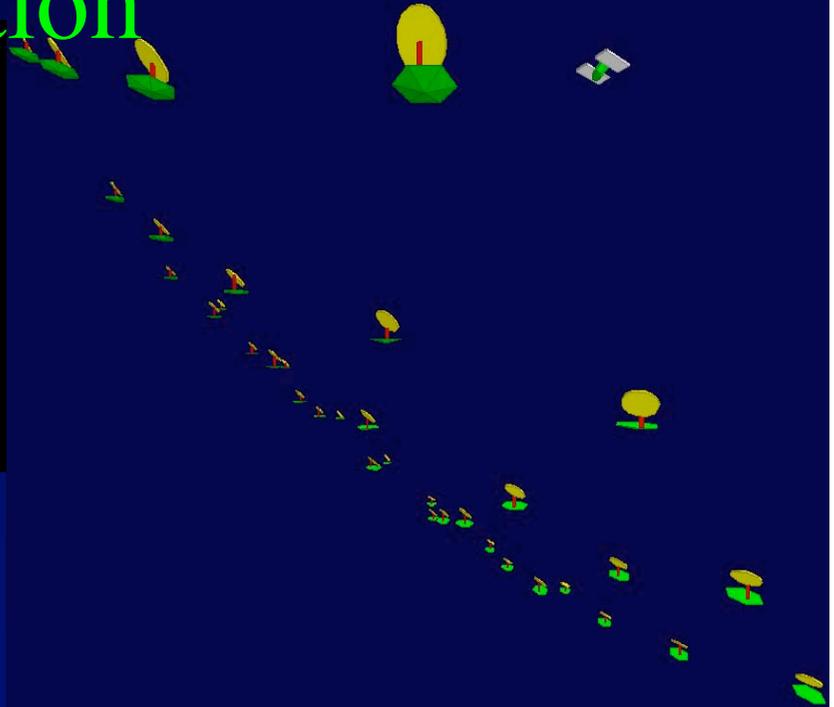
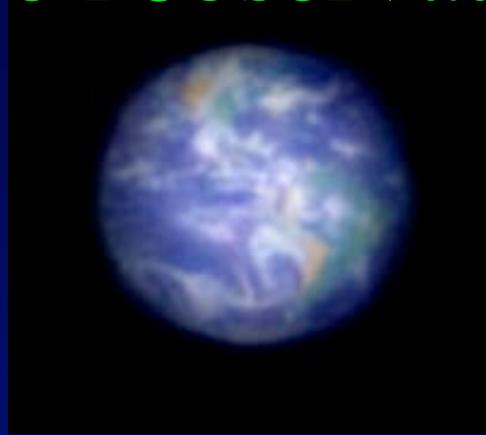


Collège de France

Chaire d' Astrophysique Observationnelle

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



- Pages web sur www.college-de-France.fr
- les fichiers des projections y seront affichés

Coronographie exoplanétaire avec les hypertélescopes

Coronographie optique et infra-rouge pour l'observation
d'exo-planètes dans l'espace

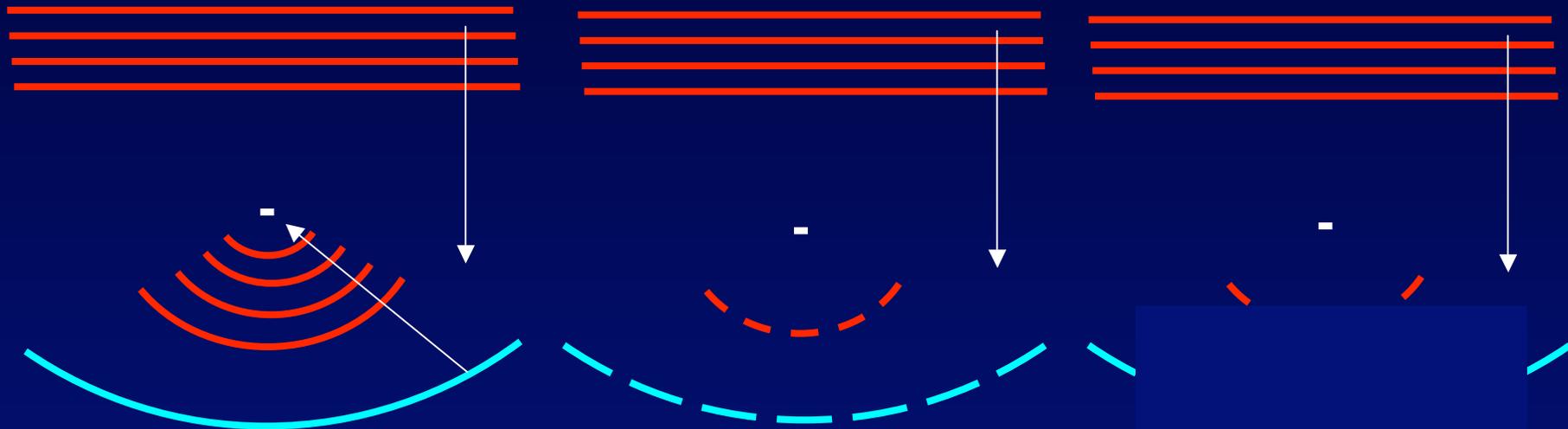
Séminaires :

Jean Schneider, Obs. Paris & LISE : « Imagerie à
haut contraste et planètes extrasolaires »

Denis Mourard, OCA: « La participation de
l'Europe dans la recherche des planètes »

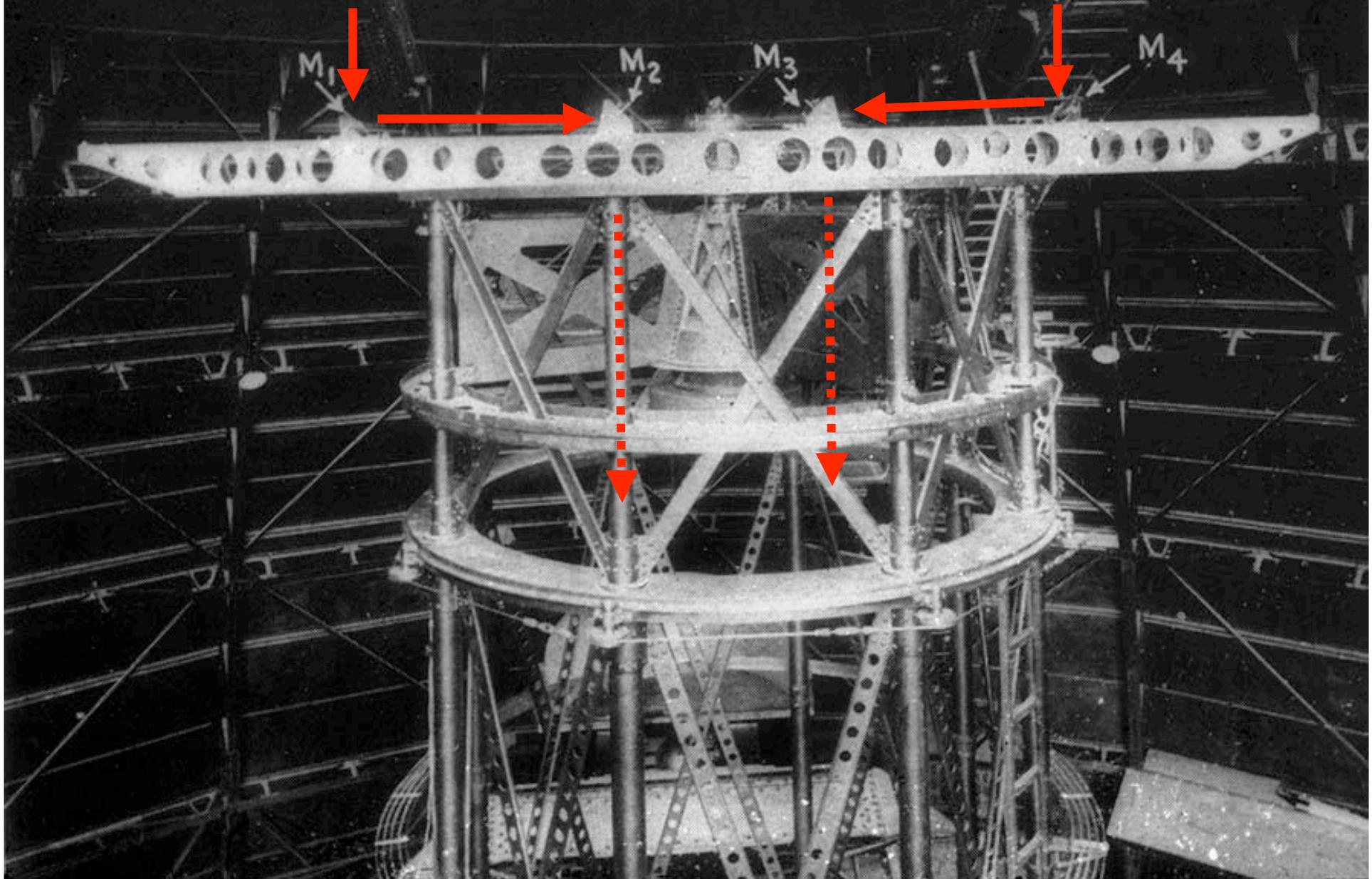
Interférométrie

le télescope géant du pauvre

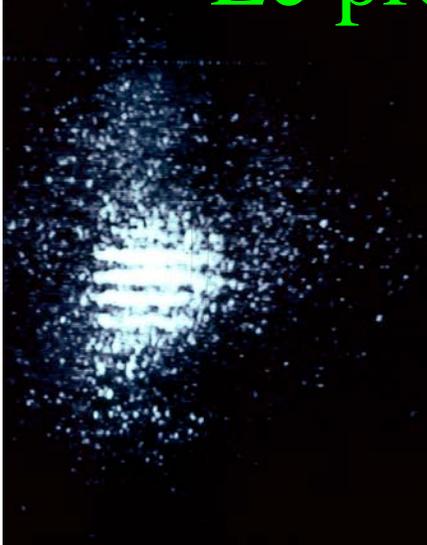


- Marche encore avec deux éléments : image dégradée, mais sans perte de résolution

Poutre de Michelson (Mt Wilson, 1930)



Le premier interféromètre à deux télescopes (1974 à Nice, puis Caussols)



Calern:

Grand Interféromètre à 2 Télescopes



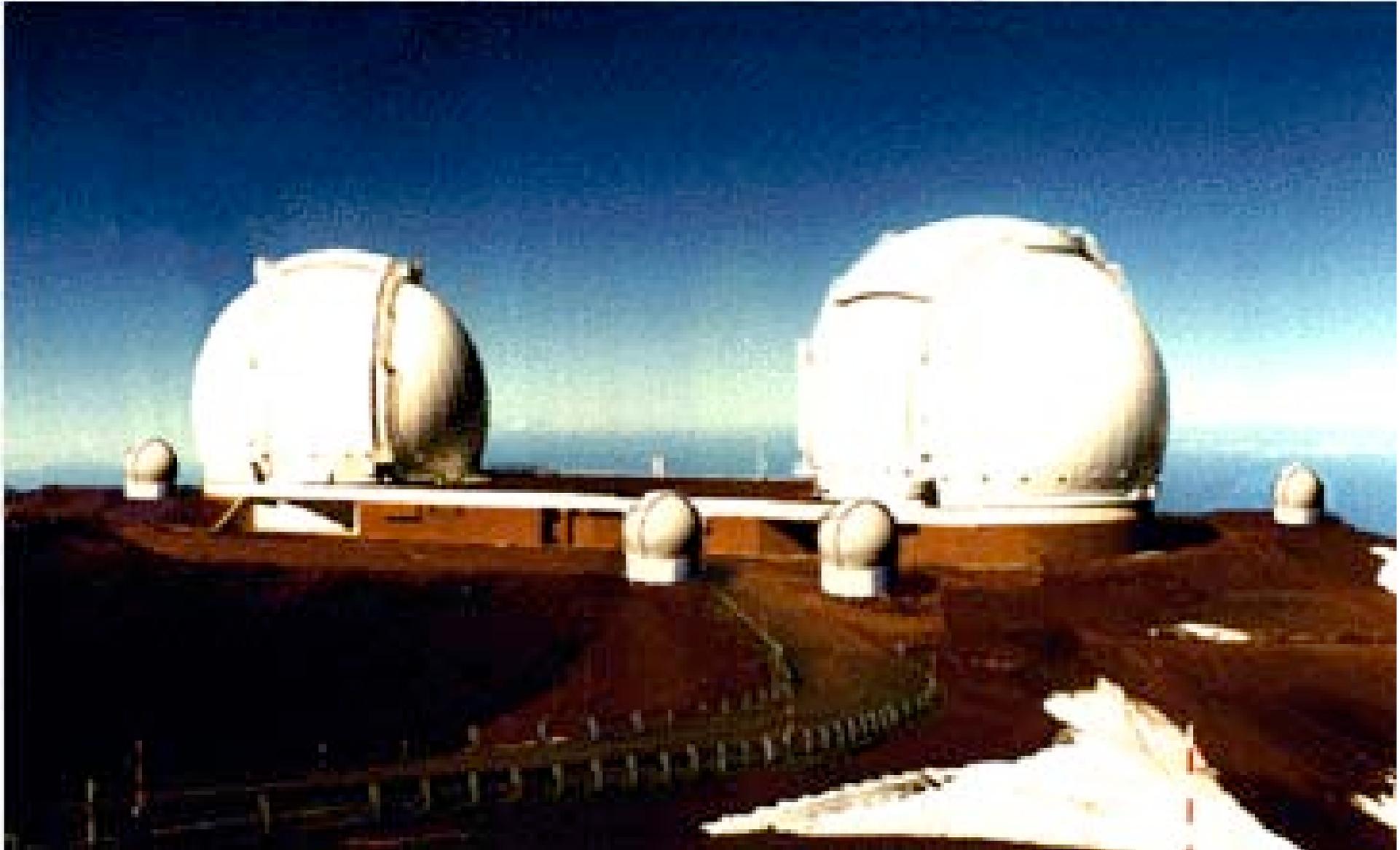
GI2T (2 x 1,5 m, base 67 m)



Franges dans spectre au GI2T



Interférométrie à Hawaïï : deux télescopes Keck de 10m

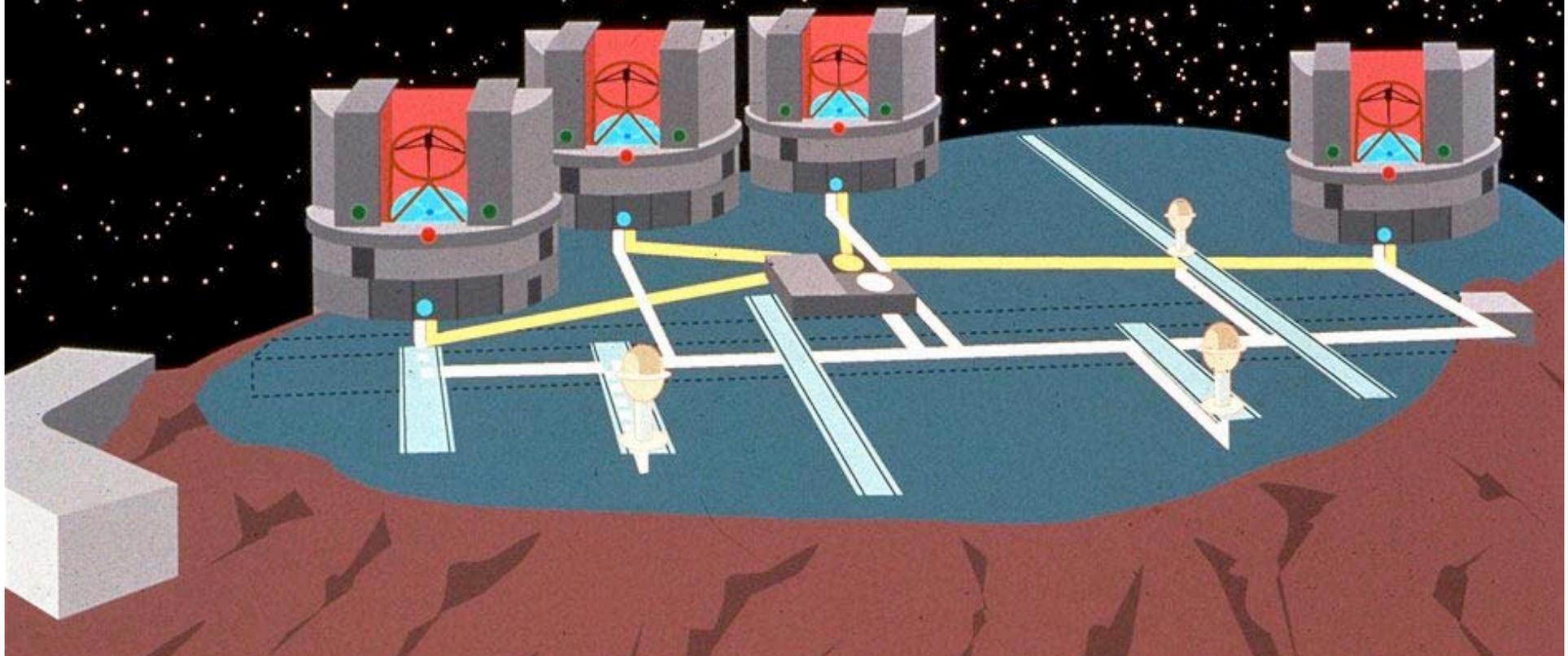


l'interféromètre européen VLTI au Chili

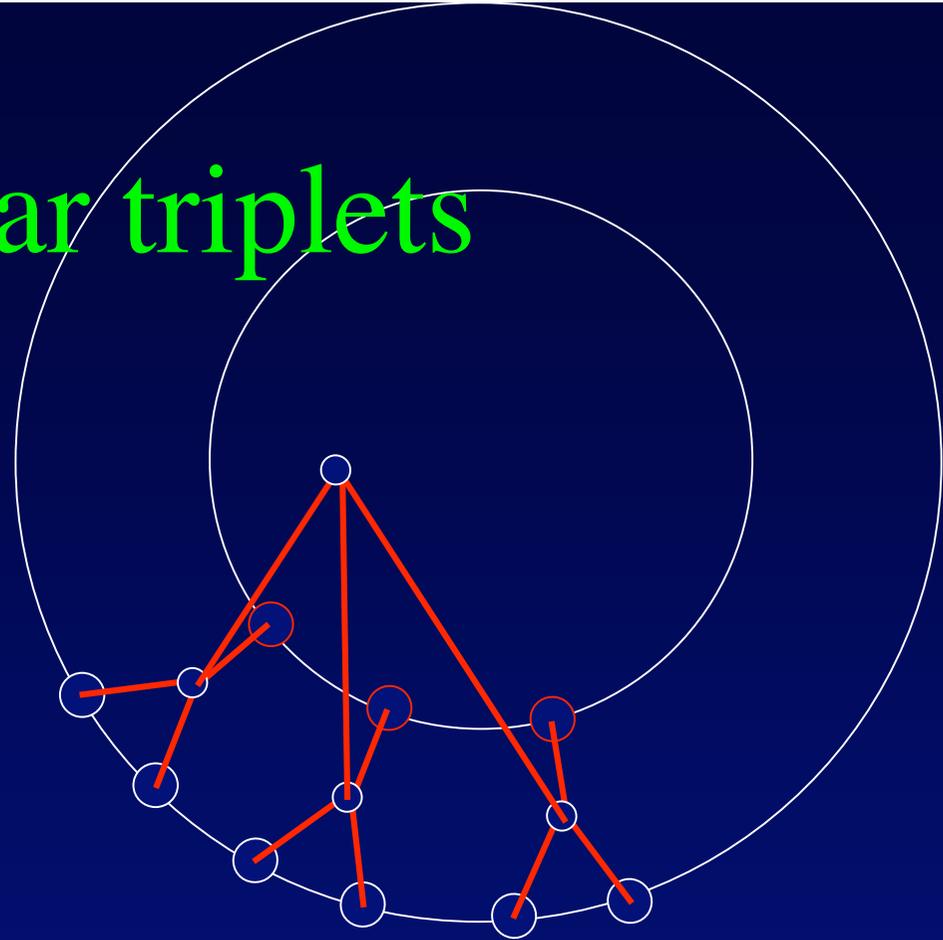


Very Large Telescope Interferometer ESO, Chili

- 3 x 8m + 4 x 1.8m



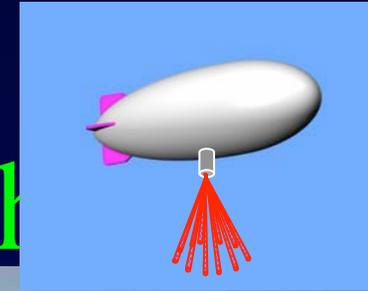
Solution 1: ATs combinés par triplets hiérarchisés



