



Imagerie hyperspectrale active dans l'infrarouge moyen : "application agrophotonique"

Maroun Hjeij

► To cite this version:

Maroun Hjeij. Imagerie hyperspectrale active dans l'infrarouge moyen : "application agrophotonique". Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Rennes, 2024. Français. NNT : . tel-04599428

HAL Id: tel-04599428

<https://hal.science/tel-04599428v1>

Submitted on 3 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain



THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE DE RENNES

ECOLE DOCTORALE N° 601

*Mathématiques, Télécommunications, Informatique, Signal, Systèmes,
Electronique*

Spécialité : *Photonique*

Par

Maroun HJEIJ

Imagerie hyperspectrale active dans l'infrarouge moyen

« Application agrophotonique »

Thèse présentée et soutenue à Lannion, le jeudi 22 février 2024

Unité de recherche : Institut FOTON – CNRS UMR 6082

Composition du jury :

Président :	Guy LE BRUN	Prof., Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire OPTIMAG, Brest, France
Rapporteur :	Marie ABBOUD MEHANNA	Prof., Faculté des Sciences, Université Saint-Joseph, LBRI, Beyrouth, Liban
Rapporteur :	Julien FADE	MCF HDR, Centrale Méditerranée, Institut Fresnel, Marseille, France
Dir. de thèse :	Pascal BESNARD	Prof., ENSSAT, Institut FOTON, Université de Rennes, Lannion, France
Enc. de thèse :	Jean-Marc GOUJON	MCF, ENSSAT, Institut FOTON, Université de Rennes, Lannion, France

Invité :

Enc. de thèse :	Luiz POFFO	MCF HDR, IUT de Lannion, Institut FOTON, Université de Rennes, Lannion, France
Enc. de thèse :	Bastien BILLIOT	Chef de projet R&D, Centre Mondial de l'Innovation Roullier, Saint-Malo, France
	Vincent DAVID	Président, Sophia Engineering, Sophia Antipolis, France

Remerciements

C'est notre décision de prendre des initiatives dans la vie et, parfois, d'oser. Ces dernières années de thèse ont constitué pour moi une période intense et exceptionnelle durant laquelle j'ai pu m'épanouir tant professionnellement que personnellement. Les travaux qui en découlent et dont ce manuscrit rend compte sont le fruit de moments de réflexion, d'apprentissage, d'expérimentation, et surtout, de partage. Avant d'entrer dans le vif du sujet, je tiens à remercier certaines personnes qui m'ont tout simplement témoigné une amitié sincère.

Tout d'abord, je remercie l'ensemble des membres du jury de ma thèse : Marie Abboud Mehanna, Julien Fade et Guy Le Brun. Merci pour l'intérêt et le temps accordés à mes travaux, ainsi que pour les échanges riches et constructifs que nous avons pu avoir.

Je remercie mon directeur de thèse, Pascal Besnard, et mes encadrants, Jean-Marc Goujon et Luiz Poffo, pour m'avoir accueilli au sein de l'Institut Foton UMR 6082. À vous trois, votre expertise, qu'elle soit d'ordre théorique ou expérimentale, m'a beaucoup apporté, non seulement en termes de résultats, mais également en termes de connaissances fondamentales et de méthodologie. J'ai ressenti une certaine liberté dans mes pistes de réflexion, mais vous avez aussi su m'aiguiller lorsqu'il le fallait. C'est en cela que vous avez contribué à forger le scientifique que je suis aujourd'hui.

Je remercie également notre collaborateur industriel, Bastien Billiot, chef de projet de recherche et développement au sein du centre mondial de l'innovation (CMI) du groupe Roullier, pour sa disponibilité chaque fois que j'ai sollicité son aide, ainsi que pour ses multiples encouragements.

Pour le financement de cette thèse, j'adresse mes remerciements au département des Côtes-d'Armor (CD22) et à l'université de Rennes.

Je remercie Angélique Le Pennec, Chloé Deschamps et Carole Perrot pour leur disponibilité et leur aide qui ont facilité le bon déroulement de cette thèse.

Je souhaite remercier tous les collègues du laboratoire, qui sont devenus ma famille bretonne en dehors des murs de l'établissement. Merci pour toutes les séances de football/basket et votre écoute : Mohammed Guendouz, Joël Charrier, Parastesh Pirasteh, Loïc Bodiou, Jonathan Lemaître, Nathalie Lorrain, Stéphane Trebaol, Christelle Pareige et Marc Brunel.

Durant ce doctorat, j'ai eu l'opportunité d'encadrer plusieurs stagiaires dans leurs projets de fin d'études. Je souhaite bonheur et réussite dans leur carrière professionnelle à Martin Lepers, Karim Chichoux, Killian Adam, Mathilde Lefeuvre, Mathieu Duplan, et Laure Etchegoinberry.

Bien sûr, un grand merci aux doctorants (certains déjà docteurs), post-doctorants et LRU pour tous les moments partagés et vécus ensemble. Des souvenirs sont gravés avec chacun d'entre vous : Erwan Weckenmann, Valentine Gaudillat, Georges Perin, Nouhaila Ben Kohaila, Asma Bouzid, Chaimae El Fakir, Et-Tijani El Metouy, Abdelali Hammouti, Abdallah Jaafar, Lobna Jerbi, Ronan Kervazo, Sadok Kouz, Grégory Lefrere, Aymeric Le Gratiet, Simon Le Méhauté, Sofiane Meziani, Jérémy Potet, Louis Ruel et Aymeric Thiel de Milleret.

Durant la dernière année, j'ai entamé une belle aventure sur un projet passionnant "HYP4U", qui porte sur la démonstration d'un système d'observation hyperspectrale haute performance à bord d'un nano-satellite français, pour diverses applications civiles et militaires. Je tiens à exprimer

ma gratitude envers les présidents de la société, Vincent David et Laurent Escarrat, pour leur confiance.

Cette année a été enrichissante grâce aux merveilleuses rencontres, qui sont devenus ma famille dans le sud de la France. Je souhaite ainsi remercier chaleureusement mes collègues : Laurent Berder, Yann Chemin, Claude Valois, Cyril Bédée, Nicolas Hericher, Caroline Maige, Remy Pype-Drager, Magali Borghese, Morgan Lefauchaux, Renan Warrick, Thierry Duband, Eric Paysse, Yannick Alcaraz, Louis Zaugg, Thomas Houllier, Jacques Dalmau, Joffrey Delbort, Anaëlle Bouillot, Vincent Girault, Jeremy Fenelon, Damien Magnan, Christophe Bousquet, Emmanuelle Gazzotti, Anne Charmillon, Sophie Richermoz, Jérôme Fromentin, Miquéla Fromajot, André Labat, Sylvain Reynaud, et bien d'autres encore.

Sans oublier mes amis au Liban, merci pour votre soutien constant et pour toujours avoir été là, même à distance : Ibrahim Khairallah, Emile Bou Kheir, Julien Haber, Frédéric Chaaya, Elias Khalife, Michael Beiruti, Jimmy Wehbe, Christian Razzouk et Charbel Ghaoui.

Un doctorat implique beaucoup de travail, mais aussi du stress, des doutes et des inquiétudes... En somme, tout un éventail de sentiments souvent synonymes de très mauvaise humeur.

À cet égard, je rends hommage à la patience et à la compréhension de ma famille : Georgette, ma grand-mère, Fadia, ma mère, Robert, mon père, ainsi que Marissa et Rosalia, mes deux sœurs. Votre soutien indéfectible a été mon pilier.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma tendresse à Maria qui, ayant rejoint mon parcours en cours de route, a accepté avec amour et courage le défi de me soutenir tout au long de cette aventure. Merci pour ta présence inestimable.

~ Let me tell you something you already know. The world ain't all sunshine and rainbows. It's a very mean and nasty place, and I don't care how tough you are, it will beat you to your knees and keep you there permanently if you let it. You, me, or nobody is gonna hit as hard as life. But it ain't about how hard you hit, it's about how hard you can get hit and keep moving forward. How much you can take and keep moving forward. That's how winning is done! ~ Rocky Balboa

Yec'hed mat.

Table des matières

Introduction générale.....	1
I. Etat de l'art de l'imagerie hyperspectrale dans le domaine agrophotonique.	3
1. Les fondamentaux de l'imagerie hyperspectrale.....	3
1.1. Relation entre la spectroscopie, l'imagerie et l'IHS.....	4
1.2. Terminologie	6
1.3. Architectures des systèmes d'imagerie hyperspectrale	9
1.4. Les sources d'éclairage dans l'imagerie hyperspectrale active	10
1.5. Les détecteurs utilisés en imagerie hyperspectrale.....	12
2. Domaine d'application dans l'agrophotonique	13
2.1. Le phénotypage des végétaux.....	13
2.1.1. In vitro	13
2.1.2. In vivo	14
2.2. La détection des réponses des plantes au stress.....	14
2.2.1. Stress biotique	14
2.2.2. Stress abiotique	15
3. Système d'imagerie hyperspectrale actif.....	16
3.1. Système optique.....	18
3.2. Paramètre à calculer : taux de réflectance	18
3.3. Métrologie d'acquisition et de traitement.....	20
3.3.1. Les dérives thermiques.....	20
3.3.2. Propriétés des images de fond.....	21
3.3.3. Propriétés des images laser	22
3.3.4. Variation de pointé du laser	22
3.3.5. Variation de l'élargissement de l'éclairage laser	23
4. Evaluation du système.....	24
5. Synthèse des contraintes du système et type de bruit.....	24
6. Conclusion et motivation de la thèse.....	25
II. Etat de l'art sur speckle et les techniques de réduction.....	27
1. Origines du speckle	27
2. Propriétés du speckle.....	29
2.1. Taille de grain du speckle.....	30
2.2. Contraste spatial du speckle	34
3. Critères d'évaluation de la compensation gaussienne.....	36

3.1.	Coefficient de détermination (R^2).....	36
3.2.	Erreur quadratique moyenne (RMSE).....	37
4.	Procédures de réduction du speckle	38
4.1.	Motivation de la réduction de speckle	38
4.2.	Algorithmes de réduction	38
4.3.	Méthodes optiques de suppression de speckle	41
4.3.1.	Décorrélation en longueur d'onde	41
4.3.2.	Décorrélation spatiale.....	42
4.3.3.	Décorrélation angulaire	46
4.4.	Outils commerciaux.....	47
5.	Approches et protocoles	50
6.	Résultats et discussion.....	51
7.	Conclusion.....	56
III.	Contrôle des paramètres du QCL pour l'IHS actif.....	59
1.	QCL intégrés à l'IHS actif	59
2.	Déplacement du dépointé laser	60
2.1.	Origine	60
2.2.	Techniques d'asservissement	61
2.3.	Caractérisation de fluctuation de dépointé angulaire	64
2.4.	Méthode implémentée pour la correction	67
2.5.	Quantification de la correction	68
3.	Instabilité de puissance d'illumination.....	71
3.1.	Origine	71
3.2.	Caractérisation de fluctuation de puissance.....	72
4.	Technique de compensation proposée.....	74
4.1.	Méthode d'estimation du taux de réflectance	76
4.1.1.	Références interne et externe	76
4.1.2.	Propriétés optiques	77
4.2.	Compensation de la fluctuation de puissance.....	80
4.3.	Résultats et discussions	85
5.	Conclusion.....	86
IV.	Evaluation IHS avec une application agrophotonique	89
1.	Objectifs	89
2.	Caractérisation spectrale en eau de la végétation.....	91
2.1.	Structuration et constitution biochimique des feuilles	91

2.2.	Importance de l'eau pour la végétation	92
2.3.	Stress hydrique et conséquences.....	93
2.4.	Moyen de détection du stress hydrique	93
3.	Matériel et méthodes	95
3.1.	Mise en culture des échantillons végétaux	95
3.2.	Application du stress hydrique	96
3.3.	Acquisition des cubes spectraux.....	97
4.	Chaîne de traitement des images	99
4.1.	Evaluation du rapport signal sur bruit sur référence.....	99
4.2.	Evaluation du SNR spécifique à la végétation	102
4.3.	Méthode de seuillage et identification des zones	104
5.	Exploitation des signatures spectrales.....	106
6.	Conclusion.....	114
	Conclusion générale	116
	Annexes	119
1.	Laser à cascade quantique	119
2.	Caractéristiques du QCL MIRCAT.....	119
3.	Propriétés des images de fond.....	121
3.1.	Référence lambertienne	121
3.2.	Echantillon végétal	122
4.	Caractérisation de la dérive thermique.....	123
5.	Images de fond sur la surface de référence	123
6.	Images éclairées sur la surface de référence	125
7.	Applications d'imagerie exploitant le speckle	127
8.	Fiche pratique – Tableau de consultation.....	128
9.	Etalon externe - éclairage simultané	128
10.	Fabrication de la référence secondaire	129
11.	Etalement du laser sur l'Infragold	130
12.	Etude temporelle de rapport de spectre	131
12.1.	Analyse spectrotemporelle du rapport foliaire par les nervures	132
12.2.	Analyse spectrotemporelle du rapport inter-composantes sous stress.....	136
	Références	142

Liste des figures

Figure 1 : Schéma du principe de fonctionnement de la spectroscopie infrarouge à double faisceaux.....	4
Figure 2 : Représentation de l'interaction des tissus végétaux avec le rayonnement électromagnétique et principes de mesure.	5
Figure 3 : Evolution de l'imagerie. (a) Imagerie panchromatique avec une seule bande spectrale. (b) Imagerie multispectrale dans multiple bandes spectrales ainsi que le profil d'intensité d'un pixel particulier. (c) Cube hyperspectral formé par des centaines d'images de la même scène et le spectre continu d'un pixel [9].....	6
Figure 4 : Spectre électromagnétique avec une barre inférieure représentant le domaine visible et l'infrarouge [30].....	6
Figure 5 : Signatures spectrales caractéristiques de différents types de surfaces [43].....	8
Figure 6 : Exemple d'image hyperspectrale acquise à partir d'une feuille verte. (a) Hypercube 3D de sous-images à bande étroite ; (b) spectre de réflectance d'un pixel particulier [29].....	9
Figure 7 : Approches de l'imagerie hyperspectrale avec leurs avantages et leurs limitations [50].	10
Figure 8 : Les matériaux utilisés pour la détection dans l'ensemble des longueurs d'onde [67].	13
Figure 9 : Illustration du système d'imagerie hyperspectrale utilisé lors de l'étude. Noter que la source d'éclairage est un laser monochromatique accordable.	17
Figure 10 : Illustration de la chaîne d'extraction de la réflectance spectrale précédente.	20
Figure 11 : Profil spatial normalisé du faisceau laser suivant l'axe dx et dy sur la surface de référence lambertienne pour les longueurs d'onde allant de 7,5 et 11 μm détectées par la caméra A65 [9].	23
Figure 12 : Évaluation du waist laser en fonction de la distance de propagation en passant par un miroir concave sur le banc optique HI2.	23
Figure 13 : Speckle produit par réflexion par une surface rugueuse. M est un point du plan d'observation.....	28
Figure 14 : Images d'un objet rugueux : (a) image prise avec une lumière incohérente ; (b) image prise avec une lumière cohérente ; et (c) une partie agrandie de l'image montrée en (b) [Pierre Chavel et Thierry Avignon, Institut Optique].	29
Figure 15 : Illustration simpliste du montage optique pour le calcul de la taille de grain de speckle.....	30
Figure 16 : Image laser acquise avec SC5000 à 4,5 μm (a) et A65 à 8 μm (b).	32
Figure 17 : La densité spectrale de puissance (DSP) pour 4,5 μm (a) et 8 μm (b).	32
Figure 18 : Autocorrélation $R(x, 0)$; coupe centrale horizontale.....	33
Figure 19: Autocovariance normalisée	33
Figure 20 : L'interpolation gaussienne 2D à 4,5 μm (a) et à 8 μm (b). Les graphes présentent le profil de l'intensité extraites d'une même coupe de l'image du flux laser isolé (figure 16.a.b.) et du flux interpolé à 4,5 μm (c) et à 8 μm (d).	35
Figure 21 : La normalisation de l'éclairage par son interpolation gaussienne, suivant (a) 4,5 μm et (b) 8 μm	36
Figure 22 : Les images filtrées en LP suivant différente zone de segmentation (a.b.) suivant 4,5 μm et suivant 8 μm (c.d.).	40

Figure 23 : Schéma (a) des zones de cohérence incidentes sur une cible, (b) des zones de cohérence rétrodiffusées avec des régions de chevauchement en raison de la diffusion diffuse, (c) du contraste de speckle réduit dans des régions de speckle [138].	43
Figure 24 : (a) Objet modélisé en 3D de la lentille sphérique. (b) Déviation de différentes lumières incidentes avec la lentille sphérique. (c) Processus de rotation de la lentille sphérique. En fonction de la déviation de l'arbre rotatif, le foyer de la lentille sphérique pour un certain faisceau incident change avec sa rotation [139].	44
Figure 25 : Le contraste mesuré à différentes tensions du moteur avec barres d'erreur. (b) Le contraste mesuré 20 fois à différentes tensions du moteur. (c) Motifs de speckle enregistrés par CCD en 500×500 pixels à 0 V (la tension du moteur). (d) Motifs des Motifs de speckle à 5 V [139].	44
Figure 26 : Utilisation d'un QCL accordable comme source, transmission laser via une fibre multimode, éclairage d'un disque infragold par un diffuseur rotatif. La caméra IR [141] capture une trentaine d'images par longueur d'onde, appliquant une moyenne pour atténuer le contraste spatial du speckle.	45
Figure 27 : La configuration de la mesure de réflectance utilisant un faisceau laser collimaté dirigé vers un échantillon minéral en rotation [142].	45
Figure 28 : Intégrateur de Köhler (homogénéisateur) [146].	46
Figure 29 : Optotune's laser speckle reducer: LSR-5-17 [149].	47
Figure 30 : Actionneur polymère électro actif (PEA) avec (a) aucune tension appliquée et (b) une tension V appliquée entre les deux électrodes souples [149].	48
Figure 31 : Montage du banc optique utilisé pour la réduction du speckle.	51
Figure 32 : (a) Diffuseur Thorlabs. (b) Spectre de réflectance dans la gamme de l'infrarouge.	51
Figure 33 : Les graphes présentant le contraste du speckle des images, suivant les longueurs d'onde de l'infrarouge, acquises avec (a) SC5000 et (b) A65.	52
Figure 34 : Les graphes présentant les résultats de R2 pour les deux caméras (a) SC5000 et (b) A65 suivant les différentes longueurs d'onde.	52
Figure 35 : Les graphes présentant les résultats du RMSE pour les deux caméras (a) SC5000 et (b) A65 suivant les différentes longueurs d'onde.	53
Figure 36 : Les graphes présentant les résultats du contraste pour les deux caméras (a) SC5000 et (b) A65 suivant les différentes longueurs d'onde avec les filtres $LP1e2$ et $LPFWHM$.	54
Figure 37 : Les graphes présentant les résultats du R^2 pour les deux caméras (a) SC5000 et (b) A65 suivant les différentes longueurs d'onde avec les filtres $LP1e2$ et $LPFWHM$.	55
Figure 38 : Les graphes présentant les résultats du RMSE pour les deux caméras (a) SC5000 et (b) A65 suivant les différentes longueurs d'onde avec les filtres $LP1e2$ et $LPFWHM$.	55
Figure 39 : Les graphes présentant les résultats du contraste pour les deux caméras (a) SC5000 et (b) A65 suivant les différentes longueurs d'onde avec les filtres LP, moyen et médian.	56
Figure 40: Illustration du fonctionnement d'un laser à cascade quantique.	60
Figure 41: Banc optique utilisant un système galvanométrique à deux miroirs oscillants [171].	61
Figure 42: Schéma simplifié du dispositif expérimental utilisé dans la référence [174].	63
Figure 43 : Représentation du centre de l'éclairage laser suivant X (a) et suivant Y (b) en fonction du balayage spectral acquis suivant les différents modules laser QCL1234.	65
Figure 44 : Banc optique équipé du système miroirs oscillants (motorisés).	68

Figure 45: Représentation du centre de l'éclairage laser suivant X (a) et suivant Y (b) en fonction du balayage spectral après correction utilisant la méthode implémentée dans le banc optique acquis par les deux caméras SC5000 et A65.....	69
Figure 46: Illustration de la trajectoire du faisceau. Les flèches rouges illustrent le trajet entre le QCL et la cible, et les flèches jaunes représentent la partie de la lumière diffusée qui revient au plan focal du détecteur [180]......	71
Figure 47 : Variation de puissance donnée en DL suite à 10 répétitions en fonction de la longueur d'onde avec les barres d'erreur adéquates des images acquises sur les différents modules laser (a) QCL ₁ et (b) QCL ₂₃₄	74
Figure 48 : (a) Micrographie de la référence commerciale "Infragold". (b) Etalon secondaire avec son revêtement en or.	77
Figure 49 : La figure présente le taux de réflectance moyen de l'étalon secondaire par rapport à la référence commerciale suivant la gamme spectrale acquise du module laser QCL ₁ (a) et des modules laser QCL ₂₃₄ (b).	77
Figure 50 : Le porte-échantillon en rouge avec un anneau de référence d'épaisseur 1 cm entourant un disque central de diamètre 4 cm. (a) Le disque central est rempli par la référence secondaire. (b) L'échantillon végétal remplace la référence secondaire.	78
Figure 51 : Les étalements suivant X et Y ainsi que le coefficient de détermination R^2 en fonction des longueurs d'onde, de l'éclairage laser gaussien sur l'étalon secondaire, suivant les modules lasers (a) QCL ₁ (b) QCL ₂₃₄	79
Figure 52 : Configuration utilisant un anneau de référence.	80
Figure 53 : Graphes représentants les gaussiennes simulées pour le calcul du coefficient d'ajustement.	81
Figure 54 : (a) Le maillage de l'autocorrélation de la gaussienne de référence tronquée par l'anneau. (b) Le maillage de l'intercorrélation établit entre la deuxième gaussienne tronquée avec la première tronquée.....	83
Figure 55 : Graphiques présentant la puissance moyenne de 9 balayages spectraux, avec les barres d'erreurs associées pour les modules laser (a) QCL ₁ et (b) QCL ₂₃₄ , corrigés de la puissance en utilisant la méthode de compensation de la fluctuation par rapport à une référence.....	86
Figure 56 : Structure d'une feuille d'une plante [203].....	91
Figure 57 : Etat des stomates de la surface de feuille du Bégonia regroupés en paquet (Groupe Roulier).....	92
Figure 58 : Évolution de la photosynthèse des plantes témoins et des plantes stressées au développement des feuilles (Kotchi 2004). Les plantes témoins sont irriguées le 06, 10 et 13 mars.	93
Figure 59 : Spectres moyens des feuilles de rhododendron pour un traitement sec de 3 à 6 mois [56].	94
Figure 60 : Images d'orge sur 11 jours : 1ère rangée, plante stressée ; 3ème rangée, plante témoin ; 2ème et 4ème rangées, fausses couleurs des étiquettes prédites [231].	95
Figure 61 : Croissance des plantes de tournesols au laboratoire dans une chambre de culture.	96
Figure 62 : Evolution journalière du pourcentage de capacité au champ des plantes.....	97
Figure 63 : Organigramme du processus d'acquisition des images.....	99
Figure 64 : SNR pixel par pixel sur la référence secondaire à 8 μ m. Le cercle jaune délimite la ROI, qui présente une valeur supérieur à 10 dB.	101
Figure 65 : SNR avant et après la réduction des artefacts sur les modules QCL ₁ (a) et QCL ₂₃₄ (b) sur les acquisitions effectuées sur la référence spectrale.....	102

Figure 66 : SNR du taux de réflectances des plantes en fonction des différentes longueurs d'onde pour les modules laser (a) QCL ₁ et (b) QCL ₂₃₄	103
Figure 67 : (a) Image acquise à 8 μm durant la thèse précédente. (b) Image visible de l'échantillon avec la référence externe autour. (c) Taux de réflectance calculé depuis une image acquise à 8 μm au cours de la présente thèse.	103
Figure 68 : (a) La réflectance acquise sur une feuille de plante à 8 μm . (b) Classification des zones discernées : foliaire et nervures. (c) et (d) réponse spectrale du taux de réflectance de différentes zones en fonction des gammes de longueurs d'onde allant de 3,9 jusqu'à 4,7 et 7,5 jusqu'à 9,7 μm respectivement.	105
Figure 69 : Évolution journalière des spectres moyens de réflectance entre la zone foliaire et les nervures au fil des jours suivants les différents régimes d'irrigation appliqué.	110
Figure 70 : Les spectres de réflectance ont été enregistrés les jours 1, 4 et 10 pour la zone de nervure sous stress dans la gamme spectrale du QCL1 (a) et des QCL234 (b), ainsi que pour la zone foliaire sous stress dans la gamme spectrale du QCL1 (c) et des QCL234 (d).	112
Figure 71 : Evolution temporelle de la réflectance moyenne.....	113
Figure 72: Spectres de puissance d'un laser QCL accordable opérant entre 3 μm et 11 μm [Daylight solutions].....	119
Figure 73 : Courbes de puissance des 4 modules du laser QCL données par le constructeur.	120
Figure 74 : (a) Image de fond de la surface de référence, prise par la caméra SC5000 et le profil d'intensité de la ligne tracée au milieu avant et après lissage. (b) Image de fond prise par la caméra A65 et le profil d'intensité de la ligne tracée au milieu avant et après lissage.	121
Figure 75 : Bruit typique présent sur l'image de fond. (a) prise par la caméra SC5000 (3-5 μm). (b) prise par la caméra A65 (7,5-13 μm).	122
Figure 76 : (a) Image de fond de l'échantillon prise par la caméra SC5000 et profil d'intensité de la ligne tracée, avant et après lissage. (b) Image de fond de l'échantillon prise par la caméra A65 et profil d'intensité de la ligne tracée, avant et après lissage.	122
Figure 77 : Bruit typique présent sur l'image de fond de l'échantillon. (a) prise par la caméra SC5000 (3-5 μm). (b) prise par la caméra A65 (7,5-13 μm).	123
Figure 78 : (a) Zone de mesure (rouge) sur l'image de référence observée par la caméra SC5000, en pointillé la position de la tache laser. (b) Intensité moyenne représentant la dérive thermique observée sur 3 à 5 μm pour une durée de 15 minutes d'acquisition. (c) Variation autour de la moyenne spatiale des mesures.....	124
Figure 79 : (a) Zone de mesure (en rouge) sur l'image de référence observée par la caméra A65, en pointillé la position de la tache laser. (b) Intensité moyenne représentant la dérive thermique observée sur 7,5 à 13 μm pour une durée de 15 minutes d'acquisition. (c) Variation de la moyenne spatiale des mesures de la dérive thermique.....	125
Figure 80 : Profil de l'évolution de la moyenne des images éclairées à 4 μm sur la zone de mesure de l'image à gauche pour une durée de 15 minutes d'acquisition.....	125
Figure 81 : Intensité moyenne représentant des images éclairées à 8 μm pour une durée de 15 minutes d'acquisition.	126
Figure 82 : Speckle présent sur la surface de l'infragold pris à 4 μm et à 8 μm avec une coupe centrale pour la présentation de l'allure de la distribution d'intensité selon les pixels avec son interpolation gaussienne.	127
Figure 83: Configuration utilisant une lame séparatrice. MP : miroir plan, MC : miroir concave.	129
Figure 84 : Illustration de la méthode de pulvérisation cathodique [266].....	130

Figure 85 : Les étalements suivant X et Y ainsi que le coefficient de détermination R2 en fonction de la longueur d'onde suivant les modules lasers (a) QCL1 (b) QCL234.	131
Figure 86 : Évolution du rapport moyen des spectres de réflectance entre la zone foliaire et les nervures au fil des jours. Chaque échantillon représente une plante, avec deux mesures sur chacune des deux faces des deux feuilles, montrant les différences de réflectance entre les plantes témoins et celles soumises au stress hydrique.	136
Figure 87 : Évolution du rapport moyen des spectres de réflectance entre les plantes témoins et stressées pour les deux zones, foliaire et nervures, au fil des jours. Chaque échantillon représente une plante, avec deux mesures sur chacune des deux faces des deux feuilles, mettant en évidence les différences de réflectance entre les plantes témoins et celles soumises au stress hydrique.....	140

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les sources d'éclairage utilisées dans les systèmes d'imagerie hyperspectrale. ...	12
Tableau 2 : Exemples d'imagerie hyperspectrale appliqué à la détection de caractères végétaux.	16
Tableau 3: Tableau récapitulatif des ordres de grandeurs de l'amplitude moyenne dans les images de fond thermique, de la référence et de l'échantillon, acquises avec les deux caméras avec les incertitudes associées.....	21
Tableau 4 : Tableau récapitulatif des ordres de grandeurs de l'amplitude des ondulations du speckle présentes dans les images éclairées à 4 et 8 μm , de la référence et de l'échantillon, acquises avec les deux caméras avec les incertitudes associées à l'amplitude maximale du signal interpolé.....	22
Tableau 5 : Taille des grains de speckle.....	31
Tableau 6 : Taille de grain d'après le calcul pratique depuis les images acquises.	33
Tableau 7 : Les résultats du contraste calculé.	36
Tableau 8 : Les critères d'évaluation de l'interpolation gaussienne.	38
Tableau 9 : Tableau comparatif du contraste en fonction de la technique et les critères d'évaluation.....	40
Tableau 10 : Les paramètres de décorrélation et leur nature.....	41
Tableau 11 : Tableau de synthèse des méthodes de réduction de speckle dans les systèmes de projection et d'imagerie.	49
Tableau 12 : Tableau récapitulatif des résultats des différentes méthodes de réduction de speckle.....	56
Tableau 13 : Tableau de synthèse des méthodes de réduction du déplacement de faisceau laser.	63
Tableau 14 : Valeurs moyennes et incertitudes des positions spatiales du centre de l'éclairage pour les gammes spectrales.	66
Tableau 15 : Tableau récapitulatif de la moyenne de la position spatiale en x et en y avec l'écart-type adéquat après correction.	70
Tableau 16 : Tableau de comparaison des valeurs d'incertitude avant et après la correction suivant les modules suivant la position spatiale en x et en y.	70
Tableau 17 : Spécifications des paramètres des caméras.	98
Tableau 18 : Quantité des échantillons, volume des données et délais d'acquisition.....	98
Tableau 19 : Comparaison de quantités de données avec la thèse précédente.....	99
Tableau 20 : Tableau récapitulatif des réflectances moyennes suivant les jours des zones discernées.	113
Tableau 21 : Caractéristiques techniques du laser QCL (Daylight solution MIRAT).	120
Tableau 22: Un résumé des différentes techniques qui utilisent le speckle comme source d'information.	127

Glossaire

IHS : Imagerie Hyperspectrale

CMI : Centre Mondial d'Innovation

Institut FOTON : Fonctions Optiques pour les Technologies de l'Information

ENSSAT : École Nationale Supérieure des Sciences Appliquées et de Technologie

Data cube : Ensemble de Données Hyperspectrales

QCL : Quantum Cascade Laser

DL : Digital Level

CC : Capacité au Champ

VNIR : Visible et Proche Infrarouge

VIS : Spectre Visible (de 400 à 700 nm)

NIR : Proche Infrarouge

SWIR : Short Wave Infrared

MIR : Moyen Infrarouge

IR : Infrarouge

FWHM : Largeur à Mi-Hauteur

LP : Low-Pass Filter

SNR : Rapport Signal sur Bruit

LIDAR : Détection et Télémétrie par Laser

PCA : Analyse en Composantes Principales

GSD : Ground Sampling Distance

ROI : Region of Interest

SAR : Radar à Synthèse d'Aperture

FFT : Fast Fourier Transform

DEM : Digital Elevation Model

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

RGB : Red Green Blue (Représentation des Couleurs)

UAV : Unmanned Aerial Vehicle

GPS : Global Positioning System

Partenaire industriel

TIMAC AGRO CMI Groupe Roullier

TIMAC AGRO est un acteur majeur de la nutrition végétale et animale à l'échelle mondiale. Implanté à Saint-Malo, en France, le groupe conçoit et commercialise des solutions innovantes pour optimiser les performances des cultures et des élevages.



Le **Centre Mondial de l'Innovation (CMI) Roullier** joue un rôle important dans le développement de ces solutions. Doté de moyens techniques de pointe et d'une équipe de chercheurs hautement qualifiés, le CMI Roullier mène des travaux de recherche dans les domaines de la nutrition végétale, de la nutrition animale et de la santé des sols.



Les domaines d'expertise de TIMAC AGRO CMI Groupe Roullier:

- **Nutrition végétale** : développement d'engrais innovants et d'additifs agronomiques pour stimuler la physiologie des plantes et optimiser l'efficacité des fertilisants.
- **Nutrition animale** : conception de solutions nutritionnelles pour améliorer les performances des animaux, leur santé et leur bien-être, tout en réduisant l'impact environnemental de l'élevage.
- **Santé des sols** : mise au point de solutions pour améliorer la fertilité des sols et favoriser une agriculture durable.

Introduction générale

La population humaine devrait atteindre 9,7 milliards d'habitants d'ici 2050. Pour répondre à la demande alimentaire de cette population croissante, il faudra augmenter la production agricole de 25 à 70 % par rapport aux niveaux actuels d'ici 2050 [1].

Or, le plus grand défi pour l'agriculture est le changement climatique causé par l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, qui entraîne des températures extrêmes et des conditions météorologiques défavorables [2].

Toutes ces prédictions alarmistes du changement climatique poussent à faire évoluer les techniques agricoles et adopter des outils de surveillance modernes de gestion des cultures [3].

Ces techniques de surveillance sont réparties en deux types : techniques usuelles par contact et d'autres à distance par des moyens optiques [4]. Les techniques usuelles par contact, qui présentent des mesures directes, sont fastidieuses à utiliser [5].

C'est la raison pour laquelle des méthodes optiques, sans contact, sont développées pour les remplacer et caractériser les paramètres de croissances des plantes et l'état physiologique [6].

Les méthodes optiques se basent sur la mesure des propriétés réfléchives des plantes et font majoritairement appel à : la spectroscopie, l'imagerie et l'imagerie hyperspectrale (IHS). Ces méthodes sont développées dans les laboratoires [7] et sont déployées à des grandes échelles comme dans des satellites ou des avions [8].

Dans les travaux de la thèse précédente présentée par Chaimae El Fakir [9], un outil de diagnostic était développé pour la détection précoce du stress hydrique chez les plantes. La conception d'un tel outil est basée sur une architecture en IHS active, associant au système d'observation une source d'éclairage spectralement accordable dans l'infrarouge moyen (MIR) [10].

Bien que, les potentialités de cette technologie apparaissent relativement prometteuses, l'analyse et le traitement du volume énorme des données restent complexes et difficiles. De nombreuses incertitudes entourent l'extraction des informations utiles [11]. Une maîtrise doit être développée pour pouvoir les caractériser et les corriger.

Dans la thèse précédente [9], une première preuve de concept a été réalisée sur un système d'analyse actif à base d'une source commerciale accordable. L'analyse spectrale consistait à moyenniser le domaine spatial.

Mes travaux prolongent ces premiers travaux afin d'obtenir une « véritable » imagerie hyperspectrale, outil de diagnostic performant dans le moyen infrarouge pour détecter et surveiller le stress hydrique, en développant des approches pour surmonter les défis liés aux bruits, aux incertitudes et aux dégradations de performance causés par les équipements et le phénomène granulaire appelé "speckle", en comprenant les concepts théoriques associés.

Les travaux menés portent sur les aspects suivants :

- l'exposition et l'appréhension d'un système d'IHS active dans le MIR,
- la mise en place des protocoles d'acquisition,

- la caractérisation des mesures hyperspectrales en identifiant les sources d'incertitude,
- la mise en œuvre d'approches pour diminuer les principales sources d'erreurs ou de dégradations.

