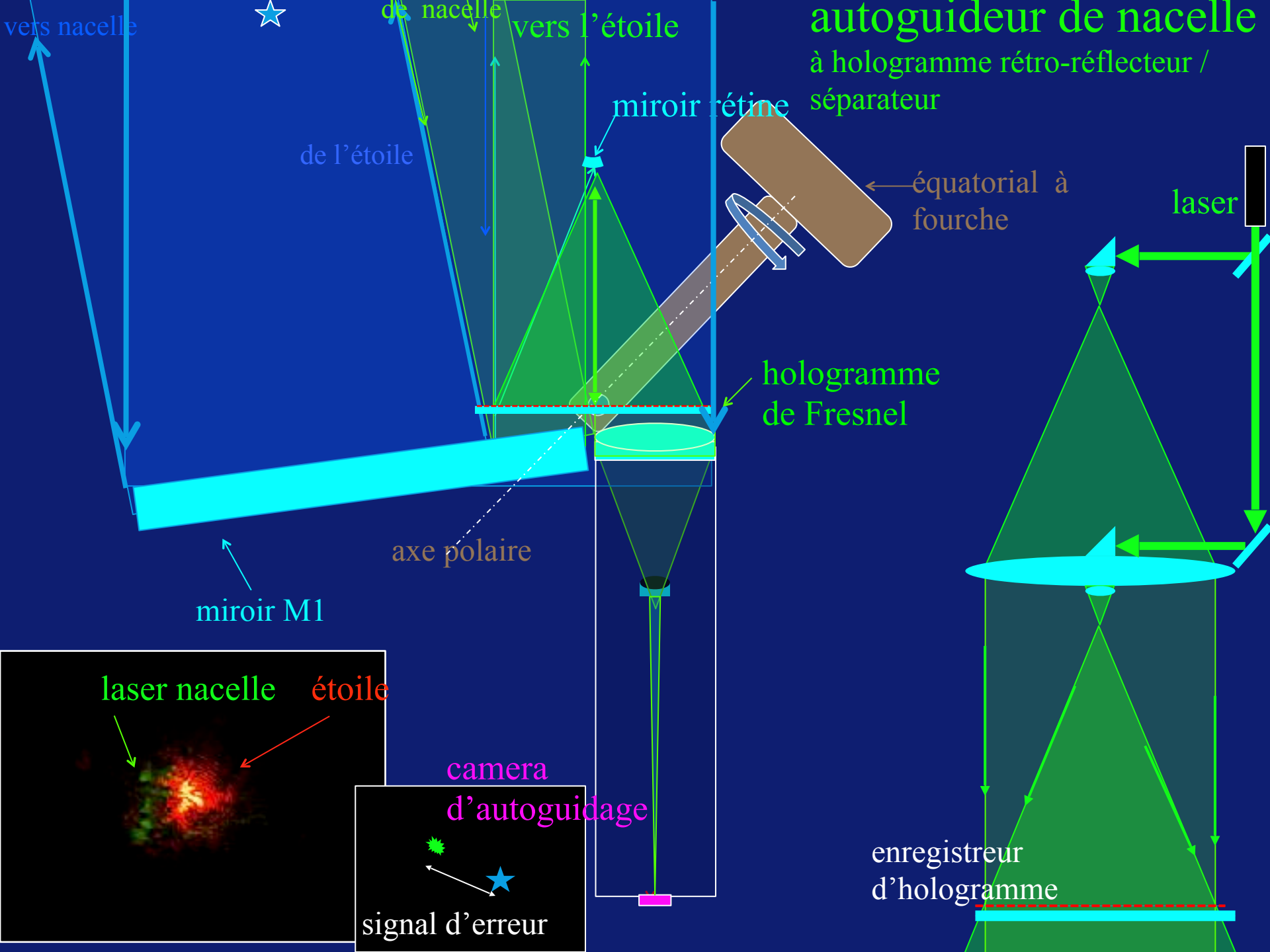






cat's eye autoguider of gondola

