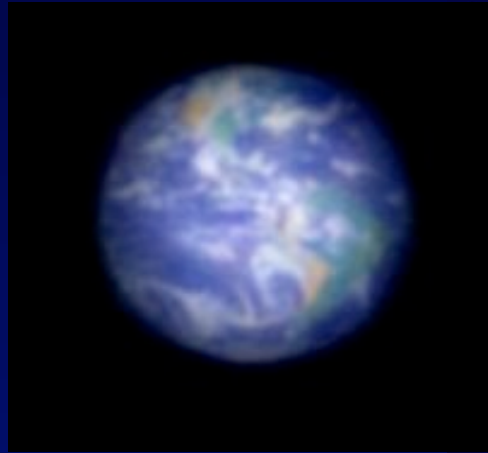


# Exo-planètes, étoiles et galaxies : progrès de l'observation



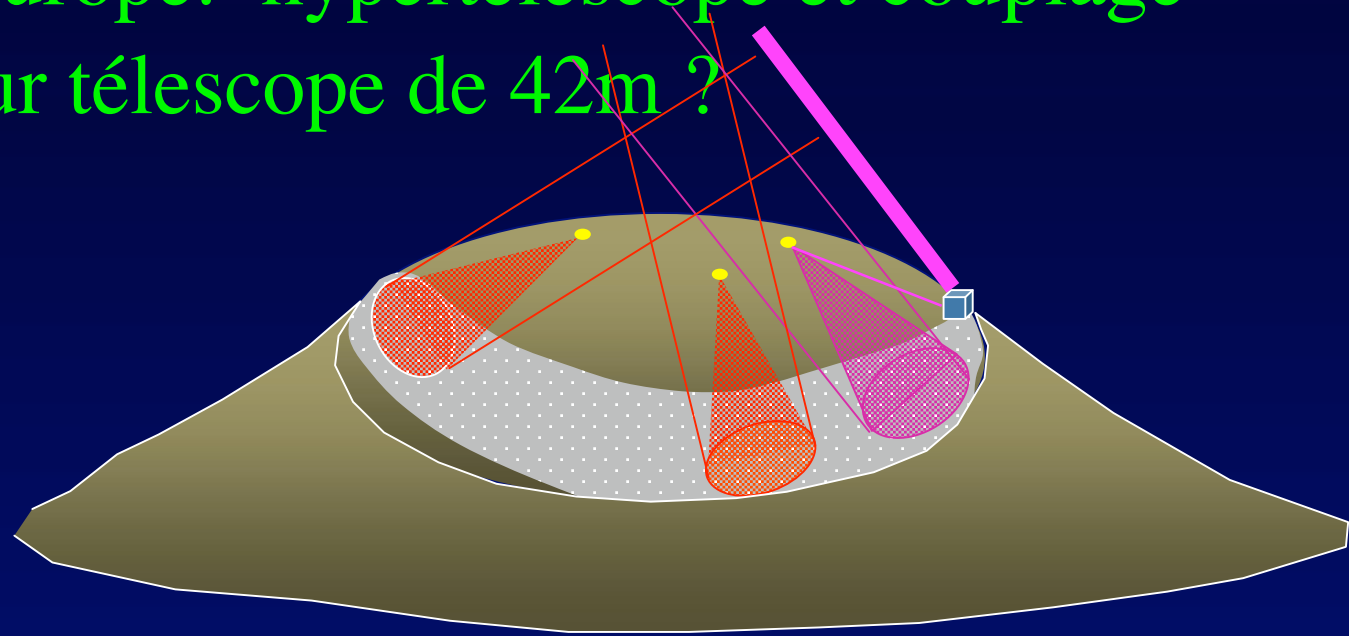
- Cours à Paris les mardis à partir du 12 Février
- 3 cours & séminaires à Nice le 29 Mai
- Détails sur [www.college-de-france.fr/chaieres/chaire11/lise.html](http://www.college-de-france.fr/chaieres/chaire11/lise.html)
- les fichiers des projections y seront affichés

# 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 ( suite )"
  - 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 :
- 1er Avril « **propositions d'hypertélescopes pour l'espace: piégeage par laser** »
- **Une grande illusion ? Éventualité de mirages galactiques**
  - Séminaire : Didier Pelat, OBSPM
- **3 cours et séminaires sont aussi prévus a Nice le 29 Mai**

Aujourd'hui:

Projets pour l'Europe: hypertélescope et couplage éventuel au futur télescope de 42m ?

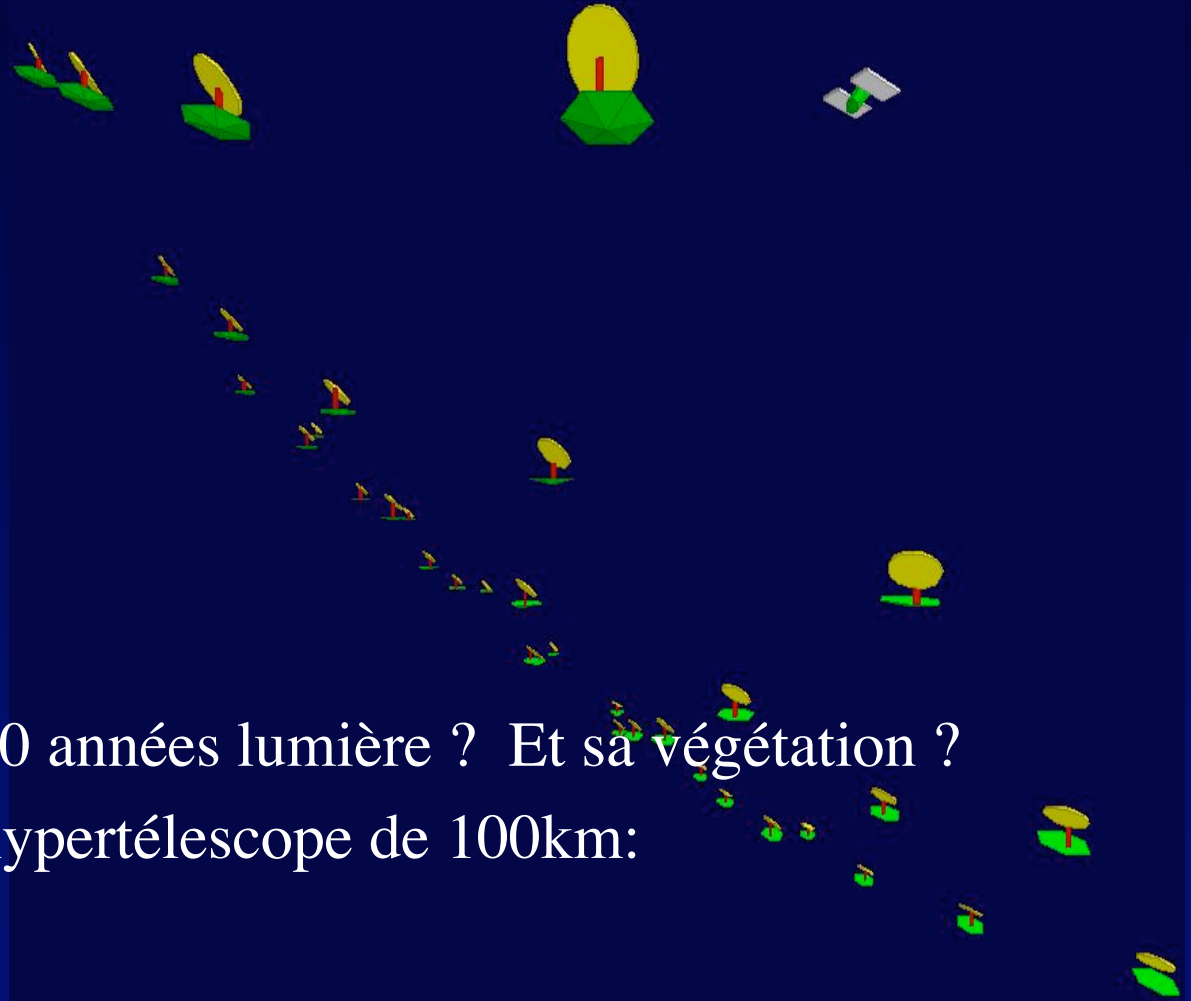
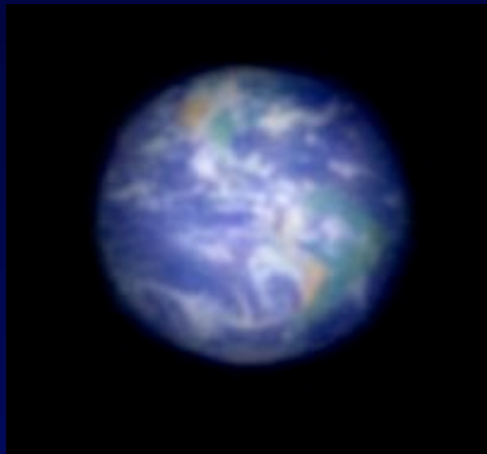


Séminaire à 17h30:

Roberto Gilmozzi, ESO

"Science and technology of the European ELT"