Ce présent manuscrit décrit la démarche méthodologique et scientifique du travail réalisé. Il est réparti suivant quatre chapitres :

- dans le chapitre 1, j'évoque dans une première partie les notions nécessaires à la compréhension du principe de l'imagerie hyperspectrale active d'après une étude bibliographique. Une deuxième partie est consacrée à l'application des systèmes d'imagerie hyperspectraux dans le domaine végétal pour le diagnostic et la surveillance qui présente la motivation du projet antérieur. Ce dernier a mis en œuvre un système d'imagerie actif dans le MIR. Je l'expose et je dévoile ses caractéristiques et les différents artefacts, qui se présentent lors de l'acquisition des mesures. Enfin, je clôture ce chapitre avec une synthèse et les problématiques à résoudre dans les chapitres suivants.
- dans le chapitre 2, j'expose le phénomène du speckle. Je présente ses notions théoriques et je le caractérise depuis les images collectées du système hyperspectral antérieur. Ensuite, une partie soulignera l'importance d'un paramètre de caractérisation pour des applications d'imagerie, qui exploitent le speckle. La motivation et les techniques de réduction sont accentuées par un état de l'art pour synthétiser la méthode à utiliser dans le domaine MIR. Des critères d'évaluation sont définis et utilisés pour quantifier les approches de calcul et d'extraction d'information. Enfin, je conclus ce chapitre par les résultats et la discussion de nos approches.
- dans le chapitre 3, je présente les défauts de mesures liés aux composants optiques. Je montre que le pointé laser, induit par la source elle-même, fluctue lors d'un balayage spectral. Je caractérise ces fluctuations de pointé et quantifie les variations de puissance laser en fonction des répétabilités de mesure. Ces problèmes ont été déjà évoqués dans la littérature par différents chercheurs. Finalement, je résume les défauts de mesure et propose mes approches pour les corriger et les rendre plus précises.
- dans le chapitre 4, j'évalue la nouvelle configuration du système par une application agrophotonique visant la détection précoce du stress hydrique chez les plantes avant tout dommage irréversible. Les protocoles de mesures, permettant la séparation des plantes saines des plantes stressées, sont présentés et discutés.

Ce manuscrit se termine par une conclusion et des perspectives aux travaux effectués.

I. Etat de l'art de l'imagerie hyperspectrale dans le domaine agrophotonique.

1. Les fondamentaux de l'imagerie hyperspectrale

L'imagerie hyperspectrale (IHS) est une technique qui génère une carte spatiale de la variation spectrale d'un paramètre physique [12]. Initialement, le principal objectif du développement des systèmes d'IHS était naturellement de fusionner les techniques de spectroscopie et d'imagerie.

Plutôt que de collecter un seul spectre en un point de l'échantillon, comme dans le cas de la spectroscopie, l'IHS enregistre un volume spectral qui contient un spectre complet pour chaque point (pixels) de l'échantillon. Les données tridimensionnelles, qui en résultent, contenant les deux dimensions spatiales et une dimension spectrale, est connu sous le nom « hypercube » [13]. Un hypercube comprend des centaines à des milliers d'images contiguës, suivant des bandes spectrales étroites.

Au cours des deux dernières décennies, l'imagerie hyperspectrale (IHS) a été appliquée à de nombreux domaines, notamment la gestion des ressources agricoles et hydriques [14], l'évaluation de la qualité et de la sécurité des aliments [15], la sûreté et la sécurité intérieure [16] ou le diagnostic médical [17].

Il y a plusieurs raisons pour lesquelles les systèmes IHS ont gagné en popularité :

- détection de matériaux : les systèmes IHS peuvent être utilisés pour détecter et identifier des matériaux en analysant les caractéristiques d'absorption et de réflexion uniques de ces matériaux dans le spectre électromagnétique [18].
- détection non-destructive et non-invasive : les systèmes d'imagerie hyperspectrale sont généralement non-destructifs et non-invasifs. Ce qui signifie qu'ils ne causent pas de dommages aux objets qu'ils analysent et peuvent être utilisés pour des applications telles que la surveillance de sites [19].
- détection haute résolution : les systèmes d'imagerie hyperspectrale peuvent fournir des images de haute résolution qui permettent de détecter des caractéristiques spécifiques [20]. Cette résolution est définie par :
 - la résolution spatiale qui décrit la précision de la localisation de la cible dans l'image. Pour les systèmes d'IHS, elle varie généralement de quelques dizaines de microns à quelques mètres.
 - la résolution spectrale décrit la précision de la mesure de la cible sur le spectre électromagnétique, elle est généralement exprimée en termes de largeur de bande ou de longueur d'onde. Pour les systèmes d'imagerie hyperspectrale, la résolution spectrale varie généralement de quelques nanomètres à quelques micromètres.
- automatisation et analyse des données : les systèmes d'imagerie hyperspectrale sont souvent équipés de logiciels d'analyse automatisés, qui peuvent traiter les données recueillies, fournir des résultats des signatures spectrales, et les comparer à une bibliothèque de signatures spectrales connues pour identifier les matériaux. Ce qui permet une analyse des données plus efficace [21].

Les avantages de l'IHS sont les suivants [22] :

- la mesure requiert une préparation minimale de l'échantillon,
- la nature de la mesure est non destructive et à distance,
- le temps d'acquisition est court (~ 50 ms pour l'obtention des informations),
- la visualisation simultanée de la réponse spectrale dans une distribution spatiale.

Cette partie présente les fondements, les avantages et les limites d'un système IHS.

1.1. Relation entre la spectroscopie, l'imagerie et l'IHS

Les techniques optiques utilisant la spectroscopie dans l'infrarouge (NIRS : Near-InfraRed Spectroscopy) ont reçu une attention considérable en tant que moyen de détection des maladies des plantes en raison de leur caractère non invasif, de leur rapidité, de leur haute sensibilité et de leur spécificité pour des types particuliers de maladies [23].

Les techniques de spectroscopie traitent la mesure et l'analyse des spectres résultant de l'interaction entre la matière et un rayonnement électromagnétique (EM) [24].

Le schéma de principe de la spectroscopie infrarouge à double faisceaux est décrit dans la figure 1.

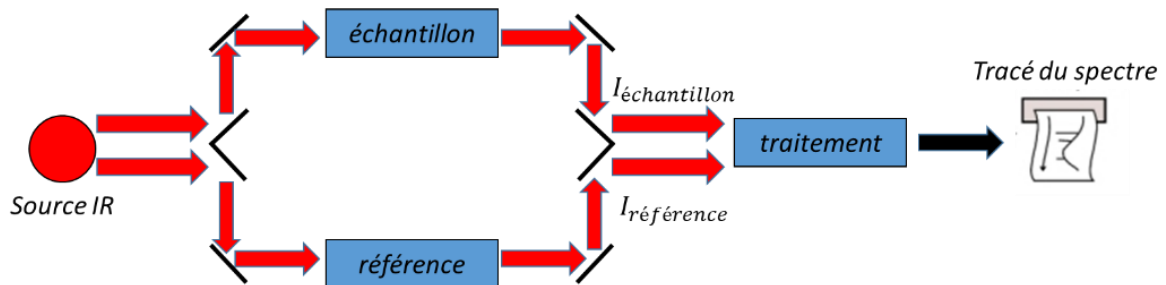


Figure 1 : Schéma du principe de fonctionnement de la spectroscopie infrarouge à double faisceaux.

Le faisceau initial est séparé en deux, celui du bas sur la figure 1 correspond au signal témoin ou « référence » et celui du haut correspond au signal passant à travers l'échantillon à tester.

Pour chaque longueur d'onde, l'intensité transmise par l'échantillon est comparée à l'intensité de la référence afin de déduire la transmittance qui se calcule comme le rapport de ces deux intensités mesurées. On aboutit ainsi au spectre de l'échantillon.

$$\rho(\lambda) = \frac{Signal_{\text{échantillon}}(\lambda)}{Signal_{\text{référence}}(\lambda)} \quad (1)$$

Ces techniques mesurent les propriétés optiques par la réflectance, la transmittance, l'absorbance ou la diffusion du rayonnement électromagnétique dans des régions du spectre mesurables par des instruments spectraux [25].

Cependant, elles offrent une mesure globale de la lumière réfléchie ou transmise depuis une zone spécifique de l'échantillon, fournissant une mesure ponctuelle à l'emplacement du capteur [26].

Contrairement aux approches d'imagerie, elles ne fournissent pas d'informations sur la distribution spatiale de la lumière dans l'échantillon. L'imagerie, utilisant un imageur comme détecteur et une source d'éclairage, permet une mesure à distance et non invasive des caractéristiques des plantes.

La figure 2 schématise les différentes propriétés optiques et l'interaction entre l'onde électromagnétique et la feuille d'une plante.

L'interaction de la lumière avec les molécules d'un échantillon peut entraîner l'absorption (1), la diffusion (2a et 2b) et la transmission (3) de la lumière. Ces interactions dépendent des propriétés chimiques et physiques de l'échantillon, et peuvent être utilisées pour les identifier et les caractériser.

La réflexion peut être spéculaire (2a), avec un angle identique à l'incidence, ou diffuse (2b), avec un angle différent de l'incident.

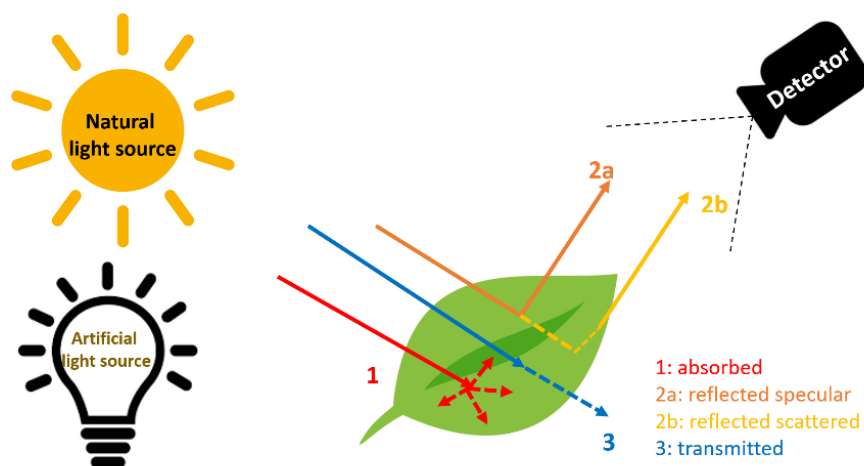


Figure 2 : Représentation de l'interaction des tissus végétaux avec le rayonnement électromagnétique et principes de mesure.

L'IHS fusionne les points forts des techniques spectroscopiques et imagerie. En outre, elle est basée sur l'évolution de l'imagerie panchromatique allant de l'image monochrome à un cube d'images hyperspectral :

- l'imagerie **panchromatique** permet d'acquérir les images dans une seule bande spectrale [27] comme montré sur la figure 3.a.
- l'imagerie **multispectrale** consiste à acquérir des images dans des bandes spectrales discrètes et espacées [28], comme montré dans la figure 3.b.
- l'IHS permet une acquisition d'images dans des bandes spectrales contiguës afin de construire un cube hyperspectral [29], comme montré dans la figure 3.c.

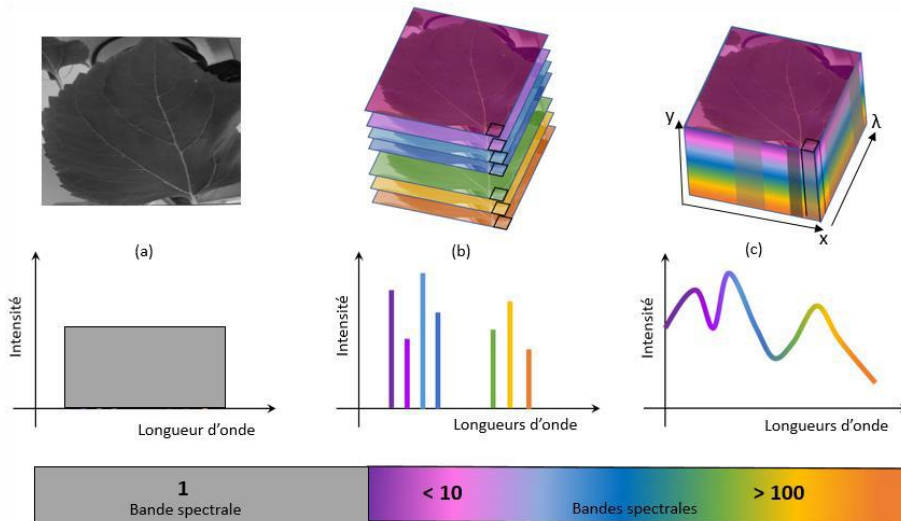


Figure 3 : Evolution de l'imagerie. (a) Imagerie panchromatique avec une seule bande spectrale. (b) Imagerie multispectrale dans multiple bandes spectrales ainsi que le profil d'intensité d'un pixel particulier. (c) Cube hyperspectral formé par des centaines d'images de la même scène et le spectre continu d'un pixel [9].

1.2. Terminologie

Dans cette section, les terminologies normalement utilisées en IHS seront mises en évidence.

Plage spectrale

La plage spectrale décrit les régions de longueurs d'onde couvertes par le système IHS. Les instruments d'imagerie spectrale peuvent couvrir les longueurs d'onde de l'ultraviolet, du visible, du proche infrarouge ou de l'infrarouge en fonction de l'application requise suivant la disponibilité et la capacité des technologies utilisées, voir la figure 4 [30].

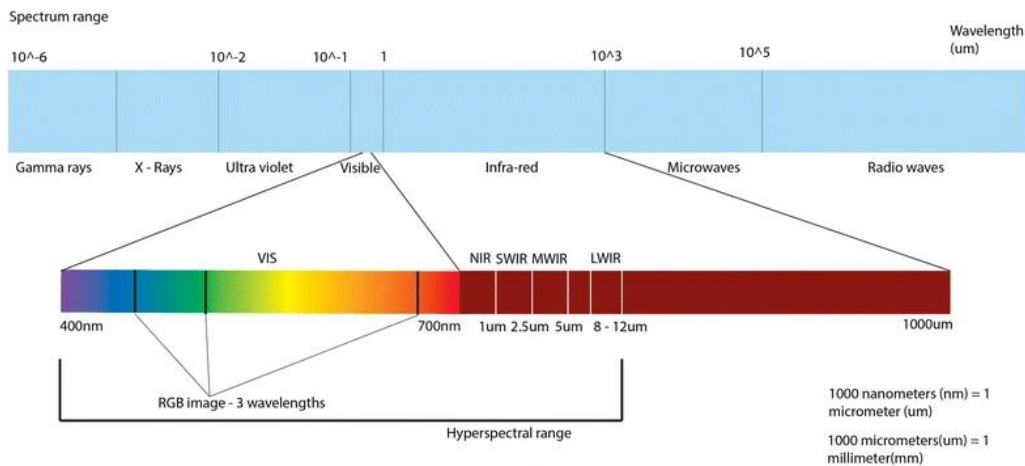


Figure 4 : Spectre électromagnétique avec une barre inférieure représentant le domaine visible et l'infrarouge [30].

Les systèmes d'imagerie hyperspectrale dans le visible et le proche infrarouge (VNIR) sont les plus utilisés dans la littérature pour des applications d'analyse d'agriculture [31]–[33].

Résolution spectrale

La résolution spectrale est définie comme la limite absolue de la capacité d'un système IHS à séparer deux caractéristiques spectrales monochromatiques adjacentes émises par un point de l'image [34].

La résolution spectrale en IHS n'est pas déterminée par le nombre de bandes spectrales capturées par le système. Elle est plutôt influencée par la largeur de bande spectrale de chaque canal. Une plus grande quantité de bandes peut offrir une meilleure capacité de détection des variations subtiles dans les propriétés spectrales des objets, mais cela n'est pas directement lié à la résolution spectrale [35].

A titre d'exemple, Akbari [36] utilise un système d'imagerie proche dans l'infrarouge entre 1000 et 2500 nm avec une résolution spectrale de 6,29 nm pour la détection du cancer. Une autre étude réalisée par Baissa [37] couvrant la gamme spectrale visible et proche infrarouge allant de 400 jusqu'à 2500 nm avec une résolution spectrale de 3 à 10 nm.

Des structures existantes dans la littérature pour la sélection de l'information spectrale sont les spectro-imageurs à éléments dispersifs [38] et à filtres [39]. La résolution spectrale dépend des propriétés optiques de ces éléments de sélection de la longueur d'onde.

Pour le domaine MIR, des filtres spectraux sont disponibles avec des résolutions spectrales allant de 40 à 100 nm, selon le fournisseur Thorlabs [40]. Un système qui consiste à avoir plusieurs filtres pour définir chaque longueur d'onde devient rapidement complexe en termes d'architecture.

Pour éviter cette complexité, la conception des systèmes IHS passifs à actifs est adoptée. Elle consiste à remplacer l'éclairage naturel par un éclairage artificiel qu'on peut contrôler, en utilisant des sources lasers accordables et monochromatiques à la place des éléments dispersifs.

Ces sources lasers renforcent la flexibilité en permettant de choisir la gamme et la résolution spectrale du balayage en longueur d'onde.

La résolution spectrale est déterminée par les caractéristiques de la largeur de raie du faisceau laser. Les détails concernant le laser utilisé dans notre étude sont présentés dans l'annexe 1 et 2, fournis par le fabricant Daylight MIRcatTM.

Signature spectrale

L'IHS exploite la signature spectrale distincte de tous les matériaux, résultant de leur composition chimique et de leur structure physique à des longueurs d'onde spécifiques [41].

Chaque élément dans un pixel de l'image hyperspectrale a sa propre signature spectrale, pouvant être utilisée pour caractériser et discriminer de manière unique tout objet dans une image sur une bande de longueur d'onde suffisamment large (dizaine de nm) [42].

Par exemple, Charrier B. et al. ont présenté les résultats de réflectance des surfaces en fonction de la longueur d'onde mesurée avec un capteur satellitaire [43]. Les longueurs d'onde sont classées en trois zones spectrales : visible, proche infrarouge (PIR) et moyen infrarouge (MIR).

La figure 5 illustre les surfaces étudiées, incluant l'asphalte, l'eau, la neige, une surface sableuse, une surface herbacée et un chêne, reflétant les propriétés détectées du rayonnement électromagnétique solaire.

Chaque surface présente une signature spectrale distincte en raison de sa composition et de ses propriétés optiques telles que l'absorption, la diffusion et la transmission, contribuant ainsi à la variation de la réflectance à différentes longueurs d'onde.

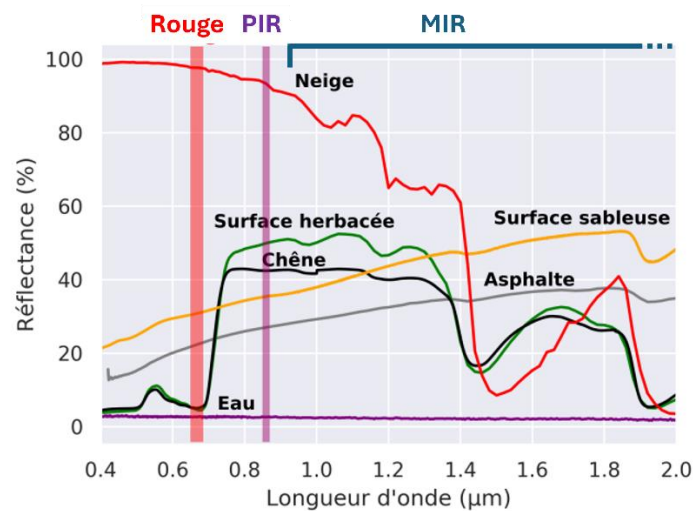


Figure 5 : Signatures spectrales caractéristiques de différents types de surfaces [43].

Image hyperspectrale

Les données d'images hyperspectrales sont constituées d'un ensemble d'images représentant les intensités mesurées à différentes bandes de longueurs d'onde du spectre électromagnétique [44].

Un cube hyperspectral est formé de bandes bidimensionnelles, représentant des images capturées à des longueurs d'onde spécifiques et empilées pour créer une troisième dimension, constituant ainsi un cube de données [45].

Ce cube, également appelé "cube hyperspectral", "hypercube" ou "data cube", attribue à chaque pixel une valeur d'intensité liée à une bande spectrale spécifique.

En explorant les bandes du cube, on peut observer l'évolution des intensités lumineuses d'un objet ou d'une scène à travers le spectre électromagnétique.

Cette représentation en cube permet une analyse approfondie des données hyperspectrales, capturant à la fois l'information spatiale et spectrale. Cela facilite des applications telles que la classification des matériaux, l'identification d'objets, la détection de changements et l'analyse de la composition chimique des surfaces.

La figure 6 présente un exemple d'hypercube extrait d'une image hyperspectrale d'une feuille verte, montrant une série de sous-images contiguës représentant l'intensité et la distribution spatiale. Toutes les images spatiales individuelles peuvent être extraites de l'hypercube à n'importe quelle(s) longueur(s) d'onde.

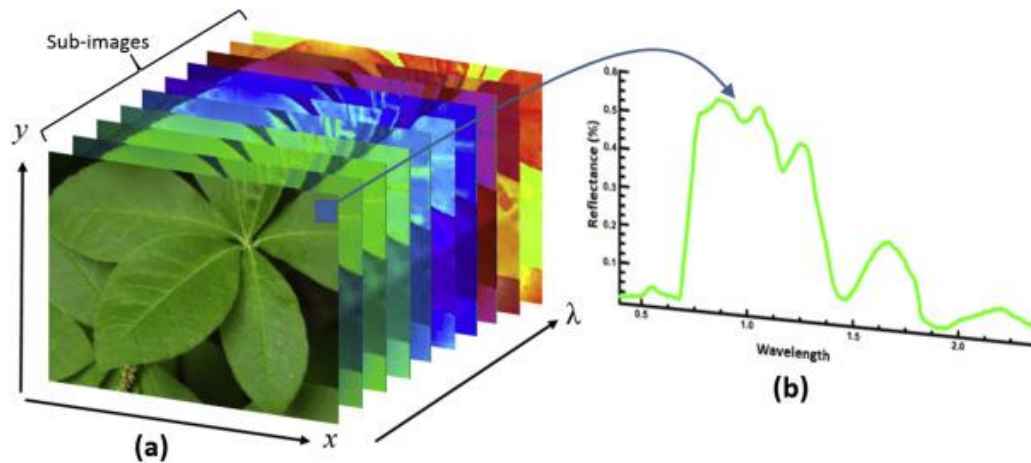


Figure 6 : Exemple d'image hyperspectrale acquise à partir d'une feuille verte. (a) Hypercube 3D de sous-images à bande étroite ; (b) spectre de réflectance d'un pixel particulier [29].

Par conséquent, une image hyperspectrale décrite comme $Im(x, y, \lambda)$ peut être considérée soit comme une image spatiale séparée $Im(x, y)$ à chaque longueur d'onde (λ), soit comme un spectre $Im(\lambda)$ à chaque pixel (x, y) .

Chaque élément de l'image de cet hypercube est appelé "voxel". Les valeurs d'intensité d'un pixel particulier caractérisent son empreinte spectrale unique, comme le montre la figure 6.b.

1.3. Architectures des systèmes d'imagerie hyperspectrale

Les systèmes IHS nécessitent tous un balayage spatial ou spectral. Les caractéristiques optiques et spectrales de ces systèmes sont largement déterminées par les exigences de l'application. Dans cette partie, je rappelle les quatre principales architectures pour l'acquisition des données dans les systèmes IHS les plus courantes. Ces dernières sont les suivantes :

- le balayage ponctuel (whiskbroom)
- le balayage linéaire (pushbroom)
- la méthode séquentielle par bandes (aerial)
- la méthode instantanée unique (snapshot)

Chacune de ces méthodes présentent des avantages et des limitations (figure 7). Leurs principes sont décrits d'une façon détaillée dans un article de Hagen et Kudenov [46].

En effet, le mode whiskbroom et pushbroom présentent une dépendance à des éléments dispersifs tel que le prisme, la grille ou prisme-grille-prisme (PGP) pour séparer la lumière [47], [48]. De plus, le temps d'acquisition des données est fastidieux nécessitant un balayage pixel par pixel ou ligne par ligne.

Le système d'imagerie en aerial [49] permet d'acquérir une seule image à une bande unique. Ce type de système utilise des filtres généralement au lieu des prismes pour la sélection de l'information spectrale. L'hypercube de données est obtenu en balayant la longueur d'onde de sortie du filtre en fonction du temps.

En comparaison, la dernière approche "snapshot" utilise typiquement une combinaison d'éléments de division d'image et d'éléments dispersifs. Dans le but d'imager un champ 2D sur

des sous-régions d'un réseau de détecteurs, de sorte que tous les pixels spatiaux et les canaux spectraux soient imagés simultanément.

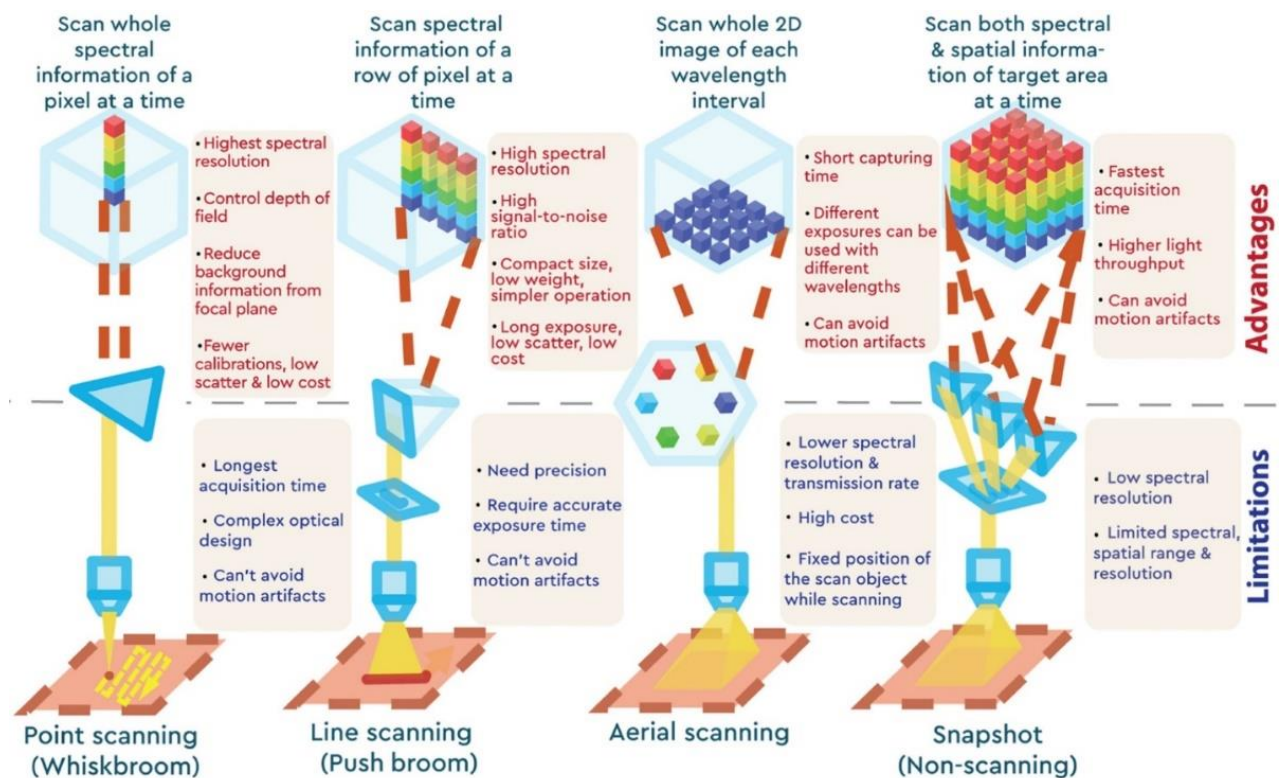


Figure 7 : Approches de l'imagerie hyperspectrale avec leurs avantages et leurs limitations [50].

Elle peut permettre d'améliorer la vitesse d'imagerie, mais peut nécessiter un compromis entre la résolution spatiale et spectrale puisqu'un nombre limité de pixels de la caméra doit être utilisé pour collecter des signaux provenant à la fois de différents canaux spectraux et de différentes positions spatiales [51].

1.4. Les sources d'éclairage dans l'imagerie hyperspectrale active

Ces sources génèrent la lumière qui permet d'exciter ou éclairer notre échantillon.

Ces sources peuvent être naturelles, comme le soleil, ou artificielles comme, les lampes halogènes, les diodes électroluminescentes, et les lasers.

Les systèmes d'imagerie hyperspectrale utilisent différentes sources d'éclairage, à la fois naturelles et artificielles, pour l'acquisition des données. Voici une description de chaque type de source d'éclairage, ainsi que leurs limites :

- source d'éclairage naturelle (système passif) :

Le soleil est une source d'éclairage naturelle couramment utilisée dans les systèmes d'imagerie hyperspectrale en extérieur [52].

Il émet un spectre électromagnétique large, qui couvre l'ensemble du spectre visible et une partie du proche infrarouge.

Les avantages de l'utilisation du soleil comme source d'éclairage sont sa disponibilité et son coût nul.

Cependant, il présente certaines limites, notamment la dépendance aux conditions météorologiques (comme les nuages) qui peuvent altérer l'intensité et la qualité de la lumière reçue, ainsi que la limitation des heures de la journée pour obtenir une illumination suffisante.

- lampes :

Les lampes artificielles, telles que les lampes halogènes ou les lampes à incandescence, peuvent être utilisées comme sources d'éclairage dans les systèmes d'imagerie hyperspectrale en intérieur ou dans des environnements contrôlés [53].

Elles offrent une émission spectrale relativement large couvrant une partie du spectre visible et peuvent être ajustées en intensité.

Les avantages des lampes sont leur disponibilité et leur coût relativement faible.

Cependant, elles présentent des limites en termes de stabilité spectrale, de variations de couleur et d'émission non uniforme, ce qui peut affecter la qualité et la précision des données hyperspectrales obtenues.

- diodes électroluminescentes :

Les LED sont des sources d'éclairage artificielles populaires dans les systèmes d'imagerie hyperspectrale. Elles peuvent être conçues pour émettre à des longueurs d'onde, offrant ainsi une émission spectrale étroite et définie [53].

Les LED sont compactes, économes en énergie et offrent une durée de vie plus longue que les autres sources d'éclairage.

Elles peuvent être utilisées pour des applications spécifiques nécessitant des longueurs d'onde précises.

Cependant, les limitations des LED résident dans leur faible puissance lumineuse, ce qui peut nécessiter des temps d'exposition plus longs pour obtenir des images hyperspectrales.

- lasers :

Les lasers sont également utilisés comme sources d'éclairage dans certains systèmes d'imagerie hyperspectrale.

Les lasers émettent une lumière cohérente et monochromatique, offrant ainsi une résolution spectrale élevée (quelques nm) et maîtrisée, spécifiquement les laser accordables en longueur d'onde [54].

Cependant, les lasers sont généralement plus coûteux et nécessitent des dispositifs de stabilisation pour maintenir la stabilité spectrale et spatiale.

Chaque type de source présente des avantages et des limites spécifiques en termes de disponibilité, de spectre émis, de stabilité, de coût et de puissance lumineuse.

Le choix de la source d'éclairage dépend des exigences spécifiques de l'application et des contraintes techniques.

Or dans le domaine de l'imagerie hyperspectrale, les lasers accordables dans l'infrarouge ont suscité un intérêt particulier en raison de leurs propriétés uniques [10]. Ils offrent une résolution spectrale élevée, généralement de l'ordre de quelques nanomètres, ce qui les rend utiles pour des applications telles que l'identification de matériaux ou l'analyse chimique.

Dans la plage spectrale du rayonnement infrarouge moyen (MIR), qui se situe entre 3 et 13 μm , de nombreuses molécules présentent des raies d'absorption caractéristiques [4], [56].

Cette région est souvent appelée "l'empreinte digitale" spectrale, car elle permet de distinguer et d'identifier différentes molécules en fonction de leurs vibrations moléculaires [57].

Le tableau 1 résume les sources et leur efficacité en terme gamme spectrale.

Tableau 1 : Les sources d'éclairage utilisées dans les systèmes d'imagerie hyperspectrale.

Source	Spectre	Application	Limite	Référence
Soleil	[250–2500] nm	Télédétection	Présence la journée	[58]
Lampe halogène	[400–1000] nm	Agroalimentaire	Durée de vie : 5000 h Décalage spectral dû à la température	[59]
LED	[400–800] μm	Végétation	Sensible aux tensions et à la température de jonction	[60]
Lasers	Large plage spectrale	Divers	Disponibilité et spécificité spectrale	[61]

1.5. Les détecteurs utilisés en imagerie hyperspectrale

Le détecteur bidimensionnel utilisé dans les systèmes d'imagerie hyperspectrale joue un rôle essentiel dans l'enregistrement des signaux spatiaux et spectraux [62].

Différents matériaux sont utilisés pour les détecteurs dans différentes plages spectrales, comme illustré dans la figure 8.

Pour les détecteurs couvrant la plage visible et proche infrarouge (de 350 à 1100 nm), le silicium (Si) est souvent utilisé. Des matrices de silicium (Si) ainsi que des matrices d'antimoniure d'indium (InSb) et d'arséniure de gallium et d'indium (InGaAs) sont employées pour ces longueurs d'onde [63].

Pour les longueurs d'onde allant de 850 à 1700 nm, des matrices d'antimoniure d'indium (InSb) et d'arséniure de gallium et d'indium (InGaAs) sont couramment utilisées [64].

Dans la plage spectrale entre 3 et 5 μm , l'antimoniure d'indium (InSb) est souvent préféré en raison de ses propriétés adaptées à cette gamme de longueurs d'onde [65].

Pour les plages de longueurs d'onde entre 3 et 5 μm et entre 8 et 12 μm , le tellurure de mercure et de cadmium (MCT) est couramment utilisé, ainsi que le silicium amorphe (FLIR A65) [66].

Il est important de sélectionner le matériau semi-conducteur approprié en fonction de la plage de longueurs d'onde souhaitée, car la bande passante du matériau semi-conducteur détermine la plage de longueurs d'onde dans laquelle le détecteur peut fonctionner efficacement.

La composition des matrices de lignes du détecteur bidimensionnel varie donc en fonction du domaine spectral d'intérêt.

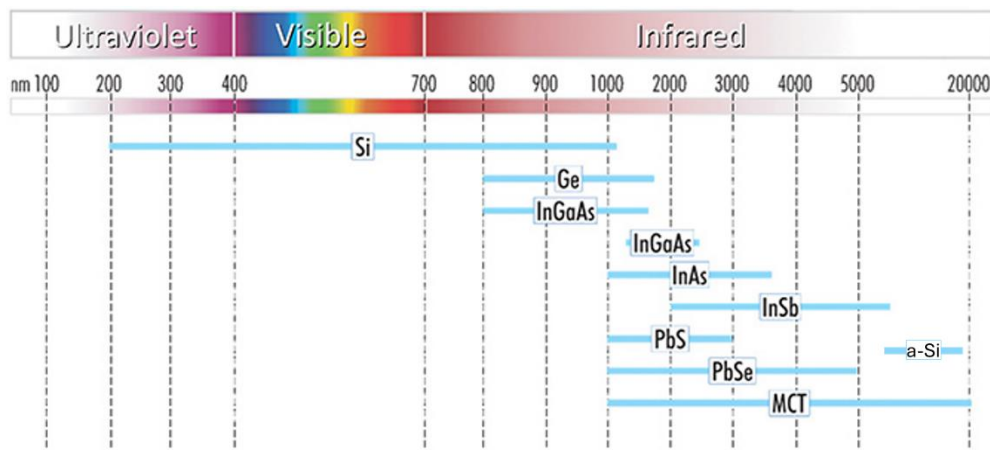


Figure 8 : Les matériaux utilisés pour la détection dans l'ensemble des longueurs d'onde [67].

2. Domaine d'application dans l'agrophotonique

L'agrophotonique est l'application de la technologie de la photonique dans l'agriculture. Elle inclut l'utilisation de capteurs optiques pour surveiller les conditions environnementales. L'objectif est d'optimiser la production agricole, l'efficacité énergétique et la qualité des cultures.

Les systèmes d'imagerie hyperspectrale dans l'agrophotonique servent comme outil d'acquisition de données pour extraire les signatures spectrales et établir les liens biologiques adéquats pour mieux interpréter l'état des végétaux. Les applications liées à l'agrophotonique sont groupées sous le nom de « phénotypage des végétaux ».

2.1. Le phénotypage des végétaux

Le terme "phénotypage" désigne une analyse quantitative des caractéristiques des plantes vivantes. Au cours des dernières décennies, le phénotypage s'est développé comme un outil essentiel pour la caractérisation d'une quantité de fonctions et de structures des végétaux [68].

Cet outil utilise principalement des analyses optiques non destructives des caractéristiques des plantes, basées notamment sur des images acquises par des systèmes IHS.

Les principales applications sont : l'estimation du contenu foliaire, la détection des maladies, la surveillance et la détection des stress. Ces recherches sont réparties suivant deux méthodologies : in vitro et in vivo [69].

2.1.1. In vitro

Ces études sont faites dans des salles à environnement contrôlé comme des laboratoires ou des serres. Ils utilisent principalement des systèmes d'imagerie hyperspectrale fixes. Parmi les

exemples d'applications in vitro, nous citons le taux de croissance des plantes, la détection du stress des cultures, l'estimation de la biomasse, l'étude de la viabilité des graines d'arbres, la caractérisation des systèmes racinaires ou encore la mesure de caractères physiologiques et biochimiques [70]–[71].

