

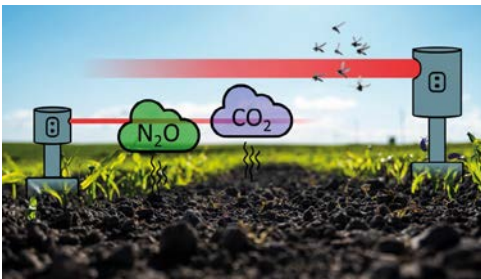
# LA TECHNOLOGIE LiDAR POUR UNE AGRICULTURE INNOVANTE ET PRÉCISE

Sofian HELMER<sup>1</sup>, Benjamin GAC<sup>2</sup>, Antoine FOURNIER<sup>2</sup>, Gaspard RUSSIAS<sup>1</sup>, Stéphane PERRIN<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Photonics Bretagne, Equipe Biophotonique, 22300 Lannion, France

<sup>2</sup> Arvalis, Département Phénotypage des Plantes, 41240 Beauce-la-Romaine, France

\*sperrin@photonics-bretagne.com



<https://doi.org/10.1051/photon/202513528>

**Avec la démocratisation et la miniaturisation des sources impulsives, le LiDAR a su s'implanter dans de nombreux secteurs tels que le transport et l'aérospatial. Il permet de rapidement quantifier une information spatiale avec une grande précision ou un déplacement avec une fine sensibilité. Depuis quelques années, d'autres domaines s'intéressent à cette technologie comme l'agriculture afin de proposer des pratiques agricoles durables ou de faciliter les prises de décision.**

**A** l'instar du radar, le LiDAR (Light Detection And Ranging) est une technique de télédétection dont la méthode classique consiste à diriger une onde impulsionnelle monochromatique vers un objet à analyser [1]. L'onde rétro-propagée est ensuite collectée pour en déterminer un temps de vol puis en extraire une distance relative de l'objet. Un système de balayage de faisceaux permet de reconstruire une cartographie spatiale (communément appelée un nuage de points).

La miniaturisation des composants optiques et électroniques a progressivement démocratisé la technologie LiDAR dans des secteurs comme la

géomatique, le transport, l'aéronautique et l'agroforesterie. En agriculture, les dispositifs LiDARs peuvent être intégrés dans les drones aériens pour retrouver la structure de canopées (e.g. Zenmuse L2, DJI) ou terrestres pour reconstruire la topographie de terrains (e.g. LiDAR 3D développé par la société SICK pour le robot Orio, Naïo Technologies). Ils sont aussi employés pour le suivi de la biomasse aérienne et de la hauteur des cultures durant les cycles saisonniers afin d'ajuster les pratiques agronomiques. Des solutions de robotisation des interventions agricoles s'appuient entre autres sur des systèmes LiDAR pour sécuriser une navigation adaptative dans les parcelles et à proximité d'opérateur ou des cultures. Dans les sciences

agronomiques, le LiDAR sur drone volant est très utilisé pour élargir la portée du « tour de plaine » ou pour compléter le suivi traditionnel des plateformes expérimentales de plein champ dédiées au phénotypage des plantes.

Le LiDAR peut également dépasser la simple interrogation télémétrique pour un usage en sciences agronomiques en considérant l'amplitude du signal optique rétrodiffusé. Son analyse offre, par exemple, des indications pour la compréhension de l'environnement et l'écosystème des plantes (e.g. surveillance entomologique [2]) et de phénomènes physiologiques. Nous présentons ici trois voies de développement des LiDARs agrophotoniques pour la quantification des émissions de gaz

atmosphériques, pour le suivi de la fluorescence chlorophyllienne [3], et pour la mesure de réflectance foliaire active.

