

ACHETER

Un miroir déformable

Pierre BAUDOZ, Observatoire de Paris, LESIA
pierre.baudoz@obspm.fr

Un miroir déformable est un composant qui réfléchit la lumière en introduisant des retards (ou des avances) optiques spatialement contrôlables sur les surfaces d'onde. Les applications sont nombreuses, allant de la microscopie à l'astronomie en passant par l'ophtalmologie ou la mise en forme d'impulsions lasers.

Historiquement développées dans les années 70 pour des applications de défense puis dans les années 80 pour l'astronomie, les technologies utilisées pour les miroirs déformables se sont aujourd'hui diversifiées. La plupart des miroirs déformables sont constitués d'actionneurs qui déforment une surface réfléchissante. On trouve aujourd'hui une variété de composants avec des écarts de plus de 3 ordres de grandeur sur la taille des miroirs (quelques mm à quelques mètres), sur la fréquence de contrôle (du Hz au kHz), ou encore sur le nombre de degrés de liberté (quelques actionneurs à plus de 4000). Il est donc essentiel de bien déterminer son besoin avant de prospecter les fournisseurs potentiels.

Principales caractéristiques d'un miroir déformable

Nous décrivons ci-dessous les principales caractéristiques d'un miroir déformable qui seront plus ou moins importantes en fonction de l'application visée.

Nombre d'actionneurs

L'objectif principal d'un miroir déformable est de corriger ou d'introduire une aberration optique dans le

faisceau. Les premiers miroirs développés étaient composés d'une poignée d'actionneurs capables de corriger uniquement les aberrations de bas ordre (basculement du front d'onde souvent nommé tip-tilt, focus, astigmatisme, coma...). En 2016, on dispose de miroirs déformables avec des nombres d'actionneurs variant de quelques dizaines à quelques milliers.

Le nombre d'actionneurs utiles pour une application dépend de la fréquence spatiale maximale que l'on souhaite contrôler sur la surface d'onde. Pour des applications où l'on veut seulement corriger des erreurs d'alignement optique, on utilisera un petit nombre d'actionneurs alors que pour la correction de phase complexe (turbulence, milieu diffusant), un grand nombre d'actionneurs sera nécessaire.

Généralement, les actionneurs sont régulièrement distribués sur une grille carrée, hexagonale ou circulaire. Leur disposition peut aussi être optimisée pour limiter les effets de bord lorsque la surface réfléchissante y est mécaniquement contrainte (*figure 1*) ou pour prendre en compte la géométrie du faisceau incident (disposition elliptique pour un miroir utilisé à 45°, *figure 2*) ou, enfin, pour optimiser l'arrangement de telle sorte à compenser des défauts préalablement caractérisés.

THORLABS

Analyseurs de front d'onde Shack-Hartmann



- 2 versions CMOS (Haute vitesse) CCD (Haute résolution)
- Sensibilité jusqu'à $\lambda/200$ rms @ 633nm
- Vitesse jusqu'à 1120 fps
- Microlentilles interchangeables
- Prix : de 3528€ à 5310€ HT

Miroirs Déformables Piézoélectriques



- Diamètre pupille : 10 mm
- 40 actionneurs - 4 kHz
- 3 bras pour correction Tip/Tilt
- Pilote Haute Tension Intégré
- Prix : 3713€ HT

Contactez-nous pour les essayer !

Tel : +33 (0) 970 444 844
 Email : sales.fr@thorlabs.com

www.thorlabs.com

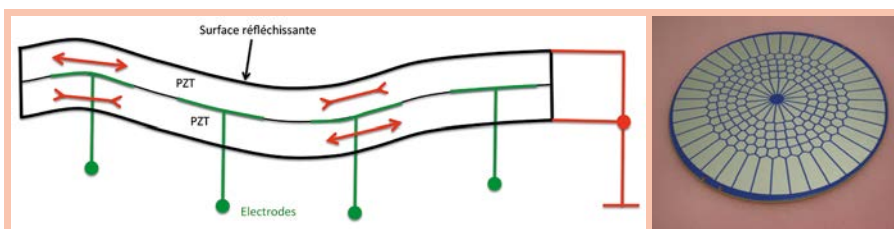


Figure 1. Principe d'un miroir bimorphe piézoélectrique (à gauche). À droite, exemple de disposition des actionneurs pour un miroir monomorphe (Cilas).