Le concept de mesure des caractères physiologiques a été démontré en mesurant l'indice de réflectance des canopées de tournesol. Cette étude a utilisé des mesures spectrales à bande étroite pour quantifier les différences de l'abondance des pigments du cycle xanthophylle (molécule de couleur jaune) et l'efficacité de la photosynthèse sous différents régimes d'engrais azotés [72].

2.1.2. In vivo

Ces études sont faites sur le terrain. Les systèmes IHS sont montés sur des chariots, des drones, des avions et des véhicules. Ils sont utilisés pour le phénotypage de grandes surfaces. Des véhicules mobiles motorisés équipés de capteurs hyperspectraux et d'instrument du système de positionnement global ont été utilisés pour estimer l'absorption d'azote, le poids sec des plantes et le rendement en grains de culture d'orge ou de blé [73], [74].

Les plates-formes aériennes offrent la télédétection pour surveiller les cultures en croissance et estimer le rendement des cultures sur de grandes zones géographiques allant de 20 jusqu'à 120 mètres [75]. Cependant, les applications de terrain à grande échelle utilisant des plates-formes aériennes ont des problèmes avec le rayonnement solaire instable en raison de la qualité constamment changeante de l'illumination solaire, des nuages et des ombres [76].

2.2. La détection des réponses des plantes au stress

Le stress végétal est un état de la plante dans lequel elle est influencée par des facteurs tels que le manque d'eau, une température excessive, une baisse de l'absorption par l'effet du froid, et biotiques dus à l'attaque par des organismes vivants défavorables comme les champignons, virus et insectes [73], [74].

Dans un état de stress, les plantes arrêtent leur croissance, réduisent fortement l'activité de leur système racinaire et diminuent l'intensité de la photosynthèse [77].

Ces réactions, dues au stress, peuvent être détectées à l'aide de systèmes IHS [78]. Ces derniers sont utilisés à l'étude du stress dans de nombreux travaux [79]–[81]. Il est nécessaire de prendre en compte de nombreux facteurs abiotiques pour déterminer avec précision les raisons de la manifestation du stress.

2.2.1. Stress biotique

En raison de ses caractéristiques spectrales et temporelles, l'IHS est utilisée pour déterminer les phases précoces des maladies des plantes in vitro et in vivo. On peut trouver de nombreux exemples d'application de l'IHS à la détection des caractéristiques de différentes espèces de plantes au sein du tableau 2.

Par exemple, l'IHS a été utilisée pour déterminer la tache de *Septoria tritici* (STB), une maladie foliaire causée par le champignon pathogène *Zymoseptoria tritici*, durant la saison de croissance du blé [82]. Les données IHS sur la réflectance de la canopée se sont avérées utiles pour quantifier la STB.

Förster a utilisé un microscope hyperspectral fonctionnant dans la gamme spectrale allant de 420 nm jusqu'à 830 nm pour étudier la propagation de la maladie de l'oïdium sur les feuilles d'orge. Un algorithme de machine learning a été utilisé pour examiner la progression temporelle de la maladie à l'aide des spectres IHS [83]. Pour la même maladie, l'apparition précoce et la sévérité a été détectée par un système IHS automatisé [84]

Zhu [85] a utilisé des algorithmes d'apprentissage automatique pour détecter rapidement et quantitativement la progression du virus de la mosaïque du tabac. En utilisant les caractéristiques spectrales et texturales des feuilles de tabac, il a pu distinguer clairement les feuilles infectées des non infectées en seulement 48 heures, par rapport aux images de référence des symptômes visibles à l'œil nu cinq jours après l'inoculation. Ces résultats prouvent la possibilité de détecter la maladie avant l'apparition des symptômes, ce qui peut aider au diagnostic et à la gestion des maladies des cultures.

L'ensemble de ces études montre que l'IHS offre une grande sensibilité pour la détection précoce des maladies. Les paramètres pour effectuer ces mesures IHS dépendent fortement des symptômes de la maladie et sont donc spécifiques à chaque interaction plante-pathogène.

2.2.2. Stress abiotique

La détection des réactions des plantes au stress abiotique d'une façon précoce peut permettre d'intervenir rapidement pour atténuer le stress et réduire les pertes de rendement. On commence à voir des exemples d'application IHS pendant la culture sur le terrain et en laboratoire pour atteindre cet objectif.

L'application IHS à la détection du stress salin, qui est exprimé par une concentration élevée des sels dans un milieu, chez le blé en est un exemple. Cette étude est établie dans la gamme spectrale allant de 400 nm à 2500 nm [86].

De même, le rendement des grains de blé et les profils de métabolites spécifiques ont été prédits de manière non destructive à l'aide de capteurs IHS sur le terrain, utilisant une caméra hyperspectrale fonctionnant dans la gamme spectrale allant de 350 nm à 900 nm [87].

La technique IHS, dans le domaine du visible (VIS) jusqu'au domaine du proche infrarouge (PIR), a été utilisée aussi pour caractériser les propriétés physiologiques de plantes mutantes avec des transporteurs de sucre altérés pour le transport du saccharose du mésophylle aux cellules stomatiques [88].

Une installation IHS portable avec une gamme spectrale de 400-1000 nm a été appliquée pour étudier le stress de la sécheresse. Il en ressort que la technique IHS est capable de détecter le stress dû à la sécheresse plus tôt que les mesures conventionnelles de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) [89].

D'après notre analyse du tableau 2, nous trouvons qu'il n'existe pas de méthodologie unifiée pour mener des études hyperspectrales des maladies des plantes qui tiennent compte de l'influence des facteurs abiotiques.

C'est pourquoi nous pensons qu'il est préférable de réaliser des expériences dans des conditions de laboratoire ou dans des serres industrielles afin d'éliminer partiellement ou complètement les facteurs abiotiques.

Tableau 2 : Exemples d'imagerie hyperspectrale appliqué à la détection de caractères végétaux.

Espèces	Objectif	Gamme spectrale	Type d'étude	Référence
Biotique				
Blé (<i>Triticum</i>)	Détection de maladie <i>STB</i>	[350 – 2500] nm	In vivo	[90]
Blé (<i>Triticum</i>)	Détection de fusariose du blé	[400 – 1000] nm	In vivo	[91]
Maïs (<i>Zea mays</i>)	Prédiction du contenu en acide des feuilles	[380 – 1030] nm	In vitro	[92]
Palmier (<i>Elaeis guineensis</i>)	Détection précoce de la pourriture basale	[800 – 950] Nm	In vitro	[93]
Mangue (<i>Mangifera indica</i>)	Estimation de la maturité	[390 – 890] Nm	In vivo	[94]
Pomme de terre (<i>Solanum tubersum</i>)	Estimation de la biomasse	[400 – 1000] Nm	In vivo	[95]
Orge (<i>Hordeum vulgare</i>)	Détection de maladie	[400 – 1000] nm	In vitro	[96]
Abiotique				
Citron (<i>Citrus limon</i>)	Détection du verdissement	[400 – 1000] nm	In vivo	[97]
Blé (<i>Triticum</i>)	Evaluation de la tolérance au sel	[400 – 2500] nm	In vivo	[86]
Vigne (<i>Vitis vinifera</i>)	Détection du stress hydrique	[400 – 1000] nm	In vivo	[89]
Riz (<i>Oryza sativa</i>)	Classification de la qualité	[400 – 1000] nm	In vivo	[98]
Tournesol (<i>Helianthus annuus</i>)	Détection du stress hydrique	[3,9 – 11] µm	In vitro	[10]

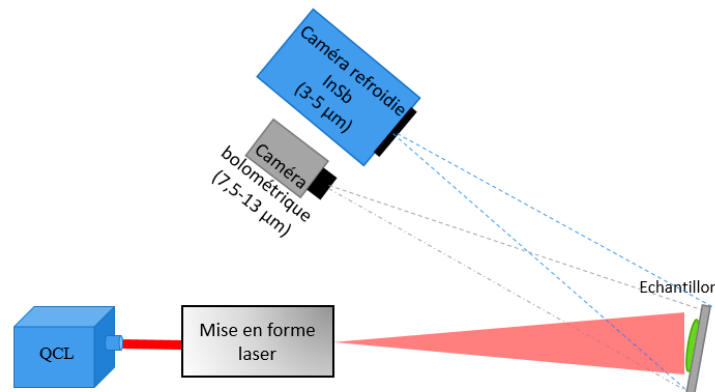
Dans le but d'améliorer l'interprétation des signatures spectrales des échantillons et d'établir les liens biologiques adéquats, il est nécessaire de comprendre les changements biochimiques, qui se produisent au sein de la plante sous stress, ainsi que leur influence sur le portrait spectral.

3. Système d'imagerie hyperspectrale actif

Suite à tout ce qui est mentionné au-dessus et à notre collaboration avec le Centre Mondial d'Innovation, un travail d'une thèse précédente à l'Institut FOTON [9] a initié le développement d'un système actif d'imagerie hyperspectrale dans le MIR.

Ce système est basé sur une architecture « *aerial* » et utilise un laser monochromatique accordable au lieu de filtres pour la sélection de la longueur d'onde. Ce système a été transposé pour la première fois dans la gamme spectrale du MIR, pour des échantillons de taille macroscopique.

La figure 9 illustre le banc optique du système d'imagerie hyperspectrale. Un laser continu accordable, sur les plages spectrales de $[3,9 \text{ à } 4,7 \mu\text{m}]$ et de $[7,5 \text{ à } 11 \mu\text{m}]$, éclaire l'échantillon. L'intensité d'éclairement présente un profil gaussien.



*Figure 9 : Illustration du système d'imagerie hyperspectrale utilisé lors de l'étude.
Noter que la source d'éclairage est un laser monochromatique accordable.*

Couplé avec un algorithme d'apprentissage, ce système a été utilisé pour étudier la croissance végétale et caractériser le stress hydrique de manière précoce. La réponse spectrale des végétaux [9] a été confirmée dans le MIR comme décrit dans la littérature [99].

Cependant, certaines limitations ont été rencontrées et seulement partiellement surmontées :

- **influence du fond thermique** : dans la gamme spectrale de l'infrarouge dite « thermique », le fond thermique sans éclairage laser est influencé par la température de la pièce de mesure. Ce fond thermique est systématiquement soustrait, mais les fluctuations induites de ce fond thermique doivent être mieux prises en compte.
- **speckle** : les images acquises sous éclairage laser monochromatique présentent un phénomène granulaire appelé "speckle", limitant l'exploitation des propriétés spatiales de l'image.
- **stabilité laser** : le faisceau du laser (semi-conducteur à cascade quantique, à cavité externe) présente des fluctuations
 - **de puissance** : en répétabilité simple, et lors des balayages en longueur d'onde du laser
 - **de la position du pointé de faisceau**, lors du balayage en longueur d'onde.

Pour surmonter ces limitations, une moyenne spatiale a été utilisée pour extraire les propriétés spectrales globales de l'échantillon étudié, ce qui a en particulier réduit l'impact du phénomène de granularité laser (speckle). Cette approche a permis une démonstration du concept. Cependant cela a conduit à masquer l'information spatiale dans les propriétés spectrales de l'échantillon soit à diminuer l'aspect imagerie de ce système d'imagerie hyperspectrale. Supprimer le moyennage nécessite d'atténuer le speckle.

Ce premier système avait pour intérêt de réaliser pour la première fois une mesure spectrale dans les bandes MIR thermiques à l'aide d'une architecture basée sur un éclairage monochromatique balayé.

Le présent travail s'inscrit dans la continuité, et se propose de reprendre l'architecture globale, et de remédier aux différents artefacts cités.

En particulier, les objectifs sont :

- optimiser l'information spatiale, en augmentant la résolution effective accessible,
- améliorer la fiabilité de la mesure de la réflectance spectrale, en compensant les artefacts, et en quantifiant les incertitudes associées à chacun.

Ci-après, je présenterai plus en détail le système optique IHS utilisé lors de la thèse précédente, le protocole d'extraction de la mesure du taux de réflectance, ainsi que les tableaux d'incertitude des paramètres de mesure qui sont liés aux artefacts.

3.1. Système optique

Le système suit l'architecture « aerial » (figure 7). Comme le montre la figure 9, il comprend :

- un éclairage artificiel pour illuminer le végétal sans besoin de filtres spectraux et pour collecter le rayonnement diffusé.
L'éclairage laser est fourni par une source d'éclairage largement accordable de type QCL opérant entre [3,9 à 4,7 μm] et de [7,5 à 11 μm].

Le faisceau laser est supposé gaussien TEM₀₀, de taille 2,5 mm (rayon à $1/e^2$) de 4 mrad à la longueur d'onde de 4 μm (d'après les spécifications du constructeur).

- un système optique de mise en forme du faisceau est constitué d'un miroir doré et d'un miroir sphérique.

Son objectif est d'élargir le faisceau laser à un diamètre de 5 cm (à $1/e^2$ du profil laser diffusé) pour l'éclairage de l'échantillon lors de la mesure ou même une référence de mesure.

Cet élargissement est nécessaire pour éclairer une plus grande surface de l'échantillon et éviter la saturation et la sous-exposition des détecteurs. Un phénomène de modification de l'élargissement du faisceau laser est dû à la chromaticité du miroir concave et à l'utilisation d'une large gamme spectrale. Ceci est quantifié par la suite.

- un système d'observation, basé sur des imageurs large bande :
 - une caméra refroidie adéquate à la gamme spectrale entre 3 et 5 μm , avec une résolution spatiale de 320x256 pixel et un codage de 16 bits (65536 DL**) avec un temps d'intégration réglable. La taille du pixel est de 30 μm .
 - une caméra bolométrique fonctionnant entre 7,5 et 13 μm , avec une résolution spatiale de 640x512 pixels et un codage de 14 bits (16384 DL) avec un temps de réponse inférieur à 8 ms. La taille du pixel est de 17 μm .

* Le temps d'intégration représente le temps pendant lequel la surface sensible est exposée à la lumière avant transfert [100].

** DL : Digital Level – Niveau numérique

3.2. Paramètre à calculer : taux de réflectance

Comme toute mesure de réflectance, le flux collecté de l'échantillon est comparé à un flux de référence.

L'équation (1) est donc complétée pour décrire l'aspect spatial de l'IHS :

$$\rho(x, y, \lambda) = \frac{I_{\text{échantillon}}(x, y, \lambda)}{I_{\text{référence}}(x, y, \lambda)} \quad (2)$$

avec : $I_{\text{référence}}$ et $I_{\text{échantillon}}$: intensité du signal utile lumineux réfléchi par la surface de référence et sur la surface de l'échantillon respectivement.

Ce signal utile est défini par le faisceau provenant du laser diffusé par la surface. Il doit être isolé des artéfacts, qui se manifestent lors de l'acquisition.

Pour accéder à $I_{\text{échantillon}}$ et $I_{\text{référence}}$, les estimations de ces intensités mesurées (I_{mes}) se calculent comme suit :

$$I_{\text{réf}_{\text{mes}}}(x, y, \lambda) = I_{\text{laser}_{\text{réf}}}(x, y, \lambda) + I_{\text{fond}_{\text{réf}}}(x, y) \quad (3)$$

$$I_{\text{réf}_{\text{mes}}}(x, y, \lambda) = \left(\left(I_{\text{référence}}(x, y, \lambda) \times B_{\text{laser}_{\text{réf}}}(x, y, \lambda) \right) \pm \Delta I_{\text{référence}}(x, y, \lambda) \right) + \left(I_{\text{fond}_{\text{réf}}}(x, y) \pm B_{\text{fond}_{\text{réf}}}(x, y) \right) \quad (4)$$

$$I_{\text{éch}_{\text{mes}}}(x, y, \lambda) = I_{\text{laser}_{\text{éch}}}(x, y, \lambda) + I_{\text{fond}_{\text{éch}}}(x, y) \quad (5)$$

$$I_{\text{éch}_{\text{mes}}}(x, y, \lambda) = \left(\left(I_{\text{échantillon}}(x, y, \lambda) \times B_{\text{laser}_{\text{éch}}}(x, y, \lambda) \right) \pm \Delta I_{\text{échantillon}}(x, y, \lambda) \right) + \left(I_{\text{fond}_{\text{éch}}}(x, y) \pm B_{\text{fond}_{\text{éch}}}(x, y) \right) \quad (6)$$

Avec :

- $I_{\text{laser}_{\text{réf}}}(x, y, \lambda)$ et $I_{\text{laser}_{\text{éch}}}(x, y, \lambda)$ représentent l'intensité perçue par un pixel de la caméra, ou toute grandeur proportionnelle au flux provenant de la scène, lorsque le laser éclaire la référence et l'échantillon respectivement.
- $B_{\text{laser}_{\text{réf}}}(x, y, \lambda)$ et $B_{\text{laser}_{\text{éch}}}(x, y, \lambda)$ représentent les amplitudes de bruits présents sur les images éclairées pour la référence et l'échantillon respectivement. Ce bruit est supposé de type « bruit multiplicatif » qui est connu sous le nom de « speckle », il sera traité dans le chapitre 2.
- $\Delta I_{\text{référence}}(x, y, \lambda)$ et $\Delta I_{\text{échantillon}}(x, y, \lambda)$ représentent les amplitudes de fluctuation de puissance laser présent pixel par pixel suivant les images éclairées par des acquisitions à des temps de collecte distincts. Ce bruit est supposé de type « bruit additif », il sera traité dans le chapitre 3.
- $I_{\text{fond}_{\text{réf}}}(x, y)$ et $I_{\text{fond}_{\text{éch}}}(x, y)$ représentent une grandeur proportionnelle au flux provenant du fond thermique sans éclairage laser provenant de la référence et de l'échantillon respectivement.
- $B_{\text{fond}_{\text{réf}}}(x, y)$ et $B_{\text{fond}_{\text{éch}}}(x, y)$ représentent les amplitudes de bruits présents sur les images de fond.

Ces différents éléments se combinent sur l'expression de la réflectivité.

L'équation (2) est ainsi développée en utilisant les équations [3-6] :

$$\rho(x, y, \lambda) = \frac{\left(I_{éch_{mes}}(x, y, \lambda) - \left(I_{fond_{éch}}(x, y) \pm B_{fond_{éch}}(x, y) \right) \pm \Delta I_{échantillon}(x, y, \lambda) \right) / B_{laser_{éch}}(x, y, \lambda)}{\left(I_{réf_{mes}}(x, y, \lambda) - \left(I_{fond_{réf}}(x, y) \pm B_{fond_{réf}}(x, y) \right) \pm \Delta I_{référence}(x, y, \lambda) \right) / B_{laser_{réf}}(x, y, \lambda)} \quad (7)$$

Afin de supprimer l'effet du fond thermique de nos images avec éclairage laser, il est nécessaire d'effectuer une acquisition du fond de la scène.

Le schéma qui illustre le protocole d'extraction de la réflectance spectrale est présenté dans la figure 10.

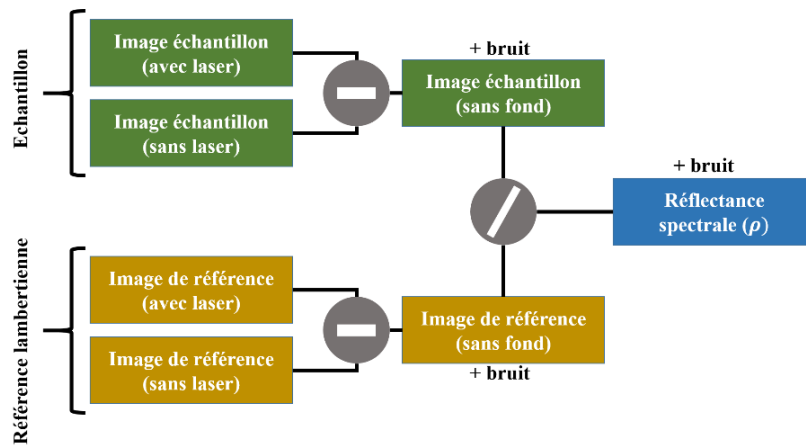


Figure 10 : Illustration de la chaîne d'extraction de la réflectance spectrale précédente.

Dans cette méthode, une acquisition est réalisée à différents moments pour capturer une image du fond thermique et une image éclairée avec un laser, représentant respectivement la référence et l'échantillon. Ensuite, une soustraction systématique est effectuée entre les images du fond thermique et les images éclairées afin d'isoler le flux thermique. Enfin, un rapport est calculé pour obtenir le taux de réflectance.

3.3. Métrologie d'acquisition et de traitement

3.3.1. Les dérives thermiques

Des éventuelles dérives thermiques de la scène doivent être caractérisées afin de les compenser dans nos mesures pour l'estimation du taux de réflectance. Ces dérives peuvent provenir notamment des fluctuations thermiques lentes de la scène au cours de la journée d'expérimentation.

Dans le cas de la thèse précédente [9], les dérives thermiques sont évaluées et caractérisées (annexe 4). Les résultats confirment que les dérives thermiques sont d'amplitude négligeable sur la surface de référence ; elles sont de l'ordre 0,3 % du signal pour les images de fond et de l'ordre inférieur à 2,4 % pour les images laser.

3.3.2. Propriétés des images de fond

La scène est thermalisée à une température ambiante dans un environnement in-vitro autour de 300 °K. Les images de fond $I_{fond}(x,y)$ correspondent à l'émission thermique de cette scène avec le laser éteint. Ces images présentent du bruit thermique $B_{fond}(x,y)$. Le protocole de caractérisation des propriétés des images de fond est détaillé dans l'annexe3 pour les images de références et pour l'échantillon.

Une amplitude moyenne (A_{moy}) est extraite des images de fond pour obtenir une valeur proportionnelle du flux qu'on obtient des images avec les détecteurs. L'incertitude associée à cette valeur vérifie le bruit du fond (B_{fond}). Le $B_{fond}(x,y)$ varie d'une caméra à une autre.

La caméra SC5000 présente un temps d'intégration réglable, adapté individuellement pour la référence et l'échantillon en raison de leurs propriétés optiques distinctes, assurant ainsi un signal suffisant dépassant le seuil de détection :

- pour la référence : un temps d'intégration de valeur $t_i=75 \mu s$ est utilisé pour l'acquisition pour éviter la saturation lors du passage en image éclairée $I_{laser_{réf}}(x,y,\lambda)$.
- pour l'échantillon : un temps d'intégration de valeur $t_i=700 \mu s$ est utilisé.

Les principales caractéristiques des images de fond prises par les deux détecteurs sont résumées dans le tableau 3.

Nous remarquons que l'amplitude moyenne du signal détecté par la caméra SC5000 dépend du temps d'intégration utilisé pour éviter la saturation. Malgré la différence du signal, le niveau de bruit pour l'échantillon ($B_{éch}$) et pour la référence ($B_{réf}$) présentent une amplitude similaire égale à 6 DL.

Pour la caméra A65, l'amplitude moyenne est différente sur l'échantillon et sur la référence. Les bruits associés vérifient une amplitude inférieure à 10 DL.

Tableau 3: Tableau récapitulatif des ordres de grandeurs de l'amplitude moyenne dans les images de fond thermique, de la référence et de l'échantillon, acquises avec les deux caméras avec les incertitudes associées.

Détecteurs	Images de fond		Image référence		Image échantillon	
	A_{moy} (DL)	B_{fond} (DL)	A_{moy} (DL)	B_{fond} (DL)	A_{moy} (DL)	B_{fond} (DL)
Caméra SC5000	542	6	8307	6		
Caméra A65	3119	7	2349	9		

Une évolution inverse est observée dans les résultats du tableau 3, ce phénomène est expliqué par le contrôle du temps d'intégration (700µs pour l'échantillon et 70 µs pour la référence) pour la première caméra, tandis qu'il n'est pas ajustable pour la deuxième caméra.

Nous ferons une hypothèse que l'incertitude associée au bruit reste la même sur les mesures, si les conditions d'acquisition restent identiques.

Nous utilisons les valeurs de $B_{fond_réf}$ et $B_{fond_éch}$ dans les équations (4) et (6) respectivement.

3.3.3. Propriétés des images laser

Le faisceau d'éclairage est sous forme monochromatique initialement gaussien.

Dans cette partie, les propriétés générales des images laser $I_{laser_{réf}}(x, y, \lambda)$ et $I_{laser_{éch}}(x, y, \lambda)$ sont étudiées suivant deux longueurs d'onde :

- $\lambda = 4 \mu\text{m}$, acquise par la caméra SC5000 opérant entre 3 et 5 μm .
- $\lambda = 8 \mu\text{m}$, acquise la caméra A65 opérant entre 7,5 et 11 μm .

Le signal réfléchi de la référence et de l'échantillon présente une allure gaussienne bruité par un phénomène granulaire « speckle » [101].

L'amplitude des ondulations du speckle est exprimée en DL. Elle est définie par la dispersion de ses valeurs par rapport au signal interpolé (annexe 6). L'effet des ondulations de speckle est ramené à l'amplitude maximale du signal interpolé pour l'exprimer en pourcentage.

Les ordres de grandeurs des ondulations du speckle sont résumées dans le tableau 4 et détaillées dans l'annexe 6.

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des ordres de grandeurs de l'amplitude des ondulations du speckle présentes dans les images éclairées à 4 et 8 μm , de la référence et de l'échantillon, acquises avec les deux caméras avec les incertitudes associées à l'amplitude maximale du signal interpolé.

<i>Détecteurs</i>	<i>Image éclairée</i>		<i>Image référence</i>		<i>Image échantillon</i>	
	<i>B_{laser} (DL)</i>	<i>B_{laser} (%)</i>	<i>B_{laser} (DL)</i>	<i>B_{laser} (%)</i>	<i>B_{laser} (DL)</i>	<i>B_{laser} (%)</i>
<i>Caméra SC5000 ($\lambda = 4 \mu\text{m}$)</i>	1500	30	500	30		
<i>Caméra A65 ($\lambda = 8 \mu\text{m}$)</i>	6000	50	300	50		

Pour valider les qualités métrologiques de l'architecture, il est nécessaire de s'affranchir de cette limitation. Pour cela, il a été utilisé un moyennage spatial de la zone d'exposition laser pour continuer à investiguer les propriétés spectrales. Cependant, cette opération de moyennage entraînera temporairement la perte de la définition spatiale de l'imageur.

3.3.4. Variation de pointé du laser

Un artefact a été identifié dans la thèse précédente, qui concerne un changement de direction du laser pendant le balayage en longueur d'onde, principalement dans la gamme spectrale de 7,5 à 11 μm .

Ce phénomène est causé par des sauts de modes, qui se produisent dans les lasers à cascade quantique. Une explication détaillée de ce problème, ainsi que d'autres problèmes liés à la source lumineuse, sera abordée dans le chapitre 3 de la thèse.

La figure 11 présente le profil spatial du laser superposé pour différentes longueurs d'onde après l'application d'une interpolation gaussienne. La figure 11 montre que la position du centre du faisceau varie environ 30 pixels suivant X et 20 pixels suivant Y.

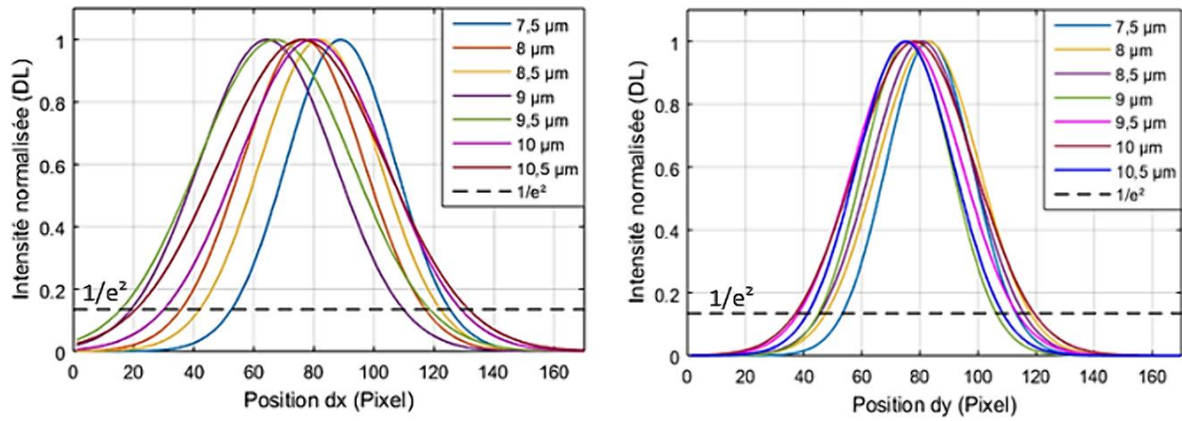


Figure 11 : Profil spatial normalisé du faisceau laser suivant l'axe dx et dy sur la surface de référence lambertienne pour les longueurs d'onde allant de 7,5 et 11 μm détectées par la caméra A65 [9].

Pour répondre aux artéfacts de l'instabilité de pointé du laser durant la thèse antérieure, une zone commune de traitement est repérée en se basant sur la déviation maximale du déplacement du pointé laser. Cette zone est une sous matrice fixe spatialement extraite des images pour appliquer une moyenne et extraire la réponse spectrale.

3.3.5. Variation de l'élargissement de l'éclairage laser

Étant donné que nous travaillons sur une large gamme spectrale, un autre problème survient : en raison des propriétés optiques de chromaticité des dispositifs optiques et du balayage spectral, ainsi que de la divergence du faisceau laser à la sortie de la source, selon **les équations de propagation en espaces libres**, nous nous retrouvons confrontés à des variations de l'élargissement du diamètre en fonction des longueurs d'onde sur la cible d'éclairage.

Le waist du faisceau laser est proportionnel à la longueur d'onde. Dans la figure 12, nous présentons l'évolution du waist laser pour 6 longueurs d'onde en fonction de la distance à la sortie de la source laser.

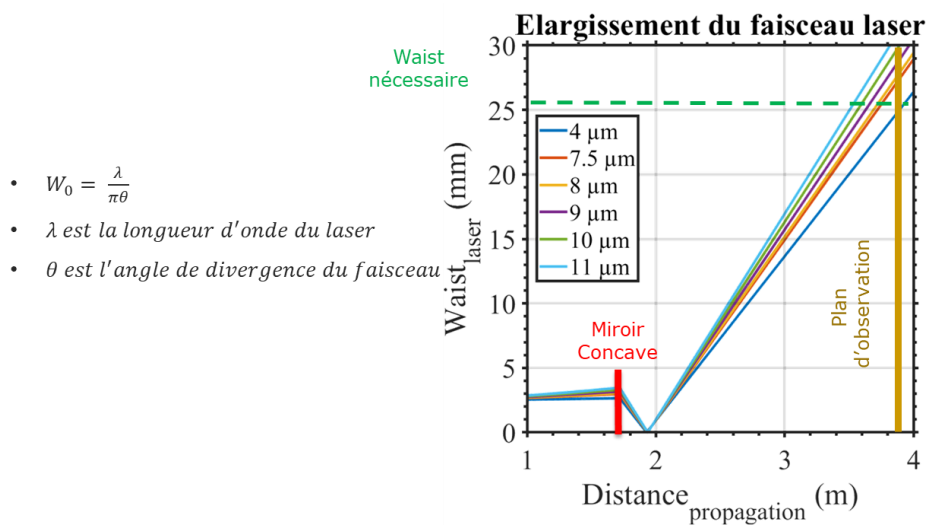


Figure 12 : Évaluation du waist laser en fonction de la distance de propagation en passant par un miroir concave sur le banc optique HI2.

La taille de la zone à éclairer est définie à 50 mm ; la ligne en tirets verts représente la taille du waist nécessaire (vu que c'est le rayon). En plaçant un miroir concave à une distance de 1,7 m de la sortie laser, le faisceau se focalise en son point focal et diverge différemment selon les longueurs d'onde.

Le plan d'observation est positionné à 2,3 m du miroir concave, et en calculant le waist, nous remarquons que cela varie de 4,5 cm à 5,5 cm, couvrant des longueurs d'onde de 4 à 11 μm .

Ce point est très important à prendre en considération, car l'élargissement résultant du balayage spectral d'une longueur d'onde à une autre peut avoir un impact significatif. Tout traitement d'image qui dépend de données d'entrée, basées sur la localisation de la tâche, ne doit pas imposer ces paramètres mais les rendre ajustables à chaque longueur d'onde. Dans le cas contraire, les résultats risquent d'être surestimés et biaisés.

Prenons un exemple concret : si l'image de l'éclairage laser est interpolée par son modèle gaussien 2D, et si le modèle exige le centre de l'éclairage avec l'éclairage, il est nécessaire de retrouver les coordonnées du centre à chaque longueur d'onde à tout moment.

4. Evaluation du système

Afin d'évaluer le banc de mesure mis en place, une caractérisation du stress hydrique des plantes a été réalisée en faisant des mesures répétitives sur des plantes témoins ainsi que sur d'autres plantes stressées. Deux régimes hydriques ont été préconisés : alimentation hydrique normale correspondant à une croissance régulière et irrigation réduite.

Des séries d'acquisition sur les deux lots de végétaux ont été réalisées avec deux résolutions spectrales (40 nm pour la gamme spectrale entre 3,9 et 4,7 μm et 50 nm pour 7,5 et 11 μm) pour un total de 91 longueurs d'onde pour chaque feuille mesurée suivant 11 jours d'expérimentation. Huit heures sont nécessaires pour une seule campagne de mesures.

À partir des images infrarouges acquises, les spectres correspondant à chaque type de plantes ont été extraits. Ces spectres ont été stockés par la suite dans une base de données pour un traitement automatique. Nous étions limités par la quantité de données réduite dans les deux gammes spectrales due à la durée des mesures.

La base de données a été traitée, afin de séparer les plantes témoins et stressées [10]. Les résultats ont montré la possibilité de séparer les deux catégories des plantes à partir du 6^{ème} jour de l'expérimentation.

5. Synthèse des contraintes du système et type de bruit

Le système présentait certains défauts visibles dans les images acquises, tels que la non-uniformité de l'éclairage due au phénomène de speckle, l'instabilité du pointage du laser et les sources de bruit liées aux caractéristiques propres du détecteur utilisé.

Pour remédier à ces défauts, des solutions ont été proposées. Une sous-image rectangulaire commune à toutes les longueurs d'onde a été choisie, ce qui permet de sélectionner l'ensemble de la zone de mesure. Sur cette zone, une moyenne locale a été effectuée afin de réduire l'effet du speckle et atténuer la contribution des différentes sources de bruit.

La présence du speckle dans l'image influence la forme du signal, ce qui nécessite une étude approfondie pour proposer des méthodes de réduction de celui-ci. L'objectif est d'extraire le

signal utile pixel par pixel au lieu de réaliser une moyenne spatiale sur la zone de mesure (spectroscopie).

L'instabilité de l'éclairage, due aux variations du pointage du laser et de l'intensité lumineuse, entraîne des mesures non comparables d'une journée à l'autre. Dans notre étude précédente, l'acquisition de la réponse spectrale de la référence et celle de la plante ont été effectuées à des moments différents.

Bien que d'autres bruits puissent persister dans nos mesures, tels que :

- le bruit de fond, lorsque le capteur collecte un signal même en l'absence d'éclairage, et lors de la soustraction de deux images, un écart-type qui reste négligeable ($\sim 0,1$ % du signal local).
- le bruit photonique, qui est de nature quantique de la lumière. Étant donné que le speckle présente des ondulations de 30 à 50 % du signal local, le bruit photonique reste masqué dans le bruit de fond et dans le bruit du speckle. Cela reste à quantifier lorsque nous atteignons la limite de l'éclairage et éliminons les autres bruits.
- le bruit électronique, qui est induit par les composants électroniques du capteur sur lesquels nous ne pouvons pas agir significativement.

Dans ce travail de thèse, nous allons nous concentrer sur les bruits prédominants dans la mesure afin d'extraire le taux de réflectance pixel par pixel.

6. Conclusion et motivation de la thèse

Dans ce chapitre, nous avons établi le contexte et défini les concepts nécessaires pour comprendre le principe de l'imagerie hyperspectrale active à partir d'une étude de la bibliographie.

Nous avons ensuite présenté les domaines d'application de l'IHS. Nous nous concentrons toutefois sur le domaine de l'agrophotonique en raison de notre collaboration avec le Centre Mondial de l'Innovation Roullier (CMI).

Le CMI groupe Roullier à Saint-Malo est un centre de recherche et développement des solutions agronomiques de haute technicité pour répondre aux besoins des cultures et des animaux sur tous les continents, dans le respect de l'environnement (<https://www.roullier.com>).

Dans ce chapitre, nous avons examiné les différents types de stress biotiques et abiotiques liés à la végétation et leur impact sur la réduction du rendement des cultures végétales.

