

D'Archimède aux ELT: Fours Solaires et Optique Adaptative

François Hénault
Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble
Université Grenoble-Alpes
Centre National de la Recherche Scientifique
BP 53, 38041 Grenoble – France



Résumé

- Les méthodes de réglage et de contrôle des miroirs segmentés des grandes installations collectrices d'énergie solaire (de type four solaire ou centrale à tour) présentent quelques liens de parenté avec celles qui sont utilisées aujourd'hui sur les télescopes astronomiques "extrêmement grands" (ELT) et leurs systèmes d'optique adaptative, même si les performances recherchées ne sont pas du même ordre de grandeur.
- Dans ce séminaire, nous explorerons le domaine des grands observatoires astronomiques terrestres et de l'optique adaptative, en décrivant les principes et les dispositifs instrumentaux utilisés pour mesurer les défauts optiques (senseurs de front d'onde), en mettant en avant quelques analogies avec les installations solaires.
- Nous verrons ensuite que l'analogie peut être poussée jusqu'aux calculs de flux et de concentration. Par exemple les pertes optiques en concentration solaire peuvent être estimées par un coefficient comparable au "rapport de Strehl" très utilisé en optique adaptative.
- Je rappellerai enfin les principaux résultats de mon travail de thèse au Four Solaire d'Odeillo (PROMES) sur les méthodes de contrôle des surfaces réfléchissantes par "rétrovisée". Il s'agit en fait d'un "senseur de front d'onde solaire" qui est actuellement en cours de développement par deux étudiants en thèse au PROMES.

Plan

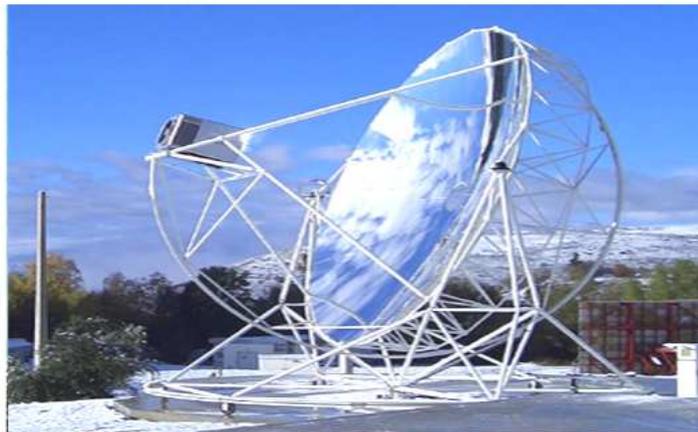
- Introduction: Concentrateurs solaires, télescopes géants et télescopes Cerenkov
- Optique adaptative et senseurs de surface d'onde en astronomie
- Calculs de flux et concentration solaires
- Contrôle et optimisation de concentrateurs solaires par méthode de “rétrovisée”
- Conclusion et perspectives d'avenir

Différents types de concentrateurs solaires

Tower power Plant
(Gemasolar, Spain)



Parabolic Trough
(Shams 1, Abu Dhabi)



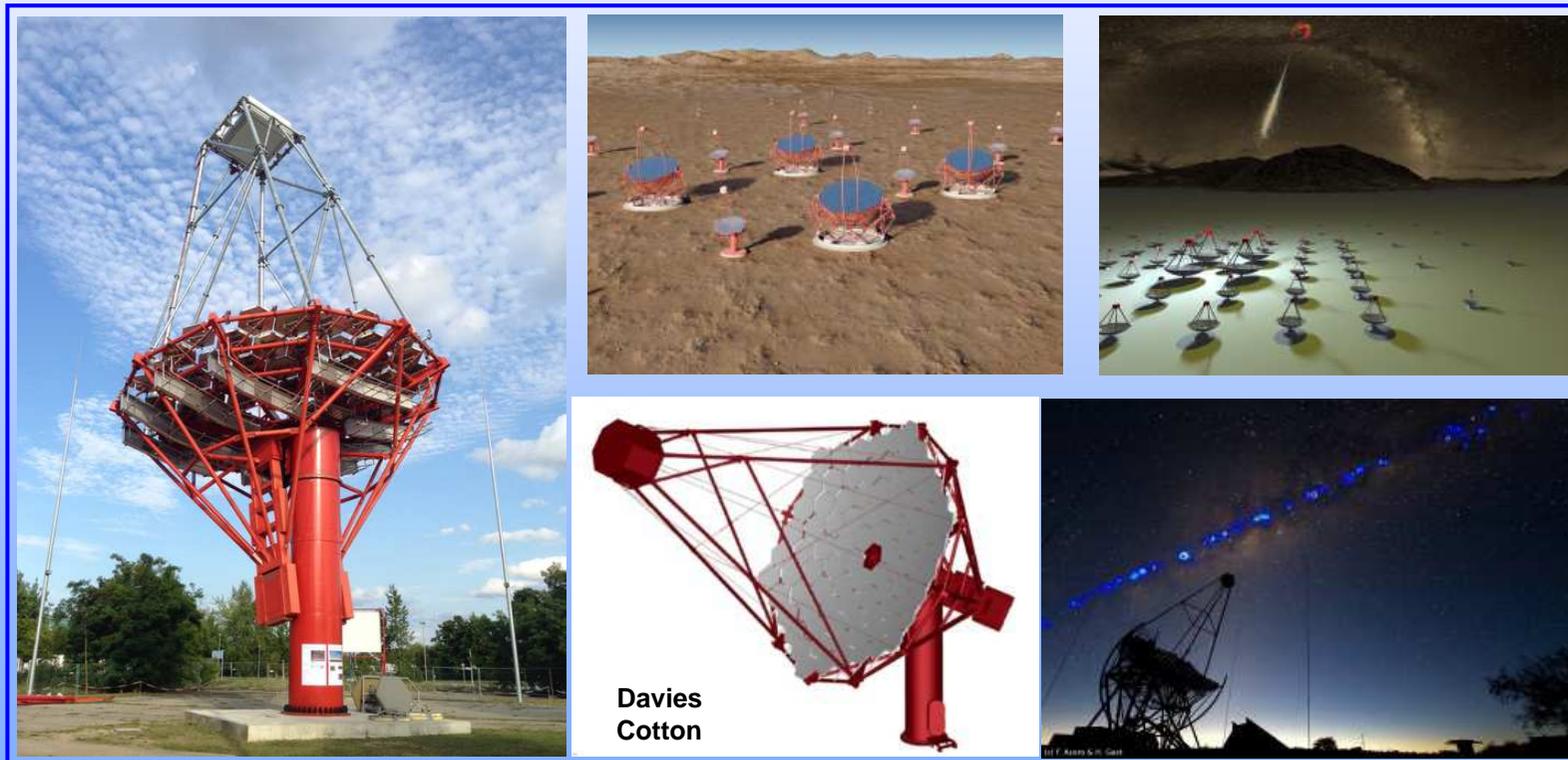
Dish Stirling
(Eurodish, Odeillo)



Linear Fresnel
(NOVATEC BIOSOL)

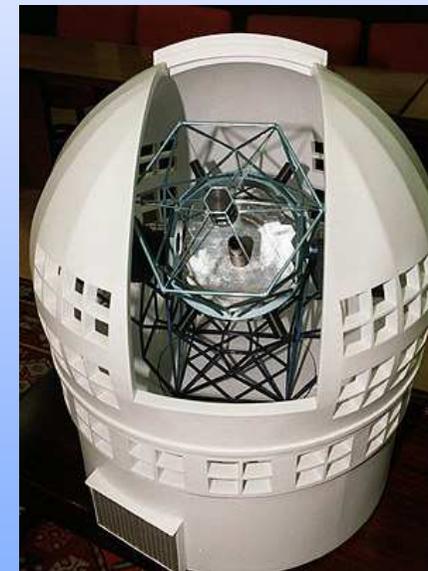
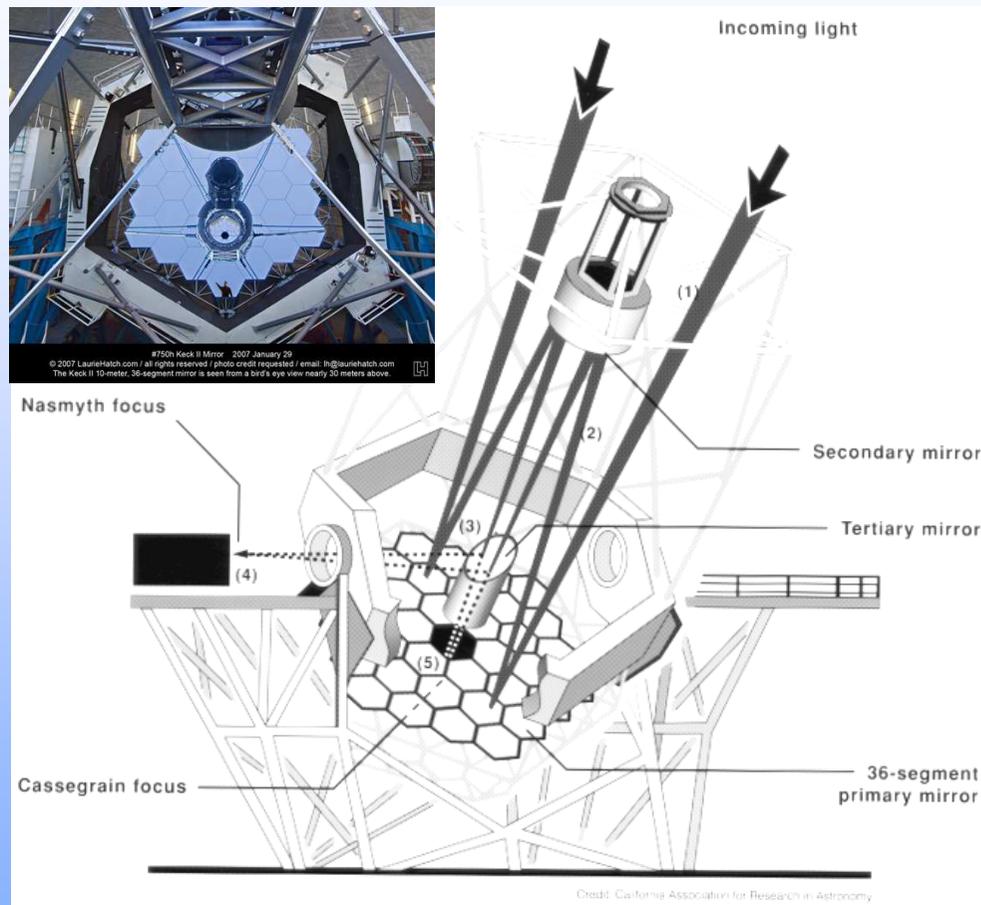
Télescopes Cerenkov

- **CTA**: Projet d'un grand réseau de ~100 télescopes Cherenkov. Mise à partir de 2020 aux Îles Canaries et au Chili (désert d'Atacama, site ESO)
- Certaines des technologies sont semblables au solaire, mais les enjeux économiques sont différents



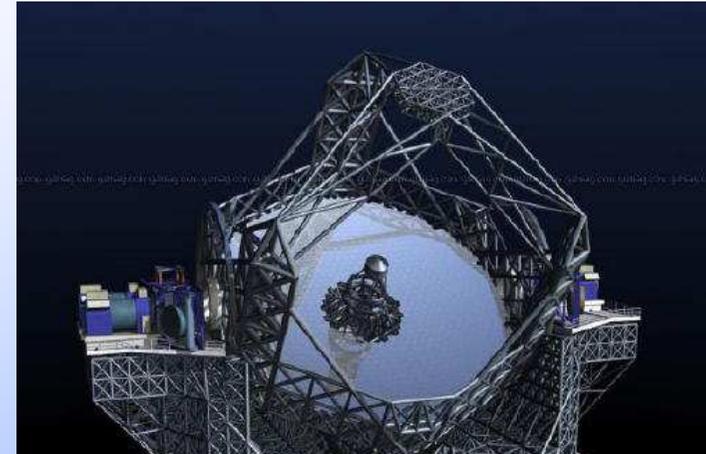
The CTA Consortium, <http://arxiv.org/abs/1008.3703> (2010)

Exemples de télescopes géants: Keck et Grantecan

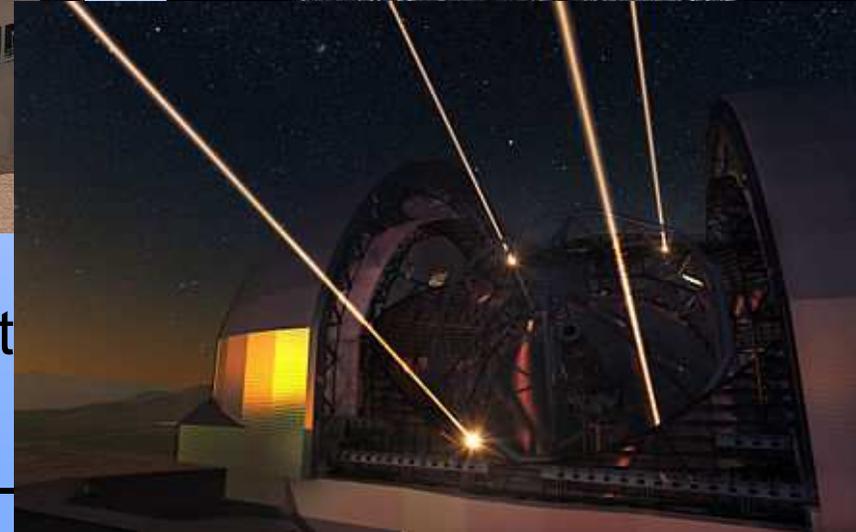


- Diamètres = 10 et 10.2 m, composés de 36 facettes hexagonales (préfigurent les futurs ELT)

Projets d'ELT (télescopes extrêmement grands)

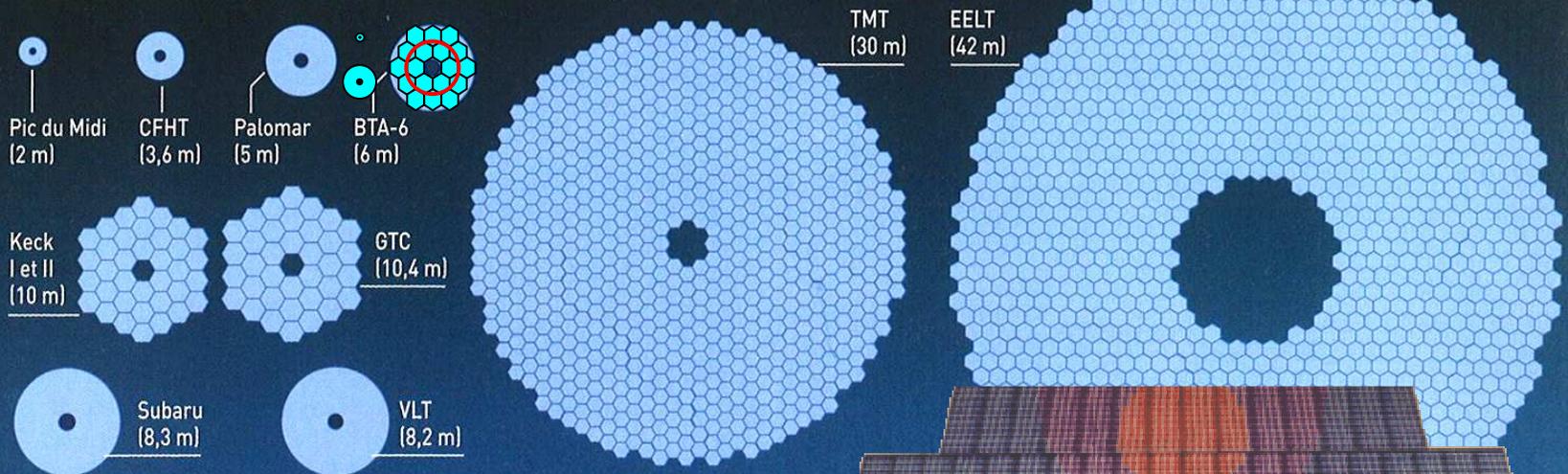


- Projets américain (Thirty Meter Telescope, \varnothing 30 m)
- Projets européen (E-ELT, \varnothing 39 m)
- Premières lumières en 2024-

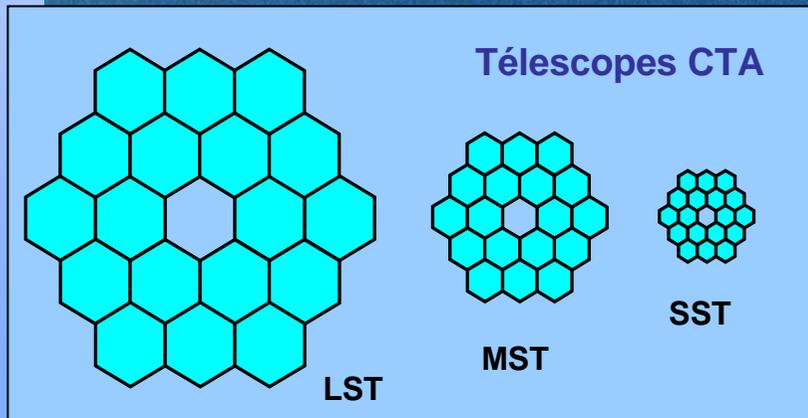


“Grands télescopes, une course aux défis”

