

# COMPRENDRE

## L'optique adaptative

Bertrand CHARLET  
Abdesselem ELHASSOUNI  
Vincent HARDY  
ALPAO, [www.alpao.com](http://www.alpao.com)  
[bertrand.charlet@alpao.fr](mailto:bertrand.charlet@alpao.fr)

Il n'y a pas de limite fondamentale à la qualité possible de correction : la limite de diffraction peut être atteinte dans la majeure partie des cas. En revanche, il faut gérer quelques spécificités techniques importantes pour l'implémentation technique. Après avoir présenté les fondements de l'OA, nous discuterons ici du choix du miroir déformable (MD), du dimensionnement d'un système complet, pour finalement montrer quelques exemples d'applications.

### Fondamentaux de l'optique adaptative

Un système d'OA classique est généralement dérivé des systèmes utilisés en astrophysique. Le front d'onde venant d'un objet est déformé par un milieu non-homogène. Certains photons sont envoyés vers un capteur de front d'onde (WFS) en utilisant une lame séparatrice.

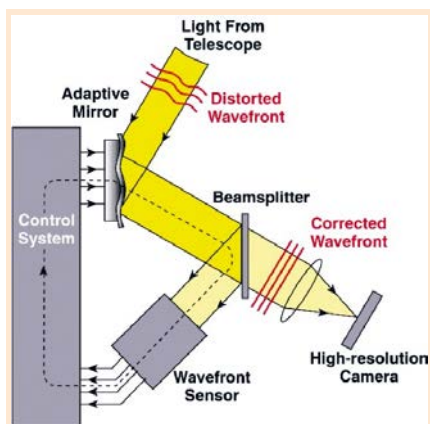


Figure 1. Schéma fondamental d'OA. (Crédit : F. Merkle, 1991)

L'optique adaptative (OA) est aujourd'hui une technologie bien connue des designers de systèmes optiques. C'est peut-être parce qu'à première vue, elle paraît magique. Une image floue entre dans le système d'OA et en ressort nette !

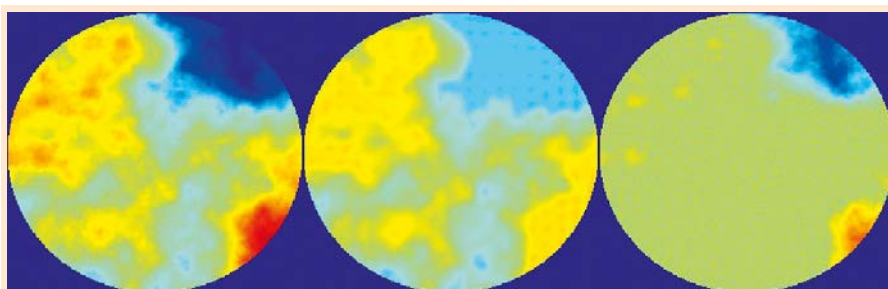


Figure 2. Aberration (gauche), forme du MD (centre), erreur résiduelle (droite).

Le but est ici de mesurer la distorsion. L'autre partie du faisceau est transmise vers la caméra scientifique après passage sur le MD (figure 1). La mesure du front d'onde est alors injectée dans une boucle de rétroaction qui, lorsqu'elle est fermée, permet de déformer le MD pour obtenir un front d'onde plan et donc une image nette.

### Bien choisir son miroir déformable (MD)

Chaque technologie de MD a ses propres avantages, avec quelques paramètres principaux à prendre en considération selon l'utilisation et le besoin.

### Nombre d'actionneurs

Le nombre d'actionneurs est un paramètre clef. Plus ce nombre sera élevé, plus des aberrations complexes pourront être compensées, permettant une amélioration de la qualité de correction. Un nombre élevé d'actionneurs augmentera proportionnellement le prix et parfois la complexité du système.

Comme décrit sur la figure 2, l'erreur de *fitting* est la différence entre les aberrations et la forme du MD. Le nombre d'actionneurs impacte directement ce paramètre.

