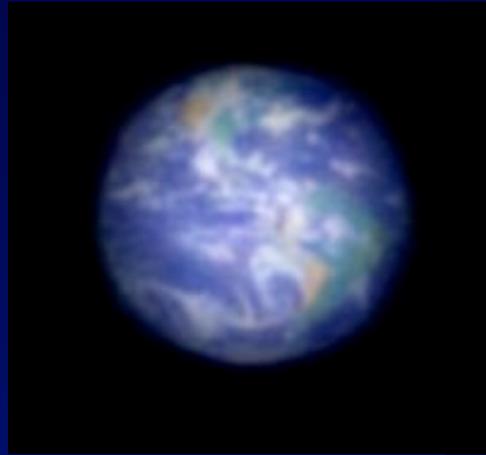


# Exo-planètes, étoiles et galaxies : progrès de l'observation



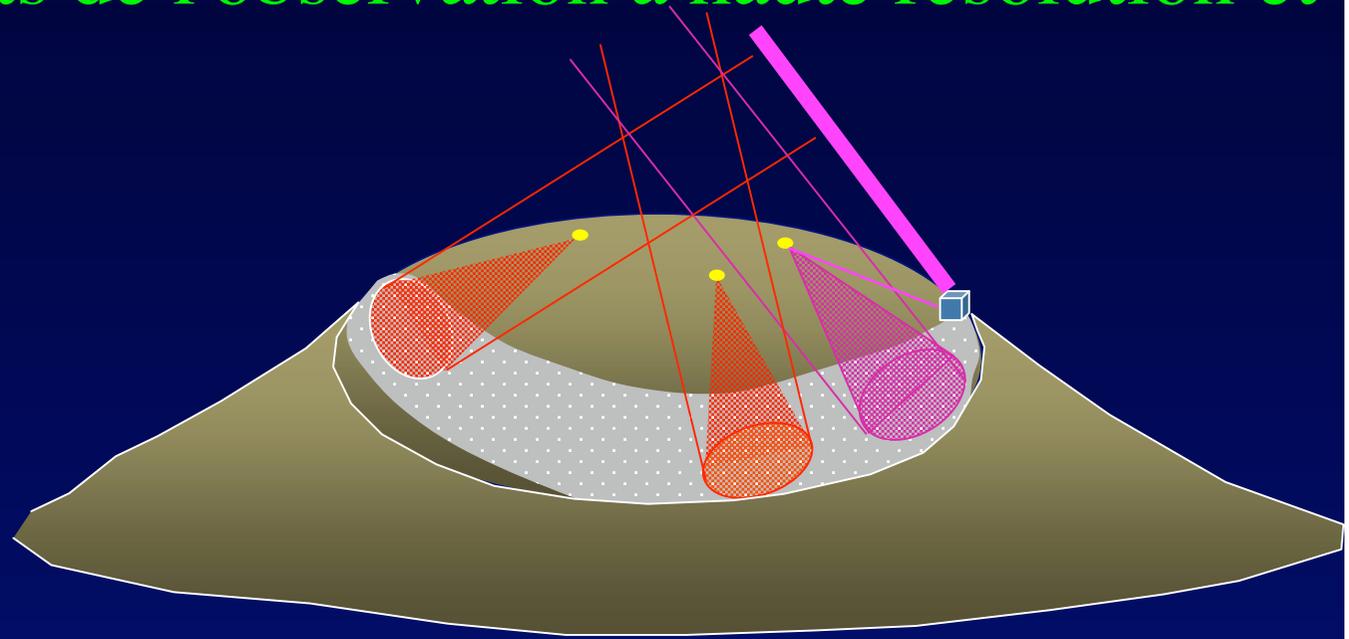
- Cours à Paris les mardis à partir du 12 Février
- 3 cours & séminaires à Nice le 29 Mai
- Détails sur [www.college-de-france.fr/chaieres/chaire11/lise.html](http://www.college-de-france.fr/chaieres/chaire11/lise.html)
- les fichiers des projections y seront affichés

# Calendrier 2008

- 12 Février: " Projets pour l'Europe: coupler un hypertélescope au télescope de 42m ?"
  - Séminaire: Roberto Gilmozzi, ESO: "Science and technology of the European ELT"
- 19 Février "Résultats récents de l'observation à haute résolution et perspectives "
  - Séminaire: **Jean Surdej, Institut d'Astrophysique de Liège** "Mirages gravitationnels: reconstruction de l'image des sources par système hardware"
- **26 Février et 4 Mars: les cours et séminaires n'auront pas lieu ( vacances scolaires)**
- 11 Mars : Faisabilité d'une Etoile Guide Laser pour mettre en phase les hypertélescopes
  - Séminaire: M.Aurière, OMP "Imagerie magnétique de la surface des étoiles: intérêt des géantes rouges "
- 18 Mars: Faisabilité d'une "Etoile Guide Laser" pour mettre en phase les hypertélescopes
  - Séminaire: H. Le Coroller , OAMP
- 25 Mars "**Propositions d'hypertélescopes pour l'espace: Stellar Imager et Luciola**"
  - Séminaire : Nathalie Behara " Naines blanches carbonées " (sous réserve)
- 1er Avril « **propositions d'hypertélescopes pour l'espace: piégeage par laser** »
- **Une grande illusion ? Éventualité de mirages galactiques**
  - Séminaire : sera précisé ultérieurement
- **3 cours et séminaires sont aussi prévus a Nice le 29 Mai**

Aujourd'hui:

## Résultats récents de l'observation à haute résolution et perspectives

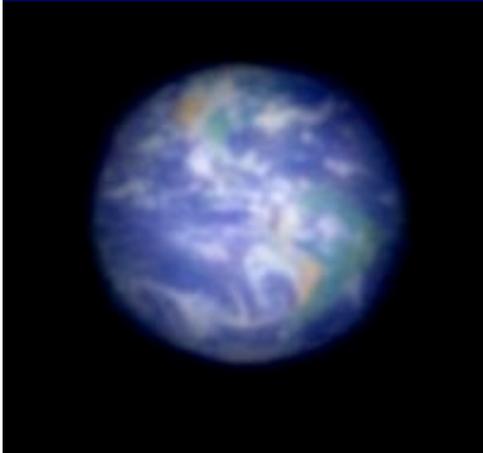


Séminaire à 17h30:

Jean Surdej, Institut d'Astrophysique de Liège

" Mirages gravitationnels: reconstruction de l'image  
des sources par système hardware "

# Vers la recherche de vie



- Voir ainsi une Terre à 10 années lumière ? Et sa végétation ?
- C'est possible avec un hypertélescope de 100km:
  - 100 miroirs de 3m
  - ou 10 000 de 30cm
  - ou un million de 3cm, piégés par laser ?

•

# Premiers résultats des grands interféromètres

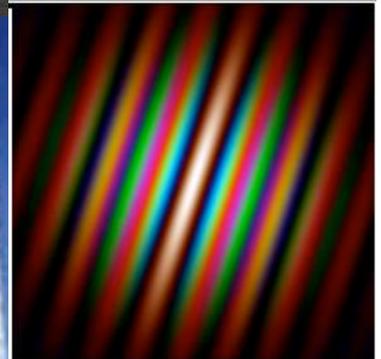
- Oscillations des Céphéides: Davis et al. (2008)



*SUSI seen from the north end of the 640m baseline.*

4 x 8m

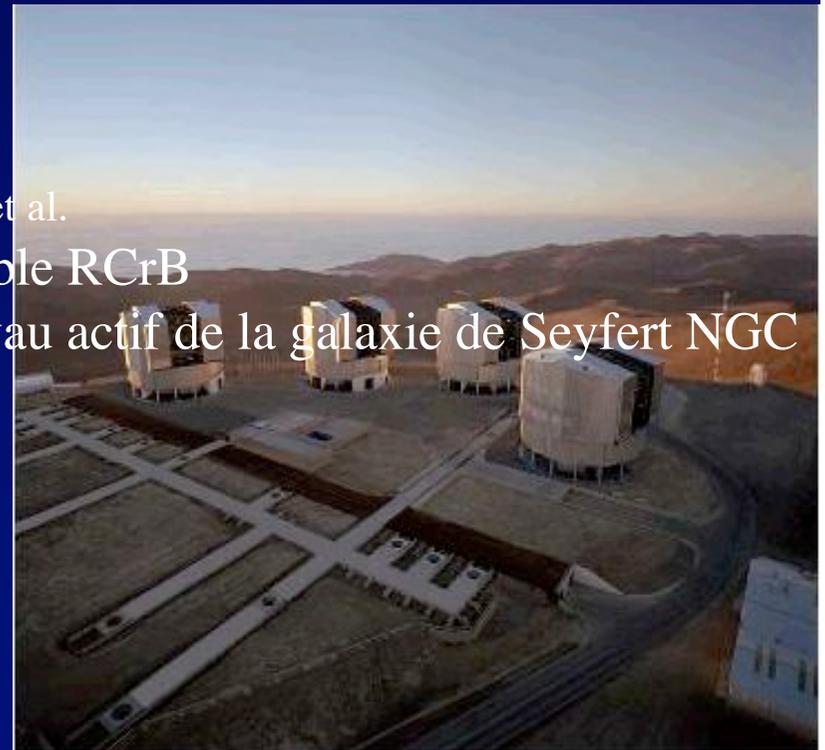
L'européen VLTI  
et l'américain Keck



2 x 10m

# Résultats récents du grand interféromètre européen au Chili

- Distance de l'étoile  $\gamma$  2 Velorum, Millour et al.
- Detection d'un disque Keplerien autour de  $\alpha$  Arae, étoile Be, Meilland et al.
- $\eta$  Carinae, Weigelt et al.
- Nova RS Ophiuchi , 5 jours après , Chesneau et al. Aussi au Keck
- Interaction disque-vent dans l'étoile jeune MWC 297, Malbet et al.
- Supergéante Be CPD-57 2874, Domiciano de Souza et al.
- Variable Mira S Orionis, Wittkowsky et al.
- Diamètre angulaire de V3879 Sgr
- Achemar, Kervella
- Disque d'accrétion d'étoile Herbig Be, Kraus et al.
- Instantané sur la poussière d'une étoile variable RCrB
- Débuts d'observations extra-galactiques: noyau actif de la galaxie de Seyfert NGC 1068



# Premiers résultats des grands interféromètres

- Etoile remplissant son lobe de Roche ( binaire semi-détachée SS Leporis, Verhoelst et al. )
- Astéroïdes (Delbo & Ligorì)
- Nova RS Ophiuchi observée avec "nulleur" Keck (Barry et al.)
- variable Mira avec "grism" Keck ( Eisner et al. )
- **vérifier VLT?** Amas globulaires et test de gravité faible ( Scarpa et al.)

