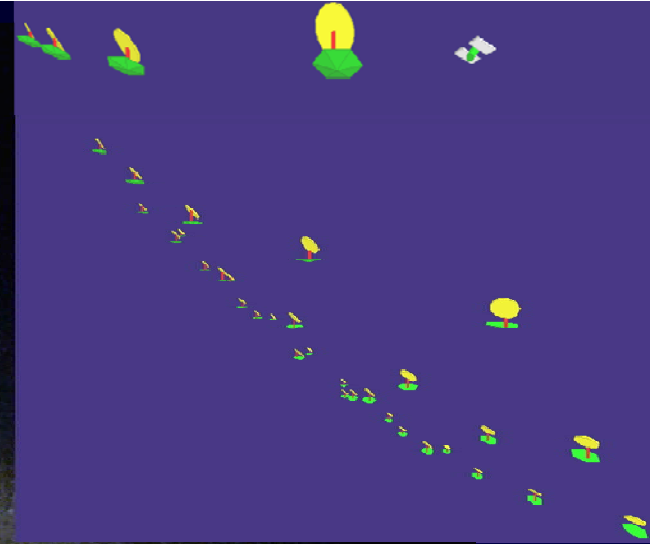
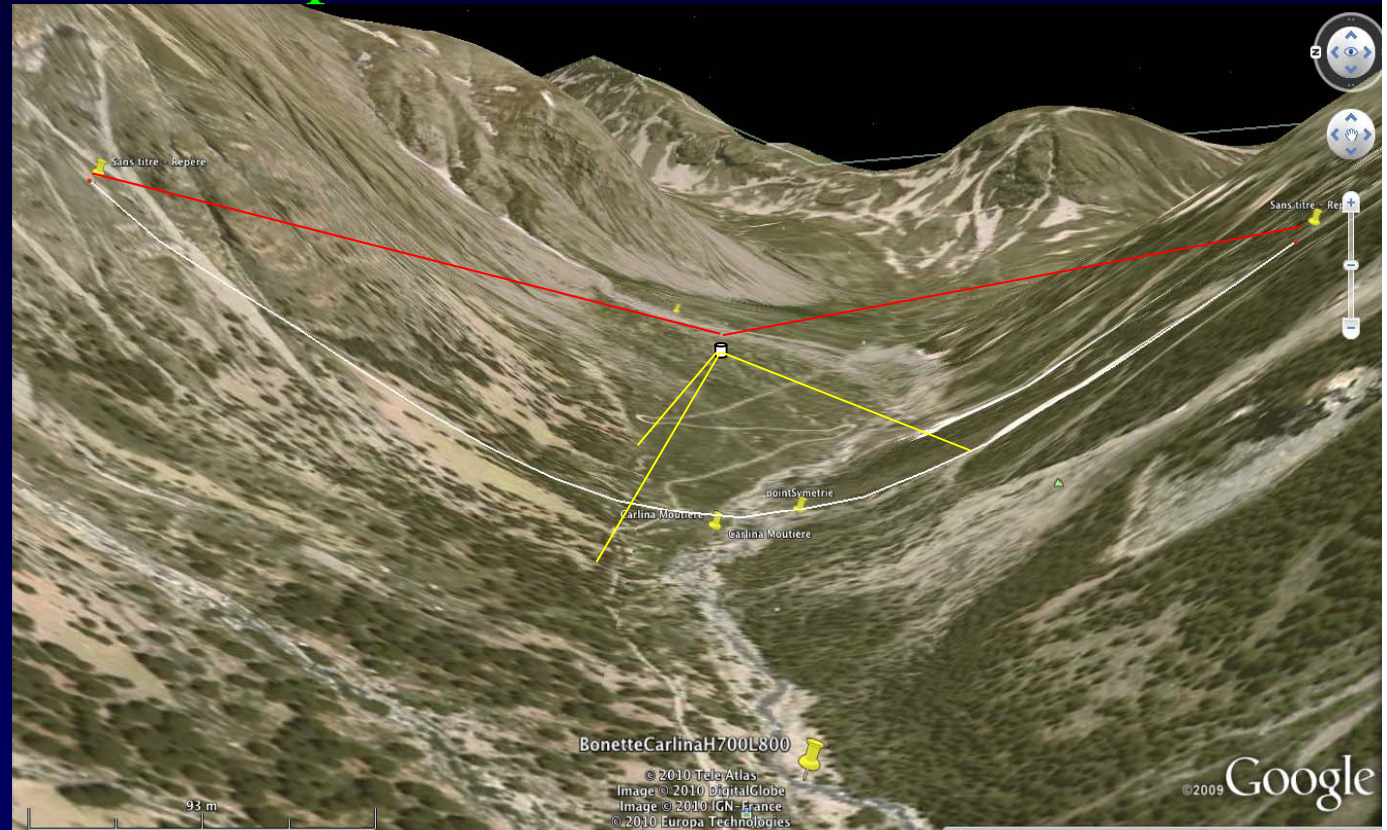


# Exo-planètes, étoiles et galaxies : progrès de l'observation



- videos des cours précédents sur:  
[www.college-de-france.fr/default/EN/all/ast\\_obs/audiovideo.jsp](http://www.college-de-france.fr/default/EN/all/ast_obs/audiovideo.jsp)
- Articles sur: [www.oamp.fr/lise](http://www.oamp.fr/lise)

# Un hypertélescope au Coeur des Alpes du Sud (vallée de l'Ubaye)... et la taille supérieure



- A 11h30: séminaire de François-Xavier Désert (Observatoire de Grenoble, IPAG)  
L'évolution des détecteurs sub-millimétriques et la révolution des observations astrophysiques

à 16h: discussion table ronde

"Vers la proposition d'un grand hypertélescope à ouverture de 500-1500m : quelle science ? quel site ? quel concept ?

Dans les locaux du colloque R&D INSU

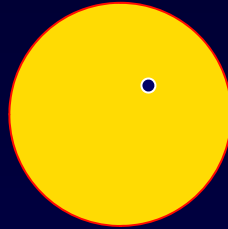




Mieux voir les étoiles,  
leurs planètes: présence de vie ?  
les galaxies,  
l'univers lointain

Résultat récent par photométrie:

## 6 exo-planètes d'une étoile, vues en transit ...



Éclipses  
moyennées

- non résolu angulairement,  
photométrie

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

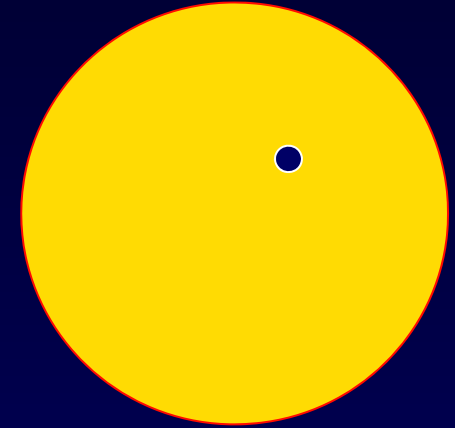
QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

Courbe de lumière

A closely packed system of low-mass, low-density planets  
transiting Kepler-11, [Lissauer et al.](#), **Nature**, 2011

Exo-planètes en transit ...

on gagnera beaucoup à faire des images résolues



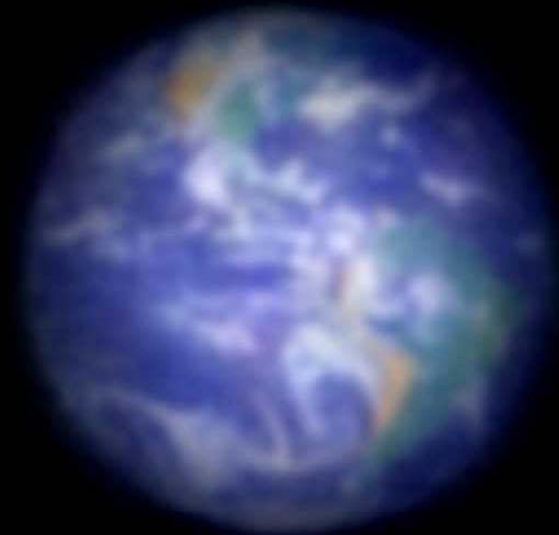
- ... notamment pour déterminer la composition chimique de leur atmosphère, par spectro-imagerie
- il faut un interféromètre imageur instantané: hypertélescope

## Interférométrie:

# l'heure des hypertélescopes arrive

- 100 ou 1000 ouvertures
- pour des images directes, instantanées ...
- riches en information ...
- sur des objets complexes, variables, à fort contraste ( exo-planètes)

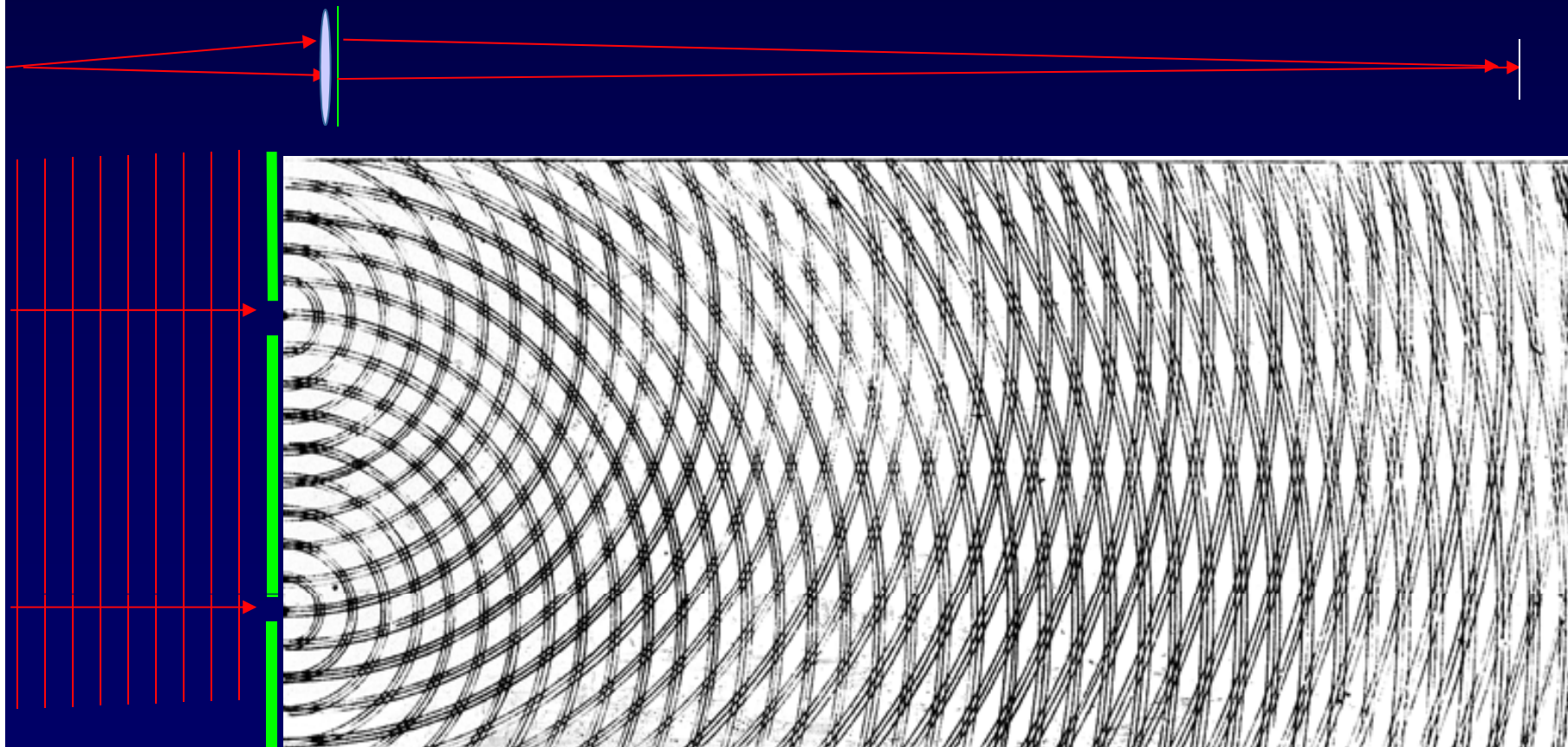
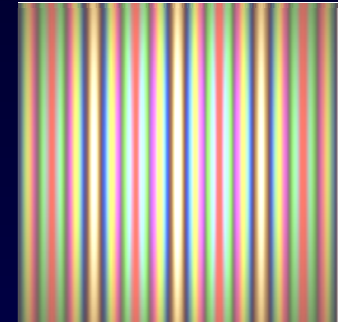
Exemple: image simulée d'une Terre à  
10 années-lumière,  
Avec 100 ouvertures de 1,5m en flotille  
de 100km



