

Mieux voir les étoiles,

leurs planètes: présence de vie ?

les galaxies,

l'univers lointain



## Tendance en interférométrie radio: antennes plus nombreuses, pour un meilleur échantillonnage de l'onde

- LOFAR 25 000 antennes, 350km
- Long Wavelength Array: 10 000 antennes, 400km
- Murchison Widefield Array: 16 000 antennes dipôles
- "Sample wavefront with myriad small antennas: revolutionary potential gains ..."
- également intéressant en optique

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.





QuickTime™ et un décompresseur  
Photo - JPEG sont requis pour visualiser  
cette image.

Les essais d'hypertélescope sur Terre préparent  
les versions spatiales

# Voir la vie extra-solaire ?

## Laser Trapped Exo-Earth Imager (LTEEI)

Pour une image directe comme celle-ci

Distance 10 années-lumière , pose 10 heures

QuickTime™ et un décompresseur  
Photo - JPEG sont requis pour visualiser  
cette image.

- Flotille de 100km, avec 10,000 - 1.000.000 miroirs, dimension 10 à 3cm ( surface 100m<sup>2</sup> )
- Espacement 1000 à 100m
- 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



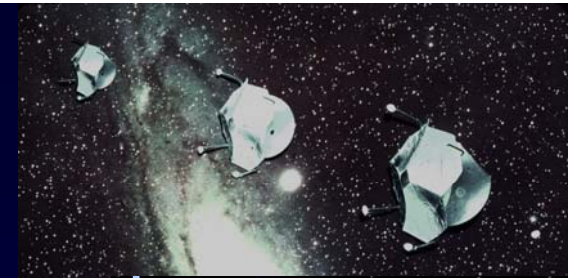
# Hypertélescope dans l'espace

- Flotille de 100 000 km ?
  - exemple: hypertélescope "Neutron Star Imager" à N miroirs de 8m
  - Voir en détail le pulsar du Crabe ? Diamètre 20km, rotation 33ms
- Au delà: Y aura-t-il une turbulence gravitationnelle ? Quelle limitation ?



## 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 ?



QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

# Proposition d'hypertélescope spatial Luciola

( soumise à l'ESA, 2008, Exp. Ast. 2009)

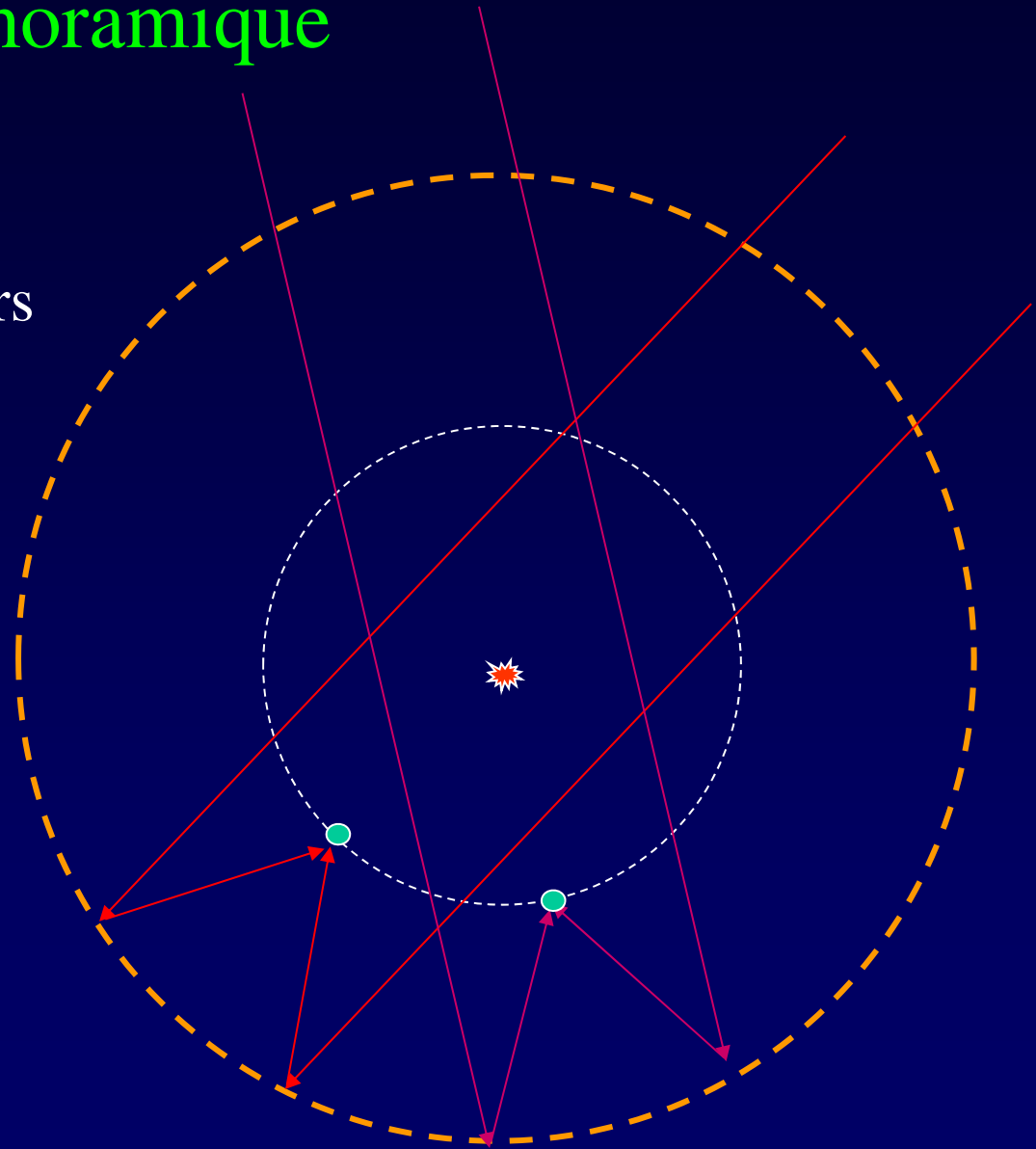




# Hypertélescope:

## Version panoramique

- Piloter une flotille de miroirs
- " formation flight"





Un début prometteur...

## essai récent de vol en formation: expérience PRISMA

2011, Franco-Suédois (CNES & SNSB ) [www.prismasatellites.se](http://www.prismasatellites.se)

- Pilotage relatif de deux mini-satellites...Mango & Tango
- ... Autonome sans le sol
- Micro fusées
- Positionnement par GPS
- Faible coût, résultats encourageants



Photo de Tango prise par Mango

# Essai récent de vol en formation: PRISMA

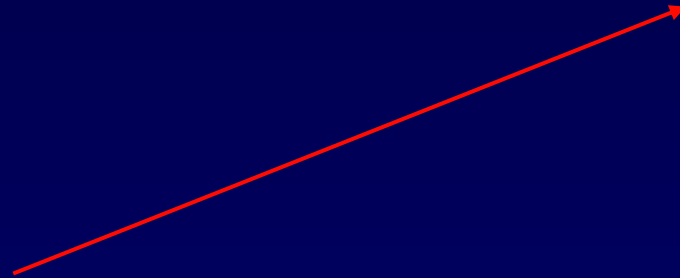


QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

# Essai récent de vol en formation: PRISMA



QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

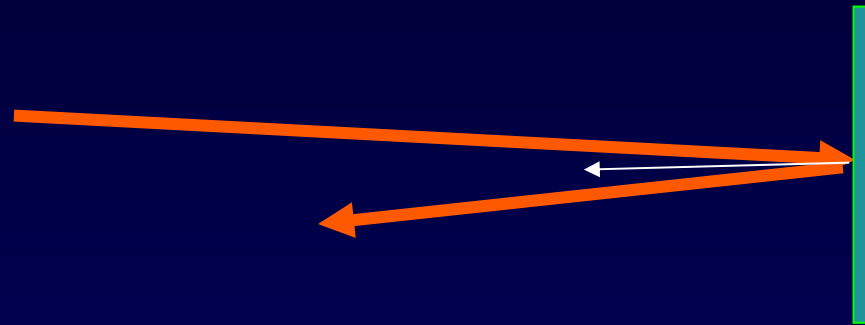


QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.



Dans l'espace:

## propulsion par laser



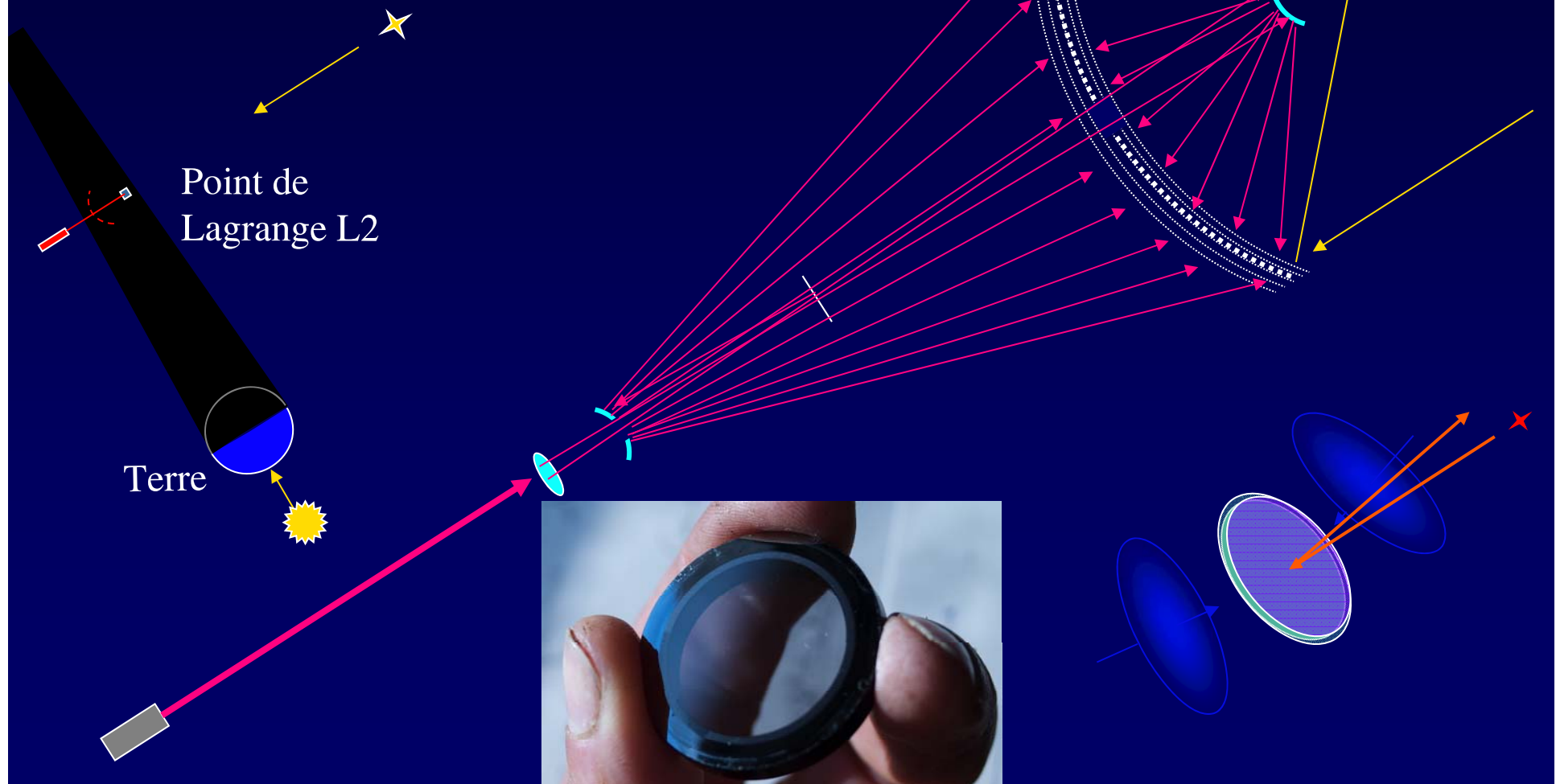
- Force répulsive
- Pression de radiation sur un miroir :  $F = 2 P/c$
- exemple:  $P = 1W \Rightarrow F = 6 \text{ nN}$  très faible !

