LE MIR AU SERVICE DU VÉGÉTAL : DE LA THERMOGRAPHIE À L'IMAGERIE SPECTRALE

Jean-Marc GOUJON[1,*], Antoine FOURNIER[2],

[1] Institut FOTON, Lannion, France

[2] ARVALIS, Lannion, France

***goujon@enssat.fr**

Nous présentons ici les applications de systèmes d'imagerie optique opérant dans le Moyen Infra Rouge (MIR) au domaine du végétal. Nous passons en revue l'application la plus populaire qu'est la thermographie, qui a donné lieu à de nombreux cas d'usage dans les cultures végétales. Nous poursuivons par une étude prospective d'imagerie à haute résolution spectrale, sur la base de lasers largement accordables, entre 3 et 10 µm. Ces diagnostics ouvrent la voie à une caractérisation précoce des pathologies.

https://doi.org/10.1051/photon/202513532

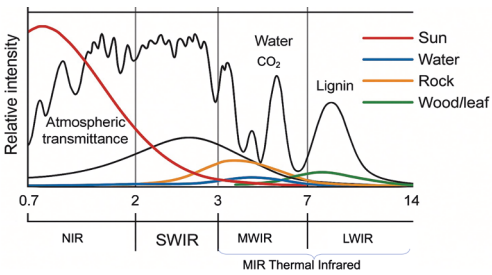
Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation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

LE MOYEN INFRAROUGE

Plusieurs définitions circulent pour définir le Moyen InfraRouge. Par commodité, nous utiliserons ici le terme Moyen InfraRouge pour désigner la plage de longueur d'onde destinée à être détectée par des caméras dites « thermiques », c'est à dire couramment entre 2,5 et 14 µm.

Dans ces plages de longueur d'onde, lorsque l'on observe une scène, le rayonnement thermique propre (émis par chaque objet de la scène) peut atteindre des valeurs suffisamment élevées pour devenir prépondérant face à la réflexion des rayons du soleil, alors que dans les longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge (de 400 nm à 1,7 µm typiquement), le flux externe réfléchi ou diffusé est majoritaire.

Figure 1. Dénomination des plages de longueur d'onde et spectres typiques



Cette superposition des rayonnements propres et diffusés suggère deux approches pour étudier les propriétés physiques des objets, et ici plus particulièrement des végétaux en croissance : la thermographie, et la spectroscopie.

La thermographie (ou imagerie thermique) recueille sur la gamme MIR le rayonnement thermique propre au moyen de caméras dites « thermiques ». Ce rayonnement est généralement apprécié en comparaison avec le corps noir, « radiateur parfait » dont le comportement est décrit par la loi de Planck (voir encadré).

Les caméras thermiques utilisées dans la gamme 3-5 µm (désignée MWIR pour Medium Wave) sont historiquement des caméras à matrices de semiconducteurs refroidies par Stirling, mais depuis plusieurs décennies désormais, elles cohabitent dans la gamme 7-14 µm (LW pour Long Wave) avec des caméras à matrices de bolomètres qui opèrent à température ambiante.

Les informations obtenues sont des images d'intensité, et permettent de segmenter spatialement les objets d'une scène, et comparer les rayonnements reçus.

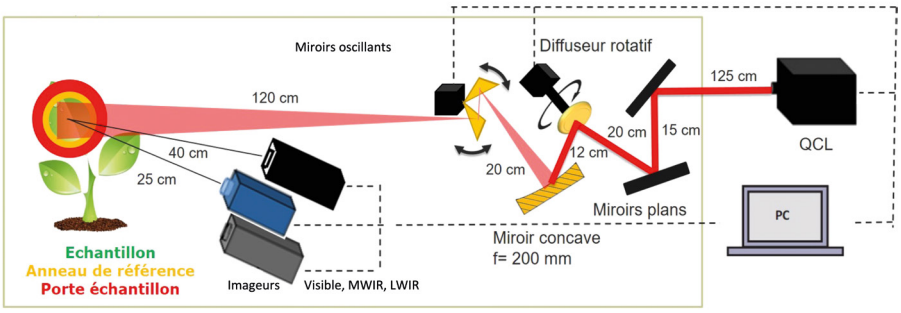


Figure 2. Architecture de l'imageur HI2 (Hyperspectral Infrared Imaging). Un ensemble de 4 lasers Daylight Mircat© accordables entre 3,7 et 10,5 µm éclaire l'échantillon végétal, qui est observé par une caméra visible, une caméra MWIR (2-5µm), et une caméra LWIR (7,5-14µm). Un jeu de miroirs pilotés ajuste le faisceau laser sur l'échantillon.

