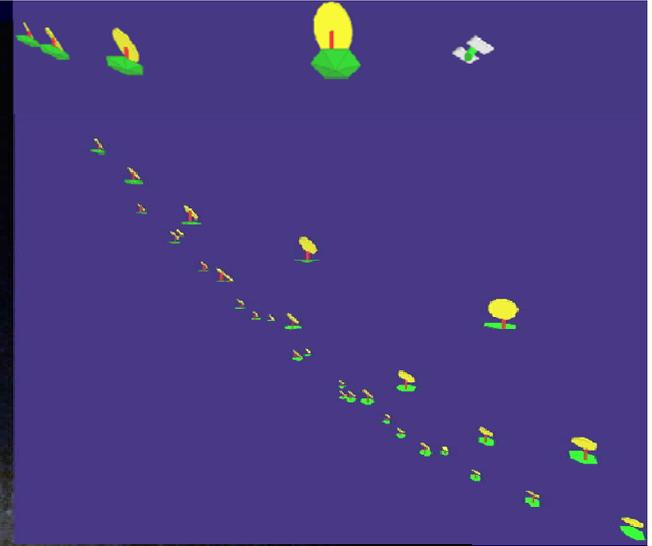


Exo-planètes, étoiles et galaxies : progrès de l'observation



- Fichiers des cours précédents sur: www.college-de-france.fr/default/EN/all/ast_obs/annee_20082009.htm
- Articles sur: www.oamp.fr/lise

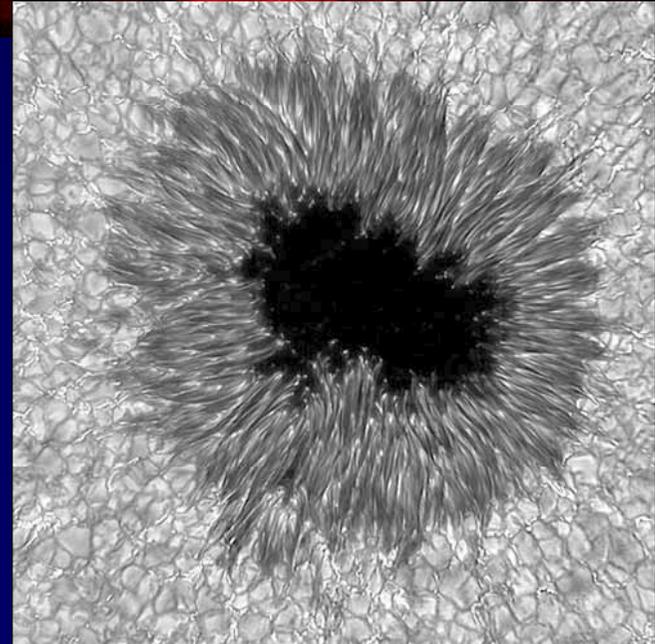
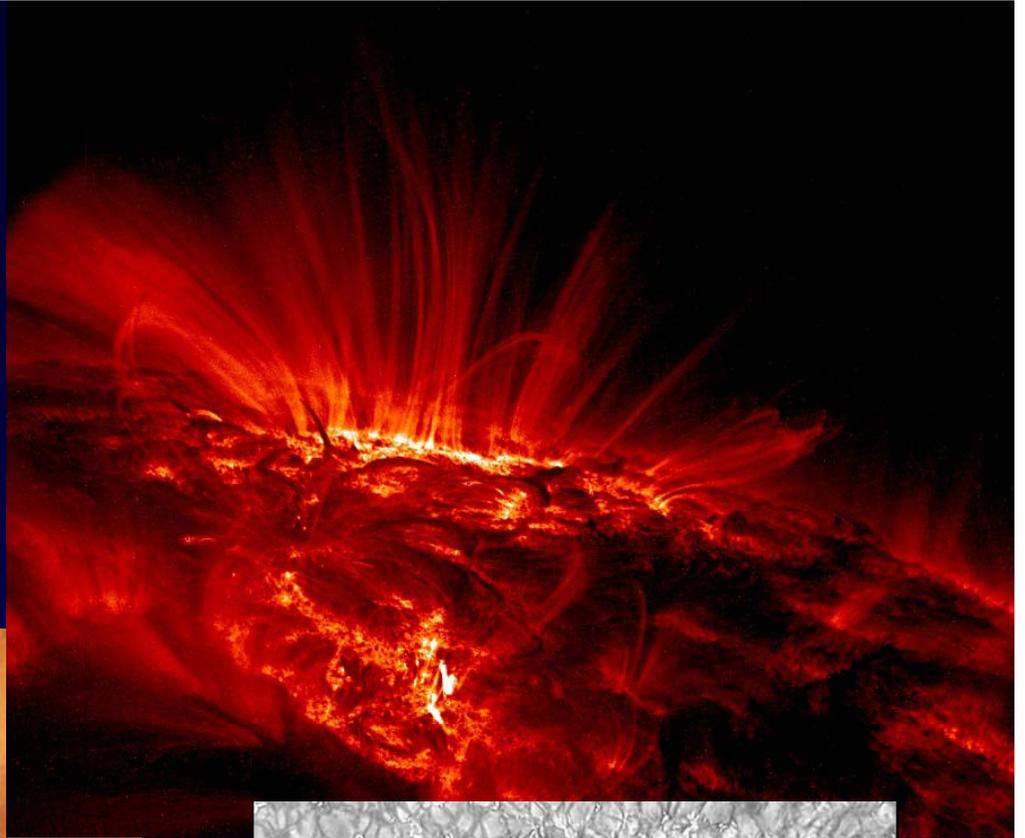
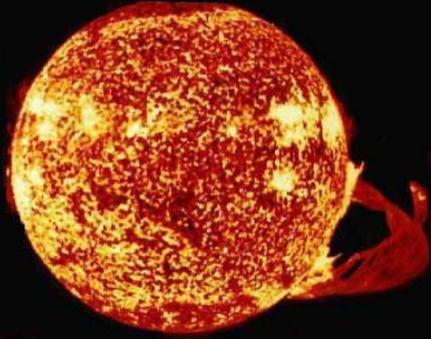
Exo-planètes, étoiles et galaxies : progrès de l'observation

- 2 février
Cours 2: Les premières images optiques à haute résolution
Séminaire: **Olivier Chesneau, " Formation et évolution de disques autour d'étoiles"**
- 9 février
Cours 3: Construction d'un hypertélescope précurseur
Séminaire: **Pierre Kervella, « La supergéante rouge Bételgeuse à haute résolution angulaire »**
- **18 et 27 Février : les cours et séminaires n'auront pas lieu (vacances scolaires)**
- 2 Mars Utiliser les anneaux de Saturne comme télescope géant ?
Cours 4: "Concept pour un hypertélescope de 200m" La
Séminaire: **Anthony Boccaletti**
- 9 Mars
Cours 5: " Hypertélescope spatial à miroirs piégés par laser"
Séminaire: **Jean Schneider "Les perspective a long et très long terme de l'exoplanetologie: optimisme ou pessimisme?"**
- 16 Mars
Cours 6: " Hypertélescope spatial à miroirs piégés par laser" (suite)
Séminaire:
aussi: conférence de Roger Angel " " "
• **Avril: cours et séminaires à Grenoble,**



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

Voir les étoiles comme
on voit le Soleil ?



Physique stellaire: observations à faire avec les futurs interféromètres et hypertélescopes

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

Évolution du Soleil



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

Modèle de granulation d'étoile super-géante

A

B

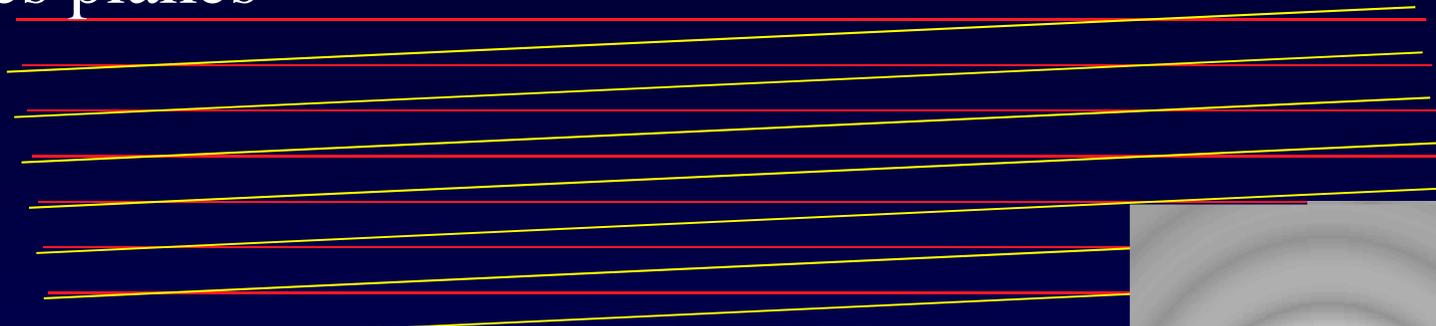
Émission H α par Algol, simulation
hydrodynamique

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

Agrandir les télescopes pour mieux voir: améliorer la résolution



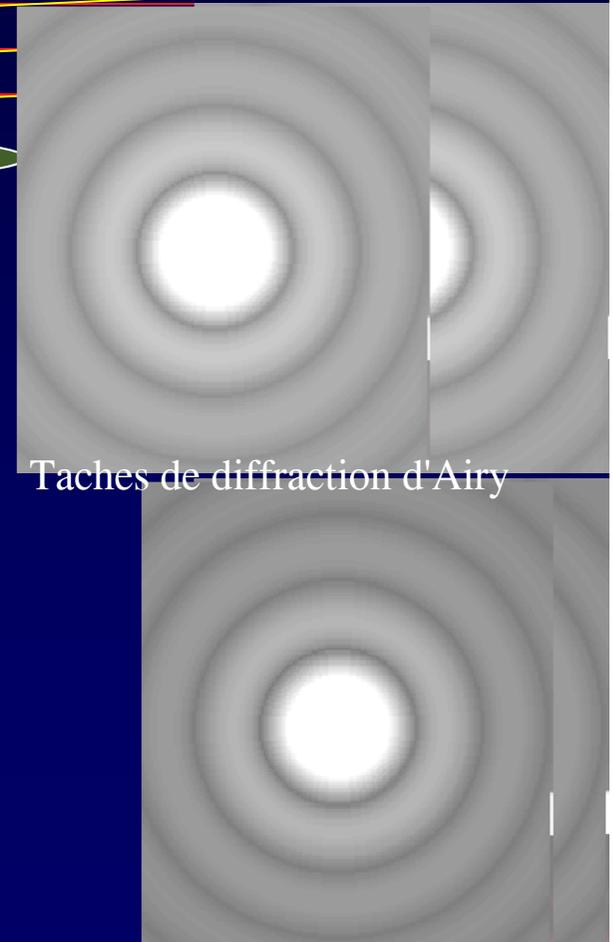
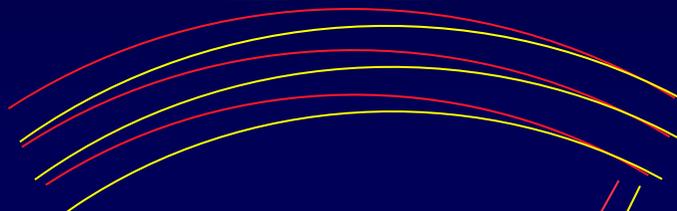
Ondes planes