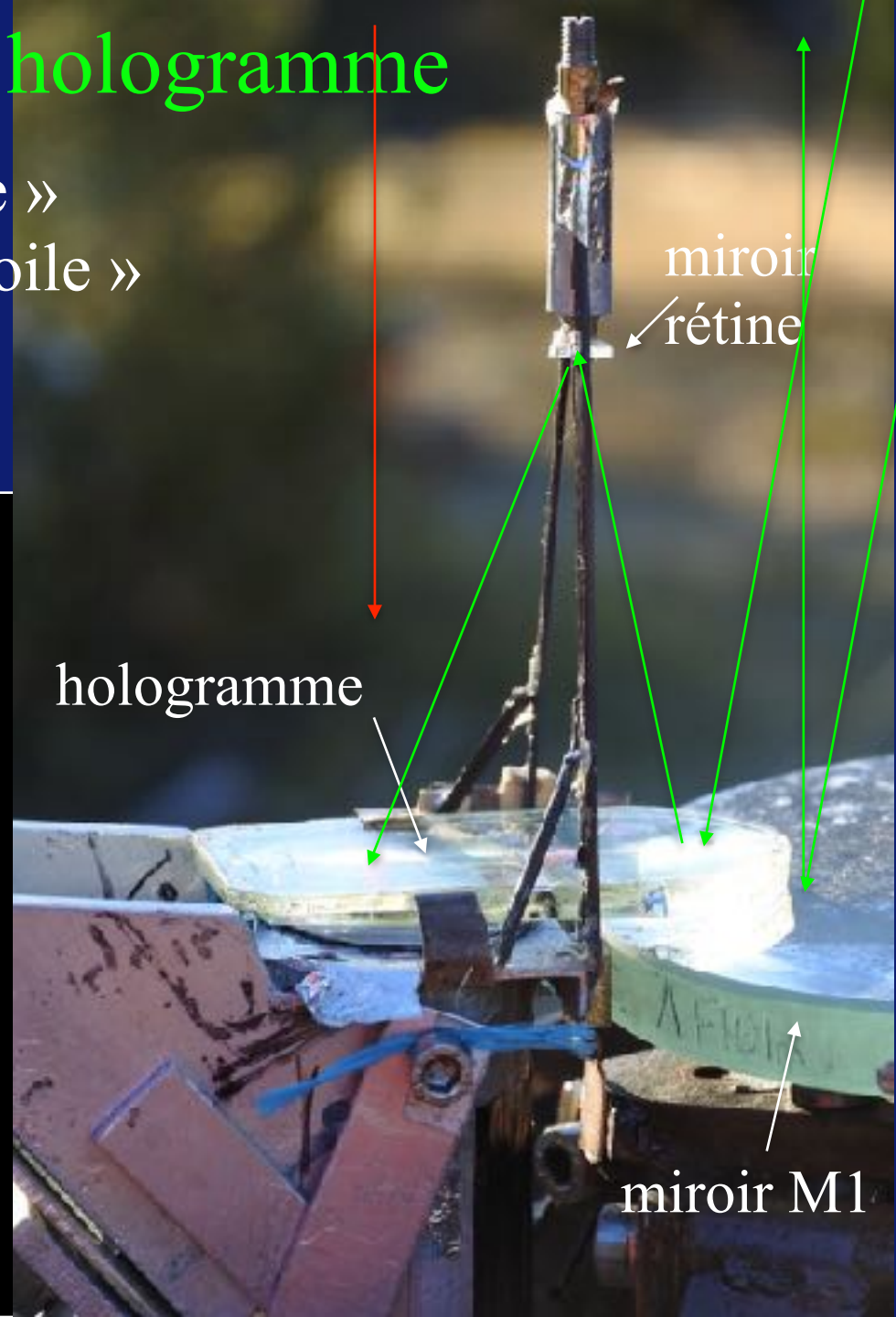
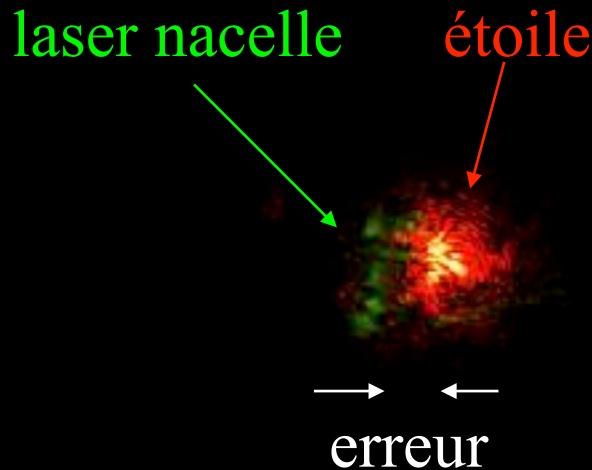
laboratory testing





