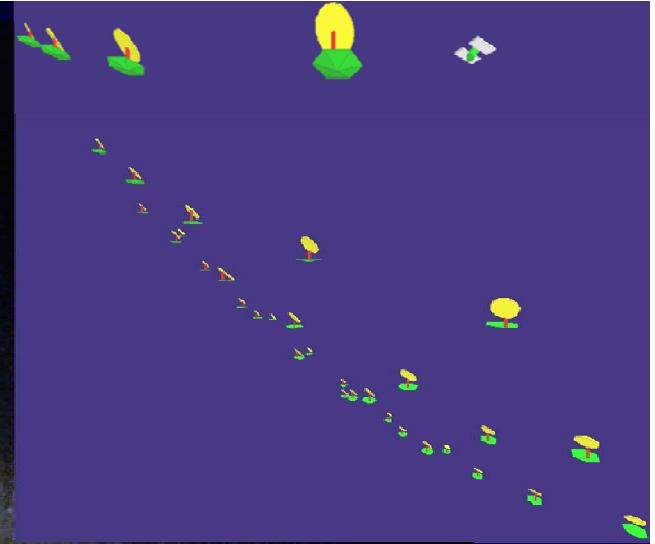


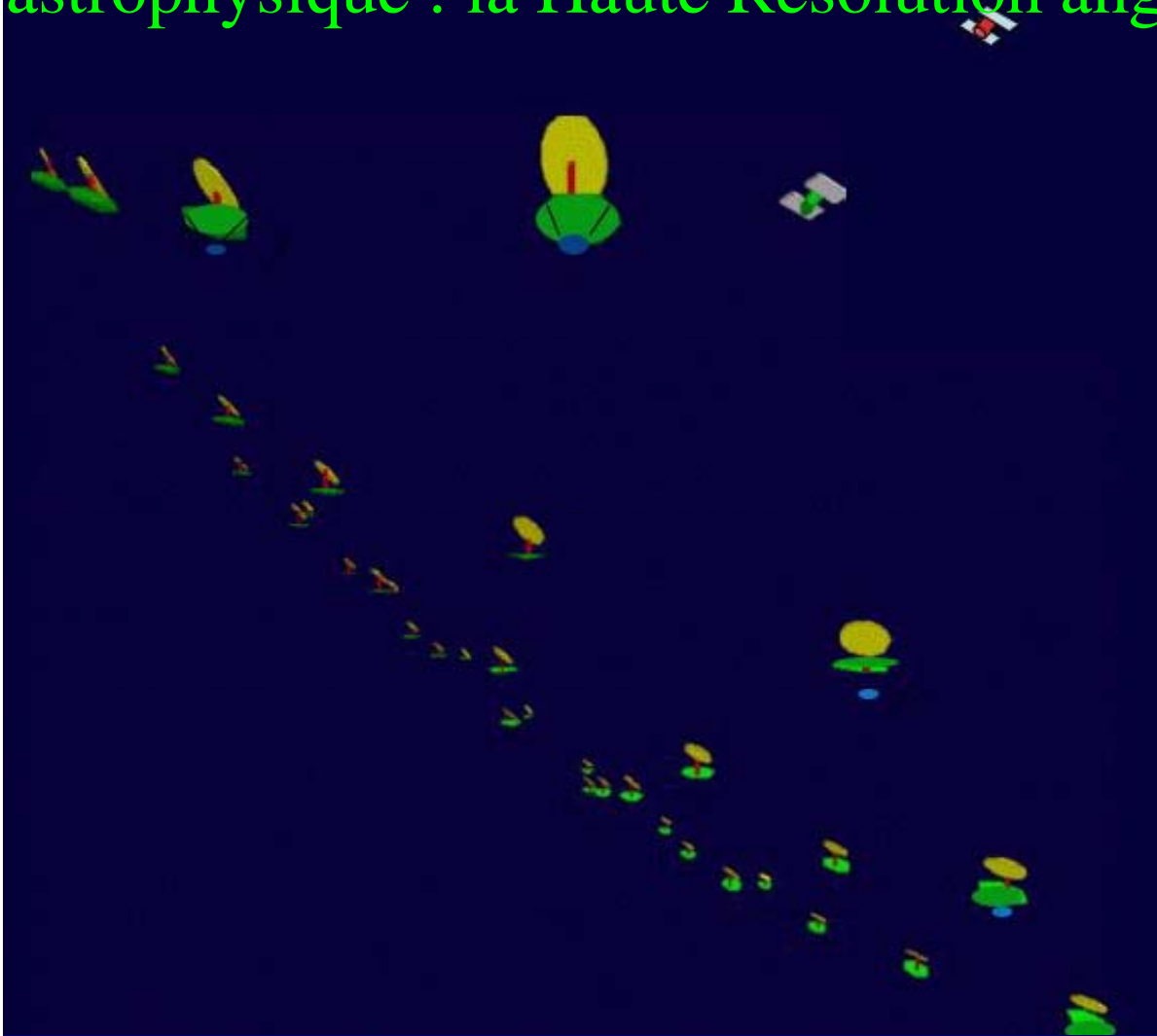
Exo-planètes, étoiles et galaxies : progrès de l'observation



- Fichiers des cours précédents sur: www.college-de-france.fr/default/EN/all/ast_obs/annee_20082009.htm
- Articles sur: www.oamp.fr/lise

aujourd'hui:

Panorama historique et analyse de l'évolution sur 30 ans d'une nouvelle méthodologie et chaîne d'instrumentation en astrophysique : la Haute Résolution angulaire

