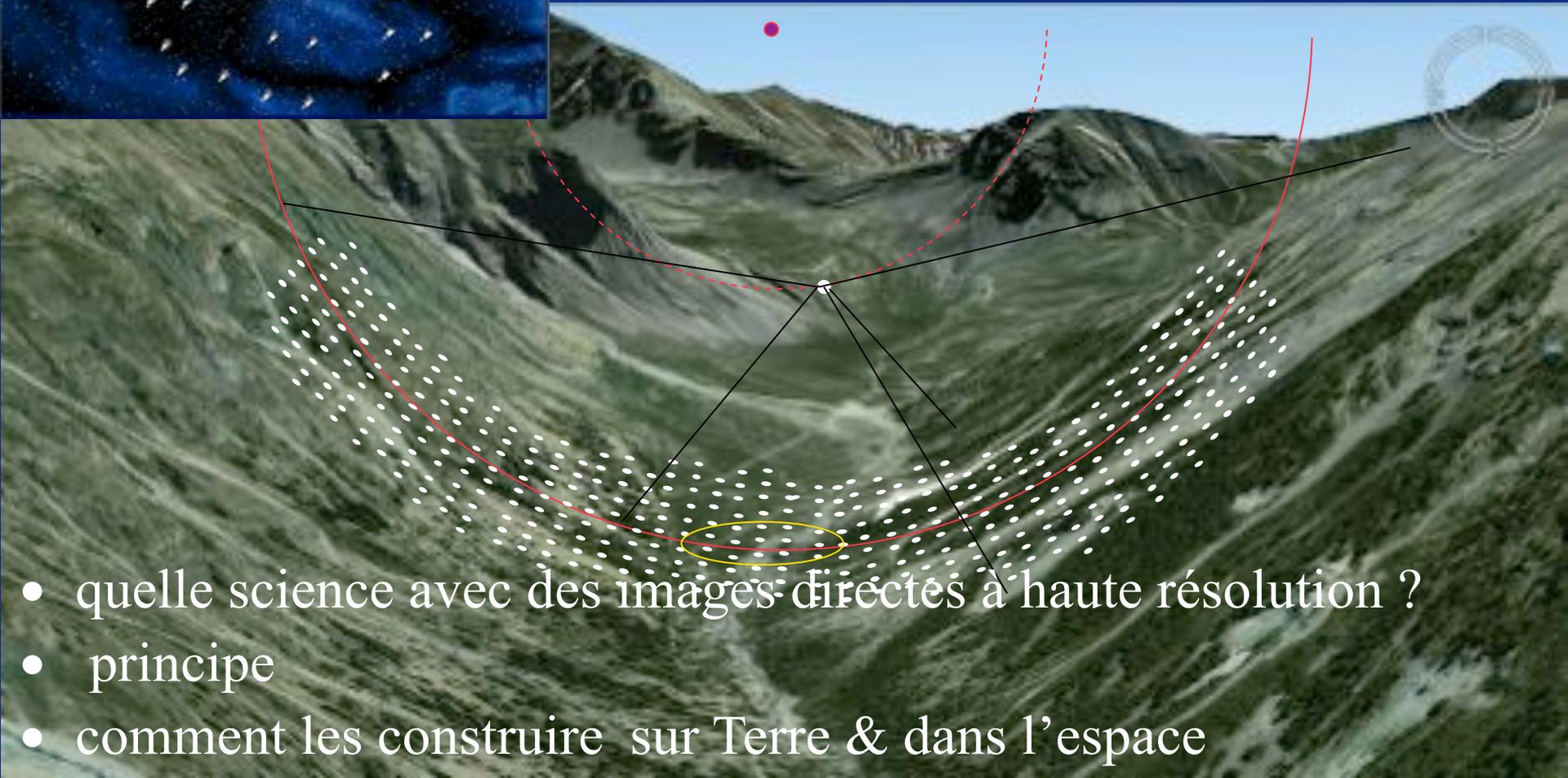


Hypertélescopes : pour quelle science ? Essai terrestre et perspectives pour l'espace

Antoine Labeyrie
Collège de France



- quelle science avec des images directes à haute résolution ?
- principe
- comment les construire sur Terre & dans l'espace

Focalisation par une lentille poussiéreuse

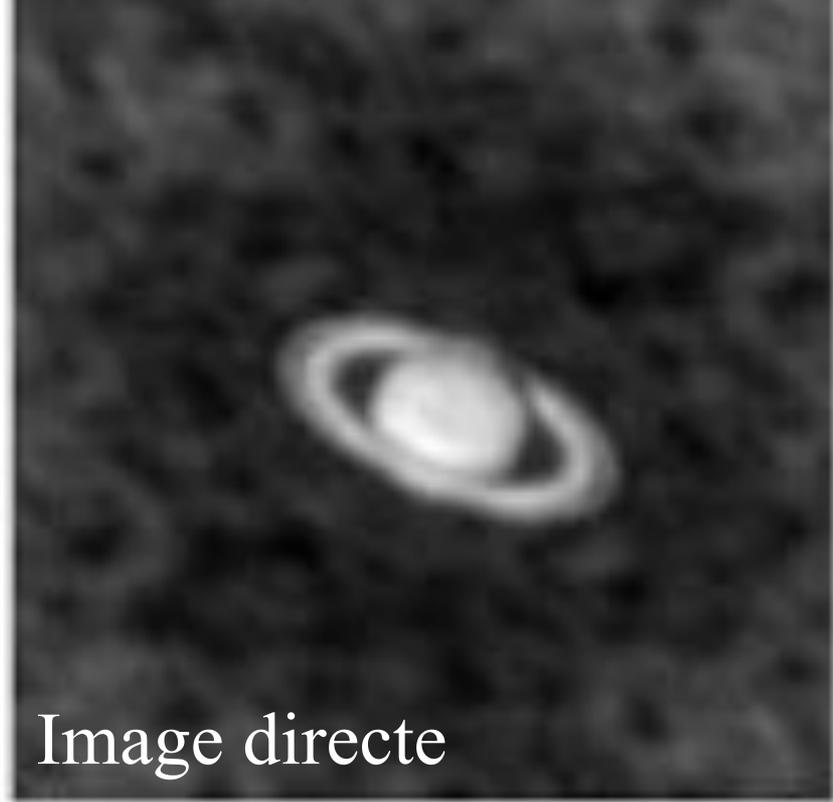
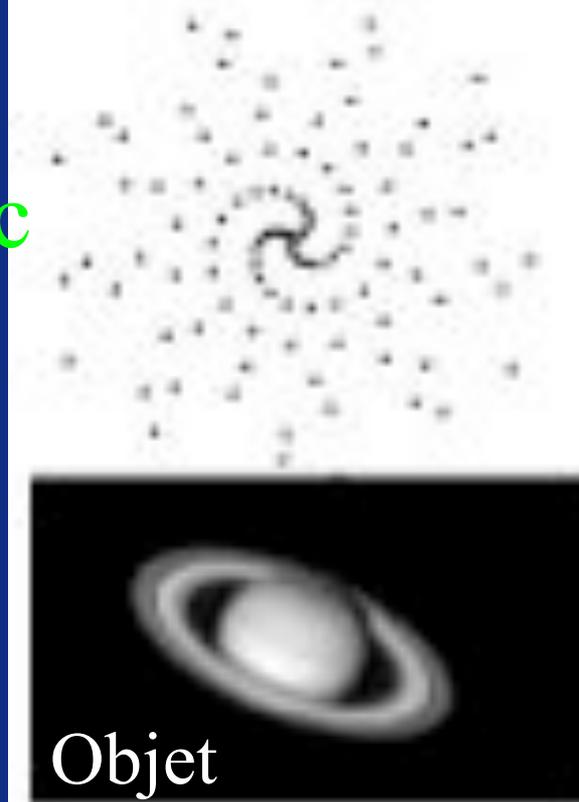
considérée comme un interféromètre Fizeau
à ouvertures nombreuses

- la poussière diffracte, formant un large halo...
- ... qui ne dégrade pas la résolution de l'image...
- ... mais atténue son contraste ...
- ... et sa luminosité

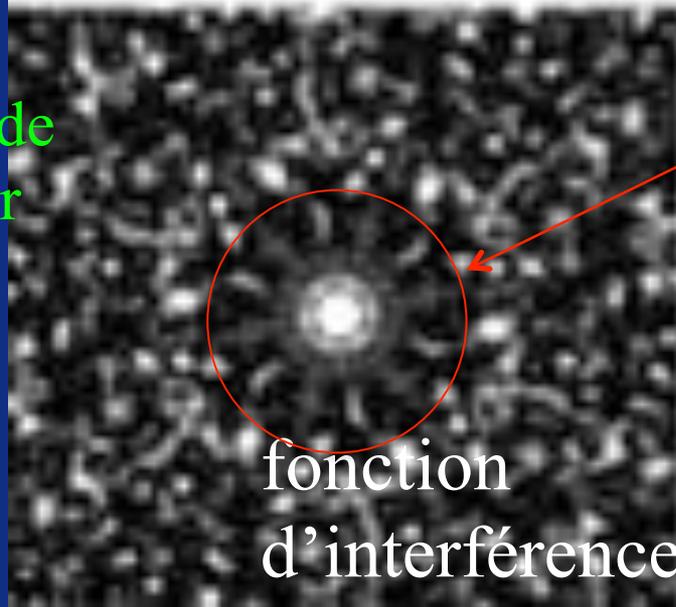
De la lentille poussiéreuse à l'hypertélescope

- ajout d'un relai optique « densifieur de pupille » près du foyer
- préserve la formation d'une image directe ...
- ... mais dans un champ limité λ/d (extensible par déconvolution de Mary)
- intensifie l'image
- rend utilisables des ouvertures fortement diluées à nombreux éléments

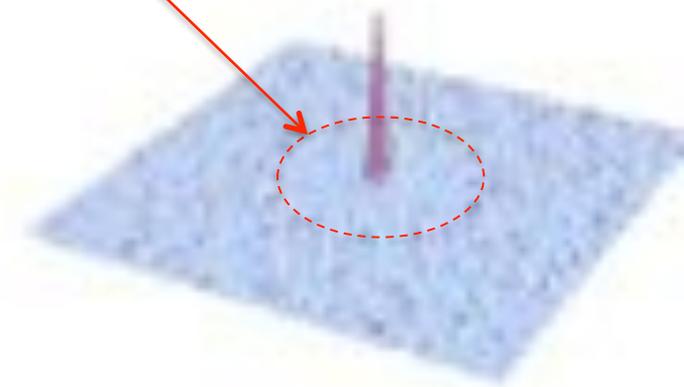
Image
directe avec
une méta-
ouverture
apodisée



Simulation en mode
hypertélescope par
C.Aime

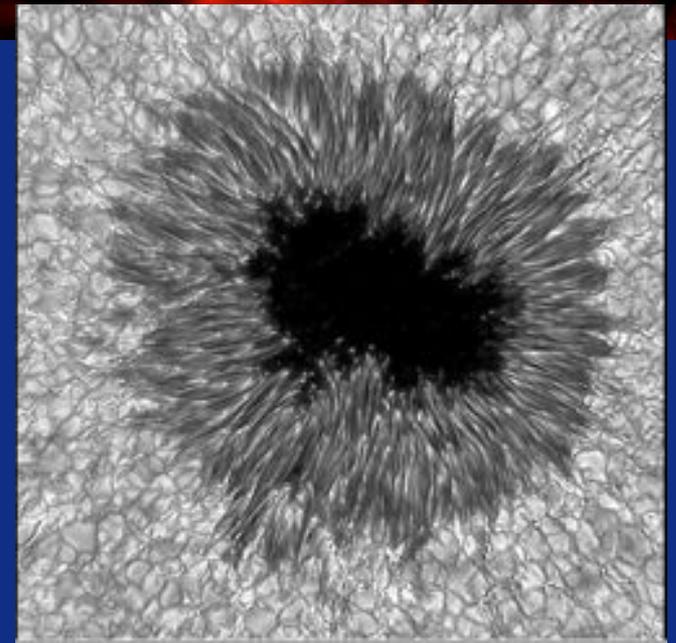
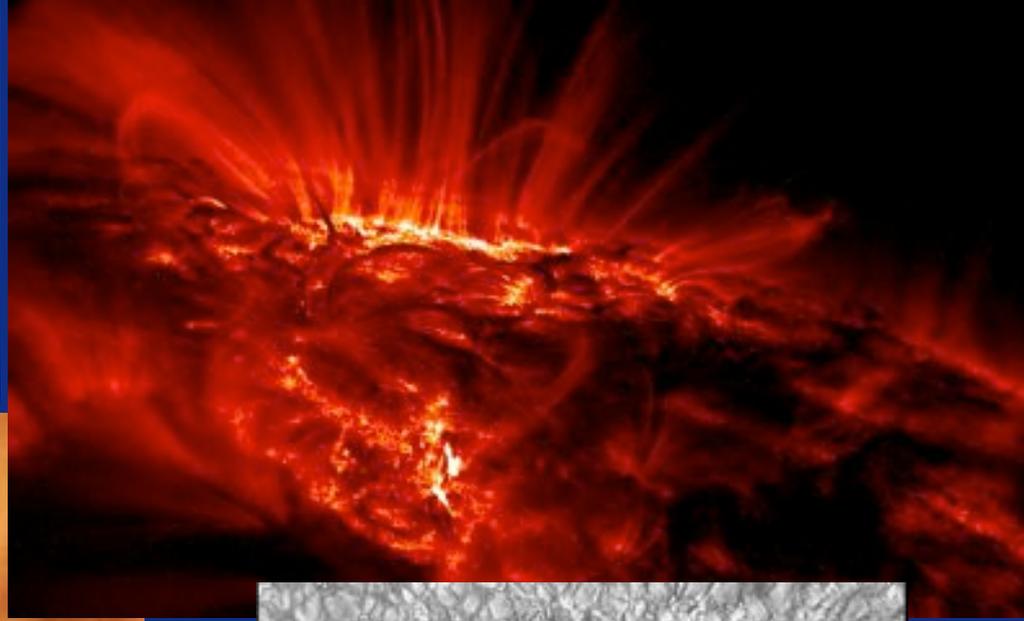


“clean field” λ/s
et zone sombre



On en a rêvé:

Voir les étoiles comme on voit le Soleil ... et leurs planètes... et la vie



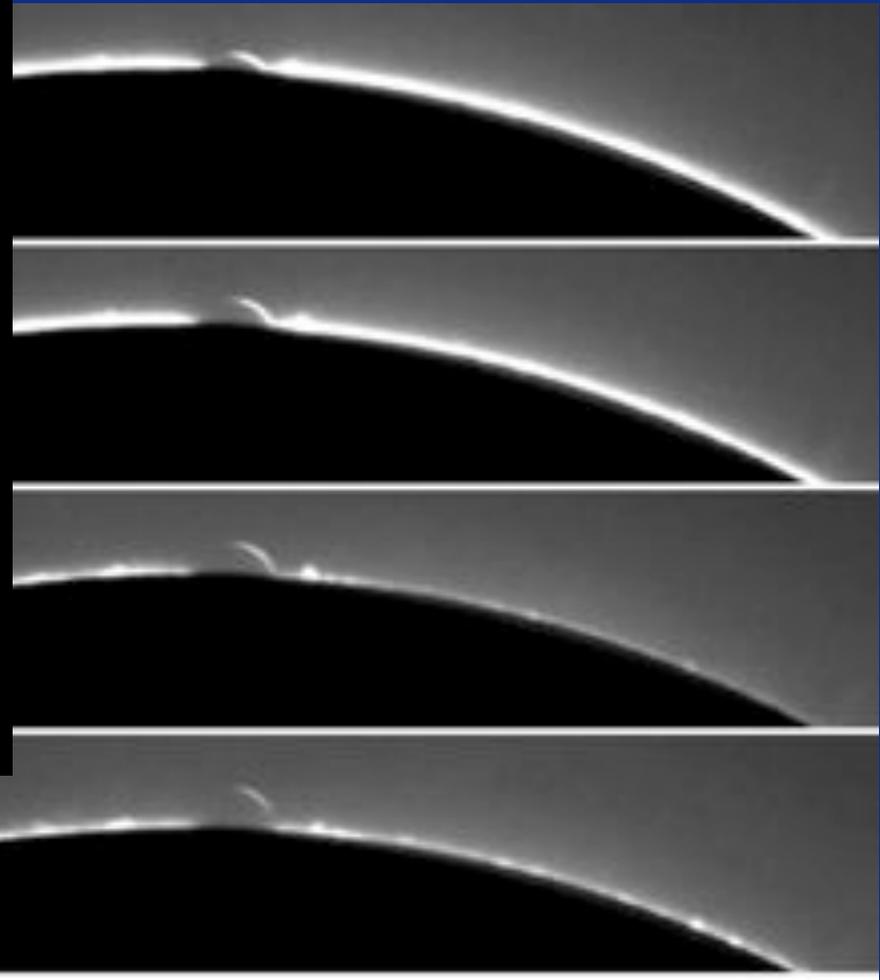
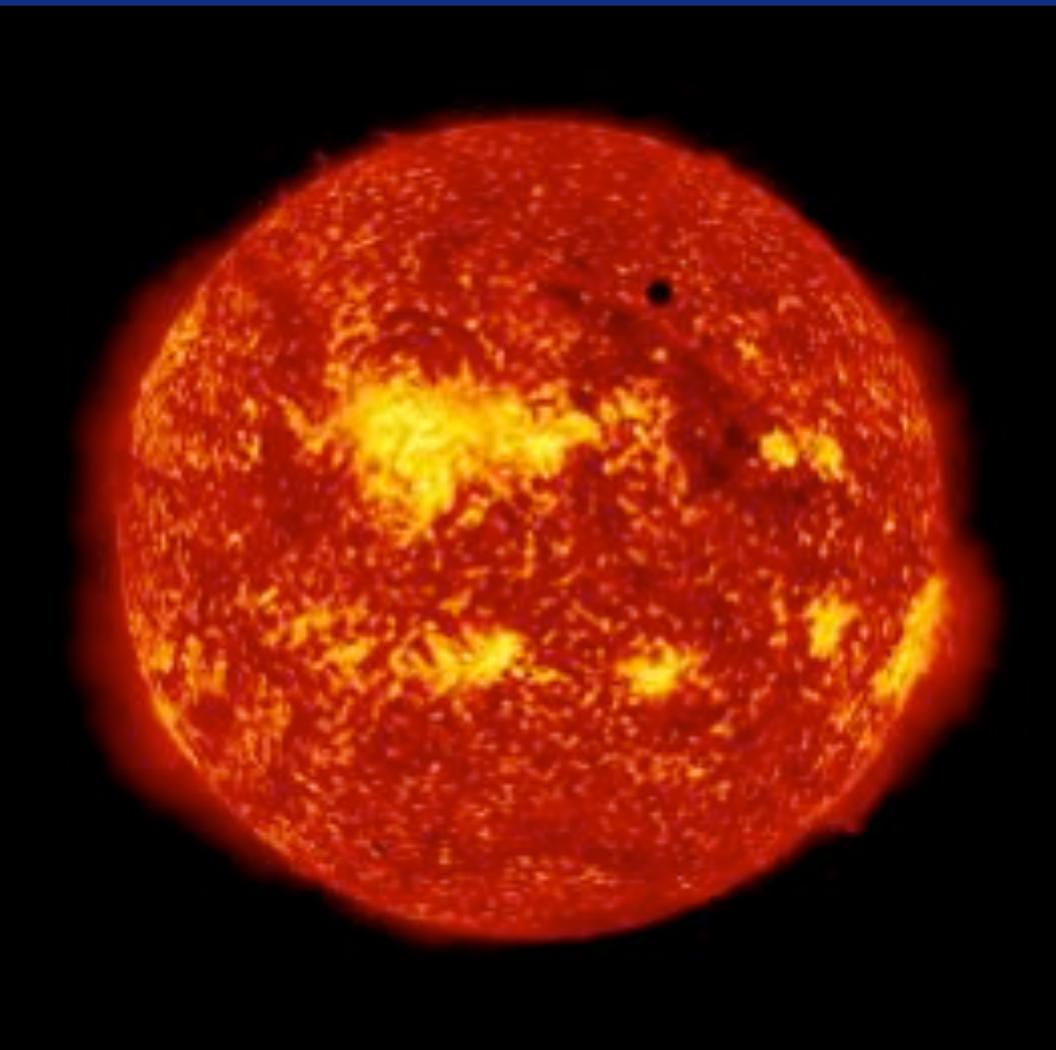
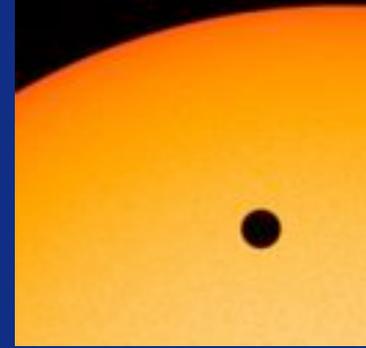
Tornades sur le soleil: et les étoiles ?