# Début d'imagerie en synthèse d'ouverture

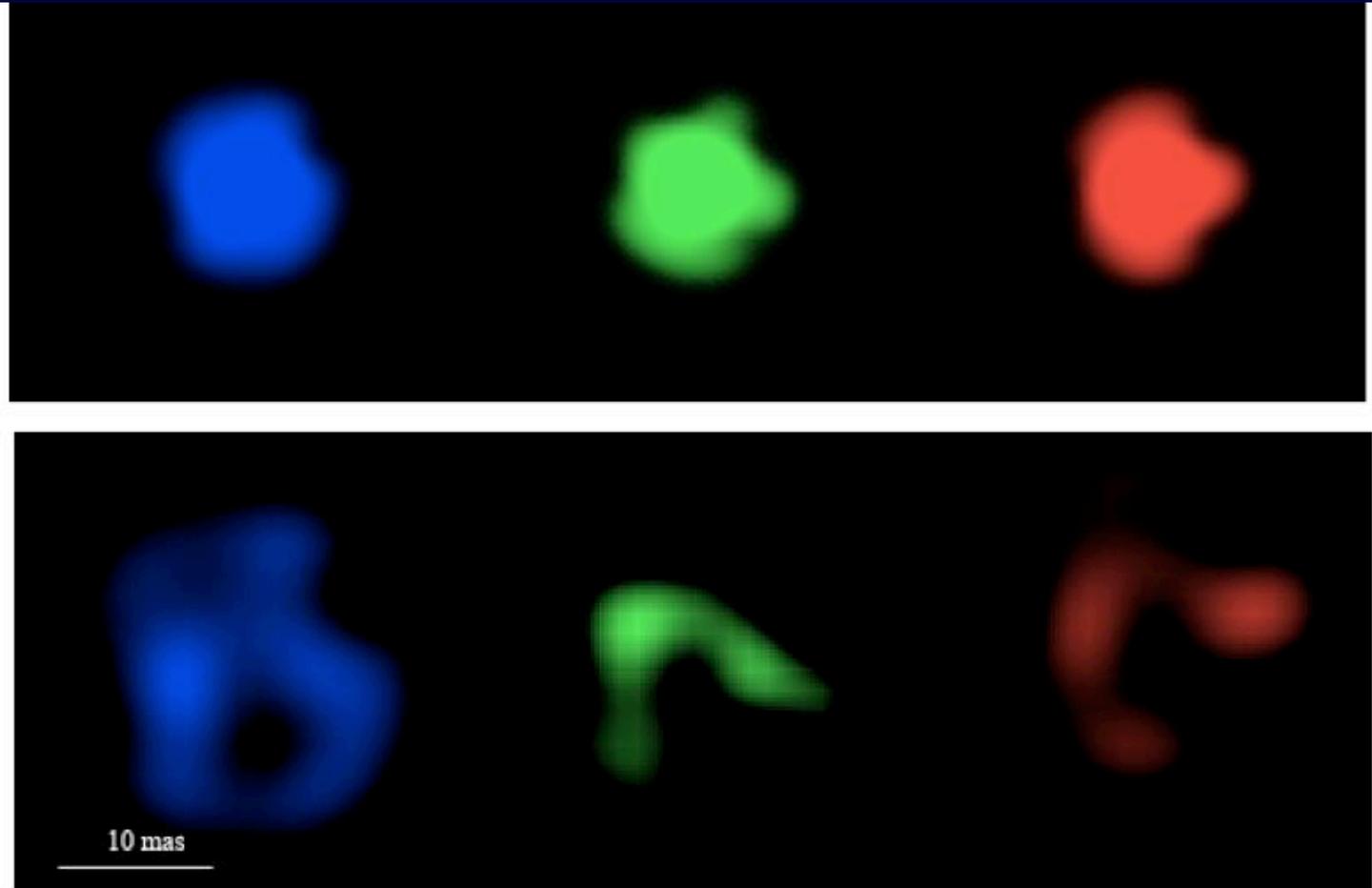


Fig. 9.— Reconstructed near-infrared images of R Aqr are shown here. The blue, green and red color images (from left to right) represent 1.51, 1.64 and 1.78  $\mu\text{m}$  respectively. The top

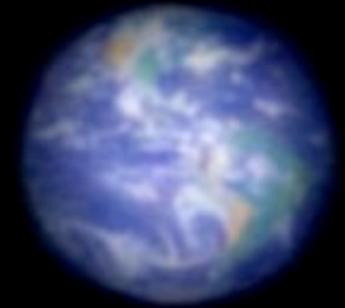
- performance limitée par la combinaison incohérente des données

# Les hypertélescopes

- Evoqués ici depuis 1996...
- leur potentiel se confirme...
- Rapprochent les domaines d'observation des télescopes et des interféromètres
- Pourront-ils remplacer des ELTs de 42m ?
- Ou seront-ils complémentaires ?

# Versions spatiales proposées

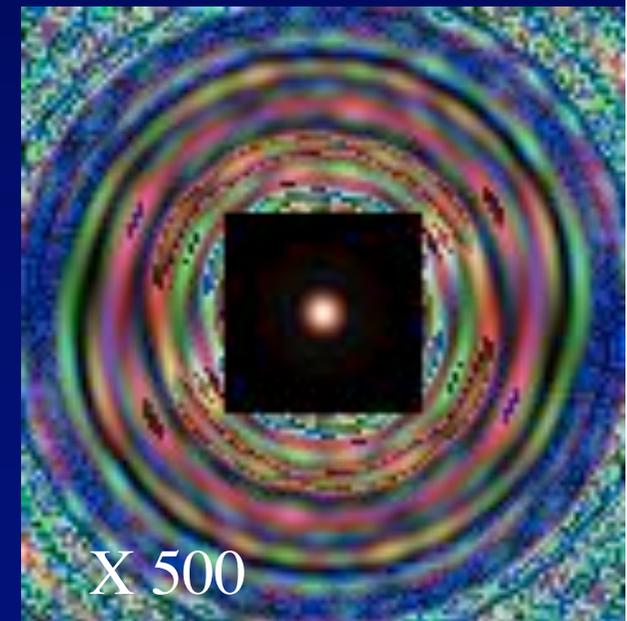
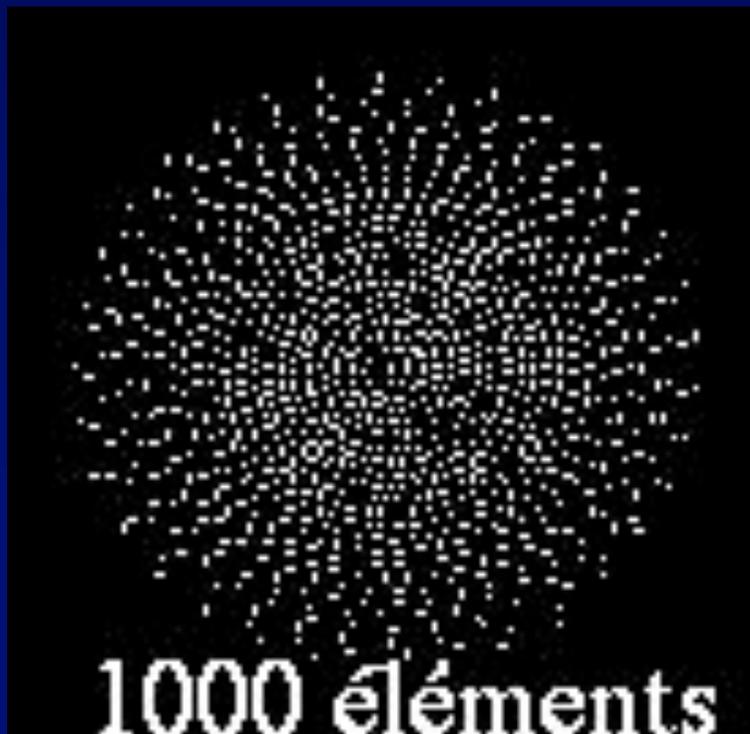
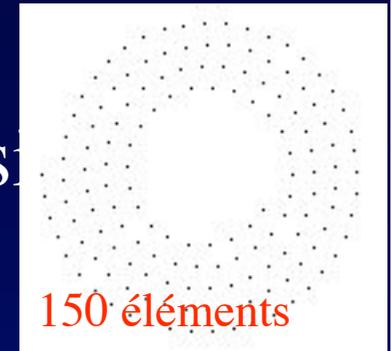
- A la NASA pour Terrestrial Planet Finder ( Labeyrie 2000)
- à ESA: Proposition Luciola ( Labeyrie et al. 2007) 
- à la NASA: Proposition "Stellar Imager" ( Carpenter, Lyon et al. 2007)
  - étude en cours à NASA/Goddard ( présentation prévue à Marseille SPIE Juin 2008)



La troisième voie :

## Hypertélescope

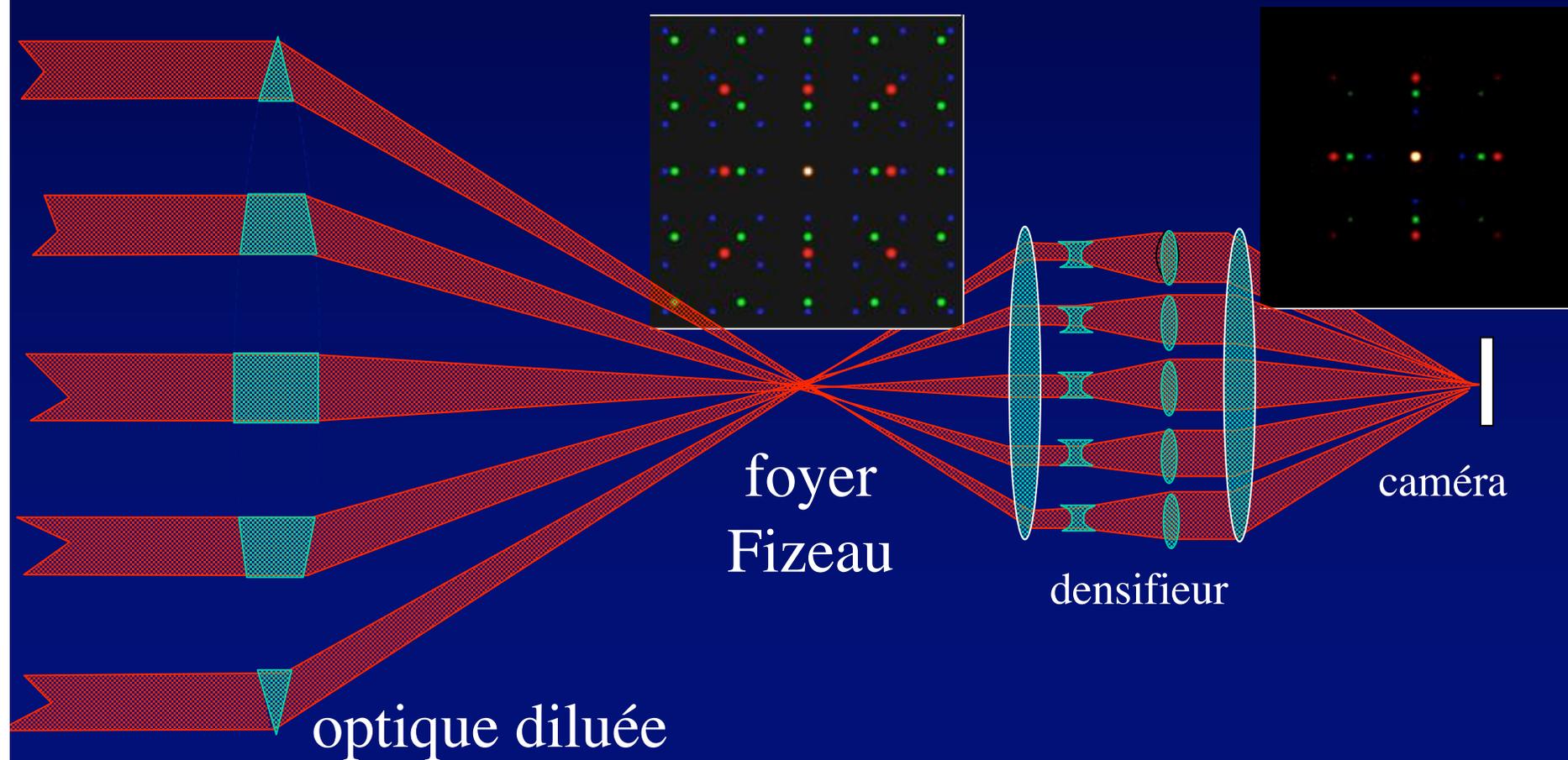
- miroir géant en pointillés
- formant une image directe "à pupille dense"