Un système de détection rapide et fiable est essentiel pour détecter les dommages de manière précoce, avant qu'ils ne deviennent pas irréversibles. De nombreuses études ont montré que l'imagerie hyperspectrale est un outil de diagnostic efficace pour les plantes.

Ces études ont montré leur efficacité pour caractériser les échantillons végétaux dans les domaines visibles et proche infrarouge. Cependant, leur utilisation dans le domaine moyen infrarouge est limitée en raison de la complexité des mesures et de la disponibilité limitée des équipements adéquats.

Aujourd'hui, des sources de lumière monochromatiques opérant dans cette région spectrale sont développées et commercialisées par des fournisseurs d'équipement optique. Ce qui nous permet

de concevoir et de mettre en œuvre un système IHS alimenté par une source artificielle pour répondre au domaine infrarouge moyen.

Ce système sera utilisé comme outil de diagnostic pour caractériser les échantillons. Cet objectif a été accompli grâce à une étude précédente. Une étude approfondie a été lancée pour concevoir l'architecture du système avec les composants nécessaires à sa réalisation.

Pour évaluer notre système, une expérience de 11 jours a été menée pour détecter le stress hydrique chez les tournesols dans la région spectrale infrarouge moyen, de manière précoce avant tout dommage irréversible.

Cependant, malgré le potentiel élevé de l'IHS, il existe de nombreux défis à surmonter pour son utilisation répandue en agriculture. Le coût élevé des instruments mobiles et de grande taille est un frein pour leur utilisation courante. Le traitement et l'interprétation des grandes quantités de données requièrent des compétences en informatique.

En outre, l'étendue des variations techniques et des erreurs dans les ensembles de données n'est pas encore totalement comprise. Par exemple, l'uniformité de l'éclairage peut être affectée par le phénomène de speckle qui peut causer des distorsions dans les images.

De plus, la source de lumière (angle, intensité) et l'objet (forme, taille, angle) peuvent également influencer les données collectées. En plus le déplacement du faisceau laser présent lors du balayage spectral.

Des approches doivent être développées pour comprendre les erreurs potentielles induites par ces artefacts et trouver des solutions pour les corriger.

L'objectif de cette thèse est de comprendre ces artefacts déjà observés dans nos mesures précédentes, de les quantifier et de proposer des méthodes permettant de les réduire. Cela contribuera à améliorer les performances de notre système, en particulier en termes de précision pour la mesure du taux de réflectance.

Dans le chapitre 2, nous examinons en détail l'état de l'art en ce qui concerne le speckle, un phénomène fréquent dans les images obtenues dans ce type de système d'IHS. Nous présentons les différentes méthodes de réduction du speckle, qui ont été développées pour améliorer la qualité des images. Ainsi, les méthodes de réduction du speckle varient en fonction de la technique d'imagerie utilisée et peuvent inclure l'utilisation de filtres, la combinaison de plusieurs images, et l'application d'algorithmes. Nous examinons les avantages et les inconvénients de chaque méthode. Finalement, nous présentons quelle méthode nous avons choisie d'implémenter dans notre système, ainsi que les raisons de ce choix, et la caractérisation de la réduction du speckle.

II. Etat de l'art sur speckle et les techniques de réduction

Le but de cette thèse est de mettre en place les approches méthodologiques pour notre système d'imagerie précédemment mis en place et de quantifier l'extraction de mesure définie par le taux de réflectance.

Dans ce chapitre, je détaille le premier artefact physique, le « speckle », en exposant ses propriétés statistiques ainsi que ses effets préjudiciables sur les systèmes d'imagerie. Je présente également les méthodes de réduction couramment utilisées ainsi que les filtres numériques documentés dans la littérature. Des approches d'acquisition, de traitement et de calcul sont essentielles pour quantifier cet artefact.

La distribution d'intensité présente un aspect granulaire. Sa présence constitue un problème dans les applications de projection laser et d'imagerie laser. Son aspect présente une dégradation de la qualité de l'image, ainsi que l'observateur ressent une fatigue excessive lorsqu'il regarde une image pleine de speckle sur de longues périodes [102], [103].

L'utilisation des lasers, comme source d'éclairage, dans les systèmes d'imagerie implique une illumination monochromatique et cohérente, ce qui favorise la création du speckle. Ce dernier observé dans les images acquises dépend de la source d'éclairage cohérente utilisée, du milieu éclairé et du plan de l'image [104].

1. Origines du speckle

Le speckle est un motif d'interférences produit par la lumière réfléchiée ou diffusée par différentes parties de la surface éclairée. Si la surface est rugueuse, qui présente des variations de hauteur de la surface supérieures à la longueur d'onde de la lumière laser utilisée, la lumière provenant de différentes parties de la surface parcourt des chemins optiques de longueurs différentes pour atteindre le plan de l'image [101].

L'intensité résultante en un point donné de l'image est déterminée par l'addition algébrique de toutes les amplitudes des ondes arrivant en ce point. Si l'amplitude résultante est nulle, parce que toutes les ondes individuelles s'annulent, une tache sombre est observée au point ; si toutes les ondes arrivent au point en phase, un maximum d'intensité est observé. Ce qui présente un aspect granulaire [105].

L'interaction entre un faisceau incident et une surface rugueuse induit des ondes diffusées. Ces dernières présentent des amplitudes et des phases. Les ondes diffusées sont supposées avoir les propriétés statistiques suivantes :

- (i) l'amplitude et la phase de chaque onde sont statistiquement indépendantes l'une de l'autre,
- (ii) les phases de ces ondes sont uniformément distribuées entre $-\pi$ et π [105].

Si l'on considère le speckle produit par une surface rugueuse (figure 13), en chaque point de la surface ou du volume du milieu, la lumière incidente diffuse dans toutes les directions. En un point M du plan d'observation, des ondelettes élémentaires provenant de chaque point de l'échantillon interfèrent entre elles. L'amplitude résultante au point M est la somme cohérente de ces ondelettes ayant chacune un module et une phase.

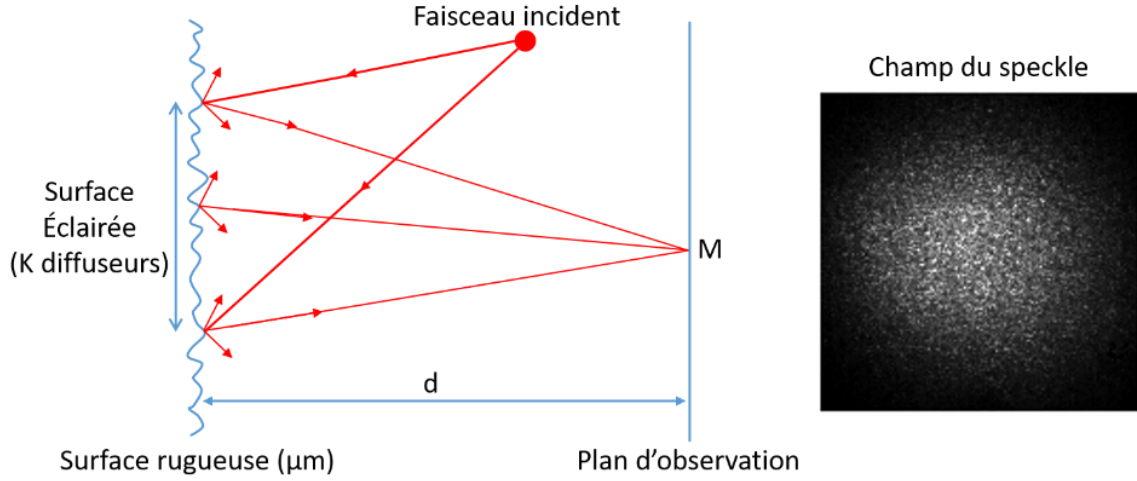


Figure 13 : Speckle produit par réflexion par une surface rugueuse. M est un point du plan d'observation.

L'amplitude du champ résultant en un point d'observation M , en prenant compte de la contribution de la phase φ_k et l'amplitude a_k correspondant au $k^{\text{ième}}$ diffuseur, s'exprime comme le suivant :

$$A(M) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N a_k \exp(i\varphi_k) \quad (8)$$

Où N est le nombre total de diffusions d'ondes secondaires sur la zone éclairée d'une surface.

Les parties réelle et imaginaire de $A(M)$ peuvent être exprimées de la façon suivante :

$$A^r = \text{Re}(A) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \cos(\varphi_k) \quad (9)$$

$$A^i = \text{Im}(A) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \sin(\varphi_k) \quad (10)$$

Le speckle statique présente un motif stable si tous ces éléments sont statiques. En revanche, un changement temporel de l'un de ces éléments entraîne une modification du motif, et on l'appelle speckle dynamique [106].

Or dans les systèmes d'imagerie, nous rappelons la notion du « temps d'exposition » d'un détecteur ou une caméra. Ce temps est le temps d'intégration des photons, qui atteignent la surface du détecteur, et qui seront, par la suite, intégrés dans l'acquisition [107].

Si le speckle change pendant ce temps d'intégration, les éléments de la scène se déplacent et apparaissent flous dans l'image [108]. Un exemple d'éléments en mouvement sont les globules rouges, qui circulent dans un vaisseau sanguin [109].

L'étude du speckle est répartie en deux catégories par les chercheurs ; ceux qui l'utilisent comme étant une source d'informations en exploitant ses paramètres par un suivi temporel [110] et ceux qui le considèrent comme un bruit, qui influe sur l'information acquise par le

résultat [111]. Les principaux paramètres qui caractérisent le speckle sont sa taille de grain et le contraste spatial de la distribution d'intensité du speckle.

La figure 14 montre trois photos, la première (a) d'un objet rugueux éclairé par une lumière incohérente, la seconde (b) du même objet éclairé par la lumière d'un laser, et la troisième (c) une sous-région de l'image (b) montrant la structure plus en détail. Le speckle a clairement un effet profond sur la capacité de l'observateur humain à extraire les informations contenues dans l'image.

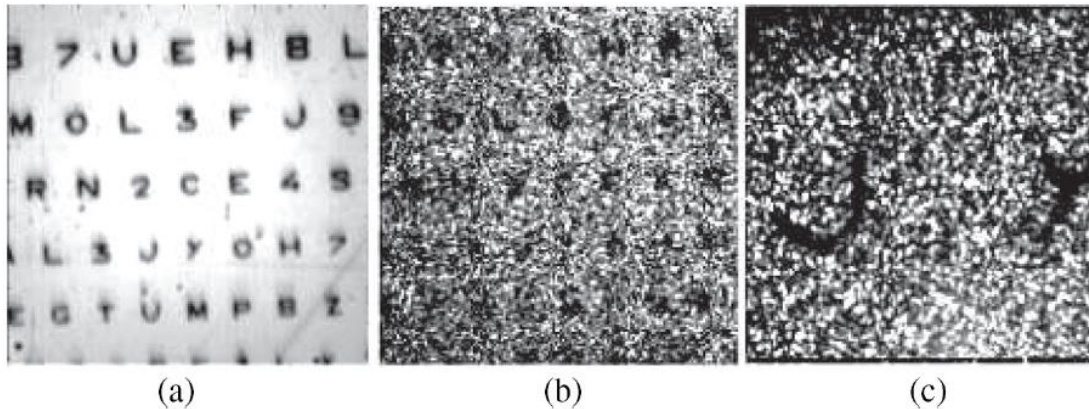


Figure 14 : Images d'un objet rugueux : (a) image prise avec une lumière incohérente ; (b) image prise avec une lumière cohérente ; et (c) une partie agrandie de l'image montrée en (b) [Pierre Chavel et Thierry Avignon, Institut Optique].

2. Propriétés du speckle

Lorsqu'on observe une image présentant un speckle d'un éclairage laser, il y a plusieurs paramètres que l'on peut en tirer :

1. **taille de grain** : la taille des grains de speckle peut être mesurée en utilisant des techniques de traitement d'image en comparant avec les équations pour estimer sa taille dans les deux directions (X et Y), telles que l'analyse de la taille et de la forme des grains [112]. Ces techniques sont détaillées dans la partie 2.1.
2. **contraste** : le contraste est un paramètre important d'une image de speckle, car il peut quantifier les contributions du speckle, de la partie éclairée par le laser, sur l'image et fournir des informations sur la rugosité de surface ou la taille des particules. Le contraste peut être mesuré en utilisant des méthodes de traitement d'image qui comparent la variation des niveaux de gris dans des régions d'intérêt de l'image [113].
3. **variations temporelles** : les variations temporelles du speckle peuvent fournir des informations sur le mouvement et la dynamique des particules ou de la surface. La variation temporelle peut être mesurée en prenant plusieurs images de speckle à des intervalles de temps différents [110].

En utilisant les paramètres décrits précédemment, il est possible de caractériser le speckle présent dans des images contenant une zone éclairée par un faisceau laser.

Toutefois, les variations temporelles sont particulièrement intéressantes à caractériser dans le cas d'échantillons présentant des mouvements, par exemple pour des études d'analyse de corrélation de la dynamique temporelle de la perfusion sanguine [114].

En revanche, étant donné que nous travaillons avec un laser accordable et que nous appliquons un balayage spectral, il est important de caractériser le speckle localement et spatialement des images acquises pour différentes longueurs d'onde.

Les paramètres, qui dépendent de la longueur d'onde, et qui permettent de caractériser le speckle dans notre cas, sont la taille des grains et le contraste spatial.

Dans ce qui suit, nous détaillons ces paramètres et leurs approches de calcul.

2.1. Taille de grain du speckle

Ce paramètre dépend de la longueur d'onde utilisée et de la géométrie de l'acquisition des images du champ de speckle.

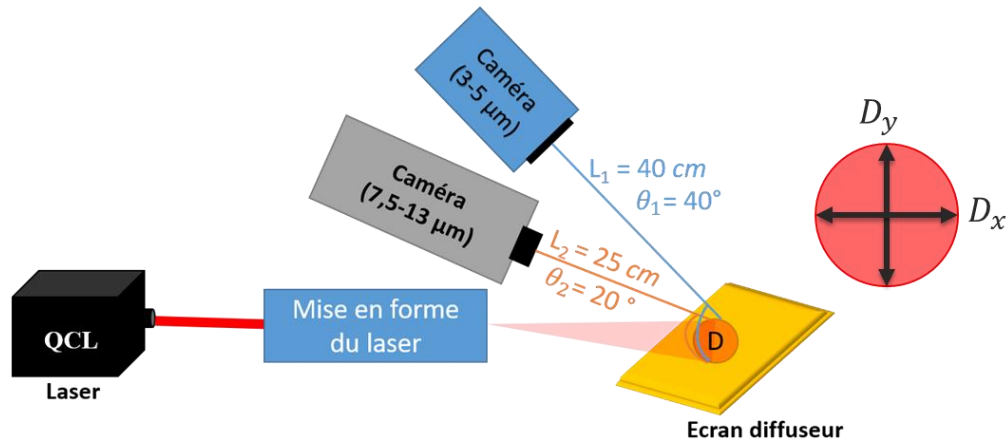


Figure 15 : Illustration simpliste du montage optique pour le calcul de la taille de grain de speckle.

L'illustration simpliste, située dans la figure 15, présente notre banc optique. La source d'éclairage émet le faisceau laser et illumine l'échantillon, qui est l'écran diffuseur. Les caméras matricielles, à leur tour, collectent le flux diffusé dans des angles et des distances d'observation distincts.

Avec :

- θ : angle entre le plan d'observation et le plan d'incidence ($\theta_1=40^\circ$, $\theta_2=20^\circ$).
- L : distance entre le plan d'observation et le milieu diffusant ($L_1=40\text{ cm}$, $L_2=25\text{ cm}$).

Li et Chiang [116] ont démontré dans leur travail, que la taille des grains de speckle 2D (en x et en y) est estimée par les relations suivantes :

$$dx = 1,22 \frac{\lambda L}{D_x \cos \theta} \quad (11)$$

$$dy = 1,22 \frac{\lambda L}{D_y} \quad (12)$$

Avec :

- λ : longueur d'onde du rayonnement incident (Entre 3-5 μm , et 7,5-13 μm).

- D : diamètre de la tache de diffusion, dépend de la longueur d'onde.

La taille des grains de speckle dans un système de diffusion de faisceau laser est directement proportionnelle à la longueur d'onde, comme le démontrent les formules 11 et 12. Cette relation découle de la nature ondulatoire de la lumière et a un impact sur la résolution du système.

La distance L entre le plan d'observation et le milieu diffusant est un paramètre essentiel dans l'équation de calcul de la taille moyenne des grains. Cependant, dans notre cas, cette distance reste constante pour chaque caméra, car nous ne déplaçons pas le système d'observation. Cela garantit que la distance entre l'échantillon et la caméra respecte la distance focale.

Nous remarquons que la taille de grain suivant la direction x est influencée par l'angle d'observation suivant l'équation 11.

Le laser éclaire un diffuseur sur une surface de diamètre D suivant une large gamme spectrale.

En supposant que le diamètre d'éclairage ne varie pas avec le balayage spectral, nous obtenons les résultats suivants dans le tableau 5.

Tableau 5 : Taille des grains de speckle.

Taille de grain λ (μm)	dx (μm)	dy (μm)	dx (pixel)	dy (pixel)
3,9	49,6	38,1	2	2
4,5	71,6	62,7	3	3
4,7	74,8	65,5	3	3
7,5	48,7	45,7	3	3
8	50,8	48,8	3	3
11	71,4	67,1	5	4

Nous remarquons depuis ce tableau, que la taille de grain de speckle dans la gamme spectrale entre 3,9 et 4,7 μm varie entre 2 à 3 pixels utilisant la caméra SC5000, alors qu'elle varie de 3 à 5 pixels dans la région spectrale allant de 7,5 à 11 μm utilisant la caméra A65.

Cette estimation prend en compte la taille des pixels dans chaque détecteur, c'est pourquoi nous nous retrouvons avec des grains de taille similaire à celle d'un pixel. La taille de pixel pour la caméra SC5000 est de 30 μm et pour la caméra A65, elle est de 17 μm .

Ceci nous donne l'estimation de la taille de grain dans les directions X et Y . La mesure de la taille de grain se fait en plus depuis les images acquises. La méthode est décrite dans les références [117], [118].

Calcul pratique de la taille des grains de speckle

D'après le calcul pratique des images acquises par notre système, nous pouvons extraire la taille de grain de speckle. La taille de grain de speckle est calculée à partir de l'équation d'autocovariance normalisée :

$$C_I(x, y) = \frac{R_I(x, y) - \langle I(x, y) \rangle^2}{\langle I(x, y)^2 \rangle - \langle I(x, y) \rangle^2} \quad (13)$$

Où R_I représente la fonction d'autocorrélation d'intensité. Elle est calculée grâce à la densité spectrale de puissance (DSP) de $I(x,y)$ la distribution spatiale de l'intensité du speckle dans l'image.

Nous présentons les images, de la figure 16, qui sont acquises à $4\text{ }\mu\text{m}$ et à $8\text{ }\mu\text{m}$ avec la caméra SC5000 et la caméra A65 respectivement. Ces images sont soustraites de leur fond thermique, afin d'isoler le flux laser. Elles présentent un exemple de calcul pour la suite du manuscrit.

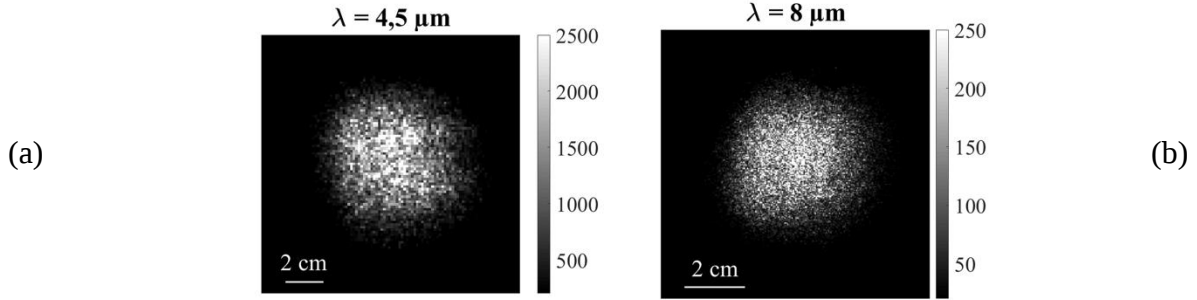


Figure 16 : Image laser acquise avec SC5000 à $4,5\text{ }\mu\text{m}$ (a) et A65 à $8\text{ }\mu\text{m}$ (b).

Depuis ces images, nous calculons la densité spectrale de puissance (DSP). Cette dernière est définie par le module de la transformée de Fourier au carré de l'image d'intensité $I(x, y)$:

$$DSP = |TF(I(x, y))|^2 \quad (14)$$

Les régions de basses fréquences apparaissent au centre de l'image, tandis que les régions de hautes fréquences se trouvent aux coins de l'image de la DSP (voir figure 17). Le pixel central est défini spatialement sur (x_{centre}, y_{centre}) .

La fonction d'autocorrélation R_I est définie par une coupe horizontale au centre de l'image de la DSP [117]. Ce qui donne $R_I(x, y_{centre})$ représentée dans la figure 18. Le minimum de $R_I(x, y_{centre})$ correspond à $\langle I(x, y)^2 \rangle$ et sa valeur maximale à $\langle I(x, y) \rangle^2$.

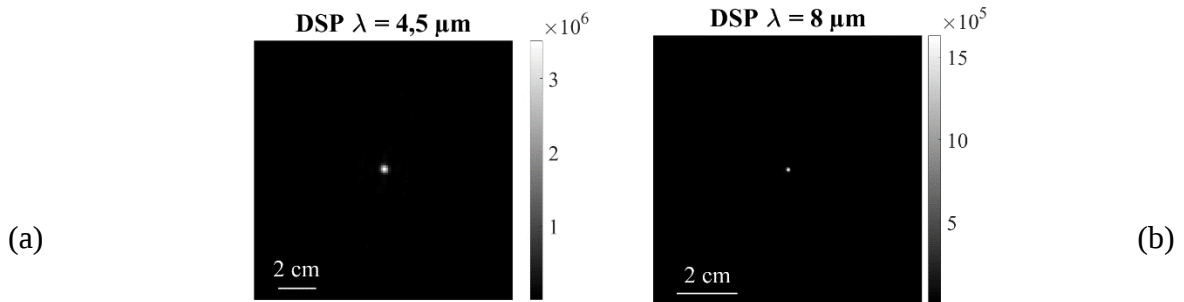


Figure 17 : La densité spectrale de puissance (DSP) pour $4,5\text{ }\mu\text{m}$ (a) et $8\text{ }\mu\text{m}$ (b).

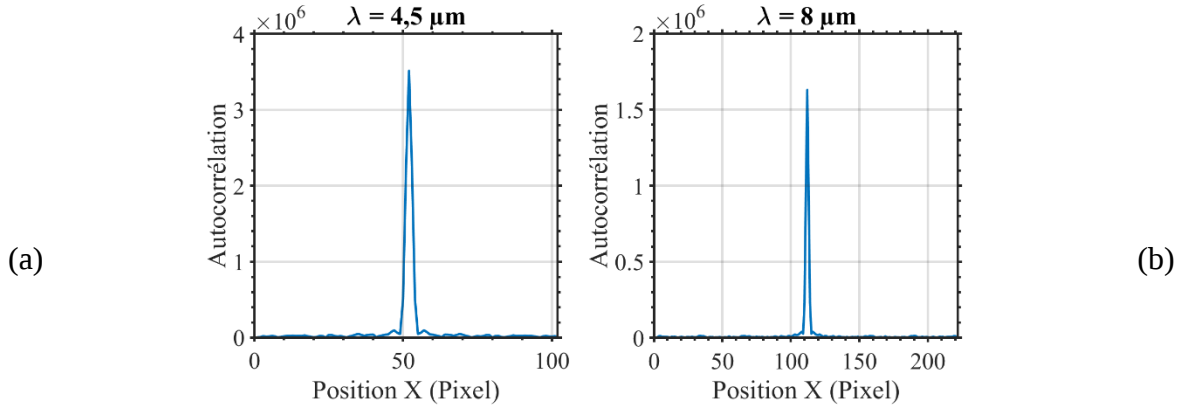


Figure 18 : Autocorrélation $R_I(x, 0)$; coupe centrale horizontale

En appliquant la normalisation, depuis l'équation (13), nous obtenons l'autocovariance normalisée qui est présentée dans la figure 19.

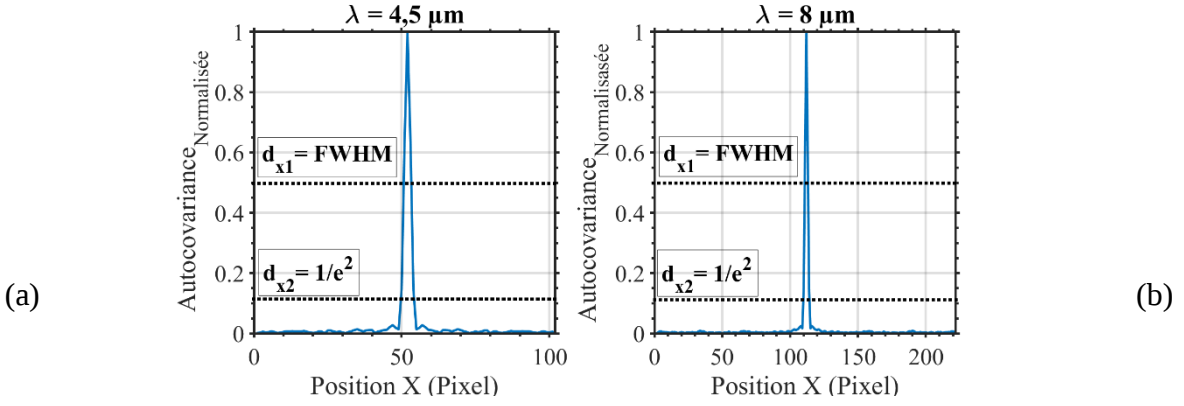


Figure 19 : Autocovariance normalisée

d_{x1} : la largeur à mi-hauteur et d_{x2} : la largeur à $1/e^2$

La largeur à mi-hauteur (FWHM) de l'autocovariance normalisée correspond à la taille de grain horizontale de speckle dx . Le calcul de la taille de grain verticale dy s'effectue de la même manière en prenant une coupe centrale verticale de la fonction d'autocovariance normalisée.

Les résultats de la taille de grain suivant X et Y sont résumés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Taille de grain d'après le calcul pratique depuis les images acquises.

Détecteurs - λ (μm)	Taille de grain (pixel)			
	dx_1	dy_1	dx_2	dy_2
Caméra SC5000 (256x320 pixels) – 4,5 μm	2,4	2,47	4,1	4,2
Caméra A65 (512x640 pixels) – 8 μm	2,4	2,51	4,08	4,26

Nous remarquons depuis le tableau 6, que la taille de grain de speckle à largeur mi-hauteur est de l'ordre de 3 pixels pour l'image laser acquise avec la caméra SC5000 à 4,5 μm . Aussi la taille de grain de speckle est de l'ordre 3 pixels pour l'image laser acquise avec la caméra A65 à 8 μm .

Nous remarquons aussi, que la taille de grain de speckle à largeur $1/e^2$ est de l'ordre de 4 pixels pour l'image laser acquise avec la caméra SC5000 à 4,5 μm . La taille de grain de speckle est également de l'ordre 5 pixels pour l'image laser acquise avec la caméra A65 à 8 μm .

L'extraction de la taille de grain à la largeur $1/e^2$ de la fonction d'autocovariance normalisée est un plus. Ceci est fait pour démontrer, par la suite, dans la section 4.2 la réduction du speckle par filtre numérique en appliquant un masque de la taille du grain de speckle.

Nous pouvons conclure de cette partie, que l'extraction de la taille de grain de speckle par l'approche pratique depuis les images lasers est du même ordre que les équations présentées ci-dessus [11-12] et extraites de Li et Chiang [116].

2.2. Contraste spatial du speckle

Le paramètre de quantification du speckle est le contraste. Ce paramètre vérifie la dispersion des valeurs d'intensité indiquée par les pixels de la caméra pour une zone éclairée.

La valeur d'un contraste spatial inférieur à 0,05 rendra le phénomène de speckle invisible pour l'œil humain dans les images [119].

Le contraste spatial du speckle K est typiquement défini comme le rapport entre l'écart-type et l'intensité moyenne des intensités des pixels dans un voisinage prédéfini autour d'un pixel central. Ce paramètre est pertinent pour un milieu homogène [120].

$$K = \frac{\sigma}{\bar{I}} \quad (15)$$

Or ce calcul est valable pour une zone homogène. Cette zone homogène peut être définie par une même composition matérielle sous un éclairage homogène.

Dans notre cas, puisqu'on travaille avec un faisceau laser de profil gaussien (d'après le fournisseur), une étape de normalisation est essentielle pour égaliser les niveaux d'intensités pour pouvoir calculer ce paramètre.

Interpolation gaussienne 2D

Notre illumination laser présente un profil gaussien. Pour cela, nous interpolons l'éclairage à son fit gaussien 2D adéquat, ceci est sous la forme de l'équation suivante :

$$IG(x, y) = A \times \exp\left(-\left(\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right)\right) \quad (16)$$

Je définis « IG » en tant qu'interpolation gaussienne pour la suite du manuscrit. Les paramètres de cette équation sont :

- A est l'amplitude de l'éclairage
- σ_x, σ_y vérifient l'étalement de l'éclairage en x et en y
- μ_x et μ_y vérifient les coordonnées du centre de l'éclairage.

Les images de la figure 20.a.b. présentent l'interpolation gaussienne 2D adéquate aux images de la figure 16 à un éclairage laser de 4,5 μm et 8 μm successivement.

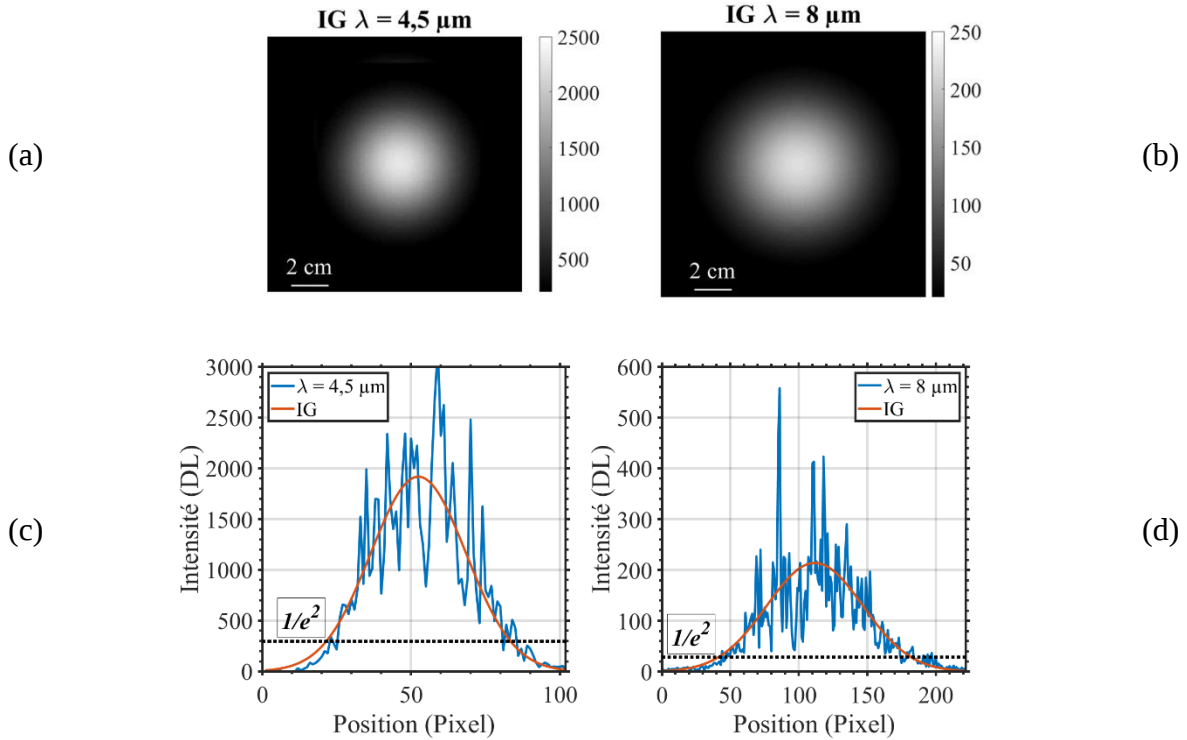


Figure 20 : L'interpolation gaussienne 2D à 4,5 μm (a) et à 8 μm (b). Les graphes présentent le profil de l'intensité extraites d'une même coupe de l'image du flux laser isolé (figure 16.a.b.) et du flux interpolé à 4,5 μm (c) et à 8 μm (d).

Les graphes dans la figure 20.c.d. présentent une même coupe horizontale centrale pour visualiser les allures des distributions d'intensité des figure 16.a.b. et figure 20.a.b. Ceci est fait pour comparer l'allure du signal soustrait de son fond thermique avec l'allure de son interpolation gaussienne adéquate.

Nous remarquons que dans les images de figure 20.a.b, des régions non significatives dans notre calcul se présentent par des pixels de couleur noire. Nous remarquons aussi l'aspect granulaire du speckle fluctue tout autour du signal interpolé dans les graphes (figure 20.c.d).

Par la suite, pour procéder au calcul du contraste spatial, une zone d'intérêt doit être définie. Cette dernière sera caractérisée par l'étalement effectif de l'éclairage laser de profil gaussien.

Cette zone d'intérêt est délimitée par les pixels, qui présentent des valeurs d'intensité supérieures à 13% ($1/e^2$) de la valeur maximale de l'interpolation gaussienne 2D. L'aire constituée vérifie les conditions de l'équation (17) :

$$Aire_{effectif} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} IG(x,y) dx dy > \frac{1}{e^2} \times A \quad (17)$$

Par la suite, afin d'égaliser l'intensité, nous normalisons l'image brute (figure 16.a.b.) par l'image de son interpolation gaussienne (figure 20.a.b.) suivant l'équation (18).

Les images de l'intensité normalisée pixel par pixel sont représentées dans les images de la figure 21.

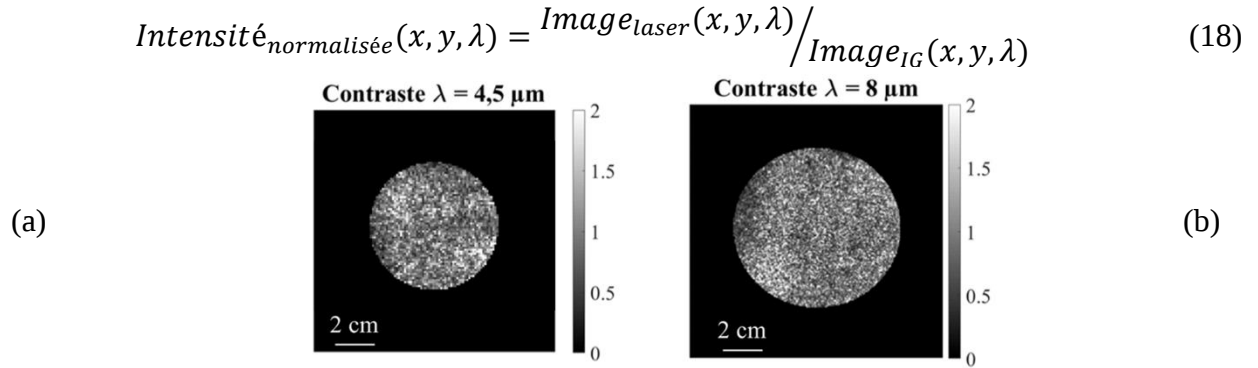


Figure 21 : La normalisation de l'éclairage par son interpolation gaussienne, suivant (a) 4,5 μm et (b) 8 μm .

Tous les pixels situés en dehors de la zone d'intérêt sont ramenés à des valeurs nulles (0).

Par la suite, le calcul du contraste spatial depuis l'équation (15) est appliqué que sur les pixels qui présentent une valeur non nulle, les résultats sont présentés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Les résultats du contraste calculé.

Longueur d'onde	$\lambda = 4,5 \mu\text{m}$	$\lambda = 8 \mu\text{m}$
Contraste	0,41	0,47

Dans cette partie, la méthode du calcul du contraste spatial du speckle est définie. Le contraste sera calculé par cette méthode pour la suite du manuscrit.

3. Critères d'évaluation de la compensation gaussienne

L'interpolation gaussienne définit l'éclairage dans un cas idéal où la diffusion de la lumière sur l'échantillon ne présentait pas de speckle. Cette interpolation définit la compensation suite aux dégradations de la diffusion dues au speckle.

Les paramètres d'évaluation de l'interpolation appliquée à l'éclairage mesuré sont :

- le coefficient de détermination (R^2).
- l'erreur quadratique moyenne ($RMSE$).