Lentille



Ondes sphériques

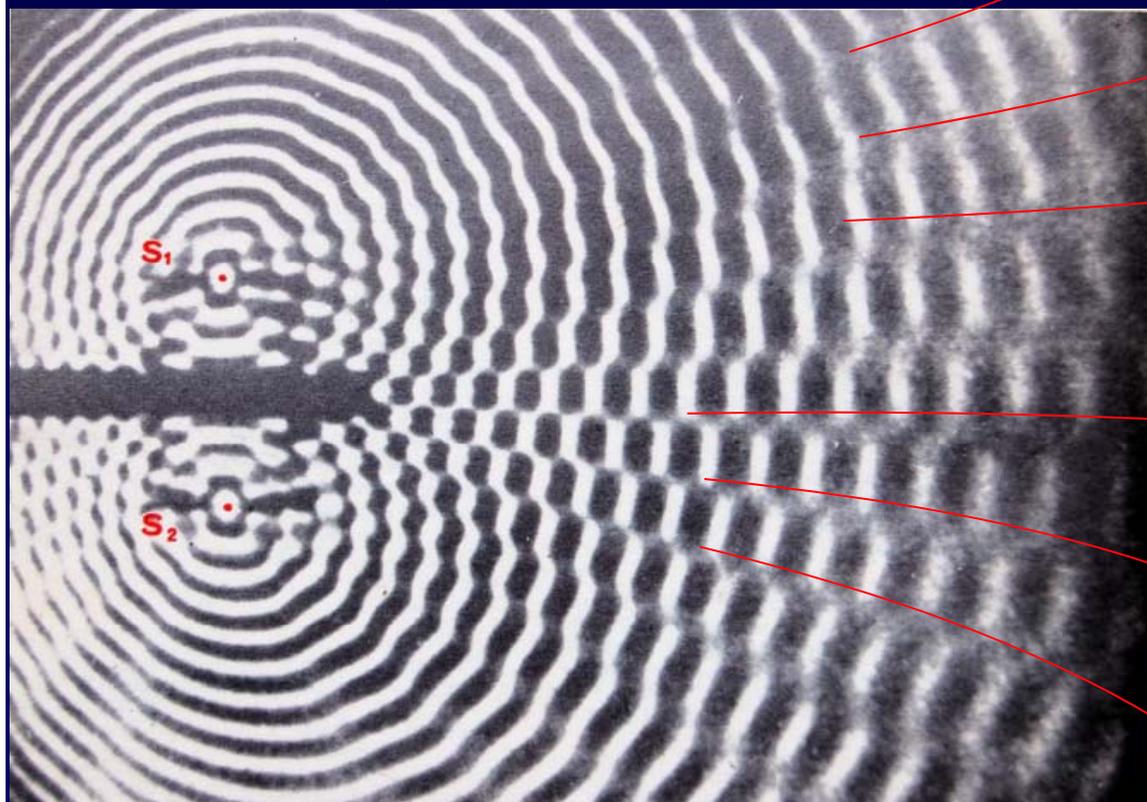


Taches de diffraction d'Airy

Caméra



Interférence de
vibrations sur une
surface d'eau



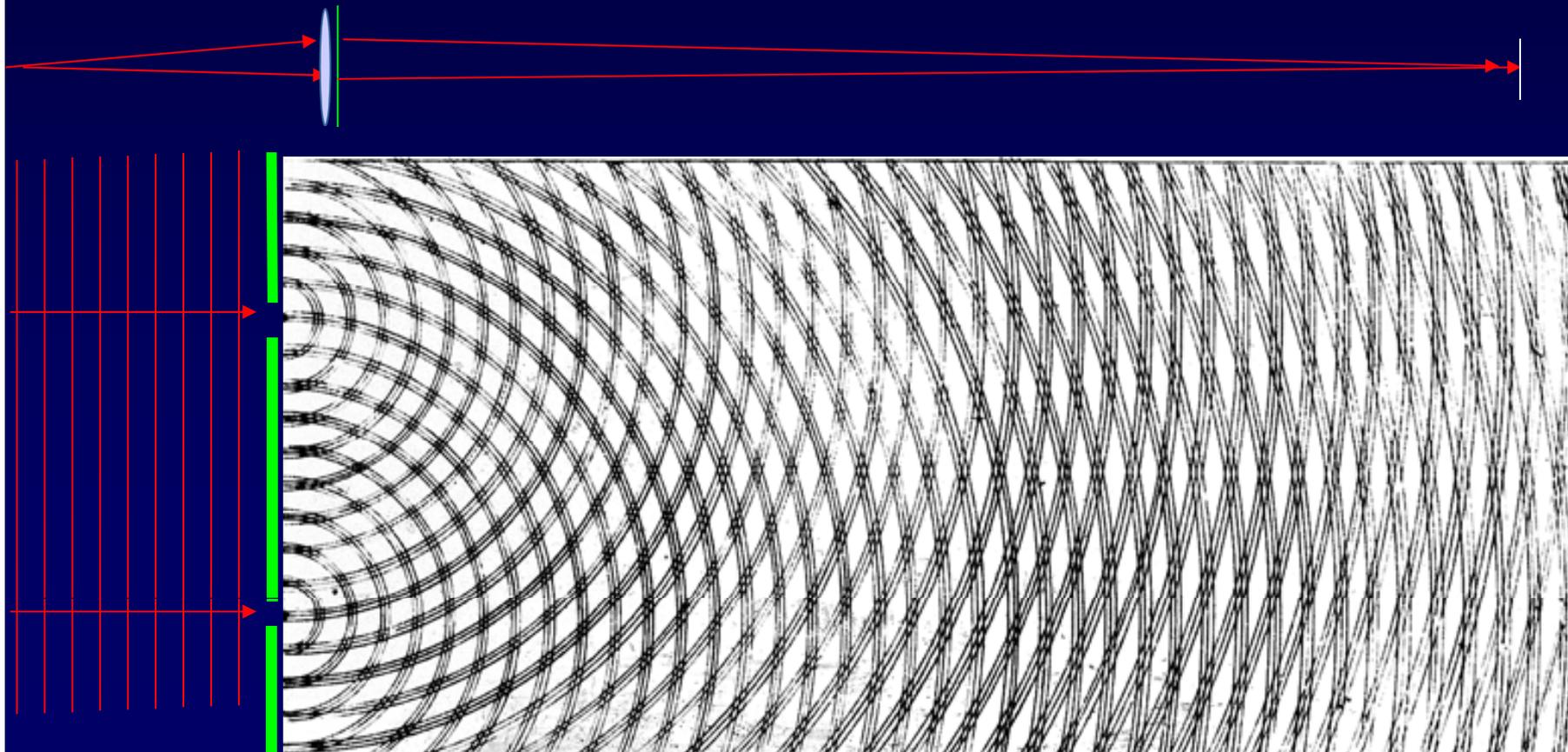
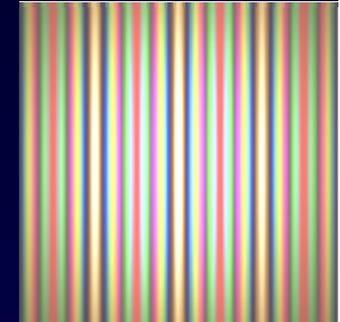
Interférence
destructive

constructive

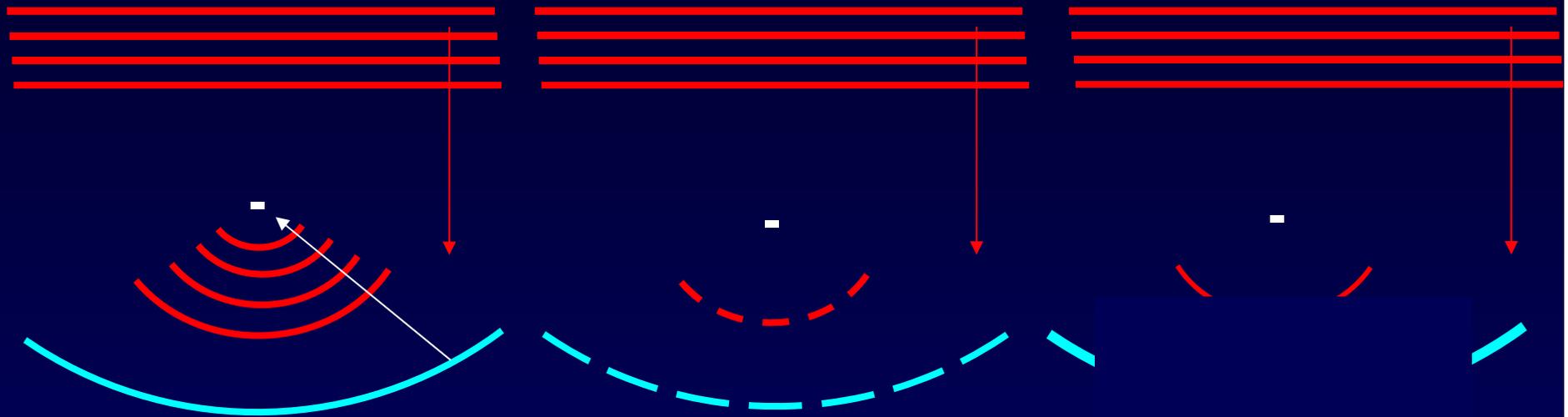
Interférences d'Young (ca. 1810)

Franges d'Young

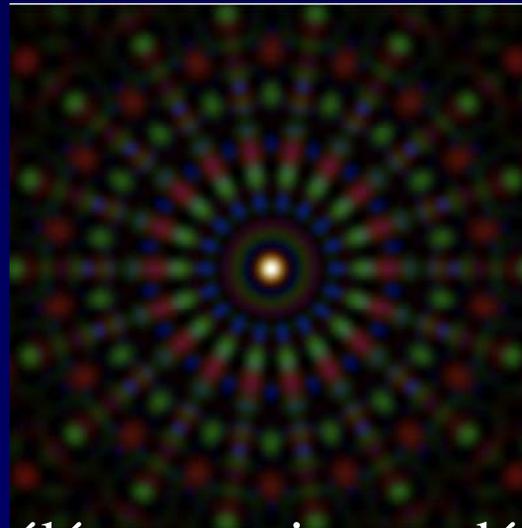
QuickTime™ et un
décompresseur
sont requis pour visionner cette image.



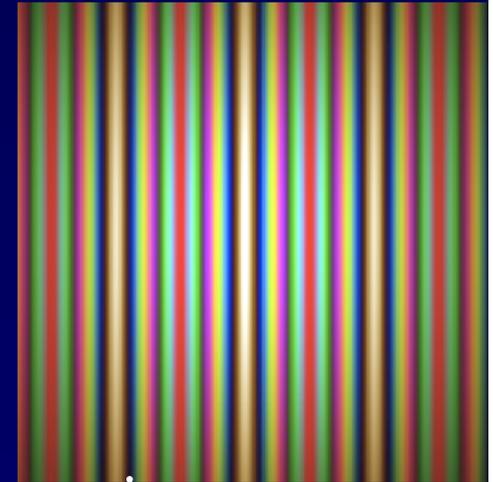
Interféromètre



Tache de
diffraction
d'Airy

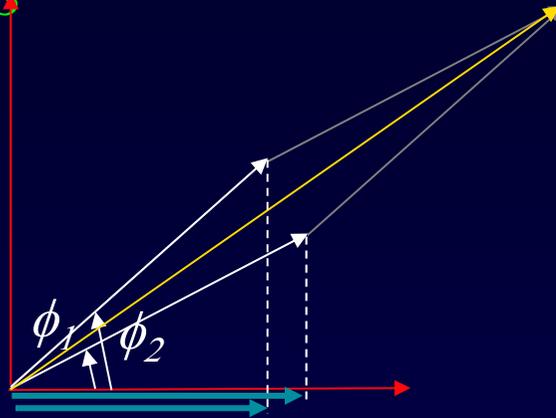


Interféromètre Fizeau

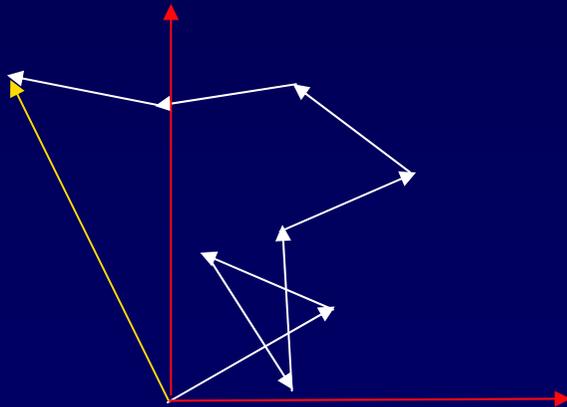


- Marche encore avec deux éléments : image dégradée, mais sans perte de résolution

Ajouter des vibrations

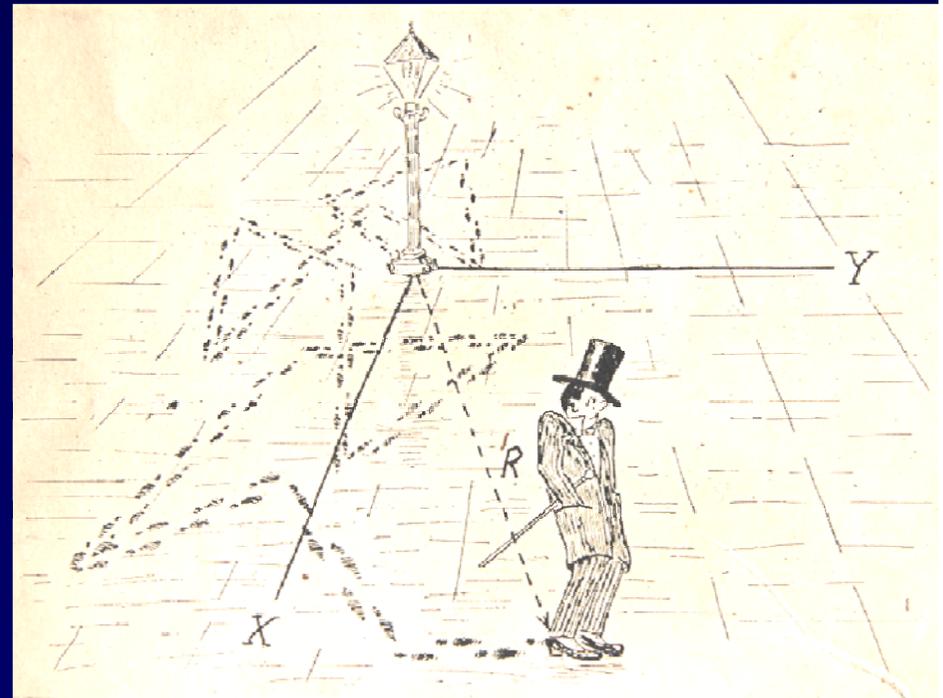


- Représentées par des "vecteurs de Fresnel"
- Ajouter N vibrations à phase aléatoire



Marche aléatoire, selon G.Gamow

(Un, deux, trois, l'infini..) →



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.

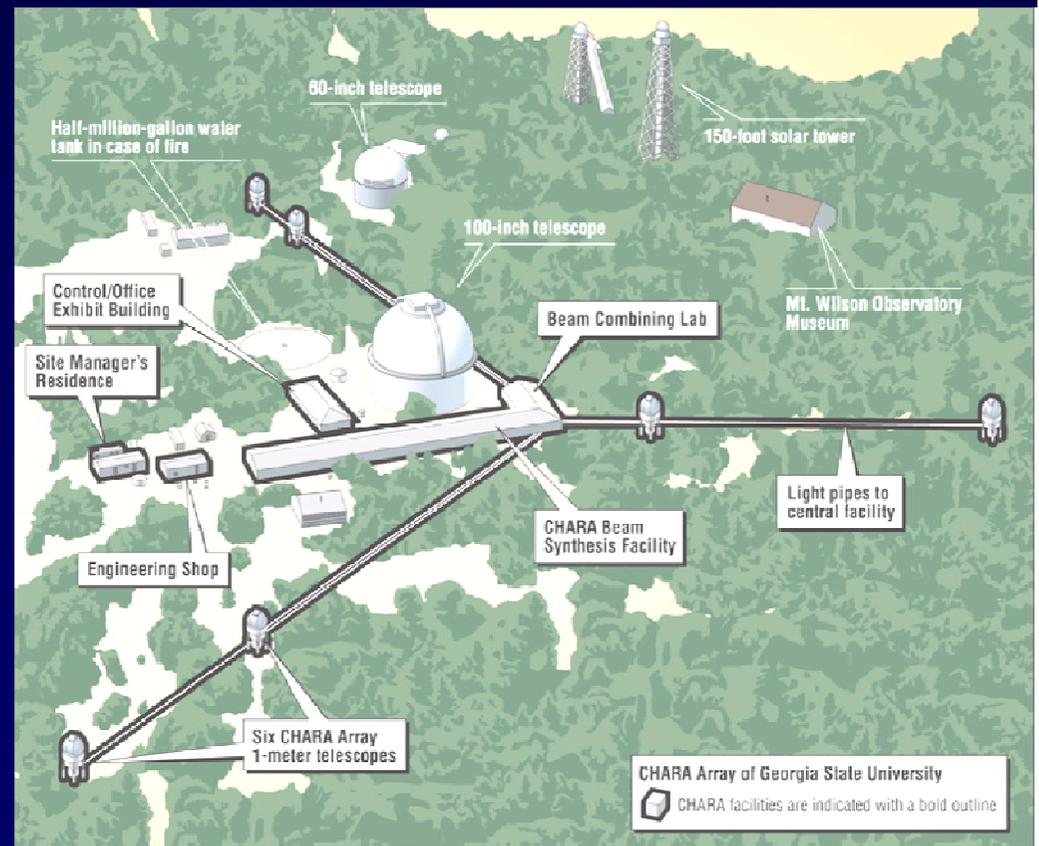
- Ils utilisent des lignes à retard complexes ...
- dont le coût élevé limite sévèrement le nombre d'ouvertures

CHARA infra-rouge + visible , 6 télescopes (non simultanés), bases jusqu'à 300m

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.



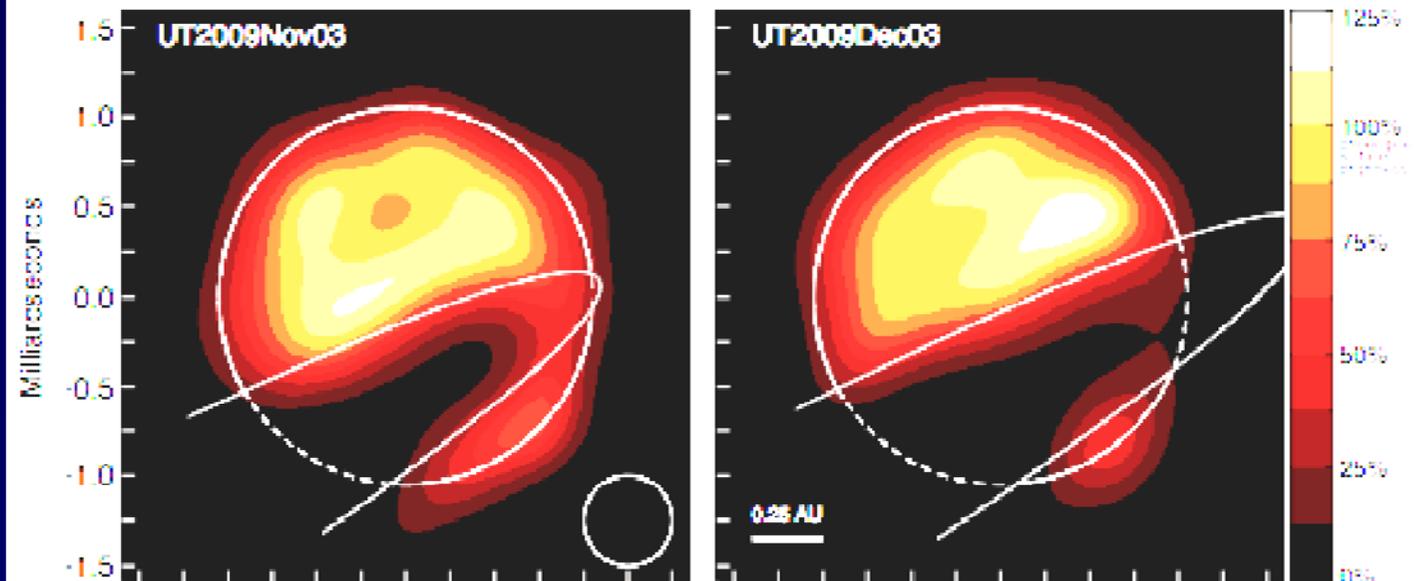
Epsilon Aurigae: Une vieille énigme résolue ?