# Principe de l'hypertélescope

ou « interféromètre imageur multi-ouverture à pupille densifiée »

(Labeyrie A&A, 1996)

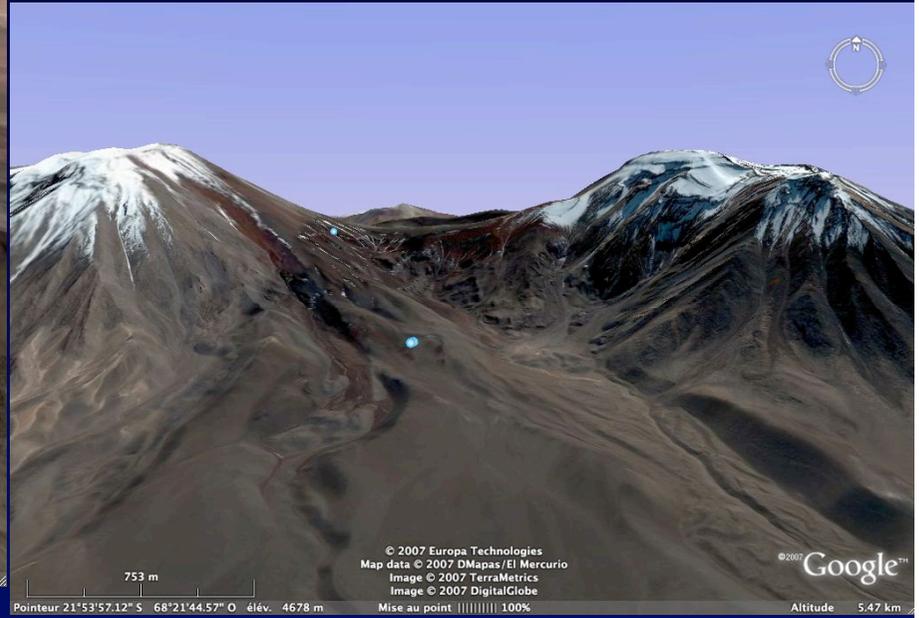
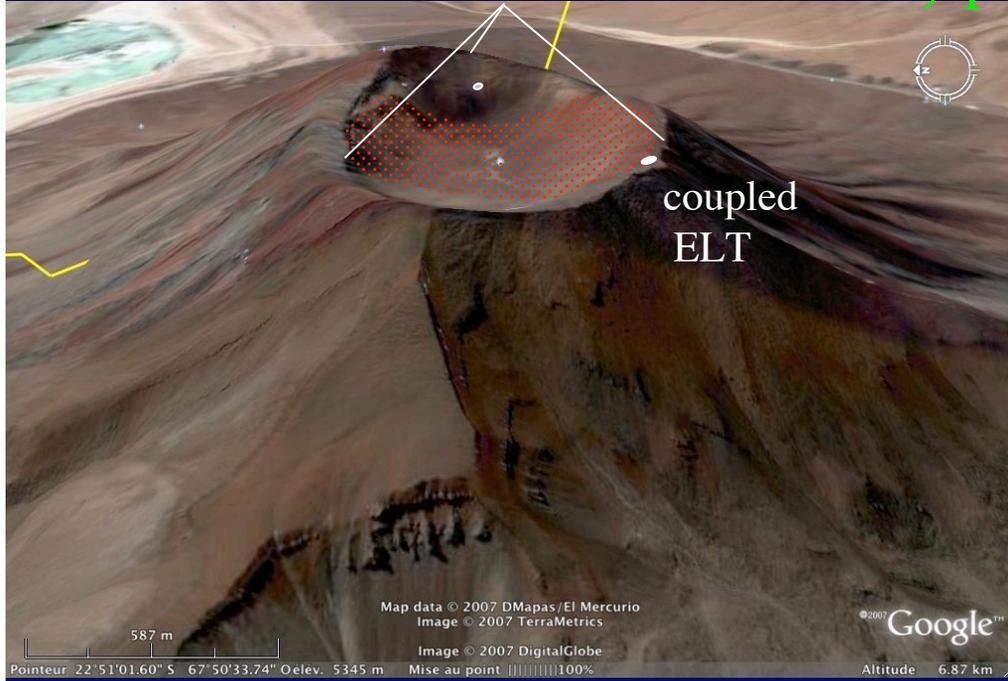


# Mise en phase adaptative sur les objets faibles: Etoile guide laser

- Fonctionne sur des télescopes ( Keck, VLT)
- Anime l'optique adaptative en l'absence d'étoile brillante
- Inutilisable pour relier les phases des ouvertures diluées....
- ...Quoique:  
version modifiée "Hypertelescope Laser Guide  
Star"



# Sites concaves au Chili, près du site ALMA

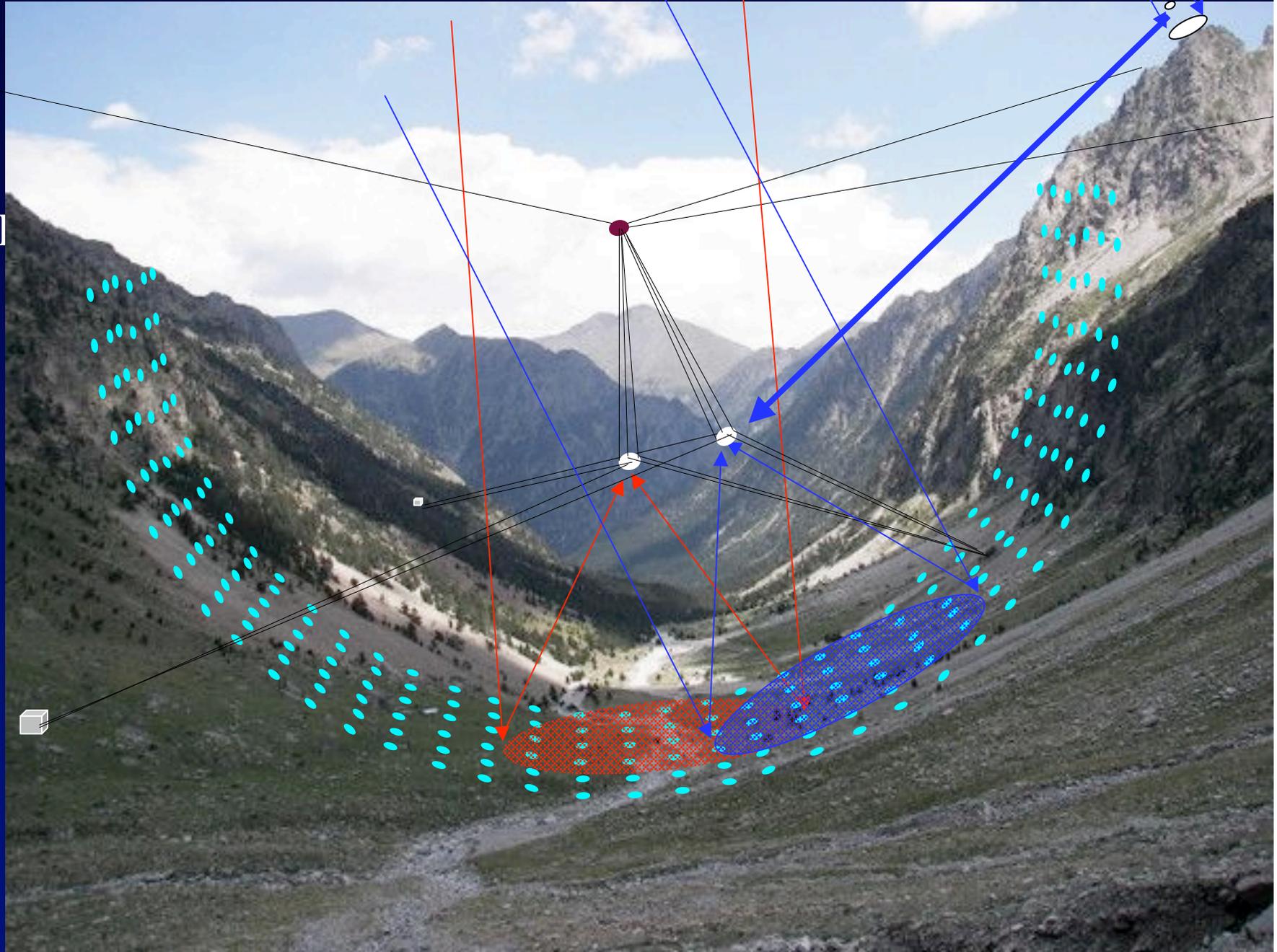


# Un site pour Carlina-2 dans les Pyrénées espagnoles ?

- vents d'altitude 2 fois plus faibles que dans le Haut Atlas
- moins de trainées d'avions que dans les Alpes
- topographie favorable pour ouverture de 150m, sans ballon



