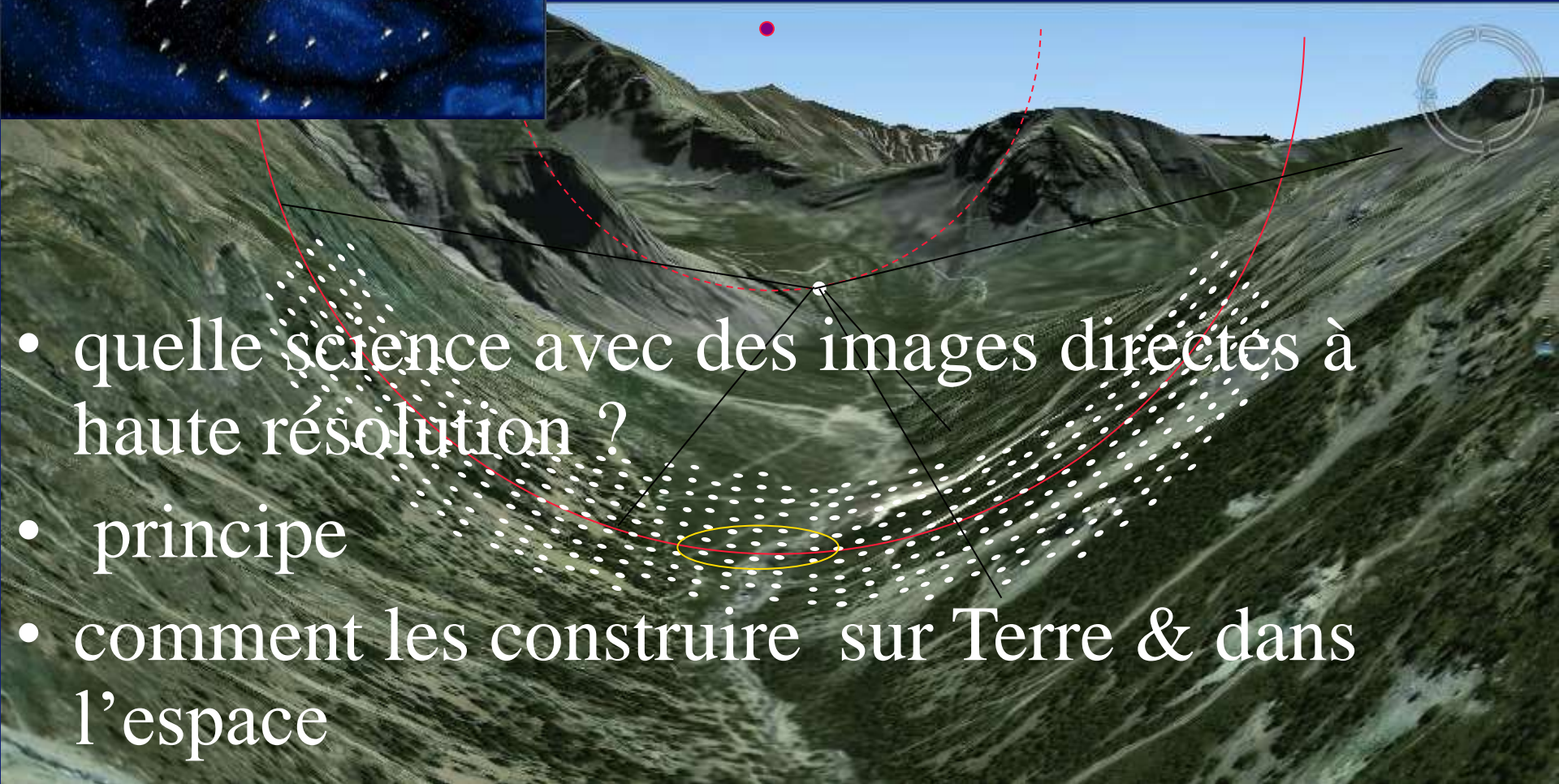


Hypertélescopes : une nouvelle génération d'optiques astronomiques

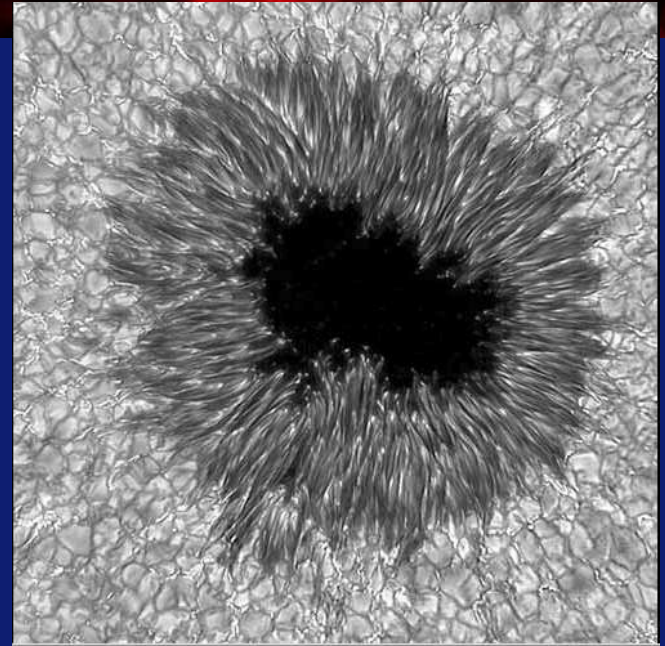
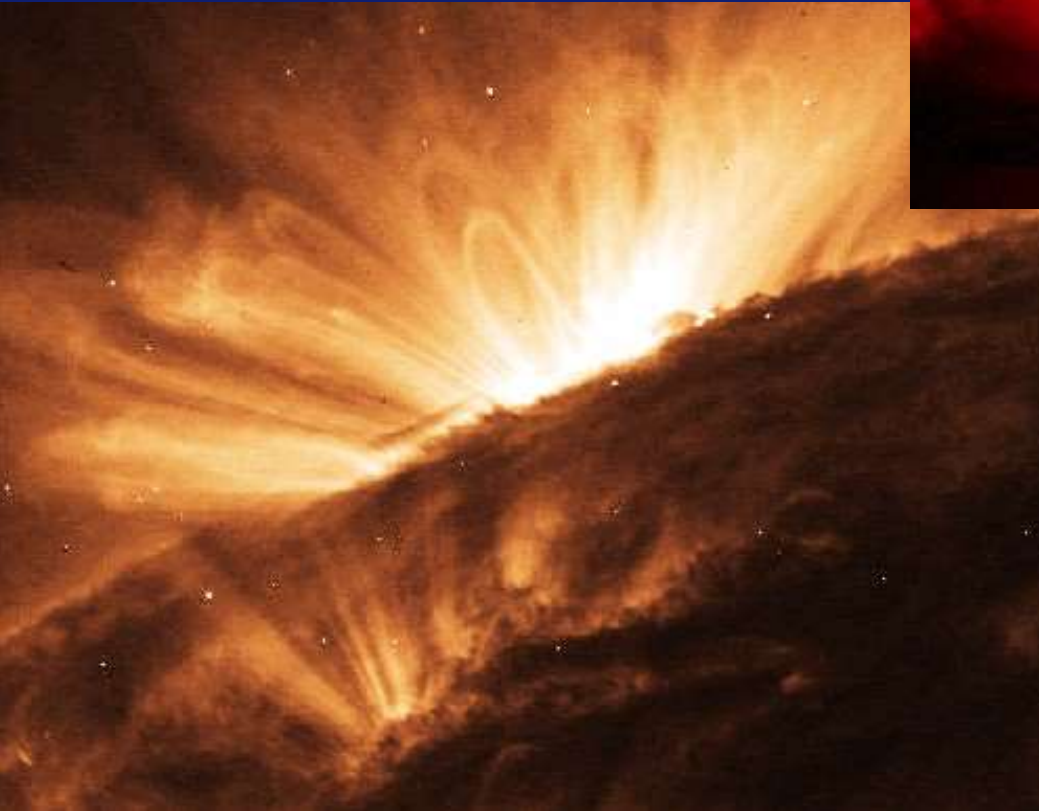
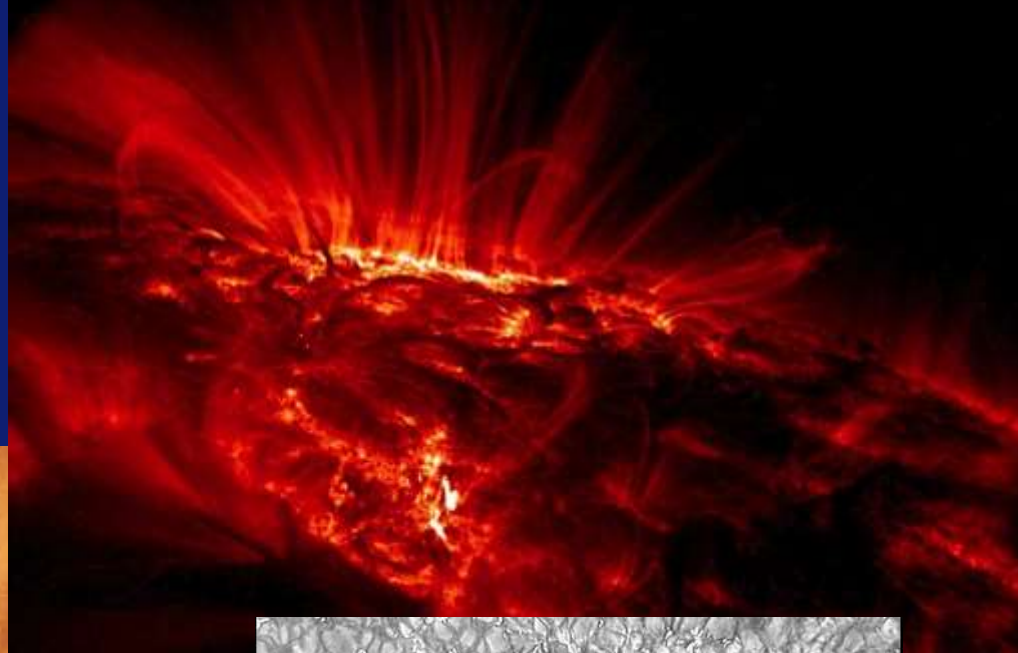
Antoine Labeyrie
Collège de France



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

On en a rêvé:

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



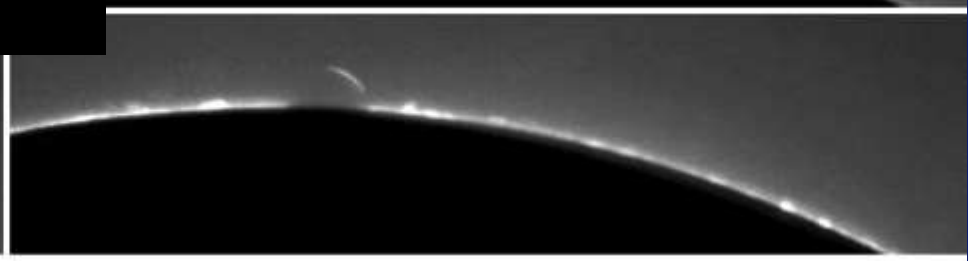
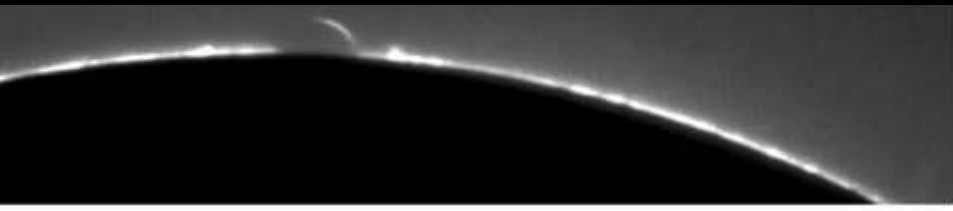
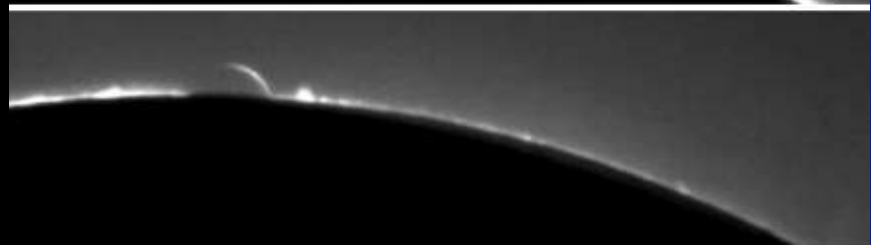
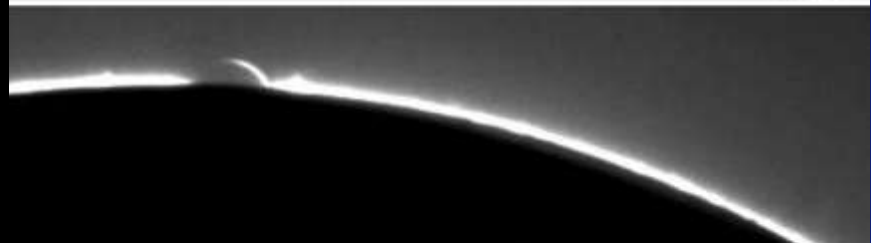
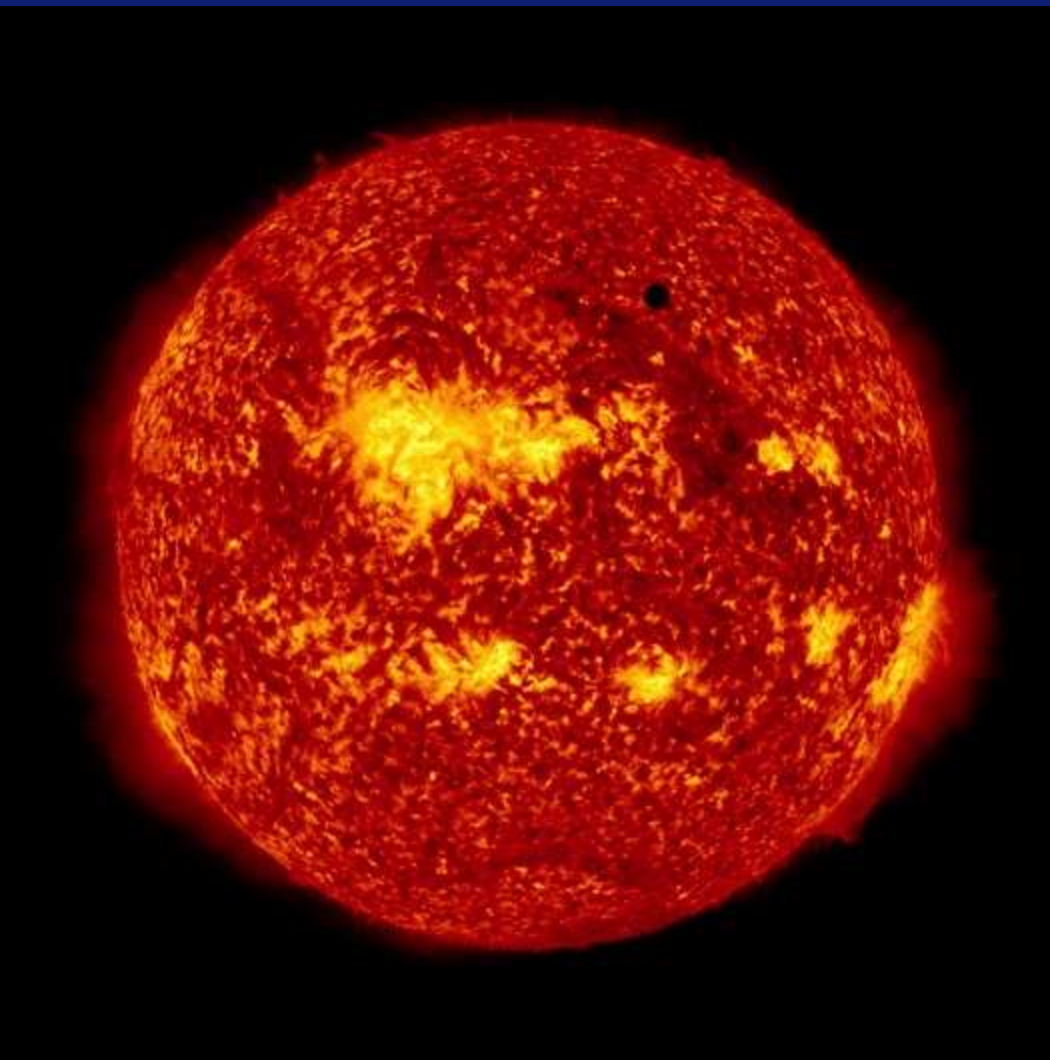
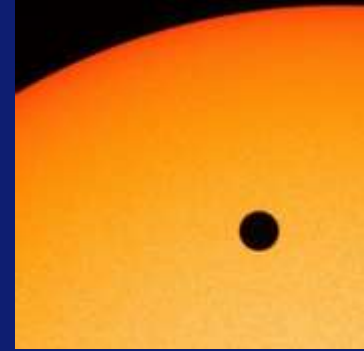
Tornades sur le soleil: et les étoiles ?