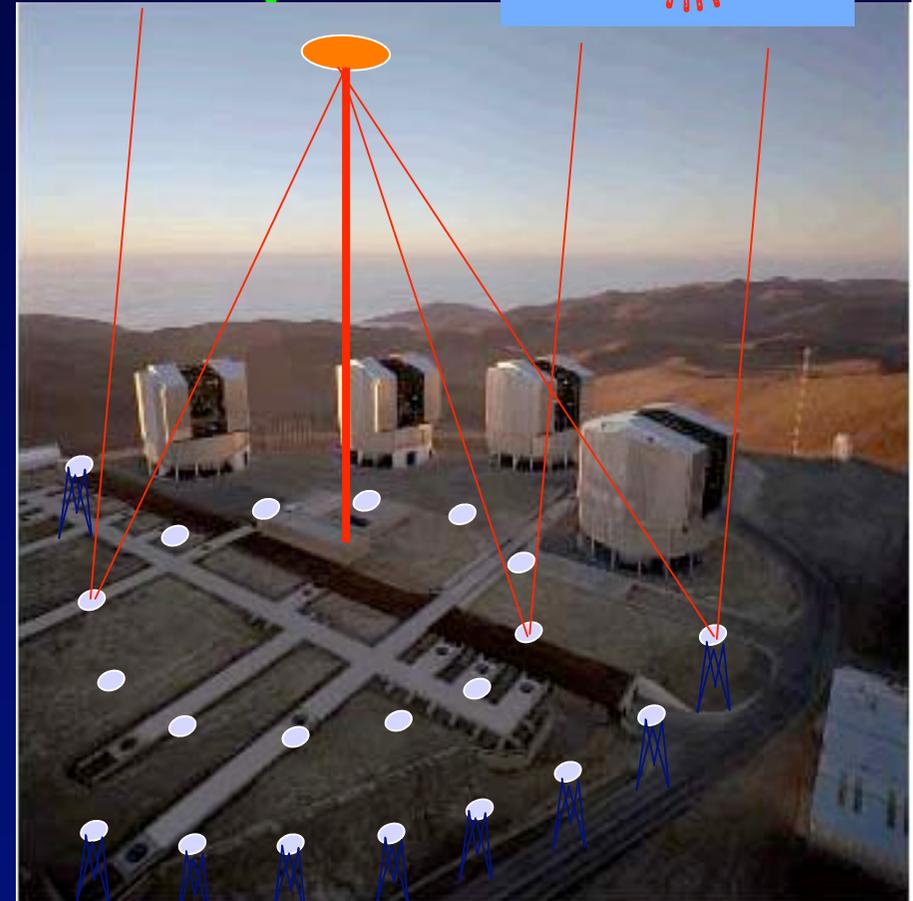
- Combineurs mobiles remplacent les lignes à retard
- Exemple: 1 seule ligne à retard pour raccorder 27 AT aux UT (soit 4 lignes au total)

Solution 2: type Carlina

AT fixes et combineur perche

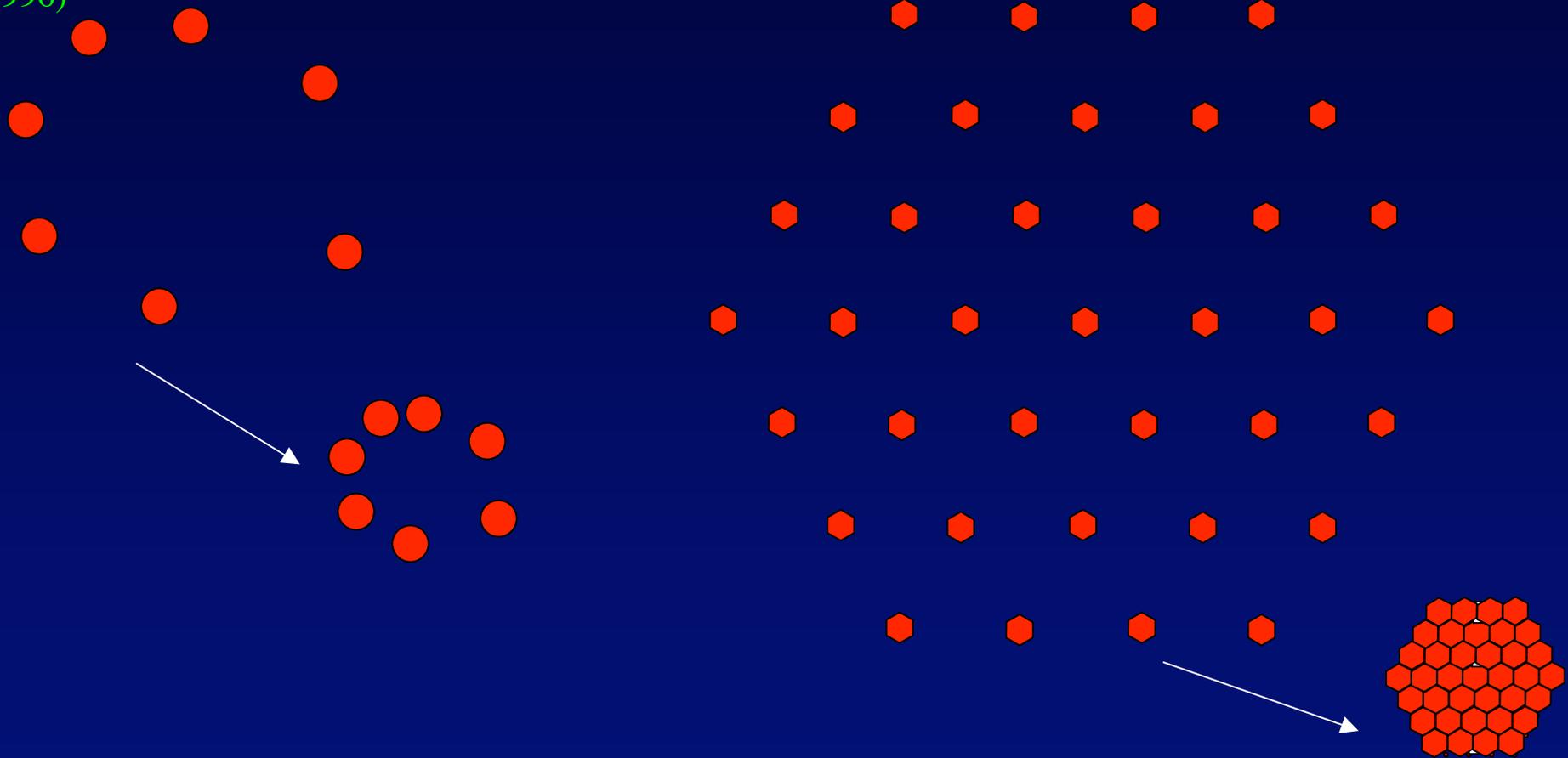


- ATs: miroirs fixes
- Ballon dirigeable à 300 m
- 4 lignes à retard suffisent
- Plusieurs ballons pour science accrue
- Mais: les aberrations du réseau limitent la distance zénithale:



Principe de l'hypertélescope

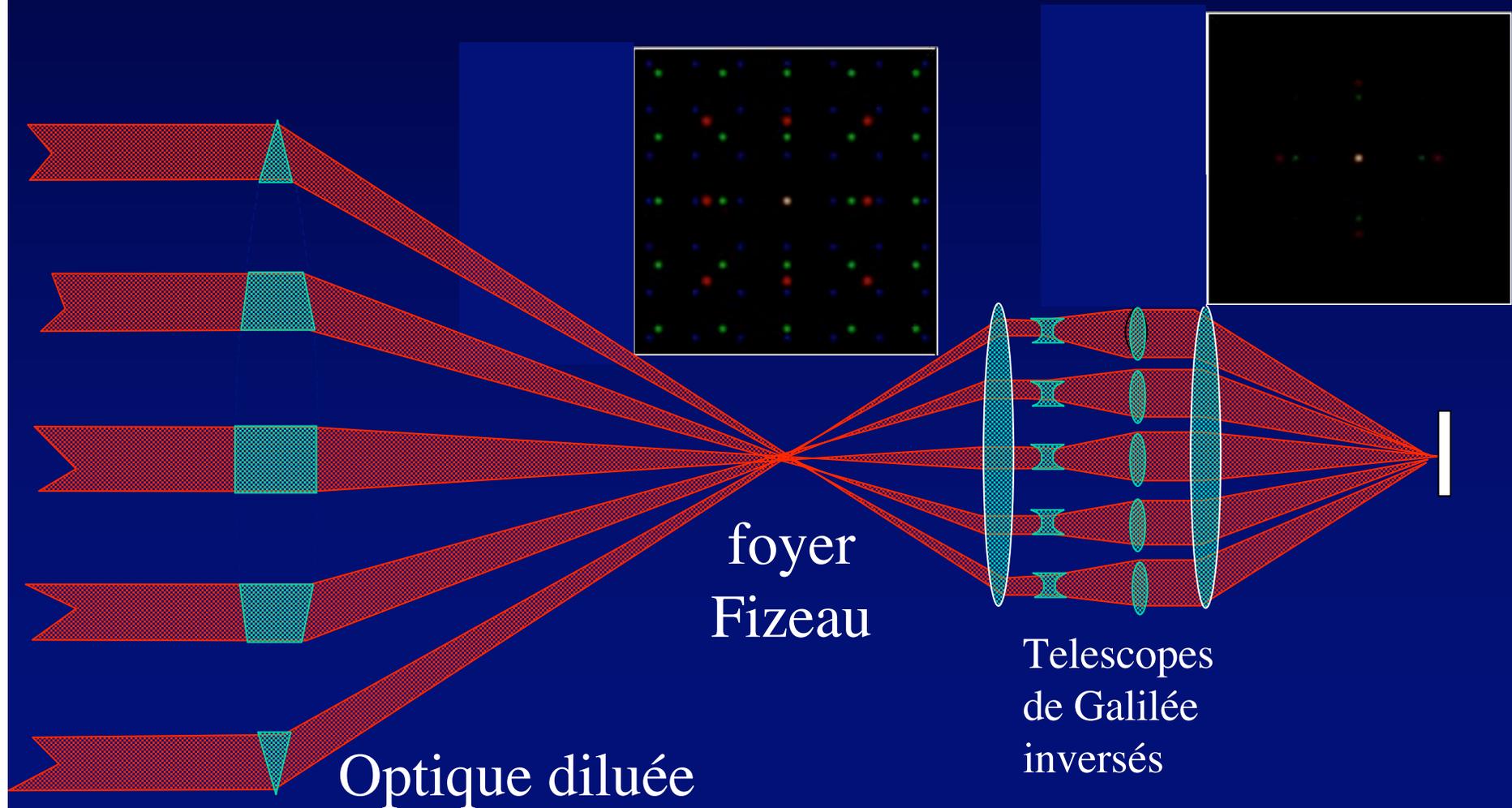
OU « interféromètre imageur multi-ouverture à pupille densifiée » (Labeyrie A&A, 1996)



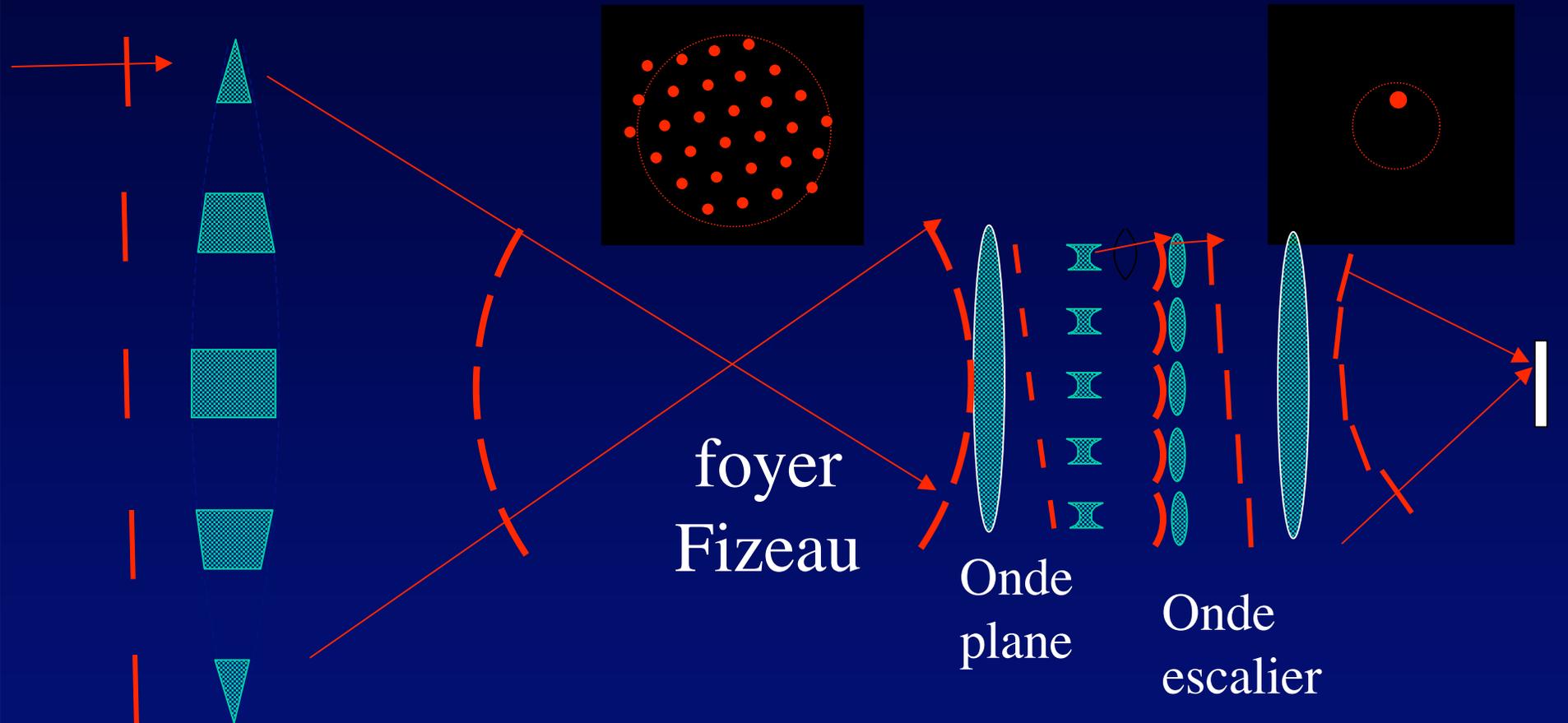
- Densifier en préservant la disposition des centres

Principe de l'hypertélescope

ou « interféromètre imageur multi-ouverture à pupille densifiée »
(Labeyrie A&A, 1996)



Source hors d'axe

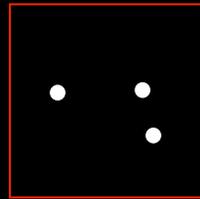


- l'onde plane devient "en escalier"
- l'image est décalée dans l'enveloppe
- pseudo-convolution, champ limité

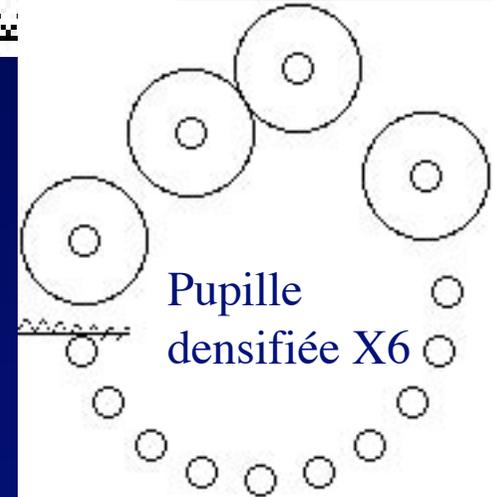
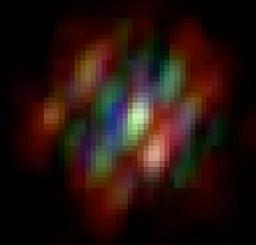
VLT-HT: Image d'une étoile triple



4 UT +10 AT



Étoile triple



Pupille
densifiée X6

Ajouter des petits télescopes ?

