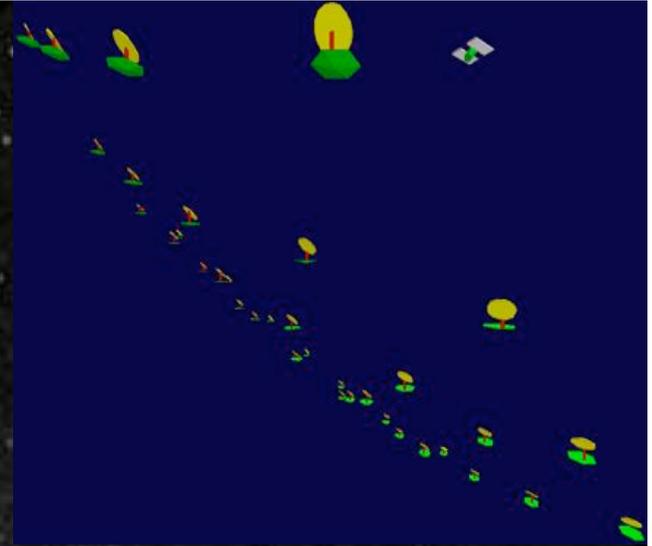


Exo-planètes, étoiles et galaxies : progrès de l'observation



- 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

- 24 Mars

Cours 6: Hypertélescope spatial à miroirs piégés par laser (suite)

Séminaire: Olivier Arcizet , Institut Néel (Grenoble)

- **1er -2 Avril: cours et séminaires à Grenoble, détails sur http://www.ujf-grenoble.fr/74905189/0/fiche__pagelibre/**



Mieux voir les étoiles,
leurs planètes,
les galaxies,
l'univers lointain

Aujourd'hui:

Hypertélescope spatial à miroirs piégés par laser (suite)

Séminaire à 15h :

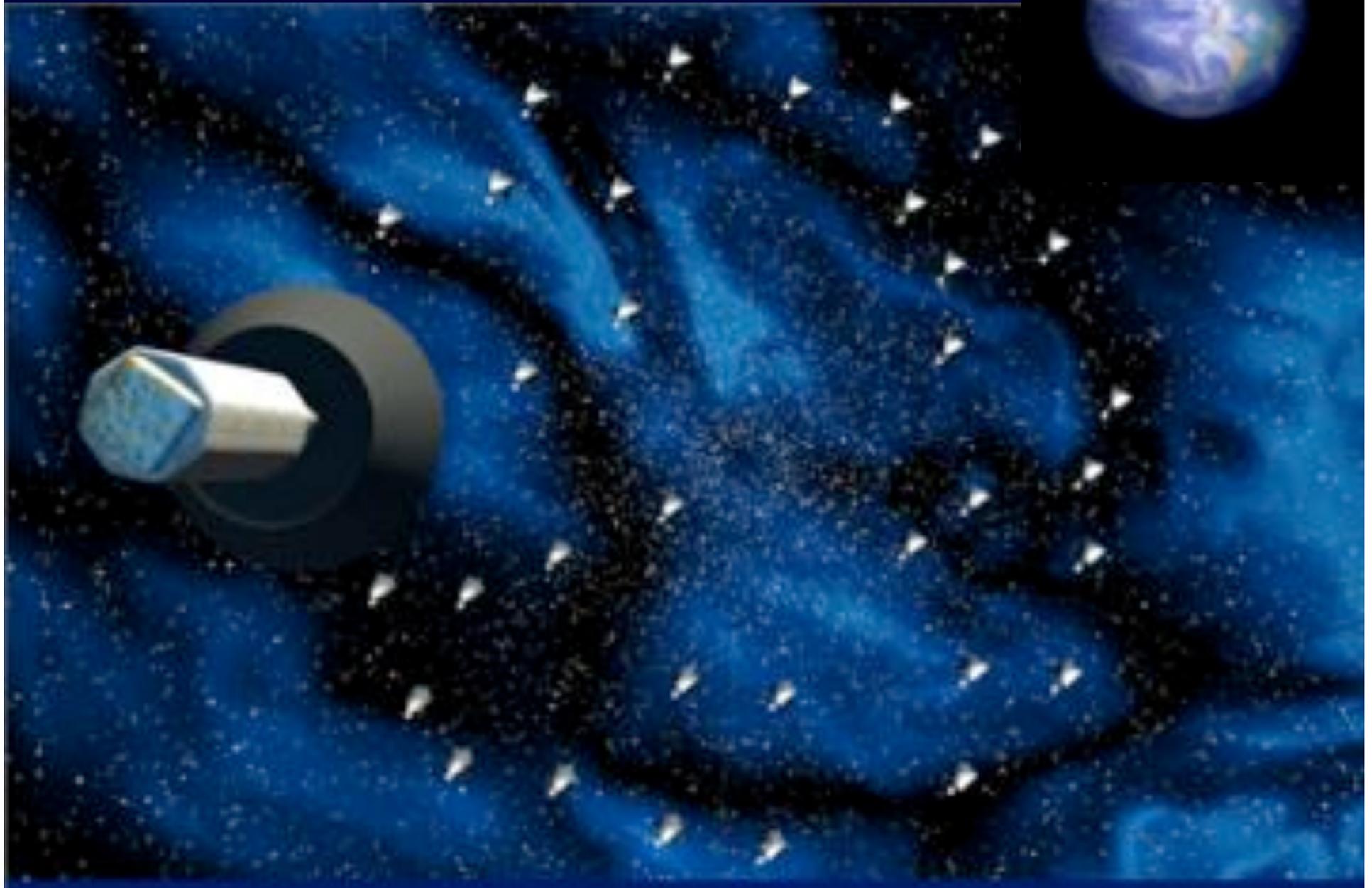
Olivier Arcizet , Institut Néel (Grenoble)

Refroidissement optique d'oscillateurs
mécaniques: vers les effets quantiques

Exo-planètes : une de plus ...

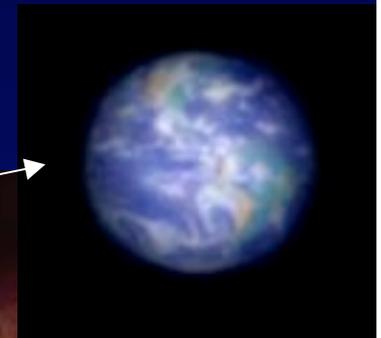
- Détectée par occultation: Corot 9b (Deeg et al. 2010)
- Période 95.274 jours, faible excentricité, étoile de type solaire

... puis dans l'espace

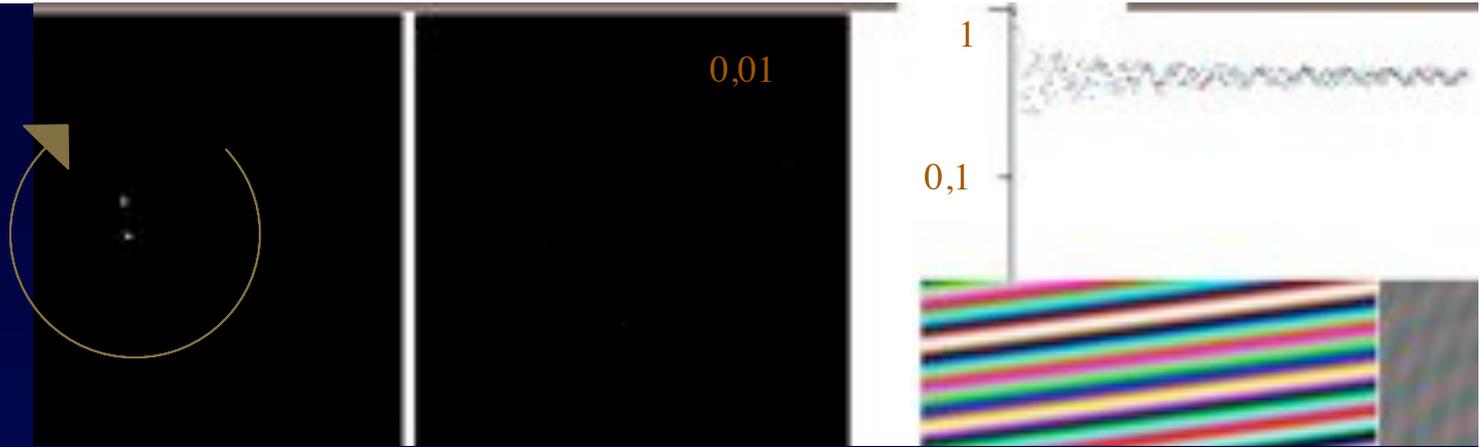


Science selon la dimension d'une flotille hypertélescope

- 1 km : physique stellaire par spectro-images résolues
 - exoplanètes (non résolues), supernovae, sursauts gamma, lentilles gravitationnelles
- 100 km: exoplanètes résolues : recherche de vie
- 100,000 km : images de pulsars, étoiles à neutron

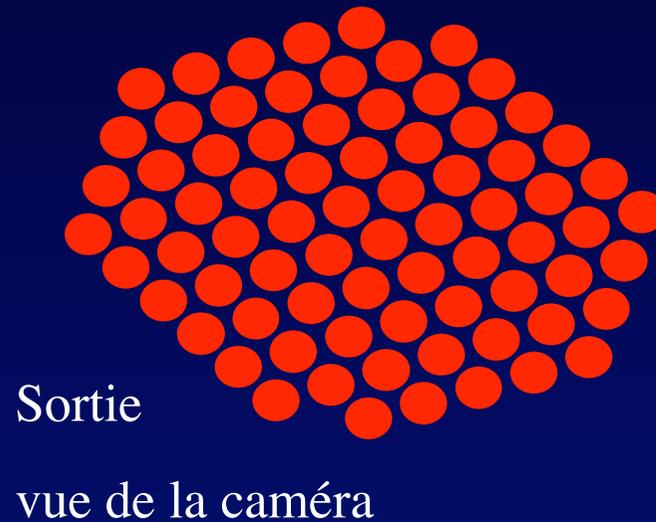
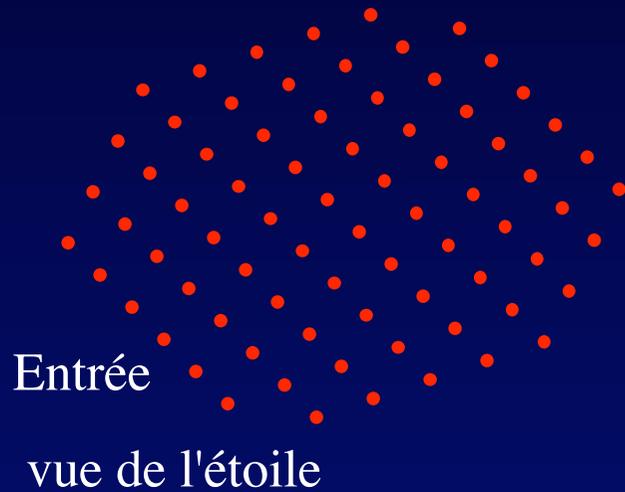


Profil de la
fonction
d'étalement,
avec rotation



Améliorer l'interféromètre Fizeau:

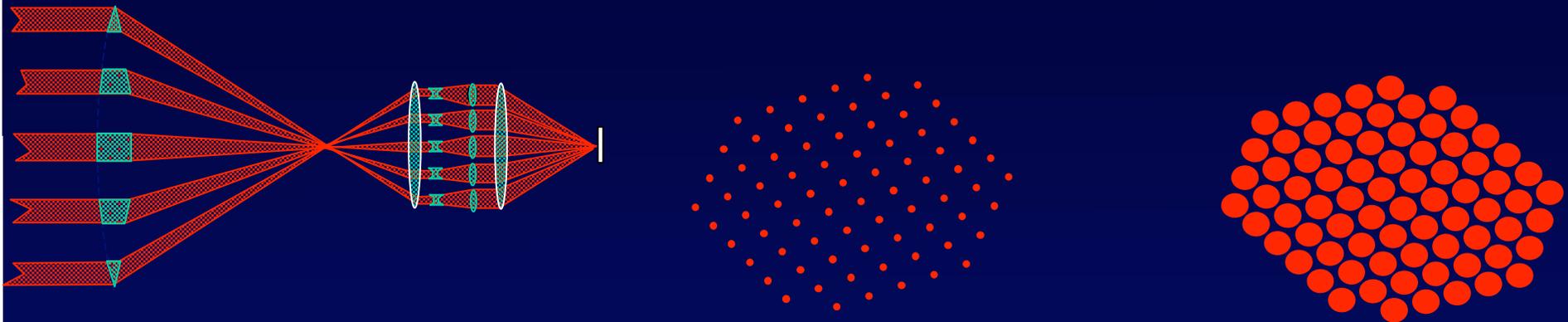
densifier la pupille pour une image plus lumineuse



- 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

Conséquences de la densification de pupille:

"imagerie hypertélescope"



- Rend utilisables des ouvertures fortement diluées

Exemples d'intensification, relativement à l'image Fizeau:

- 1 " Laser Trapped Hypertelescope Flotilla" de 100km:

40,000 miroirs, $d = 30\text{mm}$ pour surface collectrice d'une ouverture de 6m
espacement des miroirs: $s = 500\text{m}$, densification possible $s/d = 10^4$

$$\text{Intensification} = (s/d)^2 = 2,7 \cdot 10^8$$

- 2 concept de Neutron Star Imager à miroirs $d = 10\text{m}$ espacés de $s = 100,000\text{km}$