NASA Solar Dynamics Observatory

Ultra-violet 304 Angstroms

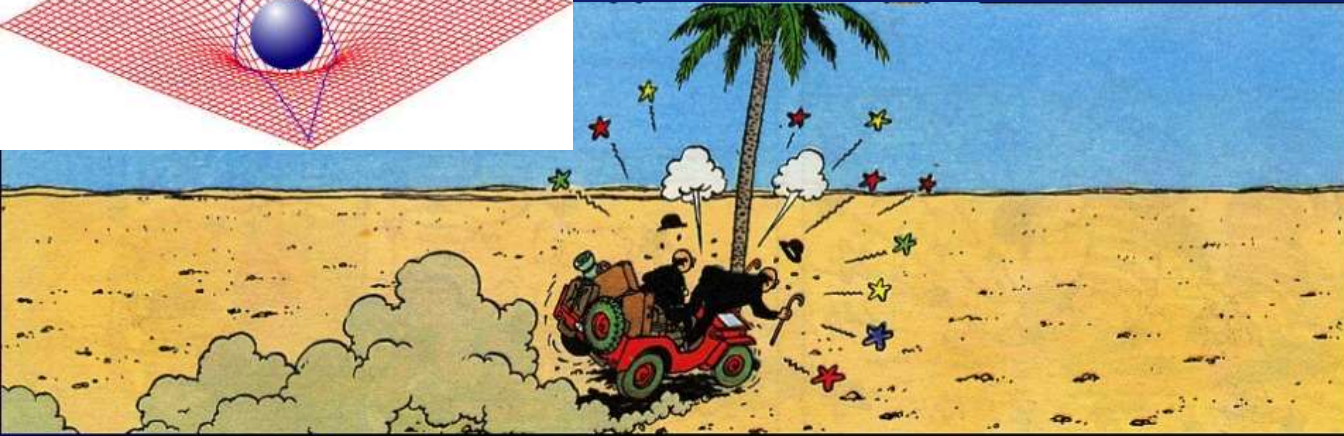
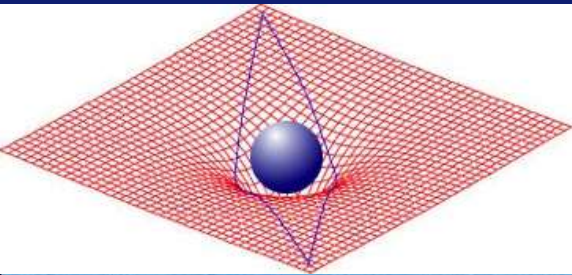
Transit de Venus devant le Soleil (Rondi et al. , 2012)



Etoile double avec trou noir (vue d'artiste)

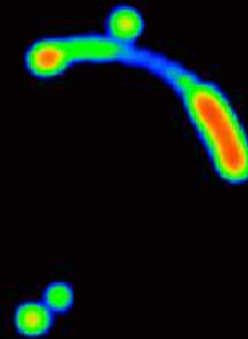


Lentilles et mirages gravitationnels



Optique (télescope Hubble)

Radio (interféromètre Merlin)



Agrandir les télescopes pour mieux voir: améliorer la résolution



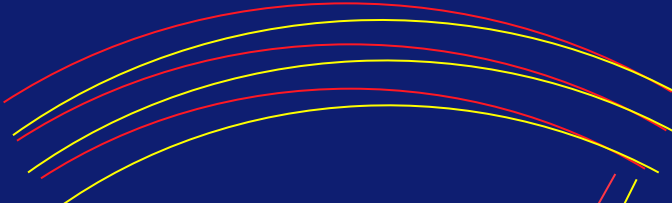
Ondes planes



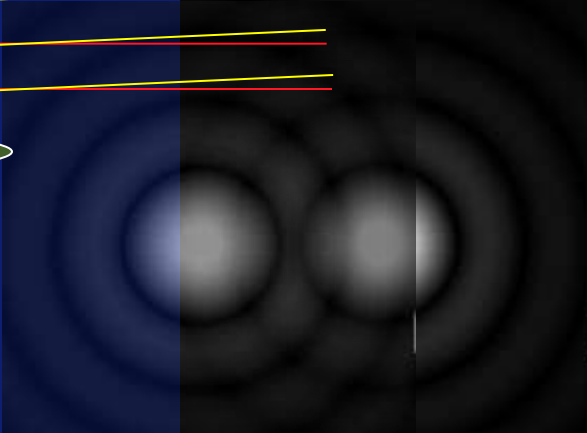
Lentille



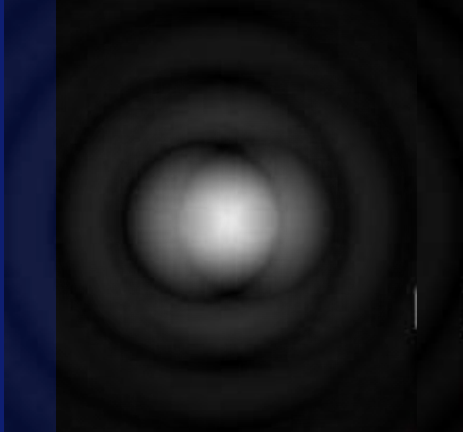
Ondes sphériques



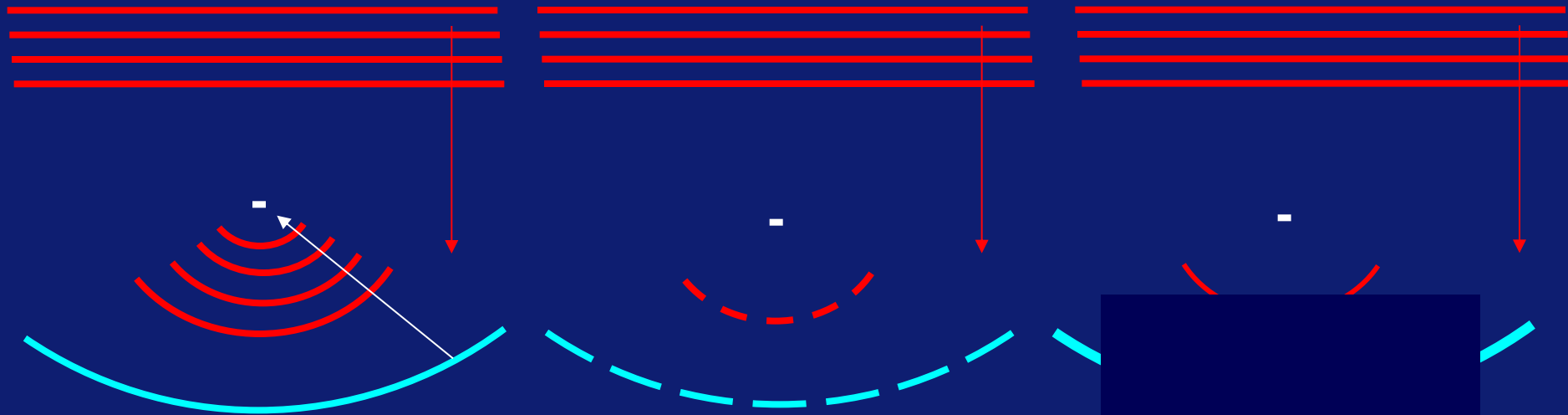
Caméra



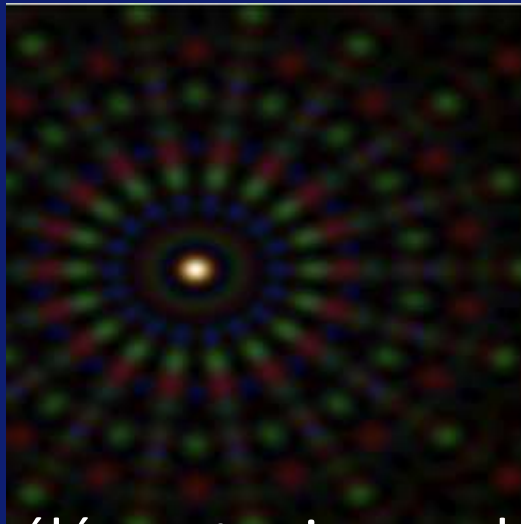
Taches de diffraction d'Airy



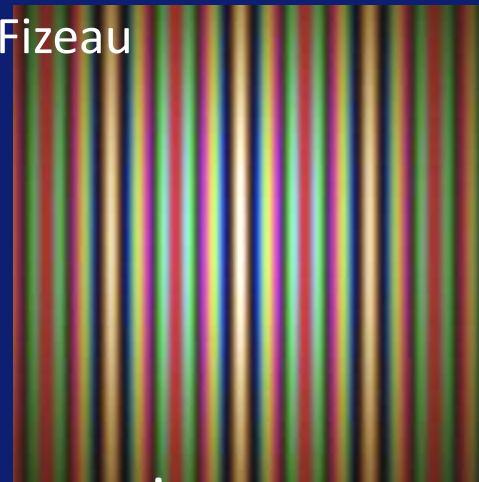
Interféromètre



Tache de diffraction d'Airy



Interféromètre Fizeau

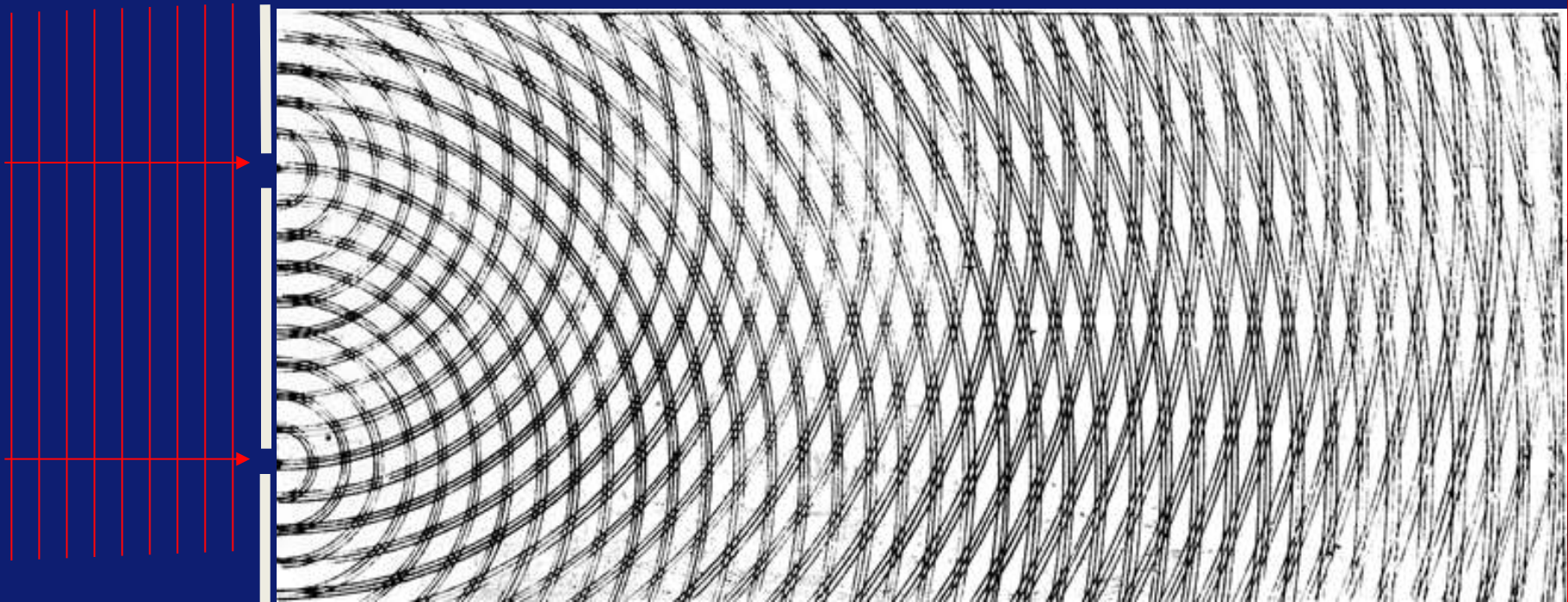
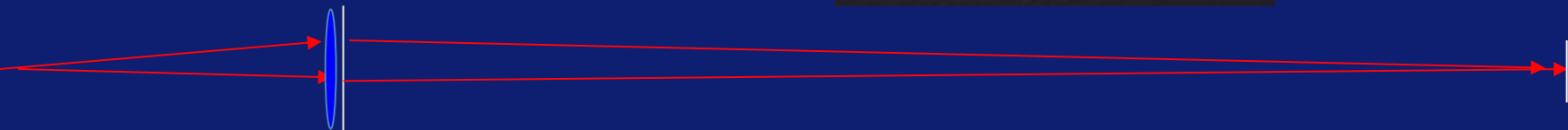
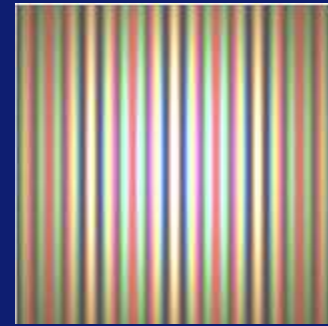


- Marche encore avec deux éléments : image dégradée, mais sans perte de résolution

Interférences d'Young (ca. 1810)

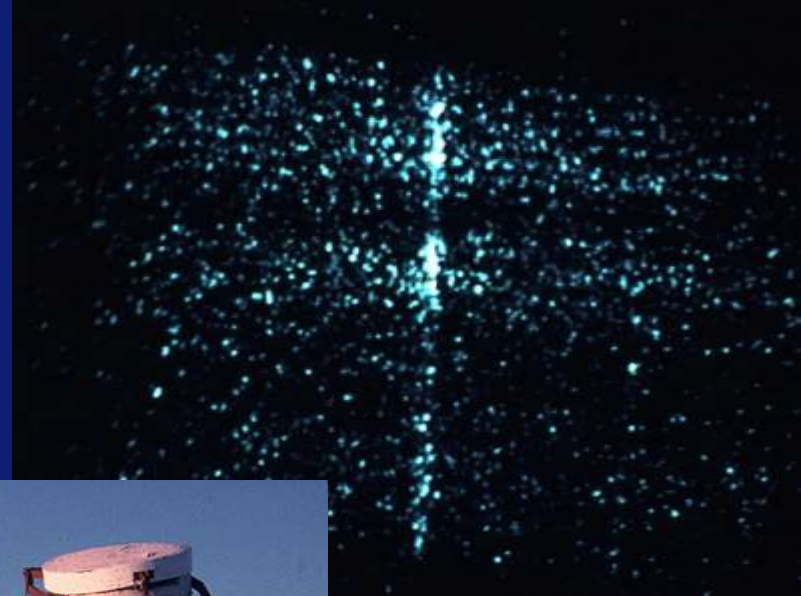


Franges d'Young



Une galère de 12 ans... construction du
**Grand interféromètre à
deux télescopes (GI2T)**

Observatoire de Calern 1976-2007



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

Groupes de télescopes, couplés 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

OVLA: un rêve abandonné
.... à cause d'une meilleure idée: l'hypertélescope à
méta-miroir dilué (architecture Carlina)