### La course

La course est la capacité du MD à se déformer jusqu'à atteindre une certaine amplitude. La course doit être plus grande que l'amplitude de l'aberration afin d'éviter une saturation des actionneurs. De plus, si la course le permet, des fonctionnalités additionnelles peuvent être utilisées, telles que l'utilisation d'un *defocus* supplémentaire permettant de faire un scan selon l'axe optique Z en même temps que le système d'OA travaille. Ou encore, elle permet de corriger les erreurs d'alignement du système.

Cependant, comme le montre la figure 2, une course limitée ne permet pas de corriger toutes les aberrations.

### Vitesse

La vitesse du MD est importante pour corriger des aberrations dynamiques ou pour des performances de vitesse

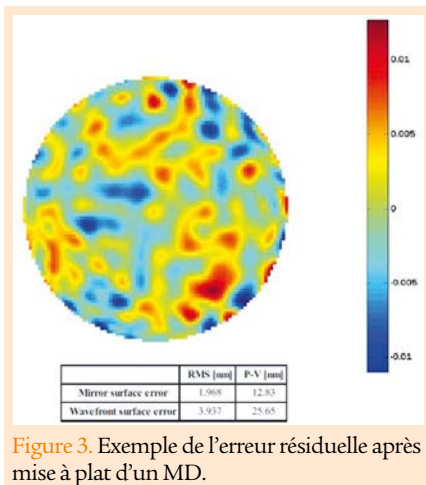


Figure 3. Exemple de l'erreur résiduelle après mise à plat d'un MD.

accrues dans certains modes de fonctionnement de boucles ouvertes. Dans le cas d'une boucle d'OA fermée, la rapidité du MD peut devenir importante mais les temps de latence du capteur de front d'onde et du calculateur temps réel sont souvent les facteurs limitant la performance temporelle.

La meilleure manière de décrire la performance dynamique du MD est de regarder son diagramme de Bode. Pour une compensation optimale, la première fréquence de résonance du MD doit être plus élevée que la fréquence des aberrations – c'est-à-dire que le MD peut suivre les aberrations sans entrer en résonance.

## Qualité optique

Comme le MD sera intégré dans un système optique, sa qualité optique doit être prise en compte. En effet, le MD doit corriger les aberrations, et non en introduire ! Une façon optimale de la déterminer est de fermer une boucle d'OA sur un front d'onde plan et de mesurer l'erreur résiduelle. Cette mesure montre les défauts de surface que le MD ne peut pas compenser. La *figure 3* montre un exemple de cette mesure.

## Dimensionner son système

Le but premier de l'optique adaptative est de corriger les distorsions du front d'onde, ces distorsions se produisant

lors du passage du faisceau lumineux dans un milieu optiquement hétérogène. Il est important de connaître non seulement ces perturbations mais aussi leurs évolutions.

Dans la partie précédente, nous avons vu comment choisir le miroir déformable afin que ses capacités de déformation puissent compenser les aberrations. Voyons maintenant comment détecter ces déformations et comment bâtir un système pour les corriger.

## Le capteur de front d'onde

Il existe de nombreuses méthodes de mesure du front d'onde : interféromètre, Shack-Hartmann (SH), capteur pyramidal, diversité de phase... Chacune d'entre elles présentent ses avantages propres. Cependant, le SH est de loin la méthode la plus courante en OA.

Le SH fonctionne sur le principe de décomposition spatiale du front d'onde. Il est composé d'un réseau de microlentilles qui mesure localement la déformation. Chaque point focal est localement dévié en fonction de l'angle du front d'onde sur la microlentille éclairée, puis imagé sur une caméra.

Les 5 paramètres principaux à considérer pour ce type de capteurs sont :

- Le nombre de microlentilles : plus ce nombre est élevé, plus la résolution spatiale du senseur est importante. En revanche, il y a plus de pixels à lire, ce qui réduit la vitesse du dispositif.
- La distance focale des microlentilles : une focale plus longue permet une sensibilité sur l'amplitude du front d'onde accrue mais diminue l'amplitude de mesure du capteur.