# Interférences d'Young ( ca. 1810)

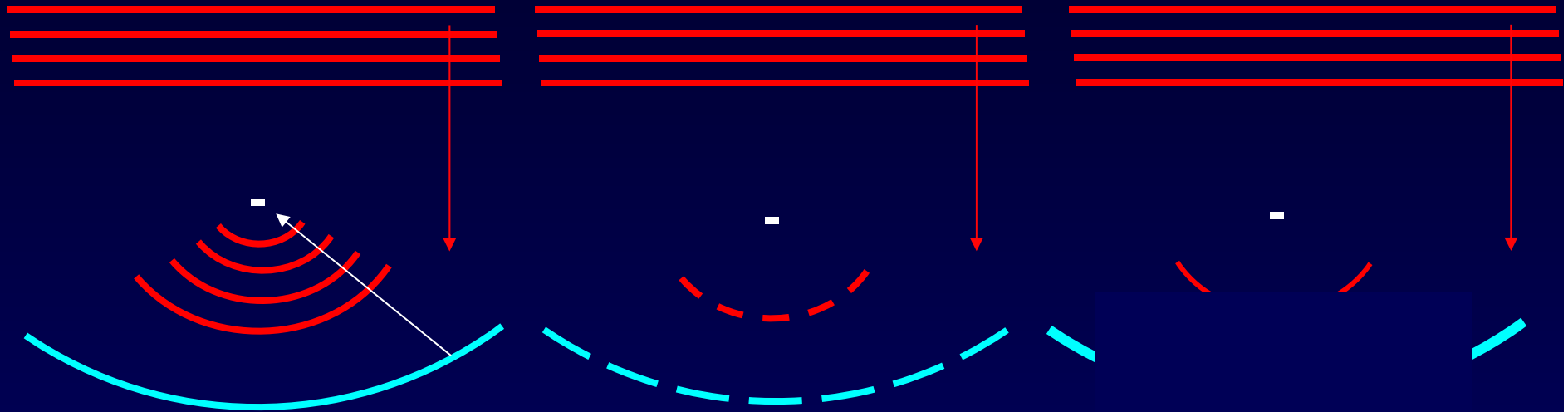
Franges d'Young

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

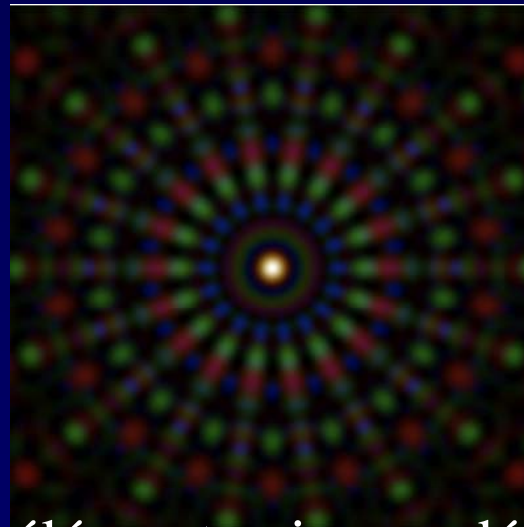




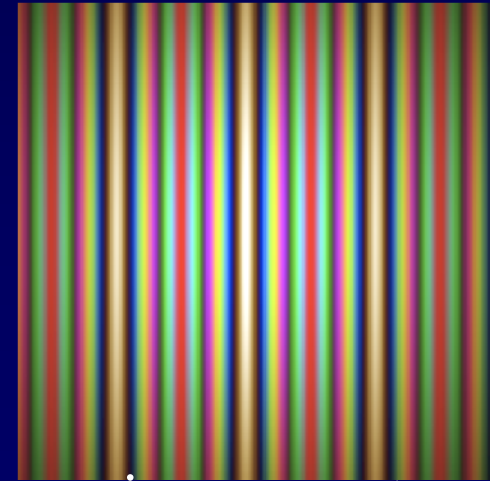
# Interféromètre



Tache de  
diffraction  
d'Airy

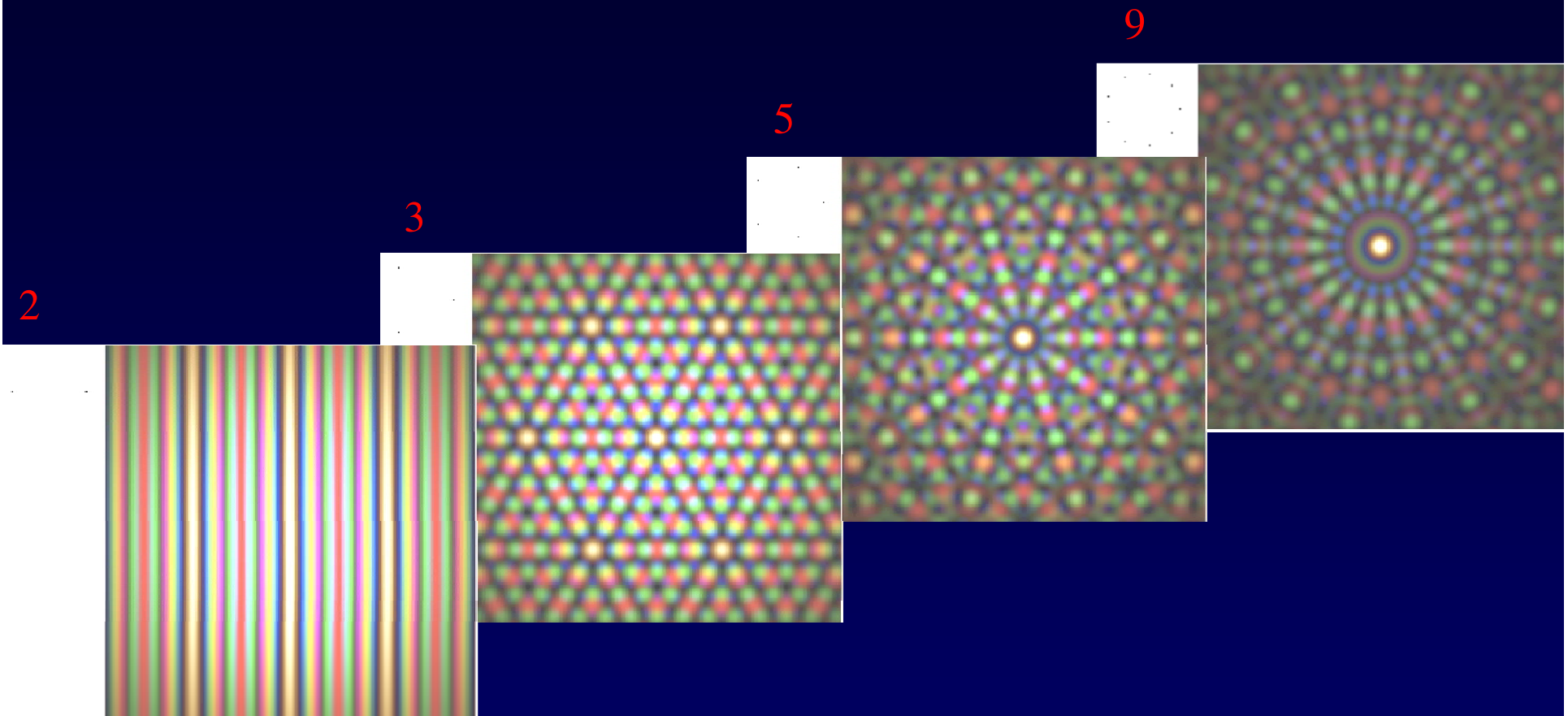


Interféromètre Fizeau



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

# Interférences de Fizeau avec 2, 3, 5 & 9 ouvertures

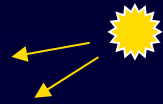
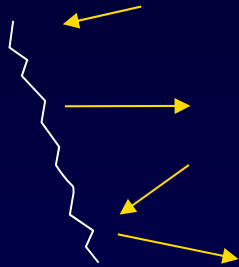


- Le pic central blanc s'intensifie avec plus d'ouvertures

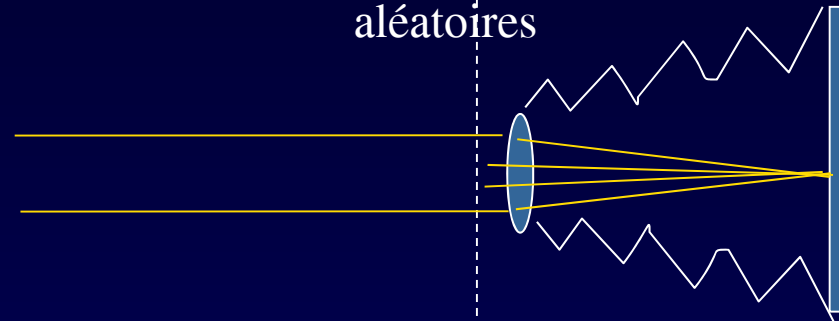
Petite expérience pour bricoleurs:

## Imagerie Fizeau d'un objet étendu

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"

# Imagerie Fizeau: simulations numériques par transformation de Fourier et convolution

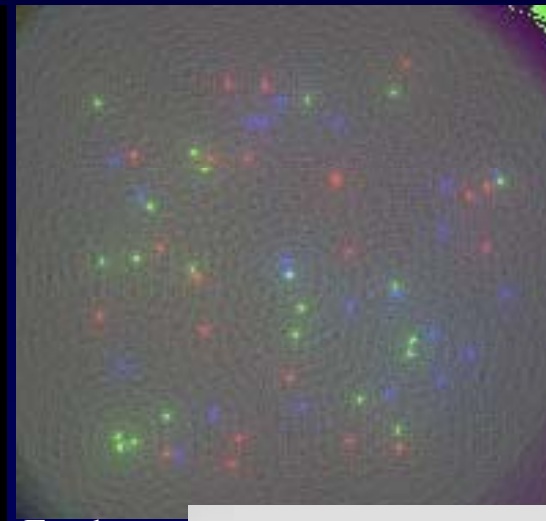
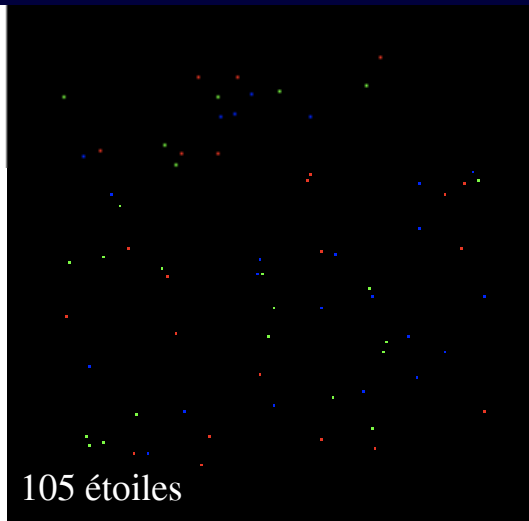
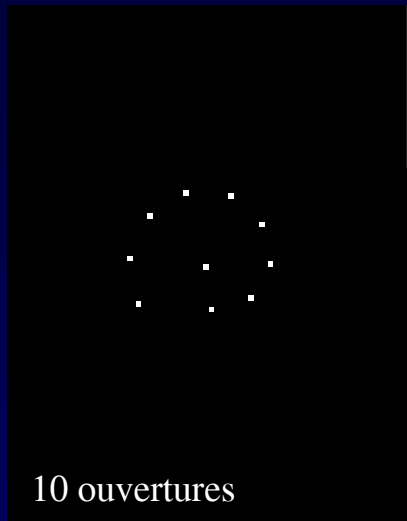


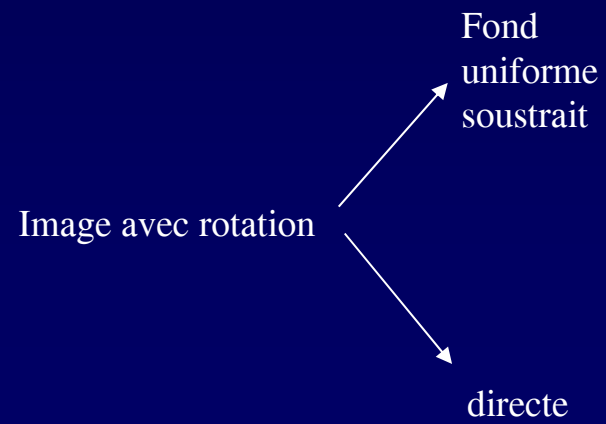
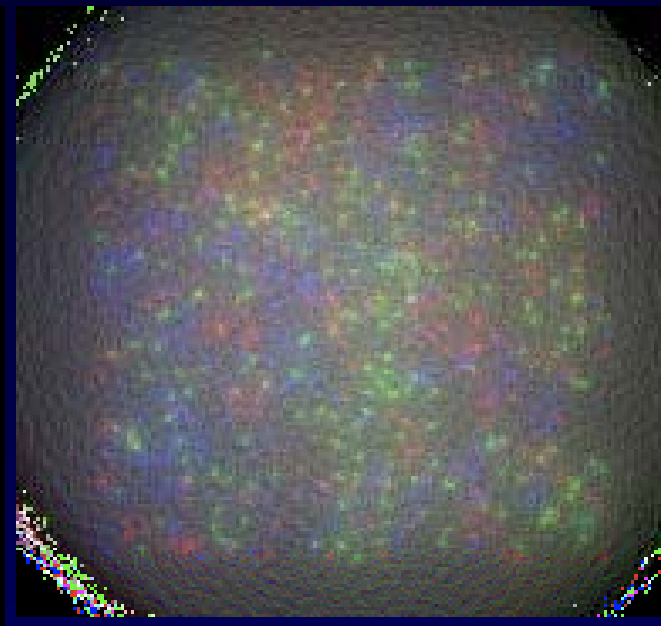
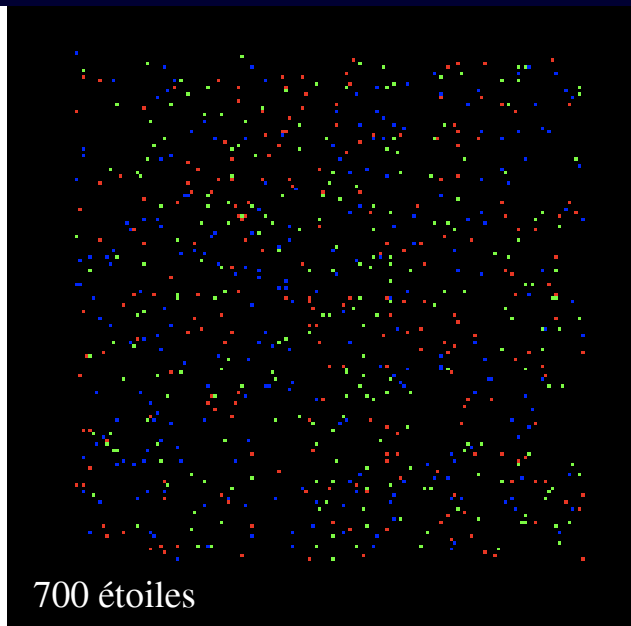
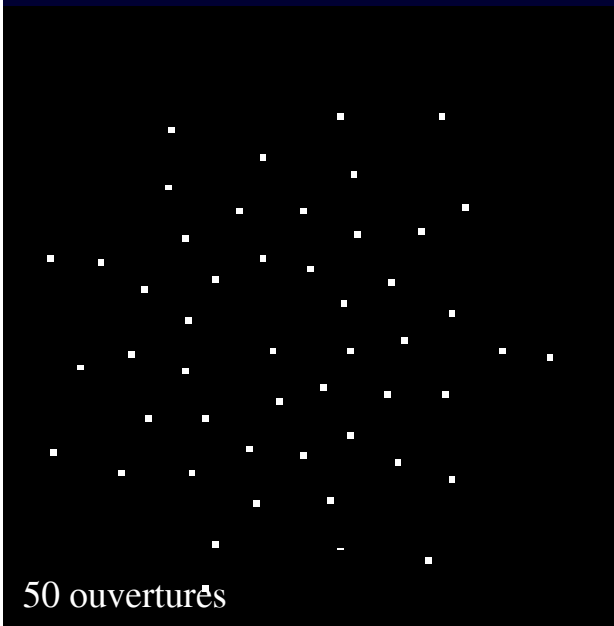
Image avec rotation

