

LES LASERS ET L'OPTIQUE ADAPTATIVE

Vincent MICHAU* et Nicolas VÉDRENNE

ONERA, Université Paris-Saclay, 92320, Châtillon, France

*vincent.michau@onera.fr



L'intégration de l'optique adaptative avec un laser, en corrigeant les aberrations optiques induites par l'atmosphère, vise à maintenir la qualité du faisceau sur de grandes distances. La combinaison de ces deux techniques présente un intérêt majeur pour la défense, notamment pour les armes à énergie dirigée et les communications optiques en espace libre. Cet article fait le point sur les développements en cours, les principaux programmes et les défis dans ces domaines.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412646>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

L'avènement du laser, c'est-à-dire d'une source puissante, de grande cohérence temporelle et/ou spatiale a laissé très rapidement entrevoir la possibilité de transporter puissance et information en espace libre sur de grandes distances.

Dans le domaine militaire, le dépôt d'énergie à distance a été la première application considérée. Néanmoins, que ce soit pour alimenter en énergie un système déporté, pour l'éblouir, l'endommager, voir le détruire, la présence de l'atmosphère sur le trajet de propagation ne peut pas être négligée. Nous ne nous attarderons pas sur les effets non-linéaires provoqués par le milieu atmosphérique qui introduisent des bornes aux densités de

puissances en jeu. Nous nous concentrons ici sur les fluctuations spatiales de l'indice de réfraction dans l'atmosphère induites par la turbulence atmosphérique. Ces fluctuations, bien que faibles, peuvent provoquer des mouvements aléatoires des faisceaux (beam wander) et une perte de l'efficacité de focalisation (beam spreading) [1]. Ces effets deviennent significatifs aux longueurs d'onde visibles dès que la propagation dépasse quelques centaines de mètres dans la basse atmosphère. Il est donc rapidement apparu indispensable de s'en affranchir. D'intenses travaux menés sur le sujet, notamment au Lincoln Lab et à l'ONERA, ont conduit aux premiers systèmes d'optique adaptative pour l'imagerie dans les années 1980 aux Etats-Unis et 1990 en France [2,3].

OPTIQUE ADAPTATIVE ET ARME À ÉNERGIE DIRIGÉE

Dans le vide, un faisceau laser à la longueur d'onde λ , émis par une ouverture de diamètre D , a une divergence minimale de l'ordre de λ/D . En présence de turbulence atmosphérique, les fluctuations d'indices introduisent des avances et retards de phase qui modifient l'amplitude complexe de l'onde, augmentent la dimension angulaire du faisceau et réduisent la densité spatiale de puissance sur la cible. La précompensation de ces avances et retards de phase par un système d'optique adaptative (OA) à l'émission permet d'envisager une atténuation de ces effets.

Le principe de la précompensation d'un faisceau laser par OA est rappelé sur la Figure 1. L'OA corrige

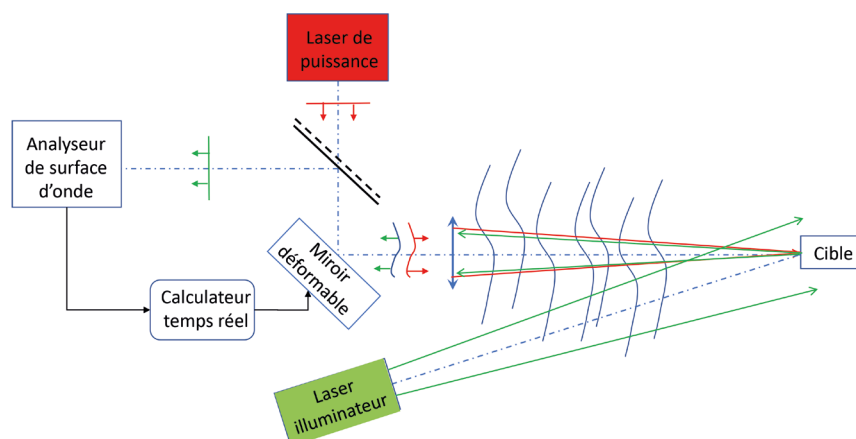
en temps réel les perturbations de la phase d'une onde. C'est un système asservi composé d'un analyseur de surface d'onde qui mesure les perturbations de la phase de l'onde à corriger, d'un miroir déformable qui applique les corrections de phase et d'un calculateur temps réel qui calcule la commande à appliquer au miroir déformable en fonction de la mesure de l'analyseur de surface d'onde délivrée. Pour effectuer la précompensation, la boucle d'OA est fermée sur une onde émise depuis la cible - on parle de cible coopératrice - ou rétrodiffusée par la cible, lorsque celle-ci est éclairée par un faisceau secondaire, dit illuminateur. Par réciprocité, le faisceau laser de puissance qui se réfléchit sur le miroir déformable se focalise au point d'où est issue l'onde utilisée pour la mesure. Les variations de chemin optique induites par la turbulence atmosphérique étant achromatiques au premier ordre, les longueurs d'onde des faisceaux illuminateurs et de puissance peuvent être distinctes et permettent une séparation optique. Cette approche permet de compenser toutes les aberrations vues par l'analyseur, pas seulement les effets de la turbulence atmosphérique. Il est également possible d'utiliser le miroir déformable pour corriger les aberrations propres du faisceau laser qui ne sont pas vues par l'analyseur de surface d'onde en effectuant un étalonnage distinct.