3.1. Coefficient de détermination (R^2)

Cette statistique mesure l'adéquation entre l'image du modèle interpolé (IG) et les données originales observées (Im). Ces images ont une taille de $M \times N$ pixels.

Les étapes, pour calculer cette statistique, sont les suivantes :

En premier lieu, nous commençons à quantifier la dispersion totale des données brutes.

Ce paramètre est connu en anglais « total sum of squares » (SST).

$$SST = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Im_{(i,j)} - \overline{Im})^2 \quad (19)$$

$$\text{Avec : } \overline{Im} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Im_{(i,j)} \quad (20)$$

En second lieu, nous calculons la dispersion des données du modèle par la somme des distances au carré entre chaque valeur prédite par le modèle et la moyenne des réponses ($\overline{Im}$).

On appelle ce paramètre en anglais « sum of squares due to regression » (SSR).

$$SSR = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (IG_{(i,j)} - \overline{Im})^2 \quad (21)$$

Ensuite, il nous reste à calculer la part de dispersion résiduelle. Elle est mesurée par la somme des distances au carré entre chaque point de l'image (Im) et le point correspondant du modèle (IG).

On appelle ce paramètre en anglais « error sum of squares » (ESS).

$$SSE = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Im_{(i,j)} - IG_{(i,j)})^2 \quad (22)$$

$$\text{On peut alors écrire : } SST = SSR + SSE \quad (23)$$

En dernier lieu, le coefficient de détermination R^2 est défini par la relation suivante :

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (24)$$

Remarque, on peut aussi l'écrire :

$$R^2 = \frac{SST - SSE}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (25)$$

Les cas suivant se présentent :

- Si le R^2 vaut zéro, cela signifie que le modèle filtré détermine 0% de la distribution des données mesurées.
- Si le R^2 vaut 1, le modèle interpolé détermine 100% de la distribution des données.
- Si la valeur de R^2 est comprise entre 0 et 1.
 - Plus le R^2 se rapproche de 0, plus les données se dispersent du modèle d'interpolation.
 - Au contraire, plus le R^2 tend vers 1, plus les données se resserrent autour du modèle.

3.2. Erreur quadratique moyenne (RMSE)

Il s'agit de l'erreur quadratique moyenne (MSE). Elle mesure la différence moyenne au carré entre l'images originale et l'image interpolée, où l'image originale (Im) et l'image interpolée (IG) ont une taille de $M \times N$ pixels. Par conséquent, la RMSE est la racine de la MSE donnée dans les équations suivantes.

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Im_{(i,j)} - IG_{(i,j)})^2 = \frac{SSE}{MN} \quad (26)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (27)$$

Le tableau 8 présente les critères d'évaluation des images de la figure 20 et la figure 16 pour quantifier l'interpolation suivant les différentes longueurs d'onde.

Ce tableau présente les résultats obtenus en utilisant un diffuseur stable sans rotation. Étant donnée l'absence d'une image de référence sans diffuseur, nous considérerons ces résultats comme notre point de départ.

Tableau 8 : Les critères d'évaluation de l'interpolation gaussienne.

<i>Longueur d'onde</i>	<i>Contraste</i>	<i>R² (%)</i>	<i>RMSE (%)</i>
<i>4,5 μm</i>	0,41	82	10
<i>8 μm</i>	0,47	76	12

4. Procédures de réduction du speckle

Dans une première partie, cette section résume de nombreuses applications et techniques expérimentales polluées par le speckle. Ensuite, nous détaillons les procédures de réduction de ce phénomène.

4.1. Motivation de la réduction de speckle

Les systèmes d'imagerie actifs tels l'imagerie radar, l'imagerie laser et l'imagerie sonar, etc. se sont avérés être de puissants outils pour leur capacité de caractériser des objets et continuent de se développer [121]–[123]. Cependant, les images obtenues par ces systèmes sont sévèrement dégradées.

Notons que le bruit technique et les perturbations environnementales sont additifs par nature, alors une simple soustraction peut éliminer leurs effets. Alors que le bruit de speckle est multiplicatif. Les bruits multiplicatifs sont plus difficiles à éliminer que les bruits additifs, car l'intensité du bruit varie en fonction de l'intensité de l'image [124]. Tous ces bruits peuvent entraîner une ambiguïté supplémentaire dans les mesures effectuées.

Par conséquent, une étape de débruitage est toujours nécessaire avant le traitement des données. Le débruitage du speckle est l'étape de prétraitement avant l'obtention de la mesure physique associée.

Les approches, pour réduire le speckle, sont classées dans les deux groupes suivants :

- algorithme de réduction basés sur le traitement de l'image,
- procédure de réduction lors de l'acquisition des images.

4.2. Algorithmes de réduction

Dans le traitement des images, la réduction du speckle est considérée comme une étape du prétraitement. Le filtrage est une approche visant à éliminer d'une image les informations inutiles afin que l'image soit plus applicable à l'étape suivante du raffinement de l'image [125].

Pour réduire le bruit de speckle des images, de nombreux filtres ont été utilisés jusqu'à présent. Quelques exemples de tels filtres sont la moyenne, la médiane.

Ils utilisent la technique de la fenêtre (sous-matrice) glissante pour éliminer le bruit de speckle. La taille de cette fenêtre varie suivant cette formule : $(2n + 1)$ ou « n » présente le nombre de pixel.

Les différents filtres sont résumés ci-dessous.

Le filtre moyen

Ce filtre est connu comme un filtre linéaire, il est utilisé pour éliminer le bruit de speckle qui englobe la valeur du niveau de gris d'une sous-matrice carrée.

Le pixel (i, j) bruyant central, d'une fenêtre de $n \times n$ pixels, est remplacé par la valeur moyenne des pixels voisins :

$$\hat{R}(i, j) = \frac{1}{n \times n} \sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-n}^{j+n} I(k, l) \quad (28)$$

La moyenne est un estimé de la réflectivité d'une zone dont les pixels inclus dans la fenêtre appartiennent à une même population, c'est-à-dire zone homogène.

Cependant, dans le cas où la fenêtre couvre deux régions distinctes, les pixels vont appartenir à deux populations différentes.

La valeur moyenne calculée, un estimé de la réflectivité moyenne des deux régions, rend les contours flous. Cette méthode est la moins satisfaisante pour éliminer le bruit de speckle, car elle entraîne une perte de détails.

Le filtre médian

Dans ce filtre, le pixel central est remplacé par la valeur médiane de tous les pixels.

La valeur médiane est obtenue en organisant d'abord toutes les valeurs de pixel par ordre décroissant ou croissant, puis en changeant le pixel obtenu par la valeur de pixel centrale.

L'avantage est qu'il préserve les bords, mais il peut les atténuer, si la fenêtre définie ne contient pas suffisamment de pixels la valeur médiane peut être éloignée des valeurs des pixels des bords qui entraîne en plus une perte d'information.

Filtrage fréquentiel spatial en fonction de la taille du grain de speckle

La méthode de filtrage fréquentiel spatial est une technique efficace pour réduire le speckle présent dans les images de diffusion laser et bien utilisée dans la littérature [126]. Cette méthode est connue en anglais sous le nom de « Low-pass (LP) filter ».

Elle se base sur la transformation de Fourier rapide (FFT) pour les différentes fréquences spatiales. Le filtrage fréquentiel spatial se concentre sur l'atténuation des fréquences associées au speckle [127].

Pour ce faire, un masque est appliqué à l'image fréquentielle. Ce masque est choisi en fonction de la taille des grains de speckle en pixels. En effet, la taille des grains de speckle en pixels détermine la gamme de fréquences associées au speckle et, par conséquent, définit la taille optimale du masque [128].

Ce masque circulaire est présenté suivant l'équation (29), qui dépend de la taille de grain en X et Y calculée précédemment (tableau 6). Ce masque est défini par un masque binaire qui présente des valeurs interne égale à 1 et externe égale à 0.

$$Mask_{BF} = \left(\frac{(M - x_{centre})}{d_x} \right)^2 + \left(\frac{(N - y_{centre})}{d_y} \right)^2 \quad (29)$$

Les figure 22 suivantes présentent les résultats des différents filtrages utilisés avec les deux tailles de grain à $FWHM$ et $1/e^2$.

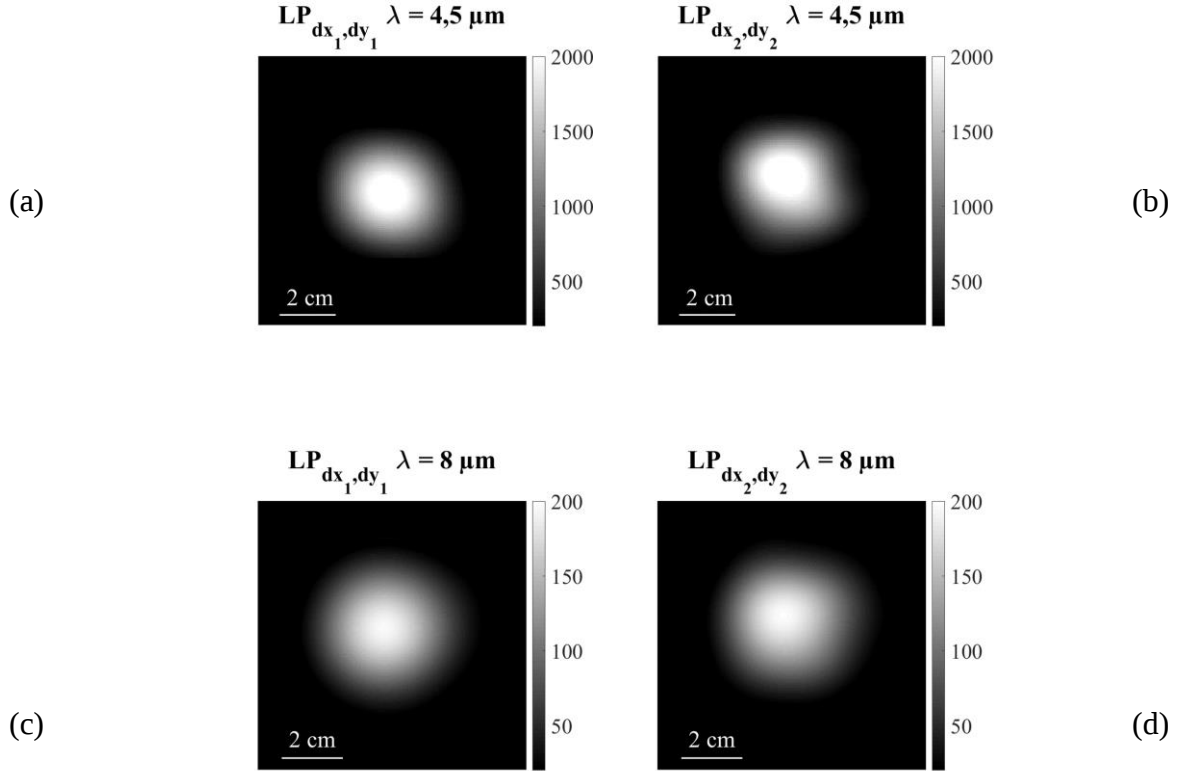


Figure 22 : Les images filtrées en LP suivant différente zone de segmentation (a.b.) suivant $4,5 \mu\text{m}$ et suivant $8 \mu\text{m}$ (c.d.).

Par la suite, en utilisant l'équation (17) nous pourrions extraire la zone effective. De cette façon, nous égalisons l'intensité de l'éclairage gaussien par l'équation (18) pour pouvoir appliquer l'équation (15) du calcul du contraste. Cette méthode sera appliquée sur toutes les méthodes de réduction. Par la suite nous calculons le contraste et les critères d'évaluation. Les résultats sont présentés dans le tableau 9.

Tableau 9 : Tableau comparatif du contraste en fonction de la technique et les critères d'évaluation.

Longueur d'onde	Technique	Contraste	R^2 (%)	RMSE (%)
4,5 μm	Brute	0,41	82	10
	LP_{FWHM}	0,037	99	2
	LP_{1/e^2}	0,73	98	3
8 μm	Brute	0,47	76	12
	LP_{FWHM}	0,029	99	2
	LP_{1/e^2}	0,04	99	2

D'après ce tableau, il est observé que la méthode de filtrage fréquentiel, qui prend en compte la taille de grain calculée à la largeur à mi-hauteur, présente la plus petite valeur de contraste spatial ($\sim 0,03$) parmi les autres techniques, ainsi que les meilleures valeurs de critères d'évaluation $R^2=99\%$ et $RMSE=2\%$.

Ce qui vérifie que l'utilisation de la taille de grain présente la taille optimale du masque pour réduire le contraste du speckle.

4.3. Méthodes optiques de suppression de speckle

Dans cette section, les procédures usuelles pour la réduction de ce phénomène sont présentées.

Ce travail est principalement axé sur la réduction du speckle dans les applications de projection avec un éclairage laser (espace libre).

Les techniques de réduction sont réparties suivant ces trois catégories dans le tableau 10 [129] :

Tableau 10 : Les paramètres de décorrélation et leur nature.

Paramètre de décorrélation	Instantanément	Séquentiel
Longueur d'onde	• Réseau de sources de différentes longueurs d'onde	• Balayage spectral rapide
Spatiale	• Source à cohérence spatiale réduite • Sources multiples éclairant des positions différentes	• Balayage du faisceau d'illumination
Angulaire	• Réseau de sources avec des angles différents en un point de l'écran	• Changement dynamique de l'angle d'éclairage • Brouillage du speckle en utilisant des diffuseurs vibrants/rotatifs

4.3.1. Décorrélation en longueur d'onde

La réduction du speckle est possible en illuminant l'échantillon par une lumière de différentes longueurs d'onde en même temps. Cette illumination génère ainsi différents motifs de speckle statistiquement indépendants qui se superposent sur l'écran de l'observateur.

Si une cible rugueuse est éclairée (à la même position et sous le même angle) par deux sources indépendantes de longueurs d'onde différentes, les deux motifs de speckle résultants seront décorrélés [31].

Il est évident que deux longueurs d'onde très similaires produiront deux motifs de speckle avec une corrélation relativement élevée et donc une faible réduction du contraste de speckle en raison de leur superposition. Si la différence de longueur d'onde augmente, les motifs de speckle résultants seront de plus en plus décorrélés et la décorrélation totale pourra être atteinte [32].

Les méthodes les plus couramment utilisées comprennent l'élargissement du spectre laser [132] ou l'utilisation de lasers à longueurs d'onde multiples [133].

Ces méthodes sont utilisées dans des systèmes de projection. Yamada [130] vérifie la dépendance de la réduction du speckle par rapport à la diversité des longueurs d'onde et la diversité angulaire. Son expérience se base à injecter deux faisceaux lasers de longueurs d'onde différentes (530-550 nm) dans une fibre optique pour un système de projection.

4.3.2. Décorrélation spatiale

La décorrélation spatiale est une technique utilisée en imagerie laser pour réduire le bruit de speckle.

Elle consiste à éclairer l'objet avec des faisceaux laser provenant de différentes directions spatiales, créant ainsi des motifs de speckle indépendants, qui peuvent être moyennés pour réduire le bruit [36].

L'éclairage multiple est une méthode de la décorrélation spatiale, qui implique l'utilisation de plusieurs sources laser éclairant l'objet à la même longueur d'onde.

Cette technique permet de générer des motifs de speckle indépendants, car chaque source laser produit des franges de diffraction avec des orientations spatiales différentes. En conséquence, les motifs de speckle produits par chaque source laser ne sont pas corrélés les uns avec les autres, ce qui peut réduire le bruit de speckle dans l'image [135].

Cependant, l'utilisation de multiples sources laser pour la décorrélation spatiale peut entraîner une dégradation de la résolution spatiale de l'image [136], car les motifs de diffraction produits par chaque source laser peuvent interférer les uns avec les autres.

Néanmoins, comparé à d'autres méthodes de décorrélation spatiale, l'éclairage multiple est considéré comme une méthode qui réduit moins la résolution spatiale [137].

Les zones de cohérence sur l'écran ne se chevauchent pas. Les taches lumineuses diffusées (rétrodiffusion) peuvent toutefois se chevaucher en raison de la diffusion diffuse dans l'écran.

La figure 23 illustre ceci. Les photons des différentes zones de cohérence dont chacun poursuit son parcours de diffusion à des positions différentes, des motifs de speckle décorrélés seront générés. Par conséquent, le contraste de speckle résultant des régions de chevauchement sera réduit.

En parlant de décorrélation spatiale dans le temps, nous supposons une source de cohérence spatiale et donc une seule zone de cohérence.

Si la zone se déplace pendant le temps d'intégration, l'observateur détectera un contraste de speckle réduit, car les motifs de speckle décorrélés se chevaucheront pour chaque point d'éclairage.

Un obstacle à une décorrélation angulaire/spatiale efficace est le « speckle memory effect ». Il se produit lorsque des perturbations, telles que des vibrations ou des changements de position, sont introduites dans le système optique pendant une période prolongée.

Lorsqu'on utilise un laser pour éclairer une surface, le speckle est créé. La position et l'intensité du speckle dépendent de la structure de la surface et de l'angle d'éclairage. En changeant l'angle

d'éclairage ou en déplaçant le faisceau laser, on peut observer que le speckle n'est pas complètement éliminé. Il y a une certaine "mémoire" du speckle, ce qui signifie que les zones qui étaient brillantes avant le changement d'éclairage ou de position du faisceau laser ont tendance à rester brillantes après le changement.

Pour surmonter le "speckle memory effect" et parvenir à une réduction efficace du speckle dans les applications de projection laser, il est nécessaire de prendre en compte ces incohérences temporelles et d'adopter des stratégies appropriées. Cela peut inclure l'utilisation de techniques de modulation temporelle pour introduire des fluctuations rapides dans l'éclairement laser, ce qui peut aider à réduire l'impact des perturbations précédentes sur le motif de speckle observé.

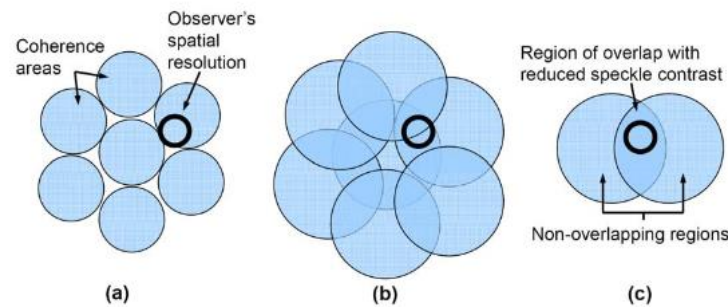


Figure 23 : Schéma (a) des zones de cohérence incidentes sur une cible, (b) des zones de cohérence rétrodiffusées avec des régions de chevauchement en raison de la diffusion diffuse, (c) du contraste de speckle réduit dans des régions de speckle [138].

L. Deng exploite cette méthode de réduction du speckle, dans le domaine visible (vert, $\lambda=520$ nm), basée sur une lentille sphérique rotative [139].

La lentille sphérique est entraînée par un moteur dont l'arbre rotatif dévie légèrement du centre de la lentille sphérique, comme le montre la ligne pointillée de la figure 24(a).

Comme le montre la figure 24(b), le faisceau de sortie est réfracté en fonction de l'emplacement et de l'angle du faisceau incident.

La figure 24 illustre les détails de la rotation, et un faisceau spécifique est tracé pour montrer la modulation du faisceau avec la rotation.

Lorsque le centre de la lentille sphérique passe par O1, O2, O3 et O4, le foyer passe par O1', O2', O3' et O4', respectivement. Cela conduit à une différence de chemin optique entre les différents faisceaux lumineux, ce qui réduit la cohérence spatiale du faisceau incident.

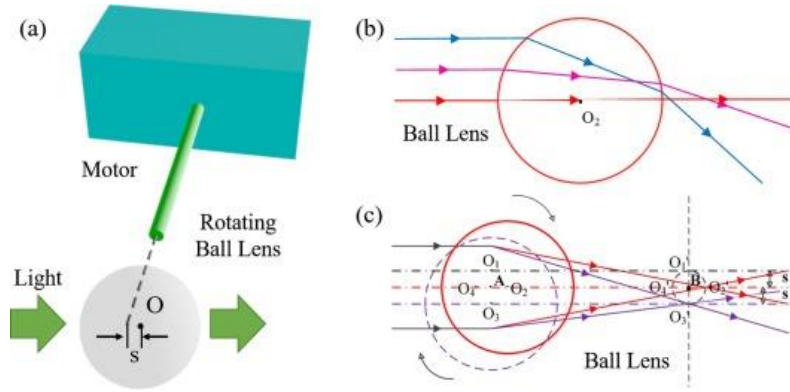


Figure 24 : (a) Objet modélisé en 3D de la lentille sphérique. (b) Déviation de différentes lumières incidentes avec la lentille sphérique. (c) Processus de rotation de la lentille sphérique. En fonction de la déviation de l'arbre rotatif, le foyer de la lentille sphérique pour un certain faisceau incident change avec sa rotation [139].

Après le passage par la lentille sphérique rotative, un point lumineux relativement homogène peut être observé sur l'écran. Dans la suite, nous présentons les résultats du contraste du speckle obtenu sans rotation de la sphère et avec rotation suivant différentes tensions du moteur dans la figure 25. Nous remarquons que le contraste est réduit en activant la rotation.

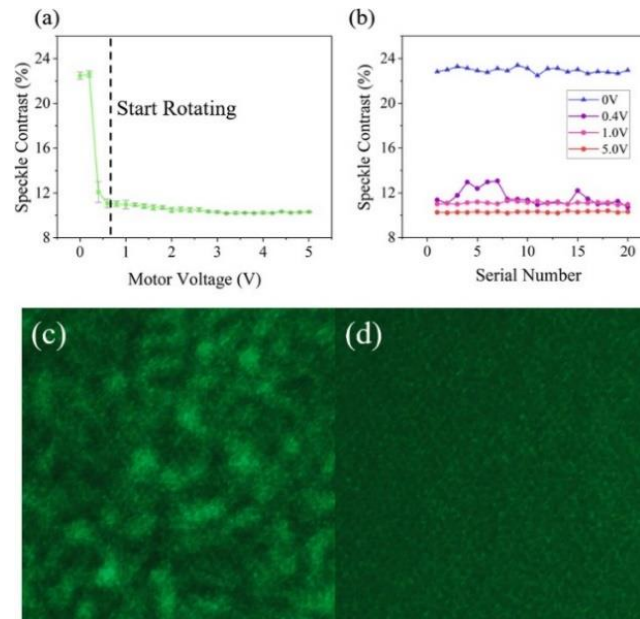


Figure 25 : Le contraste mesuré à différentes tensions du moteur avec barres d'erreur. (b) Le contraste mesuré 20 fois à différentes tensions du moteur. (c) Motifs de speckle enregistrés par CCD en 500×500 pixels à 0 V (la tension du moteur). (d) Motifs des Motifs de speckle à 5 V [139].

Y. Yoon a effectué une étude similaire dans le moyen infrarouge, allant de 6 à 11 μm , voir figure 26.

La lentille sphérique était remplacée par une pastille formée d'un mélange de diamant et le bromure de potassium (KBr). Le KBr est un matériau qui présente un coefficient de transmission égal à 90% dans le domaine infrarouge [140].

La réduction du speckle dans l'infrarouge moyen est de l'ordre de 78% de la valeur initiale du contraste avec l'éclairage sans le passage par la pastille [141].

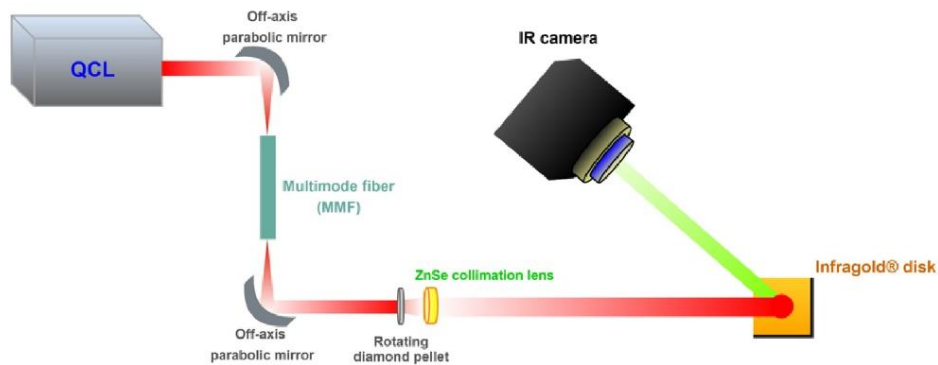


Figure 26 : Utilisation d'un QCL accordable comme source, transmission laser via une fibre multimode, éclairage d'un disque infragold par un diffuseur rotatif. La caméra IR [141] capture une trentaine d'images par longueur d'onde, appliquant une moyenne pour atténuer le contraste spatial du speckle.

Il applique un filtrage passe-bas en utilisant la transformée de Fourier 2D. Les valeurs de contraste de speckle extraites des images filtrées sont en meilleur accord avec la réduction théorique du contraste de speckle.

Nous observons que pour être significative, la réduction de speckle nécessite de moyenner des acquisitions multiples. Ce qui nécessite, une augmentation de temps d'acquisition en plus qui va entraîner un plus grand volume de stockage.

Boobhun a proposé d'appliquer la rotation à l'échantillon minéral et de calculer la moyenne des spectres de réflectance individuels [142].

La figure 27 présente son banc optique utilisé. Nous remarquons que cette solution ne nous convient pas dans la technique IHS, puisqu'on perd tout l'aspect spatial.

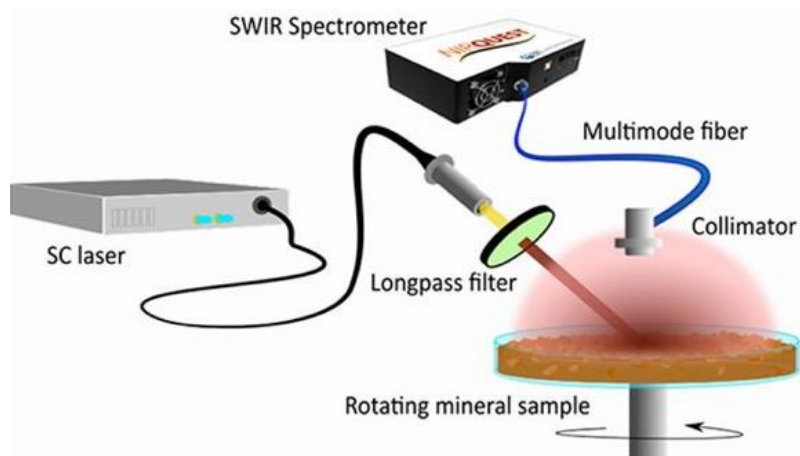


Figure 27 : La configuration de la mesure de réflectance utilisant un faisceau laser collimaté dirigé vers un échantillon minéral en rotation [142].

4.3.3. Décorrélation angulaire

La décorrélation angulaire est une autre technique utilisée en imagerie laser pour réduire le bruit de speckle. Elle consiste à éclairer l'objet avec un faisceau laser, créant ainsi des motifs de speckle qui varient en fonction de l'angle d'observation [143].

Cette technique peut être mise en œuvre en utilisant un diffracteur, un élément optique qui produit un motif de diffraction sur l'objet, ou en utilisant un élément optique, comme un diffuseur, pour générer les différents angles d'illumination [144].

Dans cette partie, la longueur d'onde utilisée est constante. La détection à partir de différents angles d'observation entraîne la détection de motifs de speckle décorrélés [145].

Cependant, si l'on considère un observateur humain/caméra dans une application de projection, il faudrait un mouvement continu de l'observateur ou de l'imageur pour obtenir une réduction continue du contraste de speckle perçu. Ce qui n'est pas pratique.

Une décorrélation angulaire instantanée est réalisable dans des systèmes de projections utilisant un homogénéisateur de faisceau de microlentilles dans le système de projecteur [146].

Le principe de fonctionnement d'un homogénéisateur de faisceau à microlentilles simple est décrit à la figure 28.

Le réseau est éclairé depuis la gauche : deux matrices de microlentilles LA_1 et LA_2 , une lentille de condensation FL .

En général, un intégrateur de Köhler se compose de deux matrices de lentilles similaires avec un pas P_{LA} et une distance focale identiques ($f_{LA1} = f_{LA2}$). La lumière tombant dans chaque microlentille illuminée produit un point d'illumination sur l'imageur.

Le fait que la lumière provenant de différentes microlentilles illumine le champ d'illumination sous des angles légèrement différents peut être utilisé pour réduire le speckle [143], [146].

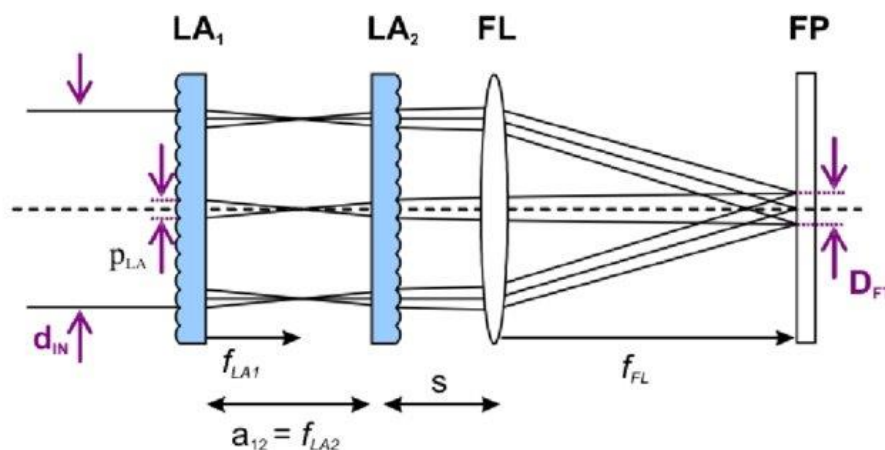


Figure 28 : Intégrateur de Köhler (homogénéisateur) [146].

Si l'angle d'éclairage est modifié pendant le temps d'intégration de l'observateur, le motif de speckle changeant sera à nouveau intégré dans le temps et un contraste de speckle réduit sera perçu.

4.4. Outils commerciaux

Dans cette partie, nous discutons les différentes techniques qui sont présentées dans la littérature.

Leur but est de créer des motifs de speckle non corrélés. La réduction du contraste et la suppression du speckle sont obtenues en moyennant temporairement les structures de speckle.

Une étude a été effectuée avec un diffuseur optique rugueux avec un certain angle de diffusion [147]. Ce diffuseur rotatif tournait, et dû aux différentes zones du diffuseur exposées à l'interaction avec le faisceau laser, différentes fonctions de phase étaient superposées sur l'écran. L'étude était faite avec trois lasers : rouge (665 nm), vert (532 nm) et bleu (456 nm). Un tel diffuseur a vérifié une réduction du contraste de 0,2 à 0,05.

Cette méthode de réduction repose sur la décorrélation angulaire. Plusieurs études se basent sur ce principe, notamment [103], [148] dans les systèmes de projection dans la gamme spectrale du visible.

La société Optotune (Suisse) a proposé une méthode de suppression du speckle [149], qui a été commercialisée sous la forme du despeckler LSR (The Laser Speckle Reducer) (*figure 29*). Il est basé sur le principe de décorrélation angulaire.

Il utilise un diffuseur qui est périodiquement déplacé dans l'espace sur une courte distance. Le diffuseur est monté sur une membrane élastique en polymère électroactif, qui se contracte et s'épaissit en fonction de la présence d'une tension sur les revêtements conducteurs d'électricité qui y sont fixés, et déplace ainsi le diffuseur (*figure 30*).

La réduction maximale du contraste du speckle est déterminée en utilisant les fréquences élevées et à des amplitudes de vibration élevées. Ce dispositif est testé avec un laser HE-NE (632,8 nm) en transmission.

La réduction du speckle par le moyennage spatio-temporel utilise essentiellement des plaques de diffusion mobile [150]. Cette méthode présente une réduction significative du contraste du speckle allant vers 10%.

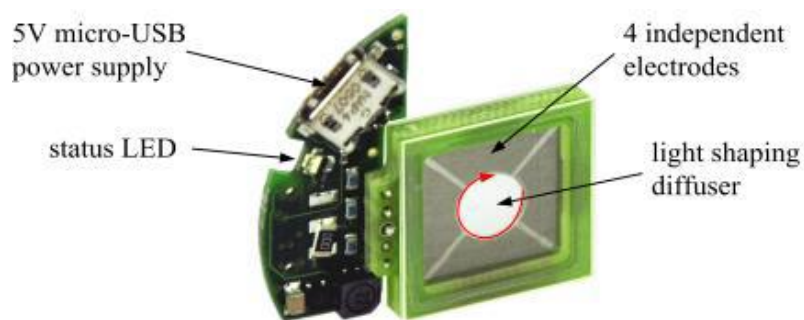


Figure 29 : Optotune's laser speckle reducer: LSR-5-17 [149].

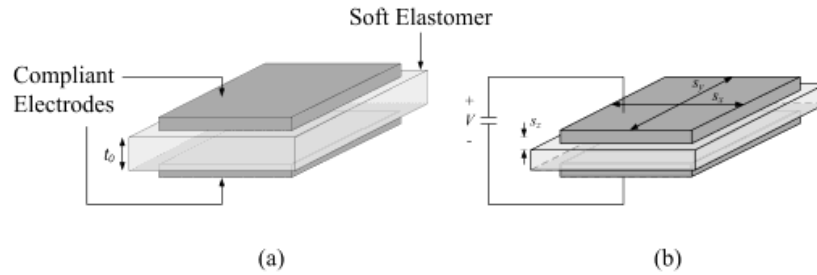


Figure 30 : Actionneur polymère électro actif (PEA) avec (a) aucune tension appliquée et (b) une tension V appliquée entre les deux électrodes souples [149].

Des méthodes impliquent l'utilisation d'un diffuseur symétrique vibrant avec un conduit de lumière (light pipe) [151] ou l'utilisation d'un papier micro-vibré [152]. Ces méthodes commerciales sont basées sur le concept de décorrélation angulaire et spatiale.

Tous ces méthodes utilisent des optiques en espace libre et un mécanisme mobile pour la réduction du contraste du speckle. Ces stratégies sont fonctionnelles dans le domaine visible.

Pour résumer, nous remarquons que les nombreuses stratégies de réduction du speckle laser pour l'imagerie par projection, elles sont basées principalement sur des composants optiques à mouvement mécanique, tels que des fibres multimodes, des lentilles vibrantes, des dispositifs de mise en forme de faisceau vibrants, des diffuseurs rotatifs.

Ces stratégies sont utilisées dans les domaines visibles et transposables dans le MIR. Nous nous intéressons dans notre étude au domaine de l'infrarouge thermique.

Dans cette gamme, les matériaux présentent une absorbance élevée par conséquent l'utilisation d'optique réfléchissant est nécessaire pour surmonter cette limitation.

De ce fait, une architecture modifiée du concept appliquée dans le visible est mise en place dans le MIR.

Dans la suite, je présente un tableau synthétique des différentes méthodes de réduction du speckle dans les systèmes de projection laser pour des applications d'imagerie. Ce tableau met en évidence leur performance et leur applicabilité dans le domaine du MIR.

Dans cette section, nous avons examiné les principes de réduction du speckle, notamment la décorrélation en longueur d'onde, la décorrélation spatiale et la décorrélation angulaire.

Bien que de nombreuses techniques aient été développées pour la réduction du speckle dans les applications d'imagerie, plusieurs solutions commerciales ont été introduites sur le marché, principalement pour la gamme spectrale visible et proche infrarouge.

Cependant, ces méthodes ne sont pas directement transposables dans la gamme thermique de MIR en raison des différences de propriétés optiques, telles que la transmission.

De plus, l'éclairage simultané avec plusieurs longueurs d'onde peut entraîner la perte d'informations spectrales par image, tandis que l'éclairage avec un balayage spatial ne fournit pas un éclairage uniforme sur toute la scène.

Tableau 11 : Tableau de synthèse des méthodes de réduction de speckle dans les systèmes de projection et d'imagerie.

