

L'IMAGERIE SPECTRALE POUR L'AGRICULTURE ET LES SCIENCES VÉGÉTALES

Antoine FOURNIER^{1,*}, Julien ROMANN², Eric DREAN², Denis TREGOAT³, Stéphane PERRIN³

¹ ARVALIS, Lannion, France

² Photon Lines, Pacé, France

³ Photonics Bretagne, Lannion, France

*a.fournier@arvalis.fr



<https://doi.org/10.1051/ photon/202212041>

L'imagerie spectrale est un concept d'acquisition optique combinant l'imagerie numérique et la spectroscopie. En constante évolution, cette technique peut être basée sur différentes solutions instrumentales et apporte des solutions à de multiples problématiques, notamment en sciences végétales ou en agriculture de précision.

L'imagerie spectrale consiste à capturer la signature spectrale de chaque point spatial (projection dans l'espace réel des pixels d'une image digitale) d'une scène à observer. En effet, l'information spatiale est enrichie d'une information spectrale, c'est-à-dire d'une donnée d'intensité lumineuse pour différentes longueurs d'onde, et ce dans un domaine spectral pouvant s'étendre de l'ultraviolet

au proche infrarouge en passant par le visible. L'imagerie numérique couleur, combinant des informations d'intensité sur trois canaux (rouge, vert et bleu) constitue ainsi la technique d'imagerie spectrale la plus courante et s'appuie sur trois bandes spectrales (une par canal). De nos jours, l'imagerie spectrale est appliquée dans de nombreux domaines, tels que l'agro-alimentaire, le spatial, l'agriculture, l'agronomie ou encore les sciences végétales et de ●●●



IMAGERIE HYPERSPECTRALE



CAMÉRAS PUSH-BROOM ET SNAPSHOT

- ▲ 400-1700nm
- ▲ 8-240 bandes spectrales



CAMÉRAS ACCORDABILITÉ CONTINUE

- ▲ 400-2300nm
- ▲ Imagerie globale par technologie non dispersive



MICROSCOPIE

- ▲ 400-2300nm



Elias.Akiki@optonlaser.com

www.optonlaser.com

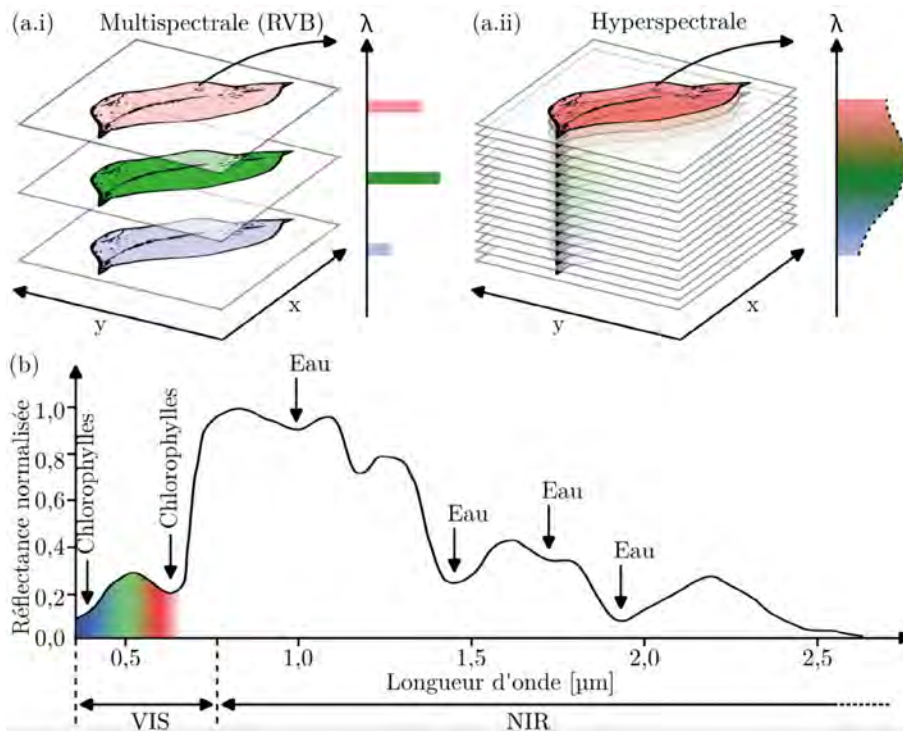


Figure 1. : Principes d'acquisition (a.i) de l'imagerie multispectrale et (a.ii) de l'imagerie hyperspectrale. Les cubes de données sont acquis dans le domaine du visible. (b) Spectre de réflectance typique d'une feuille dans les domaines du visible (VIS) et du proche infra-rouge (NIR).

l'environnement. Ces trois derniers domaines d'application seront abordés ici avec quelques cas applicatifs concrets.