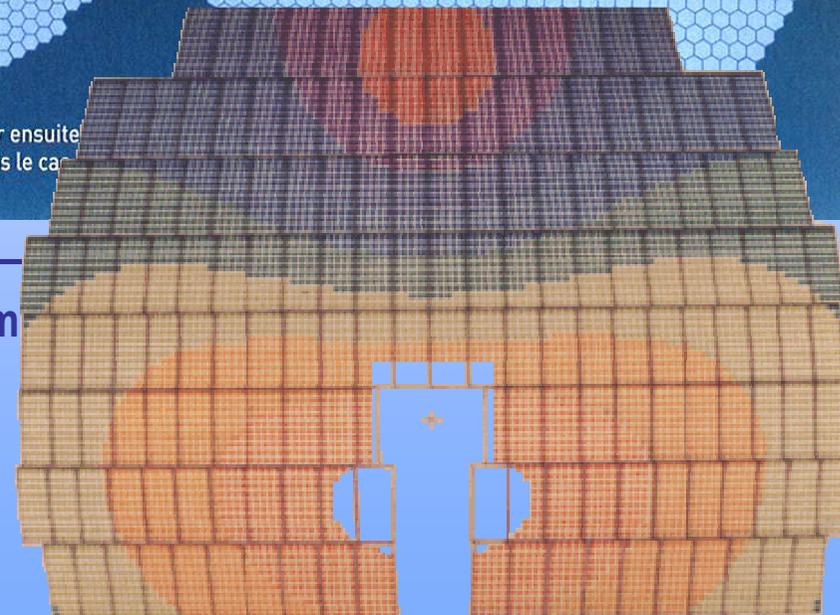
Le TMT et l'EELT comparés aux télescopes actuels



Jusqu'à 8 m de diamètre, les miroirs sont monoblocs. Seule solution pour augmenter ensuite de ces "pièges à lumière" : assembler une mosaïque de petits miroirs, un millier dans le cas



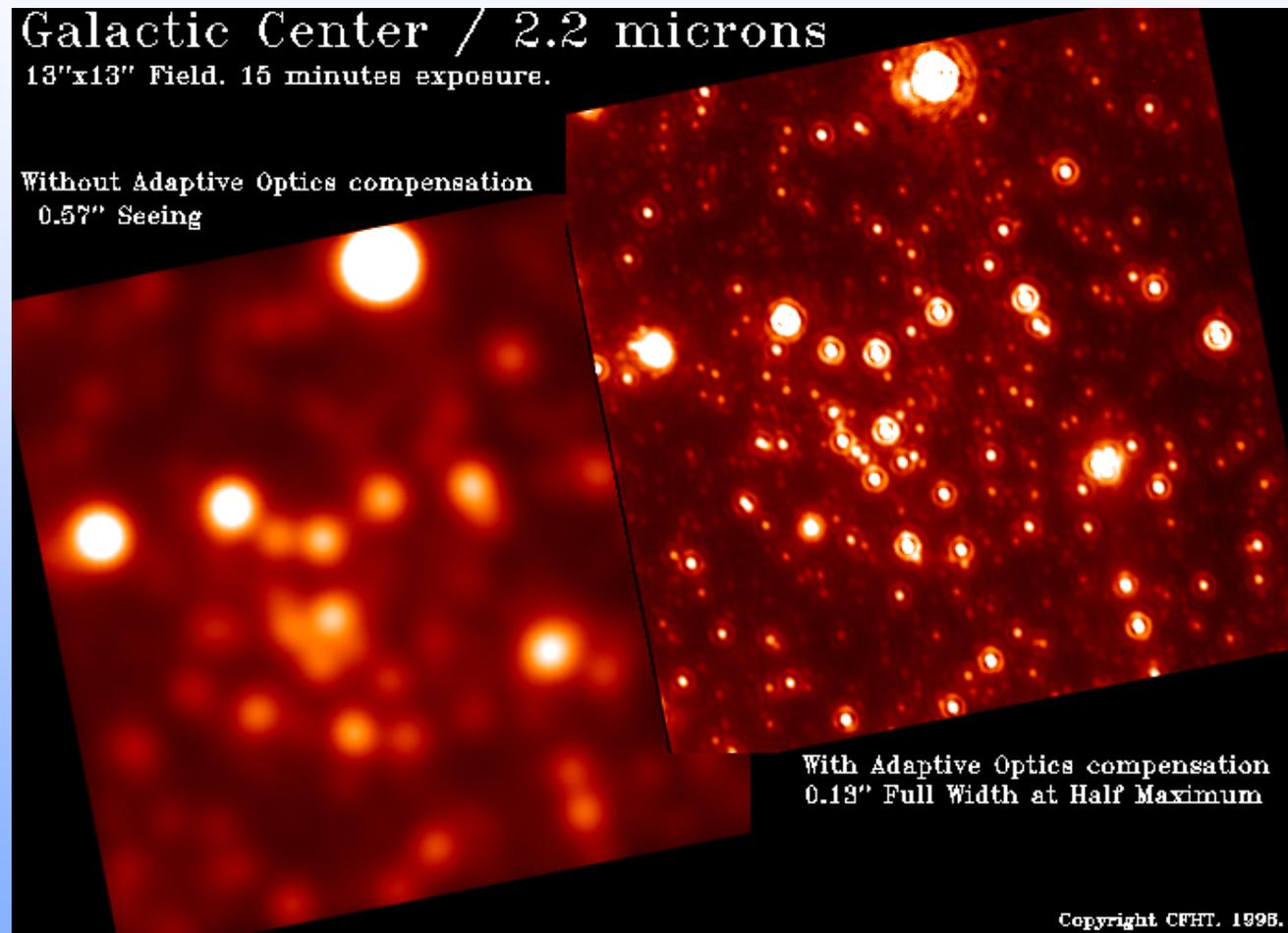
100 m



Optique adaptative et senseurs de surface d'onde

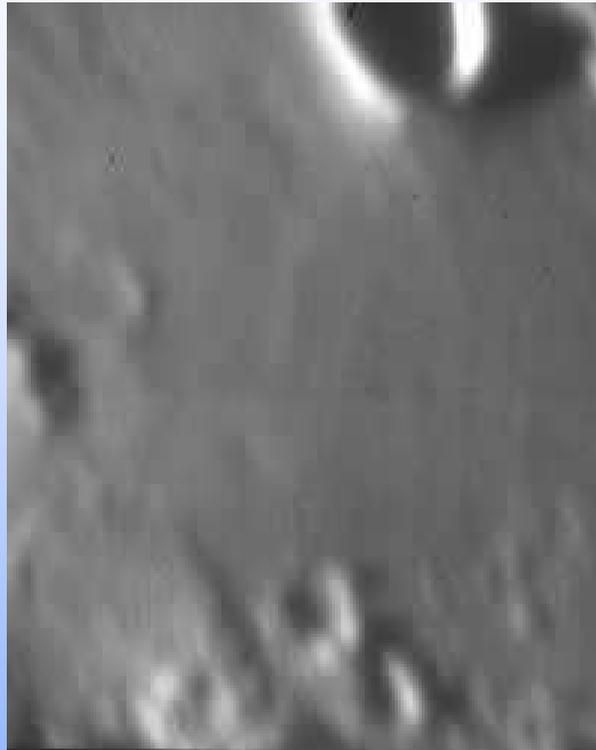
- Exemples de réalisations en optique adaptative: astronomie et astrophysique “solaire”
- Principe général de l’optique adaptative
- Senseur de front d’onde
 - Shack-Hartmann
 - Senseur de courbure
 - Senseur à différentiation optique
 - Senseur pyramidal

Optique adaptative: applications en astronomie



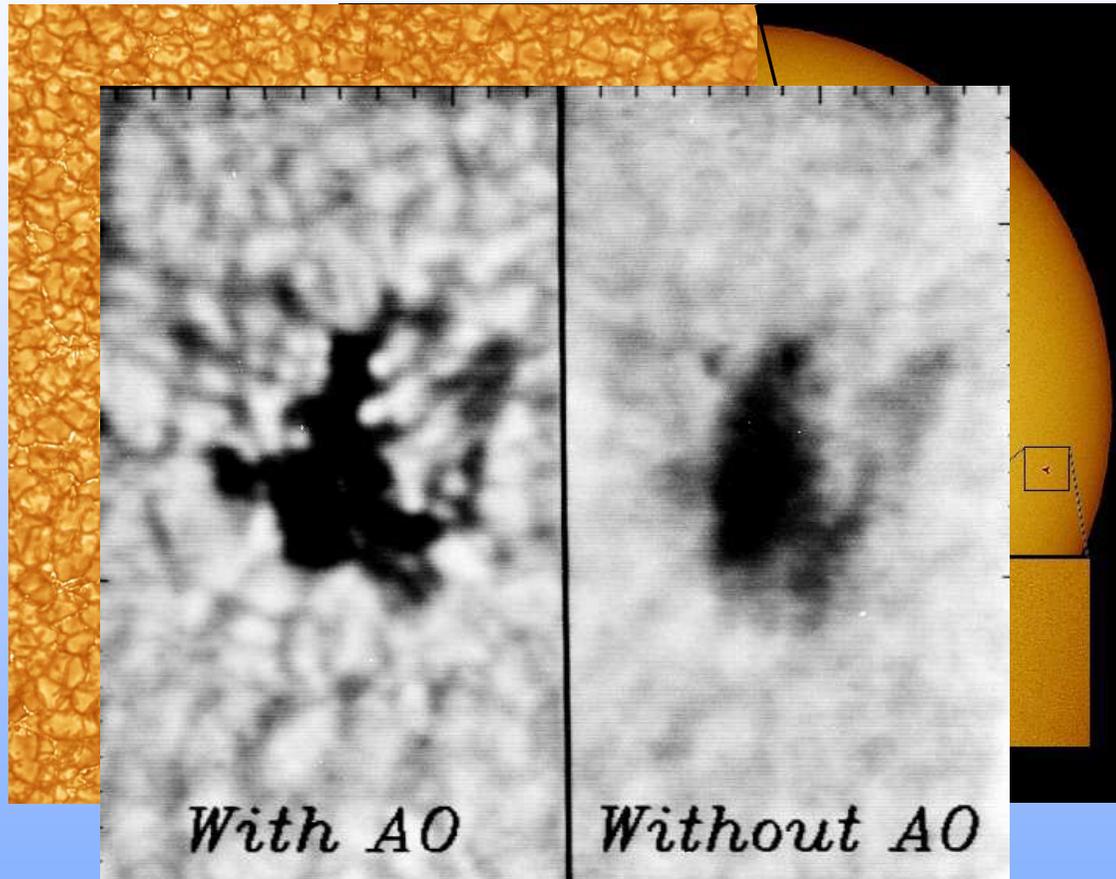
- Centre galactique, 15 minutes de pose au CFHT (\varnothing 3,6 m)

Exemple d'application en astronomie



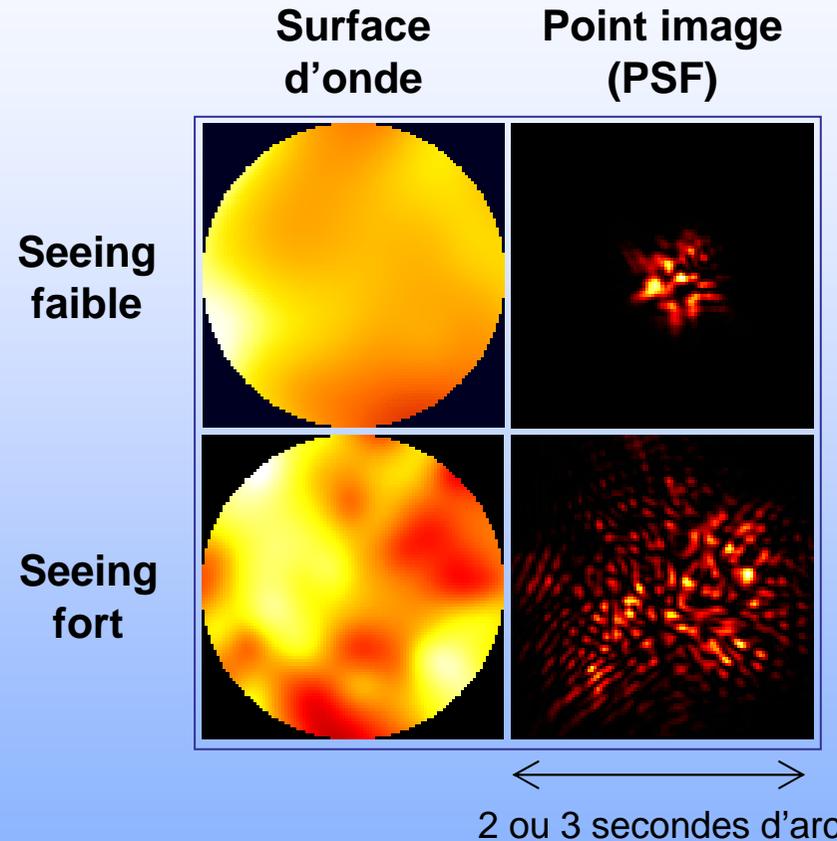
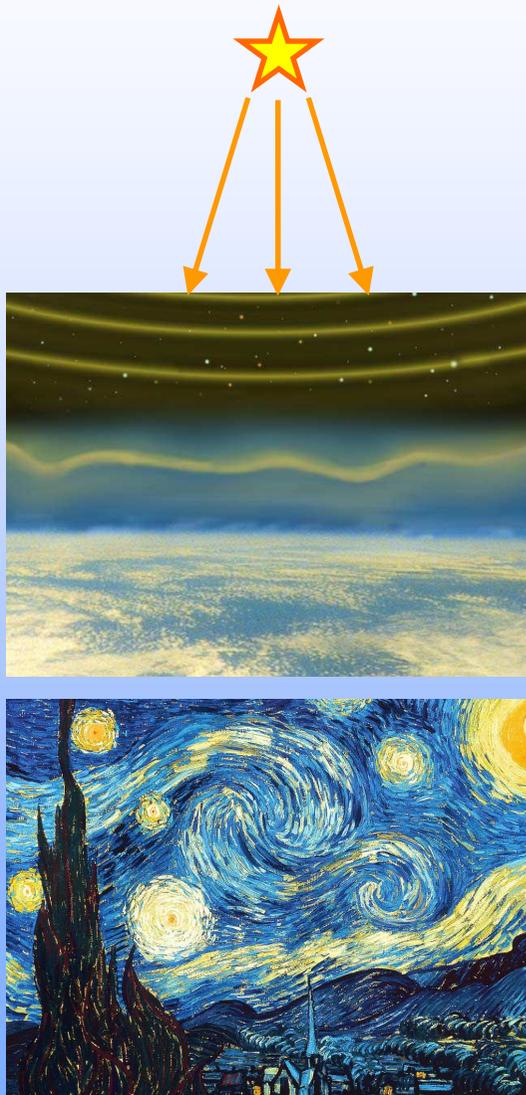
- Image de la Lune réalisée par le système d'optique adaptative NAOS du VLT (\varnothing 8 m) en bande K ($2.3 \mu\text{m}$)

Autre exemple: optique adaptative "solaire"



- THEMIS, Observatorio del Teide, Tenerife (Canaries)
- National Solar Observatory, Kitt Peak & Sacramento Peak (USA)

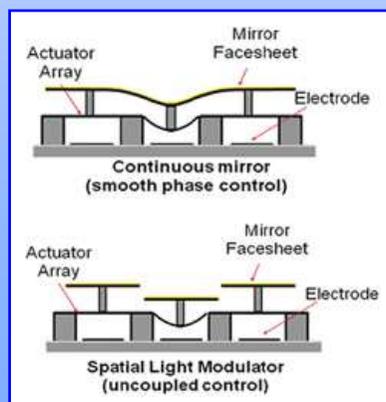
Turbulence atmosphérique (“Seeing”)



- ≈ 500 fois inférieur au diamètre du soleil
- Négligeable en énergie solaire concentrée

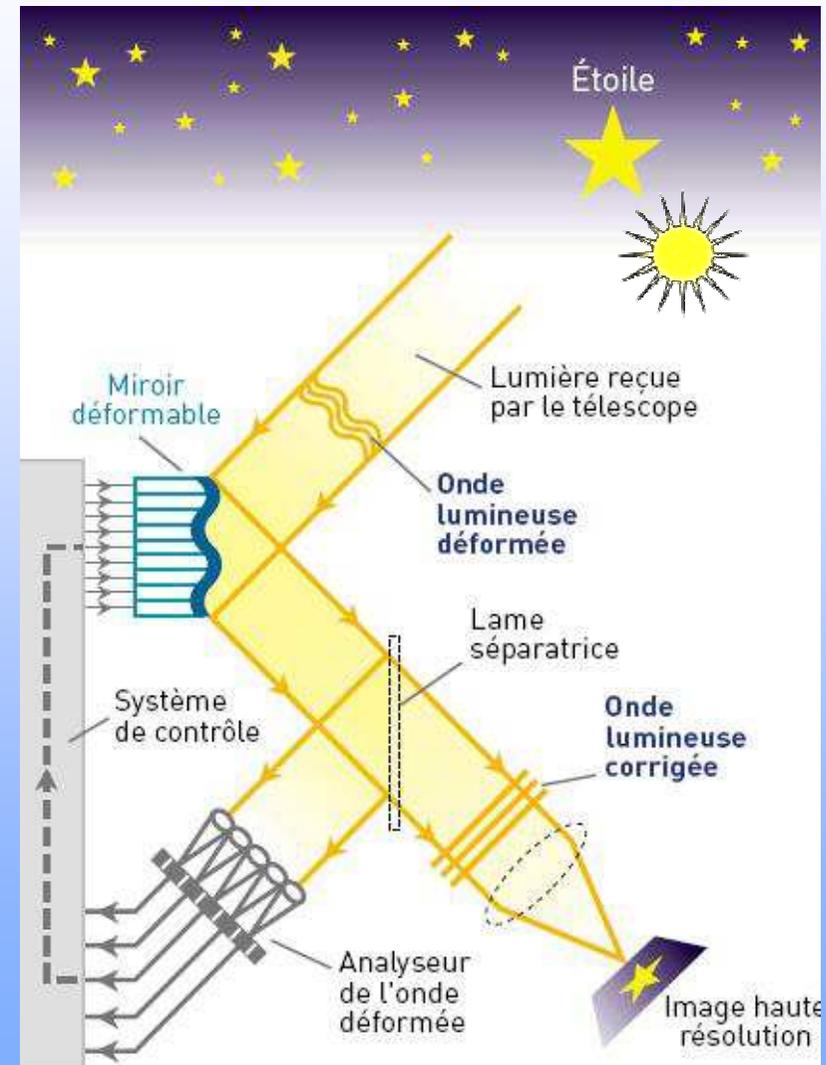
Optique active et adaptative

- Optique adaptative
 - Plutôt **boucle fermée**
 - Fréquence de rafraichissement < 10 millisecondes !
 - Correction par un miroir dédié
 - Optiques supplémentaires
 - Senseurs de front d'onde
 - Shack-Hartmann
 - Senseur de courbure
 - Pyramidal



