

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

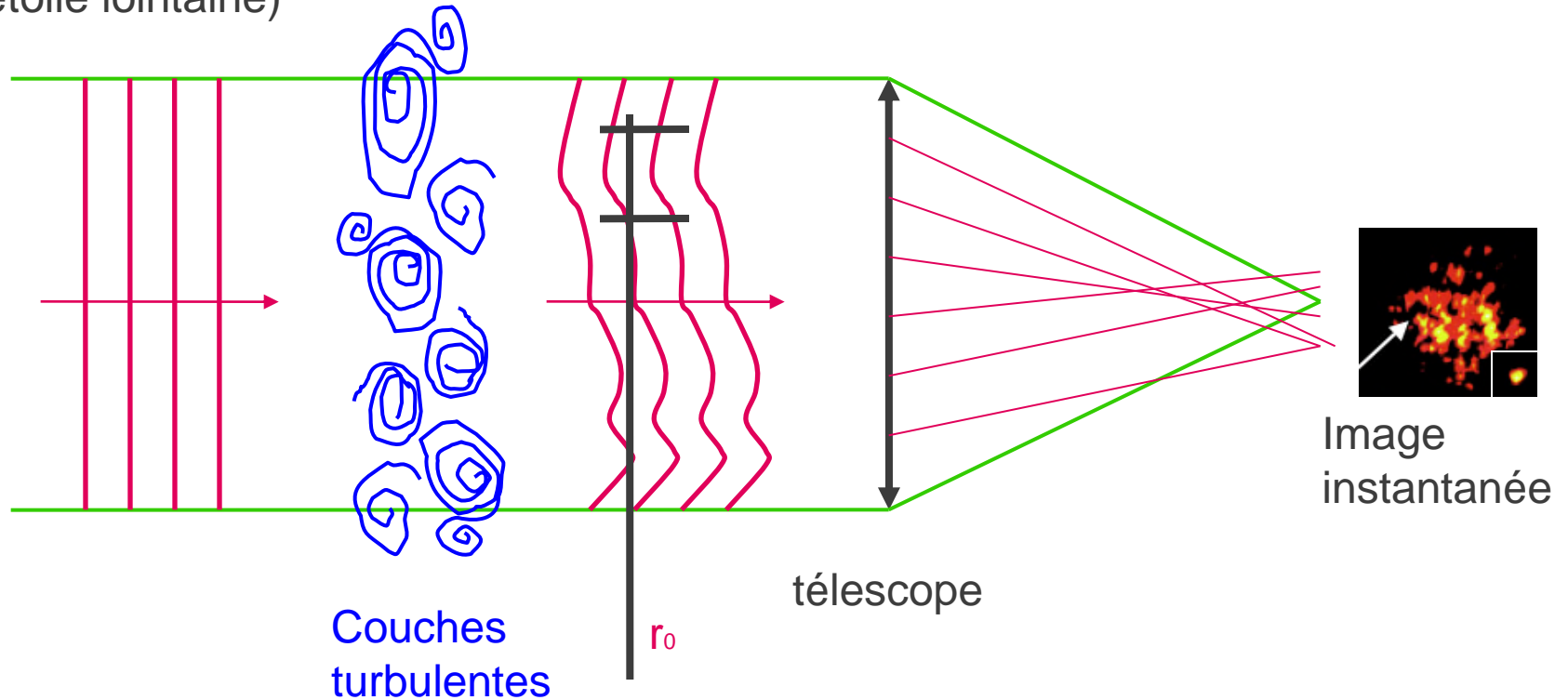
HEIG-VD Yverdon, 24 janvier 2012

L'observation des objets célestes
à travers la turbulence atmosphérique

Turbulence optique : effet

Front d'onde
initialement plan
(étoile lointaine)

Aberration du
front d'onde



Effet important si $D \gg$ largeur de cohérence de la phase, " r_0 "

Turbulence optique : effet

Planète Mercure
Télescope 42-m

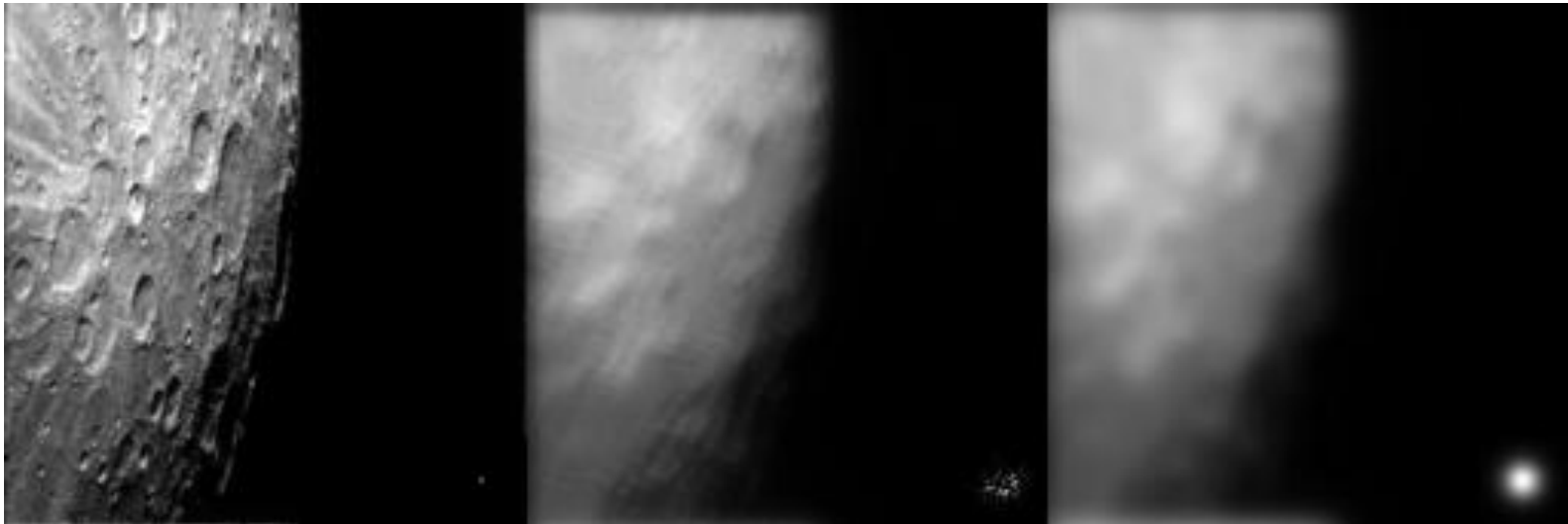


Image parfaite

Image courte pose

Image longue pose

Turbulence optique : ordre de grandeur

- Largeur de l'image d'une étoile (=point) :

- **Sans** turbulence

$$L = \lambda/D$$

- VLT D = 8 m, à 500 nm : **L = 0.013"**

- **Avec** turbulence

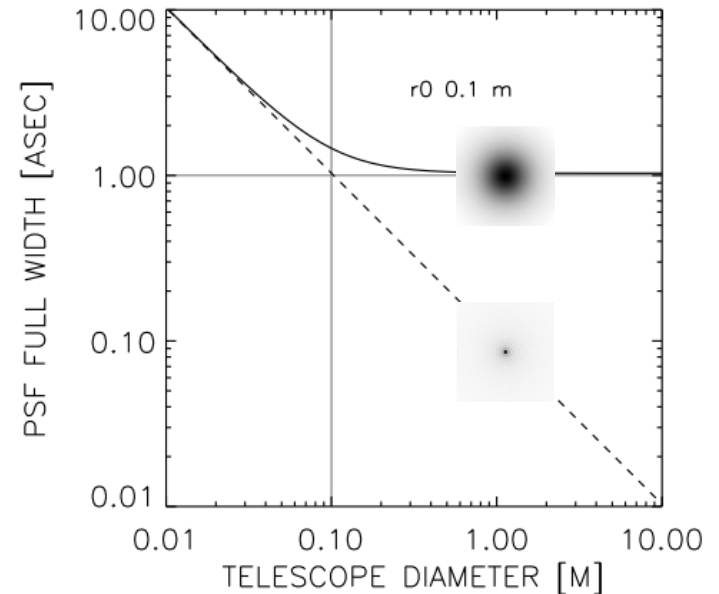
$$L \approx \lambda/r_0 \equiv \text{angle de SEEING}$$

- Typiquement $r_0 = 0.1$ m à 500 nm

- **L = 1.031"** facteur 80 x

- Evolution dynamique ?

- dT = dimension cellules turbulentes / vitesse du vent = 1 à 10 ms
- Correction doit donc travailler à bande passante ~ 100-1000 Hz



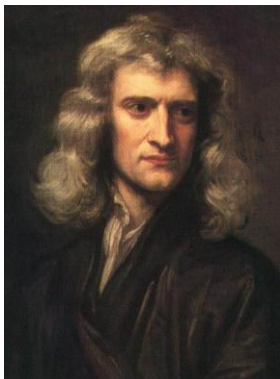
SEEING ~ 1"
temps de vie ~ 1-10 ms

Finalelement, 100 - 1000 Hz, ce n'est pas si rapide...

- mesurons la déformation du front d'onde,
- Avec cette info, pilotons un miroir déformable sur lequel le front d'onde se réfléchira, annulant l'aberration
- Nous devrions récupérer une onde plane en sortie et restaurer la résolution angulaire théorique du télescope

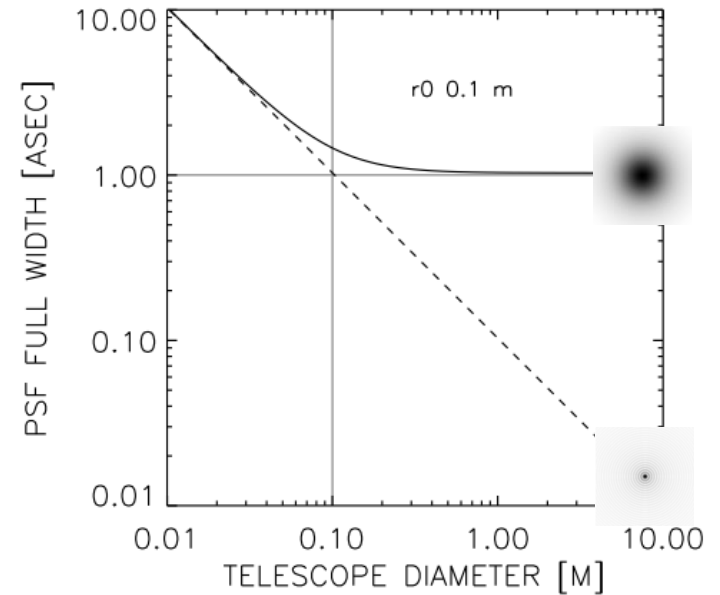
Implémenté pour la première fois en 1989 (Observatoire de Paris)

C'est la PREMIERE FOIS, depuis l'invention du télescope par Newton en 1674, que l'on voit des anneaux de diffraction en astronomie !!