- Le nombre de pixels de la caméra : un plus grand nombre de pixels donne une meilleure résolution mais réduit la vitesse de lecture.
- La sensibilité au flux de la caméra : une caméra plus sensible permet de mesurer à plus faible flux. Cependant, le coût de la caméra est très dépendant de ce paramètre.
- La vitesse de la caméra : ce paramètre prend en compte le temps de lecture et le temps de latence (temps de transfert entre le pixel et l'électronique : à ne pas négliger pour du calcul temps réel). Ce paramètre définit la vitesse du capteur.

## Le calculateur temps réel

Pour la correction d'aberrations évoluant rapidement, le temps entre la détection et la correction est un paramètre crucial. Ce temps se décompose entre la durée nécessaire à la détection et celle nécessaire au calculateur pour envoyer les commandes au MD. Il convient donc d'avoir un algorithme de calcul rapide ainsi qu'un ordinateur capable de suivre la fréquence imposée par le senseur de front d'onde. Pour cela, un calculateur en temps réel est nécessaire. Ce dernier doit être synchronisé avec les données issues du capteur afin de minimiser les temps de calcul. Idéalement, les calculs démarrent avant même la fin de la lecture des pixels du capteur.

## Spécification d'un système

Pour quantifier l'efficacité de correction en fonction du temps d'un système d'optique adaptative, le paramètre pris en compte est la fréquence

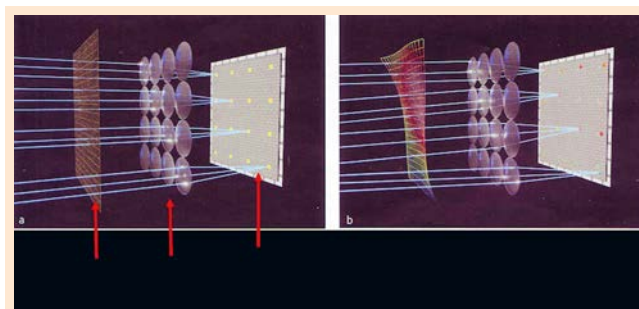


Figure 4. Principe du Shack-Hartmann (SH) avec (a) un front d'onde plat (b) un front d'onde perturbé.



de réjection de la boucle d'OA. Les aberrations ont une certaine fréquence temporelle ; si cette fréquence est plus faible que la bande passante de réjection, alors elles sont compensées par le système.

La correction se faisant toujours avec un léger temps de retard, une décomposition de l'aberration 10 à 15 fois plus rapide est nécessaire. La forme du MD est alors mise à jour à la même cadence que le senseur et le calculateur. Cependant celui-ci corrigera des aberrations 10 fois plus lentes. La fréquence de résonance du MD pourra donc être bien plus faible que celle des autres composants de la boucle.

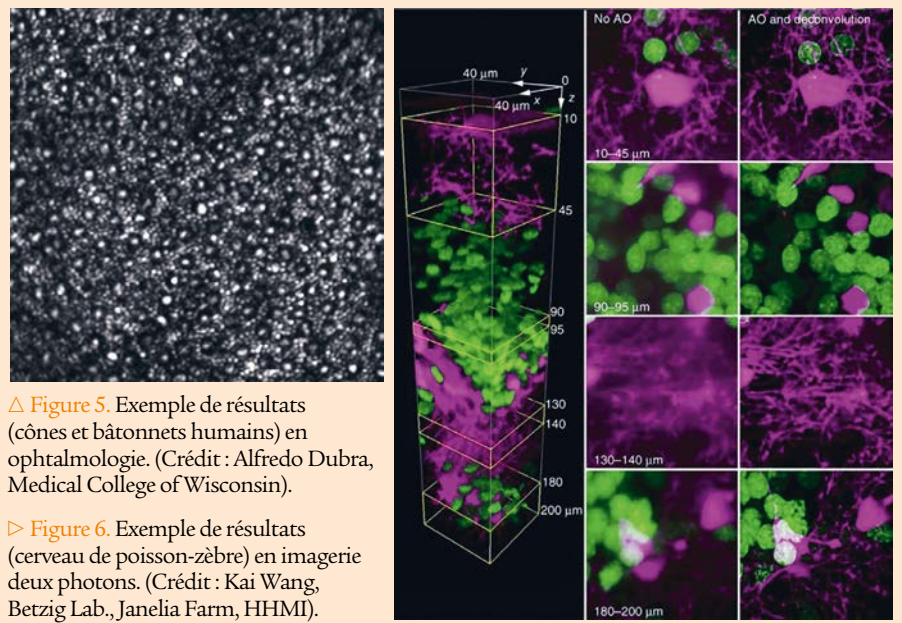
À titre d'exemple, il est généralement admis qu'une correction à 100 Hz est nécessaire pour compenser les perturbations de l'atmosphère. Pour ce faire, il faudra un capteur et un calculateur à 1.5-2 kHz avec un MD dont la fréquence de résonance est supérieure à 200-300 Hz.