Dans les années 1980 et 2000, de nombreux programmes de développement d'armes à énergie dirigée avec OA ont vu

le jour, notamment aux Etats-Unis et en France. L'Airborne Laser visant à développer et à mettre en service un système d'arme laser aéroporté à haute énergie contre les missiles balistiques en phase de poussée a constitué le programme majeur aux Etats-Unis. Comme la plupart des projets d'armes laser de cette époque, il était trop ambitieux au regard des technologies disponibles et a été abandonné à l'orée des années 2000. Néanmoins, cette période a été extrêmement féconde pour l'OA puisqu'elle a permis de mettre en place, aux Etats-Unis mais également en France et en Europe, les acteurs industriels clés en mesure de proposer des briques technologiques voire des systèmes complets d'OA. Elle a également permis de faire émerger une communauté scientifique en optique adaptative qui a soutenu son développement dans de nombreux domaines applicatifs comme l'astronomie, l'ophtalmologie ou la microscopie. Ainsi, aujourd'hui, la France et l'Europe disposent d'un ensemble d'industriels qui proposent des composants ainsi que des solutions complètes en OA. On peut par exemple citer Cilas, Alpao, Imagine Optic, Safran Reosc, Microgate pour les miroirs déformables, Phasics et Imagine Optic pour les analyseurs de surface d'onde, Toptica pour les sources pour les étoiles laser, Cilas, Alpao, Imagine Optic pour les systèmes d'OA.

Depuis 2000, l'avènement de nouvelles sources laser plus facilement embarquables comme les sources laser fibrées et l'apparition de nouvelles menaces ●●●

Figure 1. Principe de la précompensation des aberrations induites par la turbulence atmosphérique à l'aide d'un système d'OA.



ILAO STAR

Mechanical
deformable
mirror
dedicated to
ultra
intense lasers

Customized to laser
parameters

Ultra-linear

Ultra-stable



www.imagine-optic.com

sales@imagine-optic.com
+33 1 64 86 15 60

imagine  optic



Figure 2. Système d'arme à énergie dirigée antidrone HELMA-P, High Energy Laser for Multiple Applications -P, développé par la société Cilas.