En thermographie, on souhaite ne capter que le rayonnement propre de l'objet. Un objectif sera alors d'éliminer ou de caractériser les rayonnements indésirables : éclairage du soleil, flux thermique des objets ou feuillages environnants… La grandeur recueillie sera le flux intégré sur toute la plage de longueur d'onde de la caméra. La maitrise ou à défaut la stabilité de la scène de mesure sont donc primordiales, sa composition décide de l'interprétabilité des mesures.

A contrario, pour étudier le comportement spectral d'un végétal, on souhaitera se concentrer sur une seule de ses caractéristiques dépendant de la longueur d'onde : absorption $\alpha(\lambda)$, ou transmission $\tau(\lambda)$, ou encore réflexion $\rho(\lambda)$. L'imagerie spectrale visera à proposer l'équivalent d'un spectromètre sur chaque pixel. Cette technologie est en évolution rapide, et jusqu'à récemment réservée au visible et au proche infra-rouge (400 nm → 1,7 µm). Les premiers imageurs spectraux MIR sont apparus sur le marché autour de 2020, basés sur des imageurs 2,5 → 5 µm, et plus récemment entre 8 et 14 µm. Les architectures sont classiquement de type « push-broom », nécessitant le balayage spatial de l'échantillon.

Pour l'analyse spectrale, le flux thermique émis par l'échantillon peut être considéré comme indésirable. C'est pourquoi de nouvelles architectures apparaissent, susceptibles d'éliminer les contributions thermiques. Nous détaillerons plus loin une architecture MIR d'imagerie spectrale active, et ses premières applications au végétal.

L'IMAGERIE THERMIQUE APPLIQUÉE AU VÉGÉTAL

La thermographie infrarouge, en tant qu'outil d'imagerie passive, permet d'accéder à la température de surface des objets observés. Lorsqu'elle est appliquée aux végétaux, elle offre une fenêtre sur les échanges thermiques liés à la transpiration, à l'état hydrique ou à des stress biotiques et abiotiques. Contrairement aux matériaux inertes, les végétaux présentent une dynamique thermique complexe, influencée par leur physiologie et leur environnement. Cette spécificité rend la thermographie particulièrement intéressante pour le suivi non destructif de l'état des plantes, mais impose également des précautions méthodologiques pour interpréter les signaux mesurés [1].

Les premières applications de la thermographie végétale ont été développées en laboratoire, dans des conditions contrôlées permettant une calibration fine des capteurs et une maîtrise des sources de variation. Le passage au champ, nécessaire pour une valorisation agronomique, soulève des défis techniques et scientifiques : variabilité climatique, hétérogénéité des peuplements, interférences radiatives. L'expérimentation en plein champ impose donc des compromis entre précision, robustesse et représentativité, tout en conservant l'ambition d'un suivi non destructif et répétable [2].

Plusieurs usages ont été explorés dans le cadre de travaux expérimentaux : détection de stress hydrique, estimation indirecte de certains constituants (eau, azote), ou encore la détection précoce de stress physiologique. Ces tentatives s'appuient toutes sur une approche passive, exploitant le rayonnement thermique émis naturellement par les plantes. Si les résultats sont prometteurs, ils restent souvent dépendants de conditions spécifiques et difficiles à généraliser. L'intégration de la thermographie dans des protocoles agronomiques nécessite encore des efforts de standardisation et de validation.

