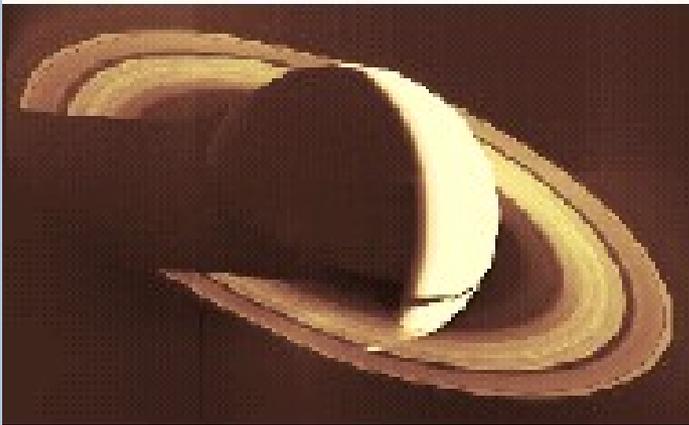


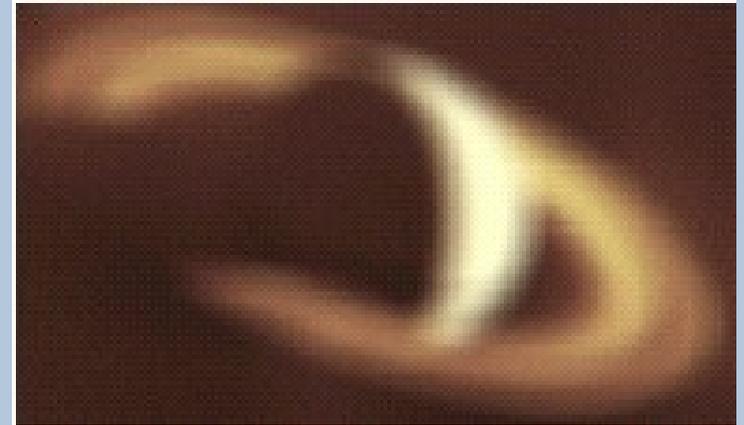
L'optique adaptative

Pourquoi ?

On sait, depuis Galilée, que ce qui est reçu des astres sur Terre est déformé par la turbulence atmosphérique. Celle-ci modifie le front d'onde que nous recevons en provenance de l'objet étudié :



L'objet



L'image

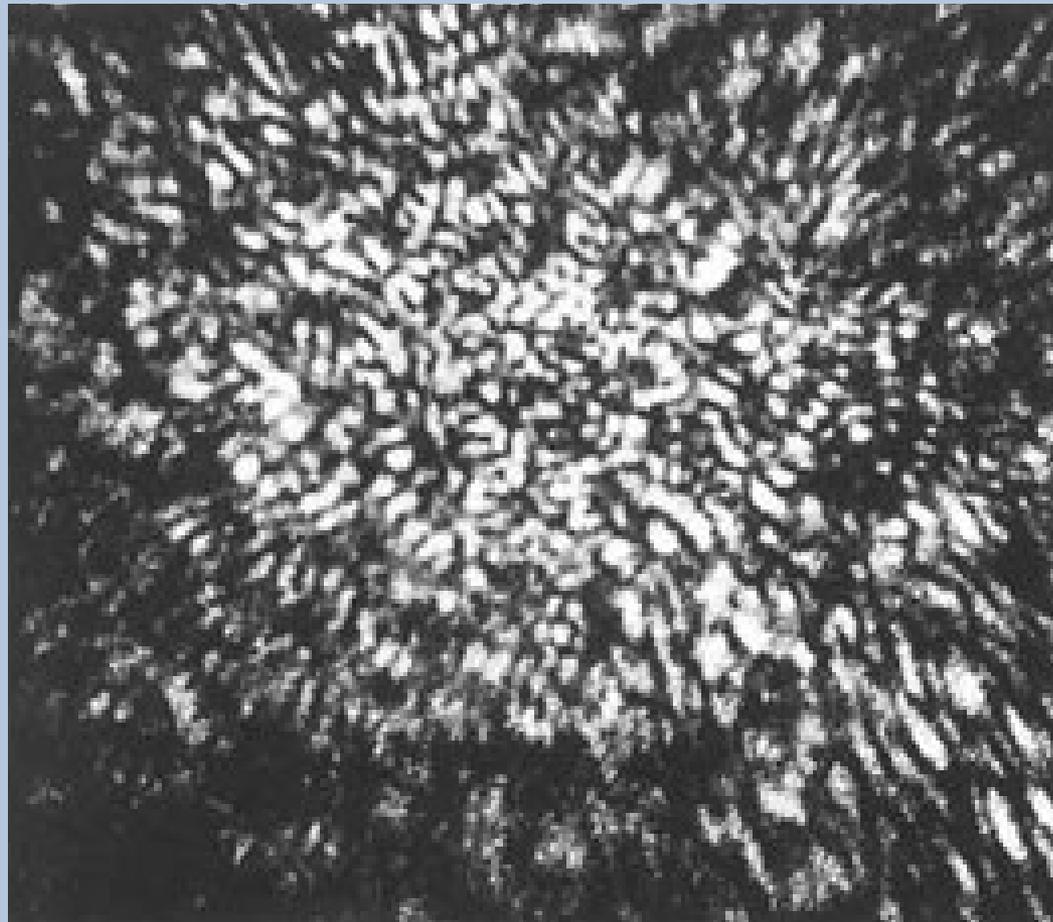
Cette déformation de l'image comporte deux composantes :

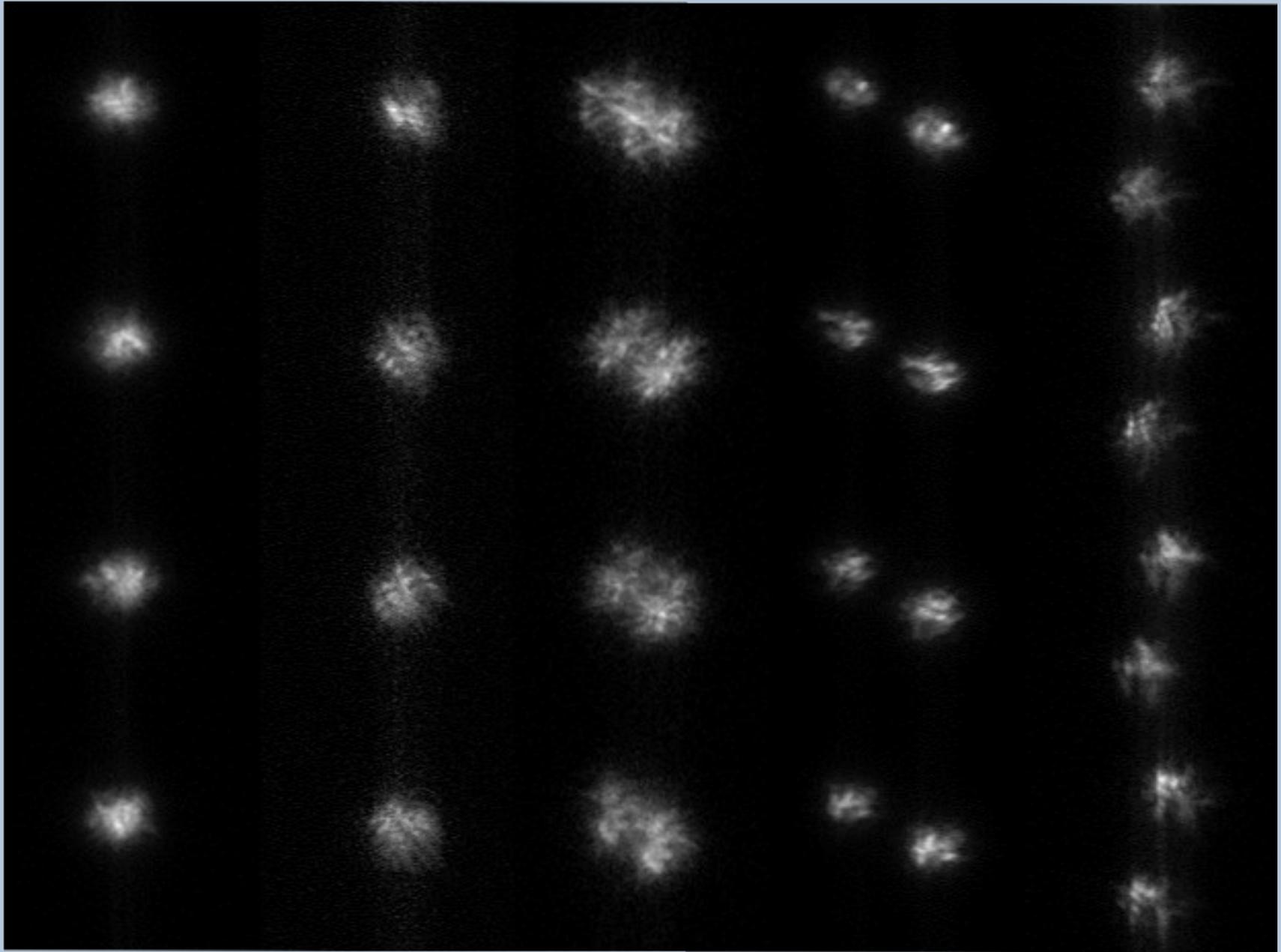
- 1) un phénomène d'interférence donnant naissance aux tavelures (pour les télescopes de grand diamètre)
- 2) un déplacement du centre de gravité de l'image (agitation).
(pour tous les télescopes)

Ces deux phénomènes dégradent l'image tant en poses

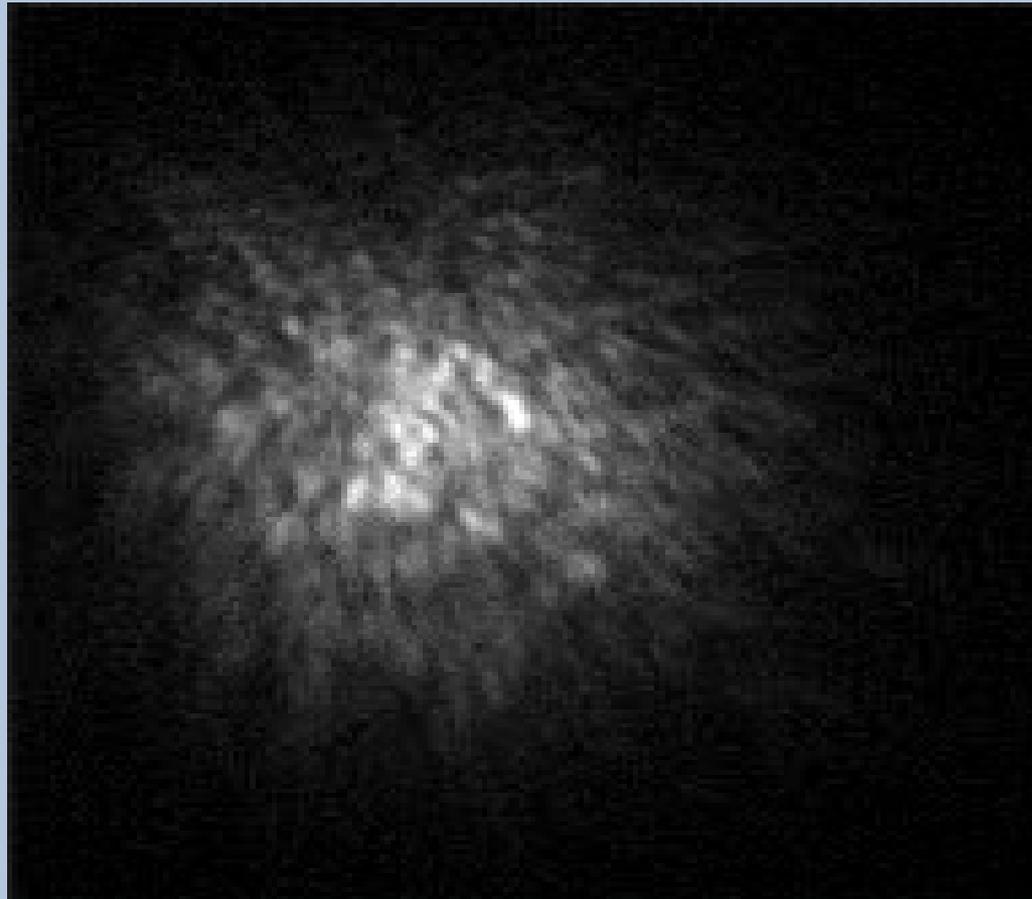
courtes (tavelures) qu'en poses longues (tavelures + agitation)

Tavelures (speckles) étoile Véga Antoine Labeyrie



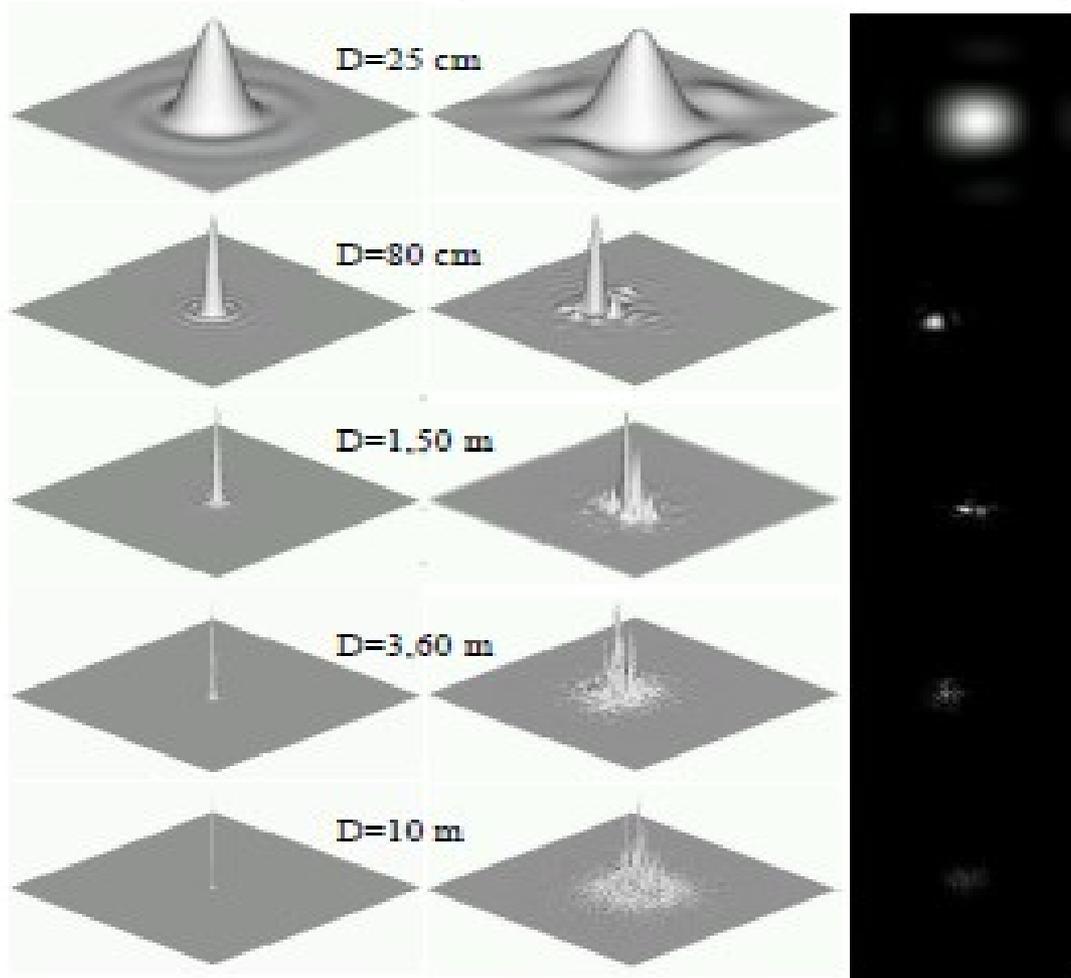


Résultat



Images sans turbulence

Images en présence de turbulence



A noter que le résultat dépend du diamètre du télescope

Evaluation de la qualité du ciel :

* Critère de FRIED (d_0), homogène à un diamètre :

C'est le diamètre d'un télescope fictif qui, en l'absence de turbulence, donnerait la tache d'Airy obtenue avec le télescope réel, en présence de turbulence.

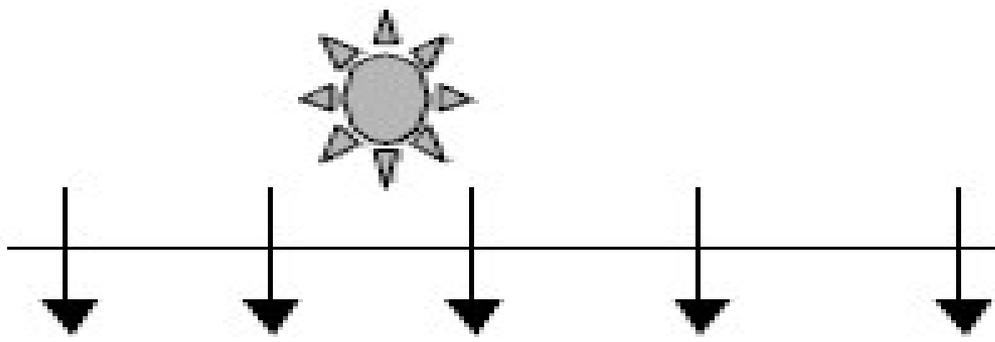
* le seeing (") : $s = 202140 (\lambda / d_0)$.
(rad) $s = 0.98 (\lambda / d_0)$.

(bons sites : $0.5'' < s < 1''$ Au Chili s peut atteindre $0.25''$)