La taille de la surface déformable dépend directement du nombre d'actionneurs et du pas inter-actionneur (*pitch*) qui définit la distance entre deux zones contrôlables quasi indépendamment. Certains miroirs sont adaptés à la miniaturisation avec une taille de faisceau de quelques millimètres alors que d'autres sont de plus grande taille (par exemple pour supporter le flux incident dans le cas des lasers) et qu'enfin les plus grands miroirs déformables pour l'astronomie atteignent 10 m de diamètre (dans le cas de la compensation lente des déformations par gravité du miroir primaire d'un télescope).

Course des actionneurs

L'amplitude de l'aberration à contrôler permet de définir l'amplitude des déformations nécessaires. Par effet de somme des déformations

de chaque actionneur, l'amplitude du mouvement pour les basses fréquences spatiales (piston, tip-tilt, focus) est généralement plus grande que pour les hautes fréquences spatiales. La course typique des actionneurs est généralement indiquée en déformation mécanique de la surface et varie de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. Les retards optiques introduits sont évidemment deux fois plus grands pour des angles d'incidence proche de la normale.

Couplage inter-actionneur

Le couplage inter-actionneur est un paramètre qui décrit l'influence de la déformation provoquée par un actionneur sur ses voisins. Il résulte souvent d'un couplage mécanique qui varie d'une technologie d'actionneurs à une autre et peut même

varier spatialement sur la surface du miroir si ce dernier n'a pas une distribution régulière des actionneurs. Ce couplage va limiter la course d'un seul actionneur par rapport au mouvement collectif d'un groupe d'actionneurs d'un facteur typiquement 2 à 3 (pour des couplages typiques de 10-15 %). S'il est trop fort, le nombre de degrés de liberté effectif du miroir sera inférieur au nombre d'actionneurs ou la course requise plus importante pour une aberration haute fréquence donnée.

Mode de fonctionnement

Le mode de fonctionnement du miroir doit aussi être soigneusement étudié. Le contrôle du miroir peut être fait de manière relative (boucle fermée) ou absolue (boucle ouverte). Dans le premier cas, les mouvements du miroir sont directement mesurés par un analyseur, et des phénomènes comme l'hystérésis ou la non linéarité de la commande sont beaucoup moins préjudiciables qu'en boucle ouverte.

Dans tous les cas, une solution d'analyse de surface d'onde doit être mise en place au minimum pour la mise à plat du miroir dans l'instrument (*voir Acheter, Photoniques n°52*).

Tableau 1. Caractéristiques principales des différentes technologies de miroirs déformables.

Technologie des actionneurs	Diamètre de faisceau	Distance inter-actionneur	Course (mécanique)	Nombre d'actionneurs max.	Hystérésis	Fréquence maximale	Effet d'empreinte	Fabricants - Distributeurs
Bobine magnétique	qq mm à 1m	1 mm à 30 mm	moyenne à grande (10-40 µm)	1000	faible (<2 %)	rapide (2 kHz)	faible	Alpao, Imagine Eyes, Imagine Optic, Microgate, Phasics
Mono/bimorphe piézoélectrique	10 à 600 mm	3 mm à 10 mm	moyenne à grande (10-40 µm)	500	moyen à fort (<5-10 %)	rapide (1 kHz)	faible	Aka Optics, Cilas, Phasics
Empilement piézoélectrique	10 à 500 mm	3 mm à 14 mm	moyenne (5-20 µm)	1400	moyen à fort (<5-10 %)	très rapide (10 kHz)	faible à moyen	Aka Optics, Cilas, Okotech, Phasics
Empilement électrostrictif	17 à 240	1 mm à 7 mm	faible (0,5- 4 µm)	1000	faible (<1 %)	très rapide (5 kHz)	faible à moyen	AOA Xinetics
MEMS (membrane libre)	15 à 50 mm	2 mm à 5 mm	moyenne (9-18 µm)	80	négligeable	moyen (500 Hz)	faible	Okotech
MEMS (membrane attachée)	1,5 à 25 mm	0,3 mm à 1,2 mm	faible (1,5 à 8 µm)	4000	négligeable	très rapide (30 kHz)	fort	Boston Micro-machines Corp., Iris AO, Inc (membrane segmentée), Thorlabs, Phasics
Actionneur mécanique	60 à 350 mm	6 à 50 mm	grande (100 µm)	≈50	très faible (<0,1 %)	lent (10 Hz)	très faible	ISP Systems, Imagine Optic

Fréquence de contrôle

Les fréquences de contrôle varient du Hz à plusieurs kHz. Pour les applications très gourmandes en bande passante comme l'astronomie ou les télécommunications optiques, une analyse complète des différentes caractéristiques temporelles doit être effectuée: temps de réponse d'un actionneur, délais de transfert des commandes, des mesures de l'analyseur et des calculs dans le calculateur temps réel, etc.