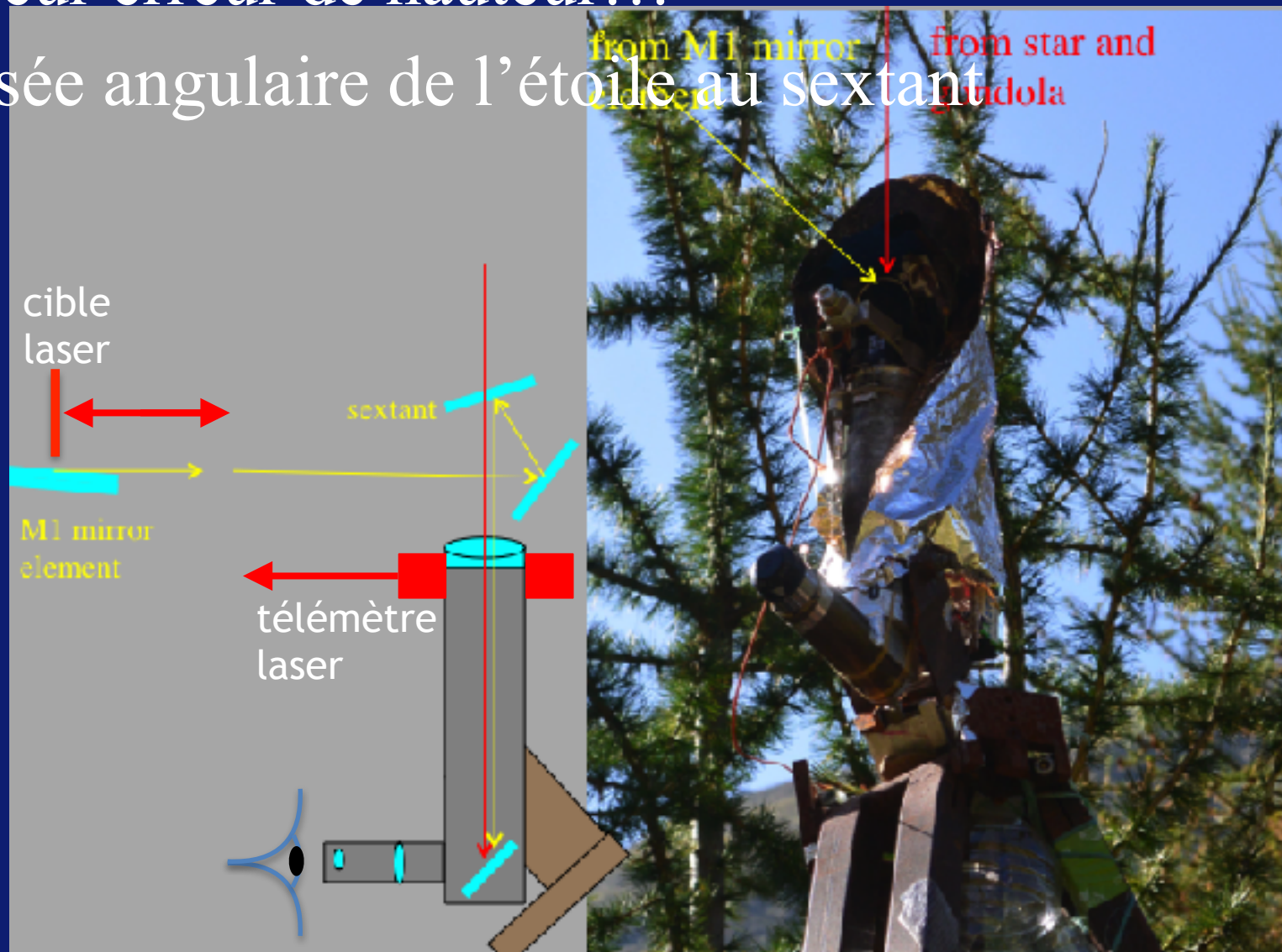
# Viseur d'autoguidage à hologramme

- « oeil de chat holographique »
- superpose les faisceaux « étoile » et « laser nacelle »
- compact



# Viseur de mise en cohérence « *co-parabolisation piston* »

- vise l'un après l'autre les miroirs M1
- mesure leur erreur de hauteur...
- ... par visée angulaire de l'étoile au sextant