IMAGERIE MULTISPECTRALE ET IMAGERIE HYPERSPECTRALE

L'imagerie spectrale comporte deux catégories principales, se distinguant à la fois par le nombre de bandes collectées et leur contiguïté. L'imagerie multispectrale (MSI pour multispectral imaging) utilise entre trois (e.g., l'imagerie RVB présentée Fig. 1(a.i)) à quelques dizaines de bandes spectrales, bandes pouvant être ou non spectralement disjointes. L'imagerie hyperspectrale (HSI pour *hyperspectral imaging*) désigne quant à elle l'acquisition de données spectrales sur un grand nombre (en général plusieurs centaines) de bandes spectrales étroites et contiguës (Fig. 1(a.ii)).

Cette distinction entre le MSI et le HSI implique également une différence majeure dans la manipulation

des données issues de ces deux techniques d'acquisition. En effet, dans le cas du MSI, le faible nombre de bandes ainsi que leur éventuelle non-contiguïté impose de considérer les données comme un empilement d'images. Dans le cas du HSI, le grand nombre de longueurs d'ondes et leur contiguïté permet de considérer les données comme un cube de données consistant en deux dimensions spatiales (un plan « image ») et une dimension spectrale (un spectre étant contenu dans chaque pixel du plan image). Cette distinction est fondamentale car elle change souvent drastiquement les méthodes utilisées pour traiter les données. En MSI, le travail d'interprétation est ainsi généralement réalisé dans l'espace spatial sur des images numériques issues de la composition de plusieurs bandes, alors que l'interprétation de données du HSI se fait généralement dans l'espace spectral, ou permet une analyse conjointe des variabilités spectrales

et spatiales.

Généralement, le choix entre le MSI et le HSI est fortement dépendant du cas d'usage. En effet, le MSI peut être vu comme une technique peu coûteuse mais n'offrant qu'une information spectrale très limitée. Le HSI offre au contraire une information spectrale (informant sur la composition) très riche, mais reste encore significativement plus coûteuse. Ainsi, les cas d'usages ne nécessitant qu'un faible nombre de bandes spectrales bien identifiées (et non évolutives) s'orientent plus naturellement vers le MSI. En revanche, les cas d'usage nécessitant une information spectrale résolue par un grand nombre de bandes, ou encore ceux étant caractérisés par un aspect évolutif de la problématique à résoudre recourent plutôt au HSI. En tant que technique d'acquisition spectralement très riche, le HSI est par ailleurs souvent utilisé comme moyen de pré-étude pouvant souvent déboucher au final sur la conception d'une solution MSI. Cette situation se retrouve typiquement sur un grand nombre de problématiques en agriculture de précision et en sciences végétales.

En sciences végétales, les imageurs multi et hyperspectraux permettent d'interroger les phénomènes de réflectance, d'absorption et de fluorescence des couverts, des sols ou d'organes spécifiques. Travaillant généralement dans le visible (VIS, 400nm - 750nm) et le proche infra-rouge (NIR, 0,75 µm - 2,5 µm), les solutions de MSI ou de HSI fournissent des réponses spectrales de composés organiques qui peuvent être étudiées et interprétées. En effet, les pigments végétaux (e.g., les chlorophylles et les caroténoïdes) ont des signatures spectrales propres dans le visible (Fig. 1(b)), de la même manière que les composés hydriques et les protéines ont des signatures caractéristiques prédominantes dans le proche infrarouge.

Au-delà du domaine VIS-NIR, dans le moyen infrarouge (2,5 µm - 5,0 µm), ce sont les propriétés ●●●