Turbulence optique : résolution angulaire, rapidité

- Impact sur la largeur de l'image d'une étoile ?
- Sans turbulence
 - $D = 8 \text{ m}$, à 500 nm : $\lambda/D = 0.01''$
- Avec turbulence
 - Typiquement $L = 1''$ (100 x)
- Evolution dynamique ?
 - $dT = \text{dimension cellules turbulentes} / \text{vitesse du vent} = 1 \text{ à } 10 \text{ ms}$
 - Correction doit donc travailler à bande passante $\sim 100\text{-}1000 \text{ Hz}$



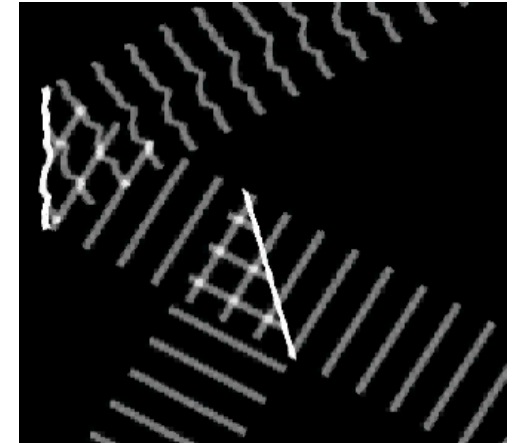
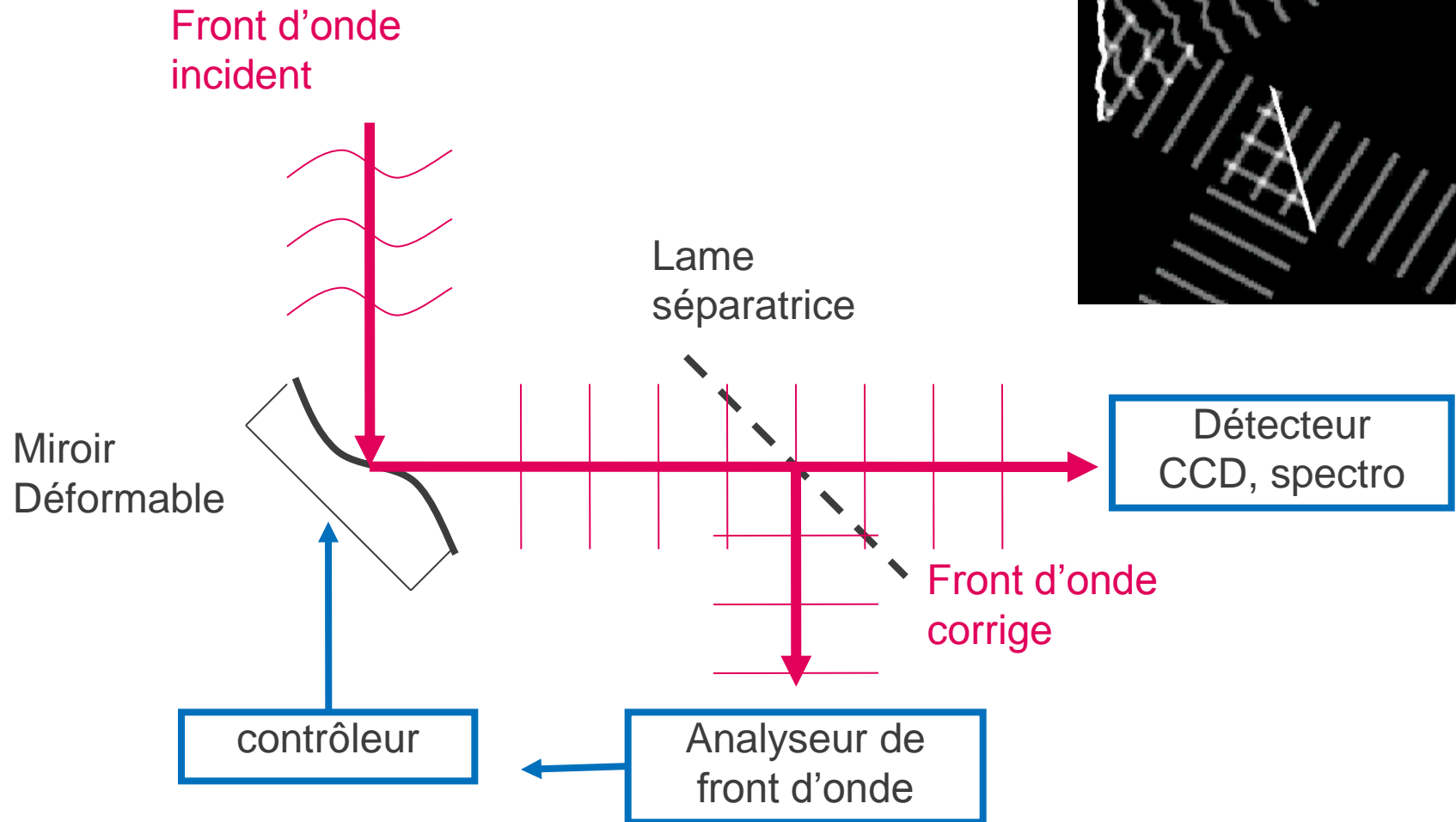
SEEING $\sim 1''$
temps de vie $\sim 1\text{-}10 \text{ ms}$

Optique adaptative : définition

*Le terme **optique adaptative** se réfère aux systèmes optiques qui **s'adaptent** pour compenser les aberrations optiques introduites par le milieu entre la source lumineuse et le récepteur (objet et image)*

Domaines d'application potentiels (en optique) ? **Partout !**

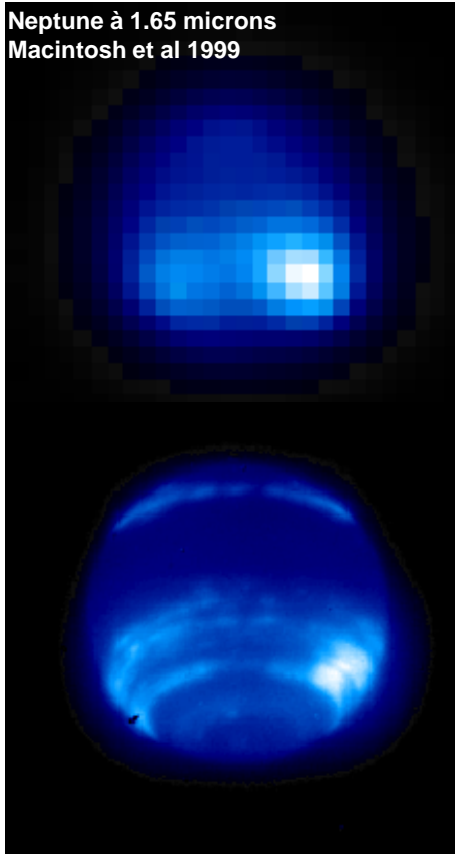
Optique adaptative en boucle fermée



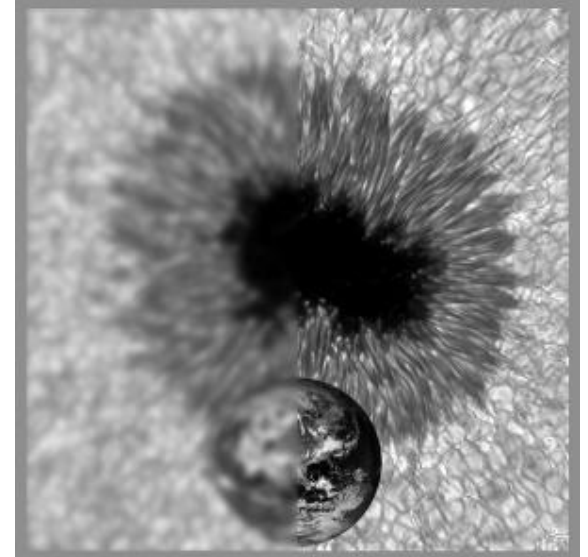
Quelques exemples en astrophysique

Quelques résultats en astrophysique : Système solaire

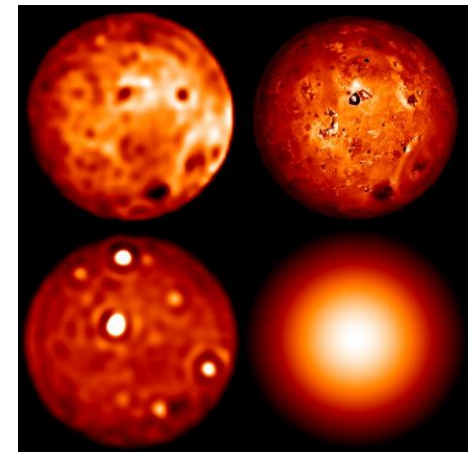
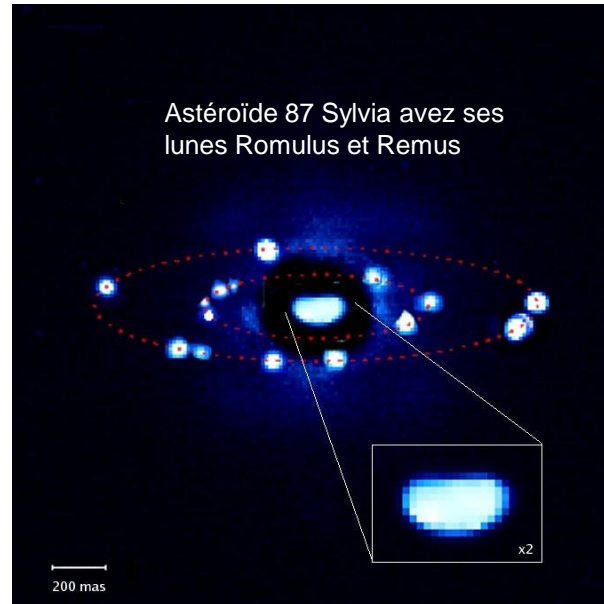
Neptune à 1.65 microns
Macintosh et al 1999