# Viseur de mise en cohérence: automatiser

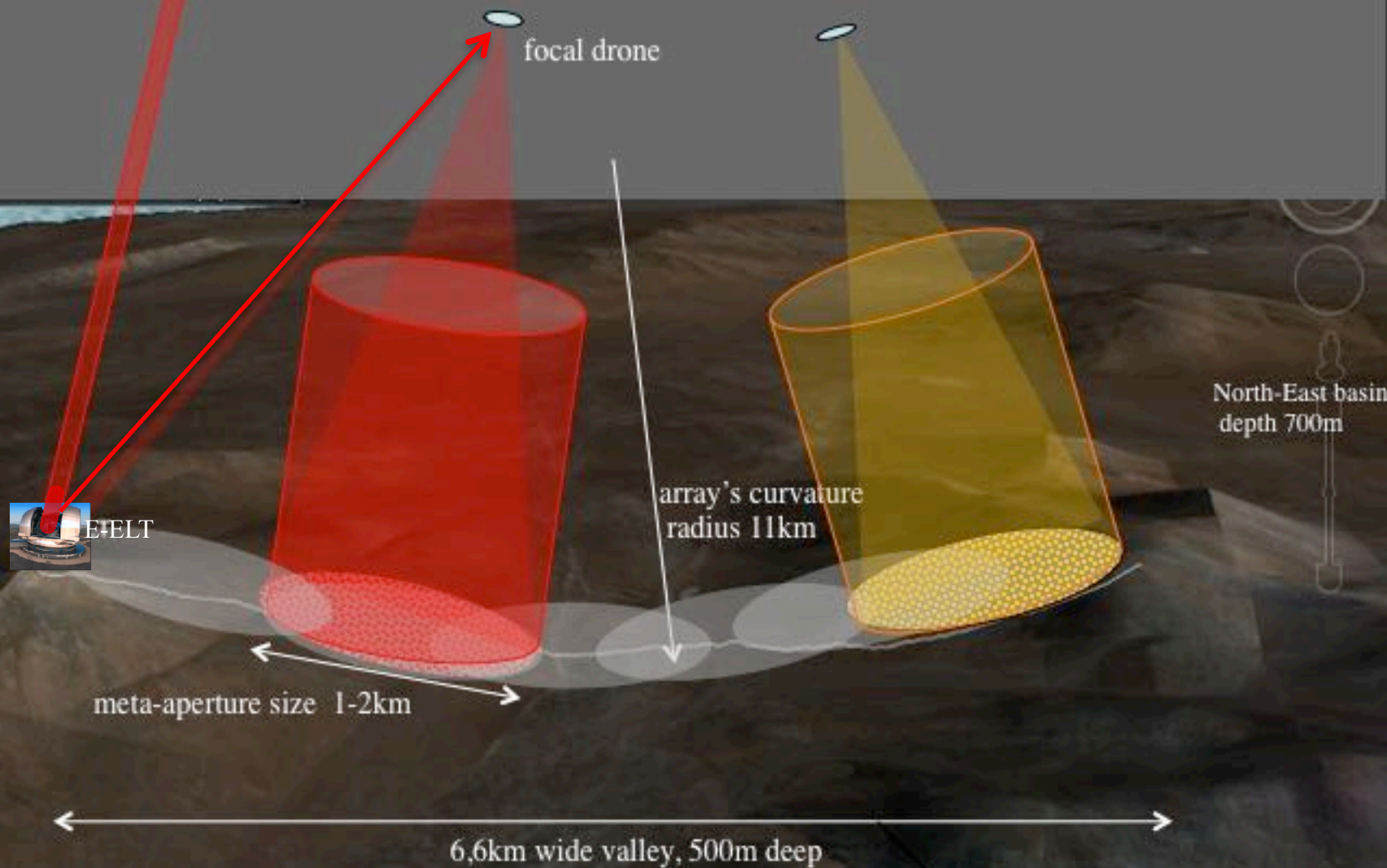
- plusieurs options à explorer:
- théodolite/télémètre suiveur
- télémètre sur la nacelle, dans la pupille densifiée
- précision nécessaire sur la hauteur des miroirs: 100 à 1000 microns