# "Laser-Trapped Hypertelescope Flotilla" LTHF

(Labeyrie et al., Experimental Astronomy, 2009)

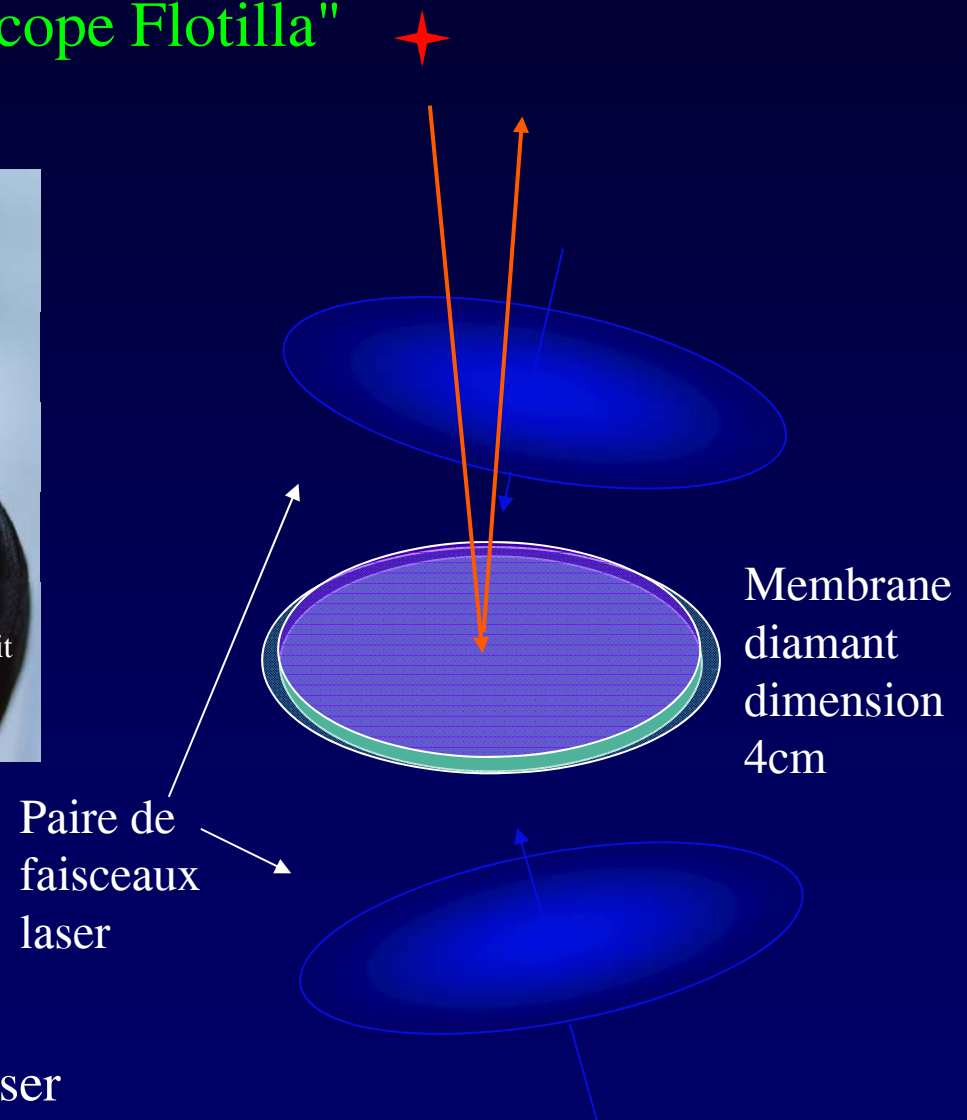
Extensible vers une flotille de 100km ?

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



# Flotille hypertélescope piégée par laser

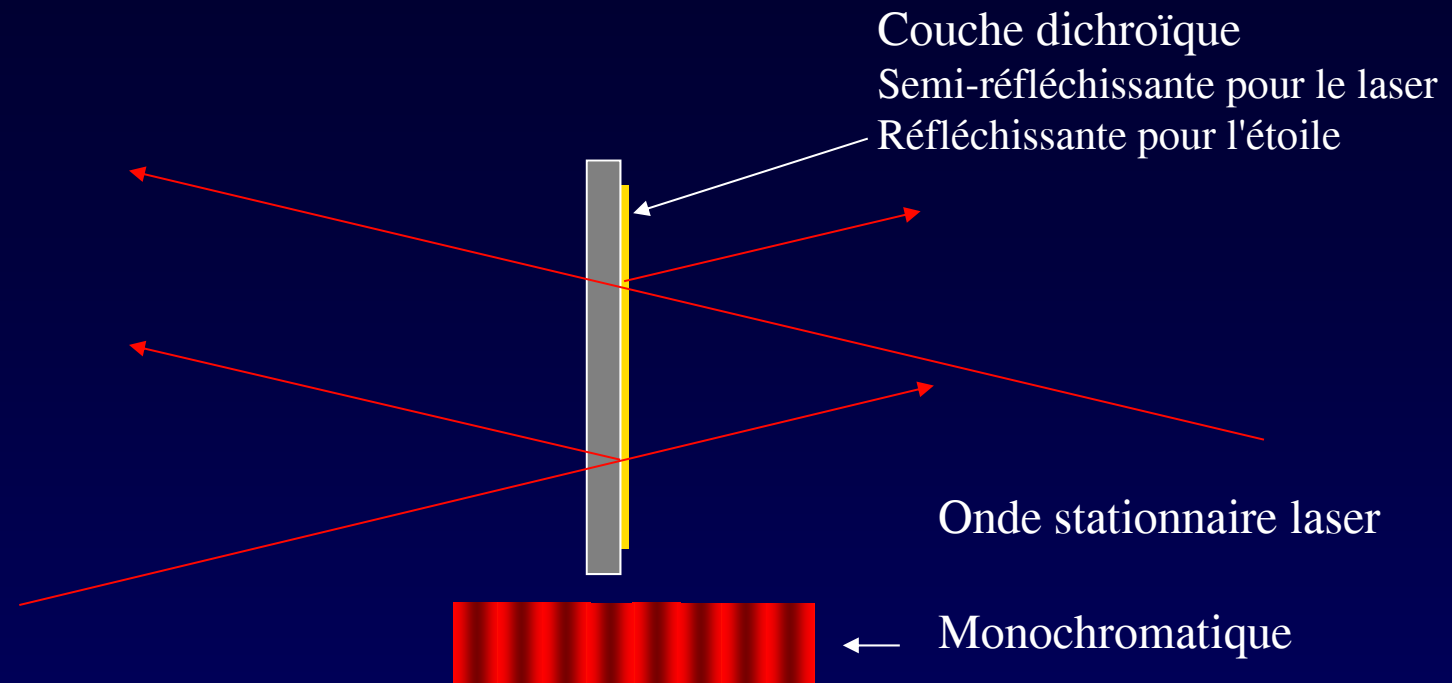
"Laser Trapped Hypertelescope Flotilla"