NASA Solar Dynamics Observatory

Ultra-violet 304 Angstroms

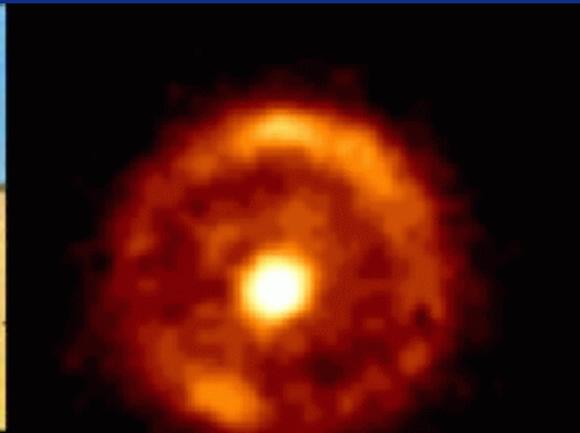
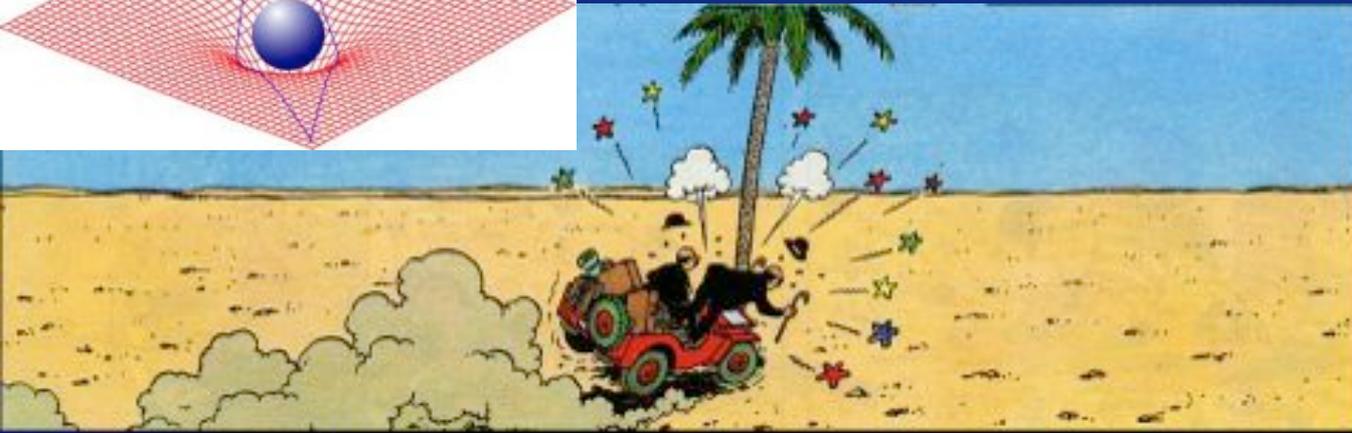
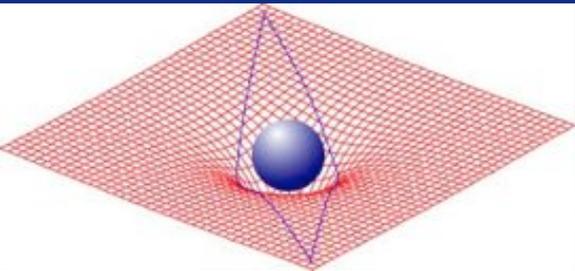
Transit de Venus devant le Soleil (Rondi et al. , 2012)



Etoile double avec trou noir (vue d'artiste)

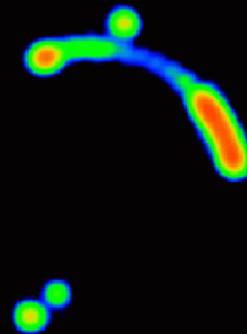


Lentilles et mirages gravitationnels



Optique (télescope Hubble)

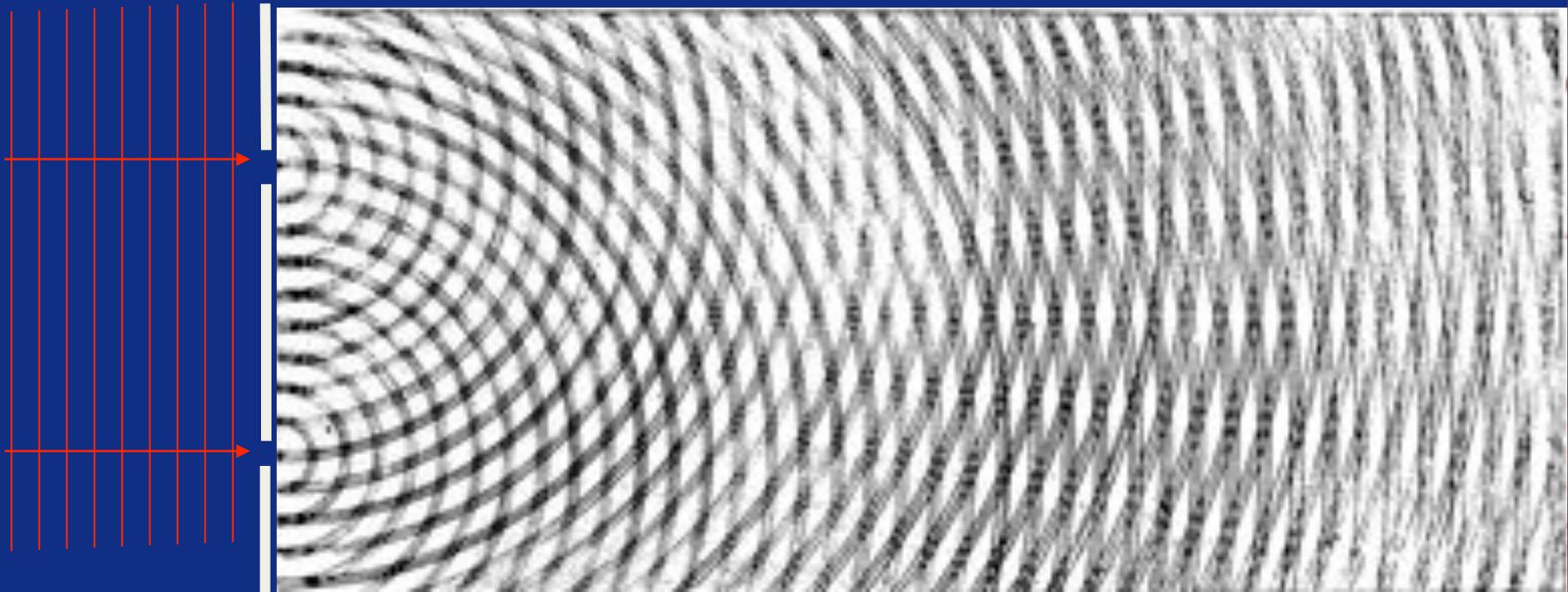
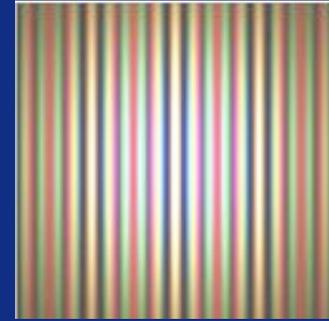
Radio (interféromètre Merlin)



Interférences d'Young (ca. 1810)



Franges d'Young



résolution



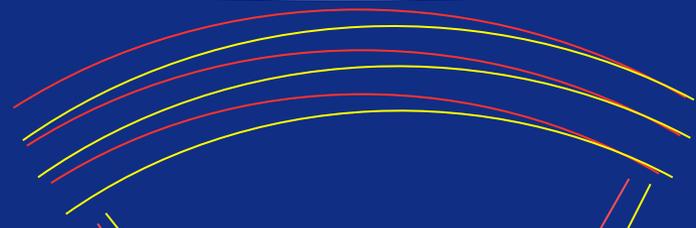
Ondes planes



Lentille



Ondes sphériques

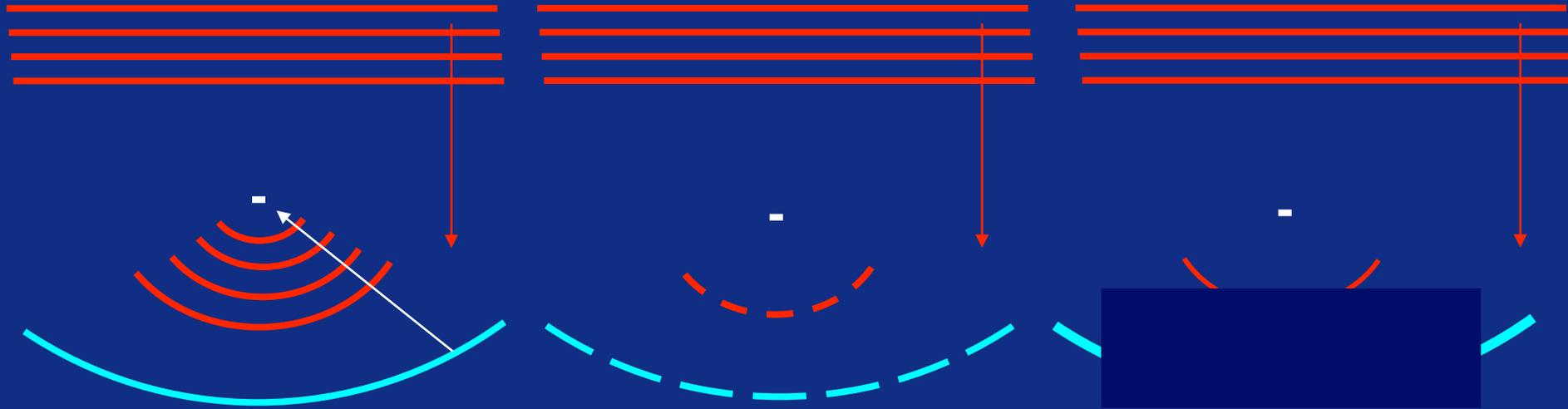


Caméra

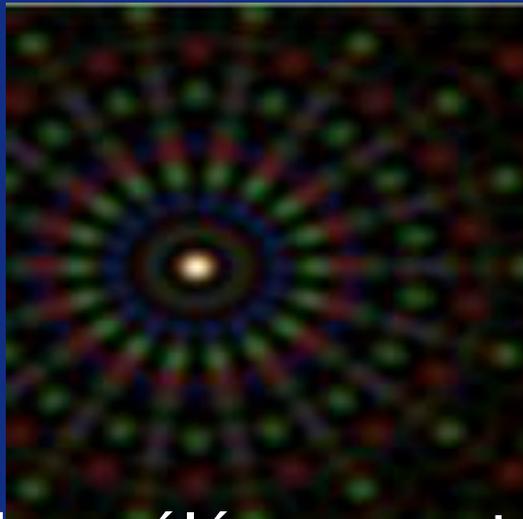


Taches de diffraction d'Airy

Interféromètre



Tache de diffraction d'Airy



Interféromètre Fizeau



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

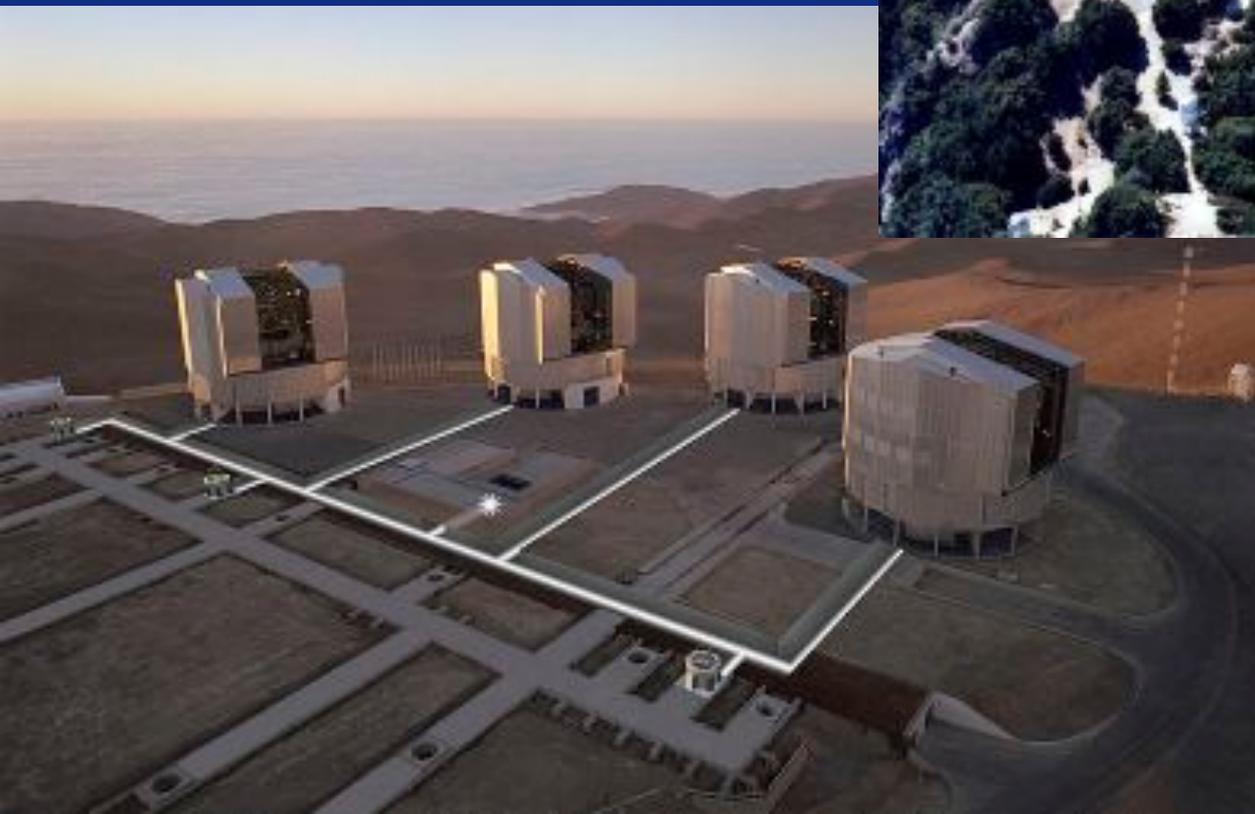
du
Grand interféromètre
à deux télescopes
(GI2T)



γ Cass
spectre avec
interférence
(Mourard et al.,
Nature 1989)