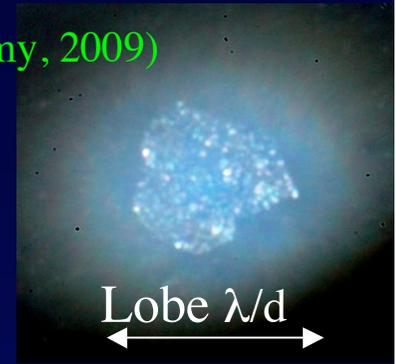
$$\text{Intensification} = (s/d)^2 = 10^{14}$$

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

Interféromètre ou hypertélescope:

Ouvertures petites et nombreuses: le gain en science

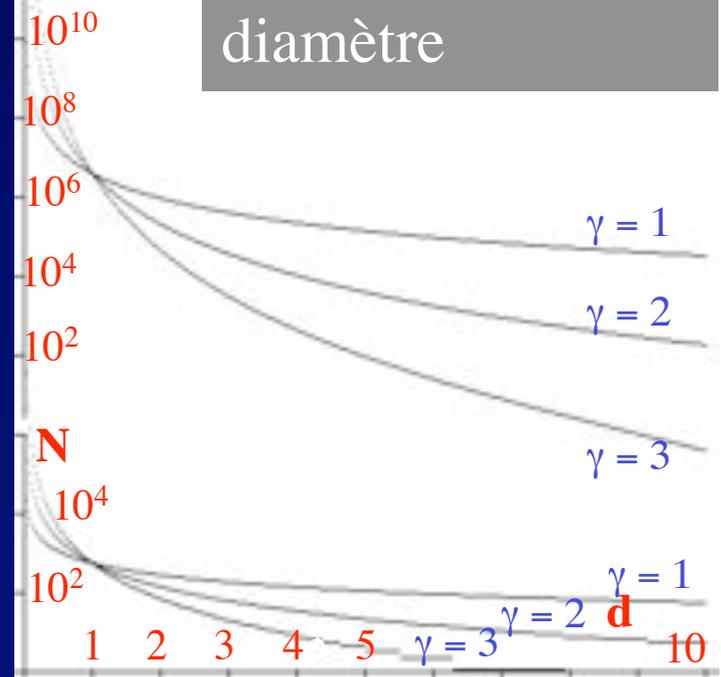
(Labeyrie et al., Exp. Astronomy, 2009)



- 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
$$Sc = C_{pa}^2 d^{-2\gamma} \{ (7/4) \log_2 C_{pa} + (1-7\gamma/4) \log_2 d \}$$
- 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 miroirs de 30mm pour la surface collectrice du JWST espacement 500m >

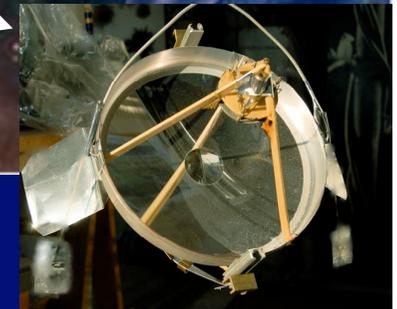
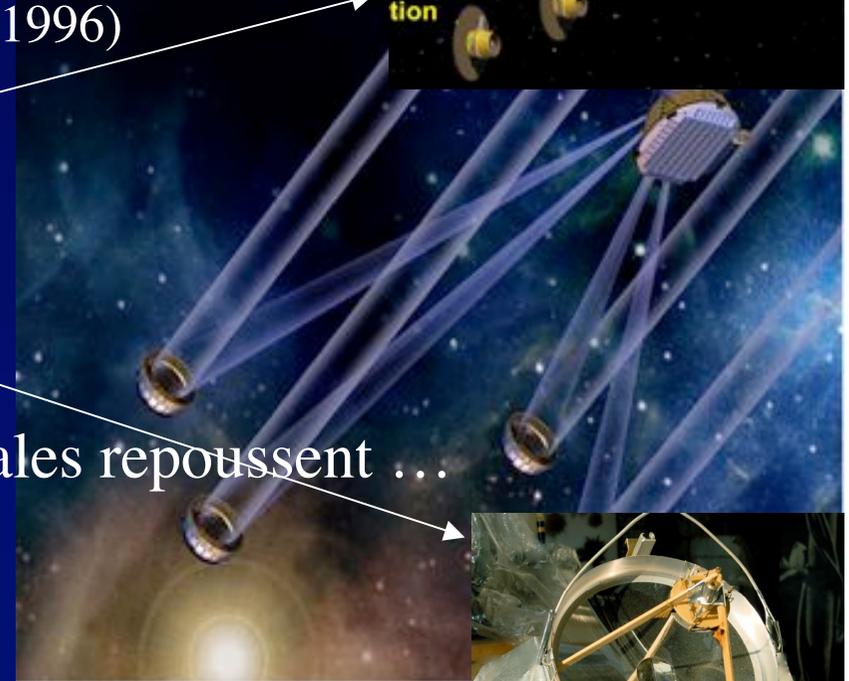
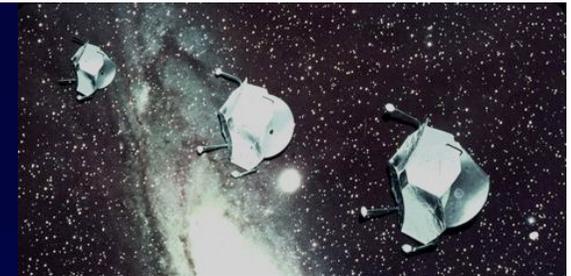
science

Science et nombre de miroirs en fonction de leur diamètre

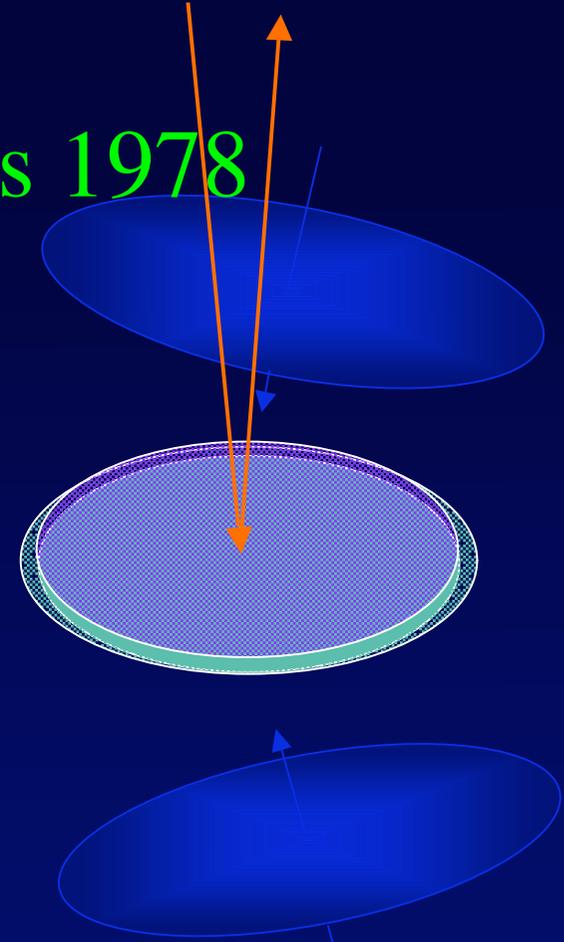


Dans l'espace: flotilles interférométriques

- Fascinant : quelle limitation de résolution ?
- Proposées à NASA et ESA depuis 1982
 - TRIO (Labeyrie et al., 1982)
 - version lunaire LOVLI (Arnold et al. 1996)
 - DARWIN (Léger et Mariotti 1993)
 - TPF-I
 - EEI
 - SPECS (Mather et al.)
 - Luciola (Labeyrie et al. 2008)
- Pilotage complexe: les agences spatiales repoussent ...
- Comment simplifier ?



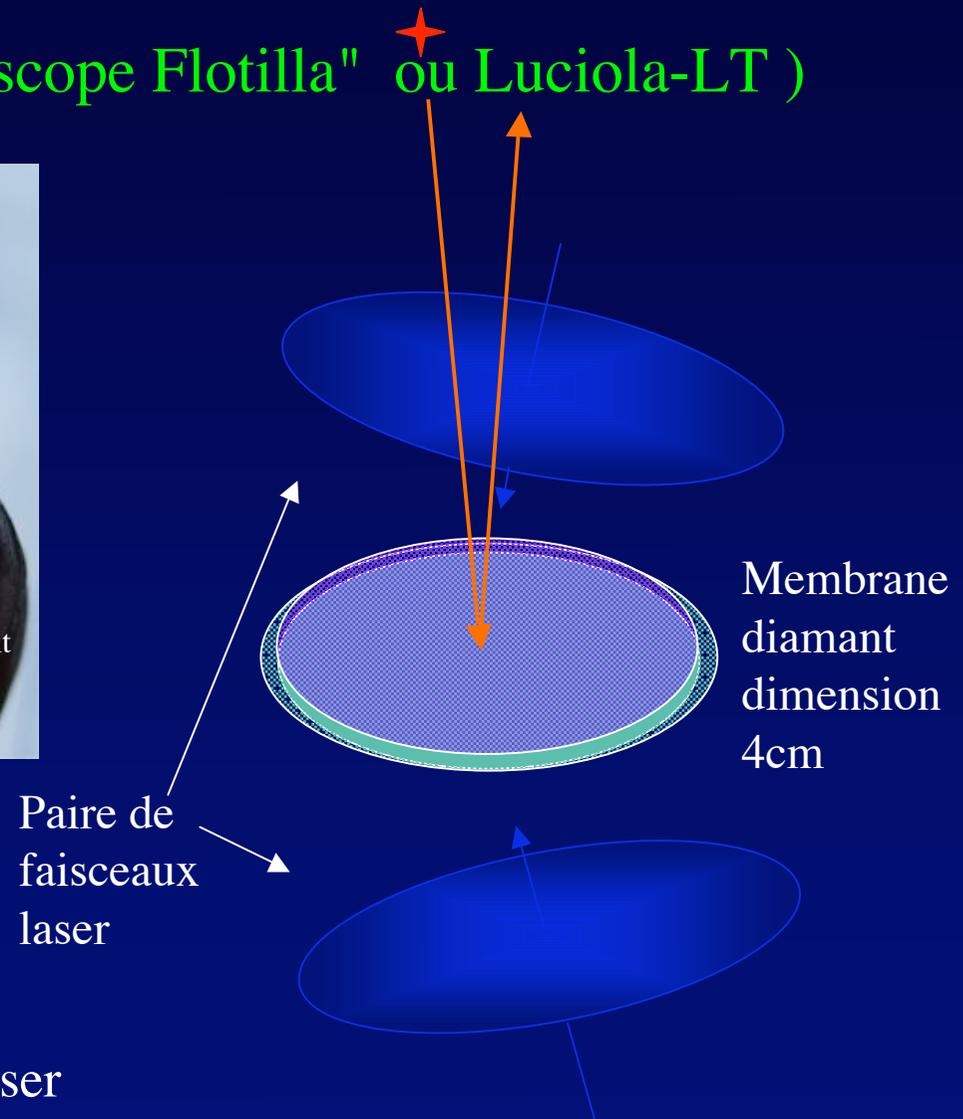
Miroirs piégés par laser étudiés depuis 1978