- Premières images optiques à haute résolution obtenues par l'interféromètre CHARA (Kloppenborg et al., 2010)
- éclipse par un nuage de 1,5 milliard de km
- dure 18 mois tous les 27 ans

Vue d'artiste



Epsilon Aurigae Eclipse (CHARA-MIRC)



Interféromètre CHARA (Mt Wilson , Californie) avec combineur visible VEGA (Mourard et al.)

QuickTime™ et un
décodeur sont requis pour voir cette image.

- combineur spectro-imageur récupéré du GI2T (Grand Interféromètre à 2 Télescopes)
- résolution **0,5 milliseconde d'arc**

détails sur: www.oca.eu/gemini/projets/vega/en/publications/index.htm

"The fundamental parameters of the roAp star gamma Equ", Perraut, Brandao, Mourard et al. A&A in press (2011)

"An investigation of the close environment of beta Cep with the VEGA/CHARA interometer", Nardetto, Mourard, Tallon-Bosc et al., A&A 525 (A67) (2011)

"Time, spatial and spectral resolution of the Halpha line-formation region of Deneb and Rigel with the VEGA/CHARA interometer", Chesneau, Dessart, Mourard et al., A&A 521, A5 (2010)

"Performances and first science results with the VEGA/CHARA visible instrument", SPIE Conf. Proceedings 7734-12, (2010)

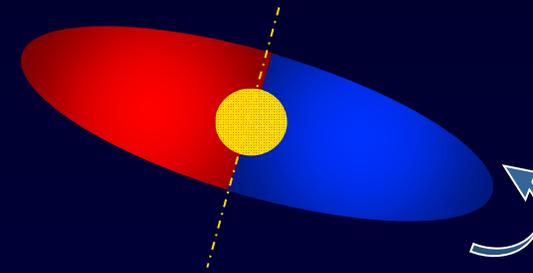
"The Halpha line forming region of AB Aur spatially resolved at sub-AU with the VEGA/CHARA spectro-interferometer", Perraut, Benisty, Mourard et al., A&A 516, (2010)

"VEGA: Principle and Performance" Mourard, Clause, Marcotto et al., A&A 508 (2009)

Tout récent:

supergéante A dévoilée

Imaging the spinning gas and dust in the disc around the supergiant A[e] star HD 62623, F. Millour, A. Meilland, O. Chesneau¹, Ph. Stee, S. Kanaan, R. Petrov, D. Mourard, and S. Kraus, 2011



Etoile avec disque de gaz et poussière

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.

Début d'imagerie d'environnement proche stellaire

- données de plusieurs interféromètres: VLTi, CHARA, etc..

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

"Milli-arcsecond images of the Herbig
Ae star HD 163296S". Renard, F. Malbet, M.
Benisty, E. Thiebaut, and J-P. Berger, A&A, 2010

Variations de diamètre d'une étoile de type Mira

Chi Cygni (Lacour et al., 2009)

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

Résultat posthume de
l'interféromètre IOTA

Bételgeuse, étoile supergéante



IOTA
(38m, 9
mas)
(Lacour et
al., 2009)

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

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

VLT/NACO (8m,
optique adaptative)
(Kervella et al., 2009)

Fonction →
d'étalement en
synthèse
d'ouverture

Grands interféromètres: aussi voir ce qui bouge, avec une étoile de référence

- Observer ensemble deux étoiles proches: très grande sensibilité au déplacement relatif, dans un petit champ limité par l'isoplanétisme (15" dans le visible)

- Au Chili: VLTi européen équipé d'un instrument astrométrique :

"Phase Reference Imaging and Microarcsecond Astrometry"
(PRIMA)



- Au Keck :

instrument ASTRA (ASTrometric and phase-referenced Astronomy)

précision: 30-100 microArcsecondes

Grands interféromètres: aussi mieux voir ce qui bouge, avec une étoile de référence

- VLTi européen Au Chili: image de la zone de formation d'exoplanètes autour d'une étoile *"Milli-arcsecond images of the Herbig Ae star HD 163296", S. Renard, F. Malbet,*

M. Benisty, E. Thiébaud et J.-P. Berger. Astronomy and Astrophysics



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

Grands interféromètres: aussi mieux voir ce qui bouge, avec une étoile de référence

- Au Chili: Very Large Telescope Interferometer européen
- 4 télescopes de 8m + 4 de 1,5m, bases 150m
- A terme: jusqu'à 6 ouvertures simultanées



QuickTime™ et un décodeur sont requis pour visualiser cette image.

Haute résolution : une percée pour la physique stellaire



"AMBER observations of the
AGB star RS Cap: extended
atmosphere and comparison
with stellar models" I. Marti-
Vidal, J.M. Marcaide, A. Quirrenbach,
K. Ohnaka, J.C. Guirado, and M.
Wittkowski A&A 2011 (ArXiv
1101.5749)

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

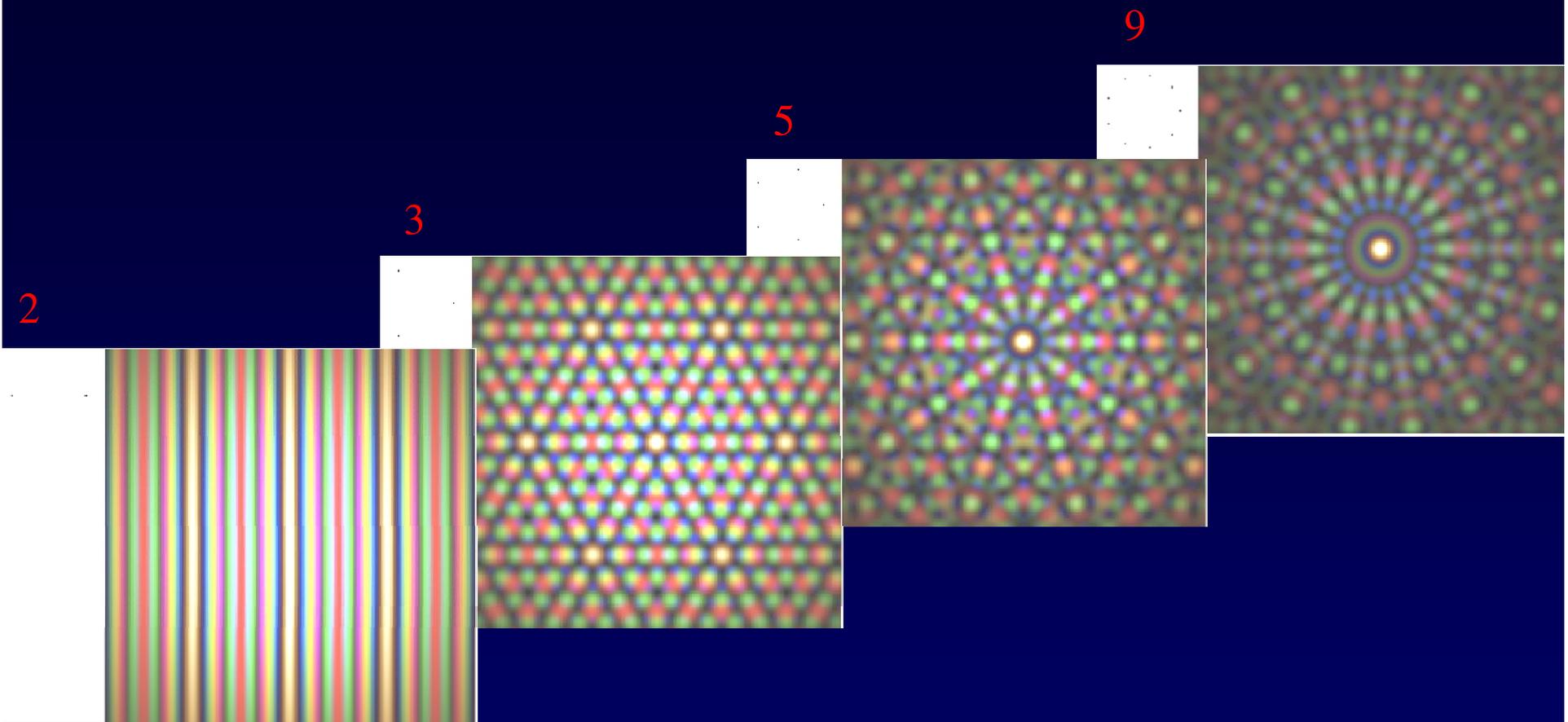
QuickTime™ et un
décompresseur
sont requis pour visionner cette image.

Et maintenant ...

Pourquoi utiliser 100 ou 1000 ouvertures ? La voie des hypertélescopes

- pour des images directes ...
- instantanées ...
- de haute qualité ...
- sur des objets complexes, variables, à fort contraste (exo-planètes)
- ils l'ont fait en radio ... à nous de jouer !

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

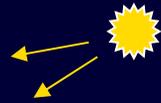
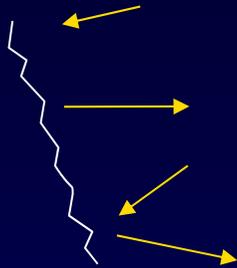


- Le pic central blanc s'intensifie avec plus d'ouvertures

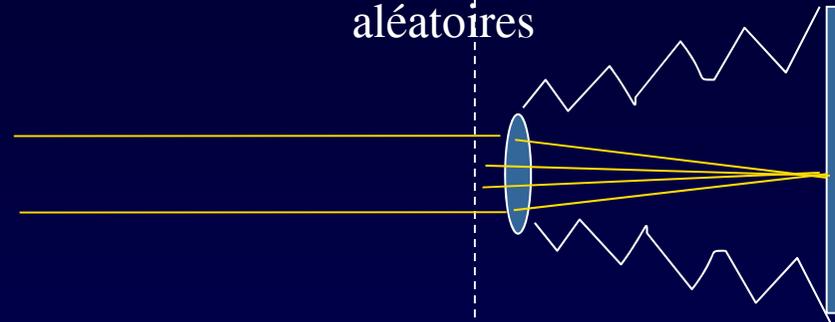
Petite expérience pour bricoleurs:

Imagerie Fizeau d'un objet étendu

Aluminium
froissé



trous
d'épingle
aléatoires

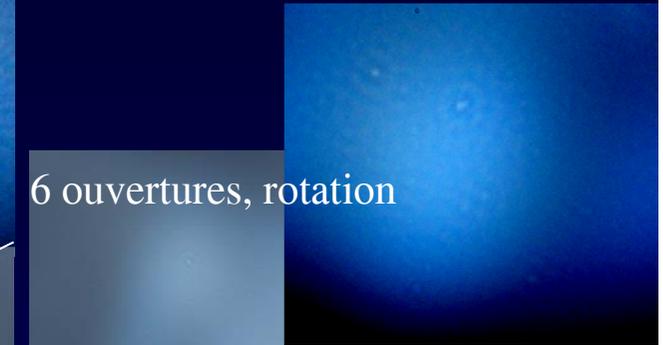
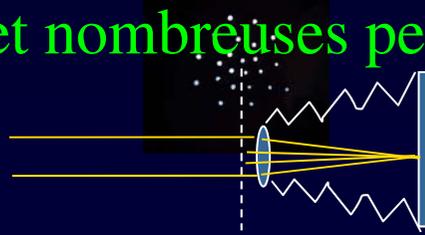
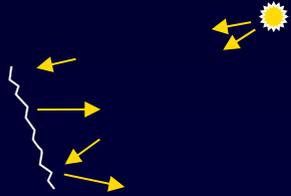


- l'image est voilée par un halo
- s'améliore avec le nombre d'ouvertures ...
- halo causé par la diffraction des petites ouvertures, et qui prélève de l'énergie ...
- ce qu'évite le montage "hypertélescope"

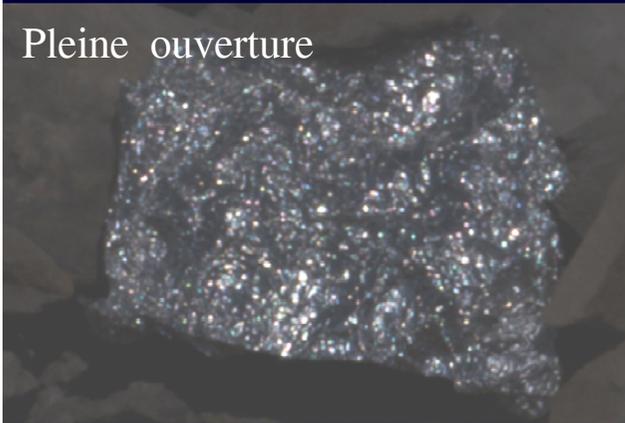
images Fizeau :

Comparaison de quelques grandes ouvertures et nombreuses petites,

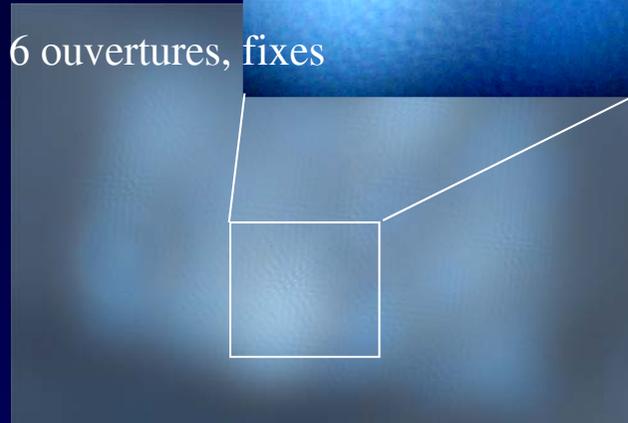
à même surface collectrice
et dimension de réseau



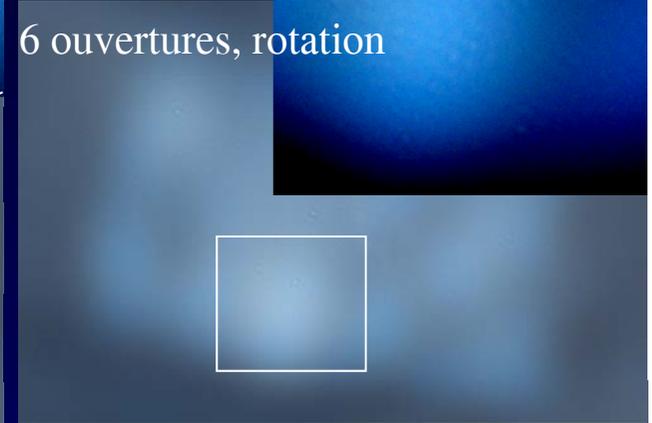
Pleine ouverture



6 ouvertures, fixes



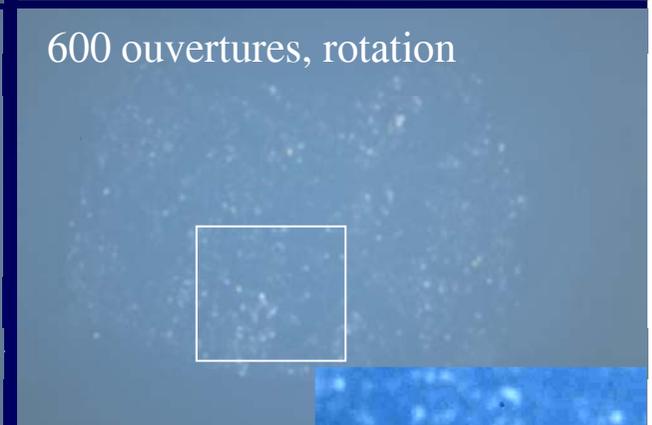
6 ouvertures, rotation



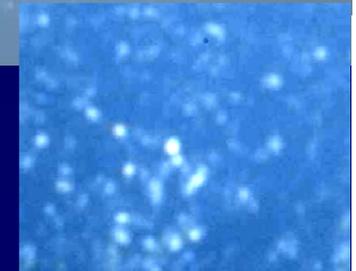
600 ouvertures, fixes



600 ouvertures, rotation



- avec les petites ouvertures:
 - plus d'étoiles apparaissent
 - l'effet bénéfique de la rotation est moins marqué



