LE SPECTRE DE LA PERFORMANCE : COMMENT LA PHOTONIQUE CULTIVE L'AGRICULTURE DE DEMAIN

Jérémy PICOT-CLEMENTE*
EPIC Photonics, 17 Rue Hamelin, 75016 Paris, France
***jeremy.picot-clemente@epic-photonics.com**

Système d'imagerie hyperspectral opérant dans un champ – Ocean Optics

Loin de se limiter à ce que l'œil perçoit, la lumière est devenue le principal vecteur d'information et d'action pour l'agriculture du 21e siècle. En maîtrisant l'ensemble du spectre électromagnétique, la photonique offre une panoplie d'outils non invasifs pour sonder, analyser et même influencer le vivant. De l'imagerie infrarouge qui révèle le stress hydrique d'une plante à l'éclairage LED qui sculpte sa croissance, les technologies optiques transforment radicalement la gestion des cultures. Cet article explore ce voyage à travers le spectre, montrant comment, en rendant l'invisible visible et l'inaccessible mesurable, la photonique est en train de bâtir les fondations d'une agriculture plus précise, plus sobre et plus productive, capable de relever le défi de la sécurité alimentaire mondiale.

https://doi.org/10.1051/photon/202513548

L'AGRICULTURE À L'ÈRE DE L'INFORMATION LUMINEUSE ?

Pour nourrir une population mondiale projetée à 9,7 milliards d'habitants en 2050, l'ONU estime qu'une augmentation de plus de 70 % de la production alimentaire sera nécessaire. Cet impératif colossal ne pourra être atteint sans une transformation profonde des pratiques agricoles. *La réponse se trouve dans l'agriculture intelligente*, et au cœur de cette révolution, agissant comme le système nerveux sensoriel de la ferme du futur, se trouve la photonique. Elle transforme la lumière, dans toute sa richesse spectrale, en un flux de données actionnables, permettant de passer d'une agriculture de masse à une gestion individualisée de chaque plante.

Au-delà du visible : étendre la perception pour un diagnostic précoce

Notre vision est limitée à une bande étroite du spectre, mais l'état de santé d'un végétal s'exprime bien au-delà. C'est dans l'infrarouge que la plante révèle ses secrets. L'imagerie hyperspectrale (HSI), en capturant

des centaines de bandes spectrales contiguës, dresse une véritable carte d'identité chimique et physiologique de la cible. Chaque signature spectrale permet une identification fine et non destructive de la santé des cultures, de la présence d'adventices, de l'état du sol ou du niveau de maturité des fruits. Autrefois réservée aux applications aéroportées ou satellitaires, l'HSI s'est démocratisée. Grâce à la miniaturisation des capteurs, à l'intégration de l'IA (edge computing) pour des analyses en temps réel et à la baisse des coûts, elle est désormais accessible sur des drones ou des systèmes portables. Des sociétés comme HySpex, basée en Norvège, intègrent ces caméras à des solutions d'apprentissage automatique pour l'analyse automatisée d'échantillons biologiques, allant du contrôle qualité de laitues ou de tomates à l'inspection de fèves de cacao.

Également actif dans le développement de capteurs intelligents pour l'évaluation de la qualité alimentaire, le centre de recherche norvégien SFI DigiFoods, regroupant les instituts Nofima et SINTEF, met au point des capteurs spectroscopiques dans le proche infrarouge, sans contact, capables de sonder en profondeur les aliments. Ces technologies permettent, par exemple, de déterminer la teneur en sucre et en matière sèche des fruits et légumes. Cette approche a été démontrée avec succès pour mesurer la teneur en sucre des fraises directement au champ et des tomates cerises sur les lignes de conditionnement, garantissant une qualité optimale pour les consommateurs tout en réduisant le gaspillage alimentaire. Ces capteurs, utilisables à la main, sur des robots agricoles ou dans des chaînes de tri, trouvent également des applications prometteuses dans la gestion de la qualité des poissons et fruits de mer.

Dans une approche complémentaire, l'imagerie multispectrale (MSI) se concentre sur une poignée de bandes spectrales (3 à 10 en général), mais plus larges. Ce compromis offre

Système d'imagerie hyperspectrale HSI automatisé pour l'évaluation, le traitement et le contrôle qualité des fraises en temps réel et sans contact © Hyspex.

