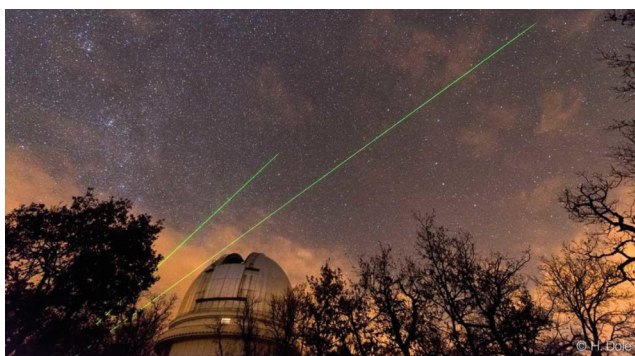


La télédétection lidar : des fondements aux applications industrielles

En France, la recherche sur les lidars est particulièrement dynamique et couvre une grande diversité d'applications. Ces travaux scientifiques ont conduit à des transferts industriels fructueux, notamment dans le domaine des lidars destinés à la caractérisation de l'atmosphère. D'autres domaines d'application buttent encore sur la taille et le coût de ces systèmes. Le Club Lidar de la SFO a pour vocation de promouvoir les échanges scientifiques au sein de cette communauté de chercheurs.



Photographie d'un tir lidar à l'Observatoire de Haute Provence (OHP – Crédit Hervé Dole).

<https://doi.org/10.1051/photon/202613619>

Patrick FENEYROU¹*, Alain MIFFRE², Philippe KECKHUT³, Philippe GOLOUB⁴, Stéphane VICTORI⁵, Sophie GODIN-BEEKMANN³, Nicolas CEZARD⁶, Laurent LOMBARD⁷, Fabien GIBERT⁸, Irène XUEREF-REMY⁹

¹Thales TRT, Palaiseau, France, ²ILM, Lyon, France,

³LATMOS, Paris, France, ⁴LOA, Lille, France

⁵Cimel, Paris, France, ⁶ONERA, Toulouse, France

⁷ONERA, Palaiseau, France, ⁸LMD Palaiseau, France

⁹OSU Pythéas, Aix-en-Provence, France

*patrick.feneyrou@thalesgroup.com

Un lidar (acronyme de Light Detection and Ranging) est un système de télédétection optique analogue du radar bien connu dans le domaine micro-ondes. Cette méthodologie a connu un essor remarquable à la suite de l'invention du laser (années 1960), en mettant à profit la directivité du faisceau (pour accroître la portée du lidar) et/ou ses caractéristiques spectrales (en vue d'applications spectroscopiques). Aujourd'hui, son champ d'application est particulièrement vaste, allant de l'archéologie, à la météorologie et l'étude de l'atmosphère depuis le sol comme par satellite, à la défense, à la topographie et la bathymétrie, aux transports et même aux loisirs. Cette diversité conduit à des systèmes dont la taille, la finalité ou encore les composants utilisés sont eux-mêmes diversifiés. La portée varie ainsi de quelques cm à plusieurs centaines de milliers de km pour la télémétrie Terre-Lune, avec des résolutions de quelques μm à plusieurs centaines de mètres et des mesures cadencées de la μs jusqu'à plusieurs heures. Certaines de ces caractéristiques découlent de l'intensité très faible des signaux à mesurer (jusqu'à 25 ordres de grandeur inférieurs à la puissance émise) combinée aux contraintes de sécurité oculaire qui limitent la puissance optique pouvant être émise. L'ensemble de ces paramètres doit donc être adapté lors de la conception du système, en fonction de l'application et des caractéristiques de la cible (aérosols et/ou molécules atmosphériques – cibles dures). La conception doit également tenir compte de la plateforme utilisée qui peut aller de dispositifs portables grand public à des plateformes mobiles - sur rail, sur route ou aéronautique - jusqu'au domaine spatial. A ce titre, l'environnement du lidar peut constituer une contrainte importante en raison des larges variations de température, des vibrations, du rayonnement, ainsi que de la nécessité de gérer des échos parasites inévitables (tel que l'écho de la surface de la mer en bathymétrie). Enfin, les contraintes de taille, de masse, de consommation et de coût constituent un frein au déploiement de tels systèmes pour nombre d'applications.