OA solaire - tache solaire et
la Terre a la même échelle



Astéroïde 87 Sylvia avec ses
lunes Romulus et Remus



Io, lune volcanique de Jupiter 11

Quelques résultats en astrophysique

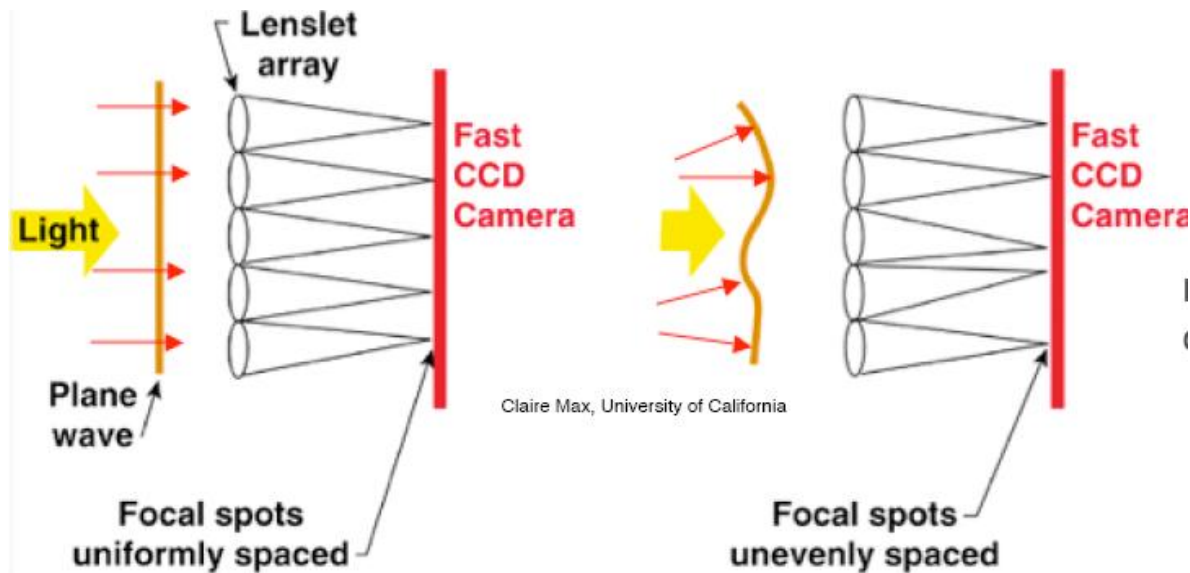


Analyseurs de front d'onde (AFO)
Les technologies les plus courantes

Analyseurs de front d'onde

- Interféromètres - Michelson etc ... - mesure **directe** du front d'onde
 - Analyseur dit de *Shack-Hartmann* - mesure de la **pente** du front d'onde
 - Analyseur dit « senseur de courbure » - mesure de la **courbure**
 - Analyseur dit « pyramide » - version moderne couteau de Foucault, **direct** et **pente**
-
- Echantillonnage **spatial** ~ r_0 soit 100-1000 points / pupille
 - Echantillonnage **temporel** ~ 100-1000 Hz
 - Bon rapport signal/bruit => assez de photons (10 à 100 photons/mesure) => **étoile-guide lumineuses**
 - Détecteurs photoniques rapides (CCD, photo-diodes, ...)

Analyseur de front d'onde : le Shack-Hartmann



$\varphi(x, y, t)$

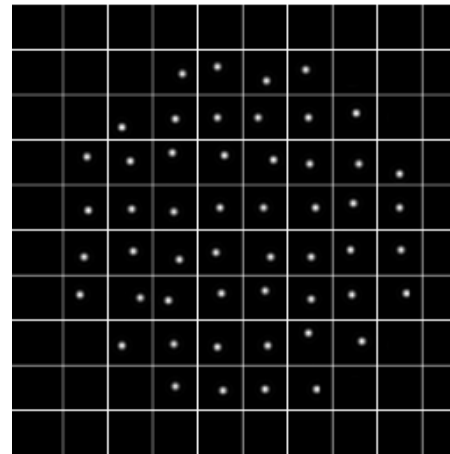
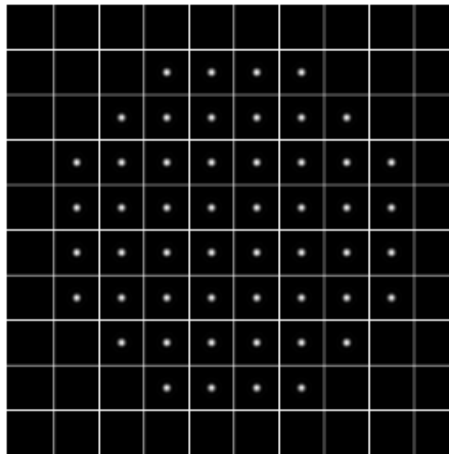
↑

reconstructeur
du front d'onde

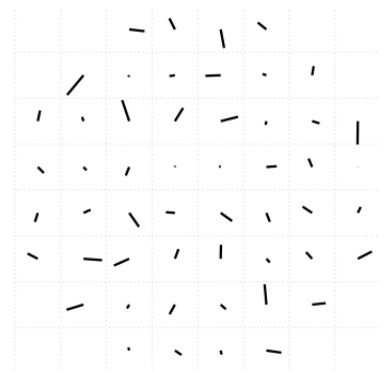
↑

$$p_x(x, y, t) = \frac{\partial \varphi(x, y, t)}{\partial x}$$

$$p_y(x, y, t) = \frac{\partial \varphi(x, y, t)}{\partial y}$$

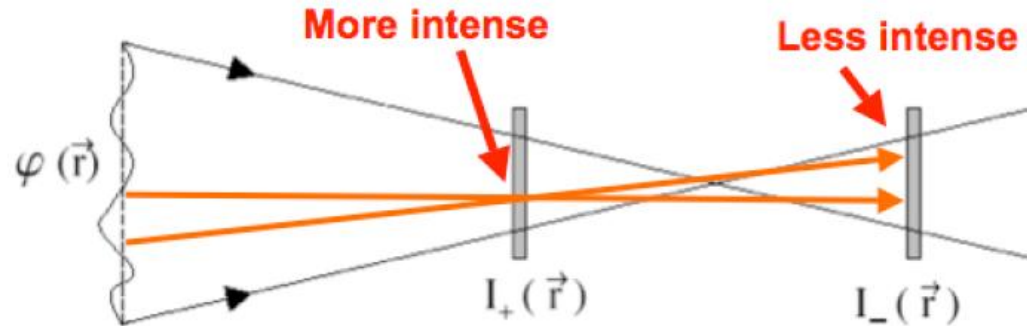


Déplacement du point ~ pente locale du front d'onde



Dérivées locales
(vecteurs-pentes)

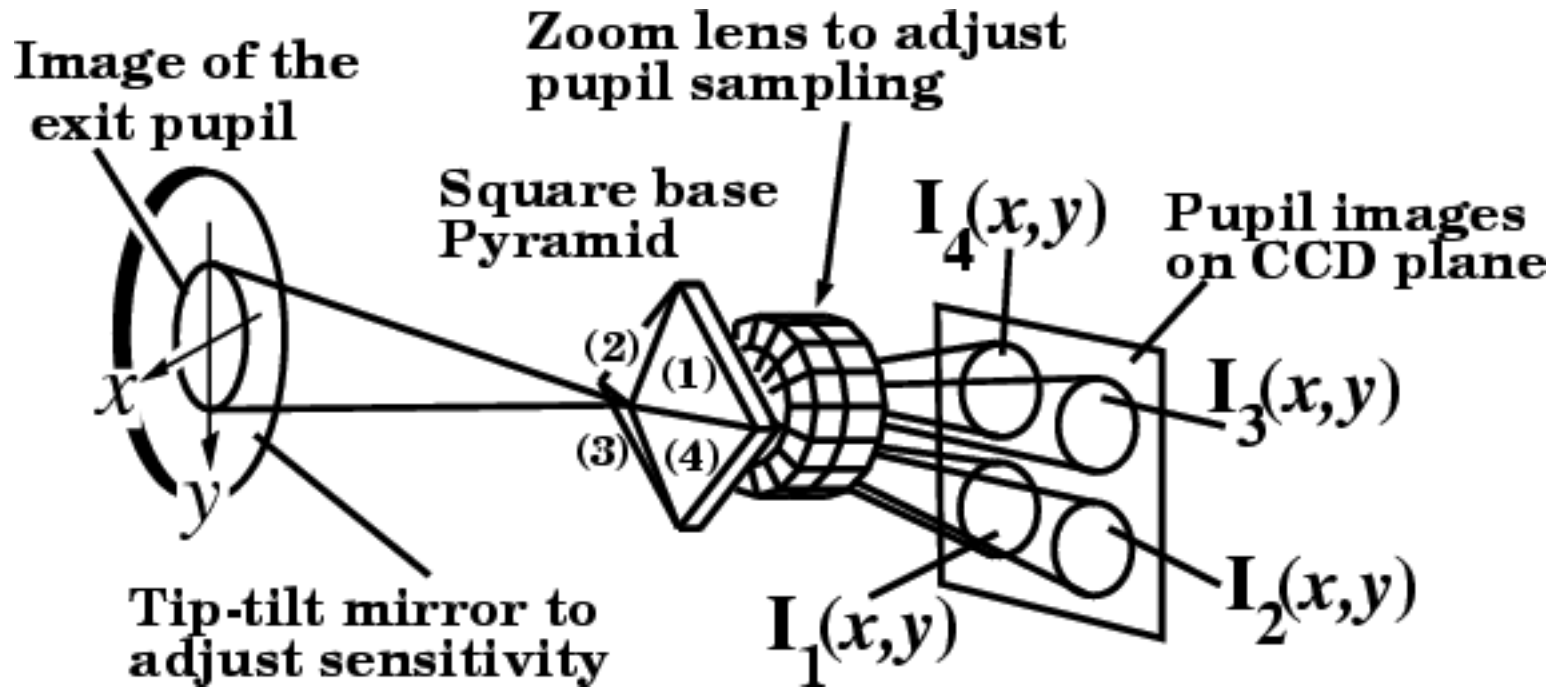
Analyseur de front d'onde : senseur de courbure



- Différence des images intra et extra focales est ~ à la courbure du front d'onde
- Avantages par rapport au Shack-Hartmann ?
 - Détecteur = photo-diodes (au lieu de CCD), moins de pixels et pas de bruit de lecture => on peut utiliser des étoiles plus faibles
 - Lecture des photo-diodes plus rapide, on perd moins de temps de calcul AFO -> miroir déformable

$$\frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-} \propto \nabla^2(\varphi)$$

Analyseur de front d'onde : pyramide



Miroirs déformables

Technologies actuelles et
nouveaux développements

Miroir déformable : concept

QuickTime™ and a
TIFF (LZW) decompressor
are needed to see this picture.