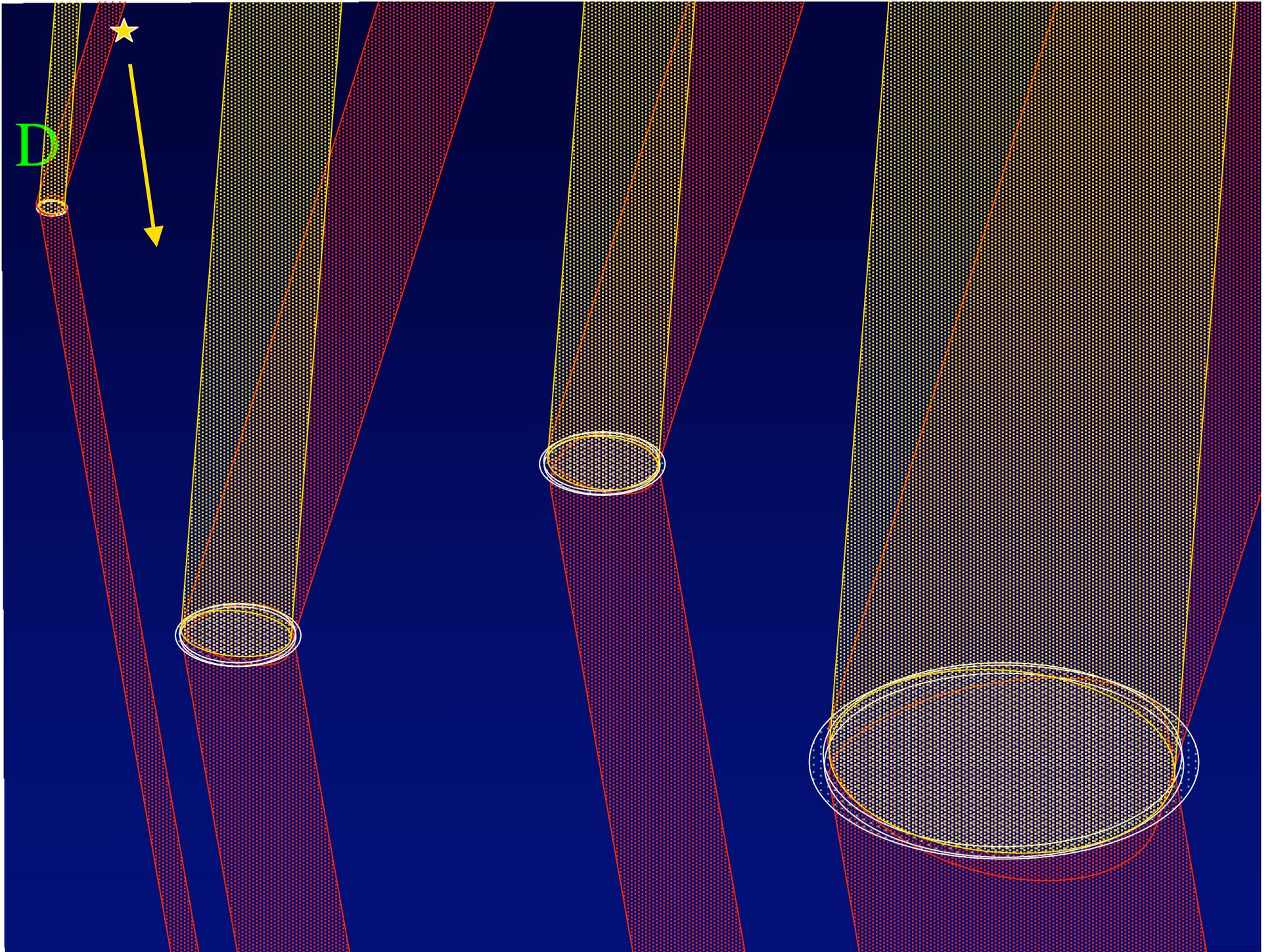
- étude avec financement NASA (2002)
- thèse de M.Guillon : piégeage de nano-particules en laboratoire , théorie
- Version diluée " Laser Trapped Hypertelescope Flotilla" (2009)

Dernière idée pour l'espace: Flotille hypertélescope piégée par laser

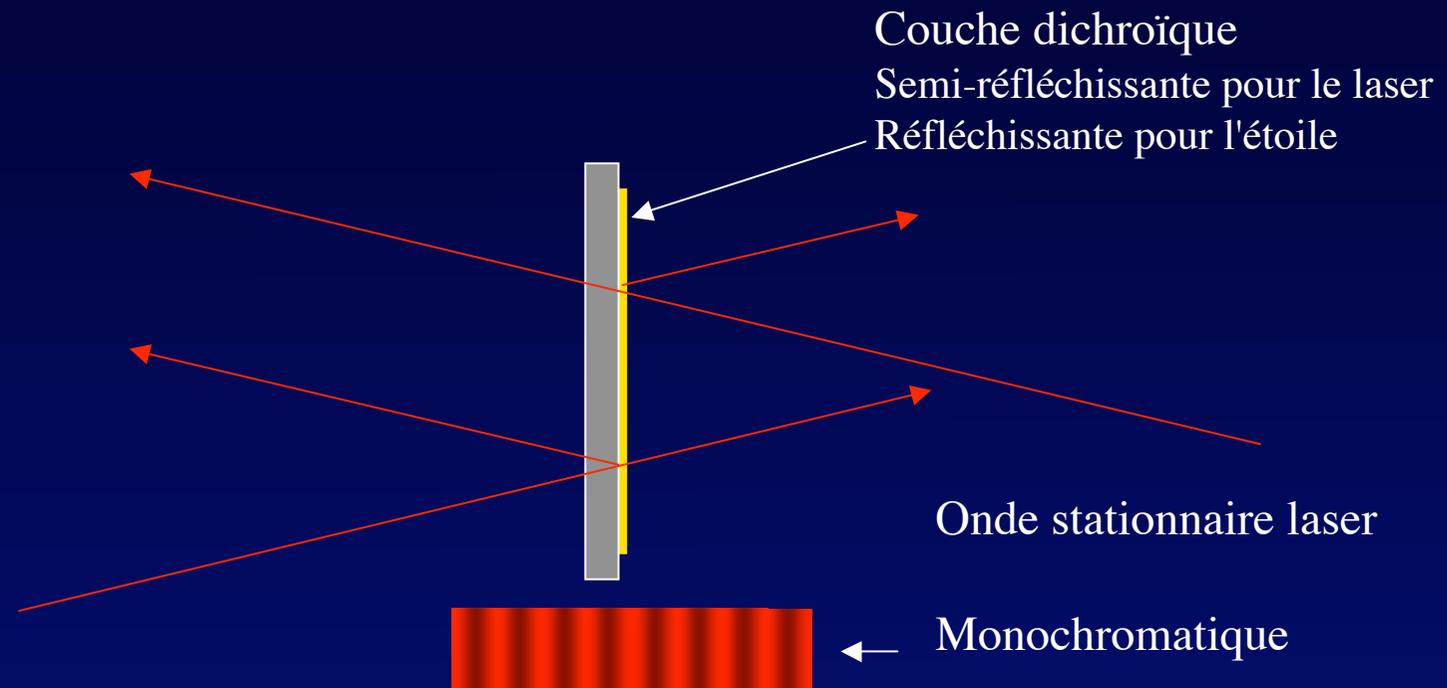
("Laser Trapped Hypertelescope Flotilla" ou Luciola-LT)



- des satellites passifs ...
- ... sous forme de miroirs piégés par laser

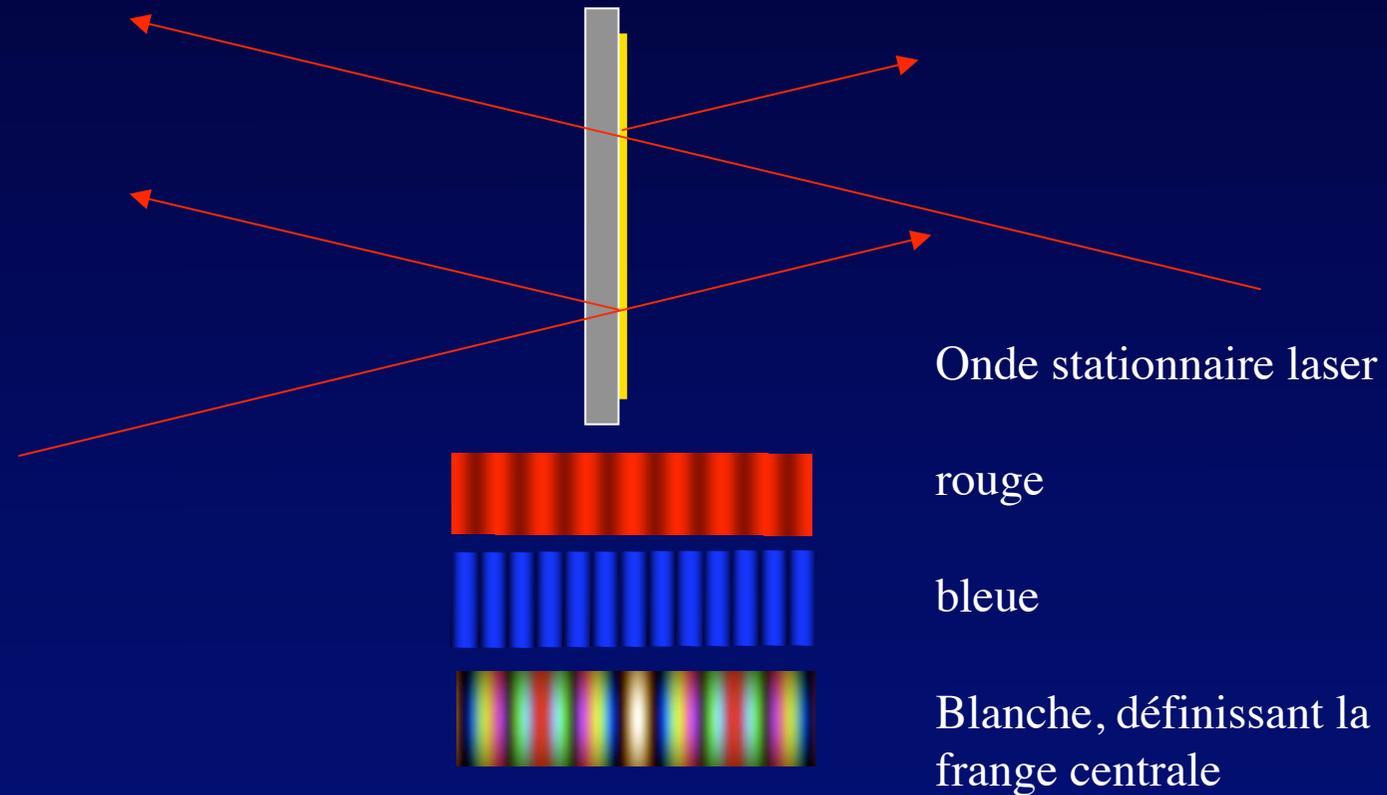


Principe du miroir piégé par laser (Labeyrie 1979, Guillon et al. 2006)



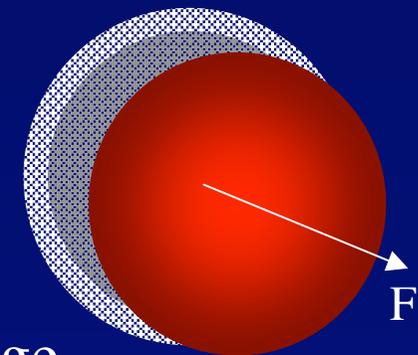
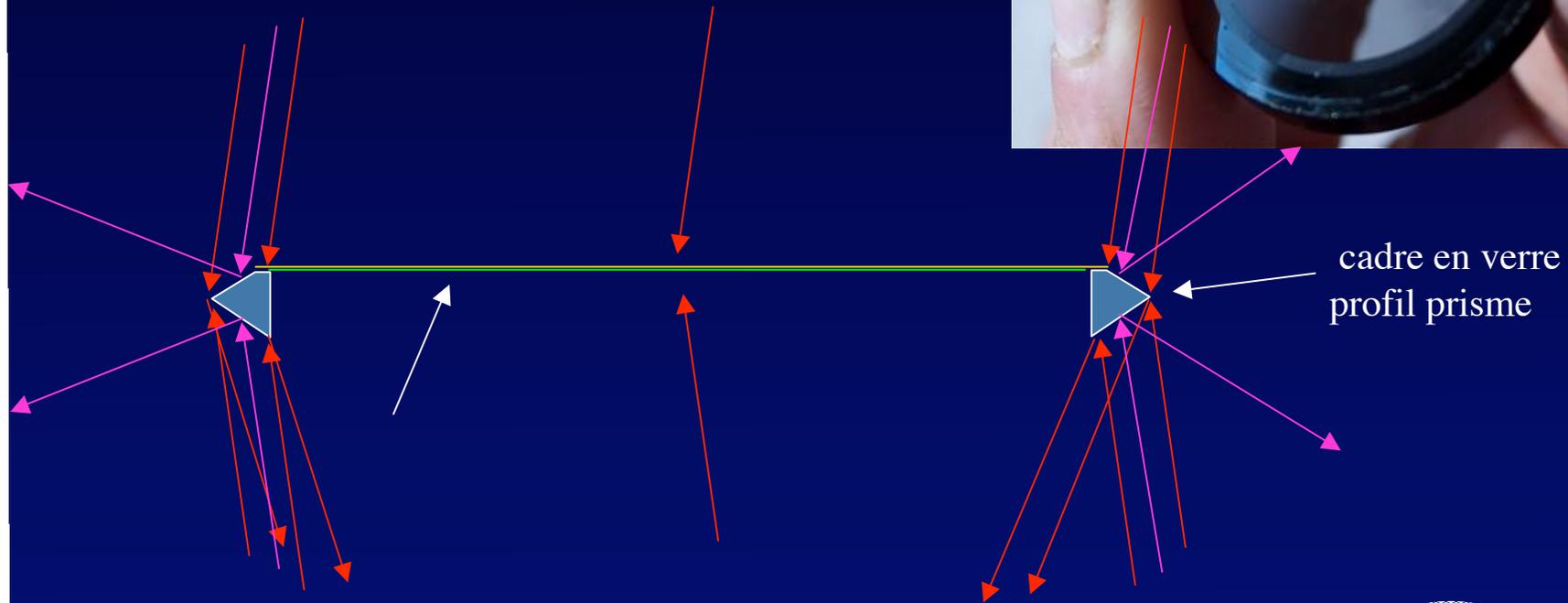
- l'interférence des faisceaux module les intensités émergentes...
- la lumière peut partir d'un côté ou de l'autre, en déplaçant la lame de $\lambda/4$
- la pression de radiation P/c s'inverse selon la position... à intervalles de $\lambda/4$
- la lame se piège sur la frange la plus proche