L'usage de l'imagerie thermique en phénotypage végétal évolue vers des approches multi-vues et statistiques pour corriger les biais géométriques et temporels, améliorant ainsi la fiabilité des mesures de température du couvert. Les efforts récents mobilisent les outils statistiques issus de l'expérimentation de terrain pour corriger les tendances spatiales et temporelles, réduisant ainsi les incertitudes et artefacts d'un facteur 5 dans l'usage des drones. Il reste toutefois à mieux maîtriser les interactions complexes entre la structure du couvert végétal et l'illumination radiative des pixels, influencée par leur voisinage immédiat.

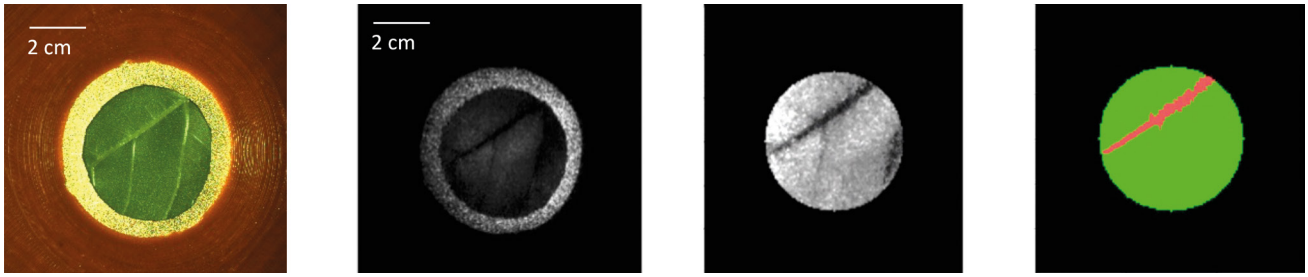


Figure 3. Exemple d'acquisition sur un plant de tournesol. De gauche à droite : image visible ; image à 8µm sans fond thermique ; image à 8 µm normalisée par la référence. À droite : segmentation zone foliaire/nervure associée.

Une question émergente concerne la possibilité de passer d'une approche passive à une technologie active, où l'on contrôlerait l'éclairement reçu à ces longueurs d'onde par la cible pour améliorer la lisibilité des signaux. Cette évolution, bien que techniquement ambitieuse, pourrait permettre de dépasser certaines limites actuelles liées à la variabilité environnementale. Elle pose toutefois des questions de faisabilité (puissance, sécurité, coût) et d'utilité agronomique : quels gains réels en précision ou en interprétabilité ? Ce champ reste à explorer, mais ouvre des perspectives intéressantes pour l'instrumentation végétale de demain.

IMAGERIE SPECTRALE ACTIVE MOYEN INFRA ROUGE

Pourquoi l'imagerie spectrale MIR ?

Technique désormais bien établie dans les applications végétales, l'imagerie spectrale opère naturellement dans le visible et le NIR, car elle utilise les absorptions (rouge et bleu) et réflexions (vert) caractéristiques des pigments naturels, dont la chlorophylle. De plus, le proche infrarouge (vers 800 nm) est fortement réfléchi par le végétal en bonne santé. L'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), reflète ce « red edge » pour l'ensemble du couvert. L'accès aux détails spectraux et à l'imagerie est un plus appréciable. Des caméras basées sur la détection Si sont donc parfaitement adaptées et économiques.

De manière prospective, et guidés par la disponibilité récente des technologies, nous nous intéresserons ici aux longueurs d'onde du moyen infrarouge (MIR), dont certaines bandes comprises entre 3 et 11 µm ont montré, selon les travaux de Buitrago *et al.* [3], des variations d'émissivité significatives en réponse à des stress hydriques. Ces variations sont corrélées à des modifications de traits foliaires tels que la teneur en eau, la concentration en lignine observées sur des plants de Rhododendron *cf.* catawbiense soumis à des conditions prolongées de sécheresse et de froid.