Fond continu soustrait

directe



# Imagerie Fizeau: simulations numériques

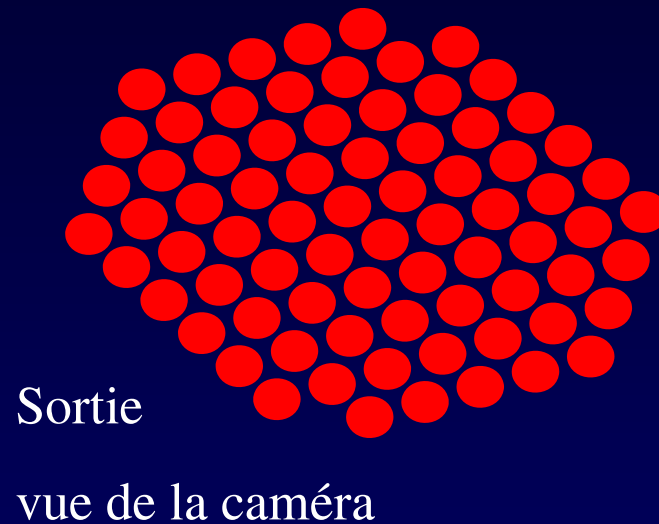
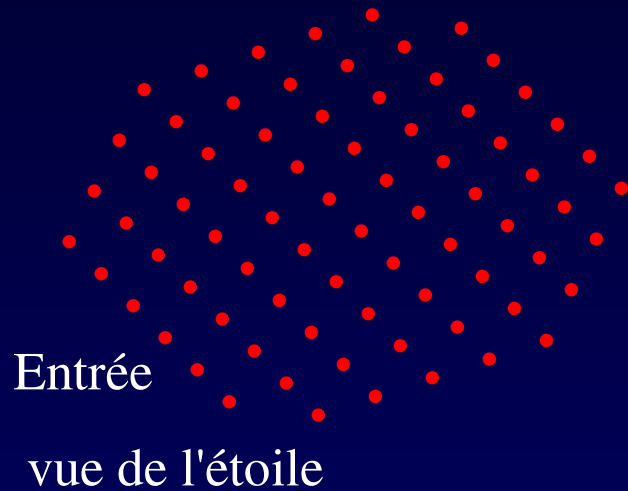


# Imagerie Fizeau multi-ouverture et hypertélescope: quelle différence ?

- Les deux donnent des images directes, riches en information
- Meilleure luminosité en densifiant la pupille
- Gain accru si l'ouverture est très diluée

## Améliorer l'interféromètre Fizeau:

densifier la pupille pour une image plus lumineuse

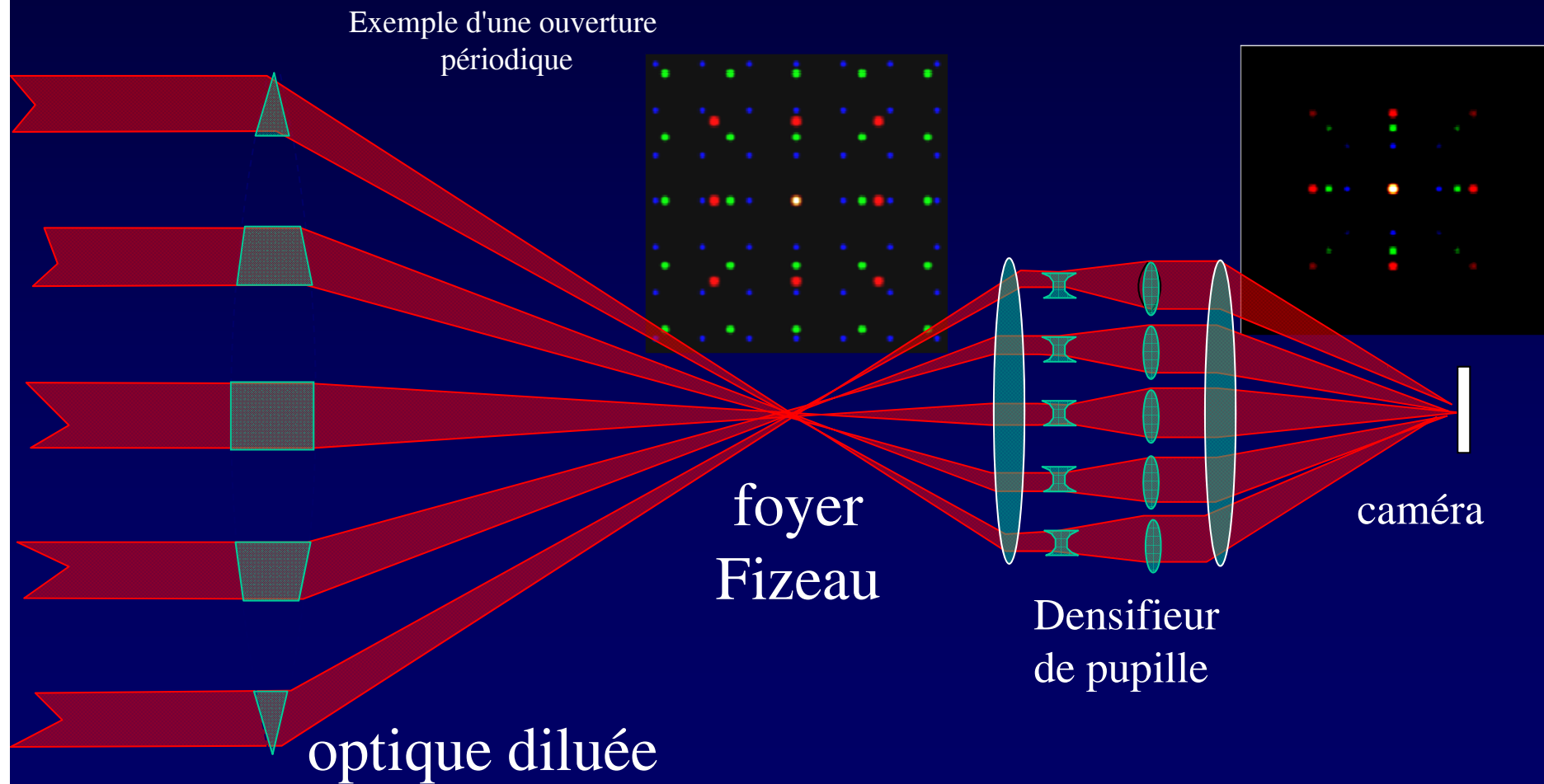


- sans modifier l'ouverture d'entrée ...
- rétrécit le halo de diffraction
- concentre sa lumière dans le pic d'interférence
- intensifie l'image qu'il forme

# Principe de l'hypertélescope

ou « interféromètre imageur multi-ouverture à pupille densifiée »

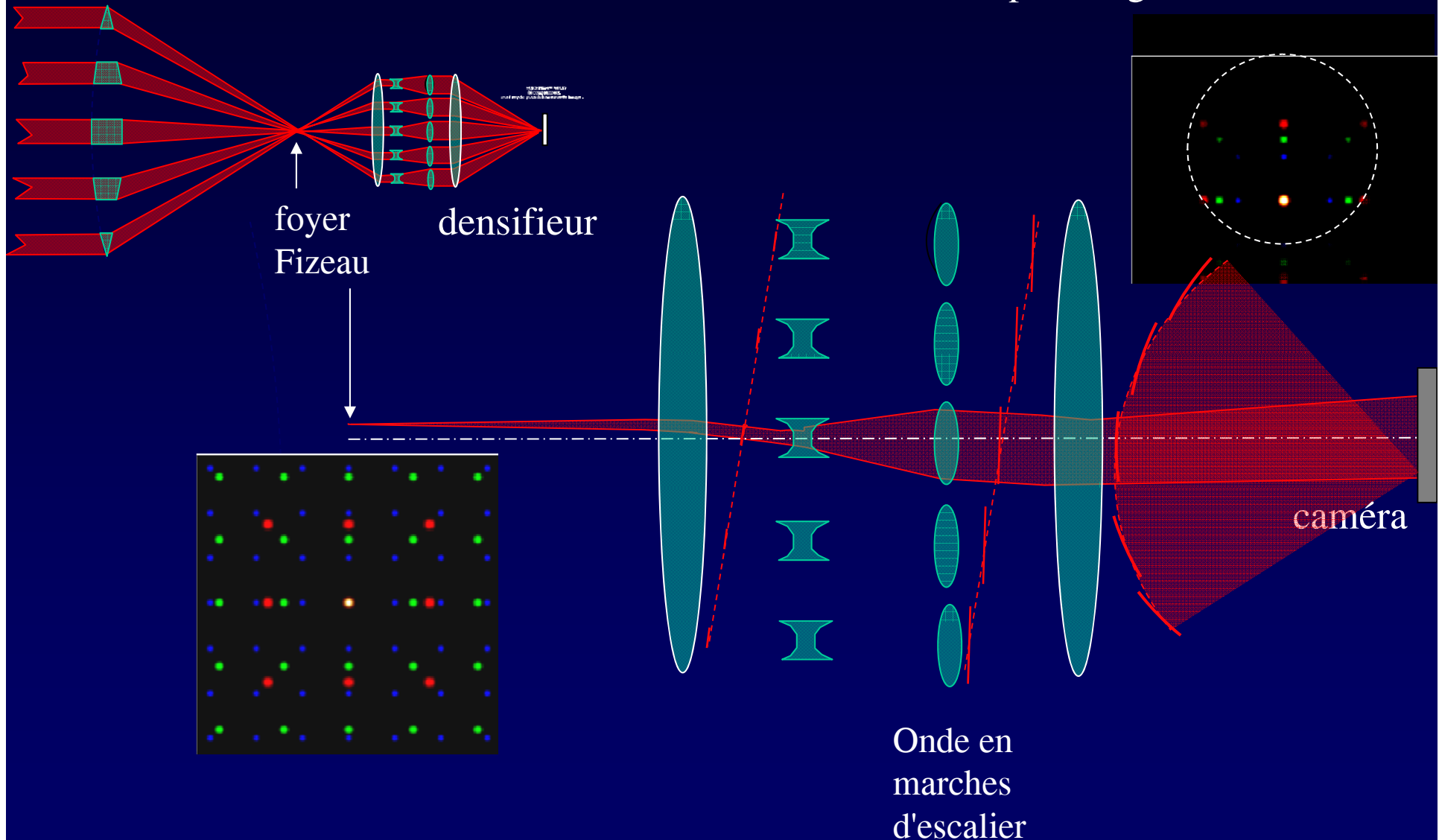
(Labeyrie A&A, 1996)





# Etoiles hors de l'axe

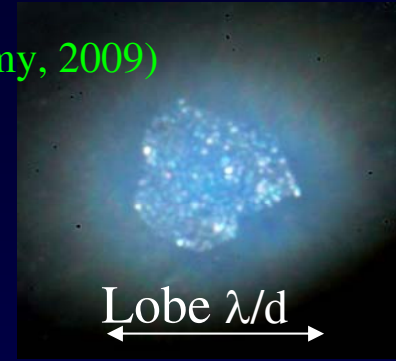
- Les images se déplacent plus vite que leur enveloppe...
- ... et en sortent éventuellement => limitation du "Champ d'Imagerie Directe "



## Interféromètre ou hypertélescope:

# Ouvertures petites et nombreuses: le gain en science

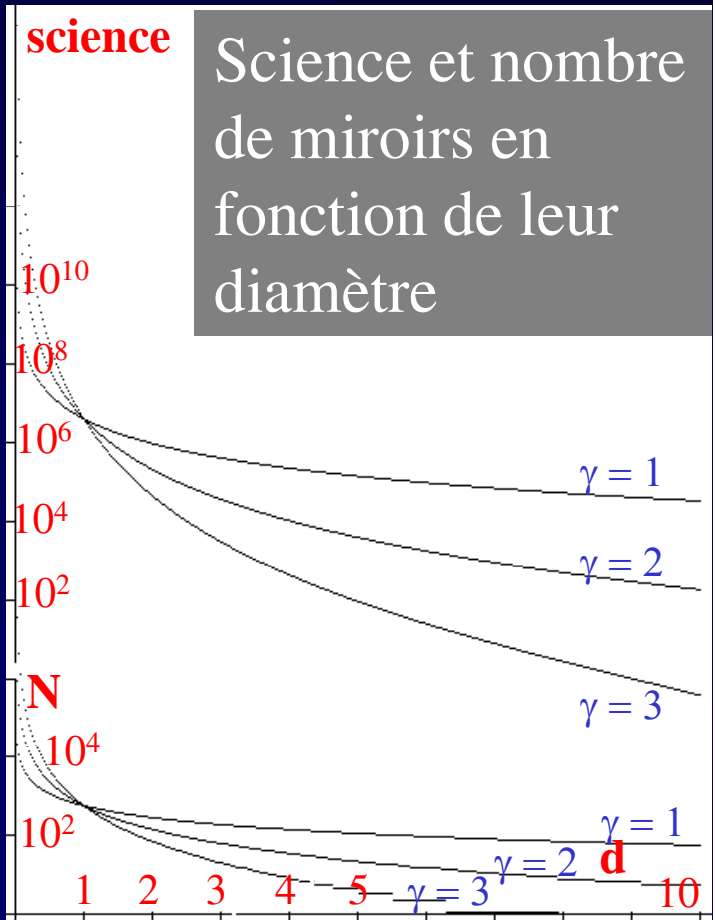
(Labeyrie et al., Exp. Astronomy, 2009)



- Champ encombré: le nombre max. tolérable d'étoiles croît en  $N^2$
- Le diamètre du "Direct Imaging Field" est :
  - Infini pour un Fizeau
  - limité à  $\lambda/s$  avec pupille densifiée (  $s$  est la distance des ouvertures)
- Science vs. dimension des miroirs  $d$ , à coût donné  $C_{pa} = N d^\gamma$ , où  $\gamma = 2$  à  $3$

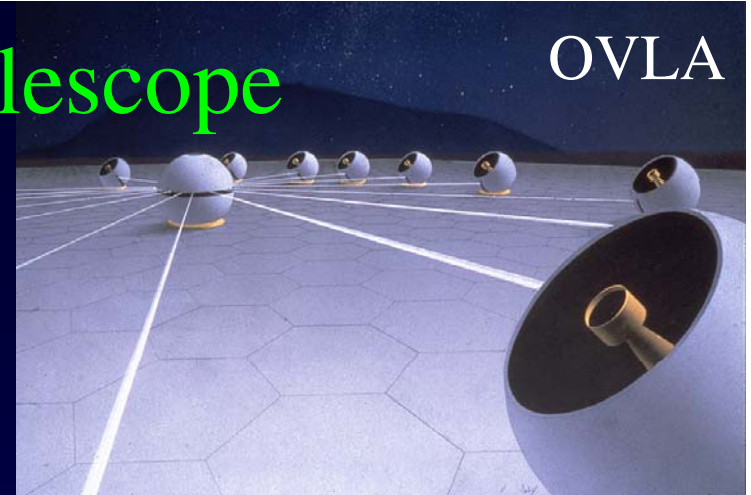
$$Sc = C_{pa}^2 d^{-2\gamma} \left\{ \frac{7}{4} \log_2 C_{pa} + \left(1 - \frac{7\gamma}{4}\right) \log_2 d \right\}$$