Reconstruction sRGB des feuilles à l'aide d'une caméra 16 bandes avec une segmentation automatique des zones de mildiou ©CSEM.

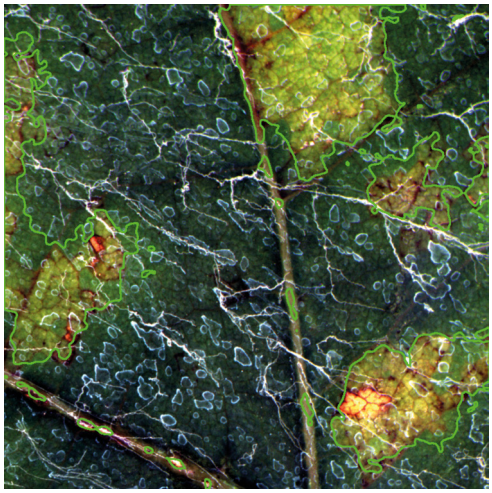
des avantages décisifs pour de nombreuses applications : l'acquisition est plus rapide, les volumes de données sont considérablement réduits et les systèmes sont plus compacts et moins coûteux. Pour le calcul d'indices de végétation comme le NDVI ou le suivi de l'état hydrique, c'est une solution largement suffisante et très efficace. Le CSEM, centre R&D basé en Suisse, a développé une caméra 16 bandes qui, intégrée à une plateforme robotique, identifie avec succès le mildiou et la flavescence dorée en viticulture. En ferme verticale, ses systèmes de vision multispectrale détectent précocement des ravageurs comme les thrips ou les acariens. Cette philosophie de la miniaturisation utile est aussi l'ADN d'Ocean Optics, l'inventeur du spectromètre miniature. Leurs instruments compacts, comme le modèle ST de quelques centimètres, sont conçus pour le terrain, permettant une analyse en temps réel de la réflectance de la végétation, que ce soit à la main ou embarqué sur un véhicule.

L'INFRAROUGE, CLÉ DE LA SIGNATURE MOLÉCULAIRE DES CULTURES

En s'aventurant plus loin dans les longueurs d'onde, notamment dans le SWIR (Short-Wave-Infrared), la photonique passe du diagnostic de l'état physiologique à l'analyse de la composition moléculaire. Les spectromètres, en particulier les technologies avancées comme le FT-NIR (infrarouge à transformée de Fourier), analysent la manière dont la lumière est absorbée par les liaisons chimiques des molécules organiques. Ils peuvent ainsi, par exemple, quantifier avec précision la teneur en sucre d'un fruit, ou la concentration en protéines d'une céréale.

Cette capacité d'analyse compositionnelle est fondamentale pour l'ensemble de la chaîne agroalimentaire, du champ à l'usine de transformation. Hamamatsu Photonics est un acteur majeur dans ce domaine, •••

proposant des spectromètres FT-NIR compacts qui accélèrent l'analyse de qualité des récoltes et peuvent même détecter la présence de parasites dans des produits comme les fruits à coque avec une vitesse inégalée. Leurs capteurs imageurs InGaAs, très performants dans le SWIR, sont au cœur des systèmes de tri industriels qui assurent une détection ultra-rapide et précise des corps étrangers dans les noix, les céréales ou les fruits secs. Au-delà des composants, Hamamatsu accompagne l'industrialisation *via* son service "Pilot Line", aidant les entreprises à passer du concept à la production de masse d'assemblages optoélectroniques pour une agriculture plus sûre et plus efficace.



Évaluation en ligne de la concentration en sucre des tomates cerises par spectroscopie NIR © Nofima

LA LUMIÈRE ACTIVE POUR SONDER, MESURER ET CARTOGRAPHIER

Plutôt que de simplement capter la lumière ambiante, l'agriculture de précision utilise de plus en plus des sources lumineuses actives pour interroger son environnement avec une précision accrue. Le LiDAR (Light Detection and Ranging) en est l'exemple le plus emblématique. En balayant le paysage avec des millions d'impulsions laser par seconde, il reconstruit des modèles numériques de terrain et de végétation en 3D d'une précision centimétrique. Ces "jumeaux numériques" des parcelles sont essentiels pour optimiser la gestion de l'eau, estimer la biomasse et prédire les rendements. Une variante, le DIAL (LiDAR à absorption différentielle), utilise deux longueurs d'onde pour mesurer la concentration de gaz spécifiques, une application cruciale pour quantifier les émissions en élevage.