Imagerie Fizeau: simulations numériques par transformation de Fourier et convolution

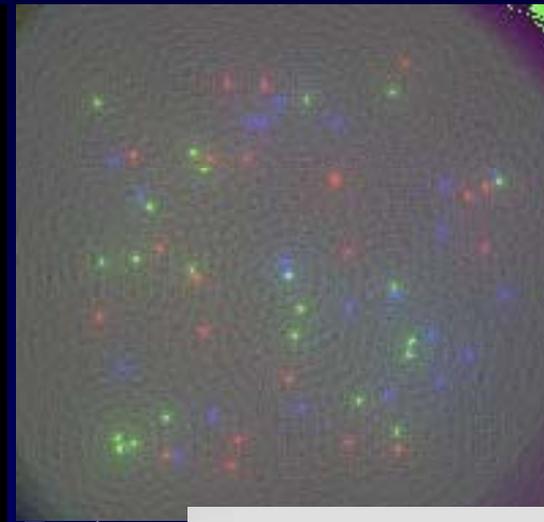
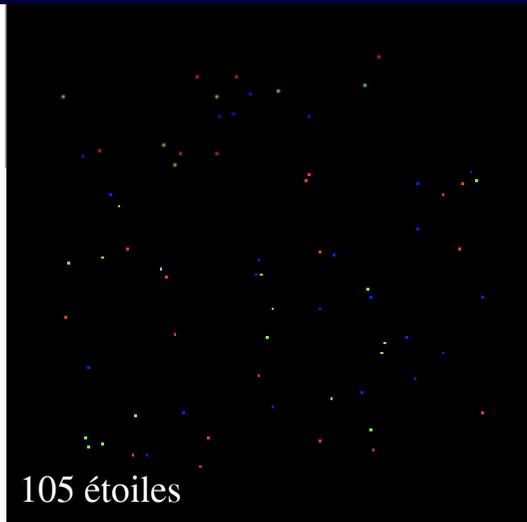
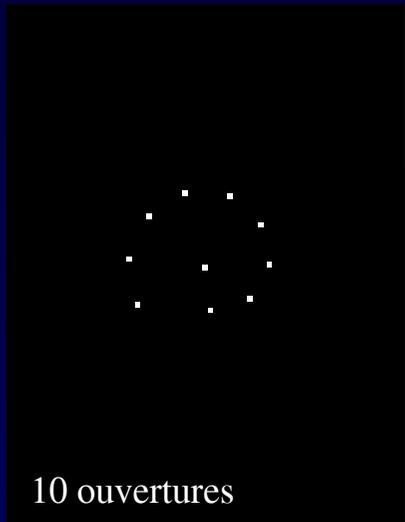


Image avec rotation

Fond continu soustrait

directe



Imagerie Fizeau: simulations numériques

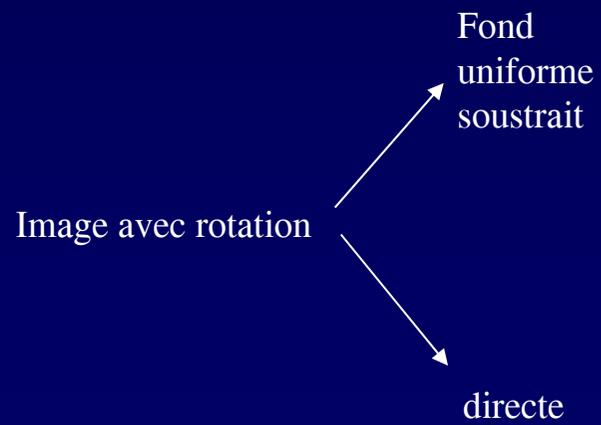
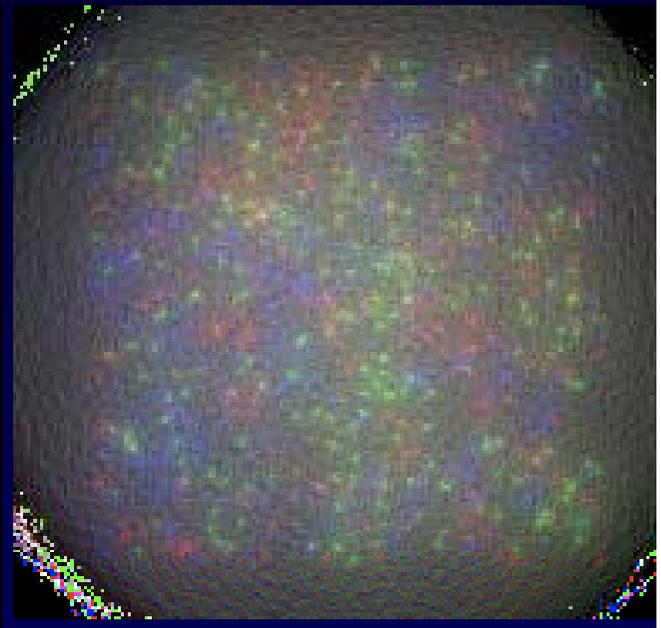
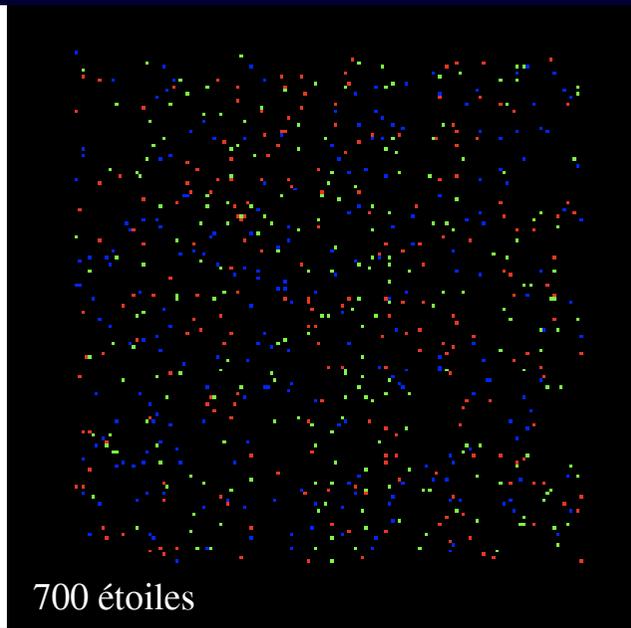
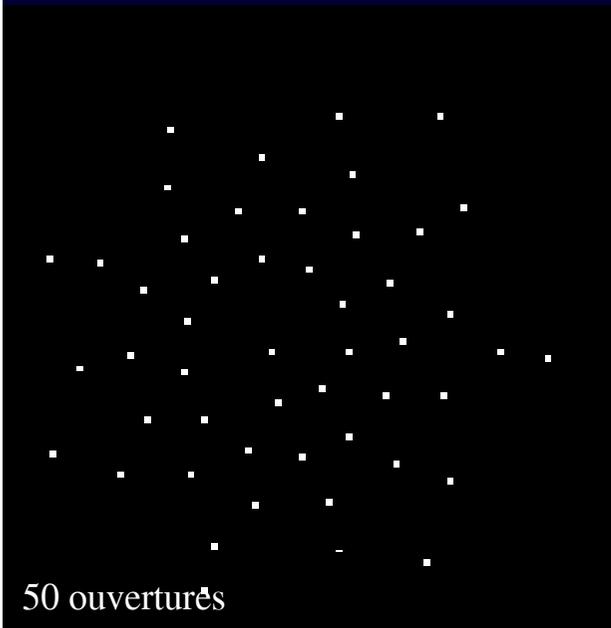
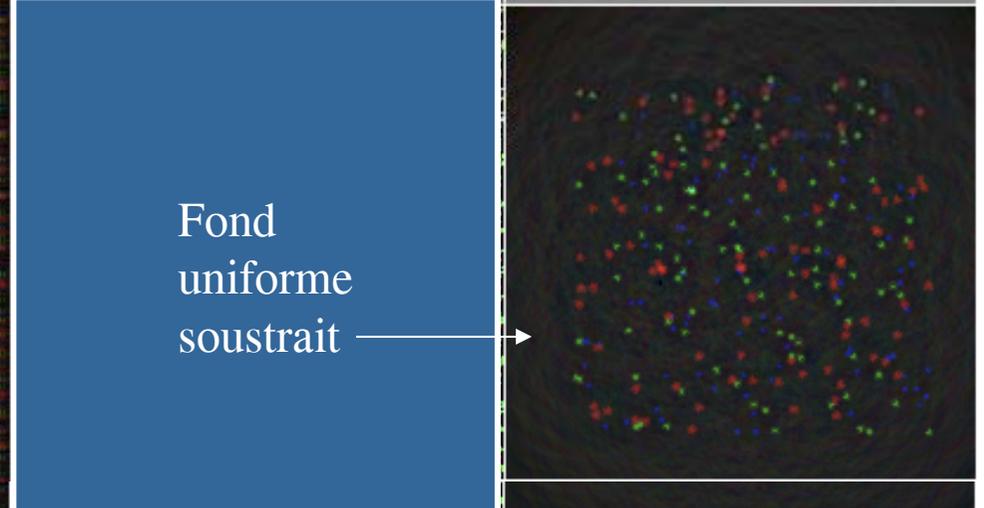
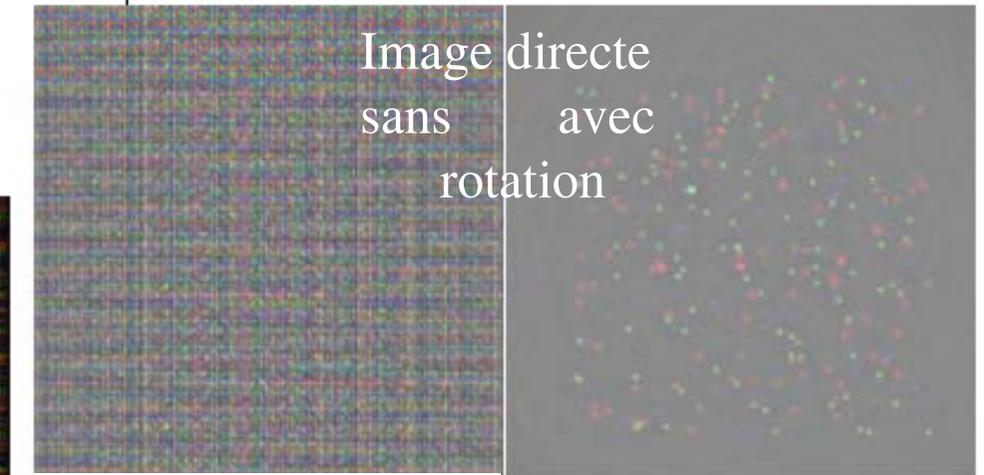
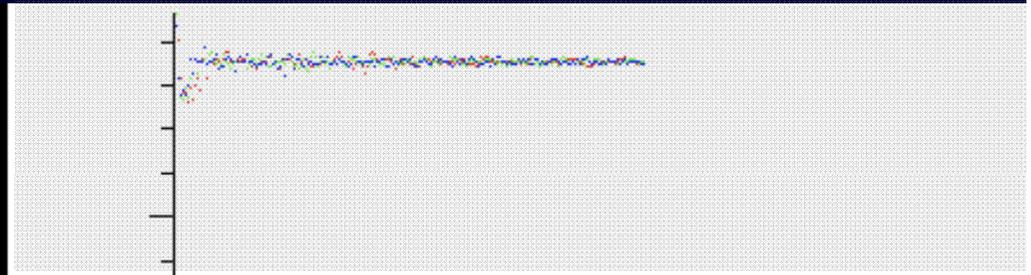
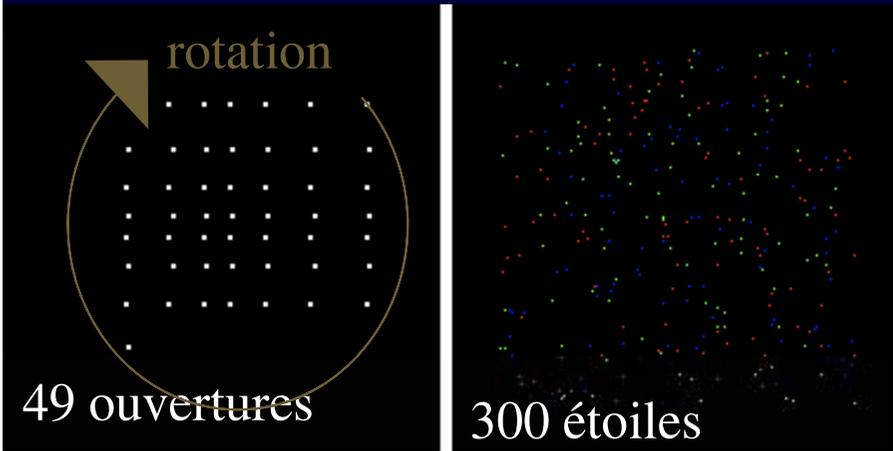
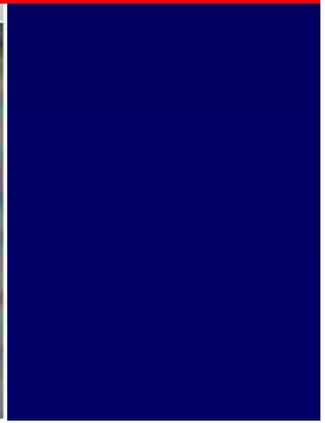
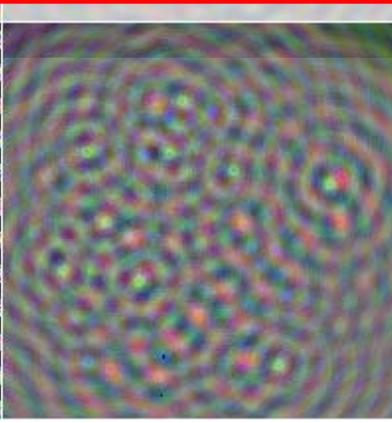
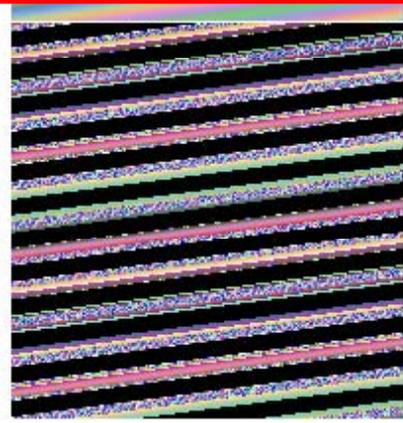
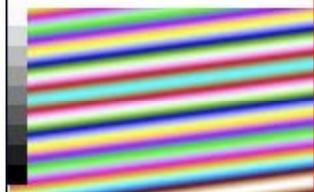
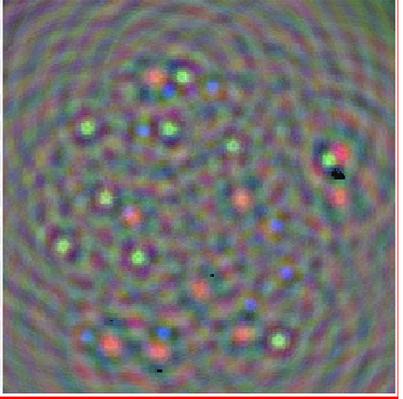
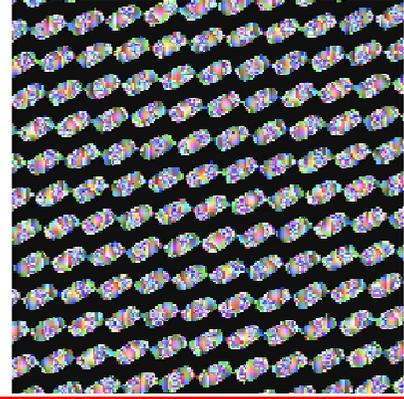
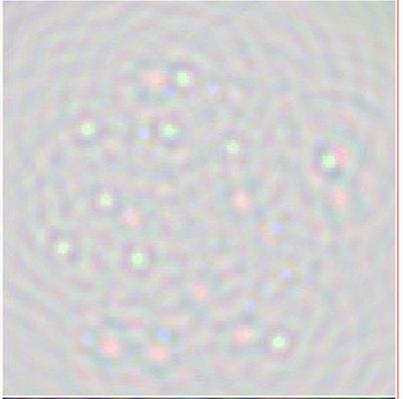
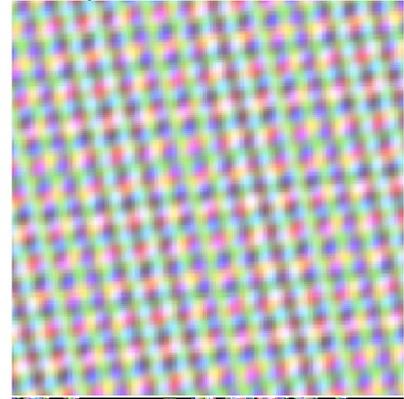
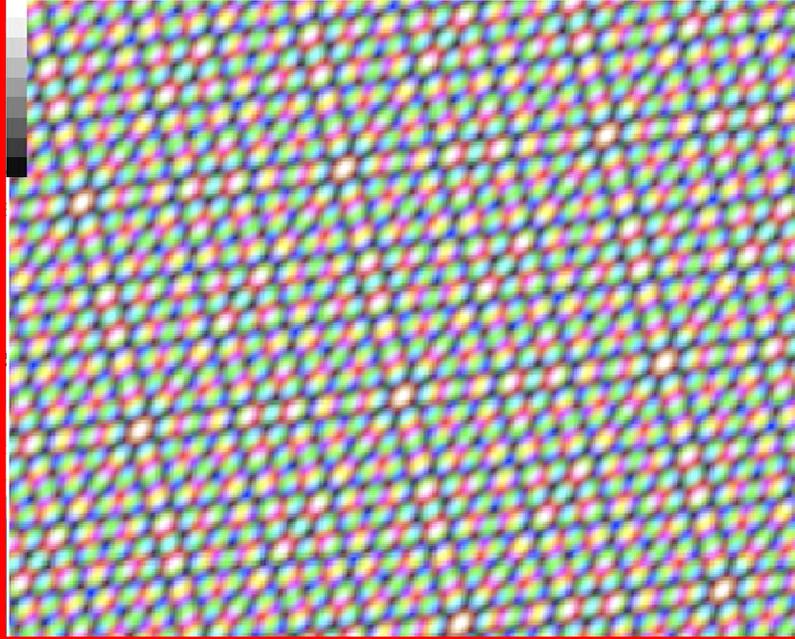
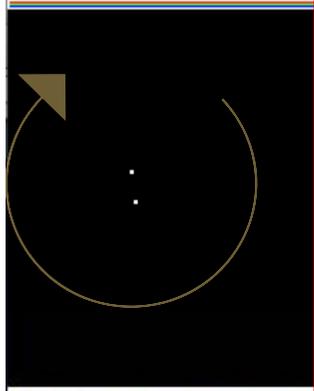
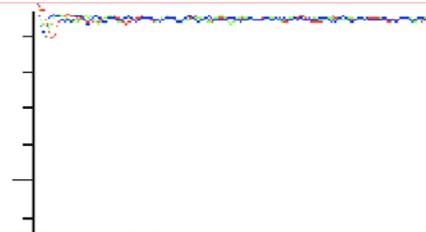
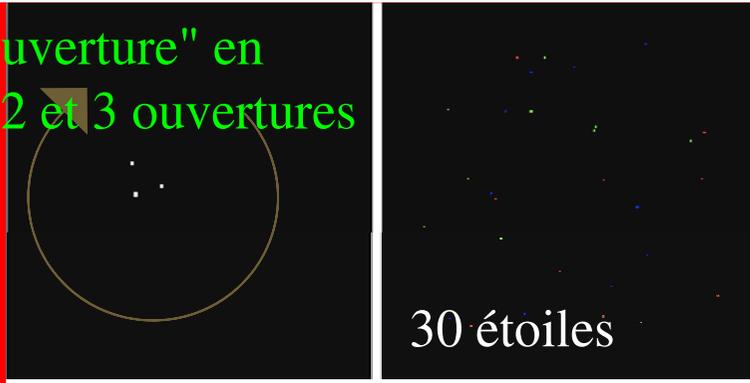