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

- CHARA , 6 télescopes de 1m
- VLT-I 4 de 8m



Mt Wilson CHARA

ESO VLT-I

Ondes radio millimétriques: interféromètre ALMA

- premières images prometteuses

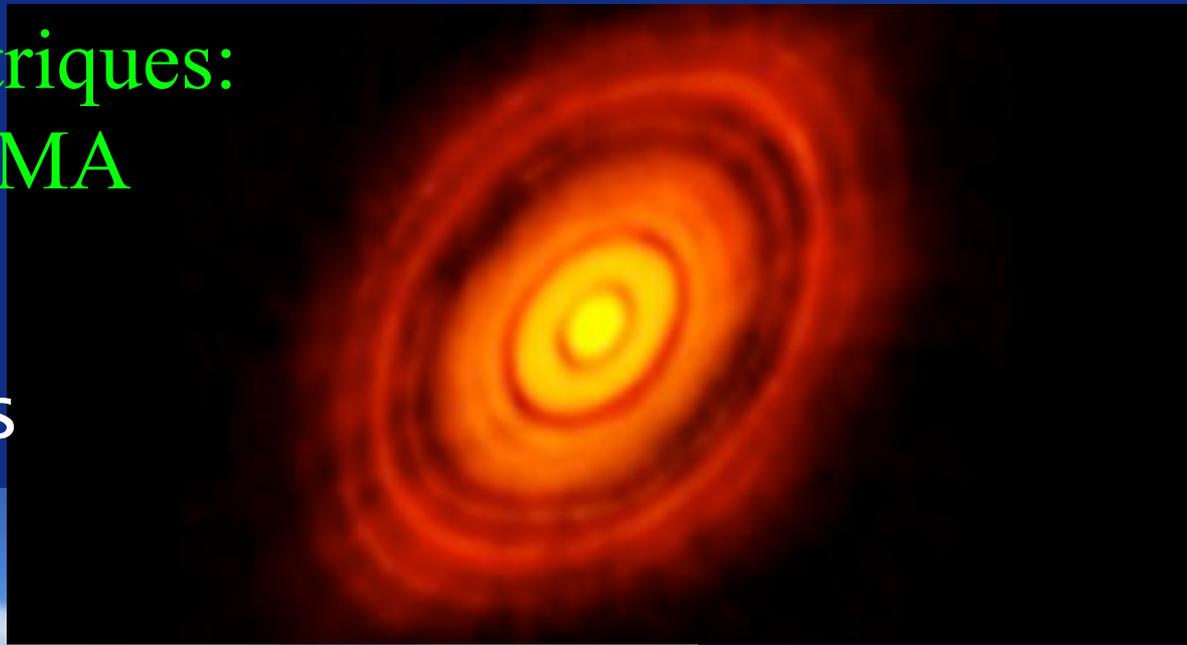
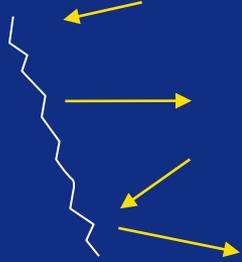


image d'un système
planétaire en formation
autour de l'étoile
jeune HL Tauri

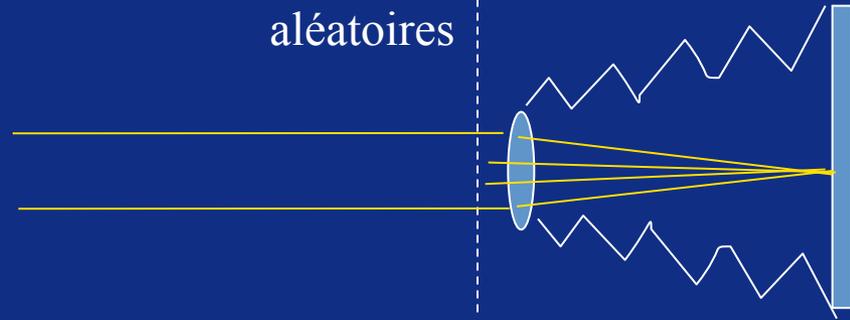
Petite expérience pour bricoleurs:

Imagerie Fizeau d'un objet étendu sans turbulence

Aluminium
froissé



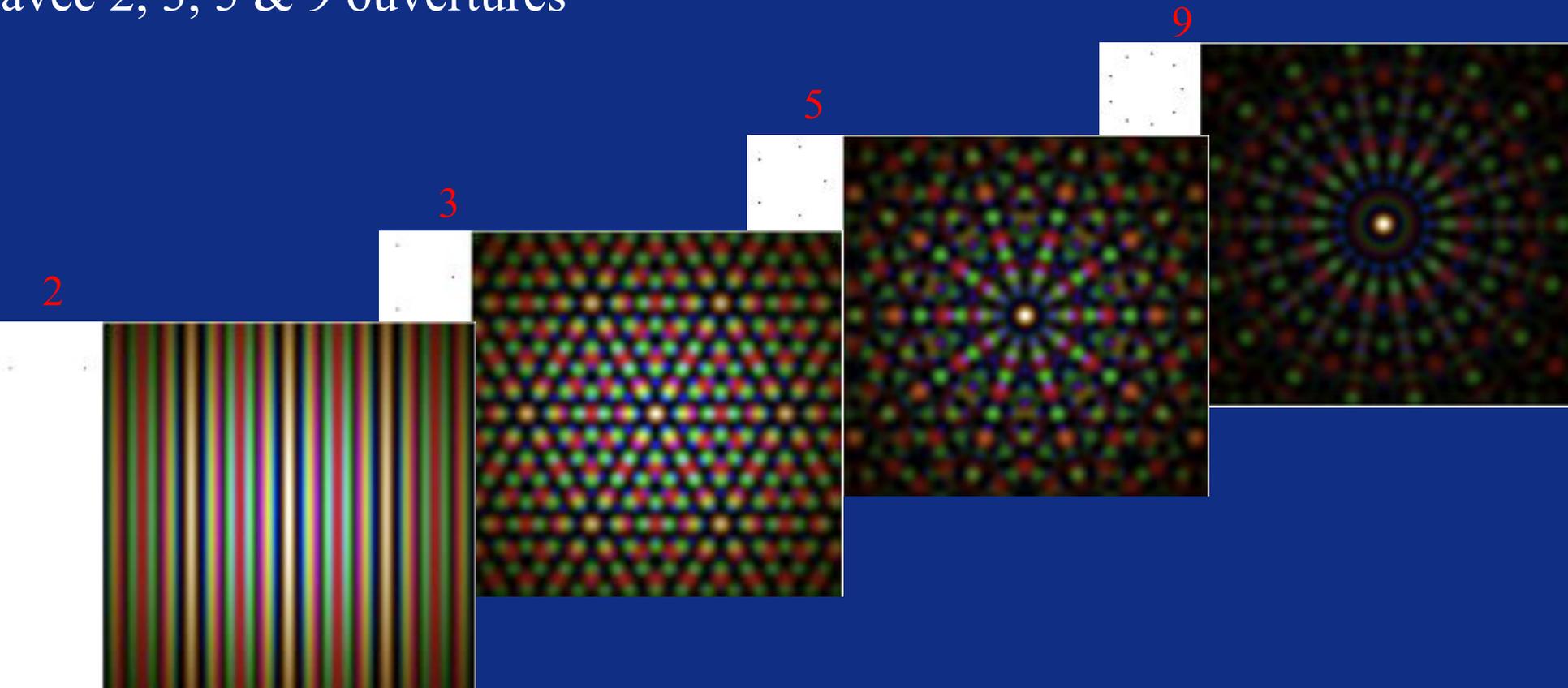
trous
d'épingle
aléatoires



- 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 »

Etapas: des franges d'interférence aux images directes... ... en passant par les speckles

Interférences de Young simulées, sans turbulence,
avec 2, 3, 5 & 9 ouvertures



- Le pic central blanc s'intensifie avec plus d'ouvertures

Image Fizeau directe: simulations numériques

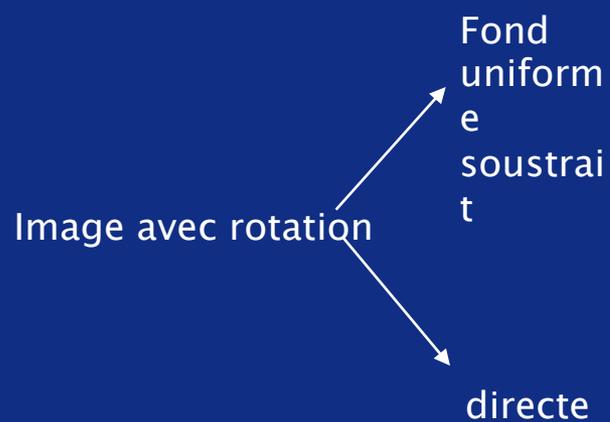
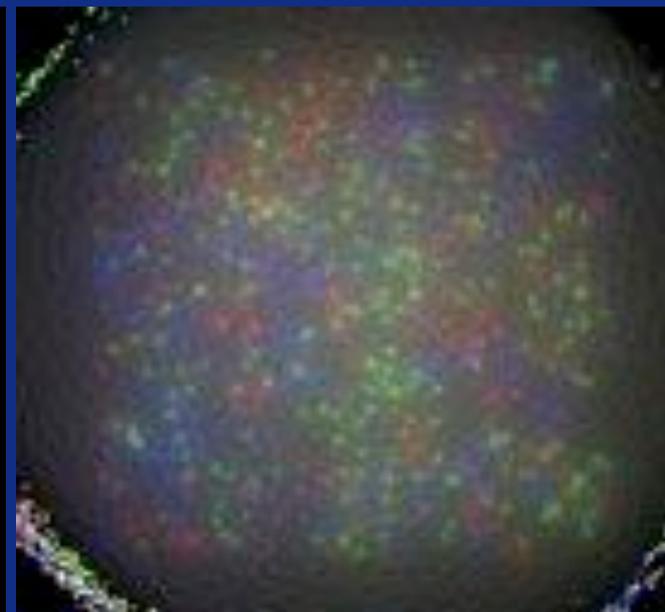
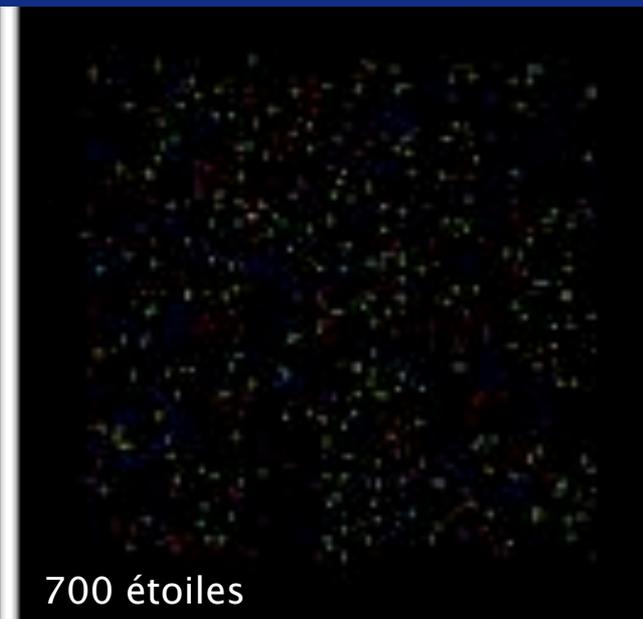
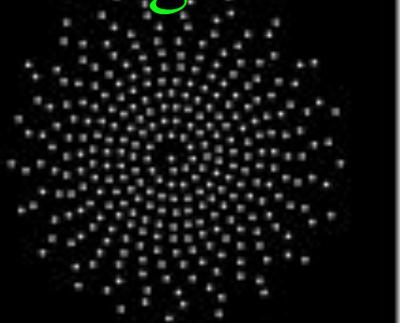


Image directe d'un amas d'étoiles

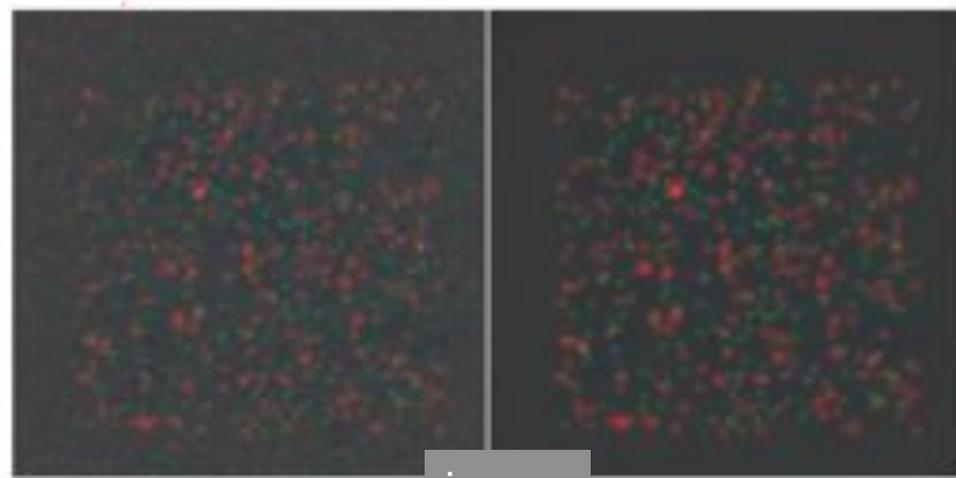
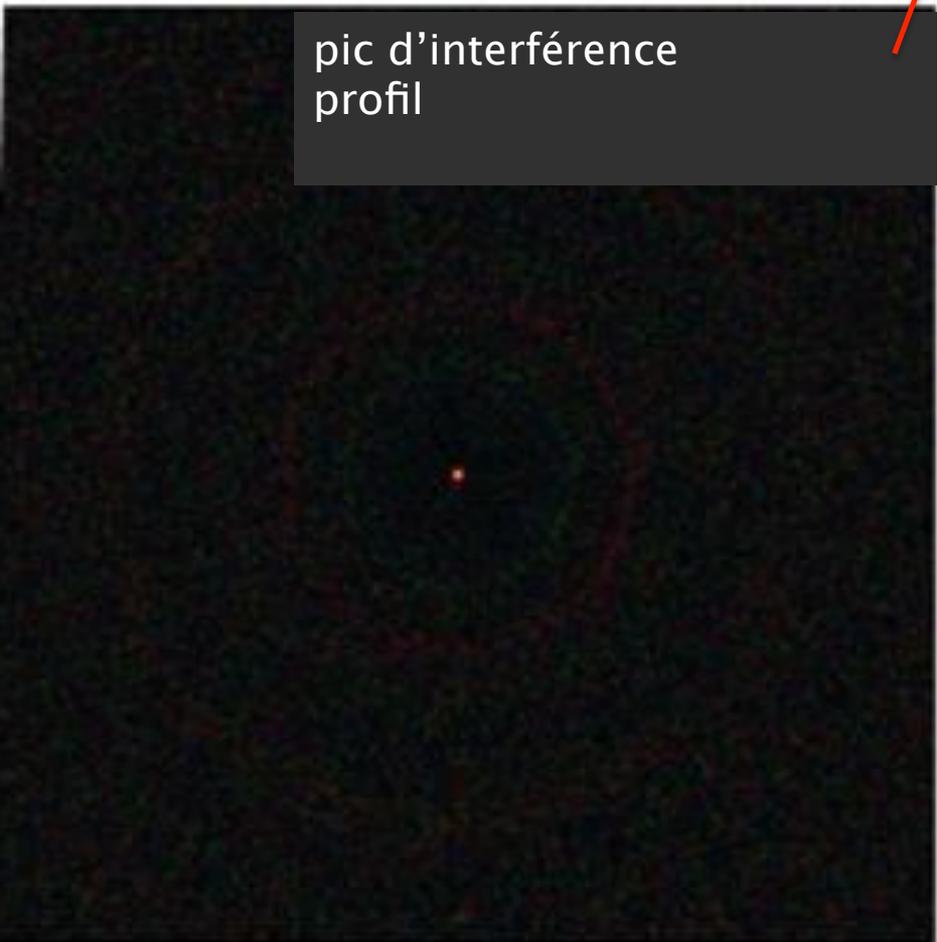