- améliore beaucoup si $N > 20$
- mais restreint la distance

4 UT + 36 AT

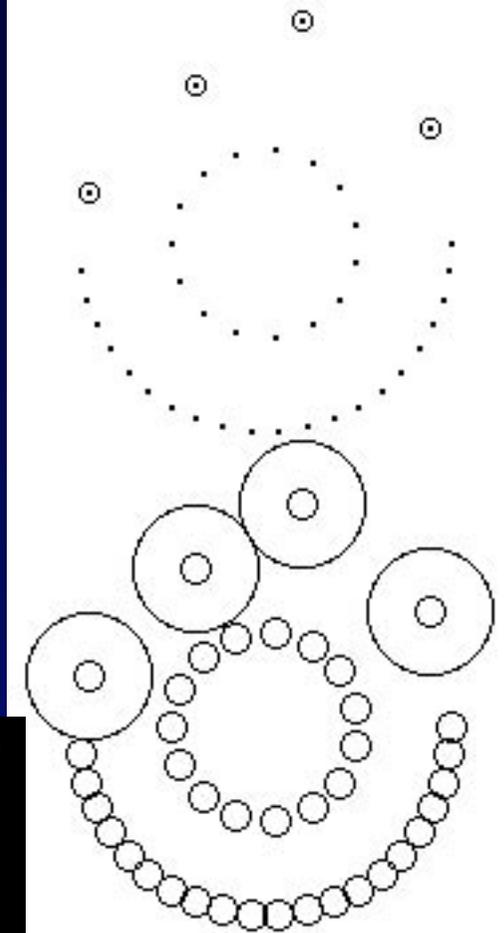
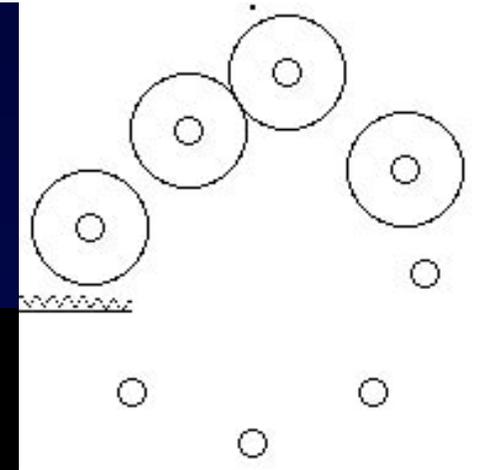


Image hypertélescope au VLTI



4 UT

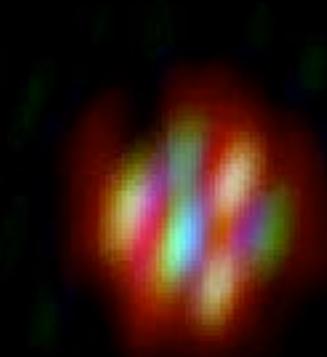
- Exemple hors axe

4 UT + 4 AT

- Les 4 télescopes de 1.8 mètre contribuent faiblement

Richesse du champ

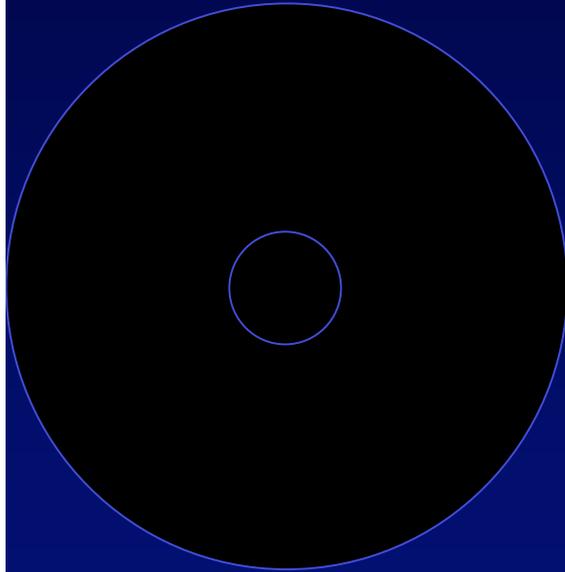
- avec une pupille complètement densifiée:
 - 24x24 resels avec AT seuls
 - 6x6 resels avec UT seuls
 - > 6x6 resels avec UT & AT



Champs d'un hypertélescope périodique complètement densifié:

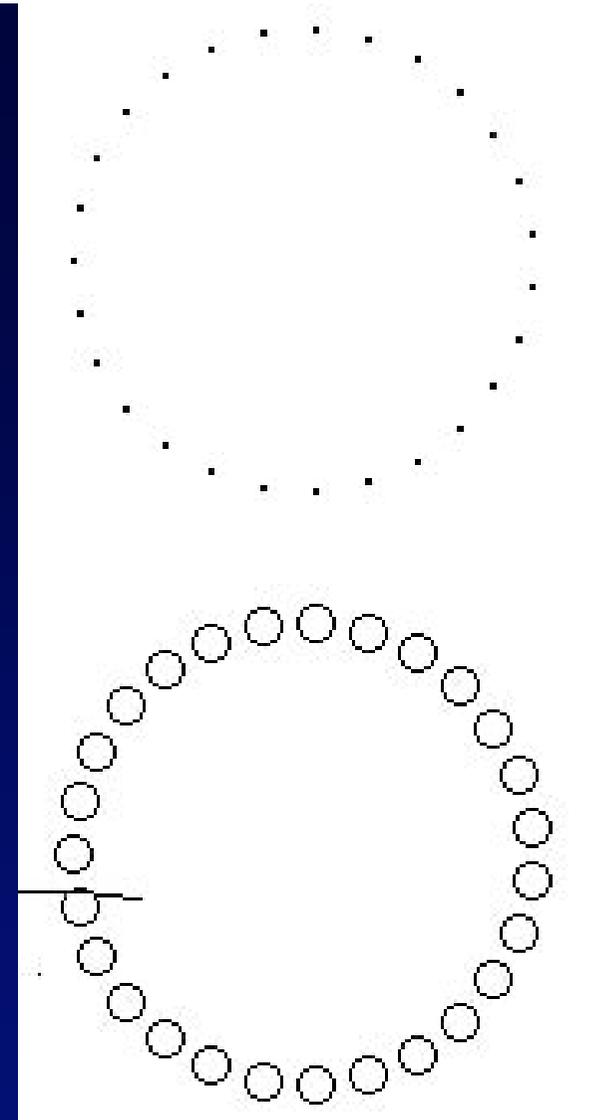
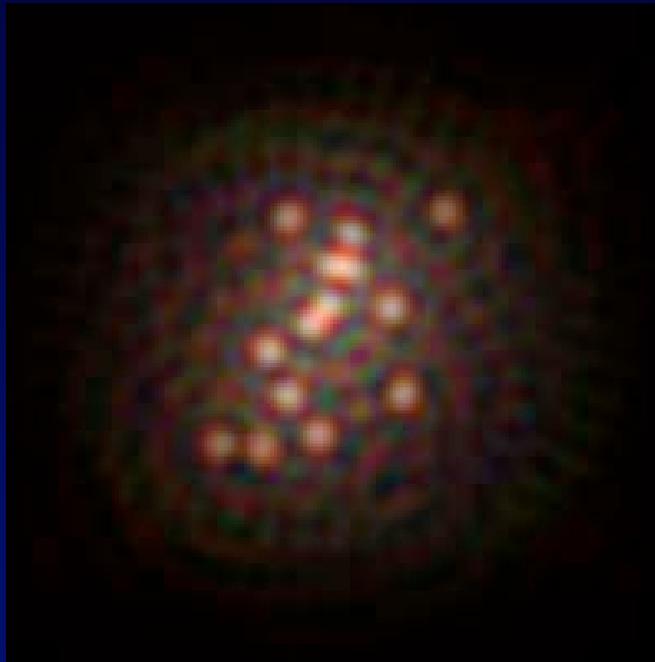
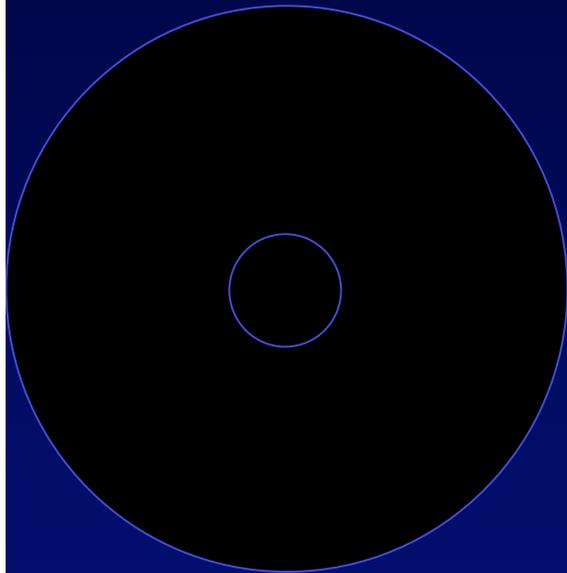
ZOF (Zero Order Field)

et HOF (Higher Order Field)



- ZOF = champ d'imagerie directe, diamètre ciel λ/s
- HOF = champ d'ordre supérieur, diamètre ciel λ/d

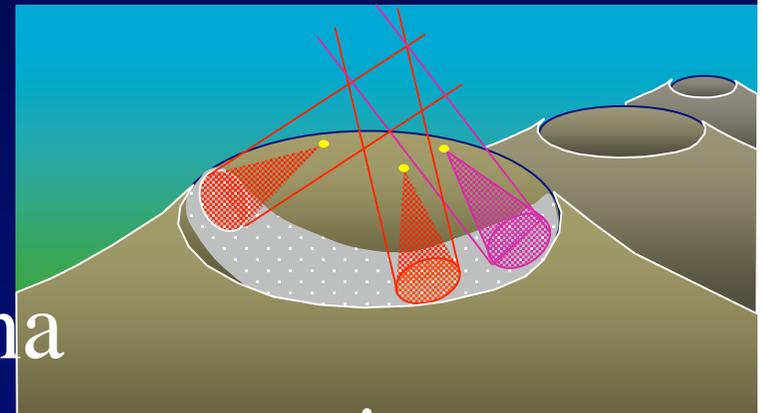
Cas d'un hypertélescope non périodique



- La notion de ZOF subsiste
- Le lobe des sous-ouvertures n'est plus utilisable pour l'imagerie directe, quoique

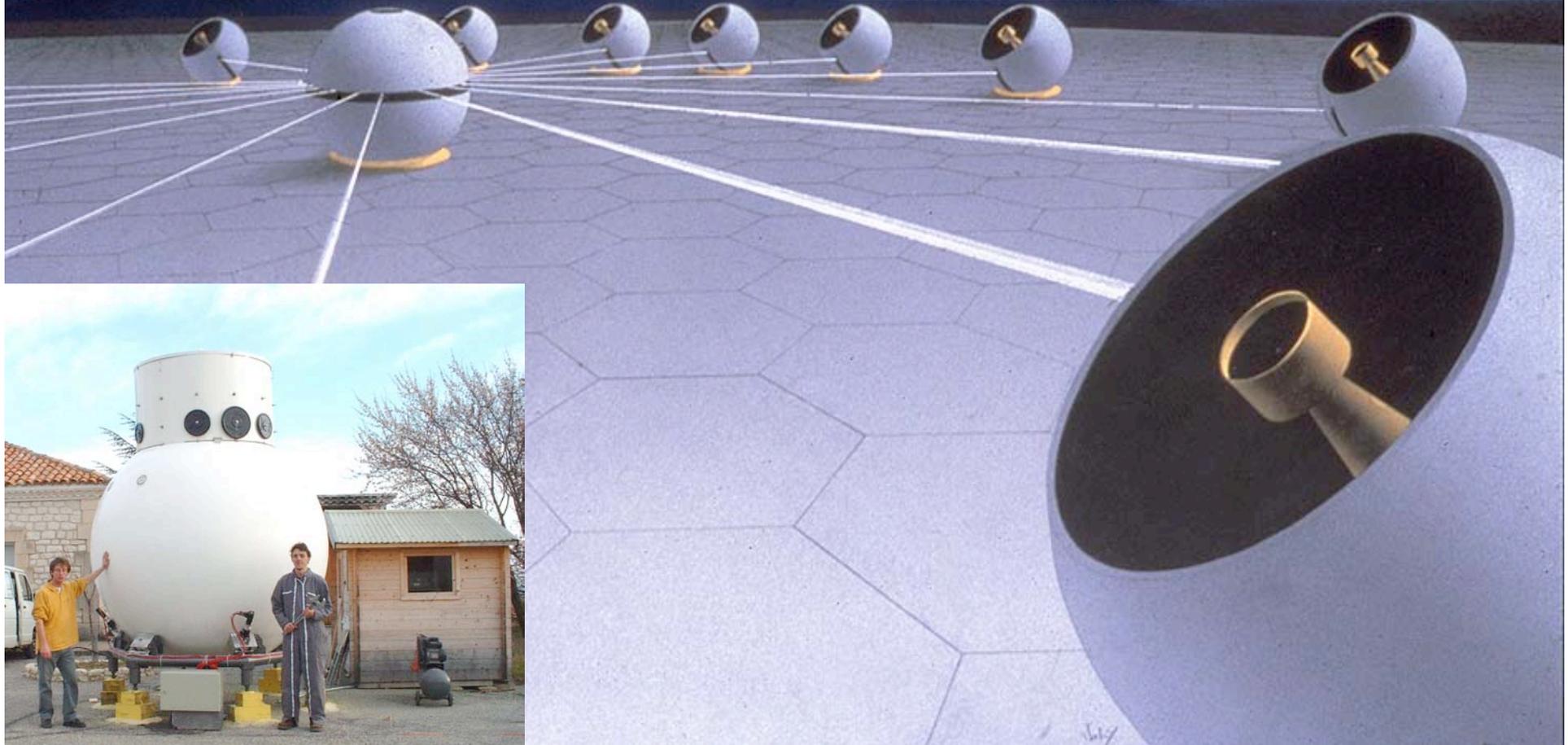
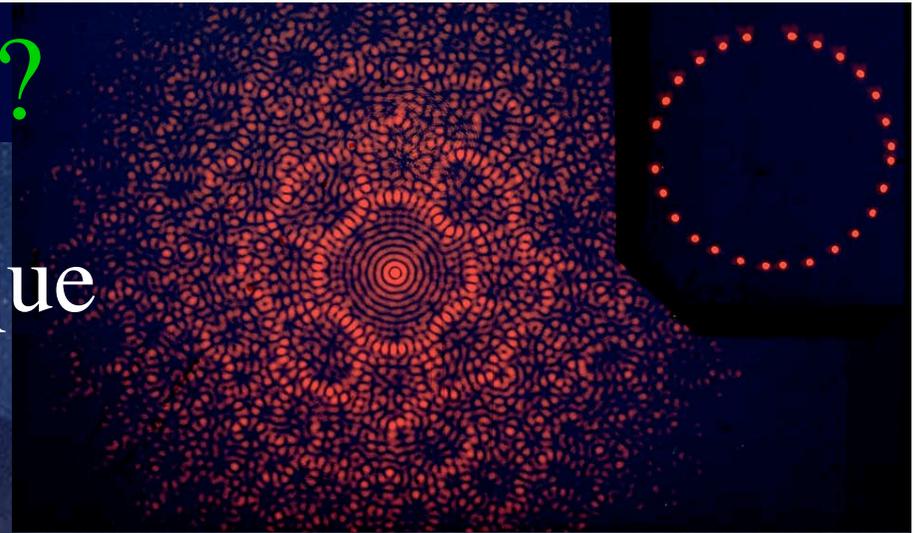
Hypertélescopes au sol

- deux voies possibles:
 - 1- site plat: OVLA
 - 2- site concave: Carlina
- limitation d'ouverture à 1 km pour sites concaves, mais:
 - optique simplifiée
 - multi-objets dans le champ primaire



Applicable à OVLA ?

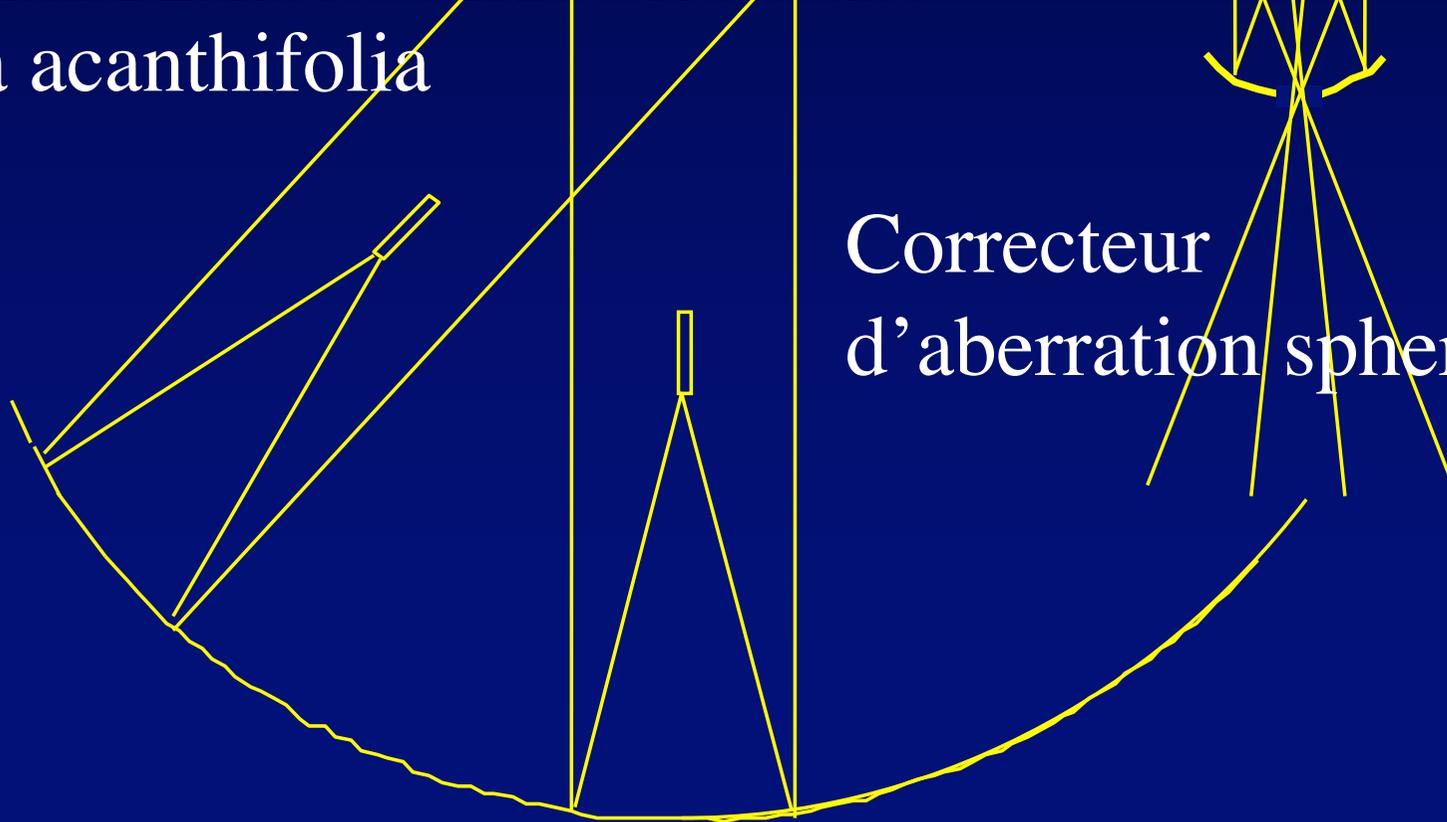
Oui pour version périodique
Si $d > 3$ m