Cet article a pour objectif d'illustrer les principaux axes de recherche sur les lidars, de l'étude des composants élémentaires au développement de nouvelles architectures et méthodes de mesure, en passant par le traitement et la qualification des signaux acquis, jusqu'à l'exploitation des produits des ●●●

mesures lidar. Les auteurs sont membres du Club Lidar de la SFO créé en 2021. Ce club, favorise le dialogue au sein de la communauté nationale sur les lidars, notamment lors de son école biannuelle (2023, 2025). Leur diversité conduit nécessairement à un survol de ces thématiques et le tableau 1 présente les contributions des auteurs. Le tableau 2 propose des liens vers les principaux réseaux et applications lidar. Pour illustrer le niveau de maturité de cette technologie, une seconde section présente les freins au transfert industriel mais également plusieurs réussites de transfert à un niveau commercial. Le document se termine par une conclusion et propose des perspectives à l'échelle internationale.

Composants et architecture lidar

a. Des composants optiques nouveaux au service de lidars plus performants

La recherche sur les composants optiques pour les lidars se concentre notamment sur les axes suivants :

- *Les sources laser.* La recherche sur les sources laser (fibrées, cristallines, ou hybrides) est un domaine foisonnant, et les systèmes lidars bénéficient de leurs progrès selon de multiples dimensions, en particulier dans la zone dite à sécurité oculaire : augmentation de la puissance pour une portée accrue, de l'accordabilité spectrale pour la détection de gaz, de la finesse spectrale (lidars à détection cohérente), de la modularité et des capacités de modulation en amplitude comme en fréquence pour des mesures multifonctions, de la compacité pour les lidars embarqués... L'emploi de sources laser hybrides, mélangeant des étages d'amplification fibrés et d'autres en espace libre, vise à associer les atouts des sources fibrées (cavité intégrée, architecture facile à aligner et peu sensible aux vibrations) et ceux des amplificateurs cristallins (haute puissance de sortie). Une telle combinaison permet d'éviter l'écueil des cavités laser en espace libre, elles aussi très puissantes mais beaucoup plus sensibles aux perturbations extérieures.
- *Les détecteurs optiques.* L'objectif principal est ici d'accroître la sensibilité dans l'IR (> 1,7 µm) où il n'existe pas de détecteur amplifié (photomultiplicateurs, photodiodes à avalanches). Pour les lidars, ces études trouvent principalement leur application dans les systèmes à détection directe. Des convertisseurs non-linéaires de fréquence rendent aujourd'hui possible l'emploi de détecteurs bas-bruit, fonctionnant dans le visible/proche-IR, dans des bandes spectrales dans l'IR moyen. Ces aspects de détection peuvent être associés à d'autres fonctions de technologie photonique intégrée. Ces développements visent à réduire la taille des dispositifs mais également à accroître leur stabilité thermique, dans un environnement soumis à des vibrations intenses.
- *Les systèmes de balayage/ Imagerie rapide.* L'observation 3D est réalisable par « scanning imaging » ou « flash imaging », ces techniques utilisant respectivement des détecteurs monopixel ou matriciel. Pour l'imagerie par balayage, les exigences de cadence de certains systèmes embarqués sont difficilement atteignables avec des dispositifs mécaniques. La recherche de scanners non mécaniques trouve alors naturellement son application.

b. Les systèmes lidar et les nouvelles méthodes associées

Les systèmes lidars reposent sur deux types de détection : l'une basée sur l'intensité lumineuse (détection directe), l'autre fondée sur la mesure d'un battement (détection cohérente).

- Concernant la détection directe, de nouveaux algorithmes d'inversion voient le jour pour permettre une meilleure classification des aérosols minéraux (poussières), urbains, biologiques (pollens), de combustion (suies) et de leur origine. On peut citer la télédétection lidar élastique / inélastique, avec des applications sur le climat et la qualité de l'air (ACTRIS), incluant des aspects de fluorescence, et même d'incandescence et de partitionnement optique de mélanges à deux et à trois composantes (sulfates, minéral, sels marins).
- Concernant la détection cohérente, jadis appliquée exclusivement dans l'IR, des solutions fibrées dans le visible sont utilisées de nos jours. Ces architectures cohérentes permettent