310 ouvertures

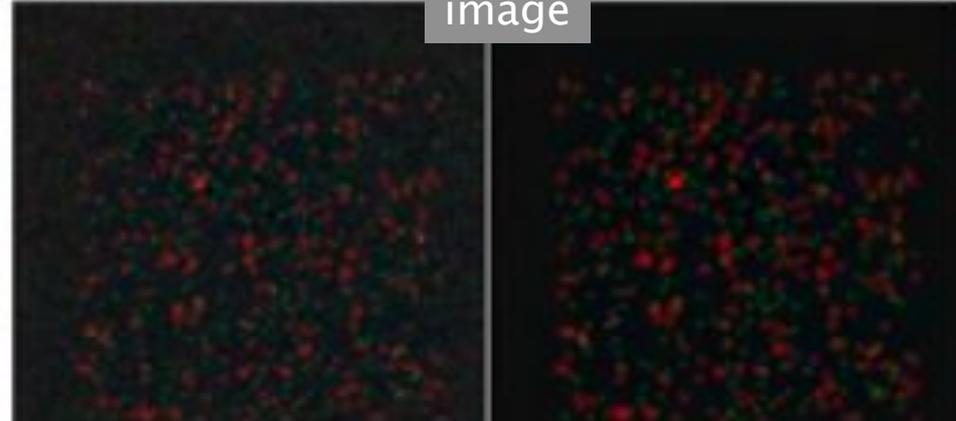
750 étoiles



pic d'interférence
profil



image



Simulated Fizeau imaging: 30 apertures and 1000 stars

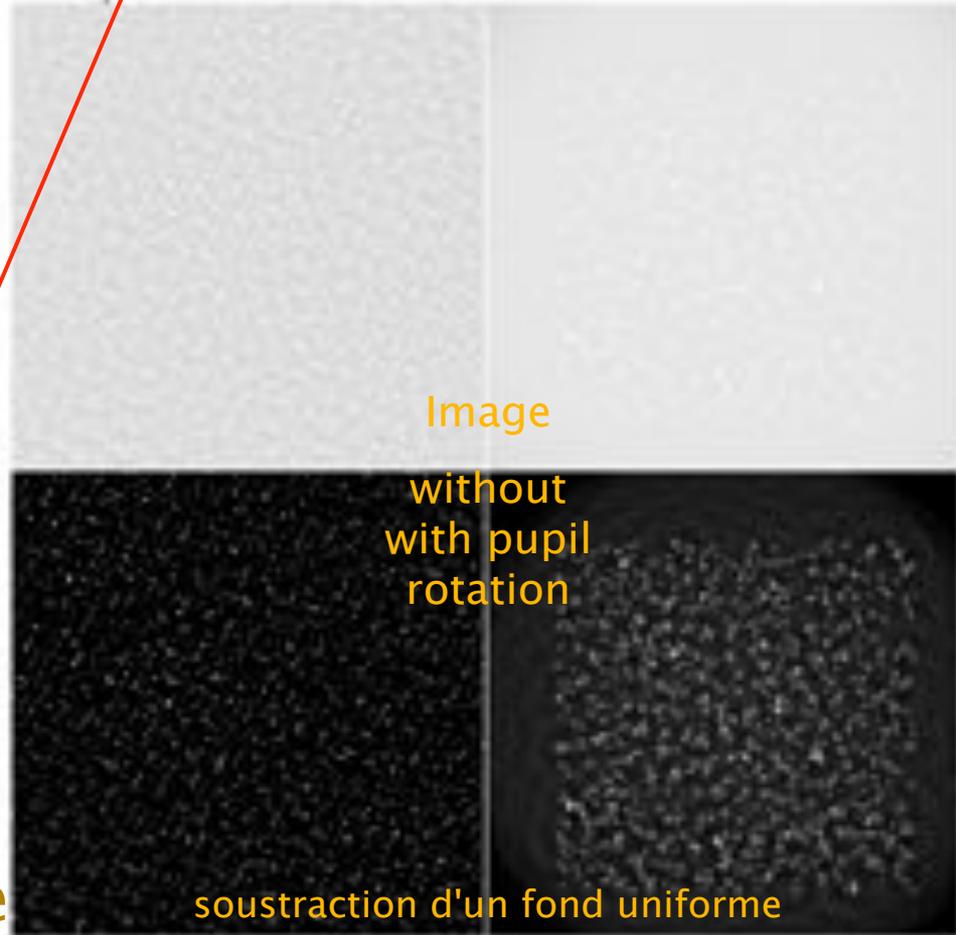
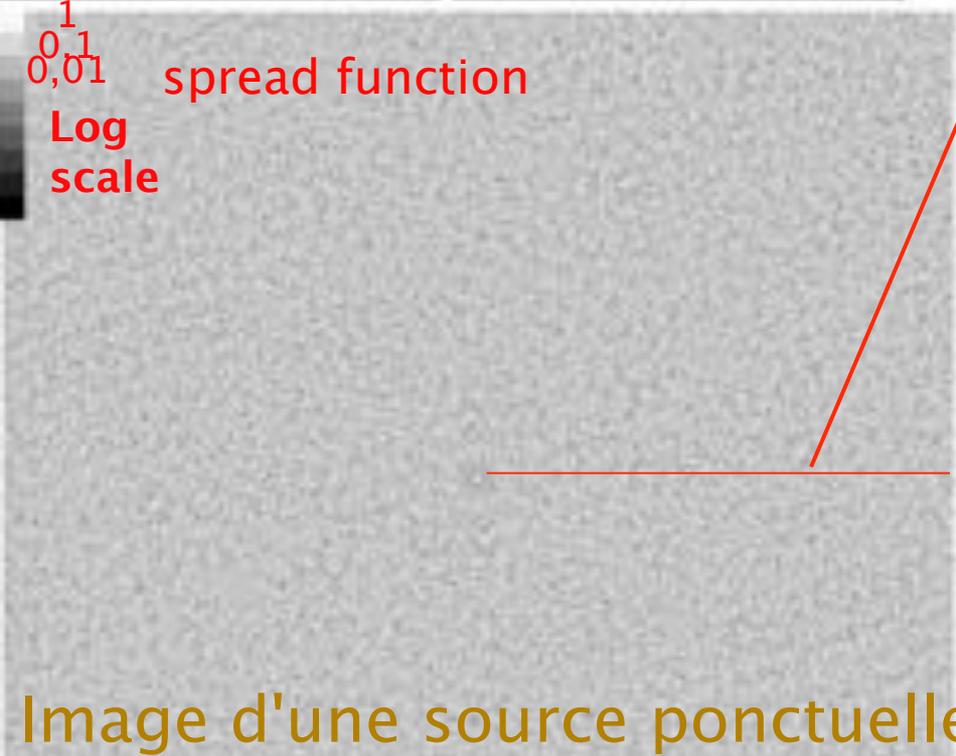
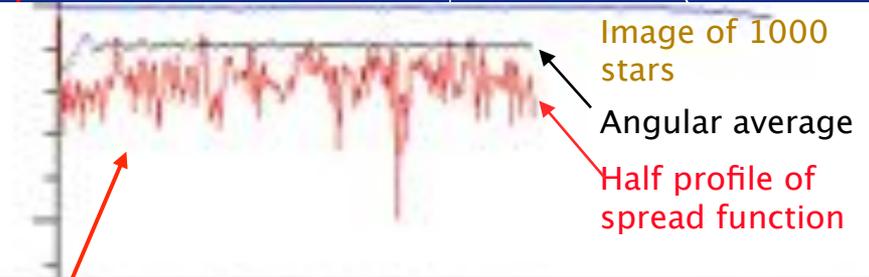
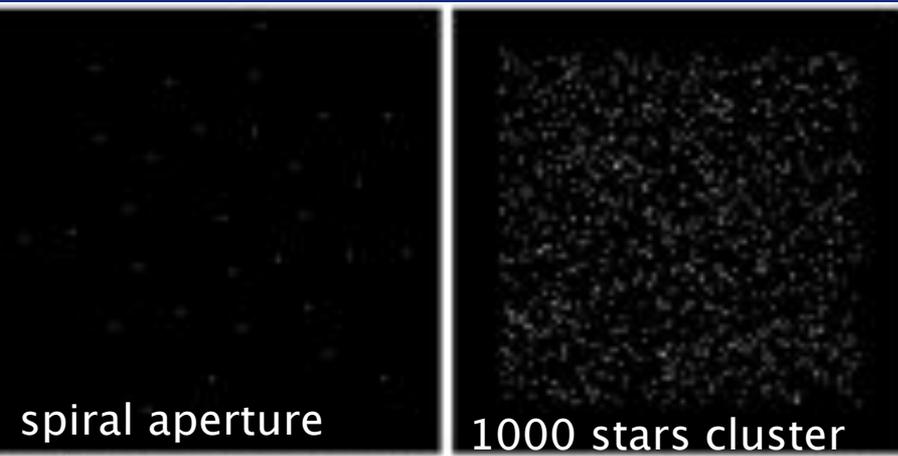
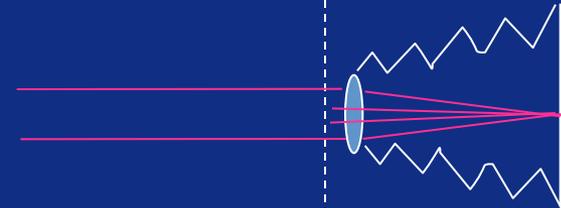
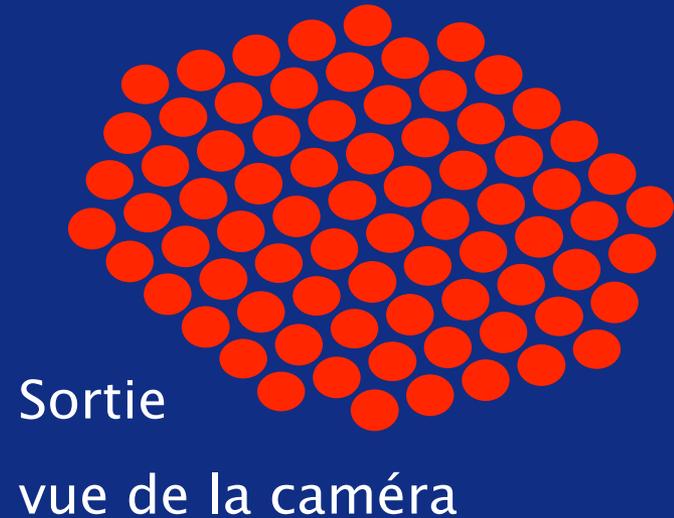
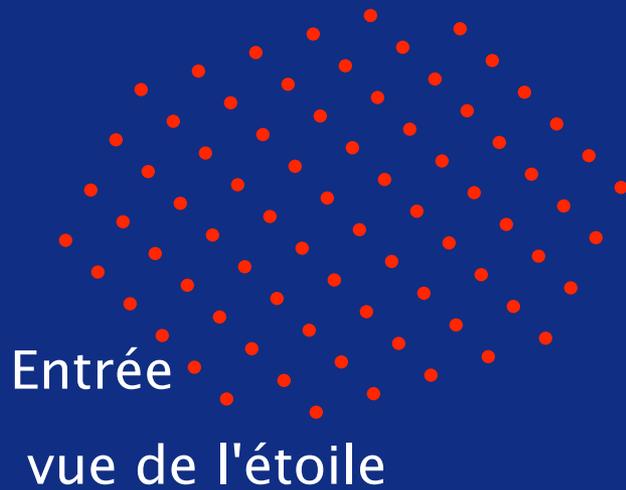


Image d'une source ponctuelle

soustraction d'un fond uniforme

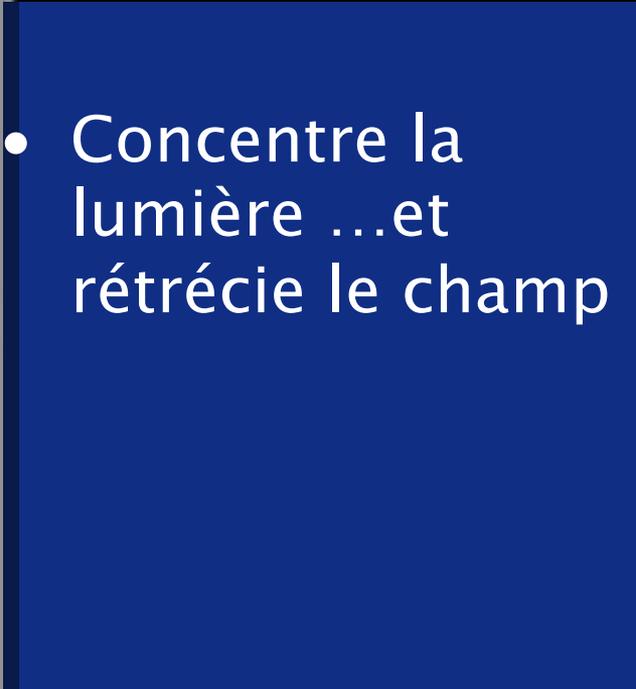
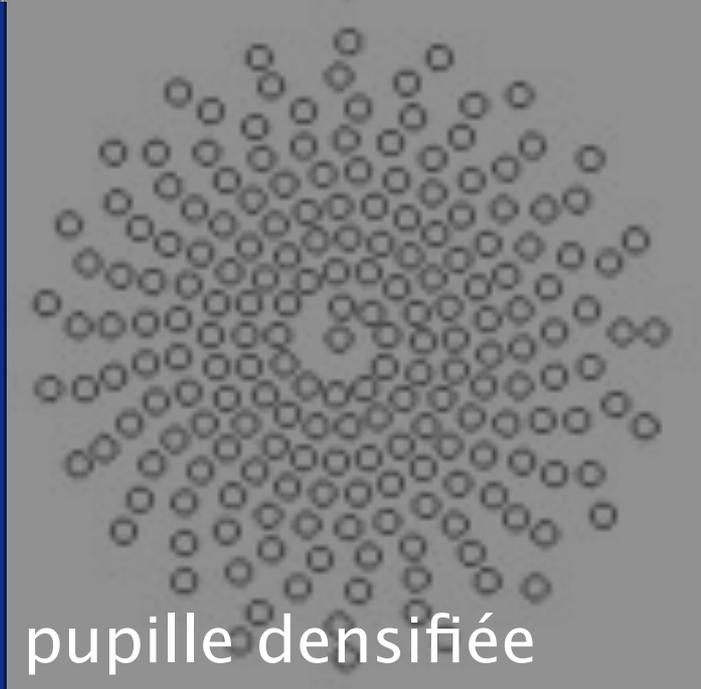
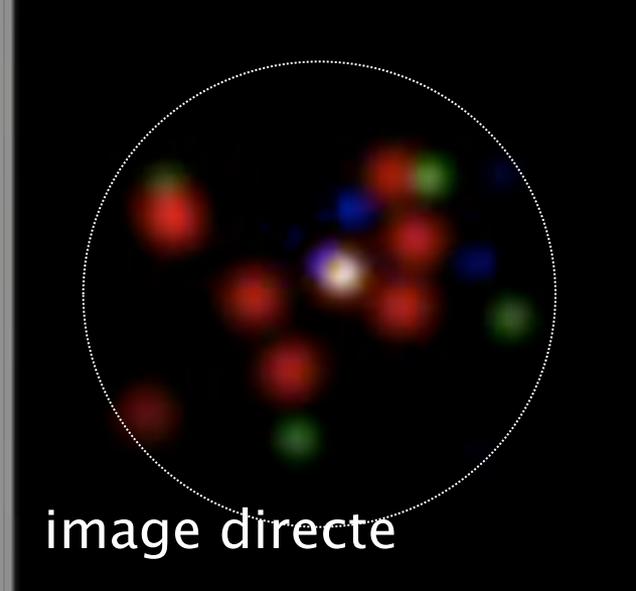
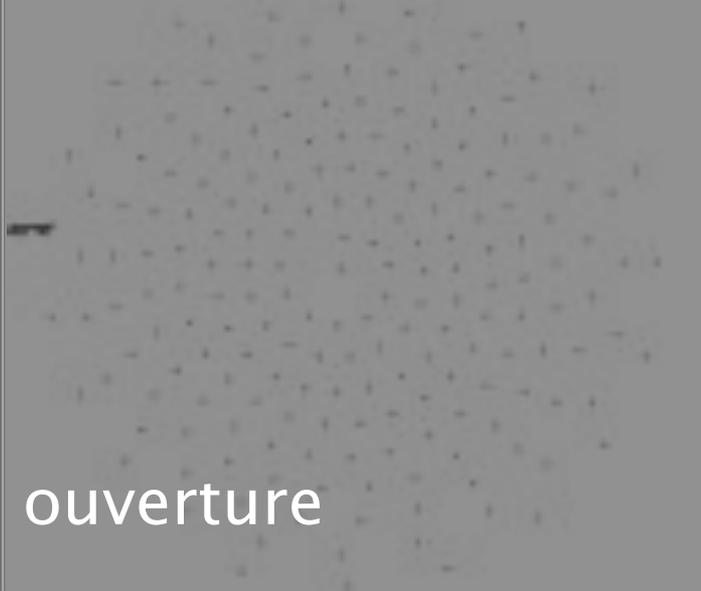
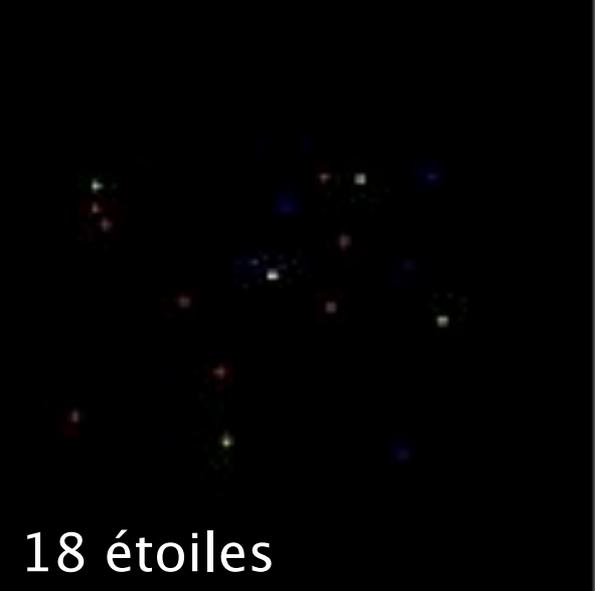
Améliorer l'interféromètre Fizeau:

densifier la pupille pour une image plus lumineuse

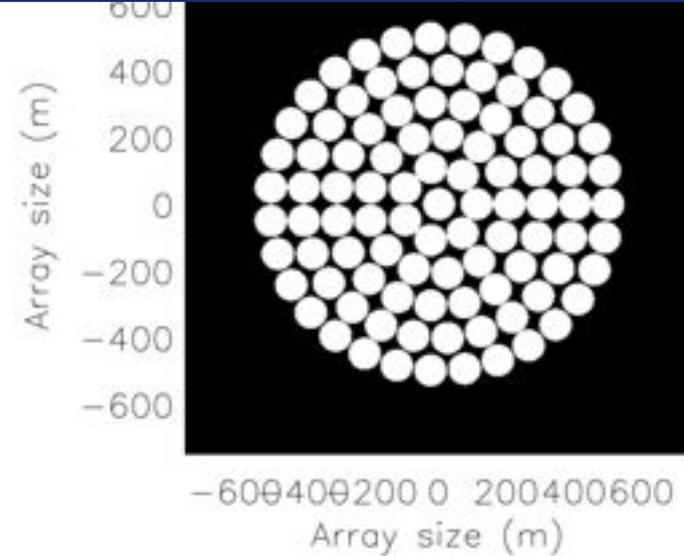
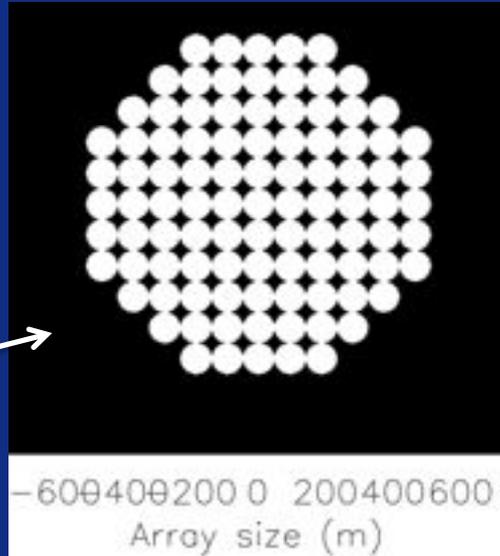