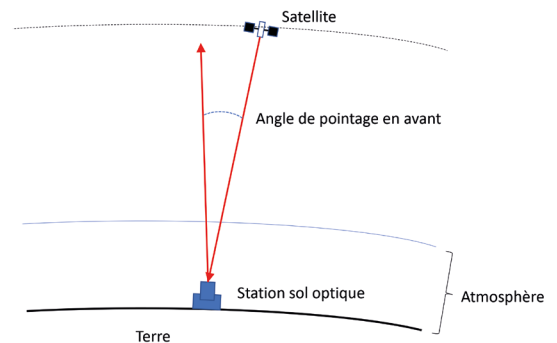
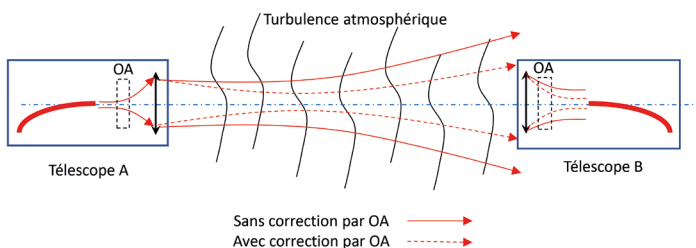
ne nécessitant pas des puissances aussi élevées comme les drones, beaucoup plus lents et plus fragiles que des missiles balistiques ont relancé l'intérêt des armes anti structures à énergie dirigée. Plusieurs systèmes sont en cours de déploiement comme le Layered Laser Defense system américain, l'Iron beam israélien, le DragonFire britannique ou Helma - P français (cf. Figure 2). Parmi ceux-ci, le Layered Laser Defense system est le premier à intégrer un système d'optique adaptative pour s'affranchir des effets de la turbulence atmosphérique.

L'application de l'OA aux armes à énergie dirigée est toutefois limitée par plusieurs restrictions à l'application de la réciprocité et de la précompensation.

La première limitation concerne le pointage. En effet, le faisceau illuminateur étant soumis aux effets de la

turbulence, il subit des déplacements aléatoires sur la cible. Si la cible est résolue, le laser de puissance peut subir ces mêmes déplacements. Plusieurs approches ont été proposées pour s'affranchir de ce problème. La plus générale consiste à éclairer la totalité de la cible et à stabiliser le faisceau sur cette image. Cette solution trouve ses limites lorsque la source est plus grande que le domaine isoplanétique des aberrations induites par la turbulence atmosphérique.

Figure 3. Principe d'un lien optique en espace libre. Lien horizontal dans la basse atmosphère (gauche). Lien sol-satellite (droite).



Lorsque la cible se déplace par rapport à la ligne de visée, la cible elle-même ne peut plus être utilisée. Il est nécessaire de pointer le faisceau laser en avant de la position apparente de la cible en raison de la vitesse limitée de la lumière. Par exemple, dans le cas d'un satellite en orbite basse visé depuis le sol, l'angle de pointage en avant peut atteindre la dizaine de secondes d'arc. Cet angle est trop élevé pour que les aberrations induites par la turbulence atmosphérique vues par le faisceau montant et celles vues par le faisceau descendant puissent être considérées comme identiques, du moins dans le domaine visible. Les concepts d'étoile laser (Rayleigh puis Sodium) et de tomographie ont été imaginés afin de s'affranchir de l'absence de source dans la direction d'intérêt et d'estimer la surface d'onde à précompenser dans une direction quelconque [2]. Ces concepts sont aujourd'hui principalement développés pour l'observation astronomique. Il faut toutefois souligner qu'ils ne donnent pas accès aux aberrations de basculements et de focalisation de l'onde et que la complexité de leur mise en œuvre limite leur emploi à des systèmes ambitieux.

Une autre difficulté apparaît lorsque la distance de propagation dans l'atmosphère turbulente devient trop élevée. Dans ce régime, dit des fortes perturbations, l'amplitude de l'onde est fortement modulée et des dislocations de sa phase peuvent apparaître. Ces dislocations qui se traduisent par des sauts de 2π sur la phase sont chromatiques. Dans ce régime, on montre que l'efficacité de la précompensation pour la focalisation diminue. Par ailleurs,

les analyseurs de surface d'onde et les miroirs déformables développés initialement pour des aberrations achromatiques et des surfaces d'onde continues ne sont plus adaptés.

COMMUNICATIONS OPTIQUES

Les communications optiques en espace libre font également l'objet de développements très actifs pour les applications civiles comme militaires depuis plusieurs décennies. En effet, la fréquence et les technologies développées pour les liens en optique guidée permettent d'envisager des débits inaccessibles avec les fréquences radios. Par ailleurs, la faible longueur d'onde autorise des faisceaux de grande directivité difficiles à intercepter (des liens discrets). Cette directivité limite de fait d'éventuels problèmes d'interférences et réduit la puissance nécessaire à l'émission.