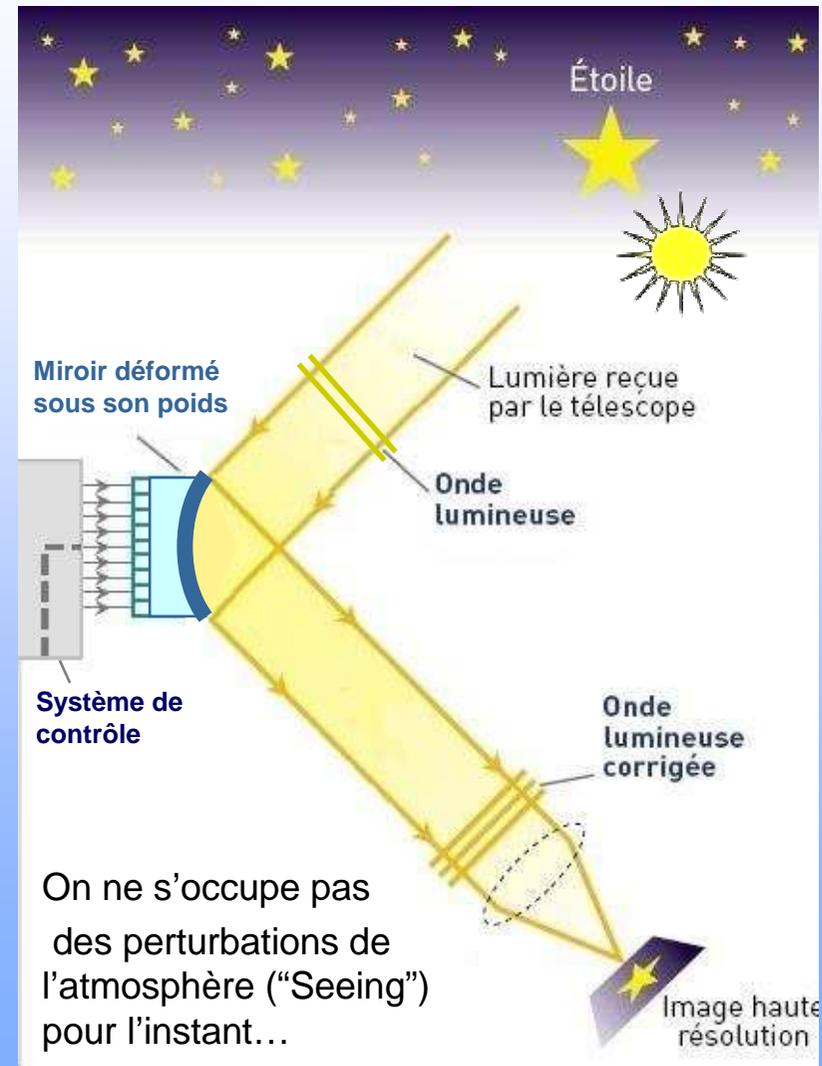
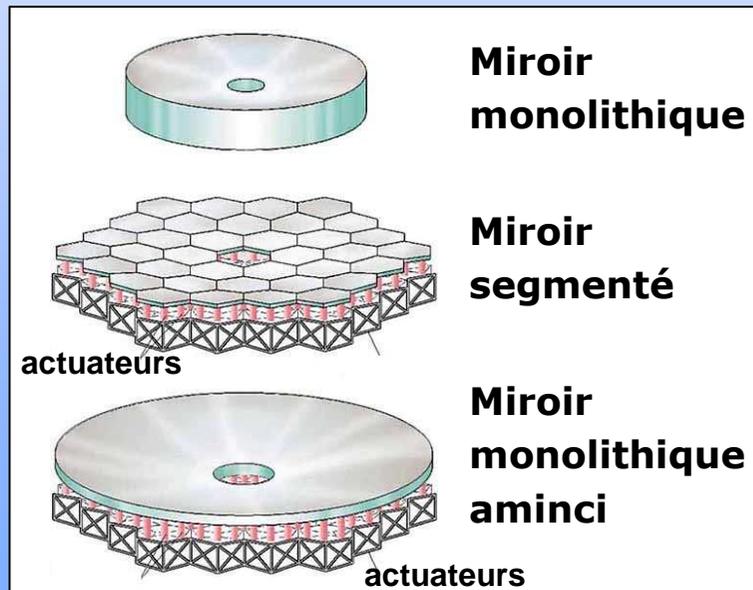
Miroir déformable continu

Miroir déformable segmenté

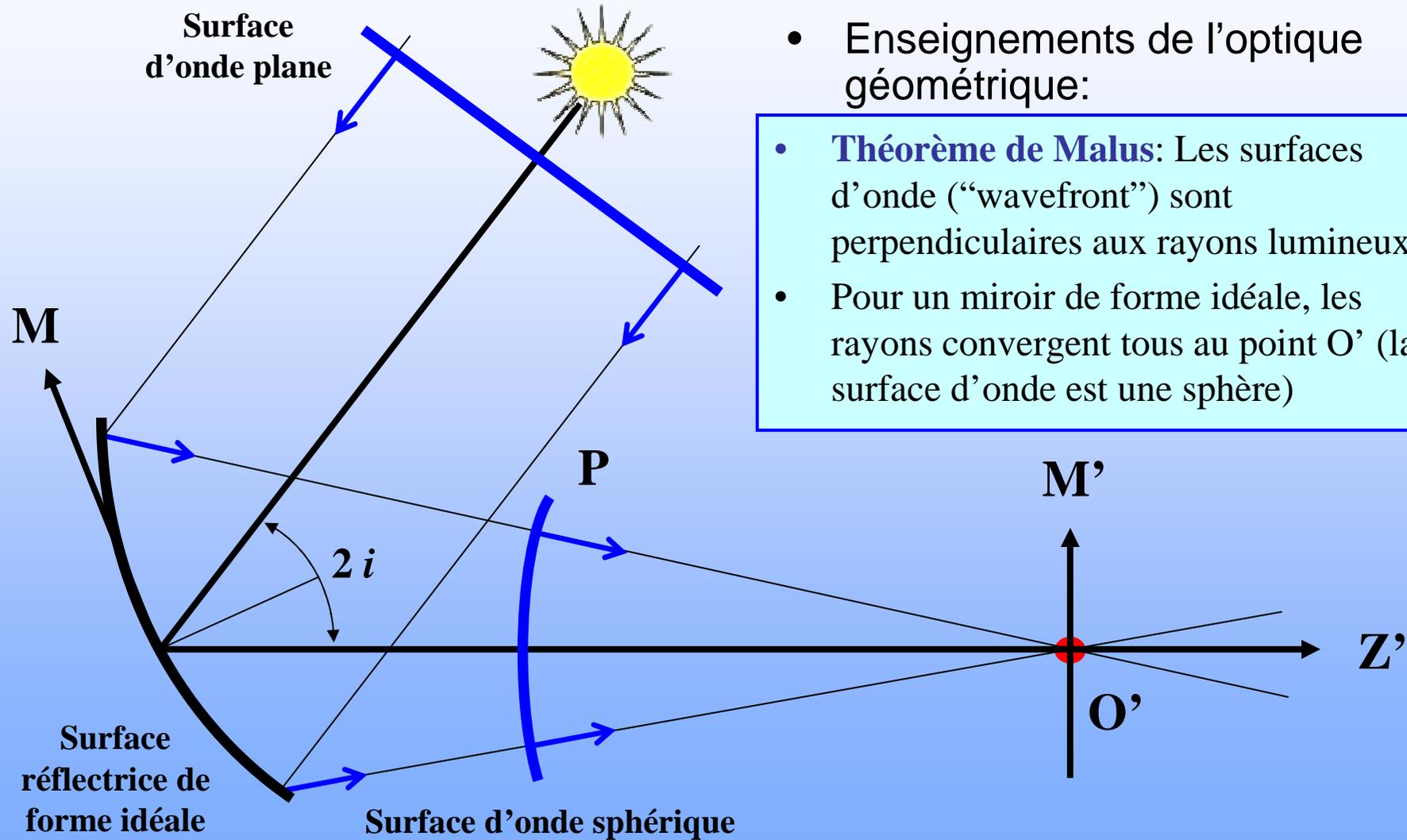


Optique active et adaptative

- Optique active
 - Plutôt en **boucle ouverte**
 - Fréquence de rafraîchissement \approx quelques minutes
 - Correction sur le miroir lui-même
 - Pas d'optiques supplémentaires



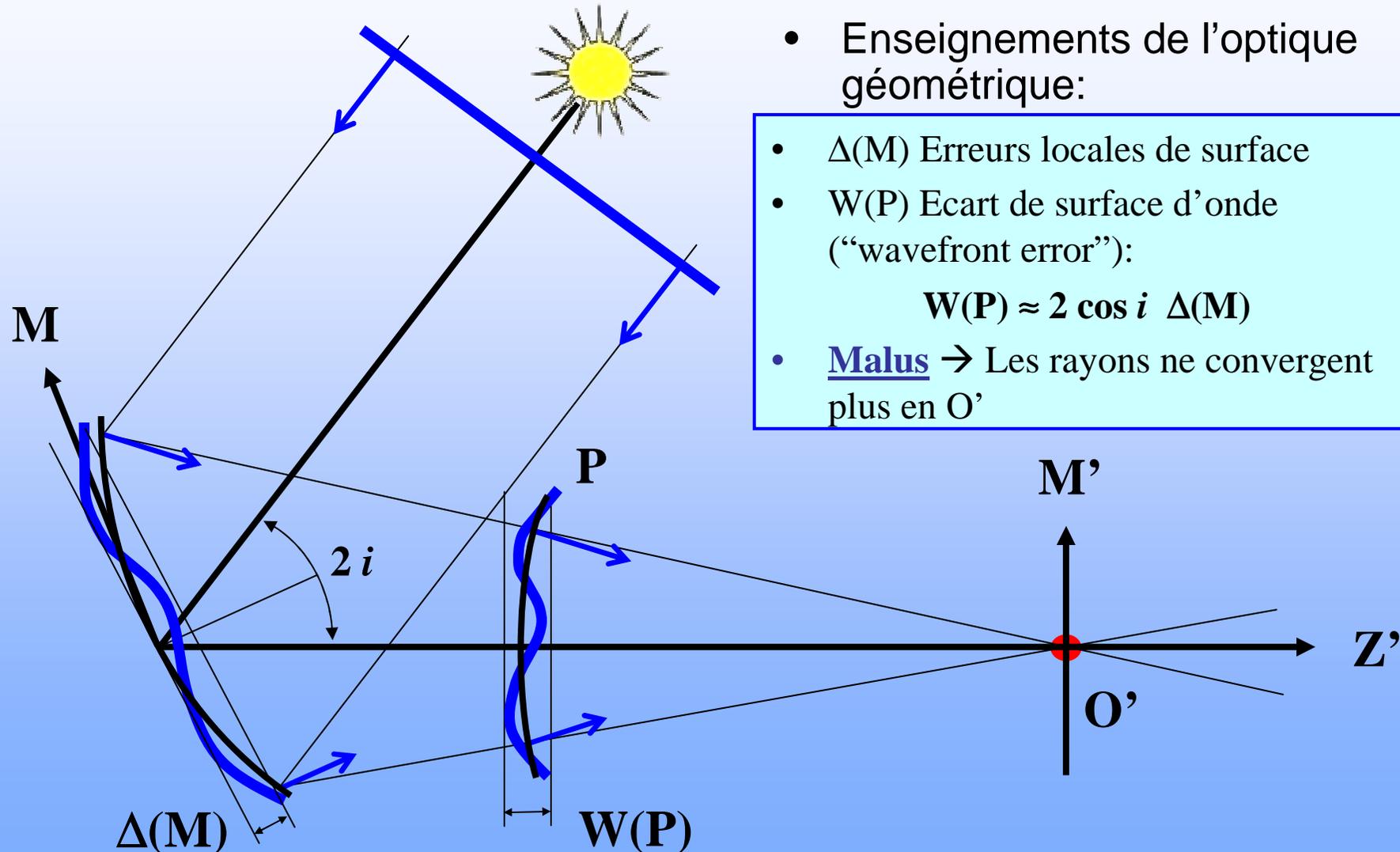
Optique adaptative - Principe général



- Enseignements de l'optique géométrique:

- **Théorème de Malus:** Les surfaces d'onde ("wavefront") sont perpendiculaires aux rayons lumineux
- Pour un miroir de forme idéale, les rayons convergent tous au point O' (la surface d'onde est une sphère)

Erreurs de surface sur un miroir



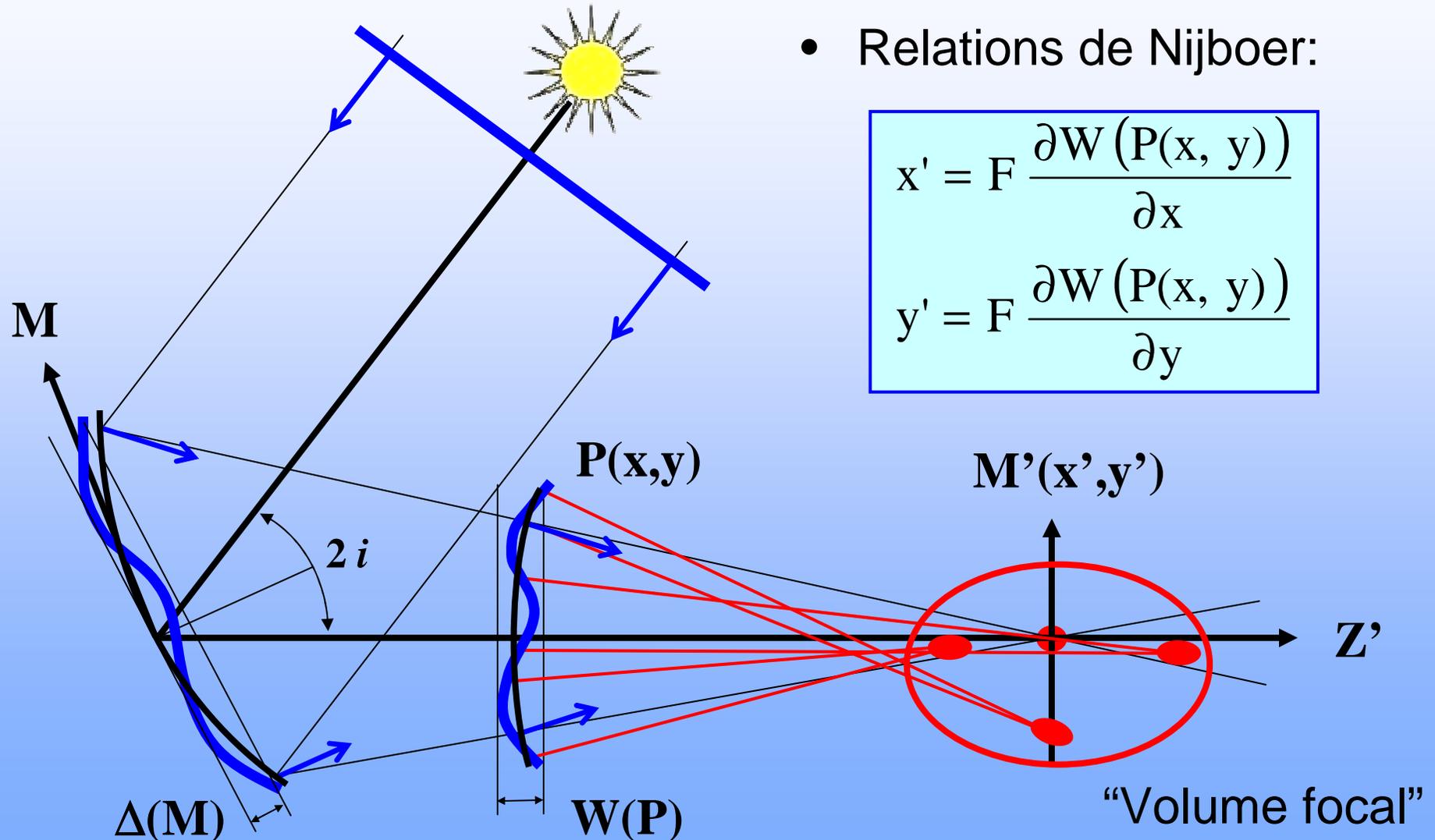
- Enseignements de l'optique géométrique:

- $\Delta(M)$ Erreurs locales de surface
- $W(P)$ Ecart de surface d'onde ("wavefront error"):

$$W(P) \approx 2 \cos i \Delta(M)$$

- Malus \rightarrow Les rayons ne convergent plus en O'