Le rayon de la tache d'Airy est donné par : $r = \frac{1.22 \lambda f}{D}$

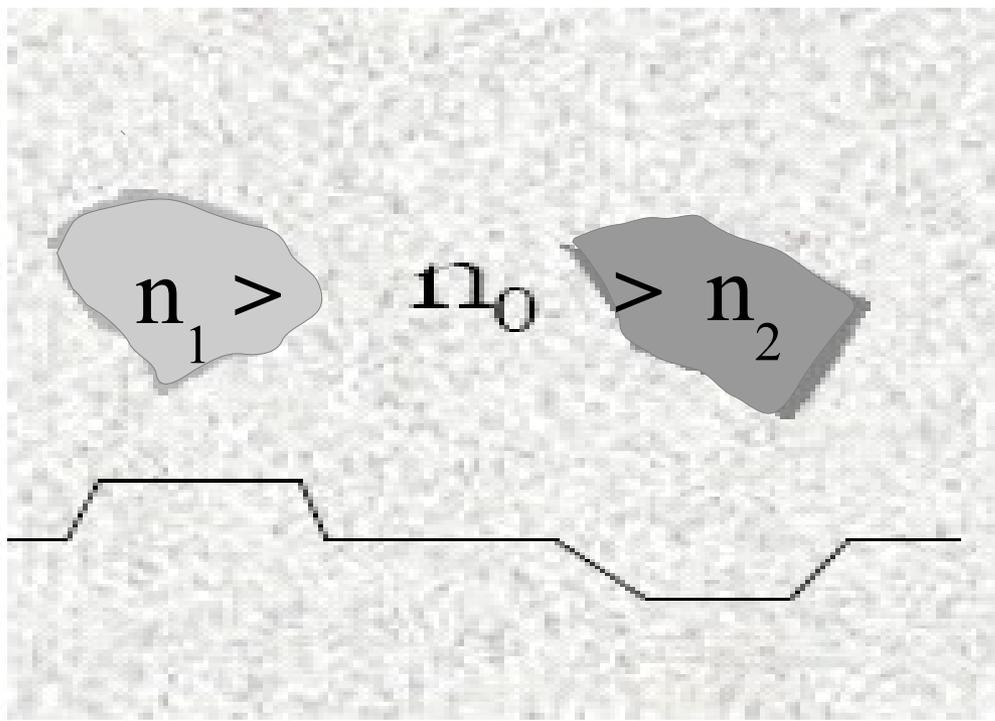
Le phénomène

Étoile à l'infini



Front d'onde plan

$$v = c / n$$



Bulles inhomogènes

$$v_1 < v_0 < v_2$$

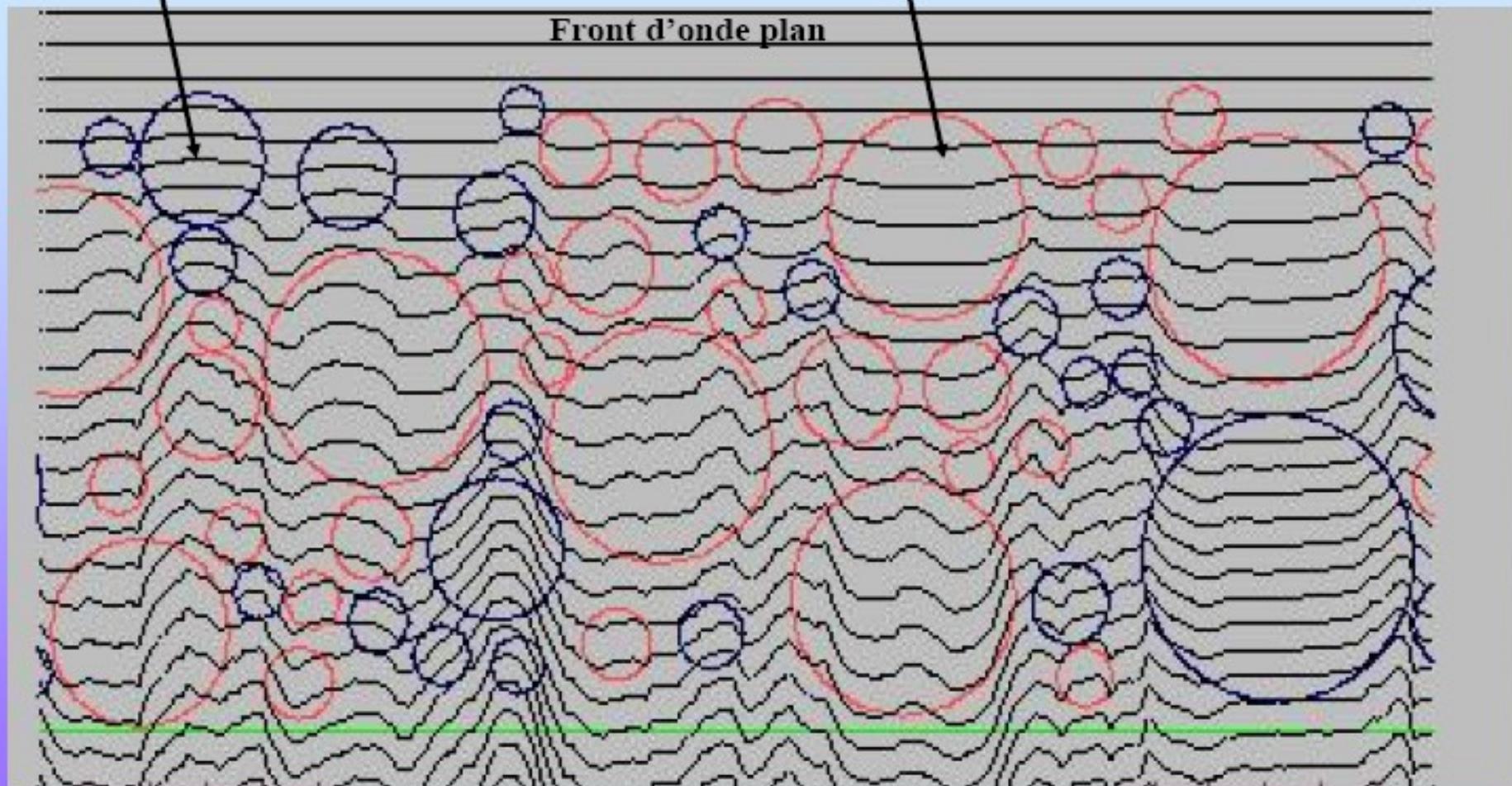
Front d'onde déformé

Trajet de la lumière dans l'atmosphère

Bulle d'air Froid

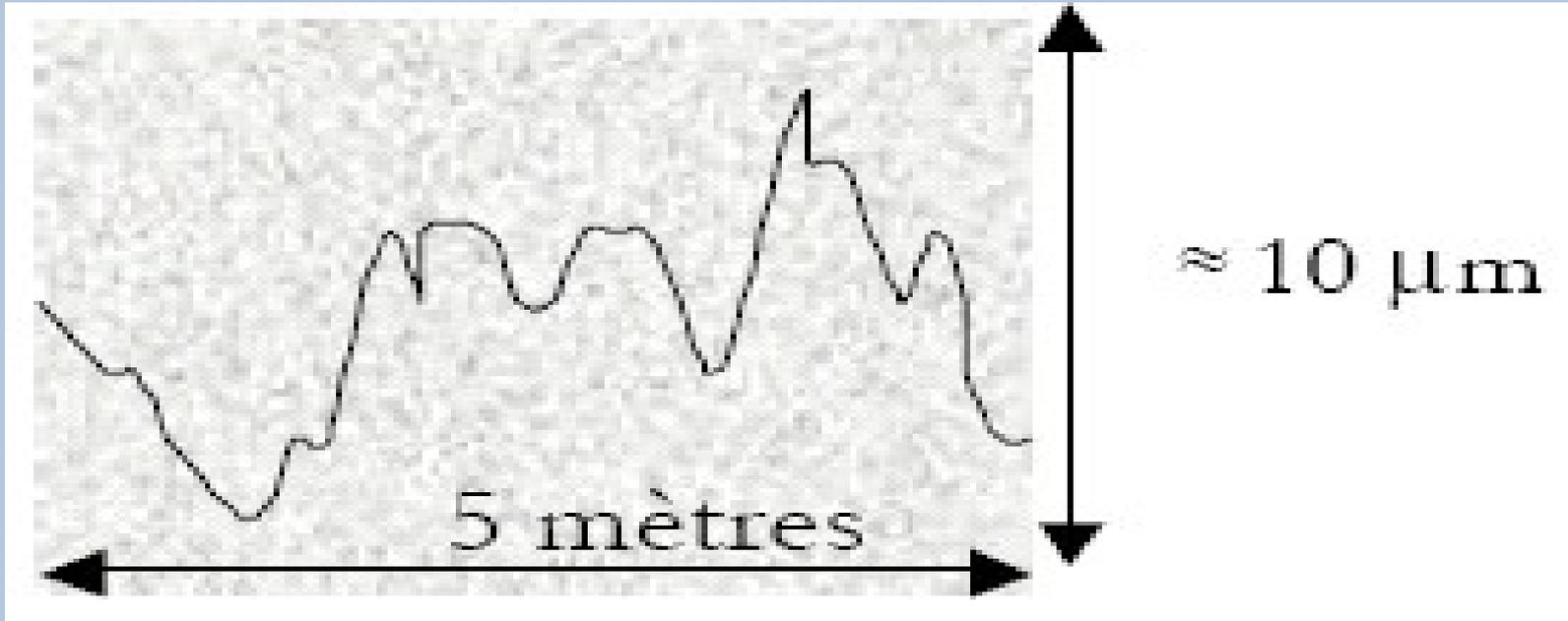
Bulle d'air Chaud

Front d'onde plan



Sol

La déformation est liée à une modification de la vitesse de phase de l'onde : certaines parties seront « en avance » par rapport au plan d'onde initial, d'autres en « retard » .



Cette variation est faible, mais elle suffit à détériorer l'image obtenue.

Pour diminuer voire éliminer les effets qui dégradent les images, on utilise un ensemble de techniques regroupées sous le terme d'Optique Adaptative (OA).

Techniques mises en œuvre :

1/ Analyse du front d'onde

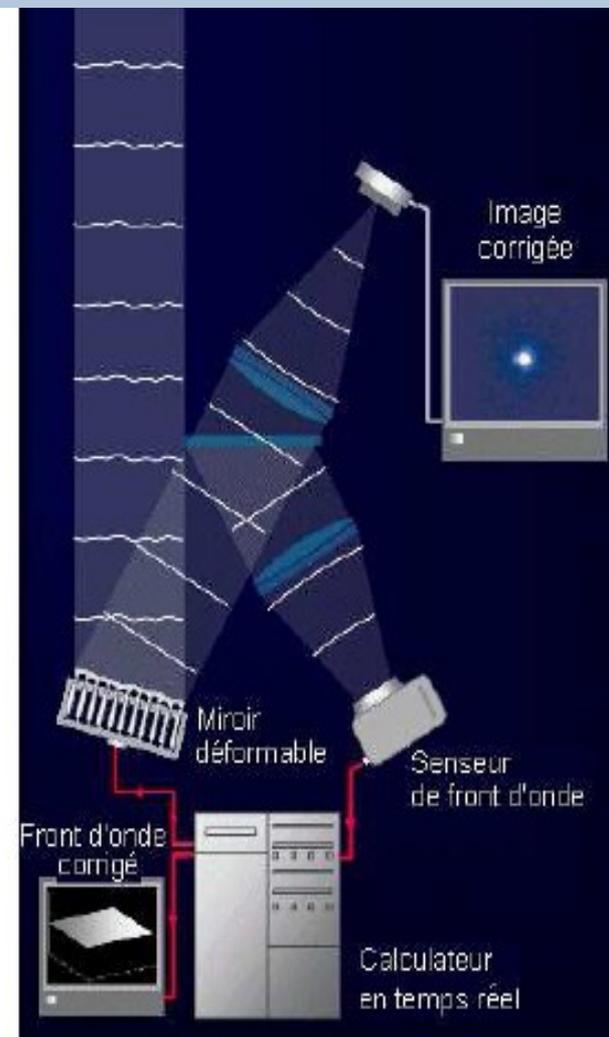
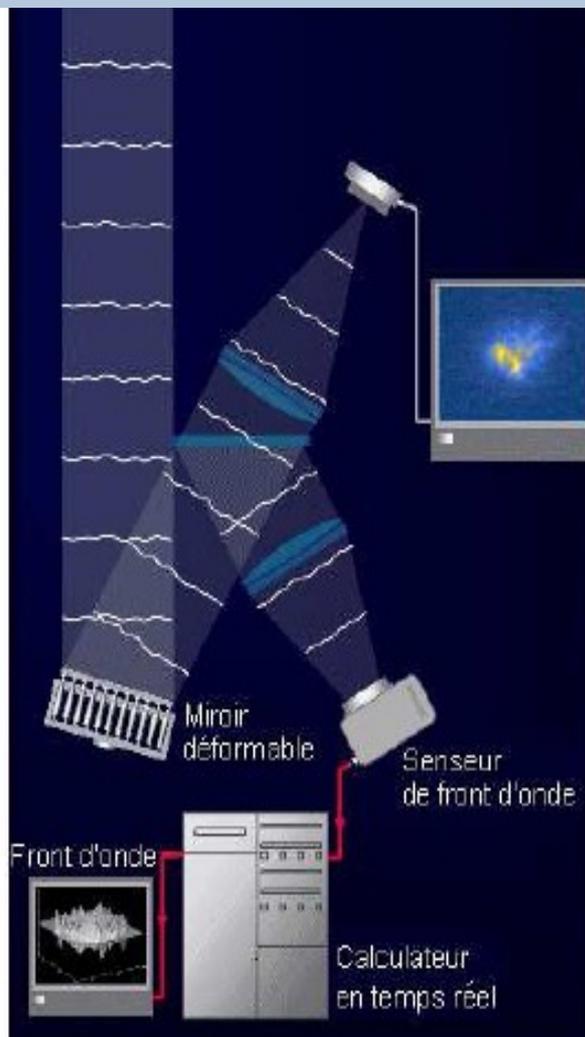
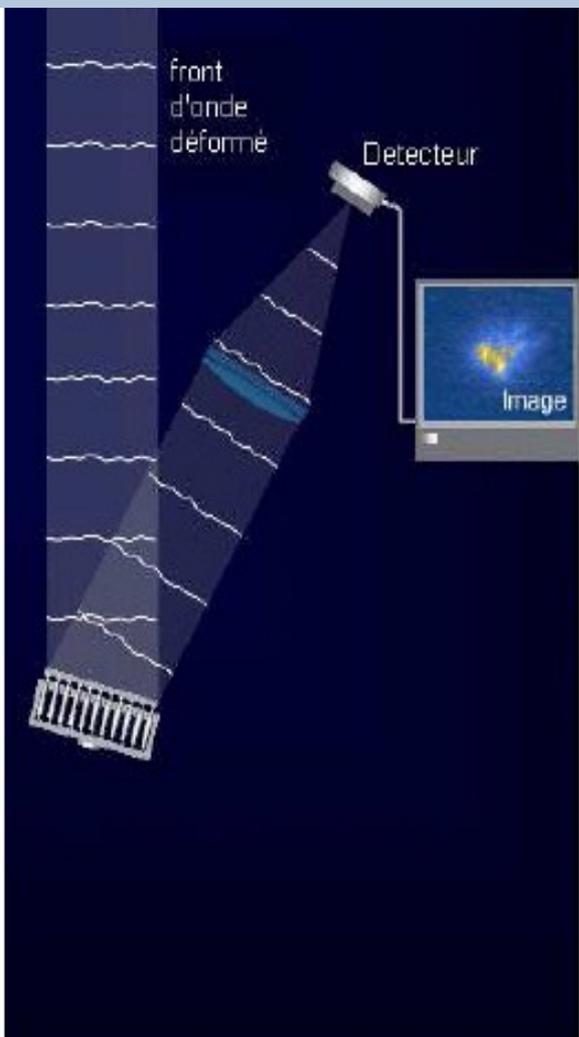
2/ Correction

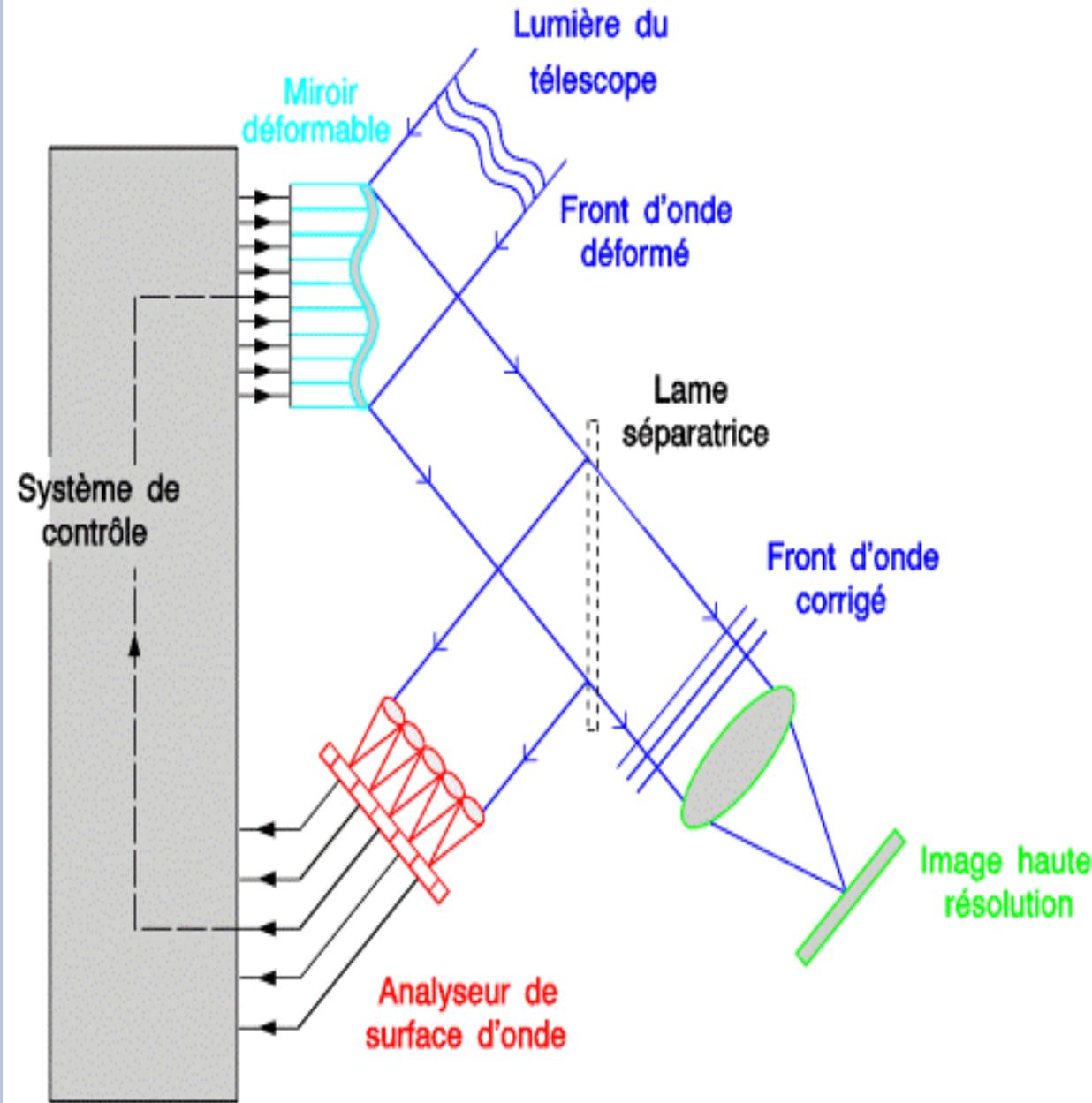
1 unique miroir déformable (tavelures + agitation)

2 miroirs (1 déformable + 1 de recentrage)

3/ Recours éventuel à une étoile artificielle

Principe de l'OA



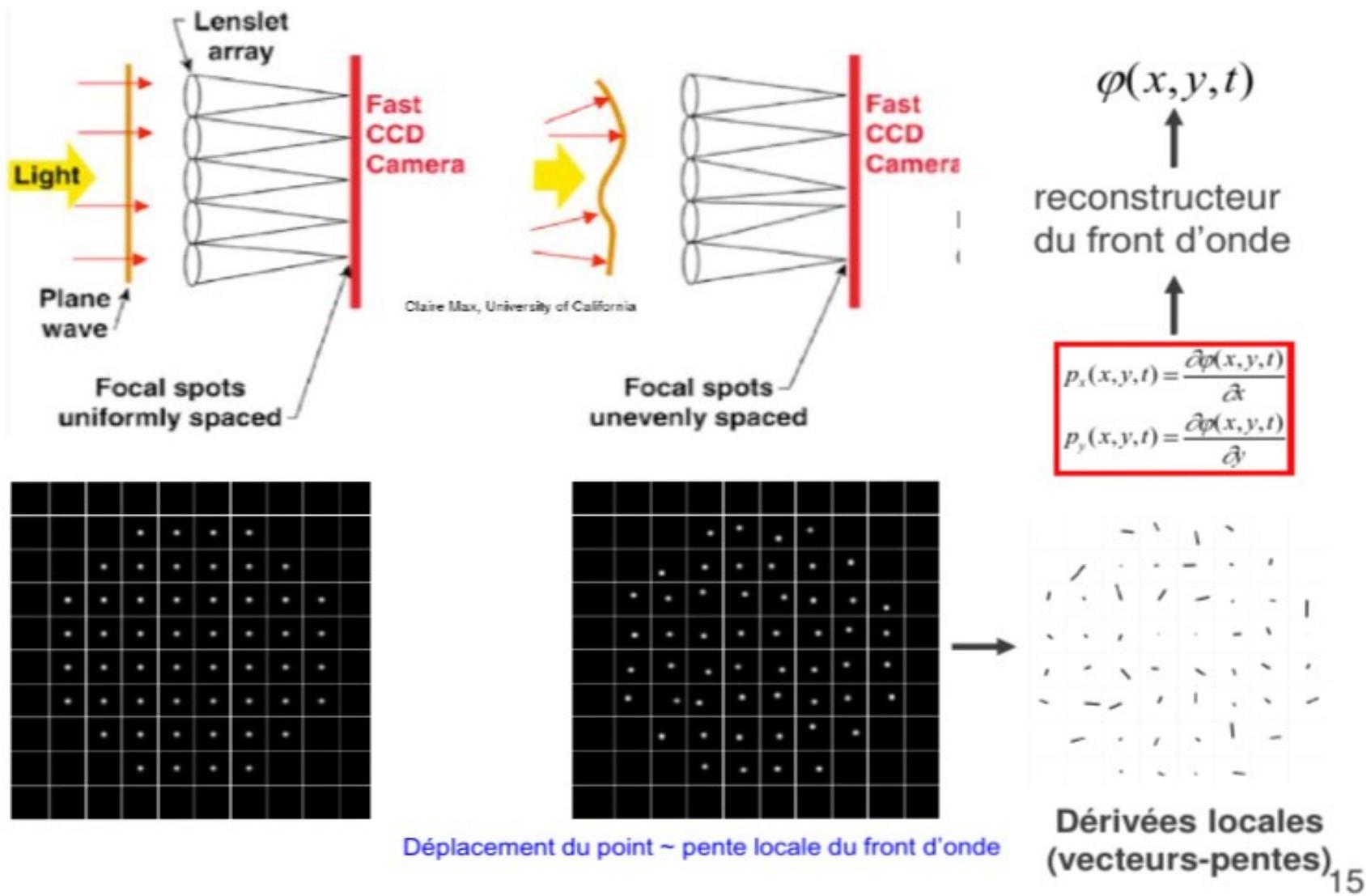


Comment se débarrasser des déformations de l'onde : en déformant le miroir en « sens inverse ! »