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

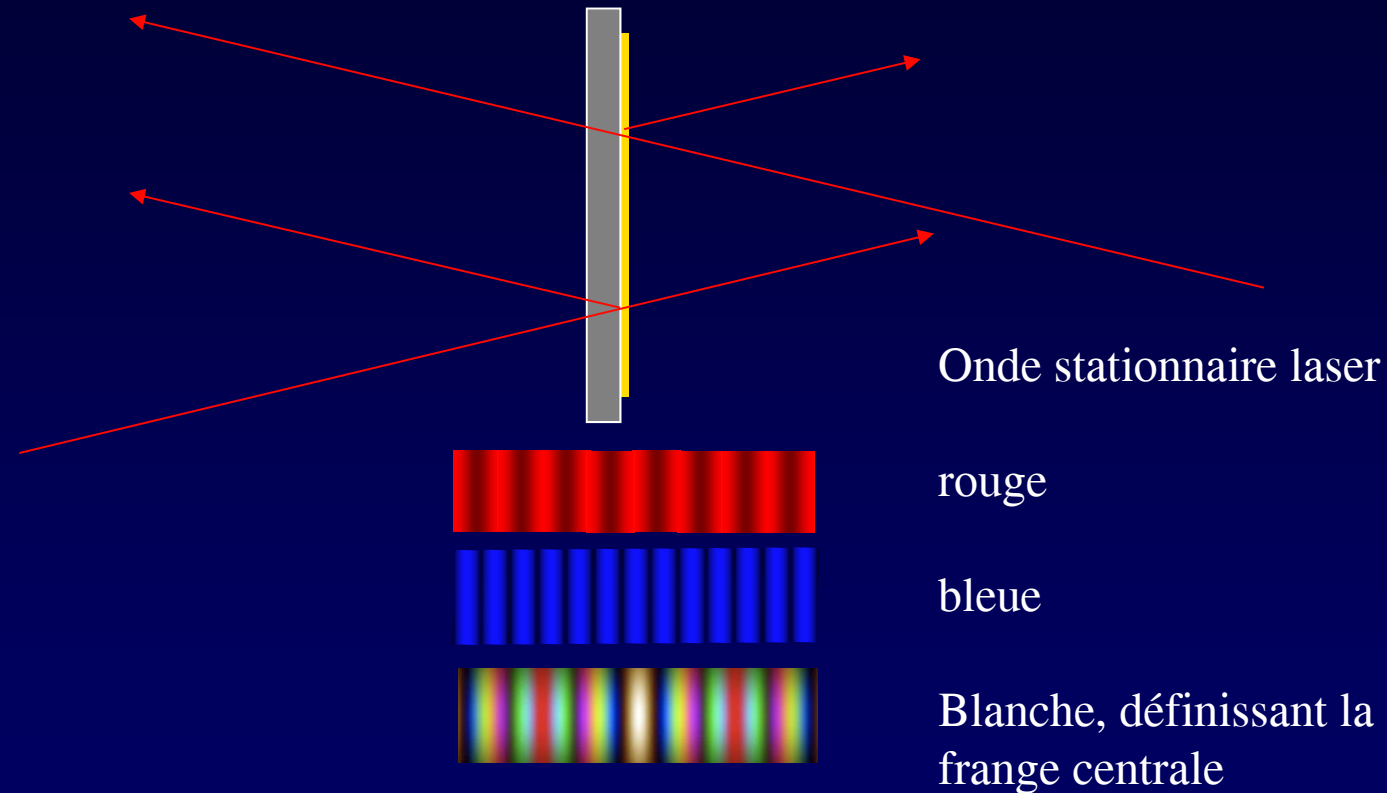


# Principe du miroir piégé par laser (Labeyrie 1979, Guillon et al. 2006)



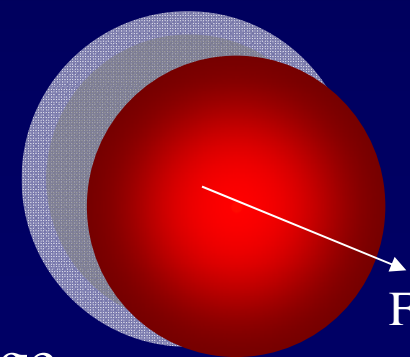
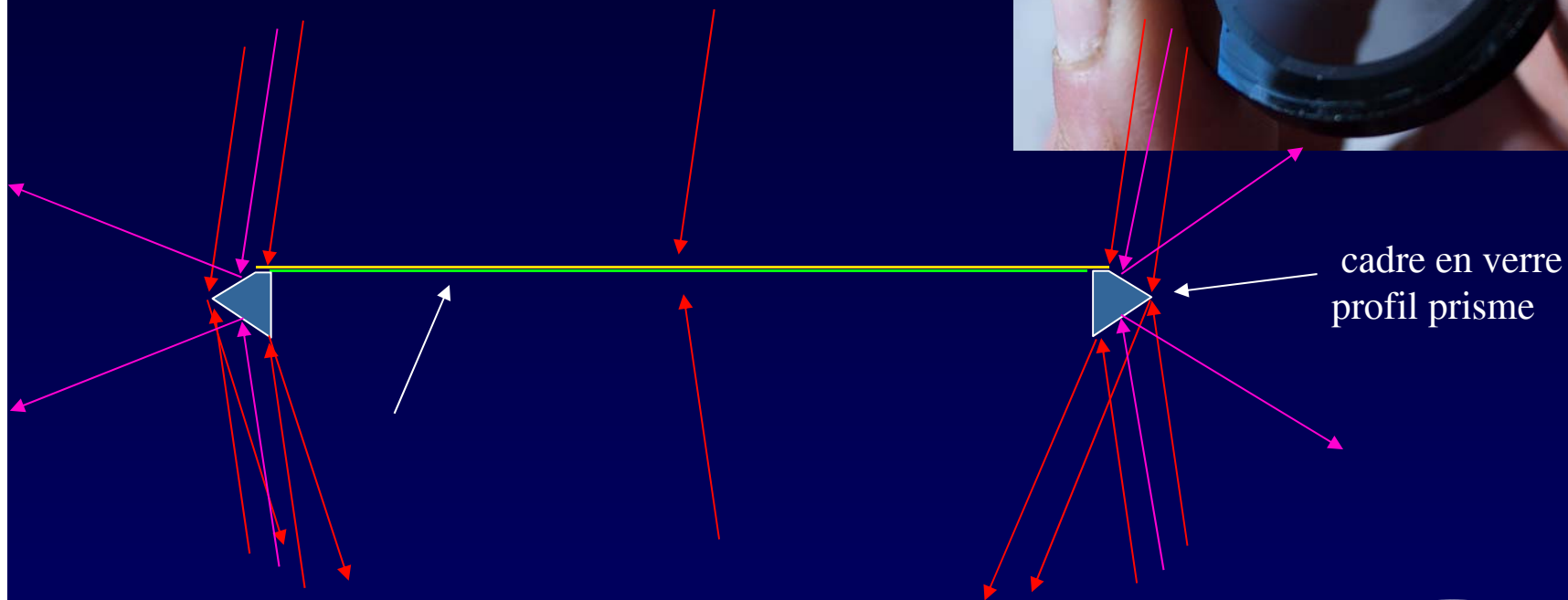
- l'interférence des faisceaux module les intensités émergentes...
- la lumière peut sortir d'un côté ou de l'autre, en déplaçant la lame de  $\lambda/4$
- la pression de radiation  $P/c$  s'inverse selon la position... à intervalles de  $\lambda/4$
- la lame se piège sur la frange la plus proche

# 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"

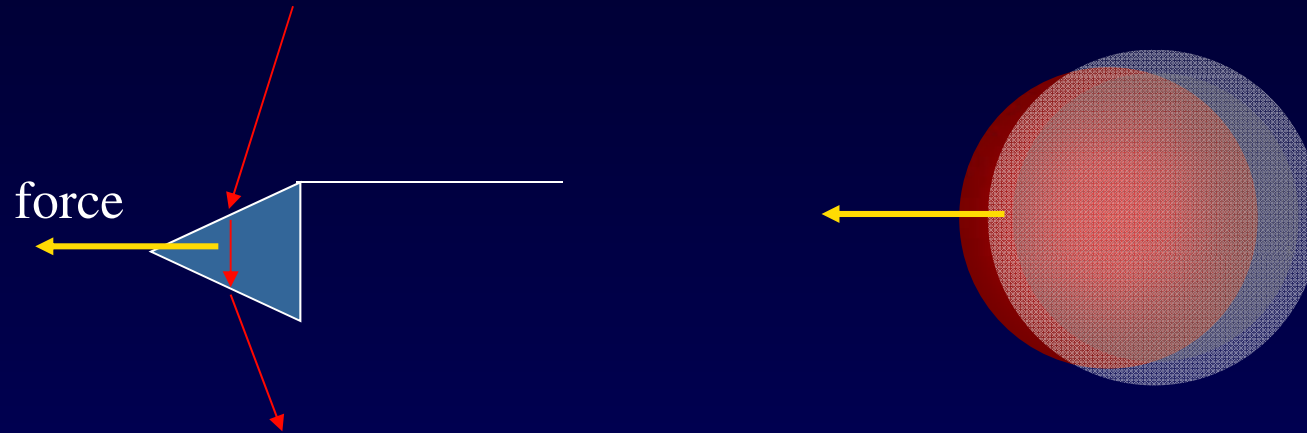


Auto-centrage

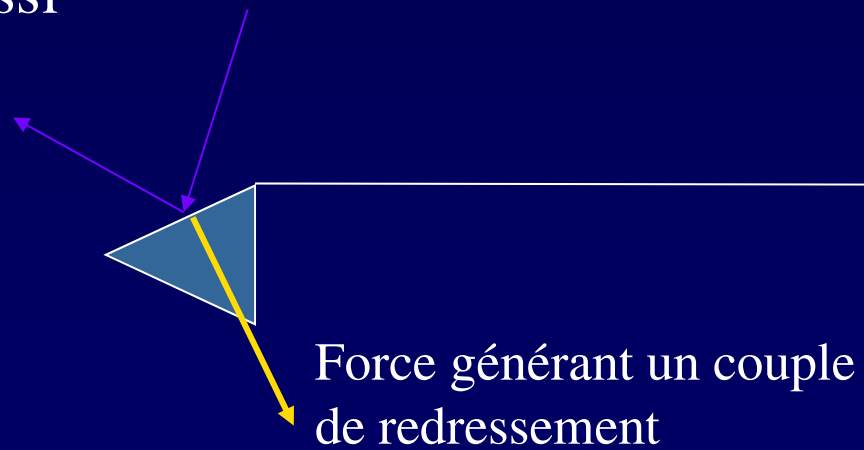


Piégeage transverse :

Auto-centrage par effet de "pincette laser"