Erreurs de surface sur un miroir

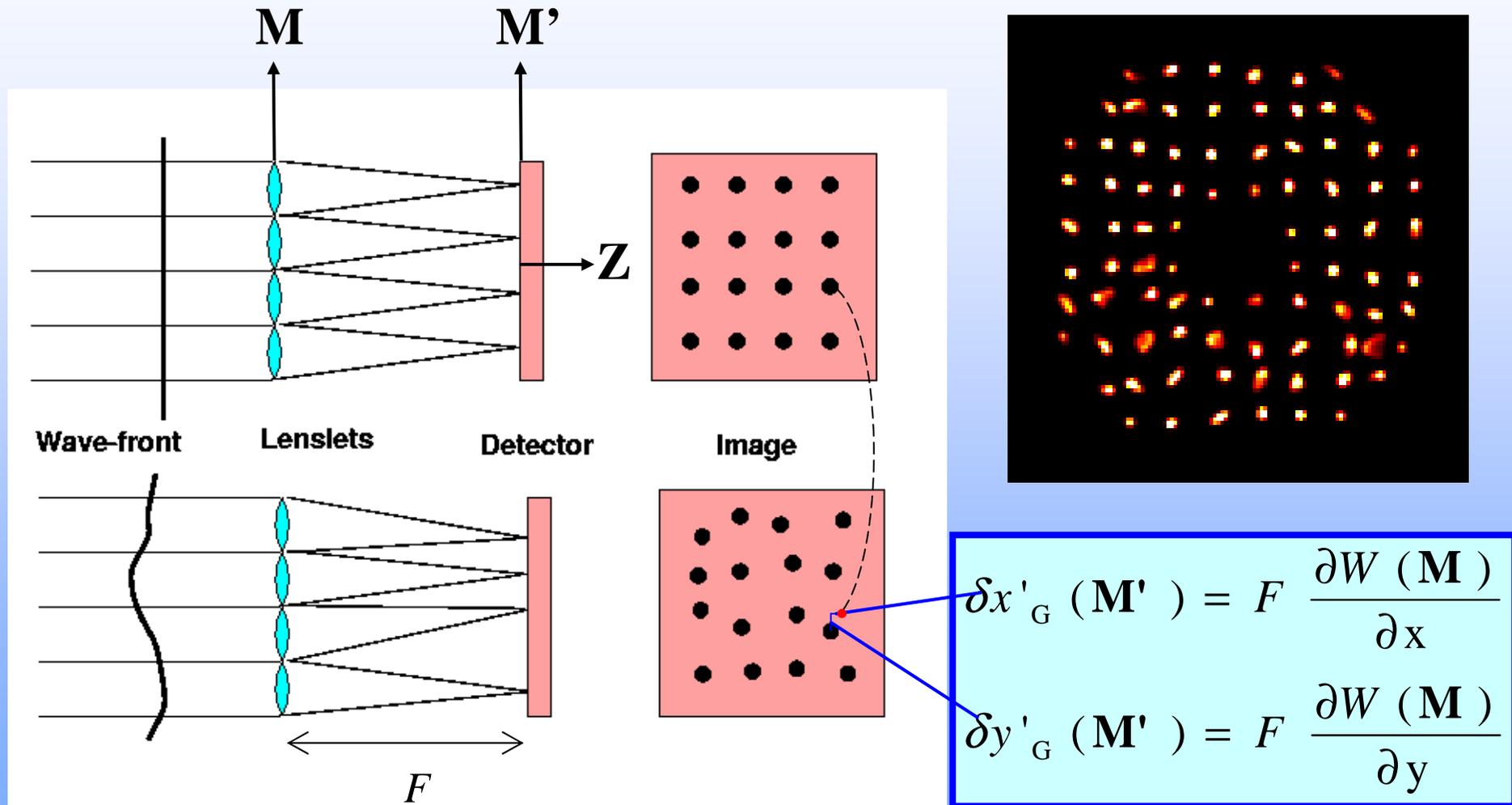


- Relations de Nijboer:

$$x' = F \frac{\partial W(P(x, y))}{\partial x}$$

$$y' = F \frac{\partial W(P(x, y))}{\partial y}$$

Senseur de front d'onde Shack-Hartmann



Senseur de courbure

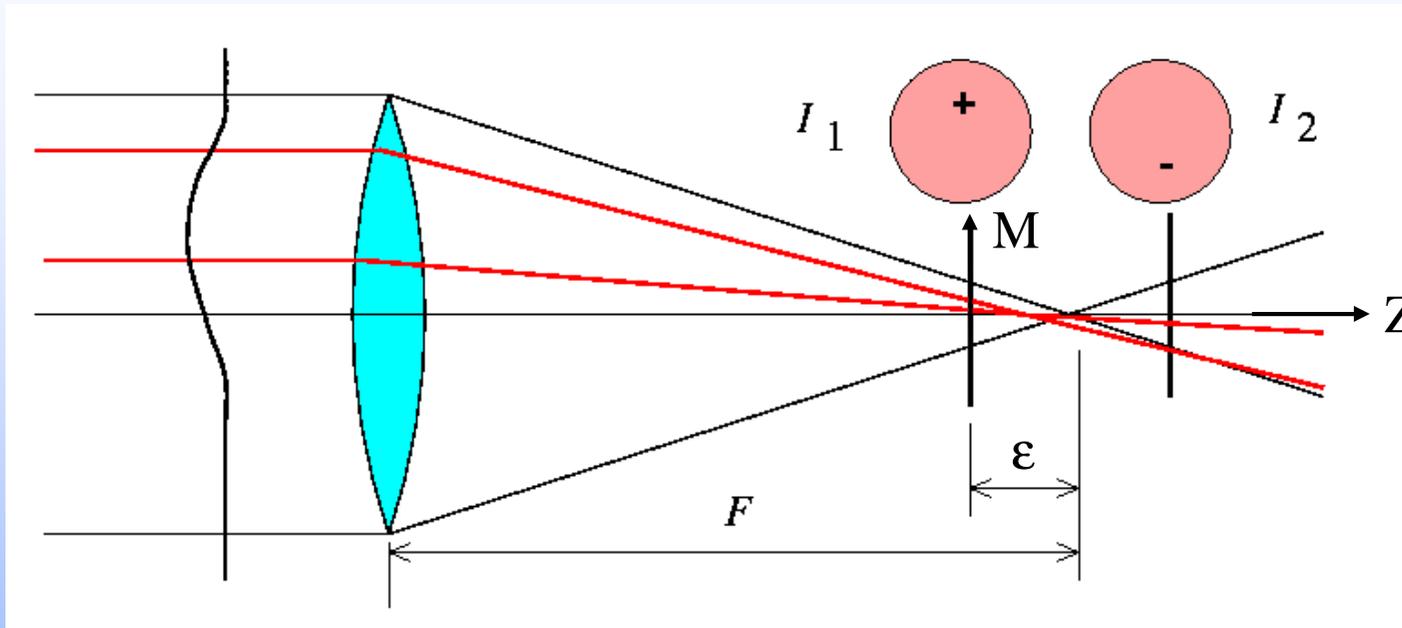


Image "intra-focus"

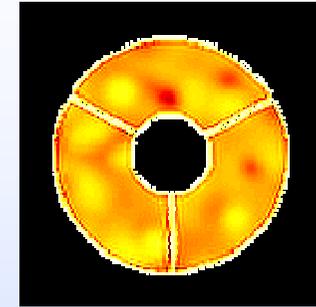
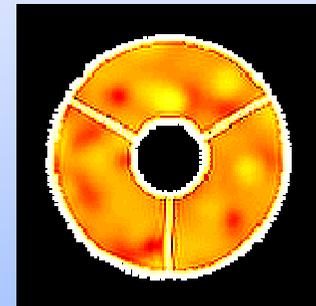


Image "extra-focus"



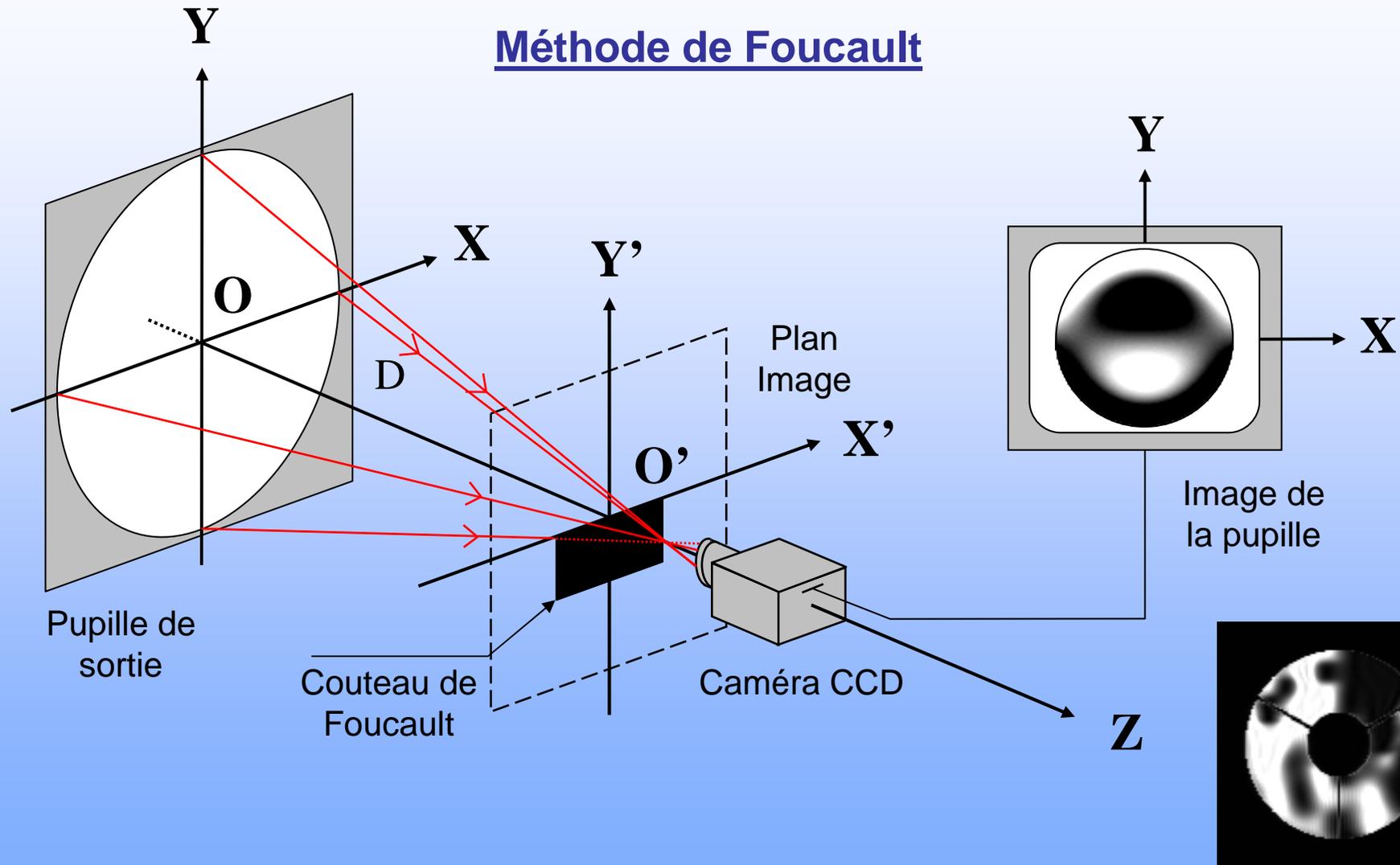
$$\frac{I_1(\mathbf{M}) - I_2(\mathbf{M})}{I_1(\mathbf{M}) + I_2(\mathbf{M})} = \frac{\lambda F(F - \varepsilon)}{2\pi \varepsilon} \left[\cancel{\delta_c(\mathbf{M}) \frac{\partial W(\mathbf{M})}{\partial r}} - B_R(\mathbf{M}) \left(\frac{\partial^2 W(\mathbf{M})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W(\mathbf{M})}{\partial y^2} \right) \right]$$

- D'après "l'équation de transport des éclaircements":

$$\partial E(\mathbf{M}) / \partial z = -[\nabla E(\mathbf{M}) \times \nabla W(\mathbf{M}) + E(\mathbf{M}) \times \nabla^2 W(\mathbf{M})]$$

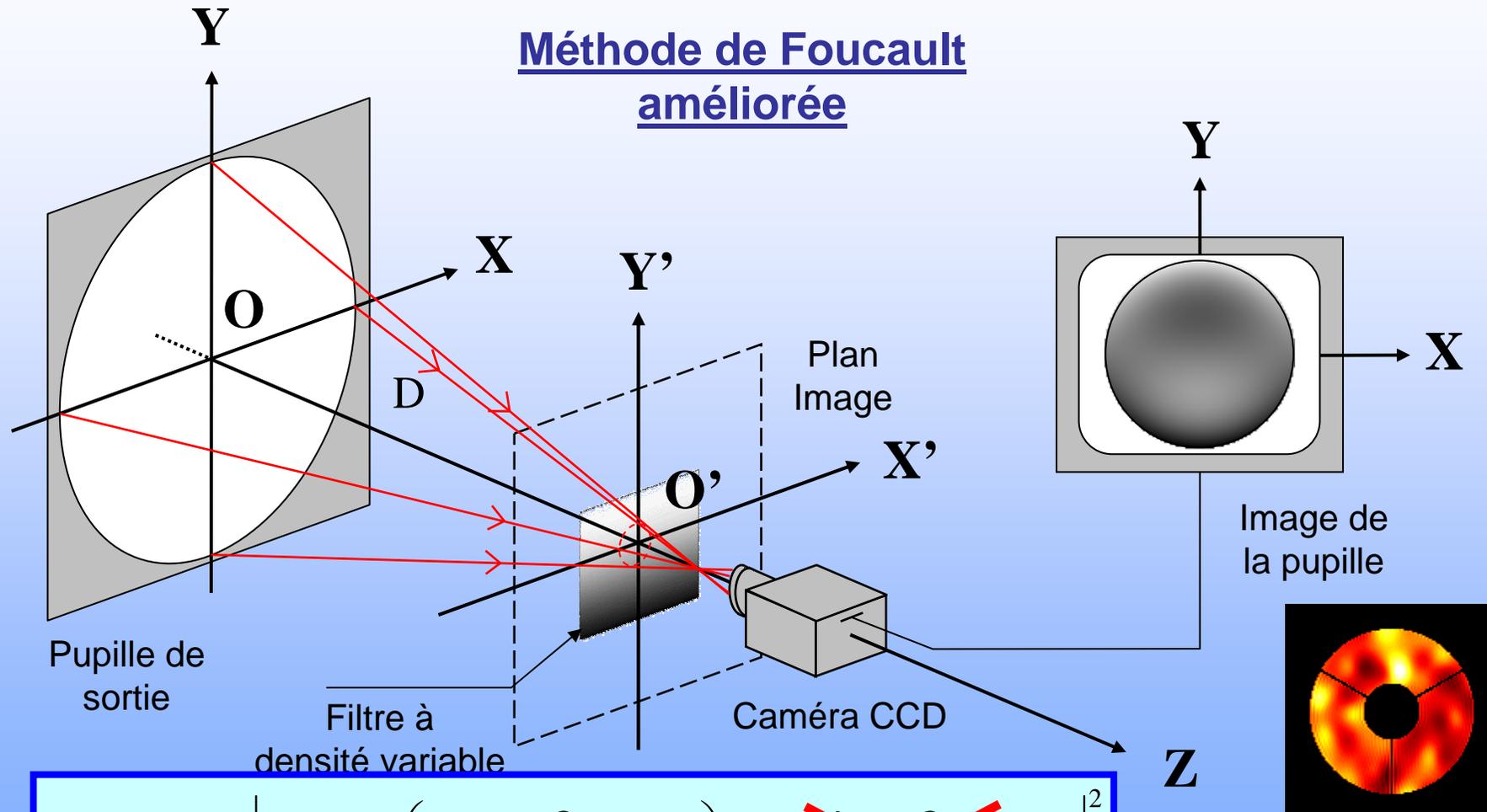
Senseur à différentiation optique (1/2)

Méthode de Foucault



Senseur à différentiation optique (2/2)

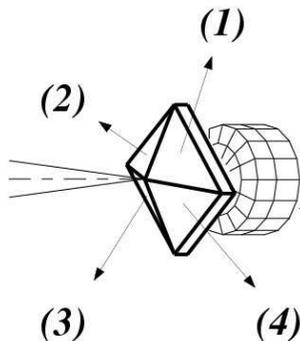
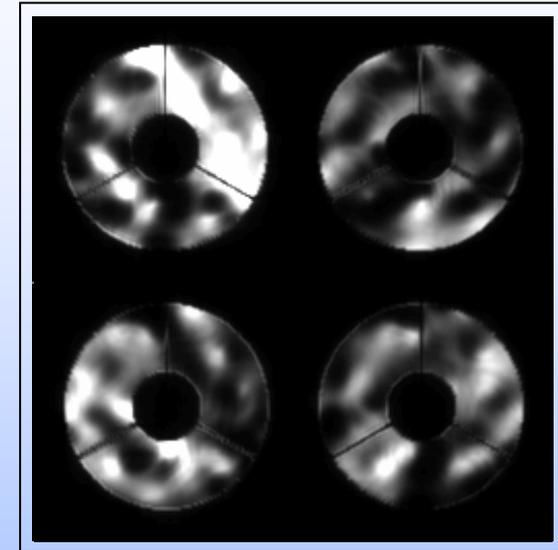
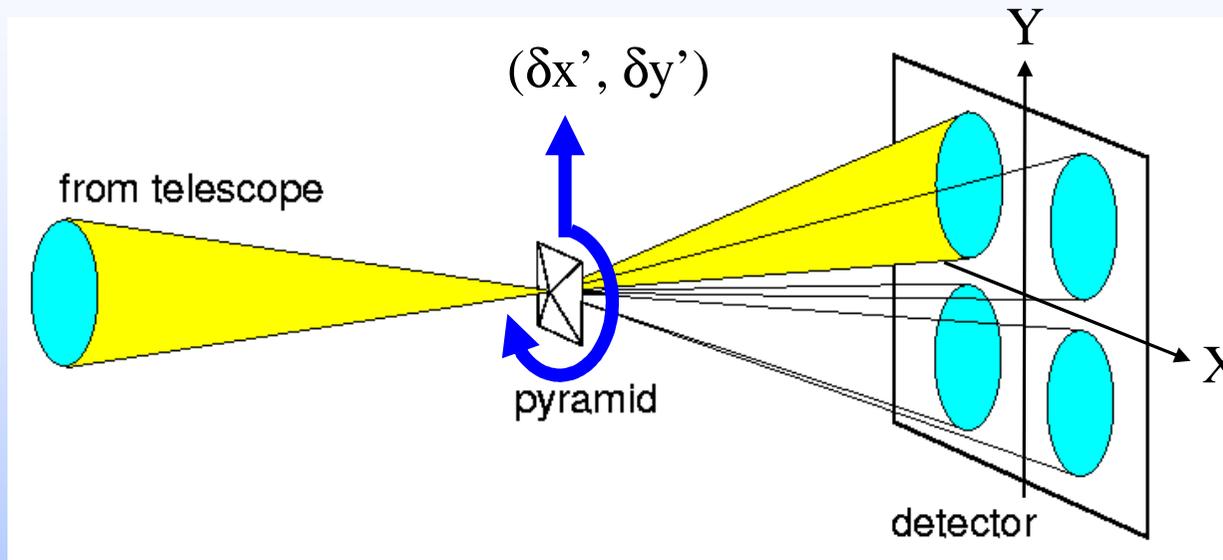
Méthode de Foucault améliorée



$$\bullet I_Y(\mathbf{M}) = \frac{1}{4} \left| B_R(\mathbf{M}) \left(1 + \frac{F}{y_1'} \frac{\partial W(\mathbf{M})}{\partial y} \right) - i \frac{\lambda F}{2\pi y_1'} \frac{\partial B_R(\mathbf{M})}{\partial y} \right|^2$$

on filters: theory and
p. 1917-1931 (2005)