Comment se piéger soi-même avec une idée fixe:
OVLA: prototype entamé à l'OHP



Ondes radio millimétriques: interféromètre ALMA

- premières images prometteuses

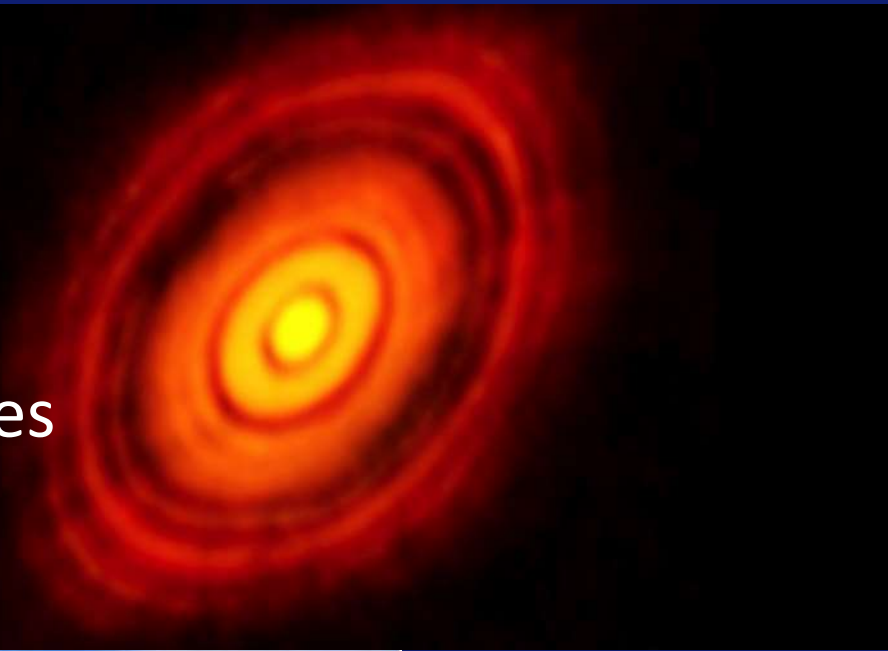
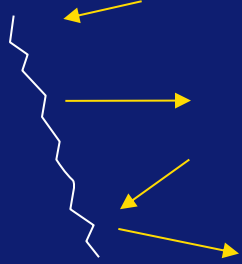


image d'un système
planétaire en formation
autour de l'étoile jeune HL
Tauri

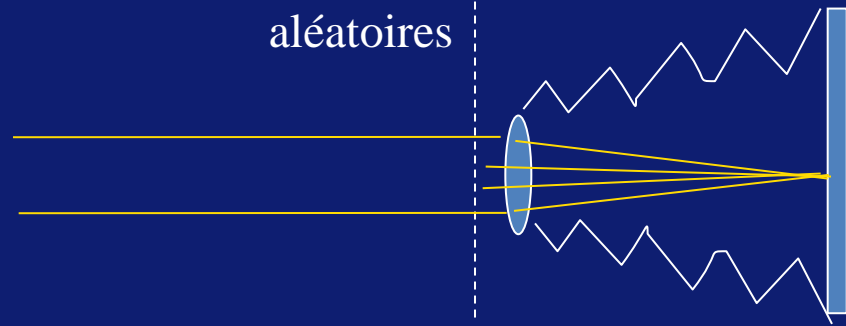
Petite expérience pour bricoleurs:

Imagerie Fizeau d'un objet étendu sans turbulence

Aluminium
froissé



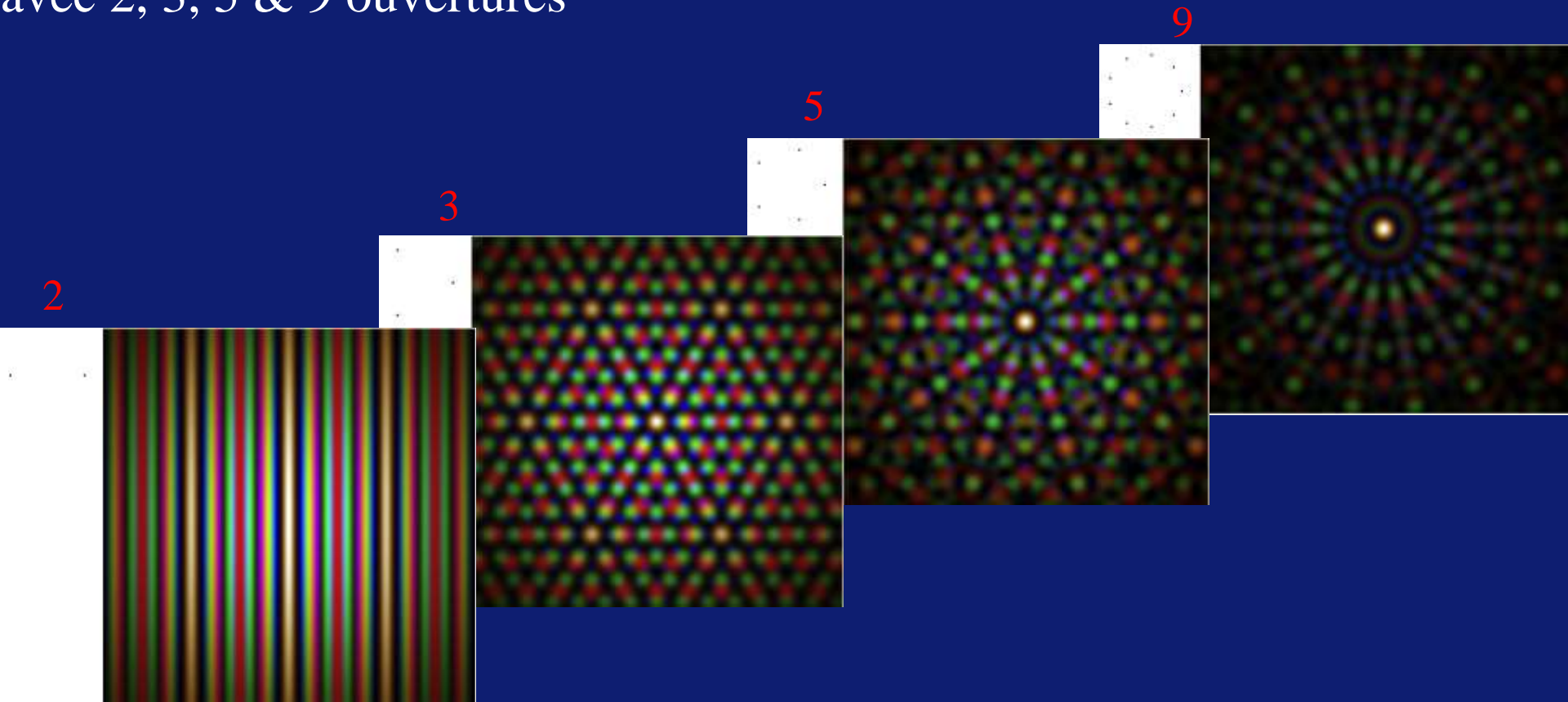
trous
d'épingle
aléatoires



- 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

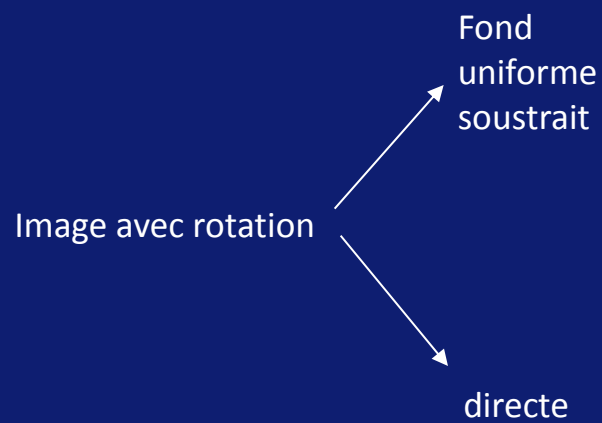
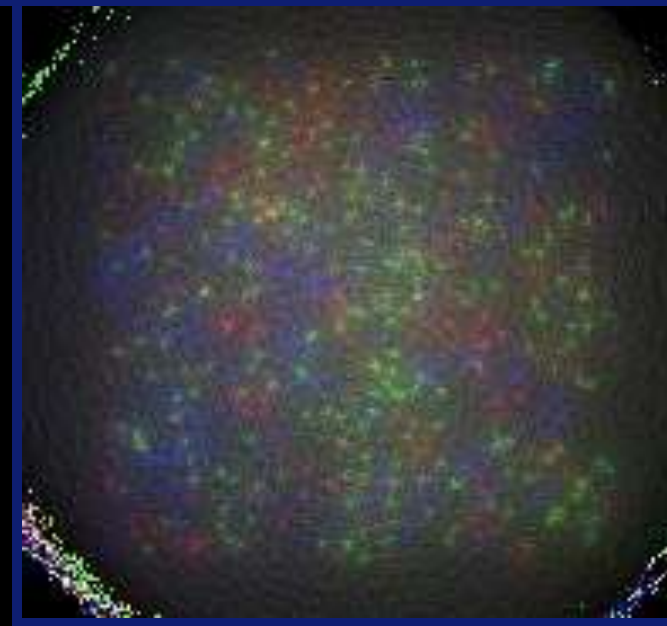
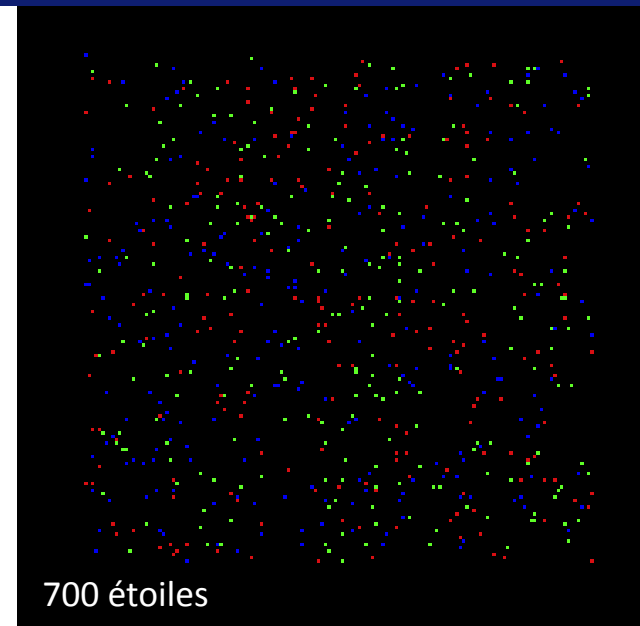
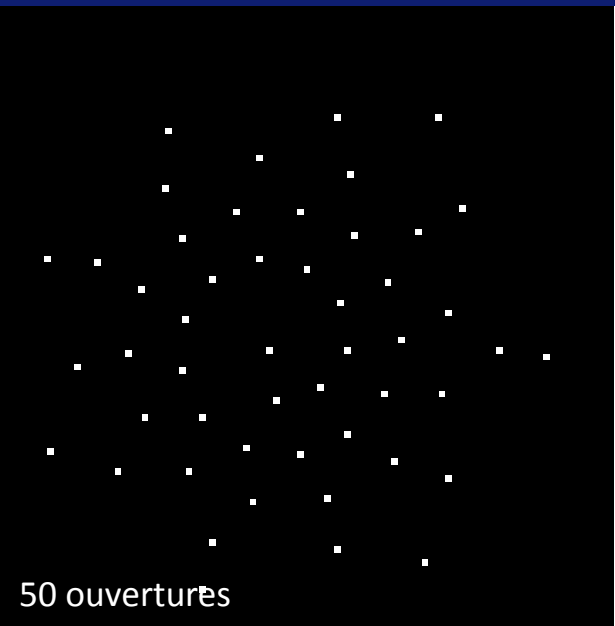
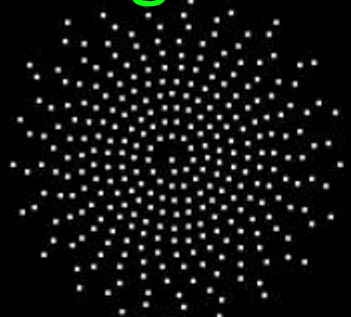


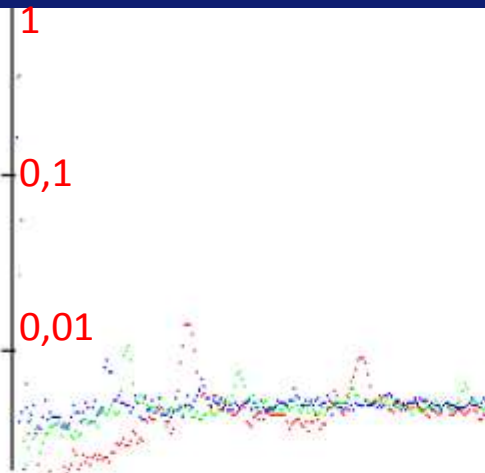
Image directe d'un amas d'étoiles



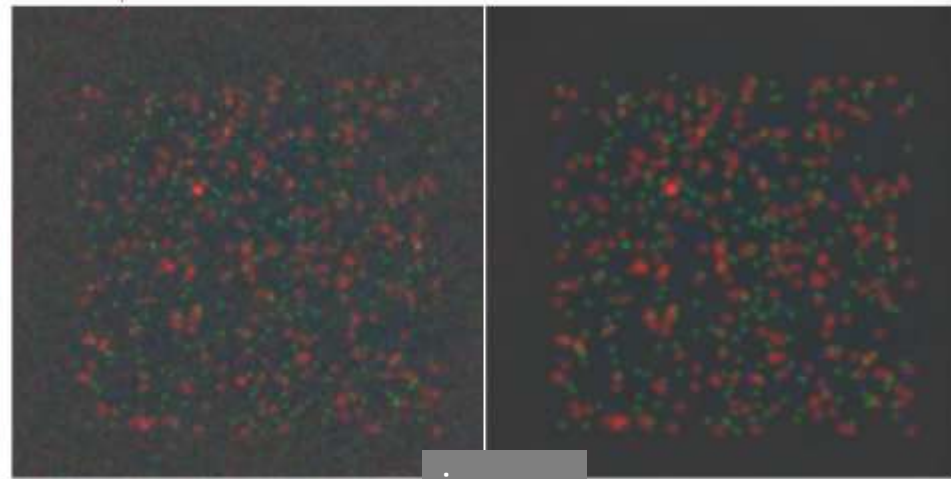
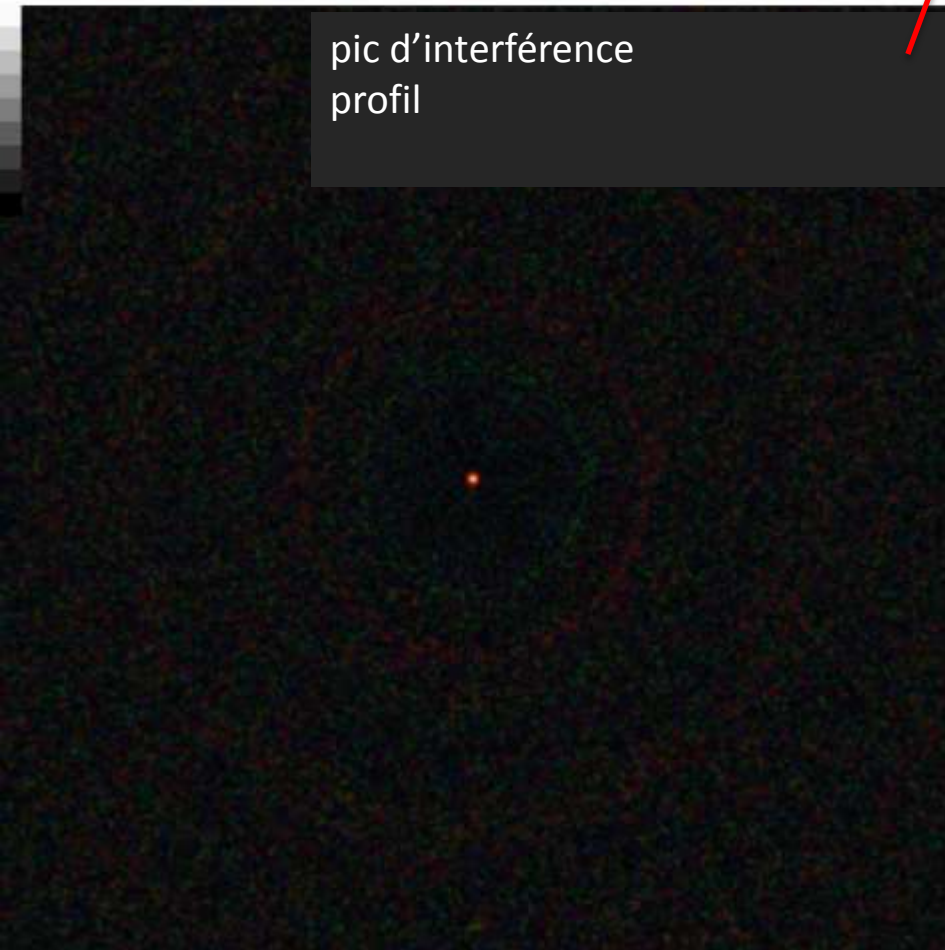
310 ouvertures