MÉTHODES D'ACQUISITION

Dans le cas du HSI, différentes méthodes d'acquisition 'spectro-spatiales' ont été développées et sont détaillées dans un précédent dossier de la revue Photoniques [1]. Chacune de ces variantes offre son lot d'avantages et d'inconvénients, ce qui les rend plus indiquées à chaque application et cas d'usage. En HSI, ces variantes sont néanmoins basées sur une optique dispersive (ou à transformation de Fourier) et un capteur photosensible. La technique à balayage d'un point de lecture (en anglais, whiskbroom) consiste à reconstruire la scène observée en collectant temporellement le spectre à chaque position spatiale. Cette méthode peu utilisée en production a été améliorée par la technique à balayage d'une ligne de lecture (en anglais, pushbroom), méthode qui repose sur la collection de multiples spectres provenant d'une ligne de mesure ce déplaçant perpendiculairement à travers le champ de vue (principe de la caméra linéaire). Ces méthodes dites de « scanning HSI » offrent des résolutions spatiales et spectrales élevées, mais nécessitent de scanner spatialement la scène à cartographier. Ainsi, les temps d'acquisition associés au scan ainsi que les distorsions spatiales liées aux inconsistances du mouvement de scan peuvent s'avérer plus ou moins gênants en fonction de l'application concernée. Une innovation dans le domaine du HSI push-broom a récemment été réalisée par Photon Lines avec la conception de la caméra de ce type la plus rapide du marché (jusqu'à 3000 images spectro-spatiales par seconde), de quoi étendre considérablement l'étendue applicative de cette stratégie d'acquisition. En face de ces méthodes de « scanning HSI » se trouvent des méthodes de « snapshot HSI », méthodes consistant à acquérir un datacube HSI complet en une seule acquisition instantanée. Les techniques de « snapshot HSI » évitent ainsi les éventuels problèmes liés au scan, mais comportent une limite majeure : l'ensemble des pixels d'un même capteur bidimensionnel sont échantillonnés pour encoder à la fois l'information spatiale et l'information spectrale de la scène analysée. Il en résulte un compromis très impactant entre résolution spectrale et résolution spatiale. Également récemment, une technique basée sur la combinaison entre la spectroscopie de réflectance et l'imagerie mono-pixel a été développée [2] au sein du partenariat entre Photonics Bretagne et ARVALIS. Cette technique de HSI non-conventionnelle basée sur la théorie de la mesure compressée permet une reconfiguration dynamique de l'allocation du temps de mesure disponible entre les performances angulaires, radiométriques ou spectrales. Elle vient d'être transférée à la start-up Photonics Open Projects.

SCIENTEC
La SoluTion à vos mesures

PHOTOMÉTRIE

Colorimétrie - Radiométrie

MESURE ET ÉVALUATION DE TOUTES
LES SOURCES LUMINEUSES

Éclairage, luminance, chromaticité,
indice de rendu des couleurs IRC,
température de couleur, valeurs
spectrales, longueurs
d'ondes crête et
dominante, pureté
d'excitation...

**APPAREILS
PORTABLES
DE HAUTE
QUALITÉ
À PRIX
ABORDABLE**

► **Luxmètre
Chromamètre
CL-200A**
Polyvalent & léger,
R&D et production...

► **Luxmètre
spectroradiomètre
CL-70F**
Économique &
performant, Tactile et
portable, Tête de mesure
rotative...

► **Photomètre
Chromamètre
CS-150/160**
Précision et convivialité,
luminance et couleur,
contrôle qualité...

► **Photomètre
Chromamètre
à réseau CS-200**
Luminance et
chromaticité,
compact et précis



ScienTec c'est aussi,
du SAV, de la formation, de la
calibration et la distribution de :
Analyseur d'écran, Photogonio-
mètres, Vidéocolorimètres,
Sources de référence...