Autre possibilité: senseur pyramidal



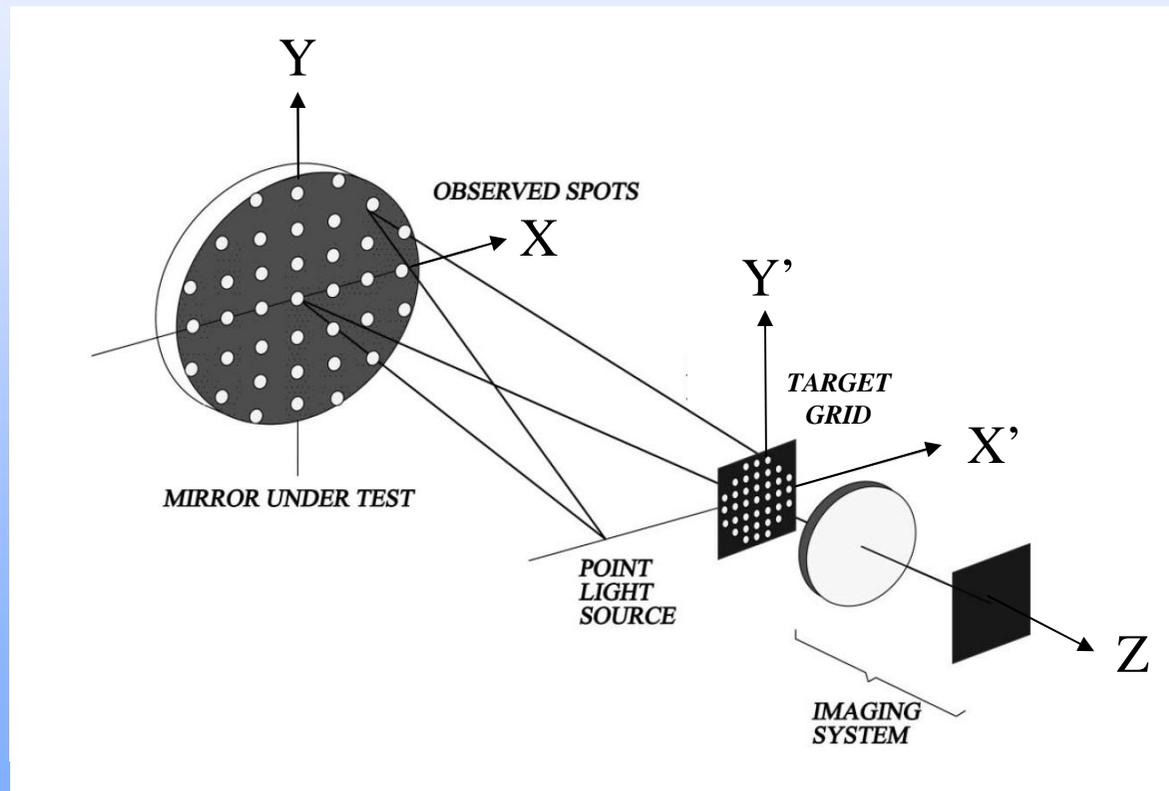
$$\frac{\partial W(\mathbf{M})}{\partial x} = g_x \frac{\delta x'}{F} \frac{\bar{S}_1(\mathbf{M}) - \bar{S}_2(\mathbf{M}) - \bar{S}_3(\mathbf{M}) + \bar{S}_4(\mathbf{M})}{\bar{S}_1(\mathbf{M}) + \bar{S}_2(\mathbf{M}) + \bar{S}_3(\mathbf{M}) + \bar{S}_4(\mathbf{M})}$$

$$\frac{\partial W(\mathbf{M})}{\partial y} = g_y \frac{\delta y'}{F} \frac{\bar{S}_1(\mathbf{M}) + \bar{S}_2(\mathbf{M}) - \bar{S}_3(\mathbf{M}) - \bar{S}_4(\mathbf{M})}{\bar{S}_1(\mathbf{M}) + \bar{S}_2(\mathbf{M}) + \bar{S}_3(\mathbf{M}) + \bar{S}_4(\mathbf{M})}$$

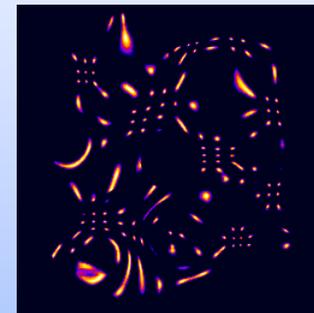
Formules du détecteur 4-quadrants

Test de Hartmann inversé

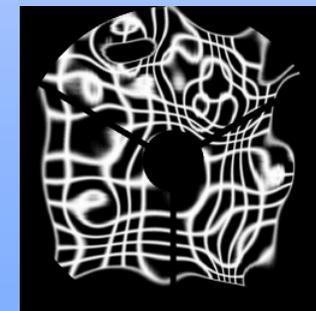
- Peu connu et utilisé, presque encore un sujet de Recherche et Développement
- Lien de parenté avec la “déflectométrie” des surfaces concentratrices solaires



Avec une passoire



Avec une grille



Calculs de flux et concentration solaires

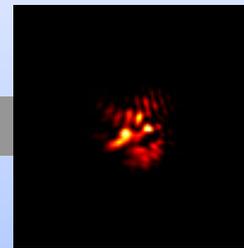
- Relation Objet-Image de l'optique classique
- Relation Objet-“Image” des concentrateurs solaires
- Introduction des erreurs optiques
- Pertes théoriques en concentration

Relation Objet-Image de l'optique classique

Objet

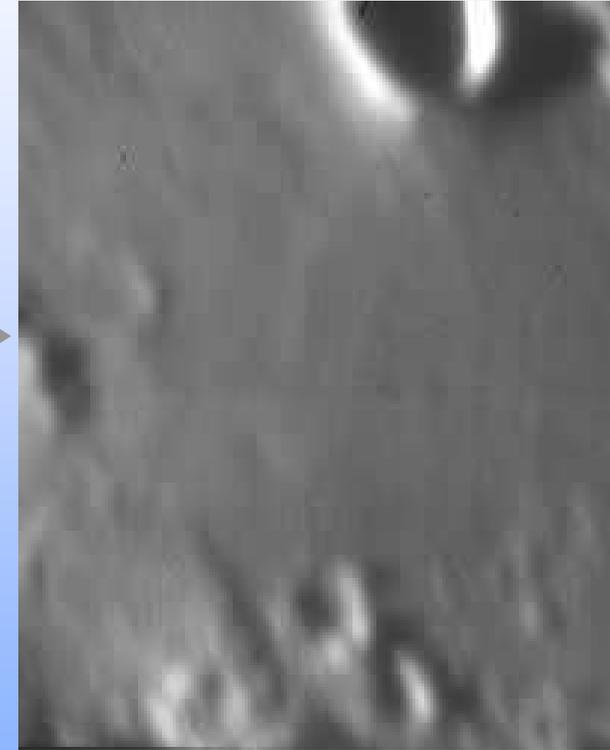


Image d'un point
(par ex. une étoile)



Réponse
impulsionnelle
("Point Spread
Function", PSF)

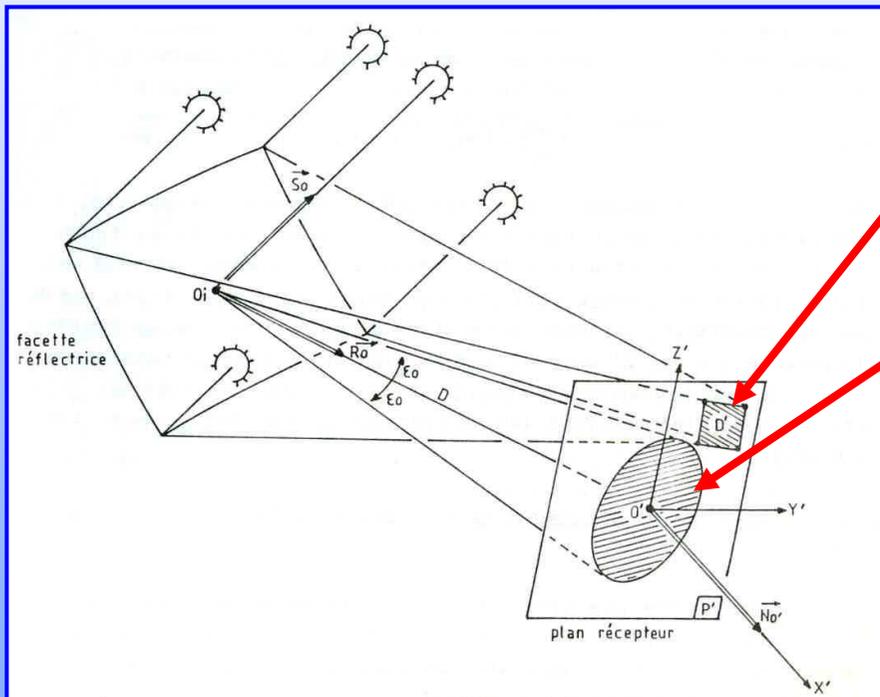
Image



$$\text{Objet}(M') * \text{PSF}(t, M') = \text{Image}(M')$$

Relations de convolution

- La “vue en trou d’épingle” de Lipps (1976) permet de retrouver la relation Objet/Image de l’optique classique
- → L’éclairement $E(t, M')$ formé sur le plan récepteur est un produit de convolution



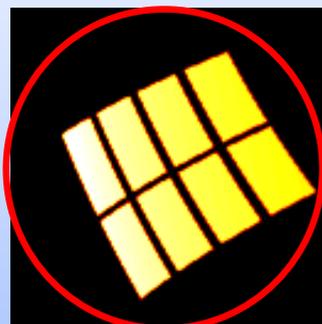
$$E(t, M') = L(M') * PSF(t, M')$$

- $PSF(t, M')$ est la réponse impulsionnelle géométrique de l'héliostat (Solei-point)
- $L(M')$ est la projection de la loi de luminance solaire $L(\varepsilon)$ sur le plan récepteur
- Seule la PSF dépend du temps t (fonction de la position du Soleil dans le ciel, cf. vue suivante)

F. Lipps, Solar Energy (1976)

Réponses impulsionnelles géométriques des héliostats

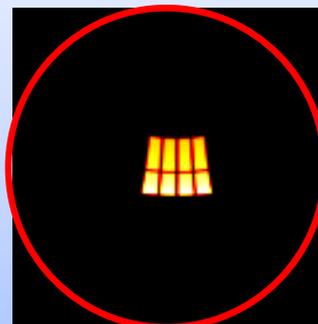
- Réponses impulsionnelles **géométriques** dans le plan de la chaudière, en fonction de la position du Soleil et de la distance héliostat-chaudière
- Calculées par tracé de rayons (par ex. Monte-Carlo) en supposant que le Soleil n'est qu'un point dans le ciel



09:00 GMT



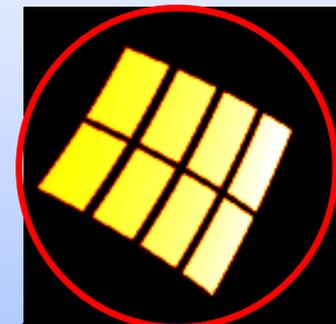
10:30 GMT



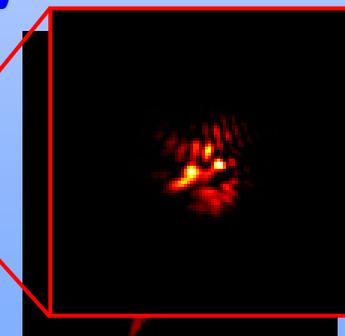
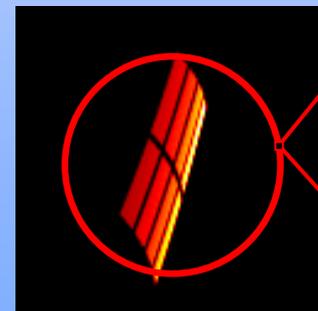
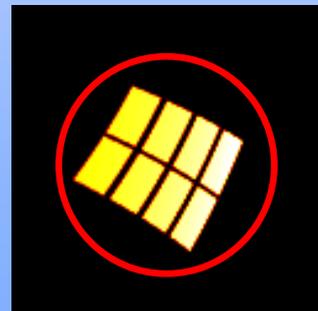
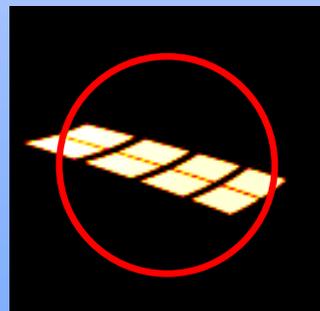
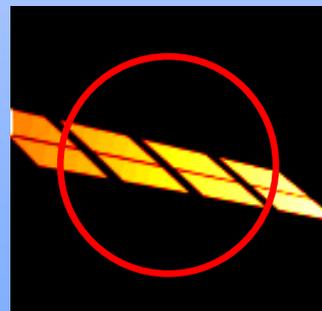
12:00 GMT



13:30 GMT



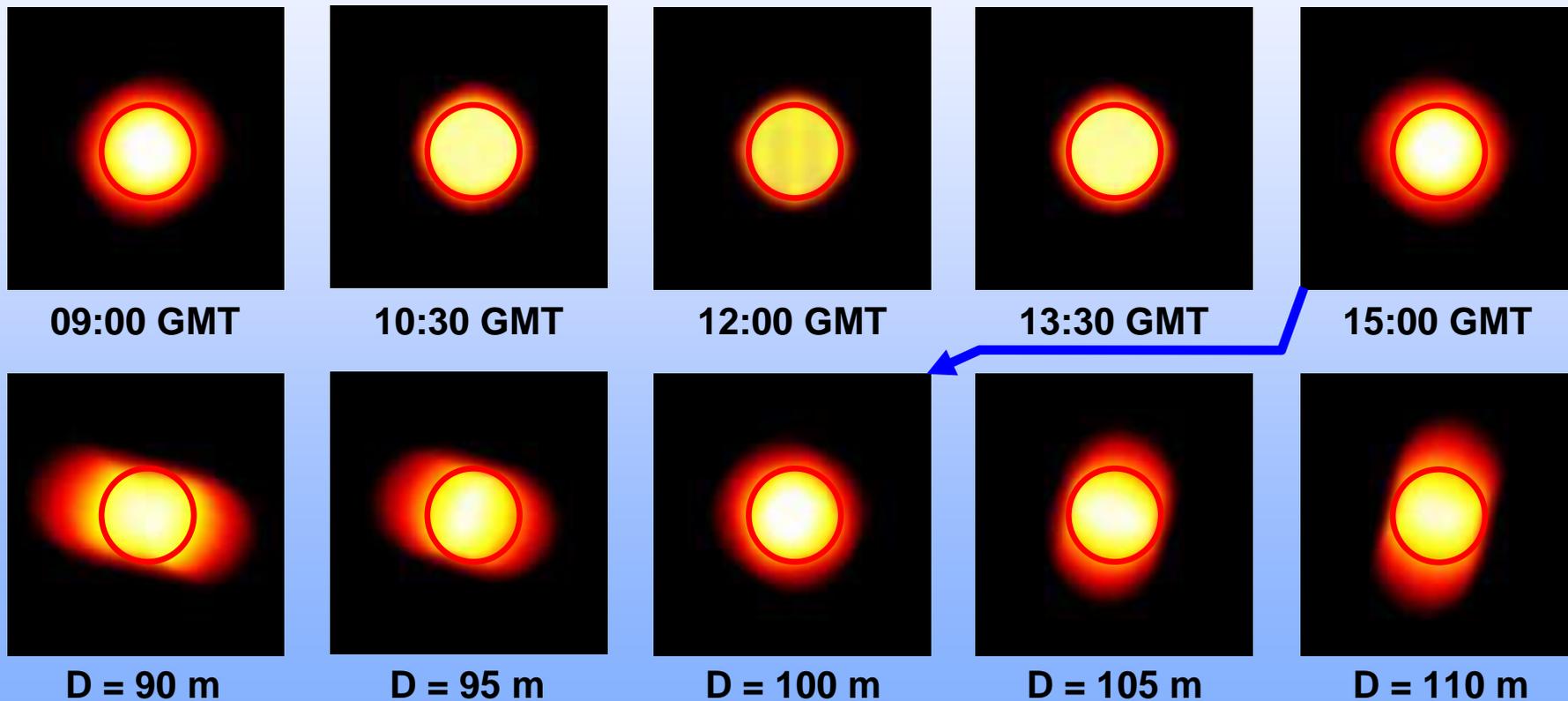
15:00 GMT



A cette échelle, la tache de diffraction est plus petite que l'épaisseur du trait rouge

