

Hyper-télescopes pour ondes millimétriques et radio

- **Séminaire à 15h15: Pierre Kervella, Observatoire Européen Austral**
"Voir les pulsations des étoiles avec un interféromètre"

- **Contraste et signal/bruit d 'un hyper-télescope pour détecter les exo-planètes**
- Réponse à une question d 'un auditeur:
hyper-télescope comparé à interféromètre hétérodyne
- **Applicabilité des hyper-télescopes pour la radio-astronomie**

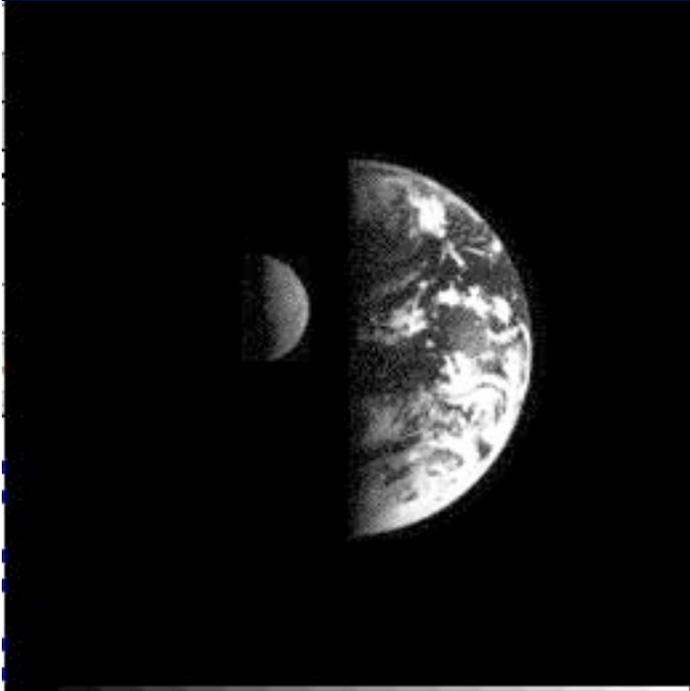
Signal et bruit

- Halo résiduel de l'étoile, avec bruit de photons
- Bruit de photon de la planète
- Fond de ciel

"Resolved imaging of extra-solar planets with future 10-100 km optical interferometric arrays", Labeyrie, A., 1996, A&AS Ser. **118**, 517-524

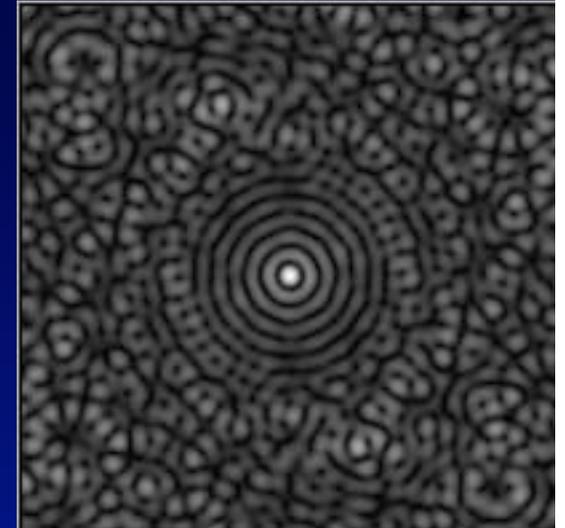
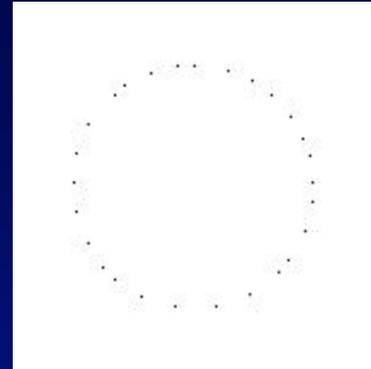
"Visible and infra-red imaging with DARWIN:: feasibility of a visible precursor" , Labeyrie,A. Boccaletti, A., Moutou,C. Riaud, P., Rabou,P., Schneider,J., Abe,L. proc. DARWIN workshop, Stockholm, Nov. 1999, ESA pub.

- formation d'un halo par les objets étendus



Terre et Lune

ouverture



Fonction
d'interférence

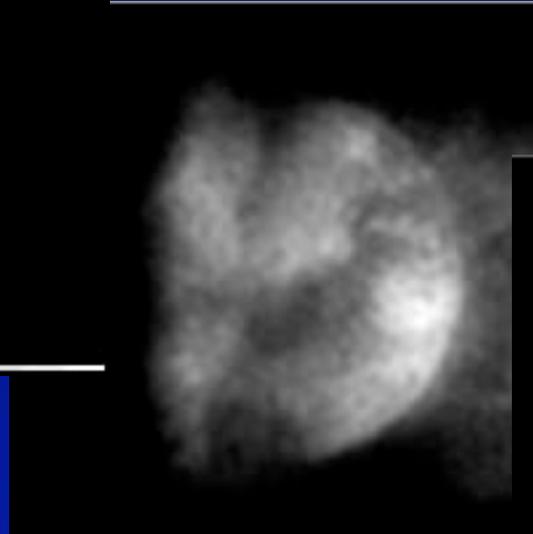


Image i3

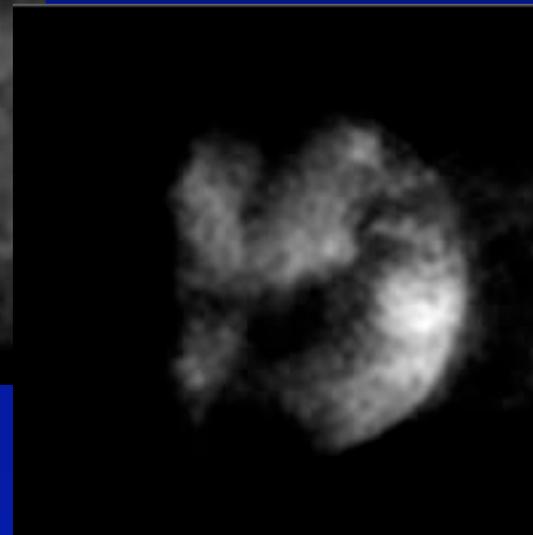


Image i2

Signal et bruit pour l'imagerie hyper-télescope d'exo-planètes

- **effets de la lumière zodiacale et exo-zodiacale**
 - **Addition incohérente des sous-images zodiacales**
 - **Addition cohérente pour objets < champ => image haute résolution**
 - Fond zodiacal: $J_z = L_z N \lambda^2 d^{-2} d^2 = L_z N \lambda^2$
 - par Airy: $J_z / N = L_z \lambda^2$
 - photons planète: $J_p = I_p N d^2$
 - Contraste planète/zodiacal: $J_p J_z^{-1} = I_p L_z^{-1} N d^2 \lambda^{-2}$
 - Signal/bruit: $J_p J_z^{-1/2} = I_p L_z^{-1/2} N d^2 \lambda^{-1}$

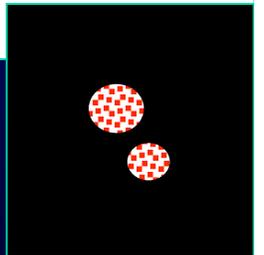
Question d'un auditeur: peut-il devenir intéressant de faire de l'interférométrie hétérodyne ?

- Etoile vue à travers un filtre étroit: cohérence pendant

$$\tau = \frac{\lambda^2}{c d\lambda} \quad \text{objet cohérent} \quad o(x, y, t) = \rho(x, y) e^{i\varphi(x, y, t)}$$

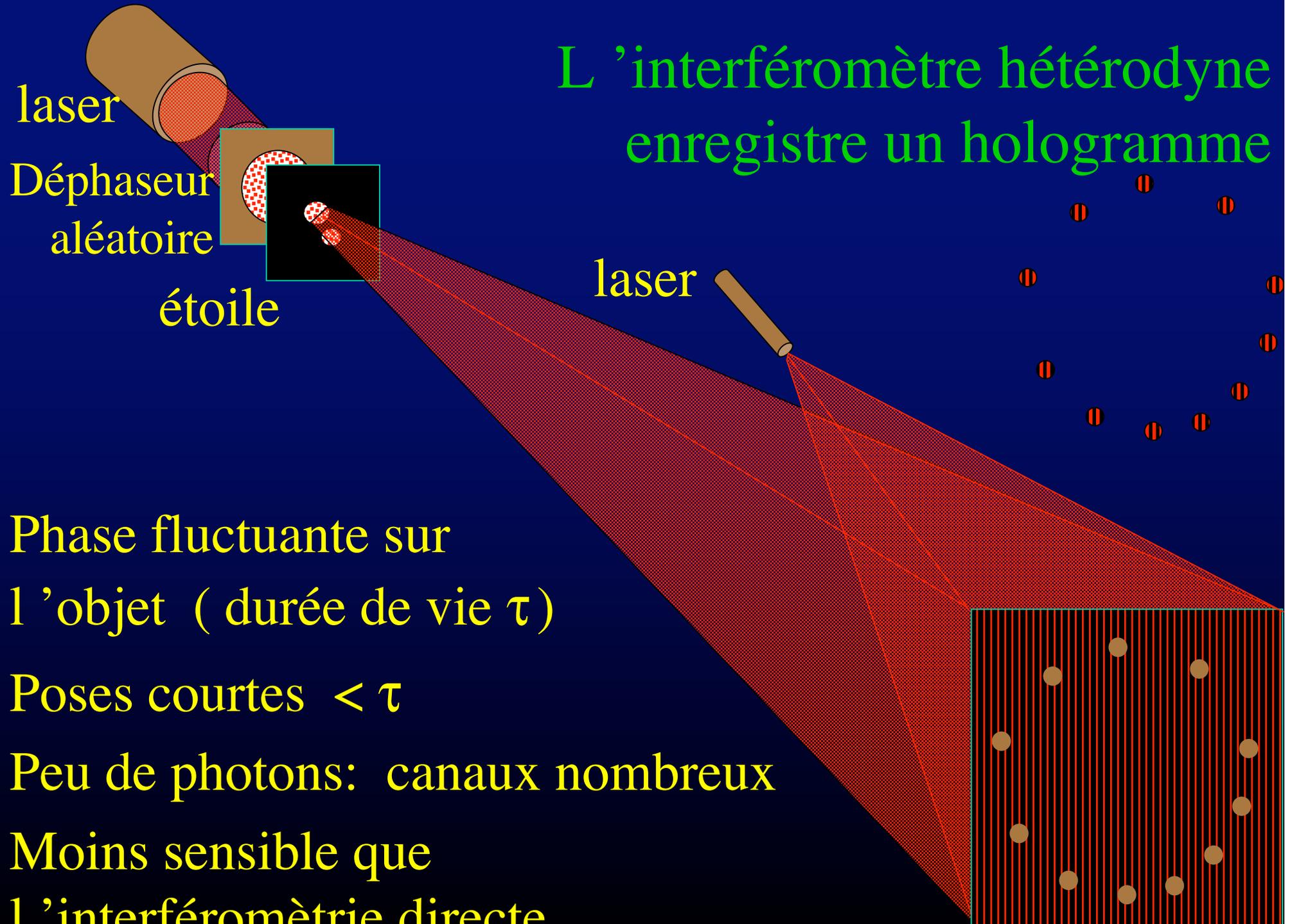
- Exemple:

- $\tau = 1,8 \text{ ns}$ si $d\lambda = 0.005 \text{ angstrom}$, $\lambda = 5\,000 \text{ angstroms}$

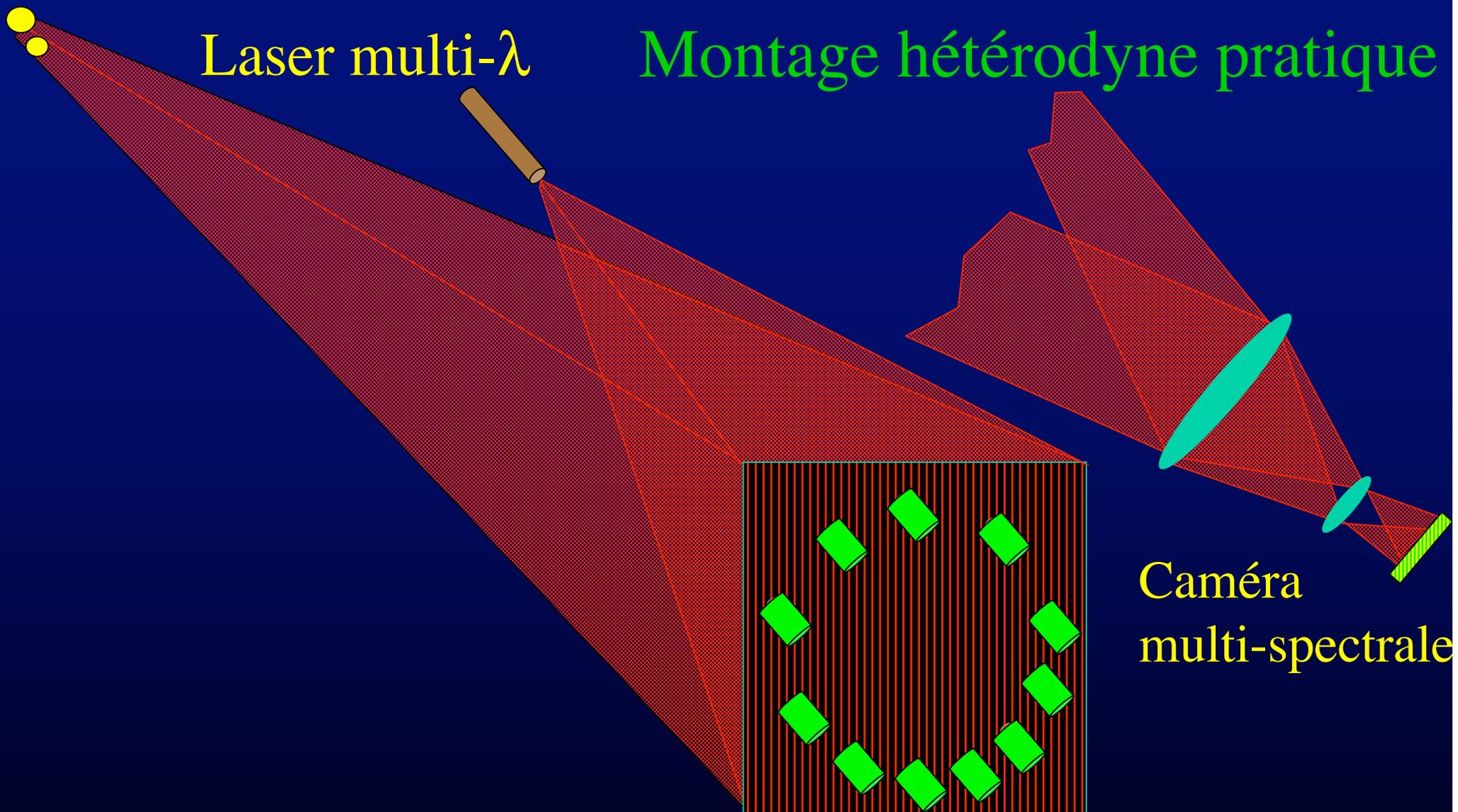


- speckles au sol: durée de vie τ
- Hétérodyne=hologramme
- laser à spectre peigne

L'interféromètre hétérodyne enregistre un hologramme



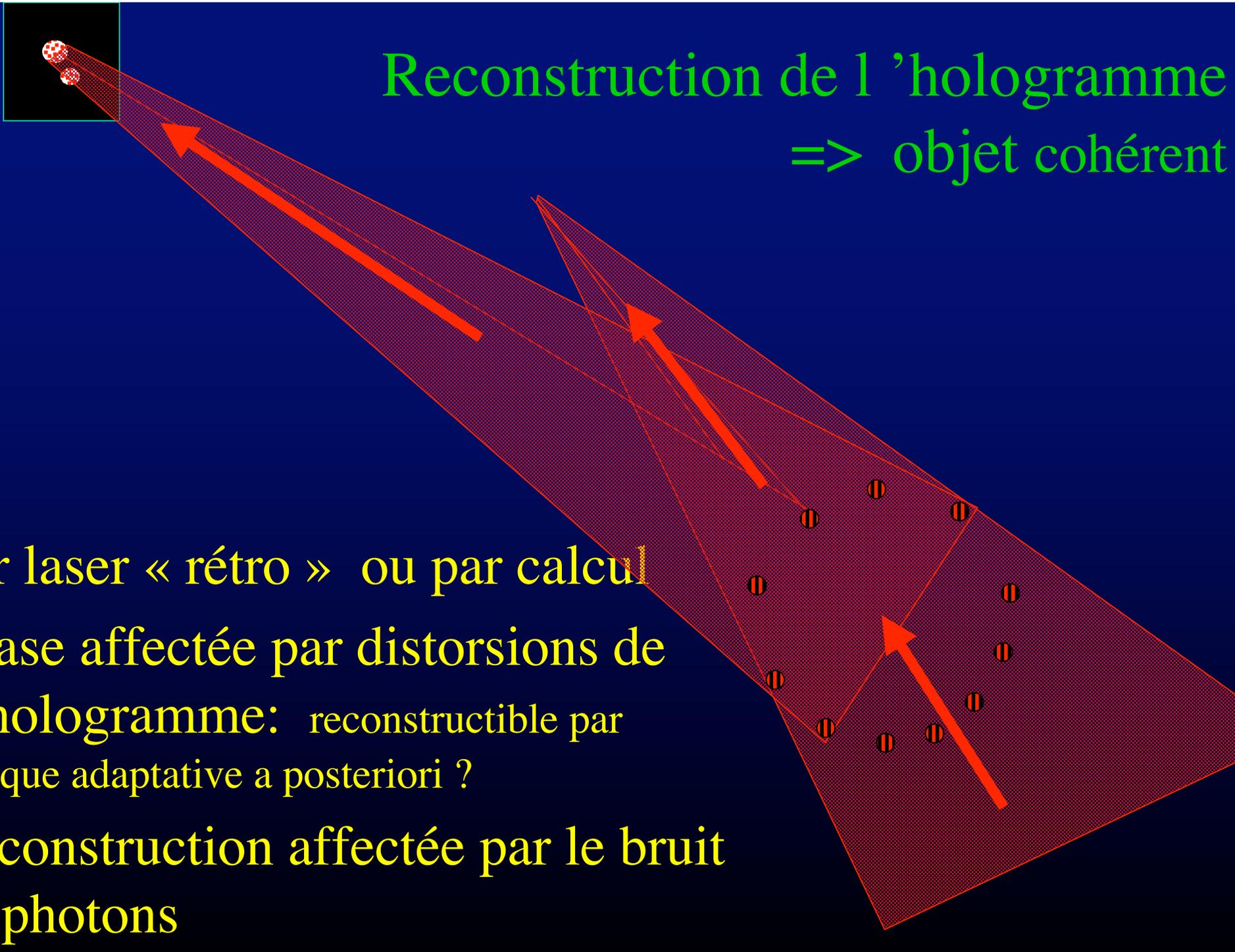
- Phase fluctuante sur l'objet (durée de vie τ)
- Poses courtes $< \tau$
- Peu de photons: canaux nombreux
- Moins sensible que l'interférométrie directe

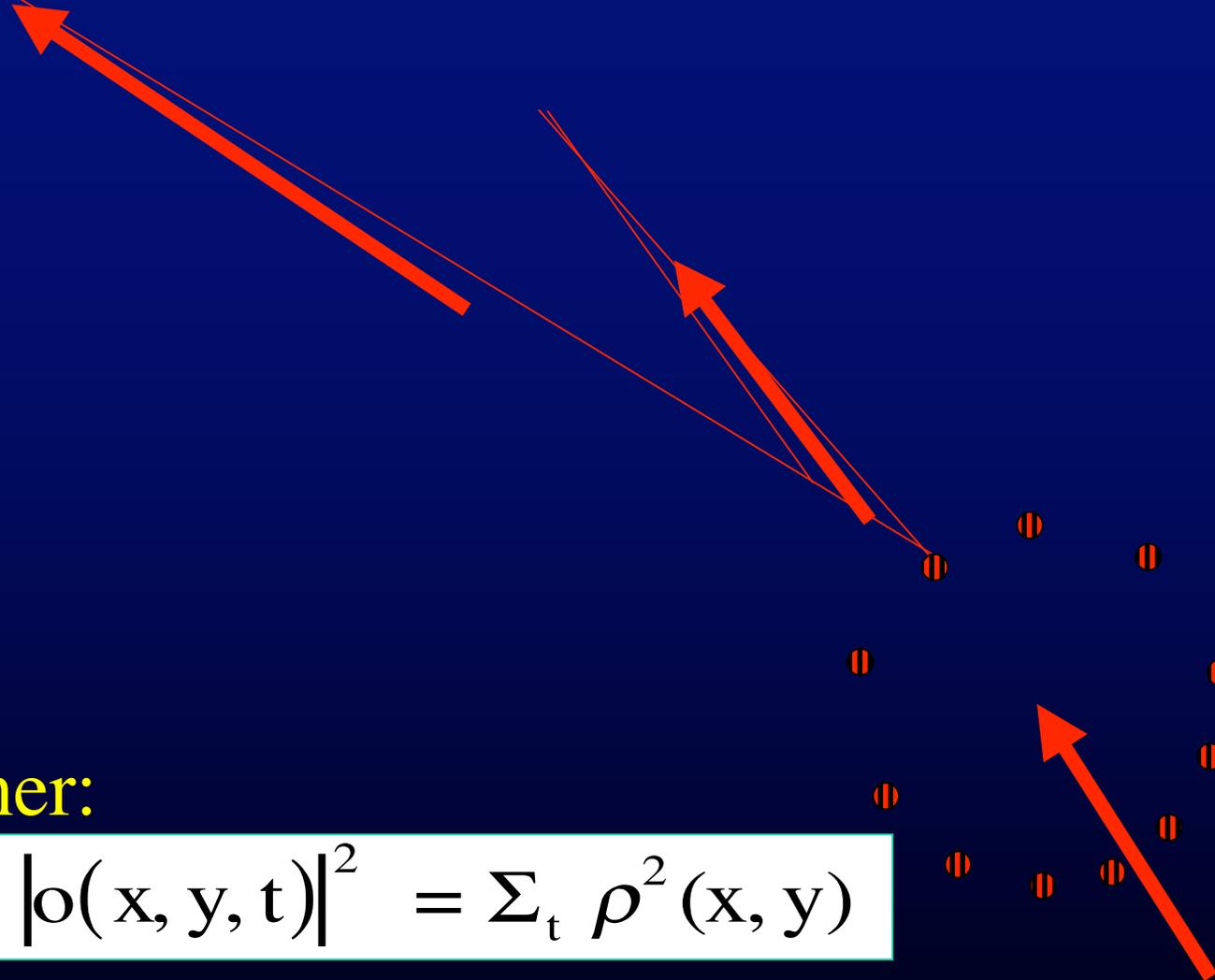
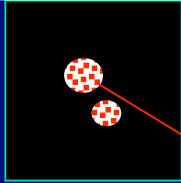