L' attitude s'auto-ajuste aussi

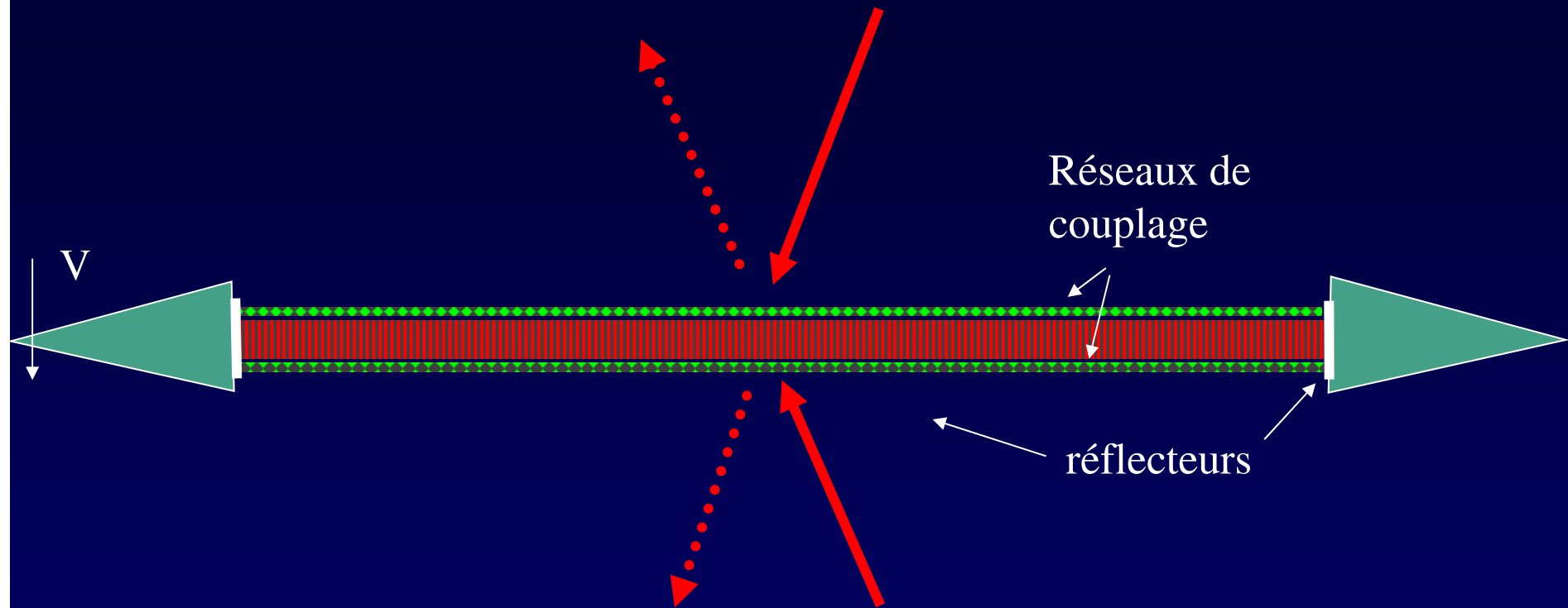


## Amortir l'oscillation



- 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

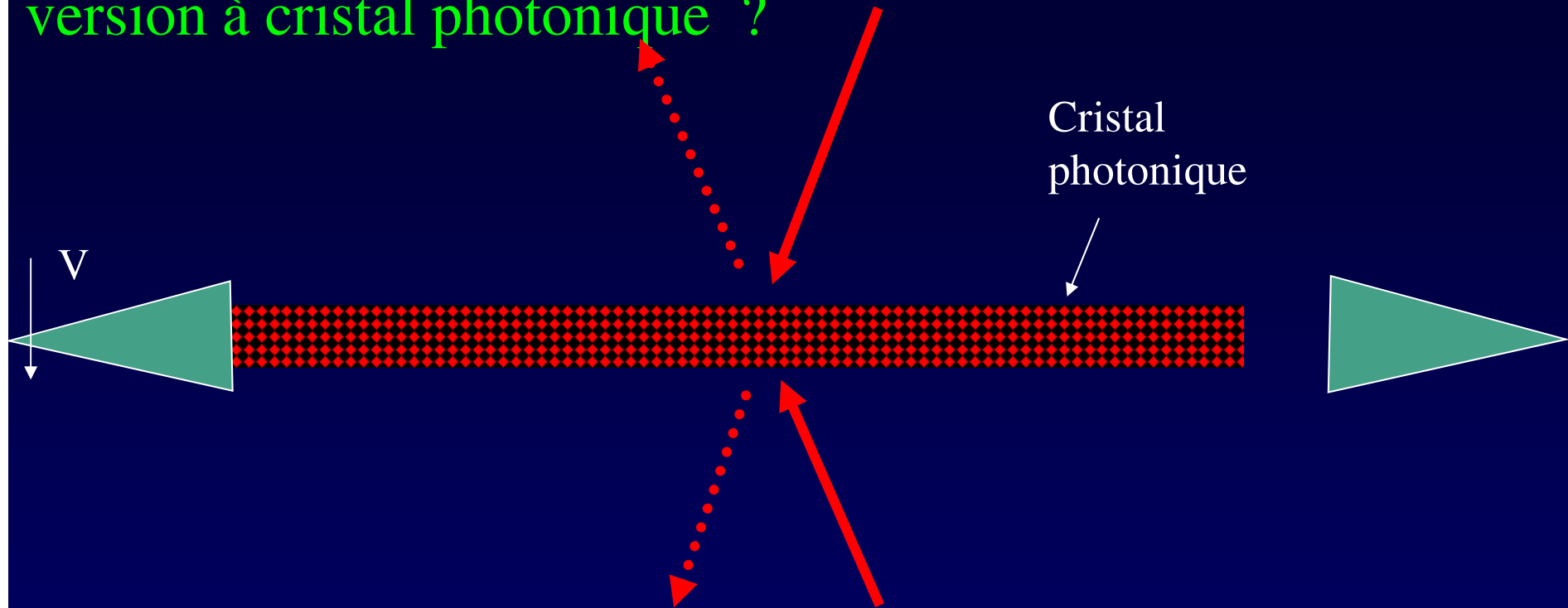
## Amortisseur optique par résonateur transverse ?



- 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)

pour observer l'infra-rouge lointain:

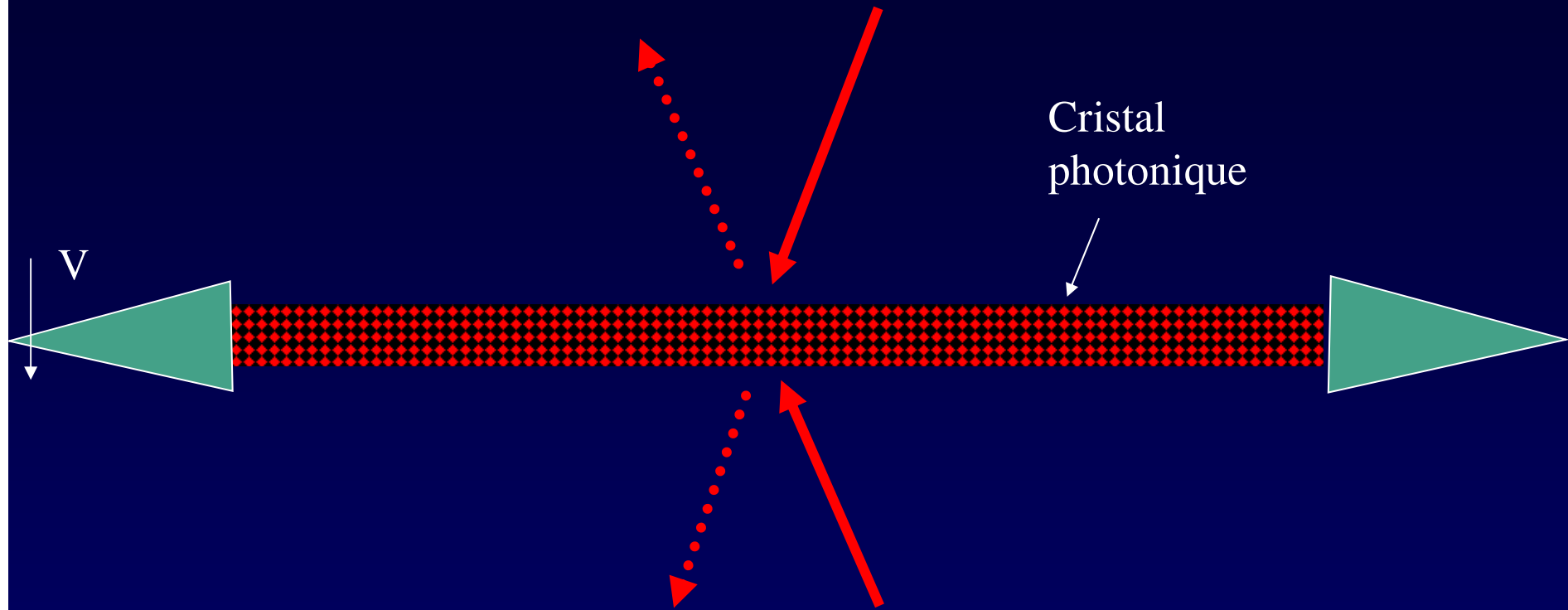
Peut-on faire d'une pierre deux coups ?

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

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.



# Refroidissement par laser: est-ce possible ?



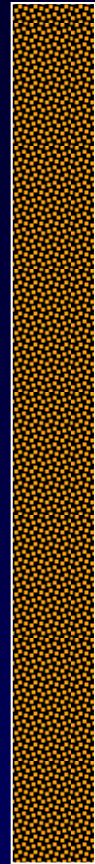
Deux articles récents le suggèrent :

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

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

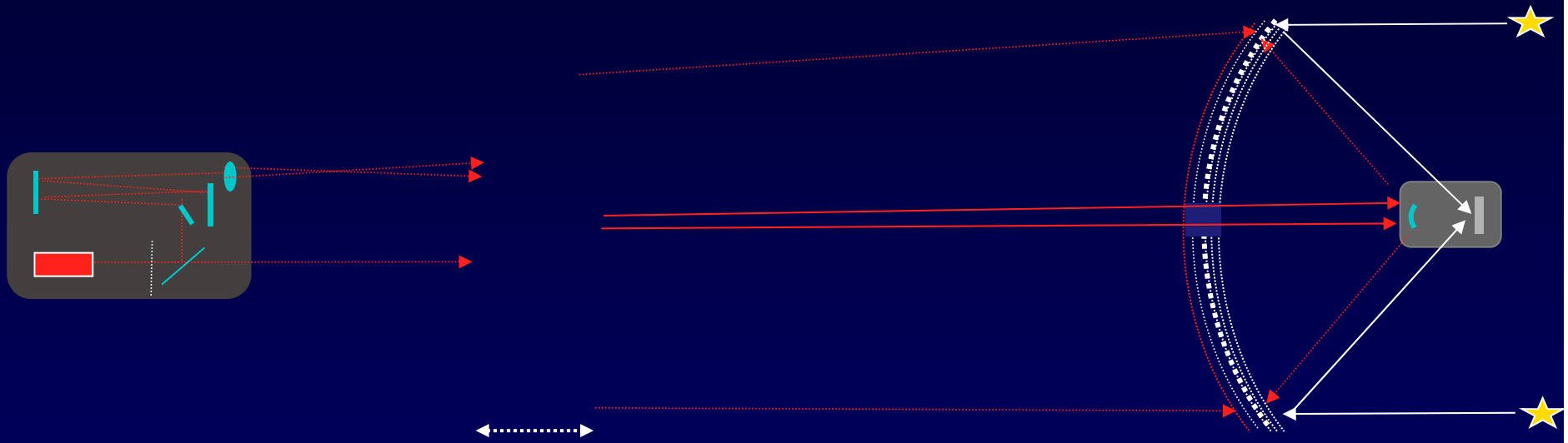
# Oscillation et température de la lame

## Le laser peut-il la refroidir ?



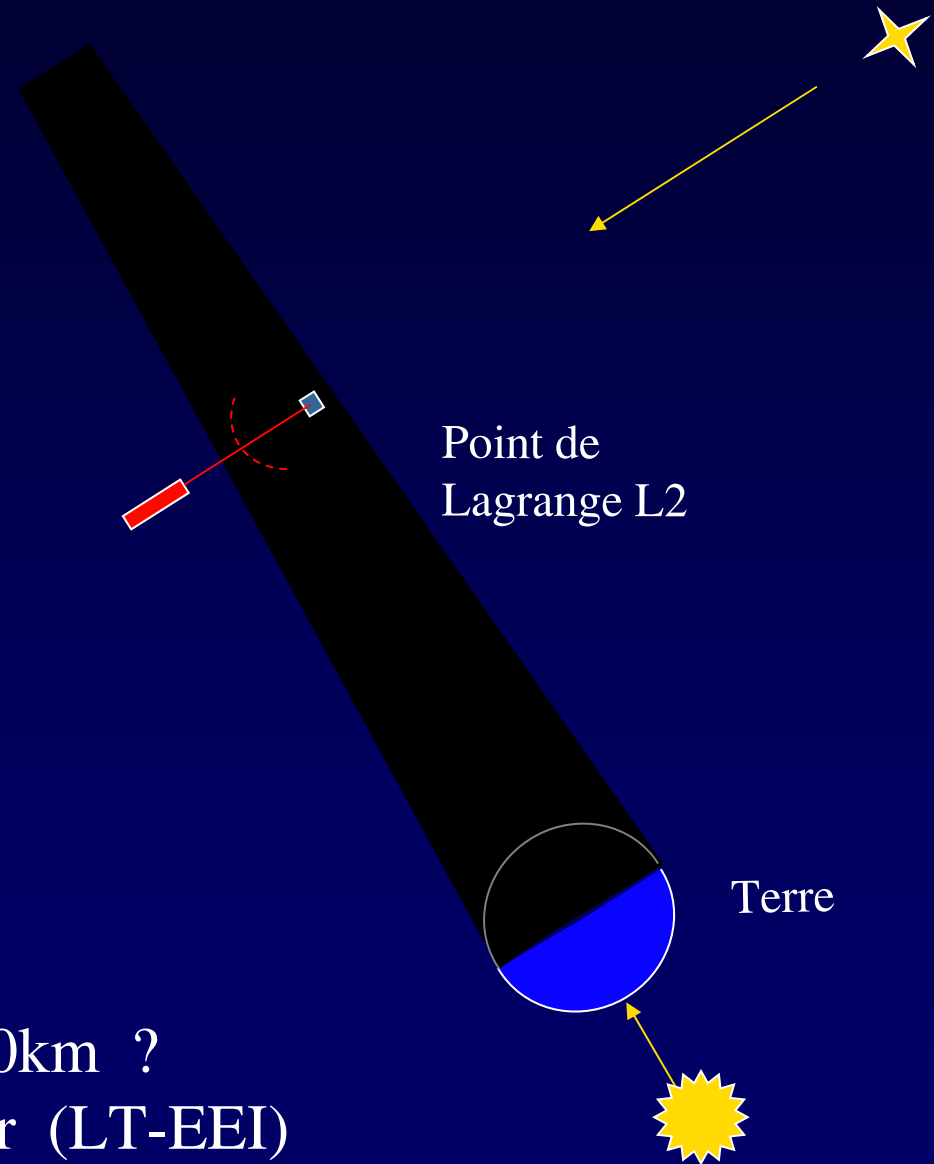
- Température : oscillation aléatoire des atomes dans la lame
- Fait osciller ses faces optiques
- Les amortir par voie optique extrait l'énergie thermique , refroidit