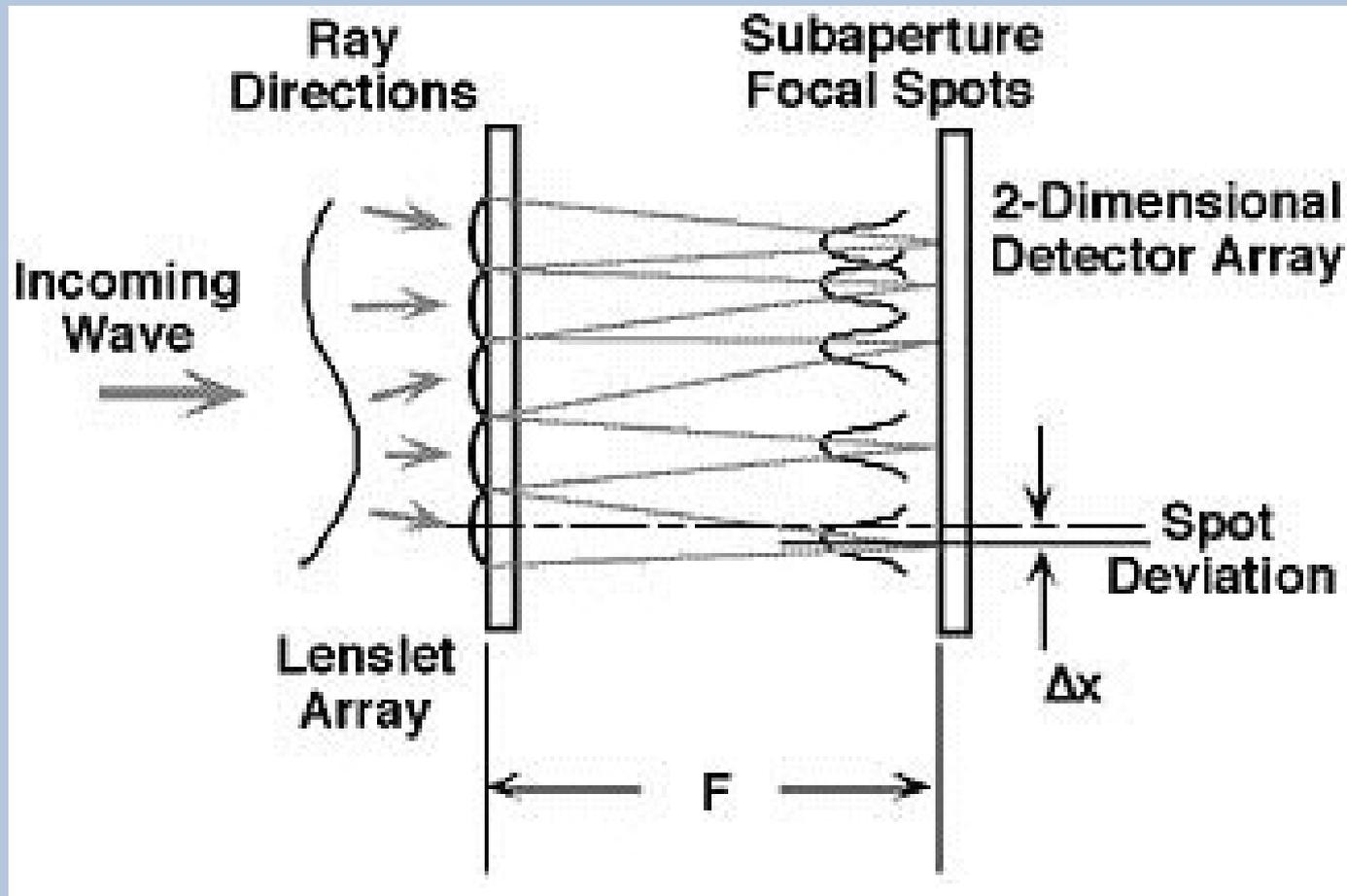
L'analyseur de front d'onde

Analyseur de front d'onde : le Shack-Hartmann

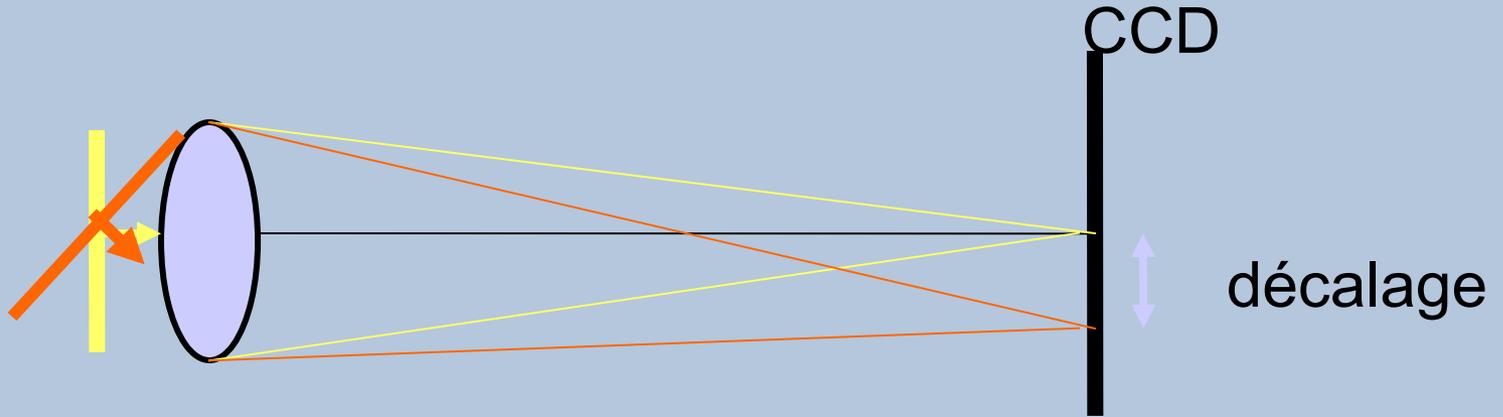


Il faut donc connaître à chaque instant la déviation du front d'onde par rapport au front plan théorique.

C'est le rôle du *senseur d'onde* :



Principe d'une micro lentille :



L'information est transmise à un ordinateur qui pilote un miroir déformable

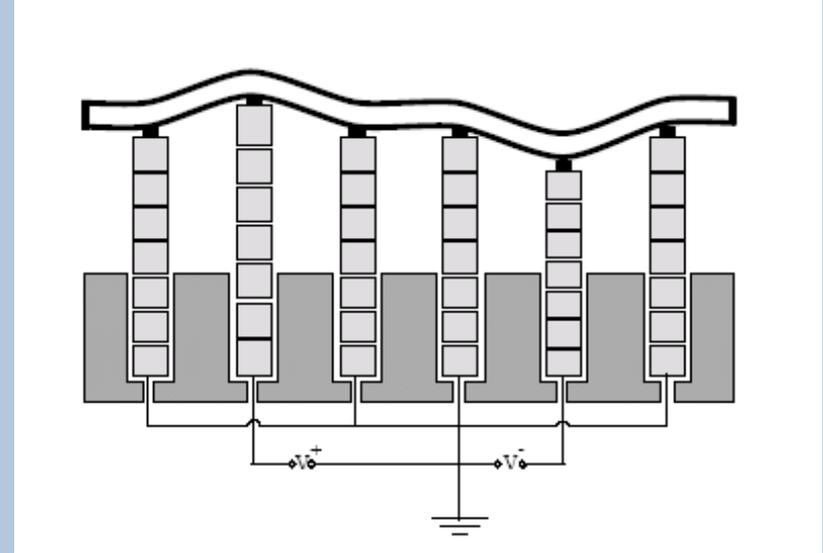
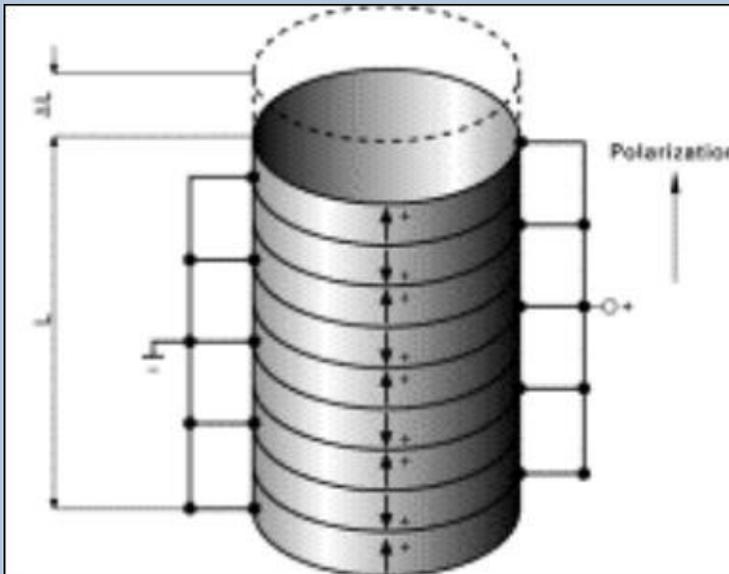
Les miroirs déformables

Piézo-électriques

Conventionnels

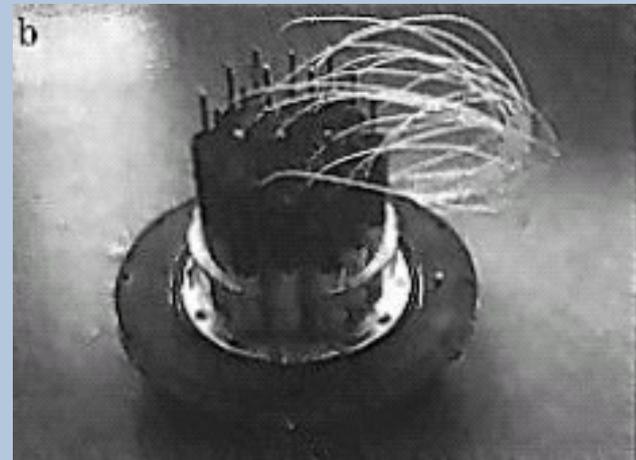
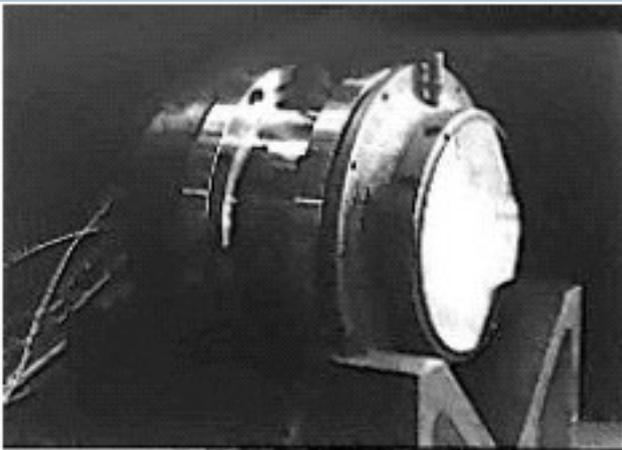
Bimorphes

Electro-magnétiques



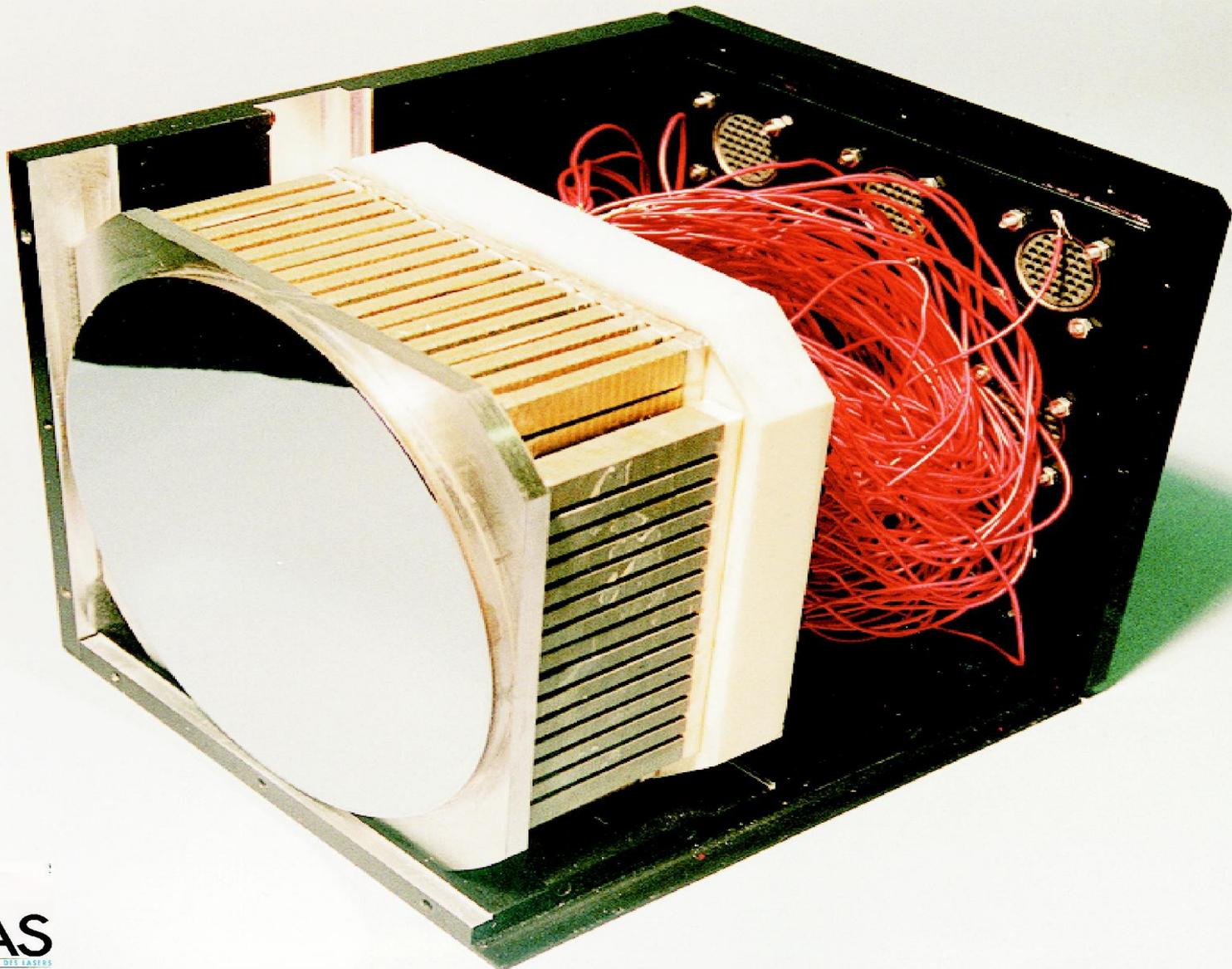
Miroirs déformables conventionnels

Utilisent les propriétés piézo-électriques de certains types de céramiques.





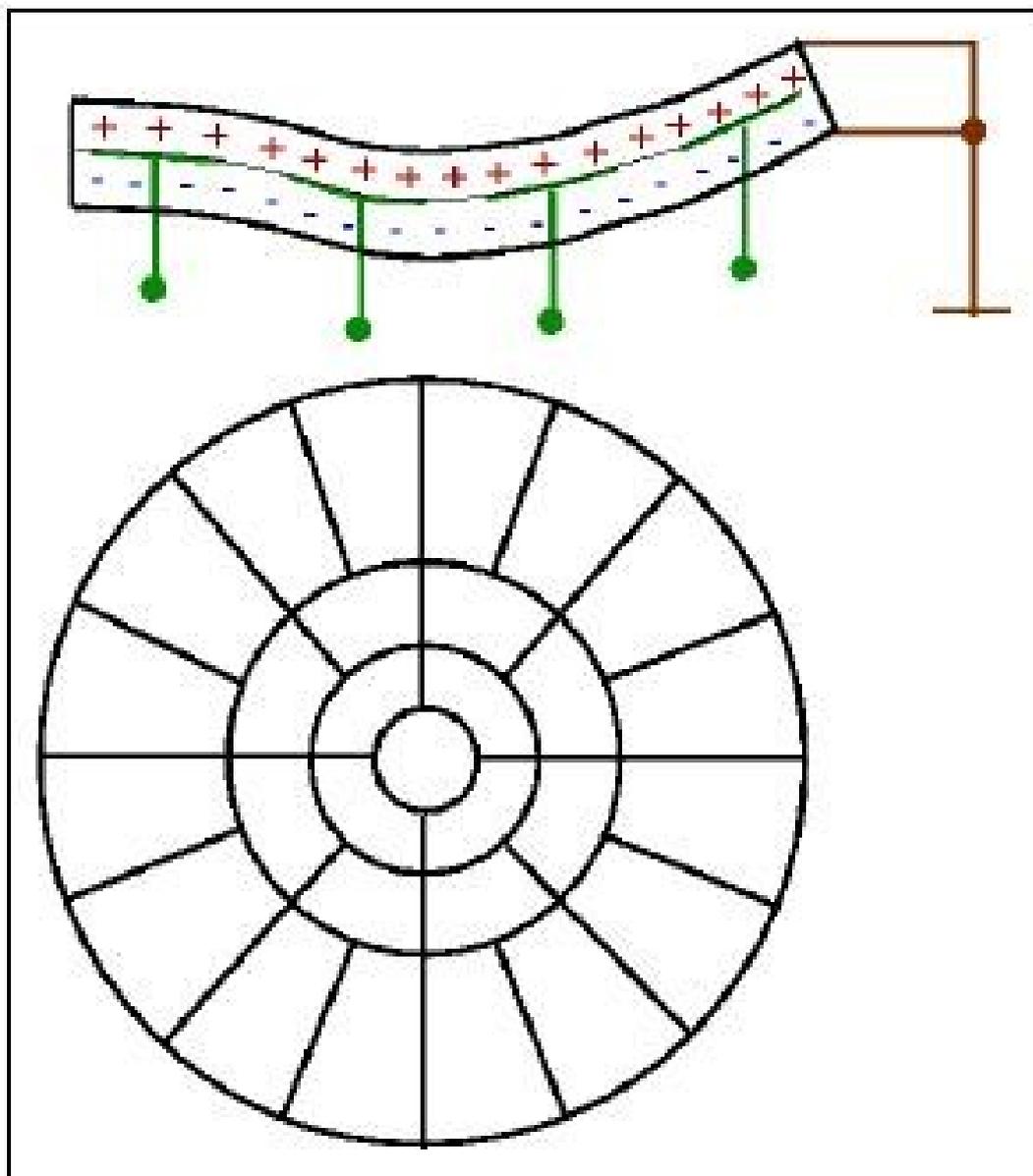
Face arrière du miroir Xinetics utilisé dans le système d'optique adaptative du télescope Keck (349 actionneurs séparés de 7 mm)



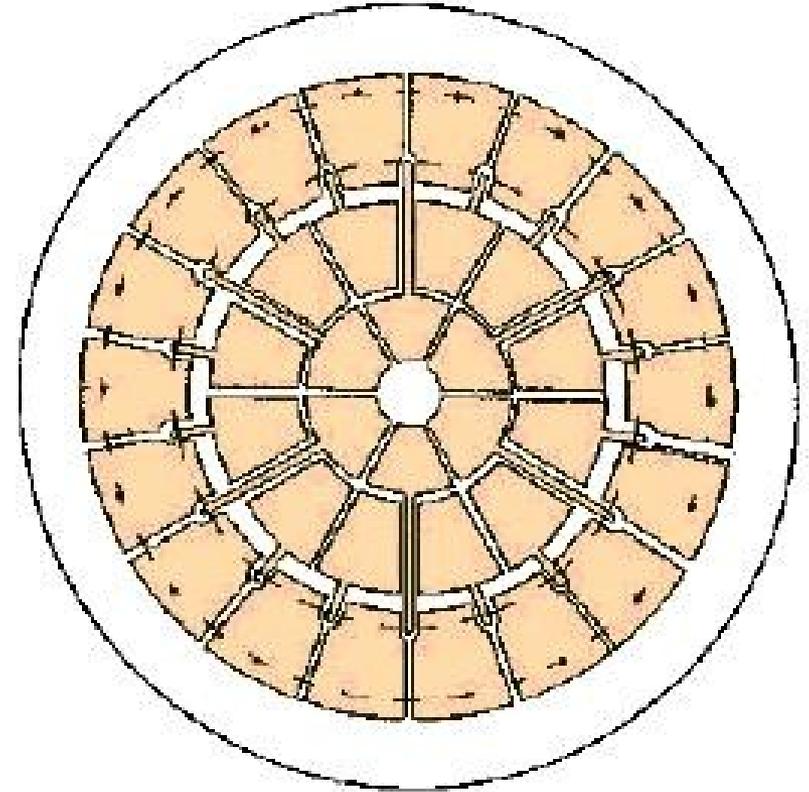
Les miroirs bimorphes

La technologie bimorphe repose sur les mêmes propriétés piézo-électriques :

Un réseau d'électrodes est pris en sandwich entre deux plaques de céramique ; sous l'effet d'une tension appliquée, une plaque se contracte alors que l'autre se dilate entraînant une courbure de l'ensemble.