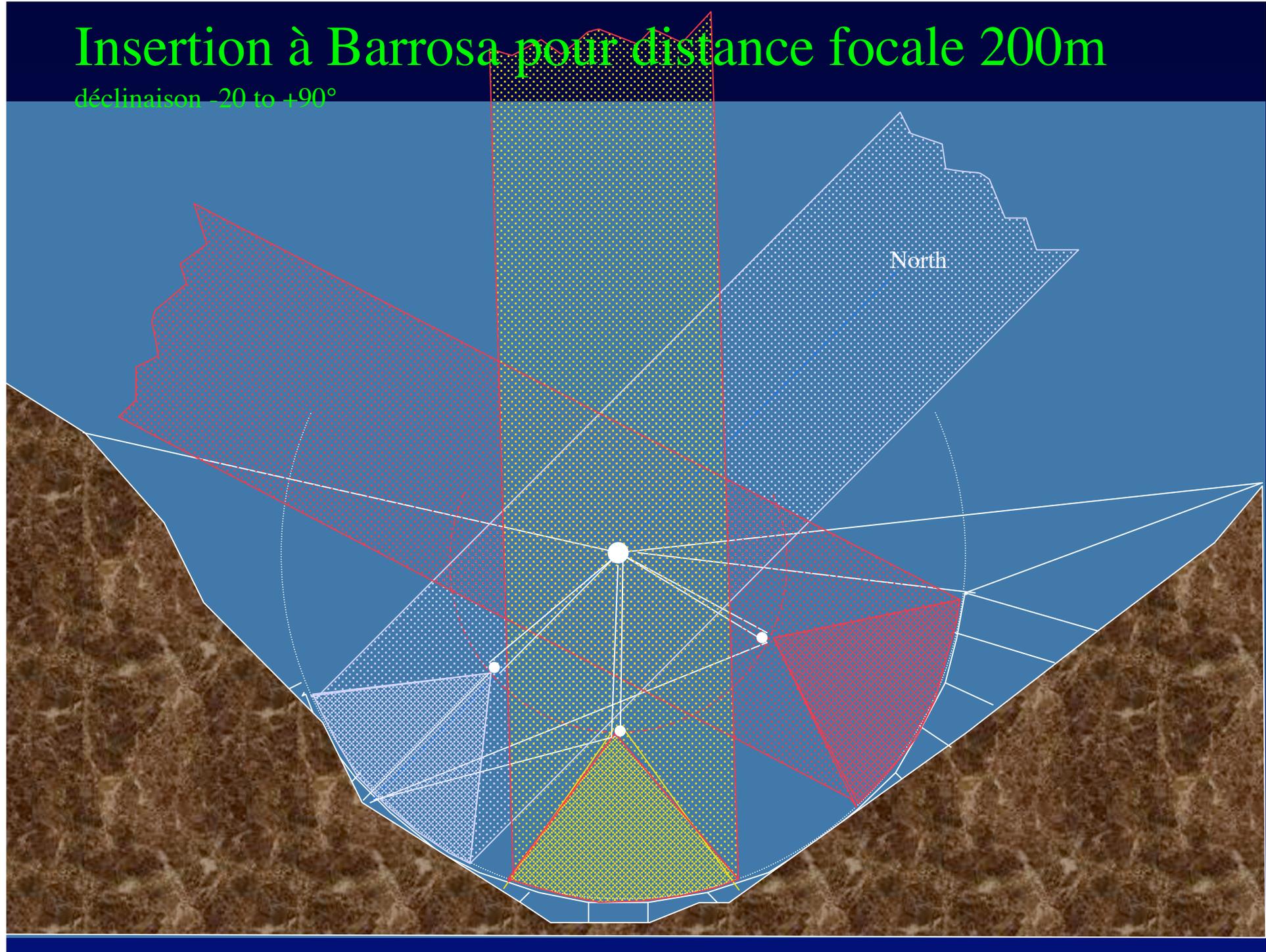
# Couplage ELT/hypertélescope à Barrosa



# Insertion à Barrosa pour distance focale 200m

déclinaison -20 to +90°

North



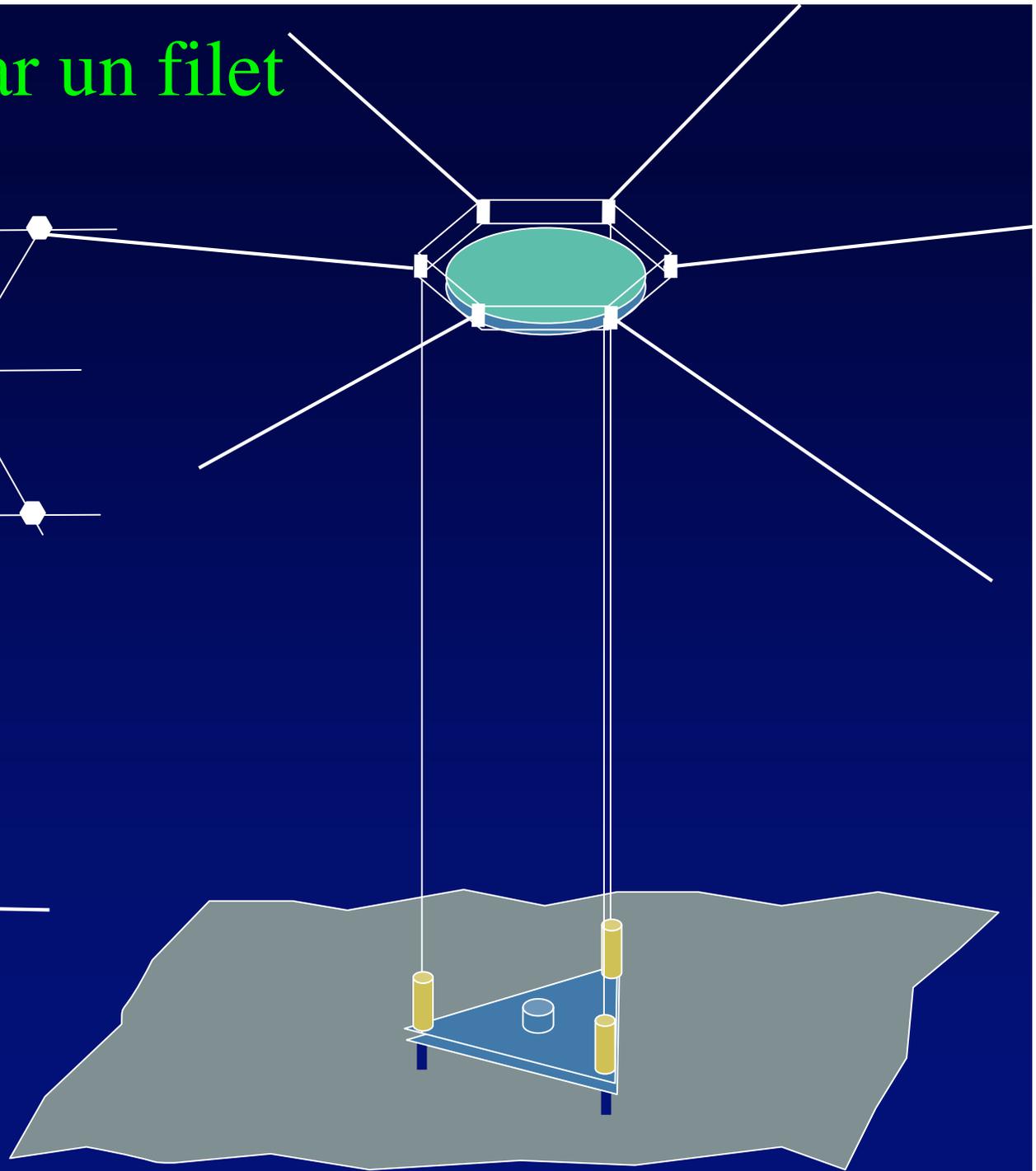
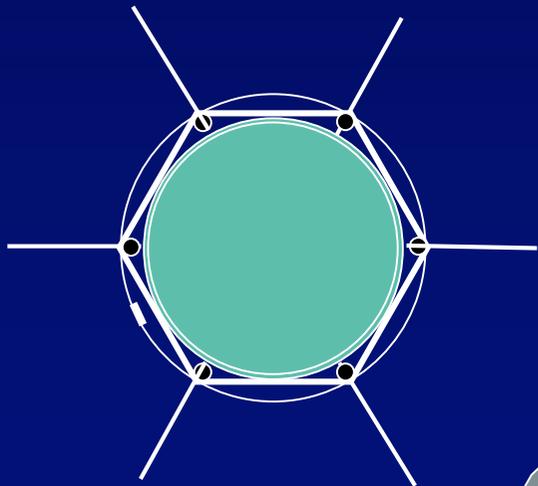
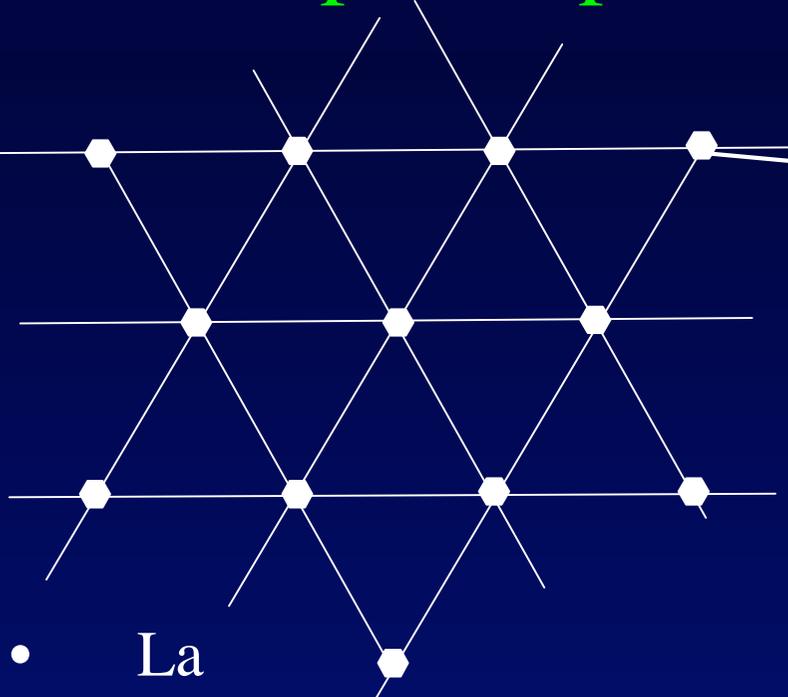
# Miroirs portés par des câbles ?



- C'est le cas du radiotélescope d'Arécibo ( 330m)
- S'affranchit de la topographie
- Utilisable en optique ?