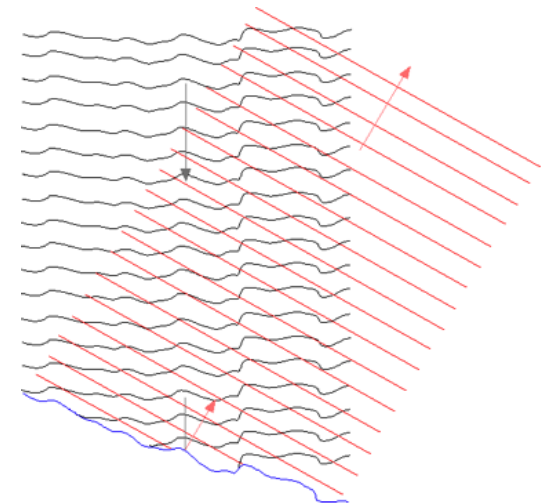
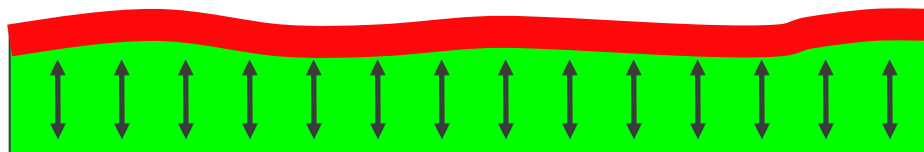
Phase
incidente

MD

Phase
corrigée

MD

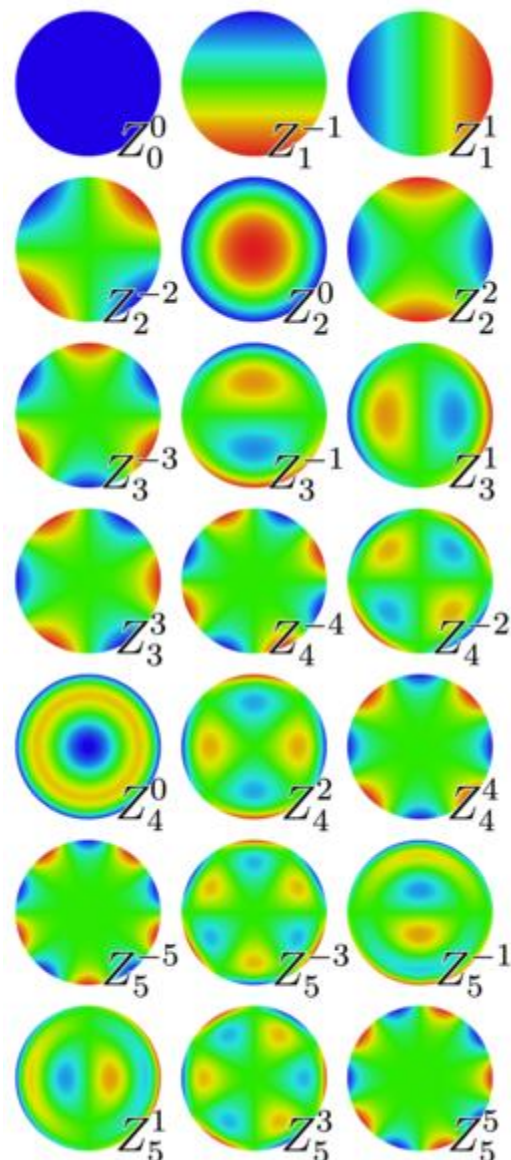
Surface réfléchissante continue



Miroir déformable : modes

On peut faire correspondre chaque type d'aberration d'un élément optique circulaire à une forme modale.

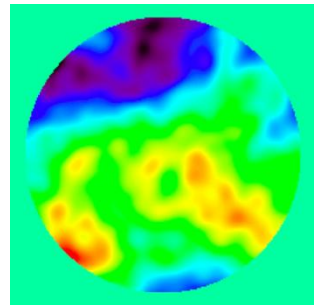
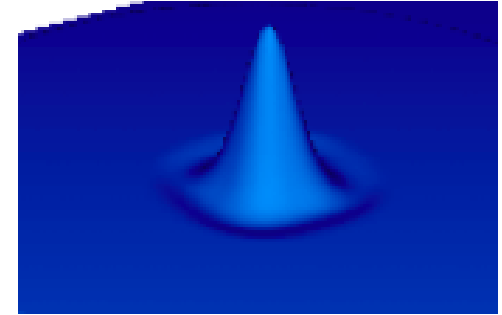
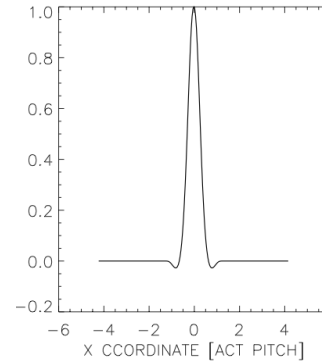
Celles-ci sont exprimées par les polynômes (modes) de **Zernike**.



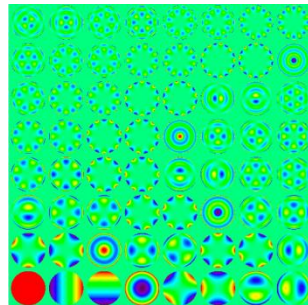
Miroir déformable : modes

- **Fonction d'influence** = déformation de la surface du miroir associée à un actuateur
- Pratiquement, on contrôle des actuateurs, mais on préfère souvent visualiser la surface du miroir en terme de **modes d'aberration** $M_i(x,y)$ $i=1..N$
tip-tilt, defocus, astigmatisme, coma, etc.

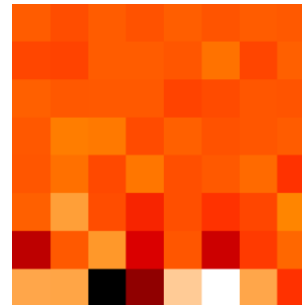
$$\hat{\phi}(x,y,t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) M_i(x,y)$$



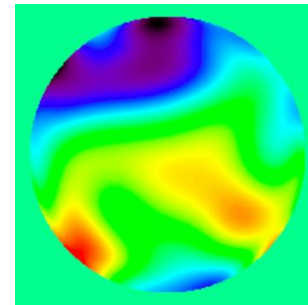
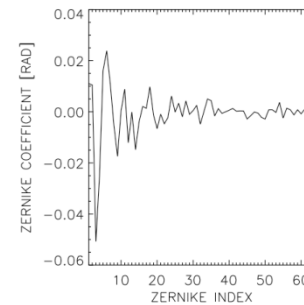
projetée
sur modes



$M_i(x,y)$ $i=1..64$



$a_i(t)$ $i=1..64$

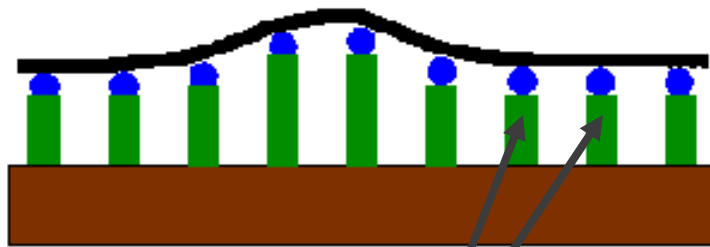


Nombre de modes miroir forcément limite

=> Existe limite de correction à haute fréquence spatiale

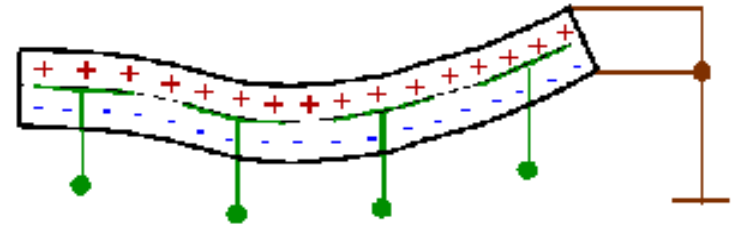
Les miroirs déformables

Miroirs à actionnement axial



actionneurs

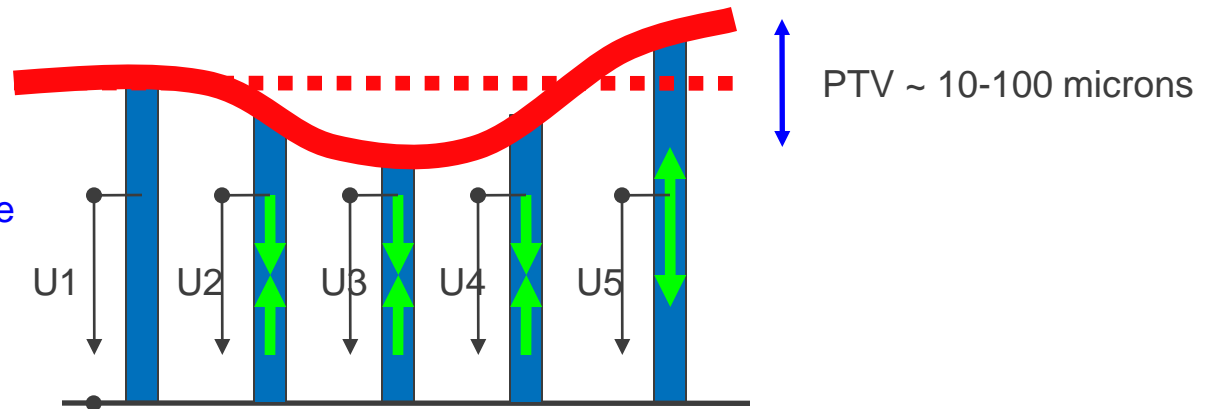
Miroirs bimorphes



Miroir déformable : technologie piézo-électrique

- Les plus utilisées : actionneurs à **céramiques piézo-électriques**

On applique un ensemble de tensions : vecteur de commande



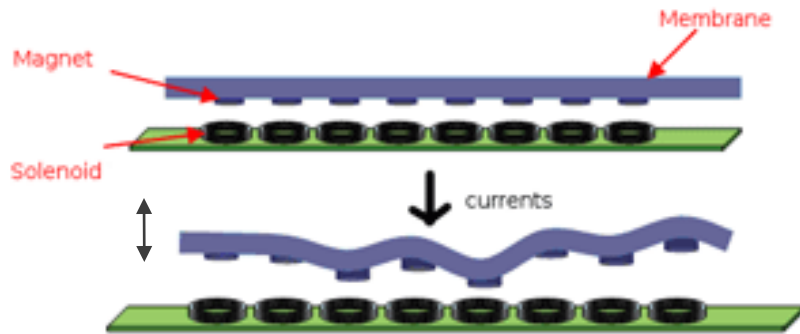
- Avantages
 - Concept de fabrication simple : on colle un réseau carré d'actionneurs sous la surface réfléchissante
 - Technologie mature (+ de 20 ans)
- Désavantages
 - Cher !!! 1000 € / actionneur. Pour 100 à 1000 act => 100 k€ à 1 M€ le miroir...
 - Pas pour production de masse
 - Distance inter-actionneurs ~ 5 mm => diamètre 50 mm à 200 mm
 - Pas possible pour micro systèmes optiques
 - Fragiles, $U \sim 200-400$ [V] hystérésis