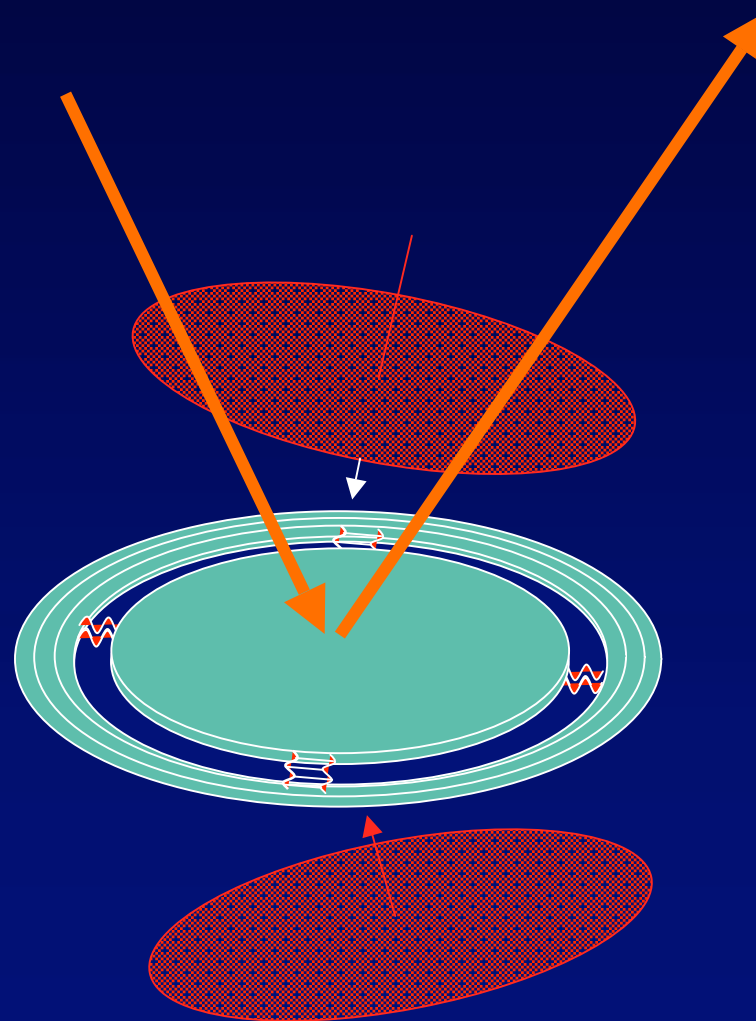
# Vers la recherche de vie



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

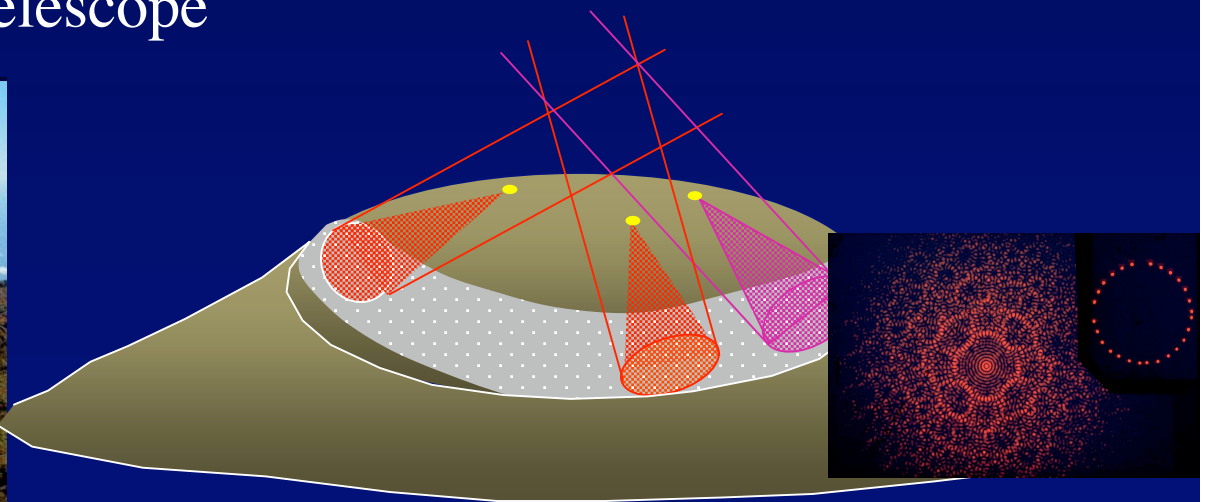
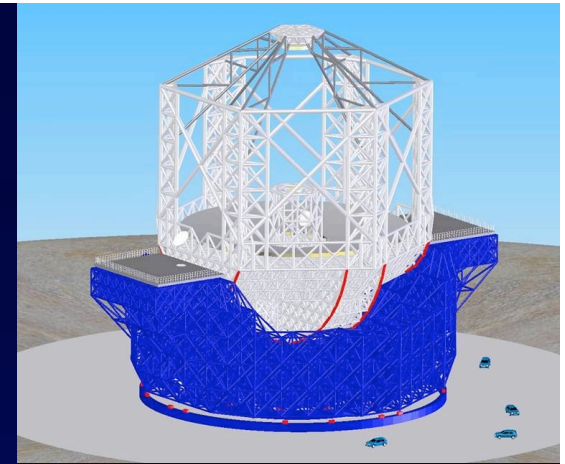
-

Dans l'espace:  
Miroirs piégés par laser

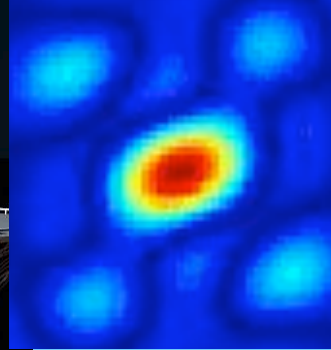
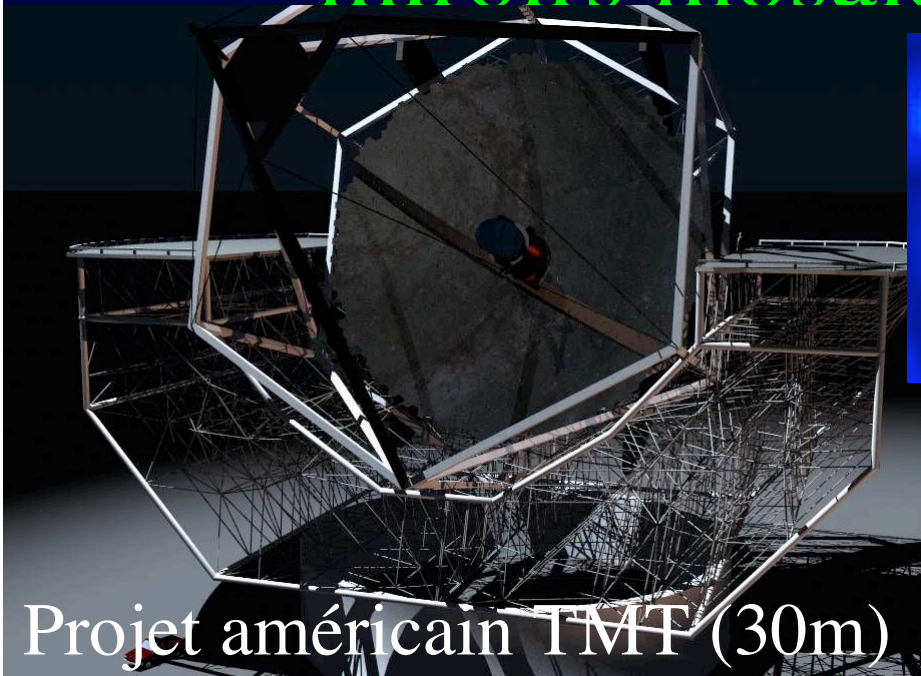


# Pour mieux voir le ciel: Quatre voies actuelles

1. Miroir mosaïque compact « ELT »
2. Interféromètre comportant quelques grands télescopes => images par synthèse d'ouverture
3. Hypertélescope => images directes, instantanées
4. Couplage ELT-hypertélescope

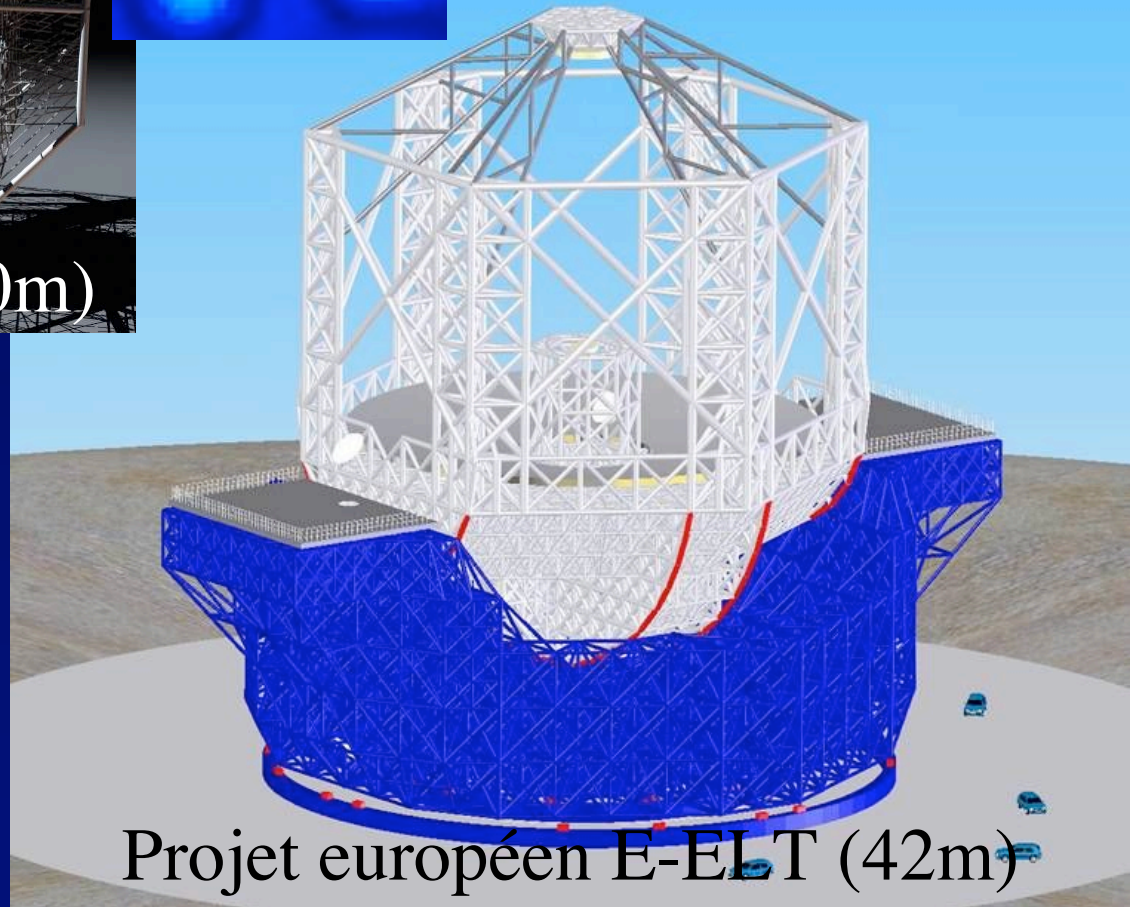


# Première voie: miroirs mosaïques 30-60m



Projet américain TMT (30m)