# Miroirs portés par un filet



# Simulations d'imagerie hypertélescope

objet

ouverture

fonction  
d'étalement

image

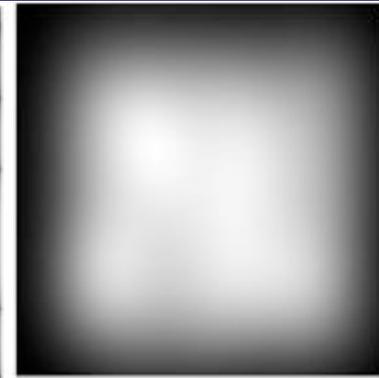
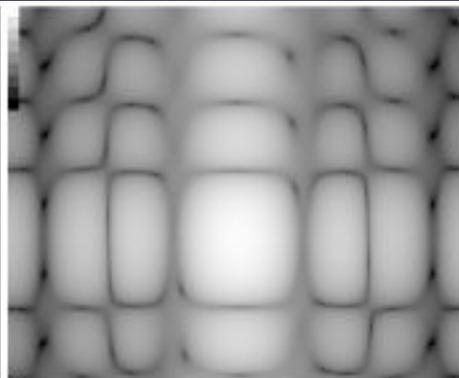
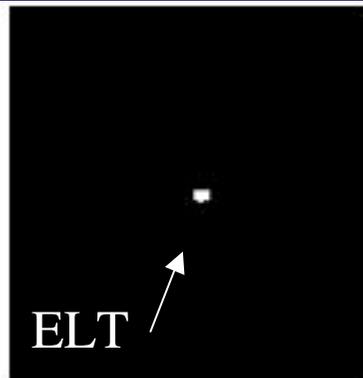
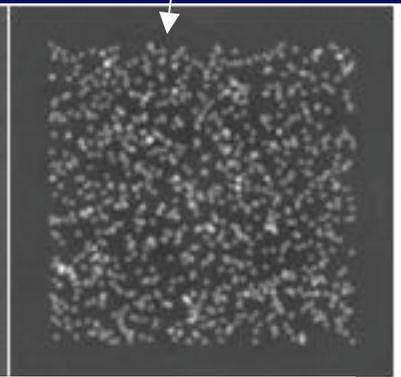
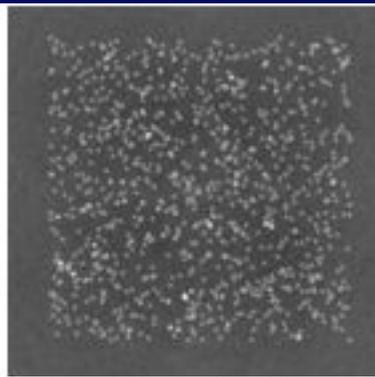
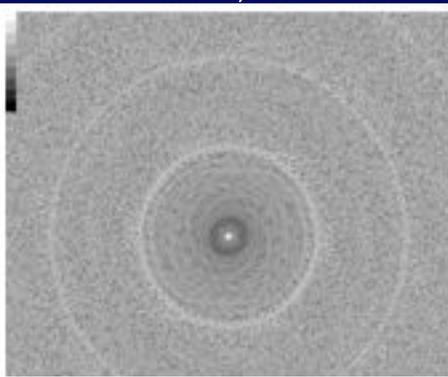
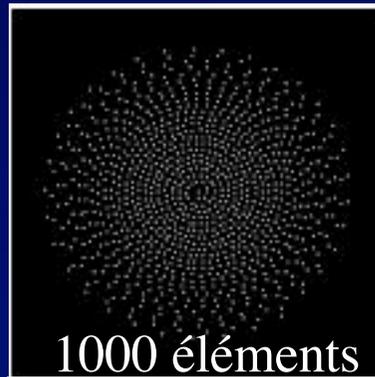
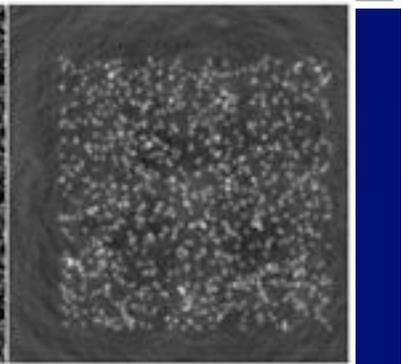
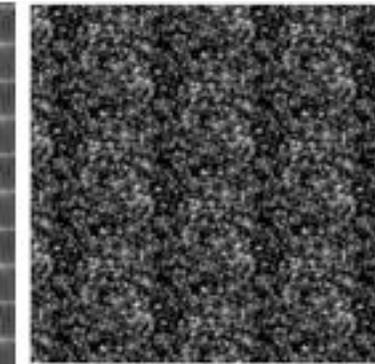
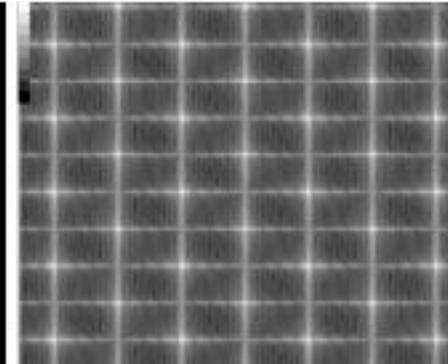
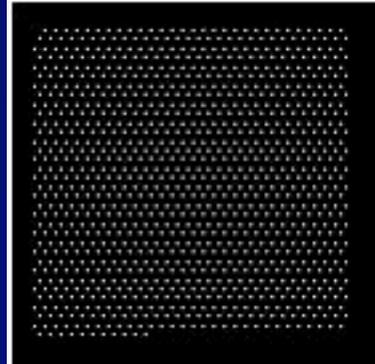


Image avec rotation

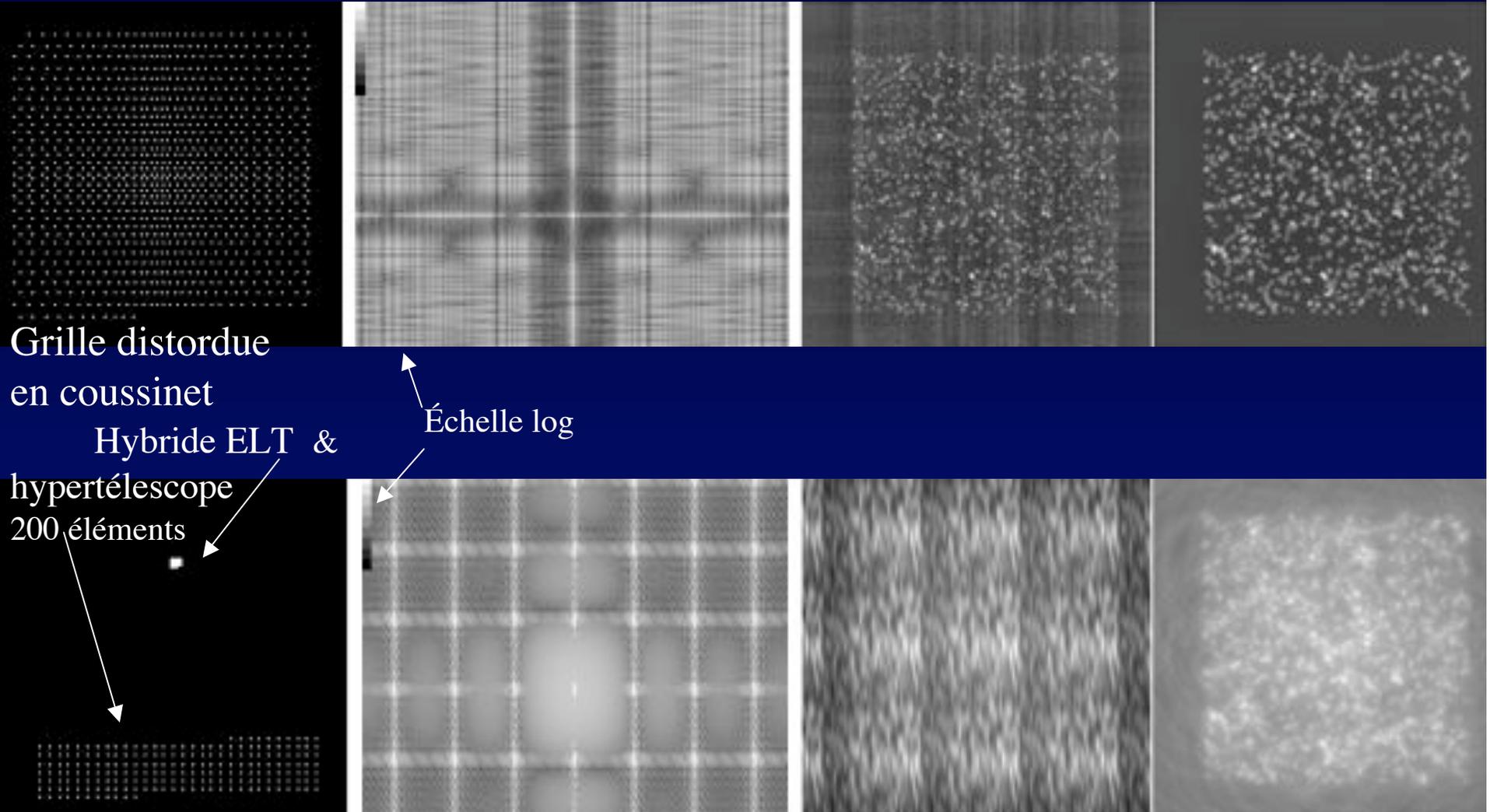
spirale



grille

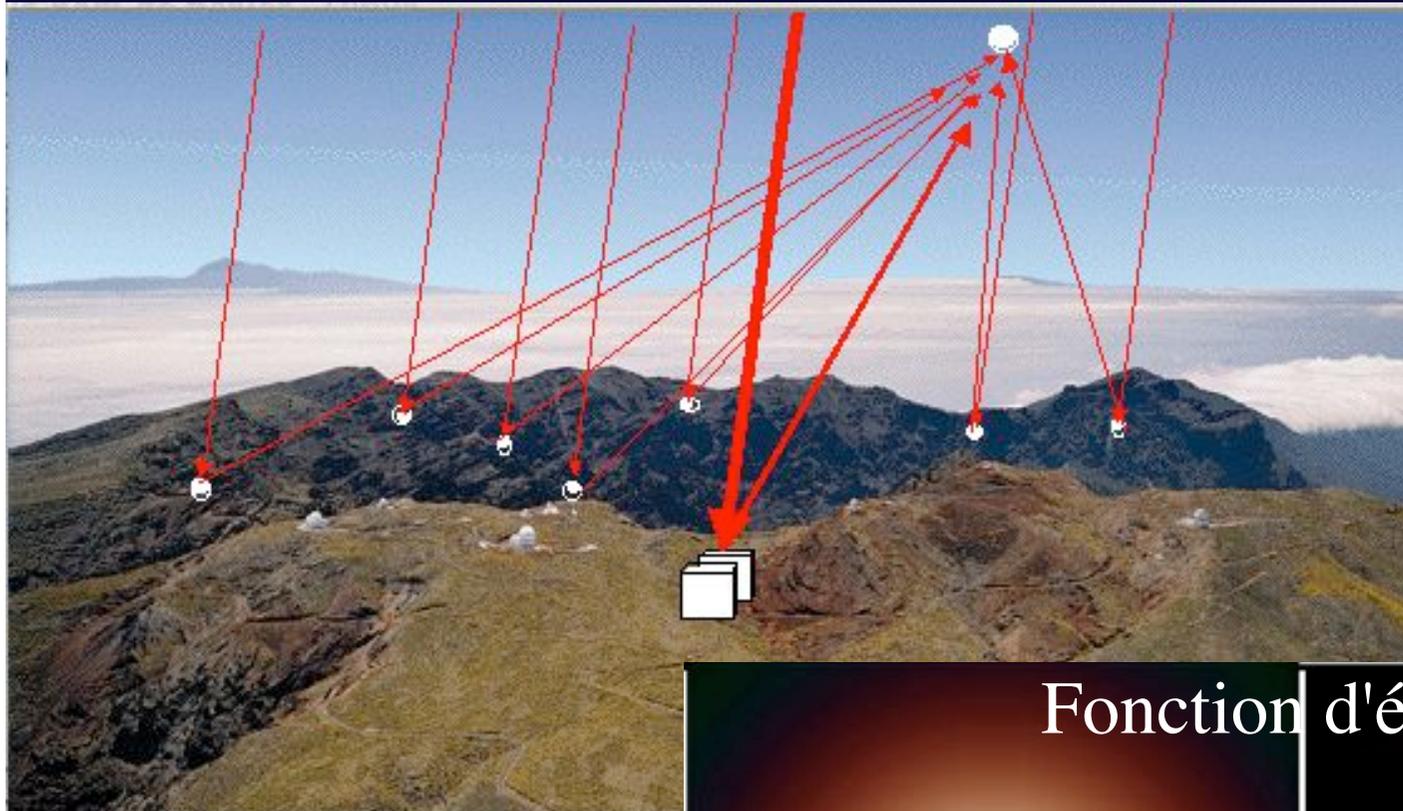


# Simulations d'imagerie hypertélescope ( suite)

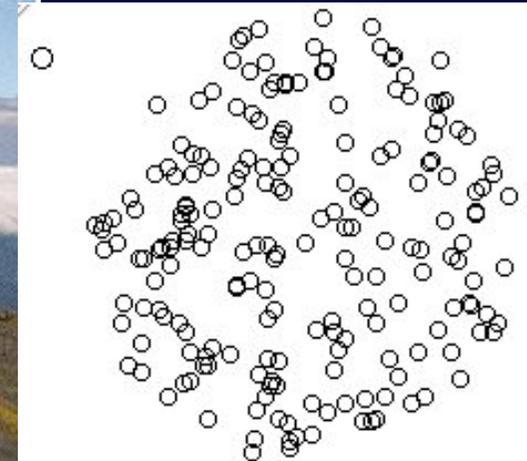


- la rotation d'ouverture améliore l'image en lissant les pieds
- le couplage ELT & hypertélescope est un peu moins bon