Miroirs déformables : besoins futurs

- Diamètre des télescopes en constante augmentation
 - Aujourd'hui max 10 m (Keck Telescope Hawaii)
 - Demain (2015) 30 m (Canada/US), 42 m (Europe)
 - 10 fois plus d'actuateurs, coût techno piezo ~ 30 M€ ~ 10% budget
 - Diamètre MD ~ 1 m => Système OA complet = 10 x 10 x 5 m (gros, lourd)
- Autres applications que l'astronomie - médecine, télécoms, ...
 - système OA doit être à coût raisonnable,
 - petit (intégrable)
 - production industrielle possible
- Cela a amené au développement de nouveaux concepts

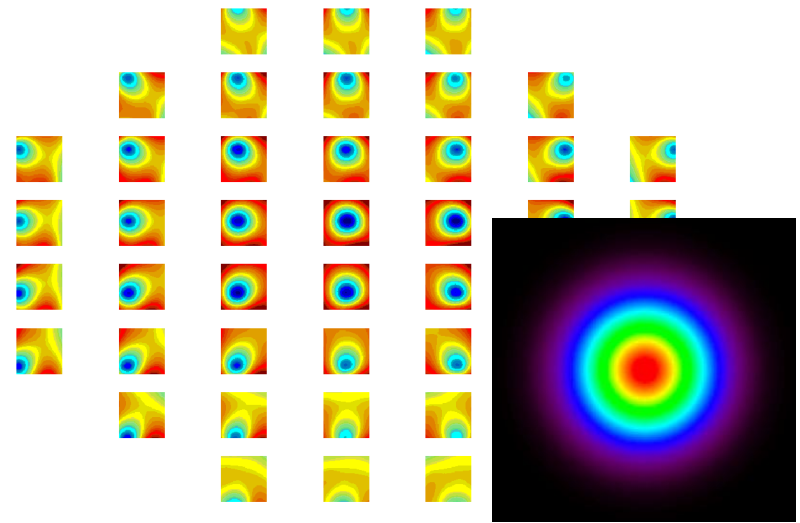
Miroir déformable : nouvelles technologies (1)

- MD a actuateur magnétiques : leaders ALPAO (France) init. Observatoire de Grenoble



- Diamètre pupille 15-20 mm
- pas actuateur 2.5 mm
- excellente linéarité (écart < 5%)
- course 10-100 microns
- coût ~ 20'000 €
- très robustes
- possible -> 20 cm ??

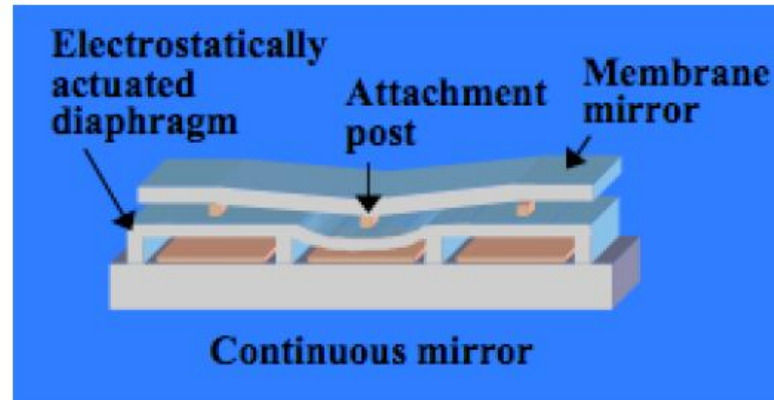
Parfaits pour correction aberrations à grande amplitude et ~ 10-100 modes (correction aberrations de l'oeil)



Miroirs déformables « MOEMS »

- Diminuer encore le pas d'actuateur ...
- Diminuer encore les coûts / actuateurs ...
- Passage à production de masse industrielle ...

Technologie Micro-Opto-Electro-Mechanical-Systems (MOEMS)

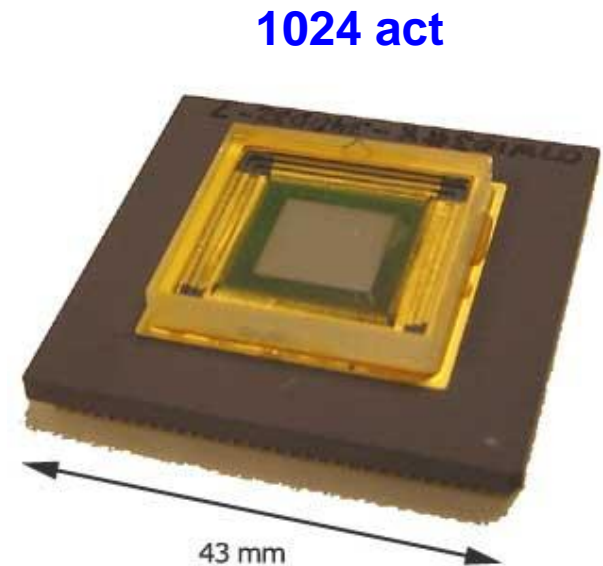
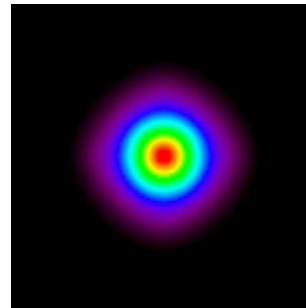
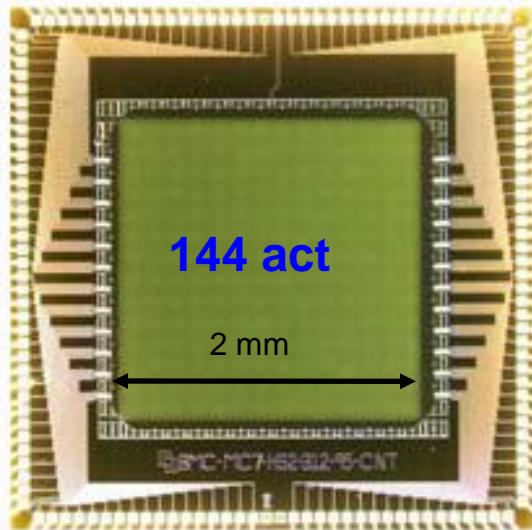


- Gravage 3D dans substrat silicium - actuateurs électrostatiques + alimentation
 - Pas d'actuateurs ~ 0.3 mm => diam MD ~ 2-10 mm
 - coût ~ 10-100 \$US/actuateur
 - Technologie silicium (wafers) => production de masse OK

Boston Corp. MOEMS



<http://www.bostonmicromachines.com>

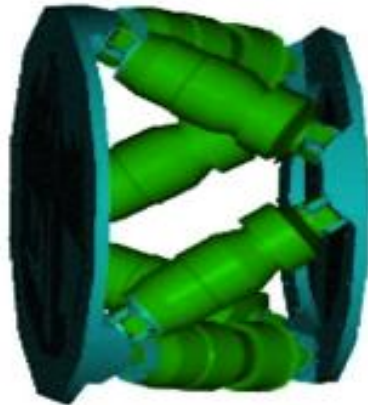


- 5'000-10'000 US\$
- Course 1-10 microns
- Encore un peu fragiles ...

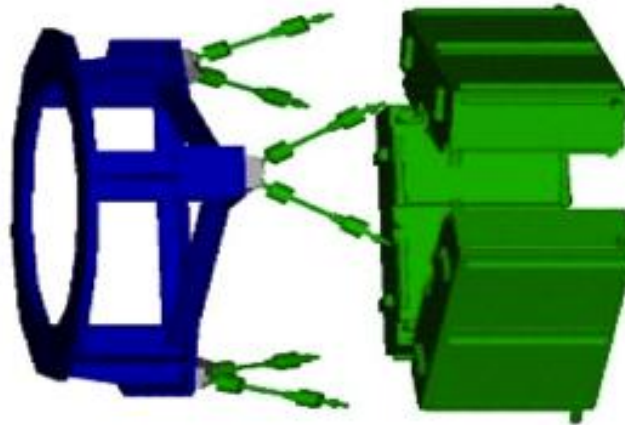
Parfaits pour aberrations
à haute fréquence spatiale
et moyenne/faible amplitude