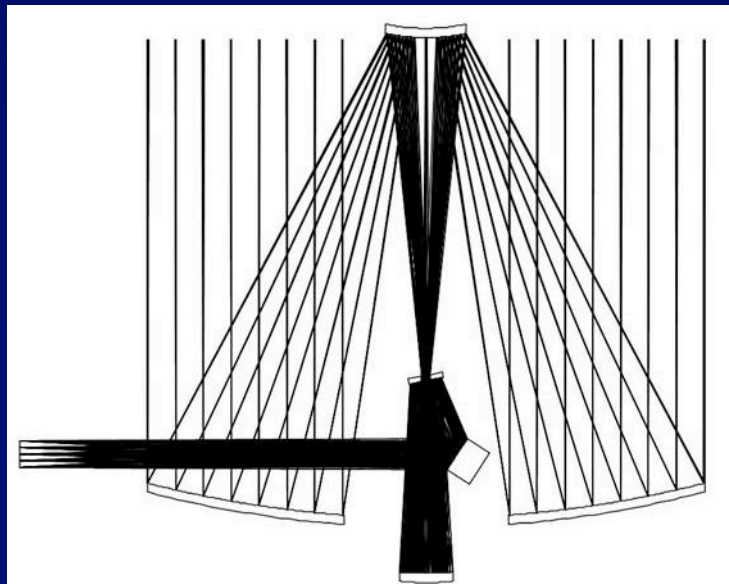
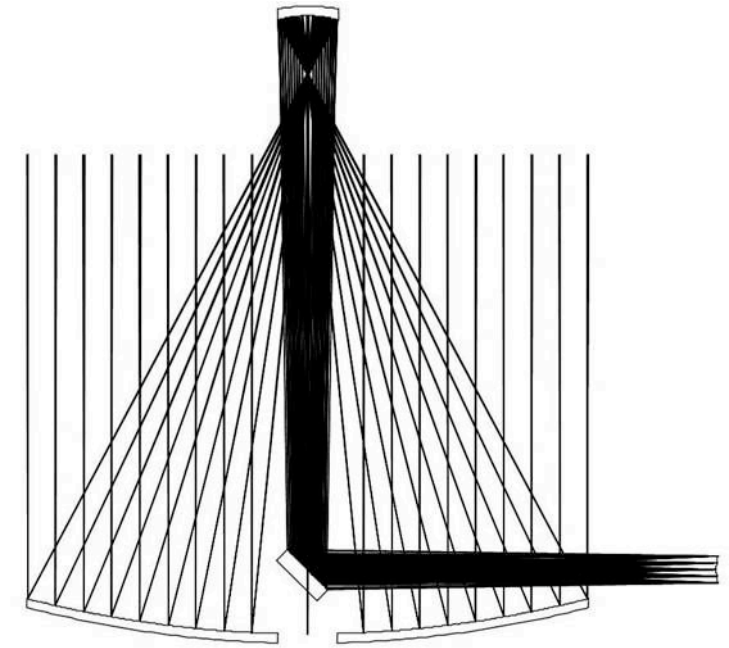
- Miroirs de 1m environ, ép. 45mm, Zerodur ou SiC
- Cout: 13 000 €/m<sup>2</sup>
- + 40% asphérisation
- + monture



Projet européen E-ELT (42m)

# Télescope européen de 42m: projet E-ELT (séminaire de R.Gilmozzi)

- Ouverture primaire F/1
- Grégorien ou Cassegrain
- M1 sphérique ou non
- Champ limité par la diffraction: 2-3'
- Optique adaptative avec laser





## Deuxième voie: interférométrie avec quelques grands télescopes

- Après les précurseurs français I2T et GI2T .....
- « Keck Interferometer » à Hawaii: 2 fois 10m
- « Very Large Telescope Interferometer (VLTI) » européen au Chili: 4 fois 8m
- belle moisson de résultats
- évolution: N télescopes de 8m, bases 1km ?
- grandes lignes à retard couteuses, limitent N
- concurrence prévisible des versions spatiales, hypertélescope



# Interféromètre CHARA au Mont Wilson

( Mc Alister et al. )

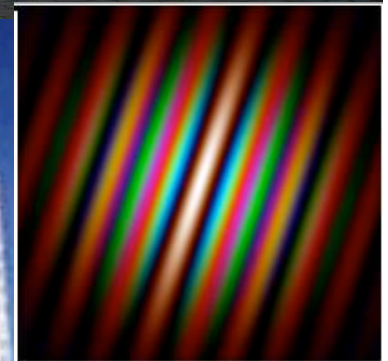
- 6 télescopes de 1m
- Bases atteignant 330m
- Lignes à retard de 45m



- Infra-rouge proche
- étendu au visible  
par D.Mourard et al.

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



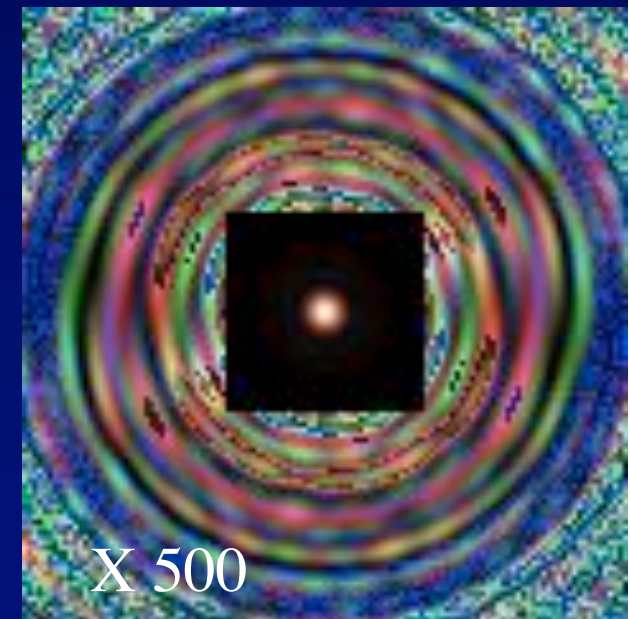
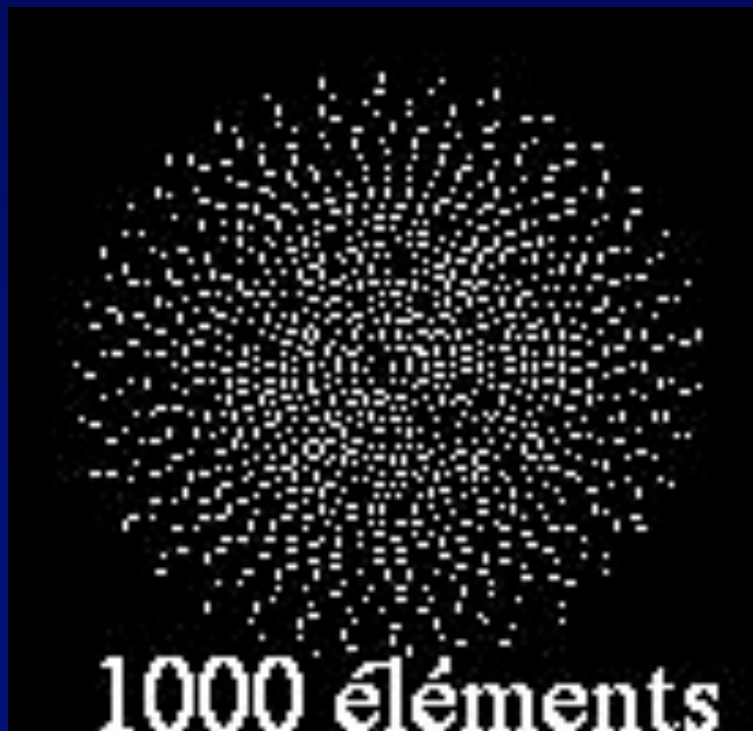
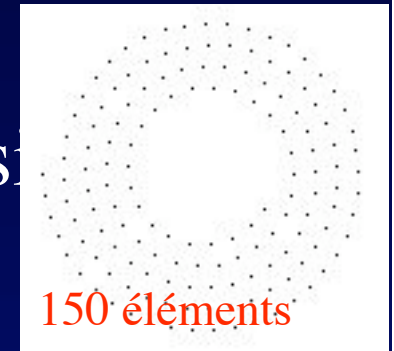
# Premier bilan des grands interféromètres Keck et VLTI

- Moisson de résultats stellaires
- Il faut améliorer la sensibilité et obtenir de véritables images .

La troisième voie :