Précision du mouvement/ qualité de la surface optique

La précision actuelle des actionneurs (de quelques dixièmes de nanomètre à quelques nanomètres) est généralement suffisante en regard de la précision des instruments de mesure pour ces mouvements. En revanche, la stabilité et la répétabilité peuvent être cruciales pour certaines applications (cf. le fonctionnement en boucle ouverte évoqué plus haut).

La partie active du miroir étant fine et déformable, elle est généralement très aberrée lorsque le miroir n'est pas sous tension. Une partie de la course des actionneurs doit donc être utilisée pour « mettre à plat » le miroir (jusqu'à 30 % pour certains miroirs !). Au-delà des fréquences spatiales corrigées, la qualité de surface du miroir est généralement dégradée par la présence de l'empreinte des connexions entre les actionneurs et le miroir. Cet effet peut être minimisé en optimisant l'interface actionneur-miroir ou en repolissant la surface optique après assemblage de l'ensemble. Les technologies d'actionneurs sans contact mécanique sont des solutions pour éviter ces effets d'empreinte et permettent aussi de minimiser l'impact d'un actionneur défectueux.

Les technologies de miroir

Les principales caractéristiques des différentes technologies de miroirs déformables sont décrites ci-dessous

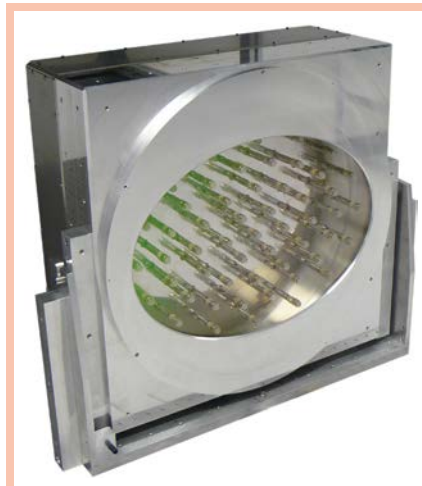


Figure 2. Exemple d'un miroir avec une disposition elliptique des actionneurs pour une utilisation avec un angle d'incidence de 45°. Les actionneurs visibles sur l'image sont des actionneurs mécaniques (ISP System).

et un récapitulatif peut être trouvé dans le *tableau 1*.

Miroirs bimorphes

Ces miroirs sont constitués de deux plaques piézoélectriques munies d'électrodes. L'application d'une tension sur les électrodes dilate l'une des plaques et comprime l'autre, résultant en une courbure locale (*figure 1*). Il est aussi possible de n'utiliser qu'une plaque piézoélectrique et un substrat de référence. On parle alors de miroir monomorphe. Les électrodes ne sont généralement pas localisées sur une grille régulière dans le cas de ce miroir, et parler de pas inter-actionneur n'a pas exactement le même sens que pour les autres miroirs (*figure 1*). La course totale accessible dépend fortement de la taille de l'actionneur et de sa distance au bord du miroir. Le nombre d'actionneurs dépasse rarement une centaine avec des courses obtenues de quelques dizaines de micromètres, ce qui les prédispose plutôt à la correction d'aberrations de bas-ordre de fortes amplitudes.

Miroirs à empilement SAM (*stacked array mirror*)

La surface optique est ici couplée à des actionneurs composés d'empilements de plaques ou de disques que

ILAO STAR

The first mechanical deformable mirror dedicated to ultra intense lasers that can perform adaptive optics correction during full power operation



NEW ACTUATORS WITH STEPPER MOTORS

LIFETIME IMPROVEMENT

VACUUM COMPATIBILITY

OPTIMIZED FOR YOUR LASER BEAM

Contact us for more details:
contact@imagine-optic.com
or +33 1 64 86 15 60



Mécatronique de haute précision

MIROIRS DÉFORMABLES

Technologie brevetée ISP SYSTEM

Gamme pour lasers intenses



- Actionneurs électromécaniques à moteurs pas à pas
- Excellente qualité de correction
- Grande amplitude de correction
- Stabilité même hors énergie
- Ø25mm à Ø600mm
- Revêtement dédié à l'application
- Membrane interchangeable
- Compatible UHV
- Possibilité de correction rapide, y compris pendant les tirs laser
- Faible hystérésis
- Convergence rapide de la boucle
- Pas d'effet d'empreinte