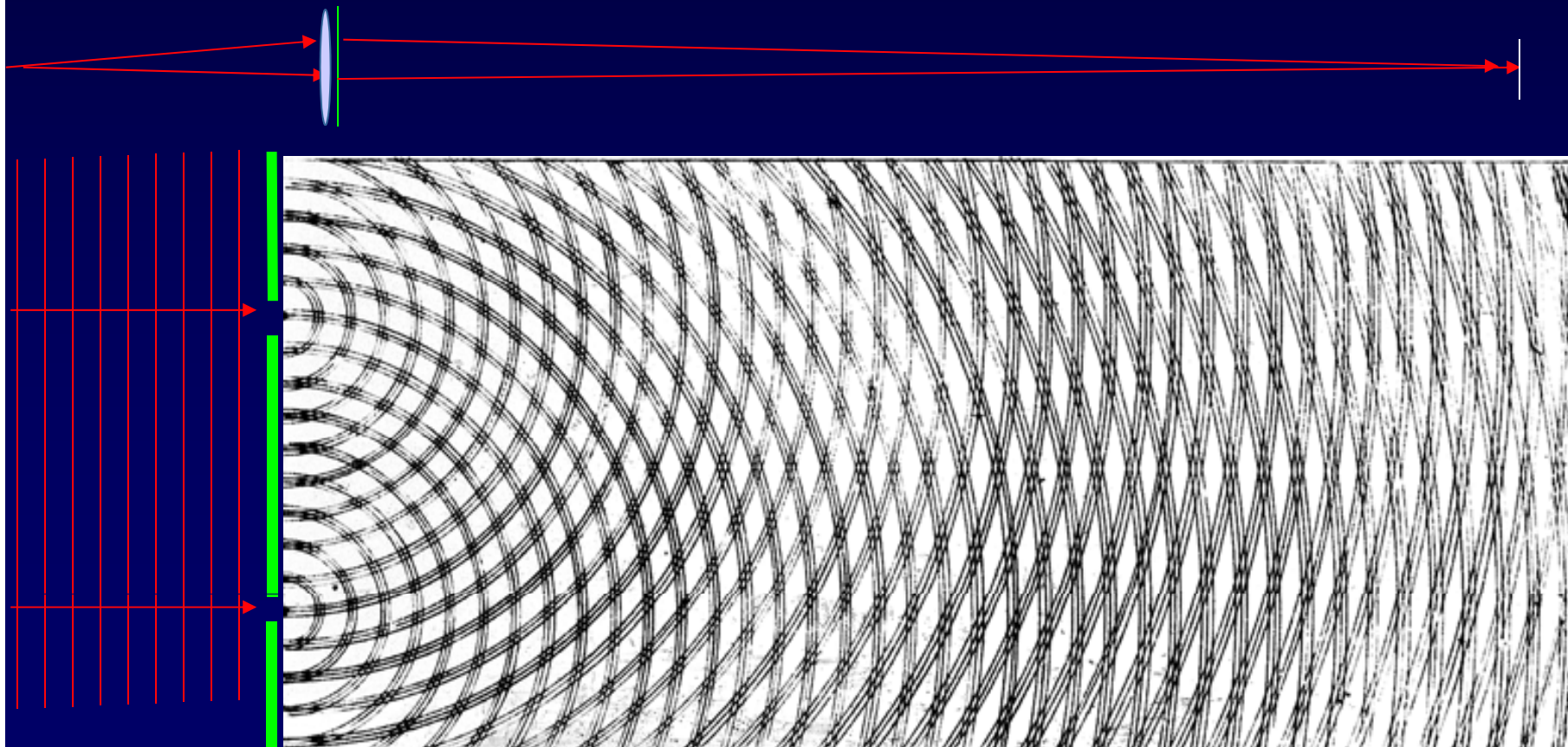
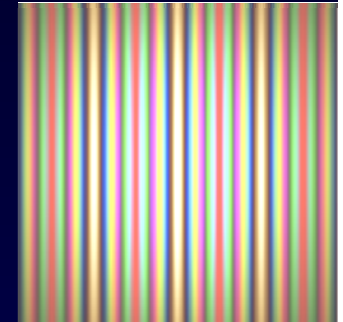


Interférences d'Young

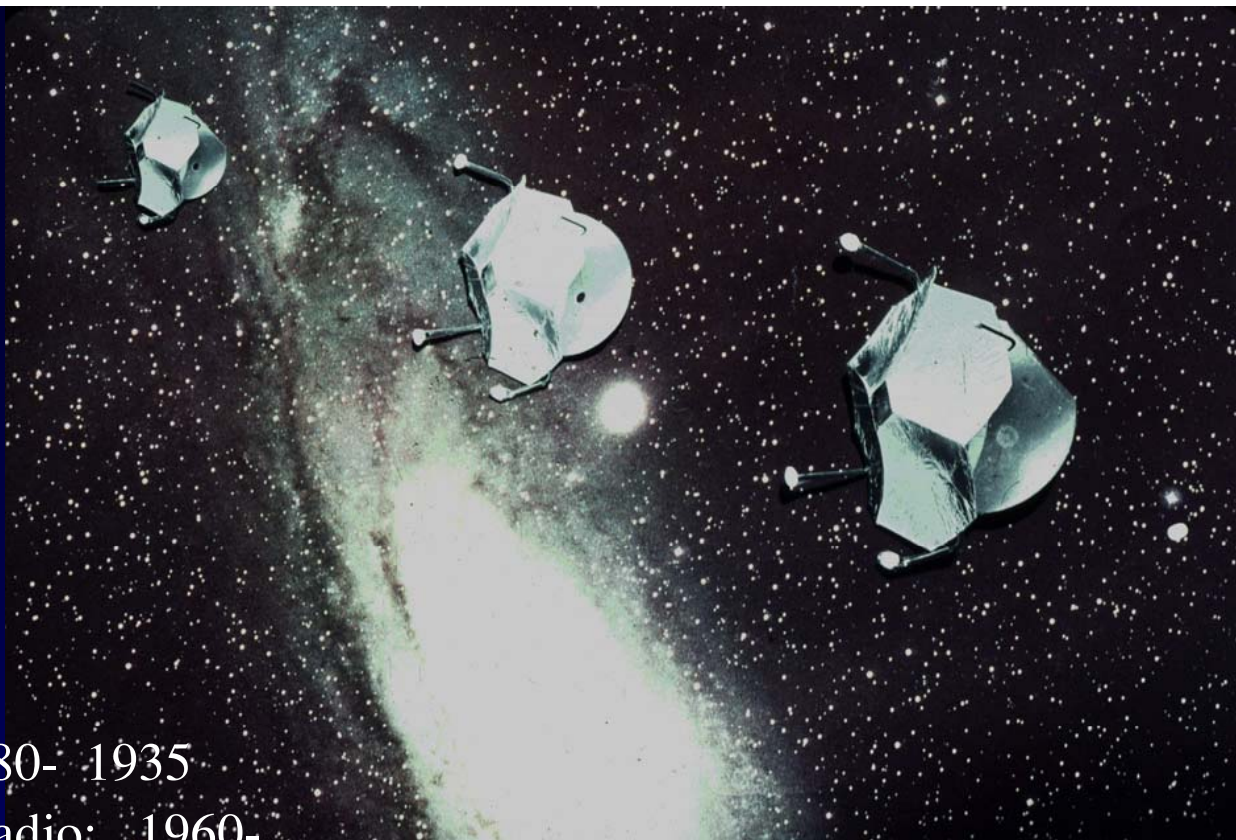
(ca. 1810)

Franges d'Young

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



Etapas



- Période des pionniers: 1880- 1935
- Essor de l'interférométrie radio: 1960-
- Interférométrie d'intensité: 1965- 1974 redémarrage actuel
- Renaissance de l'interférométrie optique directe :
"speckle interferometry": découvertes faciles au Mont Palomar
l'interférométrie devient possible avec de grands télescopes
I2T, etc... VLTI, CHARA
- 1983 propositions d'interféromètres dans l'espace: FLUTE puis flotilles TRIO, DARWIN
- 1996 Notion d'hypertélescope, théorie, démonstration "en miniature"