- Fort gain en science si  $d$  diminue
- **1000 fois plus de science avec 10cm que 1m**
- Mais rétrécir jusqu'où ? Pas trop pour limiter la diffraction
- Exemple du " Laser Trapped Hypetelescope Flotilla" : 40,000 mirrors de 30mm pour égaler la surface collectrice du JWST

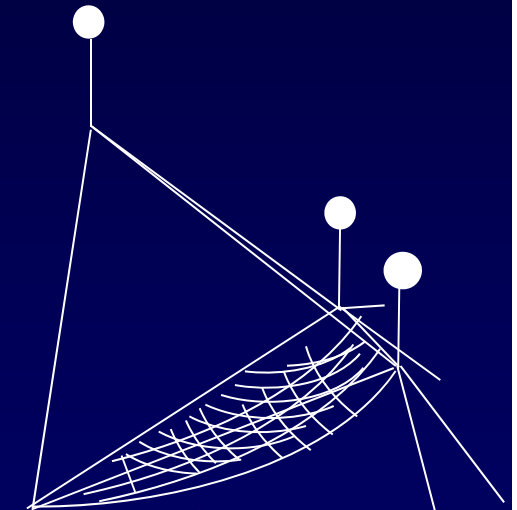
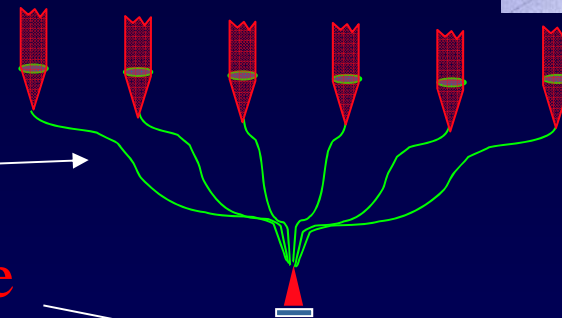


# Types d' architectures hypertélescope

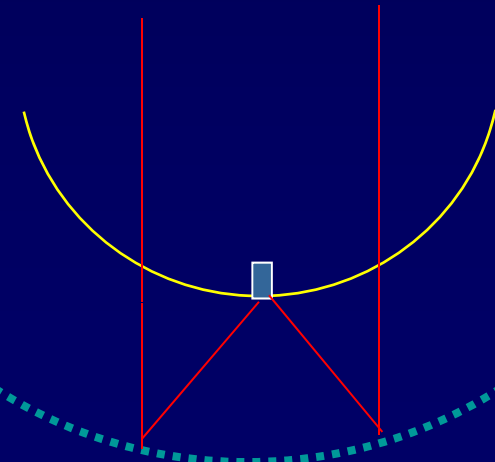
OVLA



- plat
- plat fibré
- Paraboloïde **pointable**
- sphérique "Carlina"

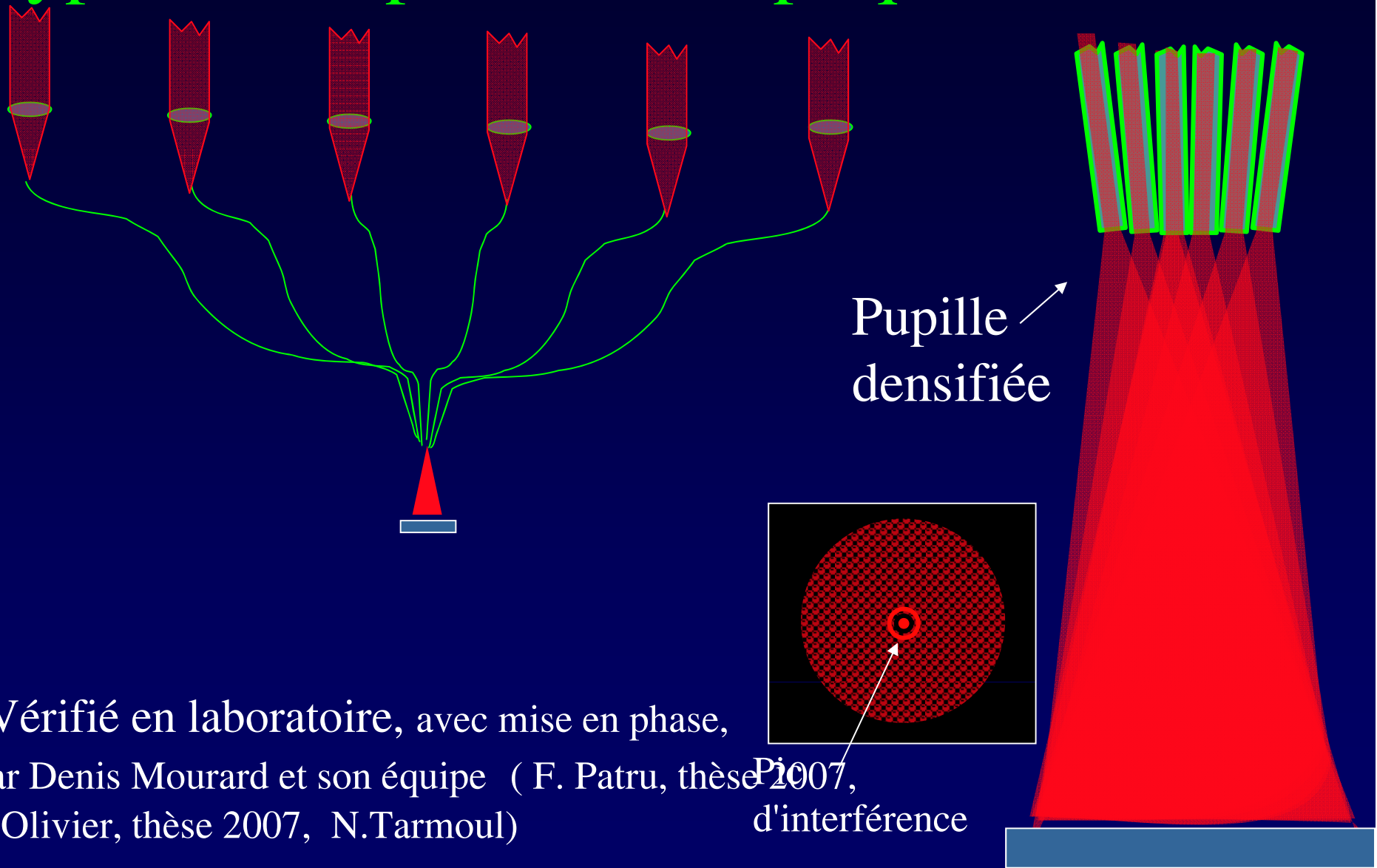


Carlina acanthifolia



Convient aussi pour flotille dans l'espace

# Hypertélescope à fibres optiques



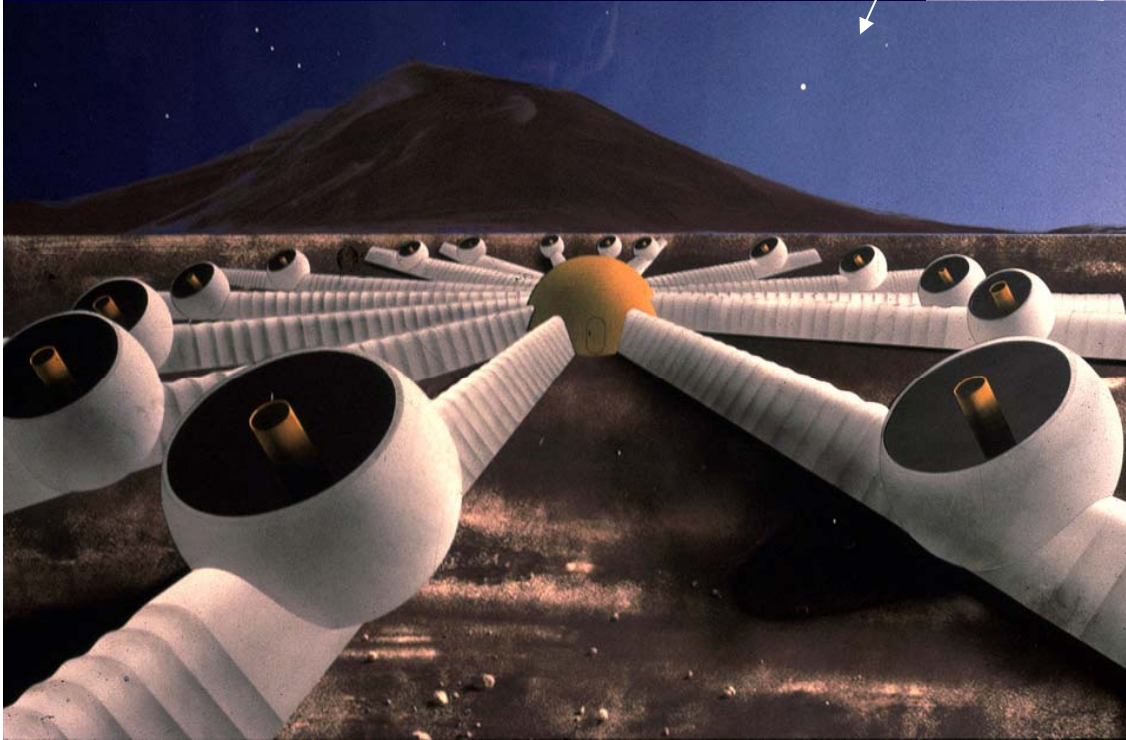
- Vérifié en laboratoire, avec mise en phase, par Denis Mourard et son équipe ( F. Patru, thèse 2007, S.Olivier, thèse 2007, N.Tarmoul)

- proposé pour coronographie par Serabyn (2007)

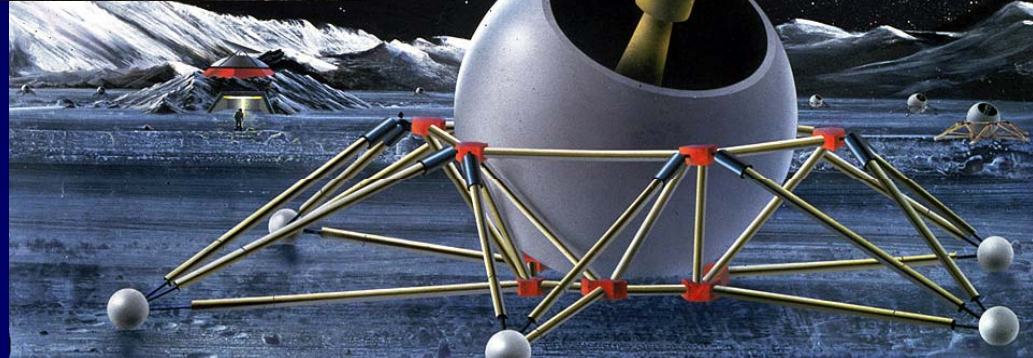
Interféromètres:

# Concepts initiaux ( ca. 1990)

Optical Very Large Array

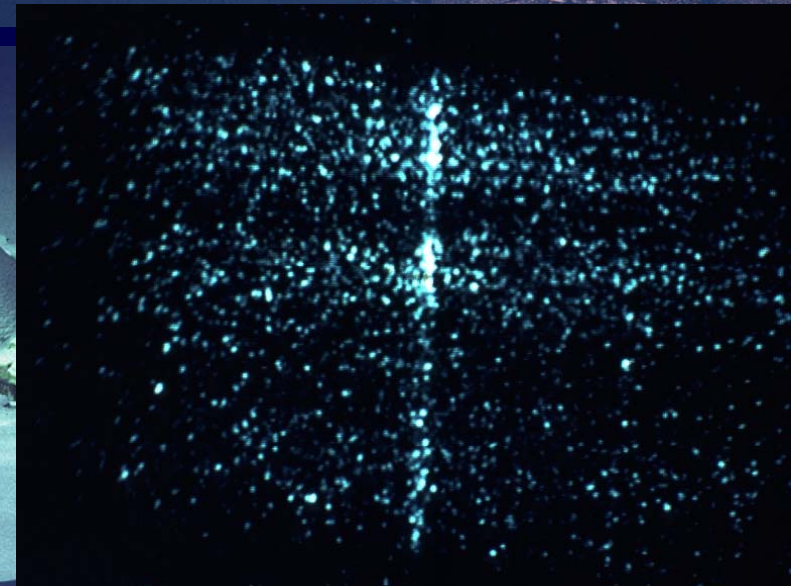


Lunar Optical Very Large Array



# Grand Interféromètre à 2 Télescopes ( GI2T)

- 10 ans pour le construire
- Motiva la construction de VLTi et Keck



gamma Cass ( Mourard et al. , Nature, 1989)

# Interféromètres en optique:

au stade actuel : seulement 2 ou 3 ouvertures simultanées



Very Large Telescope Interferometer (Chili)

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

- Ils utilisent des lignes à retard complexes ...
- dont le coût élevé limite sévèrement le nombre d'ouvertures

# ... puis dans l'espace

QuickTime™ et un décompresseur  
Photo-JPEG sont requis pour visualiser  
cette image.