# Feasibility of hypertelescope coupled with E-ELT



# Coupling E-ELT to a hypertelescope

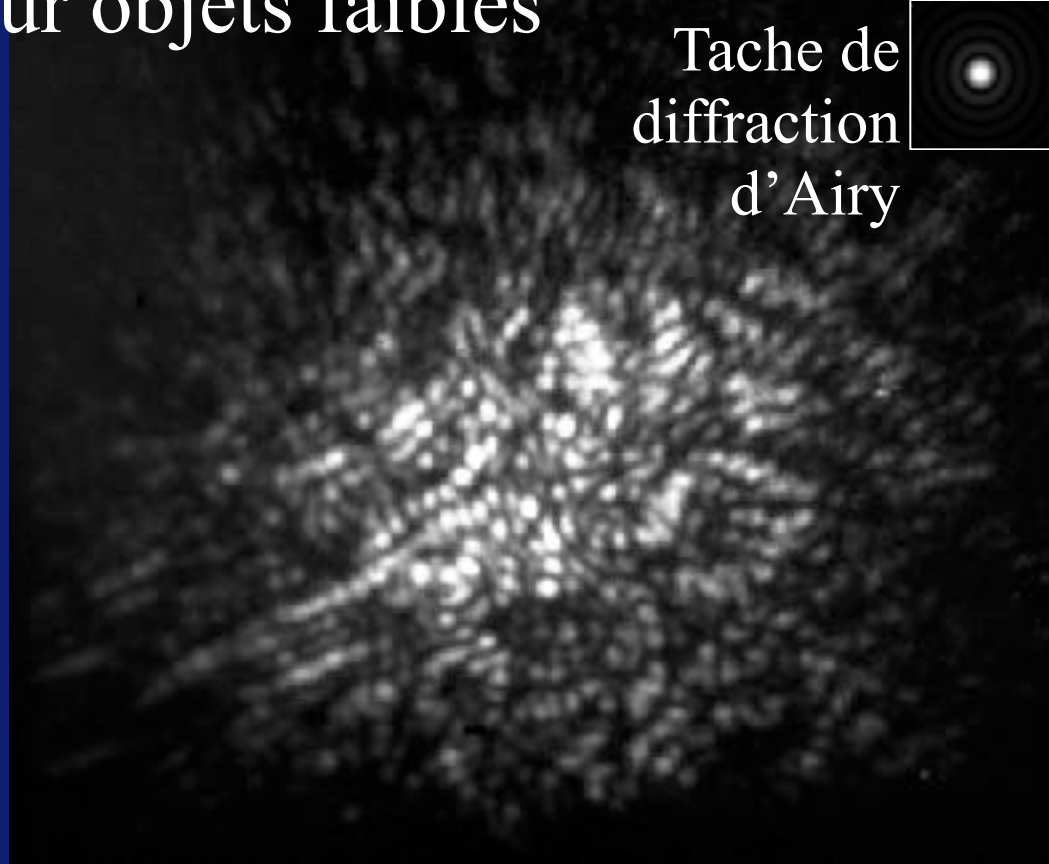


# Et la turbulence ?

... s'y attaquer par étapes

1. Reconstruction d'images par "speckle imaging"
2. Mise en phase adaptative
3. Etoile Guide Laser pour objets faibles
4. .... espace...

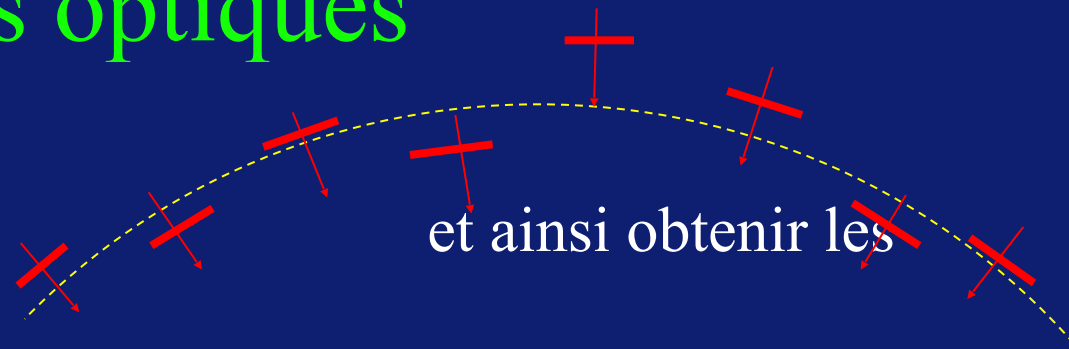
Tache de  
diffraction  
d'Airy



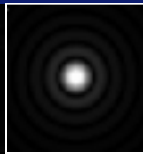


# Égaliser les chemins optiques

- Essentiel pour:
  - mettre en cohérence, interférences
  - mettre en phase: tache d'Airy