Version spatiale



- Stabilité hors énergie
- Faible consommation
- Grande fiabilité
- Alimentation 24V
- Grande amplitude de correction

www.isp-system.com
contact@isp-system.com

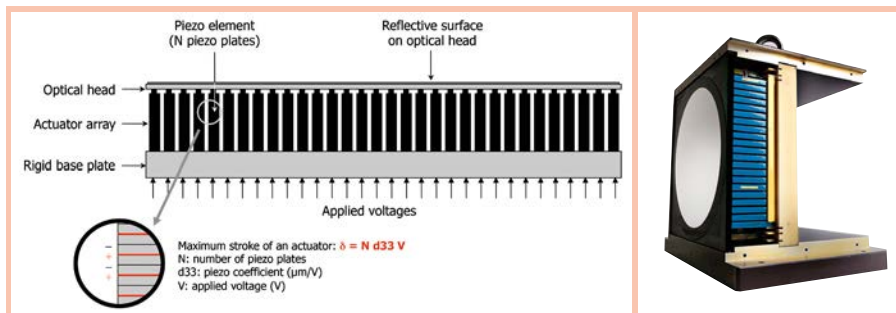


Figure 3. Principe et exemple d'un miroir à empilement piézoélectrique (Cilas).

l'on peut dilater ou comprimer par effet piézoélectrique ou électrostrictif en fonction des matériaux utilisés (figure 3). Ces miroirs peuvent développer des courses comprises entre 5 et plus de 20 μm en fonction du matériau ferroélectrique utilisé pour les actionneurs. Cette technologie est assez compacte et les pas inter-actionneurs proposés aujourd'hui sont compris entre 1 mm et 10 mm. Du fait des efforts importants générés par les actionneurs le miroir peut être épais et poli après assemblage pour éviter les effets d'empreintes sur le miroir. La qualité de surface d'onde finale du miroir peut donc être optimisée. Il est par ailleurs maintenant possible d'atteindre le millier d'actionneurs et certaines compagnies proposent même des miroirs de plusieurs milliers d'actionneurs.

Miroirs à bobines magnétiques

Chaque actionneur est composé d'une bobine fixée sur une surface de référence et d'un aimant collé directement sur la surface déformable. L'application d'un courant dans les bobines crée un champ magnétique qui attire ou repousse les aimants et déforme ainsi la surface optique. Cette technologie permet d'atteindre de grandes courses (10 à 100 microns) et des tailles de faisceaux variées: de 10 mm pour des applications biomédicales où la membrane déformée a une épaisseur de quelques dizaines de micromètres, à plus d'1 m pour des miroirs secondaires de télescopes astronomiques où c'est une coque de verre de quelques millimètres d'épaisseur qui est contrôlée.

Miroirs MEMS électrostatiques

Les miroirs MEMS (*micro electro-mechanical system*) sont constitués d'une membrane réfléchissante continue ou segmentée attachée en certains points (les actionneurs) à une membrane intermédiaire. Celle-ci sert d'électrode supérieure tandis que l'électrode inférieure est gravée dans une couche de silicium (figure 4). Une tension appliquée aux bornes de ces deux électrodes crée un champ électrostatique qui déforme les membranes. La réponse du miroir n'est pas linéaire en tension et la course est assez faible (quelques μm). Ces miroirs sont en revanche très compacts (jusqu'à 1000 actionneurs au cm^2) et existent sous différentes formes de quelques actionneurs à plusieurs milliers. Cependant, l'interface complexe entre la surface réfléchissante et la membrane intermédiaire induit une qualité de surface finale dégradée (de l'ordre de 30 nm RMS). Une solution est de déconnecter physiquement l'électrode supérieure en créant une membrane libre attachée sur ses bords et sur laquelle est déposée la surface réfléchissante. Ainsi, la qualité de surface ne dépend plus que de la qualité de la membrane et du dépôt réfléchissant.

Miroirs à actionneurs mécaniques

Les actionneurs mécaniques convertissent un déplacement macroscopique (moteur pas à pas, moteur continu) en une force appliquée à l'arrière du miroir pour obtenir une déformation précise (nanométrique) de la surface du miroir. Ils permettent

d'obtenir des grandes courses (environ 100 μm) et une grande stabilité même hors tension. La connexion entre les actionneurs et le miroir peut être optimisée pour éviter les effets d'empreintes sur le miroir. La qualité de surface d'onde finale du miroir peut donc être optimisée. La taille des actionneurs est moyenne et convient plutôt pour la correction des basses fréquences spatiales (figure 2). La vitesse de ces miroirs est plutôt lente (quelques Hz).