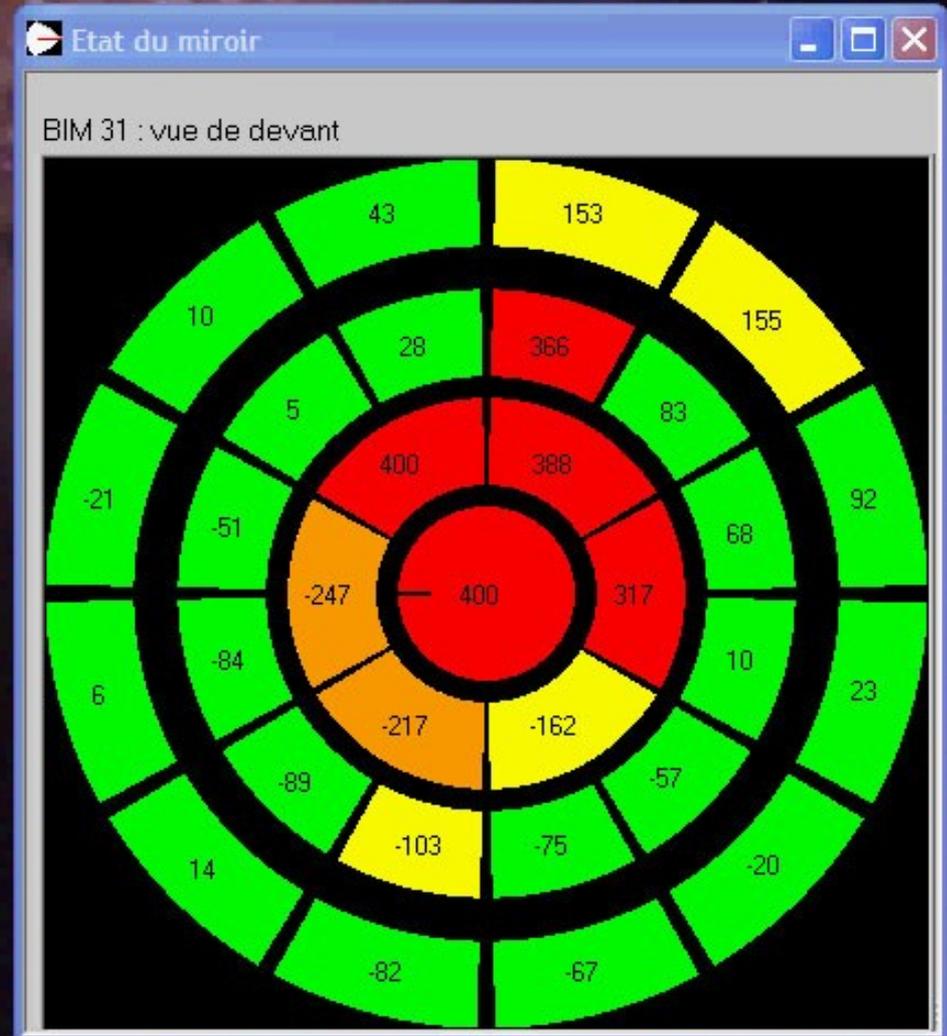
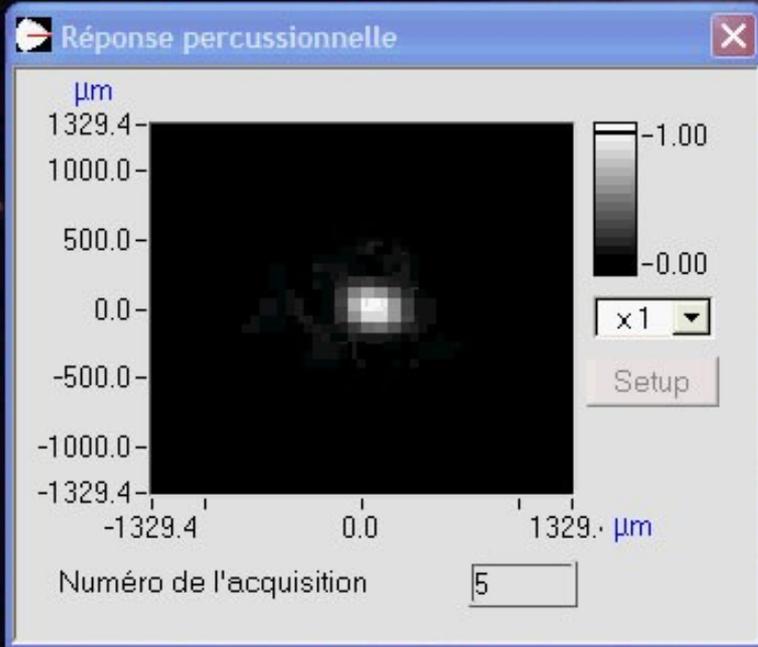


Vue en coupe et de dessus d'un miroir bimorphe



Miroir à surface continue de technologie bimorphe (100 mm ; 36 actionneurs).

Miroir déformable de type bimorphe Image test avec correction



Les miroirs à actionnement électromagnétique :

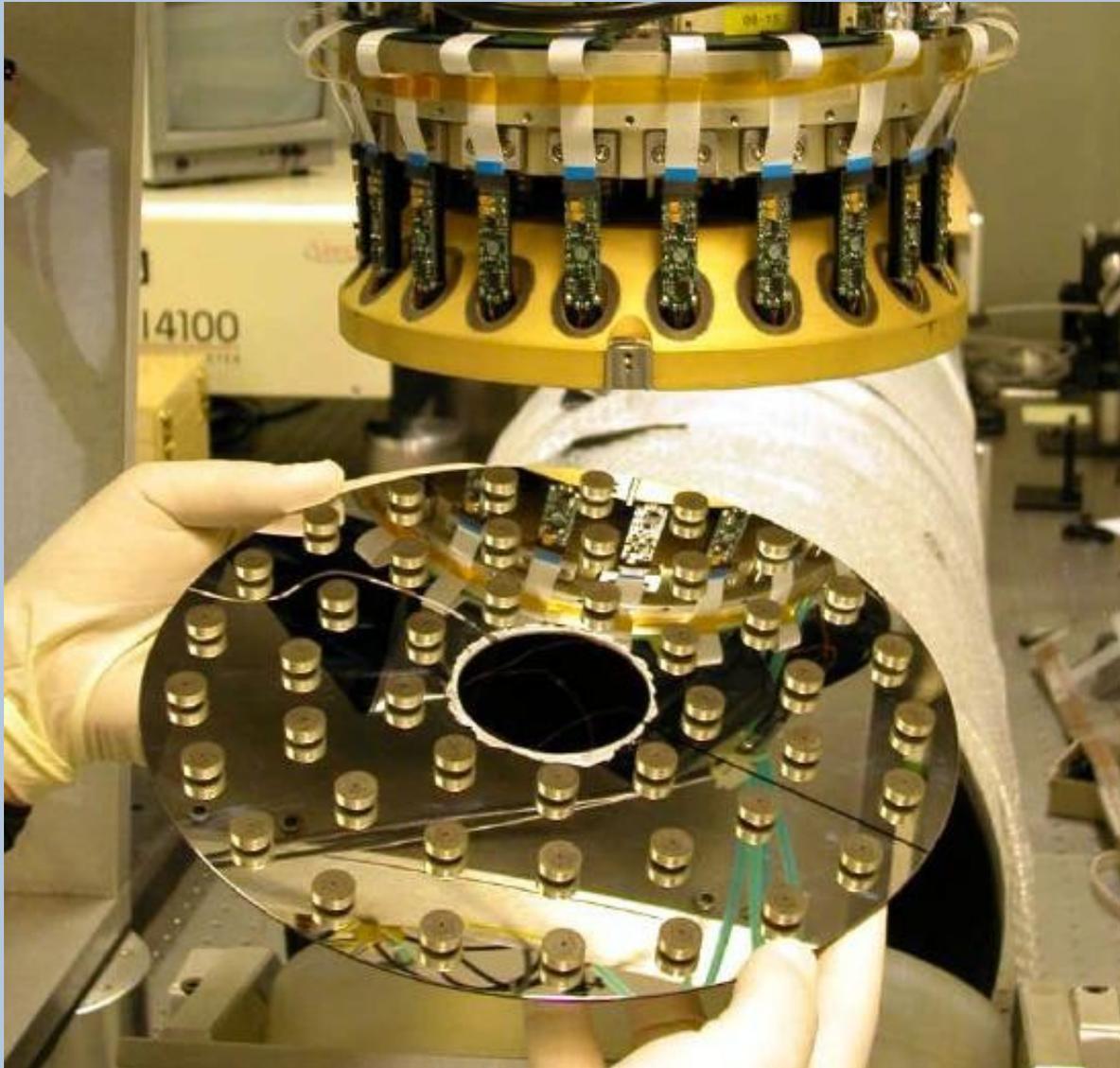
Des aimants sont collés sur le miroir déformable, en face de bobines.

Le passage d'un courant dans la bobine attire ou repousse l'aimant ce qui déforme le miroir.

Exemple : lame en Zérodur de 1,6 mm d'épaisseur pour un diamètre de 0,911 m avec 672 actionneurs espacés de 30 mm.

Avantages : faible coût et déformation importante.

Inconvénients : fragilité du miroir et dégagement de chaleur au niveau des bobines.



Prototype de miroir déformable électromagnétique
(45 actionneurs sur 240 mm de diamètre)

Autres techniques d'optique adaptative :

Par réflexion :

- miroirs liquides à ferrofluides (suspensions colloïdales de nanoparticules ferromagnétiques)

- miroirs en micro-électronique (mosaïque de μ -miroirs en silicium, en polymères,)

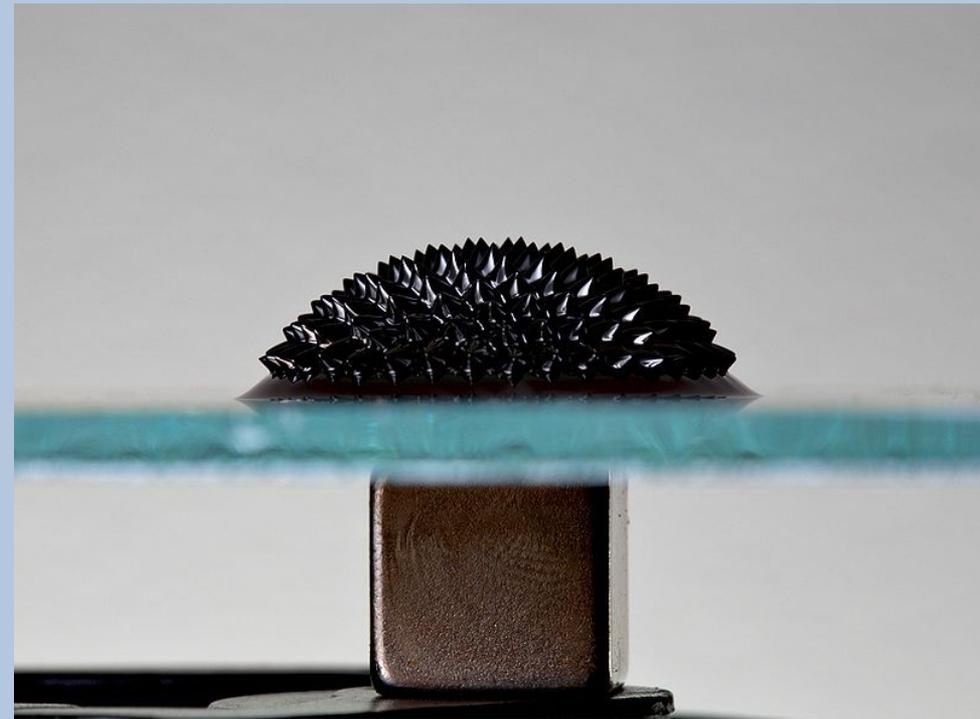
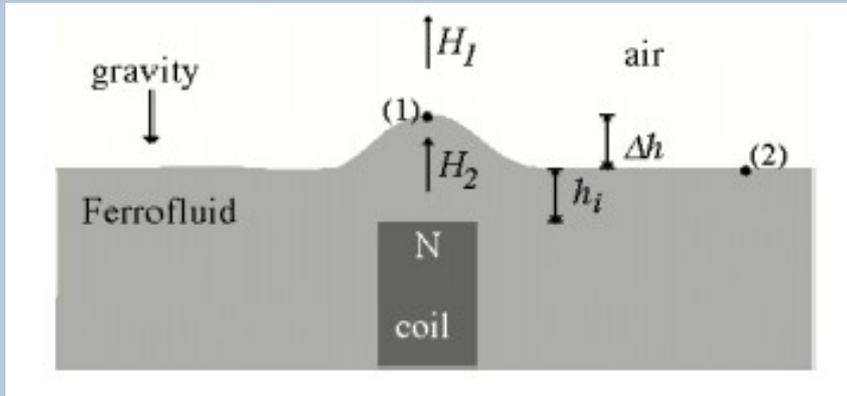
miroirs MEMS (Micro-electro-mechanical systems)

miroirs MOMS (Micro-opto-mechanical systems)

Par transmission :

- mosaïque de cellules à cristaux liquides

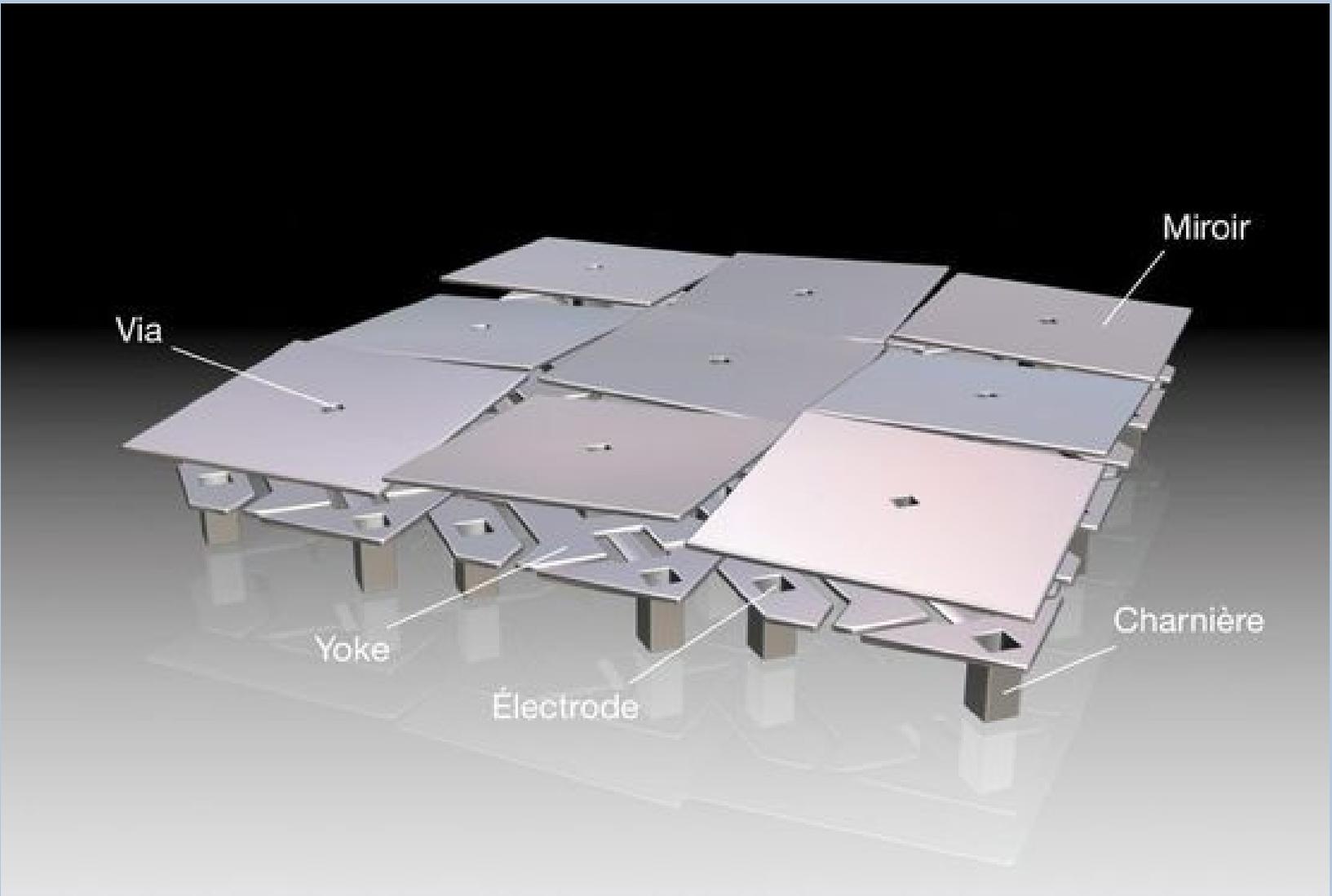
Miroirs à ferrofluide





Miroirs à ferrofluide

Miroirs MEMS ou MOMS



OA par transmission : matrice de cristaux liquides

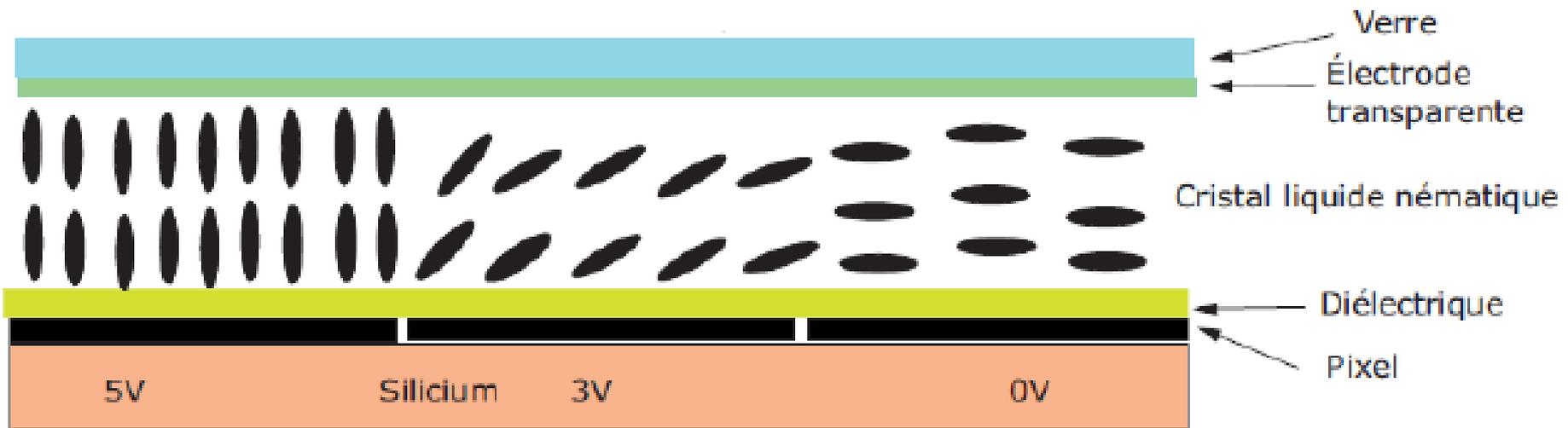
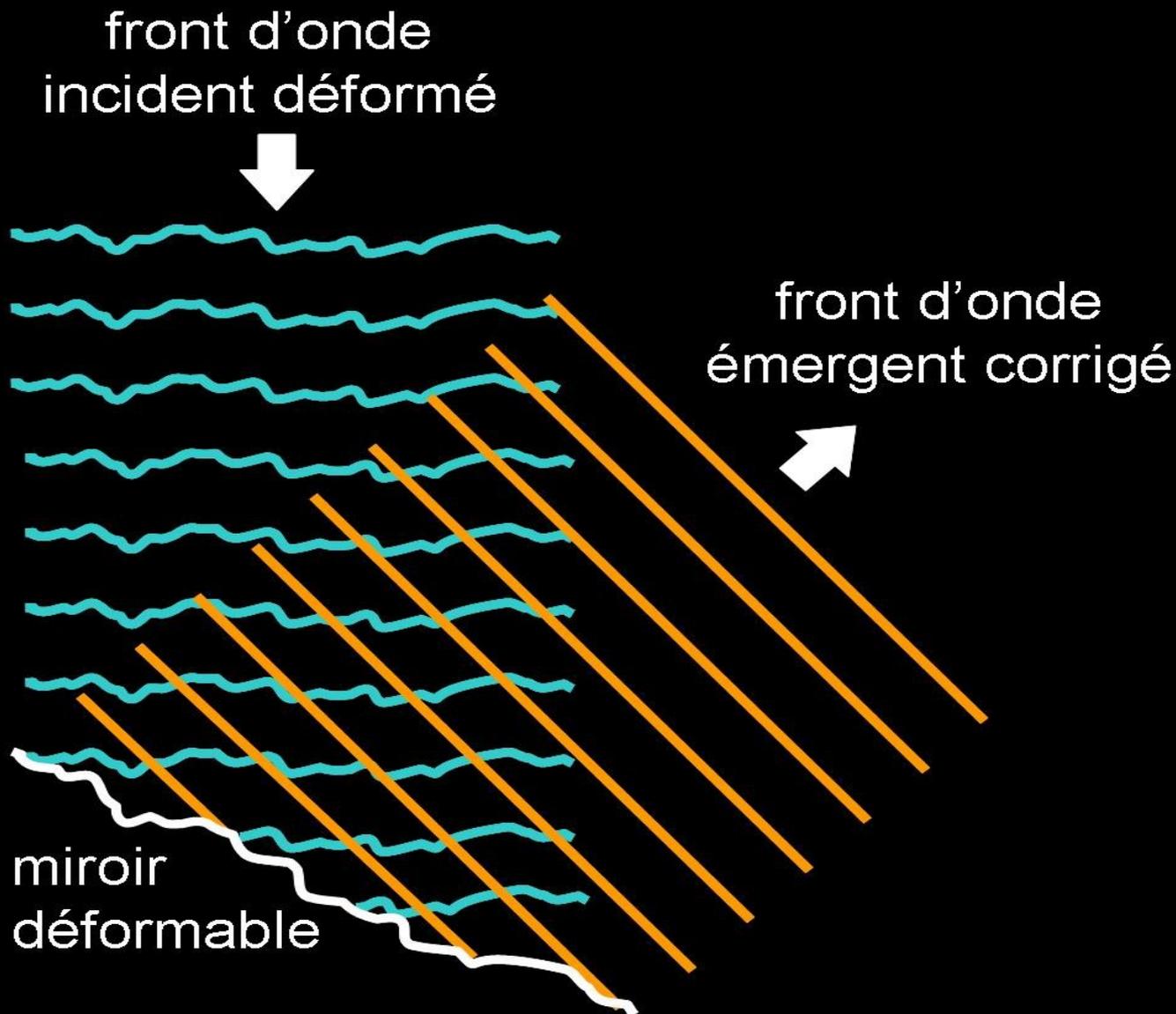


Fig. 1.9 État des molécules du cristal liquide dans un ZTN-LC-SLM, en absence de champ électrique (Droite), avec un champ électrique moyen (Milieu), et un champ électrique puissant (Gauche) [41].

principe de base de l'optique adaptative





Vidéo OA



L'étoile LASER

Pour réaliser une bonne correction, il est nécessaire d'avoir dans le champ du télescope un objet brillant dont on connaît à priori l'image; on corrige jusqu'à obtenir cette image .