CARLINA, a
ground-based
hypertelescope

Carlina acanthifolia



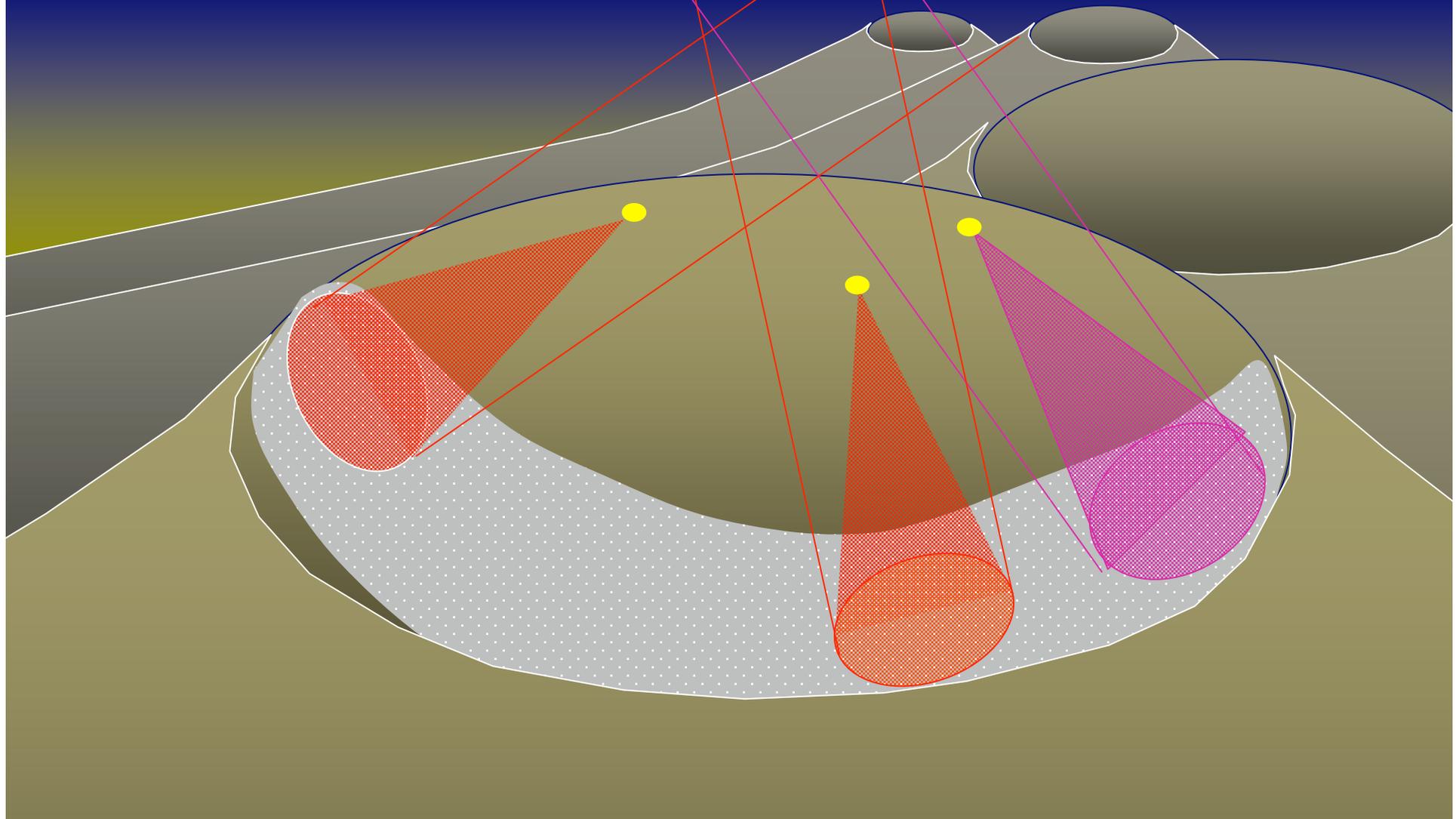
Correcteur
d'aberration sphérique



One-kilometer hypertelescope

10,000 mirrors of 1m, 5 km array

Imaging to mag. 38, cosmology

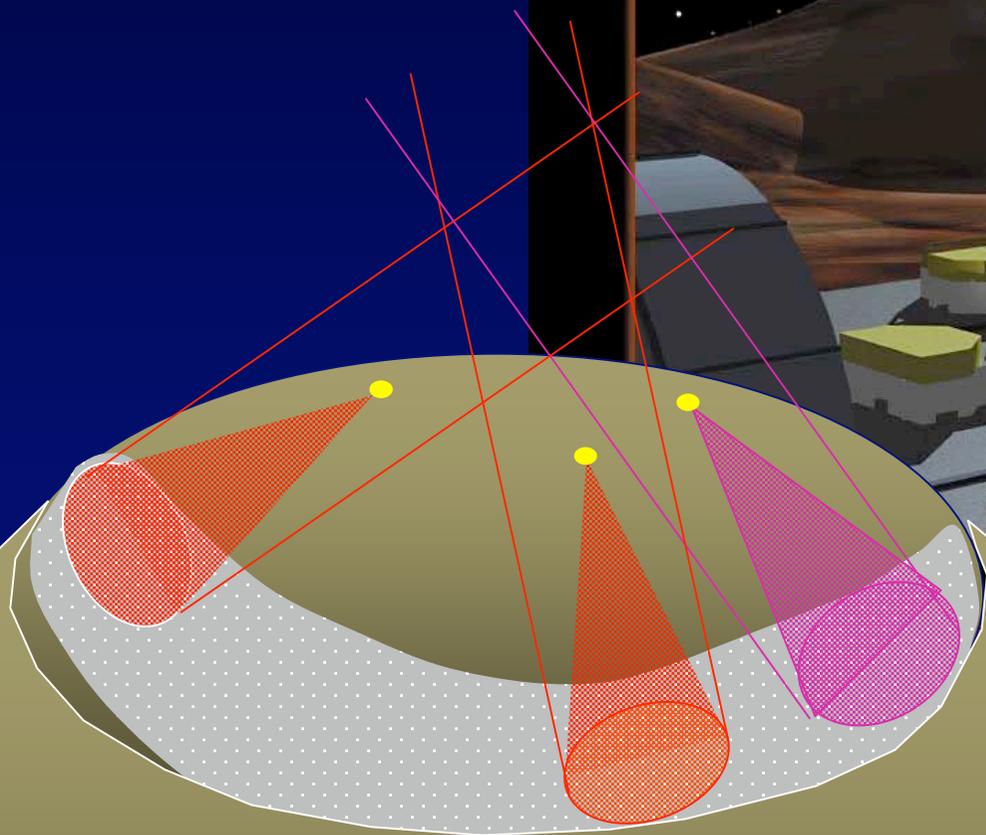


ESO: Over Whelmingly Large telescope (OWL)

- Diamètre 100 m, surface 7 000 m²
- Magnitude 35 à 38, avec optique adaptative
- Étude en cours



Eclater OWL ?



Scientific Organizing Committee

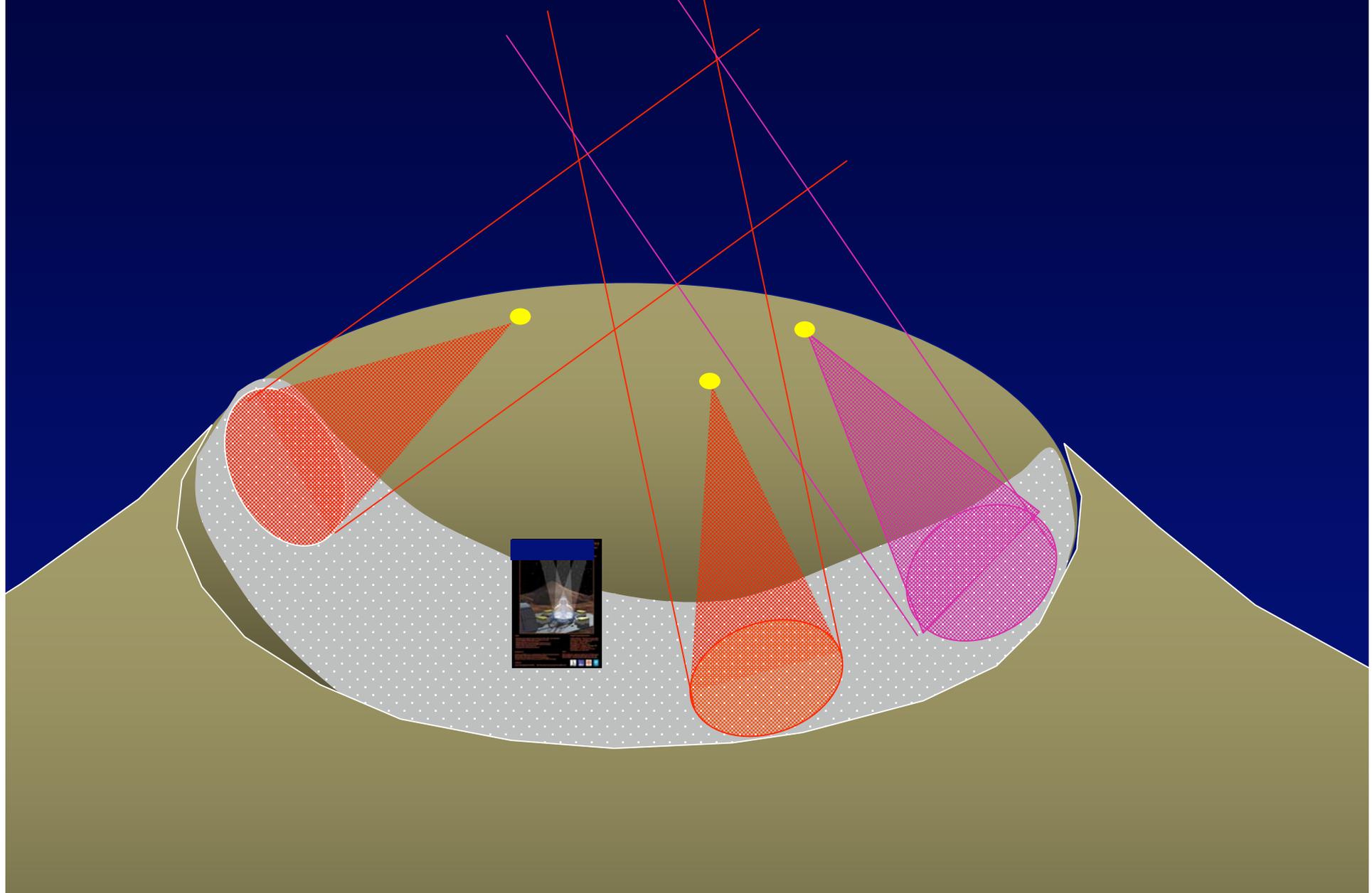
- Torben Andersen - University of Lund, Sweden
- Francesco Bertola - University of Padova, Italy
- Chris Dainty - Imperial College, UK
- Rick Dekany - Caltech, USA
- Brent Ellerbroek - Gemini, USA
- Ed Kibblewhite - University of Chicago, USA
- Gerard Rousset - ONERA, France
- Michel Tallon - University of Lyon, France
- Wizinowich - Keck, USA

lescopes

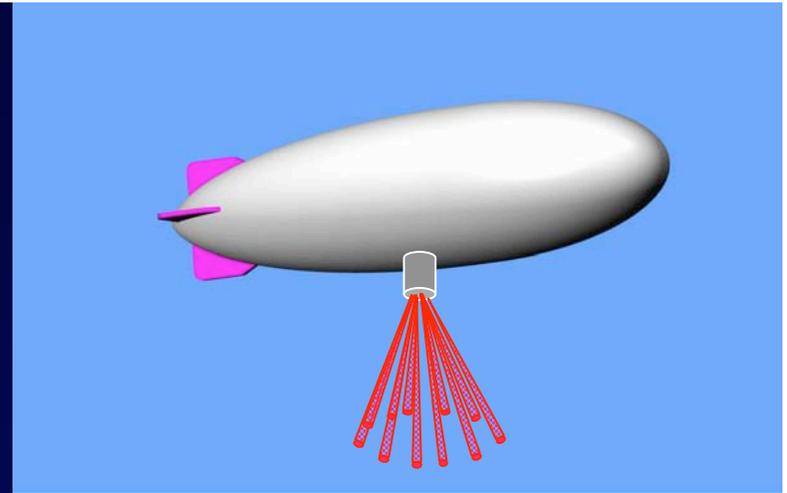
Observatory of Padova, Italy
 Observatory of Arcetri, Italy
 Observatory, Germany



Eclater OWL: échelle comparée



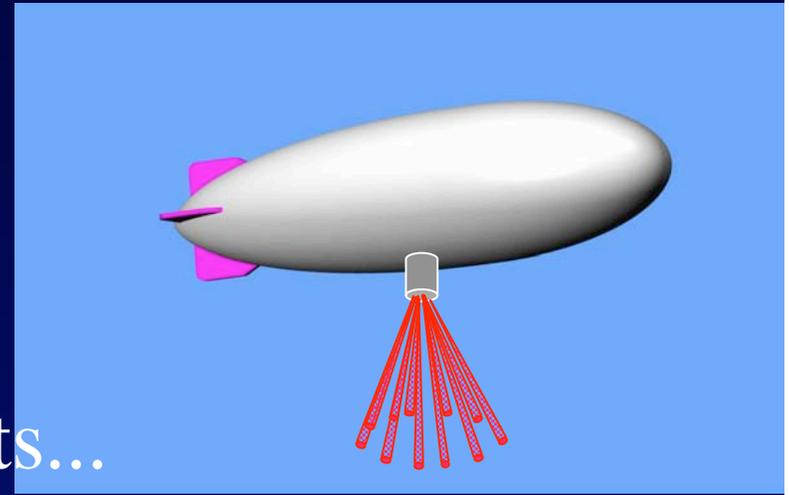
Faisabilité d'une version « éclatée » de OWL



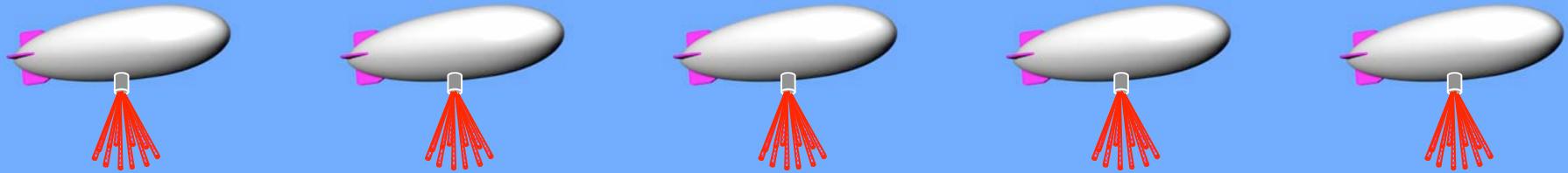
- Hypertélescope à ouverture diluée de 1 kilomètre
- Cratère de 5 km, avec miroirs fixes
- Ballons portant les optiques focales
- Optique adaptative:
 - avec étoile artificielle sur satellite ?
 - méthode de Townes ?

Technique comparée

- Structures très différentes
 - Cratère et ballons , ou
 - Monture géante
- Posent des problèmes différents...
- ... mais similaires pour l'optique adaptative
- ... qui reste un problème majeur..
- ... sauf dans l'espace



Science comparée



- Même magnitude limite si:
 - Surface identique
 - Optique adaptative
- Résolution accrue avec version hypertélescope
- Exo-planètes
- Physique stellaire: imagerie résolue
- Univers lointain, cosmologie

Galaxies lointaines et cosmologie

- Imageable par hypertélescope ?
- oui si $N=2000$

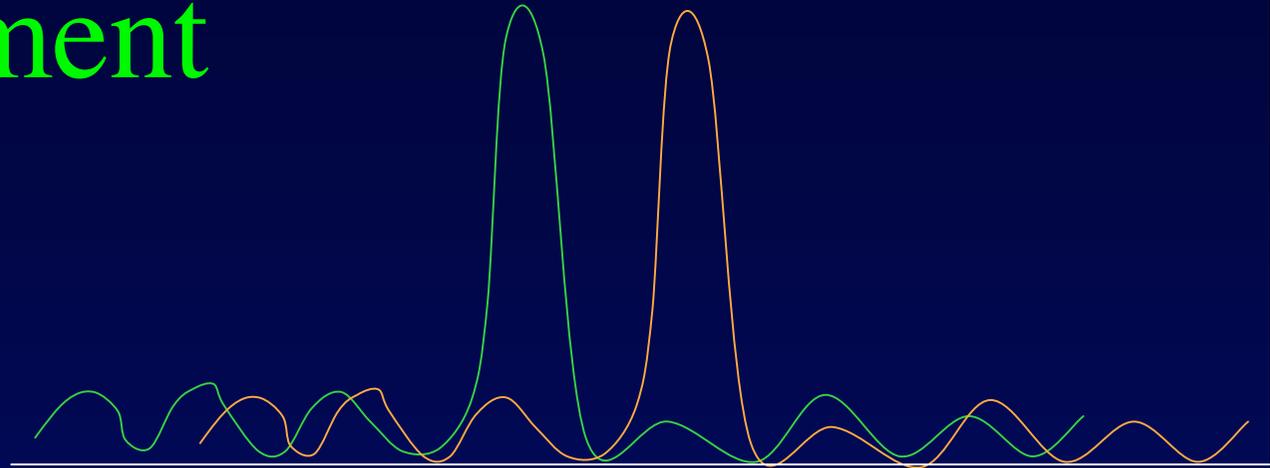


Hubble Deep Field

HST · WFPC2

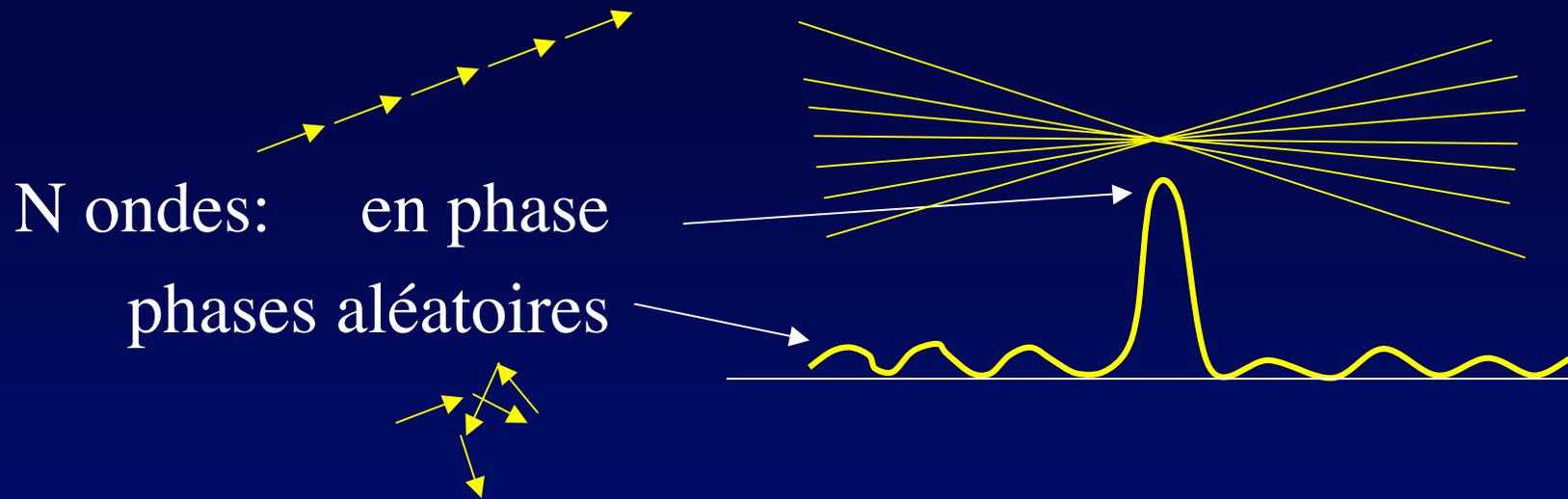
PRC96-01a · ST Scl OPO · January 15, 1996 · R. Williams (ST Scl), NASA

Encombrement des images



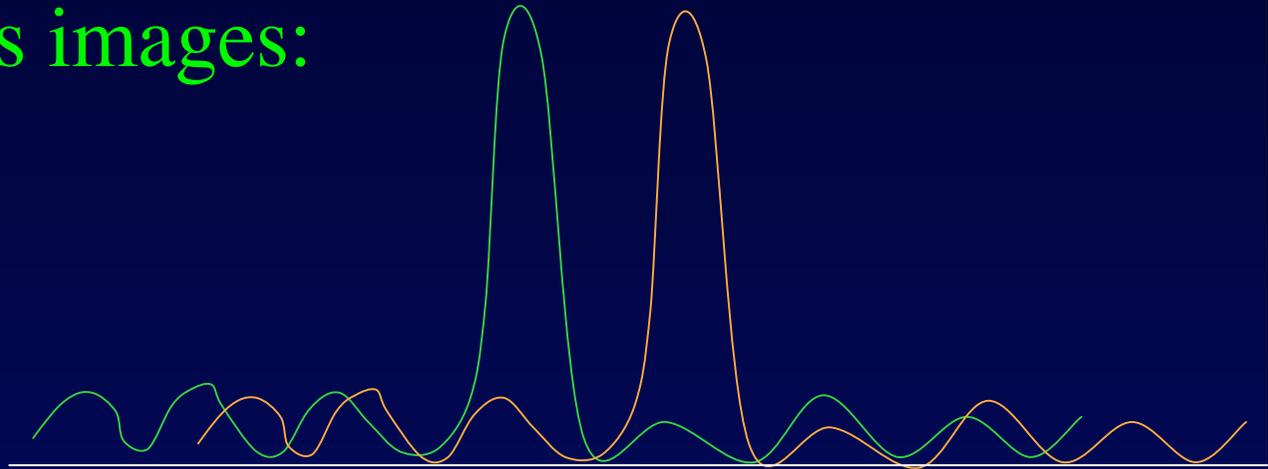
- r = nombre de sources par “lobe ciel” λ/d
- Perte de contraste catastrophique si
 $r > N$ ou N^2 , selon redondance
- **Même limitation pour interféromètres Fizeau et hypertelescopes, ne dépend pas des bases**
- Nombre sources max. par seconde carrée:
 $2.3 \cdot 10^{-11} r (d / \lambda)^2$