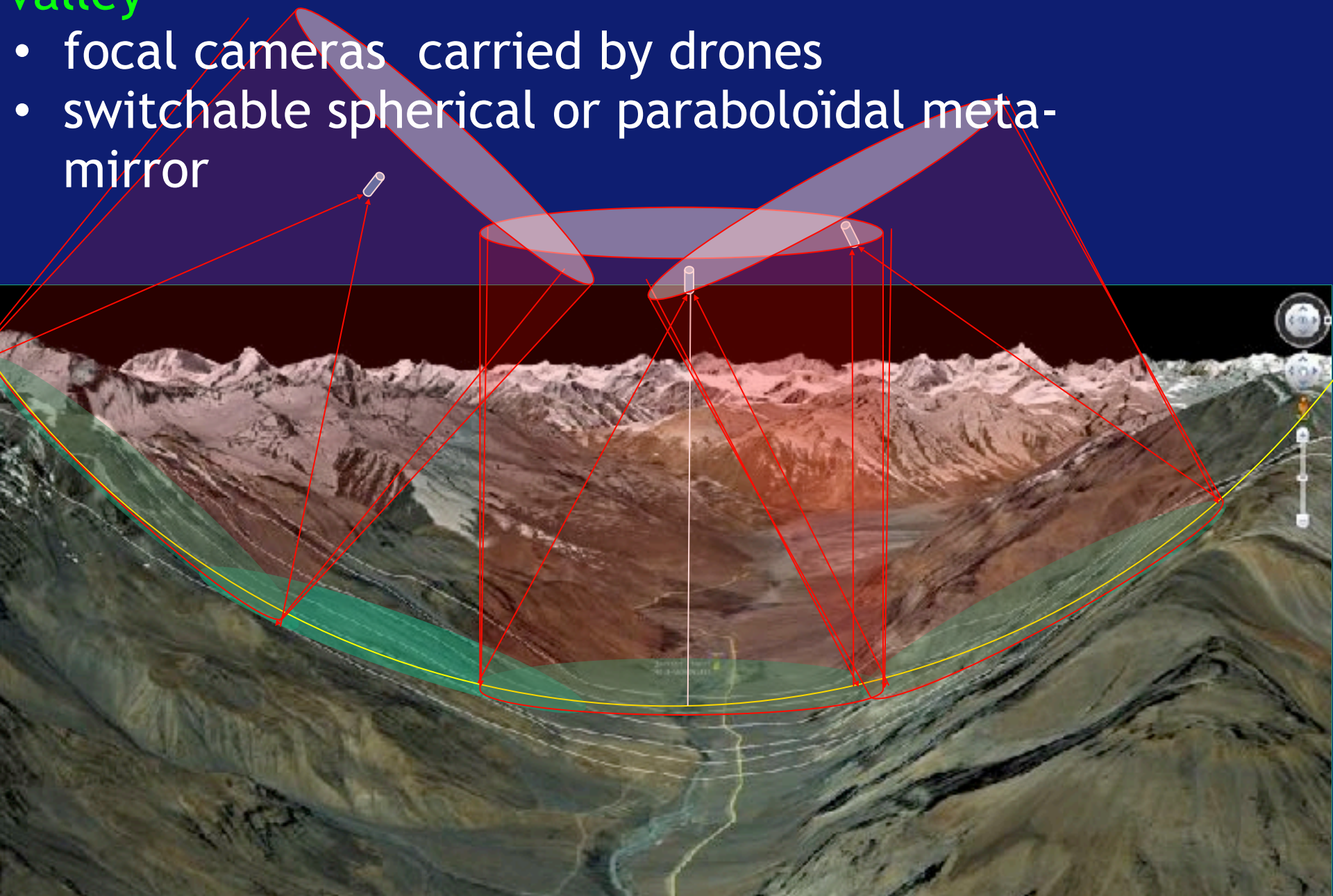


Tache de  
diffraction  
d'Airy



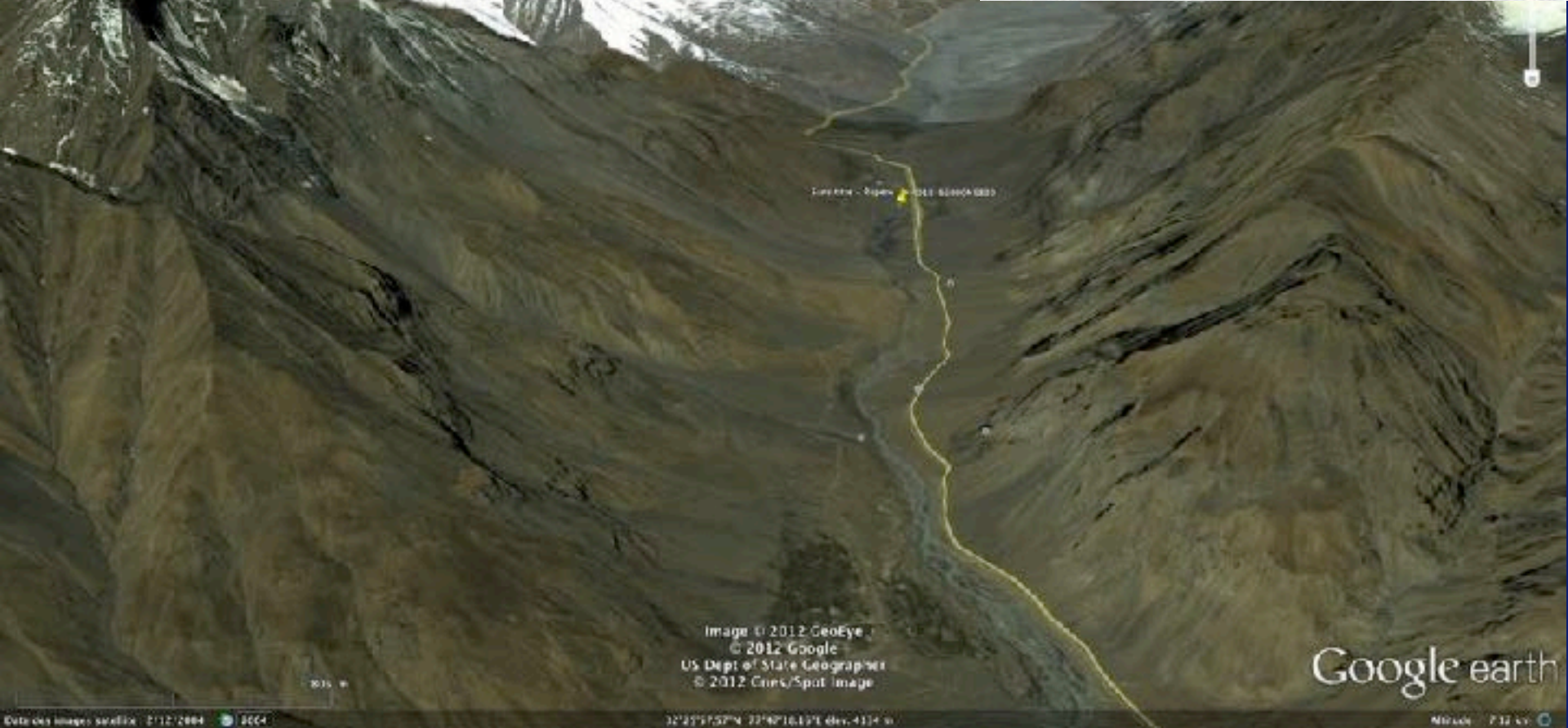
# Extremely Large Hypertelescope ( ELHyT ) in Himalayan valley