**LIDAR À ABSORPTION DIFFÉRENTIELLE**

En climatologie, l'amplitude du signal rétrodiffusé par les atomes présents dans l'atmosphère permet de suivre des concentrations de gaz à effet de serre et d'améliorer les prévisions d'évolution du climat. Pour cela, une déclinaison de la méthode LiDAR conventionnelle est généralement employée : le LiDAR à absorption différentielle DIAL (Differential Absorption LiDAR). Ce dernier consiste à générer simultanément deux impulsions à des longueurs d'onde très proches l'une de l'autre : l'une correspondant à une raie d'absorption du gaz d'intérêt (signal ON), l'autre étant très faiblement absorbée (signal OFF). La distribution spatiale de la concentration d'un gaz est ensuite retrouvée analytiquement en considérant le rapport d'amplitude des signaux rétrodiffusés. La sensibilité de mesure de concentration est principalement influencée par la capacité d'absorption des signaux ON et OFF par le gaz, ainsi que le décalage entre les deux longueurs d'onde et la pureté spectrale de la source. Pour des mesures intégrées dans un volume donné, on emploiera le terme IPDA (*Integrated Path Differential Absorption*) et une cible à l'extrémité du chemin optique est

TYPE DE LIDAR	PRINCIPE PHYSIQUE	USAGES EN SCIENCES VÉGÉTALES
Téléométrie	Temps de vol	Structure 3D du couvert, volume, hauteur
Fluorescence	Réémission spectrale	Détection de stress, pigments
DIAL	Absorption différentielle	Volatilisation des gaz traces (CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> )
Raman	Diffusion inélastique	Analyse chimique atmosphérique
Réflectométrie	Réflectance spectrale fine	Indices de végétation, phénotypage Estimation de traits biochimiques

alors nécessaire.

Dans les productions animales, les émissions directes de gaz à effet de serre (*e.g.* méthane) et de polluants atmosphériques (*e.g.* ammoniac) exercent une influence notable sur l'environnement, le bien-être animal et la santé des éleveurs. De plus, les pertes sous forme gazeuse en agriculture végétale (*e.g.* volatilisation de fertilisation azotée) ont un impact non négligeable sur l'économie des exploitations. Le besoin de cartographier les zones à fortes concentrations gazeuses dans les bâtiments d'élevage et au champ est alors crucial pour envisager des pratiques agricoles à la fois durables et performantes.

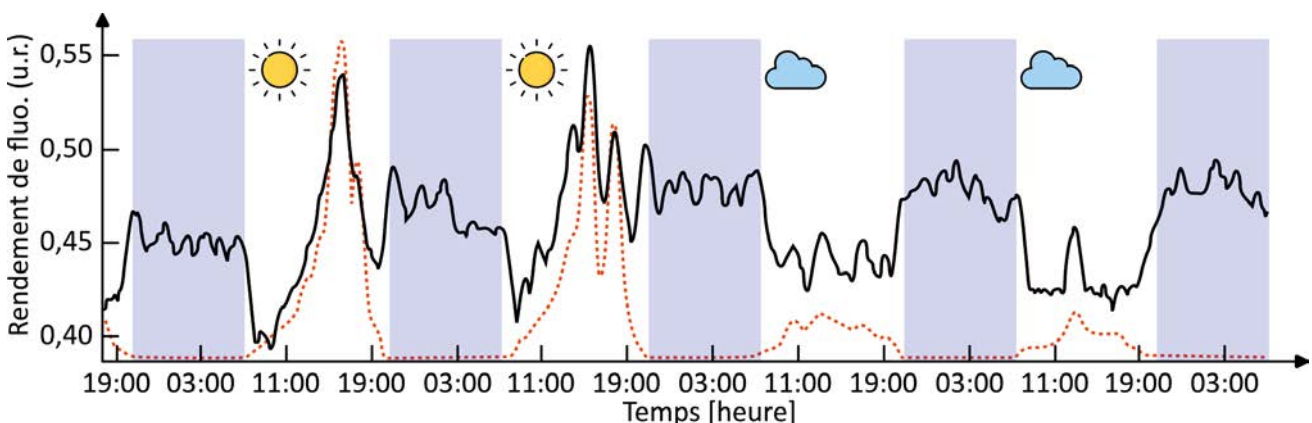
Les signatures spectrales de ces gaz d'intérêts sont prédominantes dans le moyen infrarouge. Elles sont parfois complexes à sonder *via* la technologie LiDAR car les détecteurs actuels n'offrent pas les performances nécessaires en termes de rapidité et de cadence d'acquisition. C'est le cas, par