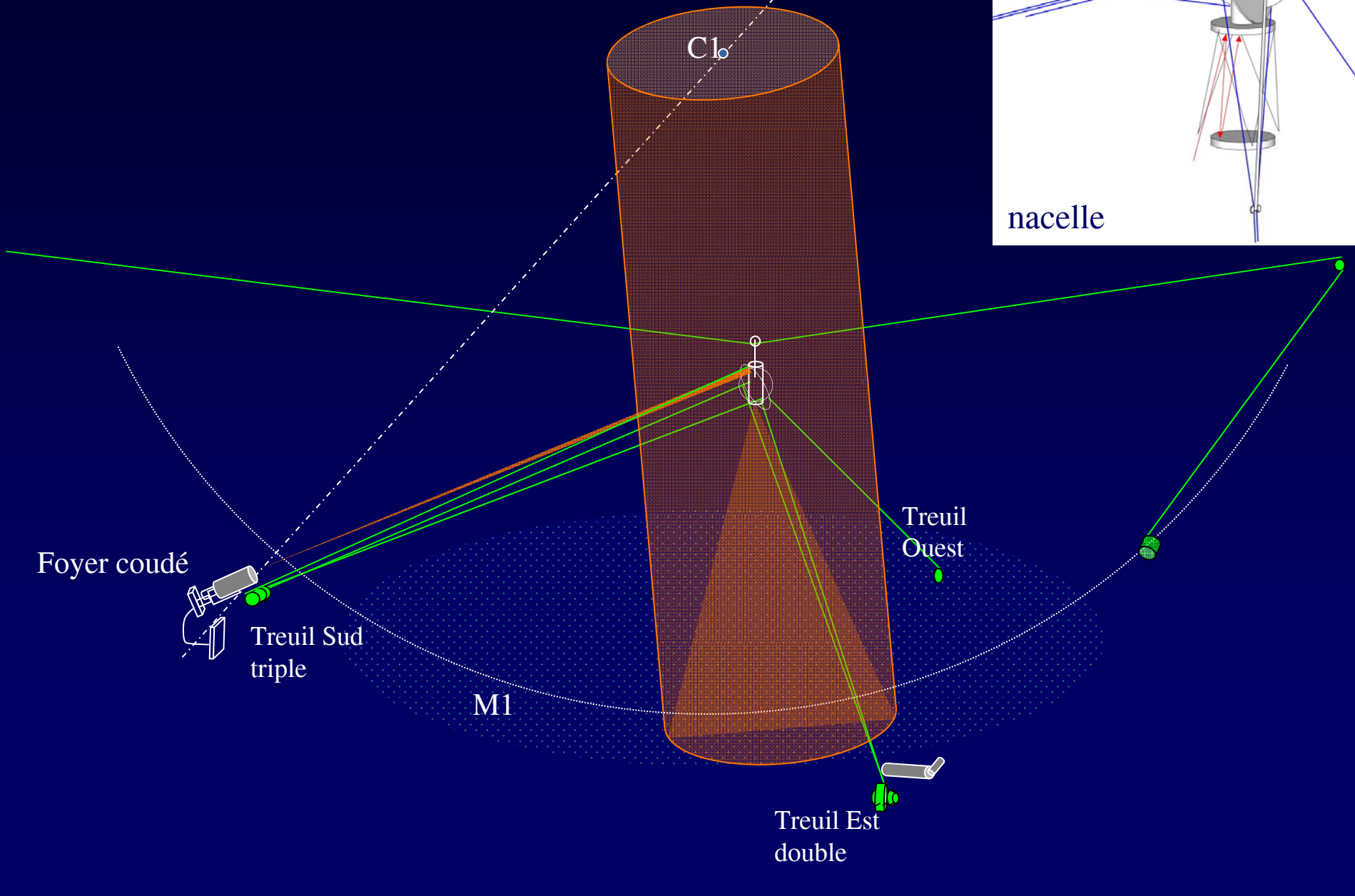
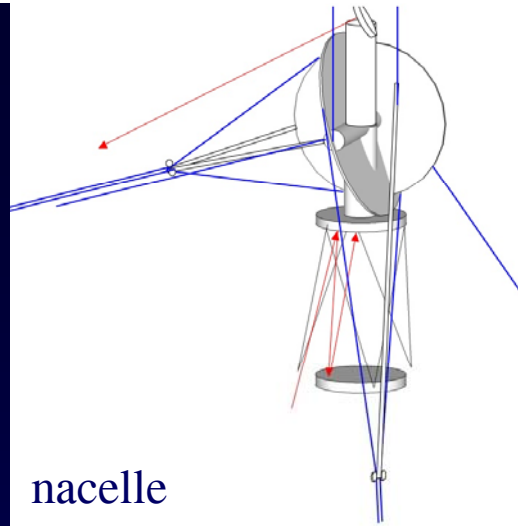
Simulation pour  
Exo-Earth Imager

- Flotille sphérique ou parabolique pointable
- Piégée par laser ?

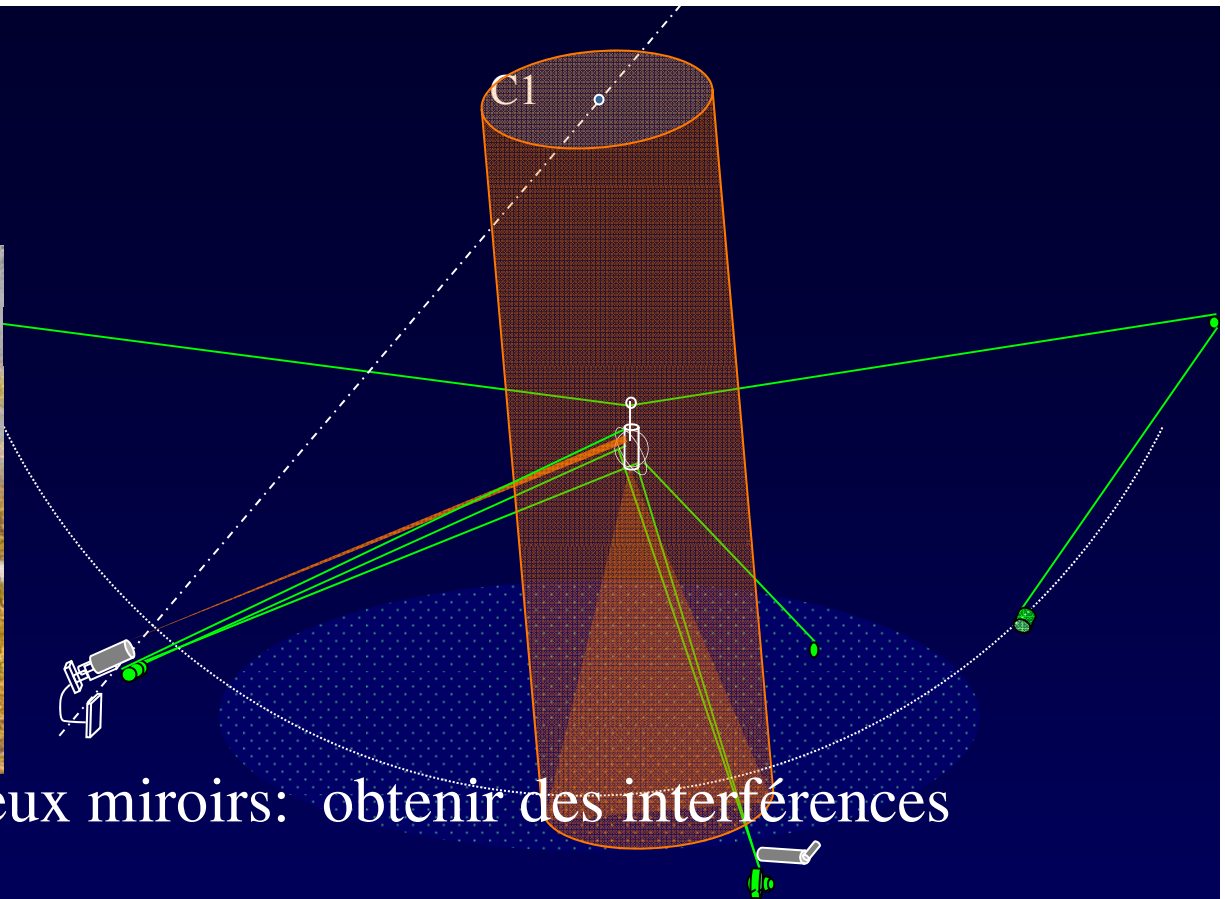


# Hypertélescope Ubaye (essai en cours)

Nord céleste

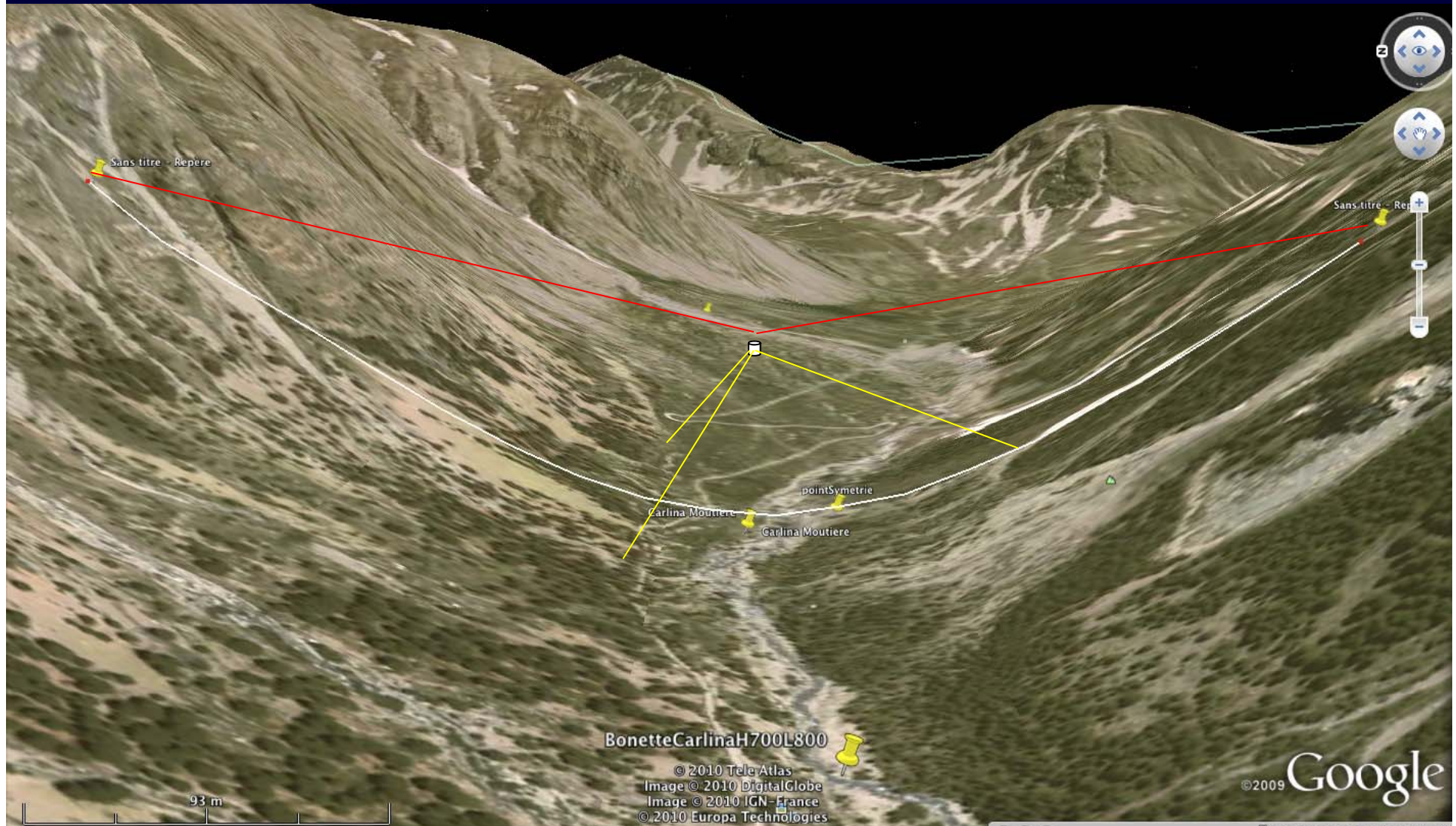


# Hypertélescope Ubaye: Perspectives



- premiers essais avec deux miroirs: obtenir des interférences
- ensuite:
  - Automatisation du pilotage
  - agrandissement à 200m ? installation de 100 miroirs
  - observation sans optique adaptative, puis avec
  - essais d'étoile guide laser
  - proposition d'un "Kilometric hypertélescope" européen

# Site des essais entamés dans l'Ubaye



# Paturage à bouquetins et chamois



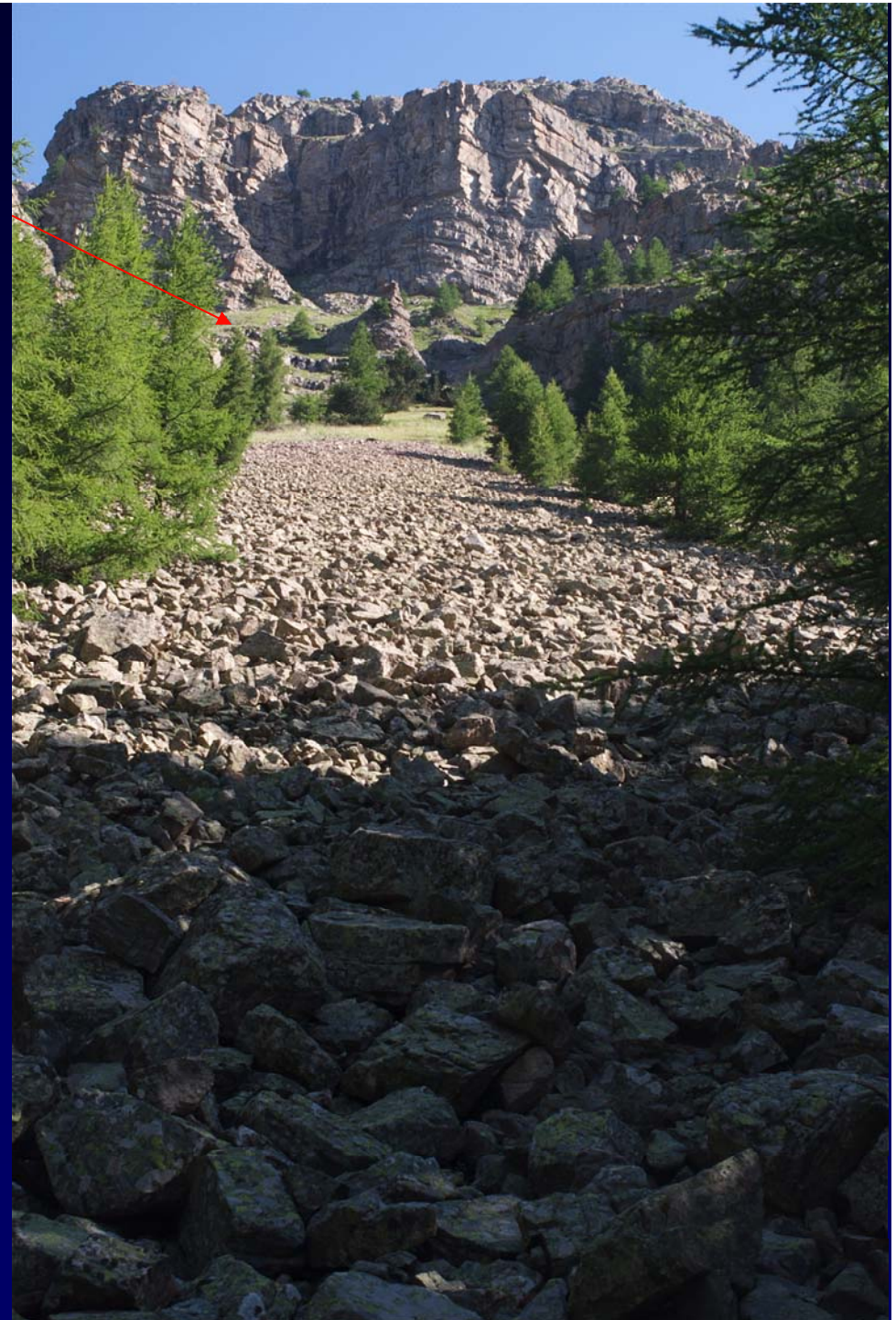
Câble de suspension traversant la vallée sur 800m, en Kevlar de 6mm