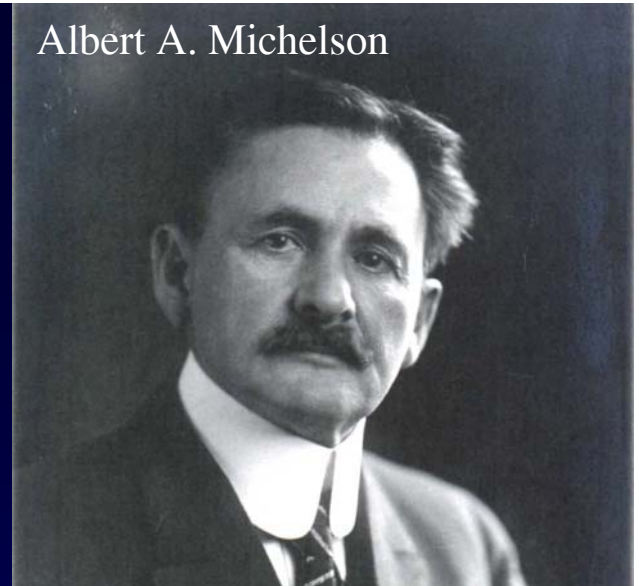
Augustin Fresnel

- Les pionniers d'avant guerre



E. Stephan

Albert A. Michelson



Etapés

- 1890 masque proposé par Fizeau, essai par Stephan à Marseille
- 1920 résolution des satellites de Jupiter par Michelson, avec masque Fizeau, puis binaire Capella par Anderson au Mt Wilson
- Années 1930 : poutre de Michelson, résolution de Bételgeuse et autres supergéantes
- 1960- essor de la radio-interférométrie, synthèse d'ouverture, formalismes
- Hanbury Brown et Twiss: interférométrie indirecte, d'intensité
- 1970 Interférométrie des tavelures
- 1974 Interféromètre à deux télescopes à Nice
- 1976 interféromètre de Shao et Staehlin , MIT, puis Palomar testbed interferometer
- 1980 Proposition à l'ESO du VLTI (Labeyrie et al.)
- 1983 Proposition d'interféromètres dans l'espace (Labeyrie et al.)
- 1980 Interféromètre hétérodyne de Townes et al. (10 microns)
- 1990 Grand Interféromètre à deux Télescopes (GI2T),
- Autres interféromètres : SUSI, NPOI
- 2000 VLTI et Keck Interferometers
- Proposition DARWIN (Mariotti & Léger)

Interférométrie directe et "d'intensité": allers et retours

- Hanbury Brown co-inventeur du radar pendant la guerre :
- estima que l'interférométrie directe est trop difficile
- Observa en interférométrie d'intensité quelques étoiles brillantes, bases 200m après I2T renonça à son grand projet, construisit SUSI , interféromètre direct ... longue galère
- efforts actuels pour relancer l'interférométrie d'intensité

Influences

- Radio-interféromètres :
stimulation, défi pour l'optique (ca. 1970)
exemples: => GI2T, concept OVLA, Arecibo => Carlina)
- Caméras, à comptage de photons
- Processeurs rapides, TF en ligne : "speckle interferometry" (Mc Allister, Weigelt
- Théorie : reconstruction des images par triple correlation des speckles (Lohmann et Weigelt)
- Fibres optiques : OHANA
- coronographie

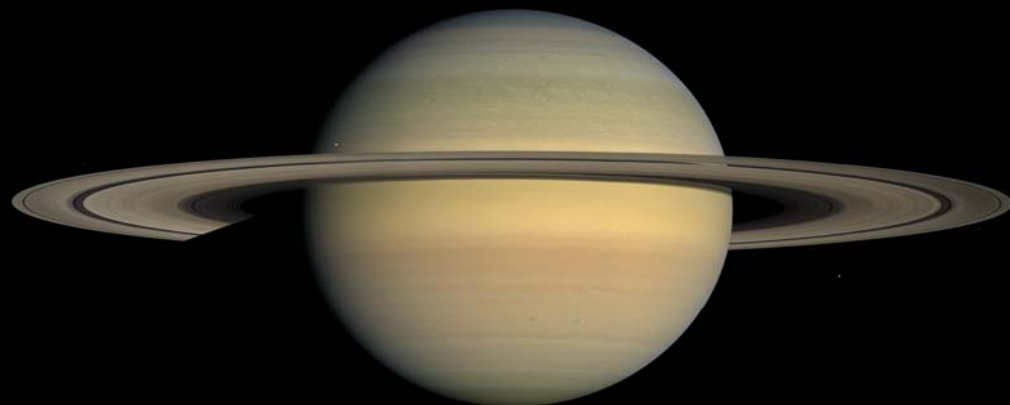
Renaissance de la science amateur

- Dans le passé: riches amateurs (Lavoisier ...)
- Aujourd'hui : amateurs en biologie, astronomie... contribuant à la recherche professionnelle (récent article dans Nature)
- forte contribution d'amateurs à l'hypertélescope Carlina
- Comment évoluera l'équilibre de la science professionnelle et amateur ?
-

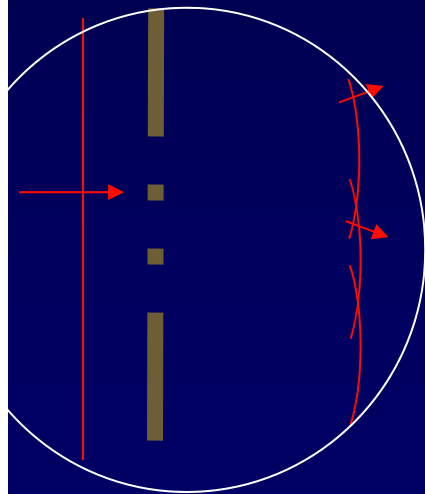
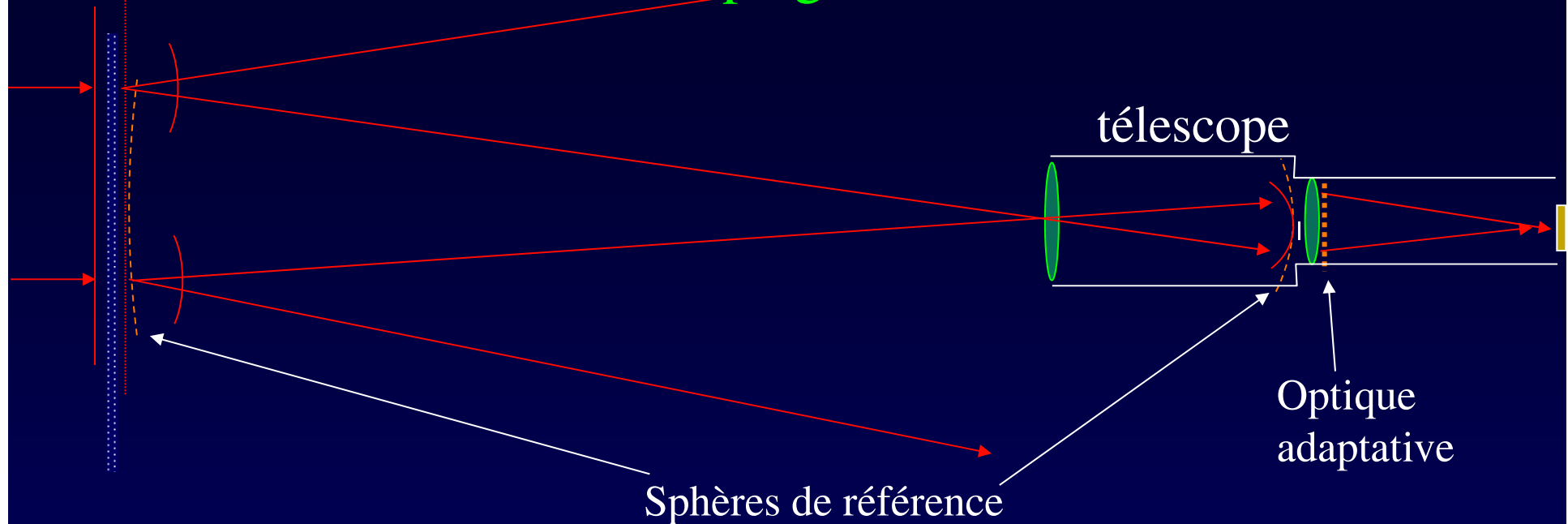
En attendant les hypertélescopes de l'espace...
Exploiter la lumière diffractée de diffuseurs naturels ?