- Géométrie moins critique si mise en phase *a posteriori*
- À comparer au mode « speckle » d'un hyper-télescope déphasé

Reconstruction de l'hologramme => objet cohérent

- Par laser « rétro » ou par calcul
- Phase affectée par distorsions de l'hologramme: restructurable par optique adaptative a posteriori ?
- Reconstruction affectée par le bruit de photons





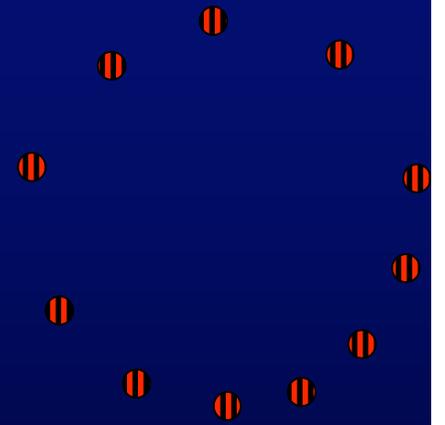
- Additionner:

$$\Sigma_t |o(x, y, t)|^2 = \Sigma_t \rho^2(x, y)$$

- Option: additionner les canaux spectraux
- Effet du bruit de photons: halo

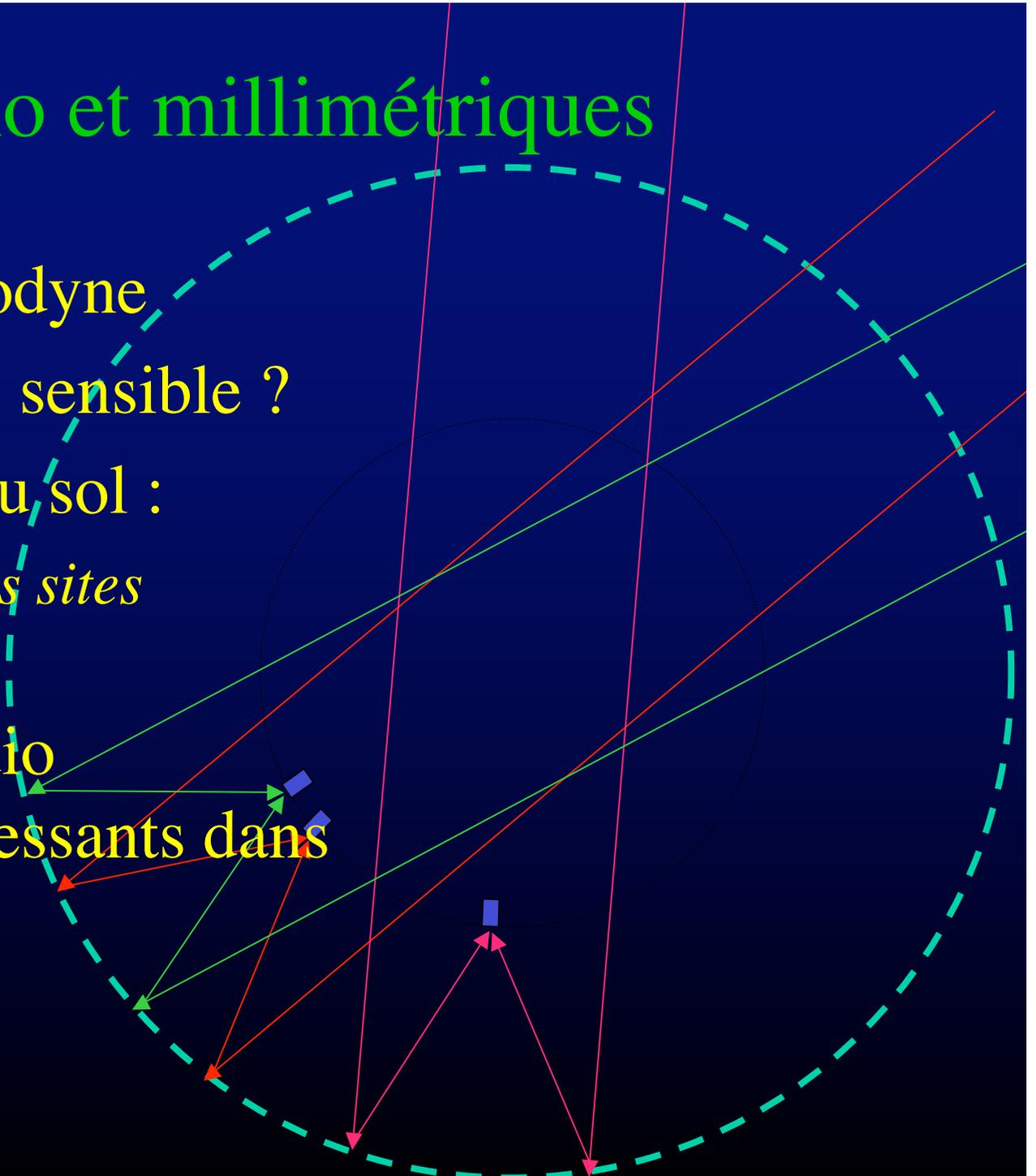
Comparaison: interférométrie directe et hétérodyne

- Hétérodyne avec détecteur idéal: (comptage de photons rapide, multi-canaux spectraux)
 - moins sensible ? à vérifier !
 - Tolérance relâchée sur géométrie ? Seulement si étoile de référence ou optique adaptative *a posteriori*
 -



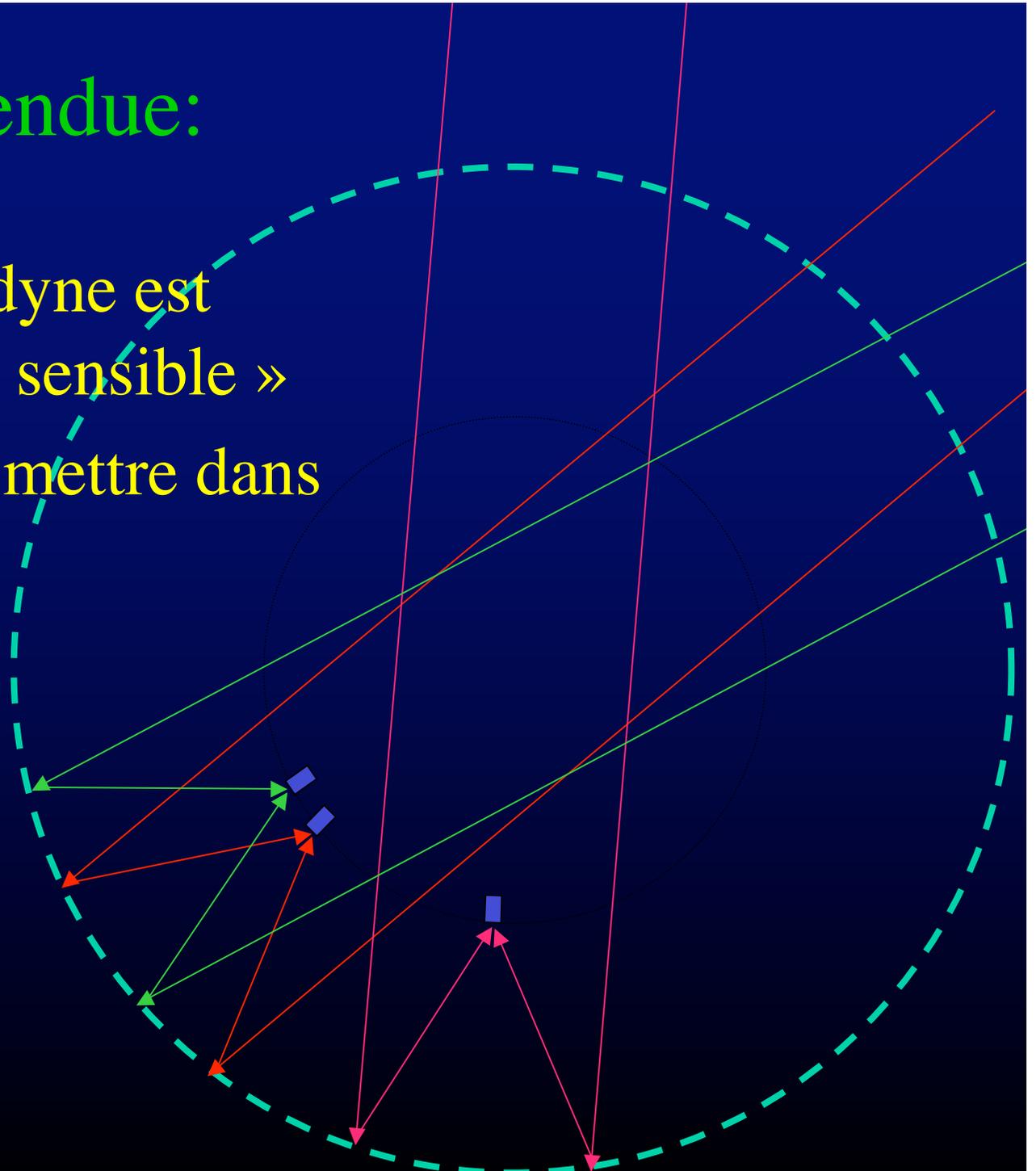
Cas des ondes radio et millimétriques

- Classiquement hétérodyne
- Hyper-télescope plus sensible ?
- Mais malcommode au sol :
 - *Dimension limitée des sites sphériques*
- Hyper-télescopes radio potentiellement intéressants dans l'espace