# Hubac vu de l'adret



Amarrage du câble porteur  
dans l'adret



# Hubac





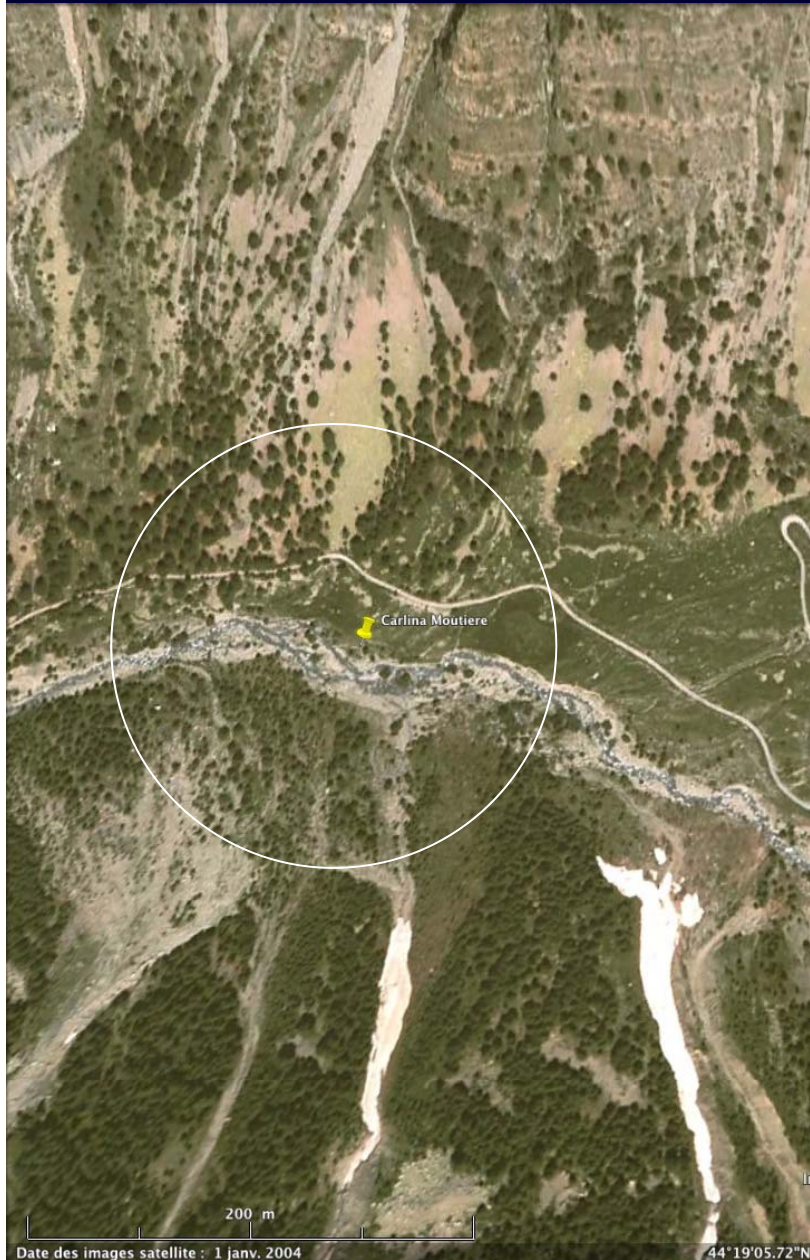
câble



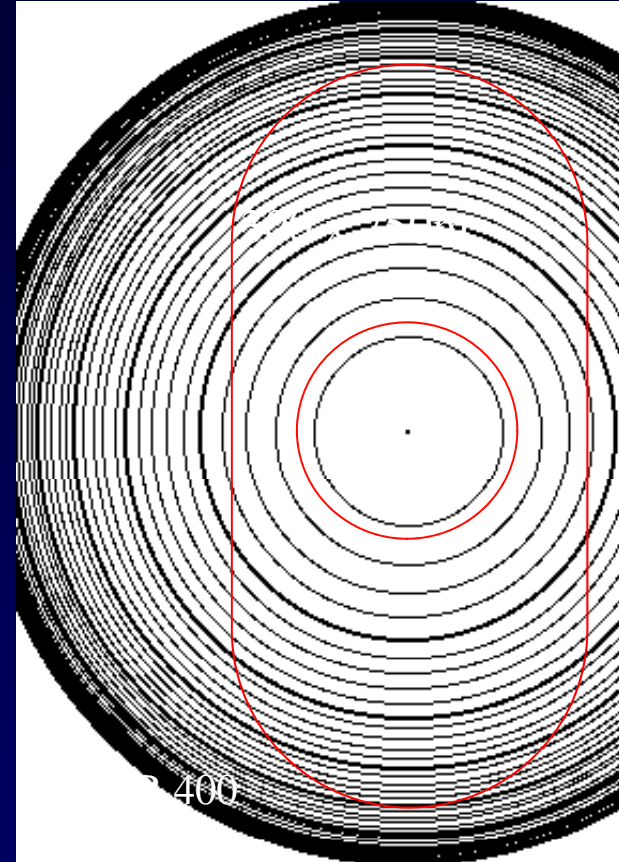
# Vallon de la Moutière, Ubaye

## Implantation d'une ouverture de 200m

### Conclusions

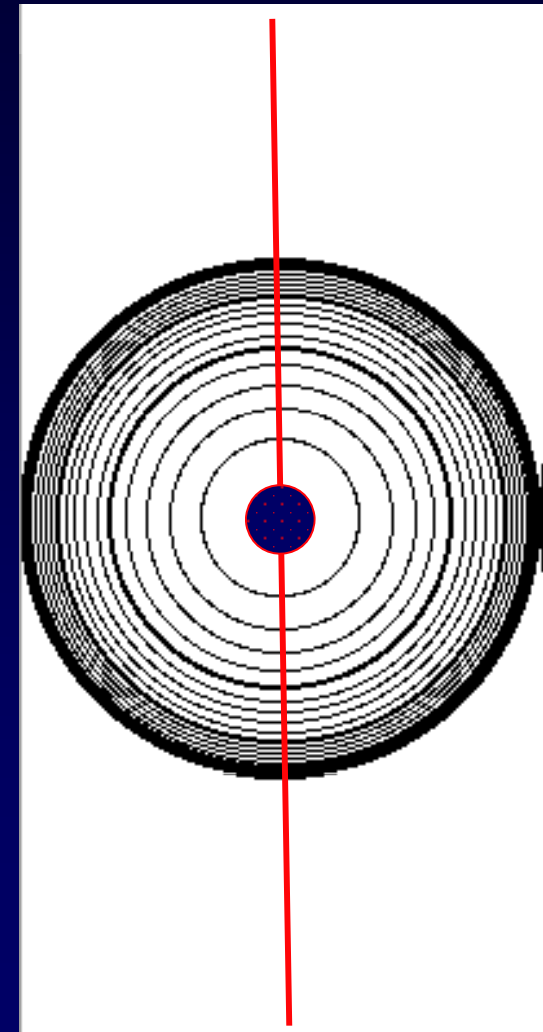
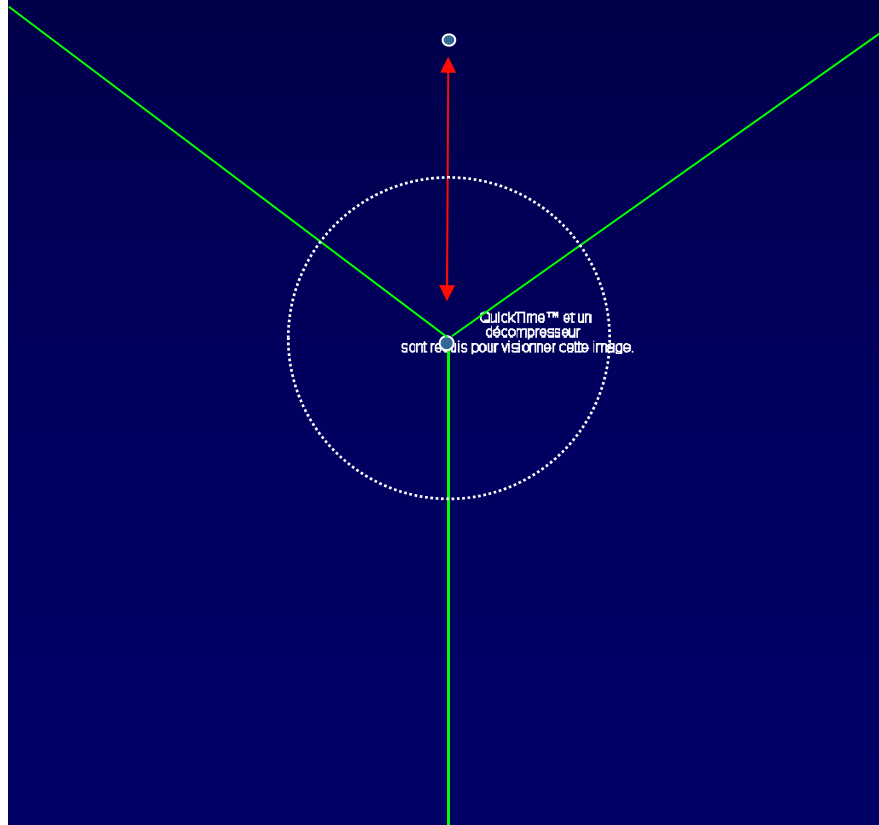


R 360  
valanches  
Click here to view the image.  
decompresseur  
pour visionner cette image.



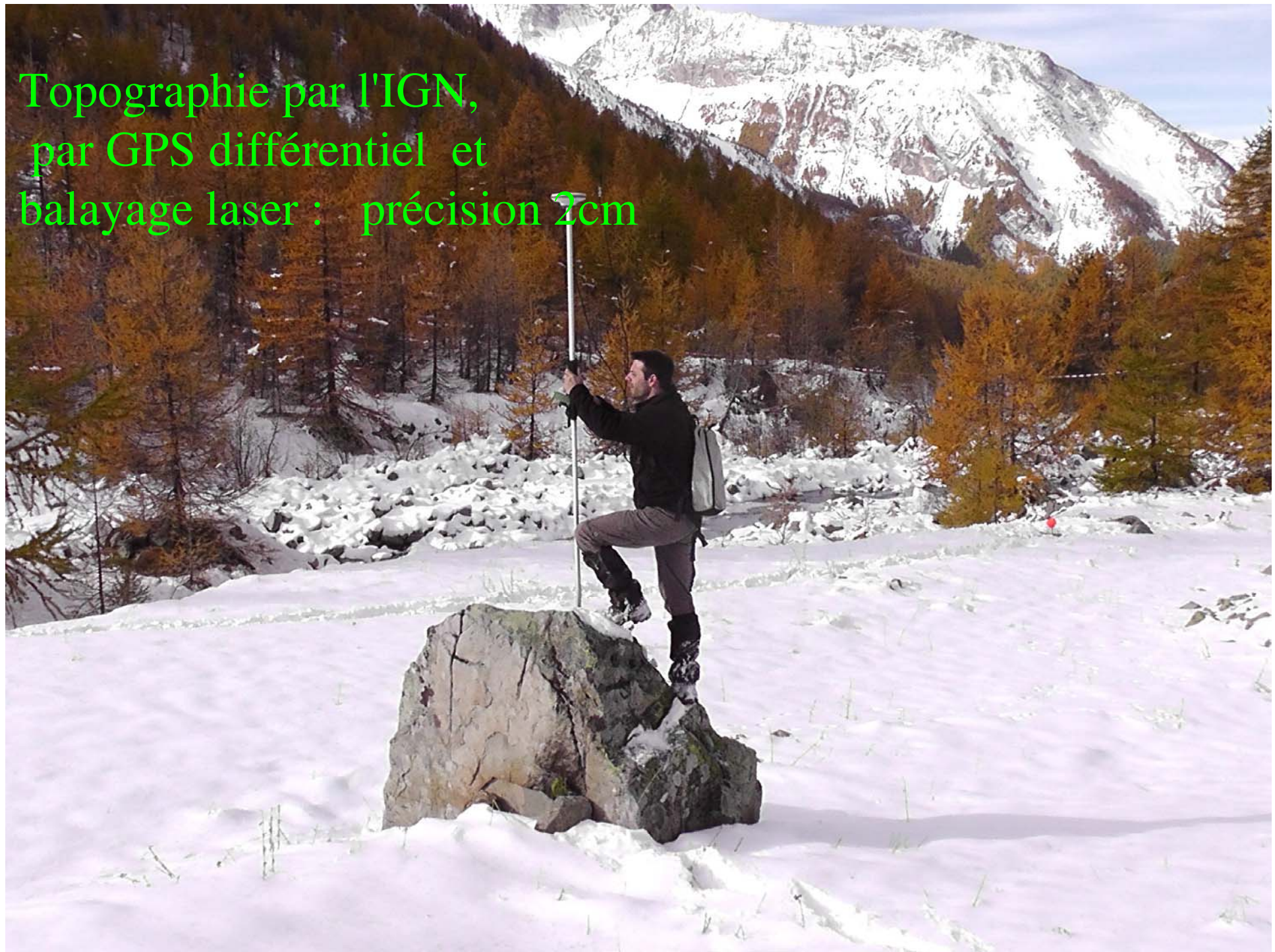
# Vallon de la Moutière, Ubaye

Implantation d'une ouverture  
initiale de 57m



Lignes de niveau : 10m

Topographie par l'IGN,  
par GPS différentiel et  
balayage laser : précision 2cm



# Ecarts à la sphère théorique de rayon 200m, mesurés en 340 points

100 m

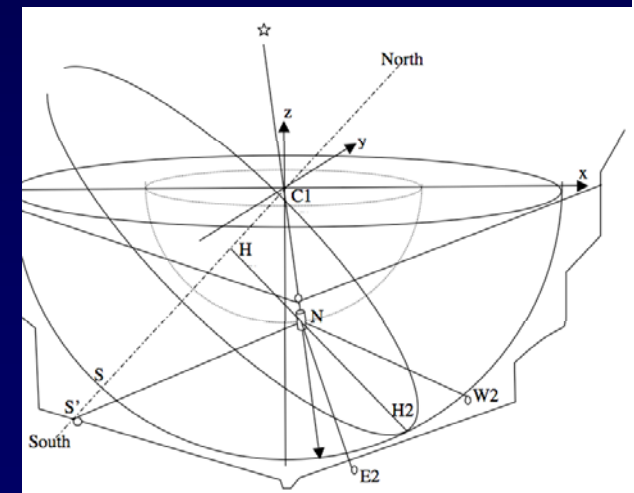
Vue du Sud

Vue de l'Est



Vue du zenith

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.