exemple, du protoxyde d'azote dont l'une de ces bandes d'absorption forte se situe à environ 2200 cm<sup>-1</sup> (soit environ 4,5 µm). D'autres gammes spectrales, correspondant à des bandes d'harmoniques et d'autres transitions vibratoires, ou à des bandes de diffusion Rayleigh, sont généralement considérées pour l'écholocation de gaz (*e.g.* autour de 6100 cm<sup>-1</sup> pour le méthane), influençant cependant la sensibilité de mesure. Photonics Bretagne (en partenariat avec Arvalis) s'est donc récemment intéressé à la technologie DIAL dans le développement de capteurs sensibles, précis et robustes afin de quantifier les émanations gazeuses au terrain. Des premiers résultats concluants ont été obtenus, montrant des sensibilités de 0,4 ppm pour le protoxyde d'azote (IPDA) et sous les seuils de sécurité pour le méthane.

**LIDAR DE FLUORESCENCE**

Le suivi de stress biotiques et abiotiques et l'adaptation aux ●●●

**Figure 1.** Variation du rendement de fluorescence chlorophyllienne de plants de maïs. L'intensité normalisée de la luminosité ambiante est superposée en pointillé.



conditions environnementales sont essentiels en agriculture pour la sélection de nouveaux cultivars et la mise en place de pratiques culturales. Ils peuvent s'observer à travers un mécanisme naturel des plantes : la photosynthèse. Son efficacité est corrélée au rendement de fluorescence de la chlorophylle (*i.e.* marqueur naturellement présent dans la majorité des espèces de plantes). Le rendement peut être quantifié *via* une excitation par lumière naturelle (*e.g.* Solar Induced Chlorophyll Fluorescence, SIF) ou par un rayonnement artificiel afin d'explorer plus de paramètres physiologiques. Généralement, la mesure de fluorescence au terrain est réalisée à l'aide d'une pince à feuille. Ces dispositifs portables nécessitent cependant la présence permanente d'un opérateur agricole et les temps de mesure peuvent être longs. Ces contraintes techniques ont motivé des développements LiDAR afin d'automatiser les mesures à distance et à plus haut