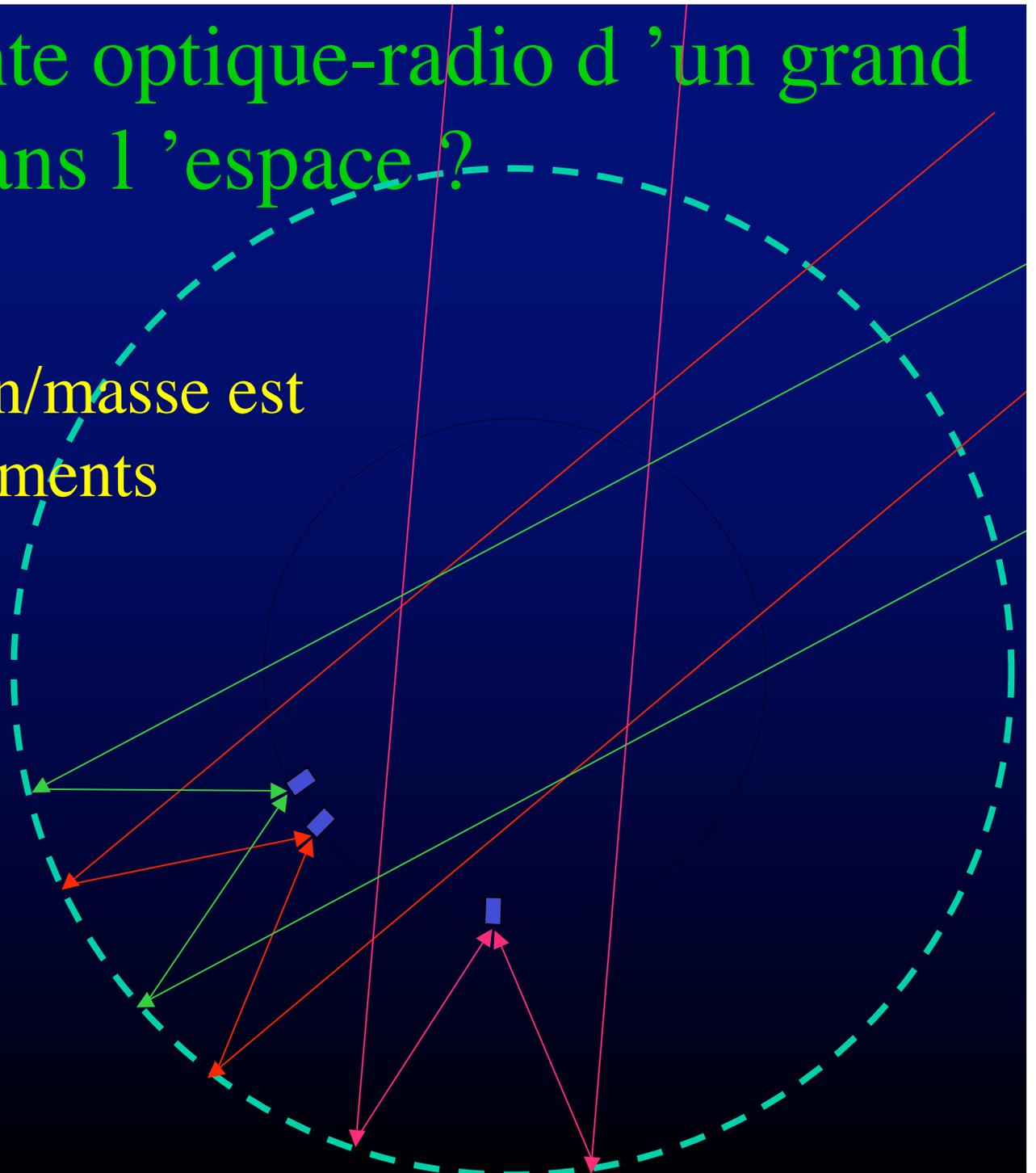
Une objection entendue:

- « le détecteur hétérodyne est intrinsèquement plus sensible »
- Réponse: on peut le mettre dans l'image directe



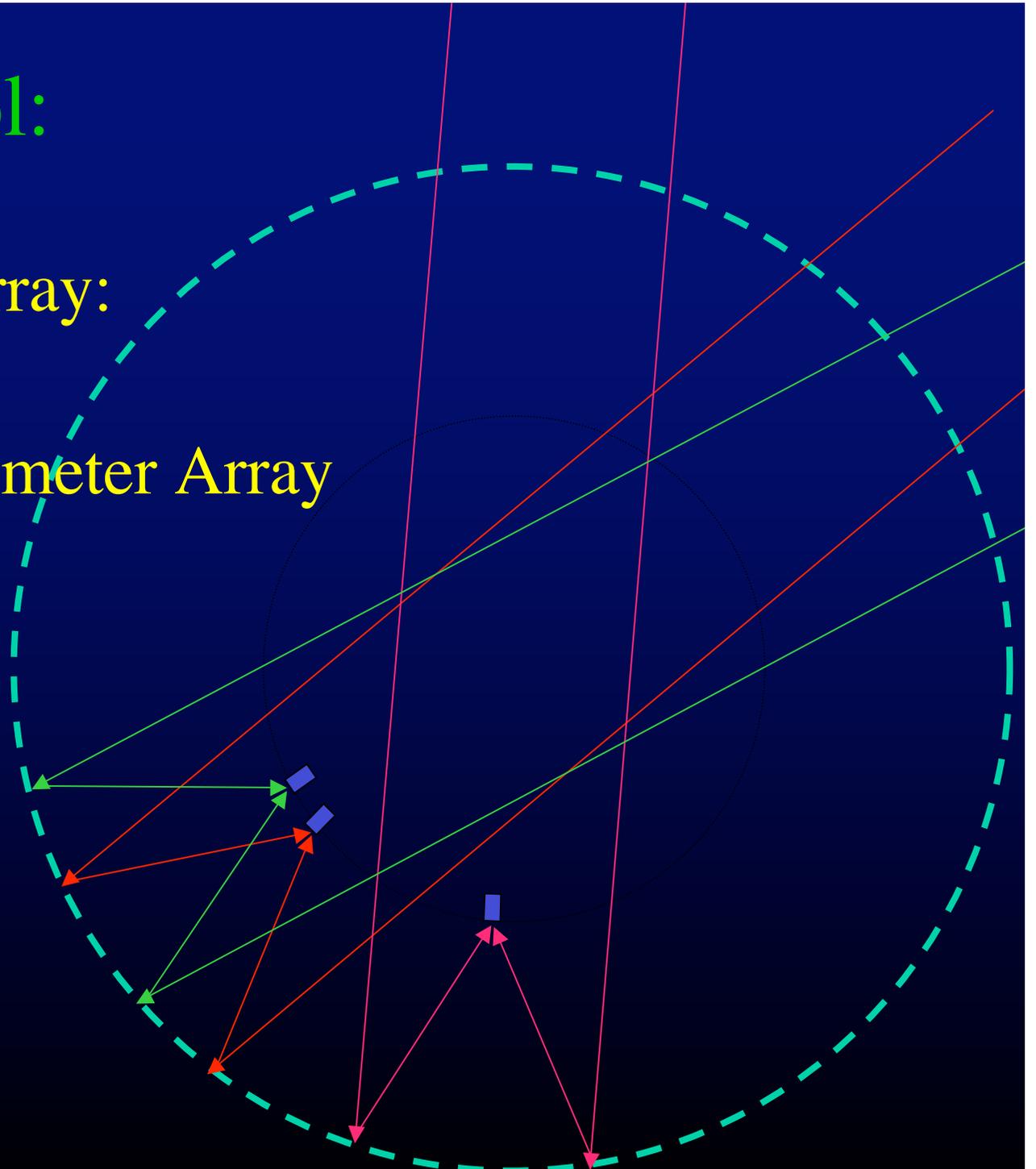
Utilisation conjointe optique-radio d'un grand hyper-télescope dans l'espace ?

- Intéressant , mais:
- L'optimum précision/masse est différent pour les éléments



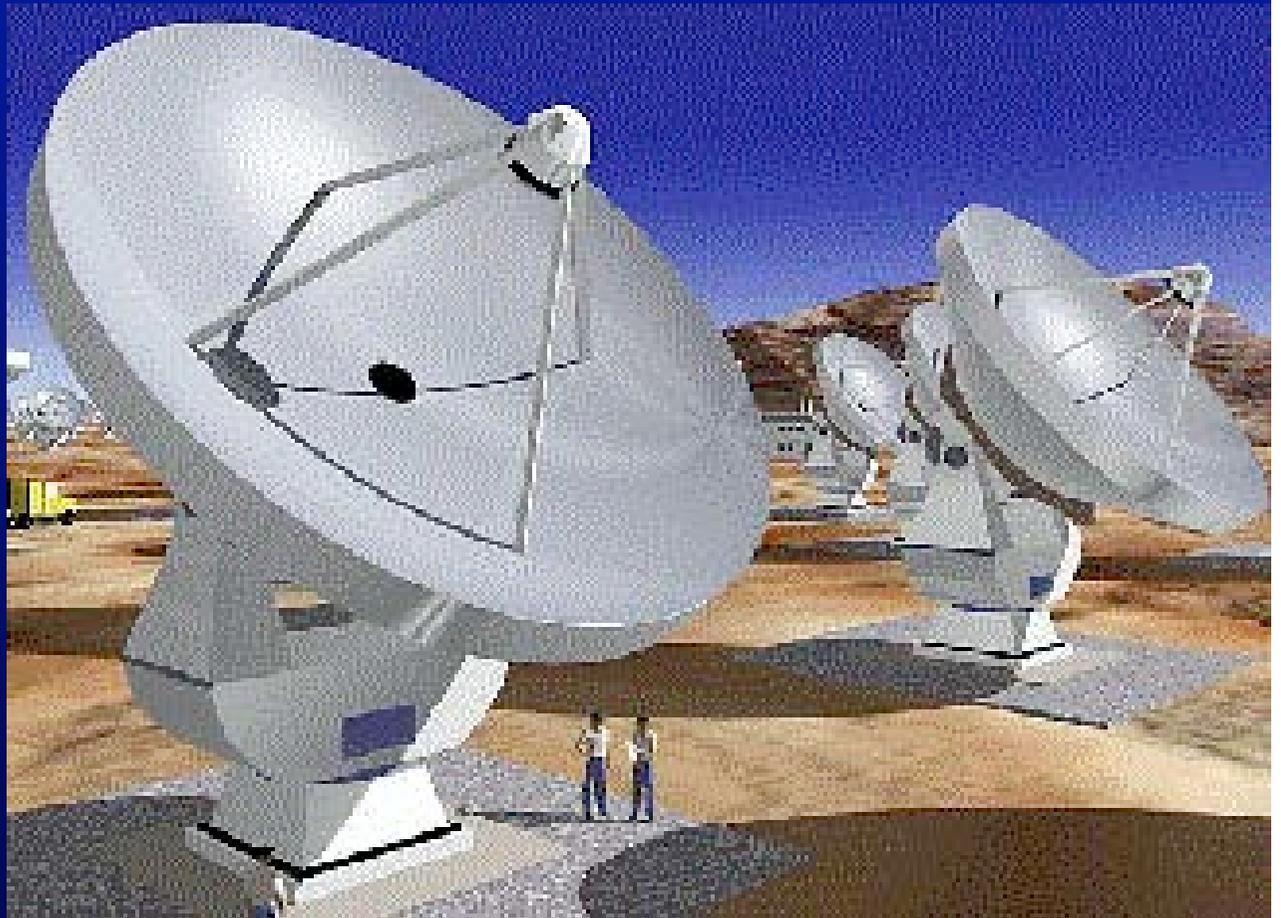
Projets radio au sol:

- Square-Kilometer Array:
détecteur en ballon ?
- Atacama Large Millimeter Array



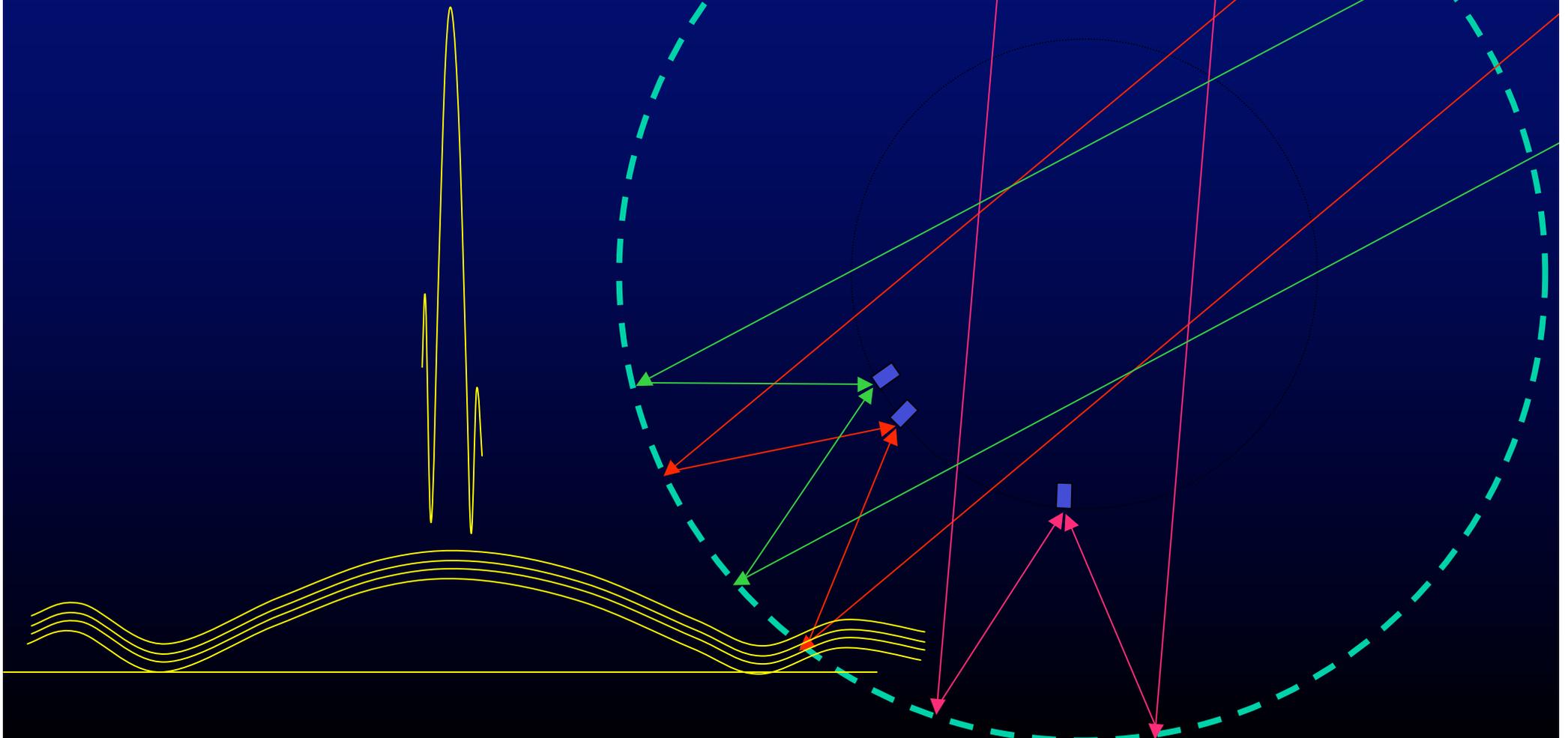
Projet Atacama Large Millimeter Array (ALMA)

- 10 km
- 64 antennes de 15m, mobiles



Cas des ondes radio et millimétriques

- Classiquement hétérodyne
- Hyper-télescope plus sensible ?