Privilégier la frange centrale en variant la longueur d'onde



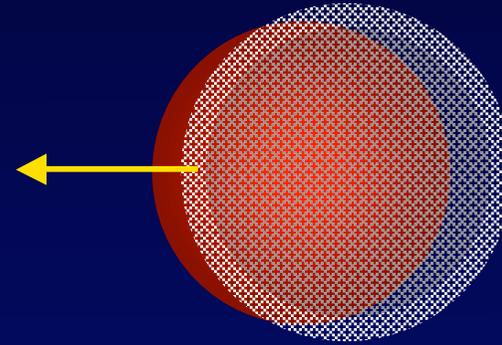
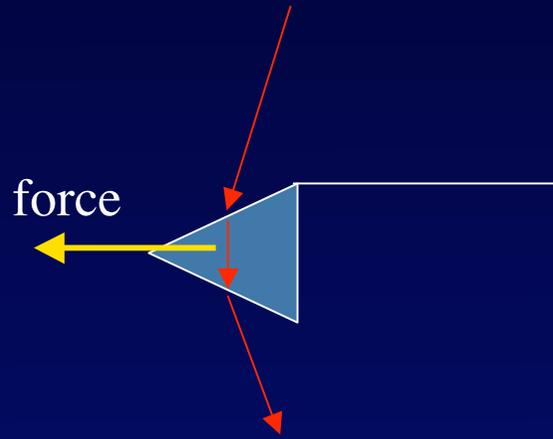
- la lame piégée est attirée vers la frange centrale en balayant du rouge au bleu la longueur d'onde laser , à répétition

Miroir membrane pour "Laser Trapped Hypertelescope Flotilla"

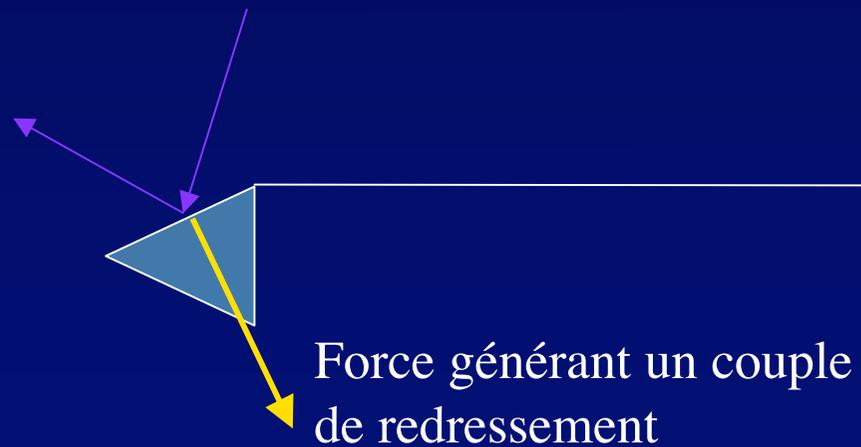


Auto-centrage

Piégeage transverse : Auto-centrage par effet de "pincette laser"



L' attitude s'auto-ajuste aussi

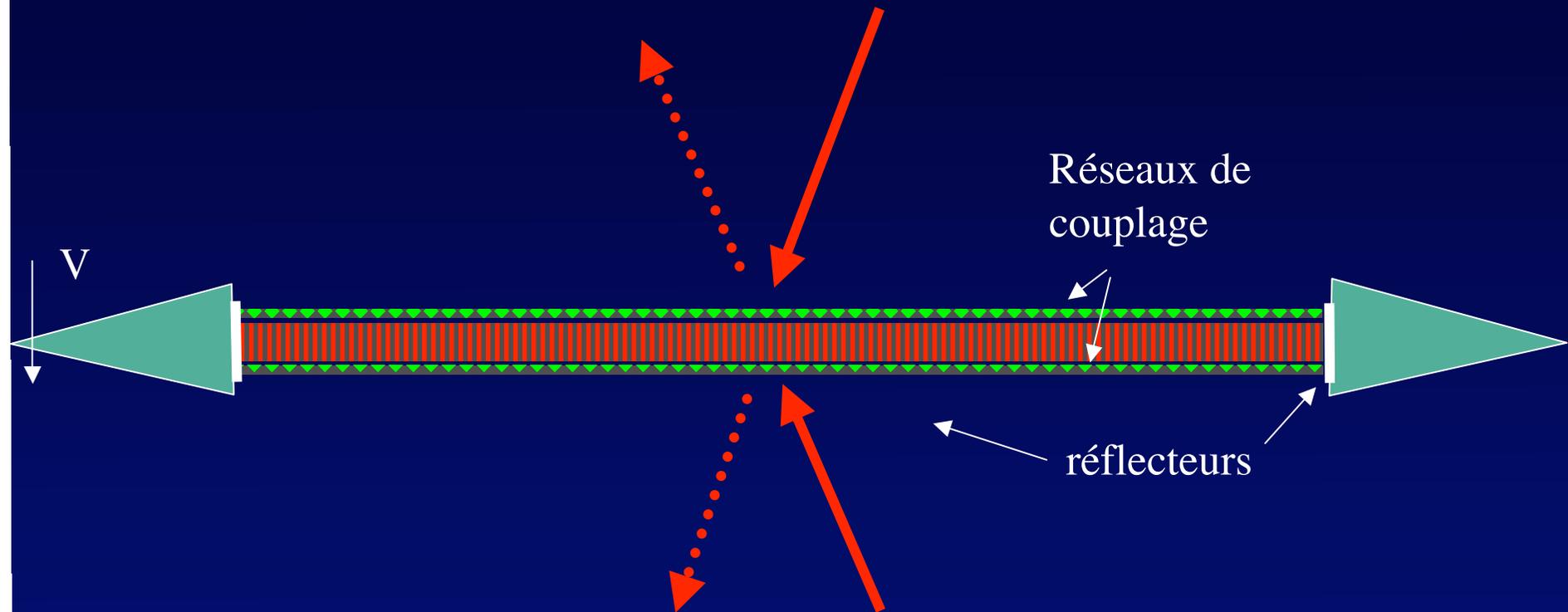


Amortir l'oscillation



- L'excitation par les photons infra-rouges s'accumule
- Amortisseur:
 - Des micro-cerises ? Queue flexible, inélastique, absorbe l'énergie
 - membrane flexible ?
 - Amortisseur optique ?
- Préciser les limitations

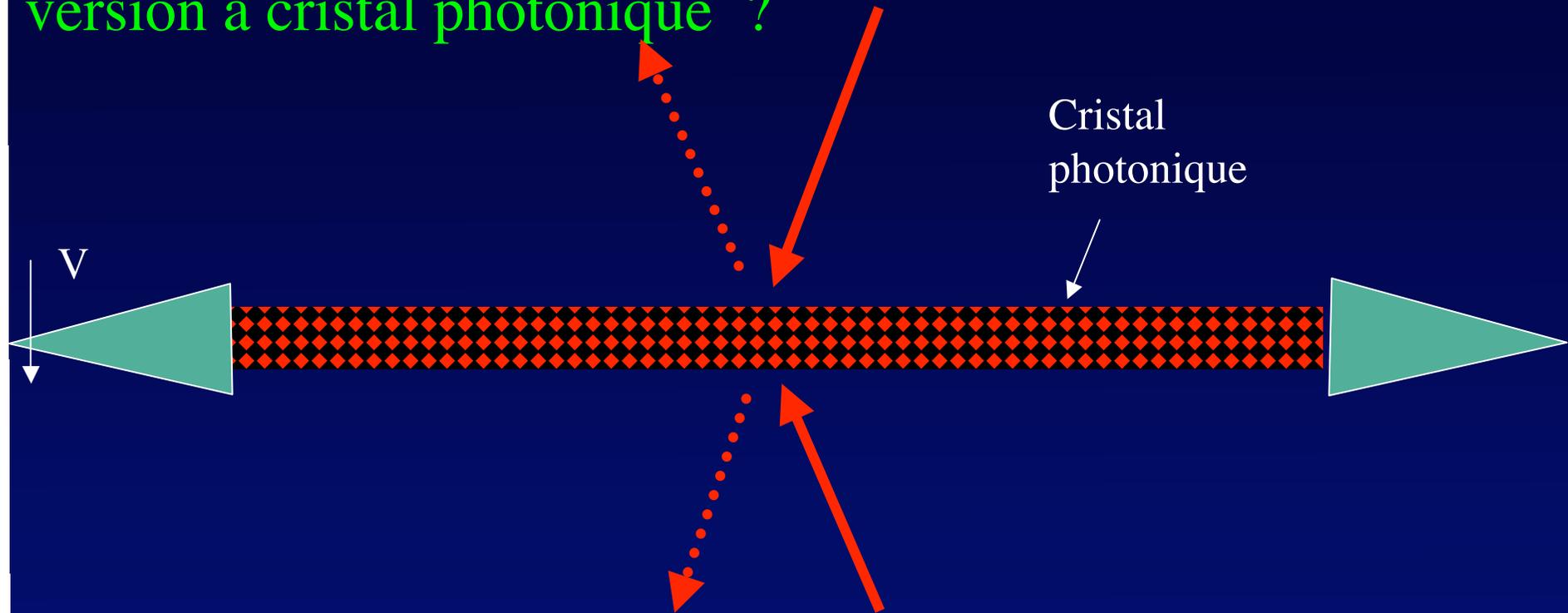
Amortisseur optique par résonateur transverse ?



- pour créer un terme d'amortissement ...
- ... rendre R & T sensibles à la longueur d'onde , donc à V ...
- ... par une cavité résonante transverse, à haut gain
- difficultés: modes complexes dans le disque

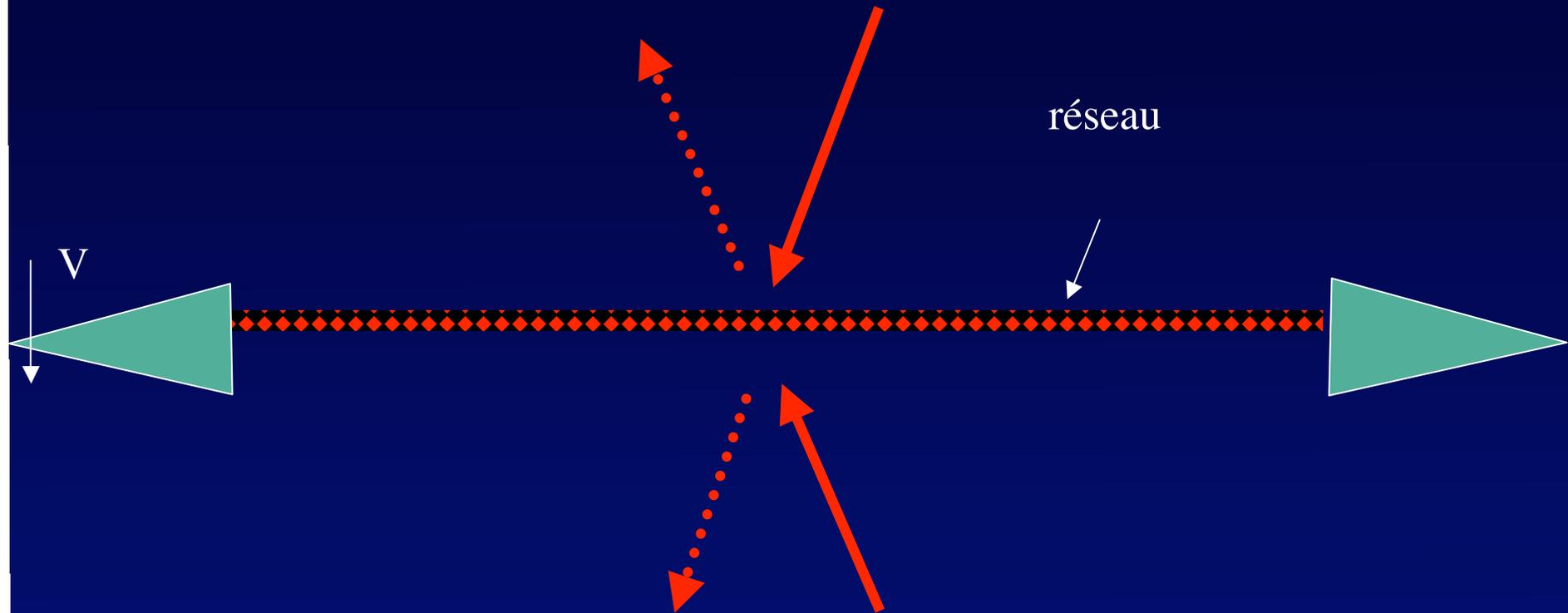
Amortisseur optique par résonateur transverse:

version à cristal photonique ?