info@scientec.fr

01 64 53 27 00

www.scientec.fr

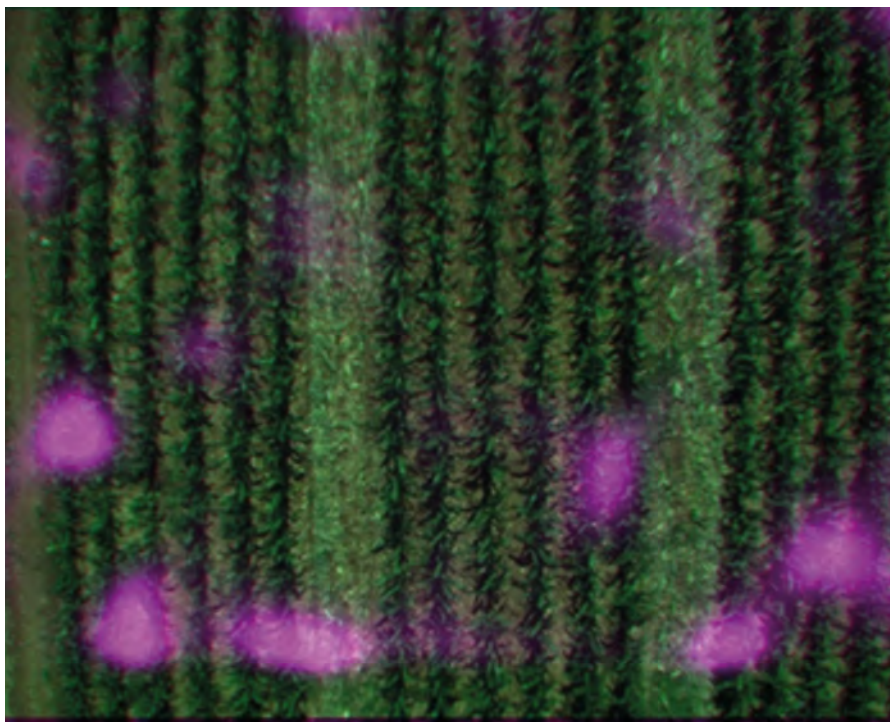


Figure 2. : Exemple d'une analyse spectro-spatiale pour cartographier les adventices dans une image multispectrale acquises par drone sur un parcelle de production de semences de Maïs. Une carte de probabilité de présence de flore adventice en rose est superposée à une reconstruction de la scène à partir des bande rouge, verte et bleu. La carte de probabilité est produite en appliquant un filtre spatial dans l'espace de fourrier à une combinaison de bandes spectrale destiné à exalter la présence de végétation.

structurales des feuilles et du couvert qui influencent essentiellement les spectres. En allant plus loin dans l'infrarouge ($> 5,0 \mu\text{m}$), les imageurs spectraux apportent des informations thermiques avec une bonne résolution spatiale. Dans ce domaine, la thermographie offre la possibilité d'évaluer des disponibilités en eau et d'observer des phénomènes d'évapotranspiration à travers le refroidissement effectif du couvert. Néanmoins, l'utilisation quantitative d'imageurs spectraux dans ces domaines de l'infrarouge se heurte à des limites méthodologiques -relatives au lien complexe entre température apparente et demande d'évapotranspiration nette - et des défis technologiques - relatifs au lien entre la température apparente et la véritable température d'un matériau vivant dans une scène fortement

structurée et donc influencée par des effets de radiativité importants.

APPLICATIONS EN AGRICULTURE

Certains imageurs spectraux permettent d'ores et déjà de fournir une information mise très pratiquement au service des enjeux agricoles.

A grande échelle, on peut citer l'instrument « *MultiSpectral Instrument* » embarqué dans les satellites Sentinel 2A et 2B dont les mesures effectuées en sortie d'hiver alimentent des outils d'aide à la décision. Ces outils fournissent par exemple des éléments d'arbitrage à l'agriculteur pour choisir - et justifier auprès des autorités de contrôle - la date adaptée et la quantité d'apport en nutriment. D'autres informations, encore plus précises, permettent de moduler au sein de la parcelle agricole l'apport de

fertilisant pour éviter les transferts dans l'environnement sans sacrifier les besoins de croissance à venir des couverts. Par exemple, les conseils fournis par l'outil FarmSTAR ont permis en 2020 d'économiser jusqu'à 40 % de l'apport avec une couverture de 380 000 ha de blé, 140 000 ha de colza, 80 000 ha d'orge auprès de 13 000 agriculteurs. Pour compléter les zones non mesurées dues au passage de nuages dans le champ de vue, des imageurs hyper-spectraux en ligne sont embarqués sur des avions.

Les travaux sur l'utilisation des produits de télédétection satellitaire ou aéroportée (y compris drone) portent actuellement sur l'affinement du suivi de vigueur des couverts et notamment de leur réponse à d'autres stress biotiques (e.g., la sécheresse) ou abiotiques (e.g., les maladies) avec un accent sur les impacts sur la phénologie et la composition du paysage à l'échelle de bassin versant.

Plus proche des couverts, les imageurs spectraux montés sur des agroéquipements ou sur des drones permettent d'affiner la cartographie des adventices en temps réel. Le pilotage du désherbage de dernier recours est alors rendu possible à la plante près dans des cas de figure où l'analyse d'image seule conserve un taux d'erreur important. Par exemple, le Datura et le Liseron sont caractérisés par des dynamiques spatiales et temporelles de croissance qui complexifient leur détection sur le rang ou dans un couvert développé. Des travaux importants sont menés en vue d'atteindre un niveau d'exactitude d'attribution élevé dans des scènes très complexes (i.e., les parcelles agricoles) et à des cadences également très élevées. Cela implique comme enjeu, l'élimination des aspersion accidentelles.