Miroir secondaire adaptatif pour un grand télescope

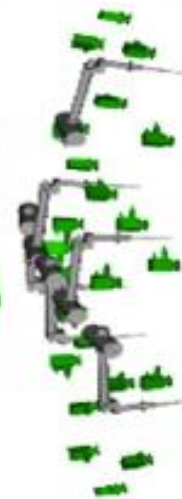
Hexapode et système de soutien



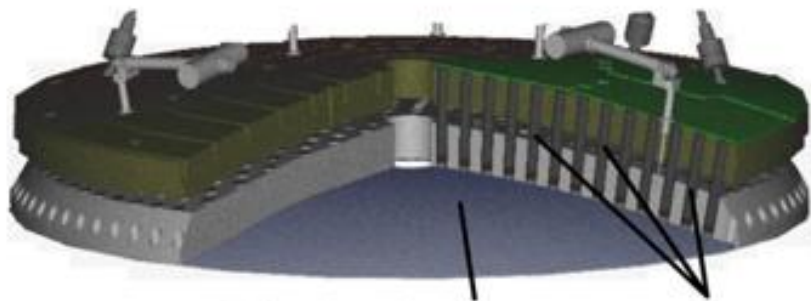
Boîtiers pour l'électronique



Plaque de refroidissement



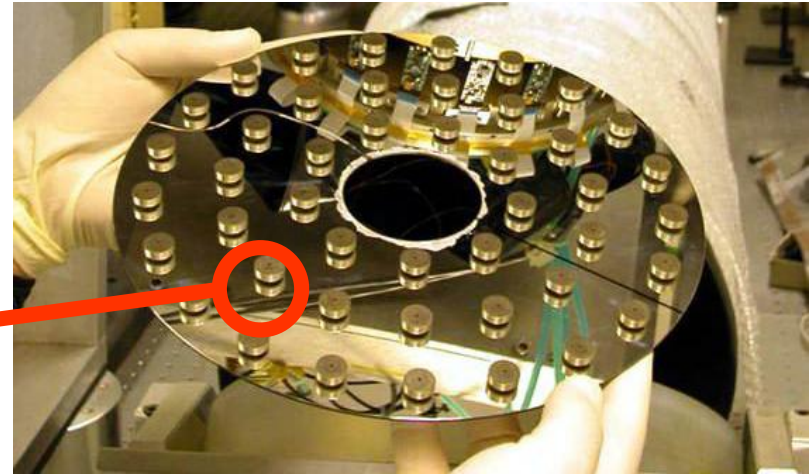
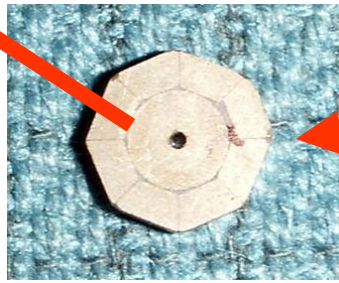
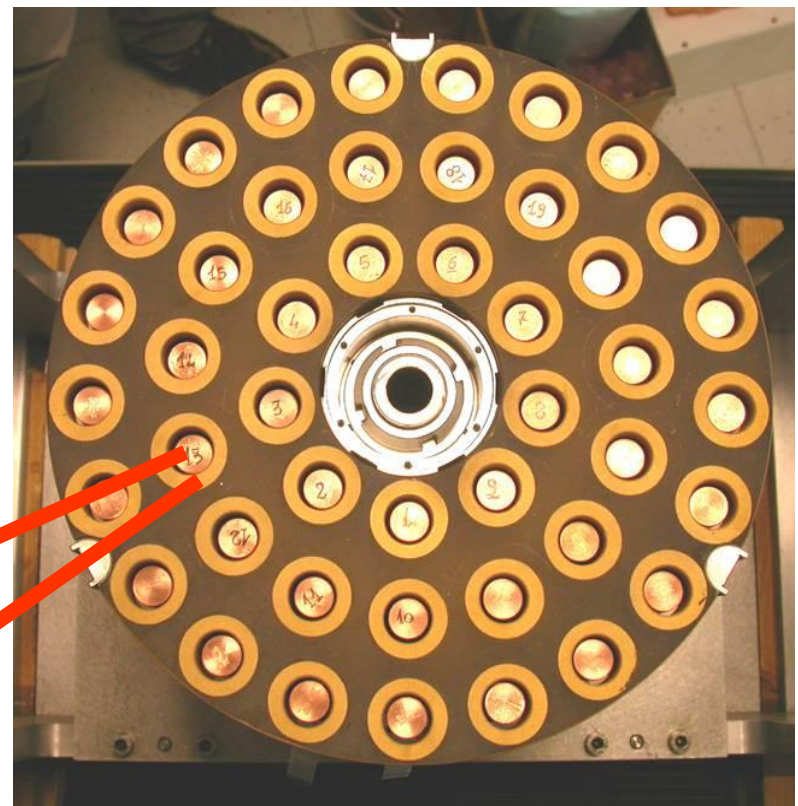
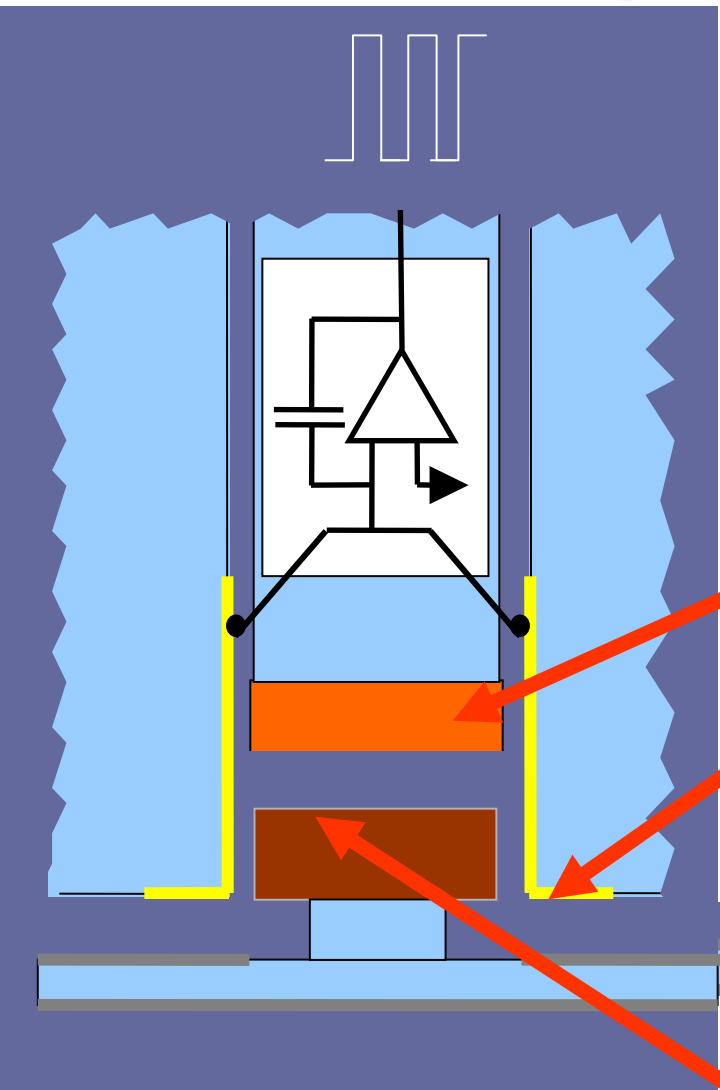
Disque de référence



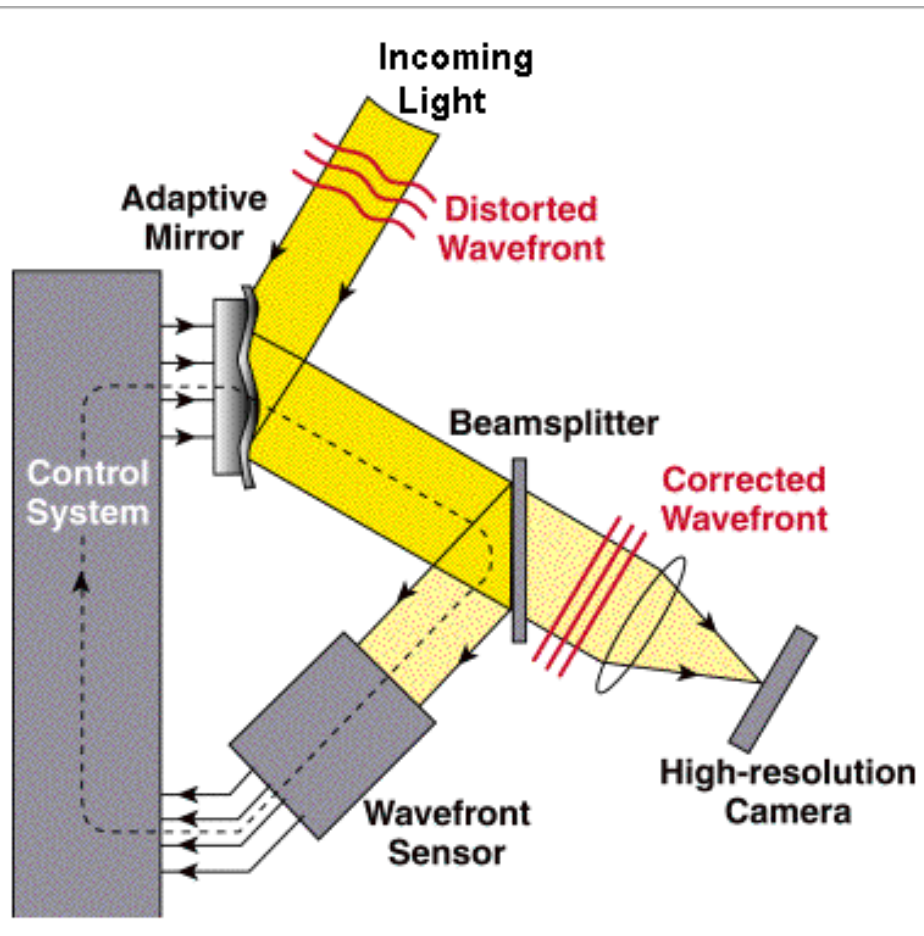
Miroir mince
(\varnothing 911mm)

672 actuateurs
électromagnétiques

Les senseur capacitifs



Contrôle (asservissement): de l'analyseur de front d'onde au miroir déformable



Construction de la commande au miroir déformable

$$\hat{\varphi}(x, y, t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) M_i(x, y)$$

- A partir de la mesure de l'analyseur de front d'onde (AFO), construire la commande au miroir (vecteur a), tenant compte ...
 - Bruit de mesure AFO
 - Type d'analyseur (éventuels modes miroir invisibles par AFO ! (piston))
 - Connaissances à priori sur la phase (p.ex. turbulence optique)

$$\vec{a}(t) = D \cdot \vec{m}(t)$$

Coefficients modes miroir Matrice de commande « optimale » Vecteur des mesures AFO