- focal cameras carried by drones
- switchable spherical or paraboloidal meta-mirror





# Candidate Himalayan sites for a kilometer hypertelescope

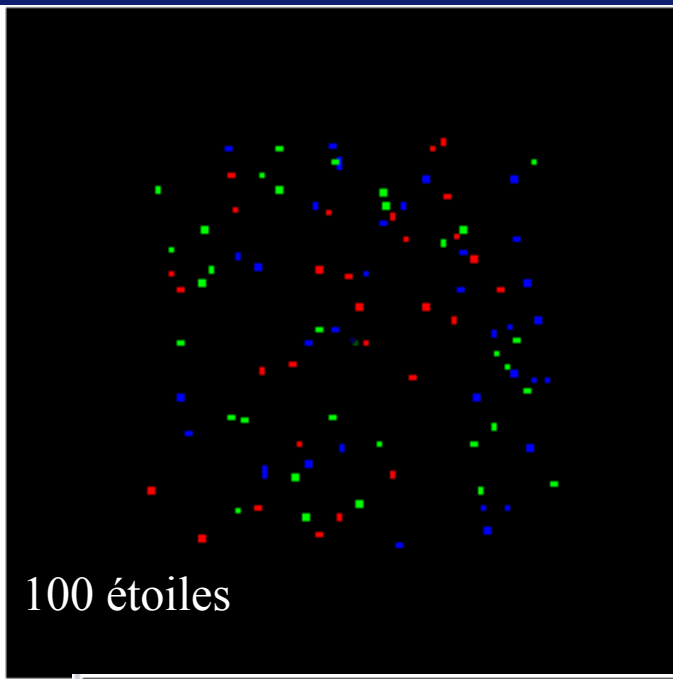
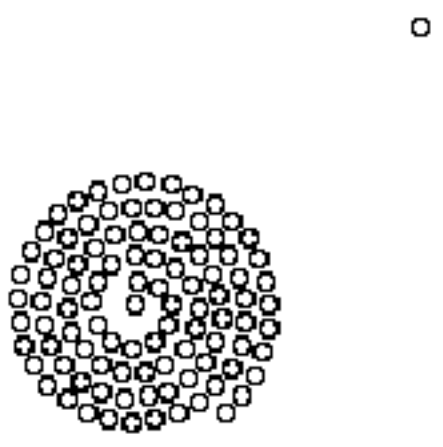
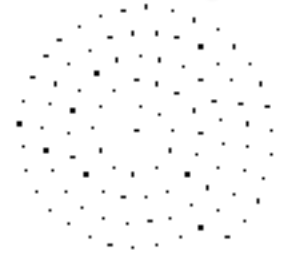