Les tendances actuelles des travaux en imagerie spectrale embarquée sur les agroéquipements s'orientent vers une mesure des interactions écosystémiques au sein de scènes de couvert diversifié préconisé dans les pratiques agroécologiques. L'objectif

étant de fournir des indicateurs de biodiversité et d'abondance.

Dans l'activité de stockage et de transport des denrées agricoles, la capacité à conserver durablement le grain est un enjeu économique, sanitaire et géopolitique. Notamment dans un contexte d'une diminution de la pharmacopée de synthèse à vocation prophylactique ou insecticide soulève des enjeux fondamentaux pour l'inspection des bennes, silos et convoyeurs. Les capacités d'inspections recourent de manière croissante à des outils d'imagerie hyperspectrale hautement performants, notamment pour leur capacité à s'adapter à de nouveaux cas d'usage (autre insecte, grain ou points d'inspection).

Les efforts dans ces domaines tendent vers une inspection plus systématique des performances technologiques des produits de récoltes à l'entrée de silo en vue de leur paiement. Les mesures actuelles étant effectuées par spectrochimométrie infra-rouge de contact sur un échantillon prélevé aléatoirement dans chaque benne, cela entraîne un risque insecte pour le silo entier.

APPLICATIONS EN SCIENCES VÉGÉTALES

Certains imageurs spectraux sont utilisés comme instrument scientifique pour explorer les réponses physiologiques des différents comportements de la plante. Ces équipements, souvent onéreux, fournissent une information détaillée et volumineuse. Leur accès est toutefois facilité par des dispositifs de mutualisation, de mise à disposition croisée de moyens et d'équipements sur des plateformes accessibles à tout porteur de besoin sociétal ou industriel. Un bon point d'entrée sont les instituts Carnot (e.g., AgriFoodTransition, Plant2Pro et Qualiment) impliquant des acteurs des sciences végétales.

On peut, par exemple, citer le développement de moyens d'imagerie spectrale dédiés au phénotypage de système racinaire en Rizhotube® à l'INRAe de Dijon [3]. Cet équipement permet de mieux comprendre les mécanismes de colonisation racinaire et de captation des éléments nutritifs dans les systèmes racinaires.

A l'échelle de la graine, l'UMR IRHS d'Angers dispose d'imageurs

hyperspectraux très résolus permettant de suivre les dynamiques d'imbibition des graines dans les gammes du visible, de l'infrarouge et du thermique [4]. Les étapes clés de la germination des végétaux sont alors accessibles.

L'imagerie spectrale visible et proche infrarouge est l'une des pistes les plus prometteuses pour permettre la détection précoce d'épidémie végétale par l'identification rapide de maladie foliaire dans un contexte d'épidémiosurveillance végétale renforcée à l'heure d'une plus grande vulnérabilité des agroécosystèmes. Un exemple particulier peut être mentionné en viticulture, où un projet de grande envergure a permis à Photon Lines de développer un dispositif HSI embarqué sur enjambeur viticole et permettant de détecter en temps réel l'apparition des premiers symptômes de Mildiou et d'Oïdium de la vigne.

Par ailleurs, les suivis multispectraux des plateformes d'expérimentation permettent au quotidien aux instituts techniques, tels que ARVALIS, d'estimer le développement des ●●●