- sans modifier l'ouverture d'entrée ...
- rétrécit le halo de diffraction
- concentre sa lumière dans le pic d'interférence
- intensifie l'image qu'il forme

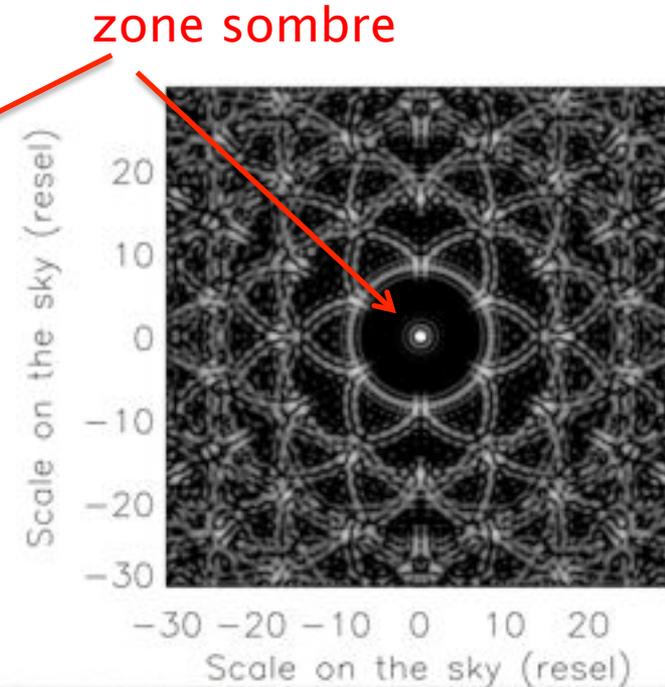
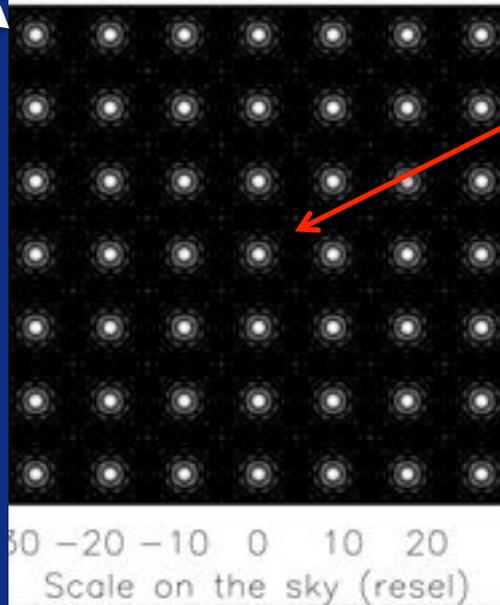
Image à pupille densifiée: hypertélescope



Simulations de Patru et al. (2008)



Patru et al., 2008



ouverture densifiée

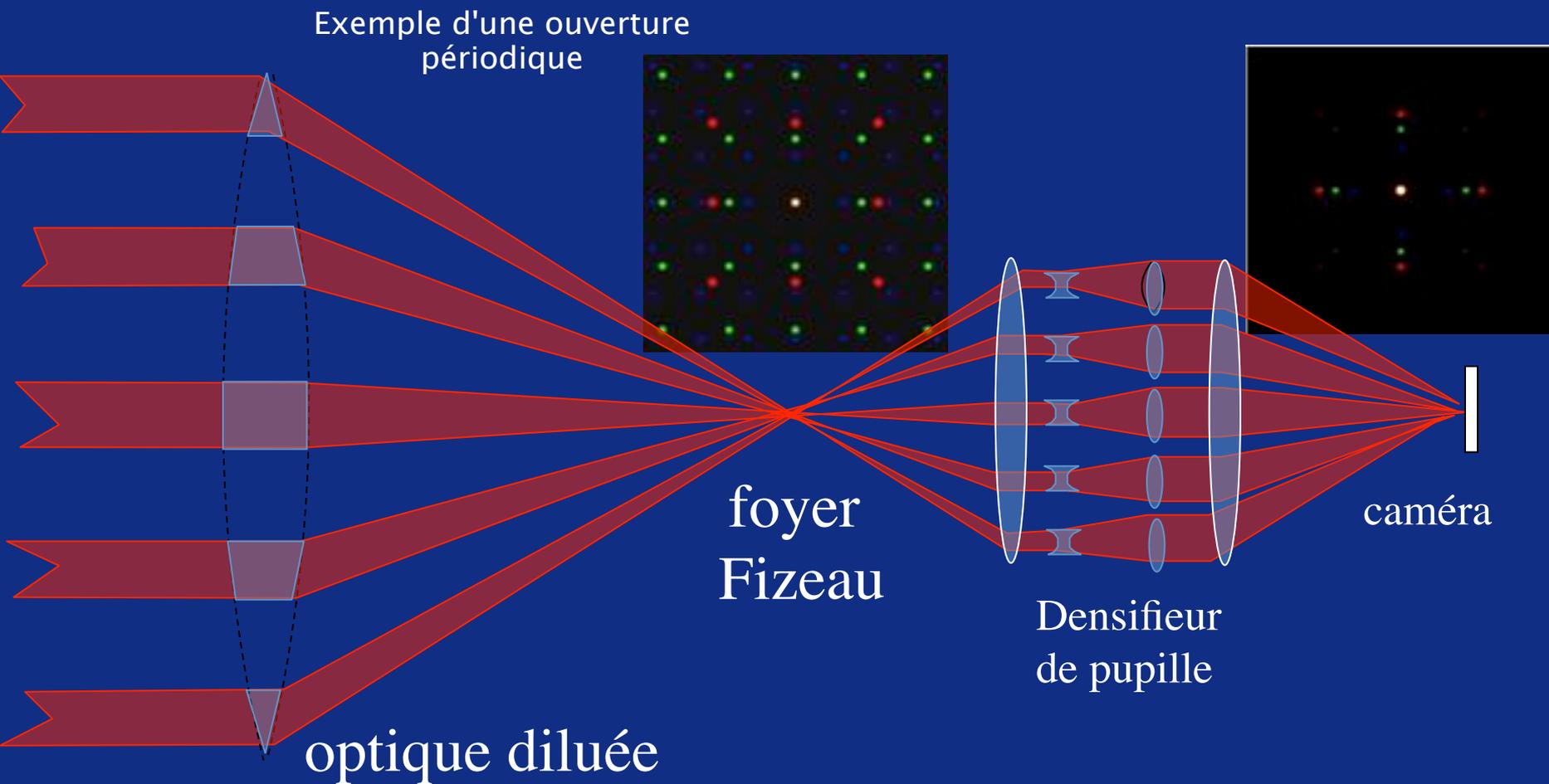
fonction d'interférence

zone sombre

Principe de l'hypertélescope

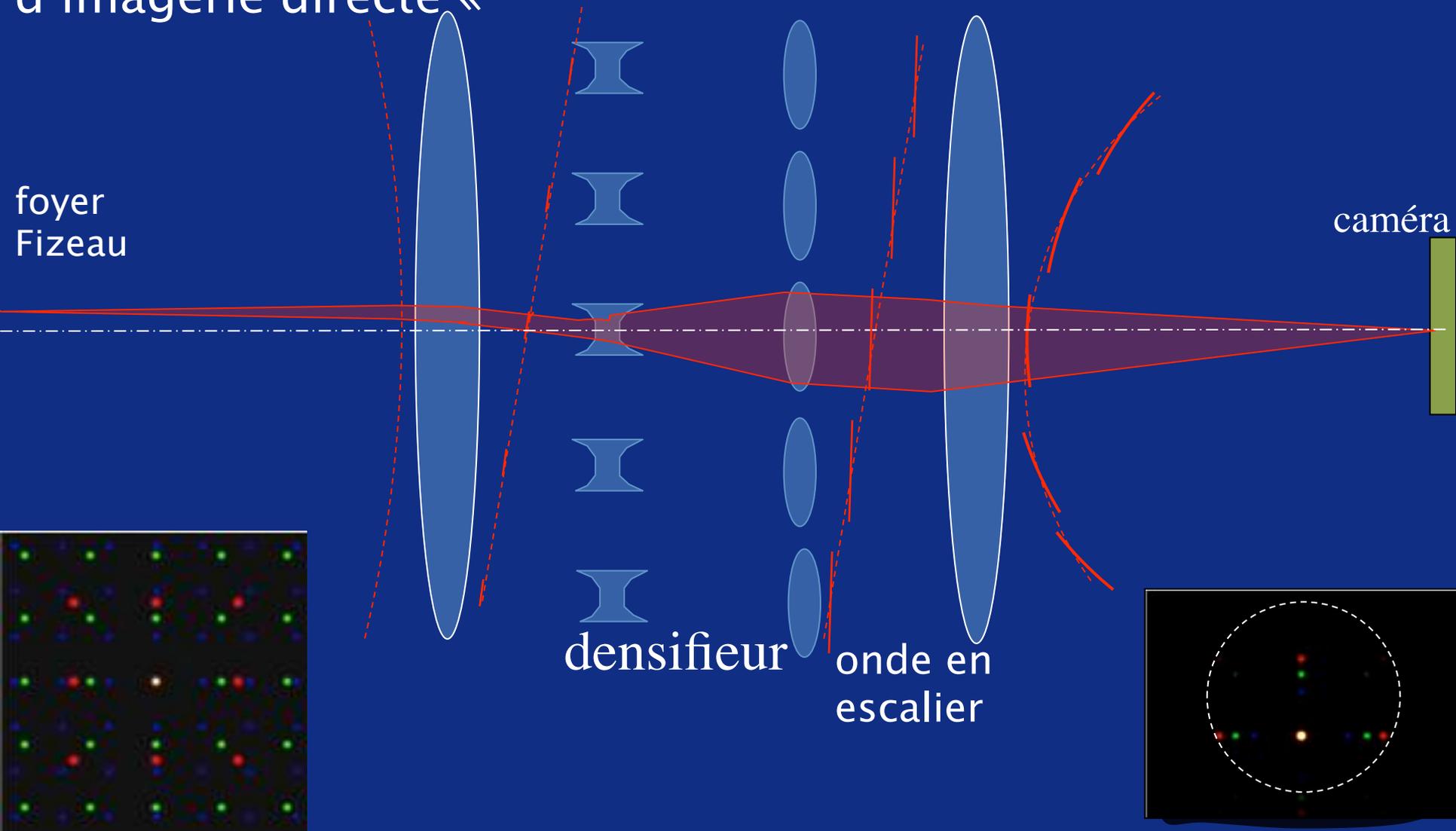
ou « interféromètre imageur multi-ouverture à pupille densifiée »

(Labeyrie A&A, 1996)

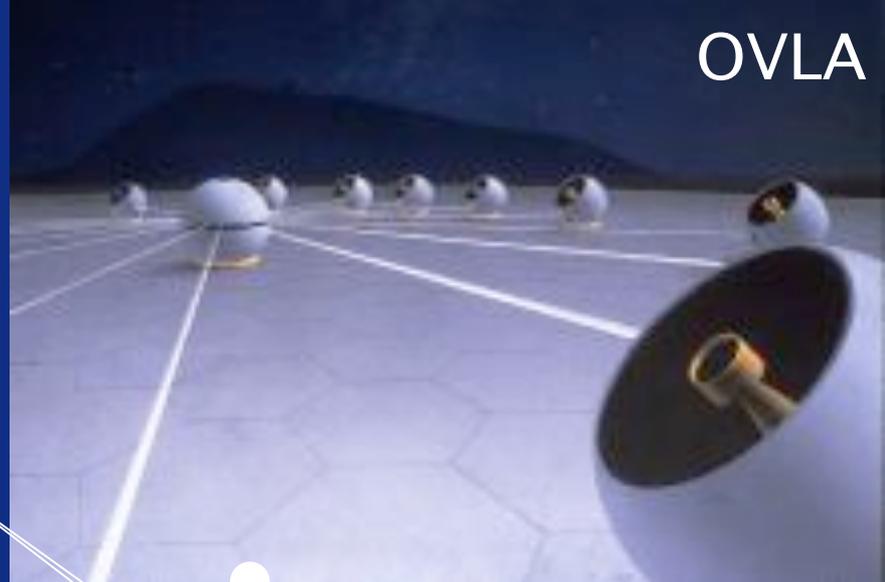


Etoile en dehors de l'axe

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



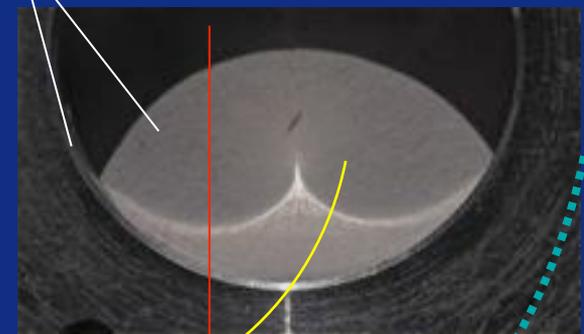
Types d'architectures hypertélescope



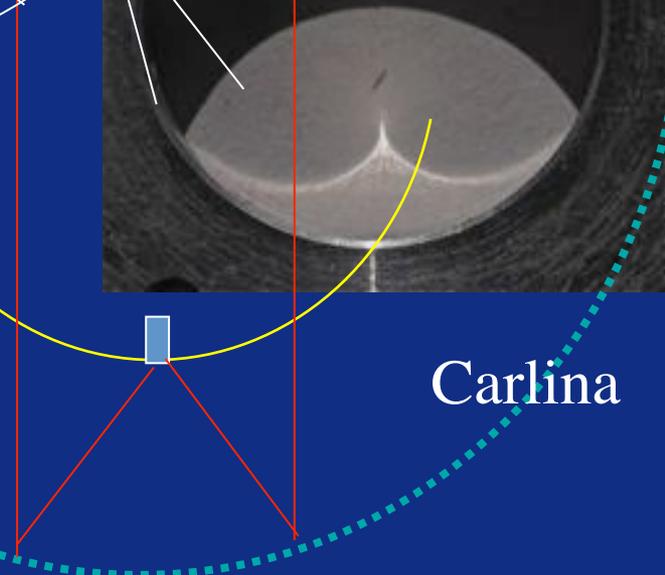
- plat
- paraboloïde pointable
- sphérique
- sphérique à parabolisation active