## Hypertélescope

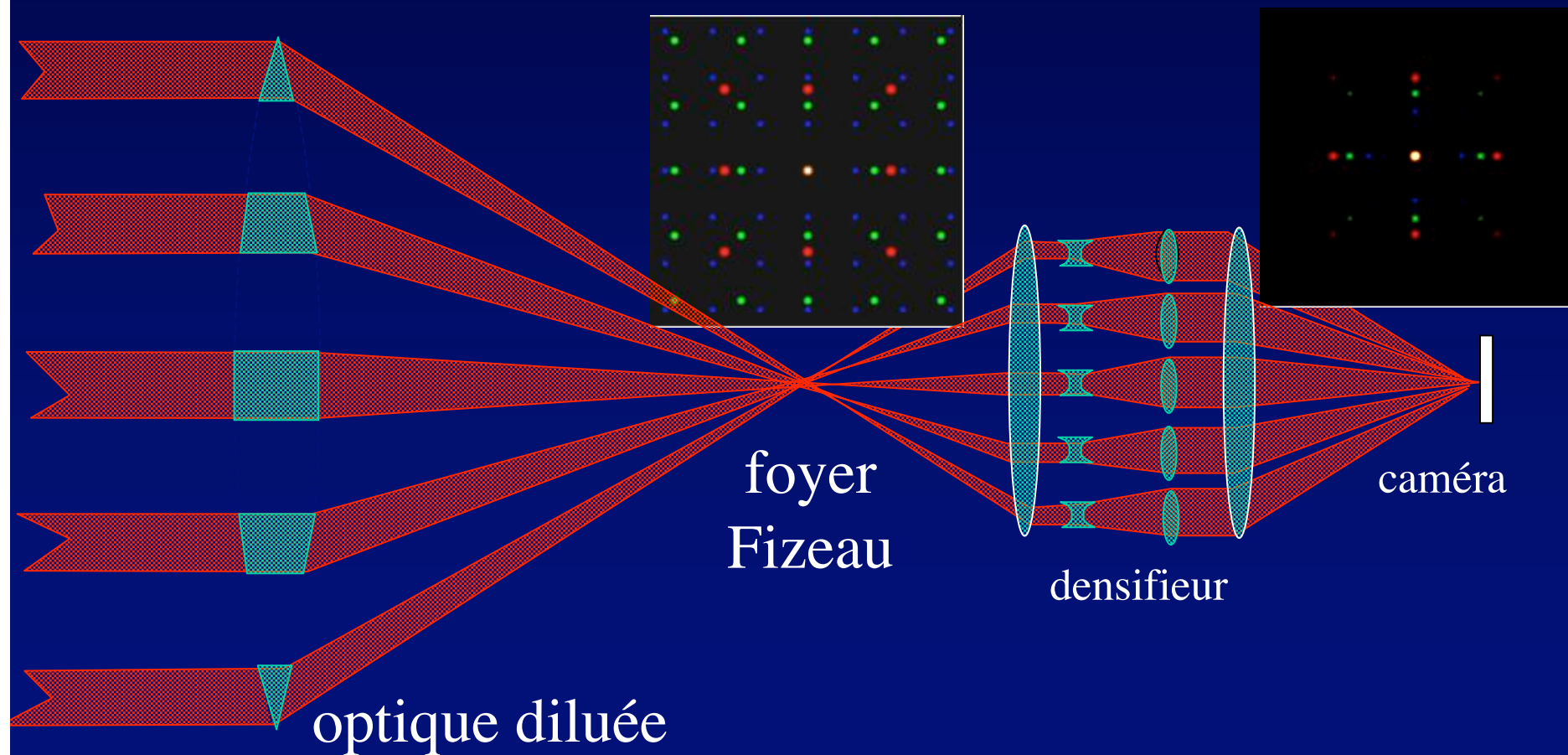
- miroir géant en pointillés
- formant une image directe "à pupille dense"
- dominera probablement dans l'espace



# Principe de l'hypertélescope

ou « interféromètre imageur multi-ouverture à pupille densifiée »

(Labeyrie A&A, 1996)

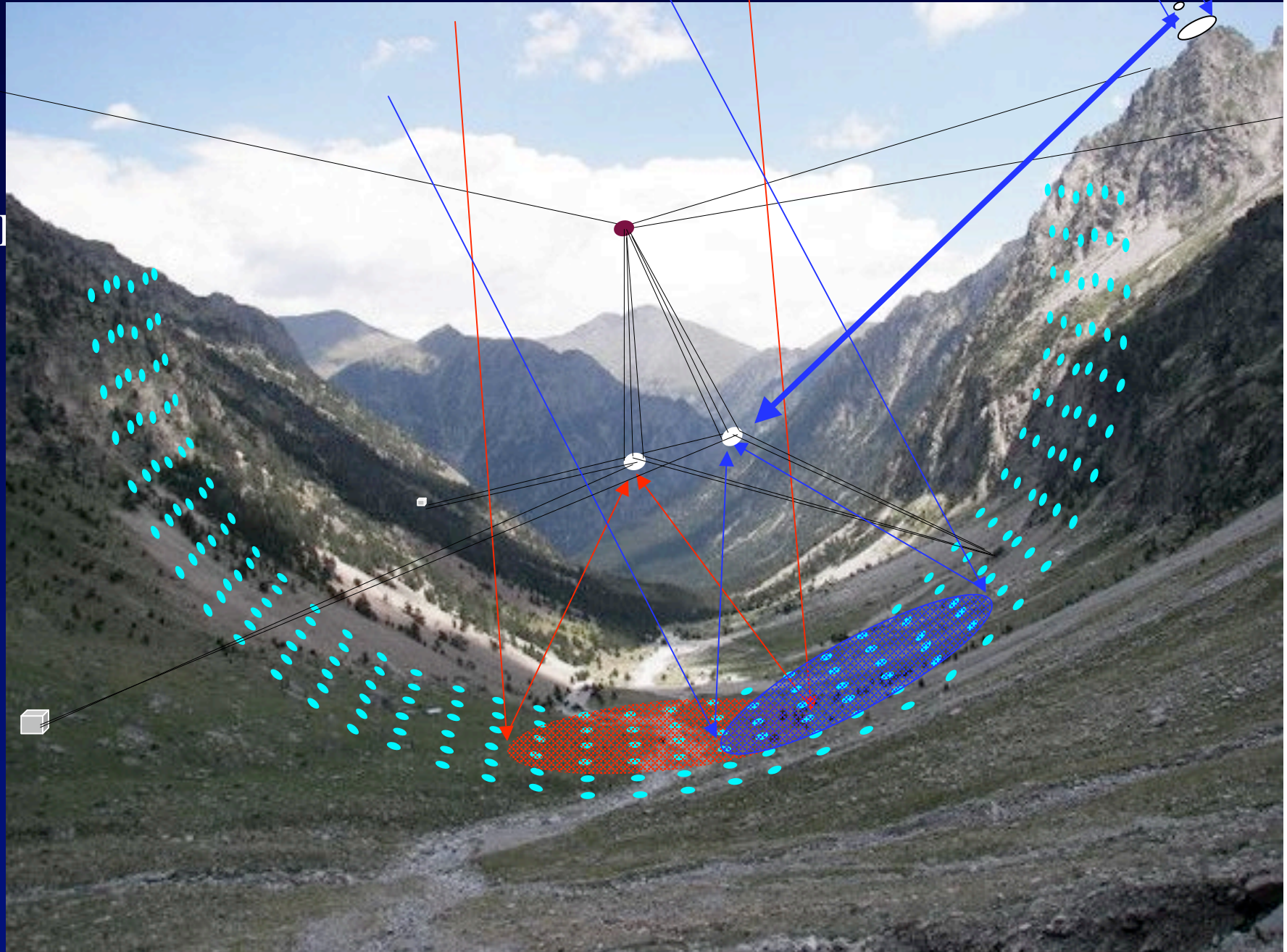


# Une nouvelle famille d'interféromètres: les hypertélescopes

- Nombreuses ouvertures, petites ou grandes
- Permet l'imagerie directe ....
- ... et la coronographie
- Vastes perspectives au sol et dans l'espace