Formation des “images” par les héliostats

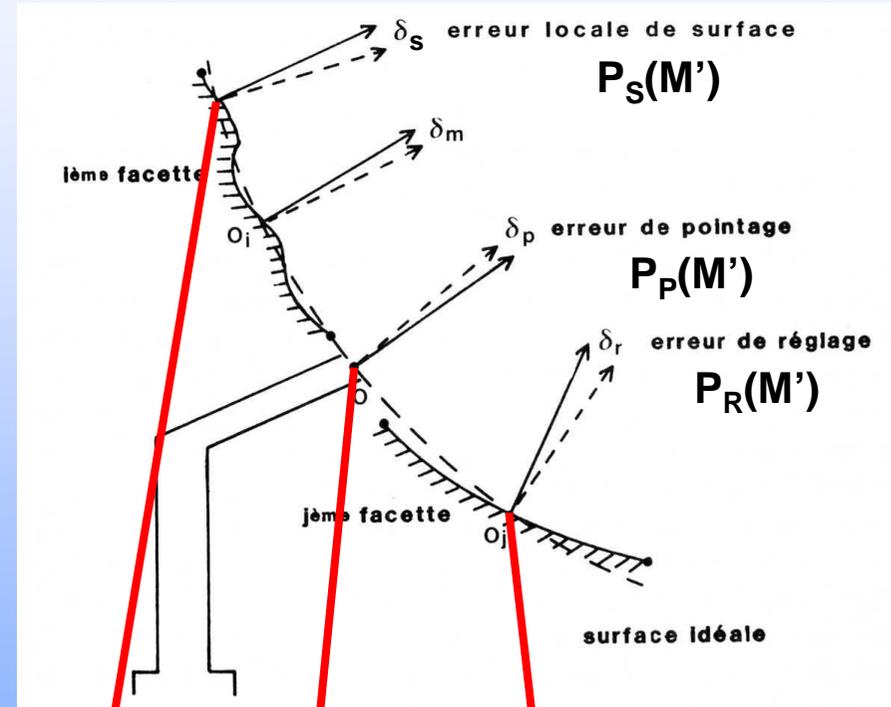
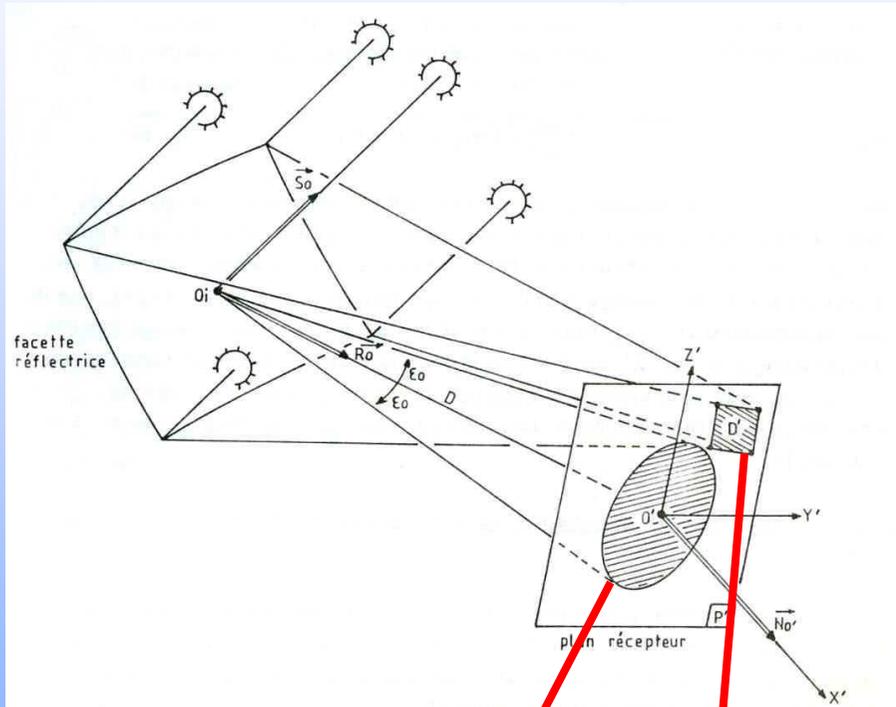
- **Taches-image** du Soleil dans le plan de la chaudière, en fonction de la position du Soleil dans le ciel et de la distance héliostat-chaudière



A cette échelle, la tache de diffraction est plus petite que l'épaisseur du trait rouge

Relations de convolution

- Cette relation de convolution peut être généralisée en rajoutant des “cônes d’erreur” $P_X(M')$ projetés dans le plan récepteur:



$$E(t, M') = L(M') * PSF(t, M') * P_S(M') * P_P(M') * P_R(M')$$

F. Hénault, Thèse de Docteur en Sciences, Université Paris XI Orsay (1987)

Introduction des erreurs optiques

- **Théorème de la Limite Centrale**: tout produit de convolutions multiples tend vers une loi normale → Aspect “Gaussien” des répartitions d'éclairement $E(t, M')$ mesurées au foyer des concentrateurs solaires
- Calculs de $E(t, M')$ **très** rapides en passant par l'espace de Fourier (les convolutions deviennent des multiplications)
- Si les cônes d'erreur $P_x(M')$ suivent des lois Gaussiennes (hypothèse la plus courante), leur combinaison est également Gaussienne, d'écart type δ égal à:

$$\delta = \sqrt{4\delta_S^2 + 4\delta_R^2 + \delta_P^2}$$

Erreurs de pointage

Erreurs locales de pente des surfaces

Erreurs de réglage

Pertes théoriques en concentration

- La relation de convolution permet de trouver une expression simplifiée des pertes en concentration en fonction de δ (fonction de Lorentz):

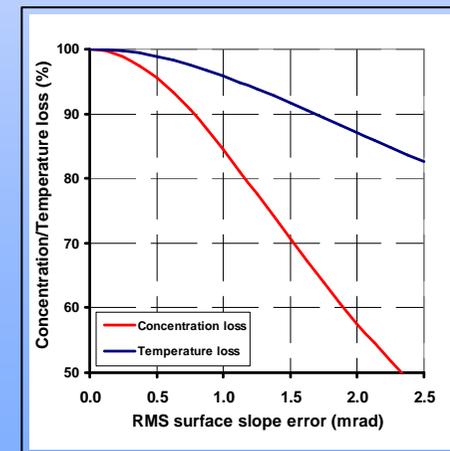
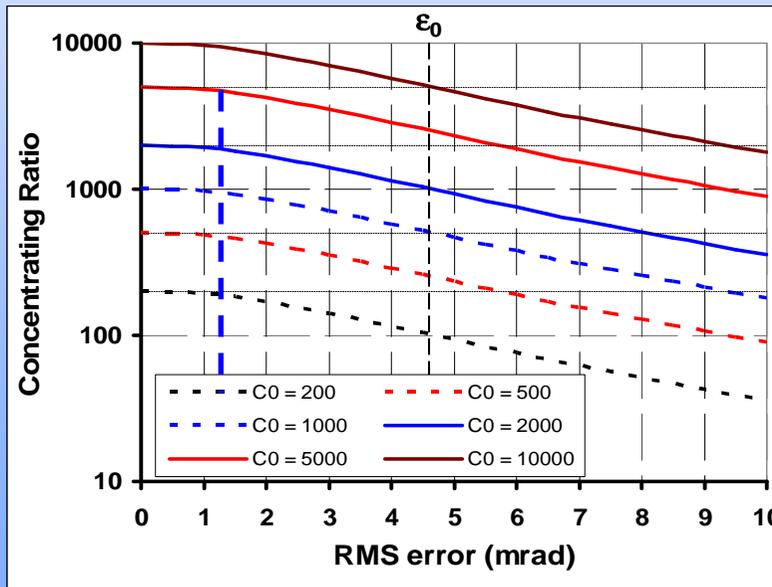
$$C = C_0 \int_{u=-\infty}^{+\infty} \int_{v=-\infty}^{+\infty} L(\mathbf{M}') P(\mathbf{M}') d\mathbf{M}' / L(\mathbf{0})$$

Concentration réelle

$$\eta = \frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + \delta^2 / \epsilon_0^2}$$

Concentration idéale
(sans erreurs optiques)

Rayon solaire
apparent



F. Hénault, Solar Energy (2015)

Analogie avec le rapport de Strehl

- En optique adaptative, le rapport de Strehl S est défini comme l'atténuation au centre de la PSF
- Limite de diffraction $\rightarrow S > 80\%$ équivalent à WFE $< \lambda/4$ PTV (Rayleigh)
ou WFE $< \lambda/13$ RMS (Maréchal)

$$S \approx 1 - \left(\frac{2\pi\sigma}{\lambda} \right)^2$$

Ecart-type
surface d'onde

Longueur
d'onde

$$\eta \approx 1 - \delta^2 / \varepsilon_0^2$$

Ecart-type pentes
surface d'onde
(écarts aberrants)

Rayon
angulaire soleil

| Synthèse | Erreurs surface d'onde RMS (*) | Erreurs pentes RMS | Coût typique (Euros) |
|-----------------------|--|---|----------------------|
| Concentrateur solaire | $< 0.1 \text{ mm}$ | $< 1 \text{ mrad}$ | $x 10^4$ |
| Télescope Cerenkov | $< 0.1 \text{ mm ?}$ | $< 1 \text{ mrad ?}$ | $y 10^6$ |
| Télescope optique | $< \lambda/13$ (**) | $< \lambda/2D$ | $z 10^8$ |

Largement inférieur à $0.1 \mu\text{m}$!

(*) Dépend de l'échelle spatiale
(**) Critère de Maréchal

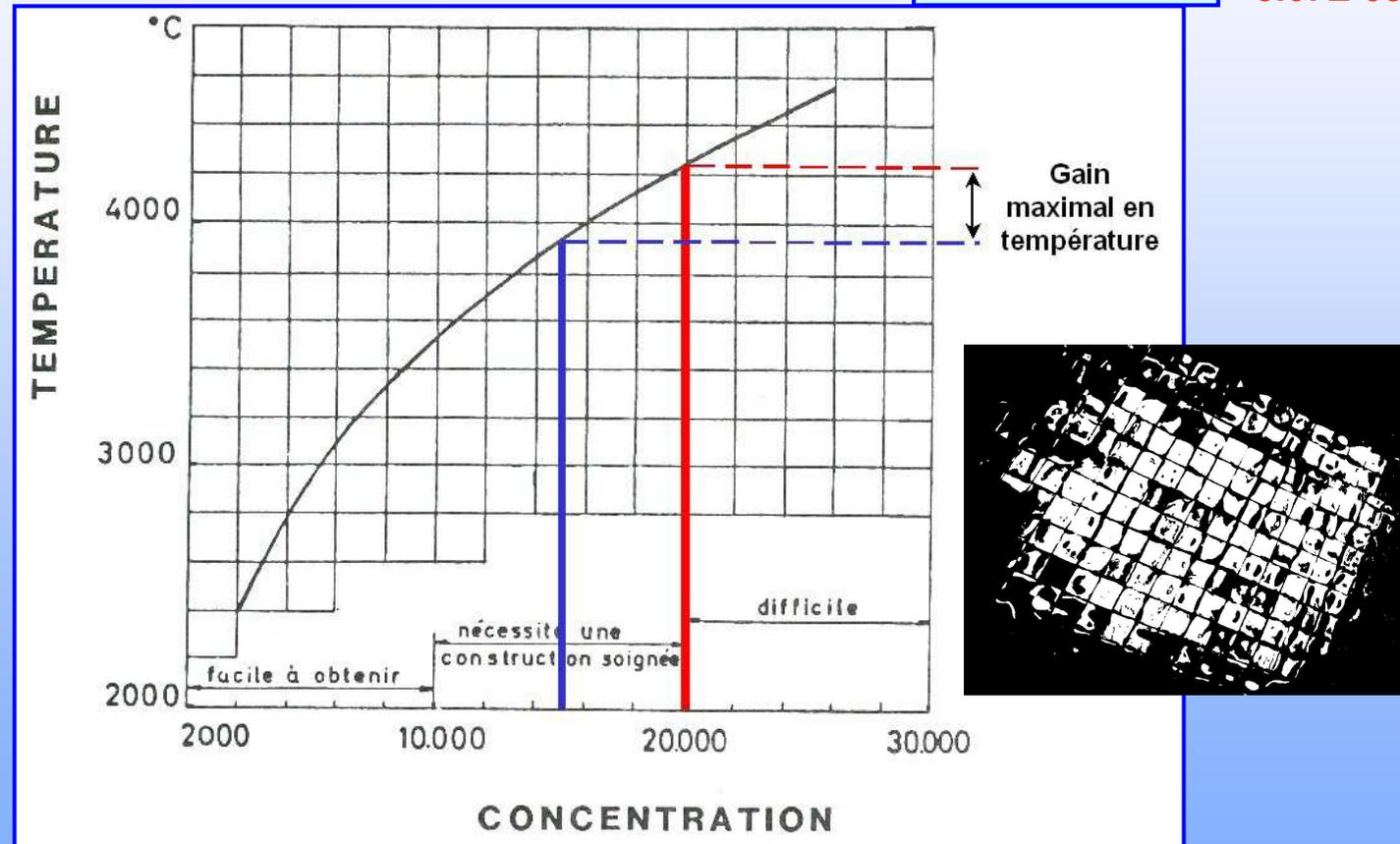
Largement inférieur au μrad !

Relation Concentration/Température

- La loi de Stefan est dure, mais c'est la loi...

$$T = \sqrt[4]{\frac{\eta C_0 E_0}{\sigma}}$$

← DNI
← 5.67E-08

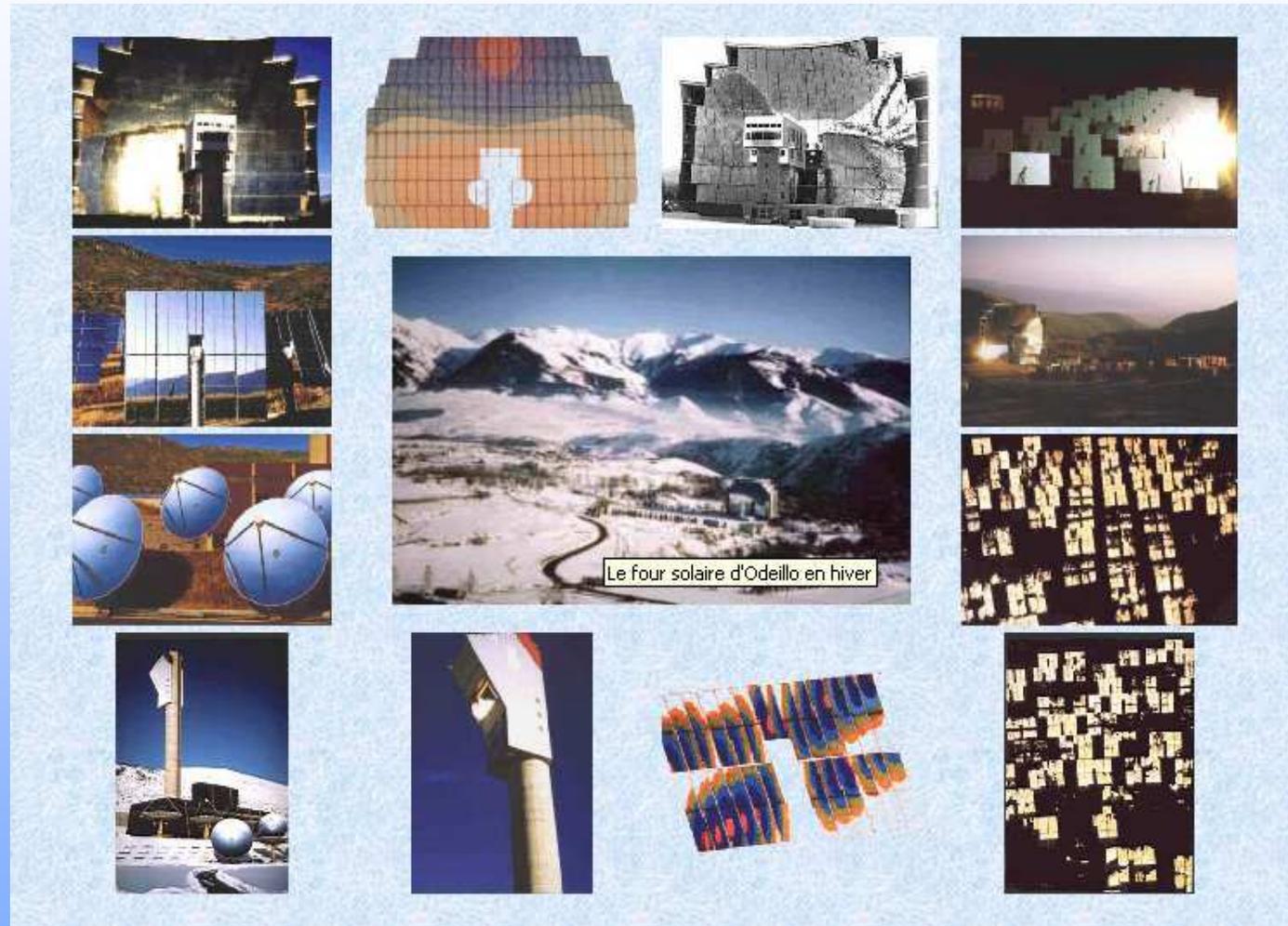


F. Trombe, A. Le Phat Vinh, in *Cahiers de l'AFEDES* n°3 (1971)

Contrôle et optimisation de concentrateurs solaires par la méthode de “rétrovisée”