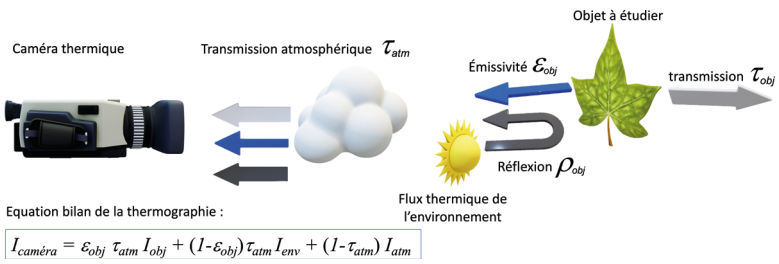
Comment étendre ces résultats à de l'imagerie MIR, afin de mesurer, sans destruction, des modifications localisées sur une feuille ?

L'imagerie spectrale vise généralement à estimer le taux de réflectance spectrale ρ(x,y,λ) d'un objet, pour chaque pixel. Un travail en réflexion amène, comme en spectroscopie classique, à normaliser par le flux incident souvent acquis sur une surface de référence. Dans le visible et proche infrarouge, on utilise une référence blanche, le spectralon®.

$$\rho(x, y, \lambda) = \frac{I_{échantillon}(x, y, \lambda)}{I_{référence}(x, y, \lambda)}$$

THERMOGRAPHIE

Que capte une caméra dans le MIR ?
Dans le MIR, les objets radiants (sans convection ni conduction) peu épais vont présenter des caractéristiques en réflexion ρ, absorption α, et transmission τ, des rayonnements reçus, dont le total des coefficients vaut 1. Ainsi le flux recueilli par la caméra sera une combinaison des flux réfléchis et transmis. S'y ajoutera le flux propre du rayonnement thermique de l'objet, que l'on désigne par l'émissivité ε. Pour l'équilibre thermique, on considère classiquement que l'absorption et compensée par l'émission (ε = α). Mais cette hypothèse vaut pour des bandes larges, et mérite qu'on y regarde de plus près, voir encart 2.



Principe de la thermographie et de la combinaison des flux

Dans le MIR également, la surface de référence doit présenter un profil de réflectivité connu sur toute la plage de longueur d'onde utilisée. On se tourne alors vers l'or dépoli, ou en succédané, de l'argent dépoli.

L'imagerie spectrale MIR connait actuellement des développements rapides, en termes d'architecture et de cadence d'acquisition. De nombreuses techniques, dont l'utilisation de peignes laser, ou la transposition de fréquence, apparaissent dans la littérature. La plupart sont réservées à la microscopie, ou à une utilisation en laboratoire.

INTÉRÊT DE L'IMAGERIE ACTIVE

L'imagerie active (voir encadré 2) permet de s'affranchir du fond continu d'émission thermique de l'objet et de certains artefacts, afin d'accéder au coefficient de réflexion spectral ρ(λ). On en attend un meilleur contrôle de la scène de mesure.

L'institut Foton de Lannion a donc proposé de développer une structure simple d'imageur de type staring, où un laser à cascade quantique MIR monochromatique largement accordable éclaire l'échantillon, et deux imageurs thermiques (MWIR et LWIR) recueillent une image pour chaque longueur d'onde -comme le montre la figure 2.

LASER MODULE	WAVELENGHT RANGE
QCL - 1 MWIR	3,87 - 4,7 µm
QCL - 2 MWIR	6,73 - 7,75 µm
QCL - 3 MWIR	7,69 - 8,64 µm
QCL - 4 MWIR	8,39 - 11 µm

Le signal utile sera donc constitué du flux laser réfléchi par l'échantillon pour chaque longueur d'onde, flux suffisamment faible pour ne pas activer biologiquement le végétal. L'émission thermique est mesurée au préalable et soustraite, à la fois sur l'échantillon et sur la surface de référence.

$$\rho(x, y, \lambda) = \frac{I_{échant_{laser}}(x, y, \lambda) - I_{échant_{Therm}}(x, y)}{I_{ref_{laser}}(x, y, \lambda) - I_{ref_{Therm}}(x, y)}$$

Rappelons que la détection est effectuée par des imageurs « large bande », et que la sélection spectrale est effectuée au niveau du laser : le balayage des lasers s'effectue par accord d'une cavité externe, et autorise une résolution de 10 nm, pour une largeur de raie de même ordre. La puissance délivrée dans le faisceau gaussien ● ● ●