# L'un des supports de miroirs déjà positionnés à la Moutière ( Ubaye, altitude 2100m)

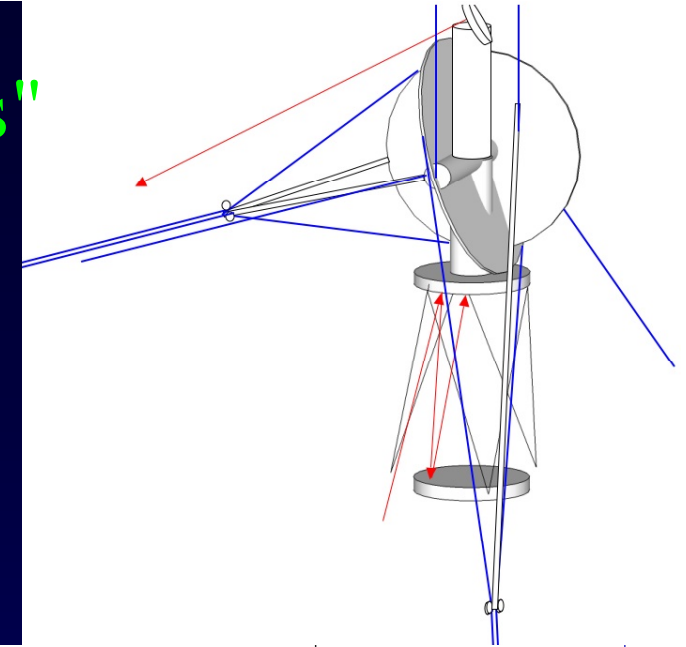


# Alignement des miroirs, par théodolite-laser



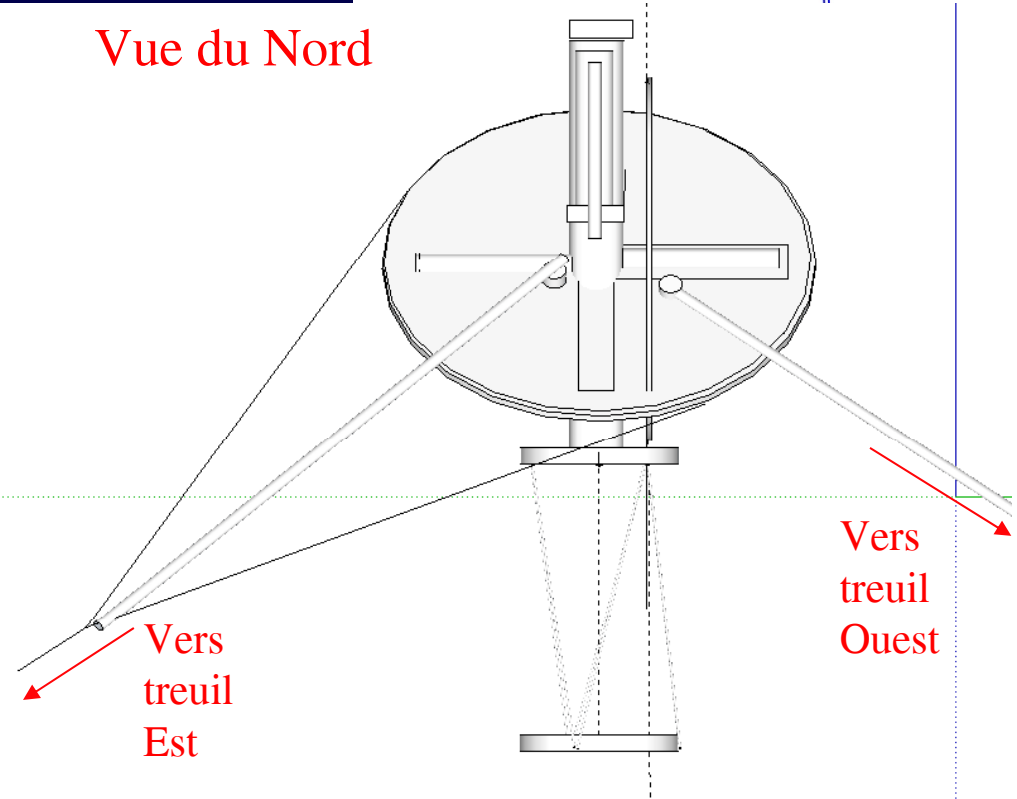
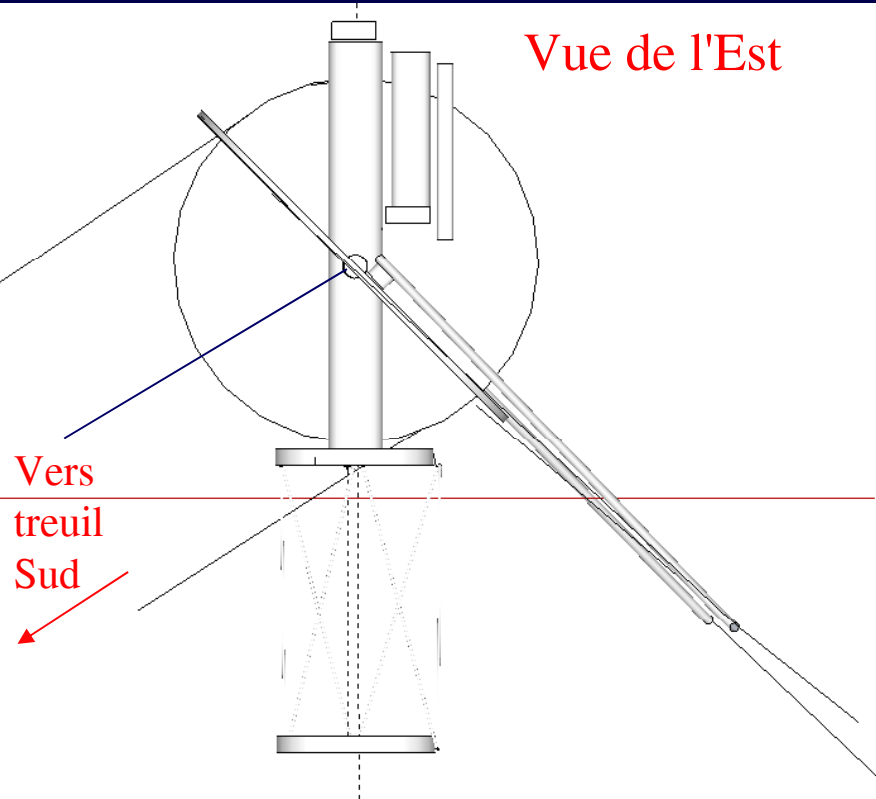
# Nacelle focale "marionnette à 6 fils"

- Pré-étude du pilotage faite par N.Palitzyne et J.R.Poletti (2010)



Vue de l'Est

Vue du Nord

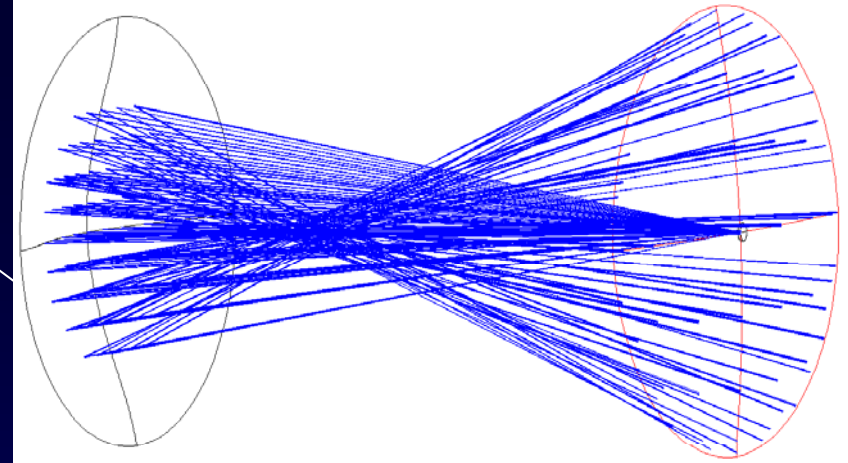
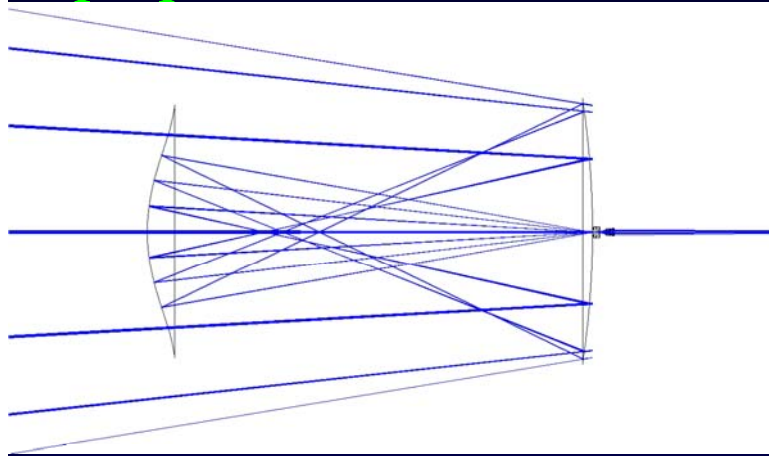




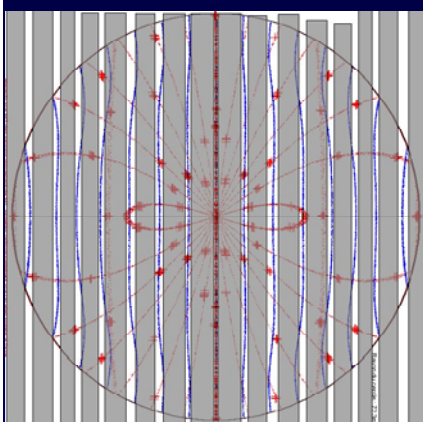
# Nacelle focale suspendue



# Optique focale dans la nacelle: correcteur à deux miroirs



M3



Découpes de M3  
diminuant  
l'obstruction



M2

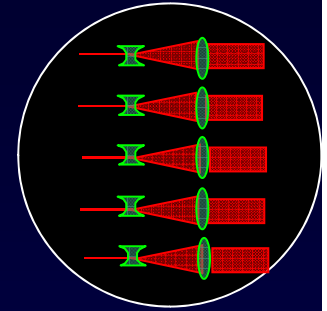
Optique focale:

# Découpeur de champ et densifieur multiple

5x5 champs de 1"

Image Fizeau  
10mm /"

densifieurs



Viseurs d'alignement

Miroir de renvoi coudé

M3

M2



Matrice de M3,  
taillée au tour  
diamant ( Savimex )

En attendant les versions spatiales...

Proposer une version agrandie : 500 à 1500m

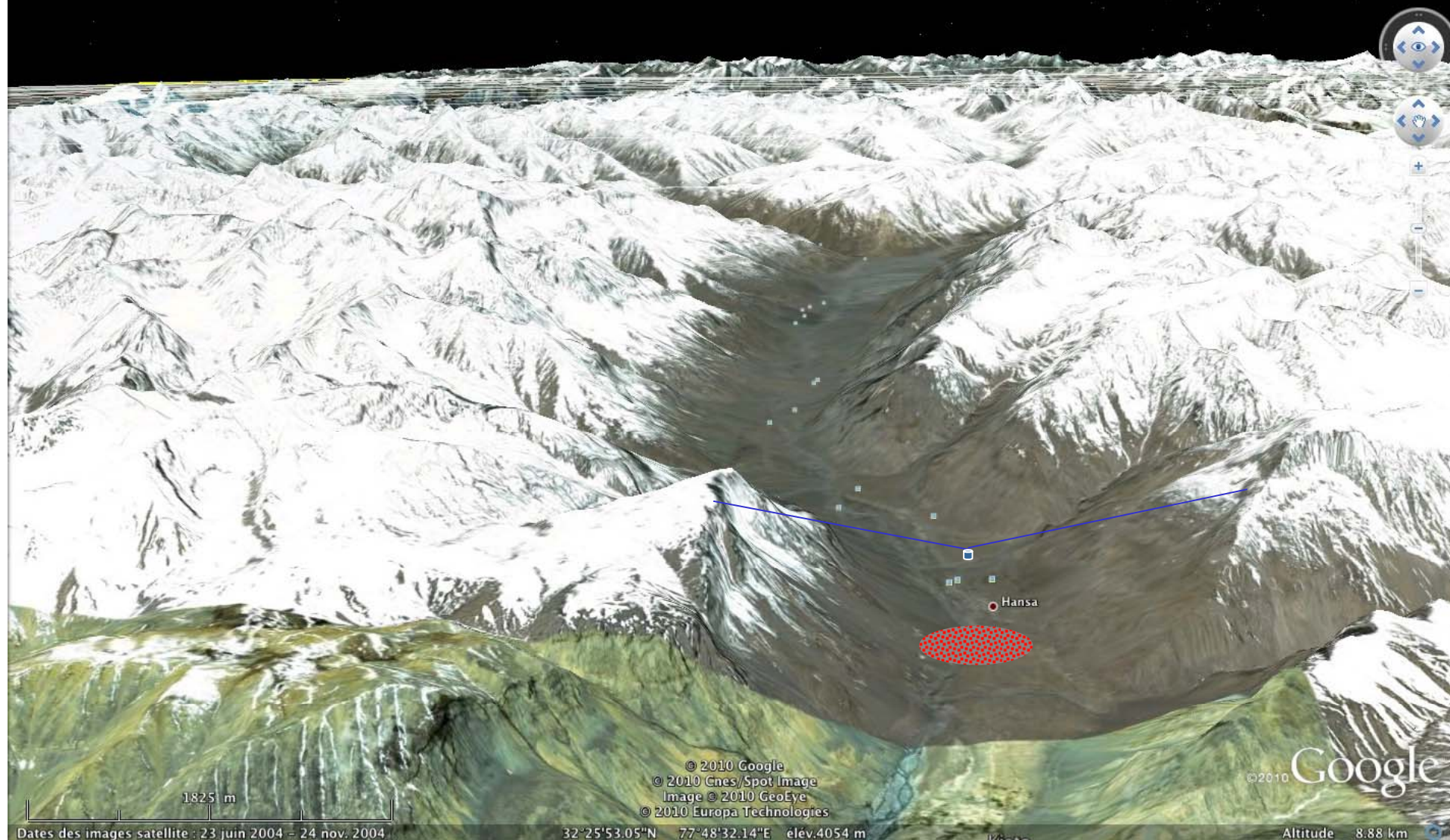
- dans une profonde vallée de l'Himalaya ou des Andes
- structure économique et modulaire sans monture ni coupole
- science: physique stellaire, extra-galactique, cosmologie si étoile guide laser

# Exemple: vallée de Hansa ( Himalaya )



- Altitude 4000m
- ouverture 600m ( Ubye x 10) nécessite :
  - profondeur de vallée 2000m
  - diamètre M2 et M3 1,44m
- point à élucider: faisabilité d'une étoile guide laser, pour cophasage des objets faibles ( simulation en laboratoire entamée, encourageante)

# Himalaya ( site repéré sur Google Earth par Rijuparna Chakraborty)



à 16h: discussion table ronde

"Vers la proposition d'un grand hypertélescope à ouverture de 500-1500m : quelle science ? quel site ? quel concept ?