CONTRIBUTEUR	THÉMATIQUES DE RECHERCHE
CIMEL	Fabricant d'instruments de télédétection dont des lidars pour la détection des aérosols et des gaz
iLM	Aérosols, polarimétrie, expériences de laboratoire à 180°, développement méthodologique
LATMOS	Stratosphère, ozone, température, aérosols, vent, surveillance atmosphérique, DIAL
LMD	Lidar atmosphère, Raman, DIAL et Doppler, sources laser et détection NIR pour lidar
LOA	Développement et exploitation des lidars : propriétés et dynamique des aérosols et des nuages
ONERA	Mesure de vent et de concentration de gaz (CO ₂ , CH ₄ , H ₂) par lidars à détection cohérente et/ou à détection directe. Mesures de distance, de vibration, de rugosité. Conception et réalisation de sources laser fibrées forte énergie pour lidar (UV, 1µm, 1.5µm, 2µm)
PYTHEAS	Lidar aérosols, Troposphère, surveillance atmosphérique, propriétés optiques, ACTRIS
THALES	Téléométrie, vélocimétrie et anémométrie, Conception de circuits photoniques intégrés (PIC), Sources laser pour lidar

Tableau 1. Contributions des auteurs à la Télédétection lidar.

Tableau 2. Sigles et liens proposés vers les principaux réseaux et applications lidar.

RÉSEAU	MOTS CLEFS ET LIEN
ACTRIS	The Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure - https://www.actris.fr/
Aeolus	https://earth.esa.int/eogateway/missions/aeolus
EARLINET	European Aerosol Research Lidar Network https://earlinet.eu/
EarthCare	Earth Cloud, Aerosol and Radiation Explorer https://earth.esa.int/eogateway/missions/earthcare
IGN - LiDAR HD	https://geoservices.ign.fr/lidarhd
MERLIN	Methane Remote Sensing Lidar Mission https://cnes.fr/projets/merlin
NDACC	Network for the Detection of Atmospheric Composition Change - https://ndacc.larc.nasa.gov/

des mesures de décalage Doppler (lidar vent) ou, sur cibles dures, des mesures de télémétrie et vélocimétrie simultanées à haute résolution. Ces architectures lidar sont encore à l'étude pour augmenter la portée des systèmes, notamment dans le domaine des transports. La recherche sur les lidars « smart-pulses » illustre l'hybridation entre détection cohérente et détection directe, en combinant différentes modulations temporelles et spectrales de la lumière (découpage d'impulsions, façonnages en peignes ou forme d'onde basée sur des rampes de fréquences) pour permettre différentes fonctions de mesure au sein d'un seul système lidar.

c. Les traitements et qualification du signal lidar

Une fois le système lidar développé et opérationnel, l'exploitation des mesures lidar, qu'elles soient atmosphériques ou sur cible dure, suit généralement les étapes suivantes :

- *L'inversion lidar*, permettant de résoudre le problème inverse (par exemple la distance à partir du signal lidar). Cette étape aboutit à la définition de nuages de points dont la complétude et la précision sont contrôlés. De manière complémentaire, l'inversion lidar permet des avancées sur le bilan radiatif dans l'atmosphère. L'algorithme BOREAL restitue ainsi les propriétés microphysiques des aérosols à partir de leur extinction, rétrodiffusion et dépolarisation, également accessibles en laboratoire en géométrie lidar de rétrodiffusion à 180 deg.
- *La classification*. La figure 1 illustre la capacité de classification des aérosols. Un autre exemple typique est la production à partir d'un nuage de points de modèles numériques de terrain dans le cadre de la lasergrammétrie. Cette étape, qui fait souvent appel au Deep Learning, attribue à chaque point une classe comme « bâtiment », « sol », « végétation »... En robotique et dans le domaine des transports, cette étape recouvre l'ensemble des algorithmes de localisation et cartographie simultanées (SLAM).

- *La mise à disposition des données lidar*, centralisées dans des bases de données publiques (ACTRIS, EARLINET, AERIS, ...), accessibles y compris à des utilisateurs non spécialistes (IGN, Pôle, ...).