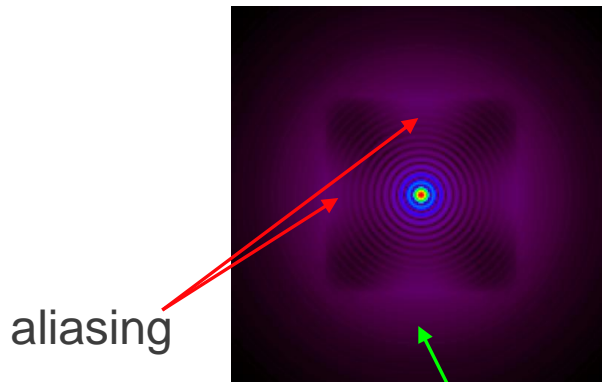
- Commande optimale: trouver la matrice D minimisant l'écart quadratique

$$\iint [\varphi(x, y, t) - \hat{\varphi}(x, y, t)]^2 dx dy$$

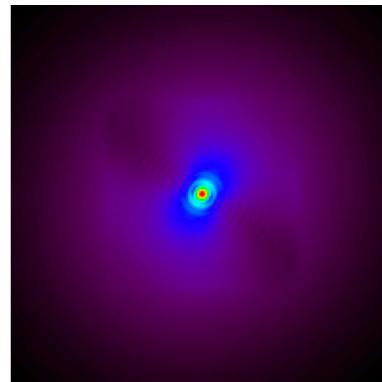
Structure de la PSF d'optique adaptative
Point Spread Function
(image du point)

Termes d'erreur dans le front d'onde résiduel

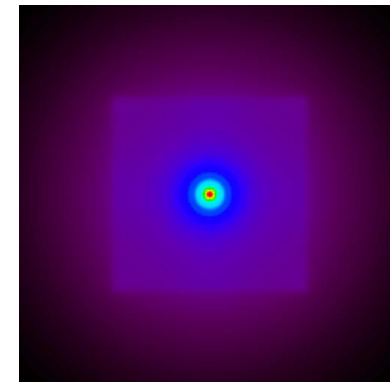
- Correction JAMAIS parfaite - on parle de correction partielle
 1. Nombre d'actuateurs limites => aberrations à hautes fréquence spatiales non corrigées
 2. Mesure du front d'onde : repliement (aliasing) hautes fréquences -> basses fréquences
 3. Bruit de l'AFO
 4. Evolution du front d'onde pendant le calcul de la commande au miroir
 5. Ecart angulaire étoile-guide \Leftrightarrow objet scientifique



Halo non corrigé



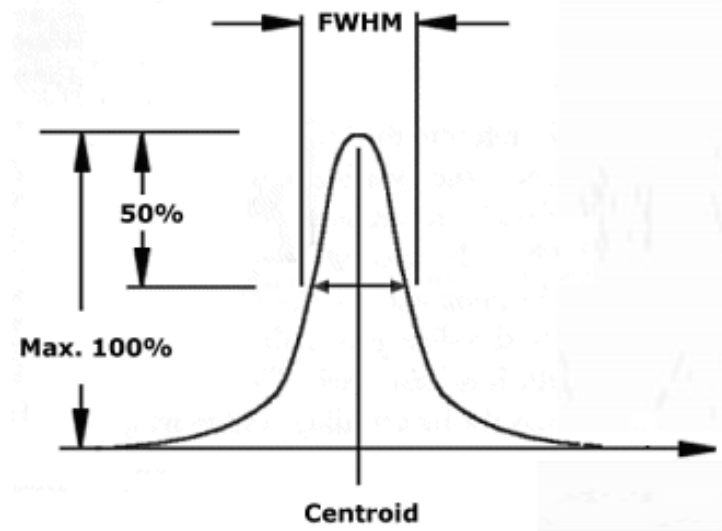
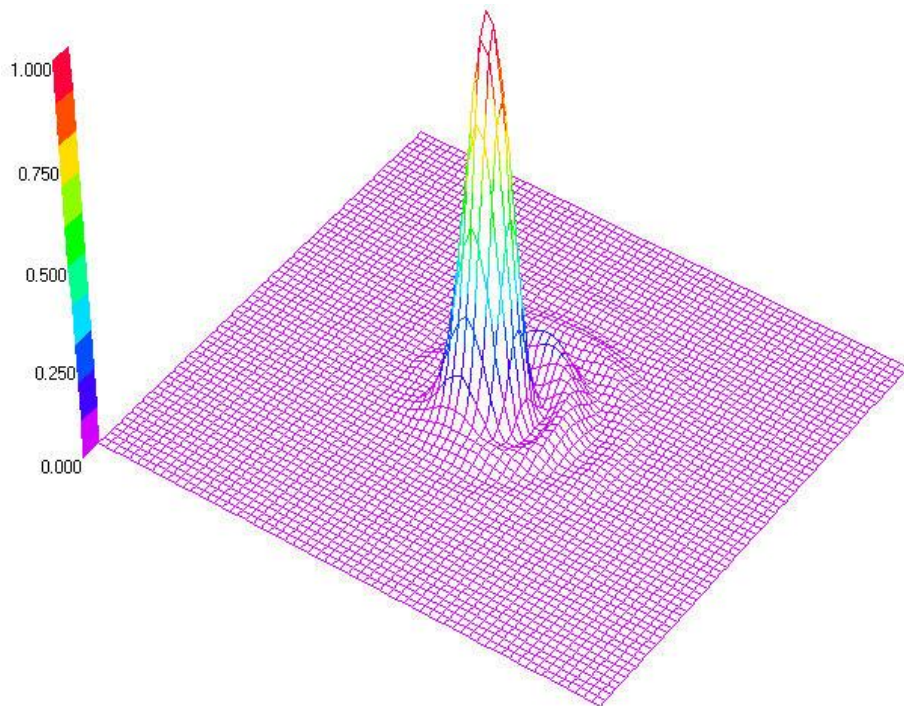
Elongation direction étoile-guide



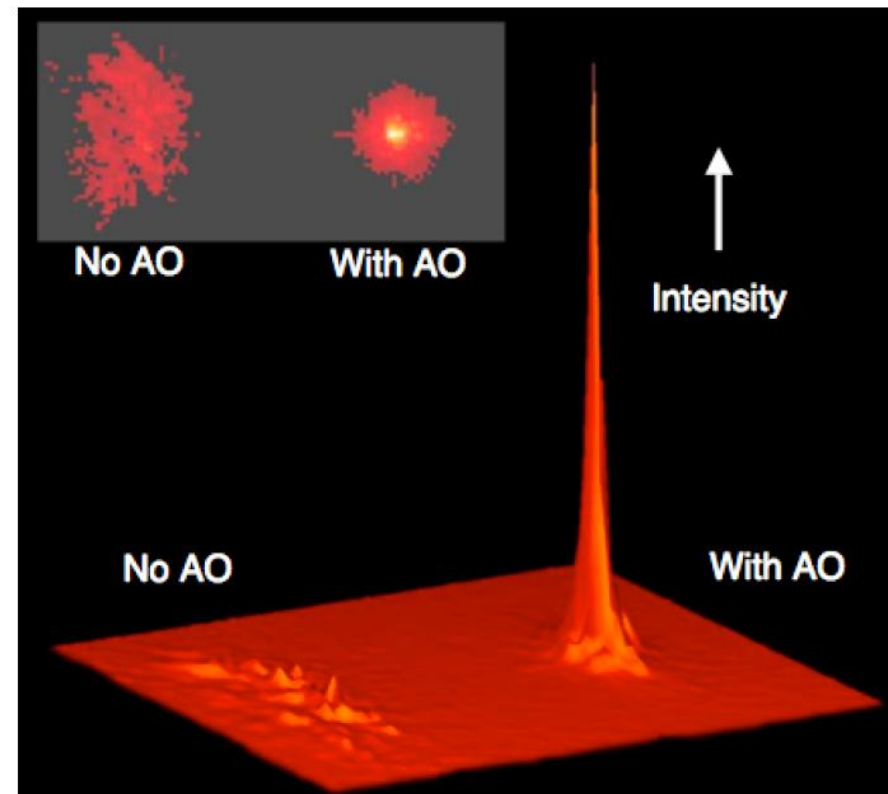
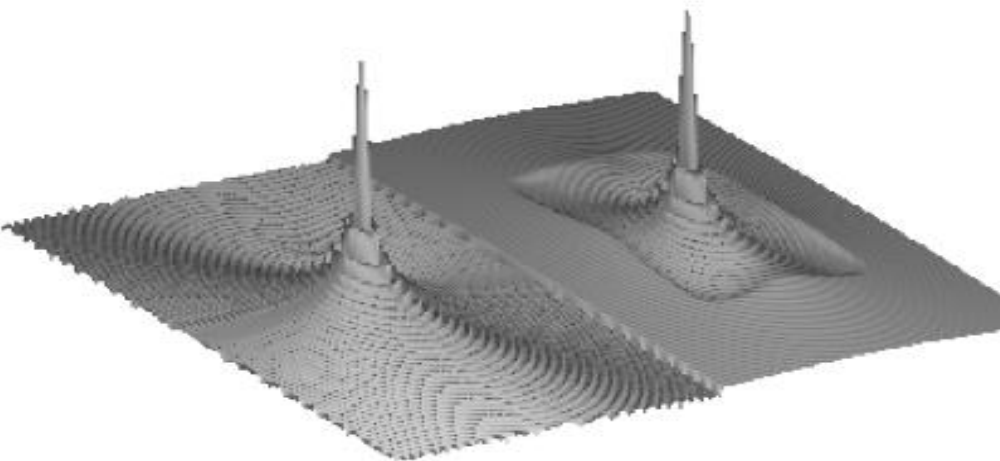
Effet bruit AFO

Quantification des performances d'optique adaptative

Point Spread Function (fonction d'étalement du point)



- Rapport de **Strehl** = intensité centrale PSF / intensité centrale sans aberrations
 - Typiquement $S \sim 10\% - 70\%$
 - Engendre perte de contraste détails fins
- Coeur de la PSF limite par la diffraction
 - Résolution théorique télescope généralement atteinte



Optique adaptative de nouvelle génération

- Si pas suffisant
Constellation d'étoiles laser + étoiles guide naturelles + plusieurs MD / chaque couche turbulente = Multi Conjugate Adaptive Optics (MCAO)