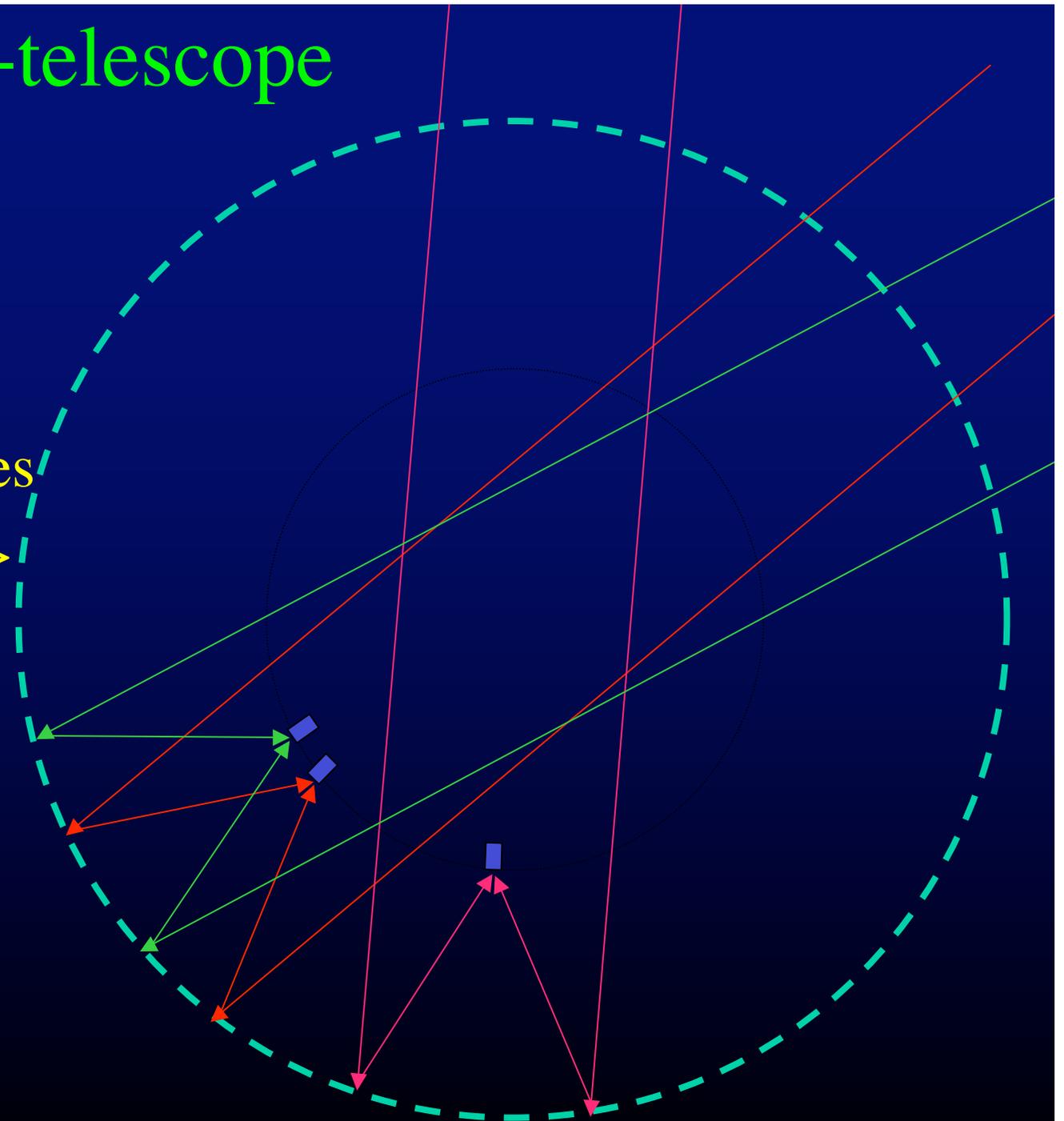
DARWIN (Mariotti et al.) étude par ESA



Moth-Eye Hyper-telescope

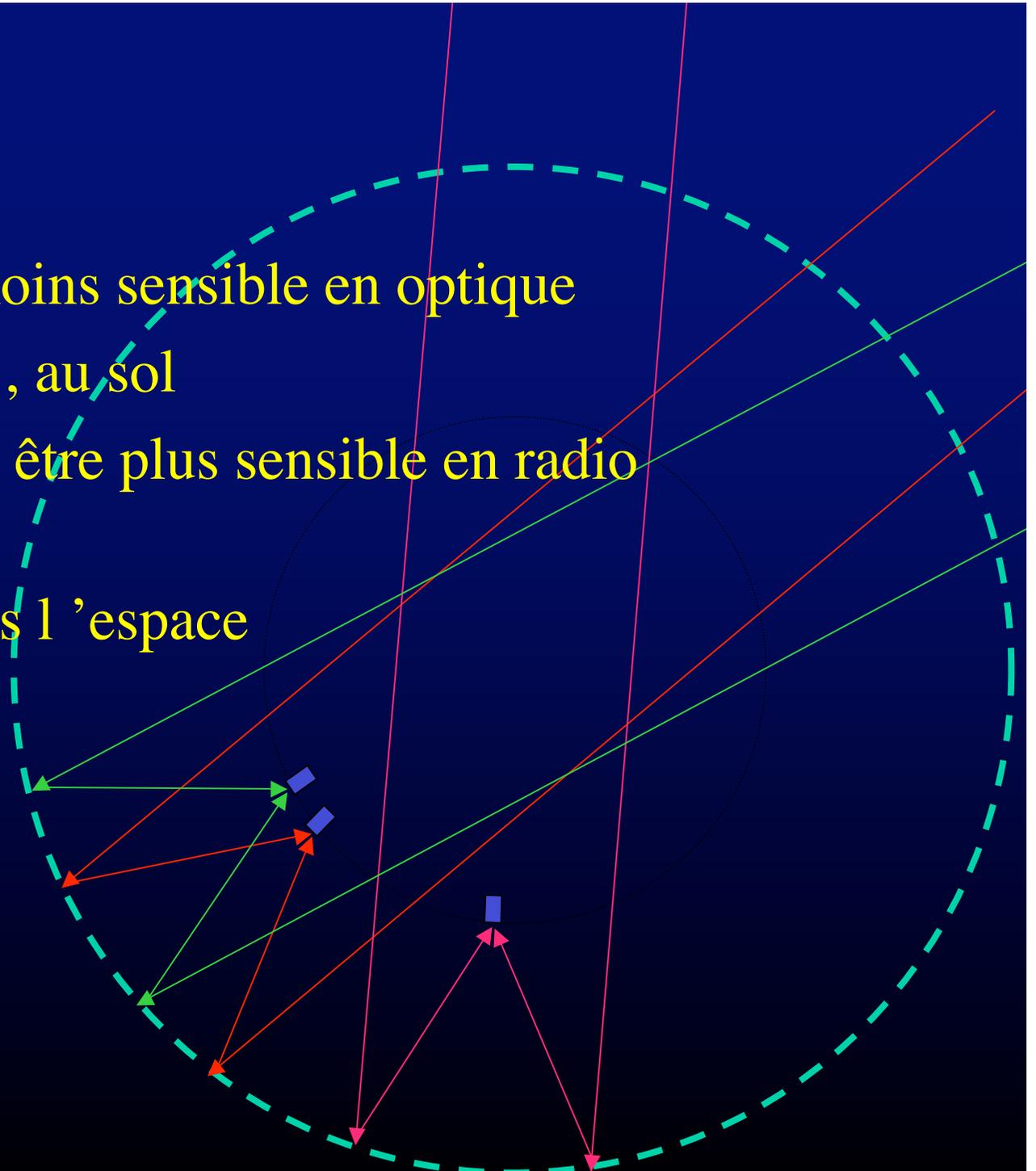
Labeyrie, Cargèse 1998

- Panoramique
- Sphère diluée fixe, stations focales mobiles
- Partage des miroirs => économie

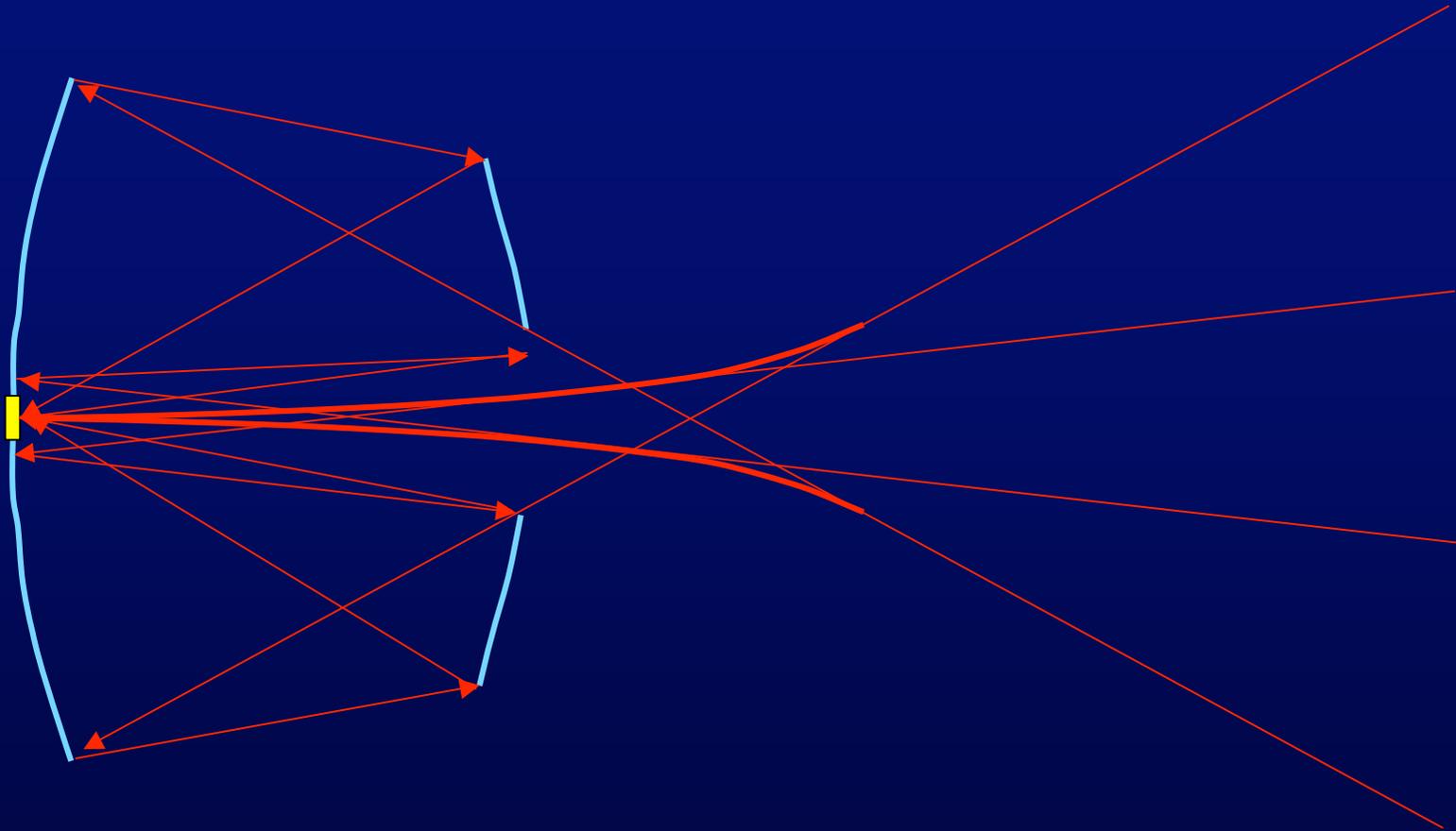


Conclusions

- Détection hétérodyne moins sensible en optique
- Plus commode en radio , au sol
- Hyper-télescope devrait être plus sensible en radio et millimétrique
- Mais nécessite sites dans l'espace