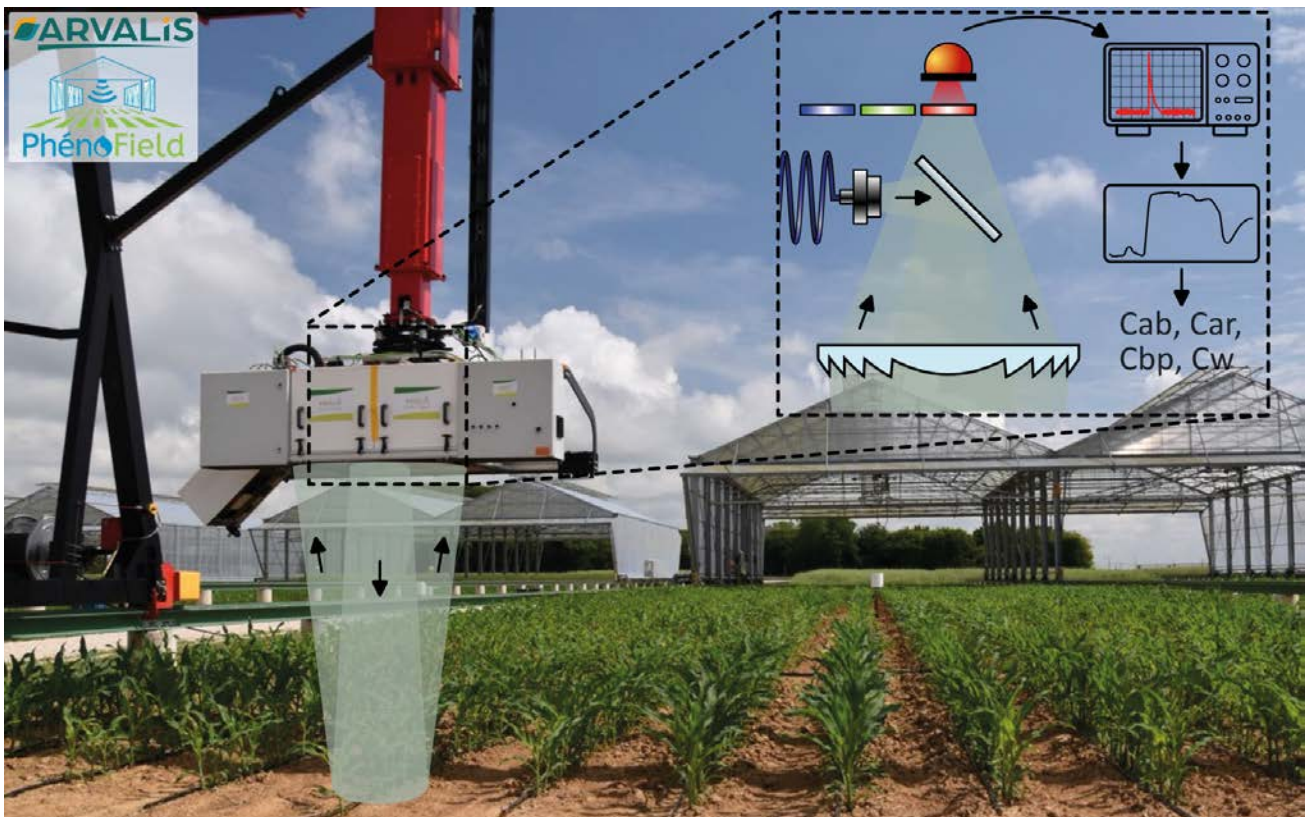
débit [4]. La technologie LiDAR de fluorescence donne accès à des variations d'état physiologique des plantes, ouvrant ainsi des perspectives d'amélioration dans les domaines du phénotypage, de l'agronomie et de la génétique.

Un système LiDAR de fluorescence, développé conjointement par Arvalis et l'Institut Foton (UMR CNRS 6082), repose sur une source laser émettant un train d'impulsions de quelques microsecondes à une longueur d'onde située dans la bande d'absorption de la chlorophylle, soit autour de 450 nm. Le signal de fluorescence est ensuite collecté entre 600 nm et 800 nm par détection synchrone. Les flux de lumière ambiante (*e.g.* soleil et éclairage dans les serres de culture) et spéculaire sont auparavant filtrés spectralement pour ne garder que les composantes d'intérêt. Les bandes spectrales d'excitation et d'émission de la fluorescence

chlorophyllienne offrent l'avantage de travailler avec les technologies silicium et des sources de type LED ou laser visible. Autrement dit, les composants photoniques abordables, compacts et efficaces en consommation énergétique, permettent d'envisager une intégration réussie dans le secteur de l'agriculture.

La figure 1 montre l'évolution du rendement de la fluorescence chlorophyllienne de plants de maïs mesuré en plein champ durant la saison 2025, comme un indicateur de leur activité photosynthétique. Sur une période de 4 jours, on remarque que les profils du rendement diurne diffèrent au cours des deux premiers jours ensoleillés et des deux derniers jours nuageux. Le rendement diurne augmente d'environ 15% les jours ensoleillés, tandis que la variation de rendement n'atteint que 5% les jours nuageux. Ces

**Figure 2.** Déploiement du LiDAR multispectral pour la mesure de réflectance de couverts agricoles dans le visible et court infrarouge.



différences s'expliquent par la mise en place de mécanismes de photoprotection en réponse à un fort éclairage. La plante active ces mécanismes afin d'éviter que l'énergie lumineuse absorbée en excès endommage son appareil photosynthétique. Afin d'obtenir une valeur absolue du rendement de la fluorescence chlorophyllienne, une étape de calibration est nécessaire avec un étalon inerte.