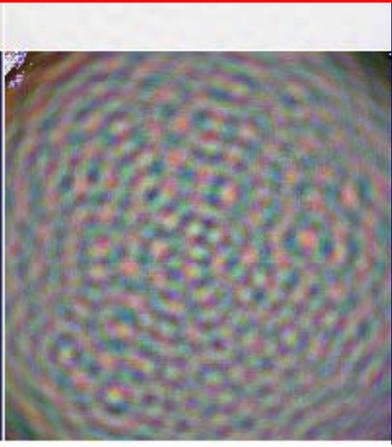
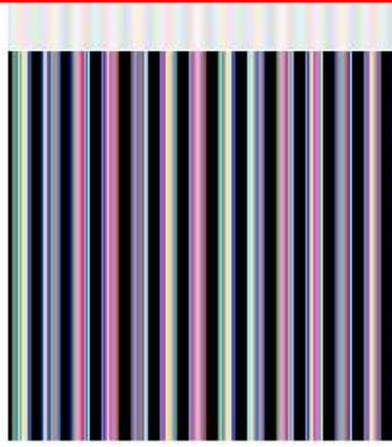
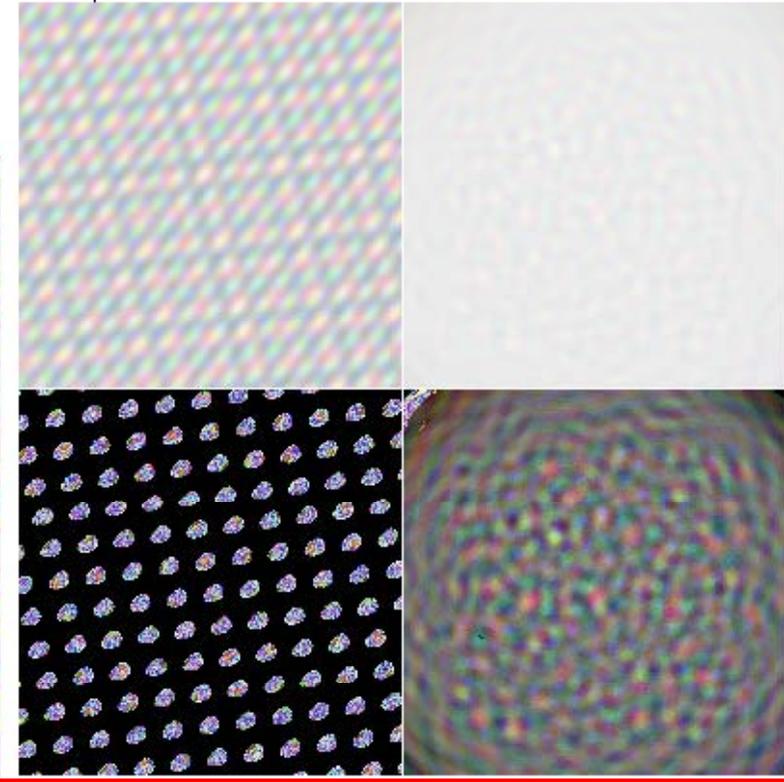
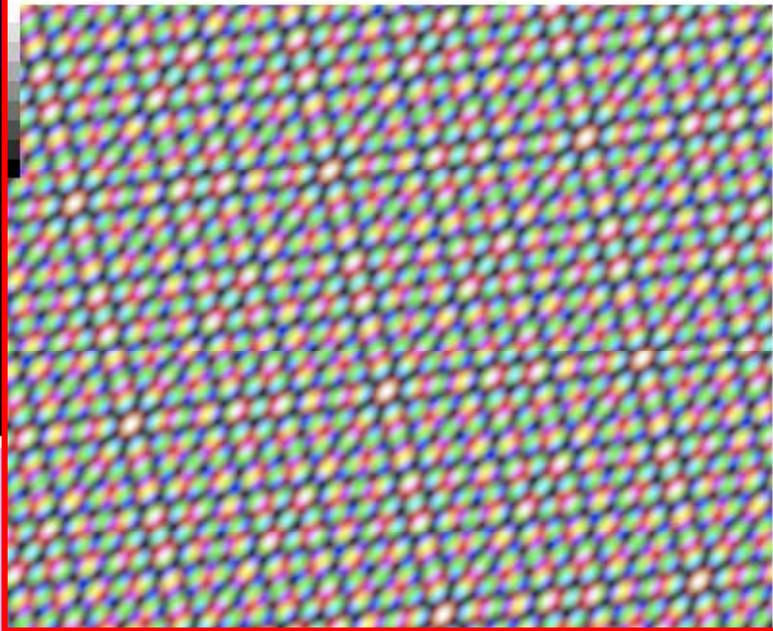
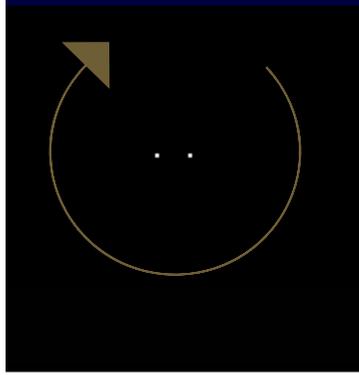
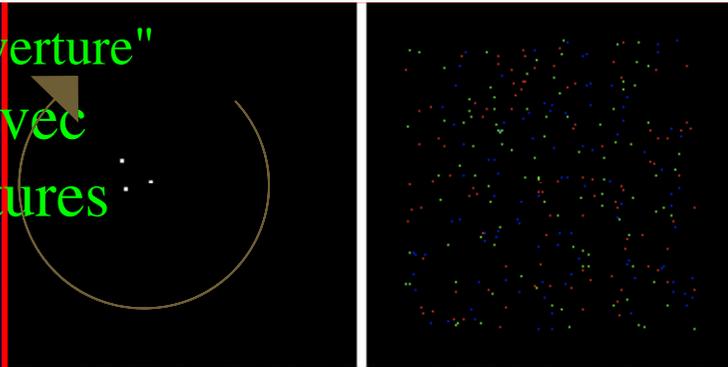
Image Fizeau de 300 étoiles avec 49 ouvertures



"Synthèse d'ouverture" en rotation avec 2 et 3 ouvertures
30 étoiles

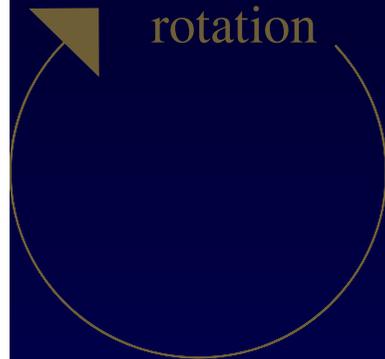


"Synthèse d'ouverture"
en rotation avec
2 et 3 ouvertures
300 étoiles



Champs encombrés:

la rotation améliore la limite théorique de N^2 étoiles pour N ouvertures
exemple: 1000 étoiles avec 33 ouvertures



33 ouvertures

1000 étoiles

- étoiles à peine détectables sans rotation
- bien détectées avec rotation
- vérifie la théorie, et l'intérêt de la rotation

Image directe
sans avec
rotation

Image d'une étoile trichrome (contraste 0,5)

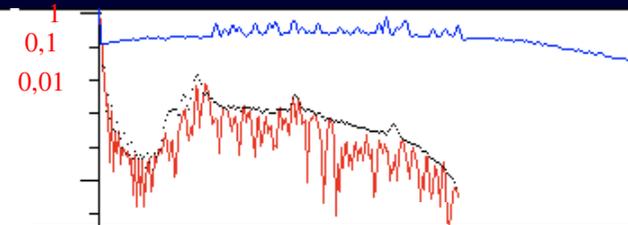
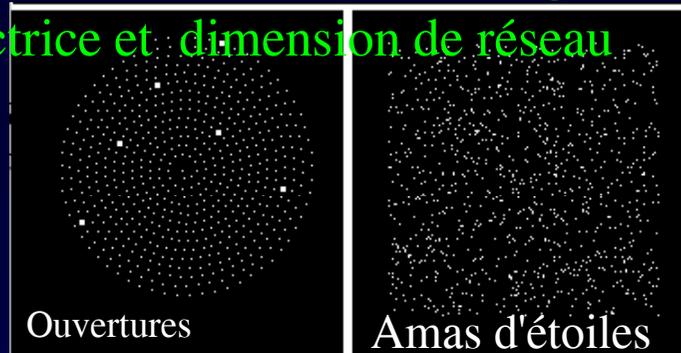
QuickTime™ et un
décompresseur
sont requis pour visionner cette image.

Fond uniforme
soustrait

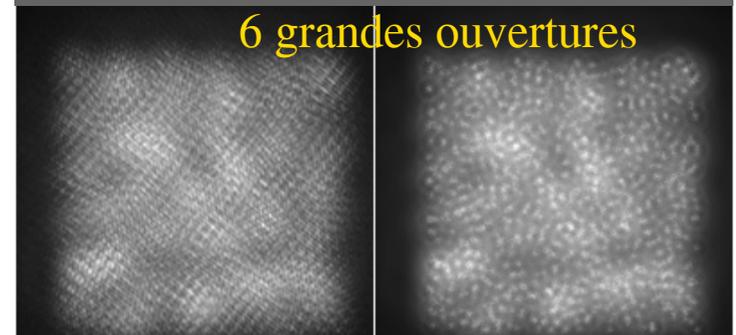
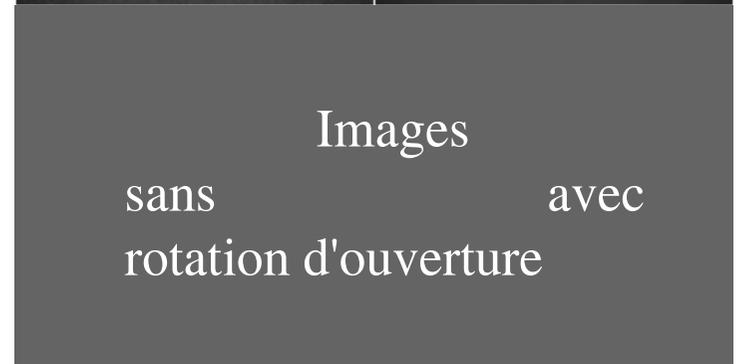
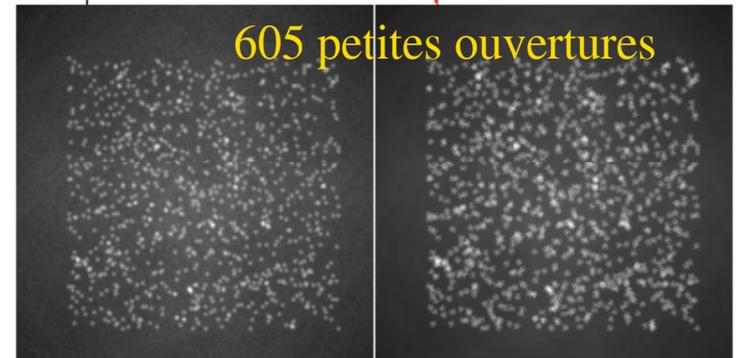
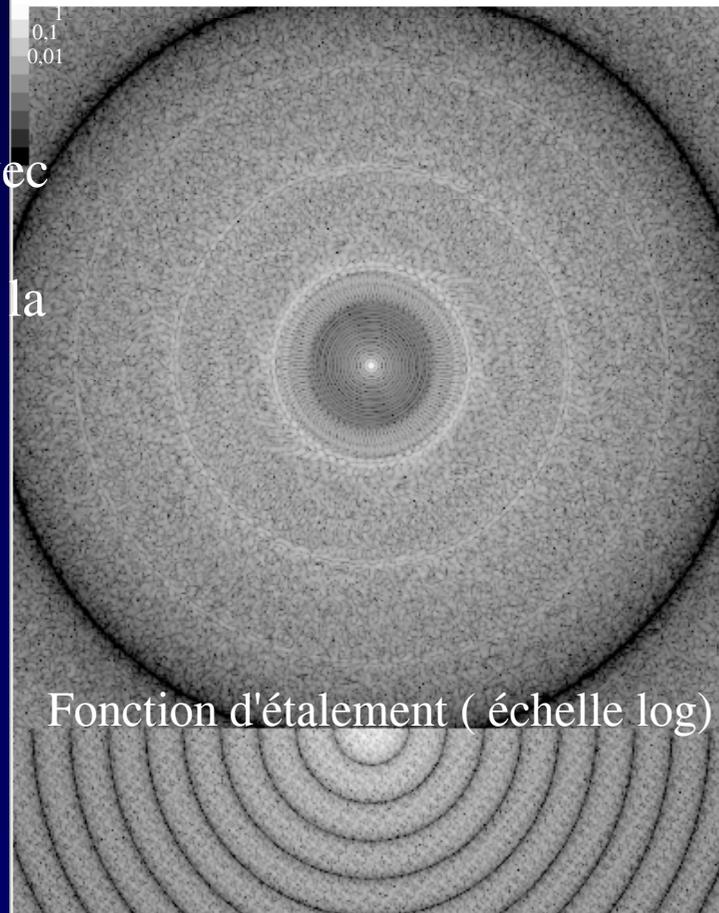