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



# "Laser-Trapped Hypertelescope Flotilla"

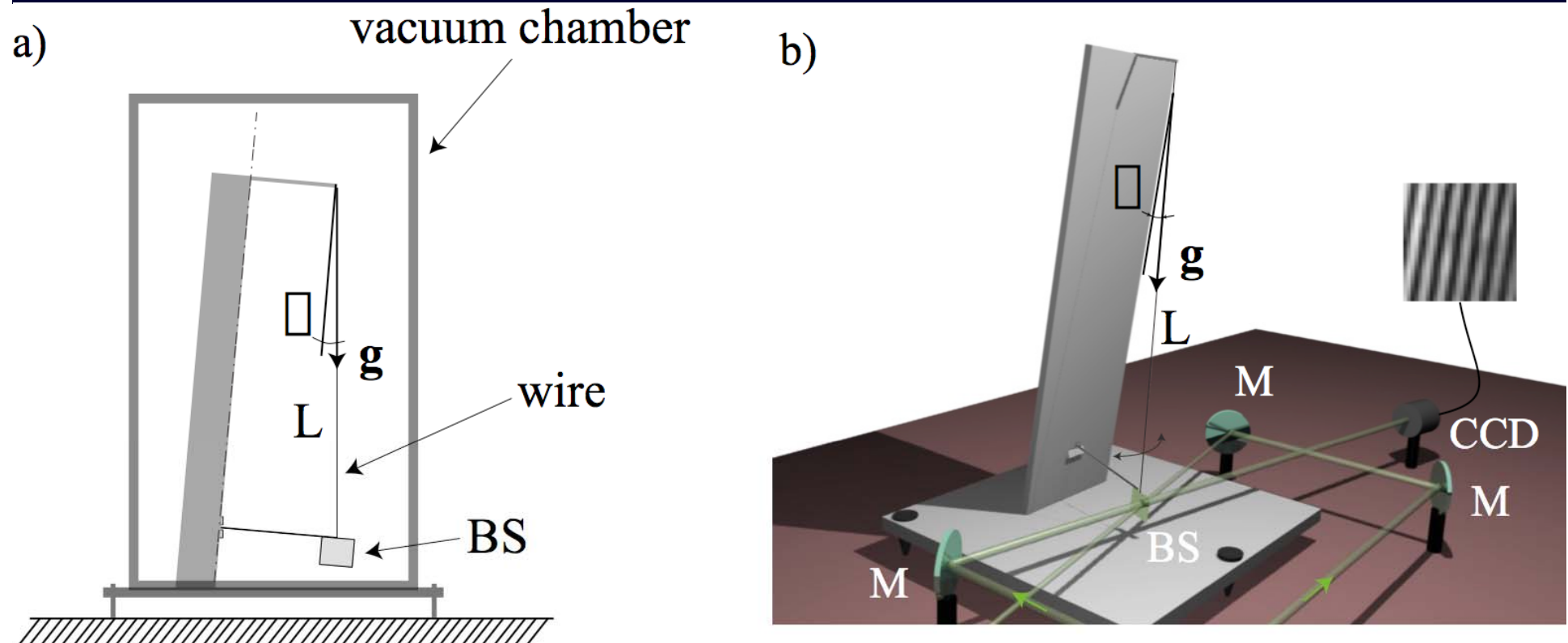
(Labeyrie et al., Experimental Astronomy, 2009 )



Extensible vers une flotille de 100km ?

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

# 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. )

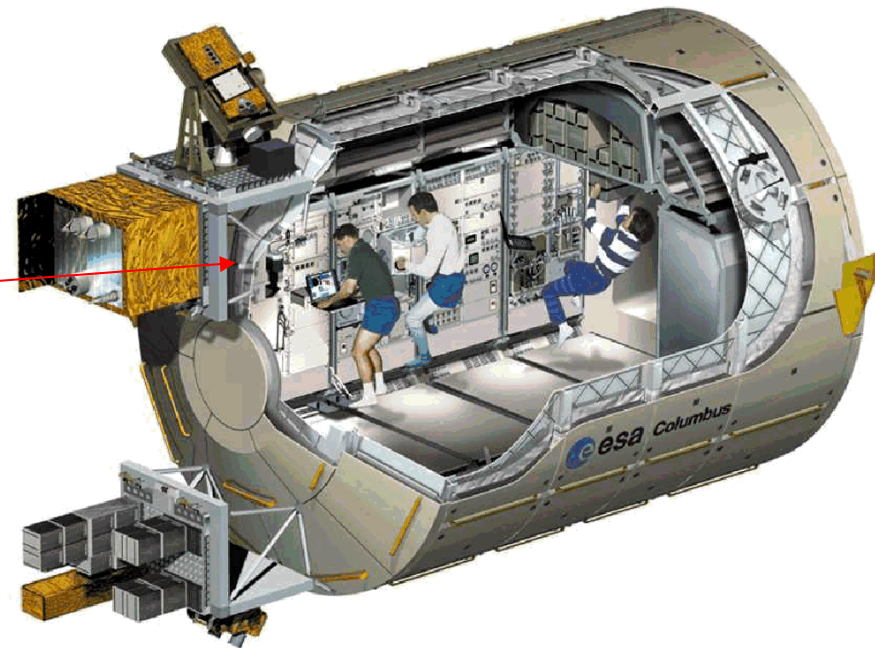


# Essais envisagés dans la "International Space Station"

- 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



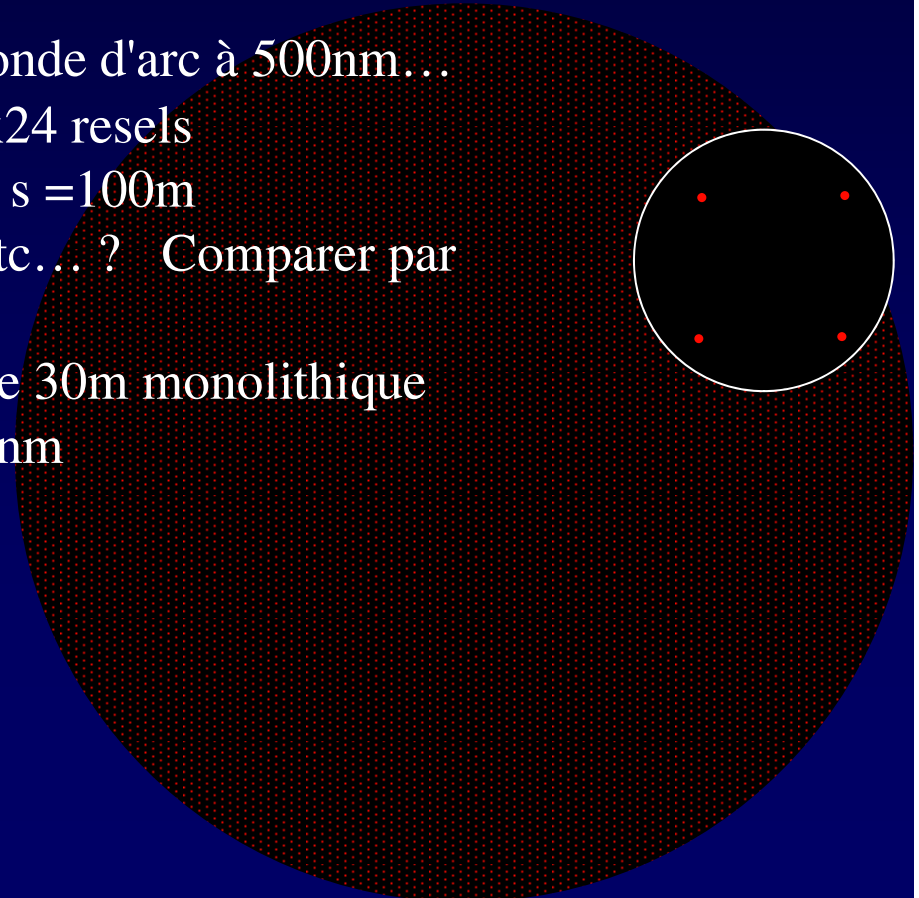
# Rechercher la vie...

## Laser Trapped Exo-Earth Imager (LTEEI)

QuickTime™ et un décompresseur  
Photo - JPEG sont requis pour visualiser  
cette image.

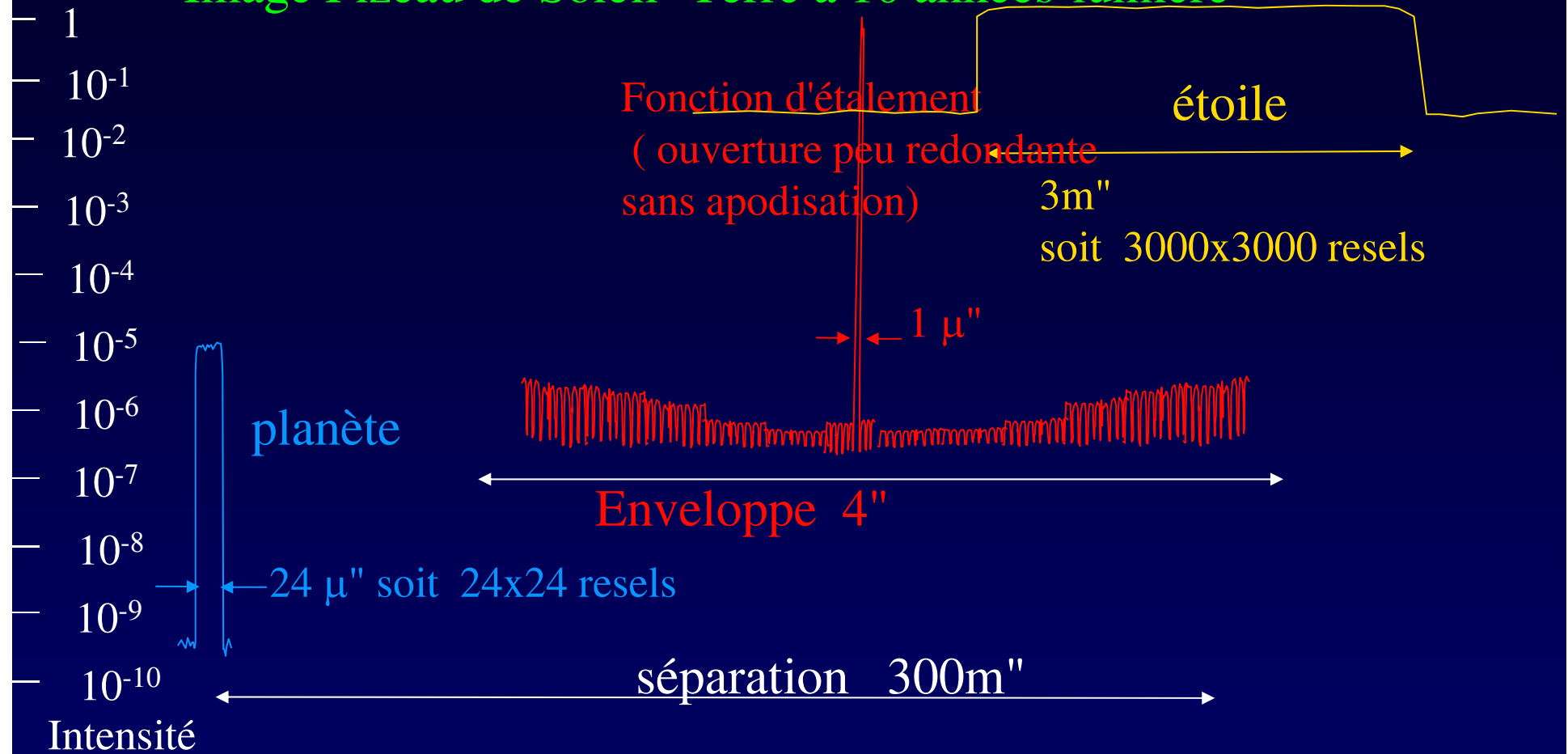
Image simulée  
d'une exo-Terre à  
10 années-lumière