# Une synergie intéressante: ELT et hypertélescope couplés



Densification de pupille  
inégale: 1 et 40



- ELT de 50m + hypertélescope 1km,  
à 200 ouvertures de 1m
- pic rétréci et intensifié x 17

Fonction d'étalement

ELT seul

ELT couplé

# Limite d'encombrement de l'image (Labeyrie SPIE 2008)

## • Objets brillants, avec rotation de l'ouverture (E poses)

- par "lobe de sous-ouverture"
- par (seconde d'arc)<sup>2</sup>

$$R_{s \max} = N^2 E \text{SNR}_{\text{speckle}}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{as} &= 3.8 \cdot 10^{-11} R_{s \max} (d / \lambda)^2 = 3.8 \cdot 10^{-11} N^2 E \text{SNR}_{\text{speckle}}^{-1} (d / \lambda)^2 = 6.2 \cdot 10^{-11} E \text{SNR}_{\text{speckle}}^{-1} A^2 d^{-2} \lambda^{-2} \\ &= 4.85 \cdot 10^{-11} E N \text{SNR}_{\text{speckle}}^{-1} A \lambda^{-2} \end{aligned}$$

## • Objets faibles, avec bruit de photons

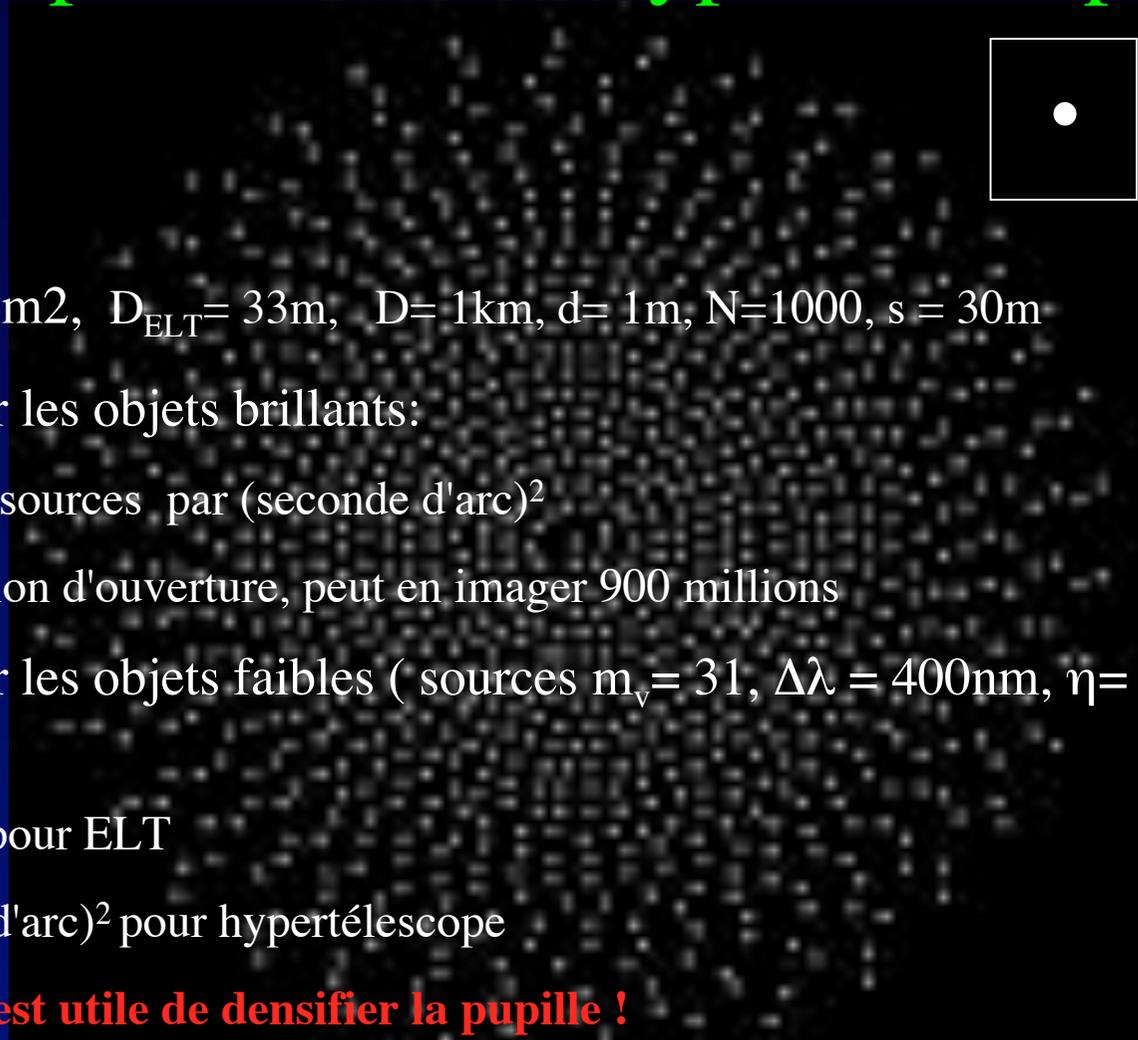
- par "lobe de sous-ouverture"
- par (seconde d'arc)<sup>2</sup>

$$R_{s \max \text{ Phot}} = N^2 P_t \text{SNR}_{\text{phot}}^{-2} (R+N)^{-1}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{as \text{ phot}} &= 3.8 \cdot 10^{-11} R_{s \max \text{ phot}} (d / \lambda)^2 = 3.8 \cdot 10^{-11} N^2 A P_{\text{flux}} T \text{SNR}_{\text{phot}}^{-2} (R+N)^{-1} (d / \lambda)^2 \\ &= 3.8 \cdot 10^{-11} N A^2 P_{\text{flux}} T \text{SNR}_{\text{phot}}^{-2} (R+N)^{-1} \lambda^{-2} = 4.8 \cdot 10^{-11} A^3 d^{-2} P_{\text{flux}} T \text{SNR}_{\text{phot}}^{-2} \left( R + \frac{4}{\pi} A d^{-2} \right)^{-1} \lambda^{-2} \end{aligned}$$

Limite d'encombrement de l'image:

## Exemple de comparaison ELT/hypertélescope

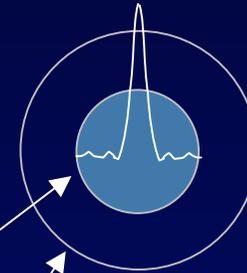
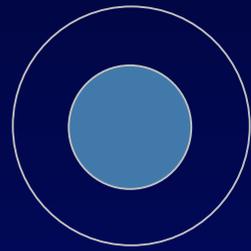


- **Surface égale**  $A = 1000\text{m}^2$ ,  $D_{\text{ELT}} = 33\text{m}$ ,  $D = 1\text{km}$ ,  $d = 1\text{m}$ ,  $N = 1000$ ,  $s = 30\text{m}$
- Encombrement du champ sur les objets brillants:
  - ELT peut imager 100.000 sources par  $(\text{seconde d'arc})^2$
  - Hypertélescope, avec rotation d'ouverture, peut en imager 900 millions
- Encombrement du champ sur les objets faibles (sources  $m_v = 31$ ,  $\Delta\lambda = 400\text{nm}$ ,  $\eta = 0,5$ ,  $t = 60\text{s}$ ,  $\text{SNR}_{\text{phot}} = 5$ )
  - Valeur inchangée 100.000 pour ELT
  - 2,7 millions par  $(\text{seconde d'arc})^2$  pour hypertélescope
  - 2700 en mode Fizeau: **il est utile de densifier la pupille !**

# Images d'un hypertélescope

- C'est un peu compliqué, mais des collègues comprennent, vérifient et précisent la théorie:
  - Vakili et al., A&A, 2004
  - Patru, thèse 2007: montage hypertélescope à fibres optiques
  - Lardière et al., MNRAS 2007, Patru et al., MNRAS 2008
  - Aime (A&A, 2008) théorie de la formation d'image
- le simulateur logiciel HYPERTEL ( Lardière et al.) est très pédagogique
- Le rendre accessible en ligne !

# Image mosaïque d'un hypertélescope



- Lardiere et al. (MNRAS 2007) et Patru et al. (MNRAS, 2008, en préparation):

"clean field"  $CLF = \lambda / s$  ( radians)

"direct imaging field"  $DIF = \lambda / (\gamma - 1) d_i$  ( $\gamma = d_o / d$      $\gamma_{max} = D d^{-1} N^{-1/2}$ )

"coupled field"  $CF = \lambda / d$

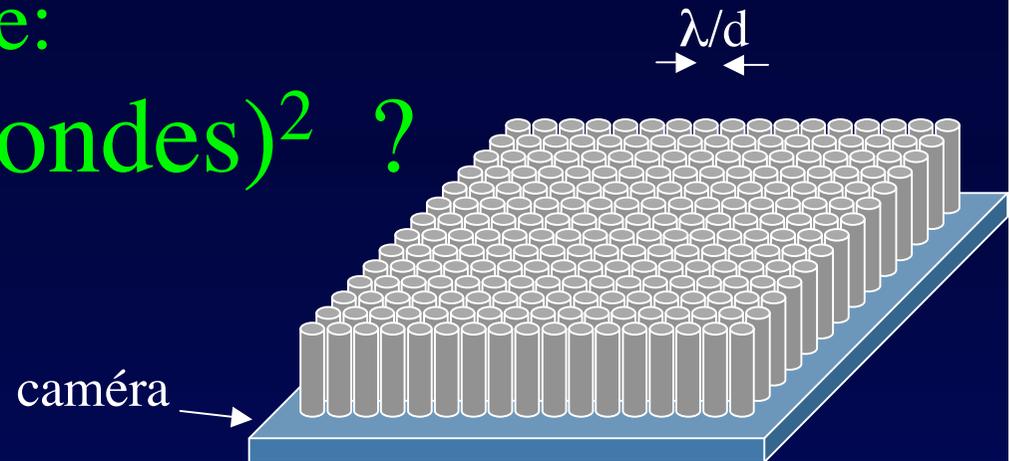
A pleine densification     $DIF = CLF$

Ajouter "champ sans aberration" et "champ localement correctible"

# Images mosaïques d'un hypertélescope

- Mode Fizeau:
  - champ illimité ( sauf par les aberrations) mais dégradé à bas niveau de lumière (Labeyrie 2008)
  - Nécessite beaucoup de pixels
- Mode hypertélescope:
  - Meilleure sensibilité à bas niveau, mais champ rétréci
  - Nécessite des poses décalées pour reconstruction mosaïque...
  - ...en parallèle dans tous les lobes observés