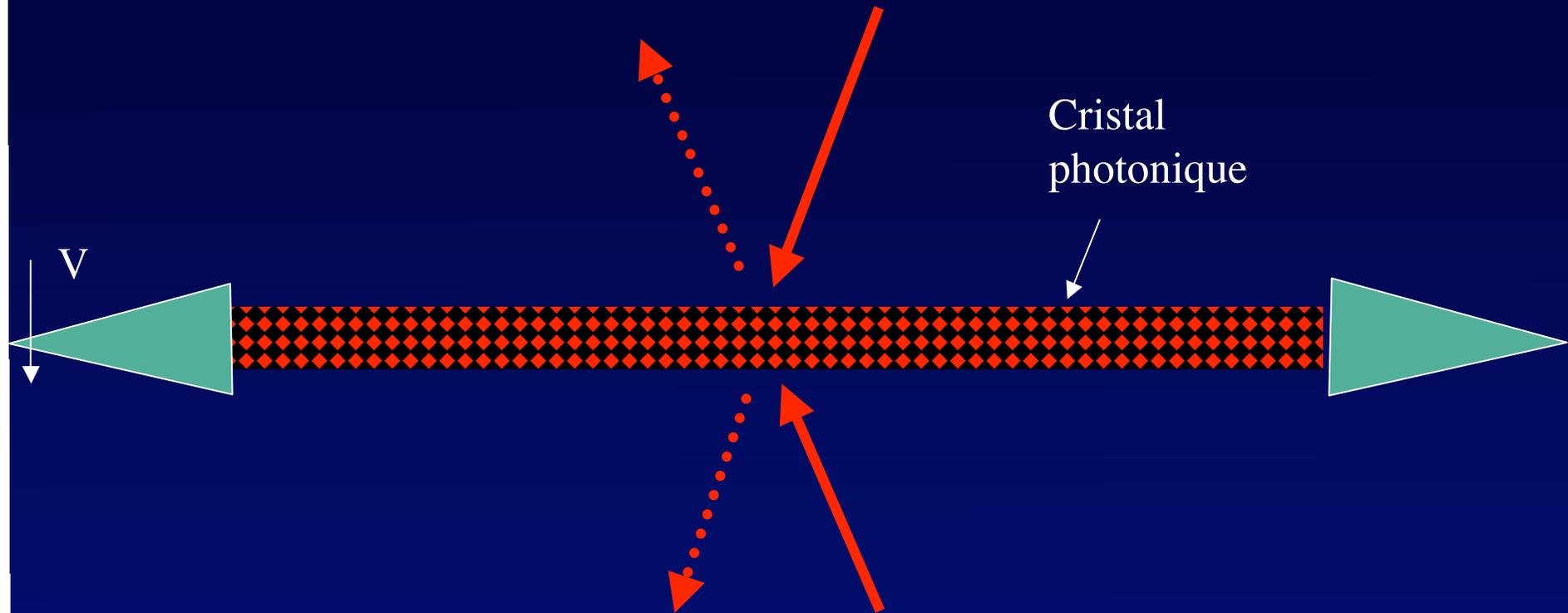
- reroidissement obtenu par Karrai et al. (2008)

Amortisseur optique actif ?



- Couramment utilisé lorsque l'on peut mesurer la position
- Difficile dans le cas présent ...
- ... à moins de rétro-réfléchir les faisceaux vers la source laser
proposition de S.Gigan: réseau ...

Refroidissement laser: est-ce possible ?

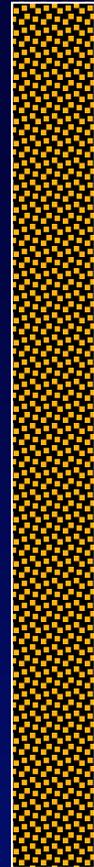


Deux articles récents le suggèrent :

Seletskiy et al., 2010 "Laser cooling of solids to cryogenic temperatures"

Karrai et al., 2008, "Doppler Optomechanics of a Photonic Crystal"

Oscillation et température de la lame



- Température : oscillation aléatoire des atomes dans la lame
- Fait osciller ses faces optiques
- Les amortir extrait l'énergie thermique , refroidit

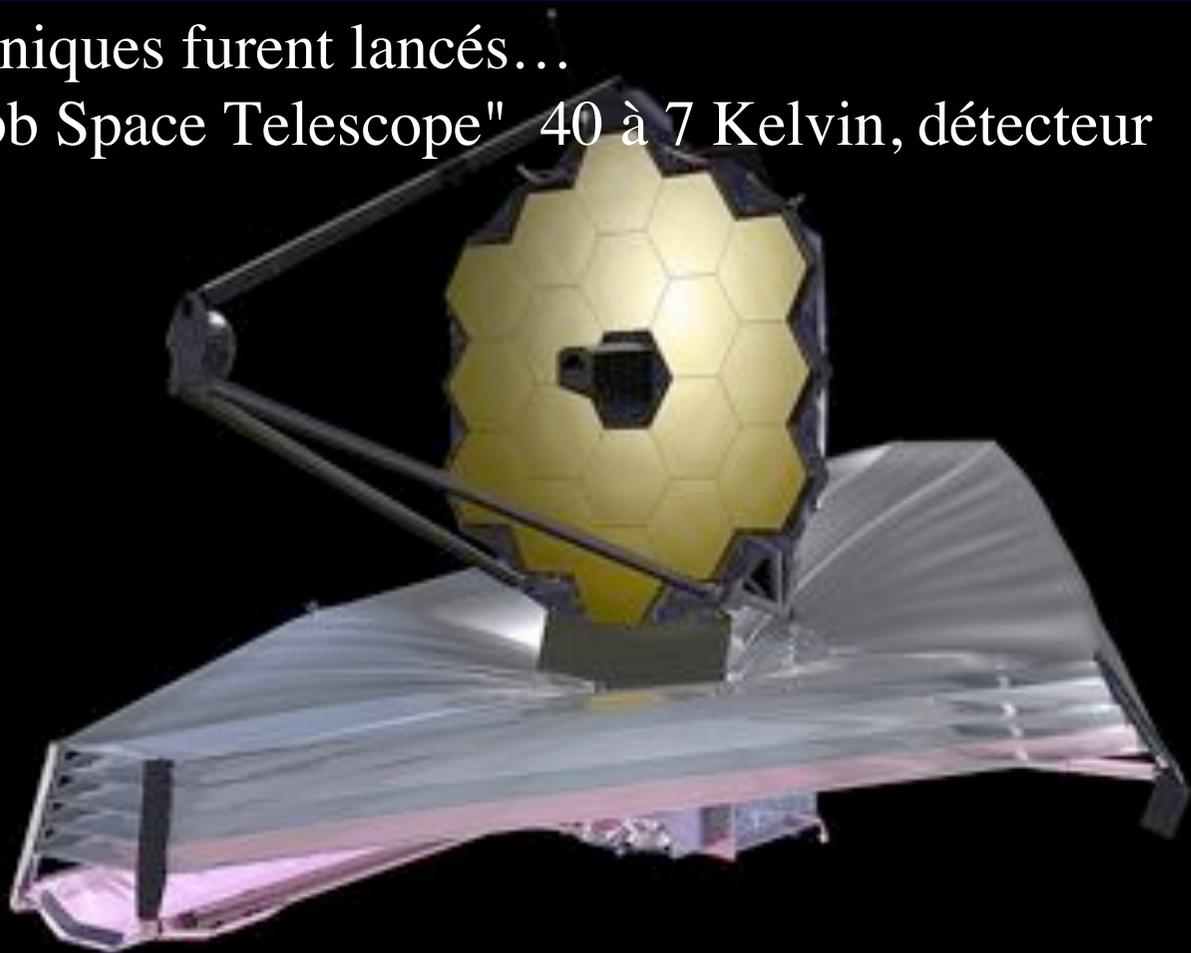
Seletskiy et al., 2010 "Laser cooling of solids to cryogenic temperatures"

Karrai et al., 2008, "Doppler Optomechanics of a Photonic Crystal"

pour observer l'infra-rouge lointain:

Peut-on faire d'une pierre deux coups ?

- piéger les miroirs
 - et les refroidir...
- des télescopes cryogéniques furent lancés...
 - bientôt: "James Webb Space Telescope" 40 à 7 Kelvin, détecteur refroidi



Interféromètre SPECS pour infra-rouge lointain et sub-millimétrique

(Leizawitz, Mather et al. , 2008)

Repoussé par la NASA



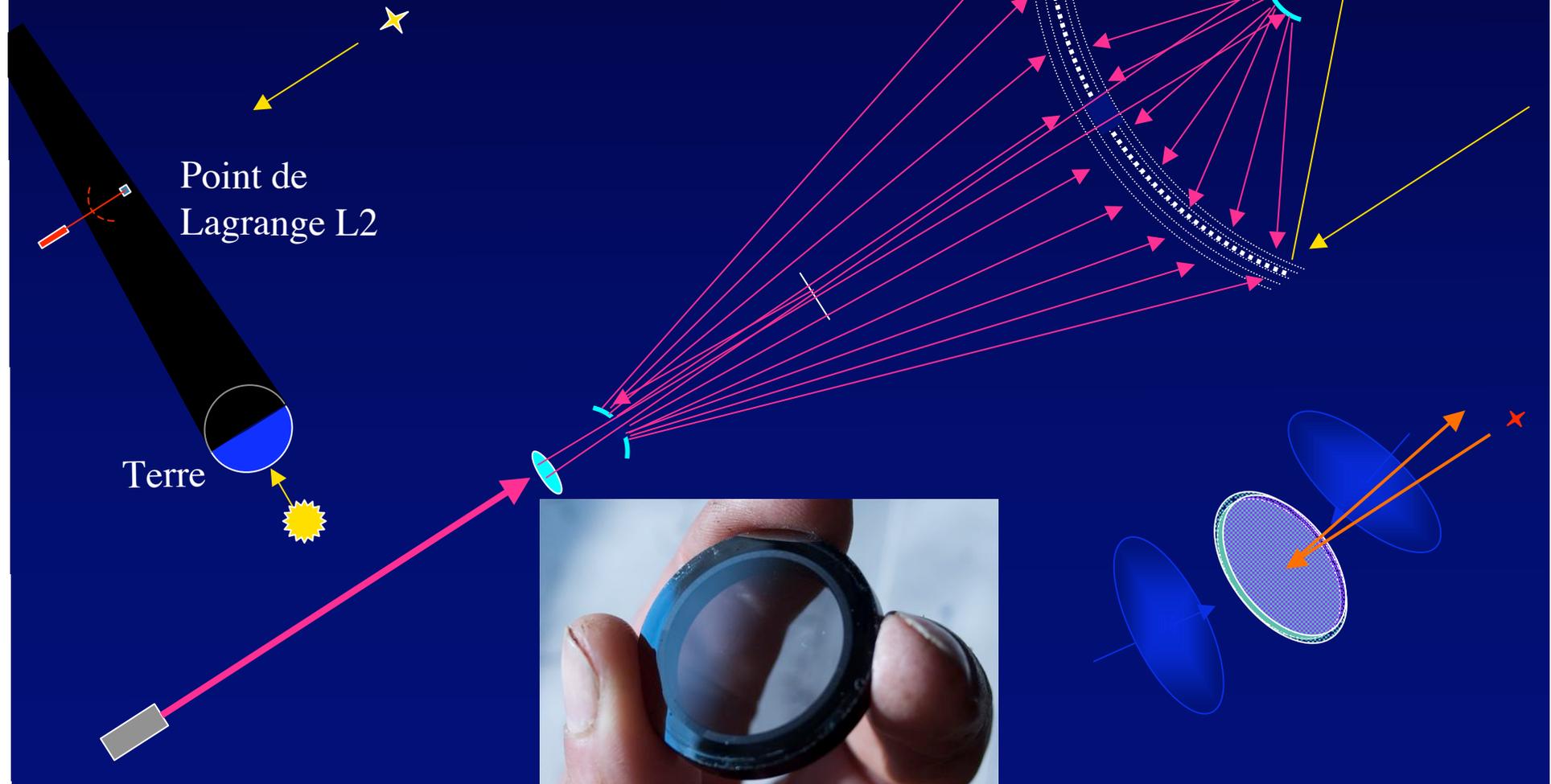
- Miroirs 25m² , refroidis à 4 K, " deux ou plus "
- Détecteurs directs refroidis a 0,1K
- changer le diamètre des sous-ouvertures en conservant la surface collectrice totale laisse invariant le rapport étoile /fond de ciel dans l'image Fizeau ou a pupille densifiée (Labeyrie , 2007)
- version piégée par laser envisageable si refroidissable
- changer le diamètre des sous-ouvertures en conservant la surface collectrice totale laisse invariant le rapport étoile /fond de ciel dans l'image Fizeau ou a pupille densifiée (Labeyrie , 2007)

"Laser-Trapped Hypertelescope Flotilla" ou "Luciola-LT"

(Labeyrie et al., Experimental Astronomy, 2009)

Extensible vers une flotille de 100km ?