Exemples d'utilisation des produits de mesure lidar

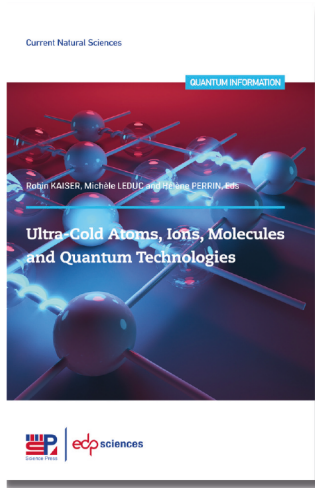
a. Topographie et modèles numériques de terrain

Dans le cadre du programme national LiDAR HD, l'IGN produit et diffuse une cartographie 3D de l'intégralité du sol et du sursol de la France en données lidar ainsi que des modèles numériques de terrain. Les données accessibles par blocs de 50×50 km² sont en particulier des nuages de points recalés, bruts ou classifiés avec une densité de points supérieure à 10 pts/m², une précision altimétrique meilleure que 10 cm et une précision en planimétrie meilleure que 50 cm. L'acquisition de ces données a mobilisé plus de 7000 heures de vol avec des systèmes lidar commerciaux fonctionnant à 1064 nm à une cadence de 1 à 2 MHz, couplés à des centrales inertielles et GPS. Le contrôle qualité s'est notamment appuyé sur des mesures complémentaires au sol. La classification a été réalisée selon 11 catégories. Cette cartographie est maintenant utilisée pour la prévention des risques d'inondations, les gestions forestières et agricoles, l'urbanisme. Une politique rigoureuse de contrôle qualité est également appliquée avec des mesures complémentaires pour vérifier que les algorithmes d'intelligence artificielle attribuent correctement les classes et que les données forment un ensemble complet. La figure 2 présente un exemple du nuage de points accessible sur le site LiDAR HD.

Ce même type de lidar est utilisé en archéologie, domaine dans lequel il apporte notamment une capacité de détection au travers du couvert végétal.

Ultra-cold atoms, ions, molecules and quantum technologies

By Robin Kaiser, Michèle Leduc, Hélène Perrin



This book is the English translation of 'ATOMES, IONS, MOLÉCULES ULTRAFROIDS ET TECHNOLOGIES QUANTIQUES' that received a special mention from the Roberval prize jury in the category 'Academic books'.

The field of cold atoms was born forty years ago and today remains a theme regularly awarded Nobel Prizes and at the forefront of physics research. The book presents the most recent developments and traces the exceptional growth of this field over the last ten years.

Prix
Roberval 

ISBN : 978-2-7598-2745-9
192 illustrated pages
Price : 95 €
Also available in ebook
On sale on
laboutique.edpsciences.fr



b. Etude de l'atmosphère

Le développement de filières (nationales et européennes) de traitement centralisé (ACTRIS/AERIS) permet d'harmoniser les données optiques aérosols issues de multiples lidars. L'initiative européenne, menée par l'Infrastructure de Recherche ACTRIS et les partenaires d'EARLINET, a transformé un réseau dispersé en une infrastructure intégrée, grâce à l'harmonisation des protocoles, au contrôle qualité et à l'intégration des bases de données dans ACTRIS-ARES, garantissant des produits homogènes et accessibles. Des filières de traitement communautaire, des services quasi temps réel pour les campagnes opérationnelles et des produits de niveau supérieur destinés à la validation satellitaire (EarthCare, en partenariat avec le CNES), à la modélisation et aux applications climatiques et de qualité de l'air ont été développés. L'apport majeur réside dans la qualité, la standardisation et la mise à disposition de données et produits prêts à l'emploi, qui rendent possible un usage opérationnel et scientifique à grande échelle des observations lidar en Europe. En France, les lidars aérosols ACTRIS opèrent sur les observatoires ou sites instrumentés nationaux avec, depuis 2020, l'intégration des mesures lidar de gaz trace atmosphériques effectuées dans le cadre du réseau international NDACC. Les lidars mesurant le profil d'ozone dans la stratosphère et la troposphère font également partie des mesures intégrées dans ACTRIS. Ces mesures lidar de long-terme sont effectuées en France à l'Observatoire de Haute-Provence (OHP) et à l'Observatoire de Physique de l'Atmosphère de La Réunion. Ces séries de profils d'ozone s'étendent sur plusieurs décennies et sont les plus longues séries de ce type à l'échelle mondiale. Ce réseau de mesures pour la surveillance de l'ozone stratosphérique a été ensuite élargi à la mesure des gaz trace, des aérosols et des paramètres dynamiques de la troposphère libre à la mésosphère.