Dans les locaux du colloque R&D INSU



# Collaborations

- Prototype à l'Observatoire de Haute Provence: Hervé Le Coroller et Julien Dejonghe
- Concept optique: André Rondi ( astronome amateur), Rijuparna Chakraborty
- Modélisation intégrée, opto-mécanique: Torben Andersen, Mette Owner-Petersen & Anita Enmark ( Univ. Lund, Suède) **colloque en Aout à Kiruna**
- Topographie IGN Marion Gaudon & Loic Evrard
- Bénévoles



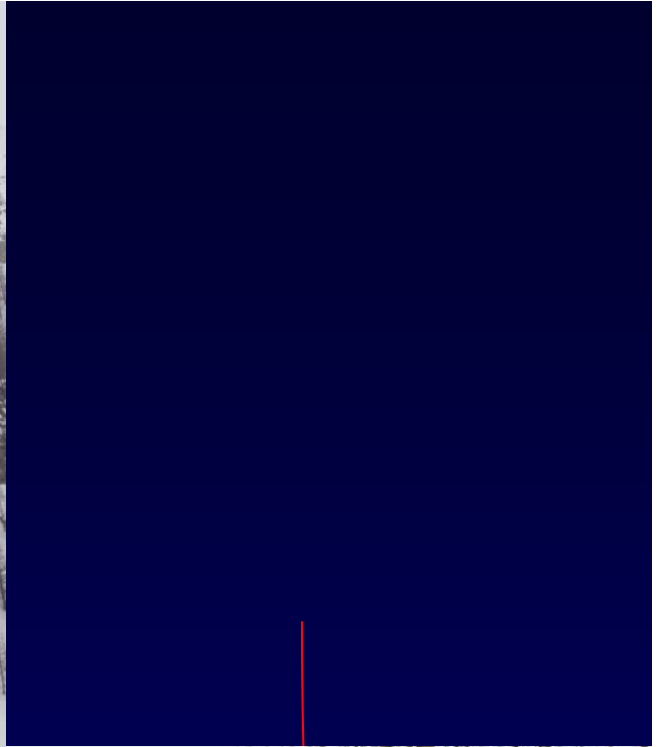
# Les hommes et la science...

## ... depuis 700 000 ans ?

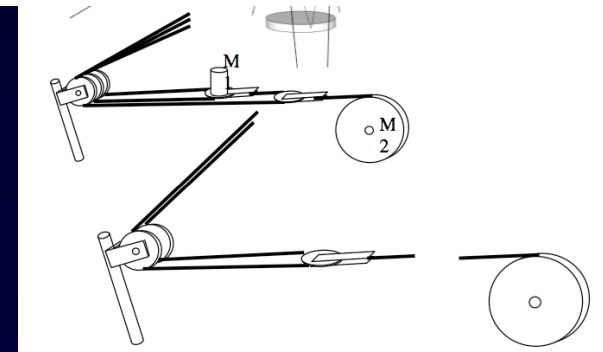
- Ils regardaient les étoiles... des oiseaux le font aussi
- ils observaient la nature ...
- la science des hommes a co-évolué avec leur cerveau

Mieux voir: interférométrie, hypertélescopes

- Faire des optiques géantes, en pointillés



# Nacelle: 6 treuils pilotent la position et l'orientation



QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

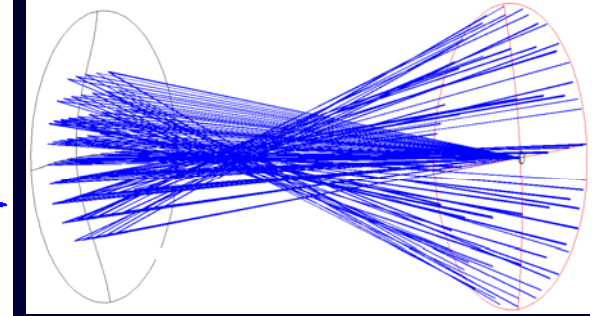
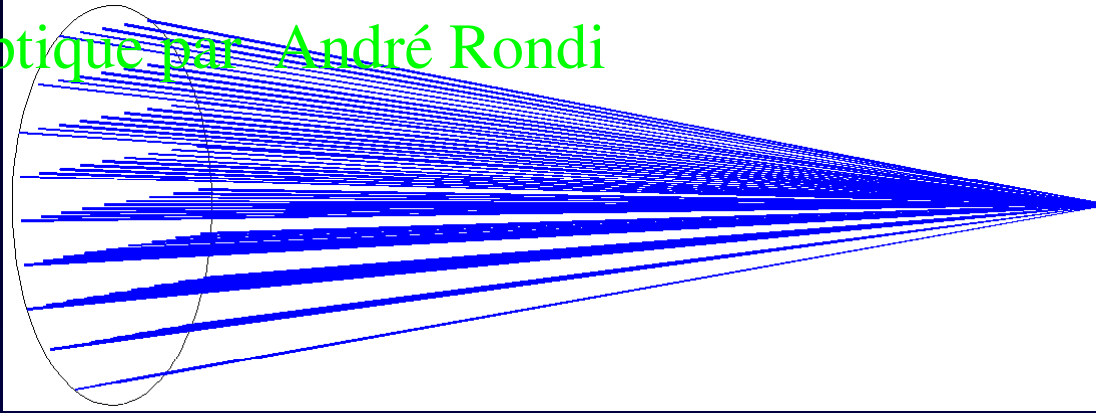
# Tripode support de miroir

## 3 prototypes pour essais

- ancrage par pieux
- stabilité voulue: quelques microns

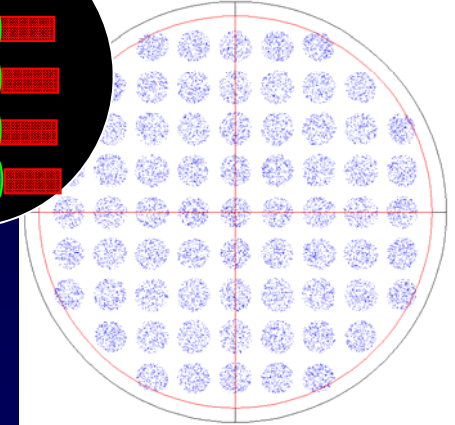
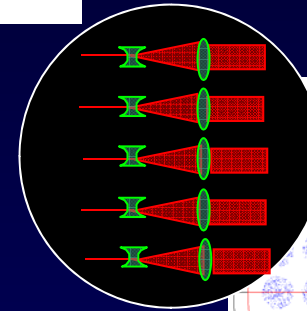
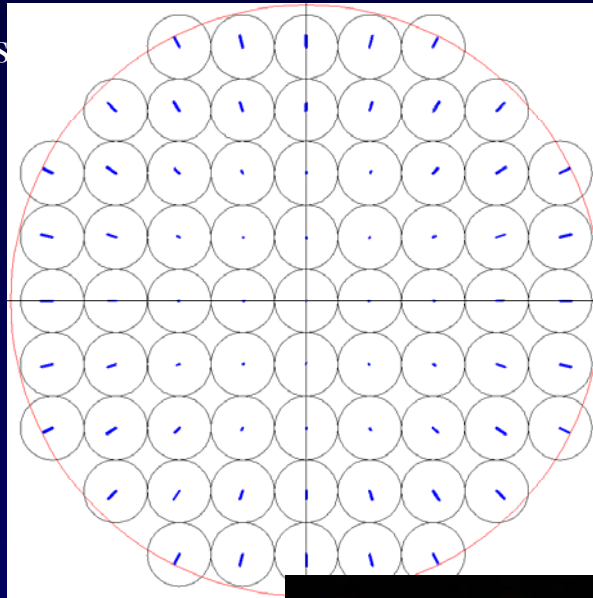


# Etude optique par André Rondi



Miroir M1 dilué de 30,6m ( agrandiss  
à 57m):  
69 miroirs de 15cm, pas 3,8m

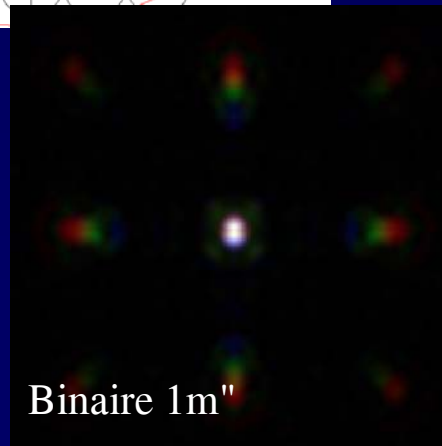
Correction de  
distorsion de  
pupille



Pupille densifiée

QuickTime™ et un  
décompresseur codec YUV420  
sont requis pour visionner cette image.

Binaire... et turbulence



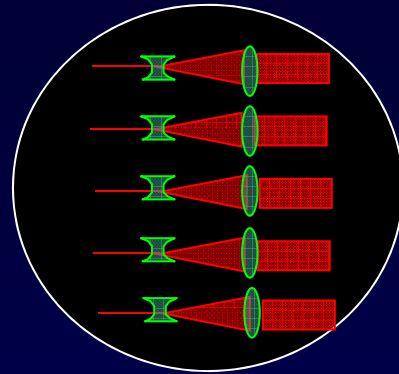
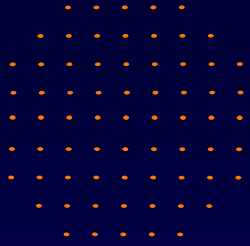
Binaire 1m"

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

Binaire 2m"

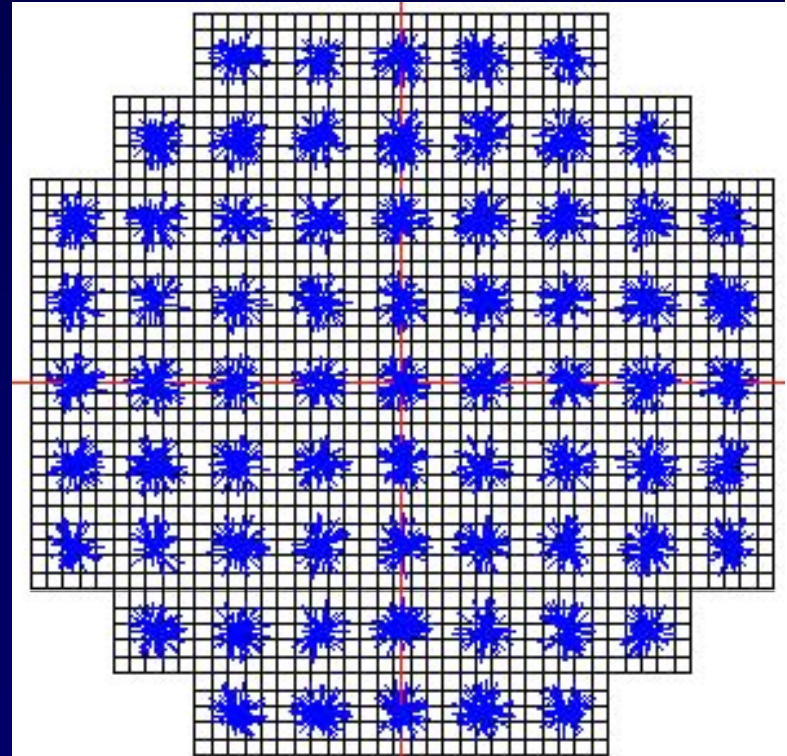
Etude optique

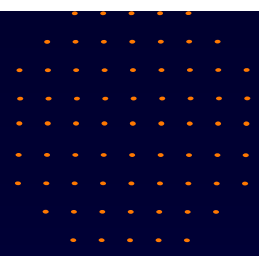
# Densifieur de pupille



Rayons dans l'un des densifieurs

La densification  $\times 19$  intensifie l'image  
361 fois





# Etude optique

## Aberrations extra-axiales (coma, astigmatisme) et champ utilisable dans chaque sous-champ

Image d'une étoile

Image Fizeau

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

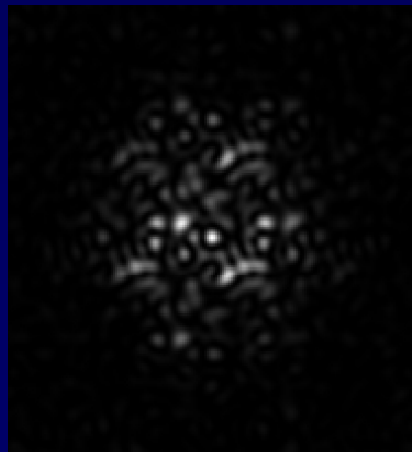
densification x19



Etoile hors-axe 0,4"

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.



QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