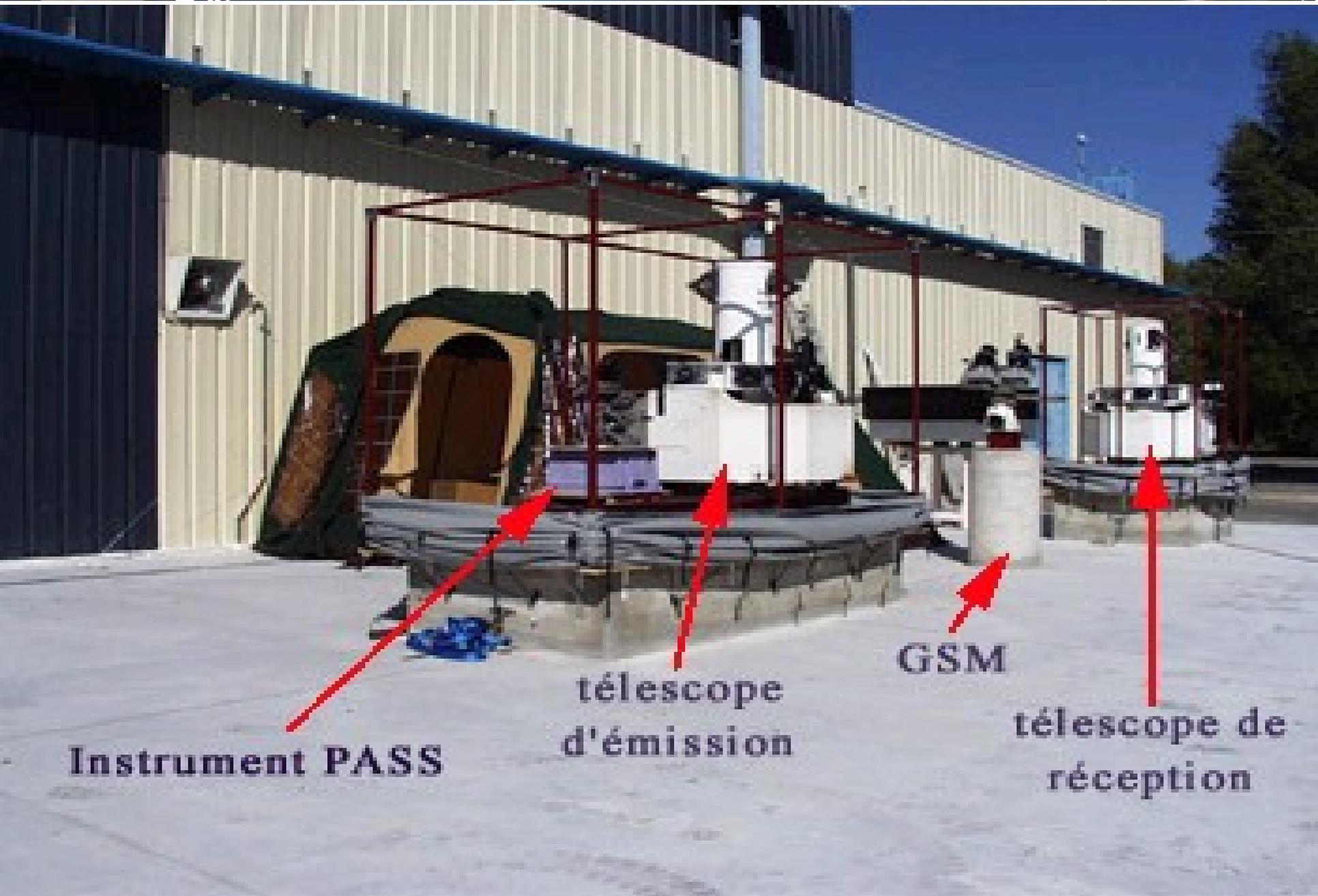
Un tel objet est cependant rare : il faut donc se tourner vers une autre technique : *l'étoile LASER.*

Elle consiste

- * soit à ioniser par irradiation LASER certains constituants de l'atmosphère vers 90 - 100 km d'altitude (ex : le sodium).

- * soit utiliser la diffusion de la lumière LASER sur les aérosols de l'atmosphère vers 20 km d'altitude.

Vue du sol, la région ionisée (ou la zone de diffusion) ressemble à une « étoile » et la lumière issue de cette région subit les mêmes déformations par la turbulence.

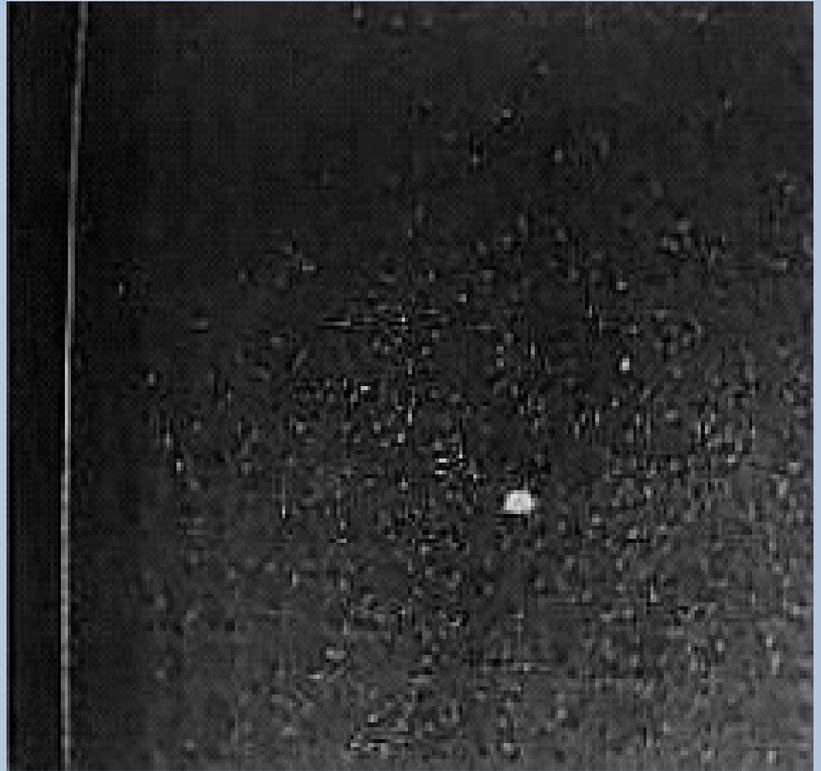
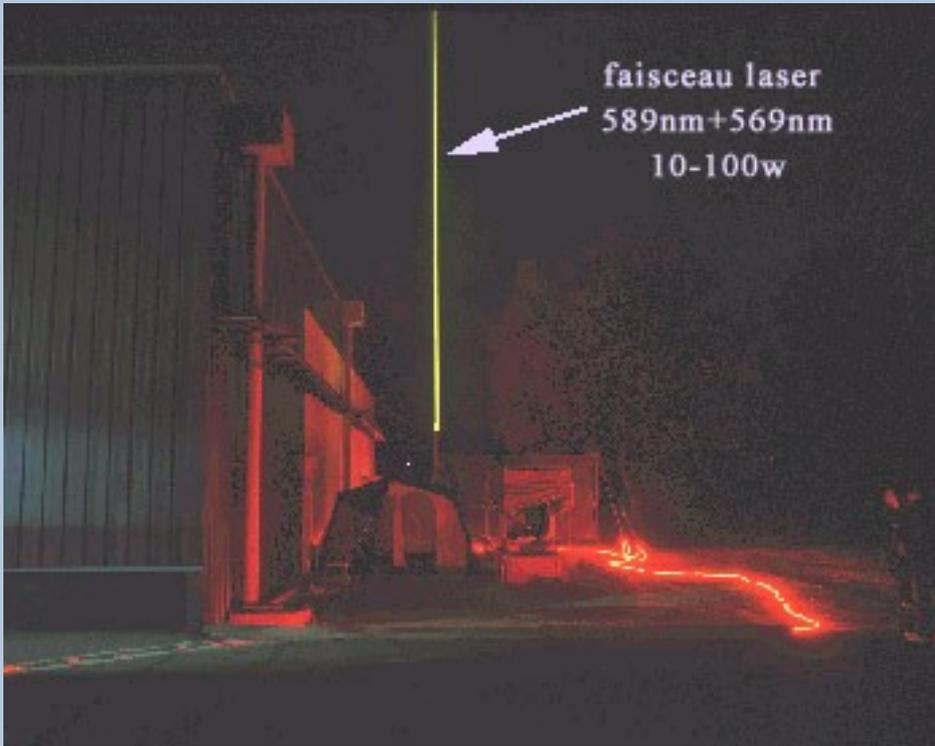


Instrument PASS

télescope
d'émission

GSM

télescope de
réception



Étoile artificielle par diffusion (écho LASER)





* La technique de base est une « **étoile monochromatique** »

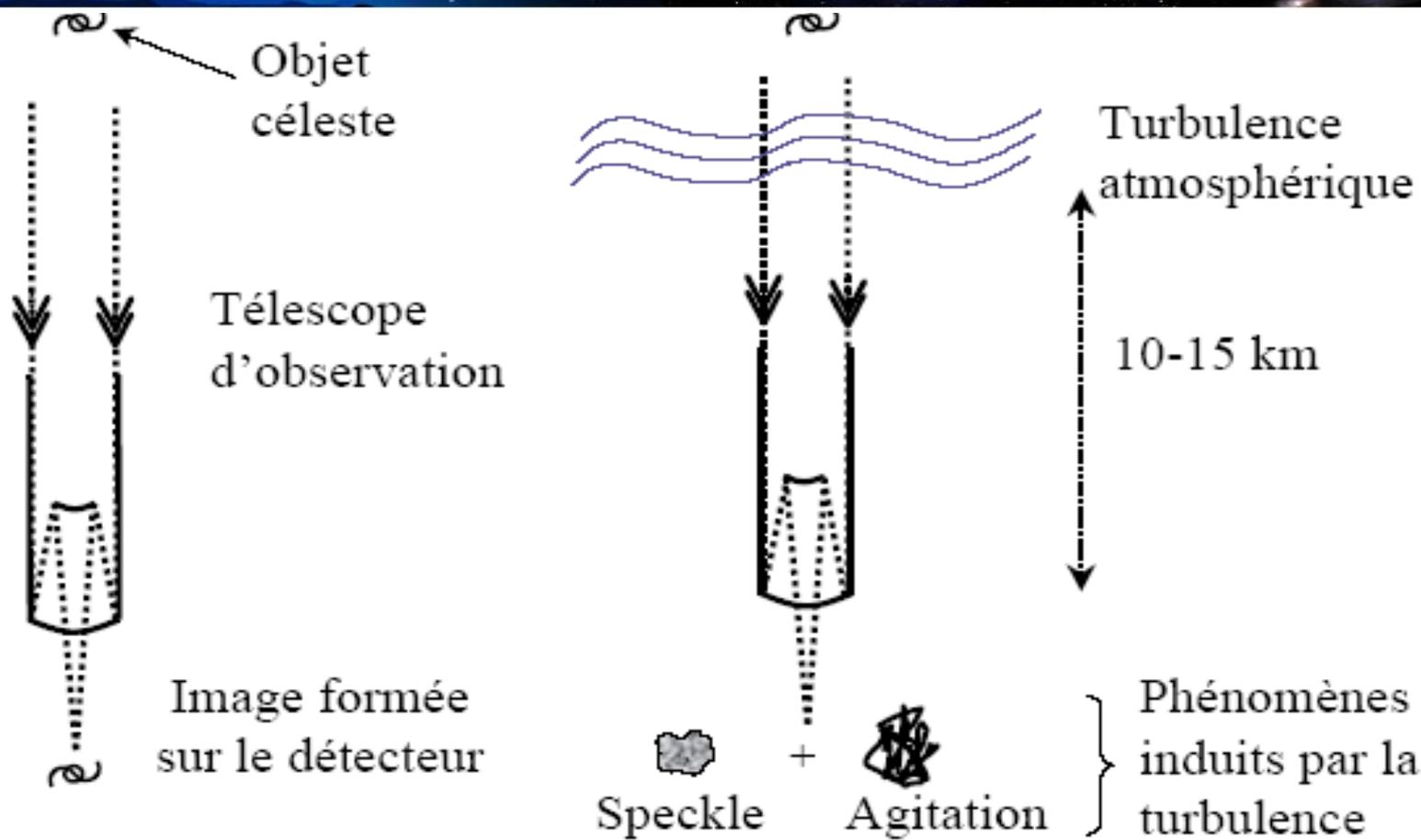
exemple : en utilisant la raie jaune du sodium.

* On peut améliorer l'efficacité du système par création

d'une « **étoile polychromatique** » :

en portant l'atome de sodium à un niveau d'énergie élevée, on obtient plusieurs raies de désexcitation.

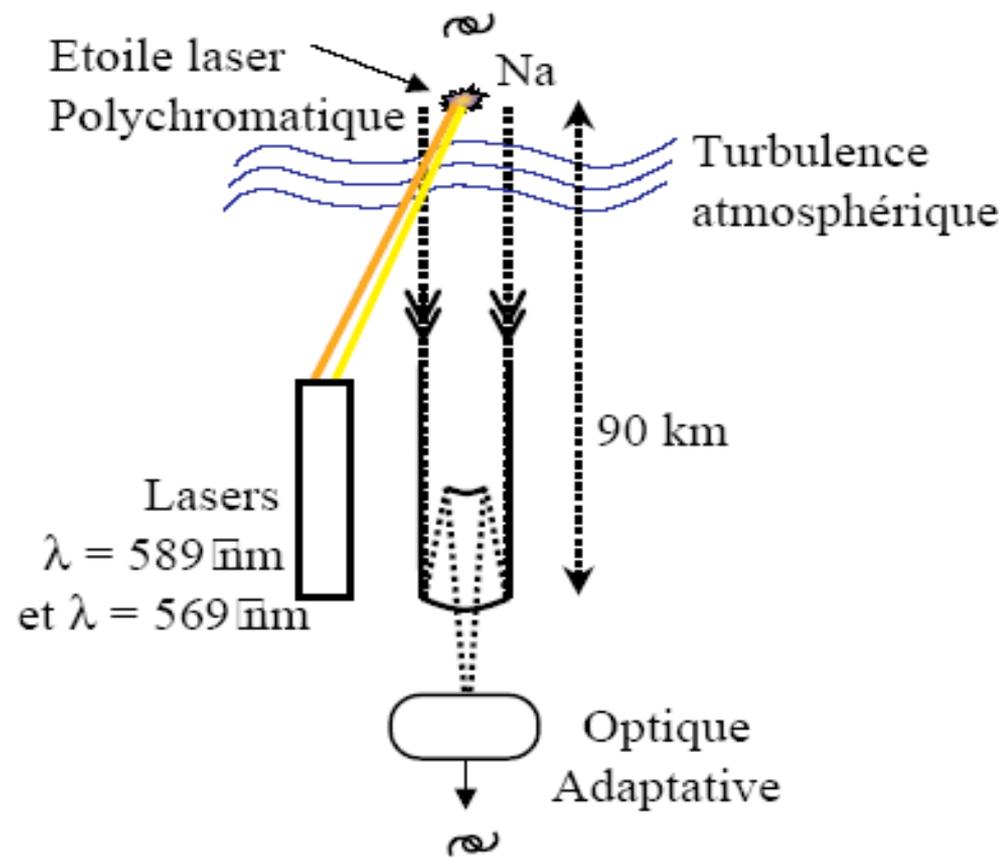
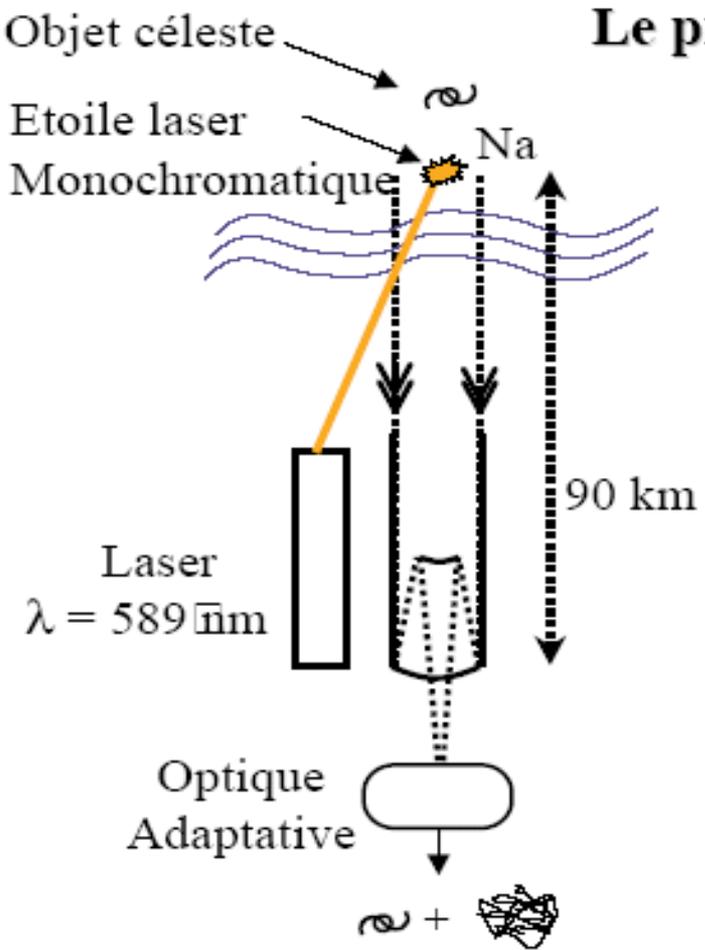
Cette technique a été proposée pour améliorer la correction du Tilt, mais a été abandonnée.