La Figure 3 présente le principe d'un lien optique en espace libre. Dans le cas d'une communication à haut débit, le signal optique à l'émission comme à la réception est transporté par une fibre optique monomode. Le faisceau optique émis par le télescope A est collecté par le télescope B. En présence de turbulence atmosphérique, la puissance transmise de fibre à fibre peut être affectée, de même que le débit de données qui en dépend. D'une part, le beam wander et le beam spreading peuvent réduire et faire varier la puissance collectée par le télescope B, d'autre part, les éventuelles fluctuations spatiales de la phase de l'onde incidente sur le télescope B peuvent dégrader le couplage de l'onde dans la fibre au foyer du télescope B, et introduire une autre source d'atténuation moyenne et d'évanouissement du signal.

L'utilisation de sources lasers plus puissantes permet de s'affranchir des atténuations moyennes. Différentes solutions, physiques ou numériques existent également pour s'affranchir des effets des évanouissements. Néanmoins, ces solutions présentent des contraintes de mise en œuvre. L'utilisation d'OA peut être préférée.

Ainsi, une OA placée dans le télescope A peut précompenser les effets de beam wander et beam spreading de la même façon qu'avec une arme à énergie dirigée. Parallèlement, comme en astronomie, une OA placée dans le télescope B peut permettre d'aider au couplage du faisceau dans la fibre optique placée au foyer. Cette double implantation appelle plusieurs remarques. Tout d'abord, si on considère un faisceau se propageant de B vers A, les rôles des OA sont inversés. Cette dualité trouve son origine dans le principe de réciprocité. Ensuite, l'implantation d'OA est très dépendante de la géométrie du dispositif et de la répartition de la turbulence le long du trajet. Enfin, ces optiques adaptatives souffrent de plusieurs limitations déjà évoquées pour les armes à énergie dirigée. En effet, le pointage par lui-même ne pose pas de difficulté, puisque la cible est coopératrice. En revanche, si le télescope B se déplace par rapport à la direction de visée du télescope A, le pointage en avant constitue toujours un problème pour la mesure des perturbations. Par ailleurs, les discontinuités de phase sont à gérer lorsque les perturbations sont très fortes.

Des développements sont en cours pour disposer de stations optiques sol pour les liens sol-satellites à très haut débit (cf. Figure 4). Certaines, notamment dans le cas de liens avec des satellites géostationnaires, intégreront des OA. Les perturbations atmosphériques étant proches du sol, en regard de la distance de propagation, une OA unique dans la station sol est suffisante. Dans le cas du lien montant, l'erreur spatiale due à l'anisoplanétisme est l'erreur principale de correction, le principe de réciprocité n'étant pas exactement vérifié du fait du pointage en avant.

L'intérêt de l'optique pour les communications ne se limite pas aux liens sol-satellites. Des liens optiques sont également envisagés entre le sol et des plates-formes aéroportées, en particulier des drones, voire entre plates-formes aéroportées, marines ou sous-marines [4].

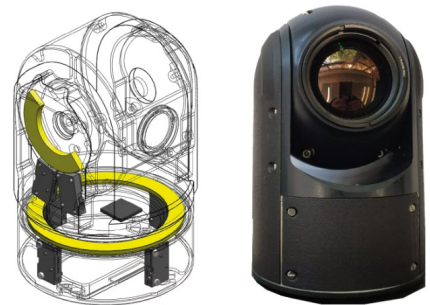
PRO-LITE
TECHNOLOGY

Du mouvement pour l'optronique

La photonique est un secteur très important pour la défense, particulièrement lorsqu'elle est associée à l'électronique pour former l'optronique.

Si l'optronique est si indissociable du secteur de la défense, c'est que les ingénieurs ont su adapter des équipements optiques pour les rendre miniatures, portables et robustes.

Le mouvement est omniprésent dans l'optronique pour la défense, stabilisations actives, systèmes d'autofocus ou mouvement angulaire.



Chez Pro-Lite, nous fournissons du mouvement pour les équipements optroniques. Grâce à la technologie piézo-céramique de Nanomotion, nous équipons le secteur optronique européen avec des modules de déplacements compacts, légers et fiables.