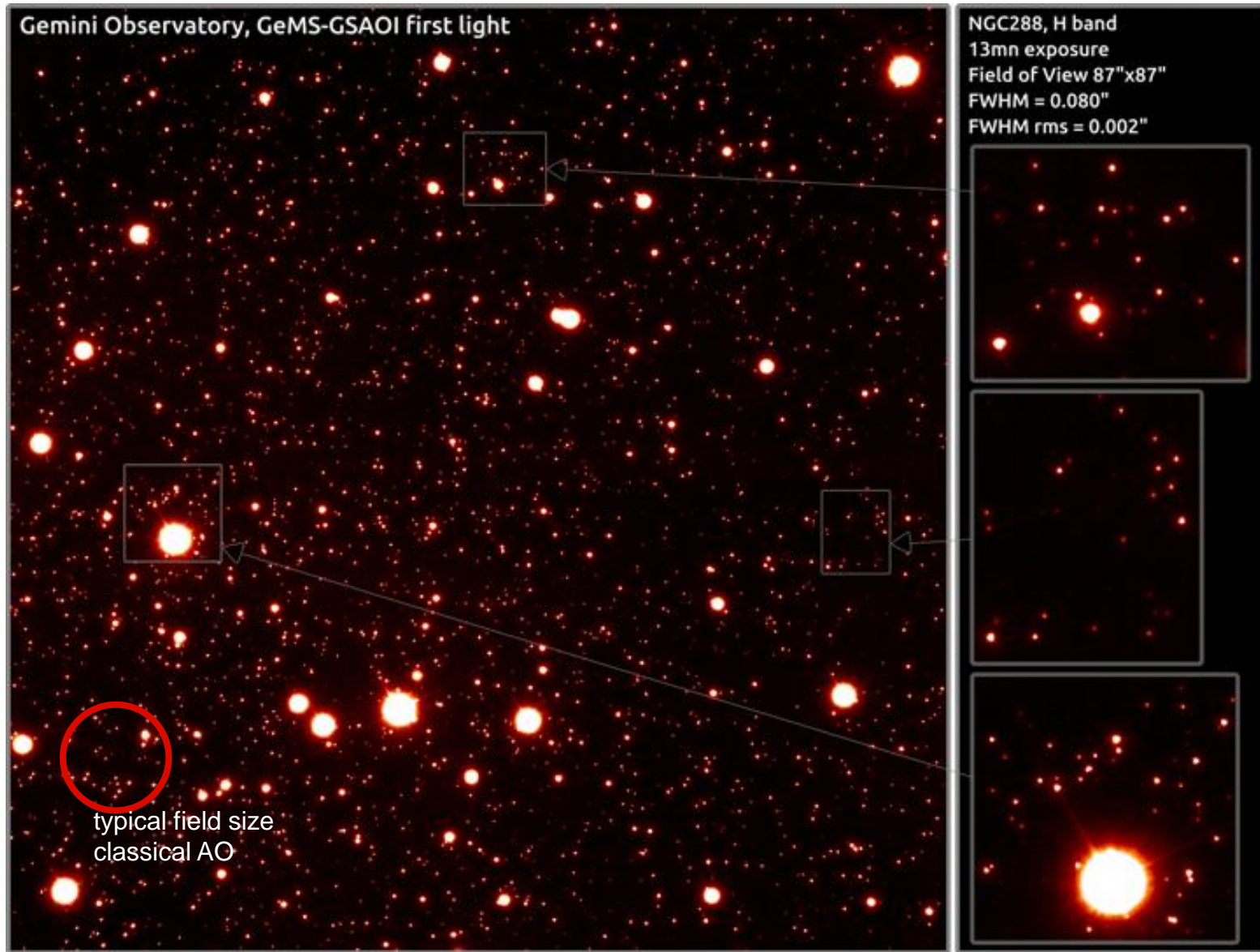
Janvier 2012, Chili

Mise en service du premier système MCAO de
l'histoire de l'astronomie

Télescope GEMINI (USA, Canada, UK, Chili)

12 ans de développement !

MCAO - first light !!



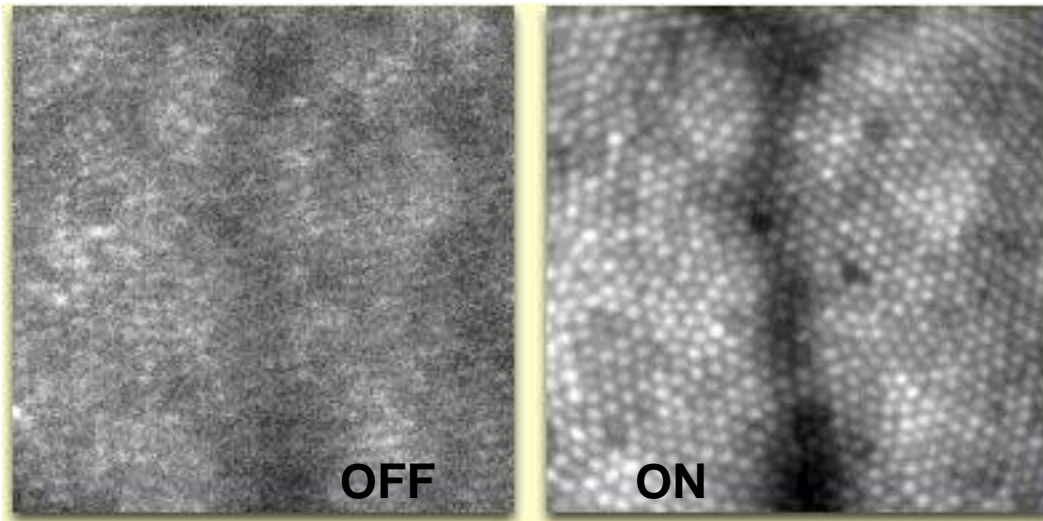
Optique adaptative de nouvelle génération

- Problème principal : couverture du ciel médiocre
 - Besoin étoile-guide brillante proche (angulairement) de l'objet
 - Solution : étoile artificielle
 - Existe couche de sodium gazeux a 92 km
 - Exciter sodium avec faisceau laser
 - On crée une étoile-guide aussi proche que l'on veut de l'objet
 - Si pas suffisant :
 - Constellation d'étoiles laser + étoiles guide naturelles + plusieurs MD / chaque couche turbulent = Multi Conjugate AO MCAO



Autres applications - non astronomie

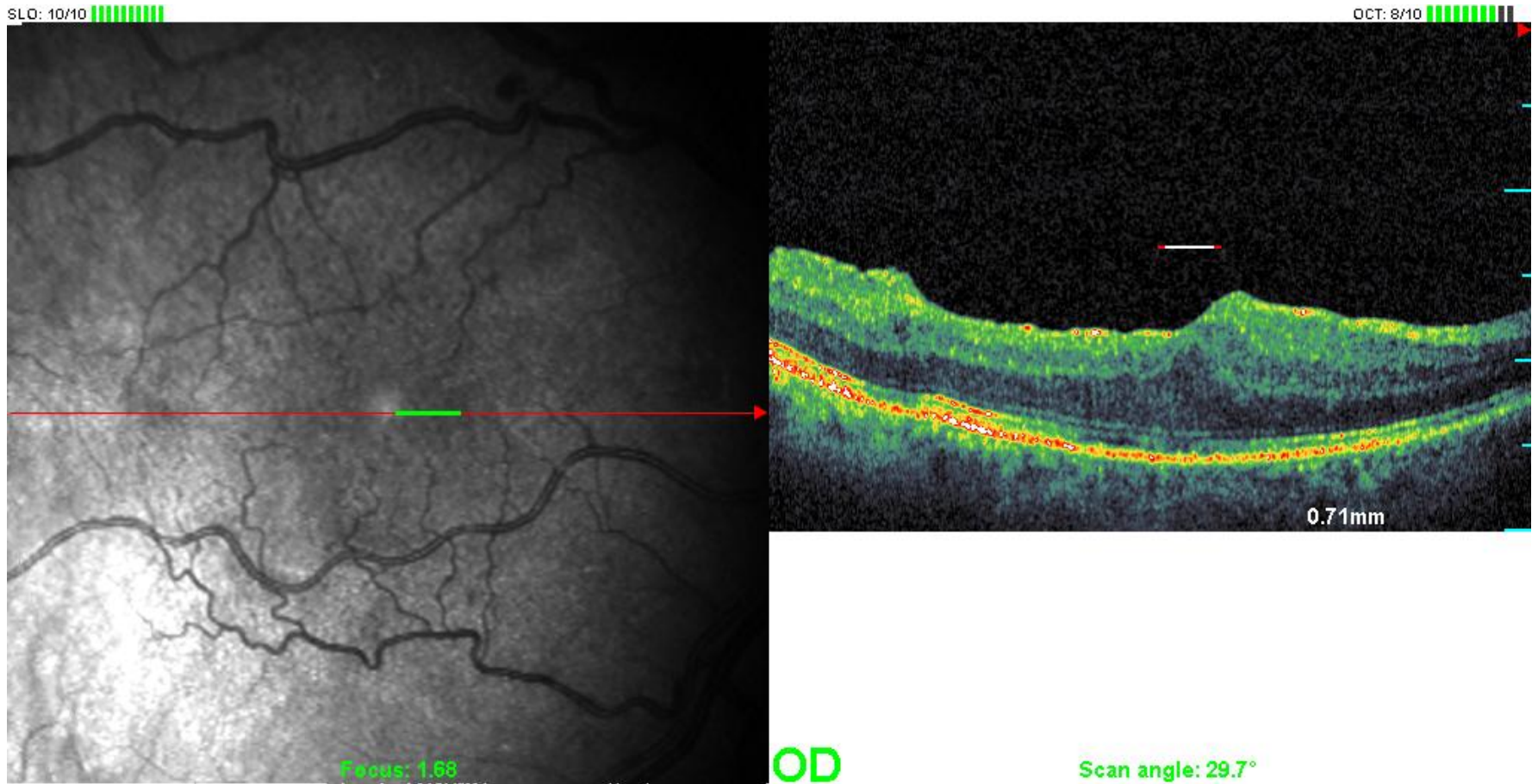
- Number ONE : **ophtalmologie** - observation rétine
 - Aberrations sur la cornée dynamiques
 - Mouvement de l'oeil
 - Couche liquide en mouvement - « larmes »



- Assez lent 10-100 Hz
- Grande amplitude 10-100 microns
 - Leader : *Imagine Optics* / France - miroirs ALPAO

Autres applications - non astronomie

- **ophtalmologie** - observation rétine



Référence: Retina Unit, Clinique Montchoisi, Lausanne, Professor Dr Marc de Smet - Dr Carl P. Herbort

Autres applications, suite... et fin.

1. Lentille adaptative pour la correction de la presbytie
2. Microscope à scanner grand champ
3. Visualisation et suivi temps reel cellules / in situ
4. Imagerie tissus humains à haute resolution dx,dz
5. Cameras digitales
6. Controle turbulence optique cavite lasers
7. Tete de lecture CD / DVD /support optique
8. Communication optique (telecom) air libre
9. Et d'autres à imaginer ...