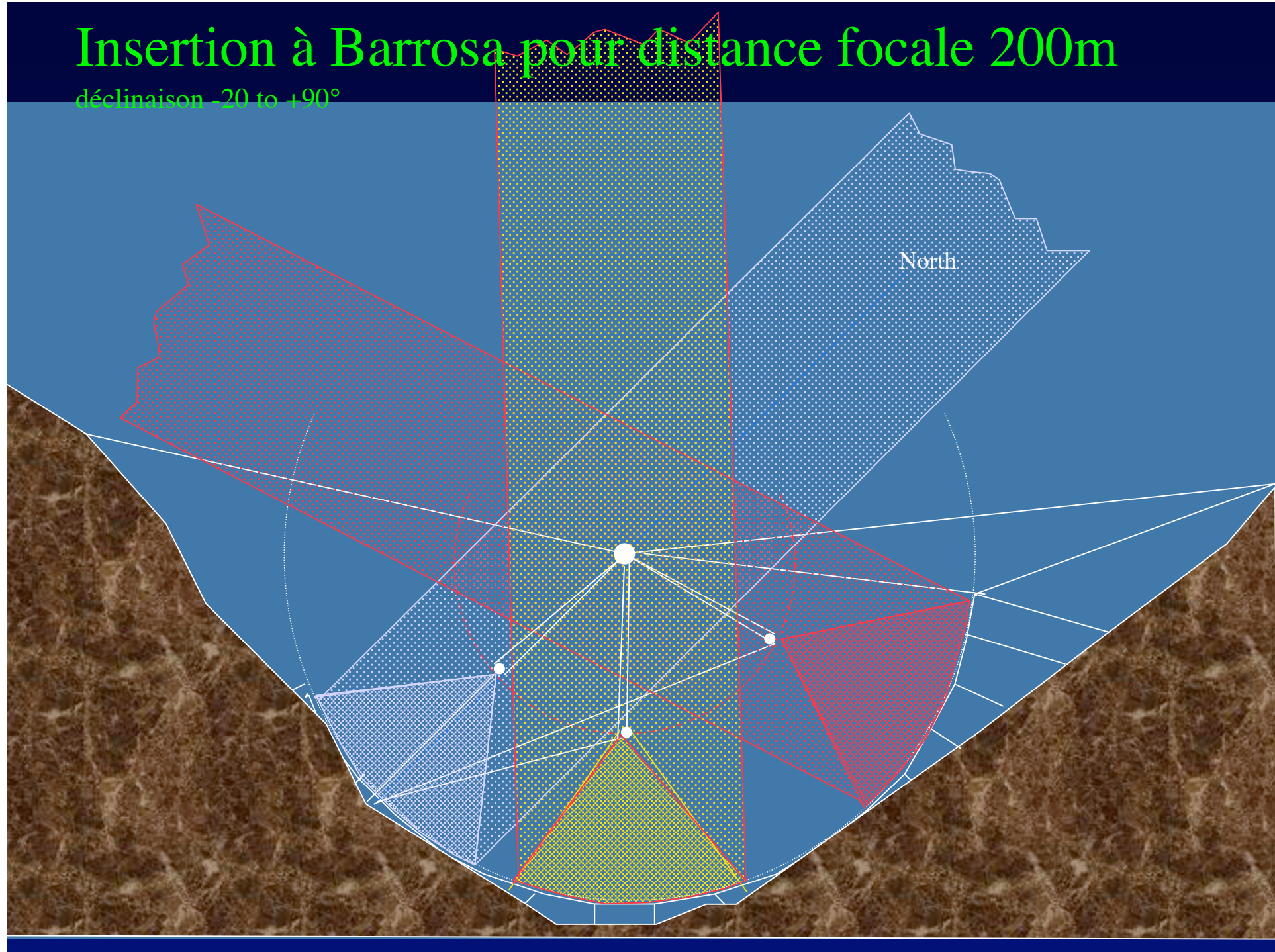
# Couplage ELT/hypertélescope à Barrosa



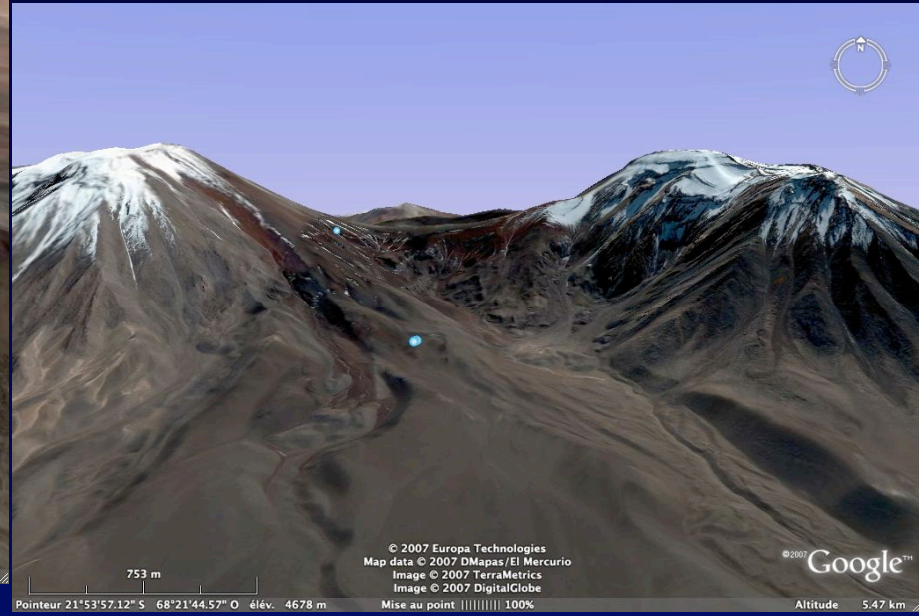
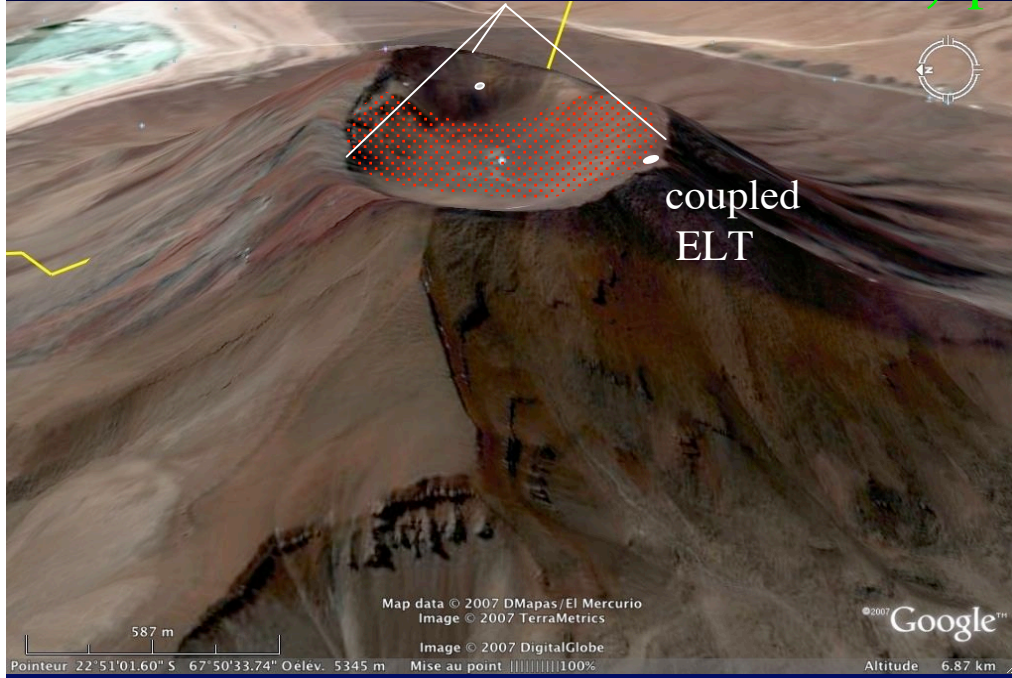
# Insertion à Barrosa pour distance focale 200m

déclinaison -20 to +90°

North



# Sites concaves au Chili, près du site ALMA



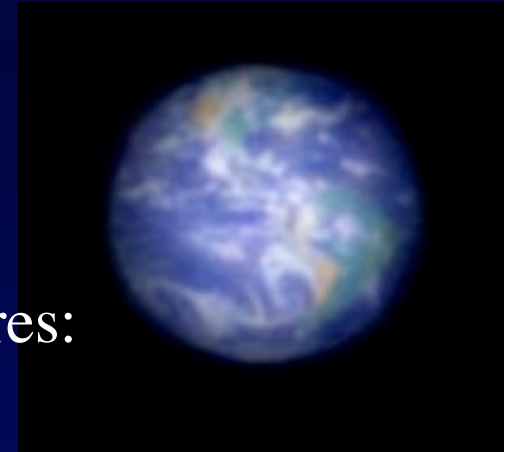
# Miroirs portés par des câbles ?