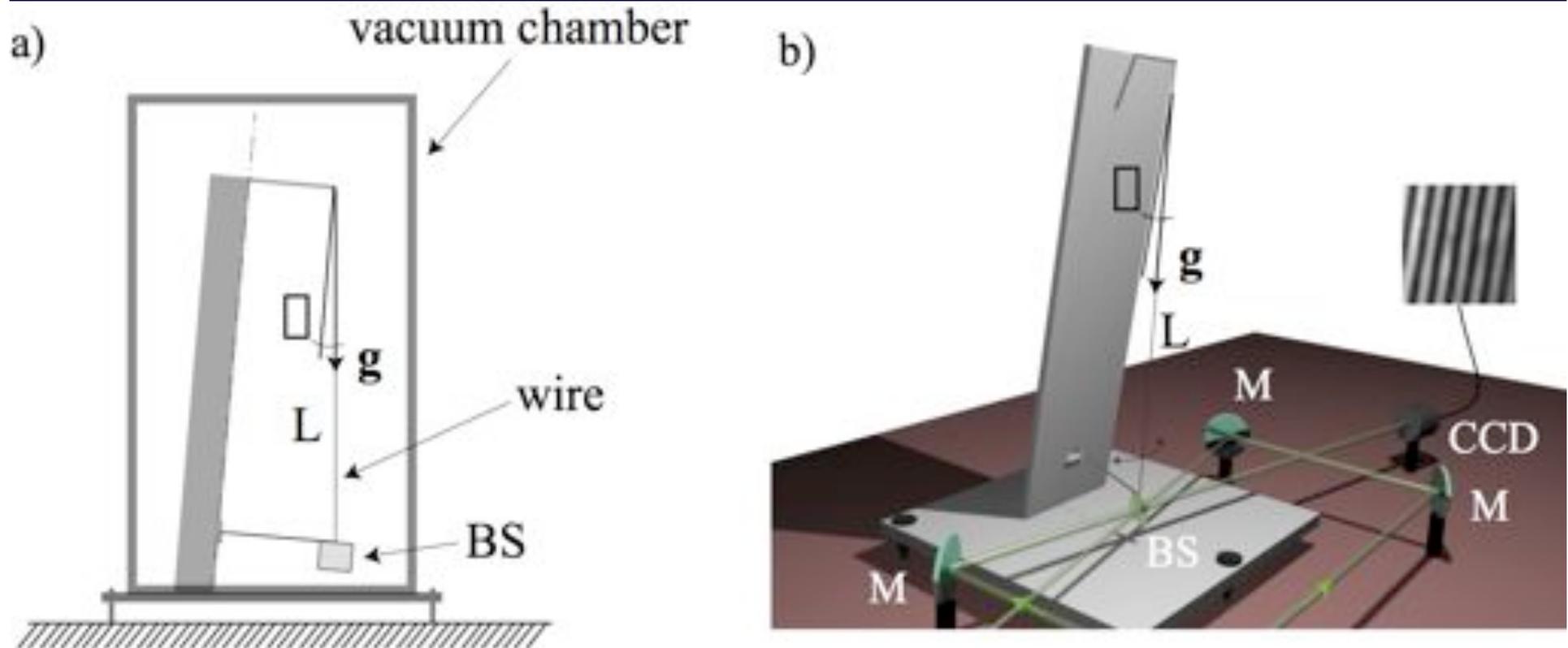
"Laser Trapped Exo-Earth Imager (LT-EEI)"



Laser trapped hypertelescope flotilla: 2 satellites nécessaires au moins , avec ligne à retard virtuelle



Montage d'essai en laboratoire par U.Bortolozzo & S.Residori



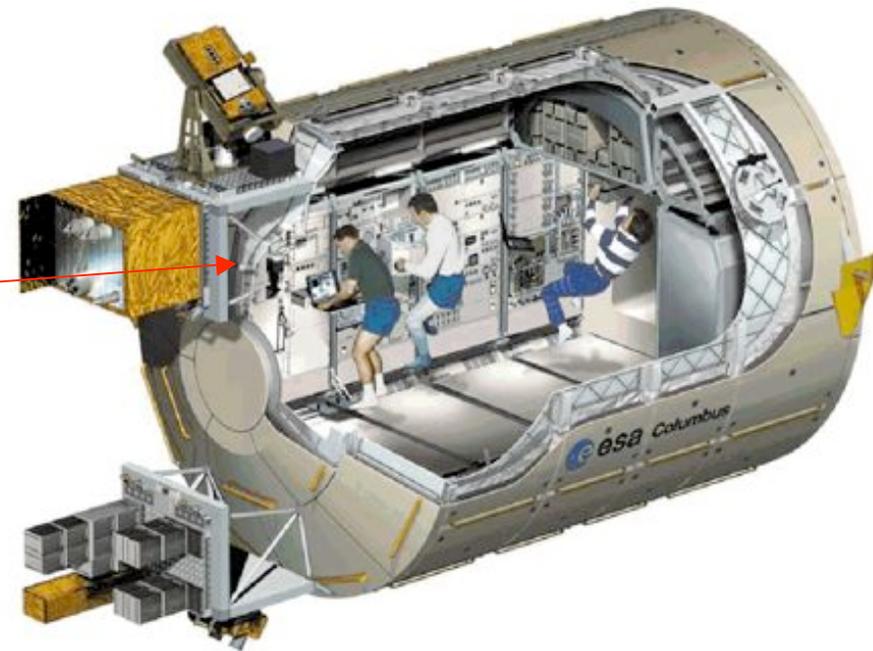
- lame à suspension "sismographe porte de jardin"
- très sensible
- sous vide poussé, éliminant l'effet du mouvement Brownien
- laser à argon 100W,
- détection de mouvement par lumière lente (Bortolozzo et al. 2)

Essais envisagés dans la "International Space Station"

- gravité résiduelle :
0,2 micro-g or 2 micron.s-2
- Acceptable avec quelques Watts de puissance laser
- satellite geostationnaire aussi envisageable



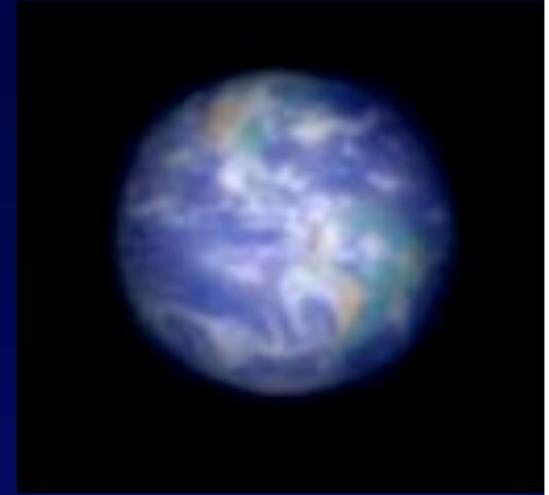
Laboratoire Columbus (ESA)
racks reliés au vide extérieur



Laser Trapped Exo-Earth Imager (LT-EEI)

Pour une image directe comme celle-ci

Distance 10 années-lumière , pose 10 heures



- Flotille de 100km, avec 10,000 - 100,000 miroirs, dimension 10 à 3cm (surface 100m²)
- Espacement 1000 à 300m
- masse totale des miroirs: 250kg : " tiennent dans une valise "

Exemple: 100,000 miroirs de 3cm

Espacement 316 m , Direct Imaging Field 1.6 nanoradian, ou 0,3 milli arc-seconde

Résolution angulaire à 500 nm: 1.03 micro-arc-seconde

Diamètre des miroirs émetteurs laser : 2.6m et 13.3 m **peuvent être dilués**

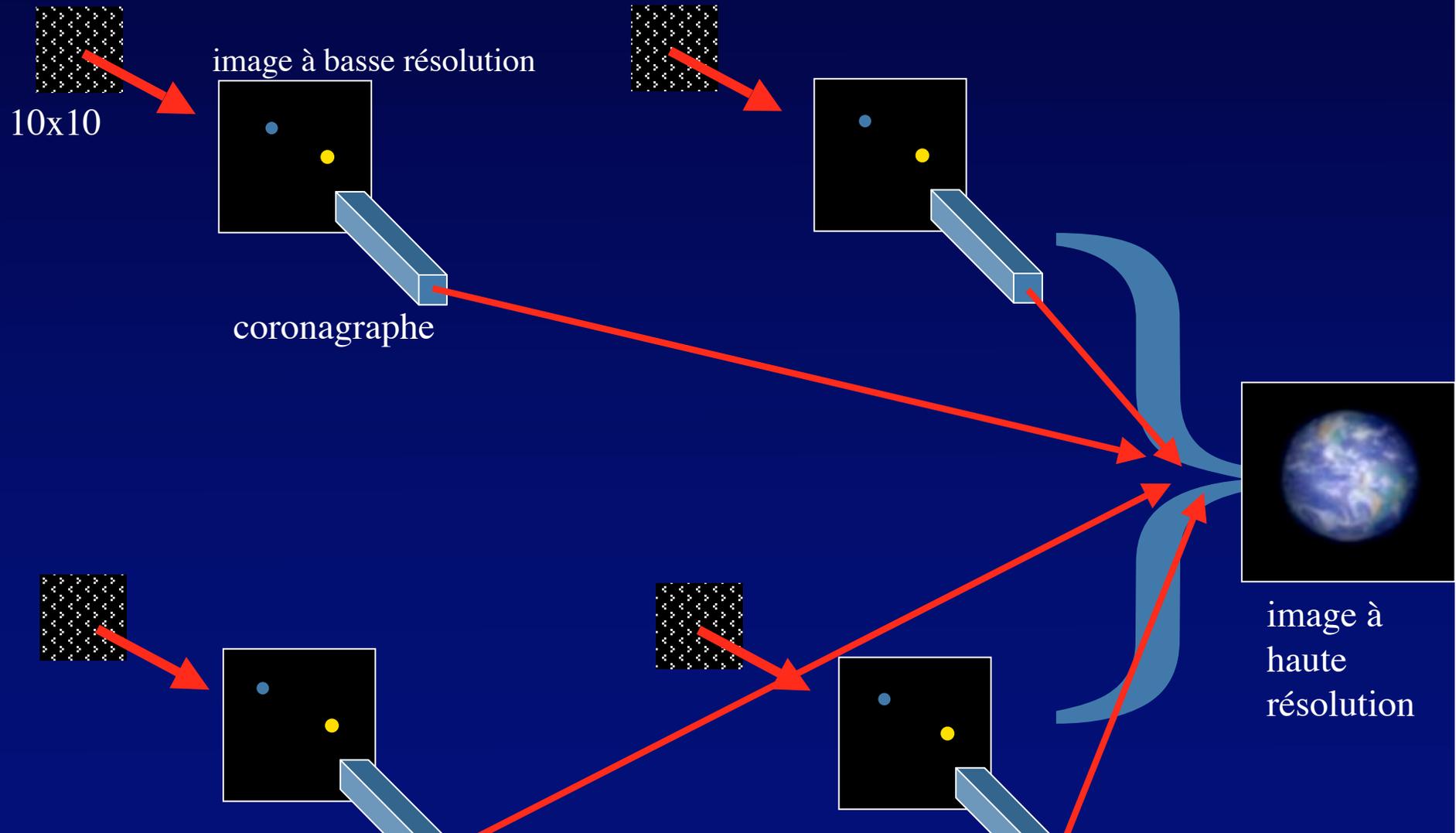
Masse des miroirs: 2.3 gramme, total pour 100,000: 236 kg

Impacts de micro-météorites > 1 micron (Grun): 2.4 /miroir/an , vitesse acquise: > 0,014 micron/s

Laser Trapped Exo-Earth Imager:

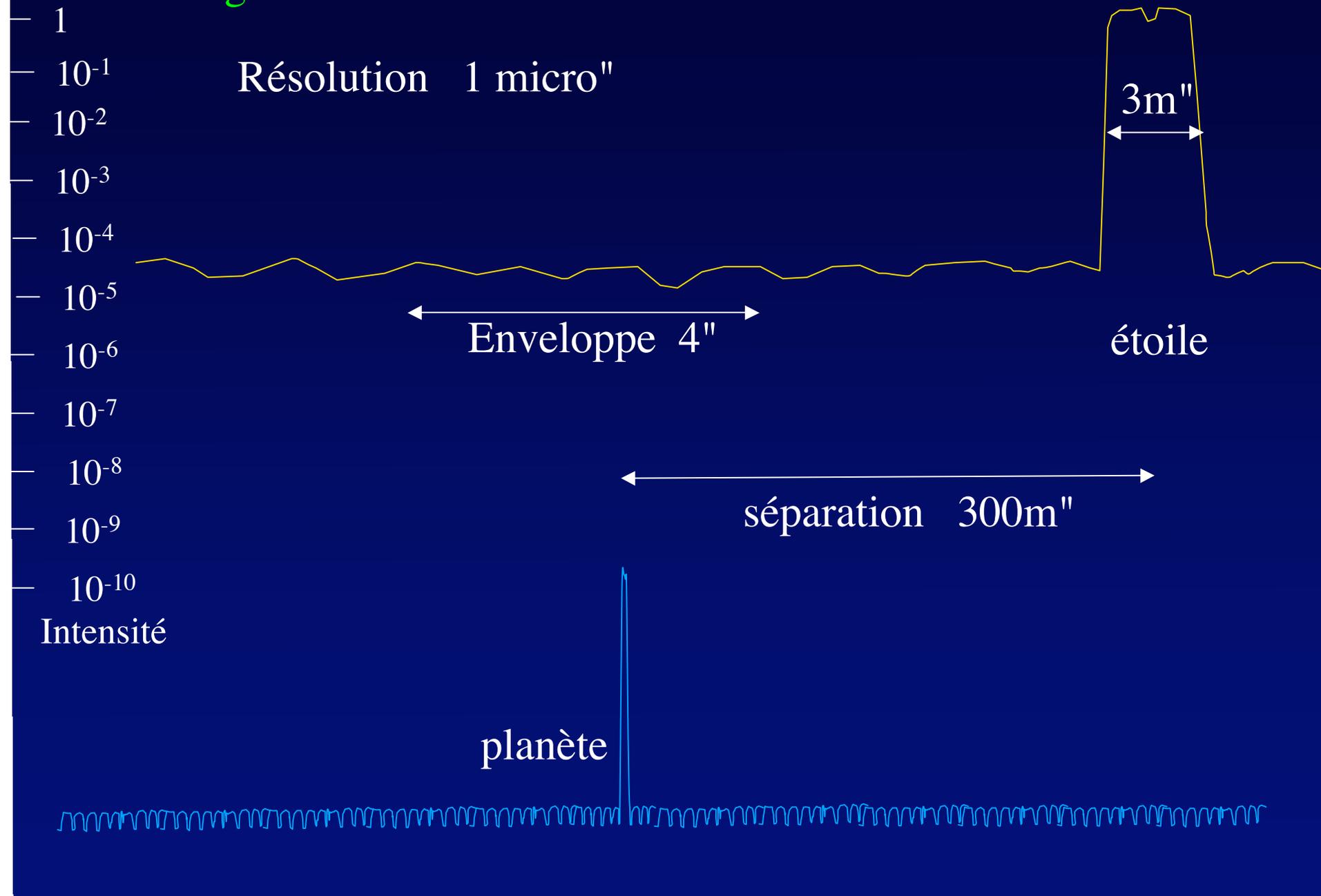
atténuer l'étoile mère

- Possible avec :
- interférence destructive entre paires proches (Bracewell)
- coronagraphie avec des sous-groupes, avec densification de pupille hiérarchique