### Exemple d'applications concrètes de l'OA

#### Astronomie – correction de perturbation atmosphérique (FSO, défense, etc.)

Les astronomes sont à l'origine de l'invention de l'optique adaptative. Mais ils ont également très largement participé à son développement et à sa maturité. Tous les télescopes de taille conséquente incluent aujourd'hui cette technologie. Les méthodes de corrections sont maintenant variées (*multiconjugate adaptive optics* – MCAO, *extrem adaptive optics* – XAO, *multiobject adaptive optics* – MOAO, etc.) et adaptées aux besoins de la science.

On peut alors se demander s'il n'est pas pertinent de copier leur design. Beaucoup d'applications l'ont déjà fait. Le terme « étoile laser » est par exemple couramment utilisé en ophtalmologie. Il convient de faire preuve de vigilance ici car les applications en biomédical par exemple ne nécessitent pas autant de performance. Il est donc possible de réduire les coûts et la complexité des systèmes.



△ Figure 5. Exemple de résultats (cônes et bâtonnets humains) en ophtalmologie. (Crédit : Alfredo Dubra, Medical College of Wisconsin).

▷ Figure 6. Exemple de résultats (cerveau de poisson-zèbre) en imagerie deux photons. (Crédit : Kai Wang, Betzig Lab., Janelia Farm, HHMI).

### Ophtalmologie

L'ophtalmologie utilise l'optique adaptative pour corriger les aberrations de l'œil, et donner ainsi accès à la rétine. Cela permet principalement d'imager les éléments constitutifs de l'œil (photorécepteurs, micro capillaires, ganglions...). Ce faisant, l'œil devient une fenêtre sur le corps humain ce qui permet de détecter et suivre des maladies oculaires, mais aussi cardiovasculaires, ou même neuronales. Les systèmes les plus fréquemment utilisés scannent point par point la rétine. La figure 5 montre un exemple de résultat.

### Microscopie

Lors de l'observation en profondeur d'un échantillon, l'éclairage traverse des couches de cellules qui sont un milieu diffusant. Il est alors important de corriger les aberrations induites par ces milieux afin d'optimiser la qualité d'image. L'OA est un moyen de corriger ces aberrations.

Certains utilisateurs utilisent même le MD pour effectuer (en plus de la correction) le scan en profondeur. Ce z-scan permet par exemple d'imager à différentes profondeurs de manière extrêmement rapide et sans perturber mécaniquement l'échantillon.

Dans l'exemple décrit à la figure 6, le contrôle du MD est réalisé en boucle fermée. Ce type de mesure nécessitant une source ponctuelle, la microscopie utilise aussi souvent des contrôles de type itératif. Le miroir est alors déformé dans le but d'augmenter un critère (netteté, contraste...) de manière itérative.

En complément de ces principales applications, l'OA est aussi utilisée en physique pour la mise en forme de faisceaux ou la pré-compensation des aberrations. Des applications comme la photolithographie, les télécommunications optiques, etc. utilisent également cette méthode de plus en plus répandue.

#### POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] F. Roddier, *Adaptive Optics in Astronomy* (F. Rodier, 1999)
- [2] R. Tyson, *Principles of Adaptive Optics* (Academic Press, Boston, 1998)
- [3] J.W. Hardy, *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes* (Oxford University Press, 1998)
- [4] R. Tyson, B. Frazier, *Field Guide to Adaptive Optics* (Spie Press Book, 2004)