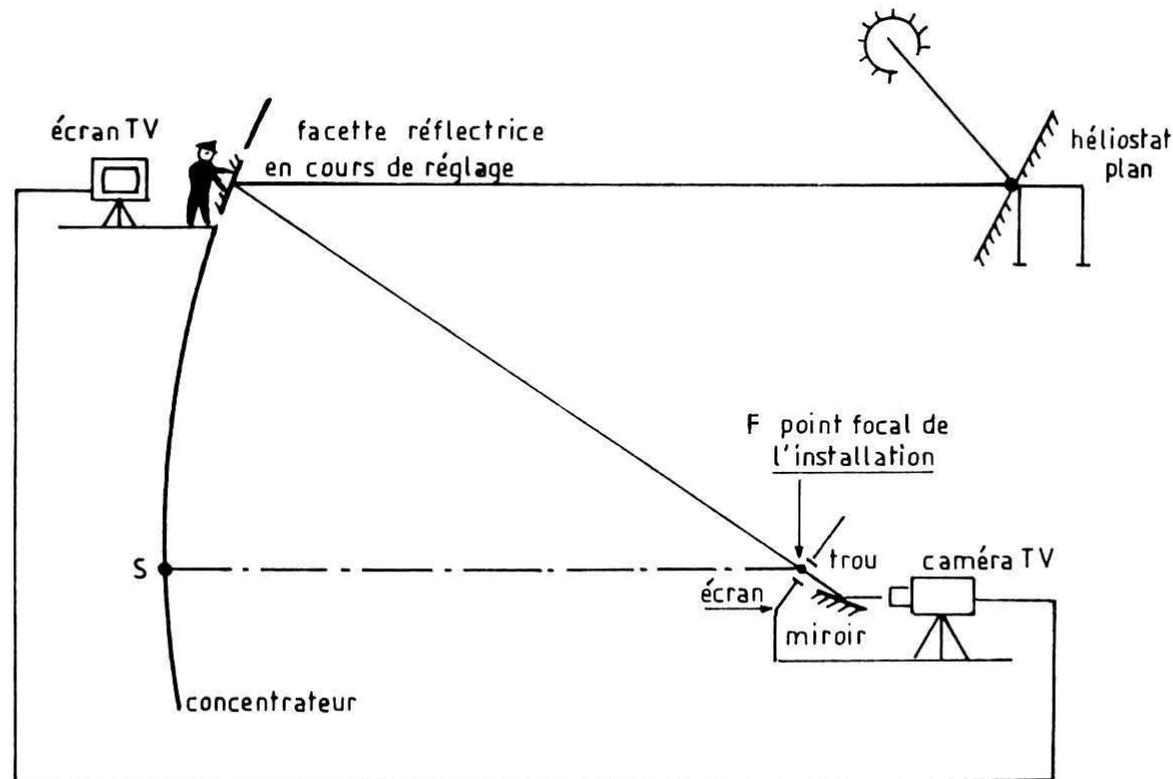
Collaboration IPAG – PROMES
(Four solaire d'Odeillo, laboratoire INSIS)

Petit voyage dans les Pyrénées-Orientales



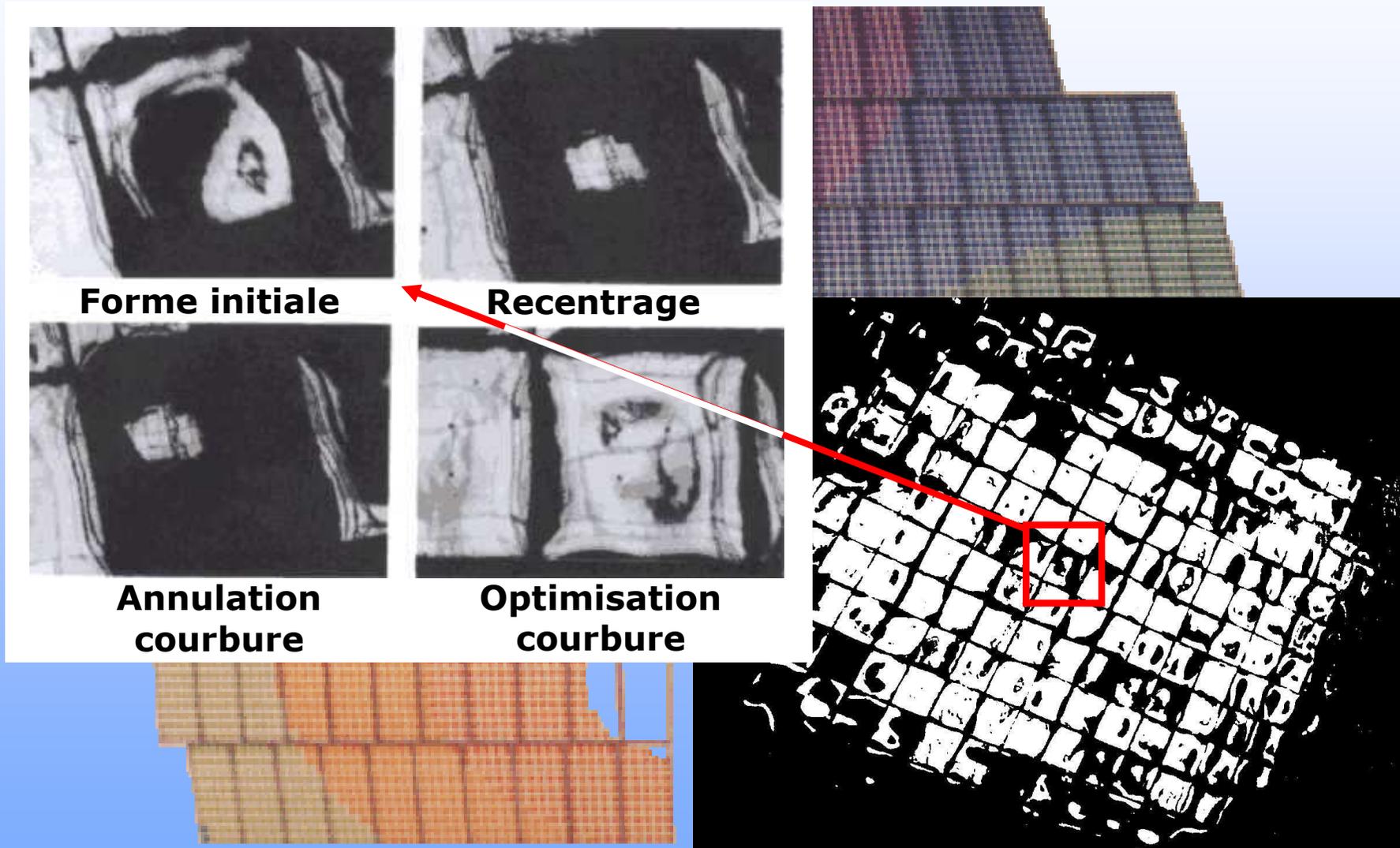
- <http://francois.henault.free.fr/odeillo/odeillo.htm>

Principe de la méthode de “rétrovisée”

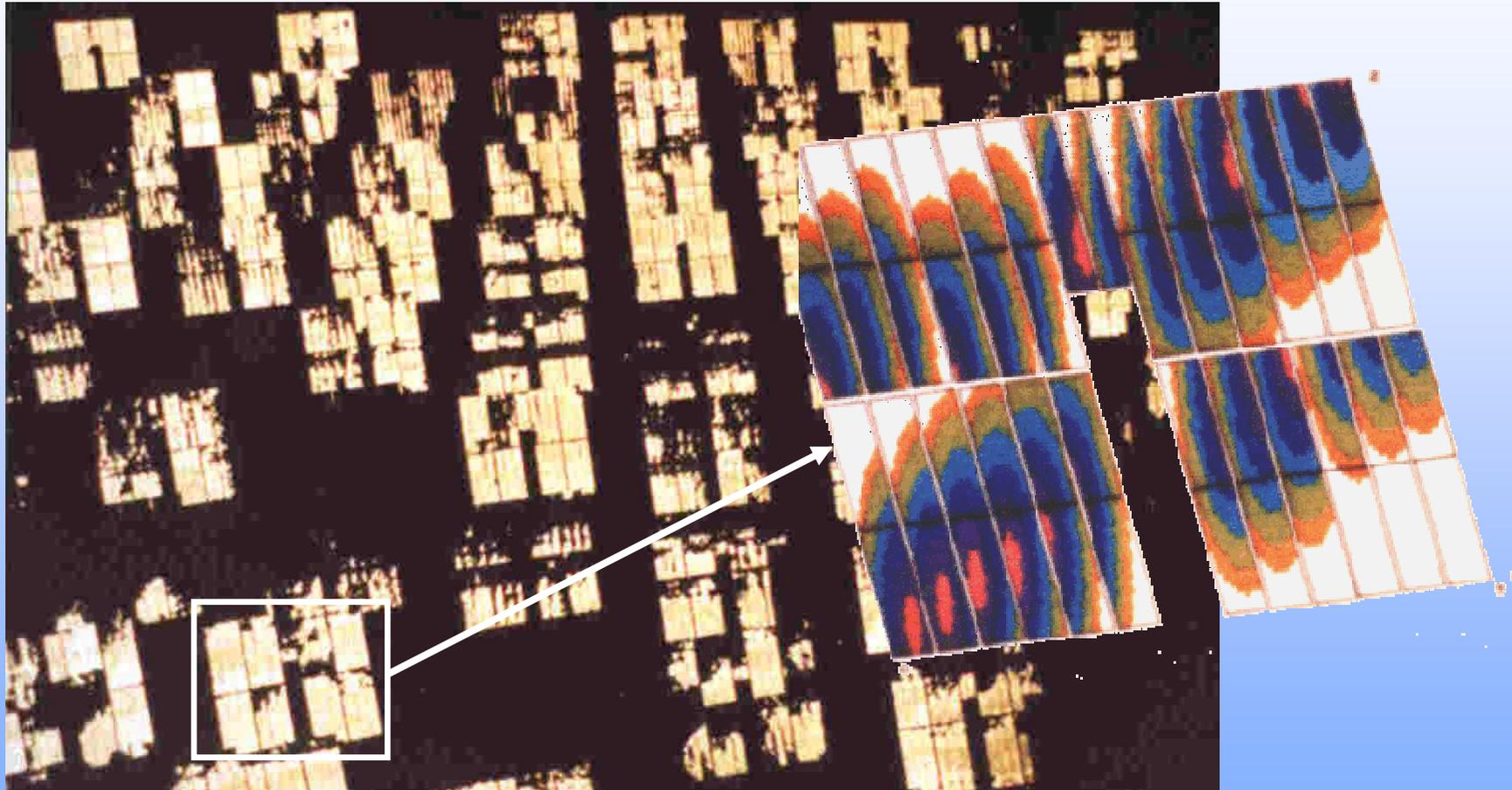


- F. Hénault, C. Royère, “Concentration du rayonnement solaire: analyse et évaluation des réponses impulsionnelles et des défauts de réglage de facettes réfléchissantes,” Journal of Optics vol. 20, p. 225-240 (1989)

Application au concentrateur parabolique d'Odeillo



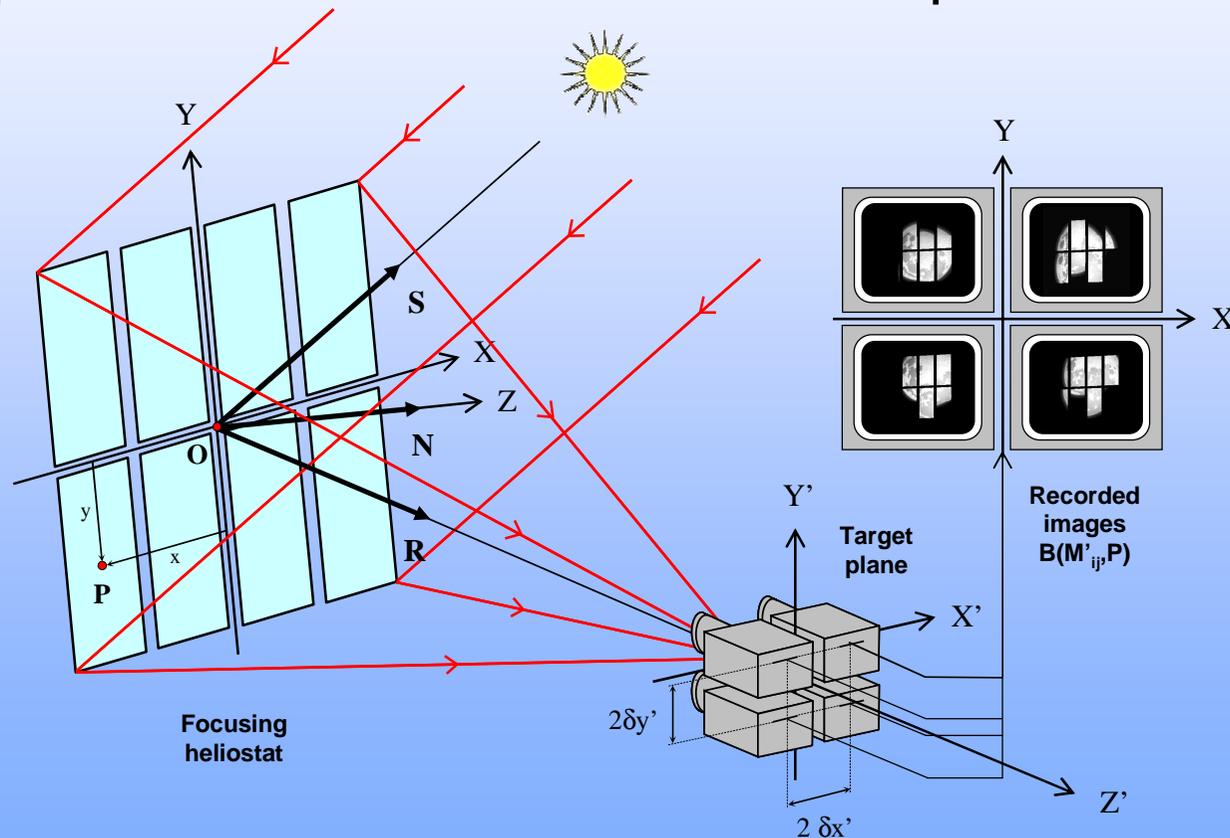
“Tir sur la lune” à la centrale THEMIS



- Nuit de pleine lune sans éclipse, du 05 au 06 février 1985

La méthode de rétrovisée aujourd'hui

- L'utilisation simultanée de quatre caméras (ou plus !) permet d'effectuer des mesures quantitatives précises



**Thèses en
cours au
PROMES
Odeillo**

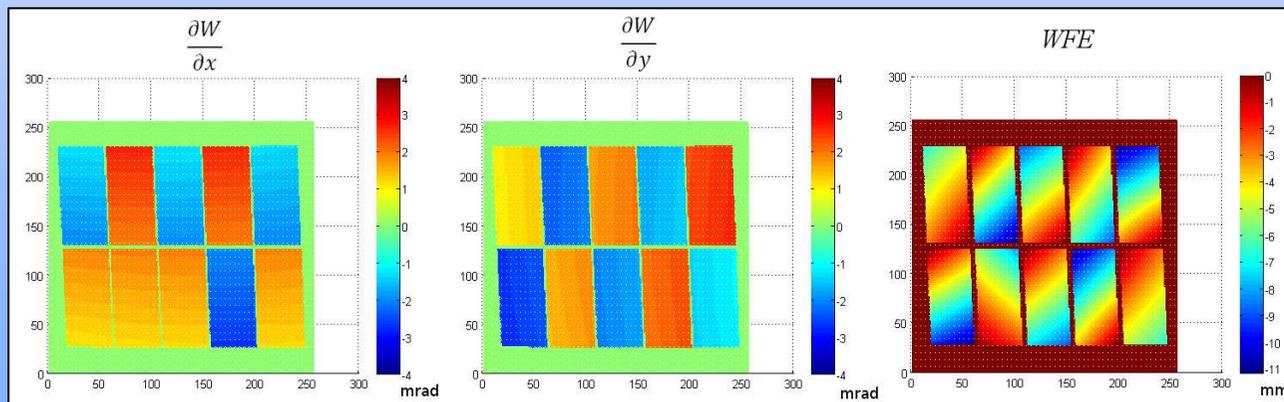
Coquand, Hénault & Caliot, Applied Optics (2017)

La méthode de rétrovisée aujourd'hui

- **1ère étape:** Mesure des pentes du front d'onde à partir des images et de la loi de luminance solaire $L(\varepsilon)$ –
[Rappelez-vous du § 3.1.3]

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial W(P)}{\partial x} \\ \frac{\partial W(P)}{\partial y} \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} \frac{K_{22}(P) + K_{21}(P) - K_{12}(P) - K_{11}(P)}{8\delta x'} \\ \frac{K_{22}(P) - K_{21}(P) + K_{12}(P) - K_{11}(P)}{8\delta y'} \end{pmatrix}$$

Formule des 4-quadrants généralisée basée sur la fonction $K(P) = [L^{-1}(\varepsilon(P))]^2$