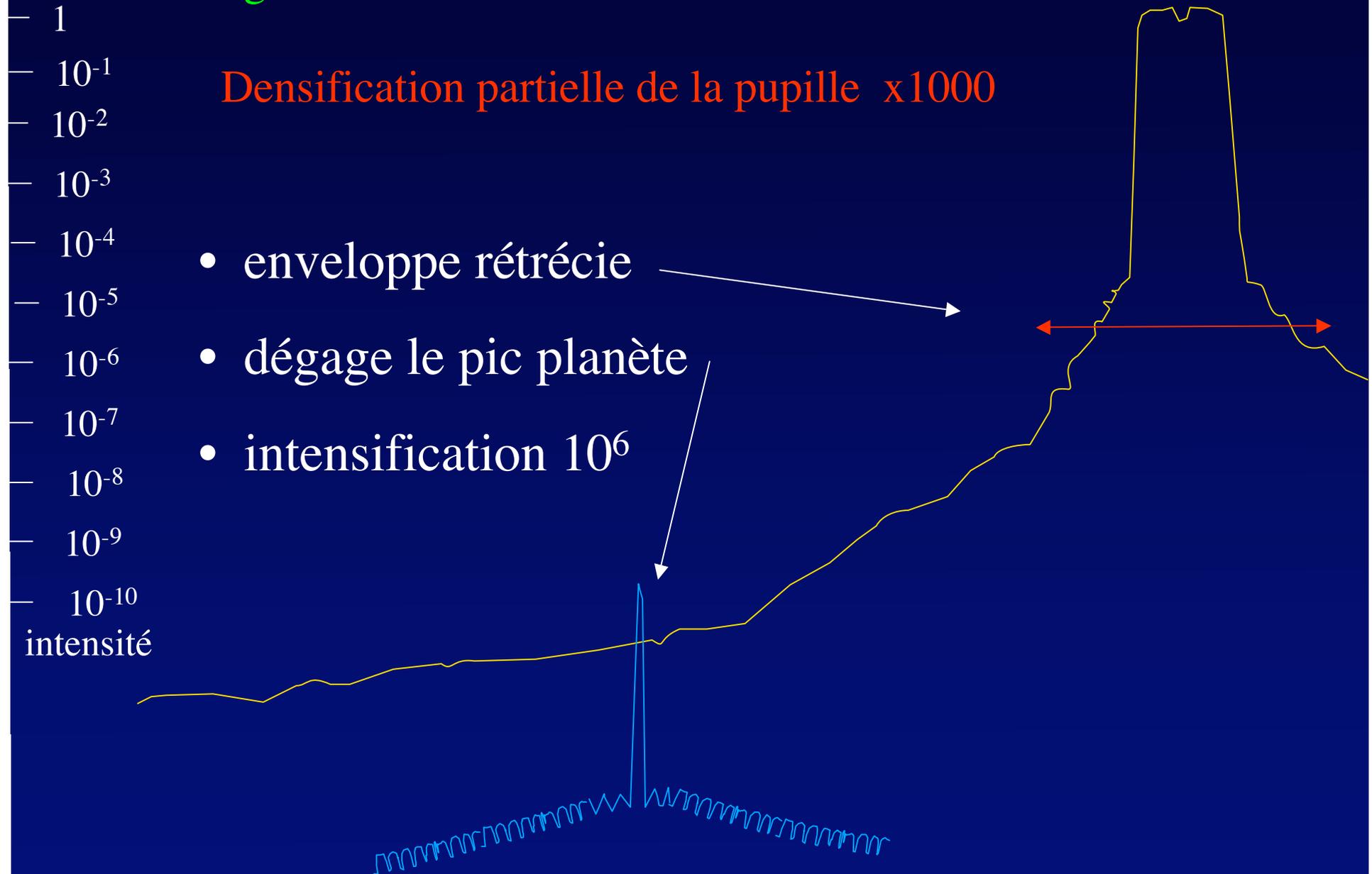
version Luciola LT d'Exo Earth Imager:

Image Fizeau de Soleil - Terre à 10 années-lumière



version Luciola LT d'Exo Earth Imager:

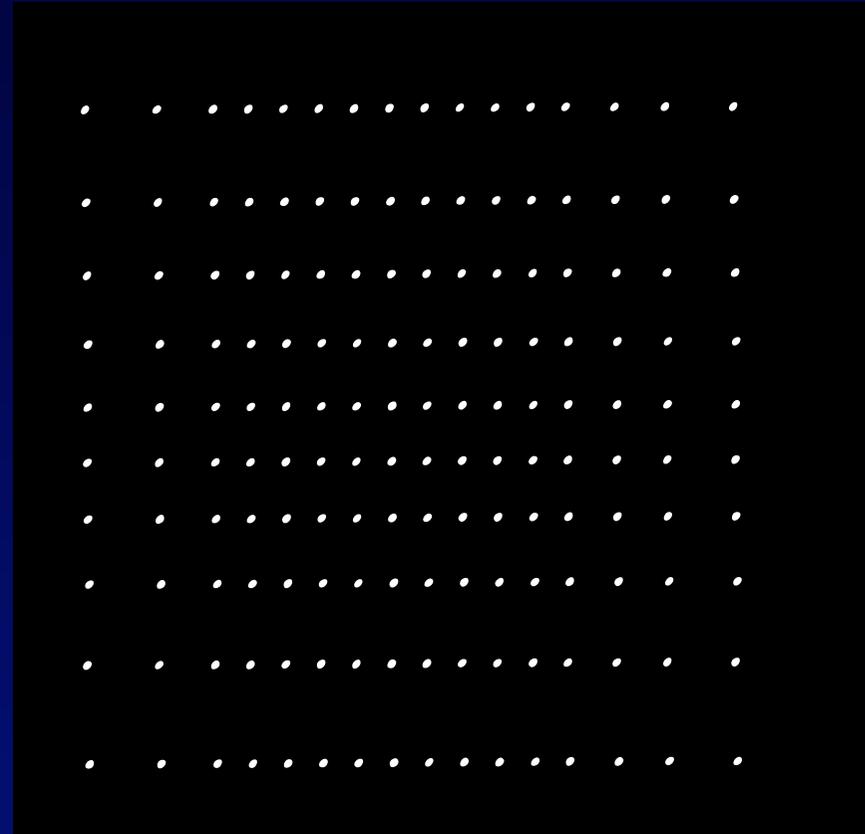
Image Fizeau de Soleil -Terre à 10 années-lumière



- Des miroirs plus espacés au b

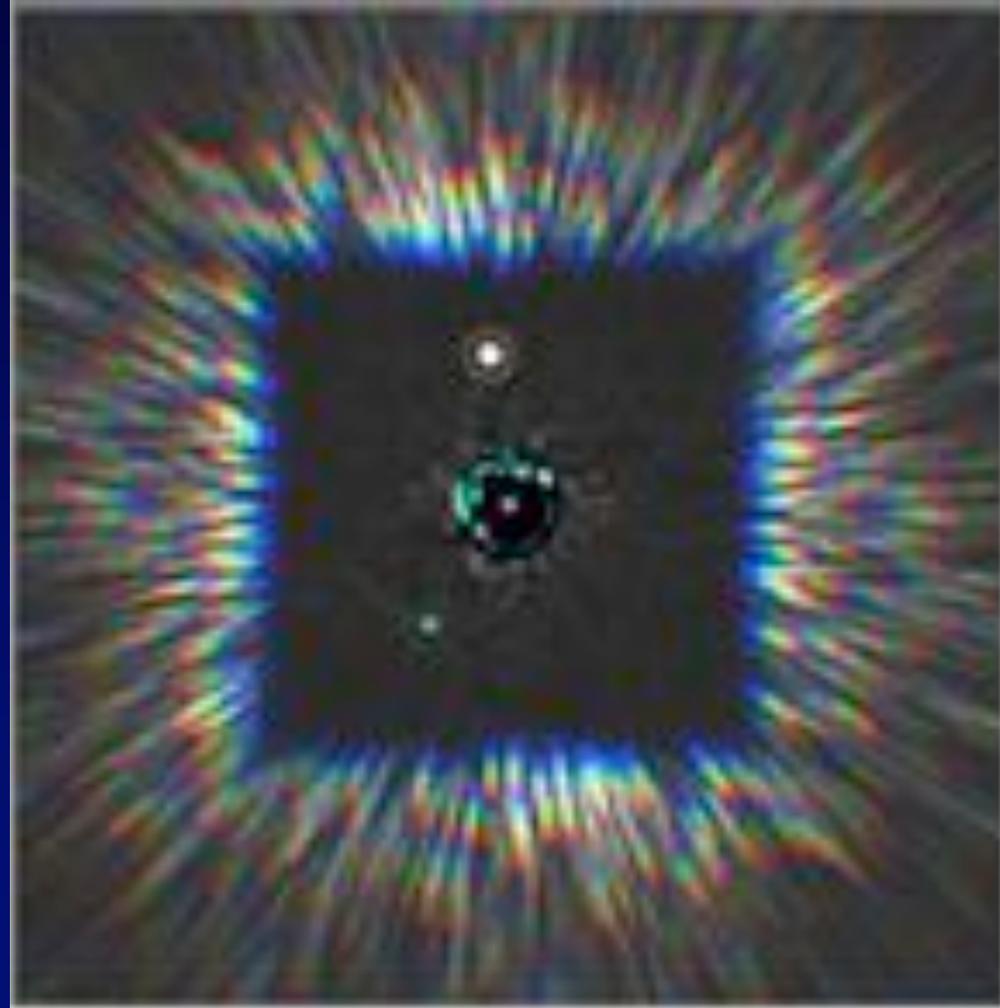
version Luciola LT d'Exo Earth Imager:

Flotille apodisante



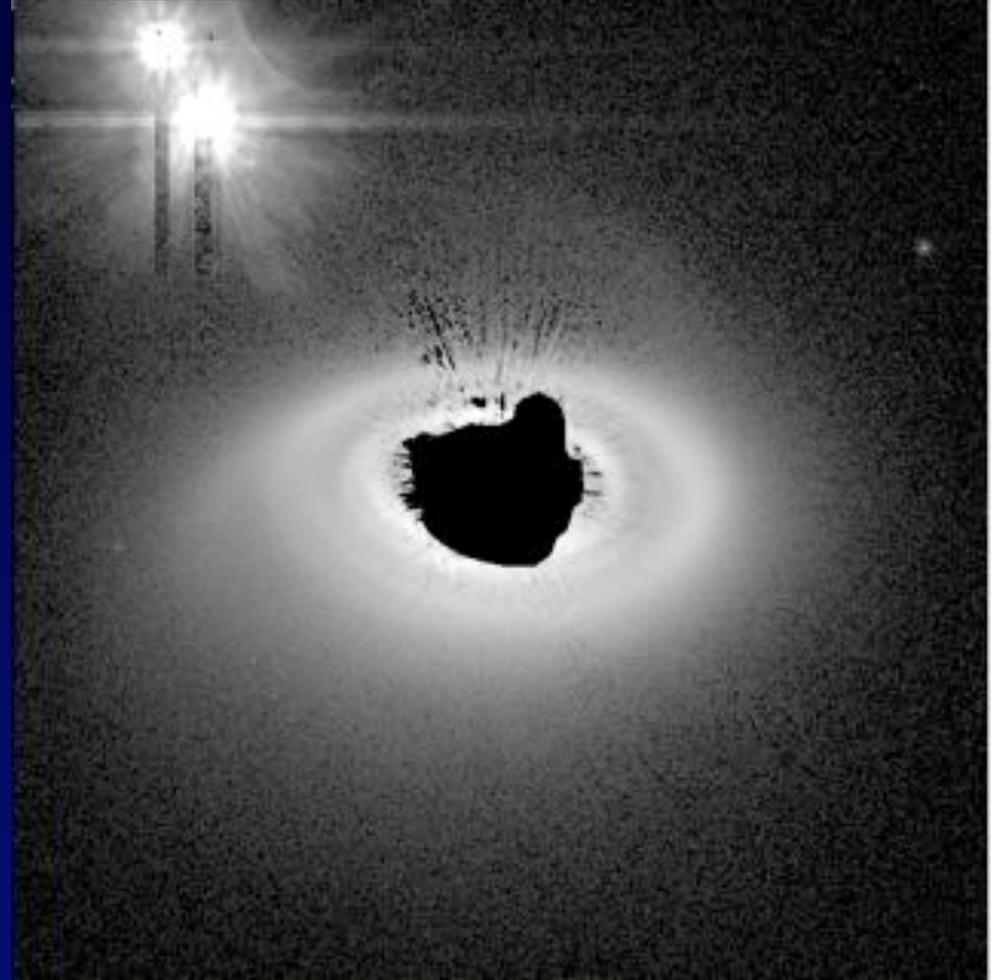
- atténue les pieds de la fonction d'étalement
- peut remplacer ou compléter un coronographe
- à préciser pour Exo Earth Imager/LT

Coronographe adaptatif



Gemini Planet Imager (McIntosh et al.)