Maturité des systèmes lidar et quelques exemples de transfert industriel

La plupart des systèmes lidar ont atteint un niveau de maturité élevé. Cependant, le transfert industriel butte fréquemment sur plusieurs difficultés. La technologie lidar reste fréquemment perçue comme couteuse et complexe. La capacité multi-fonction, pourtant réelle et dont la prise en compte permettrait de relativiser le coût, est parfois perçue comme conduisant à une pénalité incontournable sur les performances de détection. Récemment, les perspectives liées au marché de l'automobile ont conduit à de nombreuses annonces, pas toujours factuelles. Enfin, l'impression de complexité peut venir de la diversité de ces systèmes. Cette constatation a conduit à la définition de normes dans le but de faciliter l'uniformisation des systèmes et de l'exploitation des données. A titre d'exemple, la norme NF ISO 28902 portant sur la qualité de l'air et la météorologie de l'environnement comprend plusieurs volets associés à l'utilisation des lidars pour la mesure de la portée visuelle et de vent (par détection cohérente, pulsée ou à émission continue).

Malgré ces freins, plusieurs transferts réussis issus de travaux de recherche ont cependant marqué l'histoire du lidar.

L'ONERA développe des lidars vent cohérents depuis les années 90. A cette époque, les sources étaient des lasers CO₂ continus et les montages hétérodynes étaient en espace libre. L'essor des télécoms des années 2000 a engendré un développement rapide de la technologie fibrée à 1,5 μm, incluant des sources laser compactes et fiables, des amplificateurs Erbium, des composants fibrés de type circulateurs, séparateurs de polarisation, modulateurs acousto-optiques... Dans les années 2000, l'ONERA a utilisé ces composants pour concevoir et démontrer les premiers lidars vent tout fibrés et résolus en distance. Ces développements ont été transférés à KEOPSYS (maintenant LUMIBIRD) pour la source laser et LEOSPHERE (maintenant VAISALA) pour l'architecture lidar et le traitement de signal. LEOSPHERE a développé son premier WindCube d'après le démonstrateur de laboratoire de l'ONERA transféré, et est maintenant leader mondial sur le marché des lidars pour l'éolien.

De même, le laboratoire commun AGORA-Lab, partenariat entre le LOA et CIMEL, illustre un autre transfert réussi de la recherche vers l'industrie. Il a conduit au développement d'instruments innovants tels que le CE376, lidar Raman compact et automatisé pour la surveillance atmosphérique locale, et le CE710, prototype avancé de lidar à fluorescence multi-longueur d'onde (LIFE). Ces systèmes combinent l'expertise scientifique du LOA et le savoir-faire industriel de CIMEL, garantissant fiabilité et interopérabilité au sein d'ACTRIS. Cette synergie accélère la mise sur le marché de lidars intégrant mesures Raman, polarisation et fluorescence, ouvrant la voie à une nouvelle génération d'outils opérationnels pour la surveillance atmosphérique.

D'autres sociétés comme Gordien Strato développent des systèmes lidars basés notamment sur le savoir-faire acquis au sein de laboratoires comme le LATMOS. Enfin, des grands groupes industriels développent également des systèmes pour leurs marchés respectifs, qu'il s'agisse de la défense ou des transports et bénéficient du tissu français de laboratoires académiques au travers de projets collaboratifs.

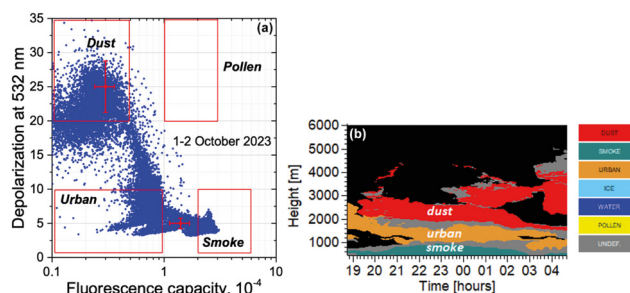


Figure 1. (a) Diagramme Dépolarisation-Fluorescence montrant les domaines caractéristiques de différents types d'aérosols (poussière, pollen, fumée, urbain). (b) : Distribution spatiotemporelle des types d'aérosols durant la nuit du 1^{er} au 2 octobre 2023 sur le site ATOLL-Université de Lille (source I. Veselovskii, B. Barchunov, Q. Hu, P. Goloub, T. Podvin, M. Korenski, G. Dubois, W. Boissiere, and N. Kasianik : Retrieval and analysis of the composition of an aerosol mixture through Mie-Raman-fluorescence lidar observations, *Atmos. Meas. Tech.*, **17**, 4137–4152, <https://doi.org/10.5194/amt-17-4137-2024>, 2024 sous licence CC BY 4.0).