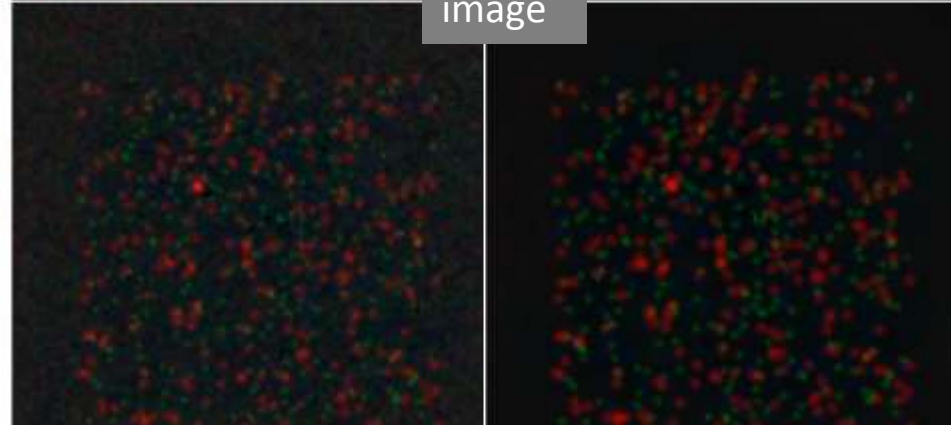
750 étoiles



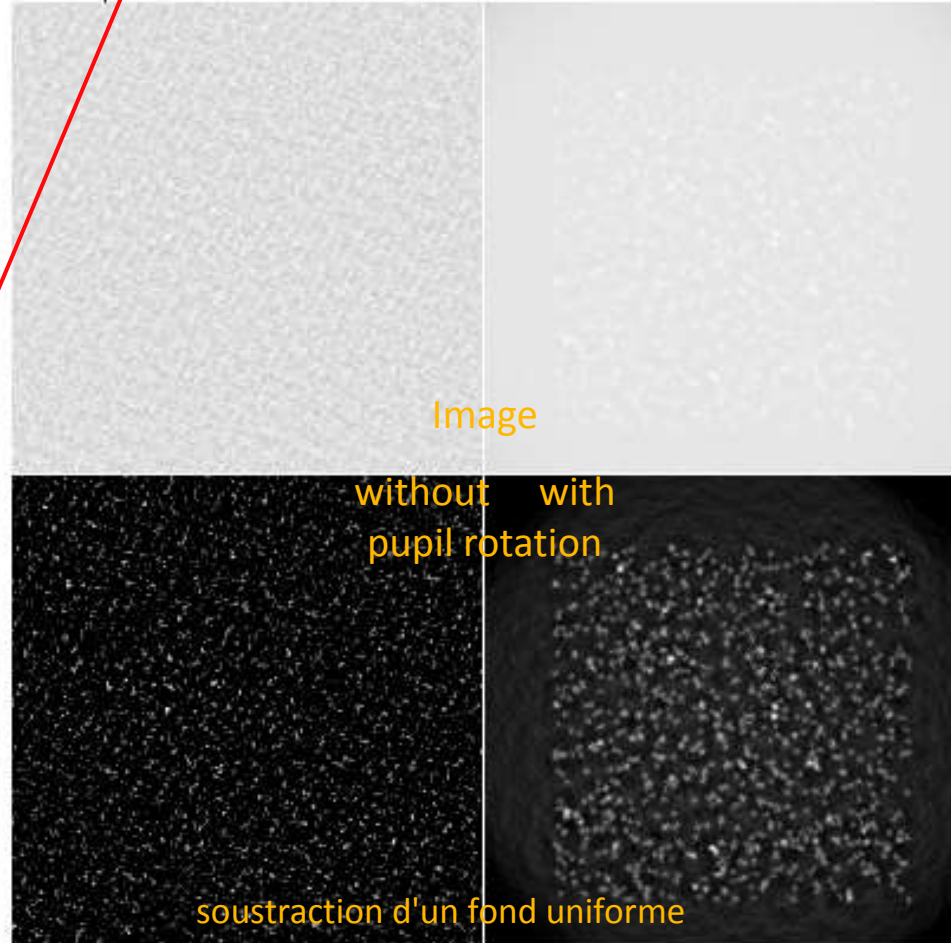
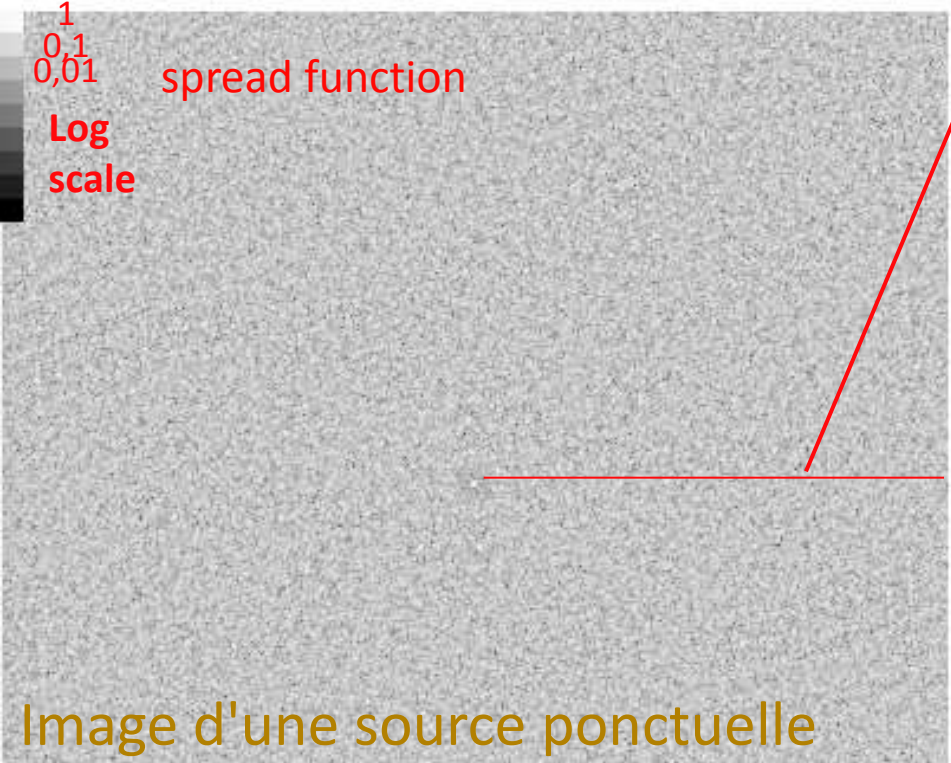
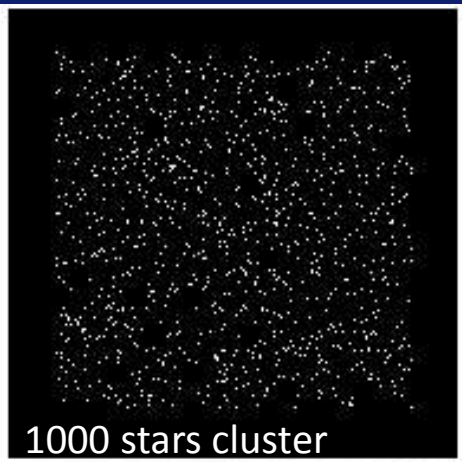
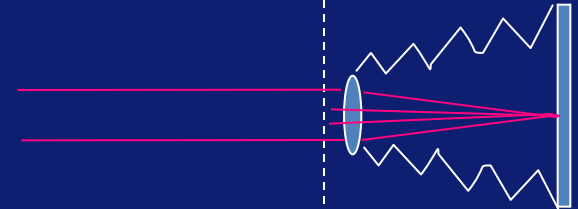
pic d'interférence
profil



image

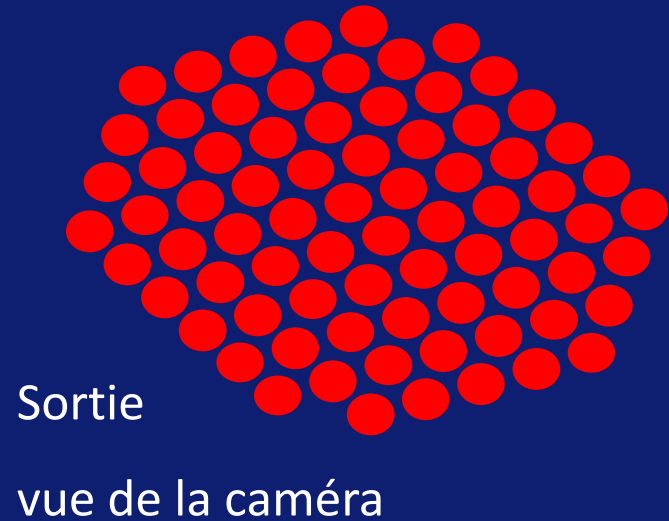
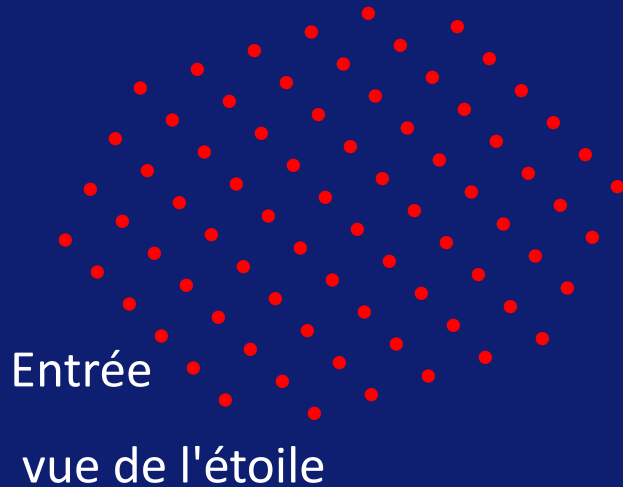


Simulated Fizeau imaging: 30 apertures and 1000 stars



Améliorer l'interféromètre Fizeau:

densifier la pupille pour une image plus lumineuse

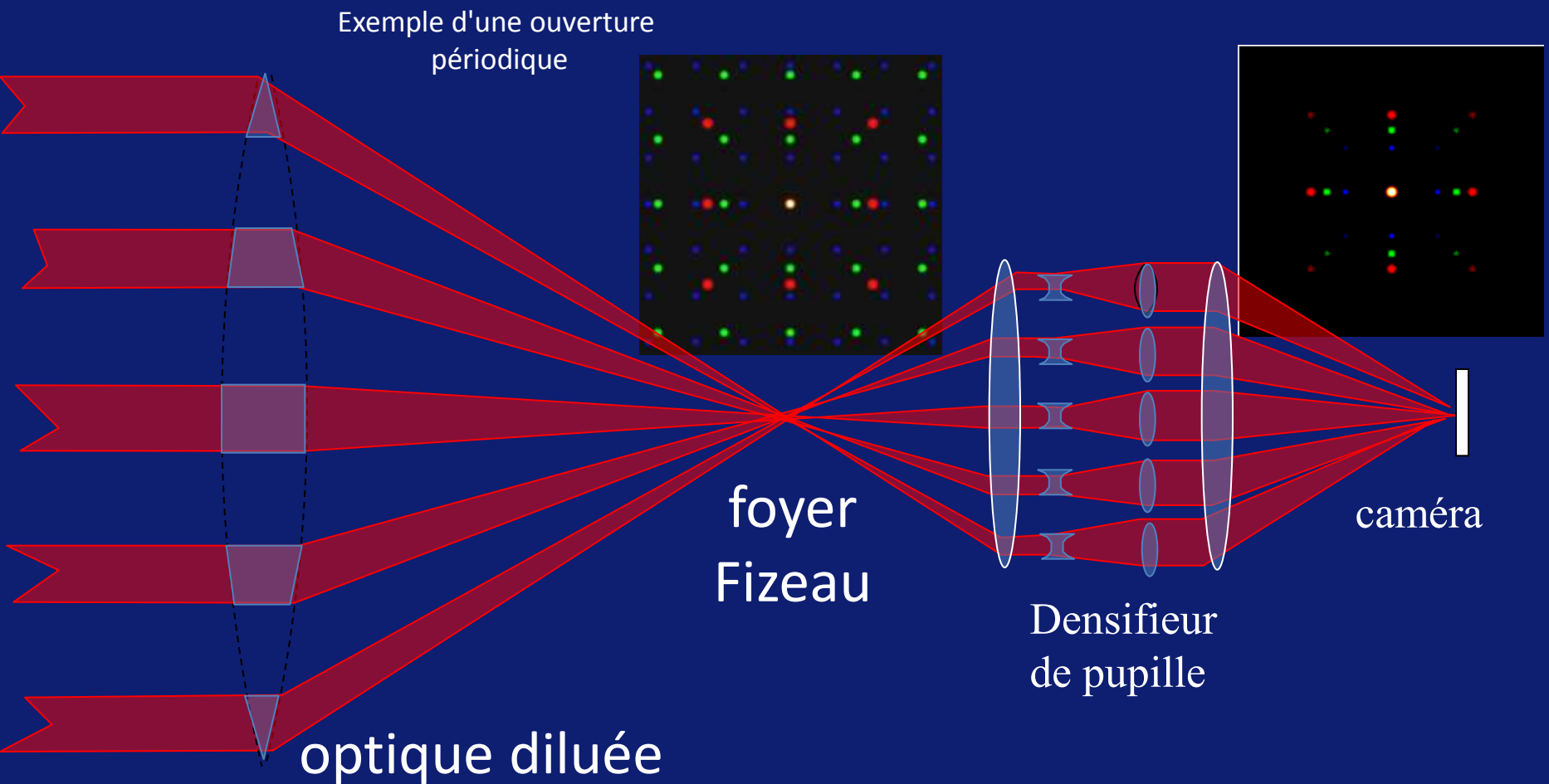


- sans modifier l'ouverture d'entrée ...
- rétrécit le halo de diffraction
- concentre sa lumière dans le pic d'interférence
- intensifie l'image qu'il forme

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 »