En absence de turbulence on obtient une image résolue à la limite de diffraction

En présence de turbulence on obtient une image brouillée et qui bouge à la surface du télescope

Le projet de l'Étoile Laser

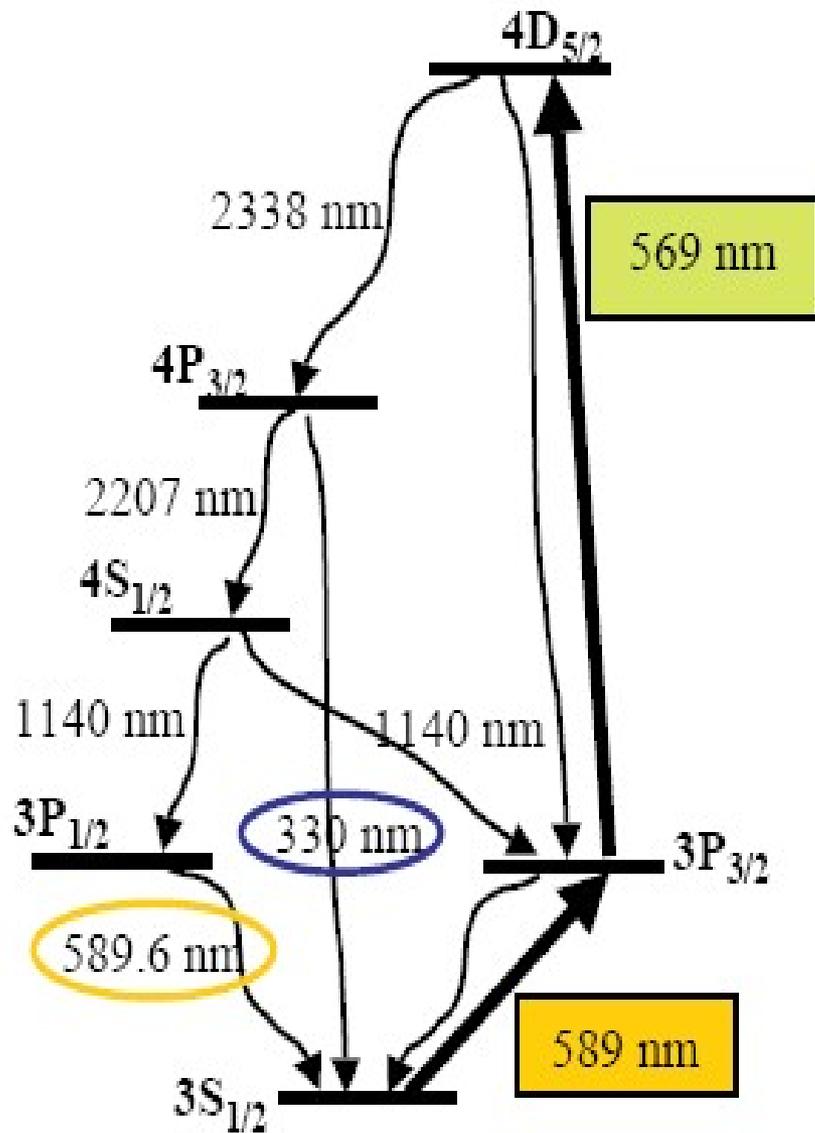


L'étoile laser monochromatique associée à un dispositif d'OA corrige l'image instantanée à la limite de diffraction mais ne corrige pas le phénomène d'agitation.

Observation courte pose

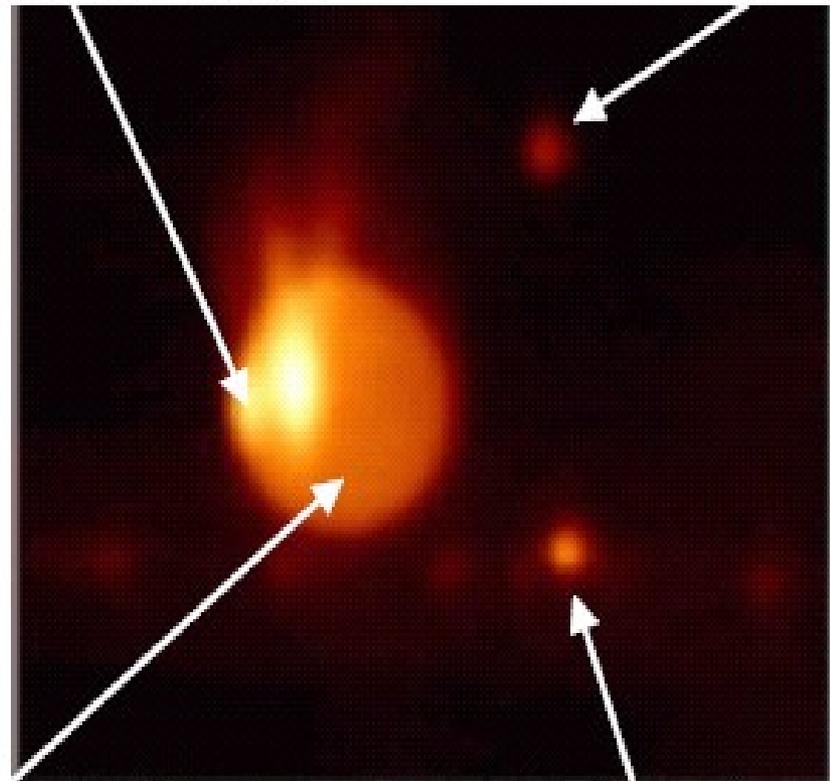
L'étoile laser polychromatique associée à un dispositif d'optique adaptative permet de corriger intégralement les dégradations de l'image causées par la turbulence atmosphérique.

Observation longue pose



Sommet du cône Rayleigh

Étoile à 330 nm



Étoile à 589 nm

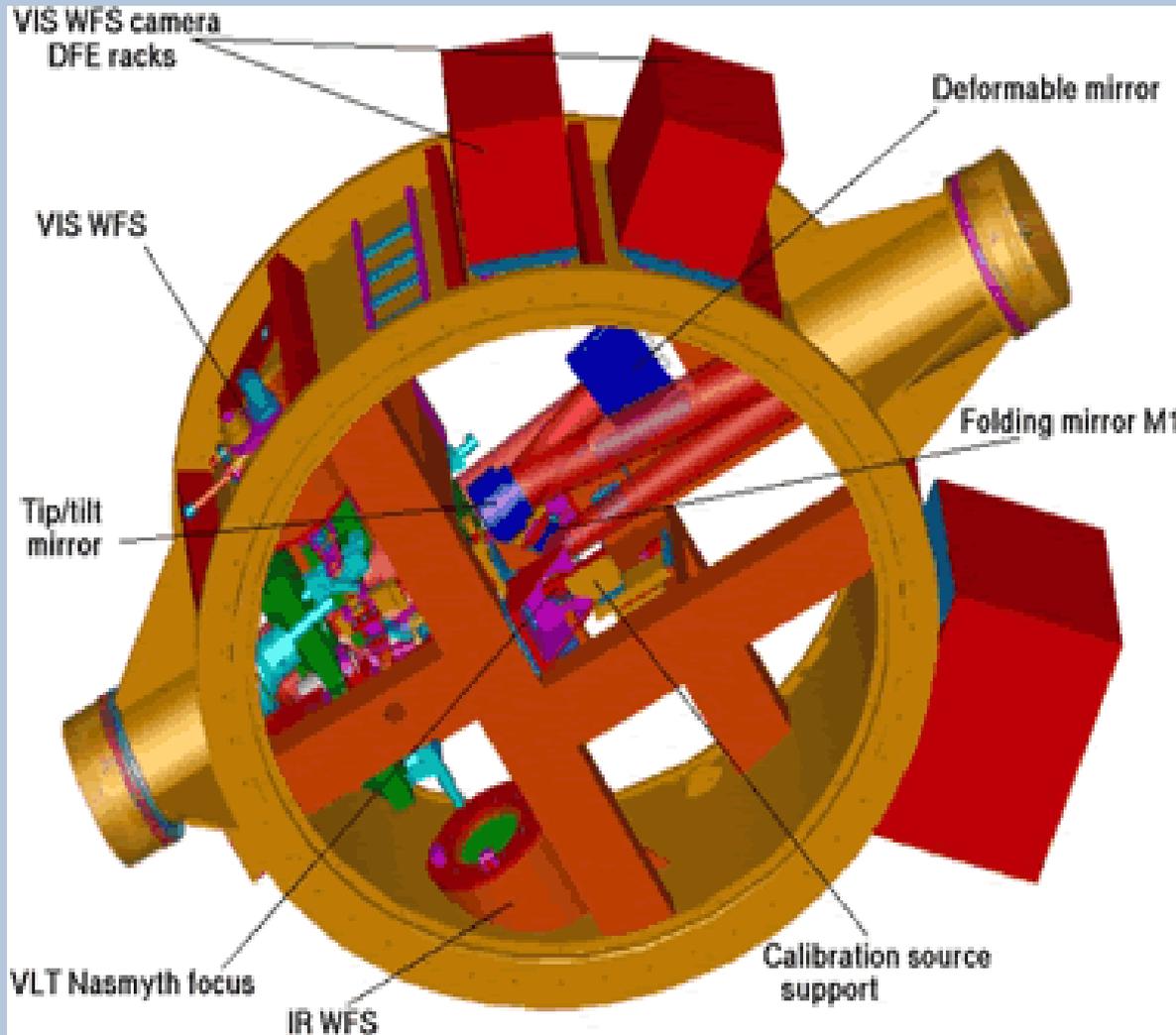
Étoile à 589.6 nm

Cette technique de l'étoile artificielle permet d'utiliser l'OA en l'absence d'étoile réelle de référence mais présente des limites :

- * le faisceau laser traverse l'atmosphère ; il subit donc une déformation.
- * les rayons issus de l'étoile artificielle forment un cône et ne sont donc pas // entre eux.

Exemple : OA sur le VLT

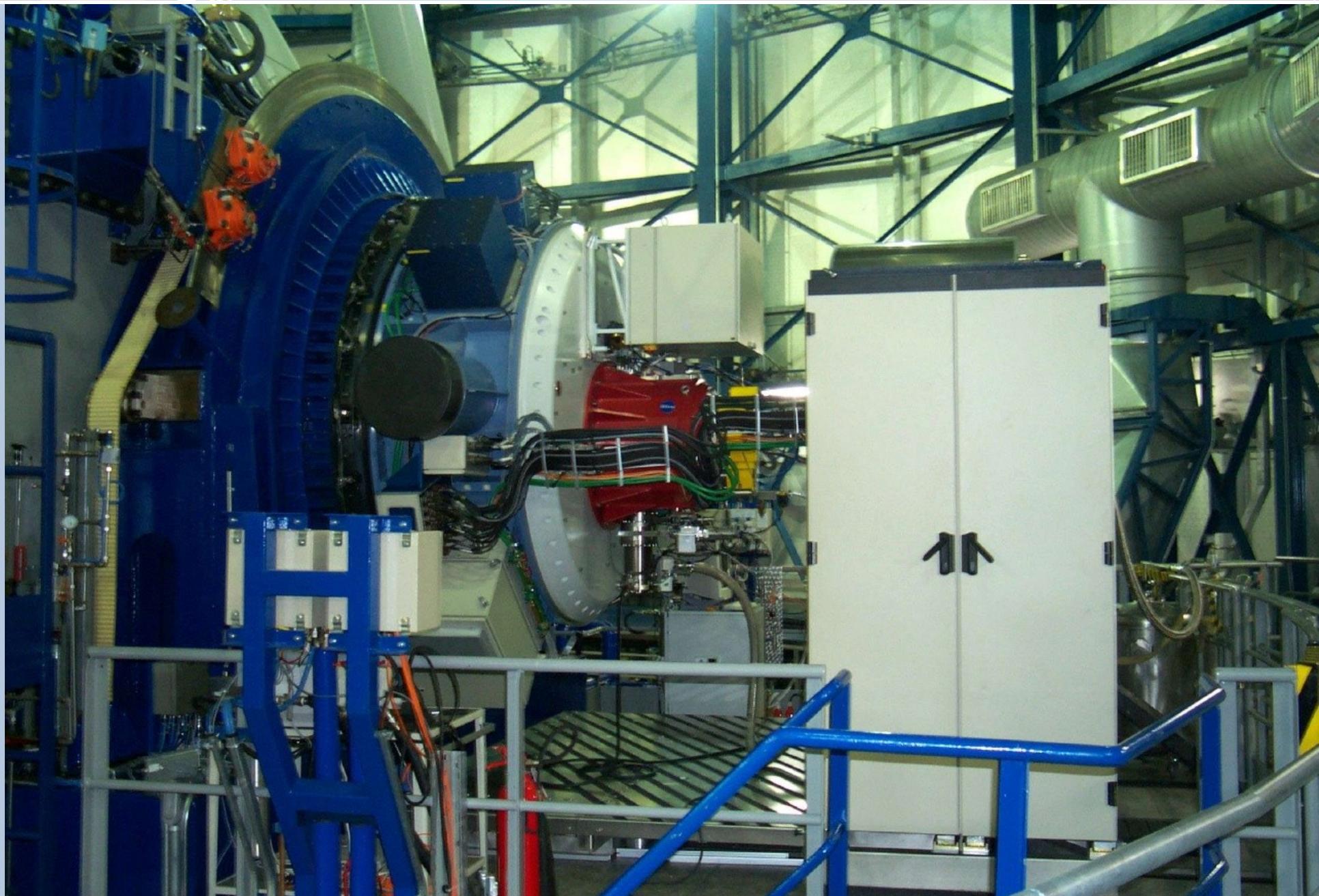
le système NAOS du VLT (Nasmyth Adaptive Optics System)



2,5 m de diamètre
70 cm d'épaisseur

Poids : 1,6 T de structure
+ 600 kg d'optique et
d'électronique

2 miroirs de correction :
- globale (Tip-Tilt)
- surface d'onde



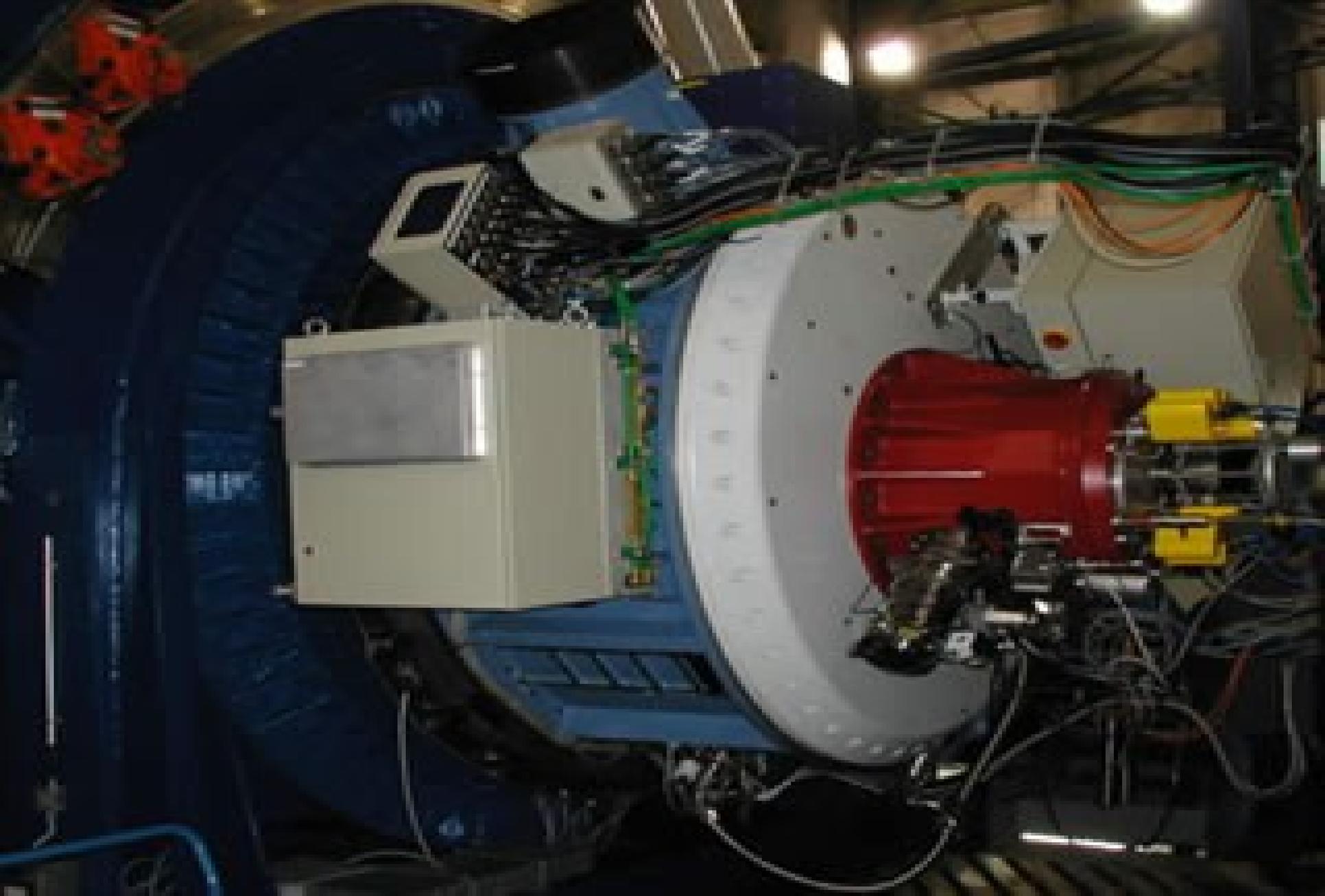
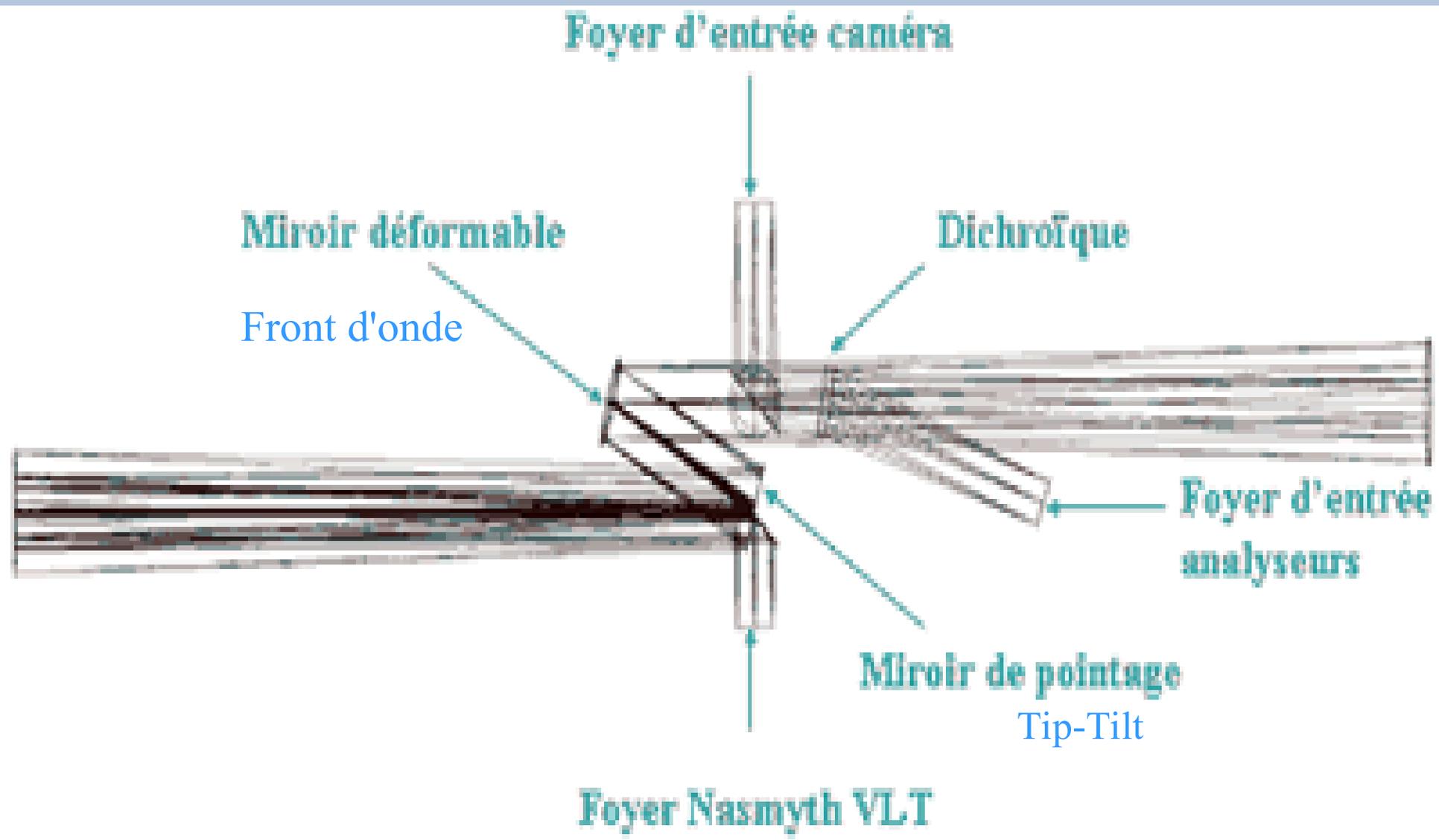