# Champ de l'hypertélescope: combien de (secondes)<sup>2</sup> ?



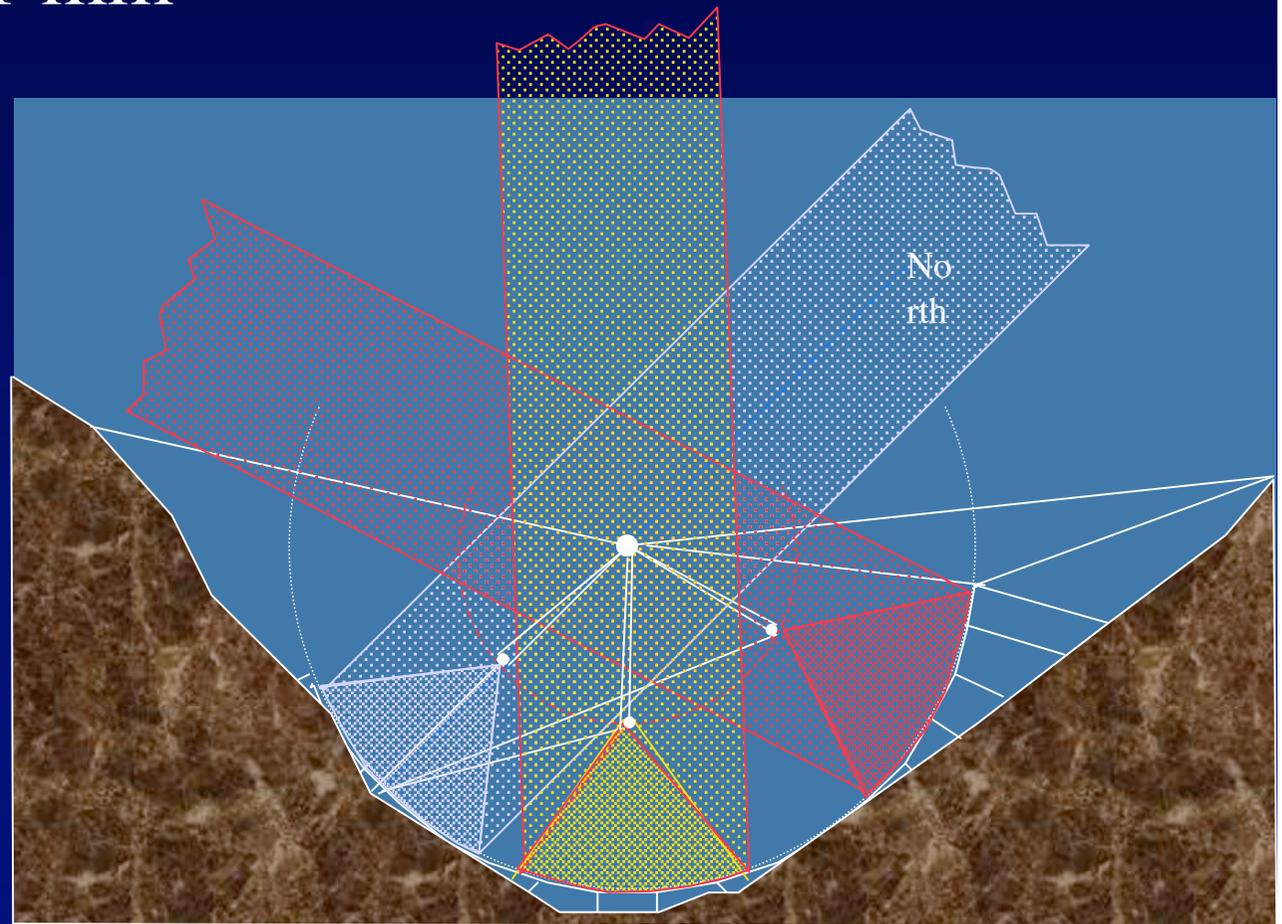
- Grille de densifieurs pour exploiter les "lobes de diffraction" adjacents : si  $d = 1\text{m}$  et  $\lambda = 500\text{nm}$   $\Rightarrow$  dimension  $\lambda/d = 0,1''$
- ... Limitée en dimension par les aberrations de champ : coma, astigmatisme
- ... Lesquelles dépendent de la combinaison optique
- Exemple d'un miroir parabolique à F/3,6
  - 33m : coma = diffraction visible pour 1/2 champ = 2"
  - 1000 m " " " 64 m"

# Corriger les aberrations de champ

- coma et astigmatisme de E-ELT corrigés par ses 5 miroirs 
  - 1/2 champ limité par la diffraction visible: 5'
- en découpant le champ: correction supplémentaire locale
  - Passive avec correcteurs locaux pré-calculés
  - Adaptative avec correcteurs locaux dynamiques : "Multi Object Adaptive Optics" (MOAO), prévue sur E-ELT
- Techniques aussi applicables sur un hypertélescope de 1000m...pour atteindre un demi-champ de 1' ? **A préciser**

# Plusieurs nacelles, un atout des Carlina

- multiplie la science
- étend à différentes longueurs d'ondes  
350 nm à 1 mm

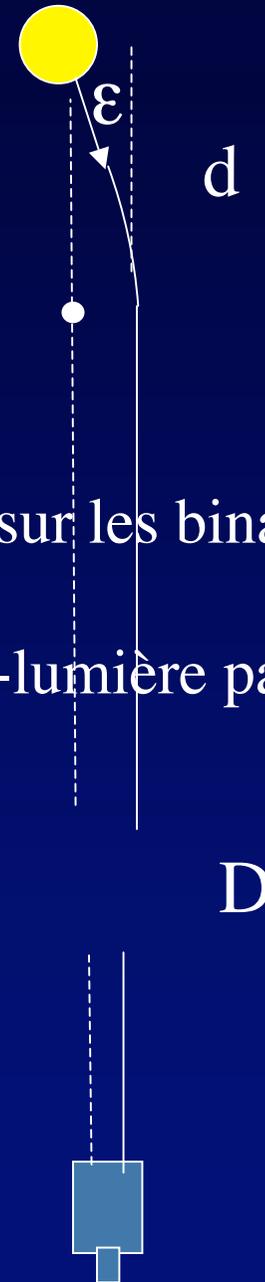


# Les hypertélescopes vont s'attaquer aux galaxies lointaines

- La haute résolution a permis de mieux voir des étoiles brillantes
- Il s'agit maintenant d'en faire des images
- ... et d'étendre aux objets faibles

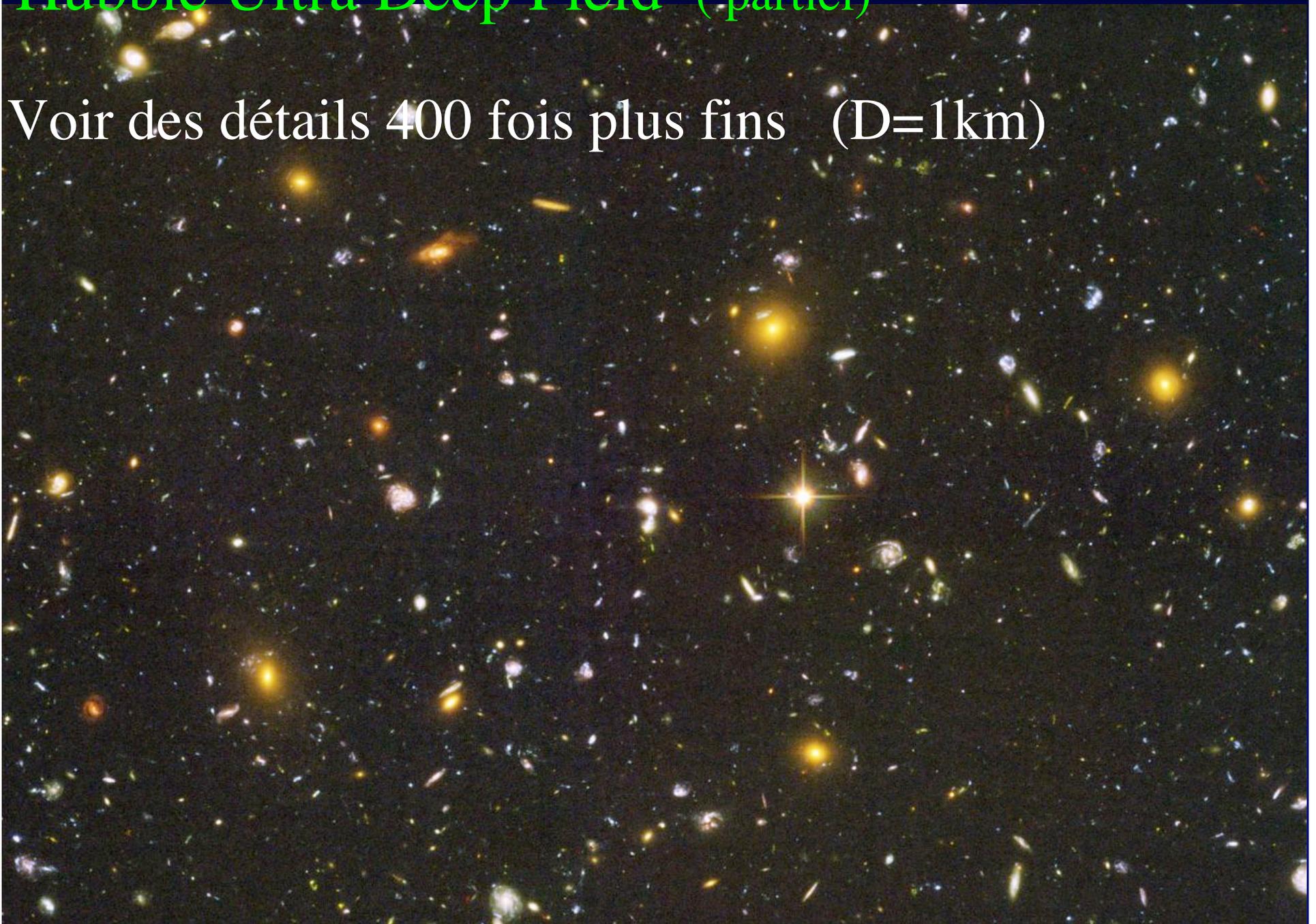
# Exemples d'observations prévues

- J.Surdej: effets de lentille gravitationnelle sur les binaires à éclipses
  - Déflexion apparente =  $\epsilon d / D$
- Aussi: exo-planètes détectées à 2500 années-lumière par Gaudi et al. (Science 15 Fev 2008)
  - Résolvables avec un hypertélescope de 200m
- Noyaux actifs de galaxies , jets
- Galaxies lointaines