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

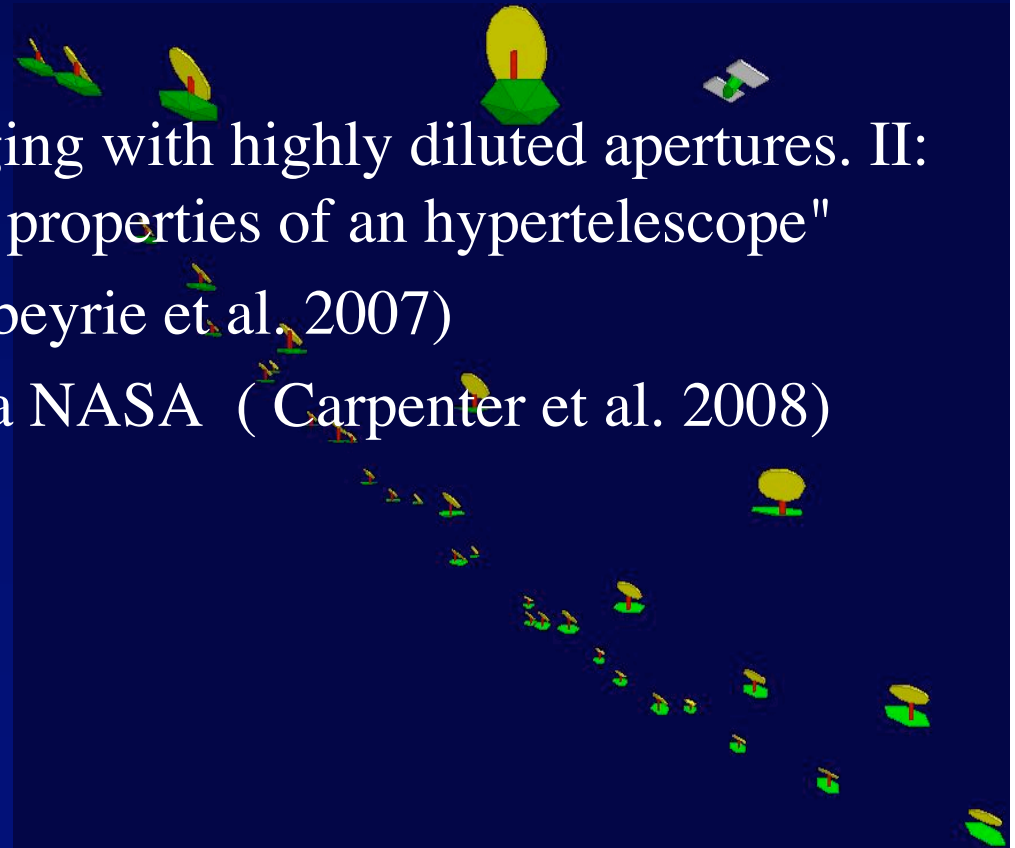


# L' idée fait son chemin

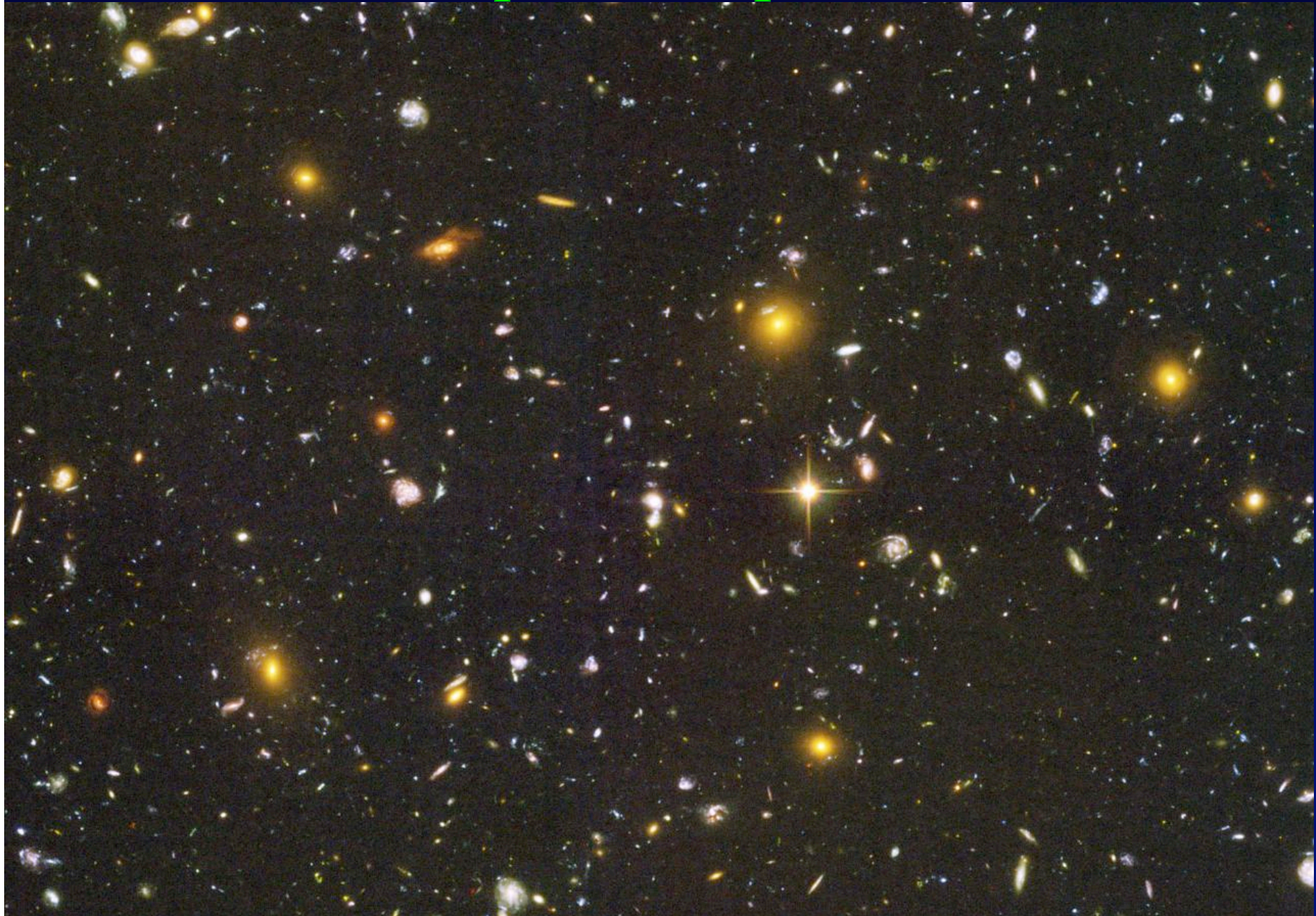


Après l'article initial ( Labeyrie, 1996) et quelques autres:

- Vakili F. et al. 2004, A&A, 421, 147
- Lardière et al. MNRAS( 2007)
- Patru et al. ( 2008) "Direct imaging with highly diluted apertures. II: Characterization of the imaging properties of an hypertelescope"
- Proposition Luciola à ESA ( Labeyrie et al. 2007)
- Proposition "Stellar Imager" à la NASA ( Carpenter et al. 2008)



# Hubble Ultra Deep Field (partiel)



# 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

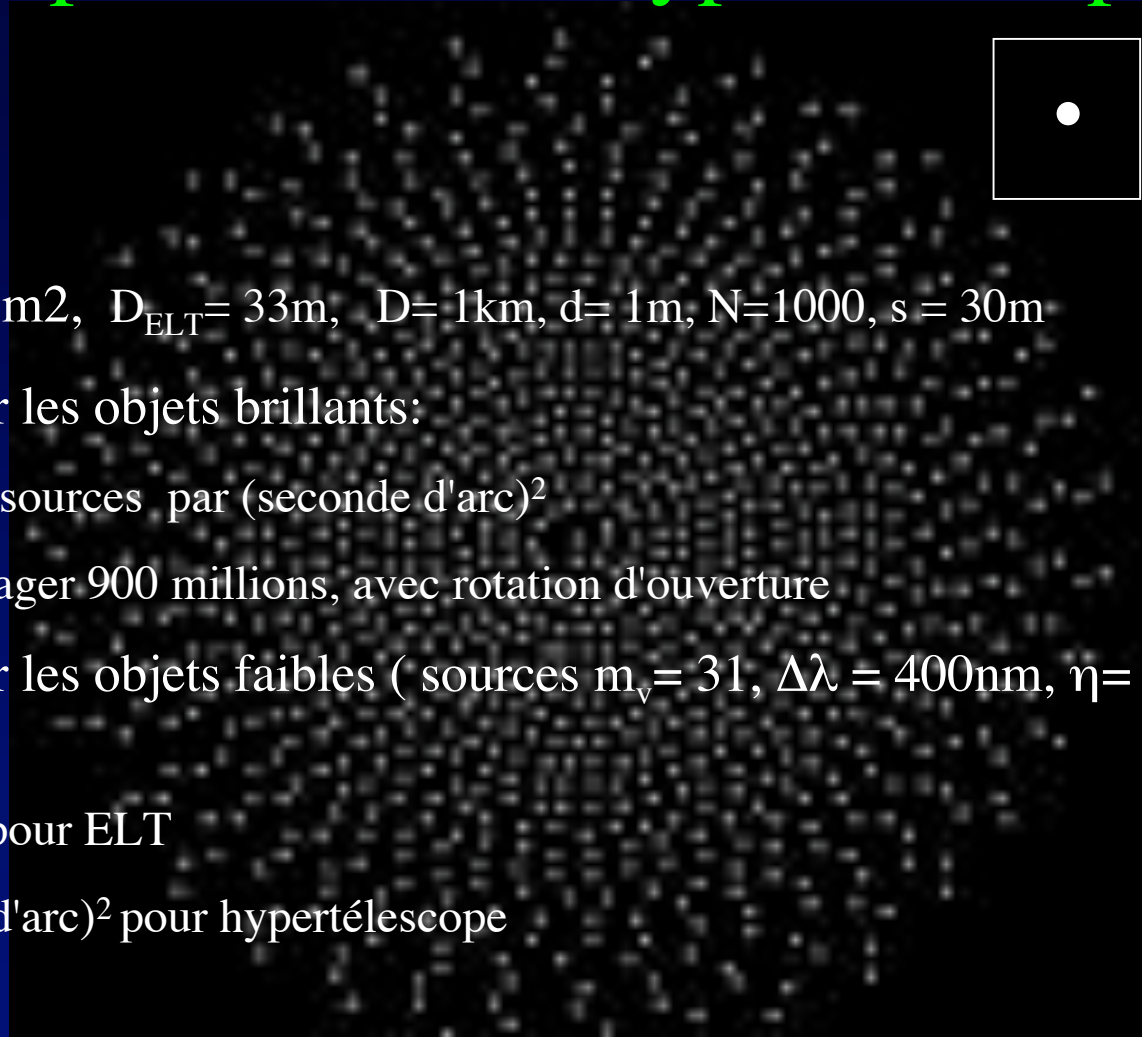
- par "lobe de sous-ouverture"
- par (seconde d'arc)<sup>2</sup>

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

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

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 peut en imager 900 millions, avec rotation d'ouverture
- 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



## Notations

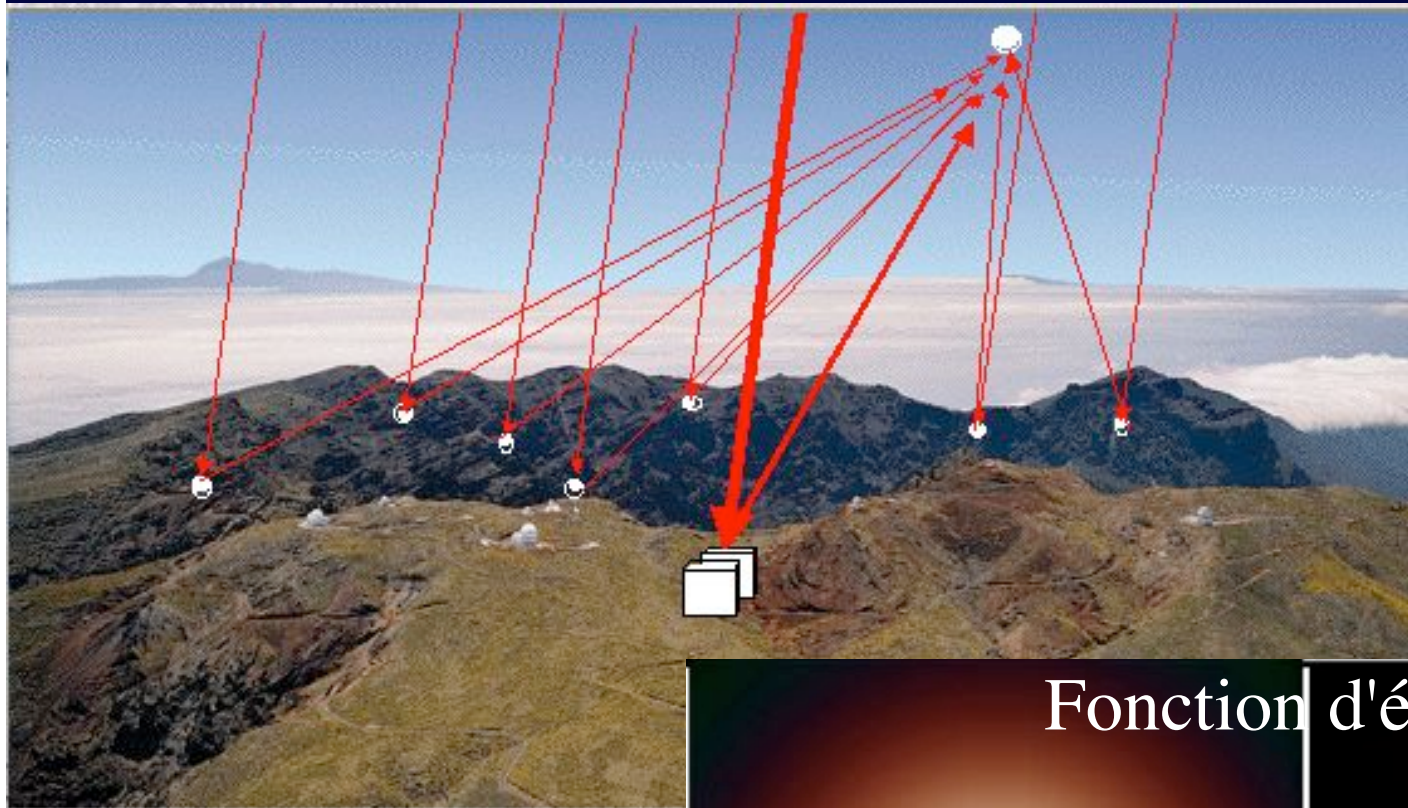
- $N$  nombre d'ouvertures
- $D, d$  diamètre global, et d'une sous-ouverture
- $s$  espacement des sous-ouvertures
- $E$  nombre de poses faites en modifiant l'ouverture
- $R_{\text{smax}}$  nombre max de sources par lobe  $\lambda/d$
- $A$  surface collectrice totale
- $P_{\text{flux}}$  photon flux.m-2.s-1
- $\text{SNR}_{\text{speckle}}$  rapport signal/bruit dans le halo a haut niveau
- $\text{SNR}_{\text{phot}}$  rapport signal/(bruit de photons)
-