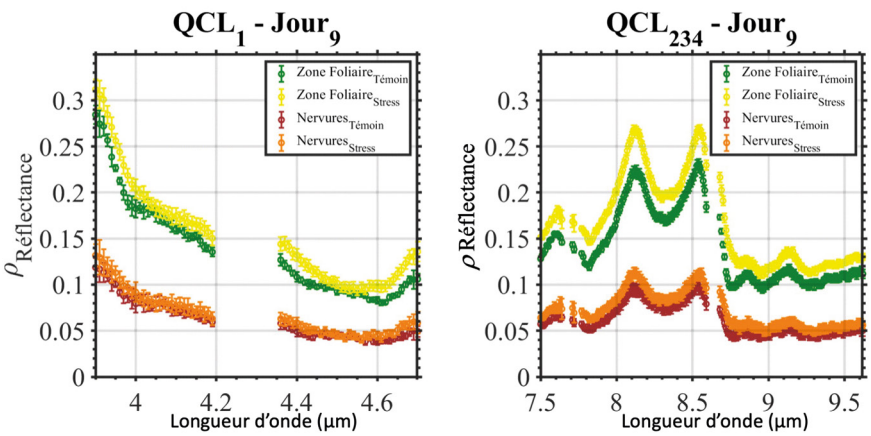
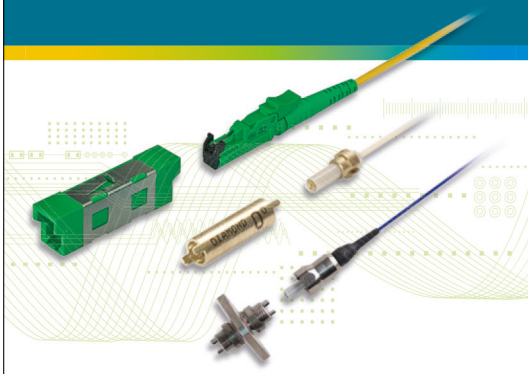


Figure 4. Exemple d'analyse comparative entre les zones foliaires et les nervures, sur des plants de tournesol soumis à un stress hydrique. Les zones spectrales où la puissance reçue est insuffisante sont volontairement retirées, notamment autour de 4,3 µm (absorption CO_2). On observe l'écart croissant entre les spectres des zones foliaires soumises à un stress hydrique, par rapport aux plants témoins.

2BLighting Technologies
High performance and reliable fiber optic assemblies

PM+
Ultra high Polarization Extinction Ratio (PER)
• Up to +4dB higher PER
• State-of-the-art insertion Loss (IL) and Return Loss (RL) values
• Best connector type and tolerance E-2000®, DMI, Mini AVIM® and Micro AVIM®
• Available on homologated fibres and cables

E-2000® PS+
Contact expanded beam
• Low loss
• Interlock solution optional
• 1310-1550nm or 980-1060nm

E-2000® PSm
Contact pump laser connector
• Low loss
• Interlock solution optional
• MM 105 0.22NA (MM 200 0.22NA optional)
DIAMOND
the fiber meeting
www.2blighting.fr
info@2blighting.com
+33 1 64 59 21 30

varie entre 50 mW et 350 mW selon la longueur d'onde.

Quelques dizaines de secondes sont nécessaires pour balayer l'ensemble des longueurs d'onde sélectionnées (plusieurs centaines) et effectuer l'acquisition, en fonction du nombre de moyennages souhaités. Des traitements spécifiques sont nécessaires pour :

- réduire l'effet de Speckle, inhérent à l'éclairage cohérent : un diffuseur rotatif est complété par un traitement par moyennage local de l'image.
- Compenser les variations de pointé du laser lors du balayage spectral : un jeu de miroirs galvanométriques recentre l'éclairage.
- S'affranchir des variations d'intensité du laser : la référence et l'objet sont mesurés lors d'une acquisition unique, au moyen d'un anneau doré diffusant autour de l'échantillon.