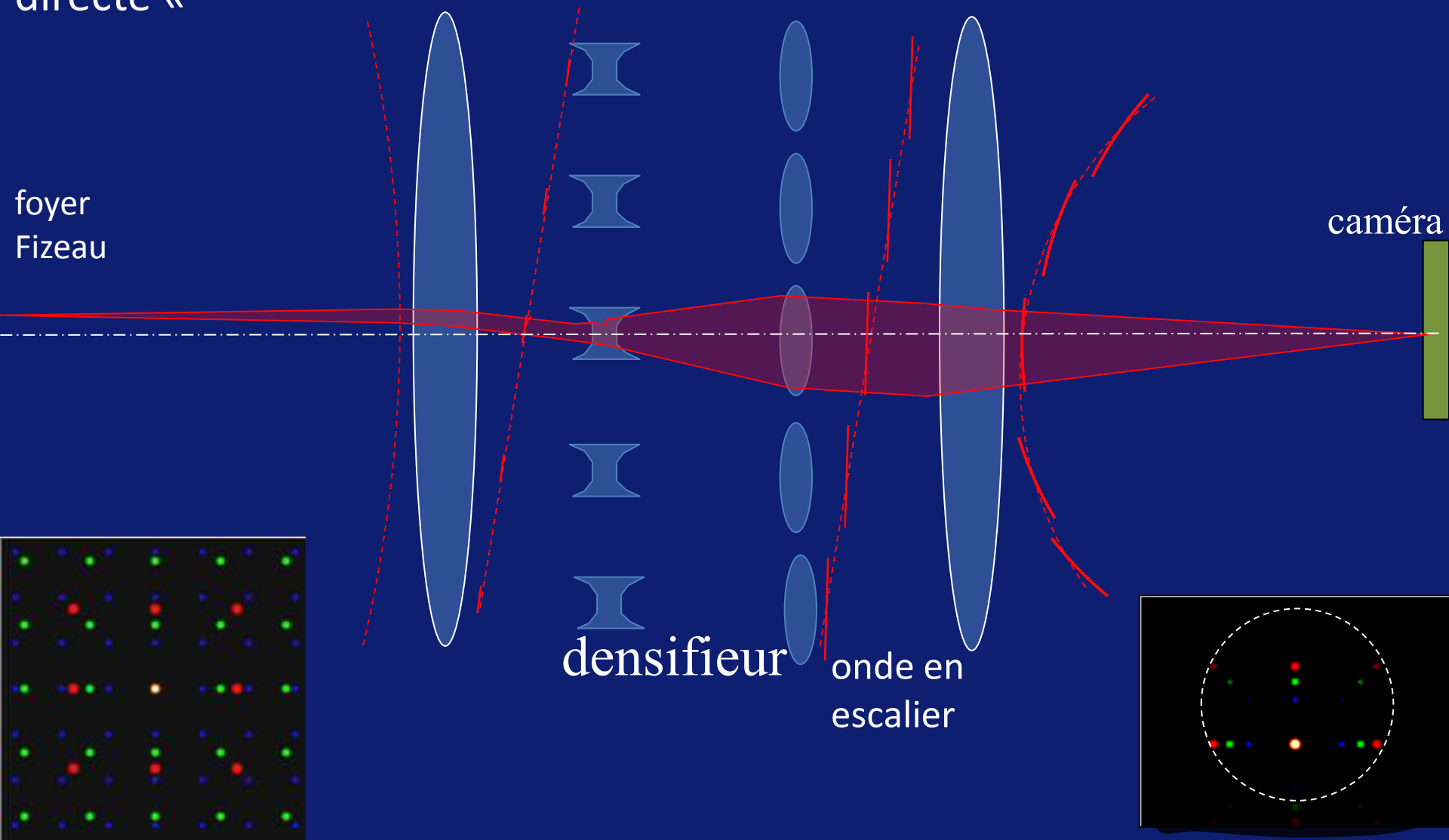
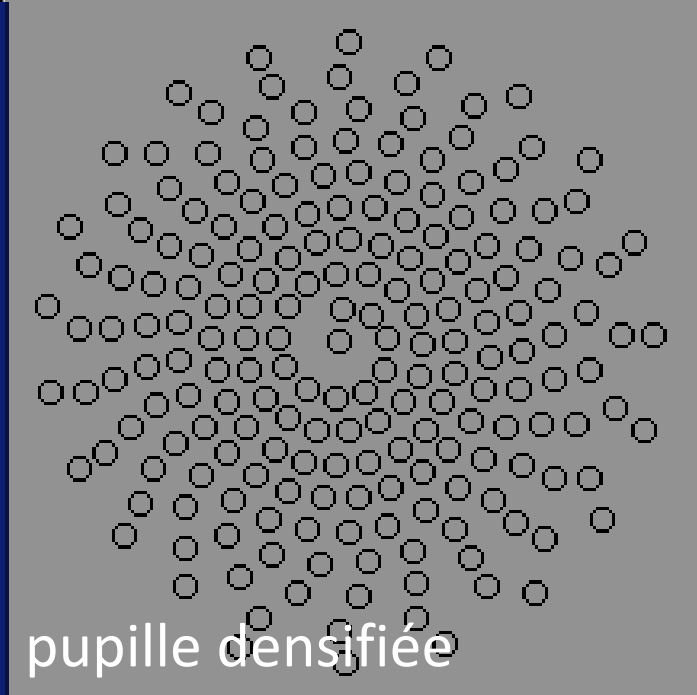
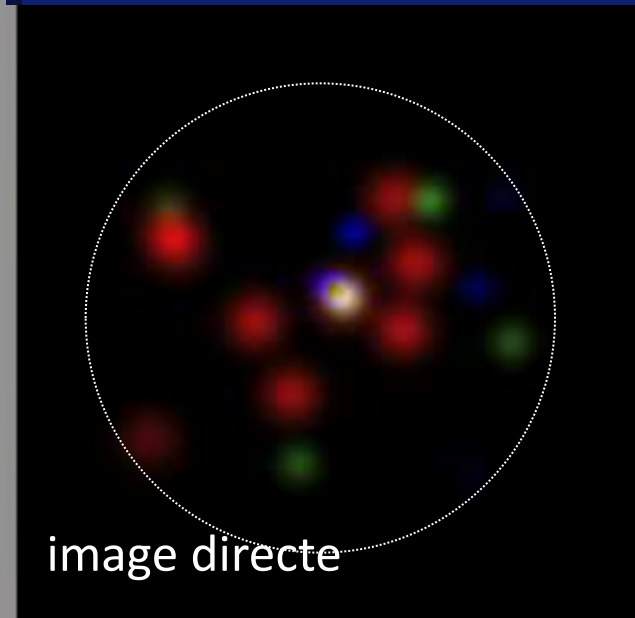
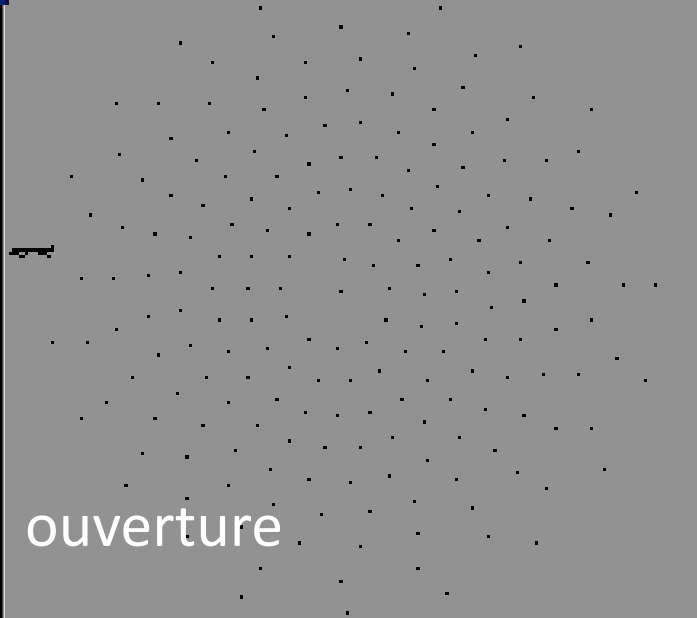
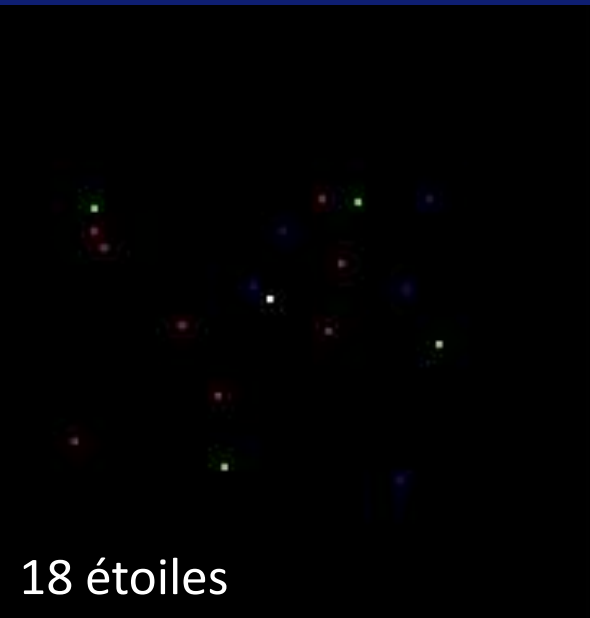
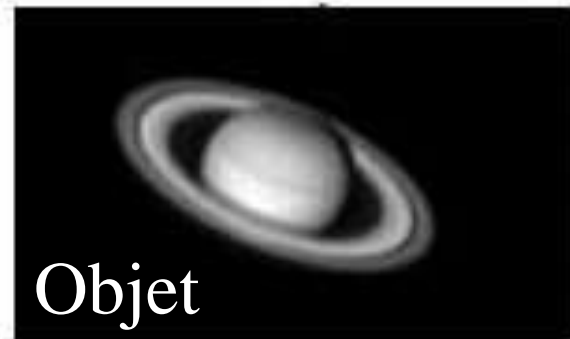
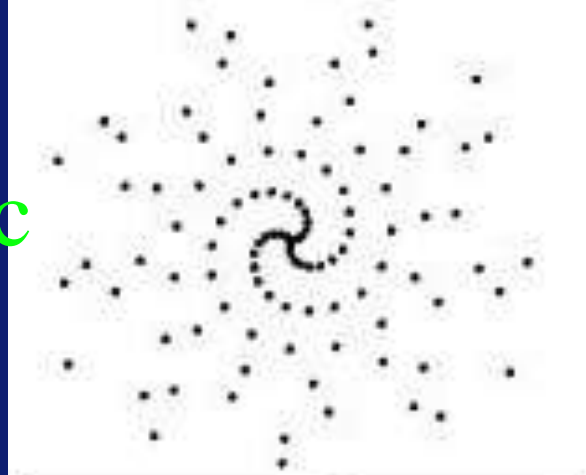


Image à pupille densifiée: hypertelescope



- Concentre la lumière
...et rétrécit le champ

Image
directe avec
une méta-
ouverture
apodisée



Objet

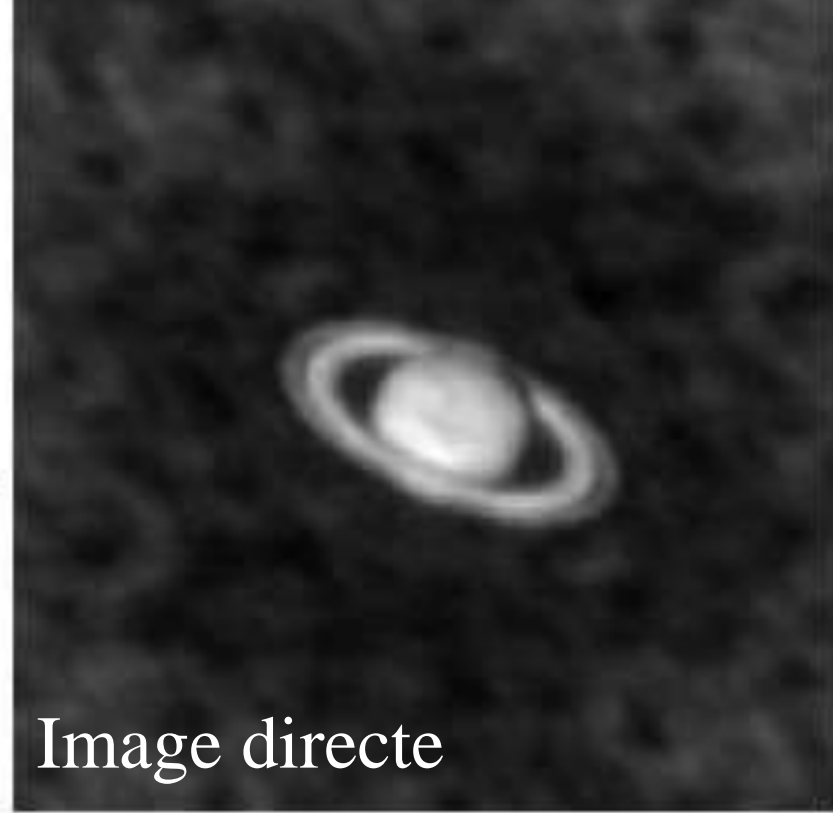
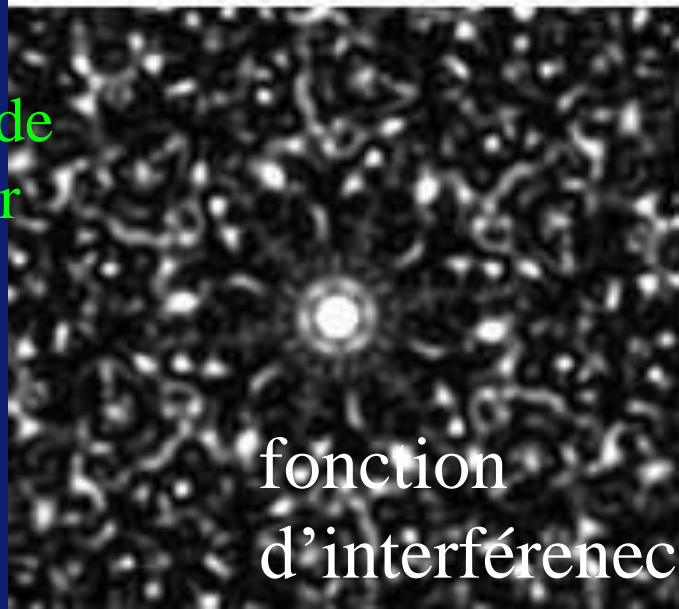
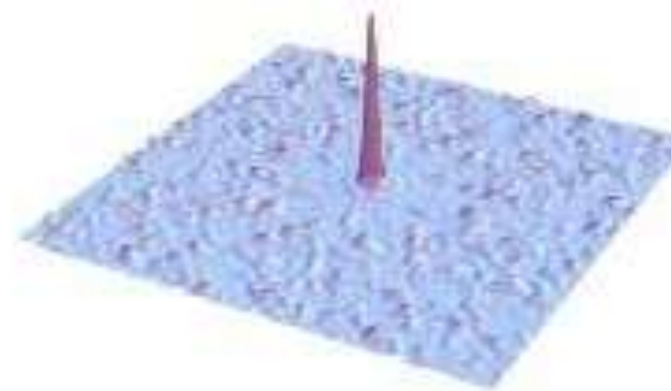