- flotille de 100km, résolution 1 micro-seconde d'arc à 500nm...
- ... soit 500 km à 10 années-lumière ou 24x24 reseles
- 1000 x 1000 miroirs de 30mm, espacés de  $s=100m$
- flotille périodique ou spirale apodisante, etc... ? Comparer par simulations
- même surface collectrice qu'un télescope de 30m monolithique
- champ d'imagerie propre  $\lambda / s = 1m''$  à 500nm



# Laser Trapped Exo-Earth Imager:

## Image Fizeau de Soleil - Terre à 10 années-lumière

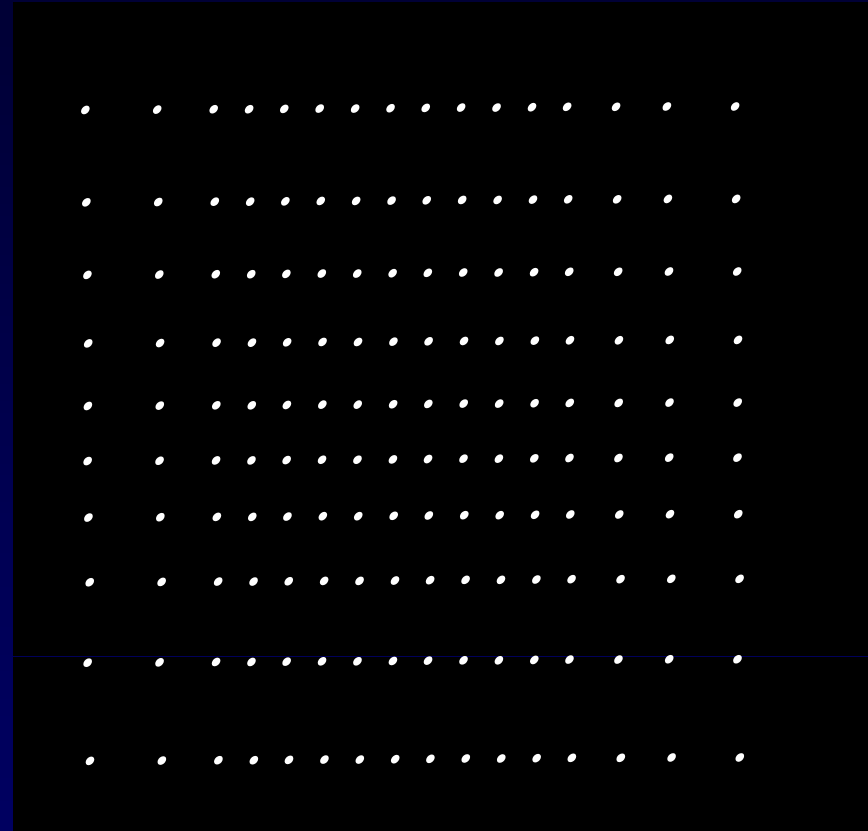


Laser Trapped Exo Earth Imager (LTEEI)

## Flotille apodisante

1000 ouvertures

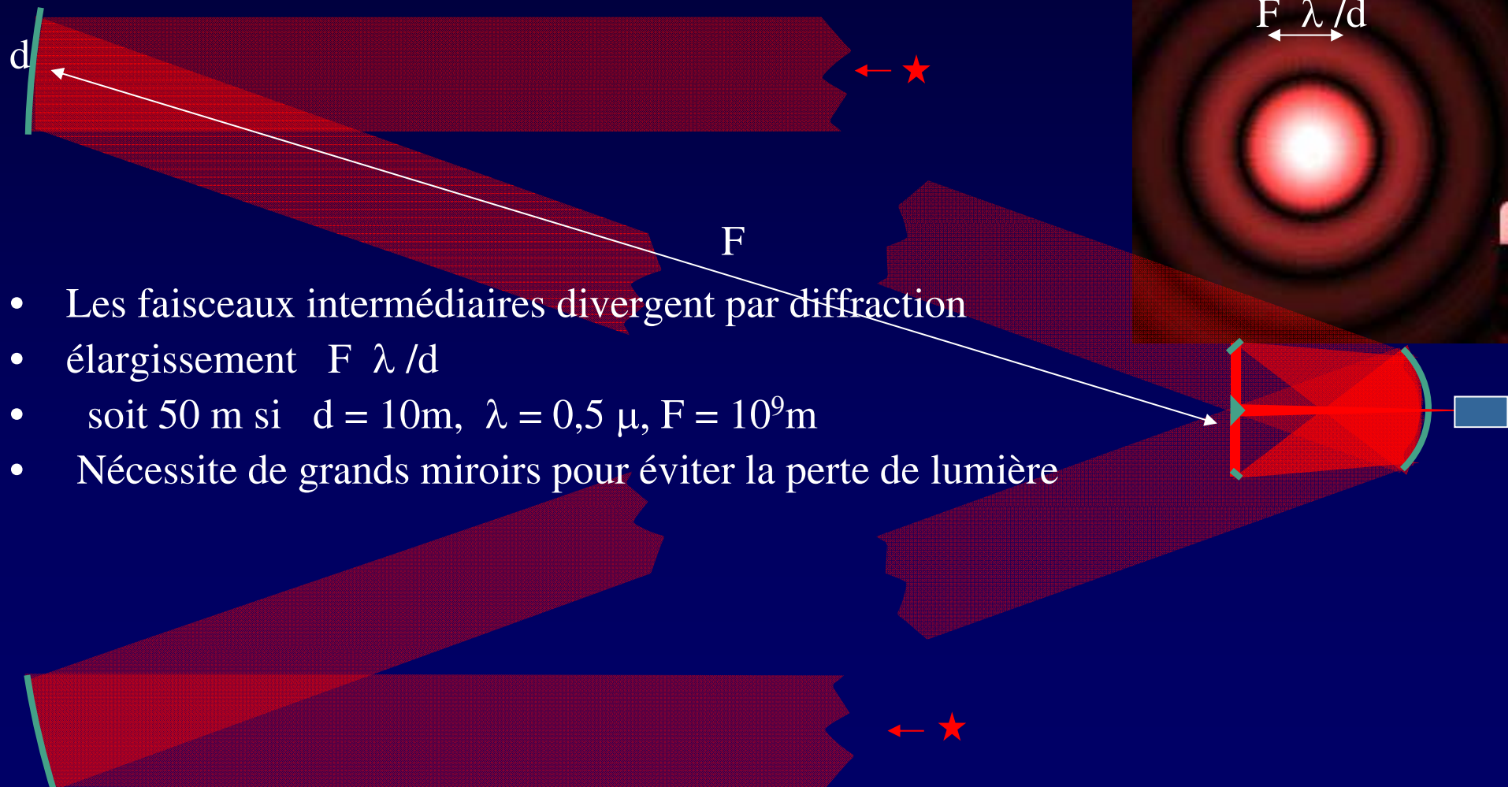
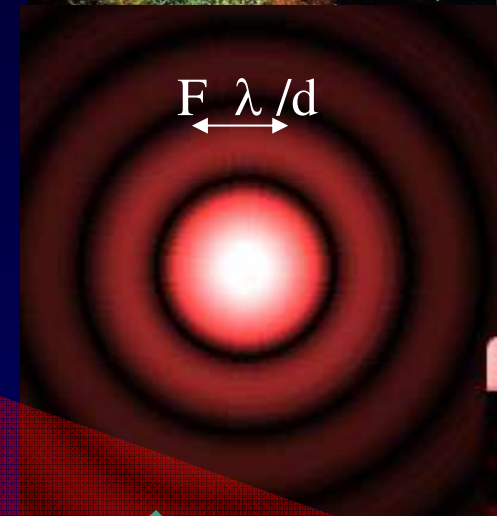
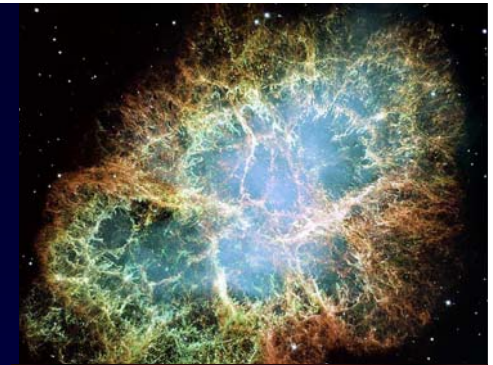
QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.