Saturne masquant le Soleil:
vue par Cassini à 2 millions de km



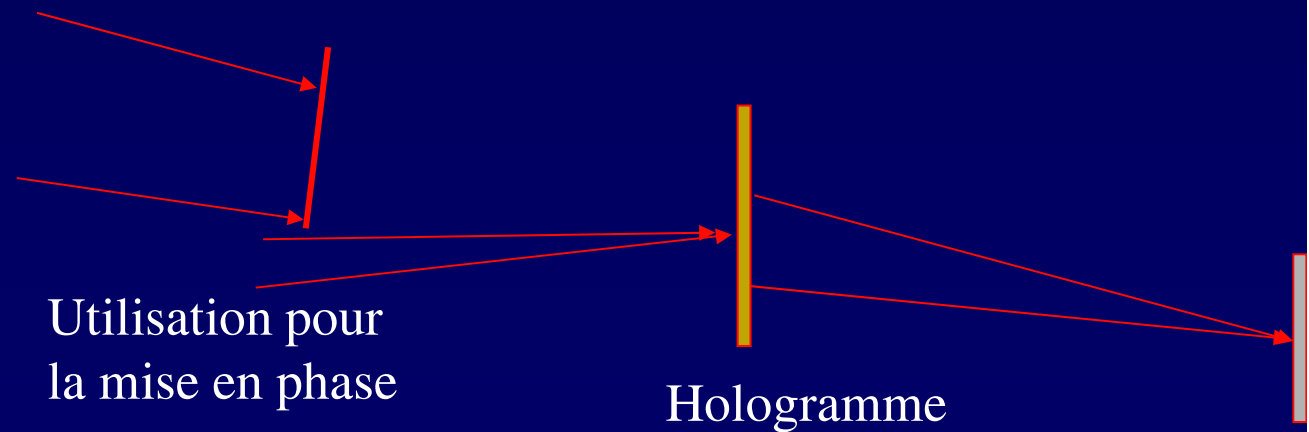
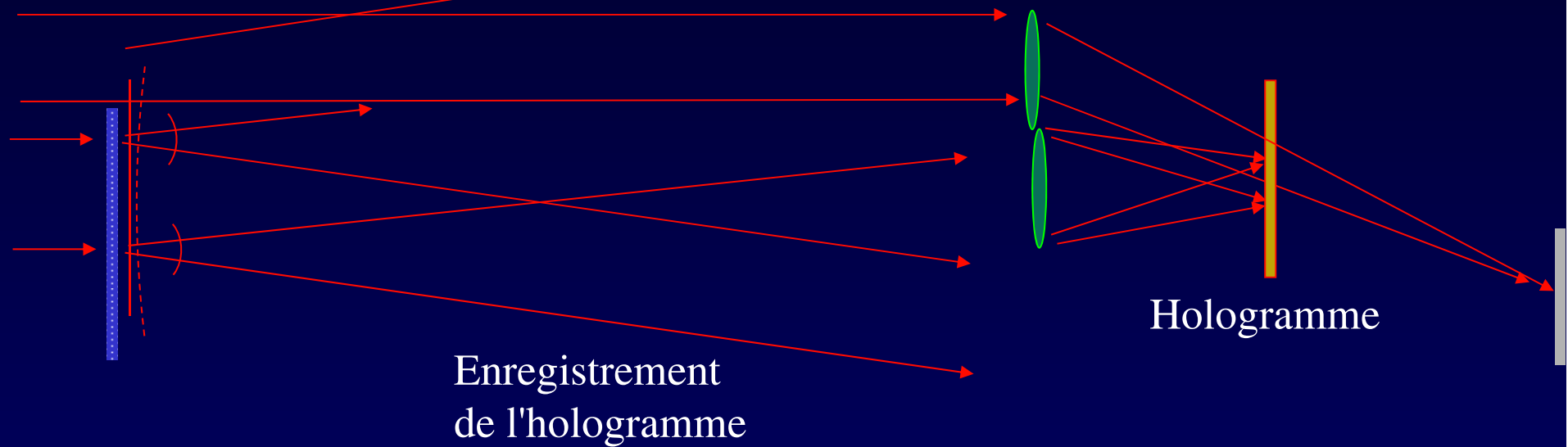
Fonctionnement du télescope géant