Image directe

Simulation en mode
hypertelescope par
C.Aime

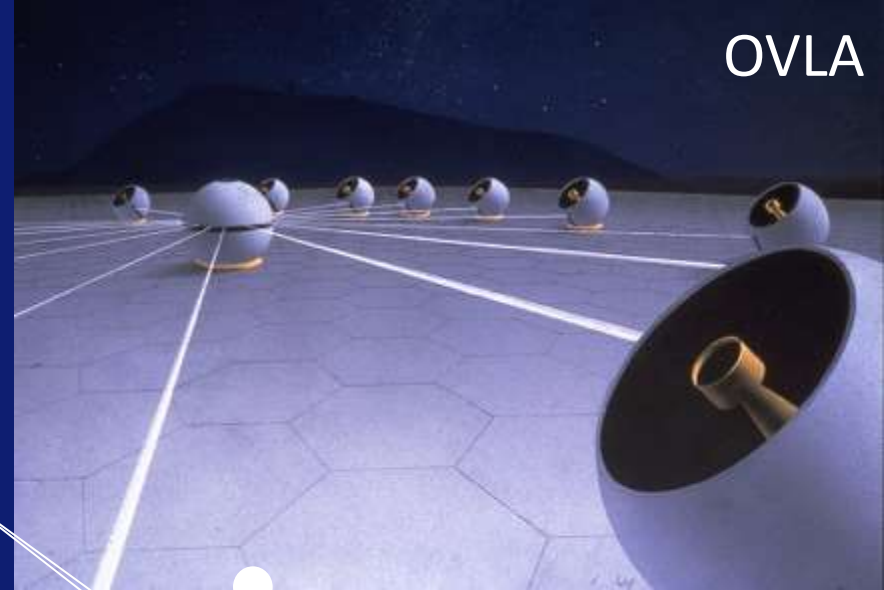


fonction
d'interférenec

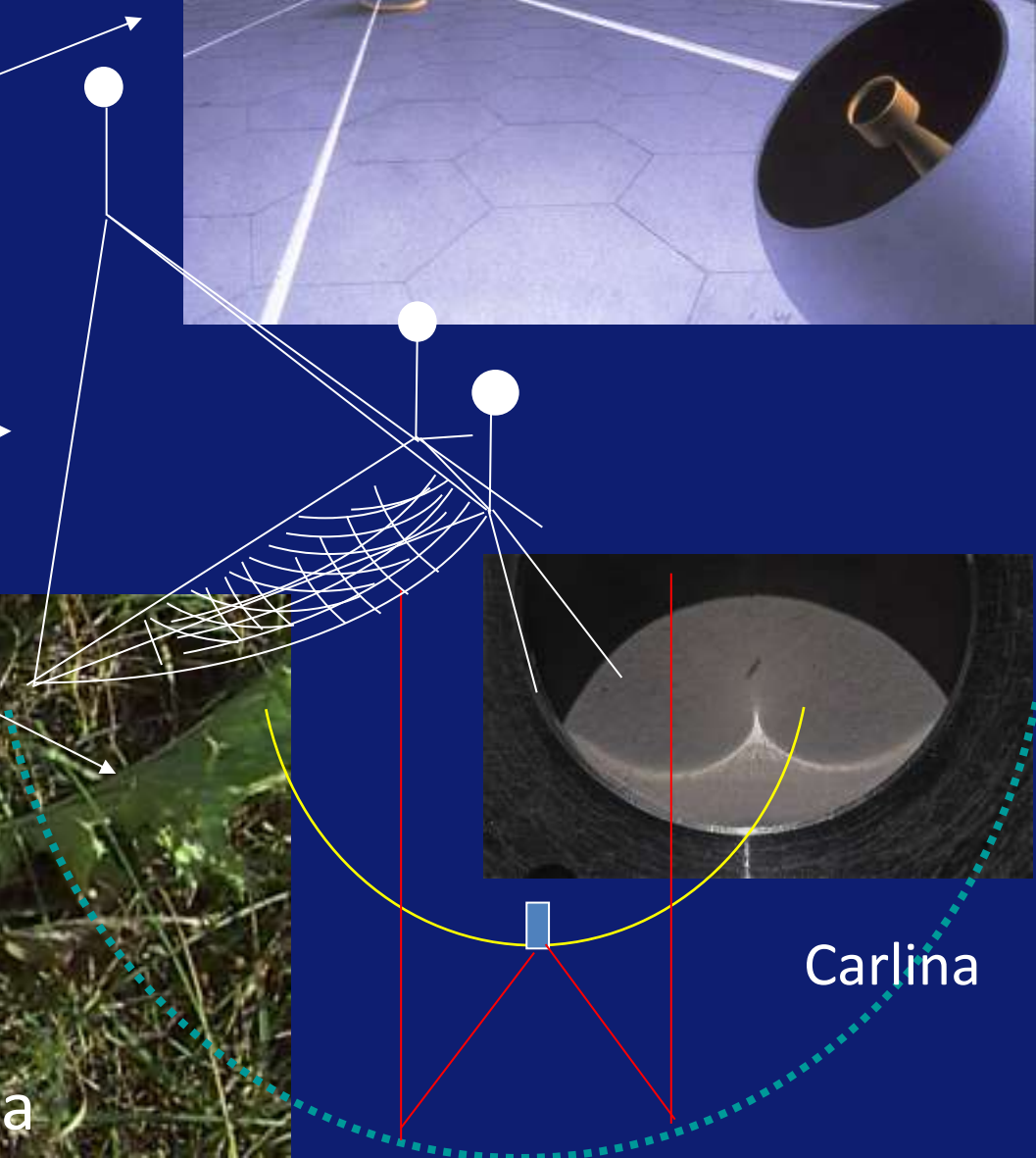


Types d'architectures hypertélescope

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



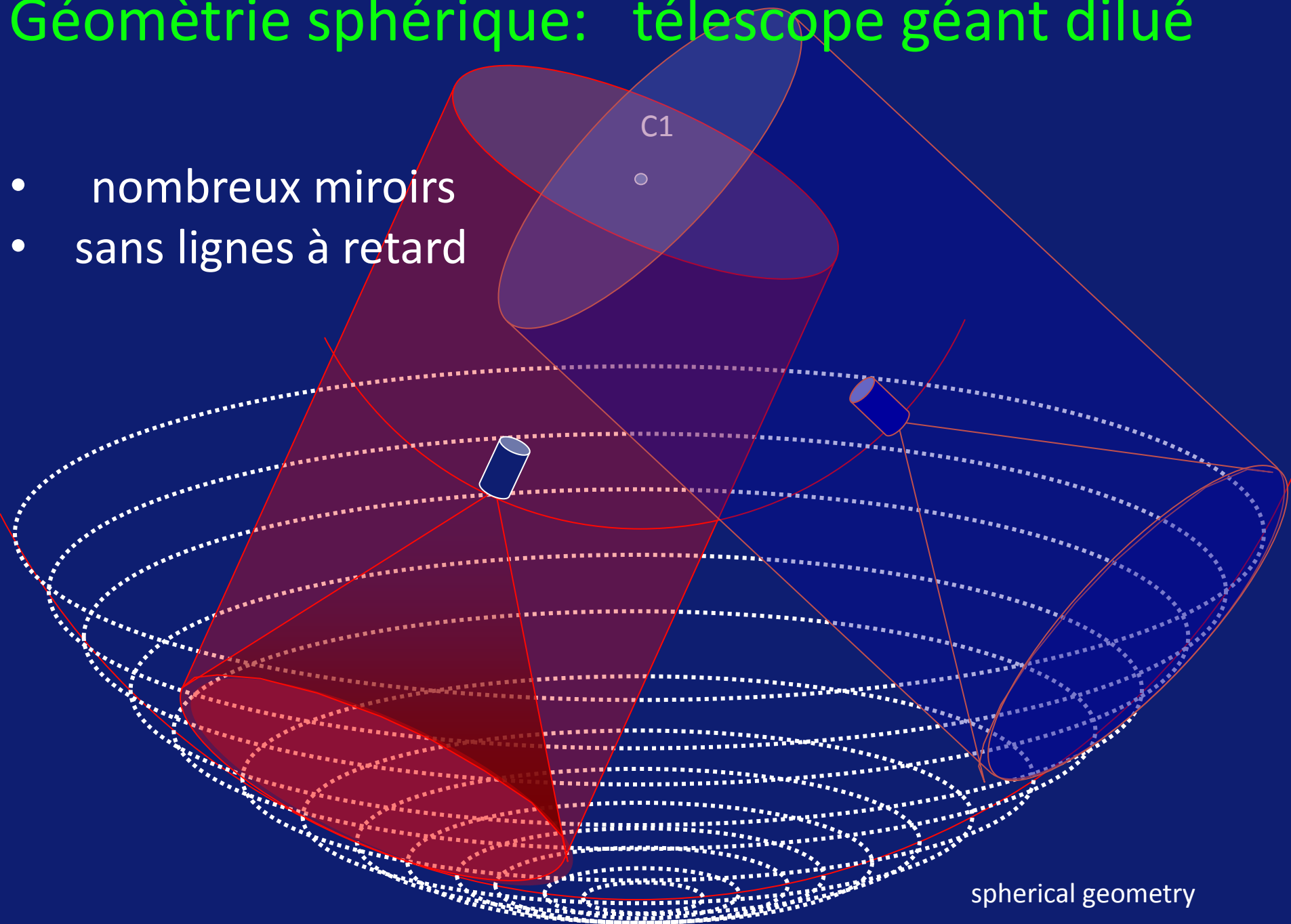
Carlina
acanthifolia



Carlina

Géométrie sphérique: télescope géant dilué

- nombreux miroirs
- sans lignes à retard



spherical geometry

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 »
- Aussi techniquement avantageux
- Coût plus faible

Construction en Chine du radiotélescope FAST

- diamètre 500m
- déformation parabolique active



Deux options:

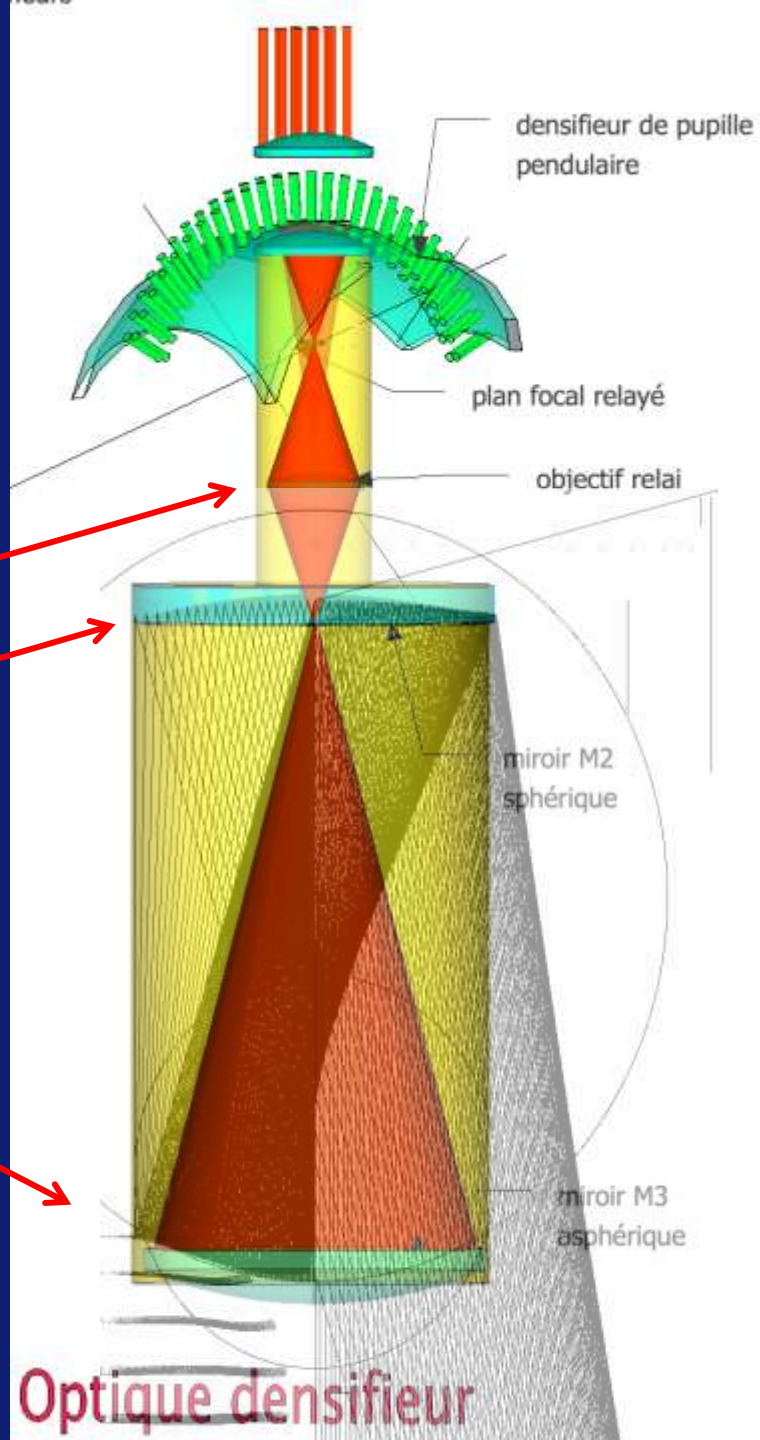
- M1 parabolique
- ou sphérique avec correcteur de Mertz

correcteur de Mertz

lentille

M2
sphérique

M3
asphérique

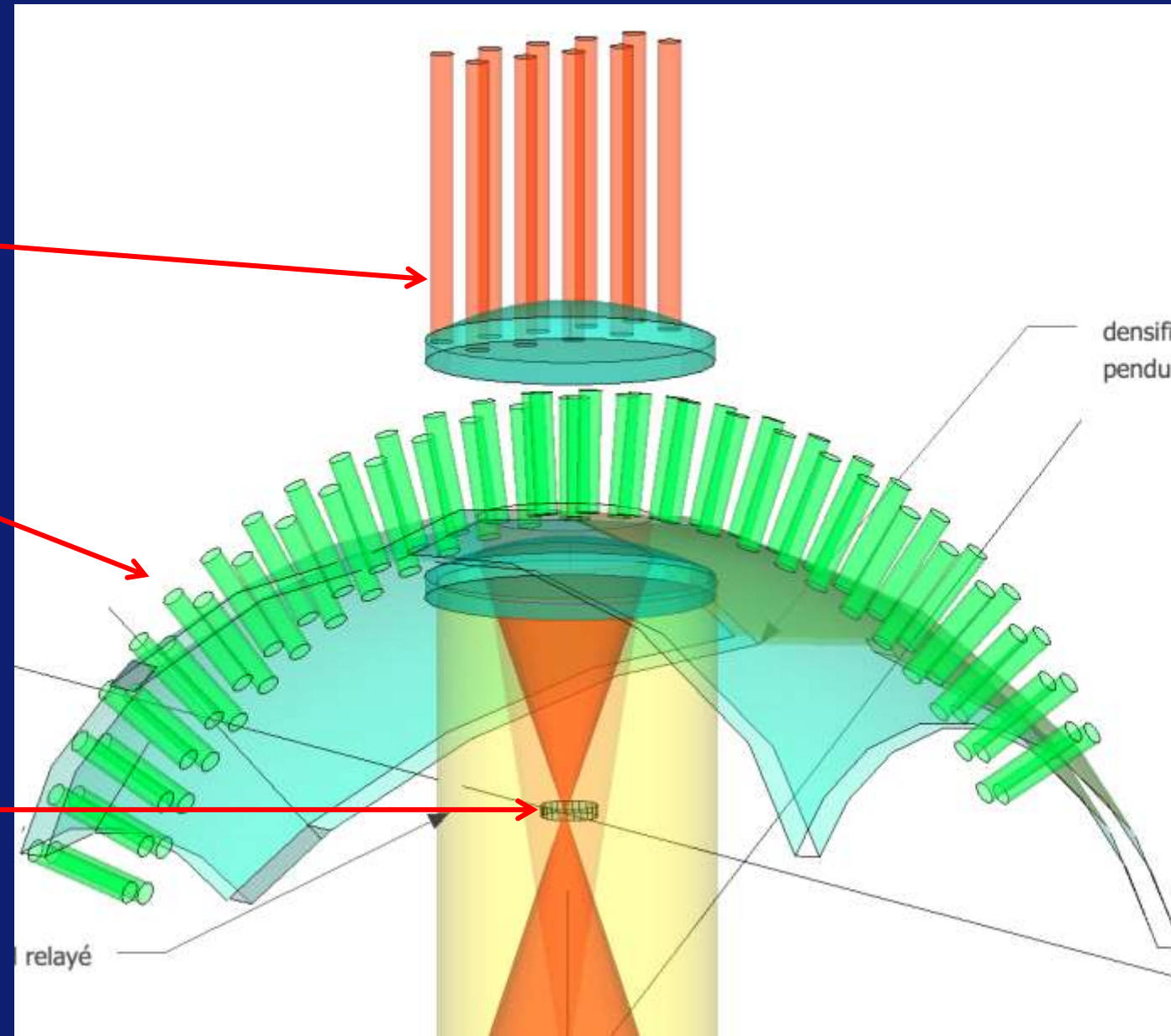


Densifieur pour pupille homothétique

pupille
densifiée

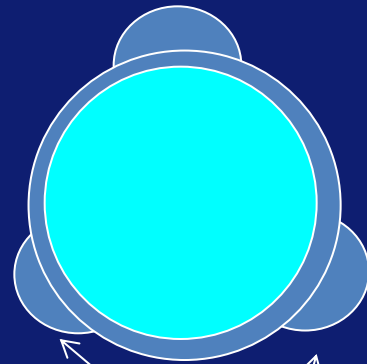
lentille dôme
et densifieur

foyer F1 et
lentille de
champ



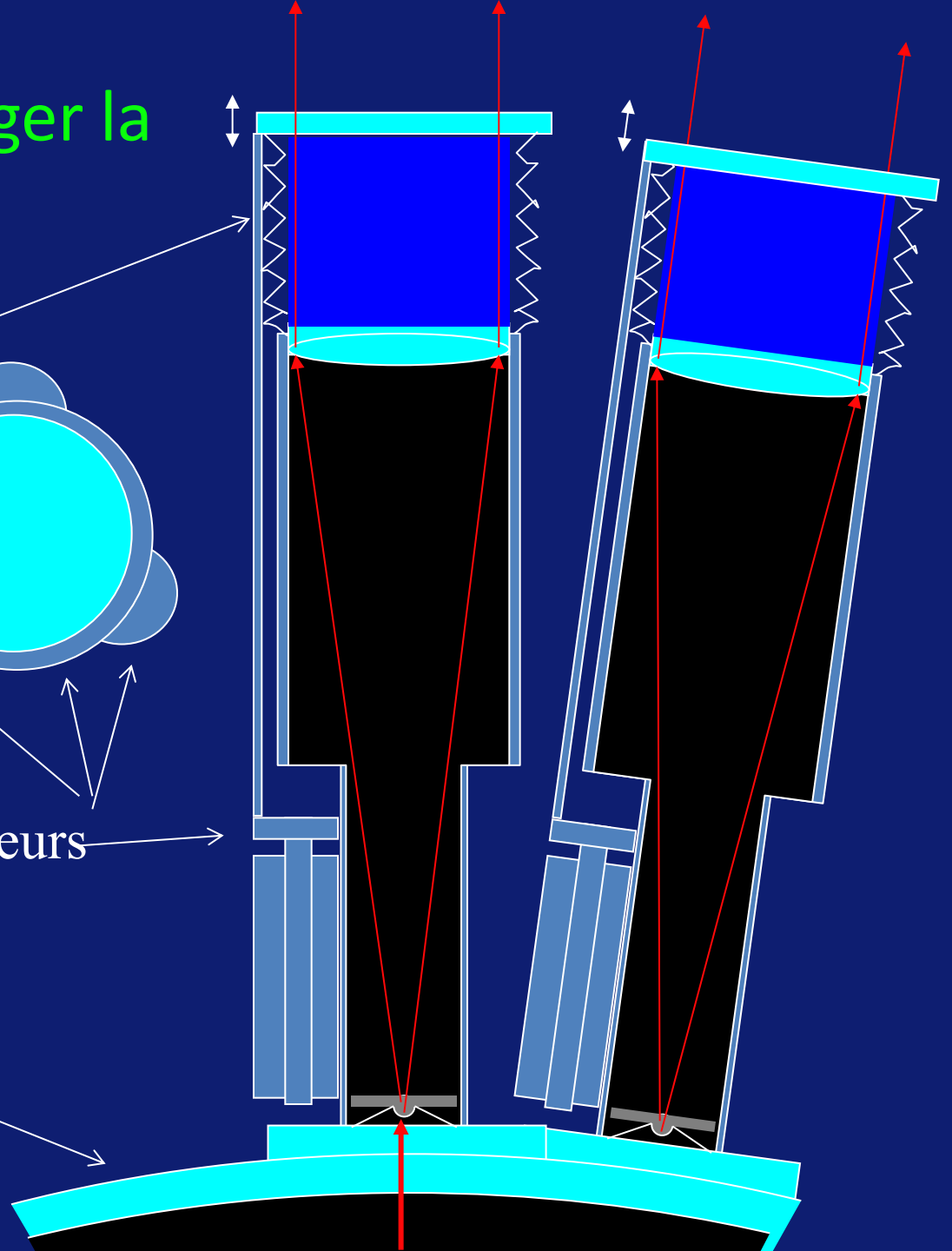
Éléments densifieurs adaptatifs pour corriger la turbulence