Une autre approche active, plus subtile, est la fluorescence induite par laser. En excitant les pigments d'une feuille avec un laser, on analyse la lumière qu'elle réémet. Cette fluorescence est un indicateur direct de l'activité photosynthétique. Une faible fluorescence de la chlorophylle signifie que la plante utilise efficacement l'énergie lumineuse pour sa croissance et est donc en bonne santé. À l'inverse, une fluorescence élevée des caroténoïdes peut signaler un stress hydrique ou une maladie. Des entreprises comme la néerlandaise Avantes fournissent des spectromètres UV-VIS-NIR qui, couplés à des lasers pulsés, permettent de réaliser ces analyses fines, que ce soit au champ pour une fertilisation de précision ou sur une ligne de tri pour évaluer la maturité des produits. En France, Photonics Bretagne développe des démonstrateurs intégrant ces briques photoniques pour des applications variées, de la spectroscopie des stress abiotiques à l'imagerie couplée à l'IA pour la détection précoce des ravageurs.

Capteurs SWIR (à gauche), spectromètres miniaturisés (au centre) et spectromètre compact à transformée de Fourier (à droite) - Hamamatsu.

SCULPTER LA LUMIÈRE POUR PILOTER LA CROISSANCE

L'aboutissement de cette maîtrise du spectre est de ne plus seulement analyser la lumière, mais de la produire et de la contrôler pour agir directement sur le vivant. C'est le domaine de l'agriculture en environnement contrôlé (CEA), serres et fermes verticales, où les LED horticoles ont provoqué une véritable révolution. Leur efficacité énergétique et leur capacité à produire des spectres sur mesure permettent de créer des "recettes de lumière" adaptées à chaque culture et à chaque stade de développement. On peut ainsi moduler finement les longueurs d'onde : le bleu pour favoriser une croissance végétative compacte, le rouge pour stimuler la photosynthèse et la floraison, et même l'UV et le loin-rouge pour renforcer les mécanismes de défense de la plante et améliorer sa qualité nutritionnelle. Des techniques comme

Sonder la teneur en azote du chou-fleur à l'aide du signal de réflectance développé par Photonics Bretagne

le pulsing de la lumière permettent d'améliorer encore l'efficacité photosynthétique. Depuis 2015, Seoul Semiconductor est un des leaders de cette innovation, améliorant constamment l'efficacité de ses puces et développant des spectres ciblés. En collaboration avec des partenaires comme Crocus Labs, ils ont mis au point des luminaires à quatre canaux (typiquement bleu, rouge, loin-rouge et blanc) qui permettent un ajustement dynamique. L'impact est considérable : des économies d'énergie majeures et une optimisation sans précédent de la croissance, le tout rendu possible par une amélioration de l'efficacité des LED d'un facteur d'environ 5 sur la dernière décennie.

Luminaire horticole à 4 canaux (bleu, rouge, loin-rouge et blanc) de Seoul Semiconductor permettant un ajustement dynamique du spectre.

PERSPECTIVE : UNE CONVERGENCE VERS L'INTELLIGENCE AGRICOLE

La trajectoire est sans équivoque : la photonique est la colonne vertébrale technologique d'une agriculture qui se doit d'être plus productive et plus durable. Les analyses de marché anticipent une croissance soutenue, portée par la convergence de capteurs photoniques de plus en plus abordables avec l'internet des objets et l'intelligence artificielle. Les avancées en photonique intégrée sur puce (PICs) promettent de miniaturiser encore davantage ces outils, amenant la puissance d'un laboratoire d'analyse NIR ou Raman directement au champ. Si des freins comme le coût d'investissement initial ou le besoin de compétences nouvelles existent, ils sont progressivement levés par des initiatives publiques et une maturité technologique croissante. La prochaine étape verra l'émergence de systèmes de détection des maladies encore plus précoces et de solutions photoniques adaptatives, capables d'ajuster en temps réel la lumière ou l'analyse aux besoins spécifiques de chaque variété. C'est bien la maîtrise du spectre lumineux qui s'impose comme le levier fondamental d'une nouvelle révolution verte. ●

RÉFÉRENCES

[1] Markets and Markets: Smart Agriculture Market Size, Share & Trends, déc. 2024.

[2] Market Data Forecast: Europe Intelligent Agriculture Market.