Correcteur d'aberration sphérique à f/1

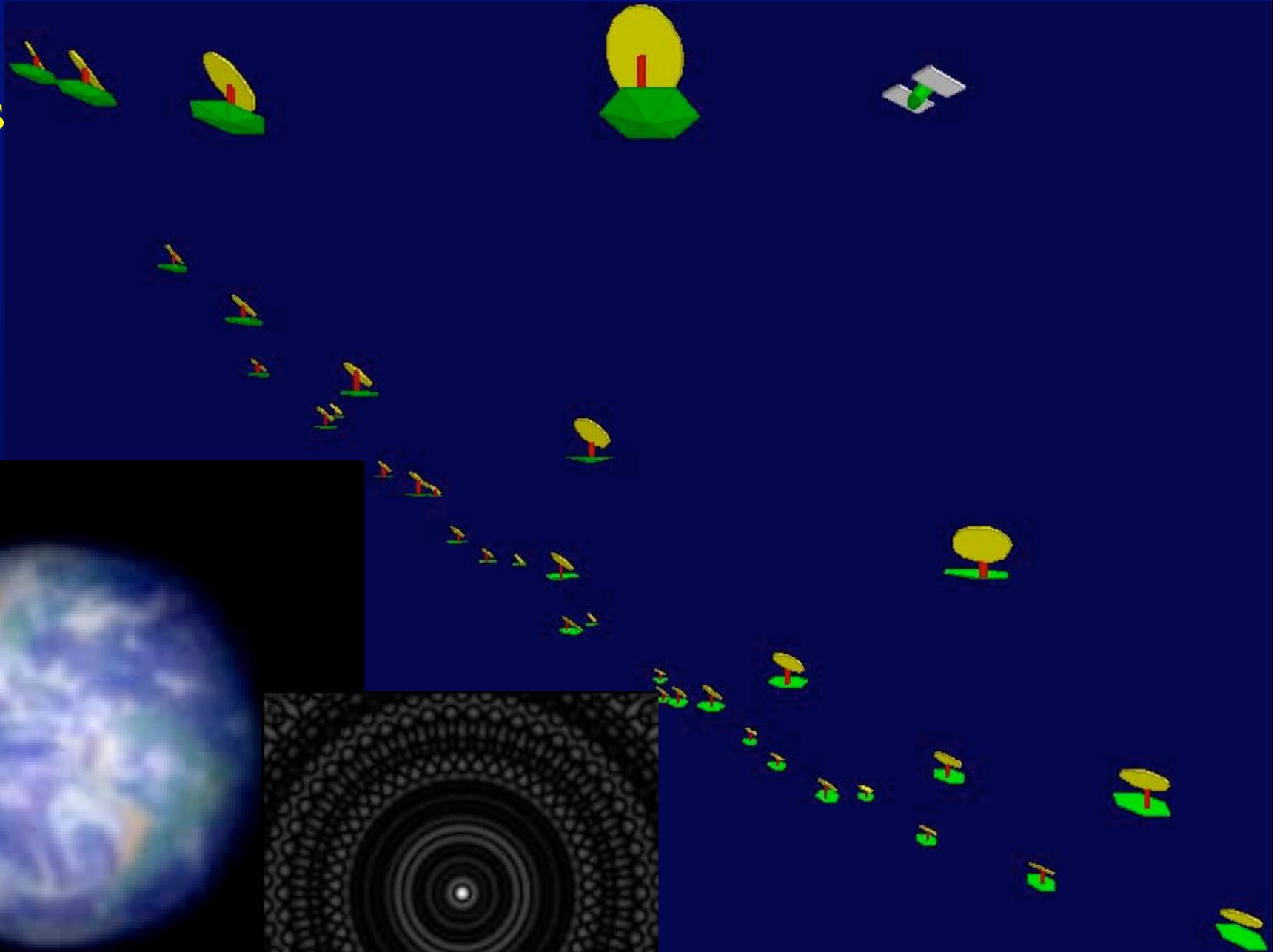


Diamètre 3,5 km pour pupille 100 km

Un hyper-telescope: Exo-Earth Imager

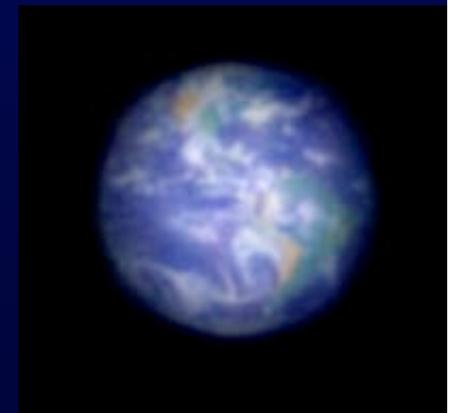
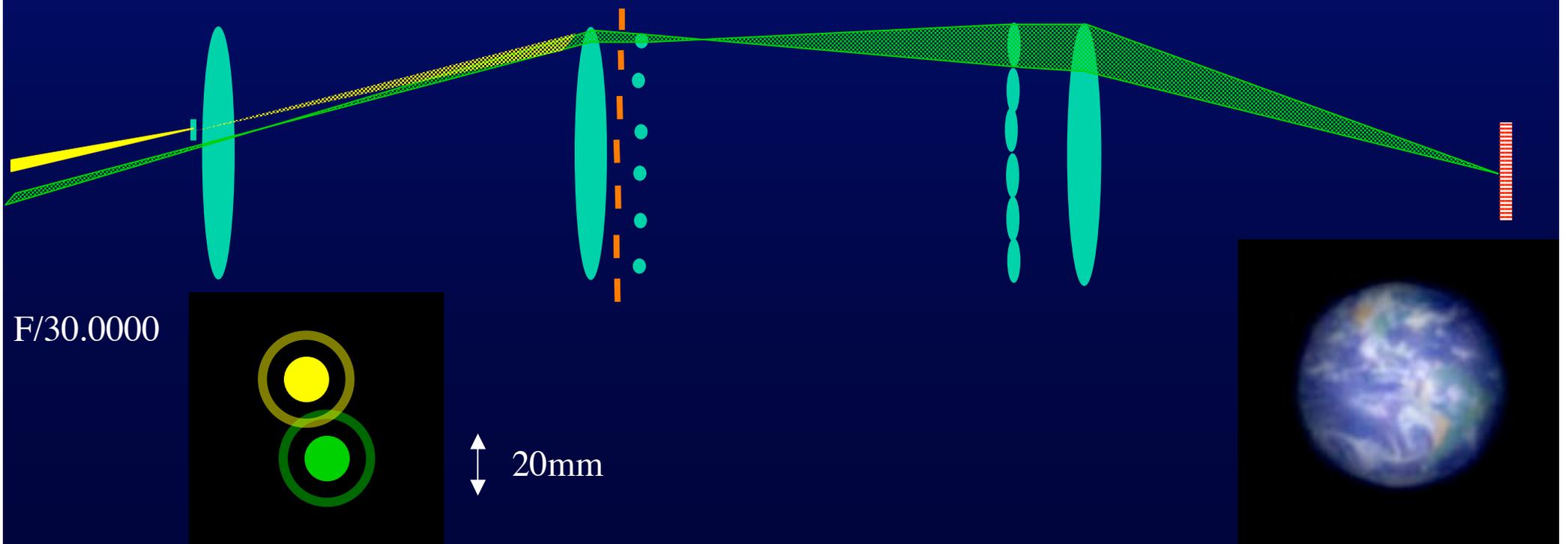
150 miroirs
de 3m
150 km

Terre à 3pc
Pose 30mn

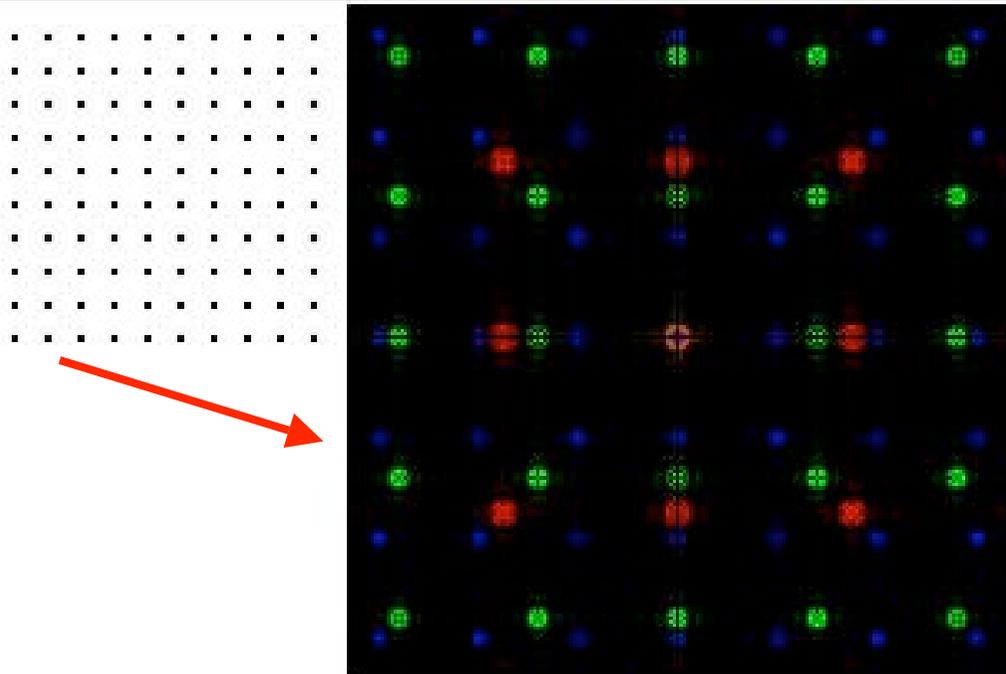


Concept Exo-Earth Imager

- hyper-télescope 300 km, 150 éléments en 3 anneaux
- avec coronographe
- forte densification de pupille : 10 000

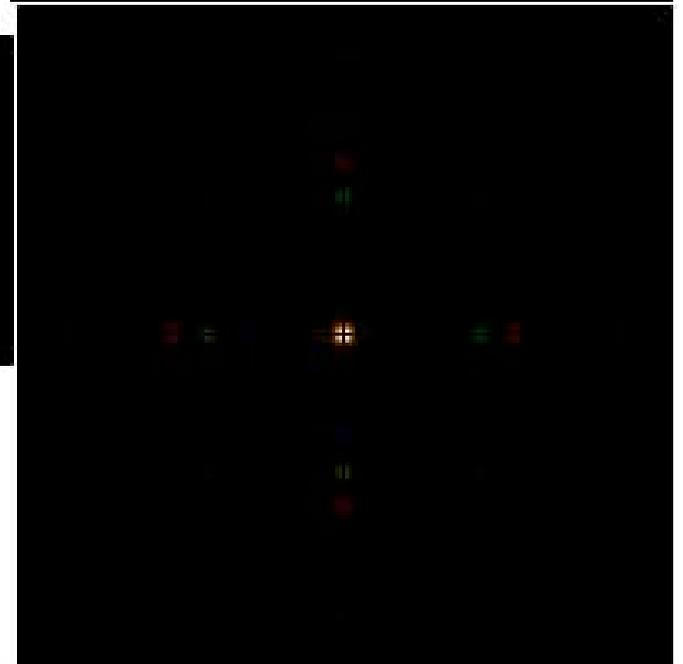
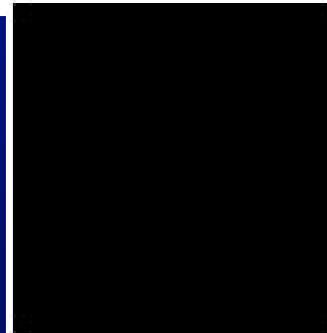
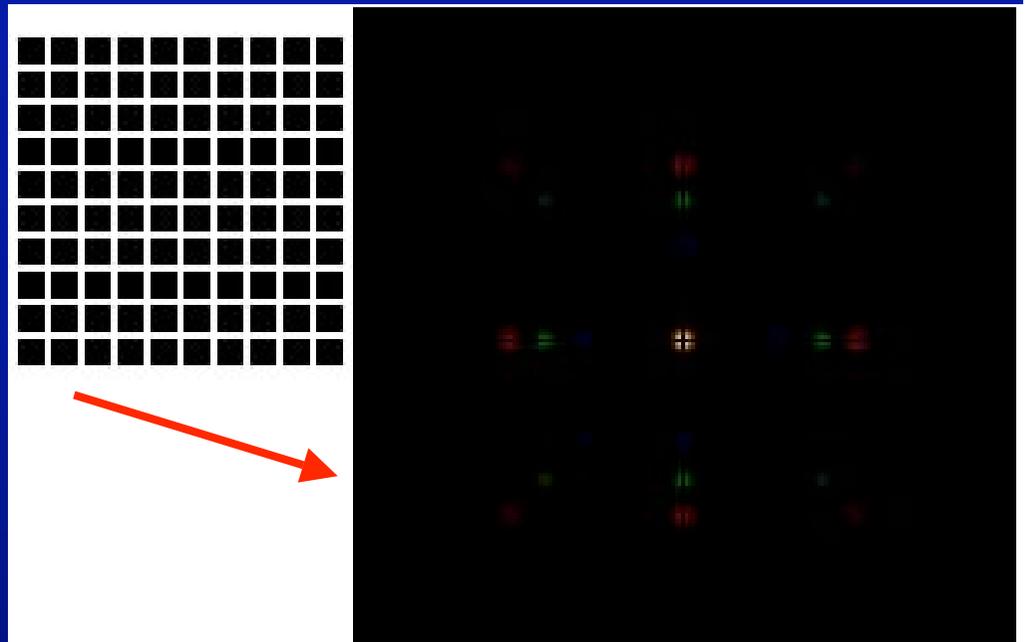


Figures de diffraction calculées



Ouverture diluée

Ouverture dense



Formation de l'image

- Ouverture: $N=150$, 3 cercles de 50 éléments
- Fonction d'interférence \Rightarrow
- L'échantillonnage planète/rayon d'Airy est critique
- Nombre d'éléments résolubles = N^2
- Perte de contraste si $> N^2$



Image simulée d'une Terre vue à 10 années lumière par un hyper-telescope de 150km

150 miroirs de 3m,
pose 30mn

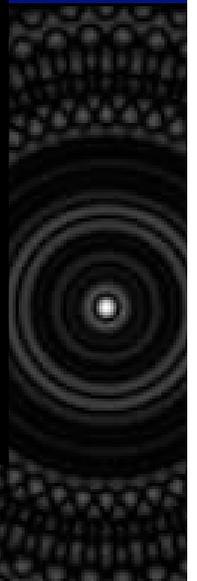
(Labeyrie, **Science**, 17 Septembre 1999)



objet



image brute



Quelle différence entre un radio-interféromètre et un hyper-télescope ?