Une quatrième voie au sol:

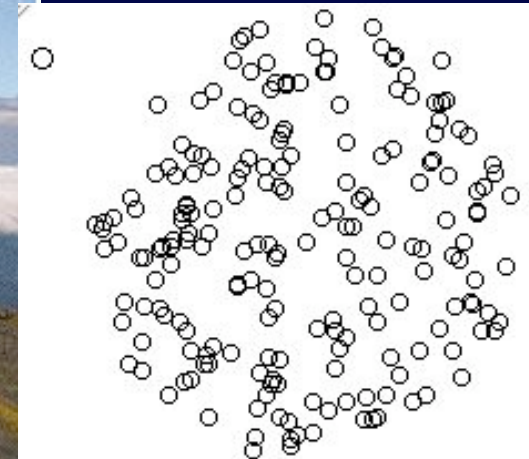
## Couplage d'un hypertélescope avec un ELT

- Apporte une résolution accrue à l'ELT
- Bénéficie de sa luminosité

# Une synergie intéressante: ELT et hypertélescope couplés



Densification de pupille  
inéegale: 1 et 40



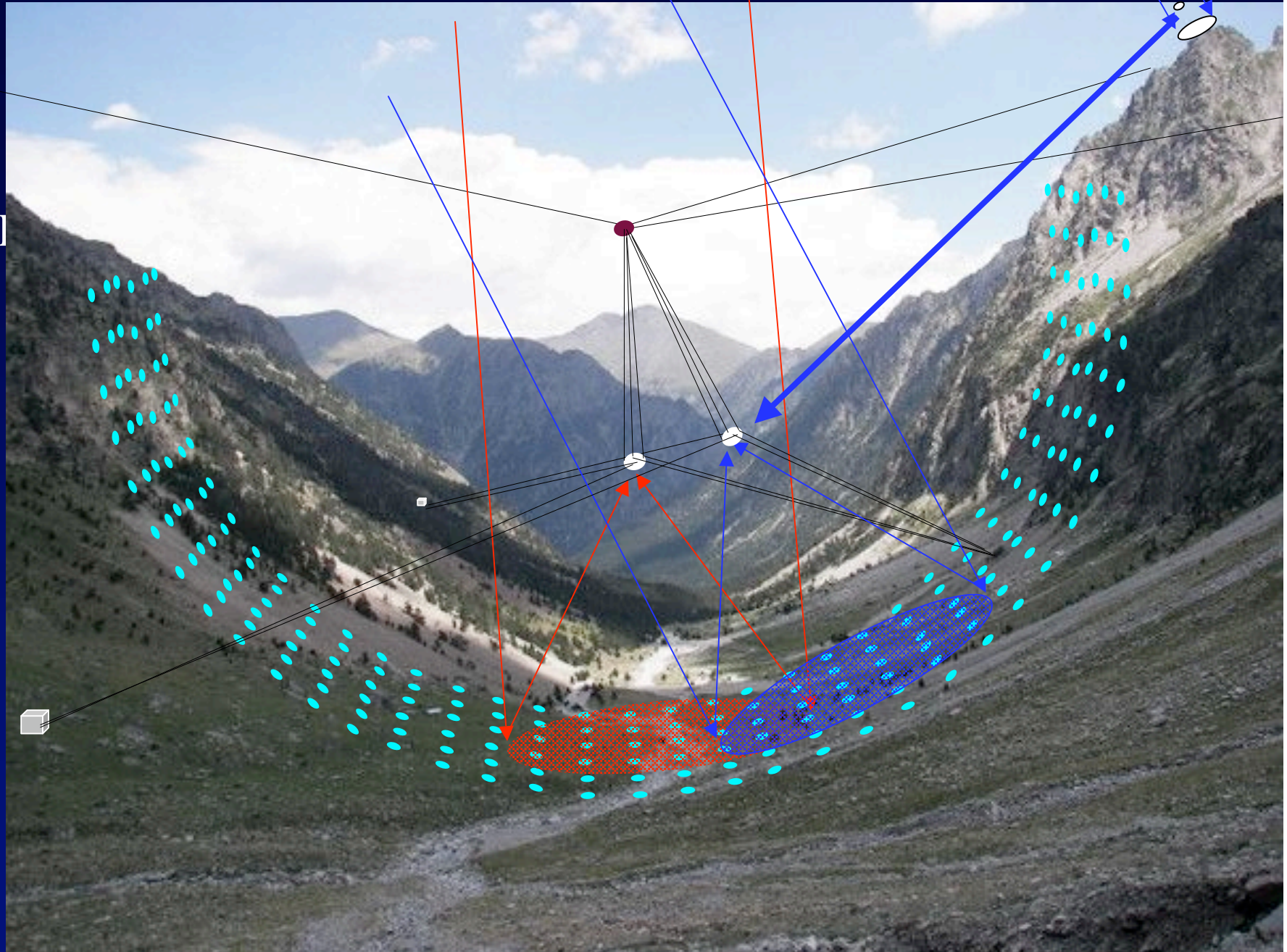
- ELT de 50m + hypertélescope 1km,  
à 200 ouvertures de 1m
- pic rétréci et intensifié x 17

Fonction d'étalement

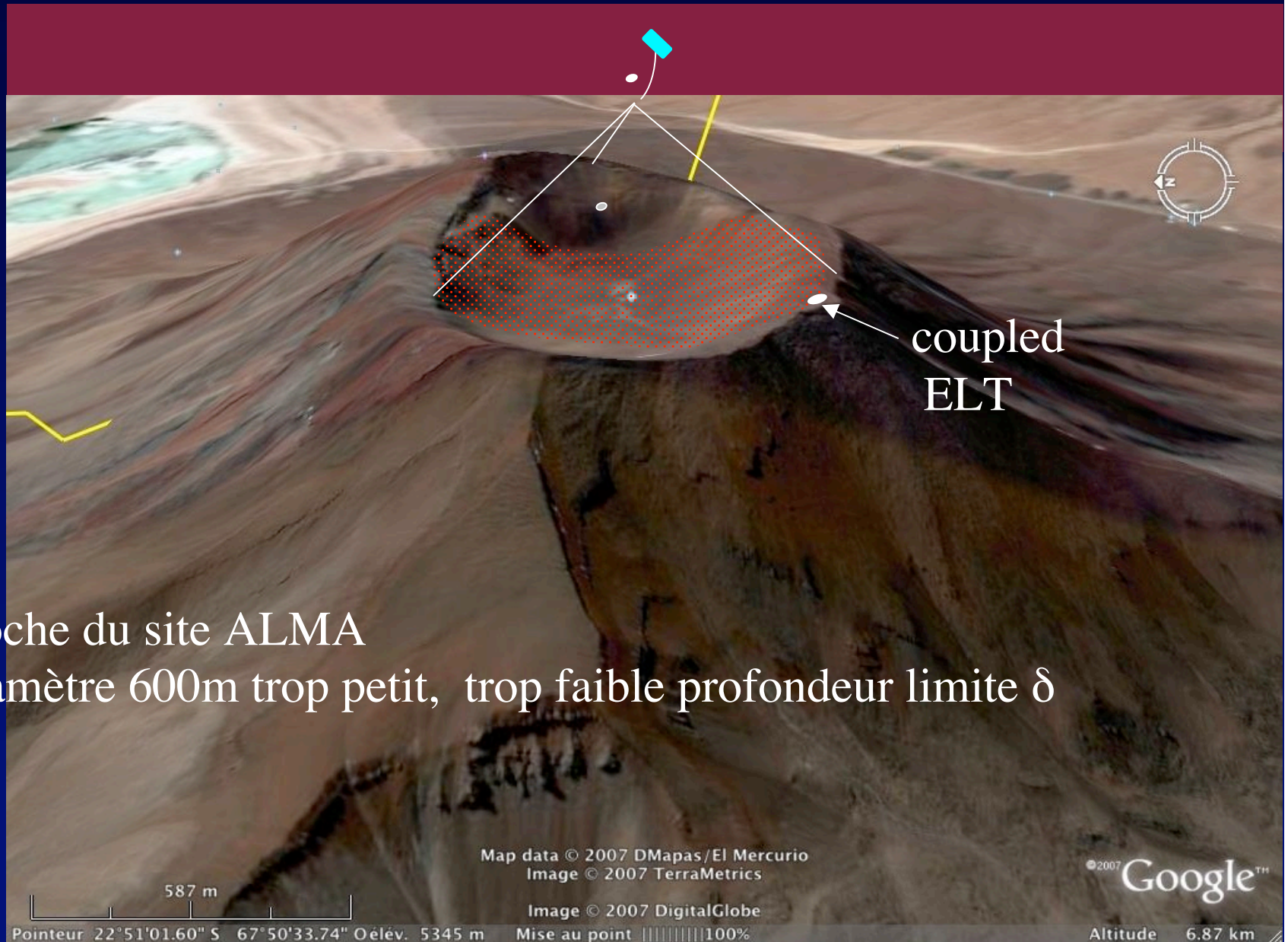
ELT seul

ELT couplé

# Couplage ELT/hypertélescope à Barrosa



# Cratère au Nord du Chili (altitude 5300m)



- Proche du site ALMA
- Diamètre 600m trop petit, trop faible profondeur limite  $\delta$

# Vallée au Nord du Chili (altitude 4800m)



455 m

Pointeur 22°42'31.91" S 67°24'18.89" O élév. 4846 m

Image © 2007 DigitalGlobe  
Map data © 2007 DMapas/El Mercurio  
Image © 2007 TerraMetrics  
© 2007 Europa Technologies