Carlina
acanthifolia

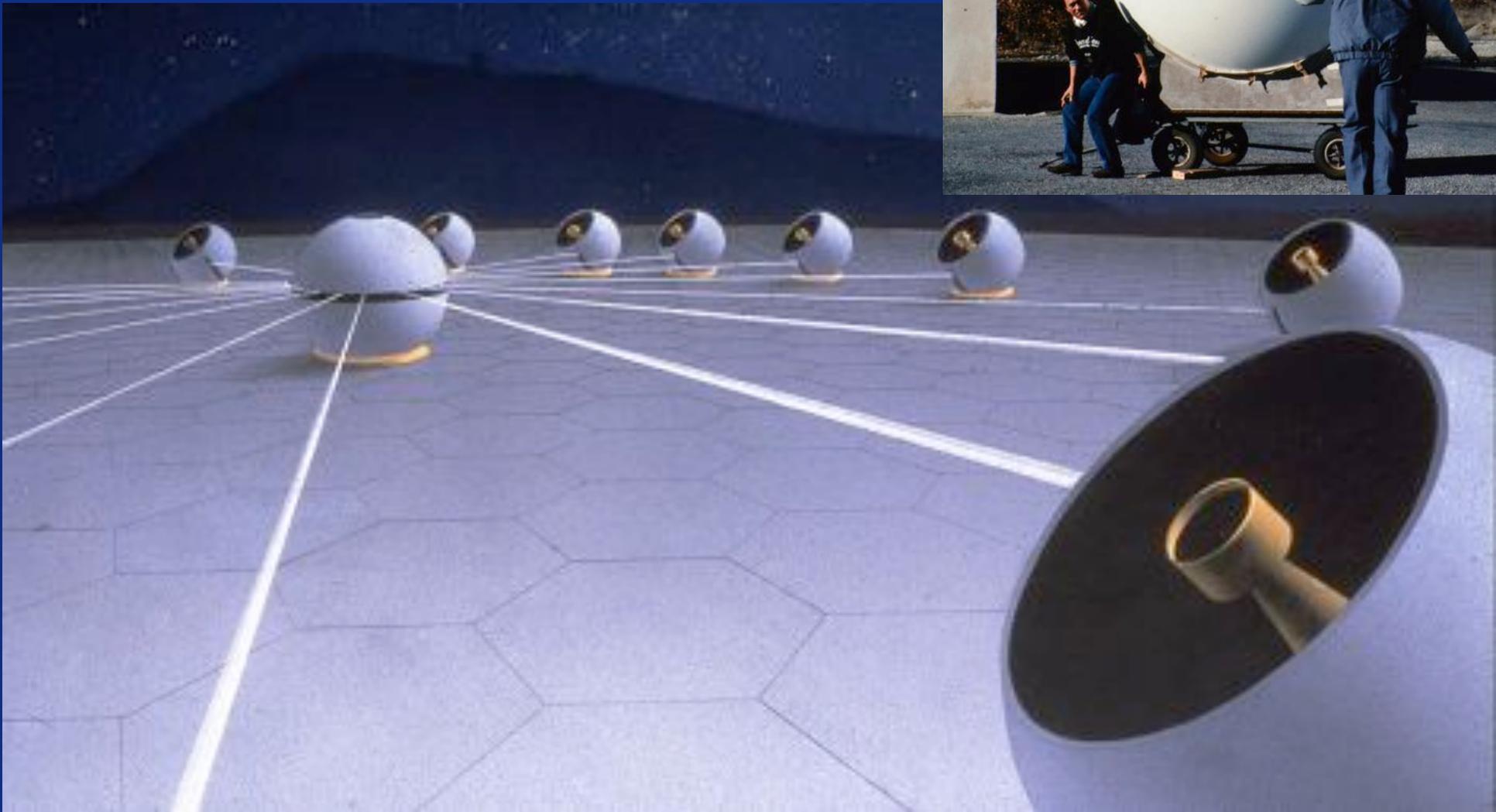


Carlina



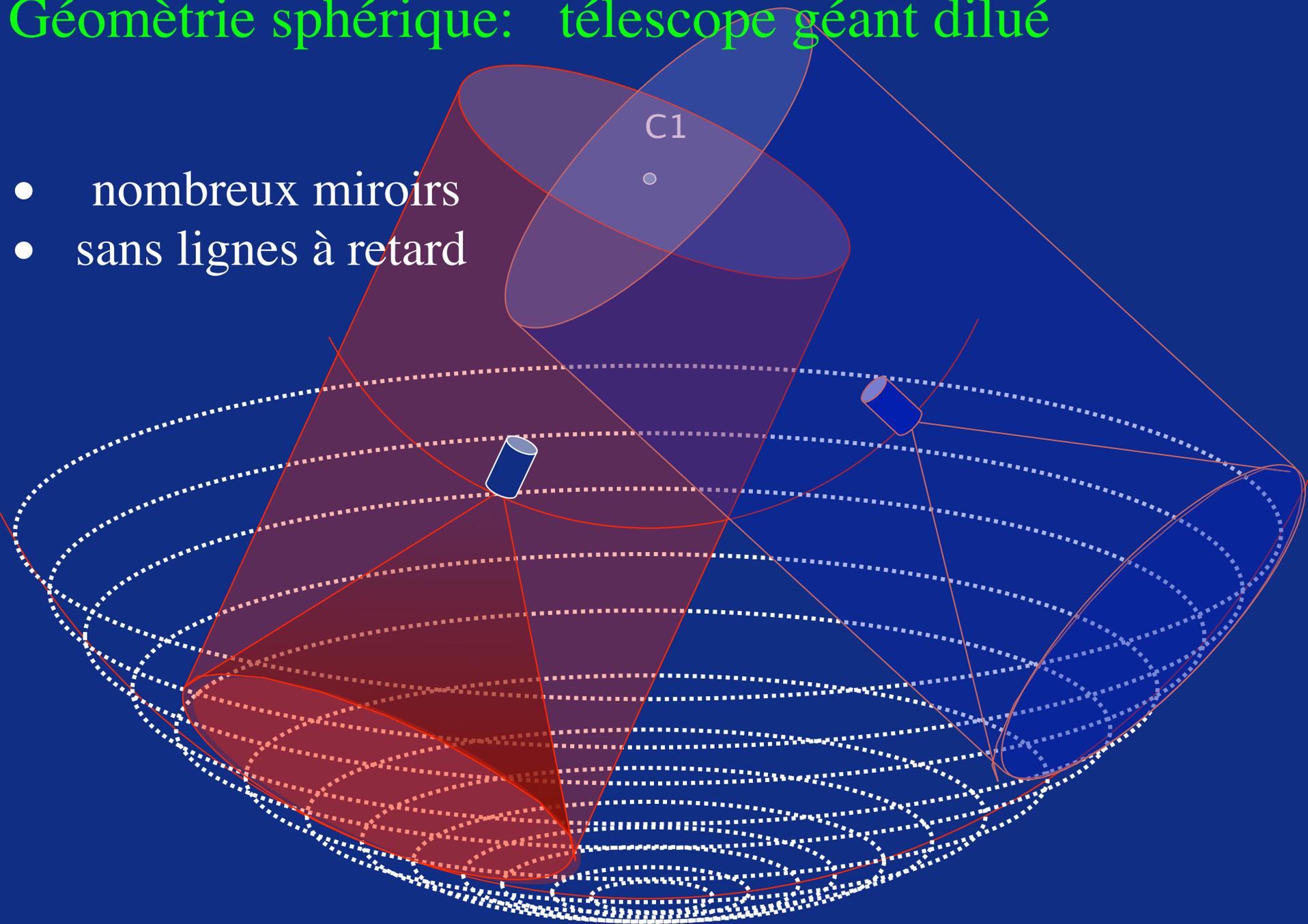
Hypertélescope à plat: abandonné pour une version sphérique

(architecture Carlina)



Géométrie sphérique: télescope géant dilué

- nombreux miroirs
- sans lignes à retard



Construction en Chine du radiotélescope FAST

- diamètre 500m
- déformation parabolique active



Deux options:

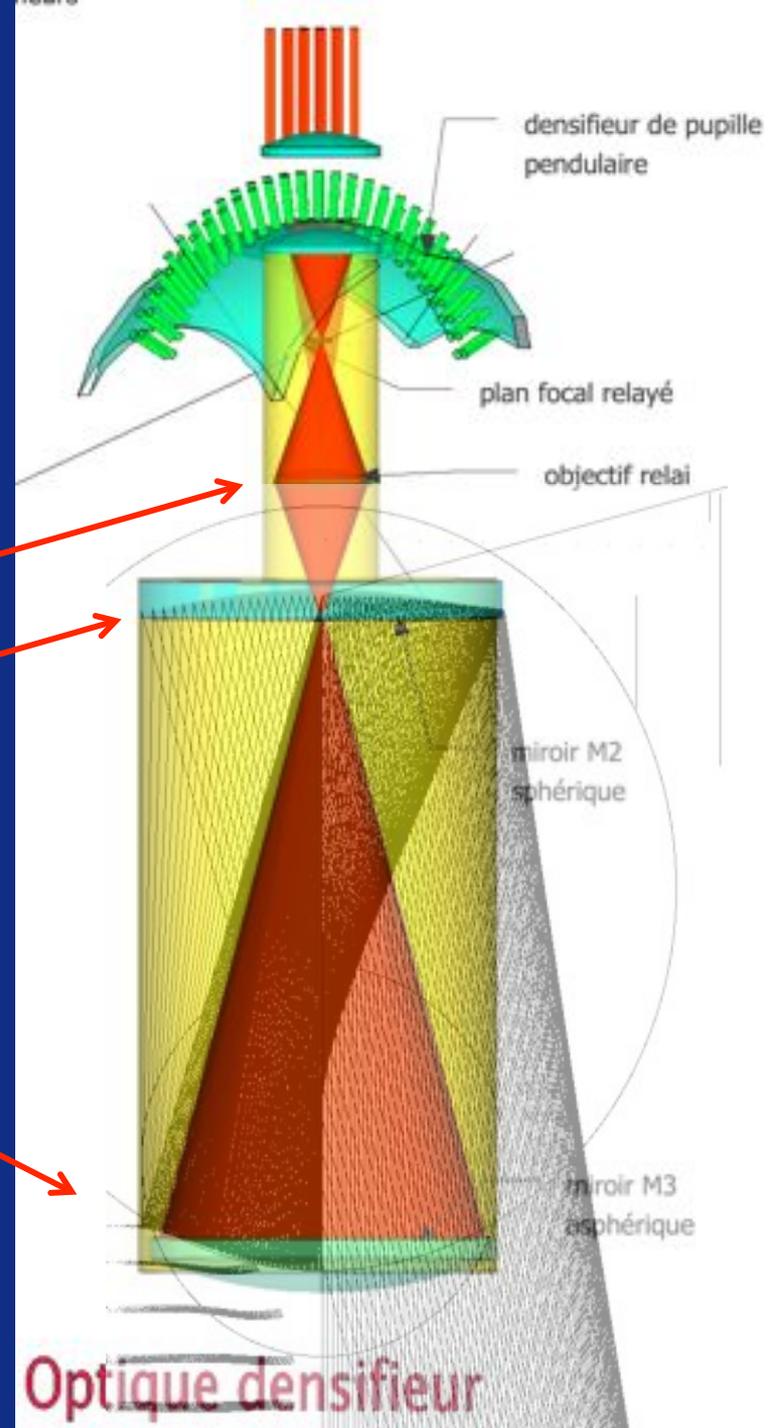
- M1 parabolique
- ou sphérique avec correcteur de Mertz

correcteur de Mertz

lentille

M2
sphérique

M3
asphérique

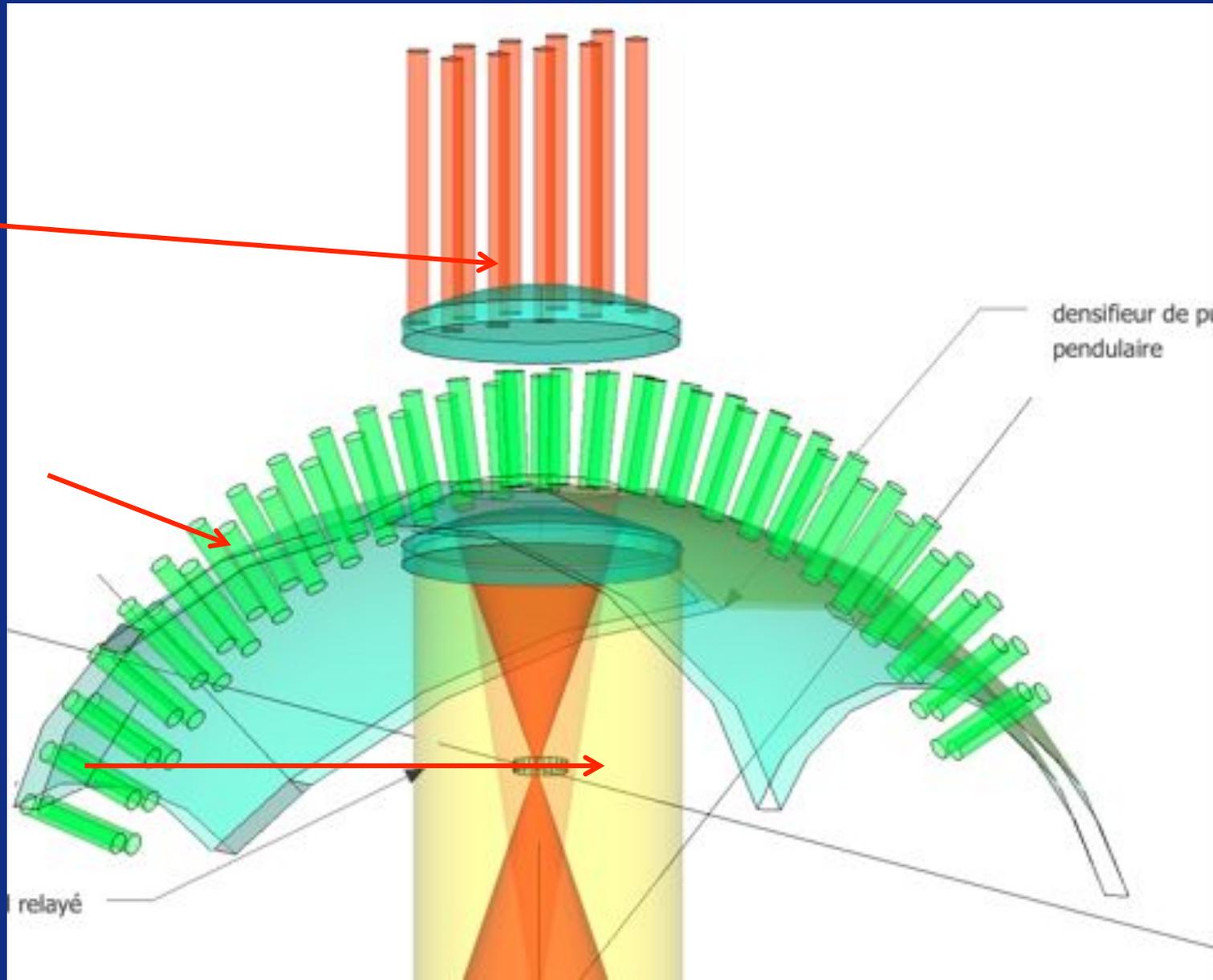


Densifieur pour pupille homothétique

pupille
densifiée

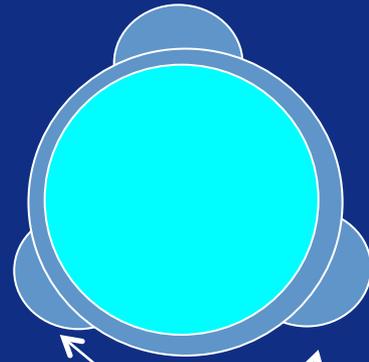
lentille dôme
et densifieur
pendulaire

foyer $F1$ et
lentille de
champ



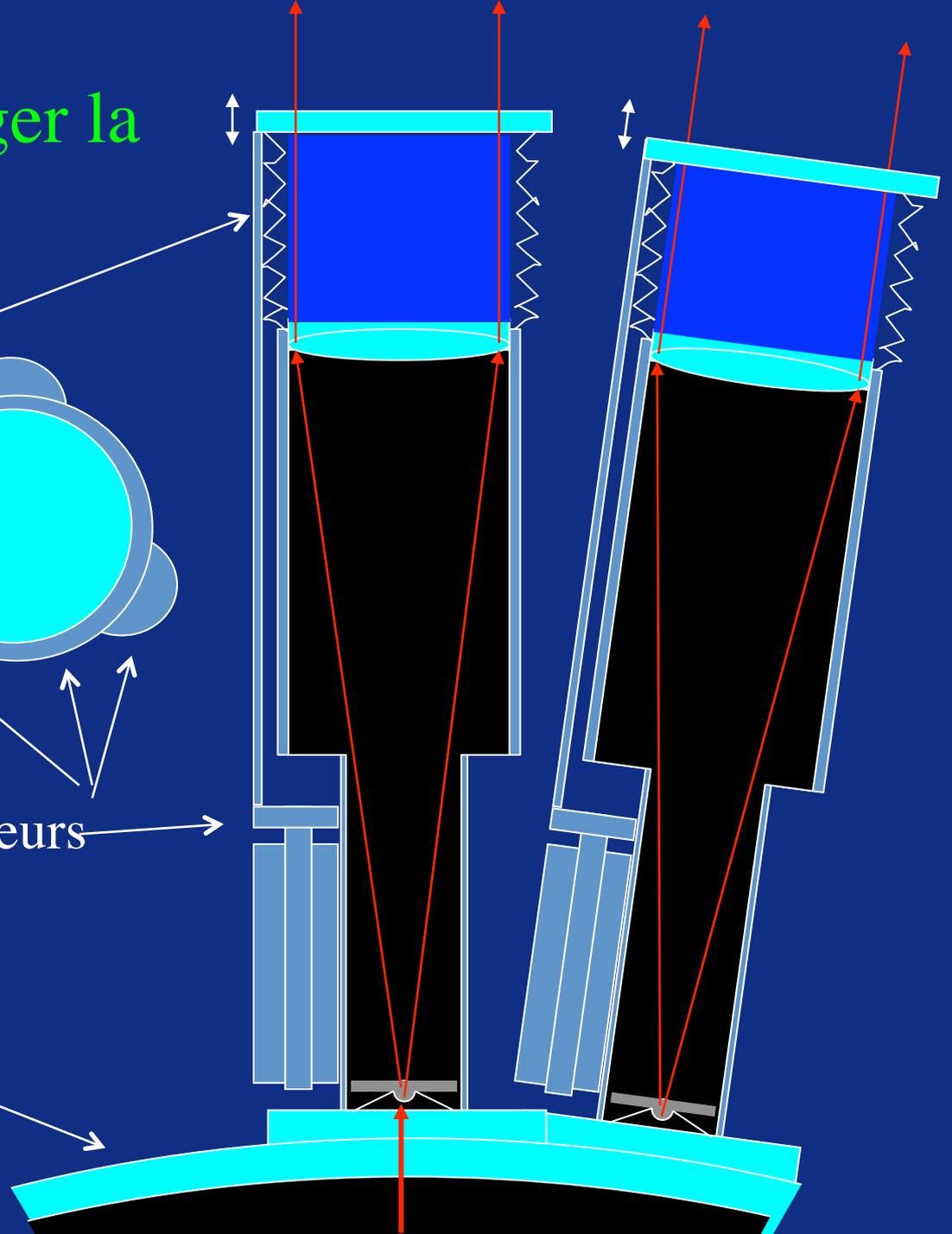
Éléments densifieurs adaptatifs pour corriger la turbulence