Pic et halo



- Pic:
 - addition des amplitudes vibratoires
 - intensité $I_{\text{pic}} = (N a)^2 = N^2 a^2 = N^2 I$
- Halo moyen : addition des intensités $I_{\text{halo}} = N I$
- Rapport d'intensités: $I_{\text{pic}} / I_{\text{halo}} = N$

Encombrement des images: exemples

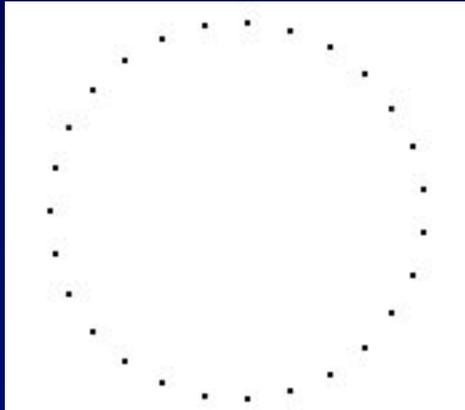


- $N = 27$, cercle non redondant avec ouvertures de 1m:
 - 729 étoiles ou 27 galaxies de 27 resels par « lobe ciel » de 0,1 “
- $N = 7\ 000$ (OWL éclaté):
 - non redondant: 10 millions d 'étoiles ou 10 000 galaxies de 1 000 resels.....
 - périodique: 7000 étoiles ou 100 galaxies de 70 resels

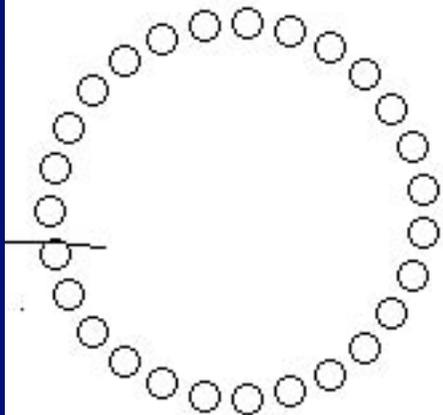
Encombrement des images

- Exemple: 27 ouvertures

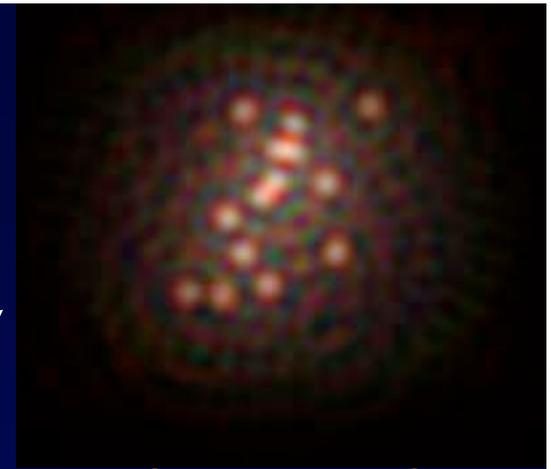
entrée



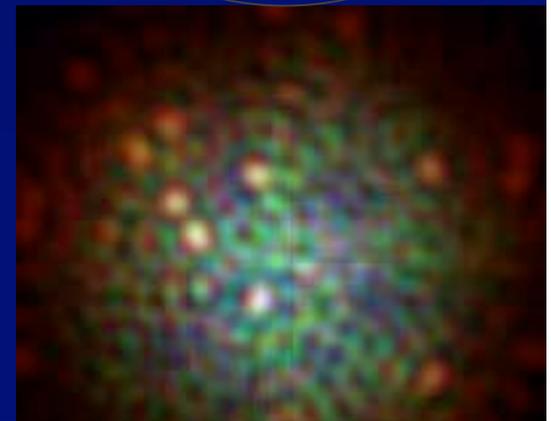
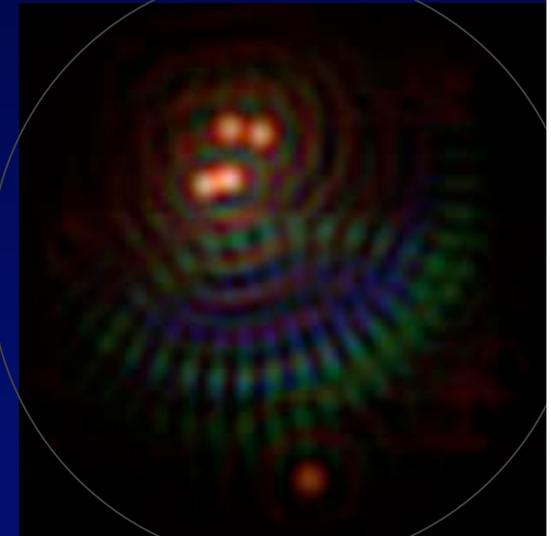
sortie



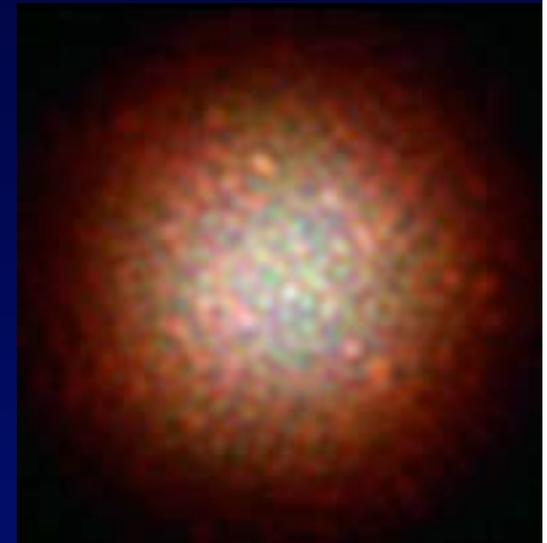
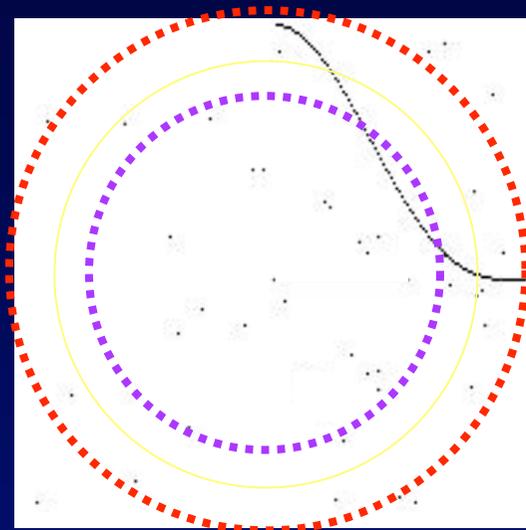
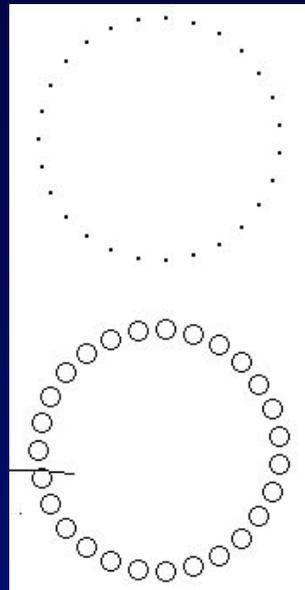
15 étoiles



60 étoiles

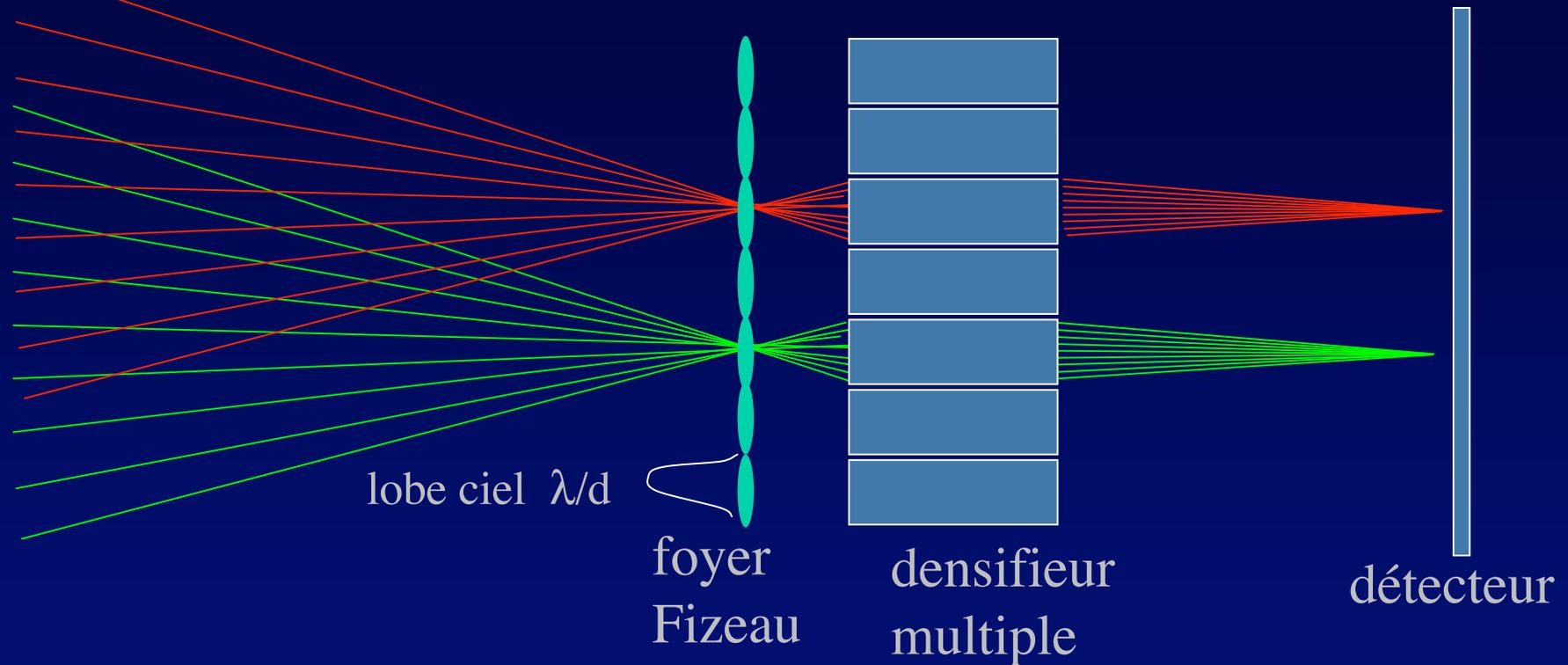


Encombrement



- 27 ouvertures, non-redondantes
- 101 étoiles, blanches, égales intensités, dont 16 dans le champ bleu

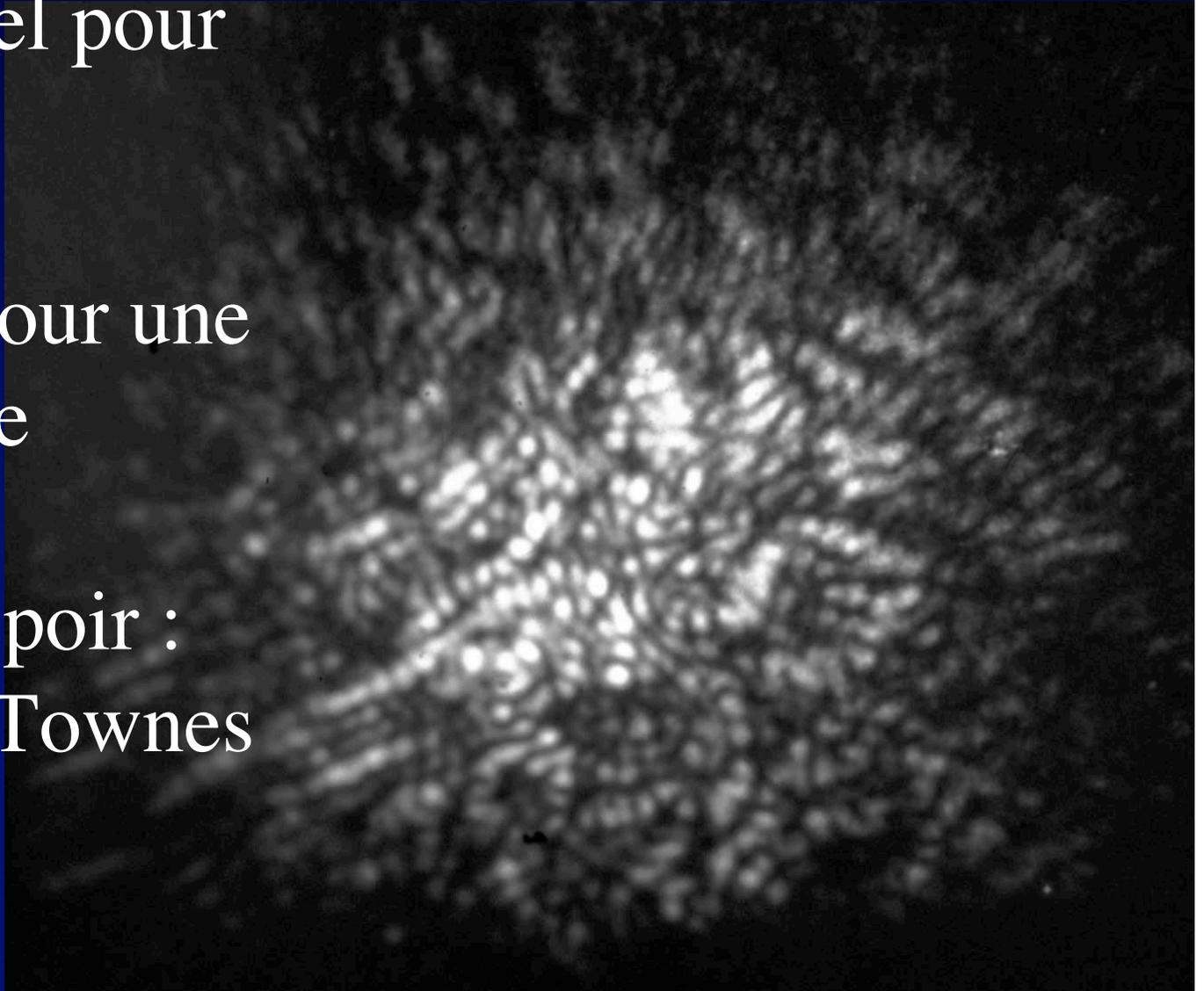
cosmologie avec OWL éclaté: champ multiple



- Optique intégrée pour 1 000 x 1 000 densifieurs
- Poses décalées pour reconstruction mosaïque

Optique adaptative

- déjà essentiel pour OWL
-et aussi pour une version éclatée
- un nouvel espoir : le LIDAR de Townes

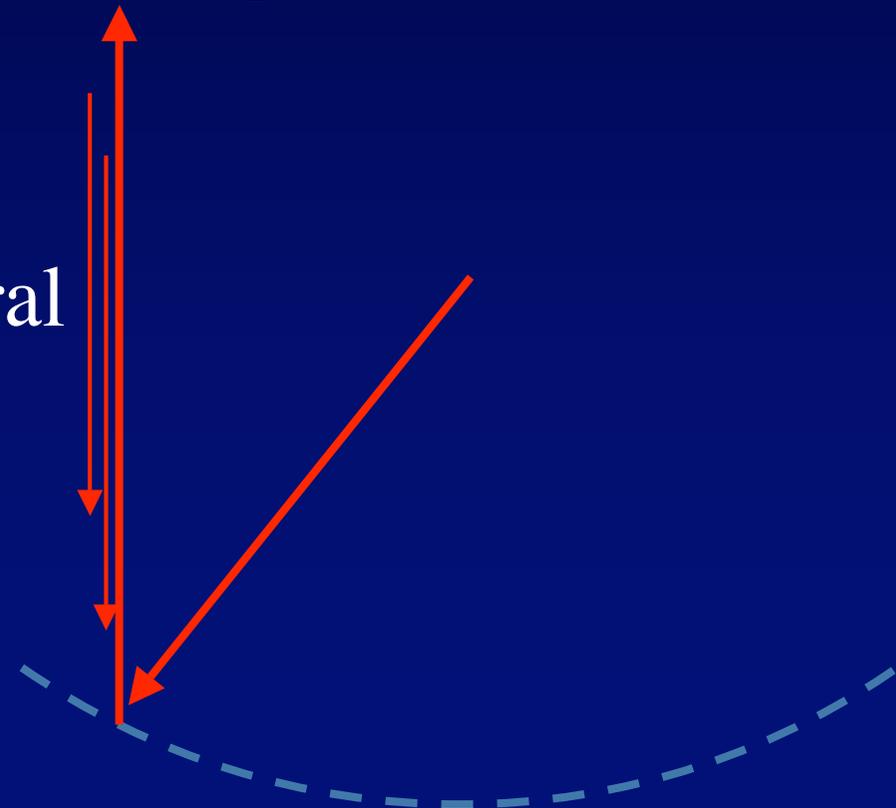
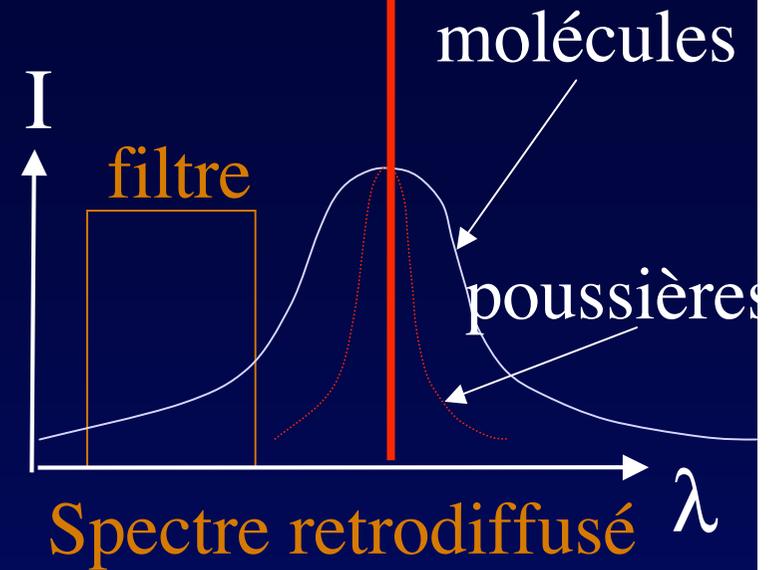


Atmosphère: une idée de Charles Townes (Ap.J., 2002)

- Lidar: impulsions laser \Rightarrow
densité locale de l'air \Rightarrow
 $n(x,y,z)$

- Composante poussières:
éliminée par filtrage spectral

- Applicable aux
interféromètres ?