Méthodes	Références Année	Performances	Applicabilité MIR	Commentaires
Illumination simultanée avec plusieurs longueurs d' onde	[130], [131] 2016-2018	Réduction de contraste du speckle dans le visible de l' ordre de 30 %	Oui	Perte de l' information spectrale
Illumination avec un balayage spatial	[134], [139] 2021	Réduction de contraste de speckle de l' ordre 50 % dans le domaine visible	Oui	Illumination non homogène
Illumination avec rotation de l' échantillon	[142] 2020	Réduction de contraste du speckle dans la spectroscopie de réflectance infrarouge	Oui	Perte de l' aspect spatial
Eclairage uniforme utilisant un homogénéisateur	[155], [156] 2018-2022	Réduction de contraste du speckle dans le domaine visible de l' ordre 80%	Non	Les matériaux absorbent fortement dans l' IR [153]
Utilisation de fibre optique multimodale vibrante	[154] 2021	Réduction de contraste du speckle dans le domaine visible à 3%	Oui	Coefficient d' atténuation (45%) Contrôle de la vibration qui réduit la qualité de l' image [154]
Utilisation d' un diffuseur réfléchissant en rotation	[141], [157] 2019-2022	Réduction de contraste du speckle dans le domaine visible jusqu' à 2 %	Oui	Réduction de puissance de sortie (dépendance du matériau) Relativement cher

La rotation de l'échantillon peut entraîner une perte d'information spatiale et de résolution, tandis que les homogénéisateurs ne sont pas encore conçus pour la gamme MIR et présentent une forte absorption.

L'utilisation de fibres multimodales vibrantes peut réduire le speckle mais présente également des coefficients d'atténuation significatifs.

Dans ce contexte, nous avons opté pour l'utilisation d'un diffuseur réfléchissant en rotation, qui est couramment utilisé dans la gamme spectrale visible et proche infrarouge.

Toutefois, il est important de choisir le matériau approprié pour le diffuseur afin de ne pas perdre le flux du signal par absorption du matériau.

Par conséquent, nous avons décidé d'appliquer cette méthode pour la suite de notre étude dans la gamme MIR.

5. Approches et protocoles

Dans cette partie, nous détaillons notre choix en présentant l'architecture du nouveau banc optique et les caractérisations nécessaires pour la réduction du speckle en utilisant un diffuseur réfléchissant en rotation.

Pour supprimer le speckle lors de l'acquisition des images, nous avons recours à utiliser des dispositifs optiques.

D'après la partie précédente, concernant les méthodes optiques, nous avons choisi une méthode qui permet d'implémenter sur le trajet du faisceau laser un diffuseur réfléchissant en rotation. Le schéma du banc optique est illustré dans la figure 31.

Ce système consiste à récupérer le flux lumineux diffusé par la surface de référence, qui est une plaque à couche d'or réfléchissante, qui est éclairé par un laser accordable fonctionnant dans l'infrarouge moyen. La structure est de type « aerial » (Figure 7), chaque longueur d'onde est utilisée pour éclairer correspond à une image de l'hypercube.

Le banc optique utilisé pour la réduction du speckle est basé sur de cinq blocs :

- excitation laser monochromatique accordable, dans le domaine infrarouge entre 3,9 et 11 μm ,
- système optique à base de miroirs à couche d'or pour guider et élargir le faisceau laser afin d'éclairer le diamètre souhaité de la surface,
- un dispositif rotatif (vitesse ~ 180 tour/s) intégré d'un diffuseur pour réduire le speckle,
- écran diffusant spectralement contrôlé, de type *infragold* composé d'un revêtement métallique doré avec une réflectance typique entre 92-96% dans la gamme de longueurs d'onde de 0,7 à 20 μm (proche et moyen infrarouge),
- système d'observation par imagerie composé :
 - une caméra refroidie SC5000 qui fonctionne entre 3 et 5 μm ,
 - une caméra bolométrique A65 qui fonctionne entre 7,5 et 13 μm ,
 - une caméra visible (RGB).

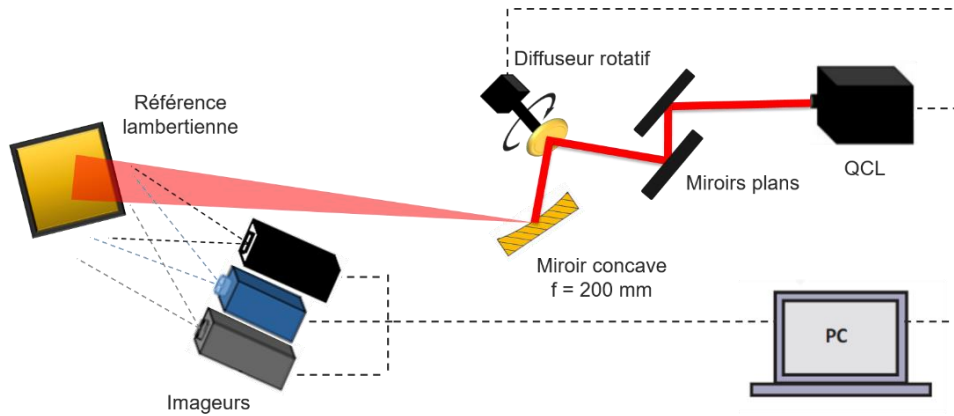


Figure 31 : Montage du banc optique utilisé pour la réduction du speckle.

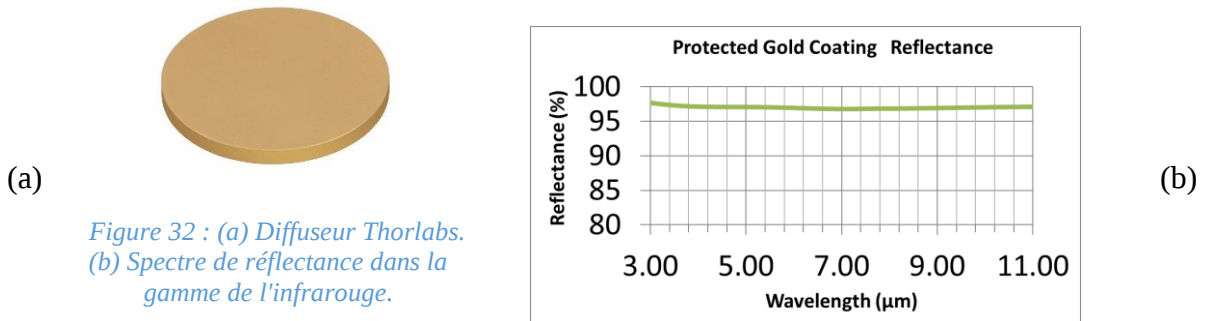


Figure 32 : (a) Diffuseur Thorlabs.
(b) Spectre de réflectance dans la gamme de l'infrarouge.

Le diffuseur est à la base d'un substrat N-BK7 et présente des grains, sur la surface, de taille 12 μm (voir figure 32). Ces derniers possèdent **un revêtement d'or** pour les protéger. Contrairement aux diffuseurs qui fonctionnent en transmission, ces diffuseurs réfléchissants atteignent une réflectance moyenne de 96% dans la gamme de longueur d'onde allant de 800 nm à 20 μm .

6. Résultats et discussion

La figure 33 présente le contraste spatial du speckle calculé des images acquises suivant les longueurs d'onde de l'infrarouge.

Ces résultats sont répartis en deux gammes de longueurs d'onde, pour cela j'utilise deux caméras adaptées spectralement (a) SC5000 et (b) A65.

La ligne en bleu désigne les résultats du contraste avec le diffuseur statique au trajet du faisceau laser. Tandis que la ligne en orange désigne le résultat avec le diffuseur en rotation. La courbe jaune présente le contraste mesuré suivant des images acquises par éclairage sans l'utilisation du diffuseur.

En bord de plage spectrale d'émission de chaque module laser, la puissance risque d'être insuffisante pour être détectée par les caméras. Par la suite, j'ai retiré ces longueurs d'ondes des graphes de résultats.

Dans la figure 33.a., le contraste calculé sans diffuseur présente une valeur égale à 0,58, cette valeur définit le point de départ.

Le contraste du diffuseur statique dans la figure 33.a présente une valeur à l'échelle 0,48 tandis que celui du diffuseur rotatif fluctue autour de 0,35.

Dans la figure 33.b., la courbe du contraste du diffuseur statique présente une valeur à l'échelle 0,5 tandis que celle du diffuseur rotatif fluctue autour de 0,38.

Ces graphes montrent que la rotation du diffuseur réduit le contraste de 0,48 à 0,35 dans la première gamme et de 0,5 à 0,38 dans la deuxième gamme.

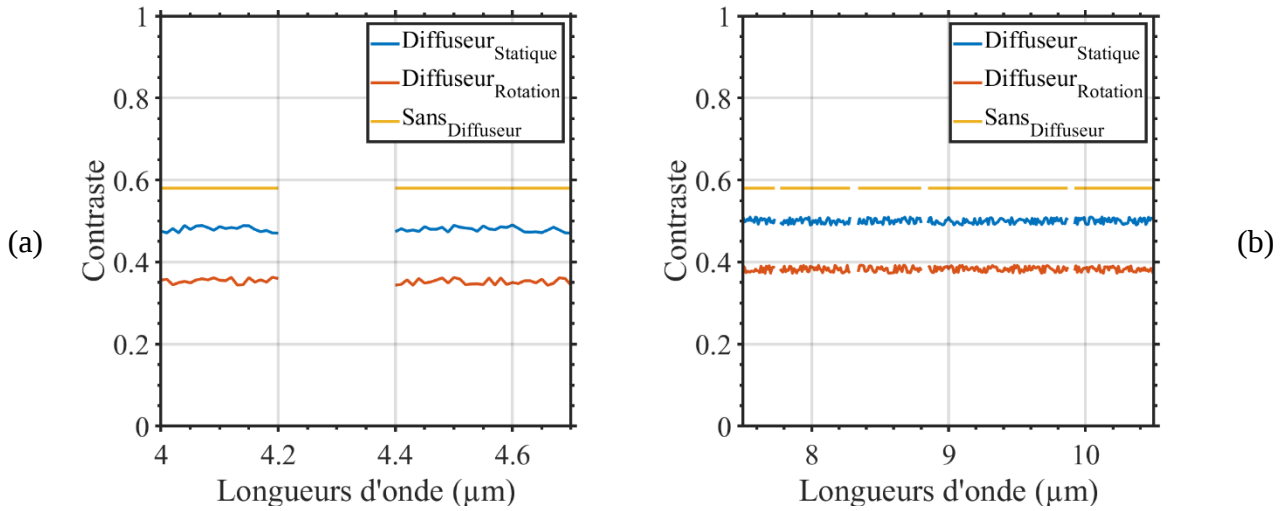


Figure 33 : Les graphes présentant le contraste du speckle des images, suivant les longueurs d'onde de l'infrarouge, acquises avec (a) SC5000 et (b) A65.

Pour quantifier la précision du calcul du contraste, je calcule les métriques d'évaluation de l'interpolation gaussienne utilisée pour l'égalisation de l'intensité.

La figure 34 présente le coefficient de détermination (R^2) pour la gamme acquise par la caméra SC5000 (a) et la gamme acquise par la caméra A65 (b).

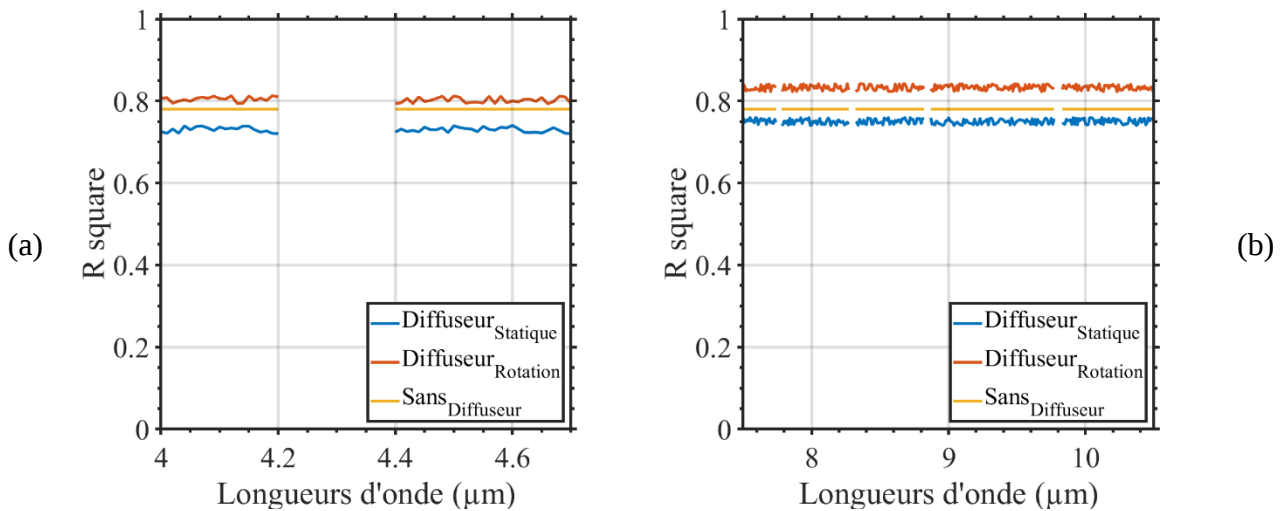


Figure 34 : Les graphes présentant les résultats de R^2 pour les deux caméras (a) SC5000 et (b) A65 suivant les différentes longueurs d'onde.

Le point de départ, sans l'utilisation du diffuseur, présente un coefficient de détermination R^2 de 0,78.

Dans la première gamme spectrale (figure 34.a.), la valeur de R^2 pour le diffuseur statique fluctue autour de 0,72 or pour le diffuseur rotatif, sa valeur fluctue autour de 0,78.

Dans la deuxième gamme spectrale (figure 34.b.), la valeur de R^2 pour le diffuseur statique fluctue autour de 0,74 or pour le diffuseur rotatif, sa valeur fluctue autour de 0,84.

Un meilleur coefficient de détermination est démontré en utilisant le diffuseur en rotation.

Pour préciser le pourcentage d'erreur quadratique moyenne, je présente dans la figure 35 les résultats adéquats.

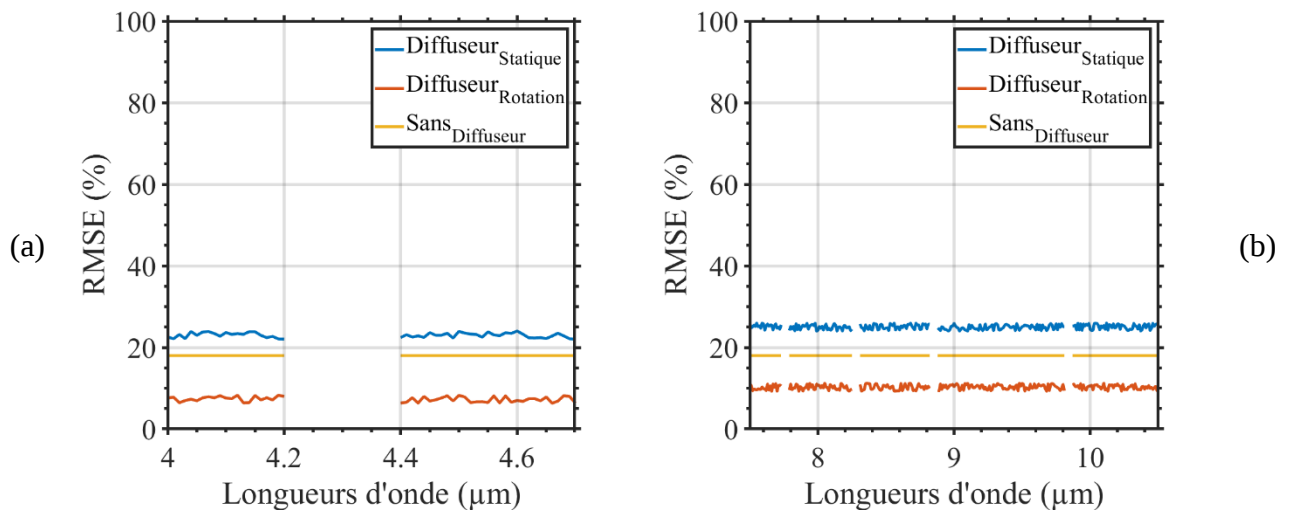


Figure 35 : Les graphes présentant les résultats du RMSE pour les deux caméras (a) SC5000 et (b) A65 suivant les différentes longueurs d'onde.

Le point de départ, sans l'utilisation du diffuseur, présente un pourcentage d'erreur quadratique moyenne RMSE de 18%.

Dans la première gamme, nous pouvons constater une valeur qui fluctue autour de 22% pour le cas d'un diffuseur statique, la valeur est réduite à 8% avec le diffuseur rotatif.

Dans la deuxième gamme, nous pouvons constater une valeur qui fluctue autour de 25% pour le cas d'un diffuseur statique, la valeur est réduite à 10% avec le diffuseur rotatif.

Nous pouvons conclure que la rotation du diffuseur induit une réduction du contraste de 40% de la valeur calculée avec le diffuseur statique.

En plus, nous avons constaté une réduction d'erreur quadratique et une augmentation de coefficient de détermination.

D'après la littérature, un filtre passe-bas peut être utilisé pour la réduction du phénomène speckle. Le critère du filtre passe-bas est lié à la zone d'isolation des basses fréquences.

Puisque le travail est conçu pour la réduction du speckle, je considère que la taille d'isolation est égale à la taille du grain de speckle calculé à largeur à mi-hauteur dans un premier cas et à $1/e^2$ dans un deuxième cas.

Par la suite, je présente les différents résultats suivant ces points :

- diffuseur statique :
 - filtre passe-bas à la taille du grain de speckle à mi-hauteur (LP_{FWHM}).
 - filtre passe-bas à la taille du grain de speckle à $1/e^2$ (LP_{1/e^2}).
- diffuseur en rotation :
 - filtre passe-bas à la taille du grain de speckle à mi-hauteur (LP_{FWHM}).
 - filtre passe-bas à la taille du grain de speckle à $1/e^2$ (LP_{1/e^2}).

La figure 36 présente le résultat du contraste pour le filtre passe-bas appliqué sur les images acquises avec un diffuseur statique et rotatif.

D'après une interpolation des images (a.b.) le contraste fluctue autour de $0,2 \pm 0,02$ pour le diffuseur statique LP_{1/e^2} . Cette valeur fluctue autour de $0,07 \pm 0,02$ pour le cas du diffuseur rotatif.

Or pour le cas LP_{FWHM} , la valeur fluctue autour de $0,1 \pm 0,01$ pour le diffuseur statique et autour de $0,03 \pm 0,01$ pour le diffuseur rotatif.

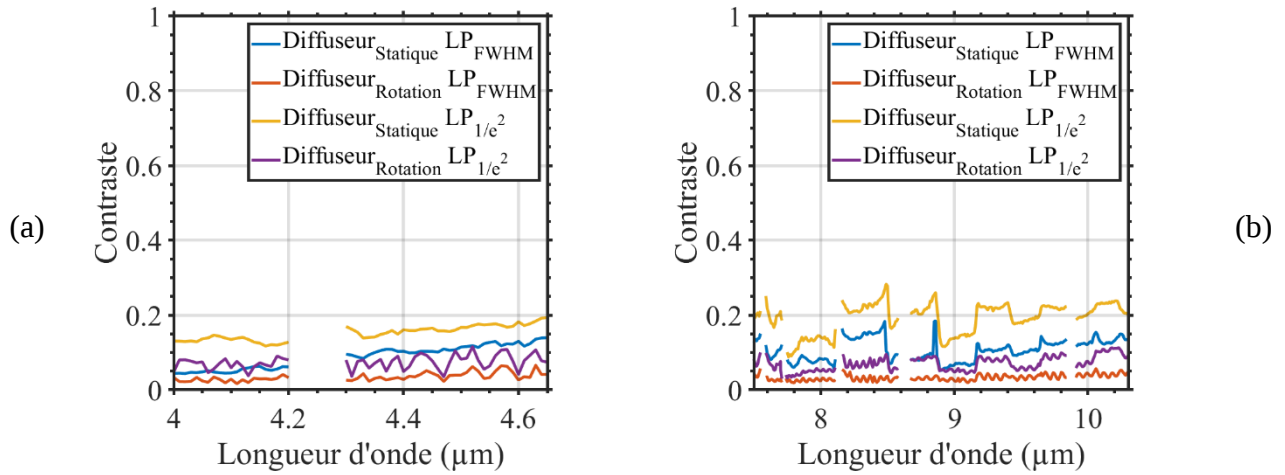


Figure 36 : Les graphes présentant les résultats du contraste pour les deux caméras (a) SC5000 et (b) A65 suivant les différentes longueurs d'onde avec les filtres LP_{1/e^2} et LP_{FWHM} .

Comme je l'ai présenté dans la partie précédente, les graphes des images 36 et 37 présentent les métriques d'évaluation de ces filtres.

Les valeurs de coefficient de détermination (R^2) de ces différents filtres fluctuent autour de $0,99 \pm 0,005$, voir figure 37.

Les erreurs quadratiques moyens, dans la figure 38, varie de 10 % pour le diffuseur statique et de 5 % pour le diffuseur rotatif avec LP_{1/e^2} . Tandis que pour le cas de LP_{FWHM} , les valeurs tendent vers 7 % et 2% consécutivement pour le diffuseur statique et rotatif.

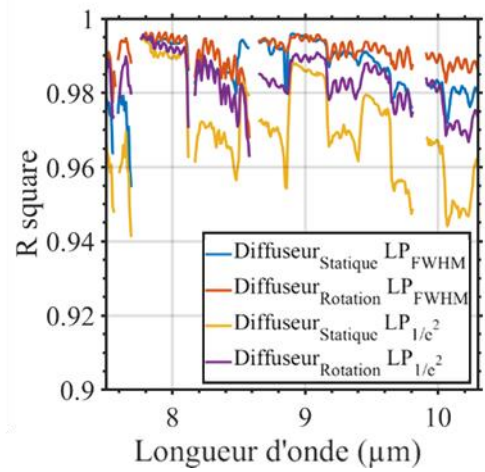
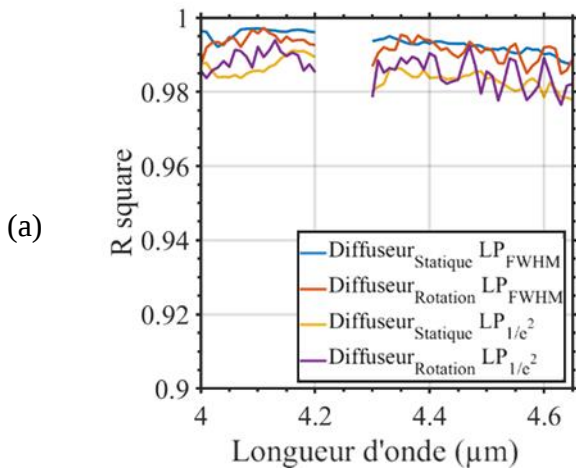


Figure 37 : Les graphes présentant les résultats du R^2 pour les deux caméras (a) SC5000 et (b) A65 suivant les différentes longueurs d'onde avec les filtres LP_{1/e^2} et LP_{FWHM} .

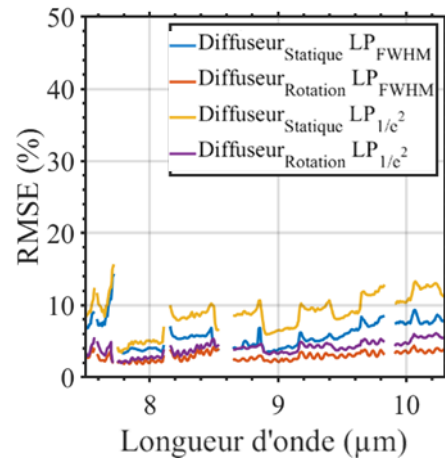
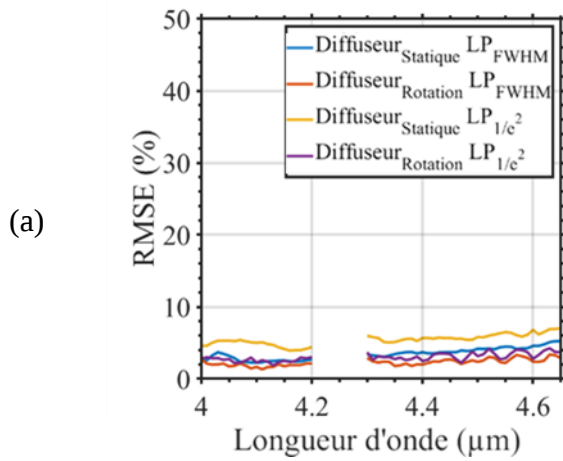


Figure 38 : Les graphes présentant les résultats du RMSE pour les deux caméras (a) SC5000 et (b) A65 suivant les différentes longueurs d'onde avec les filtres LP_{1/e^2} et LP_{FWHM} .

Pour comparer les résultats de ce filtre avec les filtres médian et moyen, je présente les graphes qui présentent le résultat sur le contraste suivant les longueurs d'onde en appliquant ces filtres.

En comparant avec les filtres classiques linéaires, les résultats sont les suivants :

Le choix de la taille de la sous-fenêtre glissante était proportionnel à la taille de grain en x et y selon les longueurs d'onde.

Pour les trois filtres médian, moyen et passe-bas, le filtre passe-bas présente un contraste global inférieur aux autres. Sa réponse moyenne est de 0,03 comparée à celle du médian de 0,12 et du moyen de 0,92.

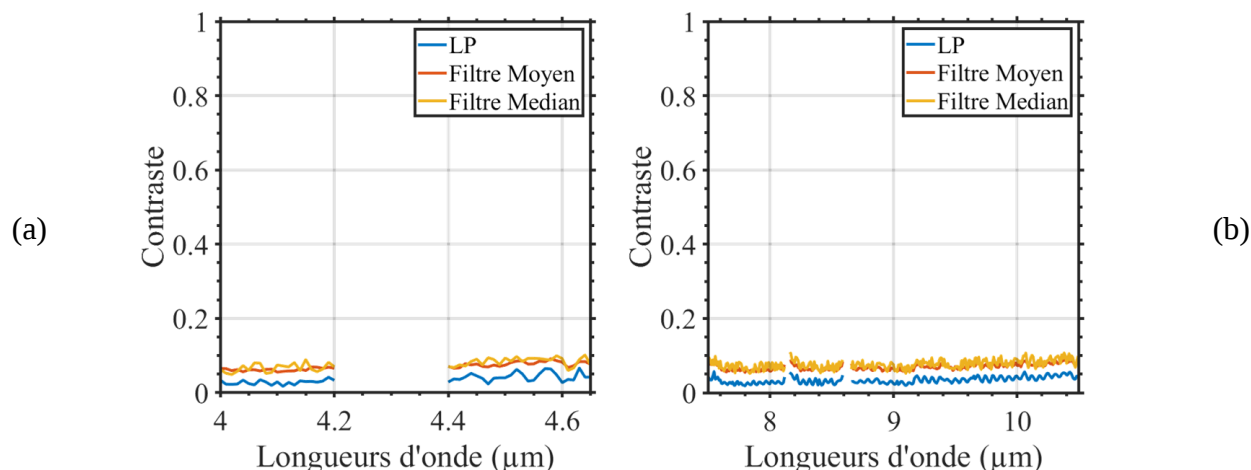


Figure 39 : Les graphes présentant les résultats du contraste pour les deux caméras (a) SC5000 et (b) A65 suivant les différentes longueurs d'onde avec les filtres LP, moyen et médian.

Pour résumer cette partie, je présente un tableau récapitulatif des résultats.

Le tableau 12 présente les différentes méthodes et les valeurs des métriques associées.

Tableau 12 : Tableau récapitulatif des résultats des différentes méthodes de réduction de speckle.

Méthode optique	Sans diffuseur	Diffuseur statique			Diffuseur rotatif		
Filtre numérique	Sans filtre	Sans filtre	LP_{1/e^2}	LP_{FWHM}	Sans filtre	LP_{1/e^2}	LP_{FWHM}
Contraste	$0,58 \pm 0,02$	$0,48 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,02$	$0,1 \pm 0,01$	$0,35 \pm 0,1$	$0,07 \pm 0,02$	$0,03 \pm 0,01$
R^2	$0,78 \pm 0,02$	$0,72 \pm 0,02$	$0,99 \pm 0,005$	$0,99 \pm 0,005$	$0,84 \pm 0,02$	$0,99 \pm 0,005$	$0,99 \pm 0,005$
RMSE (%)	18 ± 2	28 ± 3	10 ± 2	7 ± 1	10 ± 3	5 ± 1	$2 \pm 0,5$

Nous constatons de ce tableau, que la combinaison de la méthode optique, s'appuyant sur le diffuseur rotatif, et du filtre numérique passe-bas assure une réduction très significative permettant une réduction du contraste du speckle de 0,58 à 0,03 dans les images de la référence éclairée par un laser suivant la gamme de longueur d'onde.

7. Conclusion

Ce chapitre se concentre sur les artéfacts présents dans l'imagerie hyperspectrale active en infrarouge, en particulier le speckle et ses effets sur les résultats spectraux.

Le speckle est un champ granulaire créé par l'interférence des ondes diffusées résultant de l'interaction d'un faisceau laser avec une surface rugueuse à l'échelle de la longueur d'onde.

Bien que les applications utilisant le speckle comme source d'information soient présentées, ses effets préjudiciables sur les systèmes d'imagerie sont également illustrés.

Dans la littérature, certains chercheurs ont réussi à réduire l'effet du speckle en utilisant des méthodes numériques basées sur l'utilisation de filtres.

D'autres méthodes couramment utilisées en transmission sont également efficaces pour réduire le speckle lors de l'acquisition d'images, mais seulement dans les domaines du visible et du

proche infrarouge. Malheureusement, ces méthodes ne sont pas transposables à d'autres gammes spectrales en raison de l'incompatibilité des propriétés optiques des matériaux utilisés.

Bien qu'il existe des solutions commerciales, celles-ci ne fonctionnent pas toujours dans notre gamme spectrale. Les approches d'autres chercheurs dans le domaine de l'infrarouge moyen sont également présentées, mais avec leurs limites.

Les méthodes optiques de réduction du speckle visent à superposer différents motifs de speckle pour atténuer son effet. Ces méthodes comprennent la décorrélation en longueur d'onde, la décorrélation angulaire et la décorrélation spatiale.

Le contraste du speckle est un paramètre essentiel pour quantifier sa présence dans les images. Il est déterminé par le rapport de l'écart type à la moyenne des valeurs d'intensité dans une zone homogène.

Comme notre source laser produit un éclairage gaussien, nous décrivons dans ce chapitre une approche de calcul pour égaliser les intensités réparties de l'éclairage.

Cette méthode consiste à normaliser l'éclairage en utilisant sa fonction gaussienne 2D interpolée.

Les critères d'évaluation de notre méthode sont le coefficient de détermination (R^2) et le *RMSE*, qui servent à quantifier la précision de nos interpolations gaussiennes pour le calcul du paramètre du speckle.

Pour réduire le speckle dans le domaine infrarouge moyen (MIR), nous proposons d'implémenter un diffuseur réfléchissant rotatif sur le trajet du faisceau laser. Le but de cette méthode est de générer différents motifs de speckle statiquement indépendants durant le temps d'intégration de la caméra thermique.

Les résultats obtenus ont démontré que l'implémentation d'un diffuseur statique a permis de réduire le contraste du speckle de $0,58 \pm 0,02$ (valeur de départ) à une valeur de $0,48 \pm 0,1$, tandis que le diffuseur en rotation a permis d'atteindre une valeur de $0,35 \pm 0,1$ pour la gamme spectrale du MIR. Ce qui présente ~40% de réduction du point de départ.

Or pour mieux réduire le speckle, nous avons recours à un filtre numérique de fréquence passe-bas pour éliminer les effets granulaires du speckle.

De ce fait, nous lions la segmentation à la taille de grain de speckle, qui est calculée par deux différents niveaux d'hauteur de l'autocovariance normalisée suivant X et Y (la mi-hauteur et à la hauteur $1/e^2$). Cette méthode définie dans ce chapitre, présente les meilleurs résultats de réduction du speckle. Ces derniers sont manifestés par une réduction du contraste de speckle de $0,5 \pm 0,1$ à $0,1 \pm 0,02$ pour le diffuseur statique et de $0,4 \pm 0,1$ à $0,03 \pm 0,01$ pour le diffuseur rotatif. Ces résultats présentent un coefficient de détermination ~0,99.

Rappelons que l'éclairage sur la référence lambertienne est essentiel pour le calcul du taux de réflectance des échantillons végétaux. Cette valeur de référence représente la puissance de l'éclairage laser, qui est utilisée pour la normalisation de l'éclairage réfléchi des échantillons végétaux.

Pour cela, cette méthode de réduction de speckle combinant la rotation d'un diffuseur réfléchissant avec un filtre passe-bas est utilisée pour l'éclairage de référence. Le filtre

numérique ne serait pas utilisé sur les images des échantillons végétaux pour ne pas perdre la résolution spatiale.

Dans le chapitre suivant, j'évoquerai les fluctuations liées à la source d'éclairage (QCL) cette fois-ci.

III. Contrôle des paramètres du QCL pour l'IHS actif

1. QCL intégrés à l'IHS actif

Comme mentionné dans le premier chapitre, l'introduction de sources laser accordables dans le MIR et leur intégration dans les systèmes IHS, tels que les lasers à cascade quantique (QCL), offre la possibilité de développer des architectures de spectro-imageur [158].

Les QCL (1) sont une source de lumière pour de nombreuses applications comme la spectroscopie à distance [159], [160] en raison de leur puissance relativement élevée (~150 mW) et de leur accordabilité suivant leur plage spectrale.

Les lasers à cascade quantique (QCL) sont basés sur un semi-conducteur doté d'une structure à confinement quantique en une dimension, appelée puits quantique [161].

La figure 40 illustre le fonctionnement d'un laser à cascade quantique et l'annexe 1 le détaille.

Les électrons de haute énergie de la bande de conduction tombent dans les sous-bandes d'énergie créées par ce confinement quantique et se relaxent en émettant des photons d'énergie équivalente à l'écart d'énergie entre ces sous-bandes, ce qui est appelé émission par transition inter-sous-bande.

La longueur d'onde émise peut être contrôlée en ajustant l'épaisseur de la couche de semi-conducteur constituant le puit. Les QCL sont constitués de nombreux puits quantiques pour maximiser le rendement.

Les électrons traversent les puits par effet tunnel, se relaxent à nouveau et produisent de nouveaux photons, créant ainsi une cascade de photons, d'où le nom de QCL.

Cependant, pour ces sources cohérentes, autre que les problèmes de speckle vus au chapitre 2, des problèmes importants sont induits par des sauts de modes lorsque la longueur d'onde est balayée.

Les sauts de modes dans les QCL sont des changements brusques de fréquence liés à des variations de courant, utilisés pour réaliser un balayage spectral contrôlé dans des applications comme la spectroscopie.

Ces sauts de modes sont problématiques pour différentes applications telles que des mesures spectroscopiques pour de la détection à distance [162] :

- des problématiques de fluctuations de pointé du faisceau laser,
- des fluctuations de puissance optique.

En raison de la variabilité de la distribution des composants de l'échantillon dans l'image, il est important de contrôler le flux laser réfléchi par pixel [163]. En effet, les spectres bruts doivent être rapportés à une puissance de référence atteignant chaque pixel de l'image, afin de déterminer le taux de réflectance.

La cible doit être éclairée avec une reproductibilité spatiale. Le déplacement de faisceau et les fluctuations de puissance sont des facteurs importants à prendre en compte pour toute technique de détection nécessitant un éclairage artificiel [164].

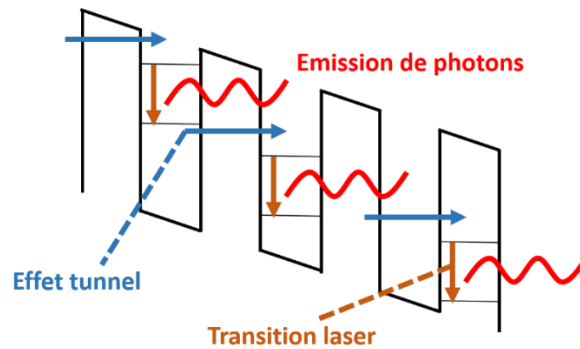


Figure 40 : Illustration du fonctionnement d'un laser à cascade quantique.

Ainsi, ce chapitre se consacre à la caractérisation des artefacts associés à la source d'illumination laser, et propose des approches pour les quantifier et les minimiser.

2. Déplacement du dépointé laser

2.1. Origine

Dans le contexte des QCL, le déplacement du faisceau peut être attribué à divers facteurs, tels que les variations de la température, les variations de courant, ainsi que les fluctuations de la longueur d'onde de la source lumineuse utilisée. En plus, l'influence du caractère multimode du laser sur ces déplacements s'explique par les interactions entre les modes [165].

Les influences se manifestent de la manière suivante [166], [167] :

- variation de la température : modifie la structure du laser, altérant la réfraction de la lumière et déviant la trajectoire du faisceau.
- variation du courant : impacte les niveaux d'énergie des électrons, engendrant des fluctuations à la sortie laser et la stabilité du faisceau.
- fluctuations de longueurs d'onde : créent des variations de mise au point du faisceau en raison des propriétés de focalisation spécifiques à chaque longueur d'onde émise.