La technologie de Nanomotion permet une grande compacité, une consommation électrique limitée et une très grande précision. Pour l'imagerie thermique, les autofocus ou les tourelles optroniques, il y a un intérêt à gérer le mouvement grâce à un moteur Nanomotion. ●

CONTACT

Pierre CLAUDEL
pierre.claud@pro-lite.fr
+33 (0)5 47 48 90 70



Figure 4. Exemples de stations optiques sol : TILBA-OGS, solution industrielle proposée par la société Cailabs (gauche), FEELINGS, plateforme de démonstration expérimentale développée par l'ONERA (droite).

Dès 2006, la société AOptix faisait la démonstration d'une communication optique à 80 Gb/s sur 1,5 km entre un ballon et le sol avec une OA à la réception. Aujourd'hui, des liens horizontaux ou quasi-horizontaux dans la basse atmosphère sont envisagés sur des distances qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de kilomètres. Des approches nouvelles sont développées pour adapter l'OA au régime de fortes perturbations qui caractérisent ces propagations. Le contrôle n'est plus effectué sur une mesure dérivée de la surface d'onde mais directement par optimisation du signal d'intérêt. La précompensation est réalisée avec des composants actifs à même de créer des champs présentant des discontinuités de phase comme par exemple le miroir déformable segmenté (MEMs) proposé par Boston MicroMachines Corporation, ou bien un multiplexeur optique associé à un circuit photonique intégré [5].

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le laser constitue une solution très prometteuse pour la dépose d'énergie à distance ou la transmission de données à haut débit et sécurisée, si l'influence du milieu de propagation peut être corrigée par optique adaptative. Du fait de l'accroissement des puissances accessibles et de l'apparition de menaces relativement vulnérables, la neutralisation de cibles par laser connaît un regain d'intérêt. De premiers systèmes émettant des puissances de l'ordre de 100 kW avec optique adaptative sont actuellement déployés. Dans le domaine

des communications, les liaisons optiques satellite-sol haut débit avec optique adaptative sont en passe de devenir réalité.

La compaction des sources et des dispositifs de correction, notamment grâce aux technologies issues de la microélectronique, permet d'envisager dans les décades à venir des usages de plus en plus mobiles avec leur corollaire de défis à relever.

Un premier défi est l'extension des domaines d'emploi de ces dispositifs. Ainsi, la transmission de données et le dépôt d'énergie dans la basse atmosphère lorsque les terminaux et les cibles sont rapidement mobiles, impliquent d'aborder les questions du déplacement rapide de la direction du faisceau et celle des fortes perturbations. Pour ce faire, la capacité à

piloter des modes du champ perturbé est une piste prometteuse. La prise en compte d'objets de grandes dimensions et de géométrie évolutive sont deux autres problèmes plus spécifiquement liés à la dépose d'énergie.

Le second défi est leur usage dans des environnements sévères et rapidement évolutifs. Le déploiement des solutions évoquées est conditionné par la perspective d'une opération automatisée, robuste et fiable de dispositifs complexes et sensibles. Il s'agit d'une part d'adapter la correction aux conditions d'opération, d'autre part de donner une prédiction précise de ses performances. L'arrivée de l'Intelligence Artificielle laisse entrevoir des pistes pour résoudre ce défi. D'une part, l'utilisation du reinforcement learning pourrait permettre d'adapter les paramètres de la correction à un environnement d'opération évolutif. D'autre part, l'accélération des outils de prévision météorologique couplés à des outils d'évaluation de performance fiables devrait répondre au besoin de prédiction. ●

RÉFÉRENCES

- [1] R. L. Fante, *Proceedings of the IEEE* **63**, 1669 (1975)
- [2] D. P. Greenwood, C. A. Primmerman. *Lincoln Laboratory Journal* **5**, 1 (1992)
- [3] G. Rousset, J. C. Fontanella, P. Kern *et al.*, *Astron. Astrophys.* **230**, L29-L32 (1990)
- [4] S. Kumar, N. Sharma, *J. Phys.: Conf. Ser.* **012011** (2022)
- [5] V. Billault, J. Bourderionnet, J. P. Mazellier, *Opt. Express* **29**, 33134 (2021)