• miroirs plus espacés au bord

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

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

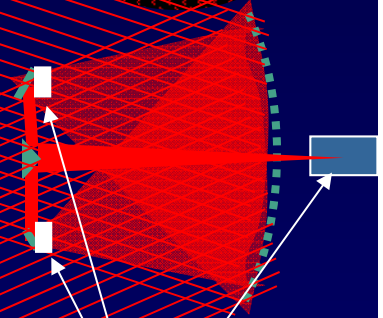
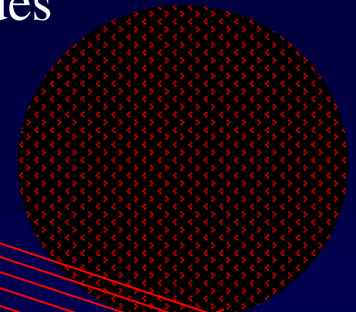


Pour Neutron Star Imager :

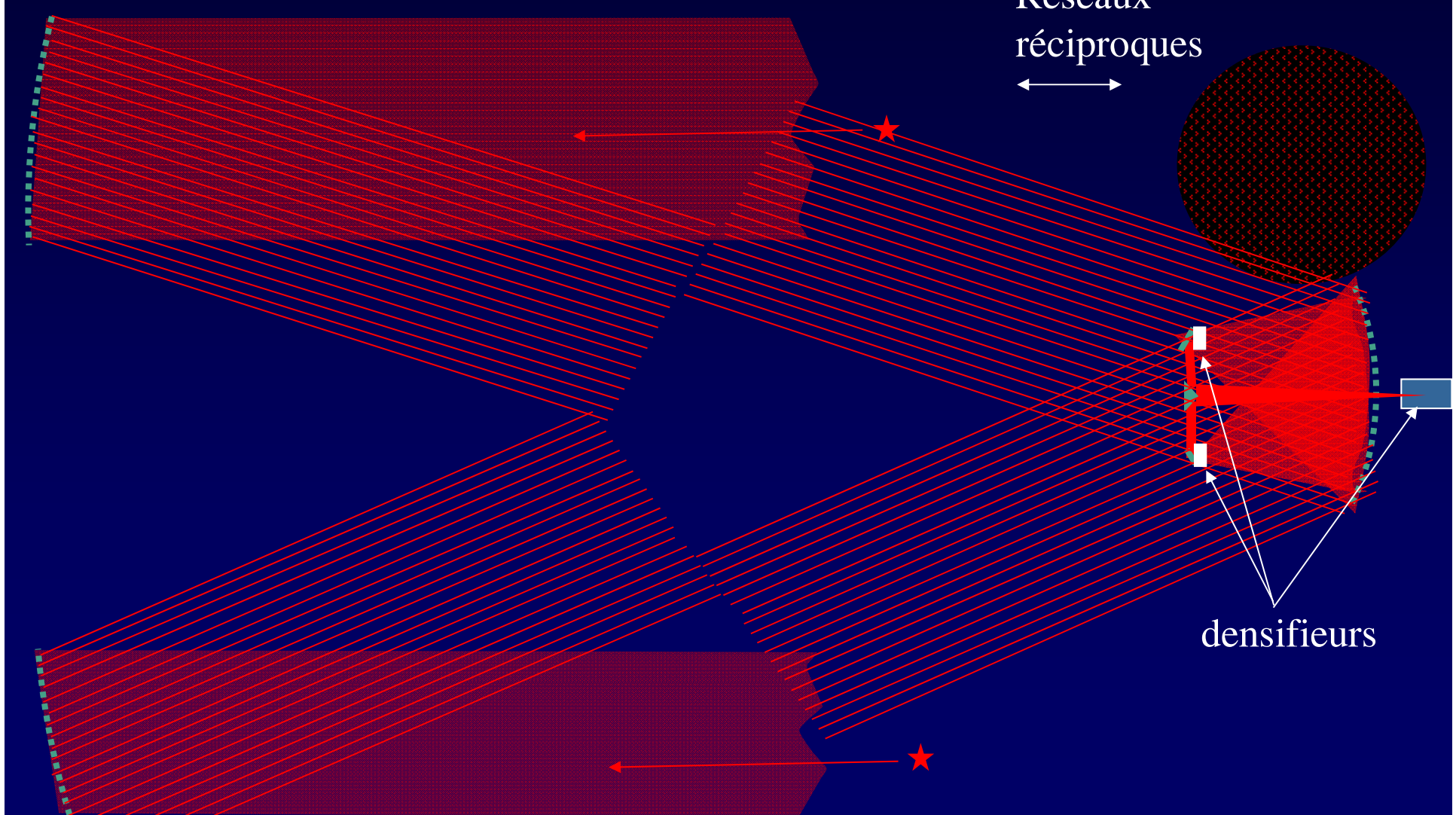
Peut-on remplacer les grands miroirs par des sous-flotilles ?

Flotille de flotilles, piégées par laser

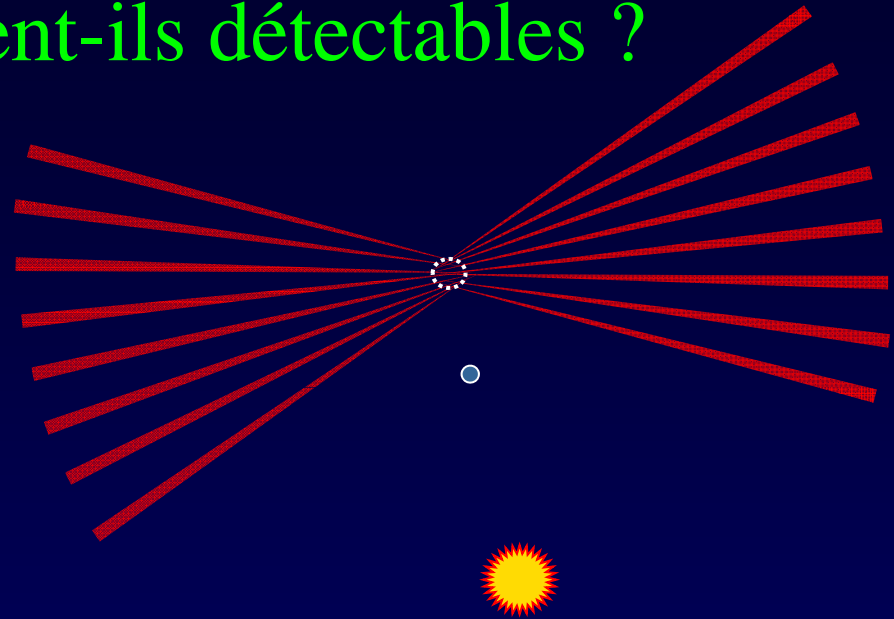
Réseaux  
réciproques



densifieurs



# Pour amateurs de SETI ( Search for Extra-Terrestrial Intelligence ): Des exo- LTHF seraient-ils détectables ?



- Méthodes classiques :
  - Écoute radio ( on peut contribuer au traitement des données par "seti at home" )
  - détection d'émissions laser: il faudrait qu'elles nous visent, donc que leur auteurs connaissent notre niveau d'évolution et capacité à les détecter
  - Recherche de sphères de Dyson
- chercher des exo-LTHF ? Par leur émission laser scintillante ?



Dans l'espace:

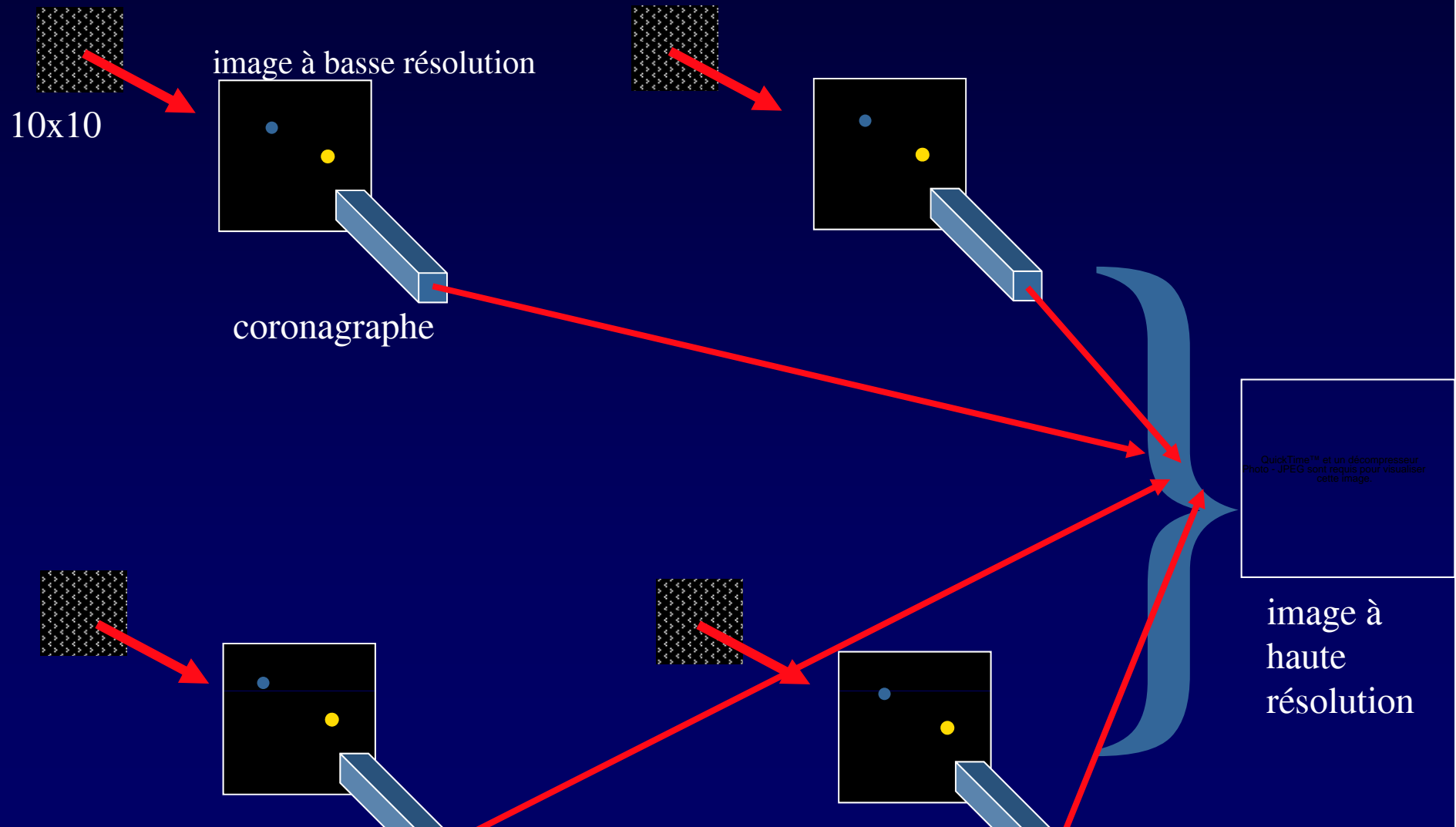
## Hypertélescopes utilisables pour les galaxies lointaines, la cosmologie

- La mise en phase est possible sur des sources ultra-faibles
- même magnitude limite qu'un télescope monolithique de surface équivalente
- galaxies lointaines, etc...
- Les petits miroirs ne sont pas pénalisants pour l'infra-rouge...
- ... mais avantageux si le piégeage laser les refroidit