L 'idée de Charles Townes

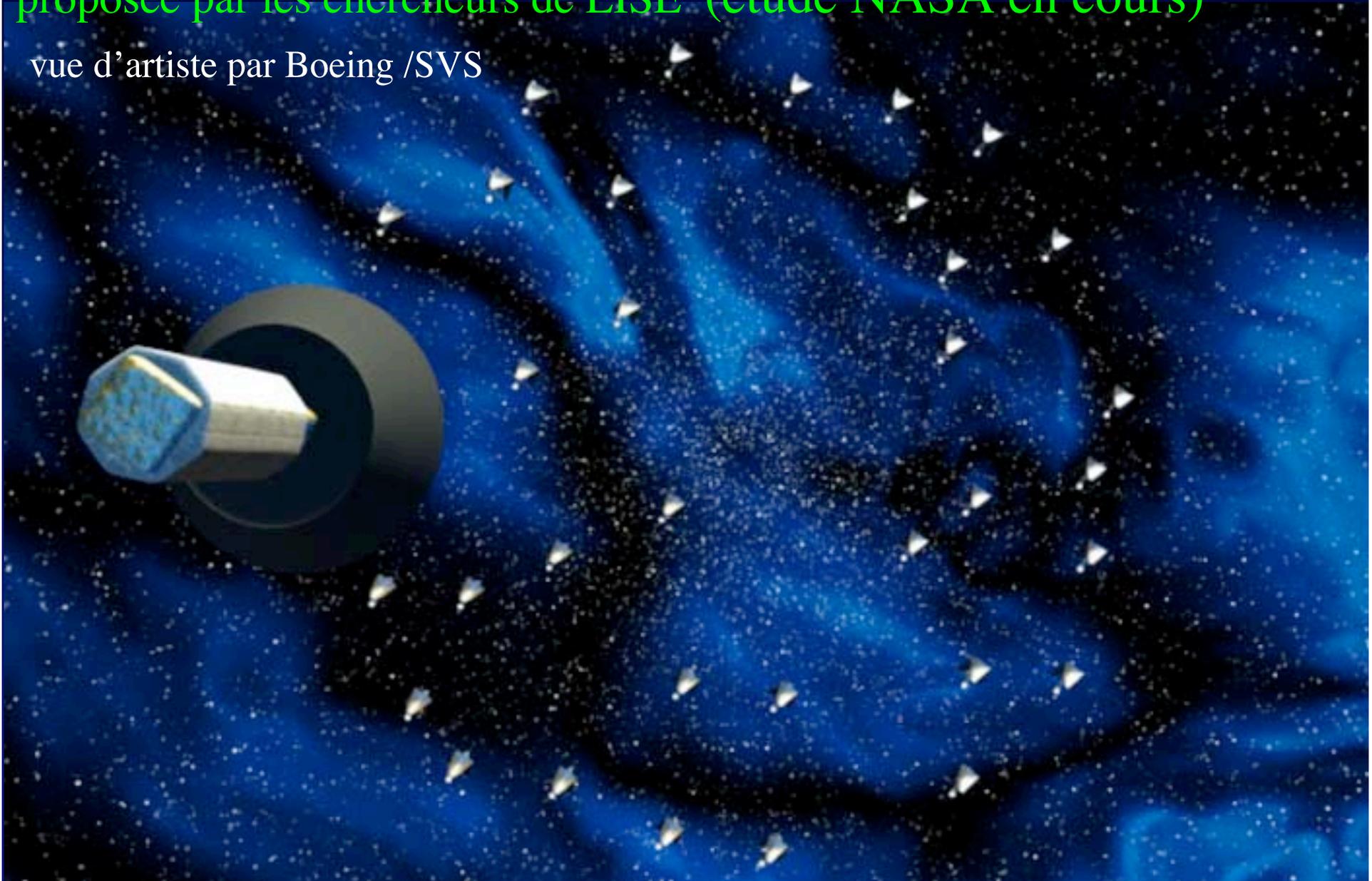
(Ap.J., 565, 1376-1380, 2002, Feb. 1)

- cartographier l 'indice de refraction le long des faisceaux
- LIDAR: localement $(n-1)$ est proportionnel à la rétrodiffusion Rayleigh ou Raman
- effet des poussières éliminé par filtrage
- altitudes repérées par impulsions
- laser Xe Cl a 305 nm , puissance moyenne 50 W

Version hypertélescope pour TPF

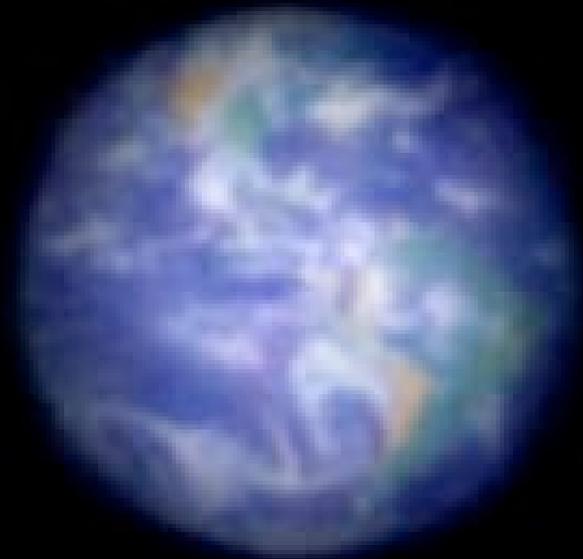
proposée par les chercheurs de LISE (étude NASA en cours)

vue d'artiste par Boeing /SVS



Voir la vie sur des images résolues

- Exemple : Terre à 10 années-lumière, vue avec 150 éléments de 4m, diamètre 150 km
- Poses 30 mn
- La verdure réfléchit l'infrarouge proche (Schneider 2002)



...
st double zoom=5, contraction=10,
st unsigned int Nt=50, rotMax=3;

Un hypertélescope de 100,000 km ? Est-ce faisable ?

- Oui pour observer des étoiles à neutron
- Assez de photons par resel

Un hypertélescope radio ?

Est-ce utile ?

- Oui, dans l'espace, avec détecteur multi-pixel
- L'image directe est plus sensible

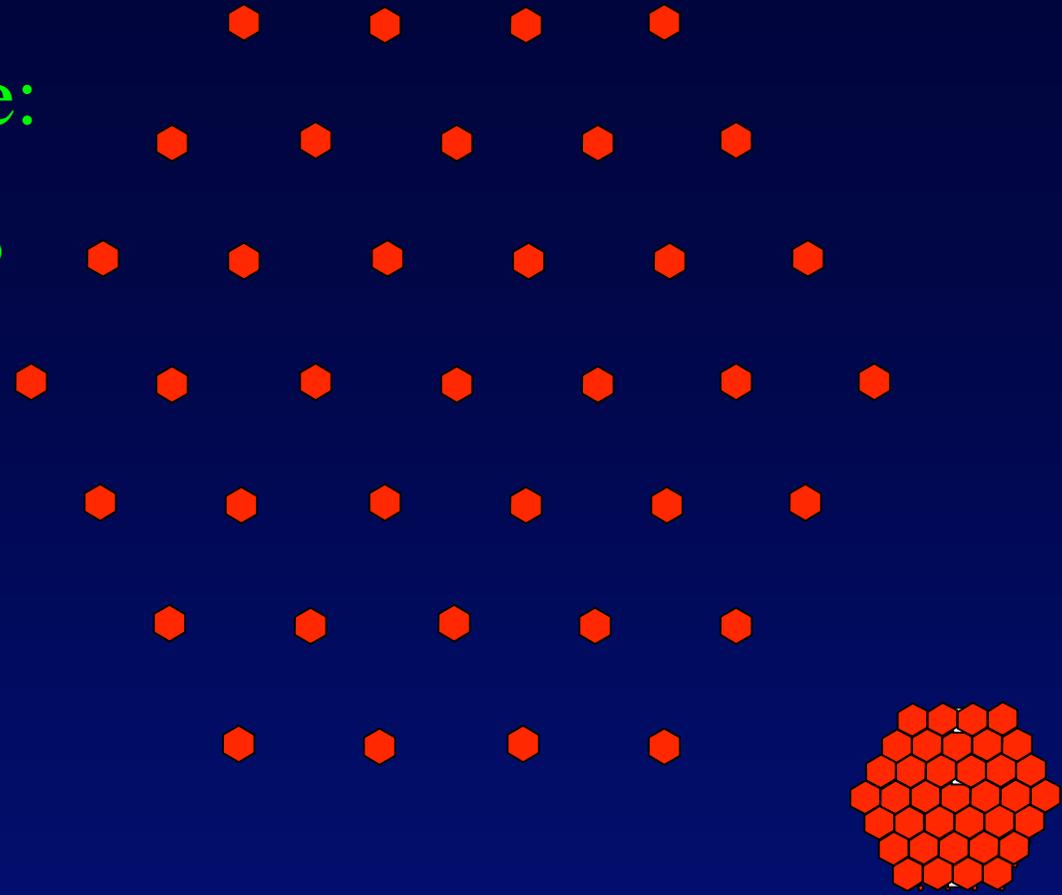
Coronographie exoplanétaire avec les hypertélescopes

- 1- Hypertélescopes
- 2- utilisation coronographique
coronographe à deux étages

Coronographie derrière un hypertélescope

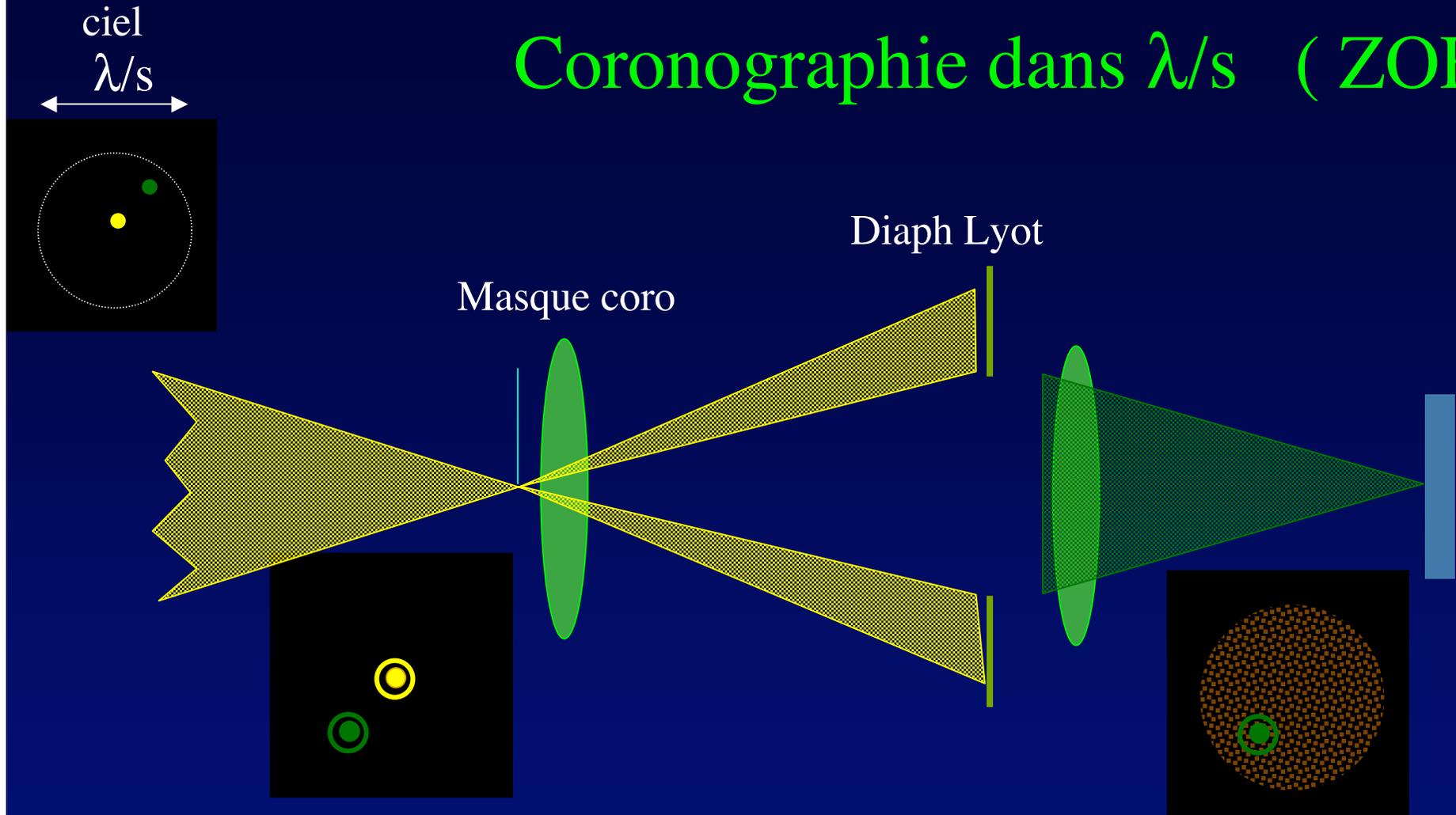
- Utilisable dans l'image hypertélescope

Pour la coronographie:
hypertélescopes
périodiques
complètement
densifiés



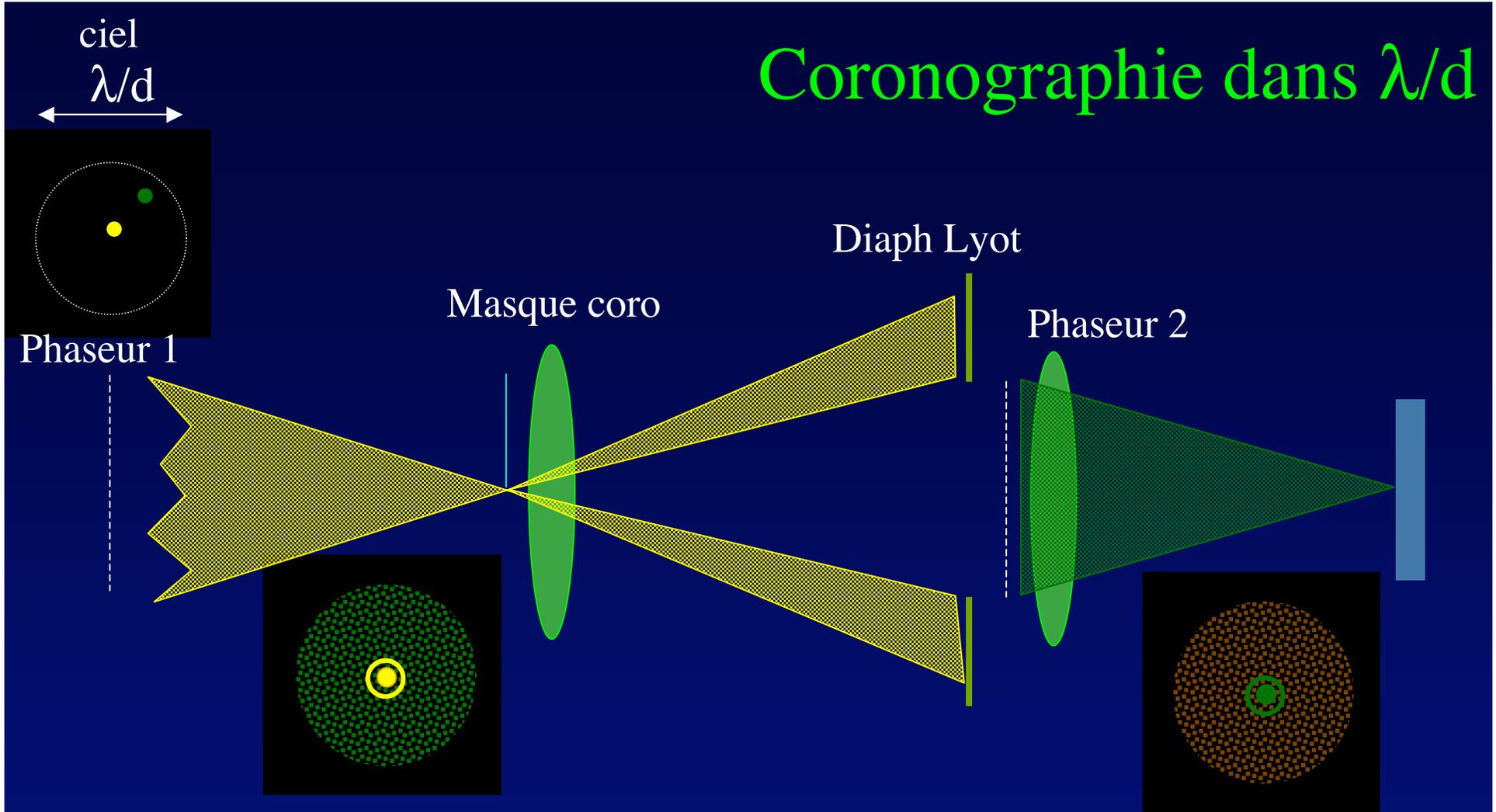
- La pupille de sortie est pleine , avec des sous-pupilles carrées ou hexagonales
- Forte redondance, améliorant la dynamique et la coronographie

Coronographie dans λ/s (ZOF)



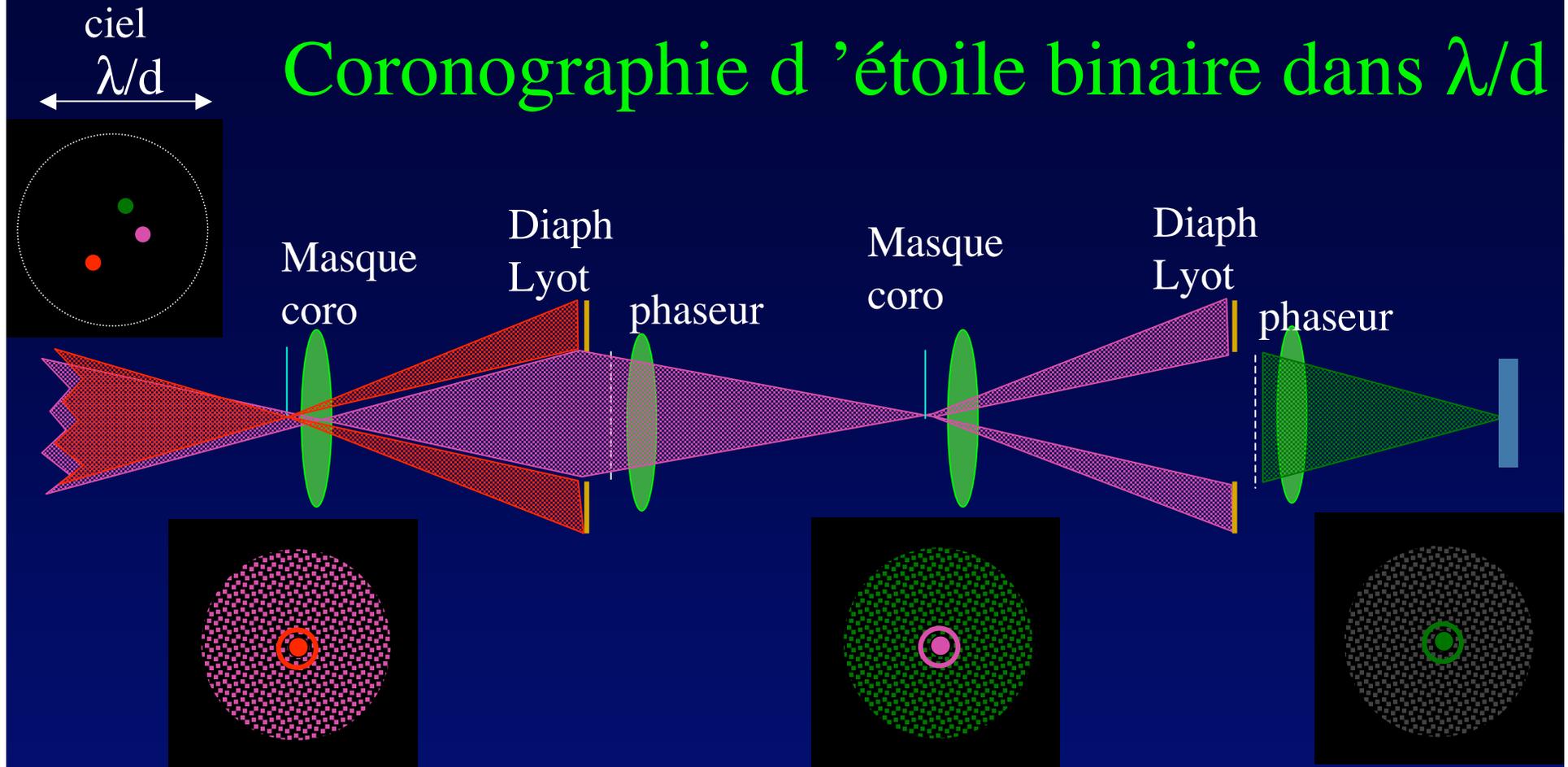
- La pupille de sortie densifiée se comporte comme un pupille classique