Imagerie Fizeau (simulation numérique) :

comparaison avec 605 petites ouvertures OU 6 grandes, visant 1000 étoiles
même surface collectrice et dimension de réseau

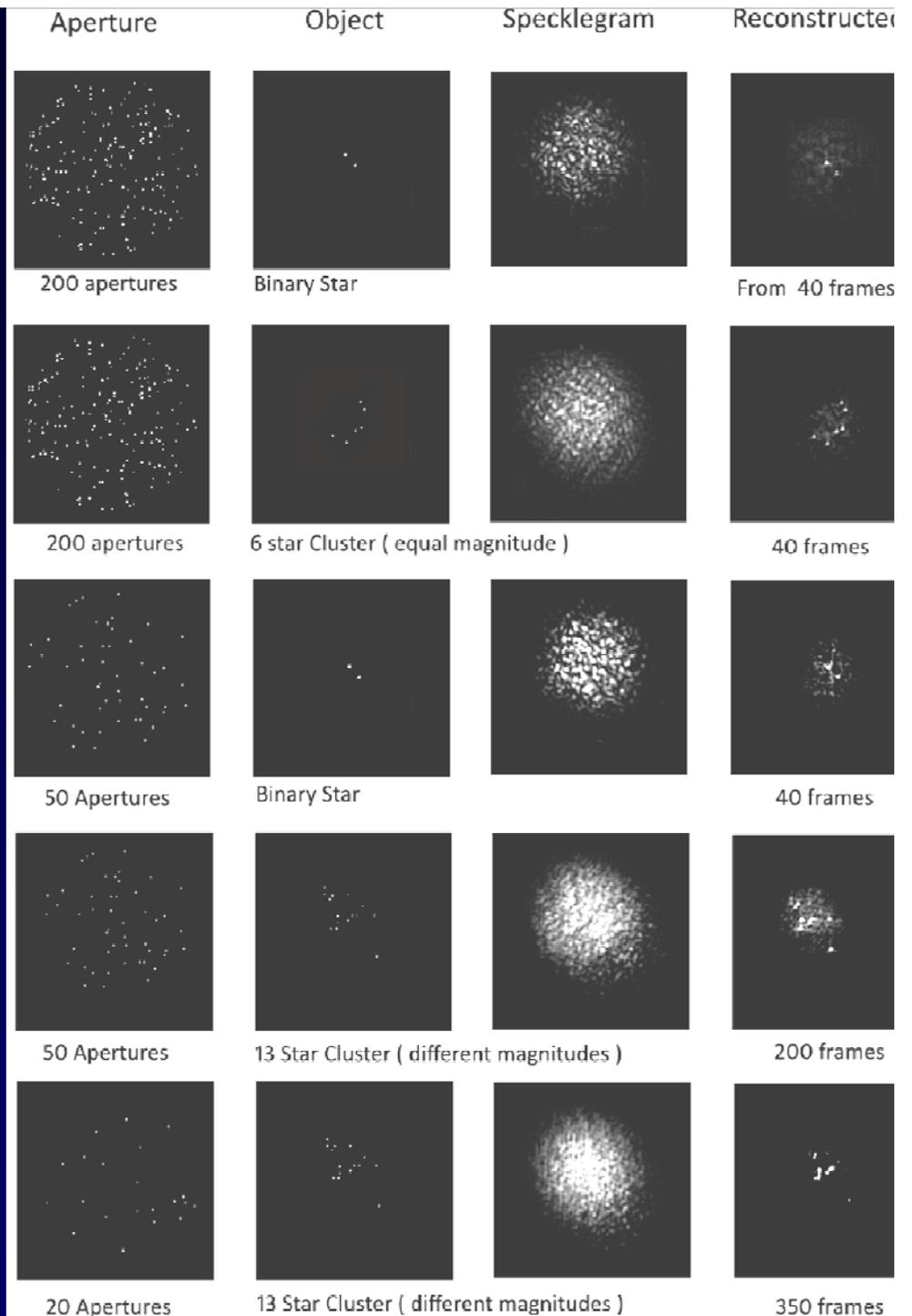
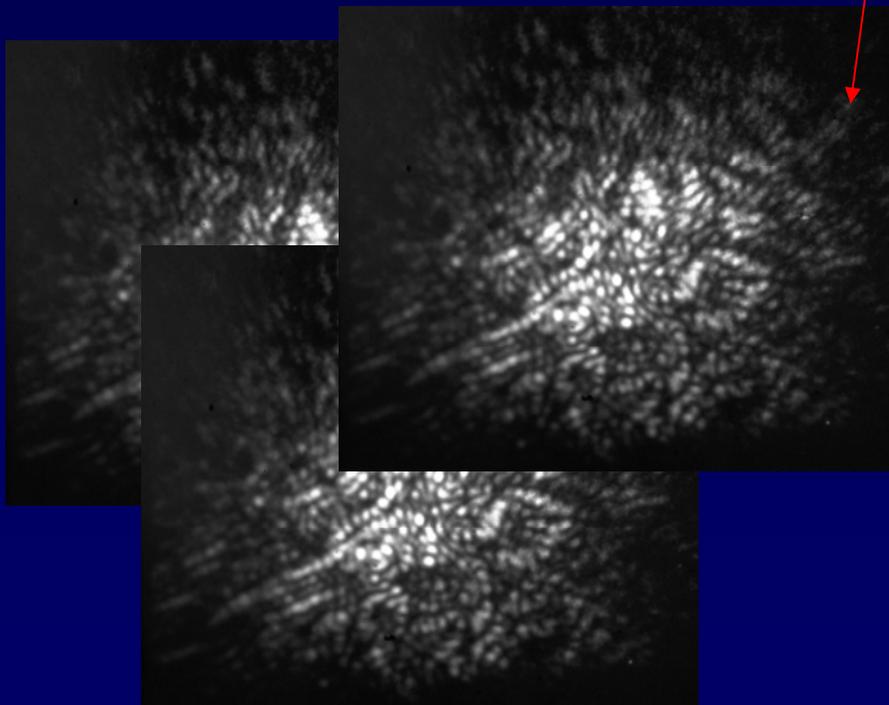


- Meilleure image avec petites ouvertures
- aussi en densifiant la pupille



En attendant l'optique adaptative...
Imagerie Fizeau sans mise en phase: reconstruction post-detection

- par interférométrie des tavelures ("speckle imaging", Surya et al., en préparation)
- nombreuses poses courtes
- calcul par triple corrélation des images
- équivaut à la clôture de phase
- exploitation de la rotation diurne



Algorithme tomographique

(Surya, proc. OSI 2011)

- simulations avec:
- 20 ouvertures
- rotation

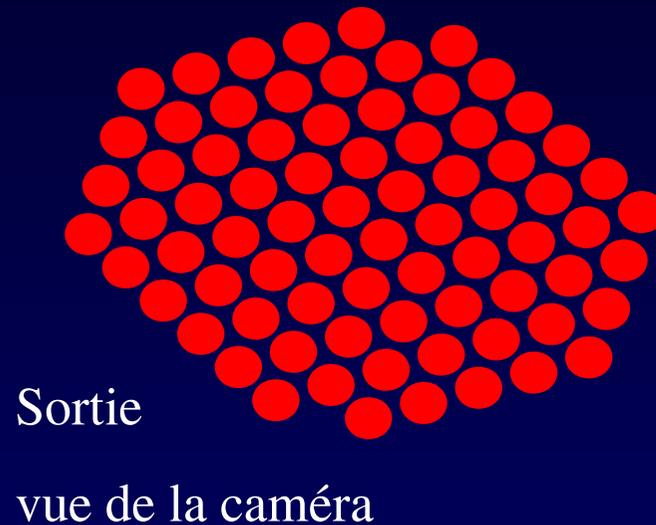
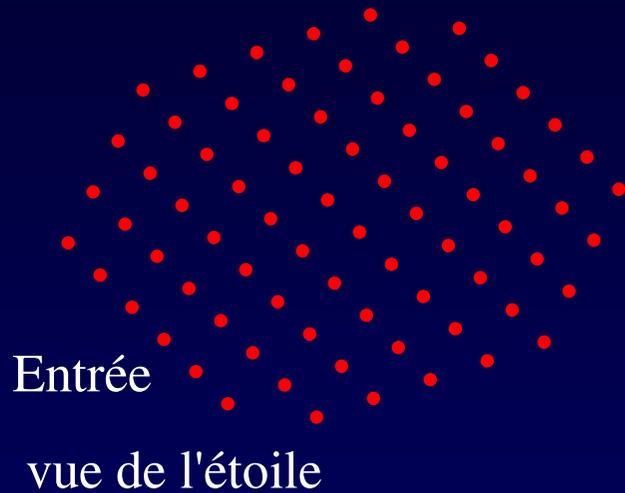
QuickTime™ et un
décompresseur
sont requis pour visionner cette image.

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

Phase de turbulence simulée

Améliorer l'interféromètre Fizeau:

densifier la pupille pour une image plus lumineuse

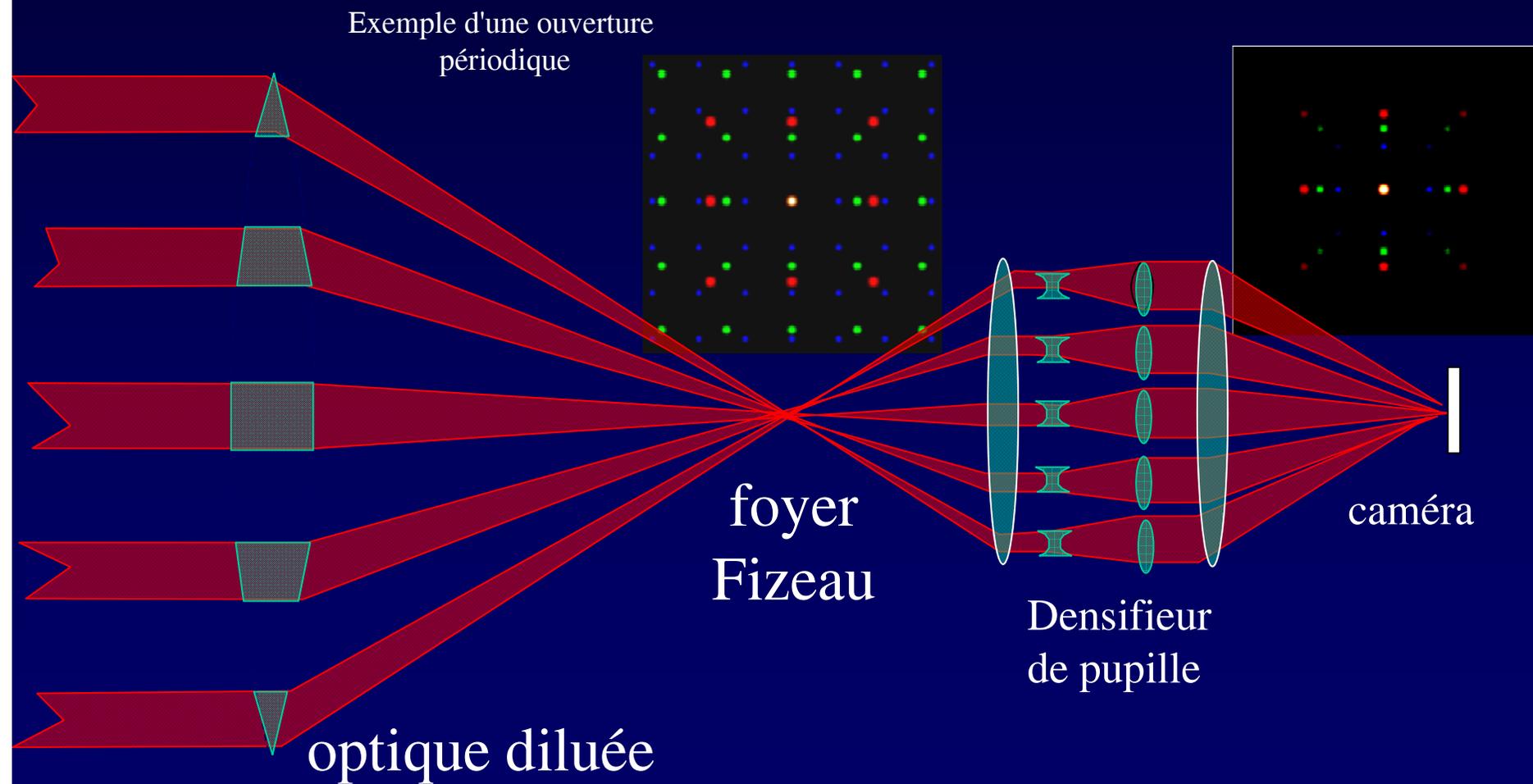


- sans modifier l'ouverture d'entrée ...
- rétrécit le halo de diffraction
- concentre sa lumière dans le pic d'interférence
- intensifie l'image qu'il forme