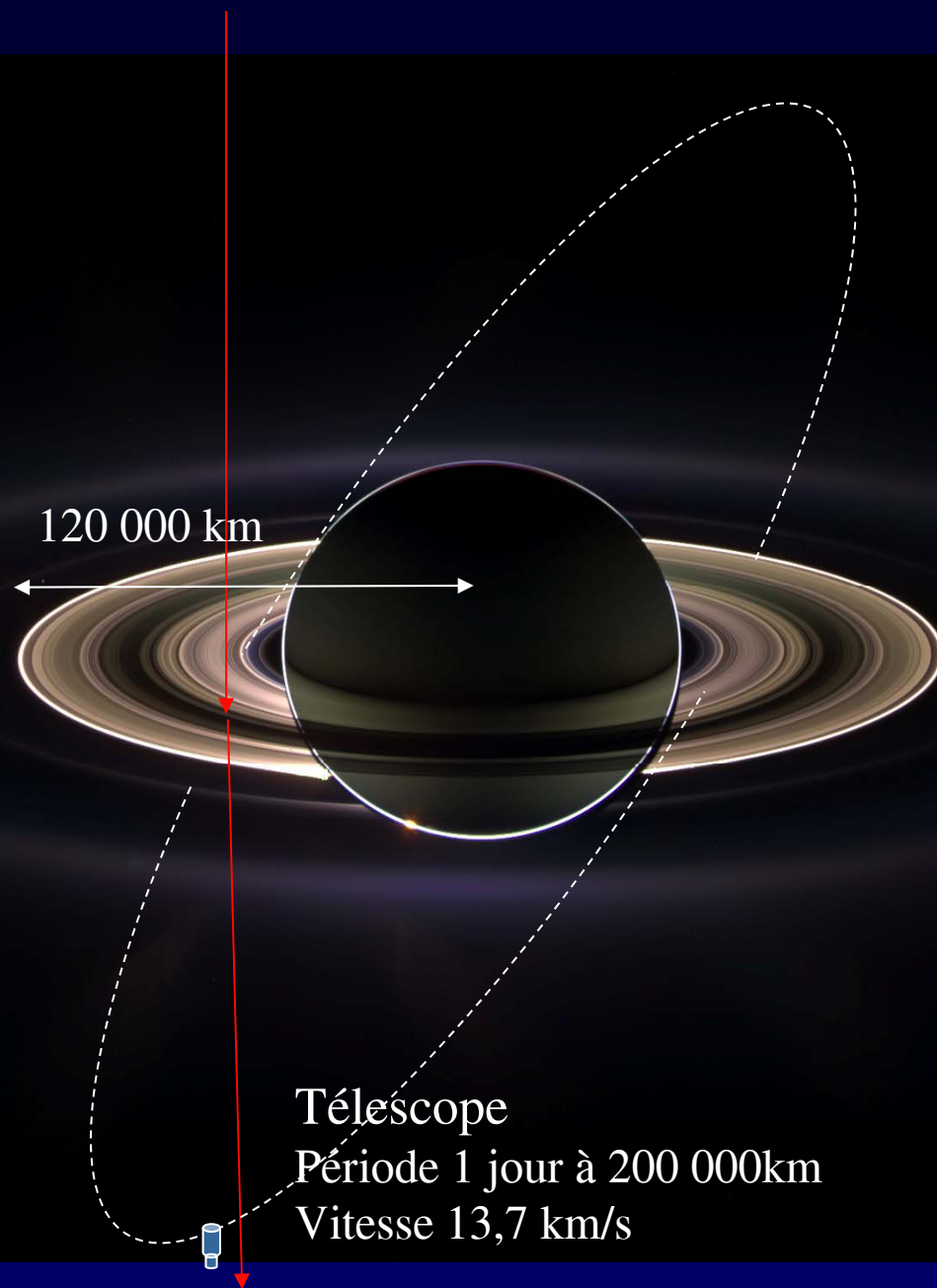
- La dimension des speckles est celle des particules (qui ne sont pas résolues par le télescope)
- Laquelle détermine donc le flux lumineux par speckle
- Nombre de resels dans l'ouverture virtuelle = nombre de speckles

A faire:

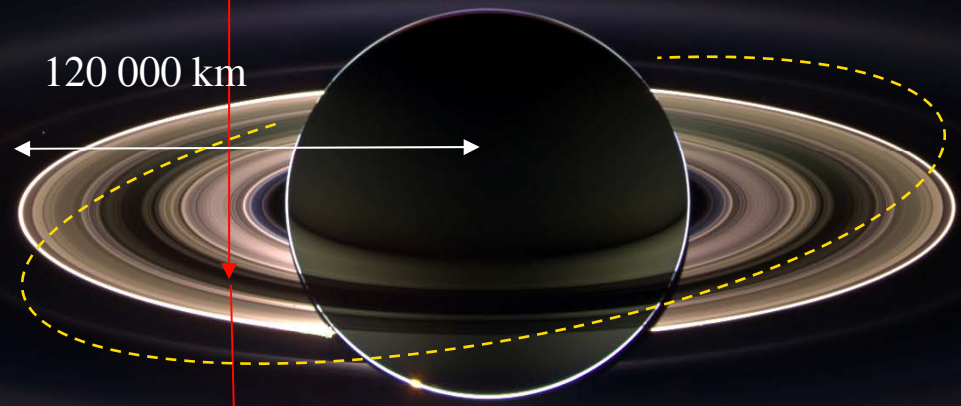
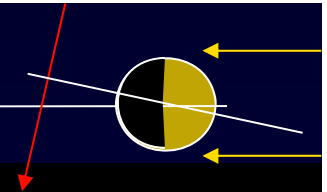
Simulation en laboratoire, avec mise en phase par hologramme remplaçant l'optique adaptative



Anneaux de Saturne



Anneaux de Saturne



120 000 km



Astéroïde Hartley 2

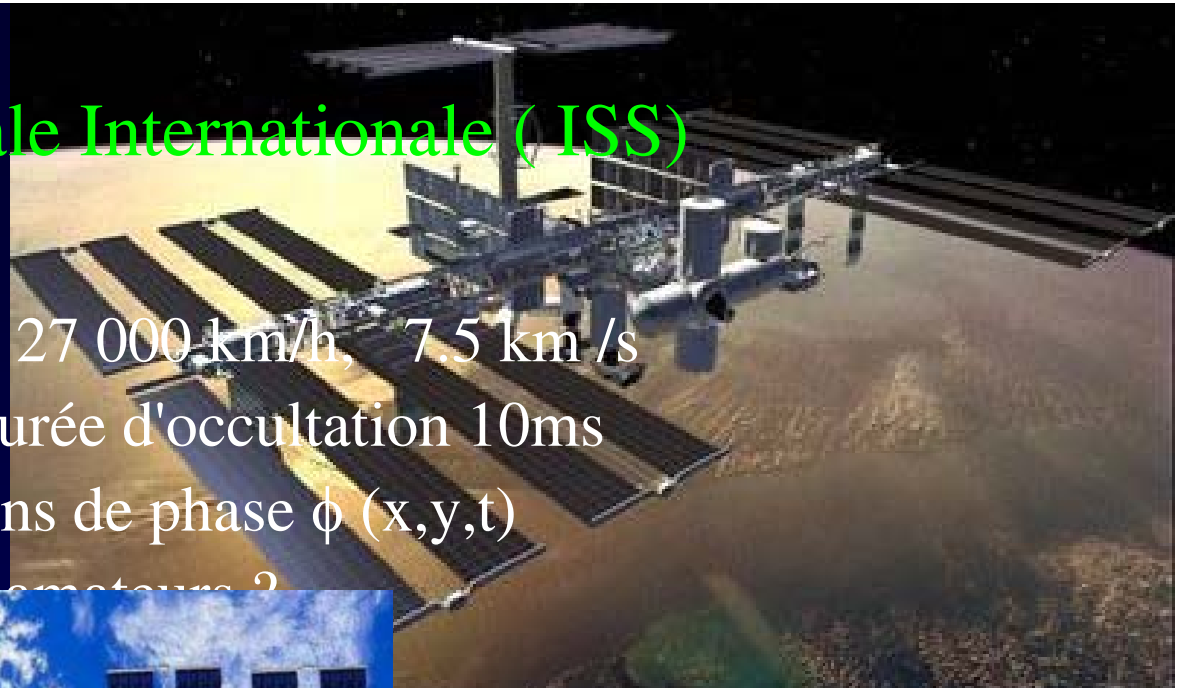
- Enveloppe de neige ? Flocons de 1cm ?
- Mouvement très lent



Candidat diffuseur :

Station Spatiale Internationale (ISS)

- altitude 340 km, vitesse 27 000 km/h, 7.5 km /s
- Vue depuis la Terre: durée d'occultation 10ms
- Pré-calculer les corrections de phase $\phi(x,y,t)$
- Proposer aux astronomes amateurs ?