Coronographie dans λ/d



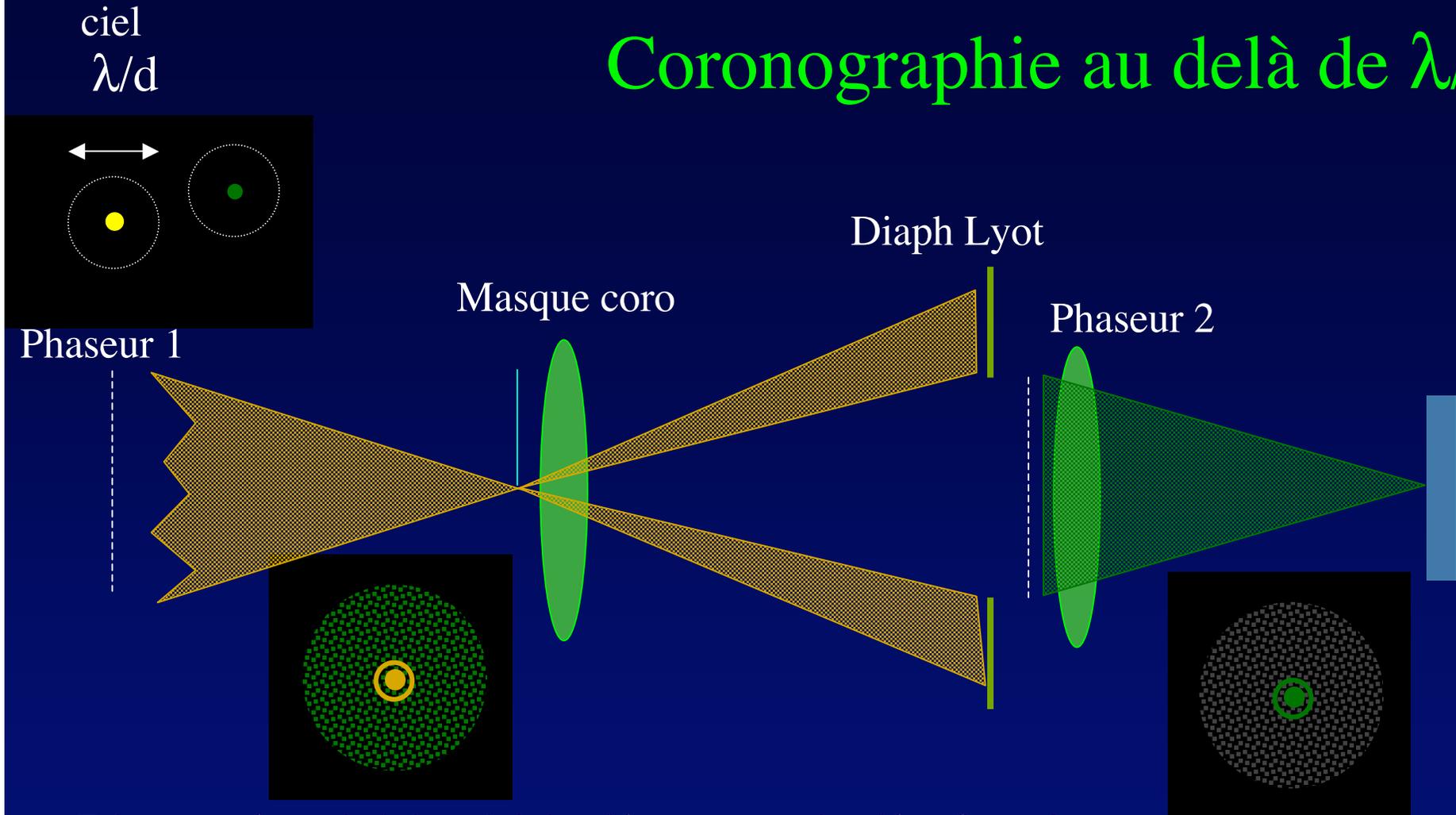
- remise en phase de la planète après atténuation de l'étoile
- Convient pour planète unique, de position connue

Coronographie d'étoile binaire dans λ/d



- Coronographe à deux étages pour binaire
- étages supplémentaires pour 3, 4, ... étoiles

Coronographie au delà de λ/d



- Phaser le résidu d 'étoile => étoile fantôme, atténuable
- remise en phase après coro => planète
- pré-coronographe utilisable avant combinaison ...
- pour atténuation accrue: planètes dans visible ?

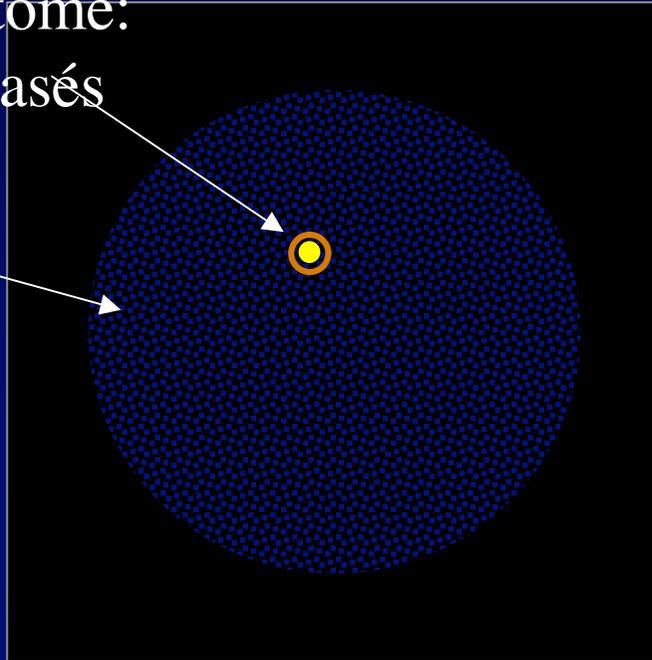
jouer avec les phases dans

le canal planète (champ ciel λ/d):

étoile fantôme et coronographie

Étoile fantôme:
résidusphasés

planète
déphasée

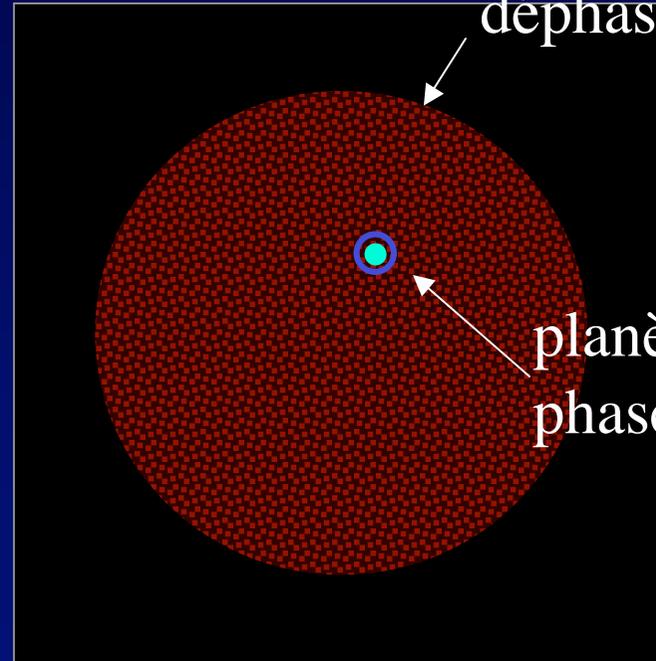


entrée

coro 2

Étoile fantôme
atténuée,
déphasée

planète
phasée



sortie

Cas de planète séparée par les sous-ouvertures: coronographe à deux étages

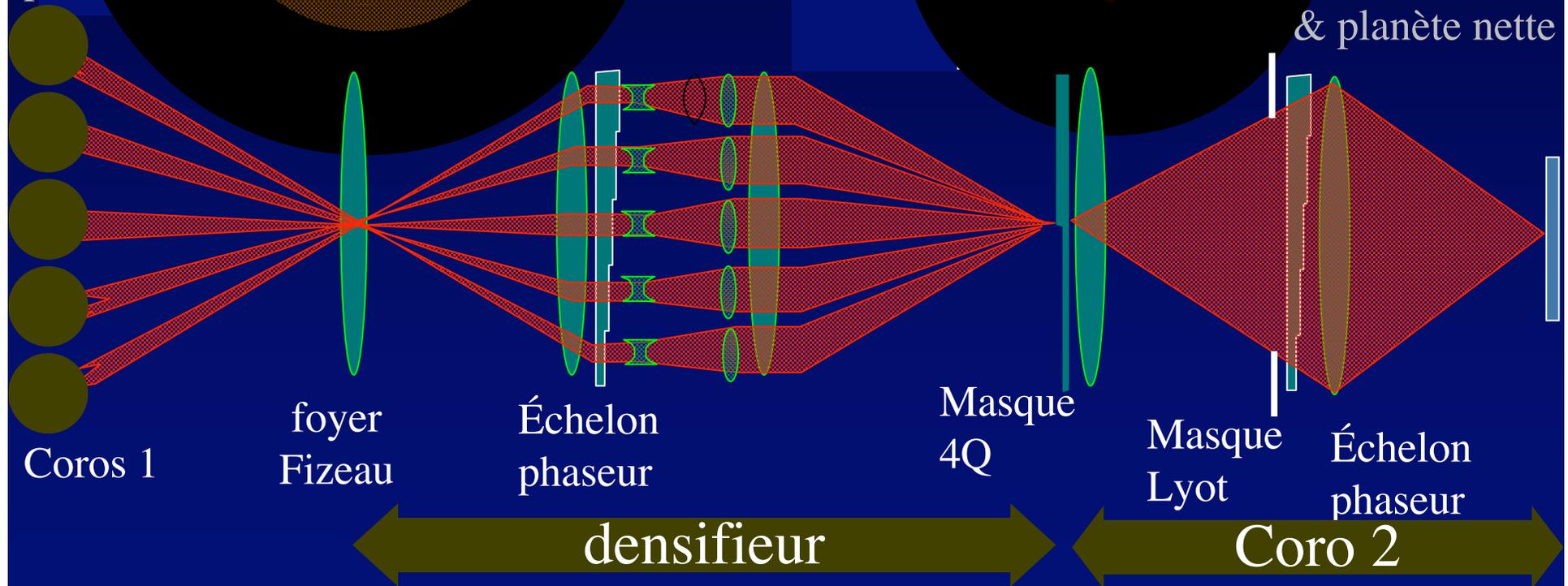
- Pré-coronographe dans chaque sous-image
- Fantôme d 'étoile dans l 'image à pupille densifiée
- Éliminé avec second coronographe après densification
- Gain multiplié : exemple: $10^3 \cdot 10^4 = 10^7$

jouer avec les phases dans un canal planète (champ ciel λ/d):
étoile fantôme et coronographie

Étoile fantôme
floue &
planète nette

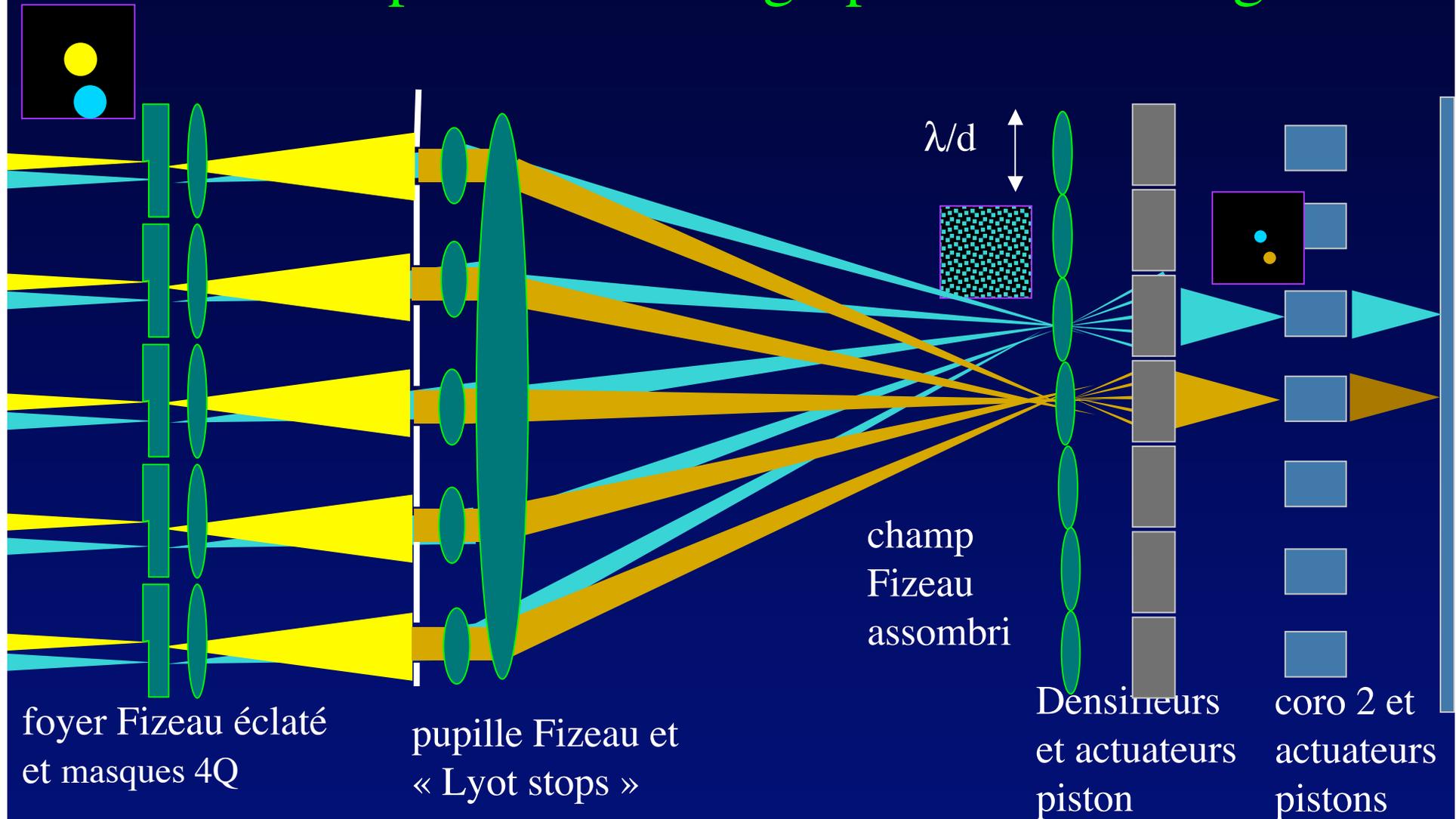
Étoile fantôme
nette &
planète floue

Étoile fantôme
atténuée, floue
& planète nette



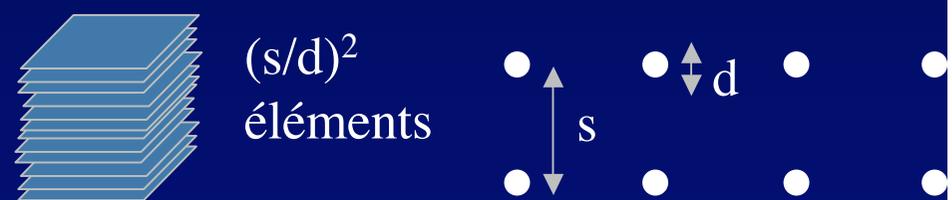
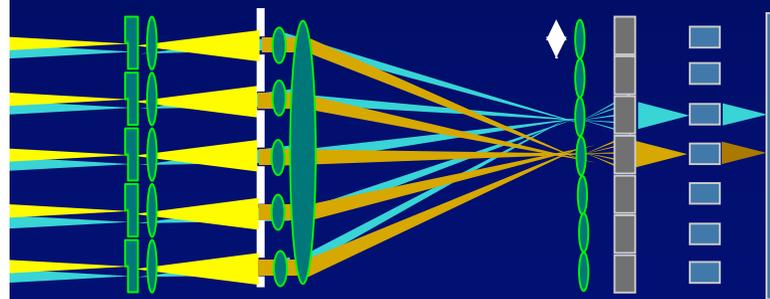
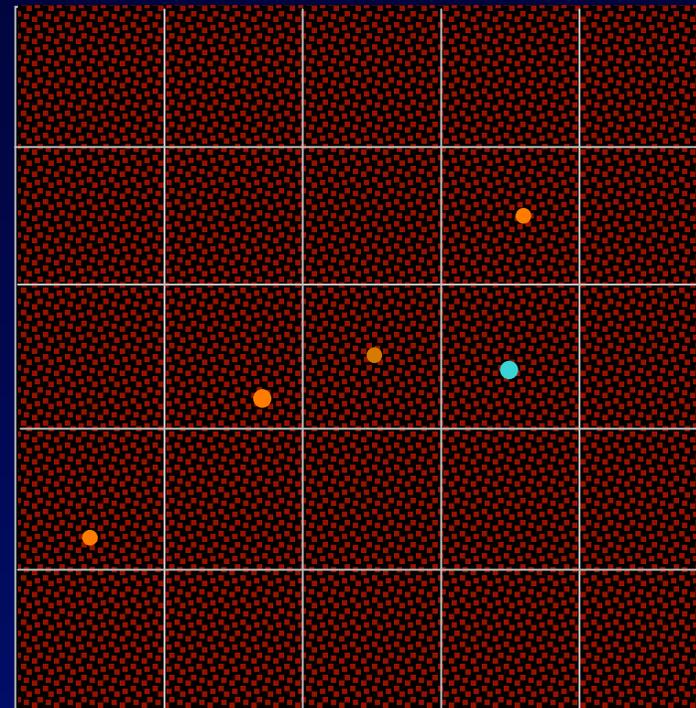
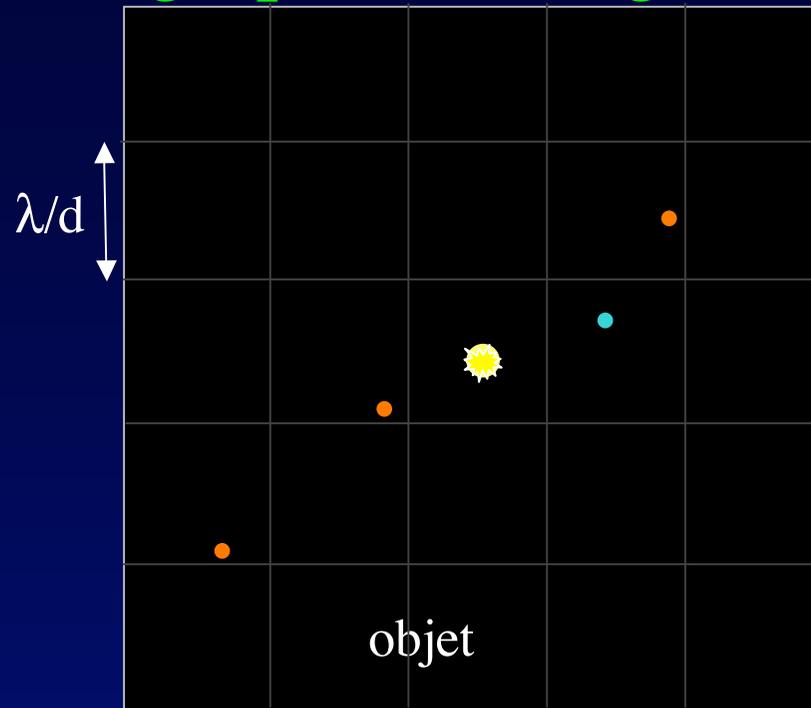
- 2 échelons phaseurs identiques