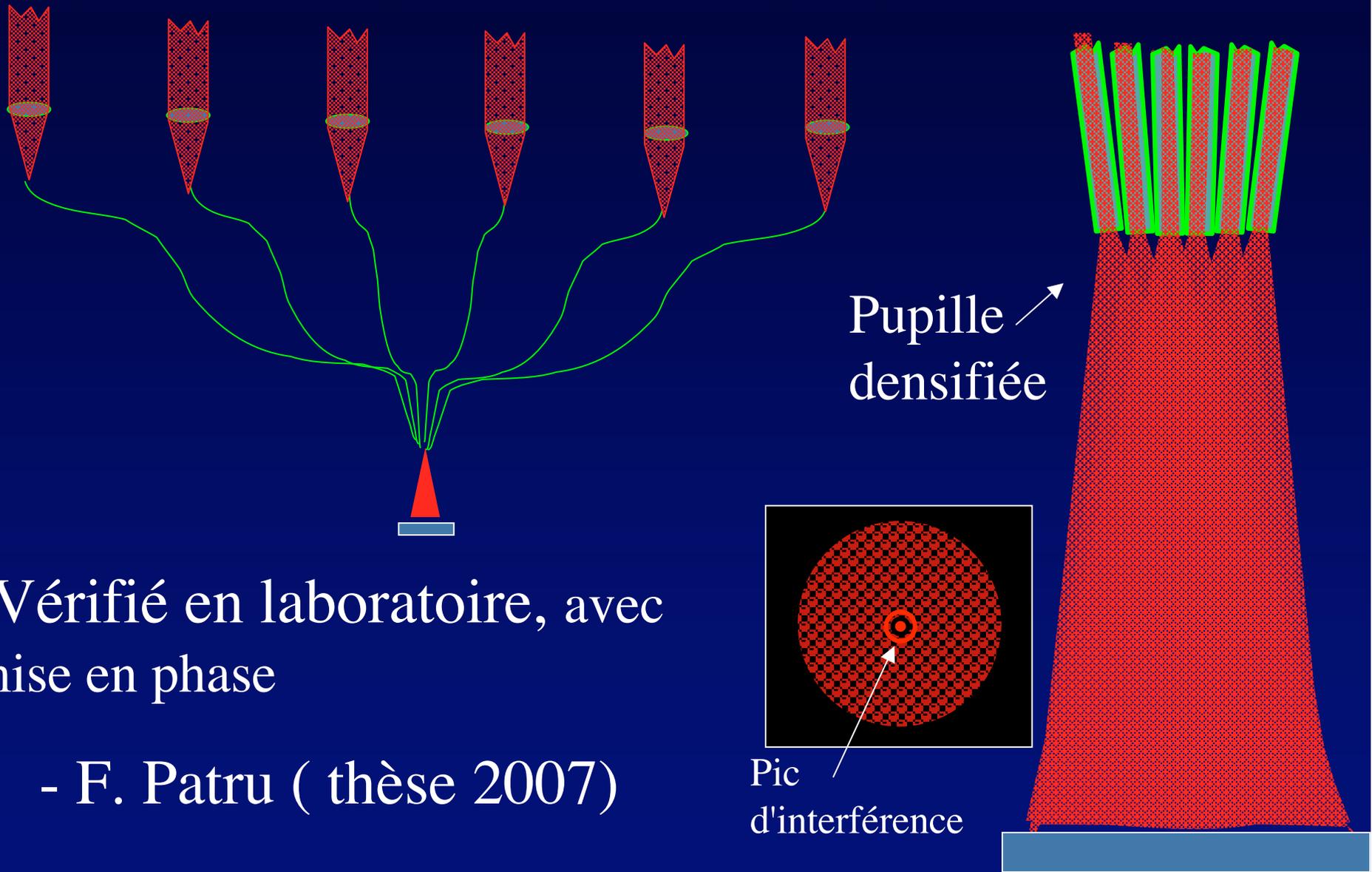


# Hubble Ultra Deep Field (partiel)

Voir des détails 400 fois plus fins (D=1km)



# Hypertélescope à fibres optiques

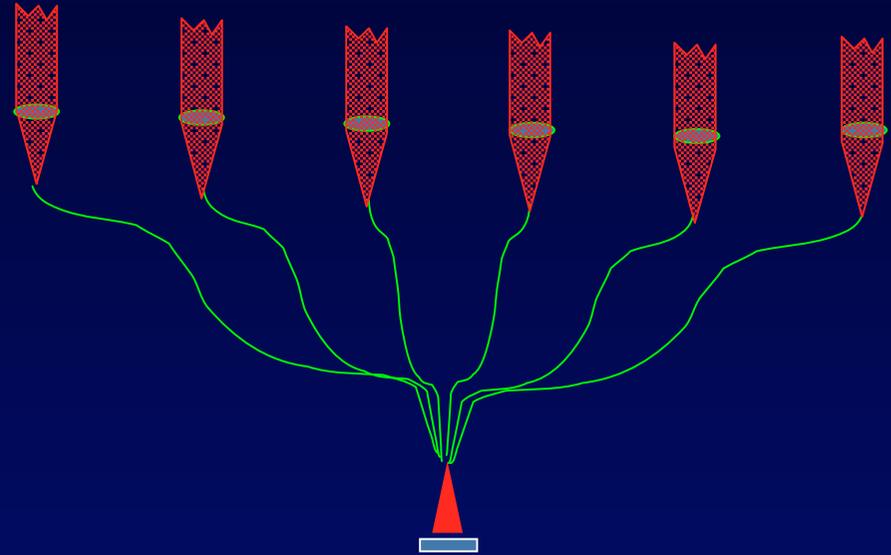


• Vérifié en laboratoire, avec mise en phase

- F. Patru ( thèse 2007)

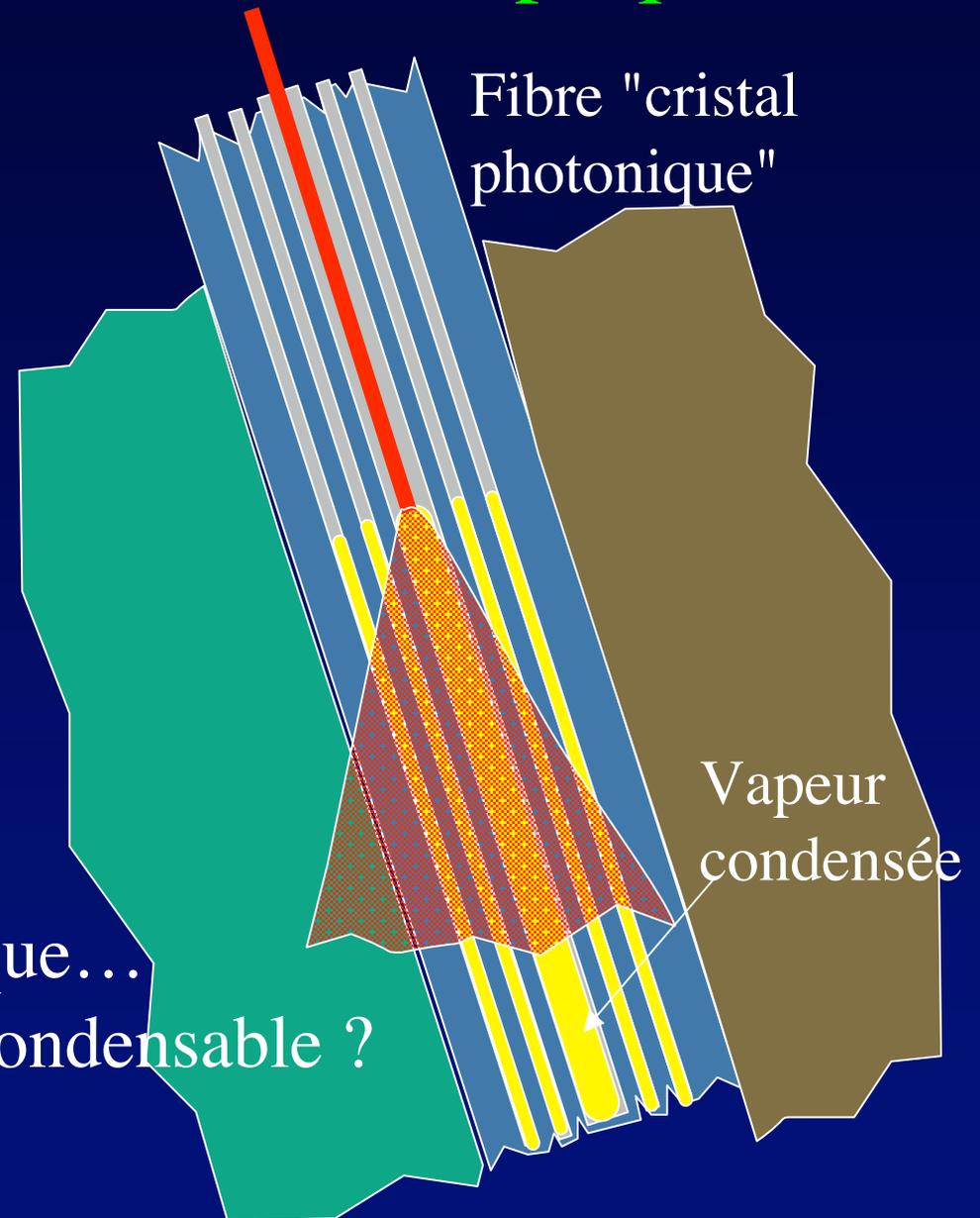
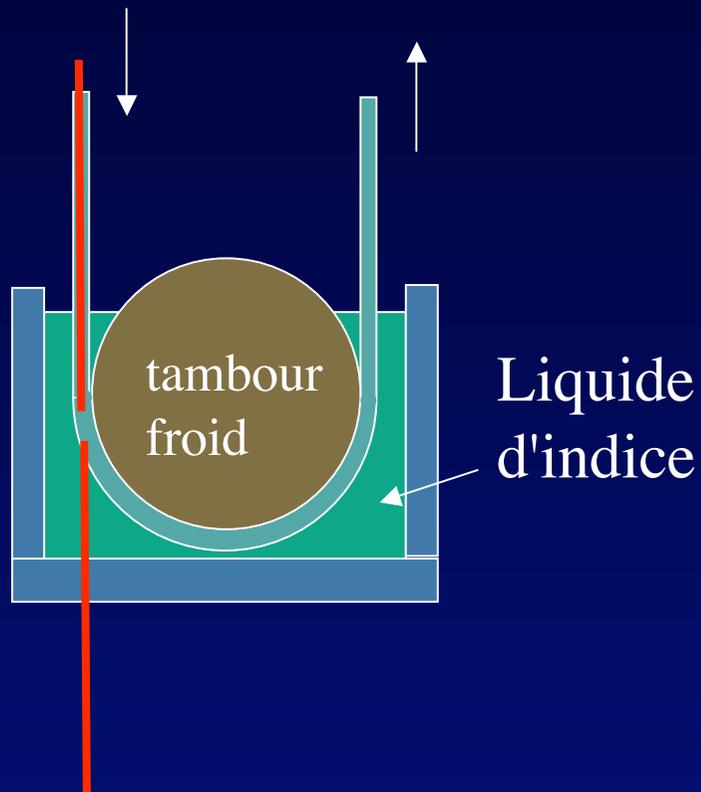
- S.Olivier ( thèse 2007)

# Hypertélescope à fibres optiques



- Ne supprime pas le besoin de lignes à retard....
- ...dont le coût limite le nombre d'ouvertures

# Inventer des lignes à retard à fibres optiques ?



- Coupleur glissant:
  - Fibre à cristal photonique...
  - ... remplie de vapeur condensable ?
- Dispersion trop forte ?

## Sites: qualités recherchées

- Tant pour un ELT qu'un hypertélescope:
  - faible turbulence angulaire
  - Turbulence lente, liée à des vents faibles Nombreuses nuits claires
- Problème avec les alizés dans la zone des tropiques : nuits claires mais venteuses . Exemple canaries, Hawaii, Chili
- Cas du Dôme C ( Antarctique) :
  - bonne atmosphère au dessus de 45m sol
  - Nécessite miroir suspendu à des ballons
-

# Conclusions

- Vérifier les performances des hypertélescopes avec une ouverture de 100 à 200m...
- Suffisante pour une science originale
- Avant de passer à une échelle supérieure, en couplage éventuel avec un ELT
- Identifier les sites les plus favorables
- Il faut classiquement 20 ans pour construire un télescope
- L'hypertélescope peut être construit progressivement, avec un modeste investissement initial