Principe de l'hypertélescope

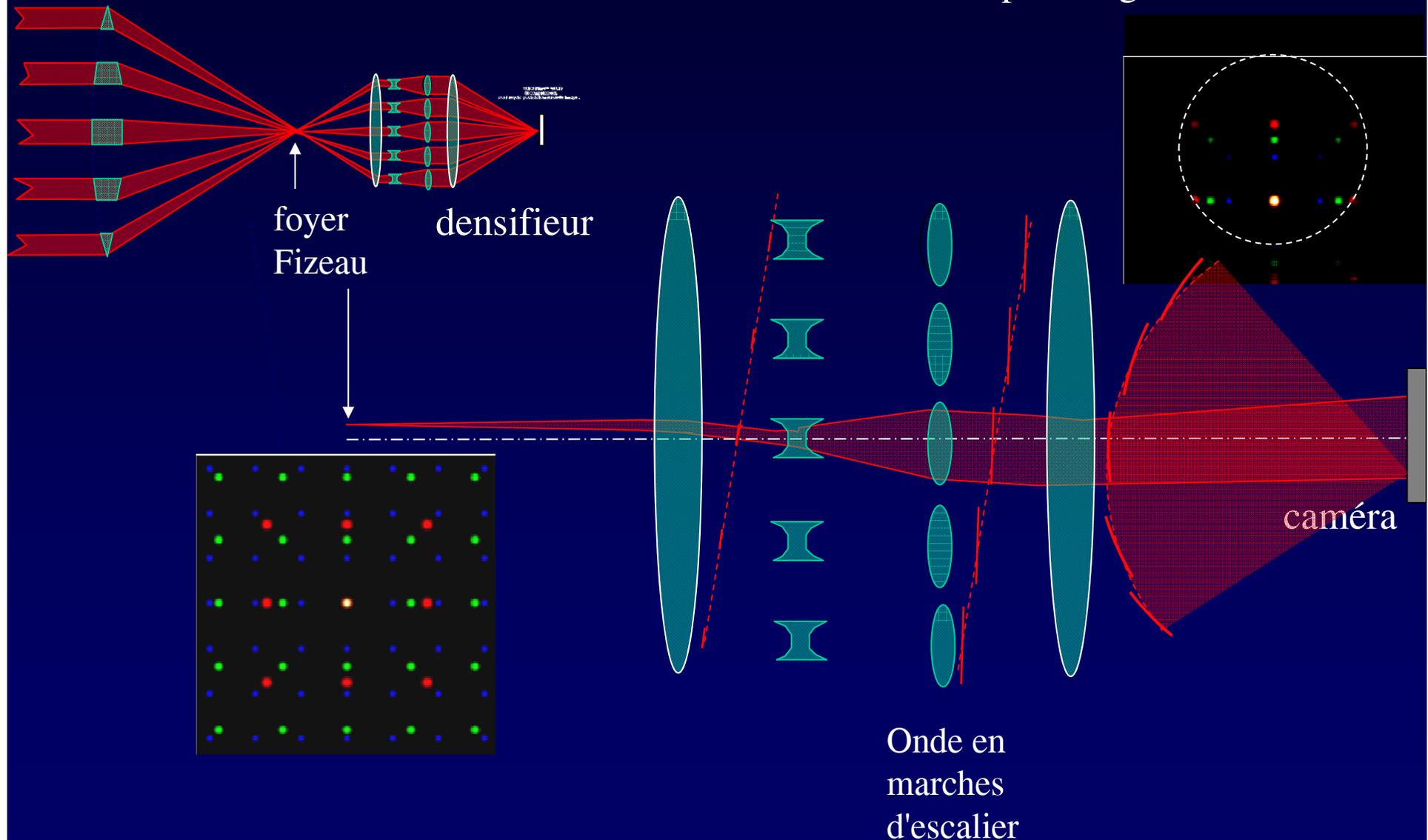
ou « interféromètre imageur multi-ouverture à pupille densifiée »

(Labeyrie A&A, 1996)

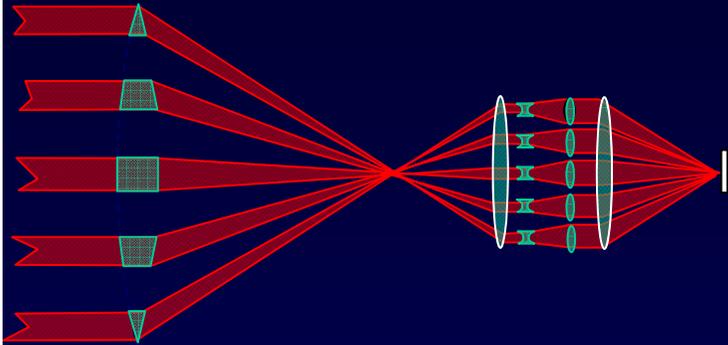


Etoiles hors de l'axe

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



Conséquences de la densification



- Rend utilisables des ouvertures fortement diluées

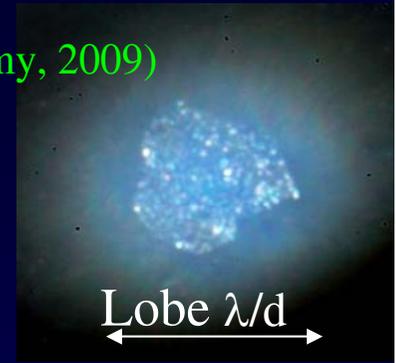
Exemple: concept de Neutron Star Imager à miroirs de 8m espacés de 100,000km

- Sans perte de lumière (Lardière et al., 2008)

Interféromètre ou hypertélescope:

Ouvertures petites et nombreuses: le gain en science

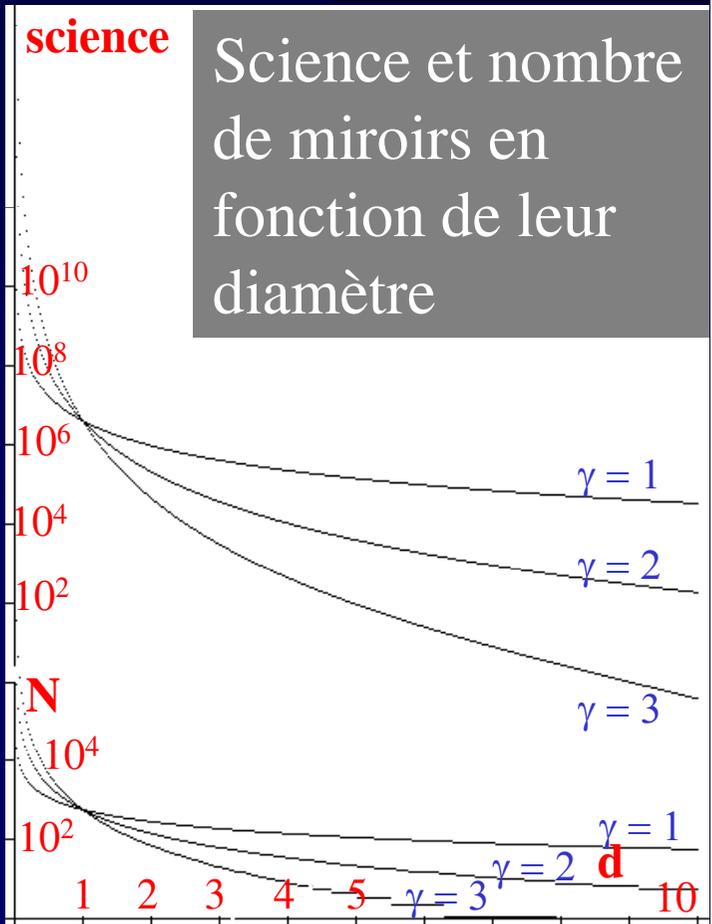
(Labeyrie et al., Exp. Astronomy, 2009)



- 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 λ/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

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

- 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



Simulations d'imagerie hypertélescope sur Bételgeuse

"Direct imaging with a hypertelescope of red supergiant stellar surfaces"

Patru, Chiavassa, Mourard & Tarmoul, SPIE 2010

(www.eso.org/sci/libraries/SPIE2010/7734-51.pdf)

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

Modèle de
Bételgeuse

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

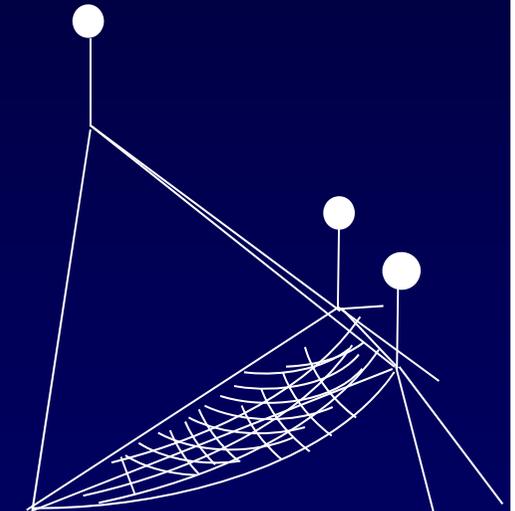
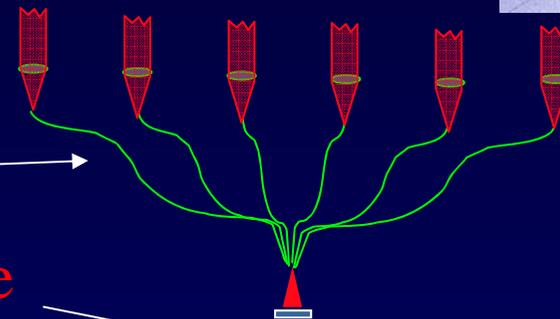
Images directes par différentes configurations d'hypertélescopes
à 100 ouvertures , sans rotation

Types d' architectures hypertélescope

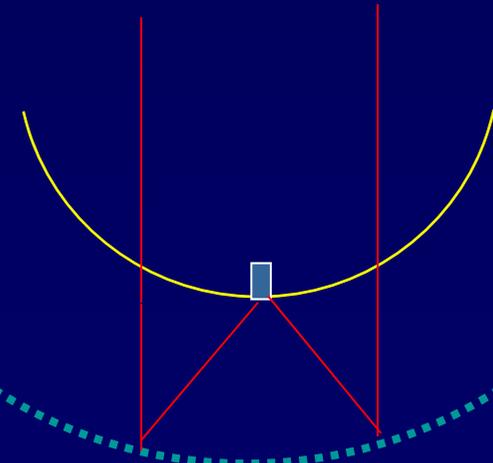
OVLA



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



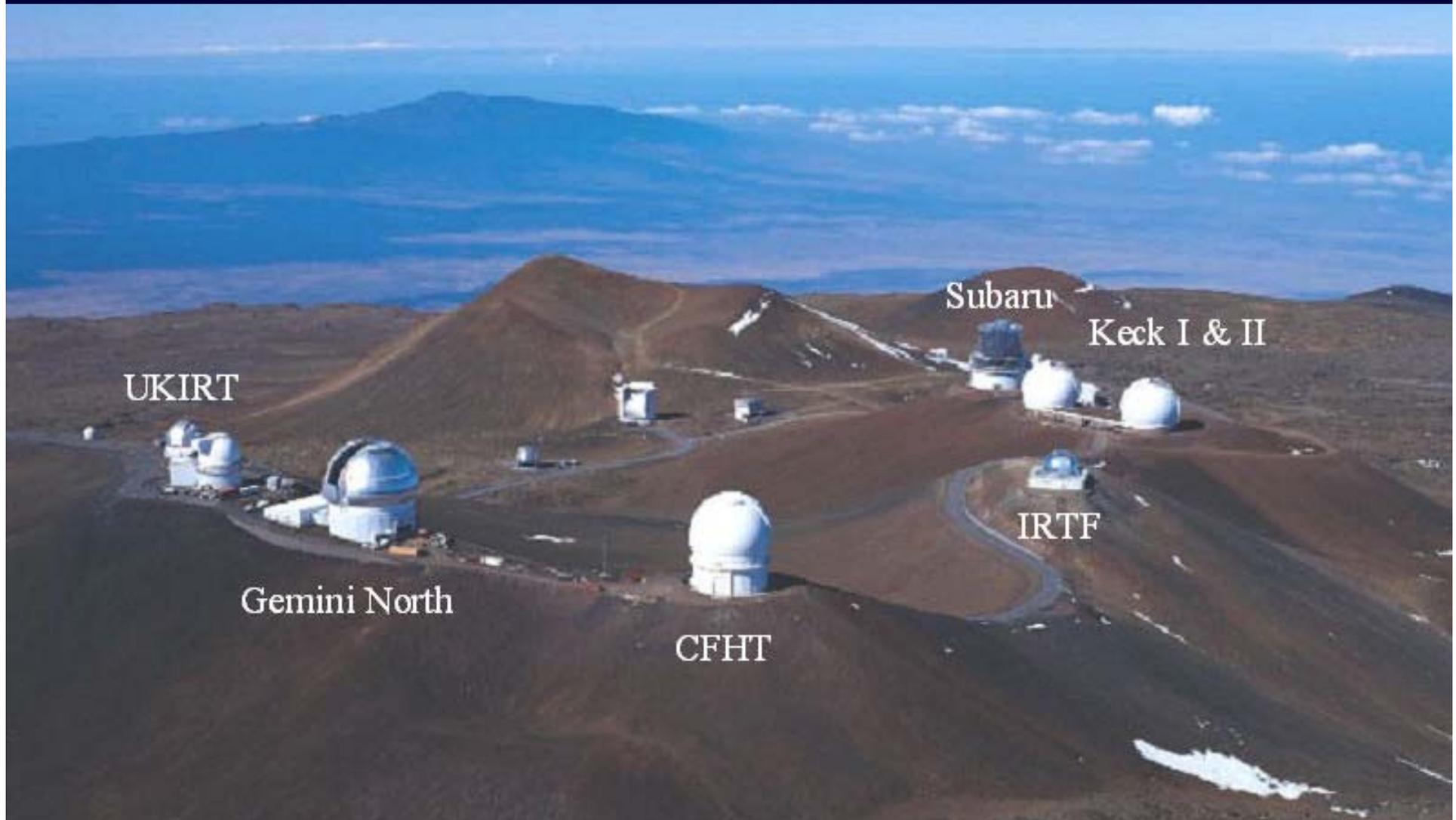
Carlina acanthifolia



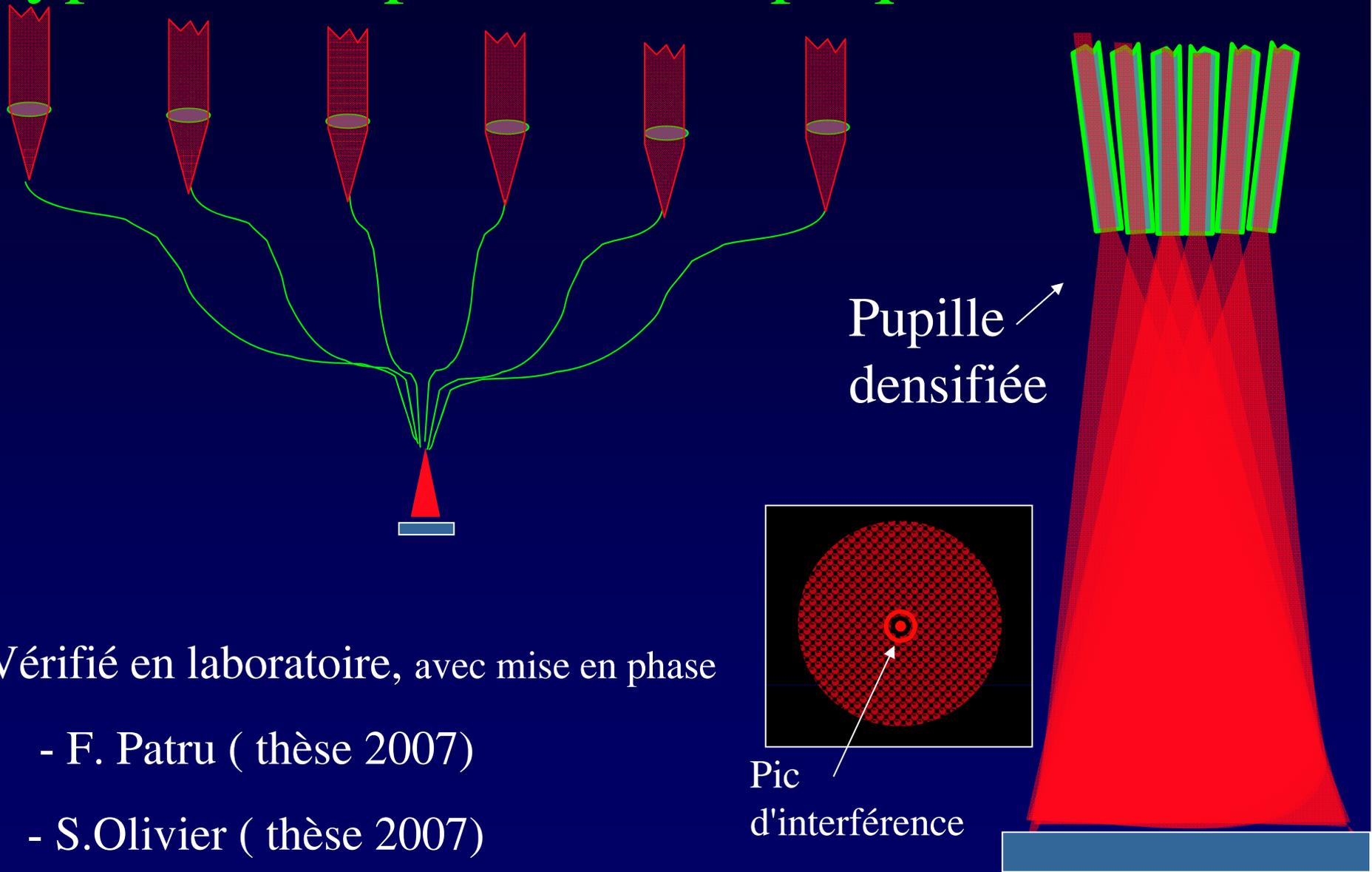
Convient aussi pour flotille dans l'espace