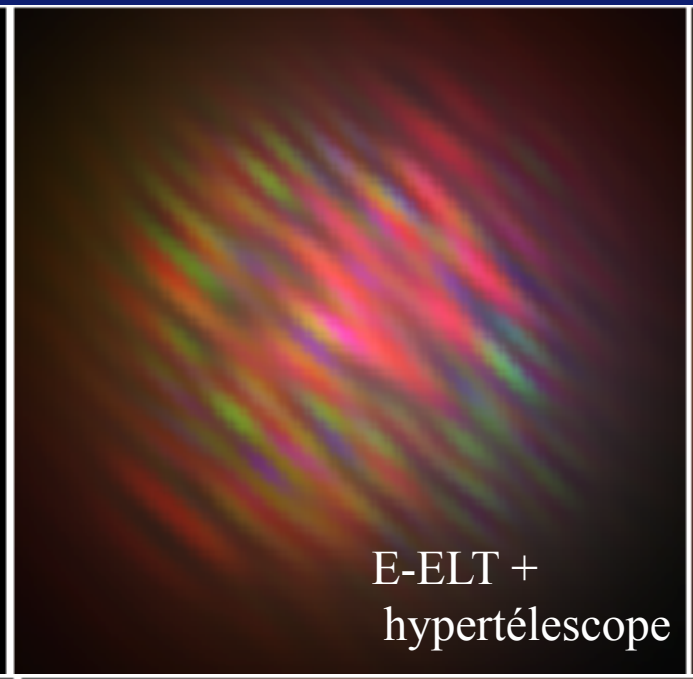
# Couplage E-ELT + hypertélescope: images simulées

E-ELT  
1 miroir de 40m →

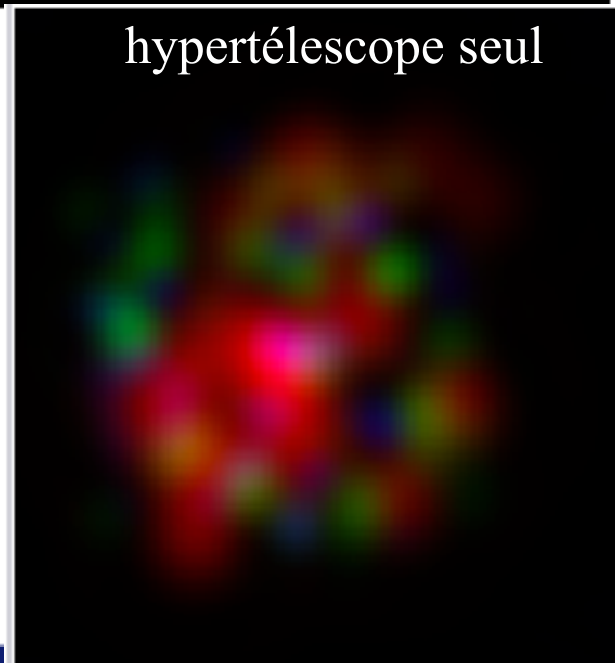
100 miroirs  
de 1m ↙



100 étoiles



E-ELT +  
hypertélescope



hypertélescope seul



E-ELT seul

# Feasibility of hypertelescope coupled with E-ELT



# Feasibility of hypertelescope coupled with E-ELT



Question à Guy à propos de Gravity :  
observer avec VLTI ( puis E-ELT ), couplé à  
l'hypertélescope ?



Question à Guy à propos de Gravity :  
observer avec VLTI ( puis E-ELT ), couplé à  
l'hypertélescope ?

- plusieurs options à explorer:
- théodolite/télémetre suiveur
- télémetre sur la nacelle, dans la pupille  
densifiée
- précision nécessaire sur la hauteur des miroirs:  
100 à 1000 microns

# Avancement du prototype "Hypertelescope Ubyte"

- pilotage de la nacelle à quelques millimètres vérifié
- image de Vega obtenue au foyer coudé, avec un seul miroir
- banc d'essai statique, à plat, à l'Observatoire de Calern
- nacelle « N-ready » en construction
- techniques d'alignement améliorées
- Etude Zemax en cours pour multi-champ et correction de coma

## à faire :

- autoguideur de pupille
- senseur de piston à « speckles dispersés » ou « Chromatic Phase Diversity » (Mourard et al. )
- drone focal
- installation de 100 miroirs  $M_1$ , actifs

## Conclusion:

### du travail pour les générations futures

- Hypertélescopes: une voie prometteuse pour l'Astronomie
- L'exploration théorique de l'imagerie hypertélescope a stimulé un gros effort technique pour le prototype terrestre...
- ... et la modélisation théorique de versions spatiales...
- ... qui annoncent des gains majeurs pour la résolution des observations astronomiques...
- ... préparant la recherche de vie extra-terrestre
- ... et une meilleure compréhension de l'Univers



# Astronomes amateurs et bénévoles: ils contribuent efficacement...

- calcul optique
- logiciel, électronique
- topographie
- organisation
- installation, alignement et observation sur le site

## **Web:**

<https://lise.oca.eu>

<http://hypertelescope.org/>

**Association « Hypertélescope LISE »**

# Les points durs

- pilotage de la nacelle: précision millimétrique atteinte
- caméras en cours d'installation sur la nacelle
- logiciel progresse
- procédures d'alignement et asservissement améliorées

# Welcome to contributors ... and funding support

- crowd funding considered