Coronographe de Hubble

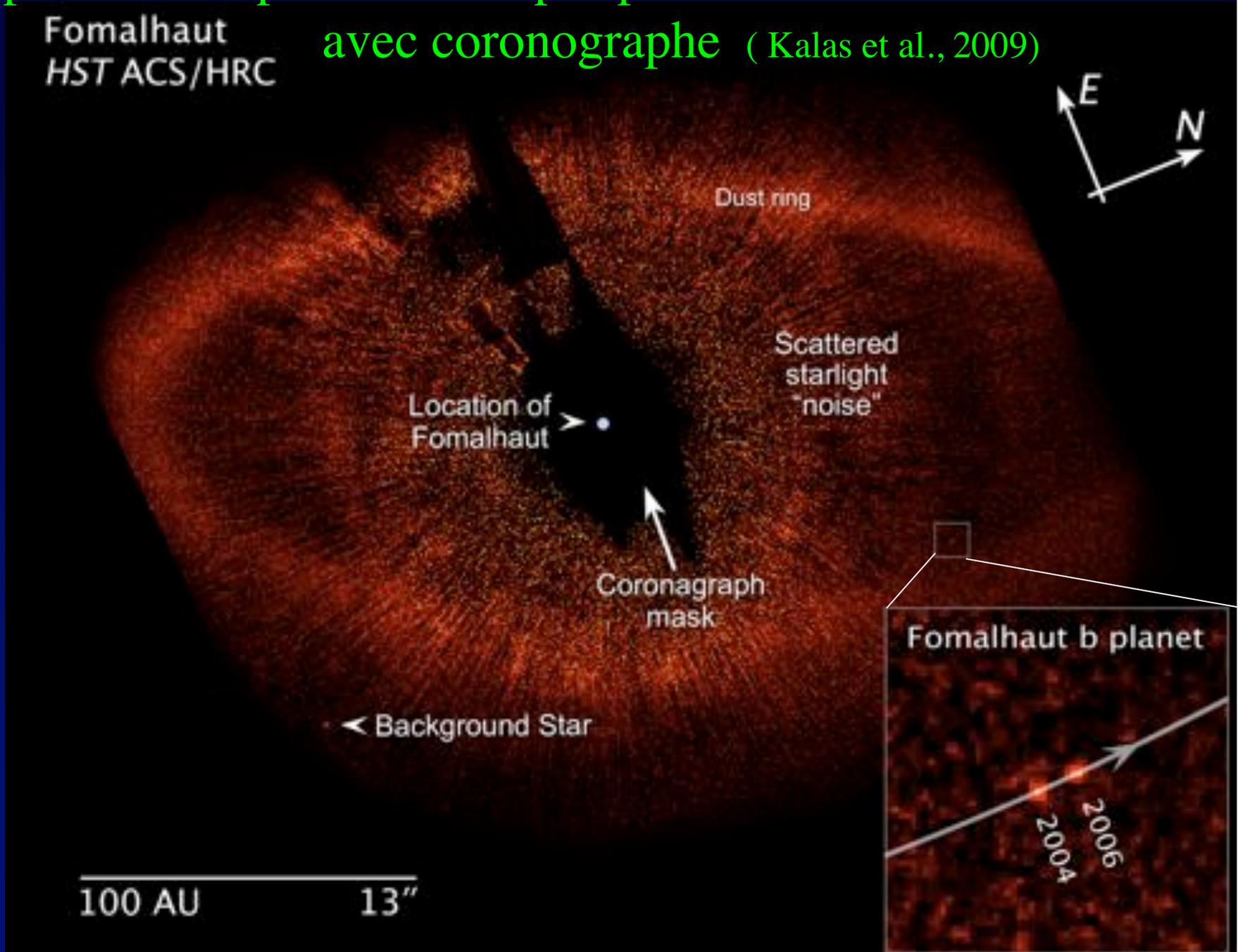


Disque de poussière autour de l'étoile jeune HD14156

Exo-planète vue par le télescope spatial Hubble

Fomalhaut
HST ACS/HRC

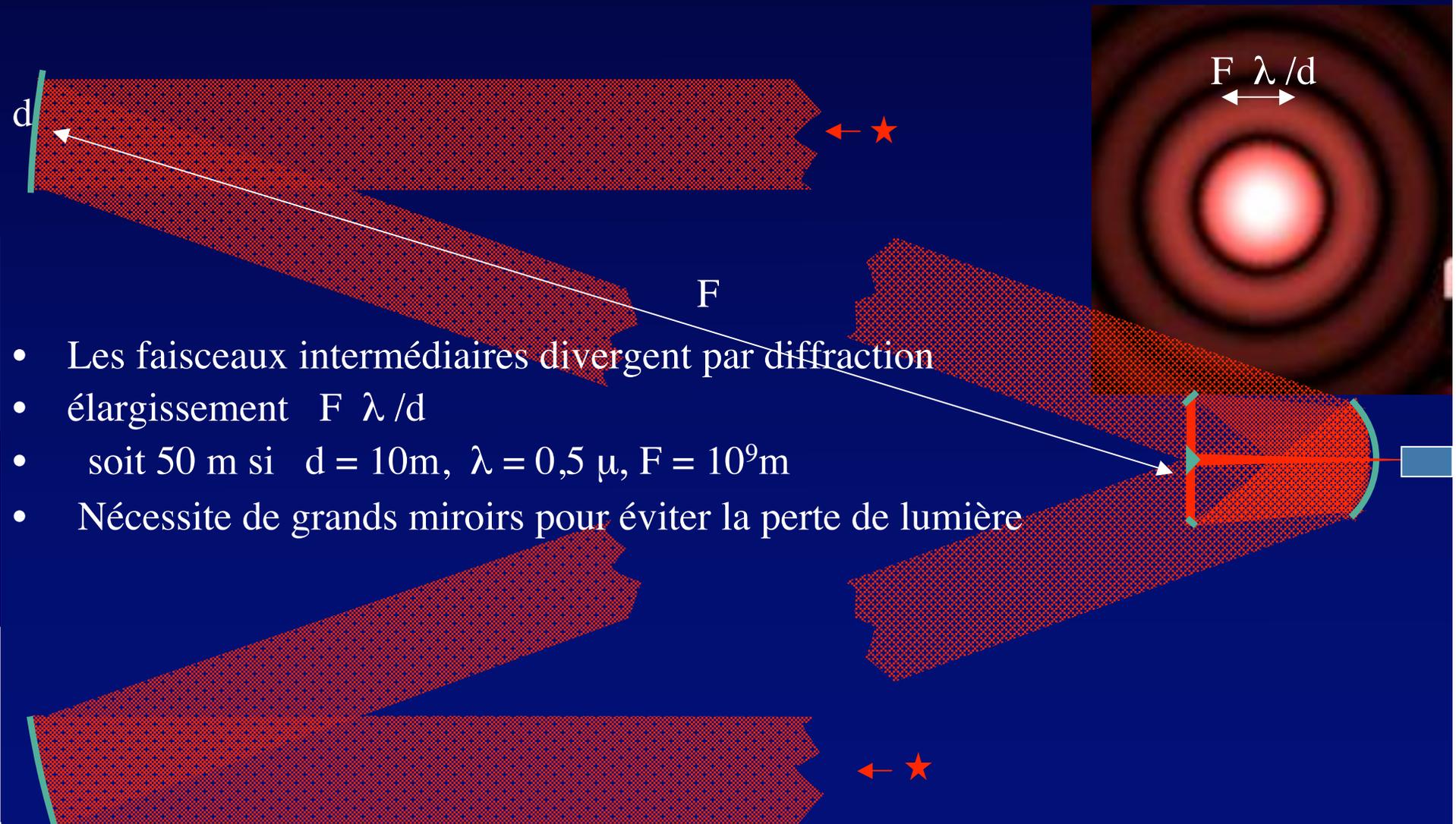
avec coronographe (Kalas et al., 2009)



Dans l'espace: flotilles interférométriques géantes

Quelle limite de dimension ? un million de kilomètres ?

" Neutron Star Imager "

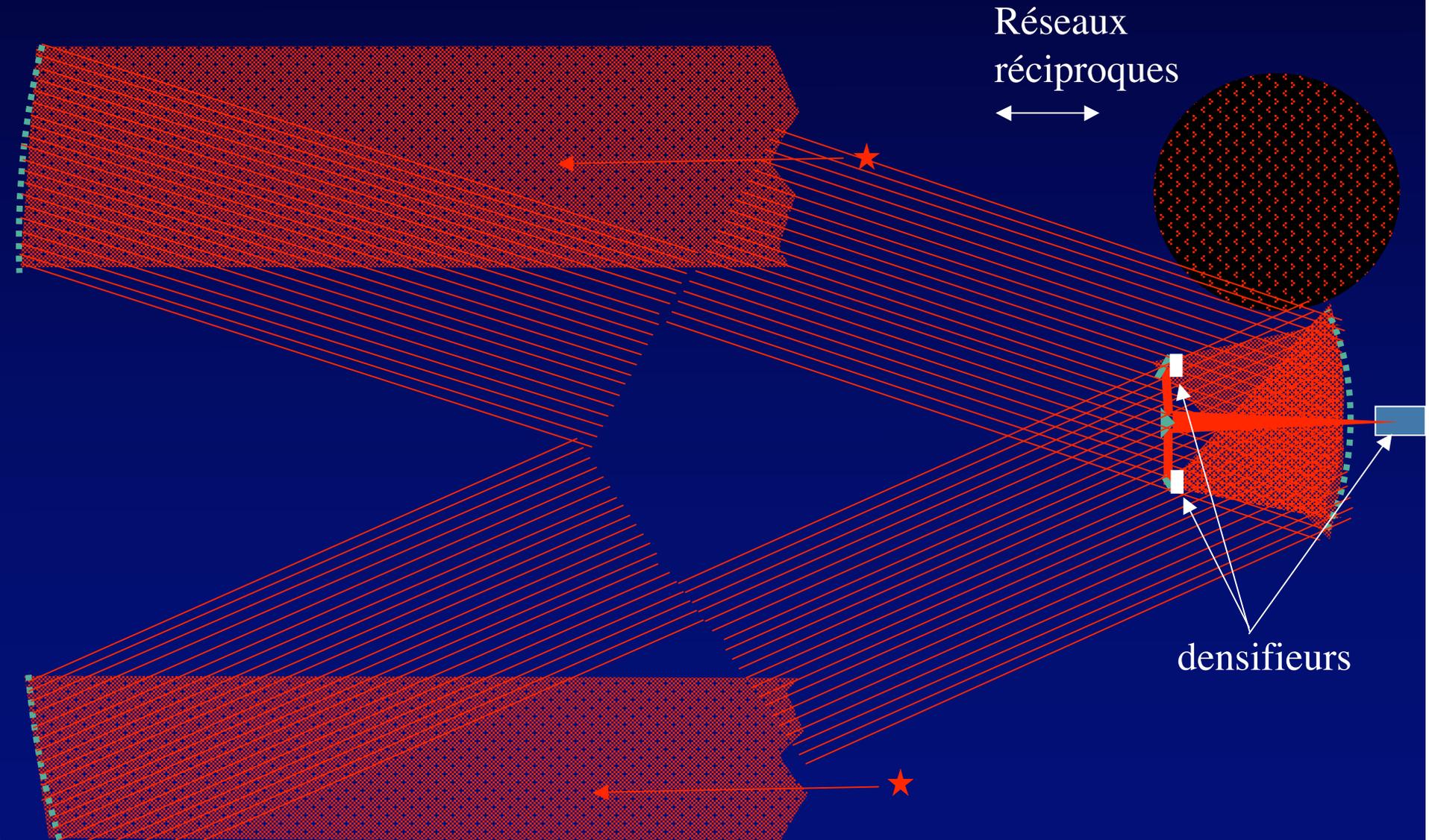


- Les faisceaux intermédiaires divergent par diffraction
- élargissement $F \lambda / d$
- soit 50 m si $d = 10\text{m}$, $\lambda = 0,5 \mu$, $F = 10^9\text{m}$
- Nécessite de grands miroirs pour éviter la perte de lumière

Pour Neutron Star Imager :

Peut-on remplacer les grands miroirs par des sous-flotilles ?

Flotille de flotilles, piégées par laser



Conclusions et suite du travail

- Images à haute résolution et haute dynamique: des voies nouvelles particulièrement actives en Astronomie
- stimulées par les découvertes de 400 exo-planètes
- aussi applicables aux objets cosmologiques lointains
- Notre compréhension de l'Univers devrait y gagner ...
- ... et la recherche de vie progresser