Mise au point ||||| 100%

© 2007 Google

Altitude 5.98 km

## 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).... spécial
-

# Simulations d'imagerie hypertélescope

objet

ouverture

fonction  
d'étalement

image

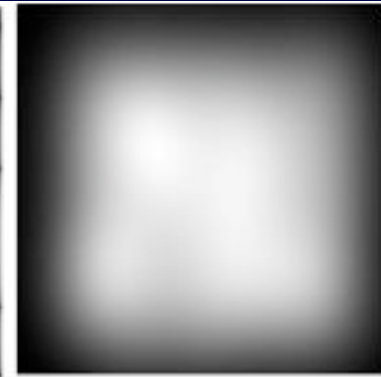
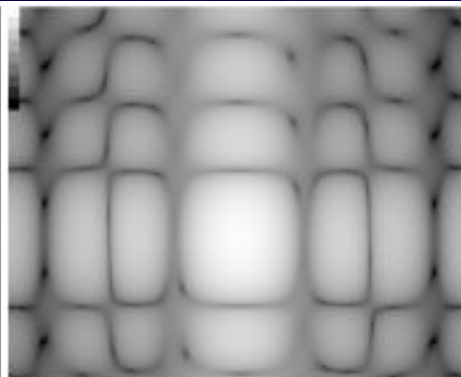
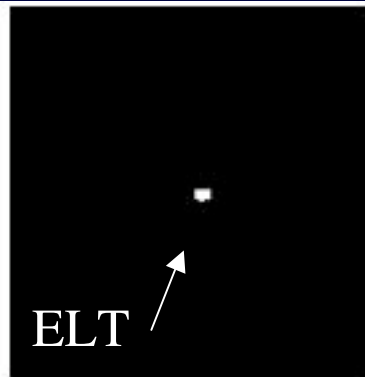
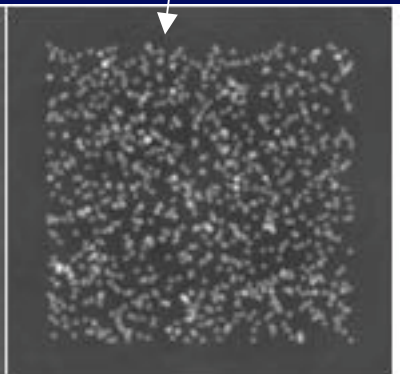
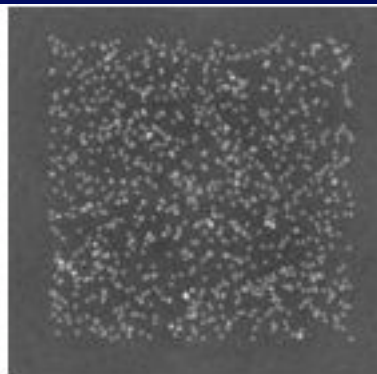
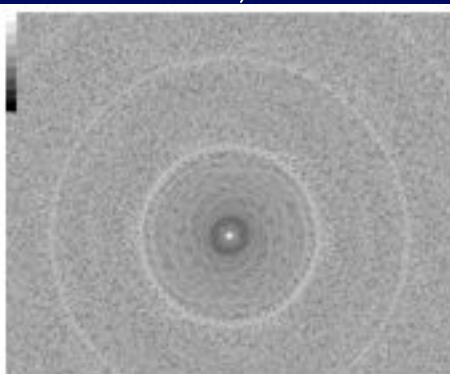
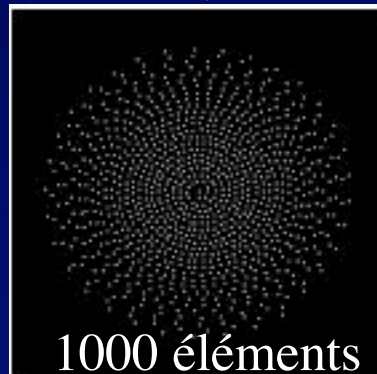
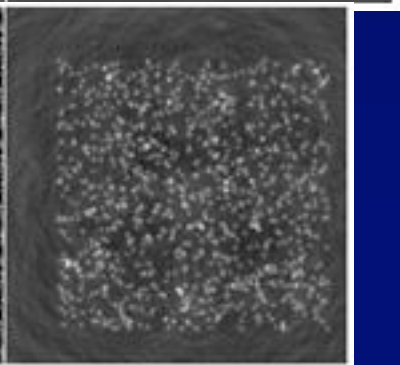
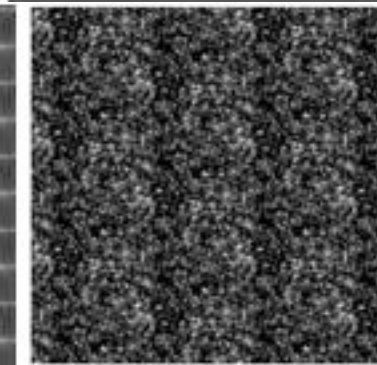
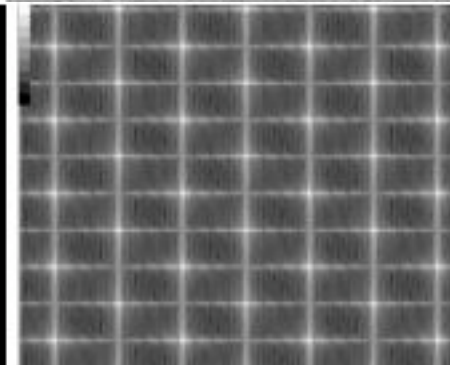
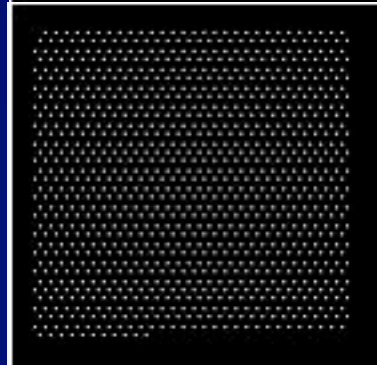


Image avec  
rotation

spirale

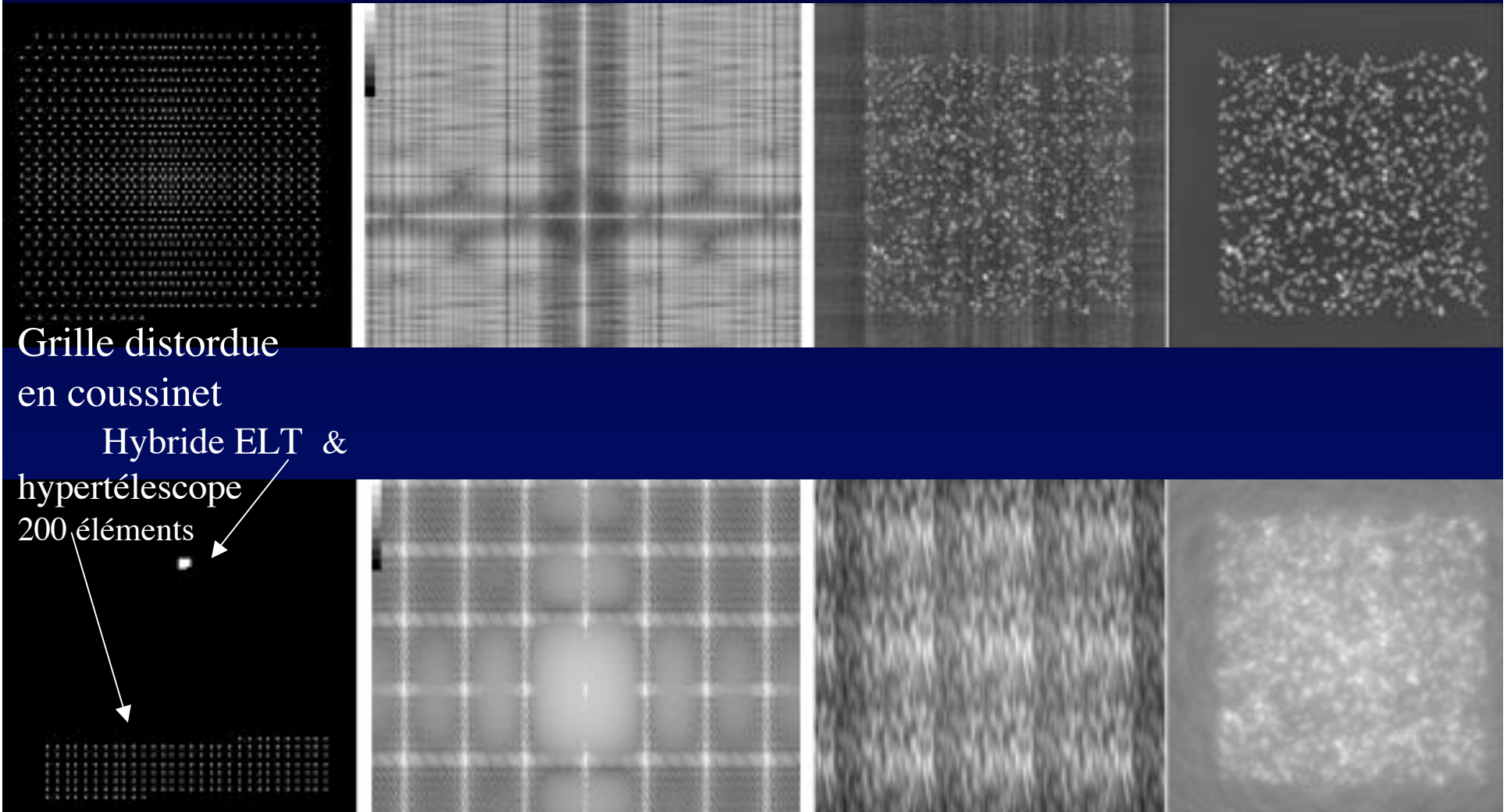


grille





# Simulations d'imagerie hypertélescope ( suite)



Grille distordue  
en coussinet

Hybride ELT &  
hypertélescope  
200 éléments

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

Pour l'Europe, aujourd'hui:

Vaut-il mieux faire un ELT de 42m?

une version "dispersée", hypertélescope de 1km ?

ou les deux, séparés ?

ou encore les deux, couplés ?

- Premiers éléments de réponse:
  - Science comparée par la théorie et la simulation ( Labeyrie 2008, SPIE) favorise l'hypertélescope **à surface égale**
  - Couplage ELT/hypertélescope également intéressant
  - Faisabilité, sites possibles et couts à préciser
- La question mérite une étude plus poussée avant d'investir  
**Contribuables de tous les pays** d'Europe, **unissez vous** pour l'exiger !