Le déplacement du dépointé laser se traduit par un changement du centre de l'éclairage, initialement de nature angulaire. Comme précisé précédemment dans la première partie, le fonctionnement des QCL est influencé par la longueur d'onde déterminée par l'énergie du niveau quantique appliqué [168].

Pour effectuer un balayage spectral, des modifications successives des niveaux quantiques sont essentielles. Cette adaptation provoque des altérations de la forme de la cavité optique, l'espace où la lumière se propage et s'amplifie.

Ces altérations de la forme de la cavité induisent des déviations spatiales. Ces dernières ont des conséquences sur la précision et la fiabilité des applications IHS [169].

Les chercheurs travaillent actuellement sur des méthodes visant à diminuer la dérive angulaire du faisceau dans les lasers QCL. Dans la suite de cette étude, je présenterai l'état de l'art des méthodes disponibles pour sélectionner celle adaptée à notre banc optique. Ensuite, je caractériserai l'effet du déplacement du dépointé laser avant et après la mise en œuvre de la méthode choisie.

2.2. Techniques d'asservissement

Pour documenter cela, Yoon et al. [141] ont utilisé un profileur de faisceau pour caractériser la dérive du faisceau laser, et ont observé des fluctuations de position de 1,5 mm du centre du faisceau.

Pour réduire ces artéfacts spatiaux, ils ont couplé le faisceau laser dans une fibre multimode à l'aide de deux miroirs paraboliques. L'utilisation de la fibre multimode a atténué la dérive spatiale du faisceau de 1,5 mm à 0,02 mm lors de la mesure spectroscopique.

Le banc optique utilisé est illustré dans la figure 26, où les deux miroirs paraboliques sont utilisés pour coupler le faisceau laser dans la fibre multimode et collimater le faisceau de sortie de la fibre.

Les fibres optiques peuvent être utilisées pour atténuer ces fluctuations. Cependant, leur utilisation peut entraîner une perte de transmission importante, comme l'a indiqué Breshike, de plus de 45 % de la lumière incidente [162].

Afin d'évaluer le problème de la fluctuation de dépointé, les chercheurs mesurent le profil et la position du faisceau à l'aide d'un profileur de faisceau commercial ou d'une caméra infrarouge du système de détection à distance.

Les profils de faisceau obtenus à partir de la caméra IR sont ajustés à une distribution normale gaussienne 2D [170], permettant de déterminer la position spatiale du centre de l'éclairage.

Furstenberg, utilisant un système similaire au nôtre, a identifié des fluctuations de position du faisceau jusqu'à 2 mm. Cette amplitude n'est pas viable pour des mesures spectroscopiques à distance, qui exigent une précision d'incertitude inférieure à 1 mm [166].

Pour résoudre ce problème, il a employé un miroir motorisé pour compenser les fluctuations de direction, réduisant les fluctuations à 0,4 mm.

Les travaux de Xianyu Meng [171] fournissent une illustration plus précise des miroirs motorisés, comme présenté dans la figure 41. Deux miroirs assurent des déplacements selon les axes X et Y du plan. Chacun est connecté à un circuit de contrôle, tous deux reliés à un système de contrôle, qui génère des signaux pour ajuster les positions angulaires des miroirs.

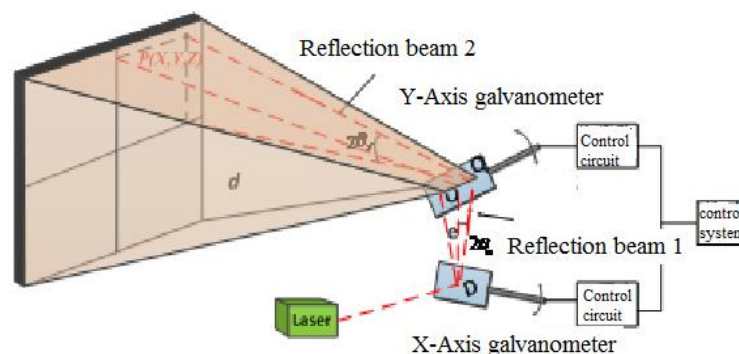


Figure 41 : Banc optique utilisant un système galvanométrique à deux miroirs oscillants [171].

Pour étalonner la position du faisceau, il a mesuré les diamètres du profil du faisceau en fonction de la position du miroir motorisé et enregistré ces informations dans une table de référence.

Une position adéquate du miroir motorisé a été déterminée pour chaque longueur d'onde. Cette procédure a permis de compenser les fluctuations reproductibles de la position du faisceau.

Ces miroirs motorisés peuvent être un système de miroir oscillants galvanométriques ou même des miroirs à commande électromagnétique (MEMS).

L'utilisation de ces miroirs a permis de réduire la dérive du faisceau dans les systèmes d'imagerie de la pupille dans les applications médicales [172], [173].

Parmi les chercheurs travaillant avec les lasers à cascade quantique, R. Muller [174] a également observé des fluctuations de position laser. Il a examiné les méthodes antérieures impliquant l'utilisation de miroirs oscillants pour corriger la dérive du faisceau, notant leurs limites.

En réponse, R. Muller a proposé une alternative : un système de rétroaction en temps réel pour compenser l'instabilité intrinsèque du faisceau QCL. Cette approche élimine la nécessité de calibrer des miroirs d'orientation spécifiques à chaque longueur d'onde, simplifiant ainsi le processus expérimental.

Le système s'appuie sur un détecteur infrarouge à quatre quadrants (quad) pour mesurer la position en temps réel d'une fraction du faisceau, capturée par un séparateur de faisceau (beamsplitter).

Le quad, composé de photoconducteurs infrarouges (modèle MCT-Q-3), génère un signal variable selon la position du faisceau dans le quadrant correspondant. Ce signal est ensuite analysé pour ajuster le système de miroir motorisé (Galvo) de manière appropriée, comme illustré dans la figure 42.

La source QCL fonctionne en mode continu (CW) à une longueur d'onde constante et une direction fixe par rapport au Galvo. La correction du faisceau laser sur l'échantillon est réalisée par la transmission de la différence de signal du quad au Galvo, permettant ainsi les réglages nécessaires.

Toutefois, certaines limitations sont à noter. Le temps de réponse du Galvo (0,4 ms) en comparaison avec le contrôleur est relativement élevé, tandis que le quad réagit en microsecondes.

De plus, une partie du signal laser est réservée à la correction, ce qui induit une diminution du signal disponible pour les mesures sur l'échantillon et la référence. Cette architecture de correction complexifie et rallonge le processus de préparation de l'expérience.

Le tableau 13 synthétise ces méthodes en mentionnant les références, leurs domaines d'application et leur applicabilité potentielle dans notre domaine MIR. Des commentaires sont inclus pour étayer notre choix.

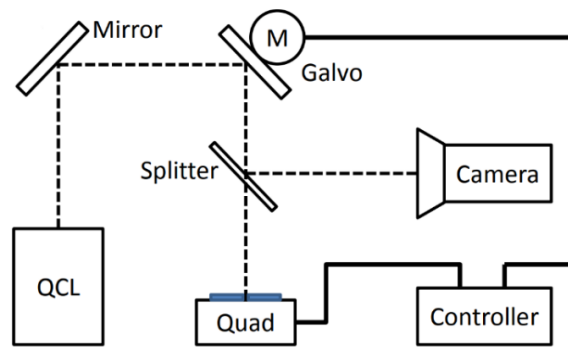


Figure 42 : Schéma simplifié du dispositif expérimental utilisé dans la référence [174].

La résolution du déplacement du faisceau laser dans l'infrarouge peut être traitée selon diverses approches, telles que l'utilisation :

- de fibres multimodes,
- de miroirs dorés motorisés,
- d'un quad avec un galvanomètre et un contrôleur.

D'autres méthodes (comme les miroirs à déformation électrostatique, les réseaux de diffraction, etc.) pourraient également être envisagées. Cependant il convient de noter que les solutions susmentionnées ont été abordées, notamment dans le contexte de lasers QCL similaires aux nôtres.

Tableau 13 : Tableau de synthèse des méthodes de réduction du déplacement de faisceau laser.

<i>Technique</i>	<i>Références année</i>	<i>Domaine spectrale</i>	<i>Transposition MIR</i>	<i>Commentaire</i>
Fibre multimode	[164], [175] 2019 - 2021	Visible	Oui	Atténuation du signal (~dB) [176]
Miroirs motorisés	[30] 2022	Visible	Oui	Utiliser des miroirs à couche d'or (~97% réflexion)
Quad	[174] 2017	Visible	Oui	Complexité d'architecture Temps de réaction (~200 ms)

L'utilisation de fibres multimodes présente des limitations, telles que des atténuations de signal dues aux propriétés optiques dans le MIR des matériaux utilisés dans la fabrication principalement.

En revanche, l'utilisation de miroirs dorés motorisés avec un tableau de correction de position permet de compenser les fluctuations du faisceau laser. Cette méthode est couramment utilisée dans les laboratoires de recherche pour la caractérisation des matériaux.

Toutefois, elle nécessite un calibrage préalable du miroir pour chaque longueur d'onde, ce qui peut être fastidieux.

L'utilisation d'un quad avec galvanomètre et contrôleur permet une correction en temps réel des fluctuations du faisceau laser, éliminant ainsi la nécessité d'un calibrage préalable. Cependant, la complexité architecturale et le temps de réponse du système (pouvant aller jusqu'à 200 millisecondes) sont des facteurs à prendre en compte. L'impact temporel se traduira par l'ajout d'une minute par mesure sur l'échantillon.

Les miroirs dorés motorisés avec un tableau de correction de position sont bien adaptés pour la transposition dans l'infrarouge car la réflexion de l'or est d'ordre 97% dans cette gamme de longueurs d'onde.

Bien que le calibrage préalable du miroir soit fastidieux, il n'a besoin d'être effectué qu'une seule fois si, d'après la caractérisation, on démontre que les fluctuations sont constantes suivant le balayage spectral.

Pour utiliser la méthode des miroirs motorisés avec un tableau de consultation, il est impératif de garantir que le déplacement spatial provienne du balayage plutôt que d'une longueur d'onde locale. Une étude doit être réalisée pour calculer la dispersion spatiale du faisceau laser sur une seule longueur d'onde. La section suivante présente cette étude et caractérise les fluctuations générées pendant la mesure.

2.3. Caractérisation de fluctuation de dépointé angulaire

Dans cette section, nous présentons le protocole de caractérisation du déplacement des miroirs. L'objectif de cette caractérisation est de recueillir un tableau de valeurs précises des positions X et Y de l'éclairage laser en fonction de la longueur d'onde, afin de corriger ce déplacement.

Nous nous appuyons sur la méthodologie utilisée dans le chapitre 2 de ce manuscrit, où la caractérisation a été réalisée sur une référence lambertienne réfléchissante.

Dans un premier temps, en raison de notre protocole expérimental, qui requiert l'acquisition successive d'images spectrales tout au long de la journée, nous avons décidé d'évaluer la reproductibilité en effectuant cinq acquisitions d'images répétées consécutivement lors du balayage spectral, sans éteindre le laser, à des moments différents.

Cette approche nous permet de démontrer que le déplacement spatial est intrinsèquement lié au balayage spectral, et non influencé par des facteurs temporels.

Afin de quantifier la position du centre de l'éclairage, la deuxième étape de notre protocole implique l'utilisation de l'interpolation gaussienne 2D. Cette technique nous permet d'extraire les paramètres μ_x et μ_y , qui définissent en pixels les coordonnées du centre de cette tache lumineuse dans l'image acquise.

Ces paramètres représentent les coordonnées du centre de l'éclairage laser. Les résultats obtenus, mettant en évidence les variations des coordonnées du centre de l'éclairage en fonction de la longueur d'onde pour les différents modules laser, sont présentés dans les graphiques de la figure 43.

Ces graphiques fournissent une représentation visuelle des fluctuations des coordonnées en relation avec la longueur d'onde, et confirment que le déplacement des miroirs est corrélé à la variation de cette grandeur.

Bien que la variation spatiale trouve son origine angulaire dans la source laser, comme évoqué dans la figure 2.1 elle s'exprime et se mesure à l'aide de détecteurs matriciels, traduisant ainsi la position spatiale le long des axes X et Y.

La variation de la position spatiale du centre de l'éclairage (0,0) en fonction de la longueur d'onde est répartie sur les deux axes :

- la figure 43.a. montre les variations suivant X.
- la figure 43.b. montre les variations suivant Y.

Les barres d'erreurs correspondant à cinq répétitions immédiates sont présentées en fonction de chaque longueur d'onde.

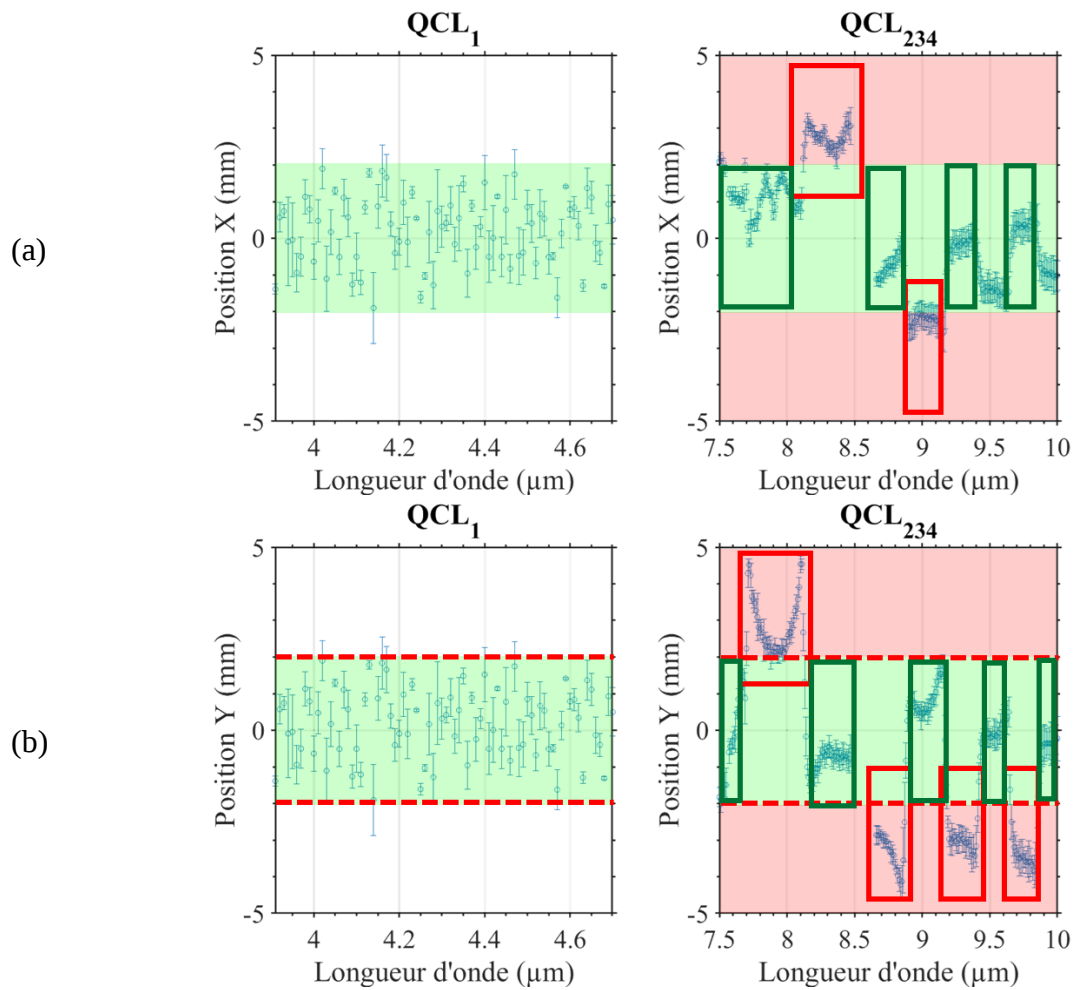


Figure 43 : Représentation du centre de l'éclairage laser suivant X (a) et suivant Y (b) en fonction du balayage spectral acquis suivant les différents modules laser QCL1234.

Pour caractériser les résultats, j'ai analysé les positions des longueurs d'onde par rapport au centre, visant des fluctuations inférieures à 2 mm, conformément à la littérature.

J'ai détecté les gammes spectrales aberrantes et identifié les tensions à envoyer aux miroirs motorisés pour les corriger, principalement celles dépassant le seuil de 2 mm (rouge) mais aussi celles déjà acceptables pour les amener davantage au centre (vert).

Ce processus n'inclut pas la correction de chaque longueur d'onde pour éviter un délai excessif (432). Les tensions appropriées pour chaque gamme ont été notées dans un tableau de consultation en vue de les intégrer dans la chaîne d'acquisition.

Il est important de noter que le mode de fonctionnement laser, utilisé pour la gamme acquise par la SC5000, est impulsionnel, tandis que pour la gamme acquise par la A65, il est continu.

Le mode impulsionnel génère des impulsions lumineuses de courte durée, de l'ordre de quelques picosecondes. Le mode continu, quant à lui, produit un flux lumineux ininterrompu [177].

En mode impulsionnel, le déplacement spectral du faisceau laser lors du balayage est généralement minime, se situant à quelques nanomètres. En revanche, en mode continu, ce déplacement peut être plus significatif, atteignant parfois quelques dizaines de nm par rapport au centre de l'éclairage [178].

Lorsqu'on considère la distance entre la source lumineuse et l'échantillon à caractériser, le déplacement du centre de l'éclairage peut s'étendre jusqu'à quelques millimètres. Toutefois, pour des applications de spectroscopie d'imagerie utilisant un éclairage laser, dépasser les 2 mm de déplacement n'est pas acceptable, car cela compromet la caractérisation précise d'une zone à la fois spectrale et spatiale [179].

Les caractéristiques, détaillées de ce laser, sont présentées dans l'annexe 2.

Pour confirmer que les variations observées sont causées par le balayage spectral et non par une longueur d'onde spécifique, des barres d'erreur ont été utilisées pour calculer l'incertitude et quantifier la répétabilité pour une même longueur d'onde.

La plage de fluctuations minimales et maximales autour du centre d'éclairage a été extraite, et une moyenne des fluctuations a été calculée pour déterminer l'ordre de grandeur de ces variations près du centre.

En raison de la reproductibilité des mesures, des barres d'erreur ont été calculées le long des axes X et Y pour chaque longueur d'onde. Ceci permet de vérifier si un déplacement survient le long d'une même longueur d'onde, ou si la variation se produit uniquement lors du balayage spectral.

Le tableau 14 résume les valeurs caractérisant le déplacement du faisceau laser lors du balayage spectral.

Tableau 14 : Valeurs moyennes et incertitudes des positions spatiales du centre de l'éclairage pour les gammes spectrales.

Module <i>Laser</i>	Position <i>x</i> (mm)	Incertitude <i>x,λ</i> (mm)	Position <i>y</i> (mm)	Incertitude <i>y,λ</i> (mm)
<i>QCL₁</i>	[-1,9 ; 1,8]	0,2	[-1,9 ; 1,8]	0,2
<i>QCL₂₃₄</i>	[-2,6 ; 3,2]	0,1	[-4,2 ; 4,5]	0,2

Nous notons des incertitudes dépendantes des longueurs d'onde pour le *QCL₁* et les *QCL₂₃₄*, variant entre 0,167 et 0,263 mm. Il est à noter que cette fluctuation correspond à la variation d'un pixel au centre de notre imageur matriciel.

Cette variation, considérée comme négligeable, ne compromet pas la qualité d'imagerie spectrale obtenue avec le laser comme source d'éclairage [165], [180]. Nous concluons de ces résultats que les fluctuations au sein d'une même longueur d'onde et lors de différentes répétitions, ne sont pas significatives.

En analysant les déplacements lors du balayage spectral des QCL₁ et QCL₂₃₄ le long des axes X et Y, nous observons des déplacements centraux atteignant 4,5 mm, accompagnés de fluctuations allant jusqu'à 2,7 mm lors du balayage.

Dans le contexte de la spectroscopie d'imagerie à distance, minimiser le déplacement du faisceau laser est important pour assurer des mesures précises. Les valeurs admissibles varient selon l'application. Des exemples de la littérature incluent :

- une étude d'étalonnage avec des QCL maintenait le déplacement sous 1,5 mm du centre de l'éclairage [181],
- pour la spectroscopie laser à distance, le déplacement était limité à moins de 2 mm du centre [182],
- une étude axée sur la réduction du speckle et la maîtrise du déplacement du faisceau le maintenait en dessous de 1 mm du centre [141].

En comparant les valeurs de la littérature à nos résultats obtenus sans correction du déplacement spatial du centre d'éclairage. Cependant, nos valeurs dépassent la limite de 2 mm de fluctuations au centre de la zone à éclairer, rendant ces résultats inappropriés pour la spectroscopie d'imagerie à distance.

Nous avons observé que nos mesures sont reproductibles le long des longueurs d'onde et que les déplacements suivent une tendance constante même pendant le balayage, avant la correction.

Une correction stable spectralement suivant une même longueur d'onde était démontrée à 0,2 mm (1 pixel d'incertitude).

Les créneaux observés dans les QCL₂₃₄ sont considérés acceptables si leurs fluctuations autour du centre sont inférieures à 1 mm, conformément à la littérature existante.

Par conséquent, notre objectif est de réduire les fluctuations et la moyenne des déplacements près du centre d'éclairage, en visant une valeur inférieure à 1 mm.

2.4. Méthode implémentée pour la correction

Cette section décrit le banc optique que nous avons utilisé dans notre étude, qui est équipé d'un système de positionnement de miroirs à galvanomètre à balayage (GVS102 de Thorlabs).

Ce système est composé d'un moteur galvanométrique à deux axes (*X et Y*) équipé d'une paire de miroirs oscillants motorisés. Il comprend également deux cartes de pilotage associées et deux dissipateurs thermiques spécifiques pour les cartes de pilotage.

L'utilisation d'un tel système nécessite un tableau de référence que nous appellerons "tableau de consultation", qui indique les positions des miroirs X et Y du système de miroirs motorisés.

Le faisceau laser émis par la cavité laser accordable est guidé vers le diffuseur via des miroirs dorés, puis il est focalisé sur les miroirs oscillants du système galvanométrique à l'aide d'un miroir concave. Le faisceau est ensuite élargi à un diamètre de cinq centimètres pour éclairer la référence lambertienne "Infragold", comme illustré dans la figure 44.

Nous utilisons des imageurs adaptés aux différentes gammes spectrales pour collecter le flux diffusé par la référence, tandis qu'une caméra visible permet d'obtenir des images de l'échantillon et de le localiser spatialement.

La fiche pratique qui détaille la manipulation mise en place pour pouvoir établir le tableau de consultation des positions des miroirs dorés est dans l'annexe 8.

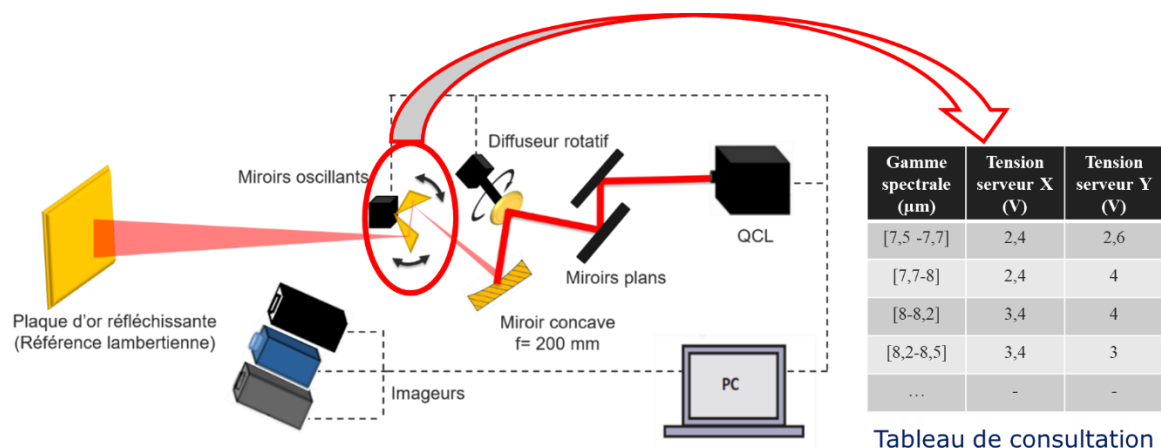


Figure 44 : Banc optique équipé du système miroirs oscillants (motorisés)

Pour la mise en place du tableau de consultation, j'ai commencé par positionner l'infragold, devant les détecteurs tout en maintenant sa position spatiale constante. En effectuant un étalonnage simple, j'ai pu déterminer les coordonnées spatiales de son centre, ce qui m'a permis d'acquérir les valeurs de position en X et Y .

En procédant à un balayage à travers différentes longueurs d'onde, j'ai ajusté l'alignement de mon faisceau laser. Cette opération impliquait d'ajuster les tensions envoyées aux miroirs pour modifier la direction du faisceau. L'objectif était de recentrer la position du point d'éclairage en fonction des longueurs d'onde, afin qu'elle coïncide avec le centre de l'infragold.

Pour consigner ces ajustements, j'ai enregistré les tensions correspondantes pour les axes X et Y pour les différentes gammes spectrales, et les ai regroupées dans un tableau. Il était utilisé pour effectuer les ajustements nécessaires afin de maintenir l'alignement du faisceau lumineux au centre de l'infragold.

2.5. Quantification de la correction

Dans cette section, je mesure la position du centre de l'éclairage en appliquant la méthode décrite dans la 2.3.

Pour ce faire, j'utilise les paramètres de l'interpolation gaussienne 2D de l'éclairage laser, isolé du fond thermique, afin de déterminer la position du centre de l'éclairage.

Les variations du centre de l'éclairage en fonction de la longueur d'onde pour les longueurs d'onde appartenant aux différentes gammes spectrales sont présentées dans les graphiques de la figure 45, après correction de l'éclairage à l'aide du système galvanométrique, pour les axes x (figure 45.a.) et y (figure 45.b.).

En comparant les résultats du premier module laser, à ceux obtenus précédemment, il est possible de constater que les variations spatiales n'ont pas été corrigées, étant donné qu'elles sont du même ordre de grandeur. L'implémentation du module d'asservissement ramène le centre de l'éclairage au centre de l'échantillon à illuminer, en fonction de la longueur d'onde.

En revanche, pour la deuxième plage spectrale allant de 7,5 à 10,5 μm acquise par la caméra A65, des variations en X et Y ont été observées en fonction des modules laser utilisés, mais l'utilisation du système galvanométrique a permis de réduire la déviation par rapport à la moyenne.

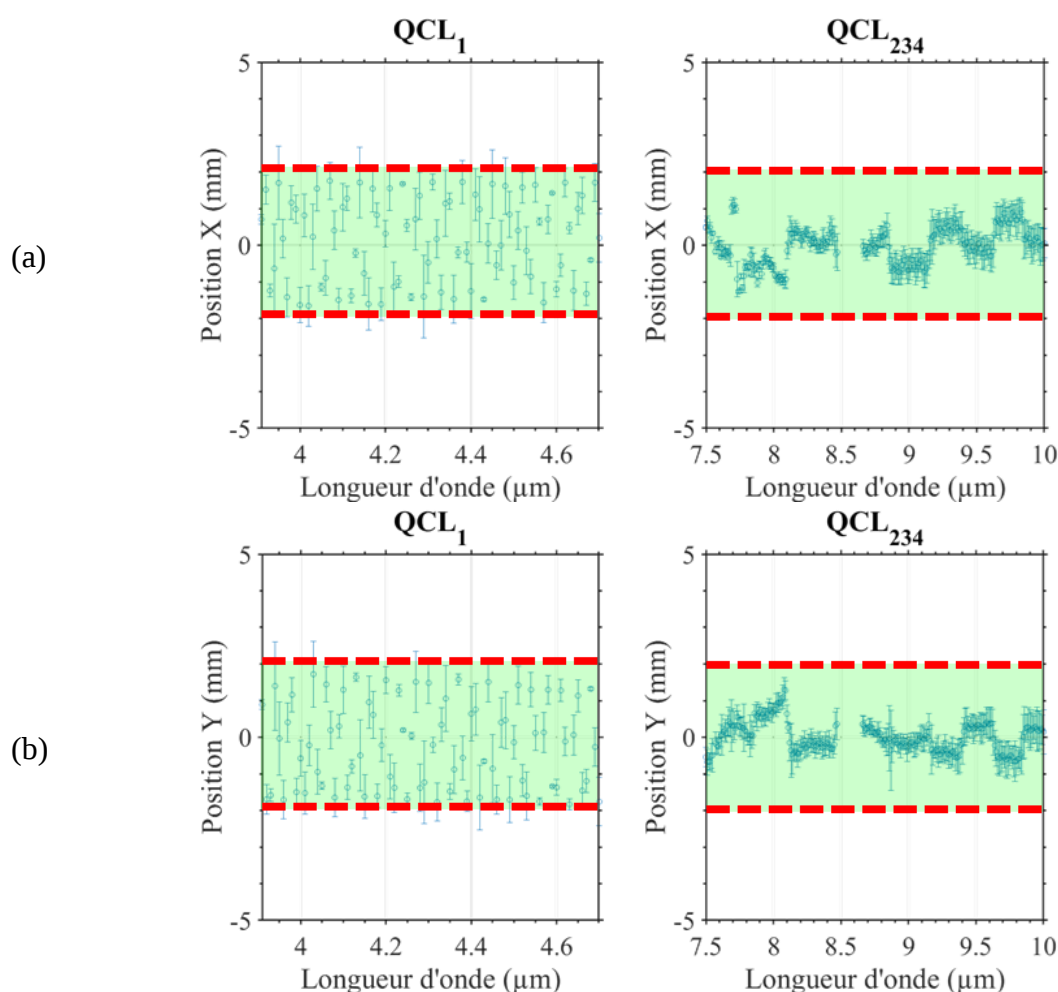


Figure 45 : Représentation du centre de l'éclairage laser suivant X (a) et suivant Y (b) en fonction du balayage spectral après correction utilisant la méthode implémentée dans le banc optique acquis par les deux caméras SC5000 et A65.

La plage de fluctuations minimales et maximales autour du centre d'éclairage a été extraite, et un écart-type des fluctuations a été calculée pour déterminer l'ordre de grandeur de ces variations près du centre.

Les résultats ont été résumés dans le tableau 15.

Tableau 15 : Tableau récapitulatif de la moyenne de la position spatiale en x et en y avec l'écart-type adéquat après correction.

Module	Position x	Position y
<i>Laser</i>	(mm)	(mm)
QCL₁	[-1,9 ; 1,7]	[-1,6 ; 1,6]
QCL₂₃₄	[-1,2 ; 1,1]	[-0,6 ; 1,3]

Pour conclure cette partie, le tableau 16 compare les valeurs moyennes des positions du centre de l'éclairage ainsi que leurs incertitudes avant et après l'implémentation du système galvanométrique.

Tableau 16 : Tableau de comparaison des valeurs d'incertitude avant et après la correction suivant les modules suivant la position spatiale en x et en y.

Paramètres	Module	Position x	Incertainde x, λ	Position y	Incertainde y, λ
	<i>Laser</i>	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Avant	QCL₁	[-1,9 ; 1,8]	0,2	[-1,9 ; 1,8]	0,2
correction	QCL₂₃₄	[-2,6 ; 3,2]	0,1	[-4,2 ; 4,5]	0,2
Après	QCL₁	[-1,9 ; 1,7]	0,2	[-1,6 ; 1,6]	0,2
correction	QCL₂₃₄	[-1,2 ; 1,1]	0,2	[-0,6 ; 1,3]	0,2

Pour la plage spectrale capturée par la caméra SC5000 équipée d'un seul module laser, des réductions ont été apportées aux fluctuations. Ces fluctuations ont été réduites de 0,939 mm à 0,567 mm grâce à une double correction de la position des miroirs, une au début du balayage spectral et une au milieu, de cette bande.

En revanche, pour la plage spectrale capturée par la caméra A65, qui intègre trois modules laser, cinq corrections spatiales ont été appliquées pendant le balayage spectral pour réduire la dispersion à une valeur acceptable (inférieur à 2 mm).

Les fluctuations du centre de l'éclairage laser présentent des ordres de grandeur similaires à ceux rapportés dans la littérature, c'est-à-dire en dessous de 2 mm. Par la suite, notre méthode de correction s'avère acceptable pour notre application.

Bien que notre approche de consultation ne prenne pas en considération chaque longueur d'onde spécifique, mais plutôt des plages de longueurs d'onde, ce choix est justifié par les déplacements qui se produisent dans chaque plage et qui restent relativement acceptables, étant en deçà de 1 mm pour les applications d'imagerie hyperspectrale active.

Une proposition pour l'avenir consisterait à élaborer un tableau de correction prenant en compte chaque longueur d'onde individuelle, ce qui pourrait induire une réduction significative des déplacements, inférieurs à 0,5 mm, notamment pour des applications de surveillance nécessitant une précision de l'ordre de 3 pixels.

3. Instabilité de puissance d'illumination

3.1. Origine

Certaines études supposent l'hypothèse que la puissance de la source laser est stable entre la mesure de référence et l'échantillon, ce qui autorise des mesures à des moments distincts [183]–[185].

Cependant, d'autres études mettent en évidence ce problème. C. Breshike et al. [180] affirment qu'un éclairage simultané d'un étalon de référence et de l'échantillon à caractériser est nécessaire pour résoudre le problème de fluctuations. On peut voir leur dispositif optique dans la figure 46.

Dans cette étude, la source utilisée est également un modèle de type MIRcatTM.

Comme nous remarquons dans la figure 46, le faisceau laser est divisé en deux par une lame séparatrice (beam splitter) pour laisser passer :

- une partie du faisceau est transmise vers un détecteur pour obtenir une mesure de référence.
- une deuxième partie en réflexion éclaire l'échantillon.

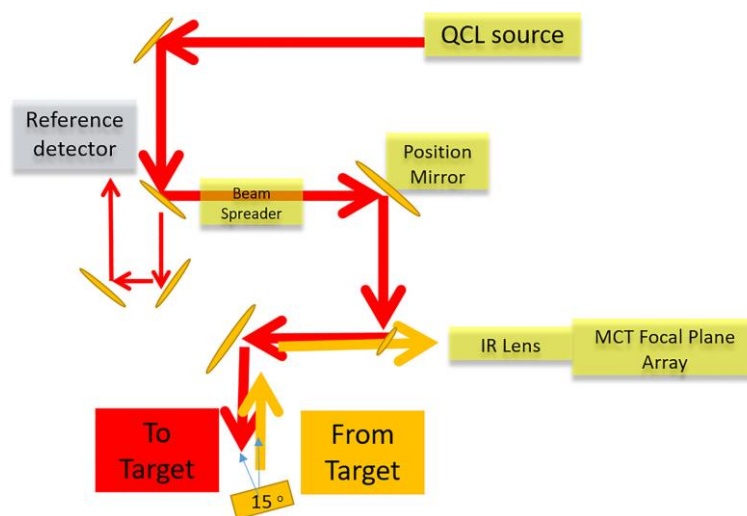


Figure 46 : Illustration de la trajectoire du faisceau. Les flèches rouges illustrent le trajet entre le QCL et la cible, et les flèches jaunes représentent la partie de la lumière diffusée qui revient au plan focal du détecteur [180].

Cette configuration permet d'obtenir deux images : une image de référence et une image de l'échantillon éclairé.

Pour corriger les fluctuations de puissance laser, les auteurs de l'étude ont normalisé l'image de l'échantillon éclairé pixel par pixel en utilisant l'image de référence.

Cette dernière est obtenue en mesurant un matériau étalon de référence, l'or étant souvent utilisé pour sa réflectance élevée (~97%) dans la gamme infrarouge.

La mesure de l'étalon de référence est réalisée dans les mêmes conditions que celles utilisées pour mesurer l'échantillon, notamment en termes d'angles et de distance d'observation.

D'un point de vue opérationnel, cette méthode est similaire à la prise d'un spectre "de fond" dans une expérience traditionnelle de FTIR, où le spectre "échantillon" est normalisé par un spectre de référence mesuré dans les mêmes conditions expérimentales.

Cette technique présente certaines contraintes, notamment liées à l'utilisation des lames séparatrices.

Les lames séparatrices, généralement en zinc sélénure, divisent le faisceau en deux trajets : l'un est transmis, l'autre est réfléchi, pour une répartition 50:50 du signal. Cependant, le zinc sélénure absorbe fortement l'infrarouge (45 %), divisant ainsi le faisceau transmis en 55 % [186]. Cette absorption peut noyer le signal de réflexion de l'échantillon végétal dans le bruit du détecteur.