canaux multiples de coronagraphie à deux étages



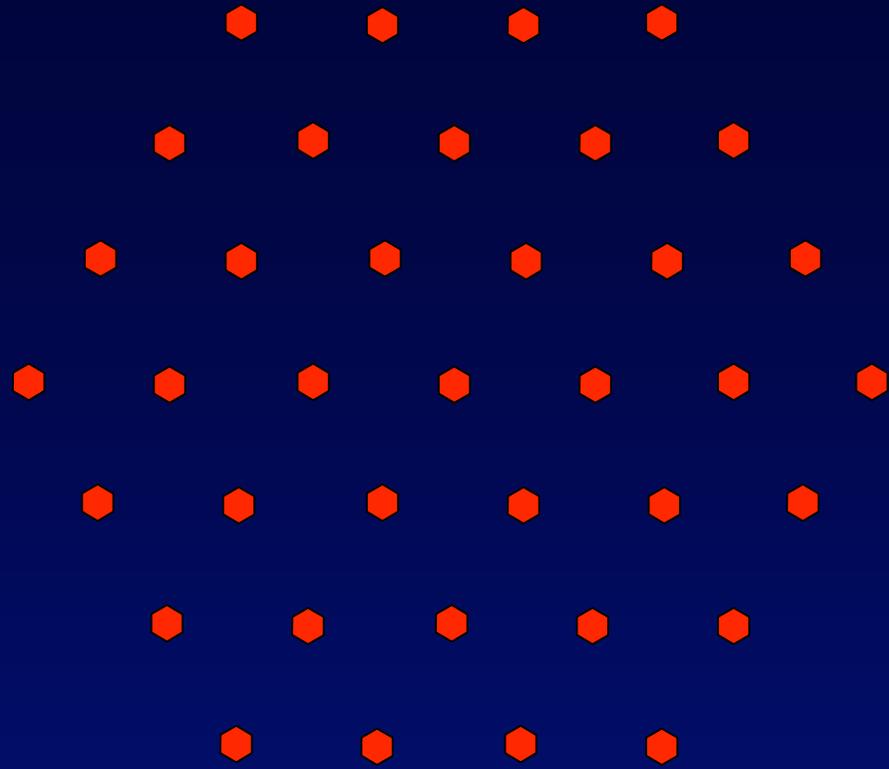
- Multiples images à haute résolution
- résidu coro 1 : image fantôme de l'étoile dans chaque image

coronographe à 2 étages



- Exploration active des HOF ou reconstruction par les spectres

Coronographe 2 étages :
comparaison avec le
cas d'ouverture
compacte et 1 étage

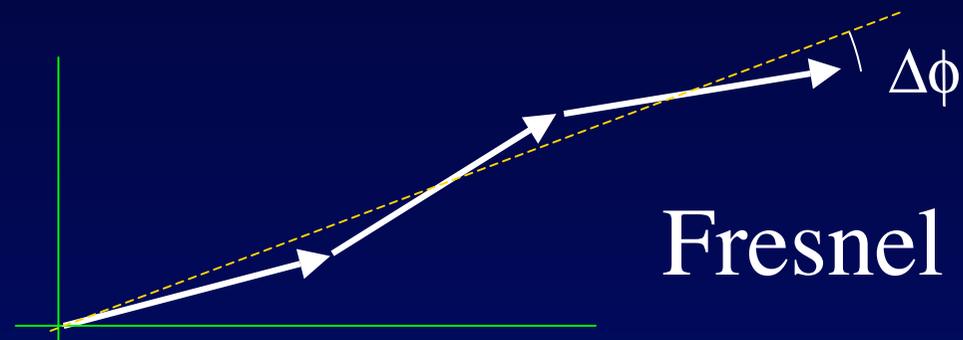


- Gains Maréchal respectifs:
 - $N_1 N_2 / (\Delta\phi_1)^2 (\Delta\phi_2)^2$ avec 2 étages
 - $N_1 N_2 / (\Delta\phi)^2$ avec ouverture compacte et 1 étage
- Dans le halo Maréchal, le coro à 2 étages est plus sensible

Phases imparfaites et coronographie

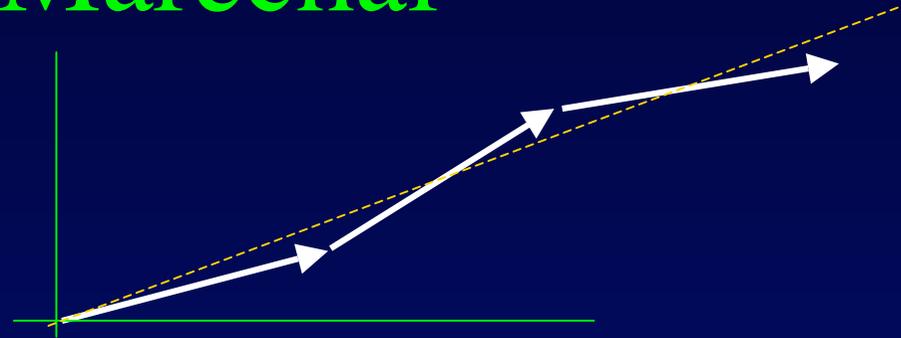
- Phases parfaites:
 - Halo étoile avec anneaux ou speckles
 - Atténuable par coronographe
- Phases imparfaites:
 - Halo additif, survit au coronographe

Lumière diffusée d'une onde bosselée: formule de Maréchal



- Somme de vibrations légèrement déphasées, de $\Delta\phi$
- Raccourcissement relatif de la somme de Fresnel: $(\Delta\phi)^2 / 2$
- Perte relative d'intensité du pic: $dI/I = 2 dA/A = (\Delta\phi)^2$
- L'énergie se retrouve dans un halo de N speckles:
soit $(\Delta\phi)^2 / N$ par speckle
- Donc : gain pic/halo $G = N (\Delta\phi)^{-2} = N \lambda^2 / (4 \pi^2 \delta^2)$

Lumière diffusée: formule de Maréchal



- Exemple pour $N=37$:
 - gain pic/halo $G = 10^6$ si résidus piston $< \lambda/1460$ (Strehl = 0.99)
 - gain pic/halo $G = 10^4$ si résidus piston $< \lambda/146$ (Strehl = 0.91)

Les ombres volantes diffusent aussi

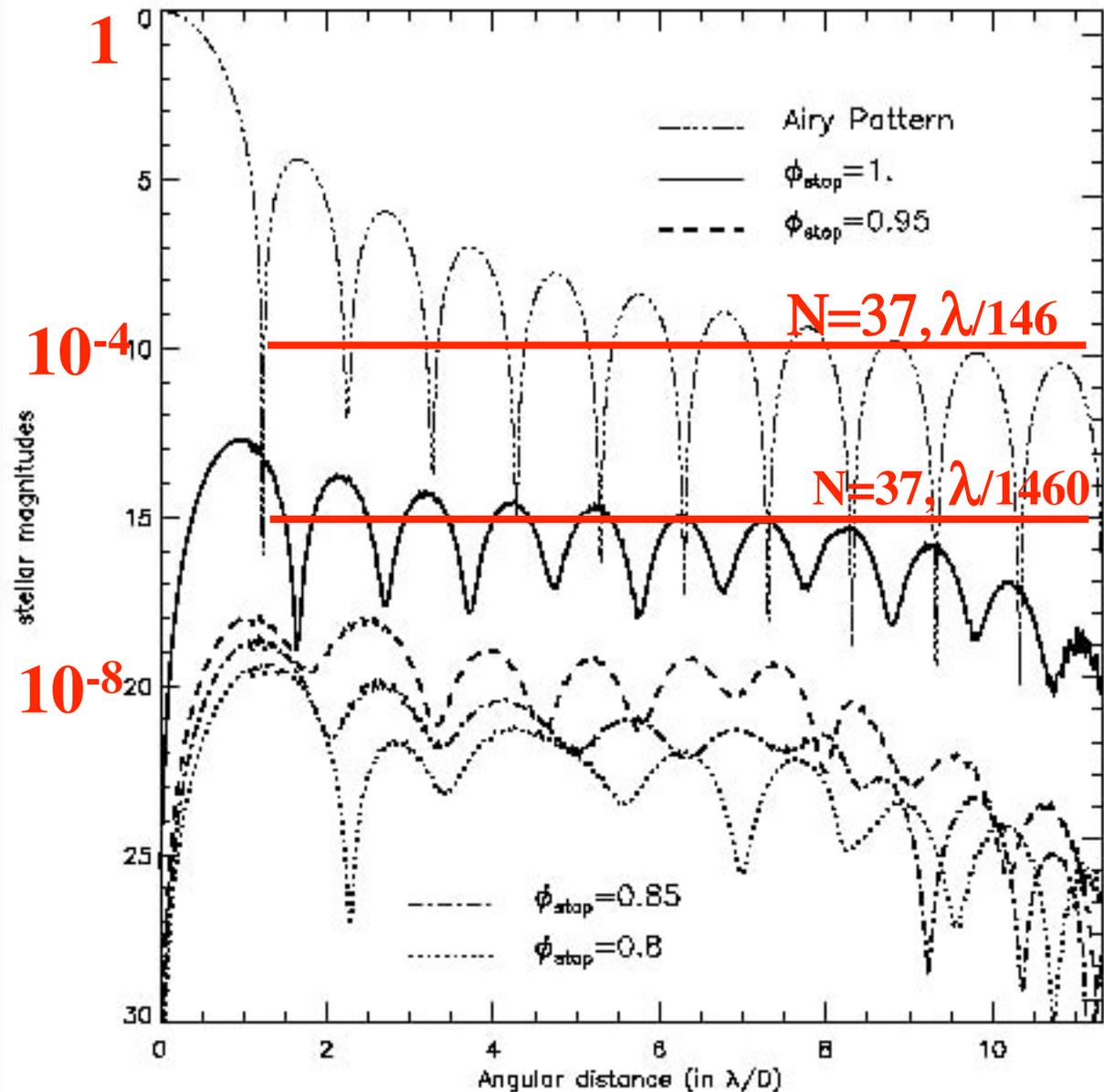
50 ans après Bernard Lyot

..... idées nouvelles de coronographes

- Roddier & Roddier : pastille de phase
- Gay : CIA
- Rouan : 4QPM
- Vakili & Abe: couteau de phase

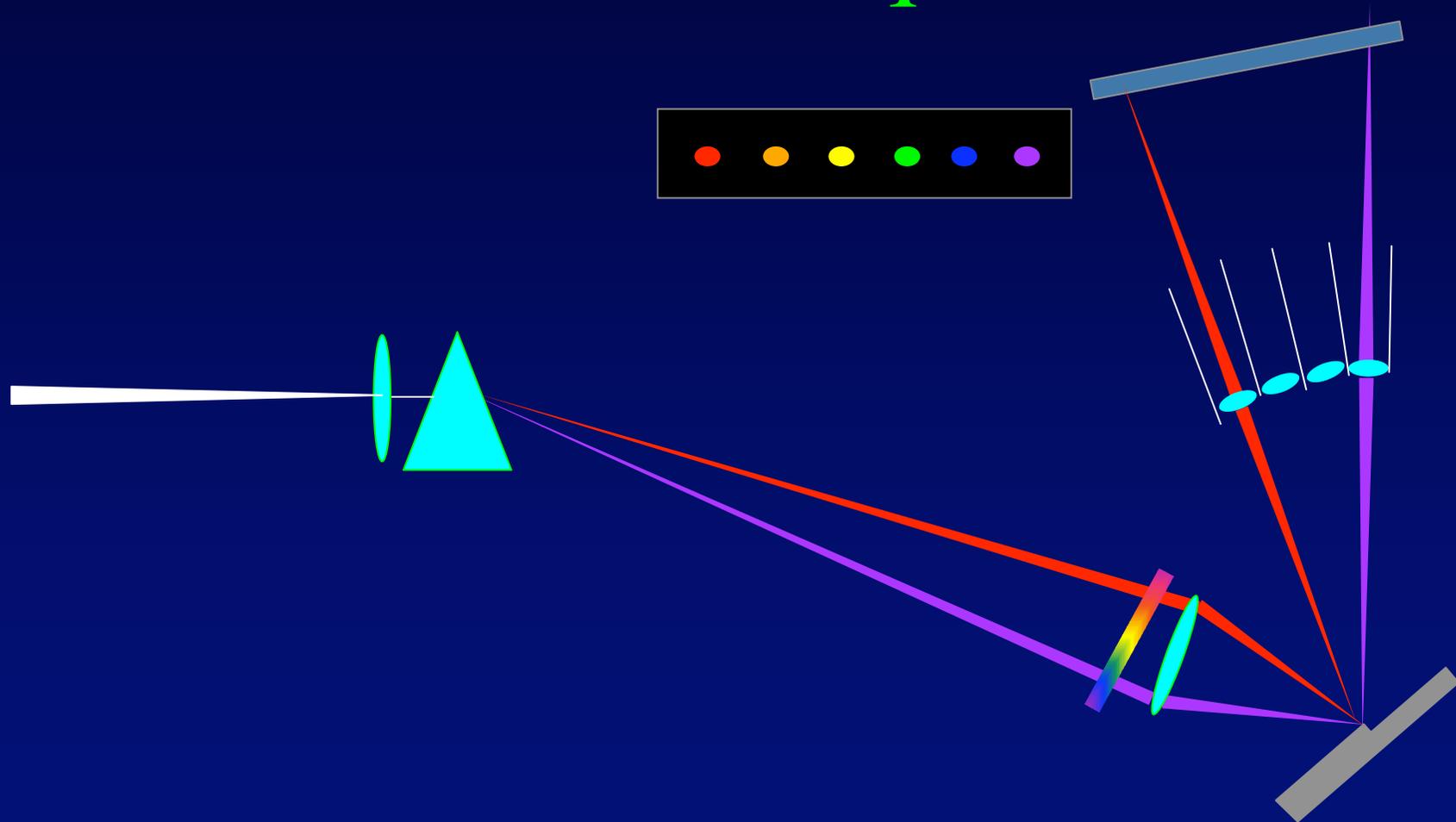
Coronographe 4 quadrants de D.Rouan

- Utilisable dans
l'image
hypertelescope



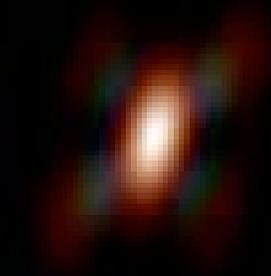
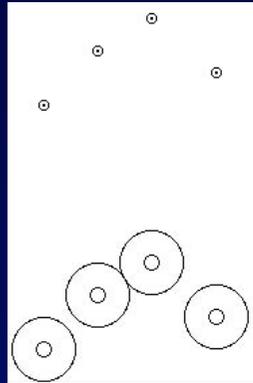
Résidu stellaire, moyenné angulairement
(Riaud et al., PASP 2001)

Masque de phase à 4 quadrants achromatique



- compatible avec spectro-imageur Courtès

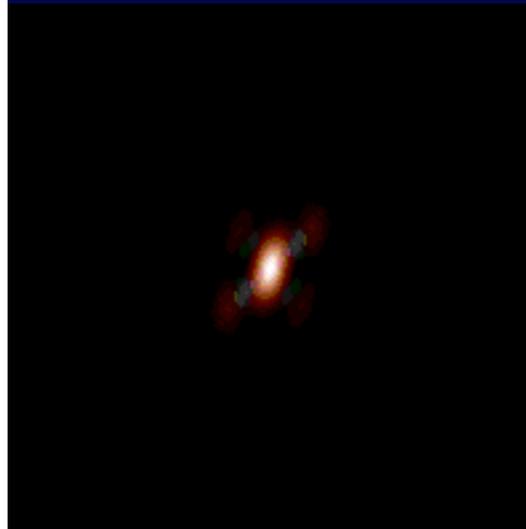
Coronographie hypertélescope au VLTI ?



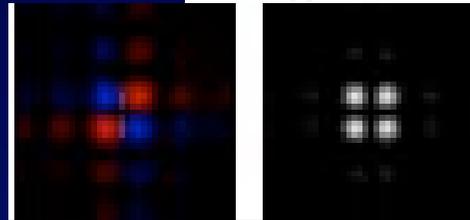
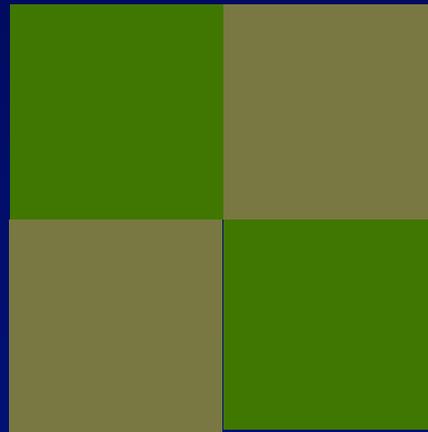
- Très petit champ direct : $6 \lambda/D$
 - soit 6 mas à 500 nm
 - 60 mas à 5 microns
- Mais champ utilisable λ/d pour planète de position connue
 - rephaser la planète après le coronographe

Masque 4Q pour VLTI-HT

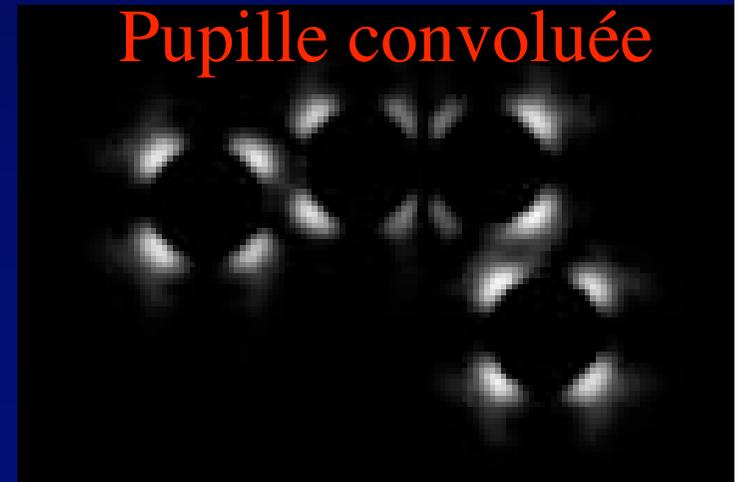
Pupille densifiée 4 UT



diffraction des 4 quadrants
amplitude et phase



Pupille convoluée



- Atténuation à calculer

Imagerie coronographique à deux étages au VLTI: voir une exo-Terre à 2μ ?

- Avec:
 - 4 coro « Planet Finder » sur les UT
 - correction adaptative des pistons
- coronographie des sous-images:
 - résolution 50 mas à 2μ : Terre à 20 pc
- Fantôme de l'étoile retiré dans l'image combinée

Gratter les résidus d 'étoile

coronographiée: facteur 10 ou 100 à gagner ?

- Soustraction des quadrants (Boccaletti et al.)
- « trou sombre » (« dark hole » de Shao & Malbet 1995)
- « tavelure noire » (« Dark speckle »)
- lissage par pose longue hyper-turbulée (Aime et al.)

hypertélescope ...

ou « Bracewell nulling » ?

- Bracewell: atténuation avec une lame séparatrice dans le combineur
- Principe initial de DARWIN (ESA) et de Terrestrial Planet Finder (NASA)
- Mais pas d 'image directe: détecteur mono-pixel
- Problème: reçoit le fond de ciel de λ/d
- Hypertélescope: le resel « planète » recoit moins de fond zodiacal et exo-zodiacal

Conclusions

- Vastes possibilités d'imagerie et coronographie:
 - VLT
 - CARLINA
 - TPF/DARWIN : améliorable
- Exo-planètes imageables en visible et IR proche ?
Spectro-imagerie => « chlorophylle »
- Génération d'après TPF/DARWIN