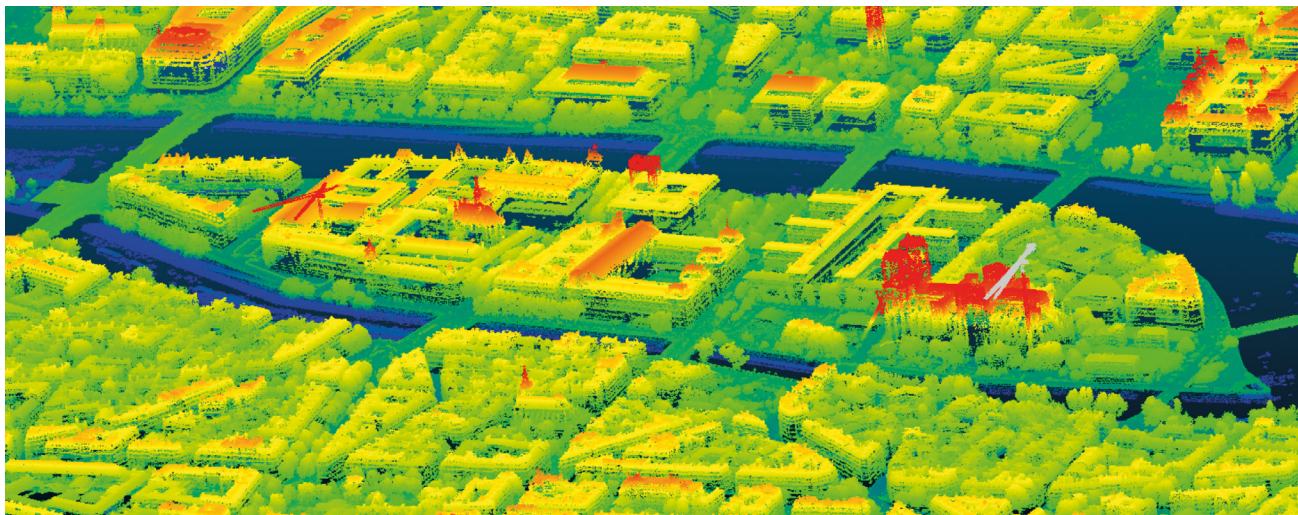


Figure 2. Nuage de points sur l'Île de la Cité - Paris (Données issues de LiDAR HD - IGN - <https://geoservices.ign.fr/lidarhd> - données chargées en Oct. 2025).

De manière complémentaire, des développements sont réalisés, en partenariat avec le CNES, pour contribuer au développement de nouveaux lidars satellites (Aeolus, EarthCare, MERLIN), reposant sur les développements, en matière de sources laser, détecteurs optiques et inversions lidar mentionnés ci-dessus, basés sur des développements en recherche fondamentale notamment en optique.

Conclusion

Le positionnement français est reconnu à l'échelle internationale, notamment au sein des projets portés à cette échelle (réseaux européens, missions satellites, conférences

internationales dont CRLC et ILRC). Si la concurrence asiatique se distingue par une forte intensité en dépôts de brevets et par une stratégie de réduction des coûts, les lidars développés en France conservent un haut niveau de performance. Issus de la recherche fondamentale et appliquée menée en optique dans les laboratoires et institutions nationales, ils reposent sur des technologies émergentes à l'origine d'innovations souvent disruptives. L'effort de transfert dans le domaine industriel a connu des succès et doit se poursuivre en travaillant notamment sur l'acceptabilité de la technologie qui passe notamment par une réduction de la taille et du coût des systèmes lidar et l'accroissement de leur automatisation. ●

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

- De 200 à 15000 nm
- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock



Réseaux Holographiques

- De 150 à 2000 nm
- Compression d'impulsion
- Télécom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock



UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000
 Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800
 US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com