Interférométrie à travers des fibres optiques

- Essais par Guy Perrin à Mauna Kea, Hawaii
- projet OHANA de coupler les grands telescopes
- Nécessite de grandes lignes à retard



Hypertélescope à fibres optiques



- Vérifié en laboratoire, avec mise en phase

 - F. Patru (thèse 2007)

 - S.Olivier (thèse 2007)

- proposé pour coronographie par Serabyn (2007)

... puis dans l'espace

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

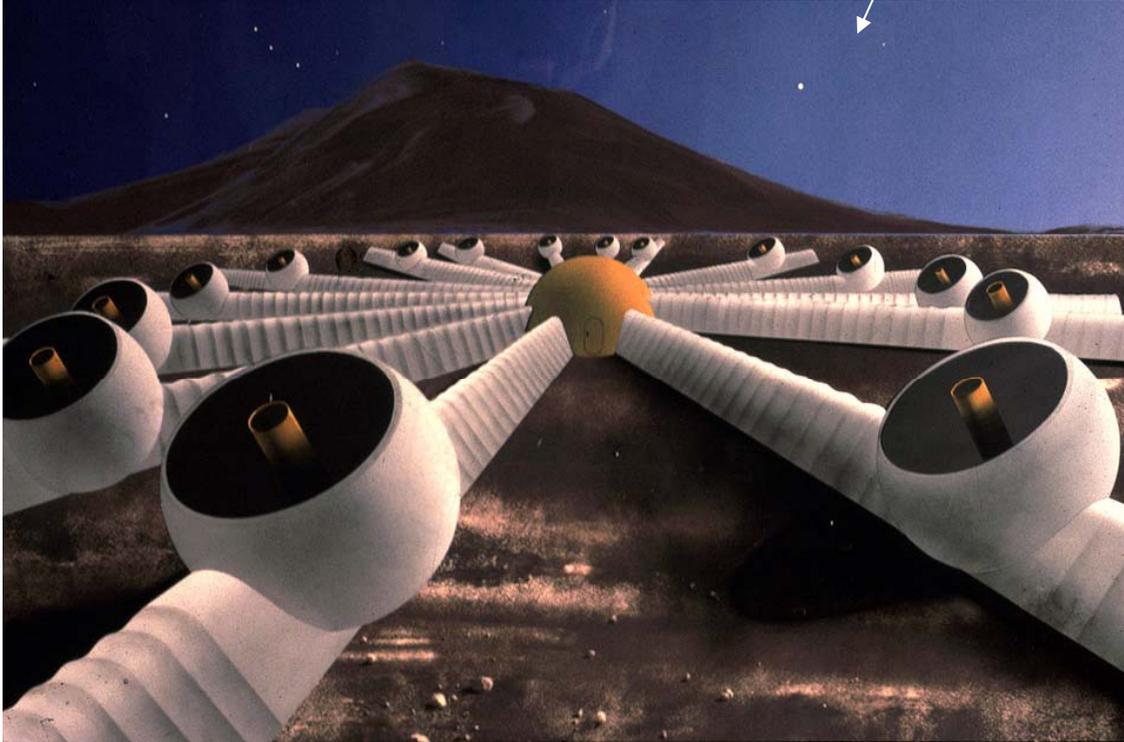
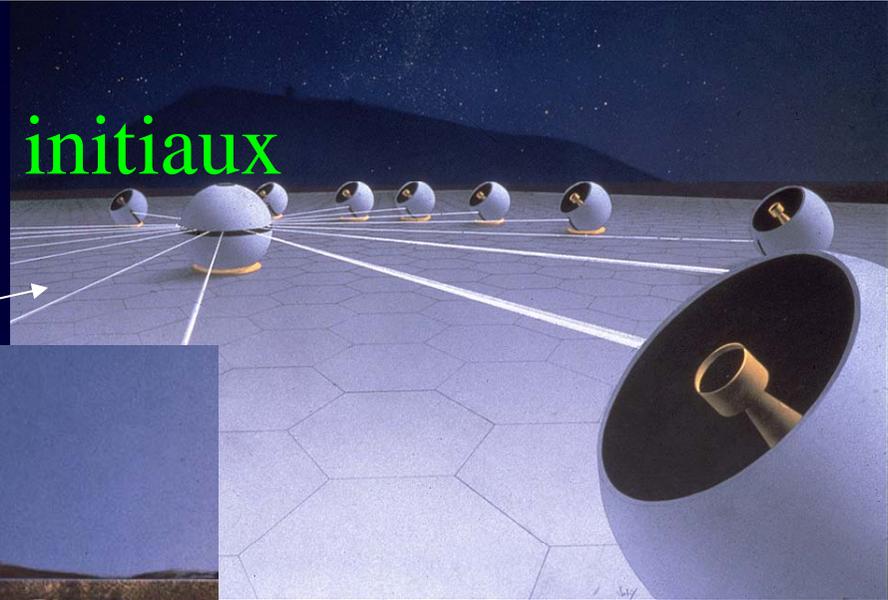
Simulation pour
Exo-Earth Imager

- Flotille sphérique ou parabolique pointable
- Piégée par laser ?

Interféromètres:

Concepts initiaux

Optical Very Large Array

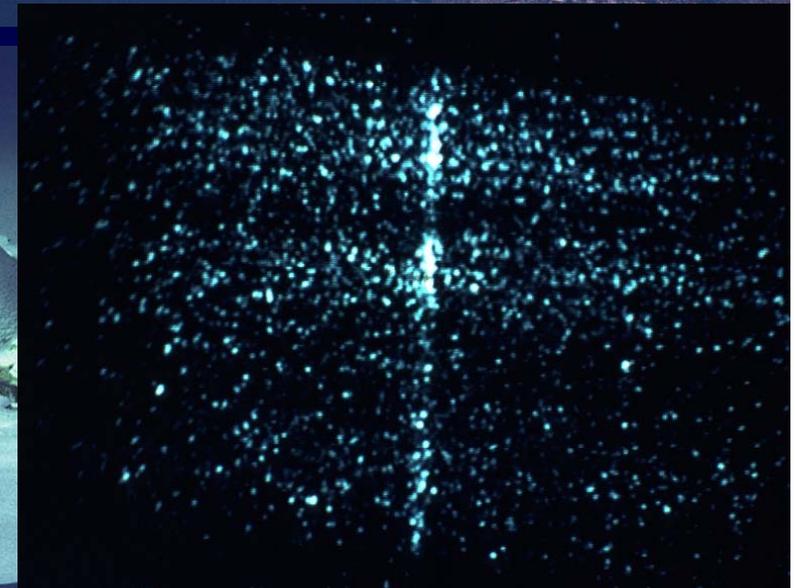


Lunar Optical Very Large Array



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)

Ce que nous voulons faire :

une nouvelle génération de télescopes...

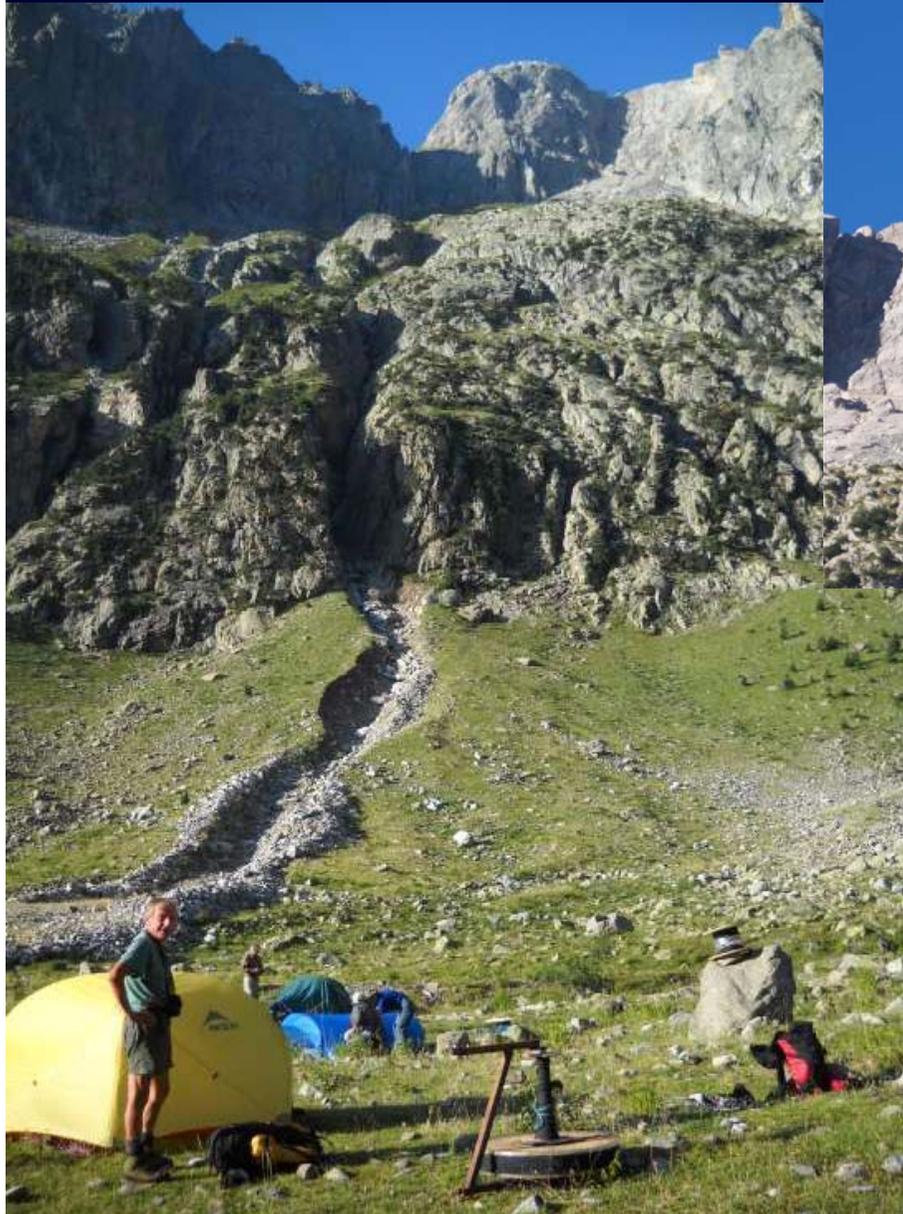
... les hypertélescopes



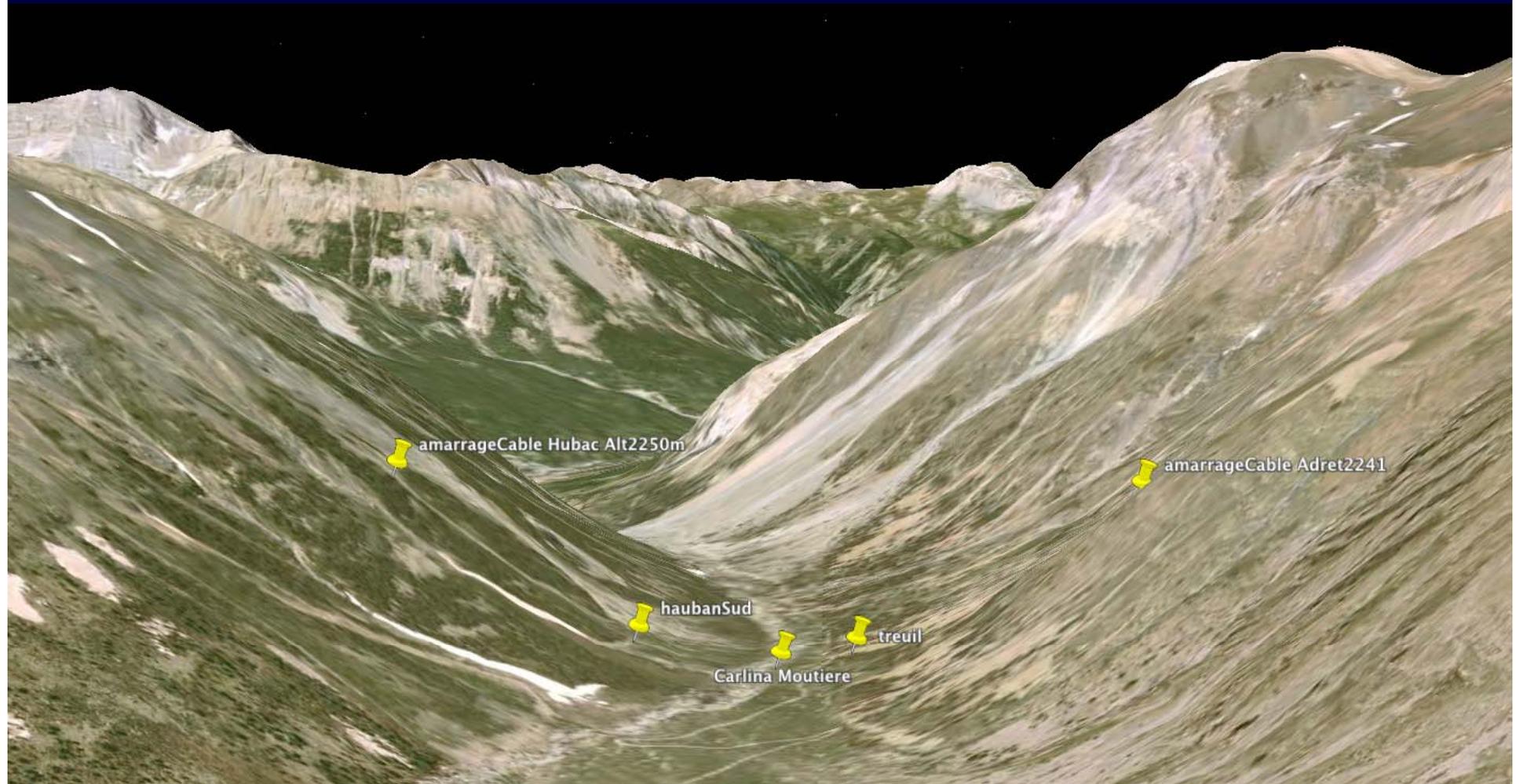


Vallée de Barrosa , Pyrénées aragonaises (photo A.Rondi)

Essais avec câble à Barrosa (Aout 2009)



Essais entamés en Ubaye



Conclusions

- après les calculs et simulations d'hypertélescope ...
- l'heure des essais est venue ...



Mercredi prochain :

Installation et essais en Ubaye