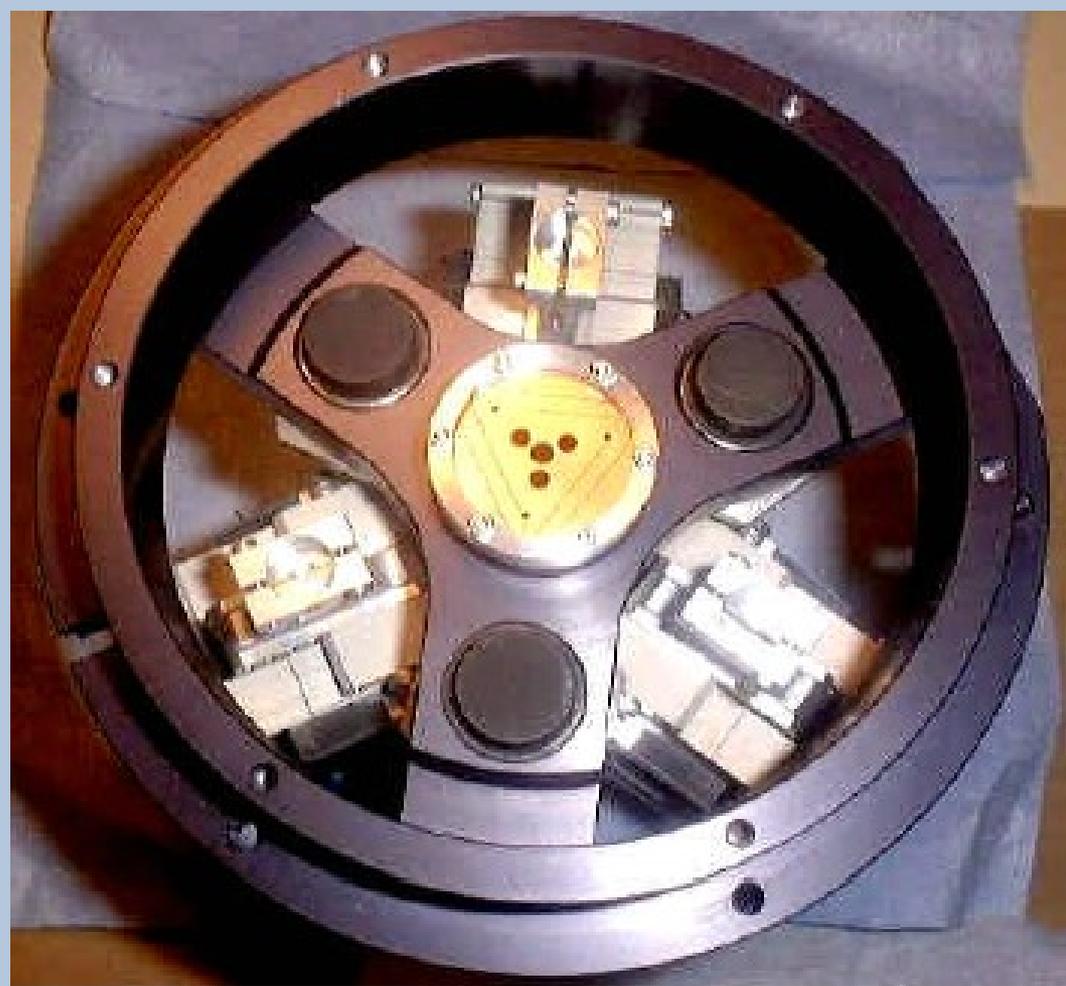
Schéma optique de NAOS





Miroir de stabilisation globale (Tip-Tilt)





Miroir de pointage deux axes
avec une précision de 2,1 mas
Fréquence ~ 350 Hz.

Miroir de correction du front d'onde



Diamètre : 115 mm

Contrôlé en 185 points (1 tous les 7 mm) par actionneurs piézo-électriques de 10 μm de course.

Deux analyseurs Shack-Hartmann :
domaine visible (0,45 - 0,9 μm)
domaine infrarouge (0,9 - 2,5 μm)

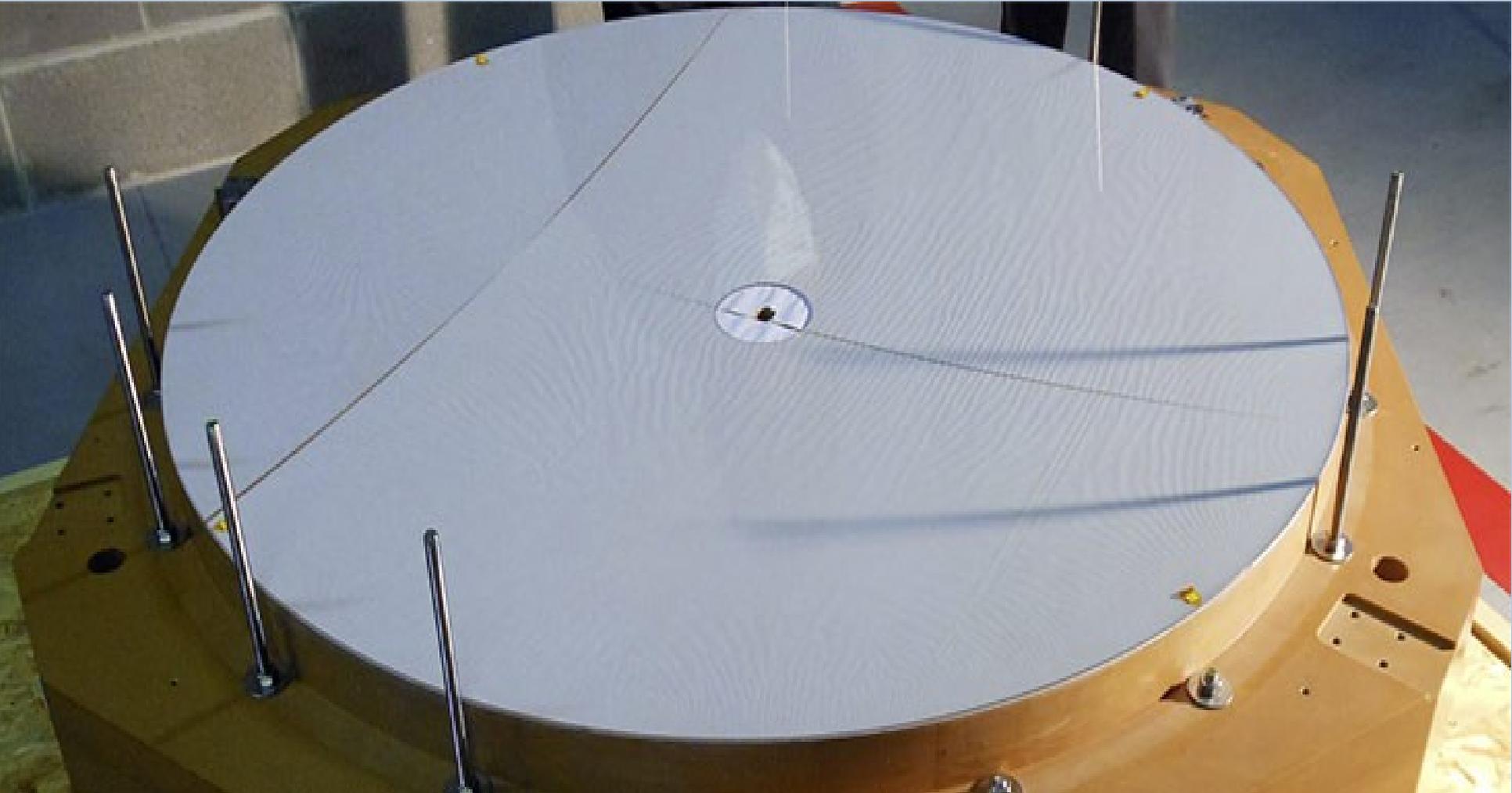
Actuellement, le système d'optique adaptative de l'UT4

(Yepun) pour MUSE comporte :

- * 4 lasers (\Rightarrow tomographie laser)
- * un « système de gestion » de l'OA (GALACSI*)
- * un miroir déformable (le miroir secondaire)

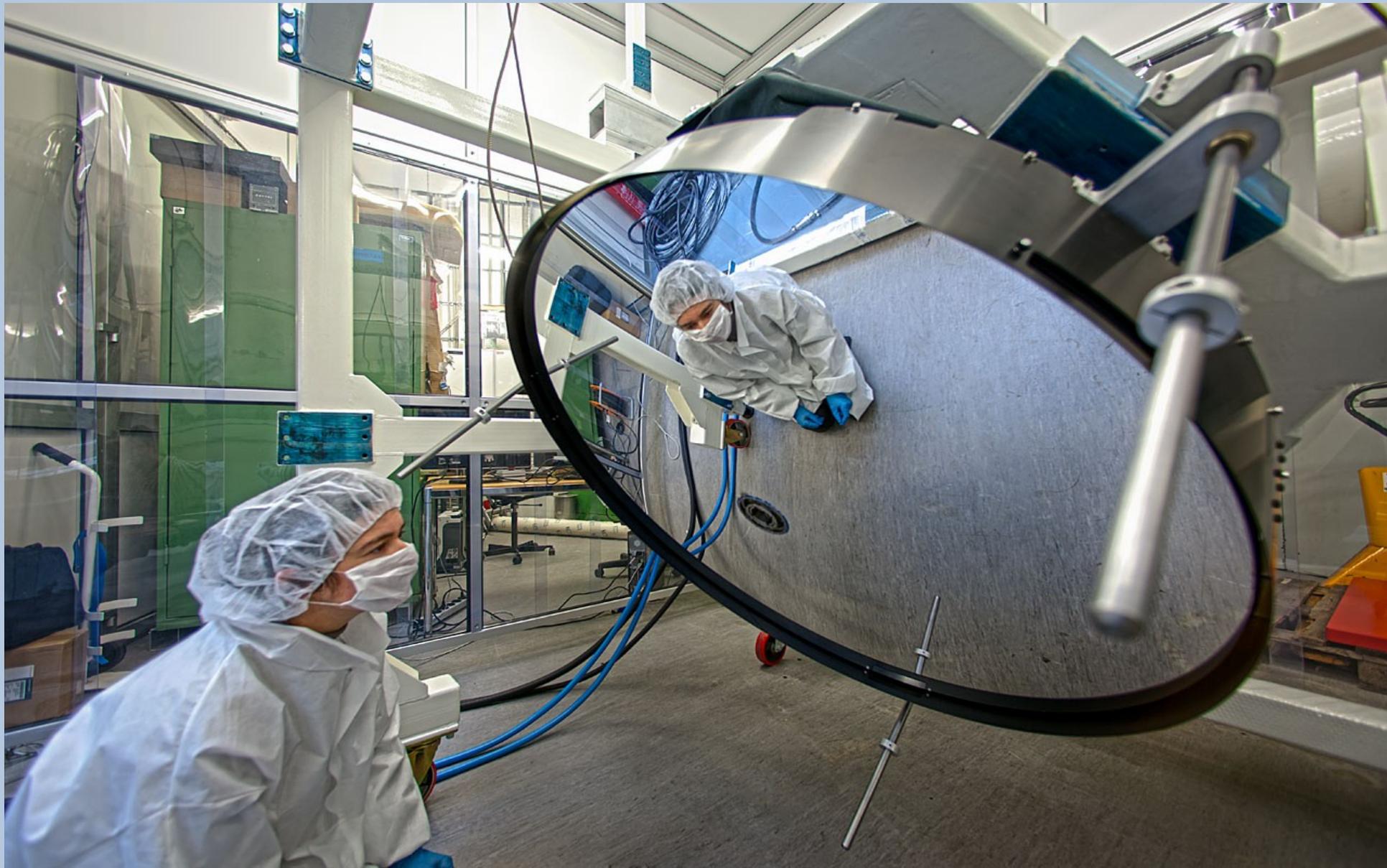
* Ground Atmospheric Layer Adaptive Corrector for Spectroscopic Imaging