élastomère optique
ou liquide



3 actuateurs

lentille dome



Essai initial dans les Pyrénées espagnoles

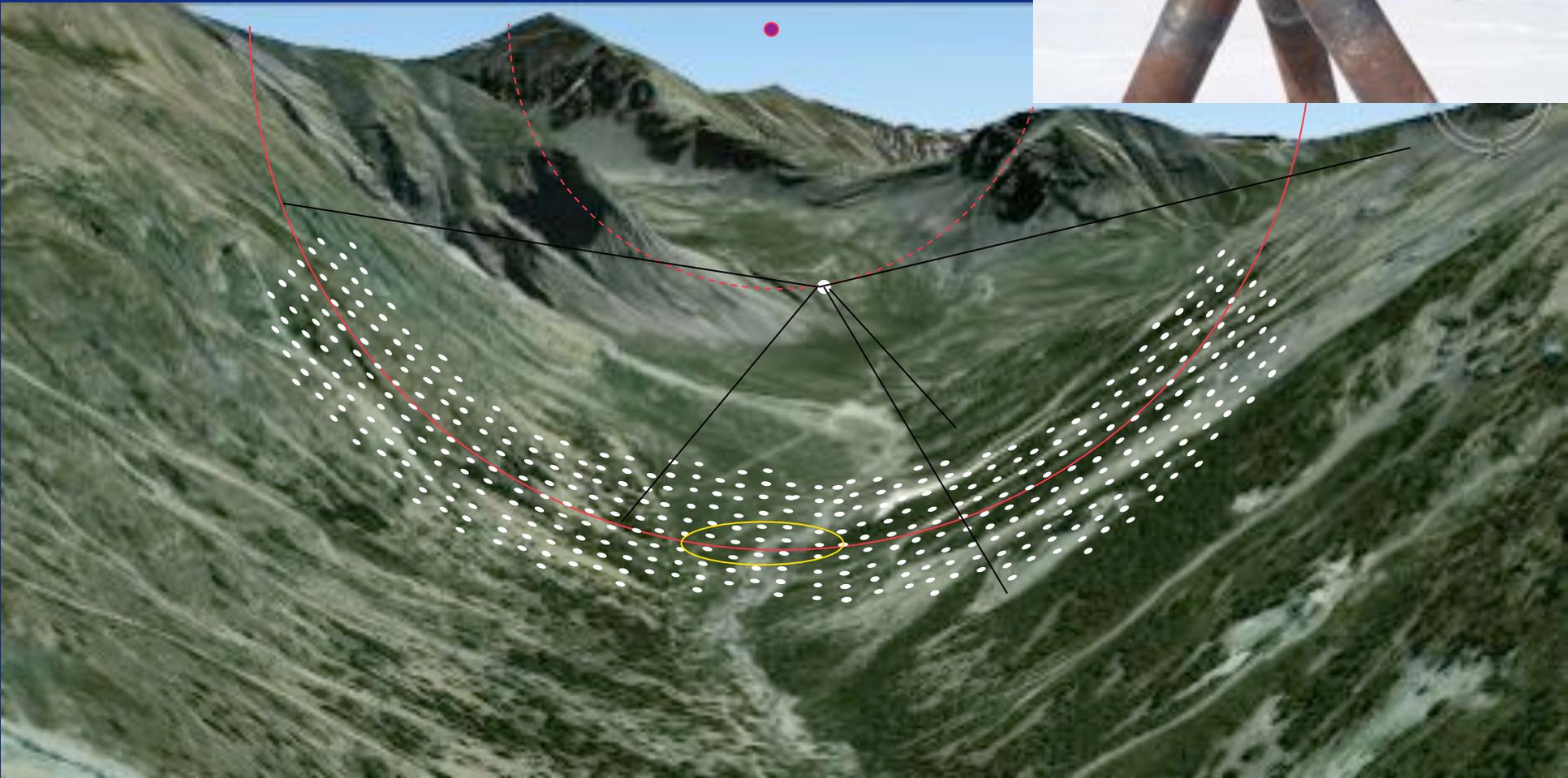


Site de l'hypertélescope en Ubaye, vallon de la Moutière, altitude 2100m



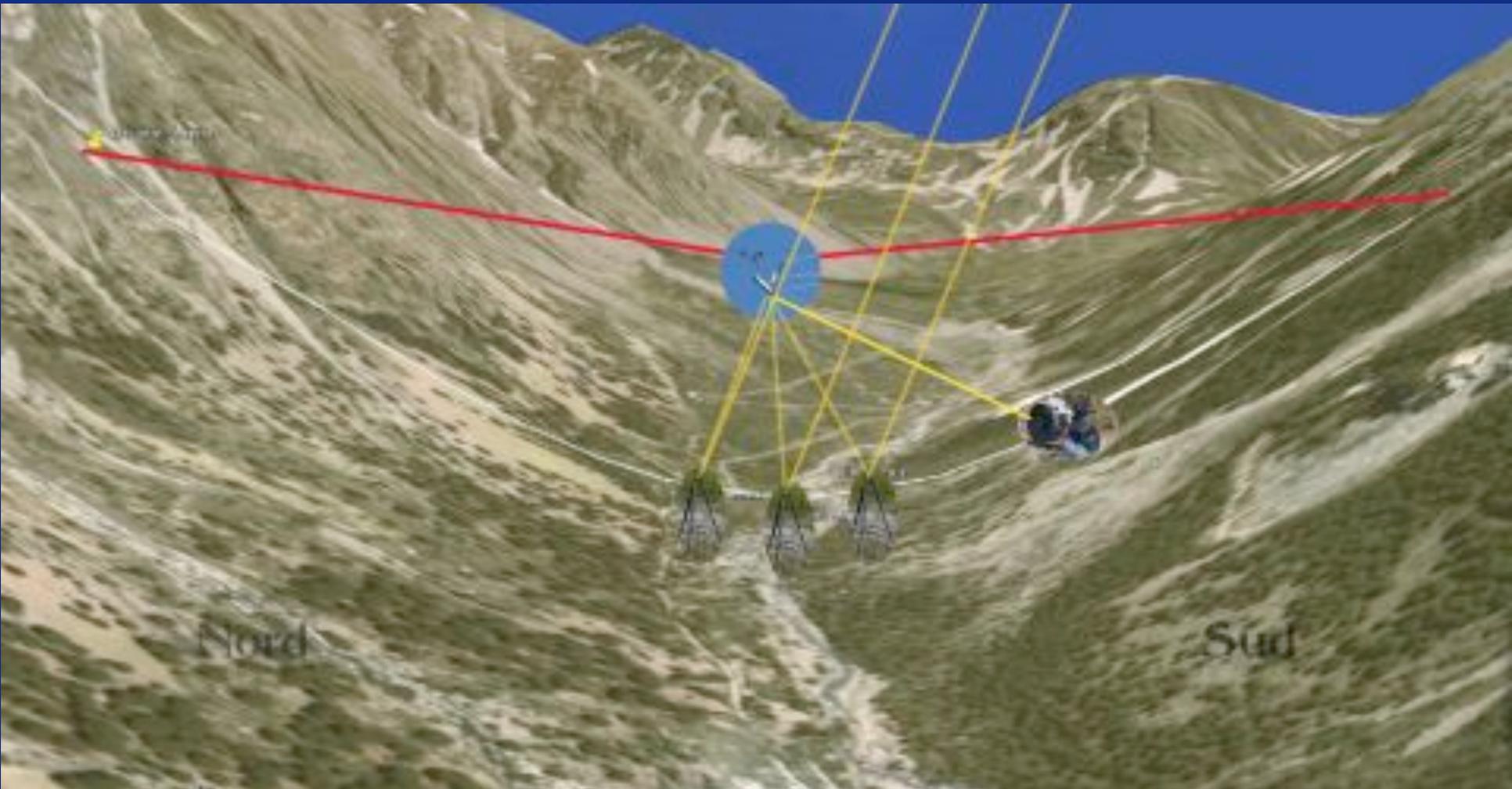
Un prototype d'architecture Carlina: Hypertélescope Ubaye »

Vallon de la Moutière, Ubaye



Nacelle focale suspendue

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



Le laboratoire-atelier



Pourquoi des miroirs si petits ?

- La théorie dit: « à surface collectrice et dimension donnée de méta-ouverture, des miroirs petits et nombreux donnent une meilleure image »
- ... car l'onde est mieux échantillonnée
- Aussi techniquement avantageux...
- ... et moins coûteux : le verre des miroirs est plus mince

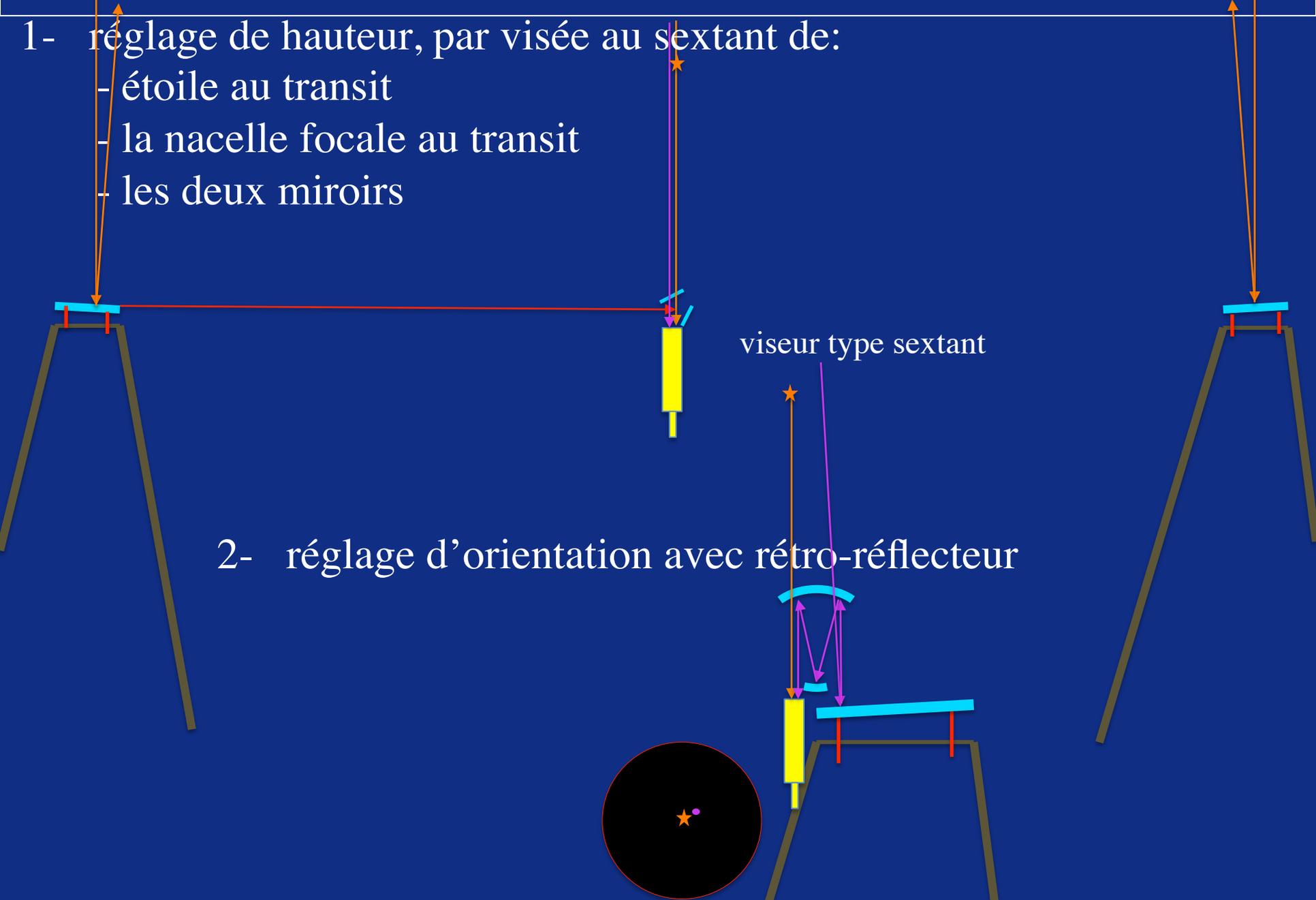
Alignement d'un miroir



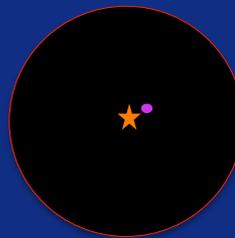
Co-sphérisation des éléments de méta-miroir M1

1- réglage de hauteur, par visée au sextant de:

- étoile au transit
- la nacelle focale au transit
- les deux miroirs



2- réglage d'orientation avec rétro-rélecteur

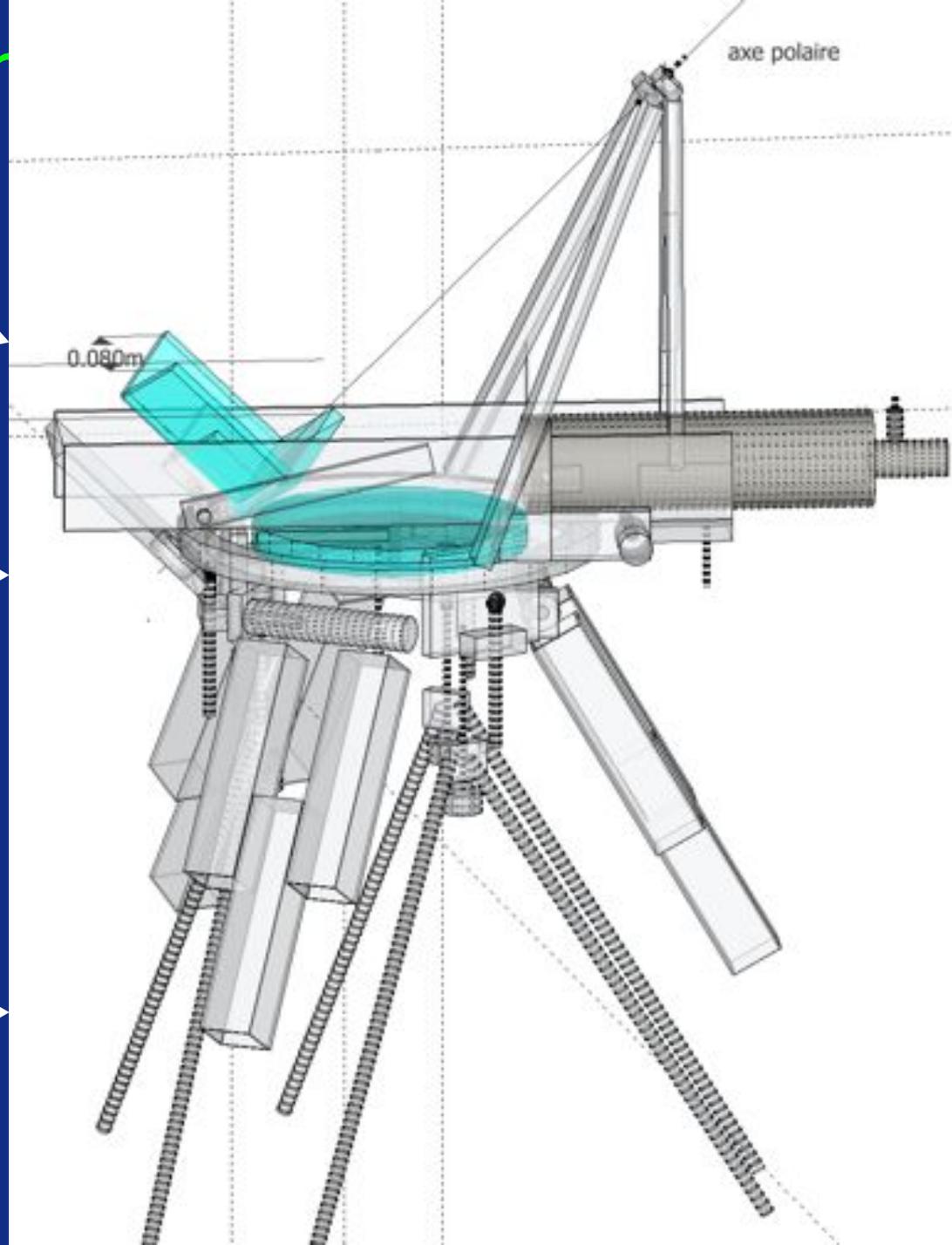


Viseur d'alignement amovible

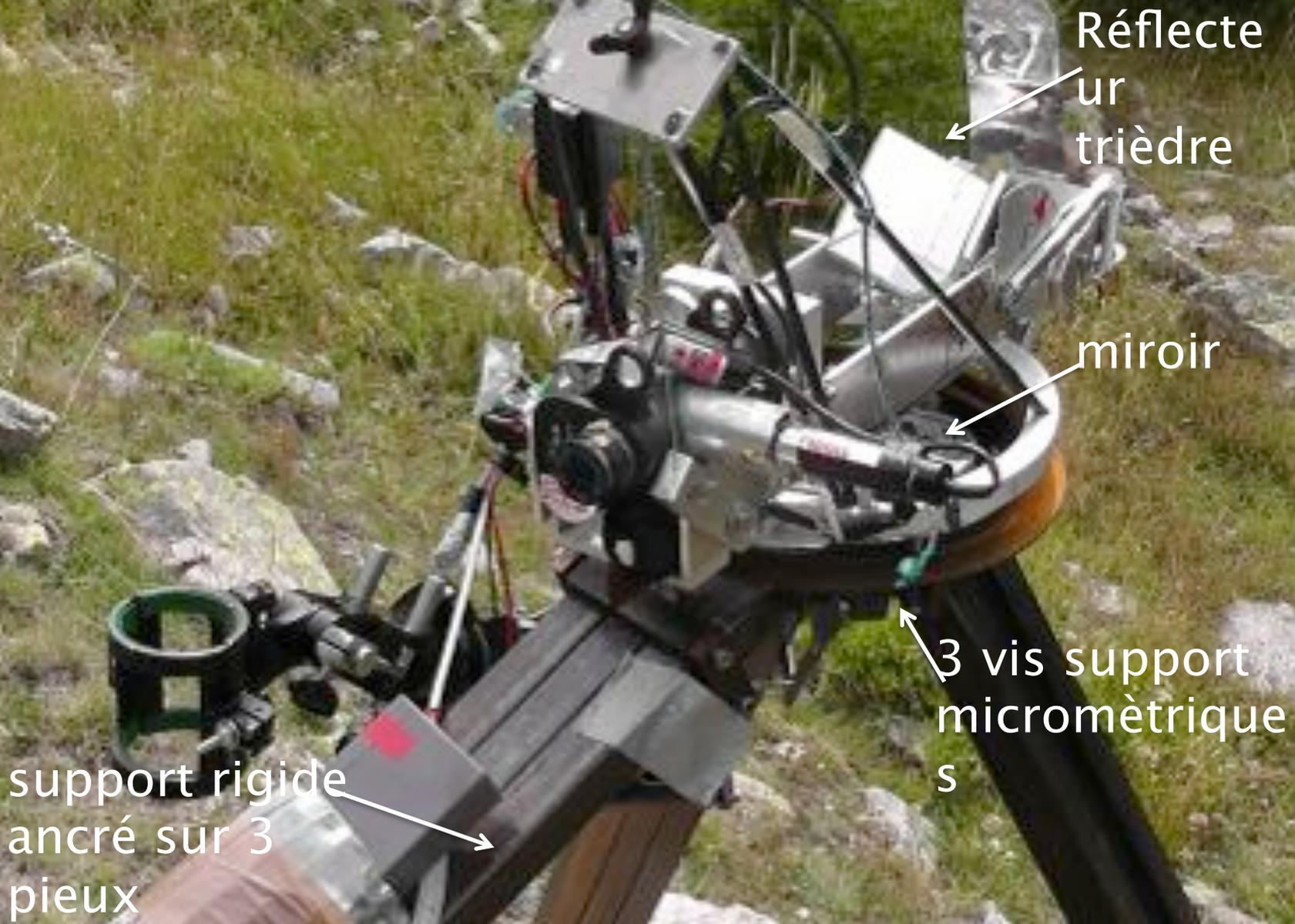
séparatrice
trièdre

miroir

tripode
support



Miroir et viseur d'alignement, amovible



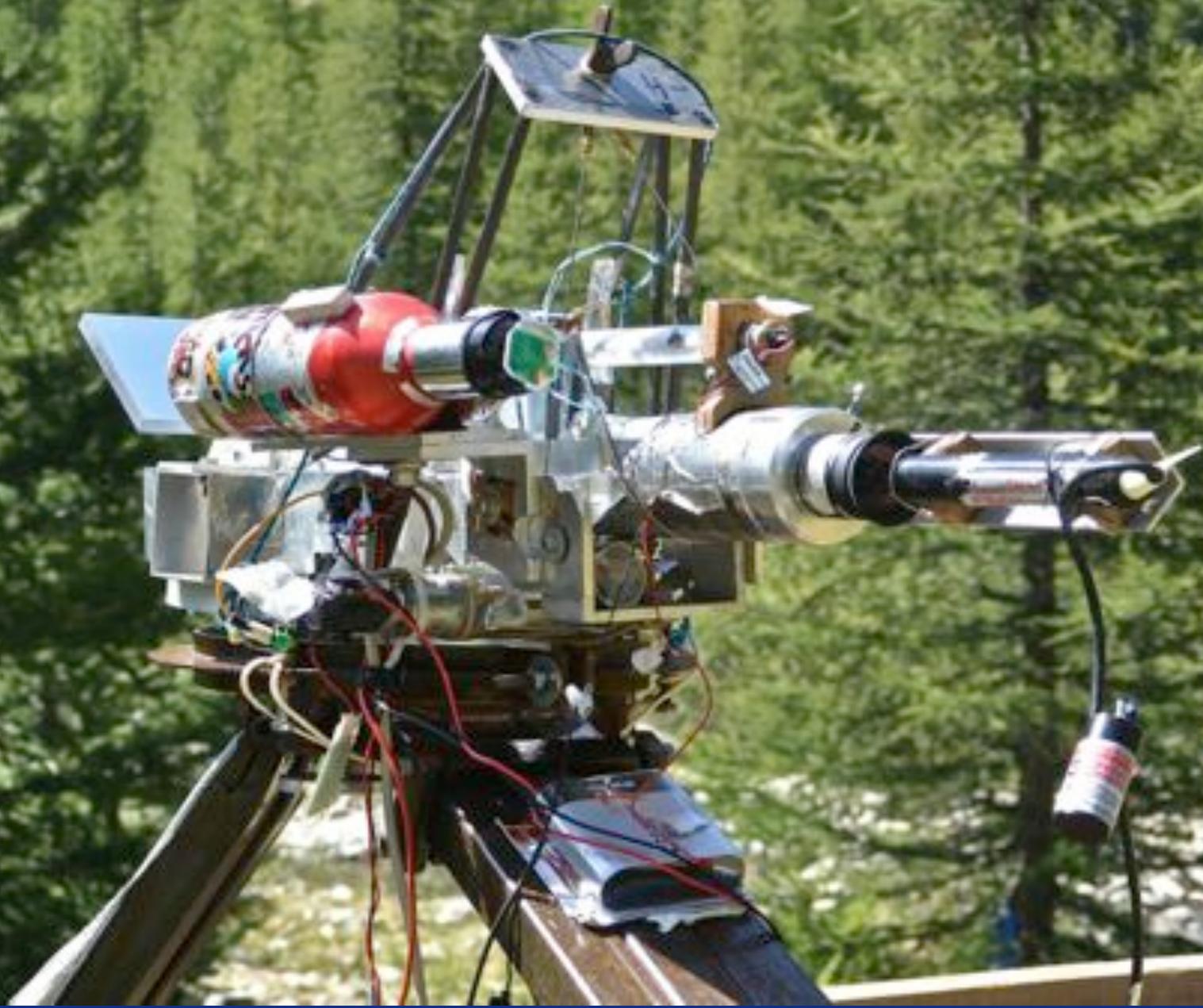
Réflecteur trièdre

miroir

3 vis support micrométriques

support rigide ancré sur 3 pieux

Viseur amovible de réglage de l'inclinaison



Viseur d'alignement des miroirs : version B



miroir trièdre



Viseurs auxiliaires près du miroir central

laser d'alignement du
train coudé

télémetre laser

viseur amovible de réglage
d'inclinaison du miroir

miroir M1



Guidage et autoguidage de la nacelle

- logiciels par R.Prud'homme, D.Mourard & P.Nunez
- électronique par E.Bondoux



Viseur axial pour « cosphérisation piston » par équerre optique



Nacelle focale



- mobile pour suivre l'image de l'étoile
- pilotée comme une marionnette par 6 fils...
- ... actionnés par des treuils ...
- ... et un ordinateur



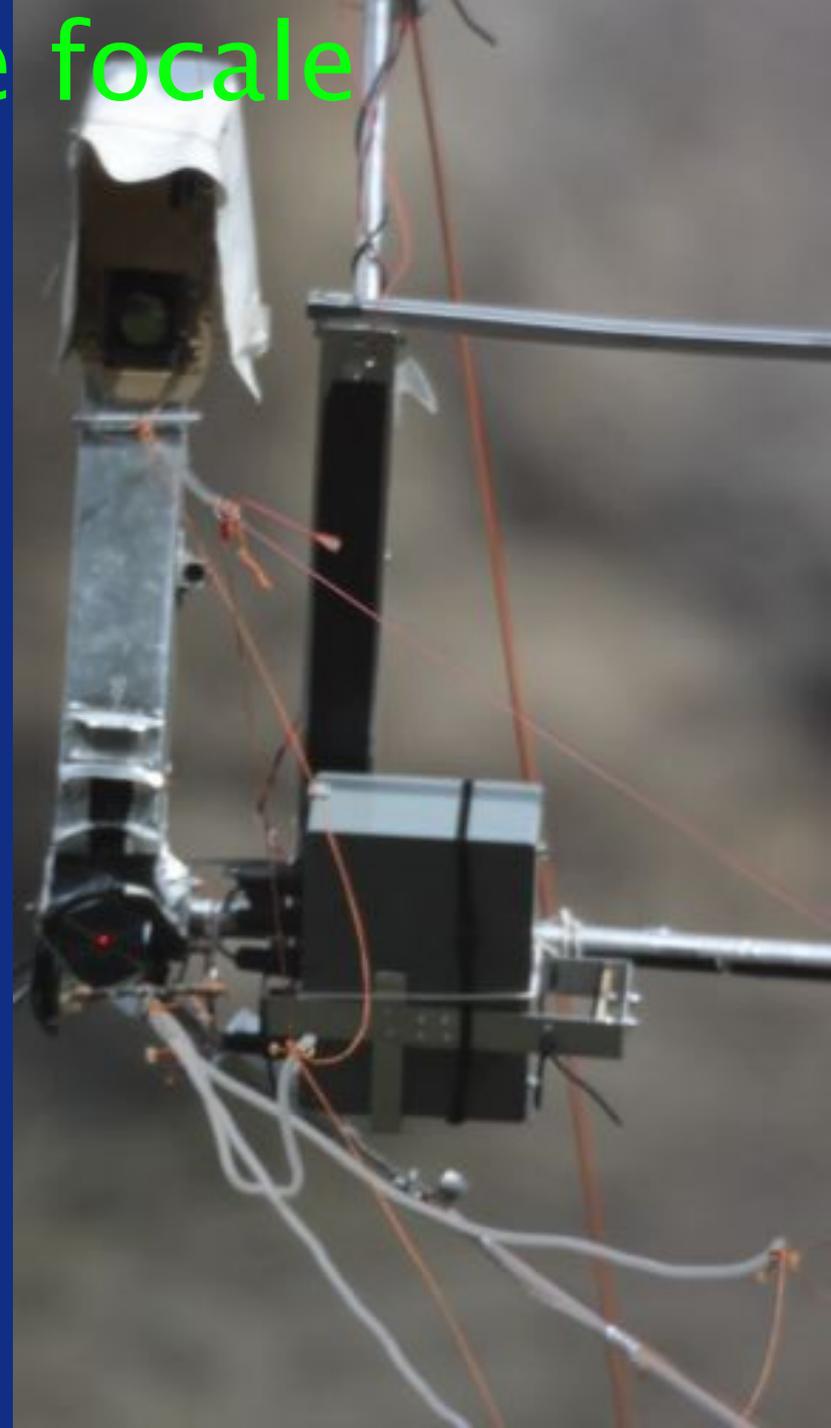
L'un des trois treuils d'entraînement horaire

- deux à l'Est, un à l'Ouest



Pilotage de la nacelle focale depuis le télescope coudé éloigné de 186m

- Une heure de poursuite au transit
- stabilité millimétrique
- radio-commande du miroir coudé



Foyer coudé dans l'ubac

première lumière sur Véga obtenue en Septembre 2014... sans franges



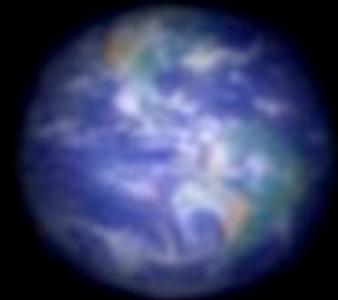
Interférences volantes



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



Propositions d'hypertélescopes pour l'espace

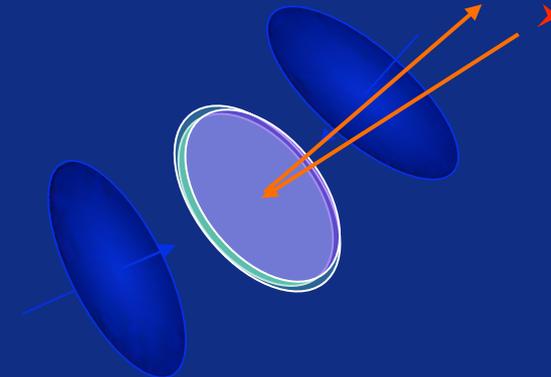


- NASA: « Exo-Earth Discoverer » (2000)
- ESA: « Luciola »
- ESA Hypertelescope Optical Observatory »
- avec option « Laser Trapped Hypertelescope Flotilla » (2012)

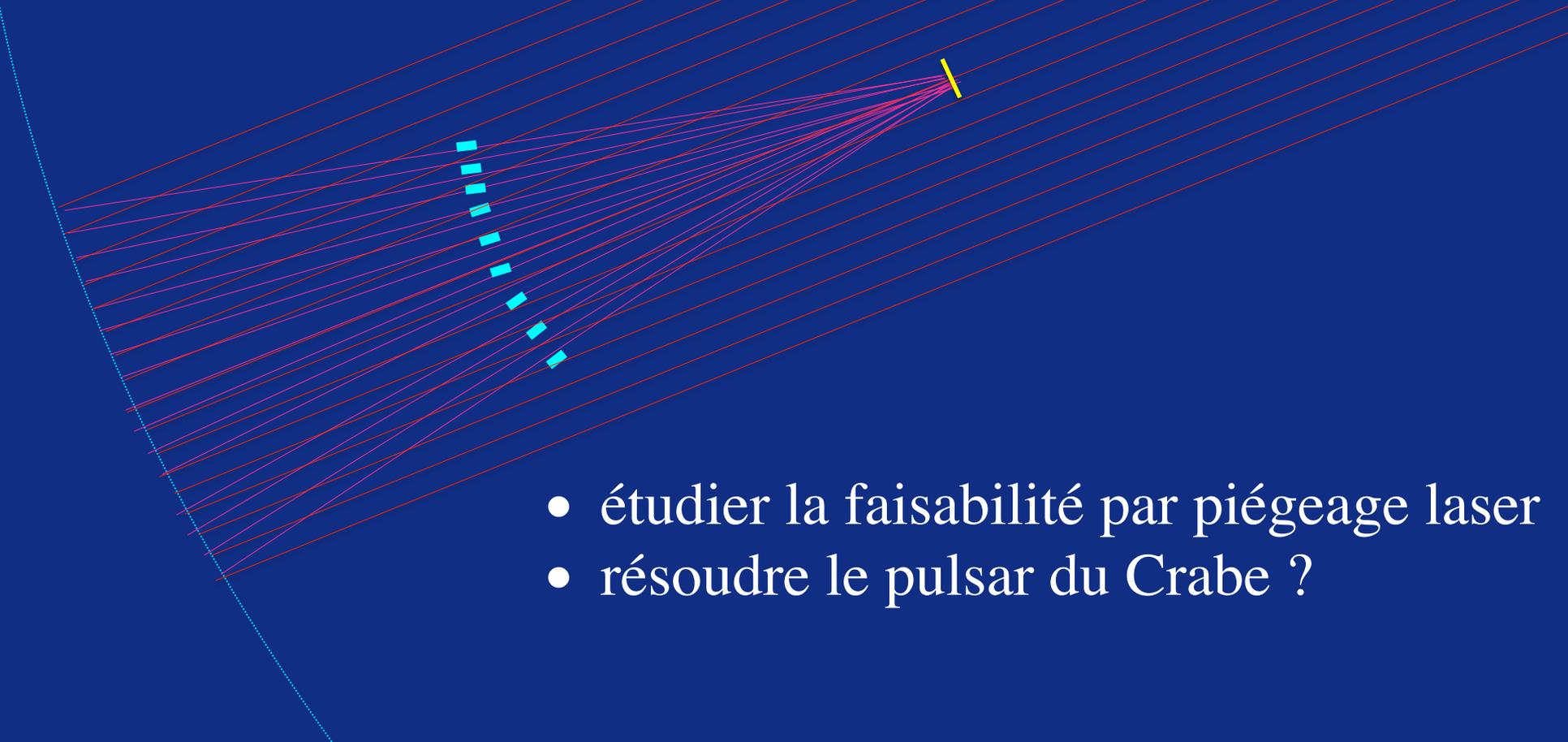


Essais en labo de « Laser Trapped Hypertelescope Flotilla »

- sous ultra-vide, par U.Bortolozzo et S. Residori
- aussi à ESA/ESTEC par T.Lagadec
- aussi a JPL par M.Quadrelli



Méta-ouverture jusqu'à 1 million de km:
divergence diffractive de faisceaux minces évitable
par relais « périscope » ?



- étudier la faisabilité par piégeage laser
- résoudre le pulsar du Crabe ?

Etapes futures ?

- hypertélescopes pour images directes riches
 - sur Terre : 100 ou 1000 ouvertures dans une méta-essais entamés en Ubaye, puis ouverture de 1km dans les Andes ou l'Himalaya « Extremely Large Hypertelescope » (ELHYT)
 - images directes avec optique adaptative
 - dans l'espace: million de miroirs de 3cm, piégés par laser (Labeyrie et al., 2009)
 - méta-ouverture jusqu'à 100,000km: résoudre l'étoile à neutrons dans le pulsar du Crabe ?

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
- ... en observant des changements de couleur saisonniers

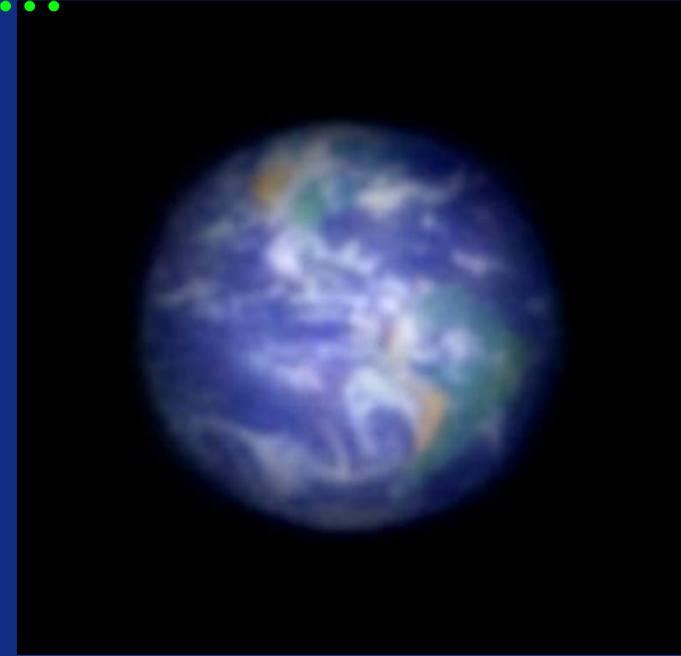


image simulée d'une exo-Terre à
10 années-lumière
hypertélescope « Exo-Earth
Imager » de 100km (Labeyrie,
Science, 1999)

L'équipe en Aout 2013:

professionnels, amateurs, étudiants, bénévoles, ils campent la-
entre Juin & Octobre

film par Martine Roussel (2012, 17mn):

<https://lise.oca.eu>



Quelques outils mathématiques utiles

- lumière:
 - rayons...
 - transformation de Fourier: diffraction, interférences
 - équations de Maxwell: micro-optique, polarisation
 - mécanique quantique: spectroscopie, piégeage d'atomes
 - Relativité Générale: lentilles et ondes gravitationnelles
 - statistique de Bose-Einstein: détection de photons
 - marche aléatoire: tavelures
- mécanique céleste

Astronomes amateurs et bénévoles: ils contribuent efficacement...

- calcul optique (André Rondi)
- logiciel, électronique (Rémi Prud'homme, Martine Roussel, Bernard Trégon)
- topographie (Jérôme Maillot)
- organisation (Jordi Pijoan, Bruno Lac)
- mécanique (François Dumon)



Association « Hypertélescope LISE »: co- finance le projet
www.hypertelescopelise.fr

autres sites:

<http://www.college-de-france.fr/site/antoine-labeyrie/activites-exterieures.htm>

<https://lise.oca.eu>