Pour des applications essentiellement monochromatiques, il convient aussi d'étudier la solution alternative du modulateur de phase spatial (SLM) qui est un composant réfractif dont on va modifier localement l'indice (voir l'article Acheter dans Photoniques n°77).

Quel miroir pour quelle application ?

Ci-dessous, quelques exemples d'applications des miroirs déformables.

Lasers/lasers de puissance

L'utilisation d'un miroir déformable dans le cadre des lasers de puissance permet d'améliorer la qualité de la tache focale, en corrigeant les aberrations optiques. La qualité de surface de l'optique du miroir doit être excellente pour éviter la lumière diffusée et surtout la création de surintensités dans le faisceau lumineux qui endommageraient les optiques de transport. L'effet d'empreinte des actionneurs sur la surface du miroir doit donc être minimisé. La face réfléchissante doit être résistante au fort flux incident et à l'échauffement qui peut en résulter. Pour cette application, la

bande passante utile est assez faible mais requiert une importante stabilité temporelle et thermique. Le nombre d'actionneurs nécessaires est assez faible (quelques dizaines) si l'on vise uniquement une mise en forme de PSF simple. Les courses nécessaires peuvent en revanche être très élevées pour compenser les contraintes introduites par les dépôts diélectriques dédiés aux hautes puissances ainsi que les déformations d'origine thermomécanique liées à la puissance laser transportée. Les miroirs à actionneurs mécaniques, les mono/bimorphes et les miroirs à bobines sont des solutions adaptées pour limiter l'effet d'empreinte des actionneurs et atteindre des grandes courses.


De manière plus générale, la mise en forme du laser peut aussi viser des modes plus élevés dans la base de Laguerre-Gauss par exemple (*beam shaping*) et le nombre de degrés de liberté nécessaire sera un peu plus élevé (100). Les applications lasers à travers des milieux très diffusants (focalisation, calcul optique) peuvent nécessiter un plus grand nombre d'actionneurs et dans ce cadre, l'utilisation de MEMS compacts peut être intéressante.

Imagerie biomédicale

Historiquement, les applications à l'ophtalmologie sont venues très rapidement après la démonstration en astronomie. Ces dernières années ont vu la mise sur le marché d'instruments d'imagerie rétinienne à haute résolution spatiale utilisant des miroirs déformables capables de s'adapter aux déformations rapides du front d'onde introduites par notre œil (voir Photoniques n°79).

ALPAO

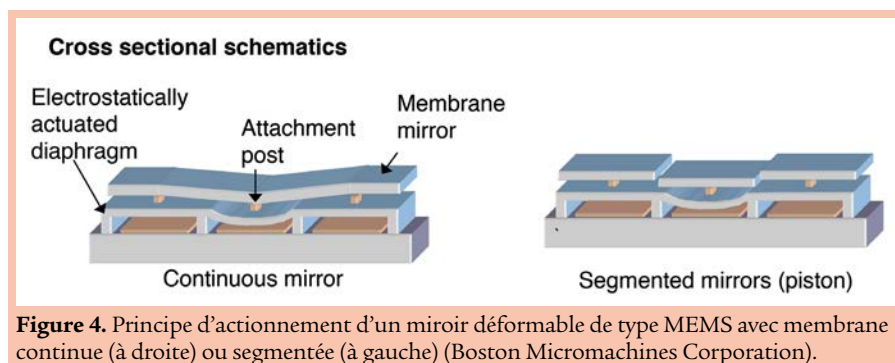
OPTIQUE ADAPTATIVE



MIROIRS DÉFORMABLES

- ✓ Miroirs standards de 69 à 820 actionneurs
- ✓ Grande course jusqu'à 80 μm (tip-tilt PtV)
- ✓ Bande passante supérieure à 2 kHz
- ✓ Excellente qualité optique offrant une planéité <3 nm RMS