Yepun : miroir secondaire déformable



D : 1,12 m E : 2 mm 1172 actionneurs électromagnétiques

Yepun : miroir secondaire déformable en cours de contrôle

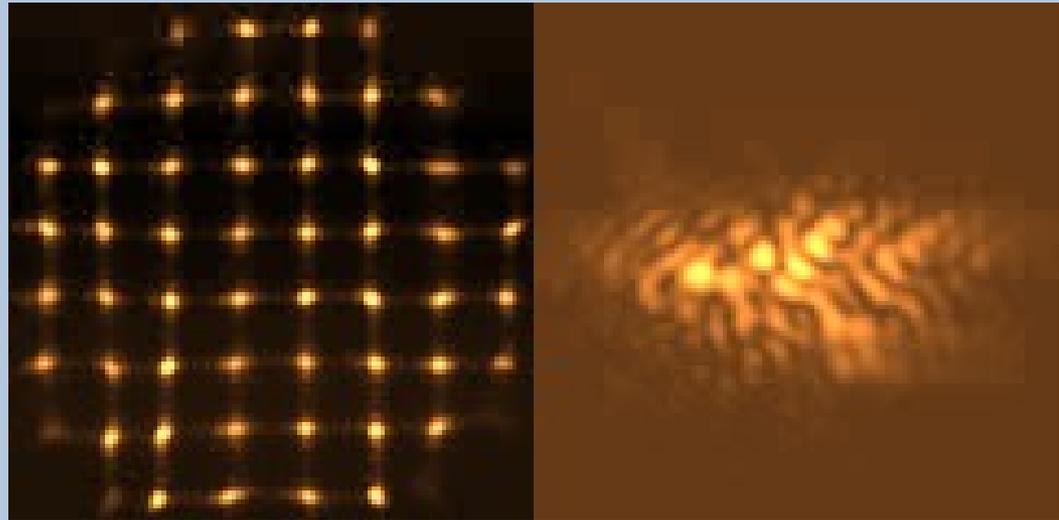


Résultats

Imagettes S

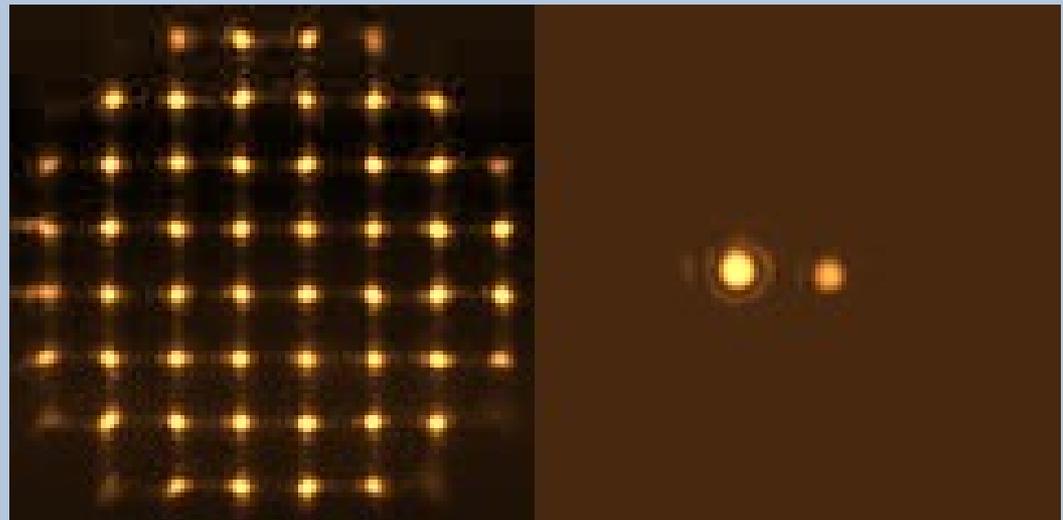
Image plan focal

Turbulence



Perturbations
turbulentes et
correction par optique
adaptative

Correction



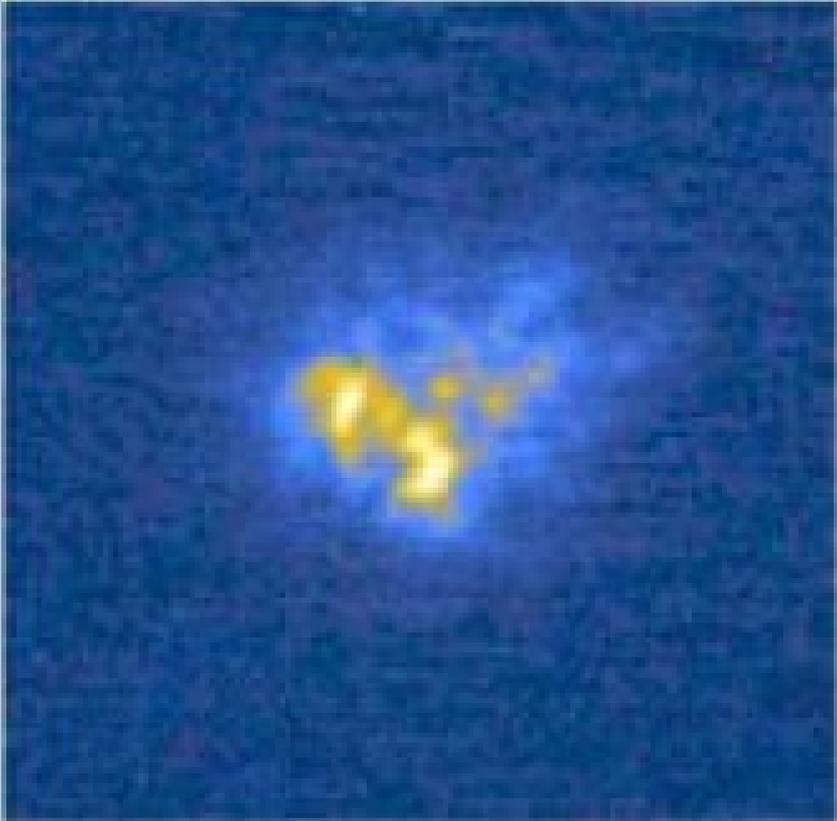


Image non corrigée

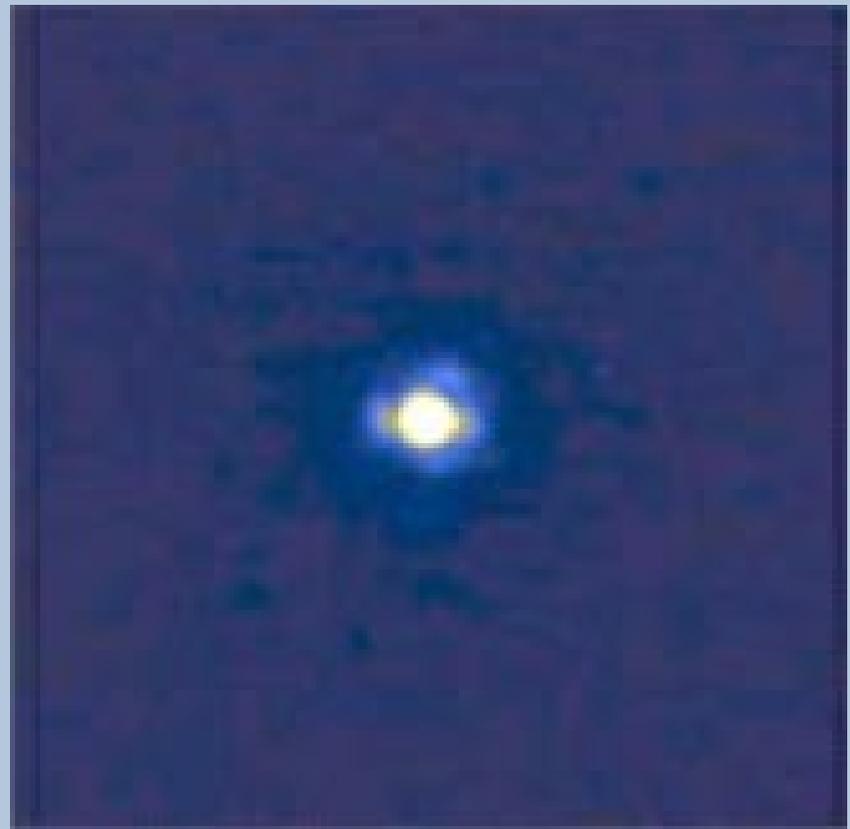
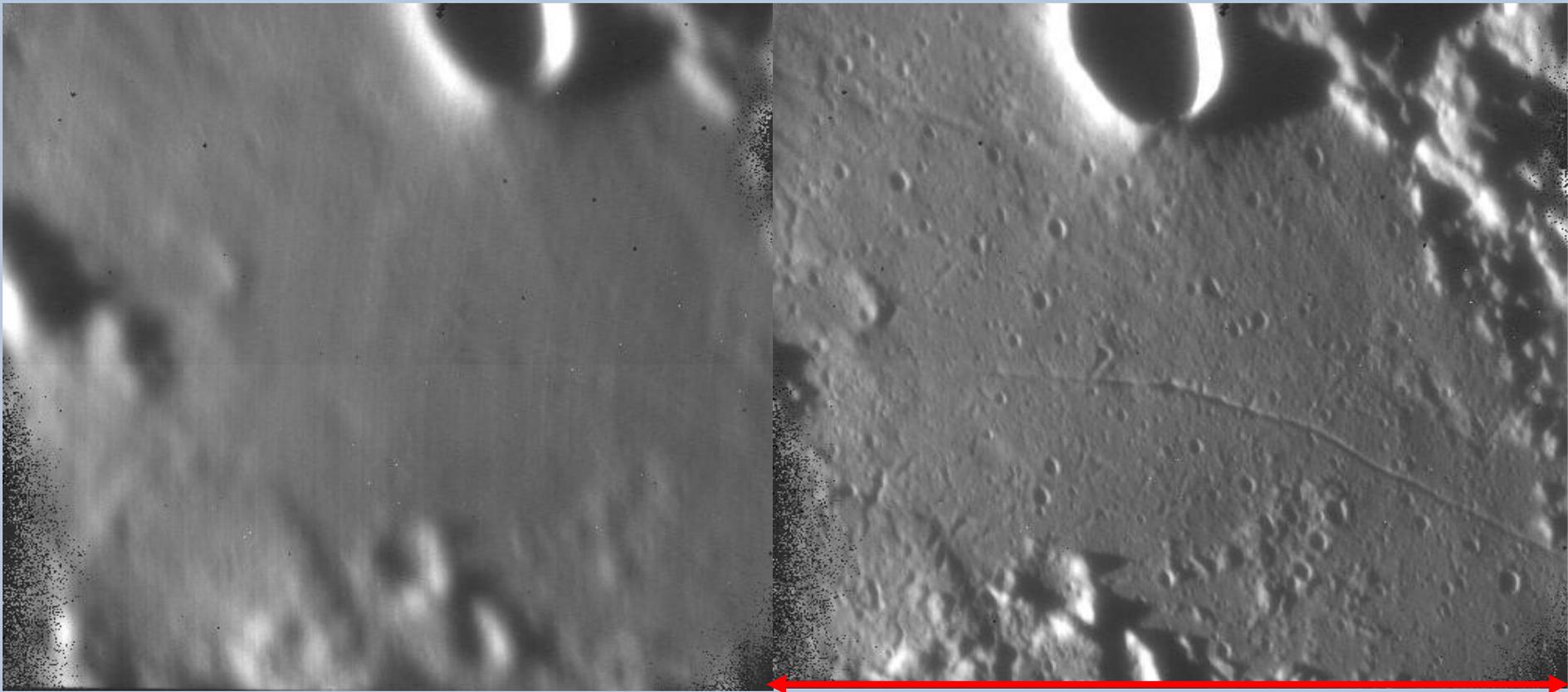


Image corrigée

Surface de la Lune à $\lambda = 2,3$ microns

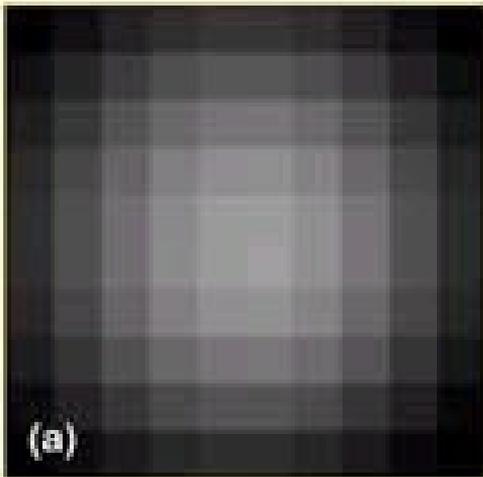


45'' = 26 km

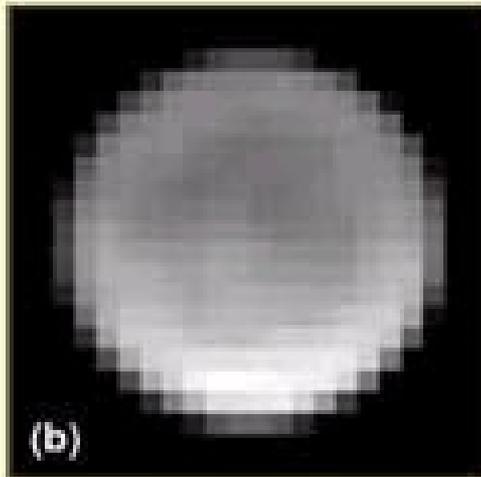
Image brouillée par la turbulence

Image corrigée par NAOS

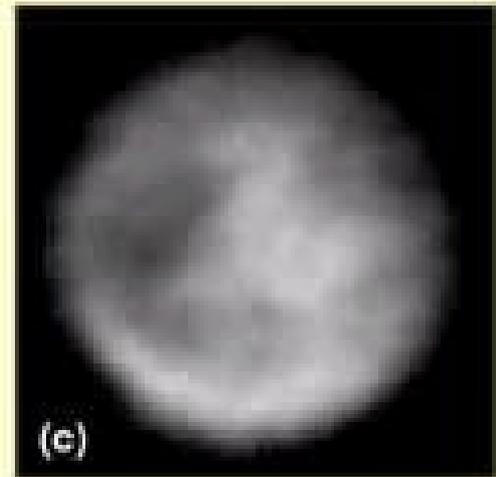
Titan (Saturn's Largest Moon)



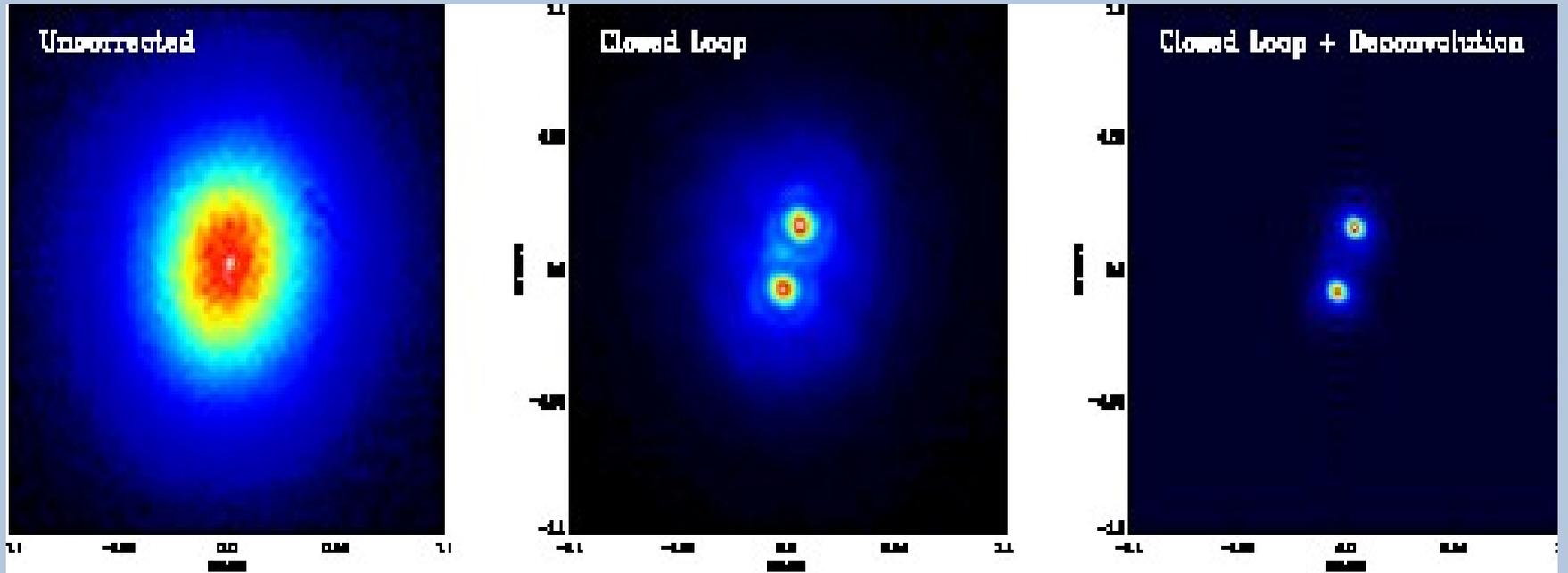
Conventional Telescope

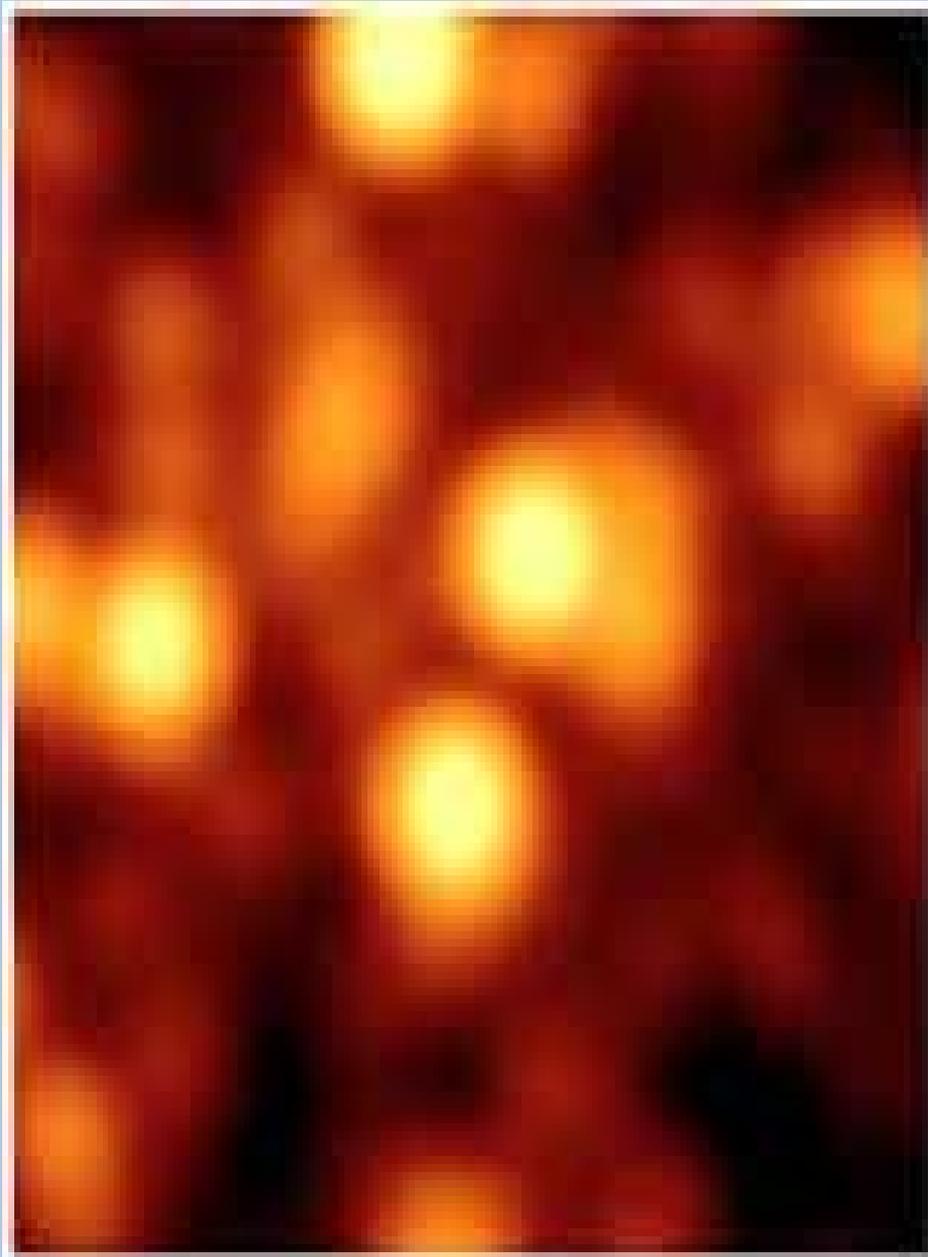


Hubble Space Telescope



Keck Telescope with AO







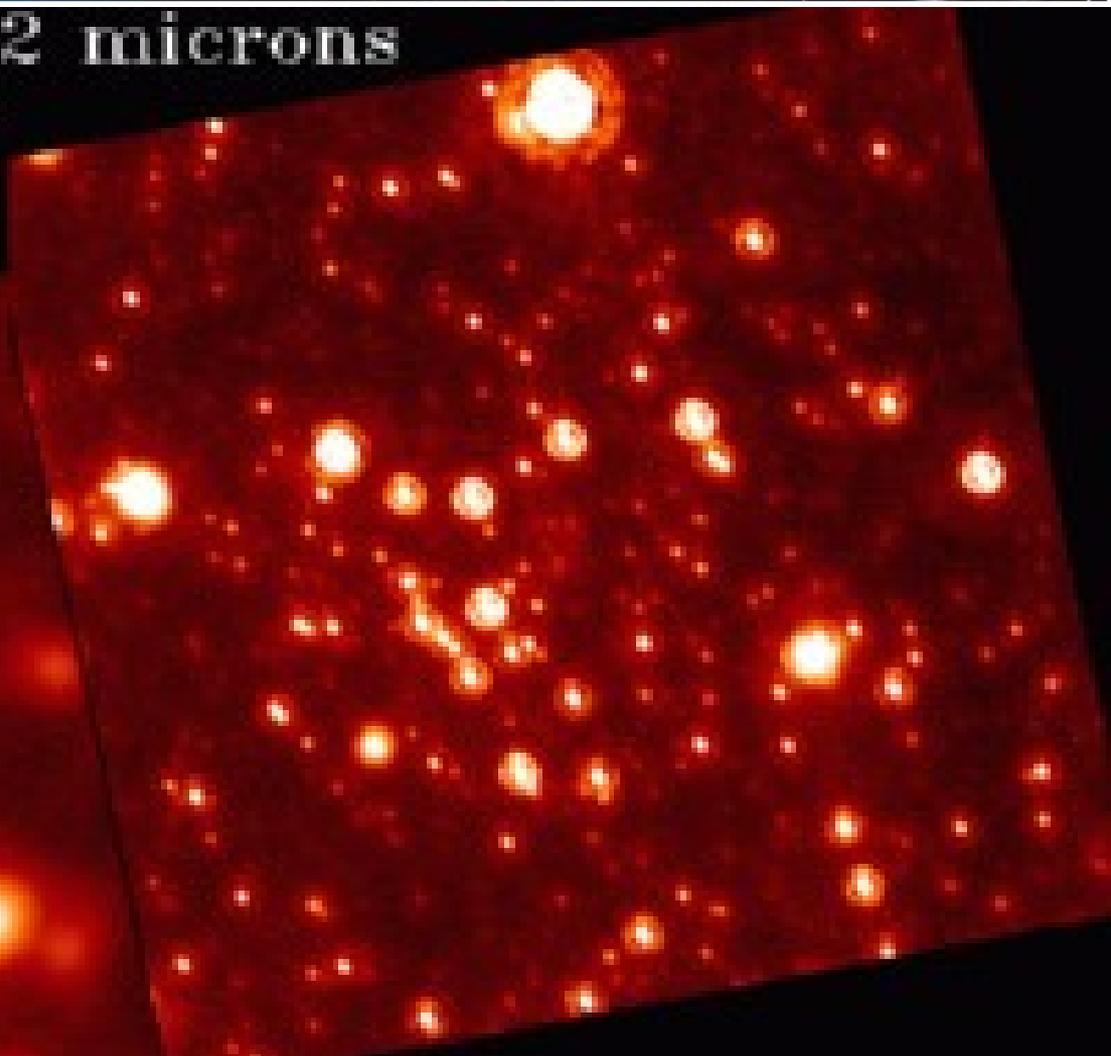
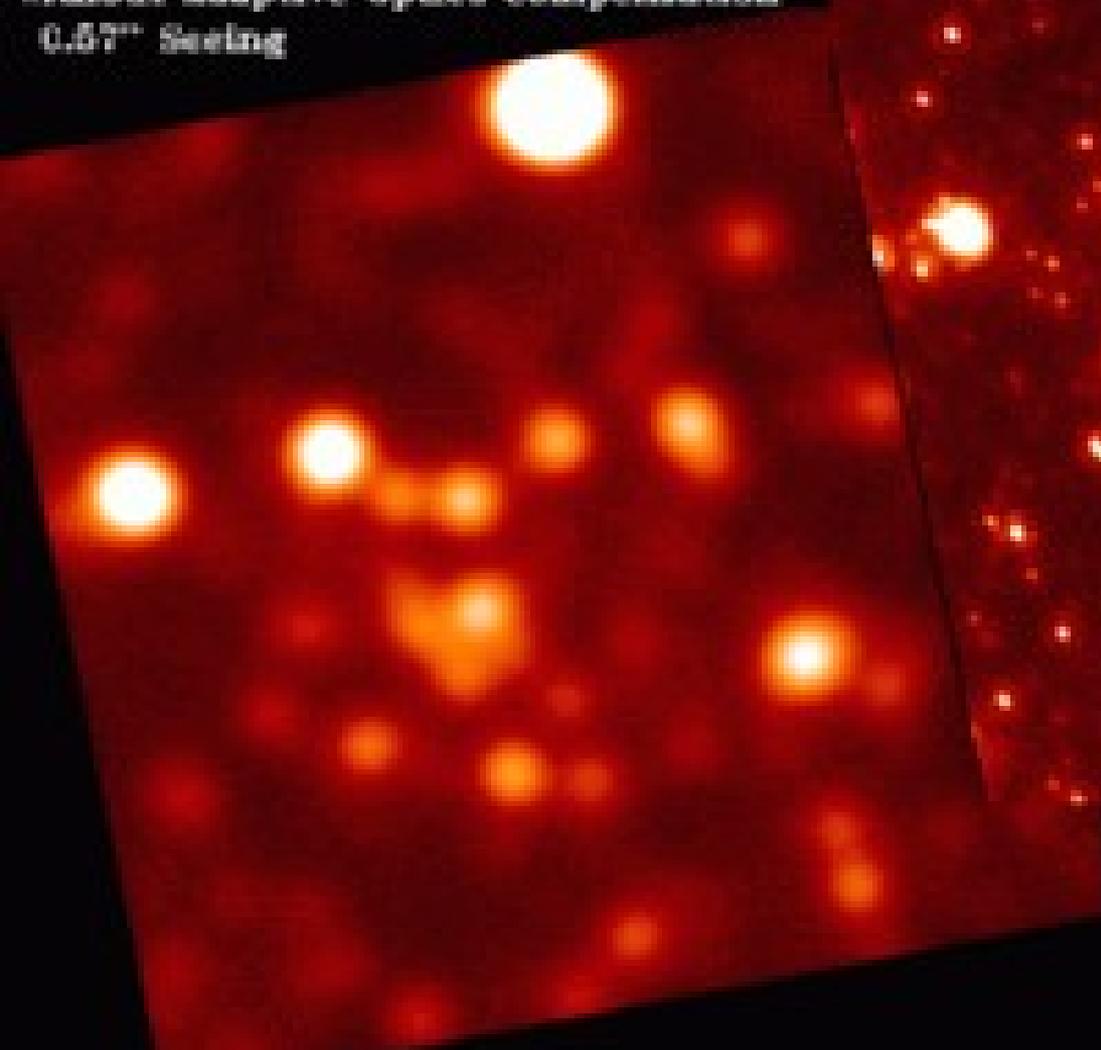
Amas ouvert NGC 6093 M80

distance ~ 30 000 al

Galactic Center / 2.2 microns

13"x13" Field, 15 minutes exposure.

Without Adaptive Optics compensation
0.57" Seeing



With Adaptive Optics compensation
0.13" Full Width at Half Maximum

La planète Neptune vue par MUSE



Adaptive optics



No Adaptive optics

Bibliographie :

Une expérience pédagogique d'optique adaptative

Thierry AVIGNON, Hervé SAUER, Lionel JACUBOWIEZ

L'optique adaptative : une révolution pour l'observation en astrophysique

Origine, concept, composants, suivi d'une revue des applications médicales et industrielles.

Dr Laurent JOLISSAINT, aquilaOptics

Etude photométrique de l'atome de sodium ; application aux étoiles lasers (LGS et PLGS)

Ioana - Cristina MOLDOVAN