Le cube d'images ainsi constitué peut être analysé par les techniques usuelles de segmentation, comme le montre la figure 3.

L'utilisation d'un éclairage mono-longueur d'onde permet d'éviter de chauffer l'échantillon. En fonction de l'application, un suivi temporel peut être effectué en cours de croissance de la plante, comme le montre la figure 4.

Ces premiers résultats montrent la capacité de l'imageur à mesurer la réflectivité spectrale propre de plusieurs zones de l'échantillon, conjointement sur les 2 bandes MWIR et LWIR.

Notons que cet imageur spectral MIR se trouve actuellement à l'état de prototype de laboratoire. Pour envisager une utilisation au champ ou en dispositif extérieur, plusieurs avancées sont à réaliser, notamment sur le rapport signal/bruit, la compacité des lasers, ainsi que l'encombrement et le coût des éléments principaux.

SPECTROMÉTRIE MIR ACTIVE

Que mesure t-on en imagerie spectrale active par balayage ?
La relation de Kirchhoff sur les objets radiants $\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$ est bien valable pour chaque longueur d'onde. A l'équilibre thermique, la thermographie utilise souvent l'hypothèse ($\varepsilon = \alpha$). Dans le cas d'une absorption de coefficient $\alpha(\lambda)$ d'un flux laser potentiellement monochromatique, l'équilibre thermique sera rétabli à T°eq par une émission ε qui, selon la loi de Planck, s'étendra sur un spectre plus large. L'effet de serre (absorption dans le visible et réémission dans l'infrarouge) en est l'illustration.
L'émissivité est donc un concept à manier avec précaution selon l'utilisation.

TECHNIQUE DE MESURE	PARAMÈTRES ACCESSIBLES POUR CHAQUE PIXEL
Thermographie	Valeurs moyennes de ($\varepsilon + \rho$), intégrées sur $\Delta\lambda$ la bande spectrale de la caméra
Imagerie spectrale passive	Composante thermique + réflexion [$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda)$]
Imagerie spectrale active	Réflexion spectrale $\rho(\lambda)$ extraite après soustraction du flux continu thermique

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'imagerie dans les bandes thermiques, appliquée au végétal, ouvre plusieurs pistes prometteuses. À court terme, il est essentiel de renforcer les protocoles d'acquisition en plein champ pour fiabiliser les mesures et faciliter leur interprétation. Le développement de modèles d'analyse adaptés aux dynamiques thermiques végétales constitue une priorité. À moyen terme, l'intégration de capteurs thermiques dans des dispositifs multi-capteurs pourrait enrichir les diagnostics agronomiques.

Enfin, l'exploration de technologies actives — par excitation MIR contrôlée — mérite d'être approfondie : elle pourrait améliorer la robustesse des mesures en conditions variables. Ces actions, combinées à une meilleure caractérisation des réponses thermiques des plantes, permettront de consolider l'usage de la thermographie comme outil d'aide à la décision en expérimentation végétale.

REMERCIEMENTS :
Les travaux d'imagerie spectrale MIR ont été réalisés à l'institut Foton (Lannion), au cours des thèses de Chaimae El Fakir (2020) et Maroun Hjeij (2024) avec le soutien du Département des Côtes d'Armor et de l'entreprise CMI-Roullier (St Malo).

Les auteurs remercient Bastien Billiot (CMI Roullier), Pascal Besnard et Ronan Le Page (Institut Foton), ainsi que Luiz Poffo (Xlim).

Les acteurs de la photonique bretonne sont regroupés au sein du cluster Photonics Bretagne, et organisent régulièrement des rencontres sur les thématiques MIR.

RÉFÉRENCES

[1] S. Labbé S *et al.*, Options Méditerranéennes Série B **67**, 175 (2012)

[2] S. Dandrifosse, *Dynamics of wheat organs by close-range multimodal machine vision.* Universite de Liege (Belgium) (2022).

[3] M. F. Buitrago *et al.*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **125**, 132 (2017)

[4] C. El Fakir *et al.*, Opt. Eng. **60**, 023106-1-15 (2021)