www.alpao.com



Distributeur	Fabricants	Technologie des actionneurs	Contacts
Aka Optics	Aka Optics, NightN	bimorphe et empilement piézoélectrique	Alexis Kudryashov contact@akaoptics.com +33 4 91 05 50 86
Alpao	Alpao	bobine magnétique	Vincent Hardy vincent.hardy@alpao.fr contact@alpao.com +33 4 76 89 09 65
Cilas	Cilas	monomorphe et empilement piézoélectrique	Richard Palomo palomo@cilas.com contact@cilas.com +33 4 42 36 97 15
Imagine Eyes	Imagine Eyes	bobine magnétique	contact@imagine-eyes.com +33 1 64 86 15 66
Imagine Optic	Imagine Optic, Alpao, ISP Systems	bobine magnétique, actionneur mécanique	Xavier Levecq xlevecq@imagine-optic.com +33 1 64 86 15 60
ISP System	ISP System	actionneur mécanique	contact@isp-system.fr +33 5 62 33 44 44
Laser 2000	Iris AO	MEMS à membrane segmentée	Remy Carasset carrasset@laser2000.fr +33 5 57 10 92 86
Phasics	Alpao, Cilas, ISP System, Okotech, Aka Optics	MEMS, bimorphe, empilement piézoélectrique, bobine magnétique	Benoit Wattellier bw@phasics.fr +33 1 80 75 06 33
Thorlabs	Boston Micromachines, Thorlabs	MEMS à membrane continue monomorphe	Lucy Lagache sales.fr@thorlabs.com +33 9 70 44 48 44
À L'ÉTRANGER			
AOA Xinetics	AOA Xinetics	empilement électrostrictif	AOXinfo@ngc.com
Boston Micromachines	Boston Micromachines	MEMS à membrane continue ou segmentée	Michael Feinberg mrf@bostonmicromachines.com +1 617 868 4178
Okotech	Okotech	empilement piézoélectrique et MEMS à membrane continue	oko@okotech.com +31-70-2629420
Microgate	Microgate	bobine magnétique	info@microgate.it

Tableau 2. Liste des distributeurs français et étrangers de miroirs déformables.

La microscopie a également bénéficié de l'apport des miroirs déformables pour réduire les aberrations introduites par l'instrument mais aussi par les échantillons biologiques. Pour ces applications, il faut une amplitude de déformation élevée (quelques dizaines de microns) avec un nombre de degrés de liberté limité (quelques dizaines) et une fréquence d'échantillonnage suffisante pour corriger les aberrations introduites par le sujet ou la scène observée (10-100 Hz). Les composants doivent être de taille réduite pour être intégrés dans l'instrument. Les miroirs magnétiques et les miroirs à empilement ferroélectrique sont régulièrement utilisés pour ces applications.

Télécommunications optiques

Les télécommunications laser en espace libre sont limitées en distance par la turbulence atmosphérique. La correction ou pré-compensation à l'aide d'un miroir déformable du faisceau laser à l'émission permet d'étendre le domaine d'exploitation de l'instrument. La fréquence de contrôle nécessaire est évidemment élevée pour corriger les effets de la turbulence (>kHz). Les instruments visant à être compacts, les technologies avec des petites distances inter-actionneurs sont privilégiées dans cette application (MEMS, bobines électromagnétiques par exemple).

Astronomie

L'astronomie est historiquement la première application civile des miroirs déformables. Les fréquences de contrôle requises varient de quelques Hz pour maintenir la forme des miroirs primaires des grands télescopes actuels (jusqu'à 10 m de diamètre) à une fréquence élevée (kHz) pour corriger la turbulence atmosphérique. Toutes les technologies ont été utilisées dans le cadre d'instruments très différents allant du grand champ à l'optique adaptative extrême (voir *Photoniques* n°75). Avec le développement d'ici une dizaine d'années des télescopes géants (>30 mètres), le nombre d'actionneurs nécessaires devient très grand (>1000).

ERRATA

Dans l'article « Acheter une caméra infrarouge » de notre numéro 80, nous avons omis d'indiquer que la société Laser Components distribue les caméras linéaires infrarouges de Xenics.

Contact : Christian Merry,
01 39 59 52 25,
c.merry@lasercomponents.fr

Dans l'article « Acheter une source à LED » de notre numéro 81, nous avons omis de lister les LED UV de la société LG Innotek, qui sont distribués en Europe par Laser Components.

Contact : Christian Merry,
01 39 59 52 25,
c.merry@lasercomponents.fr

PROCHAIN NUMERO

Retrouvez dans *Photoniques* n°83, à paraître le 20 octobre 2016, notre dossier Acheter: une imprimante 3D. Vous êtes fabricant ou distributeur et souhaitez figurer dans ce dossier: faites nous parvenir vos informations **avant le 8 septembre**,
photoniques@edpsciences.org