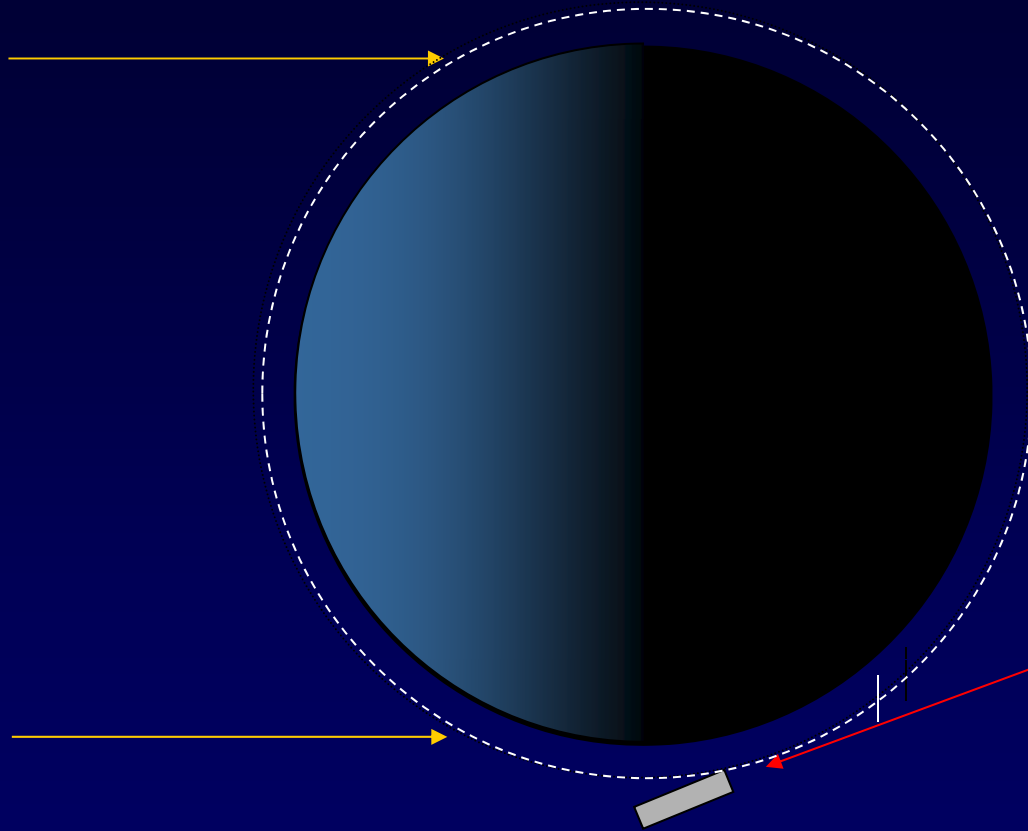


ISS devant le Soleil
photo Th. Legault



Telescope diffractif :

ISS et Hubble ?



Anneaux de Saturne pour haute résolution ?

Conclusions provisoires



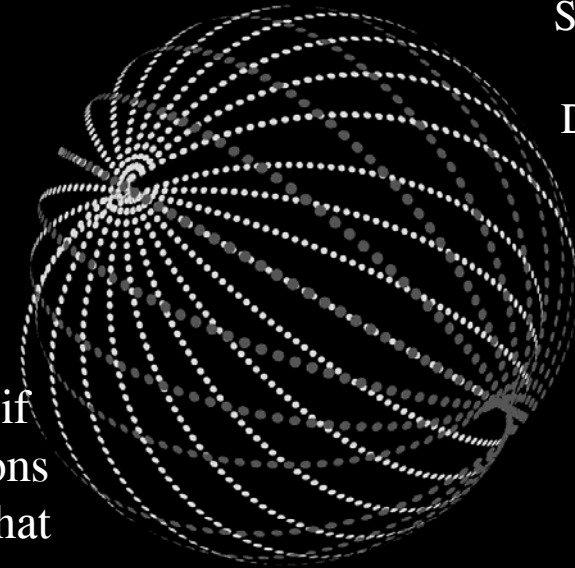
- Grosses particules nécessaires pour luminosité suffisante
- Sur Saturne : approcher à quelques diamètres ? sonde spécialement équipée => couteux et pas immédiat
- Sur ISS : peut-être possible depuis la Terre ou orbite ?
pour amateurs, en groupe, avec plusieurs télescopes mobiles ?
- sur astéroïdes ? préciser les cas favorables



Hypertélescope dans l'espace
La NASA veut coloniser Mars ...
... peut-on observer des systèmes
stellaires colonisés ?

" ...in the long range a single-planet species will not survive...if we humans want to survive for hundreds of thousands or millions of years, we must ultimately populate other planets... I know that humans will colonize the solar system..."

Michael D.Griffin, administrateur de la NASA (2005):



Sphère
de
Dyson



Base lunaire



Conclusions

- Si la civilisation terrestre survit...
- ... sa vision de l'univers pourra s'améliorer énormément
- ... et sa compréhension
- Nous sommes au seuil d'une prolifération optique

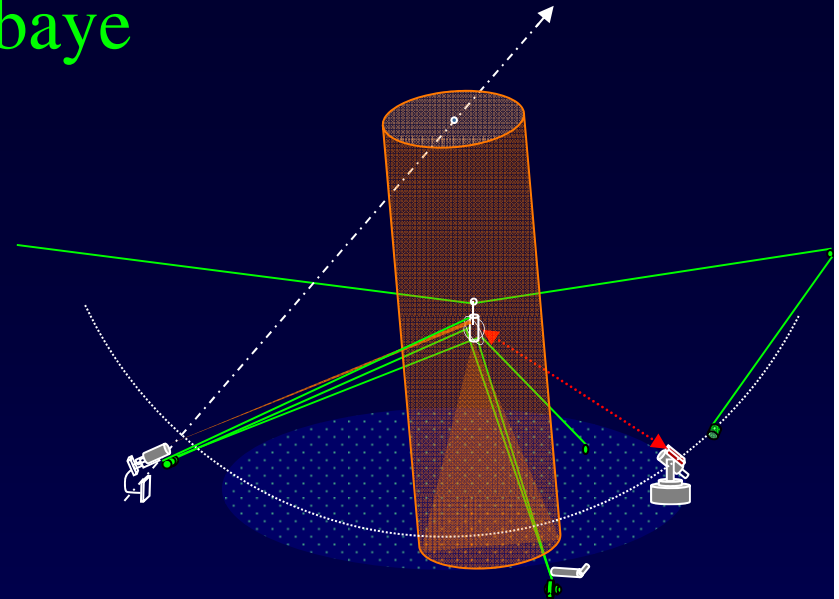


QuickTime™ et un décompresseur
Photo - JPEG sont requis pour visualiser
cette image.