**LIDAR DE RÉFLECTANCE SPECTRALE**

La réflectance constitue une information spectrale majeure pour le suivi des écosystèmes agricoles. Généralement acquise à partir de mesures satellitaires ou aéroportées, elle permet le calcul d'indices de végétation utilisés pour estimer divers traits physiologiques et structuraux des cultures. Cependant, en raison de la faible résolution spatiale et du nombre limité de bandes spectrales disponibles, seuls quelques paramètres agronomiques peuvent être évalués à l'échelle du couvert végétal. D'autres facteurs, d'origine abiotique ou biotique — tels que la teneur en eau dont les signatures spectrales se manifestent principalement dans le court infrarouge — pourraient également être pris en considération.

Dans le cadre du projet collaboratif QUALIPHEN (financé par la Région Bretagne, porté par Hytech-imaging), Photonics Bretagne et Arvalis ont développé un système LiDAR de réflectance multispectrale en configuration monostatique pour le phénotypage de précision (Fig. 2). Une source de type supercontinuum (développée par

Photonics Bretagne) a permis de retrouver les signatures spectrales de plants de maïs en plein champ du visible au court infrarouge. Ce travail a ouvert la voie à de nouvelles pistes d'investigation dont la correction des effets radiométriques liés à la structure du couvert [5] et l'affranchissement de méthodes de calibrations des imageurs passifs en intégrant des mesures actives LiDAR.

**CONCLUSION**

Au-delà de la télémétrie, le LiDAR trouve de nombreuses applications en agriculture telles que le phénotypage (suivi de la croissance), le physiotypage (suivi de la photosynthèse), l'envirotypage (suivi des gaz à effet de serre) et la cartographie fine de la biodiversité (suivi entomologique). Les récentes avancées et développements photoniques (e.g. micro-LiDAR et LiDAR Raman) ouvrent de nombreuses perspectives pour spatialiser et quantifier des processus physiologiques et écologiques. Cependant, de nombreux défis technologiques subsistent à ce jour comme la détection rapide de signaux dans le moyen infrarouge pour le suivi du protoxyde d'azote lors des phases d'épandages, l'intégration de suivi physiologique dans des méthodologies d'expérimentation agronomiques ad-hoc et l'intégration de références LiDAR dans les systèmes d'observation passifs. L'écosystème français de la photonique et de l'agronomie offre un cadre particulièrement propice à la consolidation, à la validation et à l'intégration de ces approches innovantes dans des instruments au service des transitions agroécologiques et environnementales des pratiques agricoles. ●

**RÉFÉRENCES**

[1] P. H. Flamant, *Photoniques* **97**, 40 (2019)  
 [2] T. Saha *et al.*, *Sci. Rep.* **13**, 15606 (2023)  
 [3] T. Roitsch *et al.*, *Plant Science* **282**, 2 (2019)  
 [4] B. Gac *et al.*, *J. Phys Photonics* **7**, 032501 (2025)  
 [5] S. Jay *et al.*, *Remote Sens. Environ.* **177**, 220 (2016)



**NOS SOLUTIONS LIDAR**

▲ SOURCES MINIATURISÉES DPSS & DFB



▲ SOURCES FORTE PUISSANCE REFROIDIES PAR AIR >60mJ À 1550 nm



▲ SOURCES PICOSECONDE



▲ MICRO-OPTIQUES, FILTRES & SOUS-ENSEMBLES



▲ MONTURES MOTORISÉES MINIATURES