Hubble Ultra Deep Field

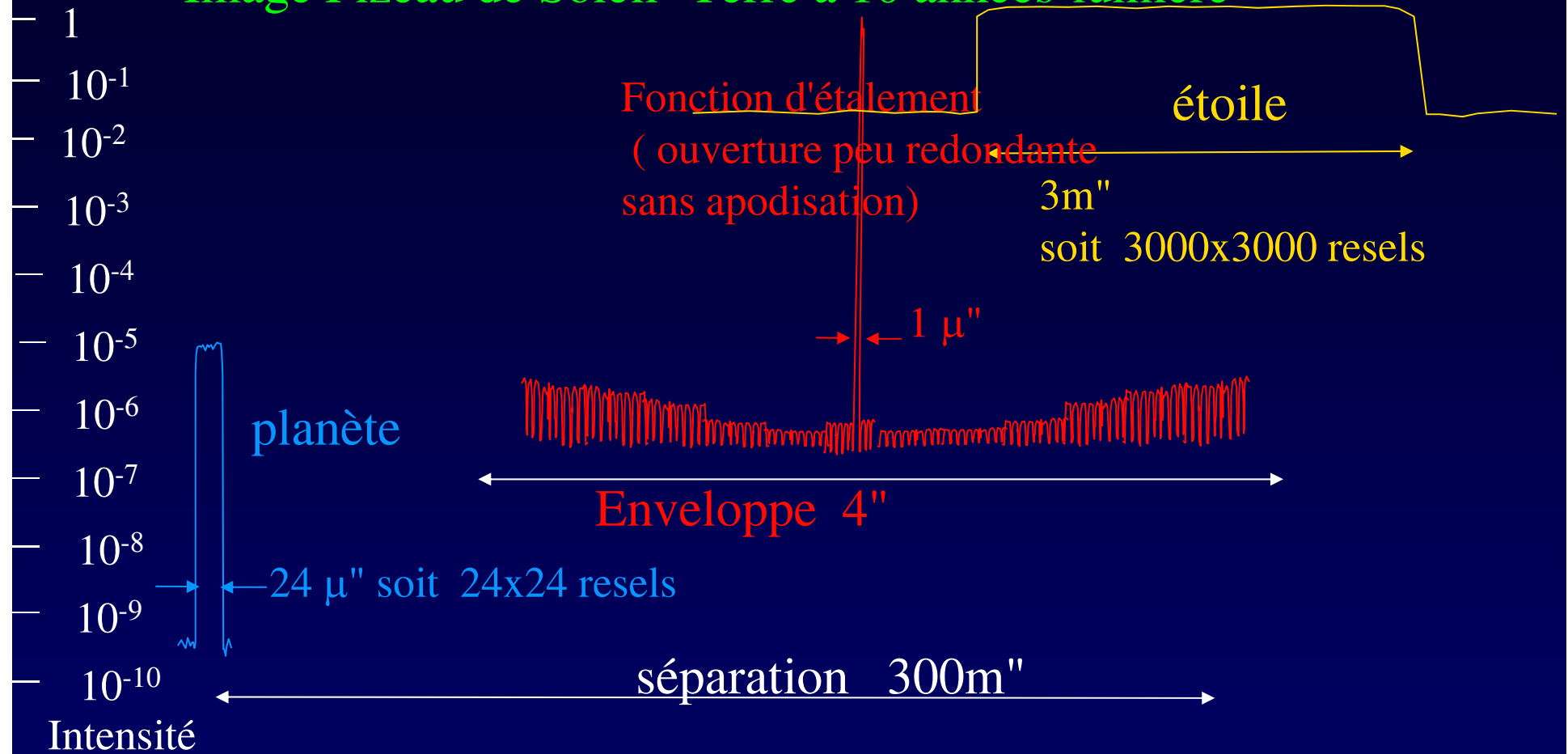
# Laser Trapped Exo-Earth Imager (LTEEI) : atténuer l'étoile mère

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



# Laser Trapped Exo-Earth Imager:

## Image Fizeau de Soleil - Terre à 10 années-lumière



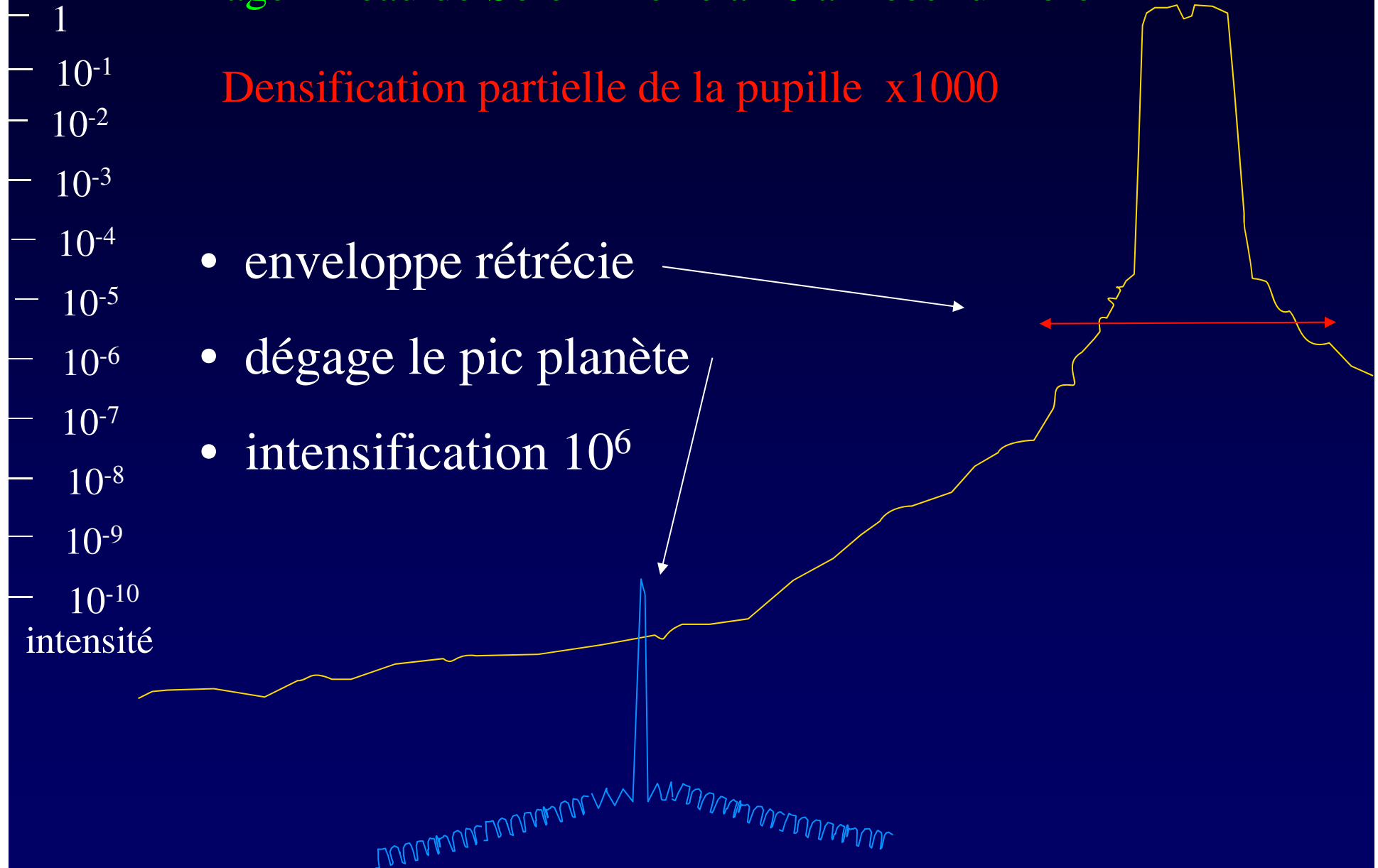


version Luciola LT d'Exo Earth Imager:

## Image Fizeau de Soleil -Terre à 10 années-lumière

Densification partielle de la pupille x1000

- enveloppe rétrécie
- dégage le pic planète
- intensification  $10^6$



version "Laser Trapped" d'Exo Earth Imager:

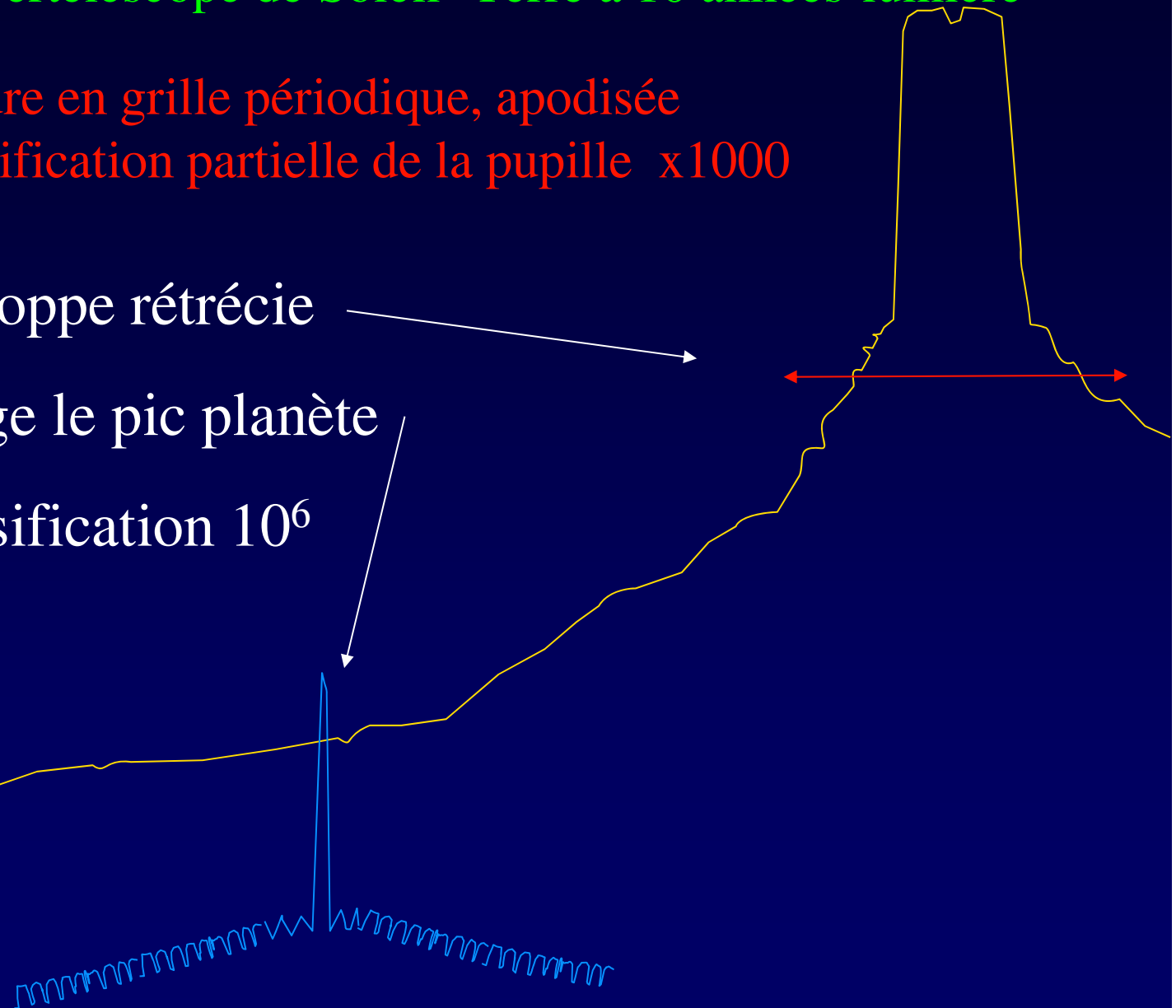
## Image hypertélescope de Soleil -Terre à 10 années-lumière

Ouverture en grille périodique, apodisée

Densification partielle de la pupille  $\times 1000$

- enveloppe rétrécie
- dégage le pic planète
- intensification  $10^6$

1  
 $10^{-1}$   
 $10^{-2}$   
 $10^{-3}$   
 $10^{-4}$   
 $10^{-5}$   
 $10^{-6}$   
 $10^{-7}$   
 $10^{-8}$   
 $10^{-9}$   
 $10^{-10}$   
intensité



# Coronographe adaptatif

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

Gemini Planet Imager ( McIntosh et al. )

# Coronographe du télescope Hubble

QuickTime™ et un  
décompresseur  
sont requis pour visionner cette image.

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)