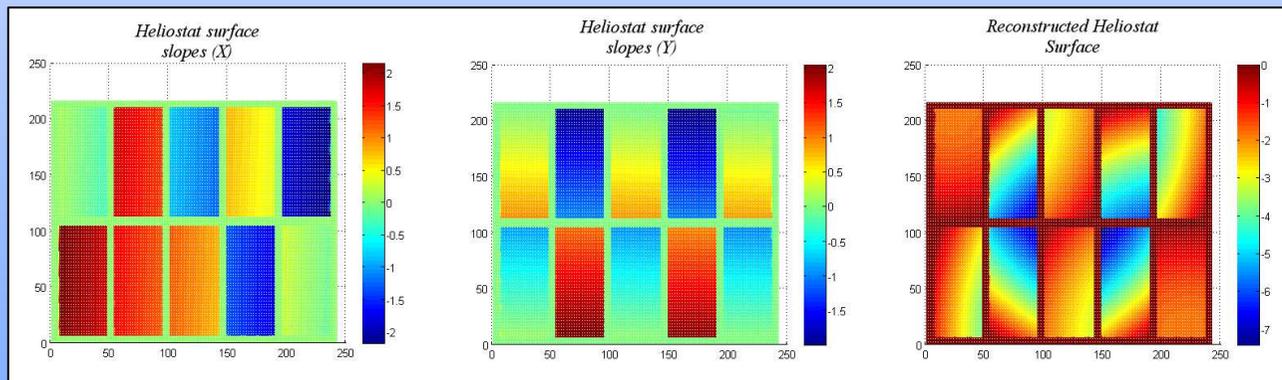
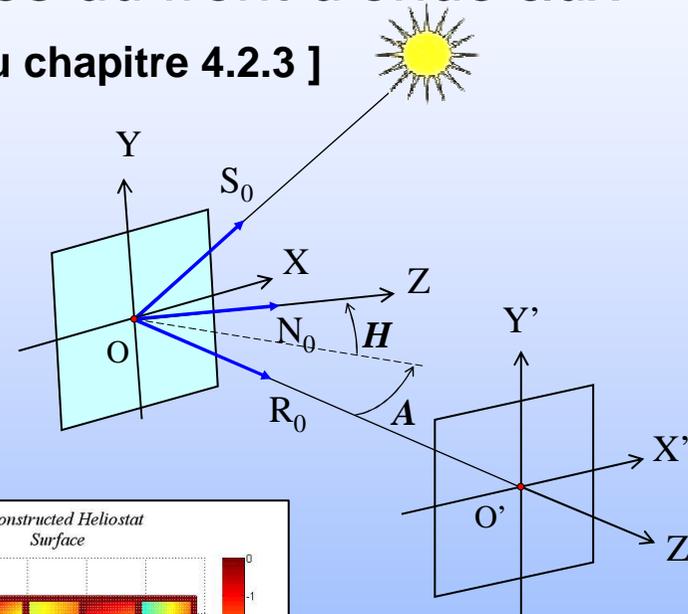
Précision de mesure
< 0.01 mrad

Coquand, Hénault & Caliot, Applied Optics (2017)

La méthode de rétrovisée aujourd'hui

- **2ème étape:** Passage des pentes du front d'onde aux pentes du miroir – [Rappelez-vous du chapitre 4.2.3]

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \Delta(P)}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta(P)}{\partial y} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\cos H} & -\tan A \tan H \\ 0 & \frac{1}{\cos A} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial W(P)}{\partial x} \\ \frac{\partial W(P)}{\partial y} \end{pmatrix}$$



Précision de mesure
~ 0.04 mrad

Coquand, Hénault & Caliot, Applied Optics (2017)

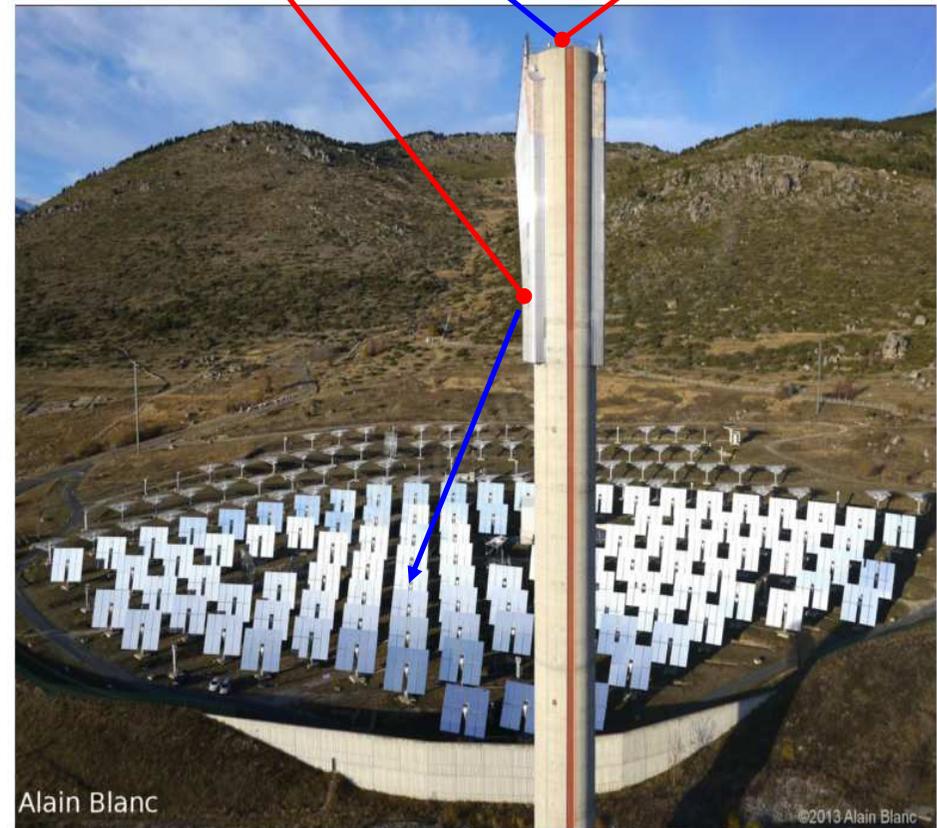
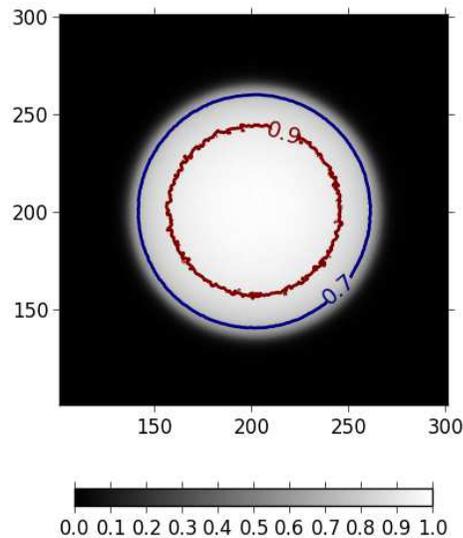
Validation expérimentale à THEMIS

Quatre caméras visant
le champ d'héliostats

Caméra
"Soleil"

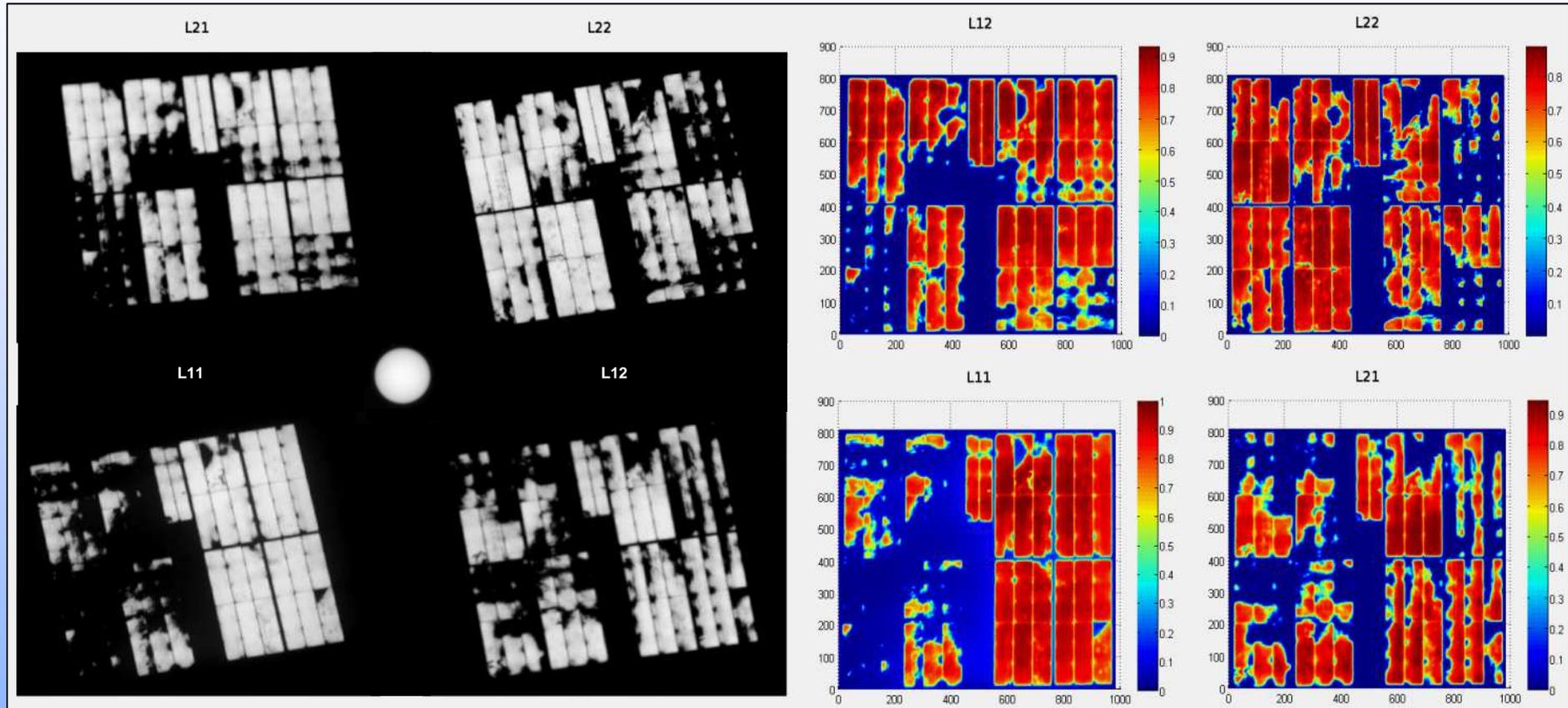


Une cinquième caméra vise
directement le Soleil pendant
l'acquisition des quatre images



Coquand, Caliot & Hénault, Proceedings of the SPIE vol. 10379 (2017)

Validation expérimentale à THEMIS

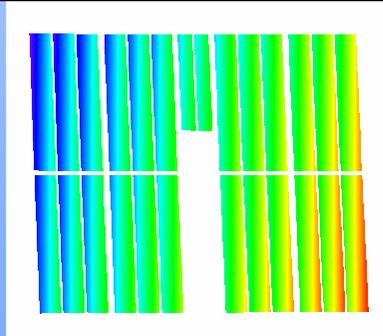
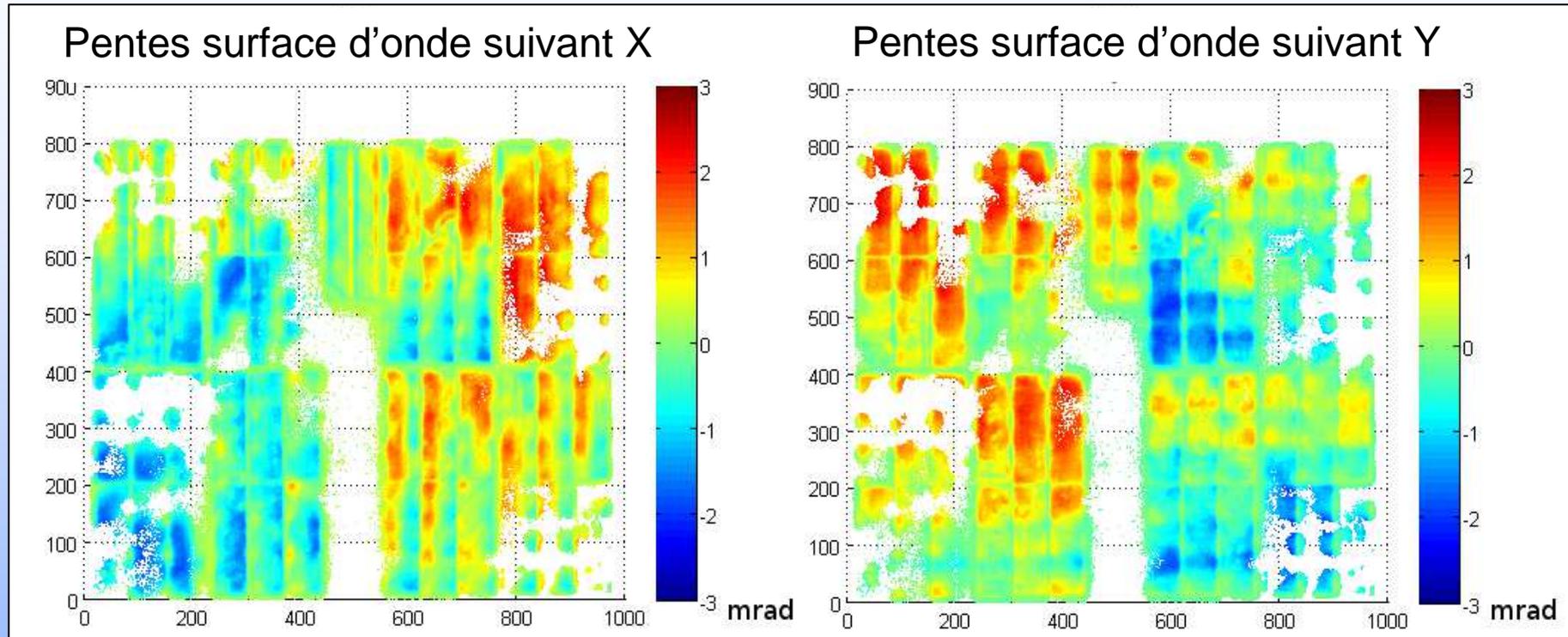


Images brutes

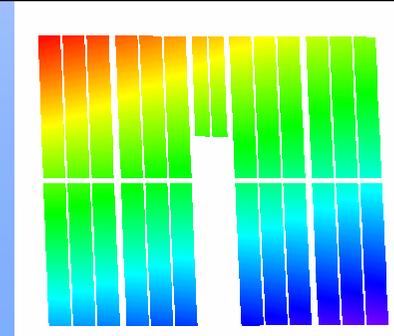
Images "rectifiées"

Coquand, Caliot & Hénault, Proceedings of the SPIE vol. 10379 (2017)

Premiers résultats (prometteurs)



Pentes théoriques



Conclusion et perspectives d'avenir

- Bien que les performances recherchées soient très différentes, énergie solaire concentrée et observations astronomiques (imagerie classique ou télescopes Cerenkov) présentent de nombreux points communs:
 - Segmentation des miroirs
 - Théorie en optique géométrique et formation des “images”
 - Méthodes de contrôle et de mesure
- Les méthodes de rétrovisée devraient bientôt être opérationnelles sur les grandes centrales héliothermiques du futur
- J'envisage maintenant de les étendre à d'autres systèmes d'observation (grands télescopes segmentés, optiques UV et X...)

Autopromotion

- Un cours sur l'optique des concentrateurs solaires (et bien plus !)

The image shows a grid of 9 presentation slides from a course on solar concentrators and adaptive optics. The slides are numbered 76 through 88. The topics covered include:

- Slide 76:** Formation des images par les héliostats. Les paramètres L , r , et r_0 dépendent du temps. Diagramme illustrant la formation d'une image par un héliostat parabolique.
- Slide 77:** Formation des images par les héliostats. Mais les héliostats sphériques présentent des aberrations géométriques importantes. Diagramme illustrant les aberrations.
- Slide 78:** Formation des images par les héliostats. Application: Héliostat sphérique. Diagramme illustrant l'application.
- Slide 81:** Formation des images par les héliostats. Tache d'image de Soleil dans le plan de la cascade à 15000 GMT. Images illustrant la tache d'image.
- Slide 82:** Formation des images par les héliostats. Tache d'image de Soleil dans le plan de la cascade à 15000 GMT. Images illustrant la tache d'image.
- Slide 83:** Formation des images par les héliostats. Aide méthodologique pour l'exercice Zemax. Diagramme illustrant l'aide méthodologique.
- Slide 86:** Erreurs de surface sur un miroir. Comme en optique géométrique. Diagramme illustrant les erreurs de surface.
- Slide 87:** Erreurs de surface sur un miroir. Relations de Nijboer: $x' = F \frac{\partial W(P(x,y))}{\partial x}$, $y' = F \frac{\partial W(P(x,y))}{\partial y}$. Diagramme illustrant les relations de Nijboer.
- Slide 88:** Erreurs de surface des miroirs. En dépit des écarts extrêmement petits... Diagramme illustrant les erreurs de surface.

<http://francois.henault.free.fr/coursol/coursol.htm>

Crédits et pages web

- Observatoire Keck: <http://www.keckobservatory.org/>
- Grantecan: <http://www.gtc.iac.es/>
- Extremely Large Telescopes
 - Thirty Meter Telescope: <http://www.tmt.org/>
 - European Extremely Large Telescope: <http://www.eso.org/public/teles-instr/e-elt.html>
- Observatoires solaires
 - THEMIS: <http://www.themis.iac.es/>
 - National Solar Observatory: <http://www.nso.edu/>
- Pages sur l'optique adaptative
 - A. Tokovinin: <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/tutorial/intro.html>
 - Majewski Lecture Notes: <http://www.faculty.virginia.edu/ASTR5110/lectures/atmos1/turbulence.html>
- Et bien entendu mon cours "Optique et Concentration de l'Energie Solaire" pour l'IOGS Saint-Etienne !
 - <http://francois.henault.free.fr/coursol/coursol.pdf>

Questions ?