- En radio et millimétrique:
 - Miroirs pleins (Jodrell Bank, Effelsberg, etc..., IRAM Grenade)
 - Antennes multiples et détection hétérodyne au delà de 100m
- mode hétérodyne:
 - enregistrement d ' hologrammes $h(x,y,t)$
 - Le bruit de détecteur intervient avant l 'amplification par interférence constructive du signal direct

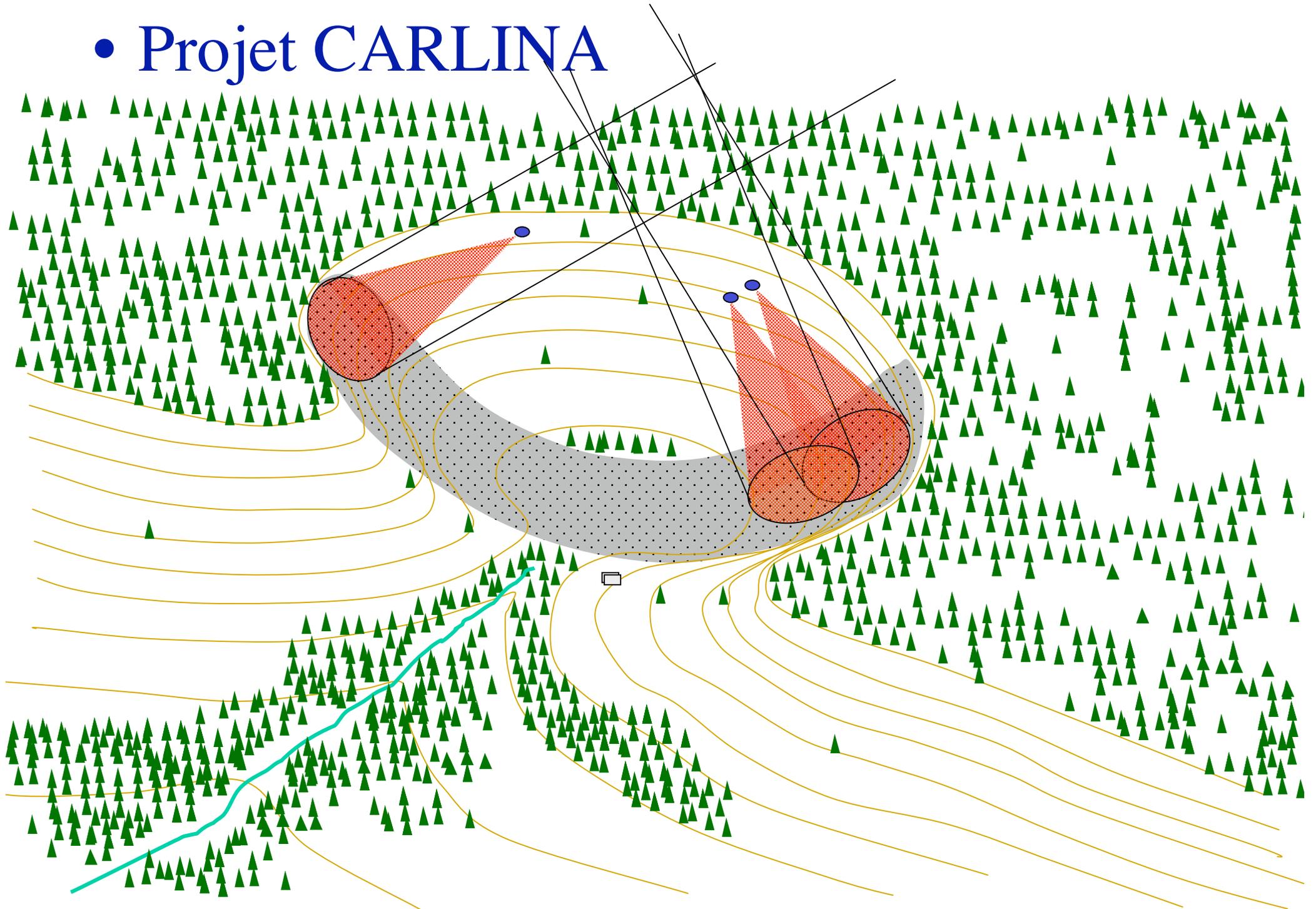
Radio-télescope d'Arécibo (Porto Rico)



One-kilometer hyper-telescope

for details see : www.obs-hp.fr/~labeyrie/

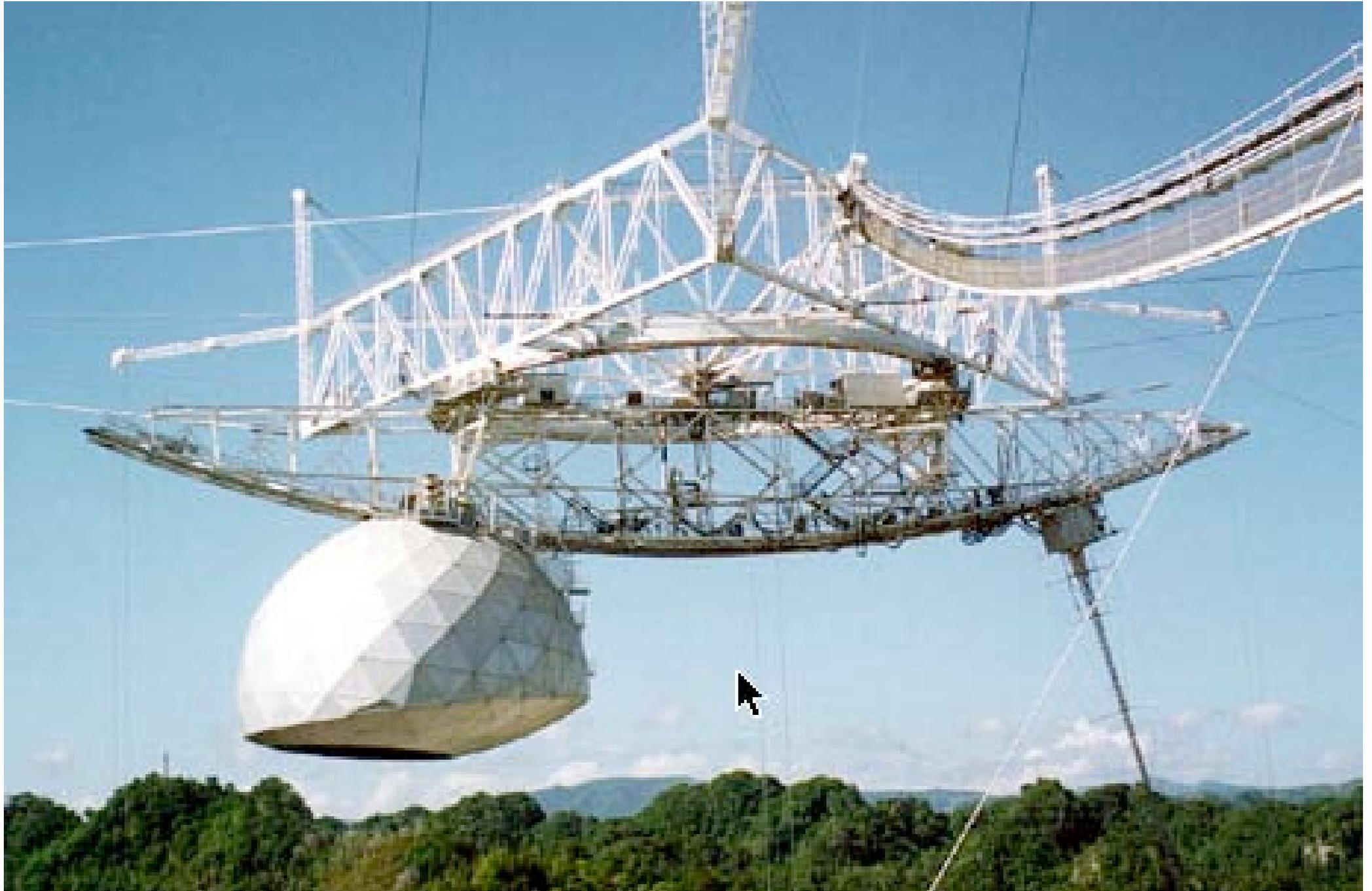
• Projet CARLINA



Sous le miroir



Rail focal orientable

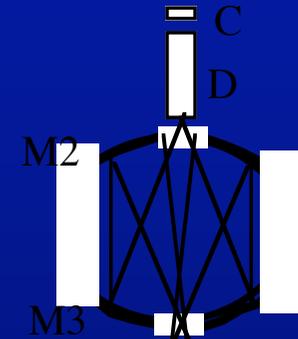


Deuxième chariot et détecteur

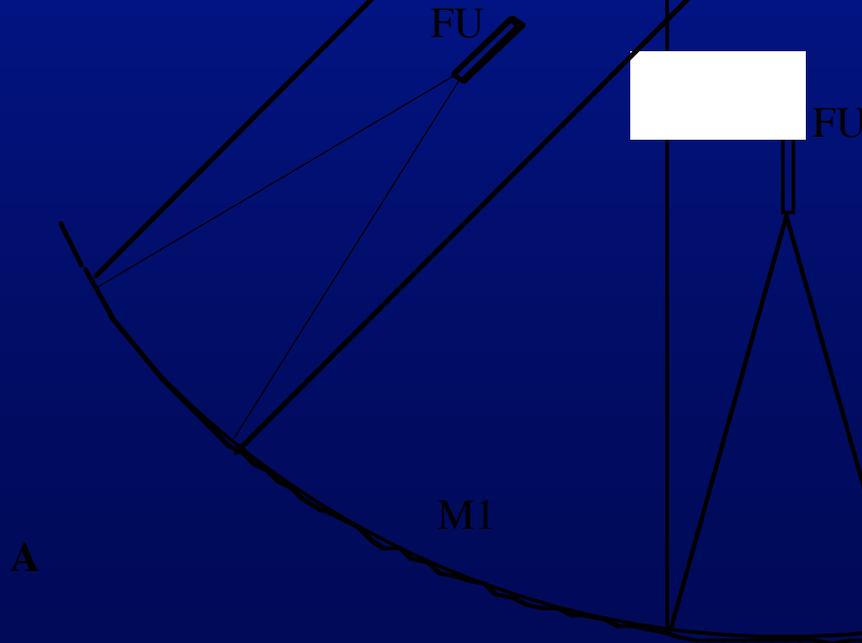




Carlina acanthifolia



Correcteur d'aberration
sphérique (Mertz)



Conclusions

- Interférométrie hétérodyne: intrinsèquement moins sensible avec détecteurs limités par les photons ?
- Signal/bruit de l'hyper-télescope meilleur que « Bracewell nulling » pour exo-planètes
- Hyper-télescopes pour millimétrique et radio:
 - Difficile au sol
 - A développer dans l'espace ?

Quelques adresses :

- Programmes cours : www.college-de-france.fr
- OVLA: Www.obs-hp.fr/~lardiere
- OVLA: Www.obs-hp.fr/~dejonghe
- Projets sol et espace: Www.obs-hp.fr/~labeyrie