Mais revenons sur Terre ...
... pour y préparer les versions spatiales d'hypertélescope

Essais d'un hypertélescope dans l'Ubaye

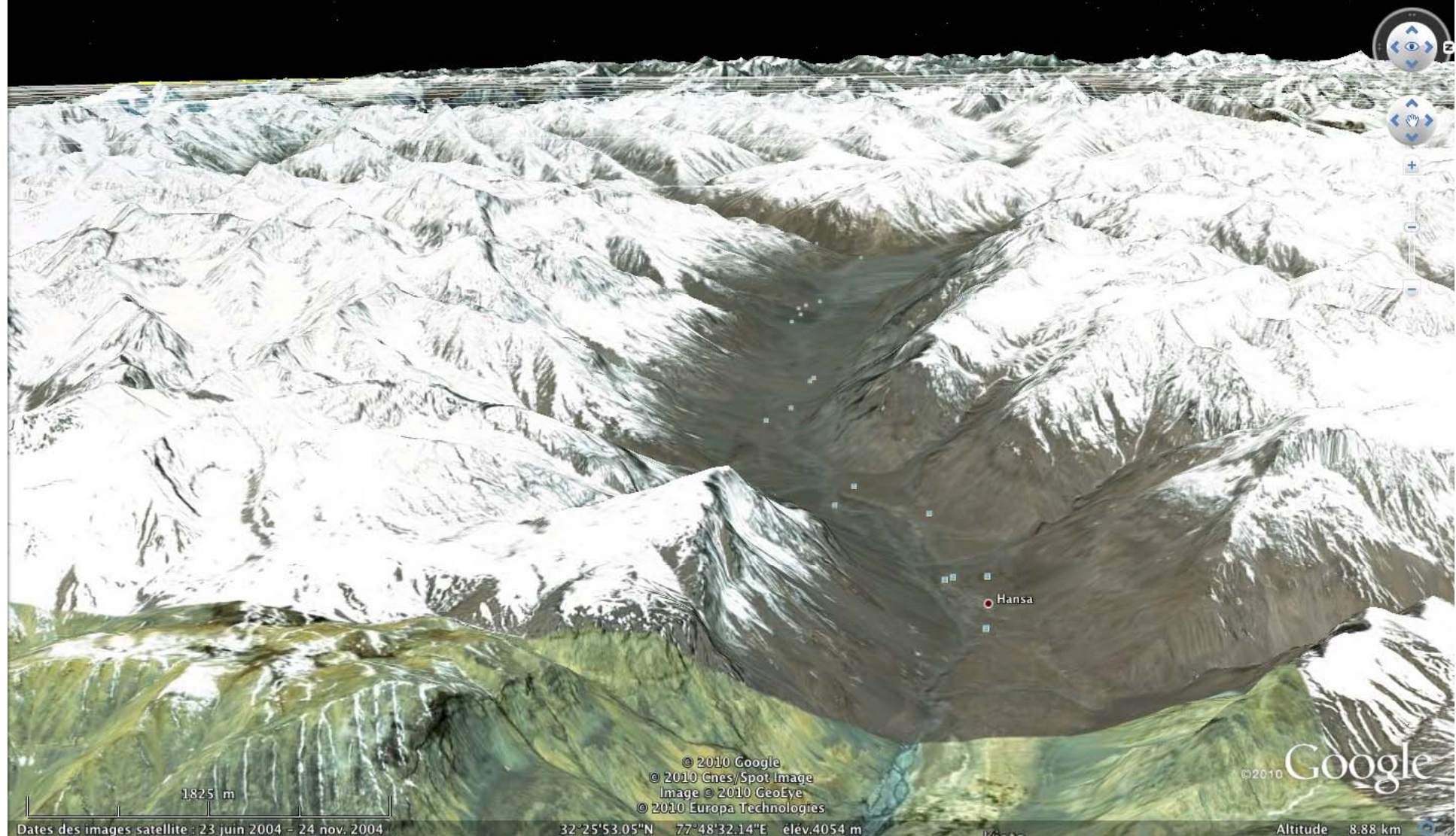


- premiers essais avec deux miroirs: obtenir des interférences
- ensuite:
 - agrandissement à 200m ? installation de 100 miroirs
 - proposition d'un "Kilometric hypertelescope" européen
 - en attendant l'espace...

câble



Himalaya (site repéré sur Google Earth par Rijuparna Chakraborty)



Limitations de l'interférométrie sur Terre

- Réseaux de quelques kilomètres en optique , quelques milliers de kilomètres en radio
- Dégradation par la turbulence atmosphérique en optique ...
- ... évitable par " étoile guide laser" ?
-

Voir la vie extra-solaire ?

Laser Trapped Exo-Earth Imager (LT-EEI)

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 - 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

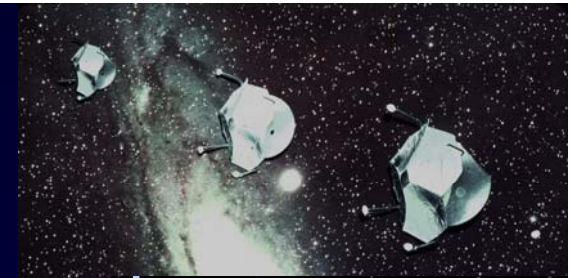
Hypertélescope dans l'espace

- Réseau optique 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 ?