élastomère optique
ou liquide



3 actuateurs

lentille dome

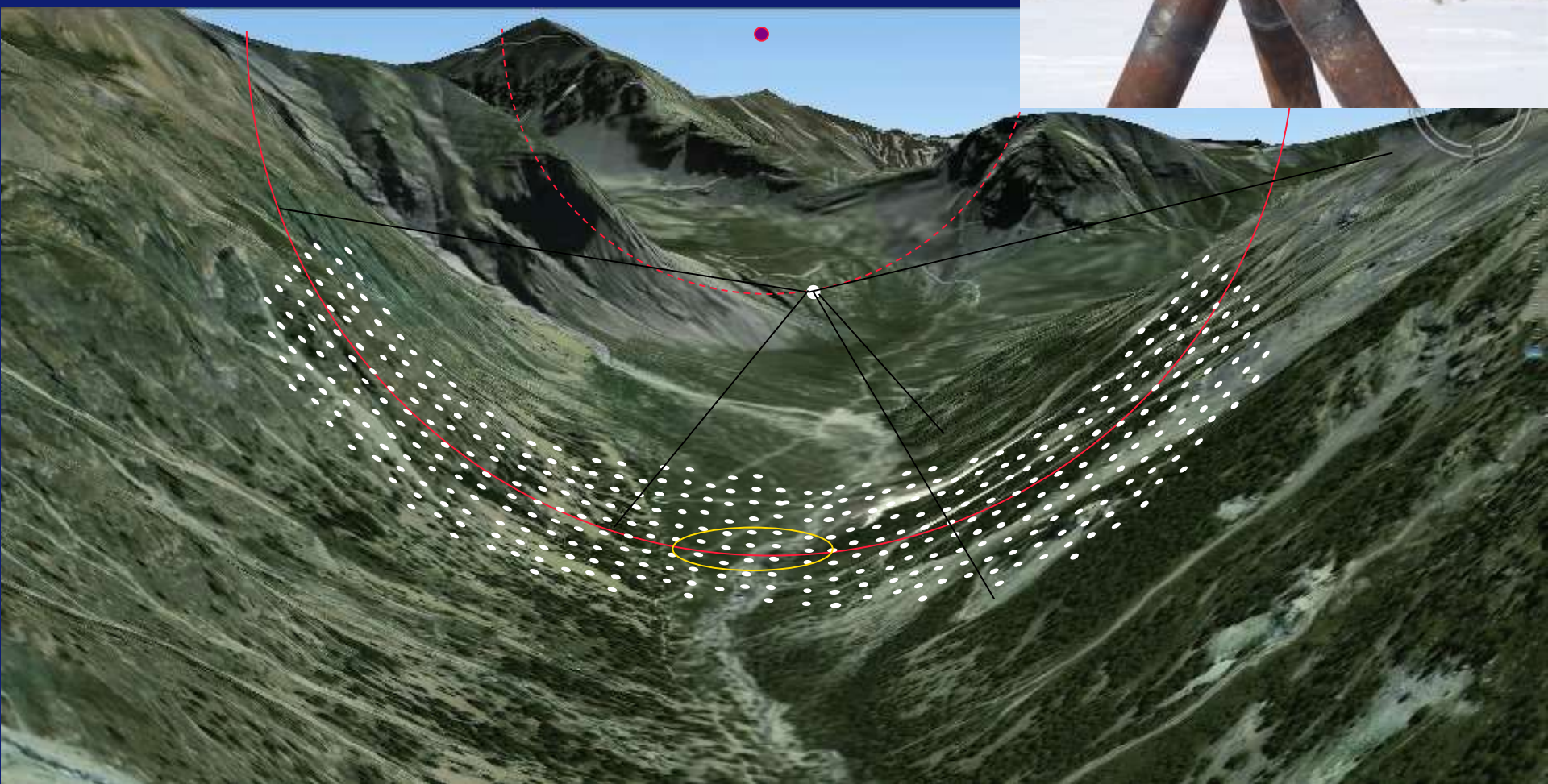


Site de l'hypertélescope vallon de la Moutière



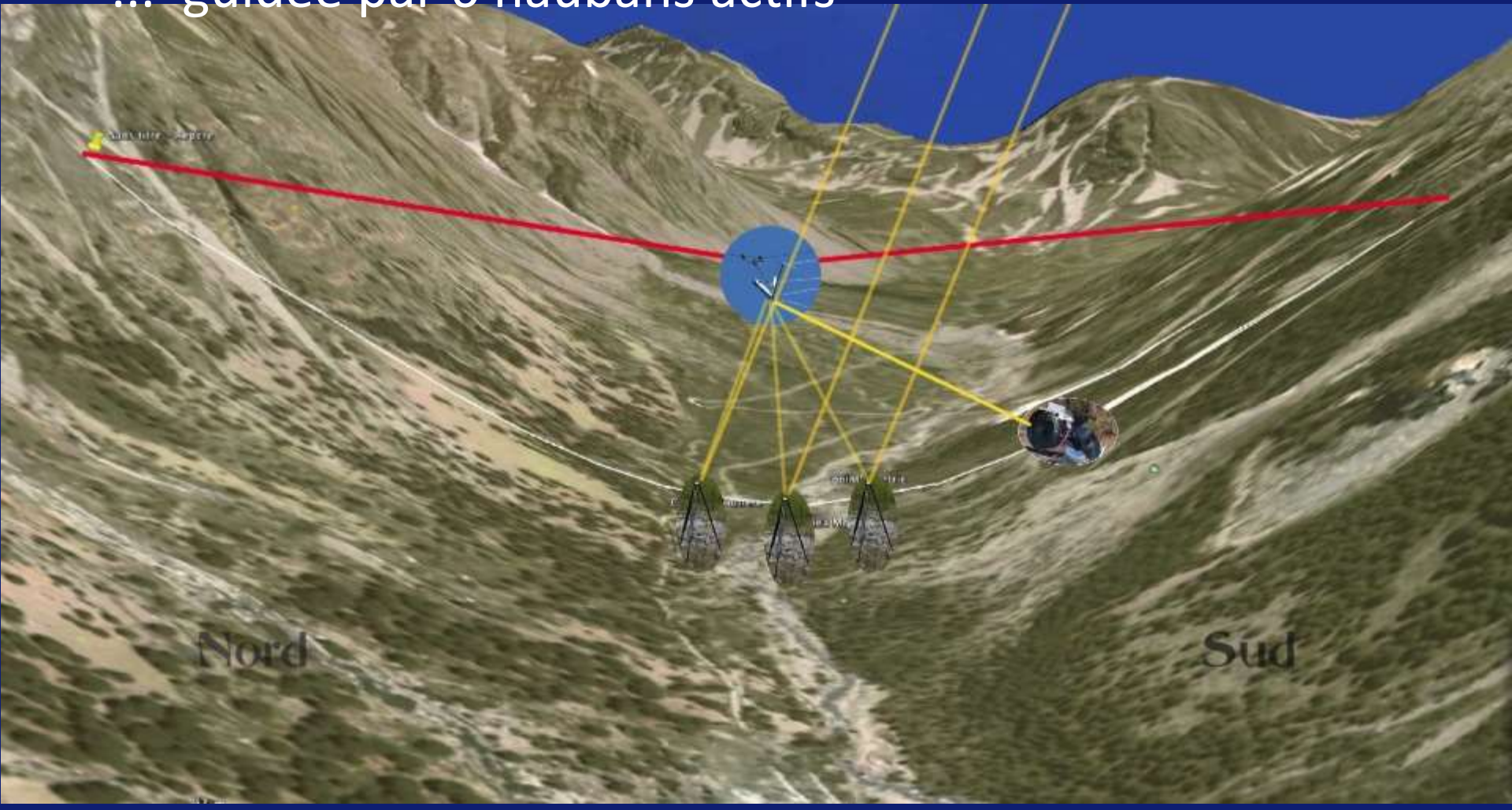
Un prototype d'architecture Carlina: « Hypertélescope Ubaye »