HySpex

High quality hyperspectral imaging

by neo

				
Lab	Airborne	Industrial	Field	UAV
				
Corescanner	XY scanner	Outdoor IP65	Stratospheric	Satellite / HyperNOR

www.hyspex.com

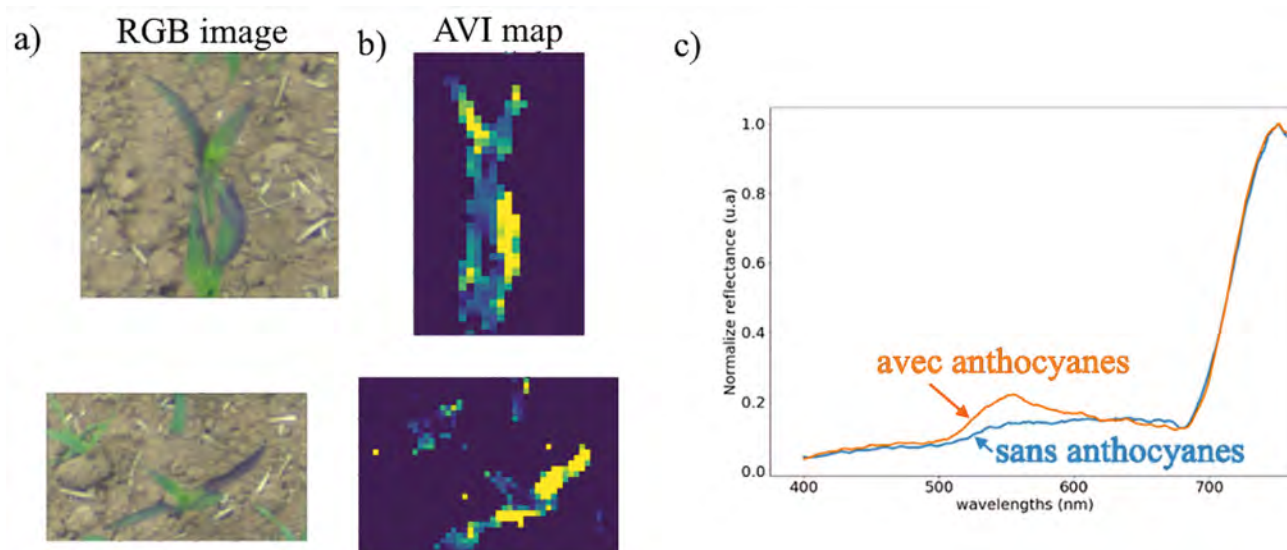


Figure 3 : Exemple de mesure Hyperspectrale conduite depuis un pont roulant sur une plateforme de phénotypage à haut débit des plantes (PhenoFIELD[5]) illustrant la possibilité de capter l'accumulation d'anthocyanine lors d'un stress froid durant le stade de levée d'un Maïs en plein champs. (a) Images couleur des plans d'intérêt, (b) même scène dans une combinaison de bandes spectrales sensible à la présence d'anthocyanine et (c) signature spectrale intégrée sur les zones avec ou sans accumulation d'anthocyanine.

couverts puis d'en évaluer les impacts des pratiques culturales et des conditions pédoclimatiques. Des indices multispectraux renseignent directement non seulement l'accumulation de stress, mais également les voies de compensation et de contournement mis en place par les couverts face à ces situations.

FUTURS CHALLENGES

Les principales limitations des systèmes d'imagerie spectrale sont la nécessaire adéquation à des cas d'usage aux contraintes très diverses en termes de débit, de durcissement, d'encombrement. De plus, les solutions MSI métiers sont souvent dimensionnées pour un seul cas d'usage et sont peu reconfigurables, à la différence des systèmes HSI. Bien que plus coûteux, ceux-ci sont plus facilement applicables à d'autres usages par changement des règles d'analyse du signal.

Les données HSI sont toutefois réputées plus lourdes et moins facilement exploitables. Depuis quelques années, des méthodes logicielles et électroniques sont en passe de résoudre ces problèmes

d'engorgement et de coût des imageurs spectraux. Enfin, des approches collaboratives autour de l'imagerie compressée voient également le jour offrant des possibilités de diminuer les coûts d'investissements finaux. Cela s'opère par une meilleure répartition de l'effort de développement et de l'exploitation de la valeur entre les acteurs de la technologie. De plus, des solutions plus adaptables et plus légères sont apportées tout en étant performantes.

CONCLUSION

En agriculture, l'imagerie spectrale est généralement déployée

sous forme de capteurs multispectraux adaptés à un cas d'usage. En science végétale, cette technique optique se retrouve sous forme d'instruments puissants et complexes. Dans ces deux activités, l'accès à l'information spectrale pour chaque pixel permet non seulement de mieux comprendre des phénomènes biotiques et abiotiques, mais également de mieux agir sur les couverts agricoles. A travers de récentes avancées technologiques réduisant l'empreinte et la complexité d'usage, des niveaux de déploiement et des services rendus sont alors envisageables dans les années à venir. ●

RÉFÉRENCES

- [1] S. Tisserand, *Photoniques* **110**, 58 (2021). doi: 10.1051/photon/202111058
- [2] M. Ribes *et al.*, *Sensors* **20**, 1132 (2020). doi: 10.3390/s20041132
- [3] C. Jeudy *et al.*, *Plant Methods* **12**, 1-18 (2016). doi: 10.1186/s13007-016-0131-9
- [4] E. Belin *et al.*, *J. of Imaging* **4**, 83 (2018). doi: 10.3390/jimaging4070083
- [5] K. Beauchène *et al.*, *Front. In Plant Science* (2019). doi: 10.3389/fpls.2019.00904