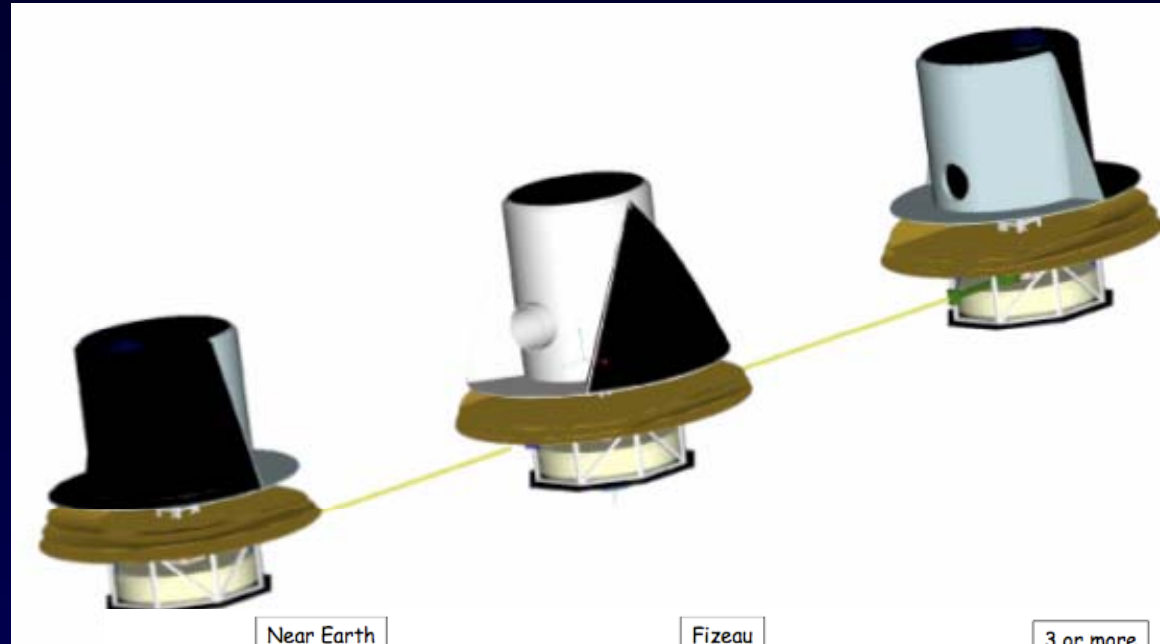
QuickTime™ et un
décompresseur
sont requis pour visionner cette image.

Proposition d'hypertélescope spatial Luciola

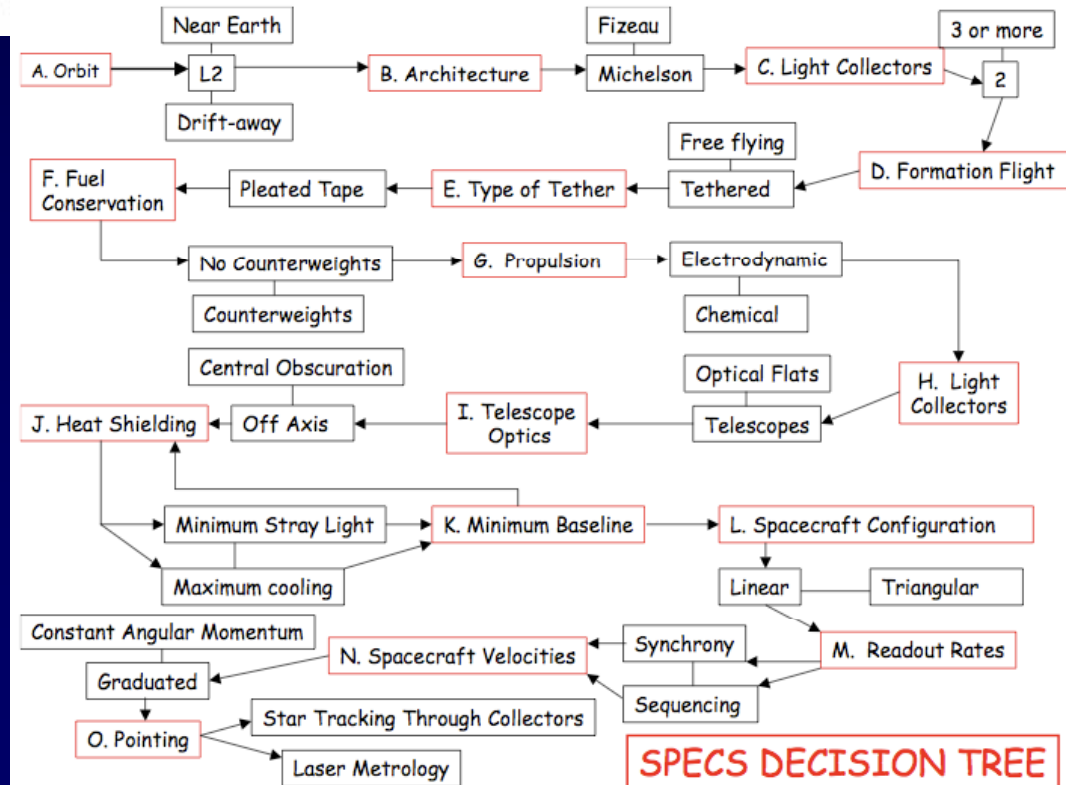
(soumise à l'ESA, 2008, Exp. Ast. 2009)



Interféromètre millimétrique SPECS (Harwitt, Mather, Leisawitz et al. 2008)



- Domaine sub-millimétrique
- Télescopes refroidis
 - Piégeage laser applicable ?



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

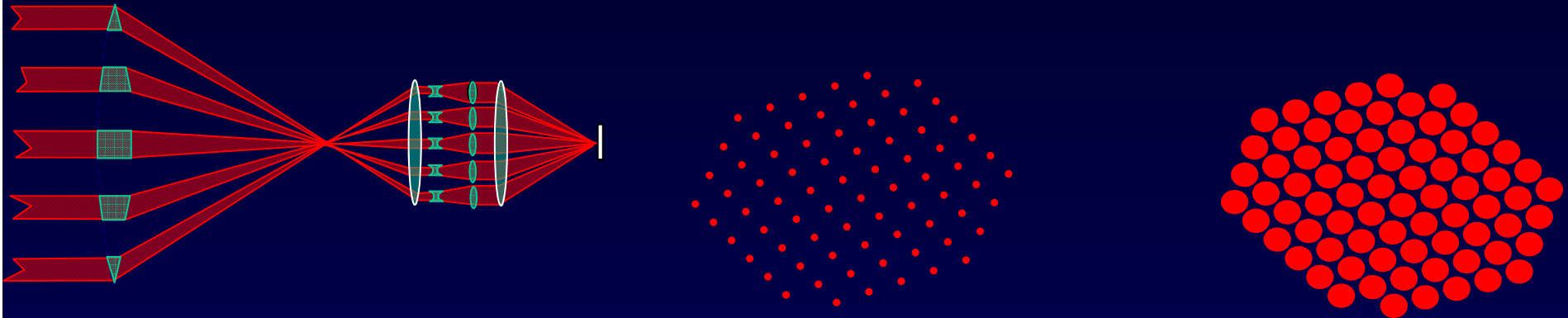
- LOFAR 25 000 antennes, 350km
- Long Wavelength Array: 10 000 antennes, 400km
- Murchison Widefield Array: 16 000 antennes dipôles
- "Sample wavefront with myriad small antennas: revolutionary potential gains ..."

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

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

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 $s = 100,000\text{km}$

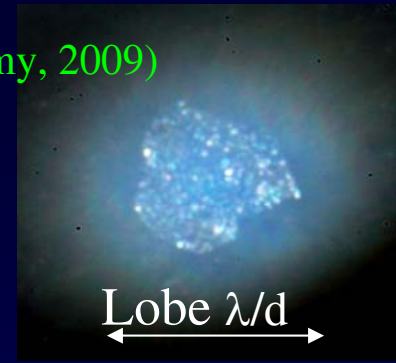
$$\text{Intensification} = (s/d)^2 = 10^{14}$$

- 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