Vallon de la Moutière, Ubaye



Nacelle focale suspendue

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



Le laboratoire-atelier



Alignement d'un miroir

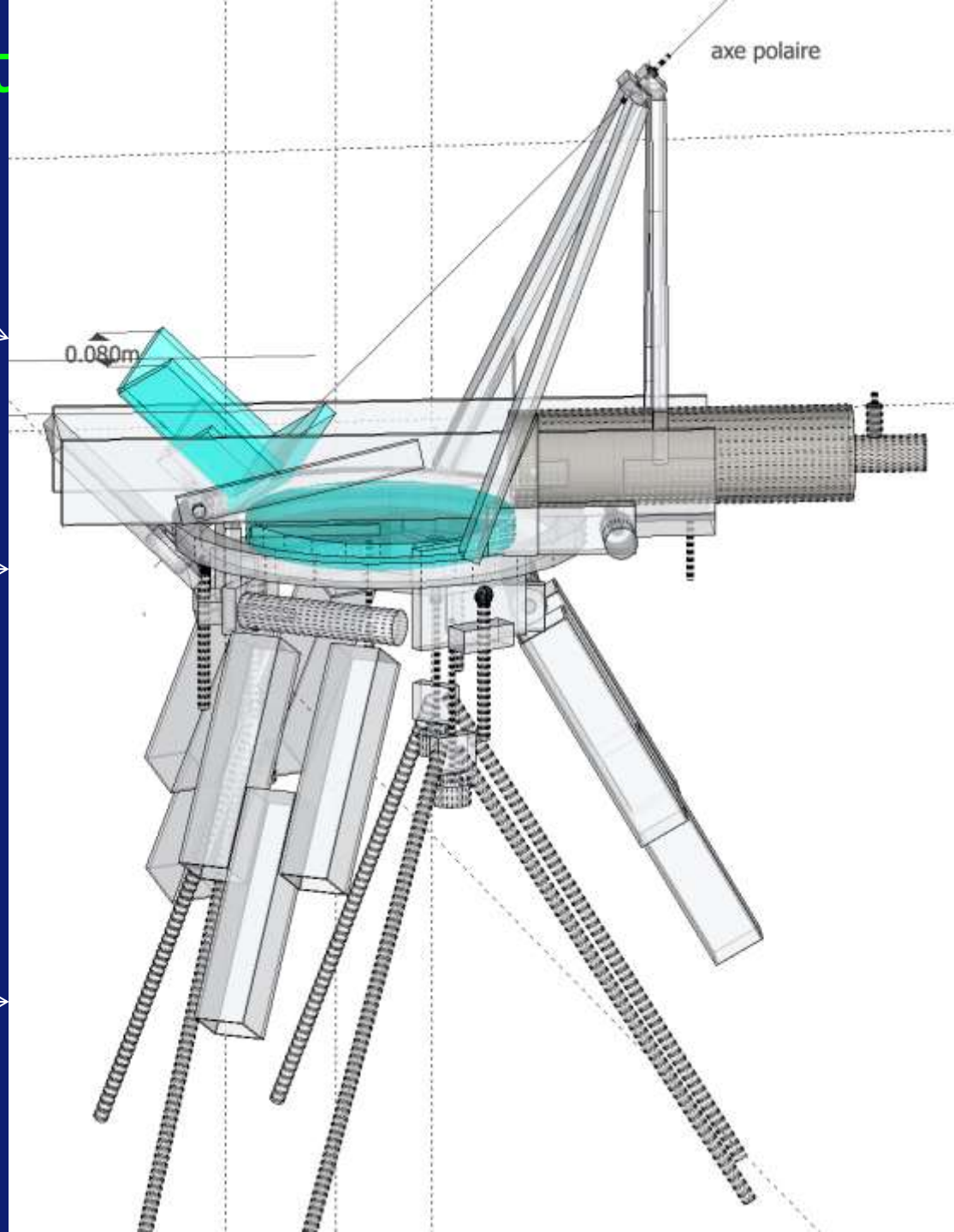


Viseur d'alignement amovible

séparatrice
trièdre

miroir

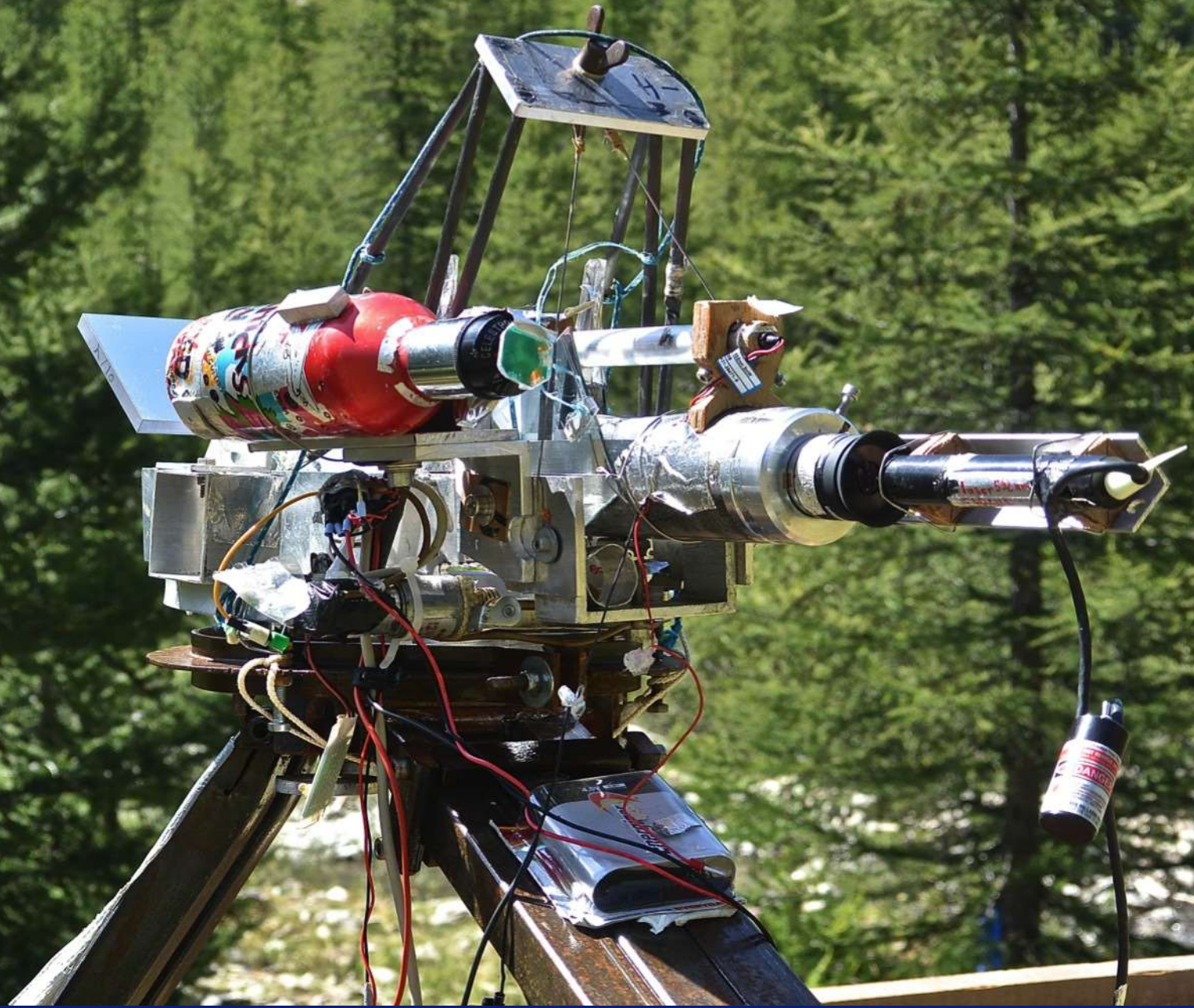
tripode
support



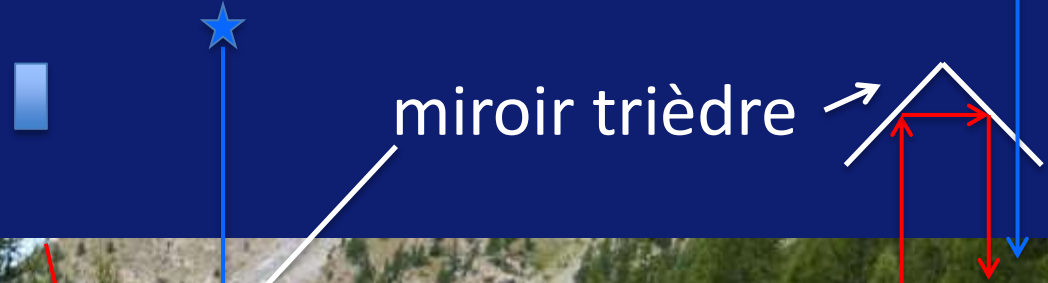
Miroir et viseur d'alignement, amovible



Viseur amovible de réglage de l'inclinaison



Viseur d'alignement des miroirs : version B



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

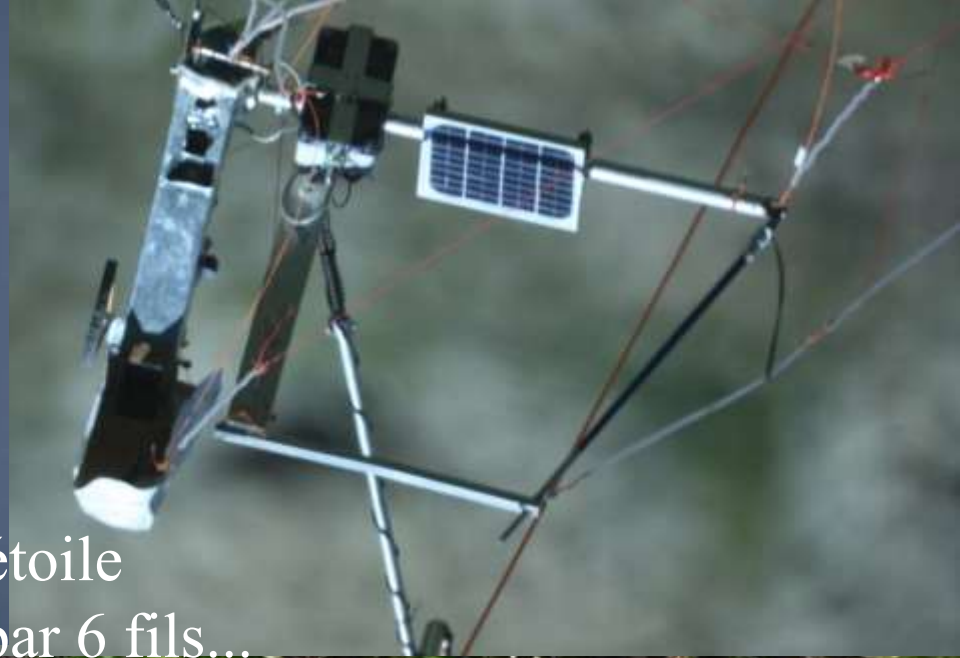


Foyer coudé dans l'ubac



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

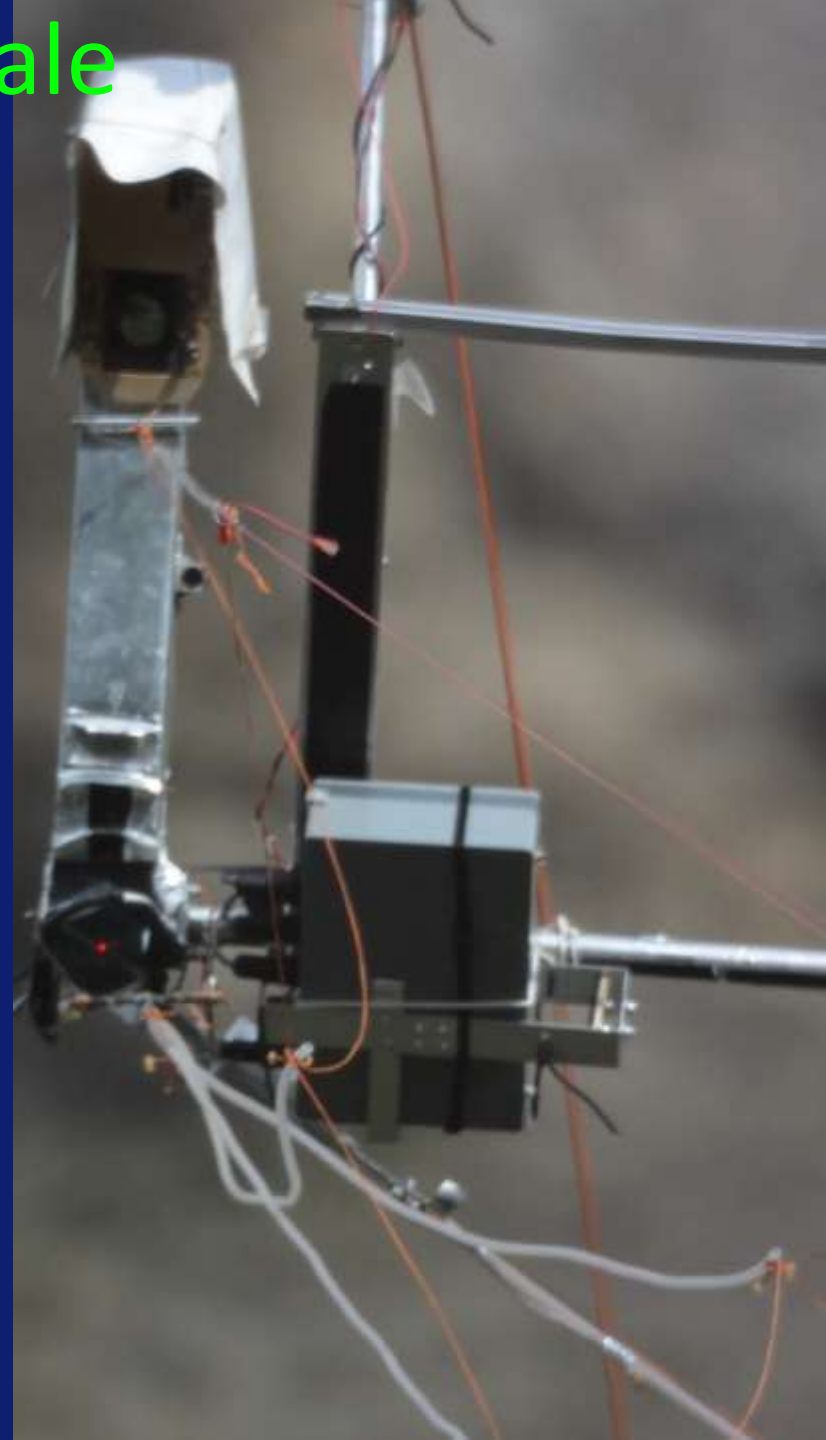
- deux à l'Est, un à l'Ouest



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

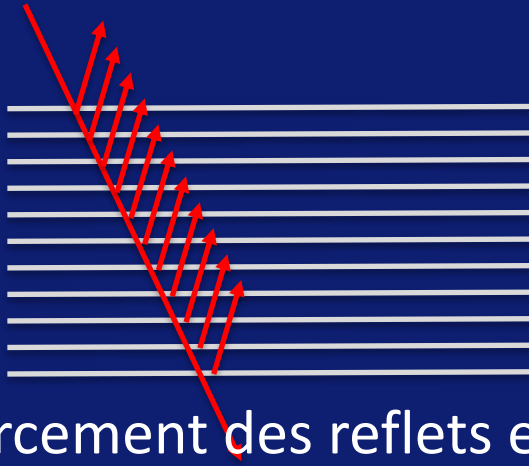


Et les oiseaux ?

- Mesures de protection :
- câbles ramenés au sol hors des périodes d'observation
- marqueurs lumineux
- en concertation avec le Parc National du Mercantour



Interférences volantes



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

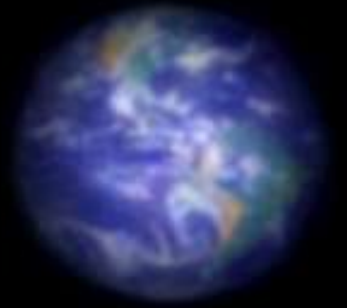


Propositions d'hypertélescopes pour l'espace

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



Avaient-ils imaginé les perspectives de l'interférométrie ?

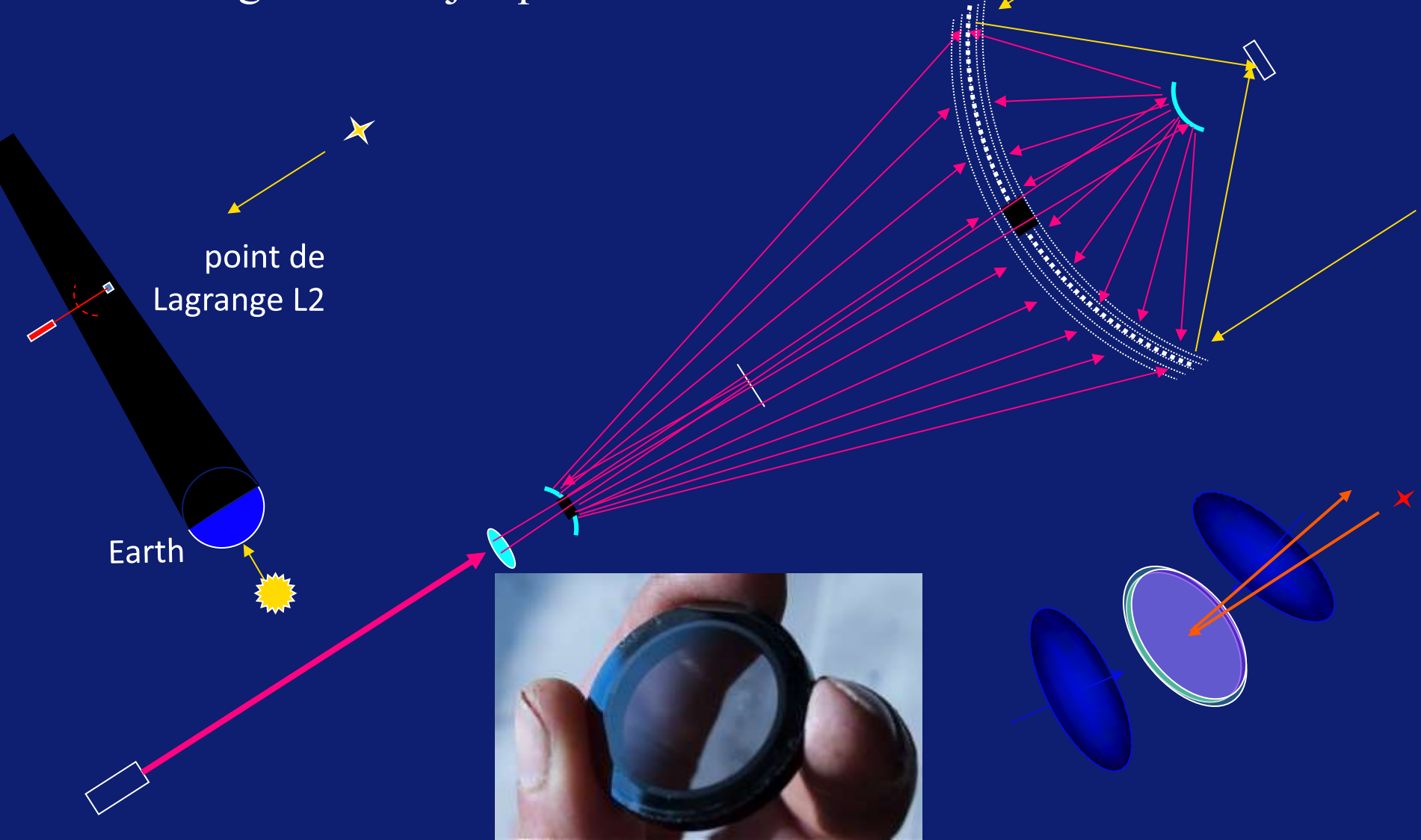


- ... centaines d'ouvertures
- ... imagerie directe
- il manquait les moyens techniques:
 - mise en phase adaptative, caméras, asservissements, ordinateurs, etc...



Dans l'espace : hypertelescope sous forme d'une flotille de miroirs

diamètre augmentable jusqu'à 10 km... ou 100 000km



Etapes futures ?

- hypertélescopes pour images directes riches
 - sur Terre : 100 ou 1000 ouvertures dans une méta-ouverture
 - 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

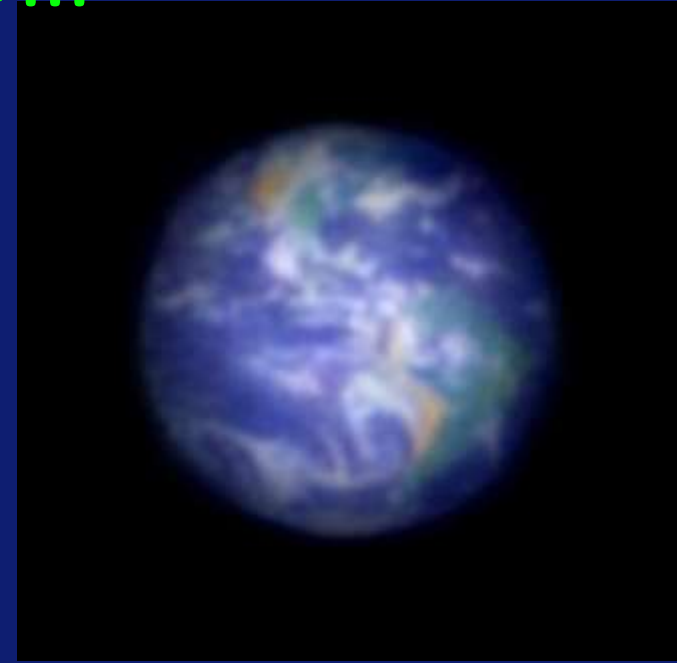


image simulée d'une exo-Terre à
10 années-lumière
hypertélescope « Exo-Earth
Imager » de 100km (Labeyrie,
Science, 1999)

L'équipe en Aout 2013:

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

film par Martine Roussel (2012, 17mn):

<https://lise.oca.eu>



Astronomes amateurs et bénévoles: ils contribuent efficacement... à domicile et sur le site

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



Association « Hypertélescope LISE »: co- finance le projet

www.hypertelescope.org

autres sites:

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

<https://lise.oca.eu>