3.2. Caractérisation de fluctuation de puissance

Pour quantifier les variations de puissance de l'éclairage laser, nous avons utilisé le banc optique illustré dans la figure 44 avec une référence commerciale, l'Infragold.

Cette référence présente une surface granulaire à diffusion lambertienne, revêtue d'une couche d'or offrant une réflectance de 97% avec une absorbance négligeable dans le MIR.

Deux imageurs thermiques opérant dans l'infrarouge sont utilisés pour capturer le flux diffusé sur la large gamme spectrale : l'un avec un détecteur refroidi InSb (SC5000) pour la plage de 2,5 à 5,1 μm , et l'autre avec un détecteur bolomètre (A65) pour la plage de 7,5 à 13 μm . Des mesures de stabilité de l'éclairage laser sont effectuées toutes les deux minutes.

Une mesure complète comprend :

- une acquisition d'image du fond thermique sans illumination laser,
- une acquisition d'image éclairée de l'échantillon pour chaque longueur d'onde en effectuant un balayage spectral.

Le faisceau laser suit une distribution gaussienne, comme indiqué par le fournisseur. Pour calculer la puissance de la zone effective, nous considérons la zone d'étalement effective. Cette zone est déterminée par les pixels dont la puissance est inférieure à l'amplitude maximale de l'éclairage divisée par e^2 [187].

Ensuite, je présente le protocole de caractérisation, qui isole le flux laser en soustrayant systématiquement le fond thermique, détermine le centre de l'éclairage par le barycentre en fonction du nombre de pixels dans la zone, réalise une interpolation gaussienne 2D pour créer un masque de l'étalement effectif, et calcule la somme du flux diffusé sur les pixels.

Le protocole de caractérisation de la puissance totale suit les étapes suivantes :

1. acquérir les images spectrales (λ) de la référence commerciale ($Im_{référence}$).
2. soustraire le fond thermique ($Im_{fond_{référence}}$) de ($Im_{référence}$)

$$\rightarrow \widehat{Im_{référence}}(x, y, t_1, \lambda) = Im_{référence}(x, y, t_1, \lambda) - Im_{fond_{référence}}(x, y, t_0, \lambda) \quad (30)$$

3. trouver le barycentre de l'éclairage d'après les « N » premiers max

$$\rightarrow I_{barycentre}(x_{barycentre}, y_{barycentre}) \quad (31)$$

- $N = 15000 \sim$ nombre de pixel de la zone d'intérêt.
- la zone d'intérêt est définie par un masque circulaire de ~ 5 cm de diamètre, aligné avec la taille de la tache de diffusion, en vue de son utilisation ultérieure dans un porte-échantillon qui assure une zone visible équivalente à un disque de 5 cm de diamètre pour l'échantillon végétal.

4. interpoler l'éclairage par le fit 2D gaussien adéquat

- pour ce faire, nous avons besoin d'initialiser les paramètres de la fonction, lesquels sont fournis à l'étape 3.

$$\widehat{IG}(x, y, t_1, \lambda) = A(t_1, \lambda) \times e^{(-(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2})} \quad (32)$$

5. définir un masque circulaire binaire pour la région d'intérêt (M_{ROI})

$\rightarrow$ zone de l'étalement de l'éclairage laser considéré gaussien

- propriétés du masque :
 - $If \widehat{IG}(x, y, t_1, \lambda) > \frac{A(t_1, \lambda)}{e^2} \rightarrow M_{ROI}(x, y) = 1$
 - $If \widehat{IG}(x, y, t_1, \lambda) < \frac{A(t_1, \lambda)}{e^2} \rightarrow M_{ROI}(x, y) = 0$

6. appliquer le masque sur l'image du flux laser isolé :

$$Im_{référence}(x, y, t_1, \lambda) * M_{ROI}(x, y) \quad (33)$$

7. calculer la puissance totale en intégrant tous les pixels de l'image :

$$P_{tot}(\lambda) = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Im_{référence}(x, y, t_1, \lambda) * M_{ROI}(x, y) \quad (34)$$

Les graphiques de la figure 47 montrent les valeurs moyennes des puissances calculées à partir des images acquises avec les deux caméras, pour les gammes de longueurs d'onde de 3,9 à 4,7 μm et de 7,5 à 10,5 μm . Les écarts types locaux sont également présentés pour chaque longueur d'onde au cours du balayage spectral composé de dix répétitions, espacées de deux minutes chacune.

Bien que la forme de la courbe de puissance obtenue soit similaire à celle fournie par le fournisseur (annexe 2Caractéristiques du QCL MIRCAT), qui utilise les courants maximaux pour chaque gamme spectrale, ces résultats ont révélé un problème majeur.

Dans le mode impulsionnel du premier module laser QCL₁, les variations locales, sur une même longueur d'onde, présentent une incertitude d'environ 2/3 % de la puissance moyenne. Cette observation confirme la stabilité intrinsèque de ce mode par rapport au mode continu [188], lequel est employé par les modules laser QCL₂₃₄.

Ces derniers montrent des fluctuations moyennes d'approximativement 20 % le long des longueurs d'onde, se manifestant lors des dix séries de répétitions, espacées chacune de deux minutes.

Cela est dû au fait que le mode impulsionnel permet de contrôler la durée et l'intensité des impulsions laser, ce qui peut être important pour certaines applications telles que la spectroscopie [189].

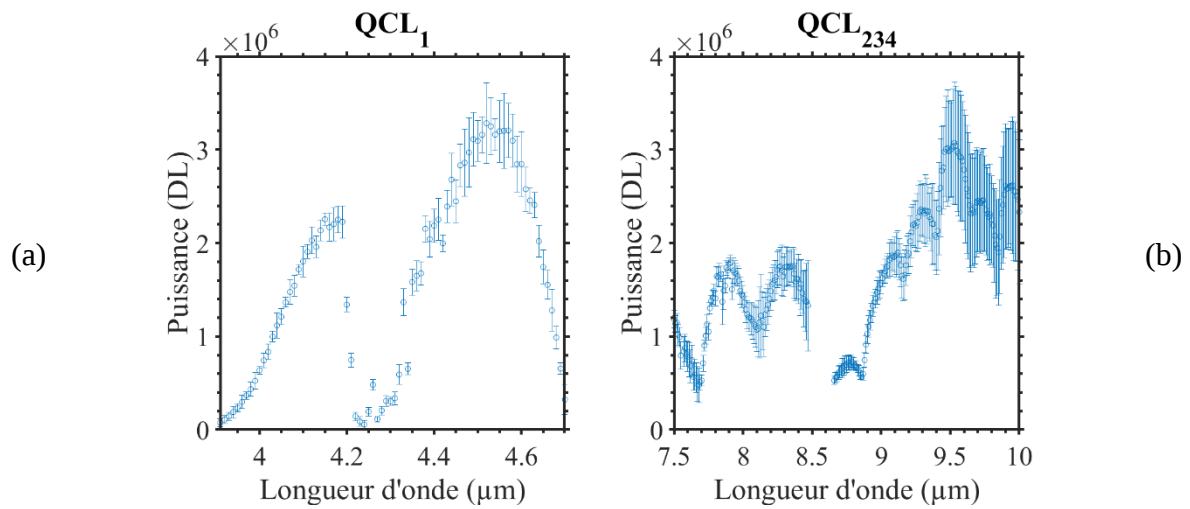


Figure 47 : Variation de puissance donnée en DL suite à 10 répétitions en fonction de la longueur d'onde avec les barres d'erreur adéquates des images acquises sur les différents modules laser (a) QCL₁ et (b) QCL₂₃₄.

Ce problème est temporel et semble être dû au laser lui-même, lorsqu'il passe d'un module à l'autre. Cette variation de puissance est préjudiciable pour l'étude et doit être prise en compte dans l'analyse des données.

4. Technique de compensation proposée

Rappelons que notre objectif de mesure est d'extraire le taux de réflectance. Pour cela, nous normalisons la réflectance de l'échantillon par celle de la référence.

Si ces deux images sont prises à des moments d'acquisition différents, elles ne peuvent pas être utilisées pour valider notre calcul en raison de leur dépendance temporelle et de l'incertitude de la puissance, comme confirmé dans la 3.2.

Les méthodes de normalisation de l'éclairage de l'échantillon par un éclairage de référence dans les systèmes d'imagerie hyperspectrale active utilisant un laser comme source d'éclairage sont les suivantes :

1. éclairage de référence interne [190]–[192] :
 - a. description :

Cette méthode consiste à utiliser une partie de l'échantillon lui-même comme éclairage de référence.

Une région spécifique de l'échantillon est choisie pour servir de référence interne. Les fluctuations de puissance optique du laser sont prises en compte lors de la mesure de la réflectance de la région de référence.

Les données de l'échantillon sont ensuite normalisées en fonction de la réflectance de cette région de référence.

b. contraintes :

Pour garantir l'efficacité de cette méthode, il est important que la région choisie comme référence interne soit homogène en termes de composition, de réflectance et stable au cours de l'acquisition des données.

Il convient de noter que la région de référence choisie doit être représentative de l'échantillon dans son ensemble pour assurer une normalisation précise.

Comme dans notre cas, nous travaillons avec des feuilles de plantes qui ne présentent pas les mêmes compositions dans les différentes zones, nous ne pouvons pas utiliser cette méthode.

Sauf si on prend différentes zones de référence pour chaque zone : zone foliaire, nervure principale, nervure secondaire.

Même la surface, des deux faces supérieures et inférieures, présente des différences de composition en stomates.

2. étalonnage externe [28]–[30] :

a. description :

Cette méthode utilise une source de référence externe pour normaliser la réflectance de l'échantillon.

La référence externe est positionnée à proximité de l'échantillon pour mesurer en temps réel la puissance du faisceau laser.

La source de référence peut être un matériau réfléchissant dont la réflectance est connue et stable.

L'éclairage est effectué simultanément, le faisceau laser étant divisé pour éclairer à la fois l'échantillon et la référence dans le même champ d'observation des imageurs. Le flux lumineux de l'échantillon est ensuite normalisé par rapport à celui de la référence, en tenant compte des fluctuations de puissance optique du laser. Cependant, il est important de noter qu'une division du faisceau laser entre la référence et l'échantillon peut entraîner une perte de flux lumineux sur l'échantillon.

b. contraintes :

L'utilisation d'une source de référence externe nécessite que cette source soit caractérisée en termes de réflectance et qu'elle présente une stabilité temporelle.

Il faut prendre en compte les erreurs potentielles liées à la distance et à la géométrie de l'éclairage entre le système d'observation, l'échantillon et la référence.

Une attention particulière doit être accordée à l'équilibre du partage du faisceau entre la référence et l'échantillon afin de minimiser toute perte de flux lumineux sur l'échantillon et garantir une mesure précise de la réflectance de la référence tout en maintenant un éclairage adéquat de l'échantillon.

Cependant, cette approche n'est pas applicable dans notre méthode en raison de l'absorption du signal infrarouge par les lames séparatrices et l'échantillon végétal (3.2). Cela génère un flux diffus en deçà de la détection minimale de nos détecteurs infrarouges. Cette situation est présentée et testée dans l'annexe 9.

4.1. Méthode d'estimation du taux de réflectance

Pour résoudre les fluctuations laser et normaliser précisément le flux diffusé de l'échantillon avec l'éclairage total du laser sans perte de puissance, nous avons développé une méthode. Cela implique la comparaison du flux collecté de l'échantillon avec celui de référence, évitant ainsi la division du faisceau laser et la répartition de puissance sur deux zones égales.

Pour mettre en pratique cette méthode et prendre en compte les fluctuations, nous avons fabriqué une référence secondaire d'étalonnage unique, spécialement conçue pour notre plage spectrale MIR. Cette référence unique est coupée en deux et illustrée dans les figure 50(a.b.) :

- **la référence interne** prend la forme d'un disque de 4 cm de diamètre, constituant ainsi un point de référence unique permettant le remplacement par l'échantillon végétal.
- **la référence externe périphérique** est conçue comme un anneau circulaire d'une épaisseur de 1 cm et d'un diamètre de 4 cm.

Cette référence est fabriquée et structurée de cette manière afin de garantir que les propriétés optiques résultant du dépôt et du matériau choisi soient comparables et proviennent du même traitement.

4.1.1. Références interne et externe

Dans cette partie, je présente la méthode utilisée pour fabriquer la référence secondaire, qui est similaire à la référence lambertienne commerciale de LabSphere "Infragold".

Cependant, pour nos besoins, cette référence secondaire doit être « sur mesure » afin de pouvoir le découper en forme de disque et d'anneau, comme expliqué précédemment.

Malgré nos recherches auprès des fournisseurs, aucun produit disponible sur le marché ne répondait à nos exigences en termes de flexibilité et de formes précises (disque, anneau) pour notre référence secondaire.

Par conséquent, nous avons décidé de le fabriquer nous-mêmes afin de répondre à nos besoins spécifiques.

Pour créer notre propre étalon secondaire, nous avons utilisé la microscopie focale pour estimer la taille moyenne des grains présents sur la référence commerciale "Infragold", voir figure 48(a). Ensuite, nous avons acheté des papiers de verre avec des grains de taille similaire ($\sim 30 \mu\text{m}$).

Cependant, les propriétés optiques de ces papiers de verre différaient, ce qui nous a conduits à réaliser un dépôt d'or par pulvérisation cathodique afin d'harmoniser leurs caractéristiques réfléchissantes. Ce traitement est détaillé dans l'annexe 10.

La première image de la figure 48 est une micrographie de la référence commerciale utilisée pour estimer la taille moyenne des grains, afin de déterminer la taille de papier de verre à utiliser dans l'étude. La deuxième image montre l'étalon secondaire avec son revêtement en or.

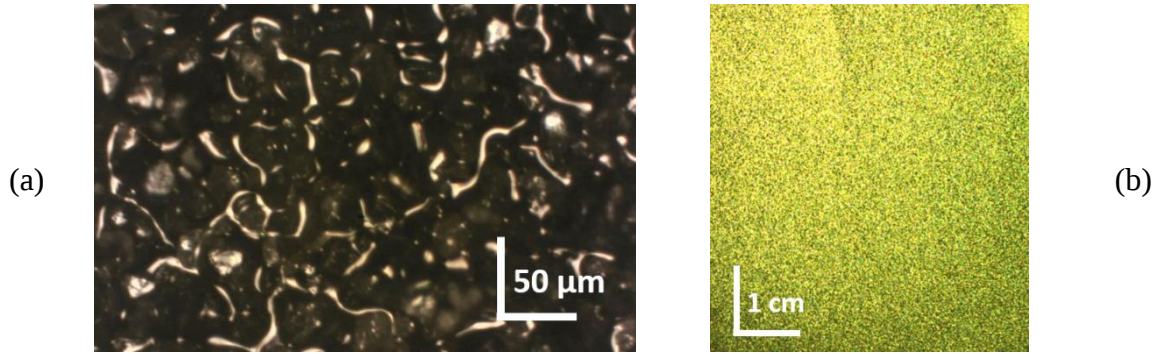


Figure 48 : (a) Micrographie de la référence commerciale "Infragold". (b) Etalon secondaire avec son revêtement en or.

4.1.2. Propriétés optiques

Pour utiliser l'étalon secondaire que nous avons fabriqué dans la gamme du MIR, nous devons caractériser sa réflectance en fonction des longueurs d'onde par rapport à celle de l'infragold, ainsi que sa diffusion en termes d'étalement sur les axes X et Y.

Cette caractérisation nous permettra de vérifier si les hypothèses formulées pour l'ajustement de la puissance, telles qu'elles ont été présentées dans la section précédente, restent valides.

Nous avons suivi la méthode de caractérisation de la puissance décrite dans 3.2 en effectuant des mesures de puissance sur l'étalon et sur la référence commerciale.

Les graphiques de la figure 49 présentent la normalisation des réponses globales entre l'étalon et la référence commerciale suivant les différentes gammes spectrales acquises avec les deux caméras thermiques.

Nous observons que le rapport entre ces deux réponses atteint une valeur stable d'environ 80% de réflectance dans le MIR.

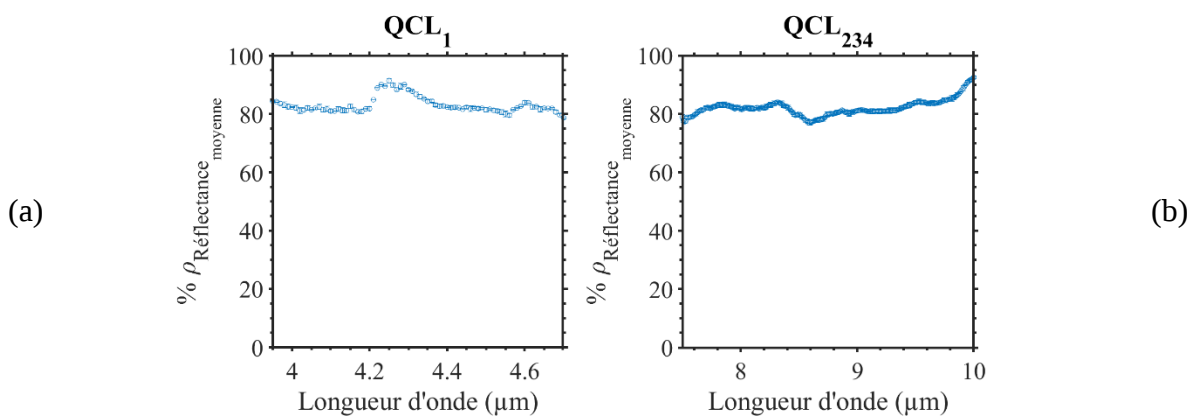


Figure 49 : La figure présente le taux de réflectance moyen de l'étalon secondaire par rapport à la référence commerciale suivant la gamme spectrale acquise du module laser QCL₁ (a) et des modules laser QCL₂₃₄ (b).

Ce qui confirme une bonne performance de notre échantillon en termes de réflectance optique dans cette plage spectrale.

Pour vérifier la diffusion du faisceau laser, nous caractérisons l'étalement. Celui-ci est défini conformément à ce qui est expliqué, dans la section (2.2), du faisceau pendant son interaction avec l'étalon secondaire.

Dans notre méthodologie expérimentale, nous avons fixé la référence externe sous la forme d'un anneau tout autour du centre de notre porte-échantillon. Ce porte-échantillon est composé de deux plaques en plastique avec un disque central de 5 cm de diamètre (figure 50).

Dans un premier temps, nous avons placé la référence circulaire à l'intérieur du disque central du porte-échantillon, comme illustré dans figure 50.

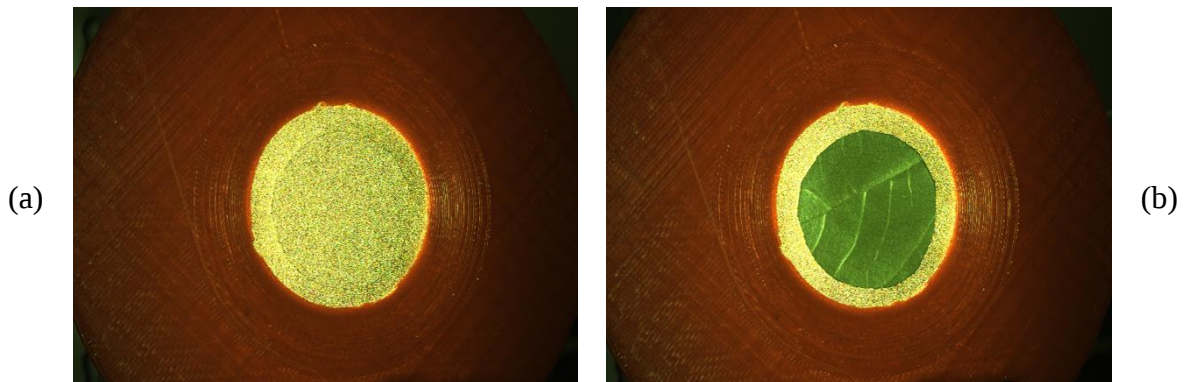


Figure 50 : Le porte-échantillon en rouge avec un anneau de référence d'épaisseur 1 cm entourant un disque central de diamètre 4 cm. (a) Le disque central est rempli par la référence secondaire. (b) L'échantillon végétal remplace la référence secondaire.

Dans les graphiques de la figure 51, les étalements du faisceau laser gaussien sont présentés suivant les axes X et Y .

À partir de ces graphiques, nous pouvons observer que l'étalement reste constant à environ 50 mm (5 cm) dans la zone d'intérêt, bien qu'il puisse légèrement diminuer.

Les incertitudes, quant à elles, sont négligeables, représentant seulement 0,02 % de variation. Cette constance des mesures confirme l'hypothèse selon laquelle l'étalement reste stable lors du balayage de la longueur d'onde, démontrant ainsi que le laser conserve sa forme gaussienne.

Nous observons que l'étalement suit une tendance similaire à celui de l'infragold (annexe 11), avec un étalement constant de 50 mm sur l'ensemble de la plage spectrale pour QCL_1 , présentant un coefficient de détermination supérieur à 80 %.

Cependant, pour QCL_{234} , le coefficient de détermination diminue de 80 % à 60 % en fonction du balayage spectral, comme cela déjà été observé dans les chapitres précédents.

Cette section vise à valider la caractérisation de l'étalon secondaire. Il présente une réflectivité constante d'environ 80 % par rapport à la référence commerciale sur l'ensemble des longueurs d'onde. De plus, il présente des propriétés de directivité et de diffusion similaires, avec un étalement constant d'au moins 50 mm, ce qui est conforme à nos besoins d'application.

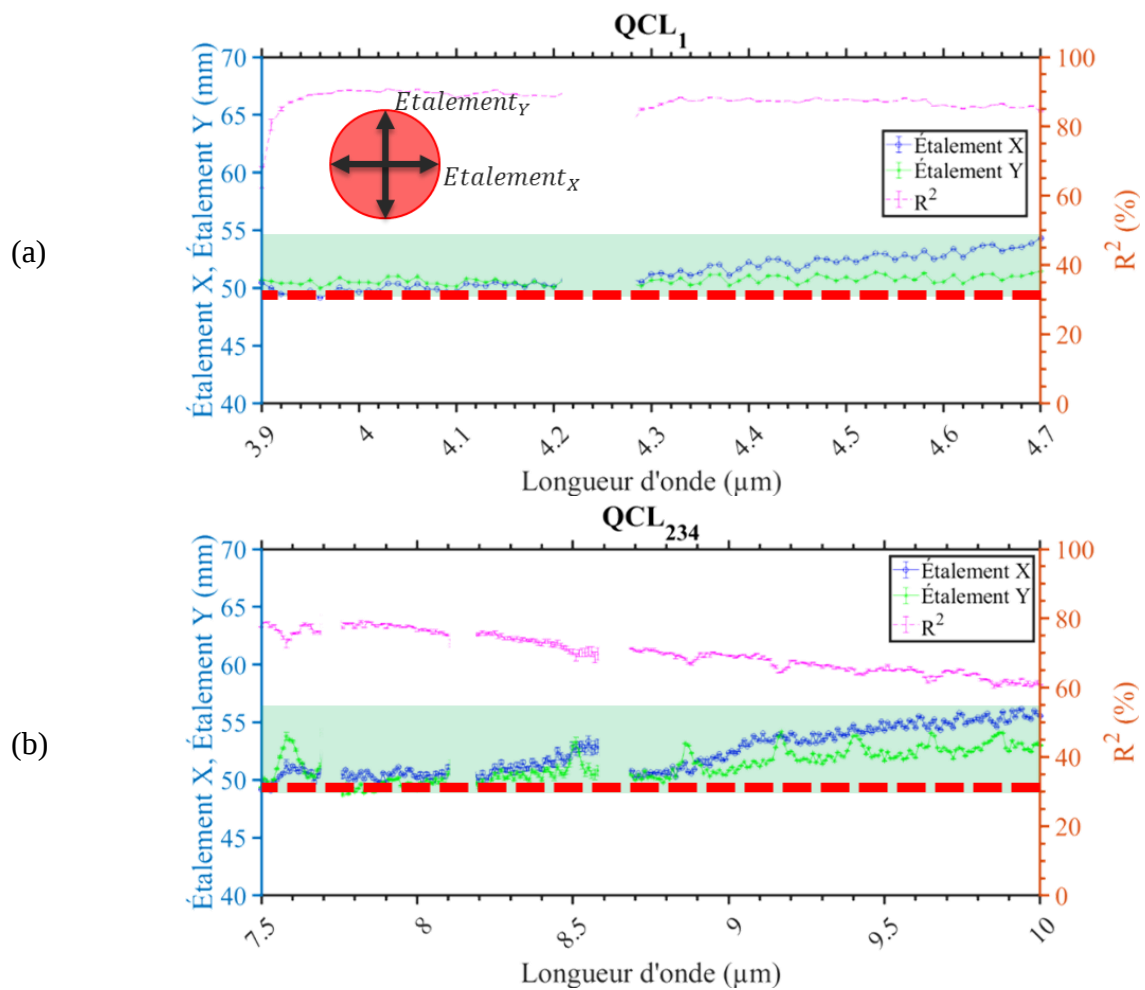


Figure 51 : Les étalements suivant X et Y ainsi que le coefficient de détermination R^2 en fonction des longueurs d'onde, de l'éclairage laser gaussien sur l'étalon secondaire, suivant les modules lasers (a) QCL_1 (b) QCL_{234} .

Plusieurs hypothèses ont été formulées pour atteindre notre objectif de normaliser le flux détecté sur l'échantillon avec celui collecté sur la référence, afin de calculer le taux de réflectance pixel par pixel :

1. une réduction de la taille de la zone d'intérêt de 1 mm (3 pixels) autour du périmètre circulaire, est appliquée pour éviter tout déplacement indésirable du faisceau laser lors du balayage spectral, comme le démontrent les résultats de la figure 85.
2. une hypothèse a été faite sur la similitude des fluctuations de l'éclairage gaussien aussi bien au centre qu'à la périphérie [196]. Cette hypothèse repose sur la symétrie radiale inhérente au faisceau gaussien, ainsi que sur le constat que les variations de puissance se manifestent de manière uniforme dans toutes les positions, du centre jusqu'aux bords de l'échantillon [197].
3. il a été considéré que la forme du faisceau laser est gaussienne et reste inchangée en termes de forme, mais varie en amplitude. Cette caractéristique, fournie par le fournisseur et validée par nos interpolations, a été prise en compte.

En conclusion, deux acquisitions effectuées à la même longueur d'onde sont comparables, étant donné qu'elles se situent au même emplacement spatial de l'éclairage. De plus, les fluctuations

sur la fonction gaussienne 2D sont du même ordre de grandeur, que ce soit au centre ou à la périphérie. La seule variable changeante est la fluctuation de puissance, qui varie d'environ 20 % comme illustre le graphe de la figure 47.

Notre approche pour pouvoir calculer le taux de réflectance de nos échantillons végétaux :

Modélisation de l'éclairage :

- à partir de l'image spectrale de référence, un modèle gaussien 2D de l'éclairage laser a été déduit, couvrant le centre et la partie périphérique.

Substitution du centre :

- en se basant sur l'image spectrale de l'échantillon, le centre correspondant à l'échantillon végétal et les bords à la référence périphérique ont été identifiés, puisqu'il ne change pas spatialement.

Comparaison des zones communes :

- en comparant ces zones communes, un coefficient de compensation de puissance a été calculé pour ramener l'éclairage sur l'échantillon à celui de la référence.

Calcul du coefficient de compensation :

- en utilisant les mesures de l'anneau de référence périphérique prises à différents moments, un coefficient a été dérivé pour corriger la mesure acquise de l'échantillon et l'aligner avec celles de la référence.

Grâce à ce protocole, nous sommes en mesure de compenser les fluctuations de puissance optique du laser du flux collecté de l'échantillon à la référence pour pouvoir appliquer la normalisation. Cela nous permet de calculer le taux de réflectance de l'échantillon.

La configuration qui résout notre problème est présentée dans la figure 52. Elle est similaire à celle de la figure 44, mais avec une modification concernant le porte-échantillon éclairé en prenant en compte la référence externe sous forme d'anneau.

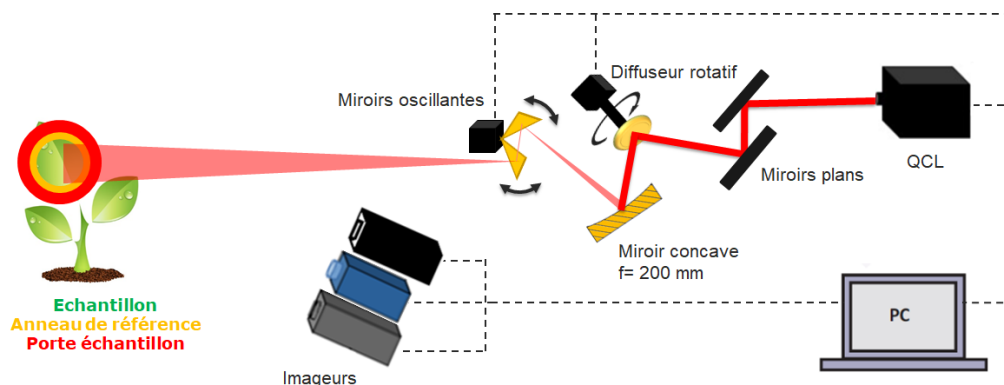


Figure 52 : Configuration utilisant un anneau de référence.

4.2. Compensation de la fluctuation de puissance

Pour mettre en place notre approche de compensation des fluctuations de puissance, les étapes sont détaillées comme suit :

Pour simuler notre problème, nous utilisons une modélisation basée sur une interpolation gaussienne 2D. Cette équation est caractérisée par une amplitude associée au centre d'éclairage en X et Y, ainsi qu'un étalement défini selon les directions X et Y.

Afin de tenir compte des fluctuations de puissance, nous simulons deux gaussiennes présentant des amplitudes différentes, acquises à la même longueur d'onde mais supposées sur deux temps différents « T_0 » et « T_1 ».

Étant donné que l'éclairage diffère entre la référence interne et l'échantillon végétal, nous calculons un coefficient en utilisant une zone identique présente dans les deux acquisitions distinctes, qui correspond à la référence externe.

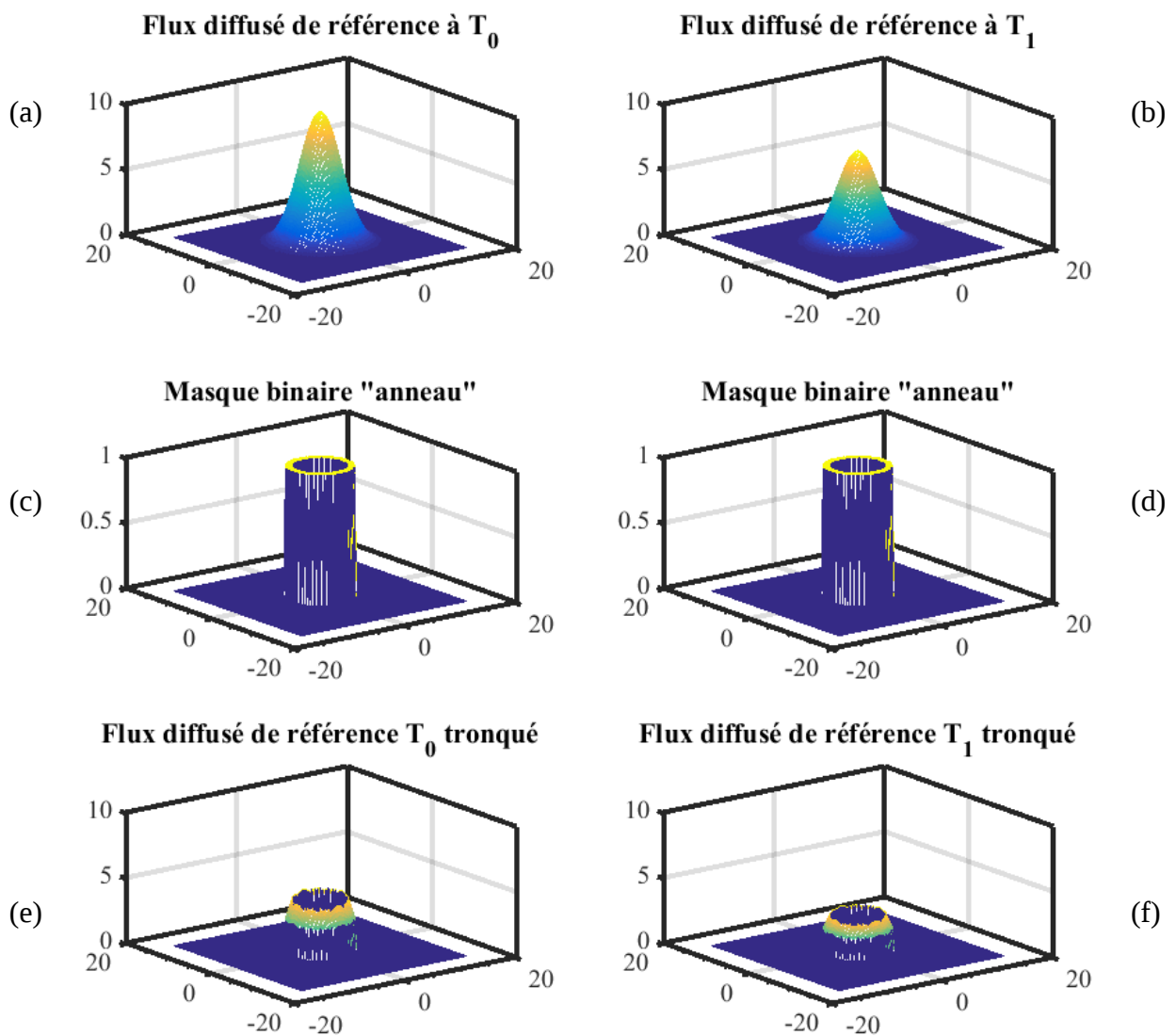


Figure 53 : Graphes représentant les gaussiennes simulées pour le calcul du coefficient d'ajustement.

Les images de la figure 53 représentent les éléments suivants :

- (a) le flux diffus de référence.
- (b) le flux diffus présentant une fluctuation exprimée par une diminution d'amplitude.
- (c) un masque binaire spatial appliqué à la référence externe.

- (d) le même masque (c) qui ne change pas spatialement d'une acquisition à l'autre.
- (e) l'application du masque (c) sur (a).
- (f) l'application du masque (d) sur (b).

Ces images illustrent notre approche pour tenir compte des fluctuations de puissance en utilisant des masques et en les appliquant aux flux diffus correspondants.

D'après les hypothèses mises en place, le laser présente une instabilité sur la puissance optique telle que :

$$A_0 = \alpha \times A_1 \quad (35)$$

Où α représente le scalaire à calculer. Ainsi dans nos expressions de nos gaussiennes :

$$G_0 = \alpha \times G_1 \quad (36)$$

Lorsque deux gaussiennes sont similaires mais présentent des amplitudes différentes, le coefficient d'ajustement (α) peut être calculé en utilisant l'autocorrélation de la gaussienne de référence et l'intercorrélation des deux gaussiennes.

Les étapes impliquées dans ce calcul sont les suivantes :

1. acquisition des données de deux éclairages laser gaussiens, y compris tous les paramètres permettant de modéliser leur forme tels que leurs amplitudes au centre, leurs coordonnées centrales, ainsi que leurs étalements sur les axes X et Y.
2. calcul de l'autocorrélation de la gaussienne de référence tronquée par la référence externe pour évaluer ses fluctuations spatiales.
3. calcul de l'intercorrélation entre les deux gaussiennes pour déterminer leur alignement relatif.

Pour une meilleure visualisation, la figure 54 présente deux maillages :

- la figure 54.a présente le maillage d'autocorrélation, normalisé par son maximum, de la gaussienne de référence tronquée par l'anneau.
- la figure 54.b présente le maillage d'intercorrélation entre les deux anneaux des deux gaussiennes identiques, avec une amplitude différente.

Ce maillage est également normalisé par le maximum de l'autocorrélation de l'anneau de la gaussienne de référence.

Dans la figure 54.a, le pic central indique la corrélation maximale lorsque la coupe d'anneau est parfaitement alignée sur elle-même.

La symétrie de l'anneau est clairement visible dans le maillage, avec des motifs de corrélation symétriques autour du pic central, indiquant une régularité dans la structure de l'anneau.

Les variations de corrélation sur le maillage révèlent les zones de forte et de faible corrélation, mettant en évidence les régions internes de l'anneau.

Les valeurs élevées dans le maillage indiquent une forte corrélation positive, qui se présente au pic central, illustrant les zones de superposition étroite des anneaux malgré la différence d'amplitude.

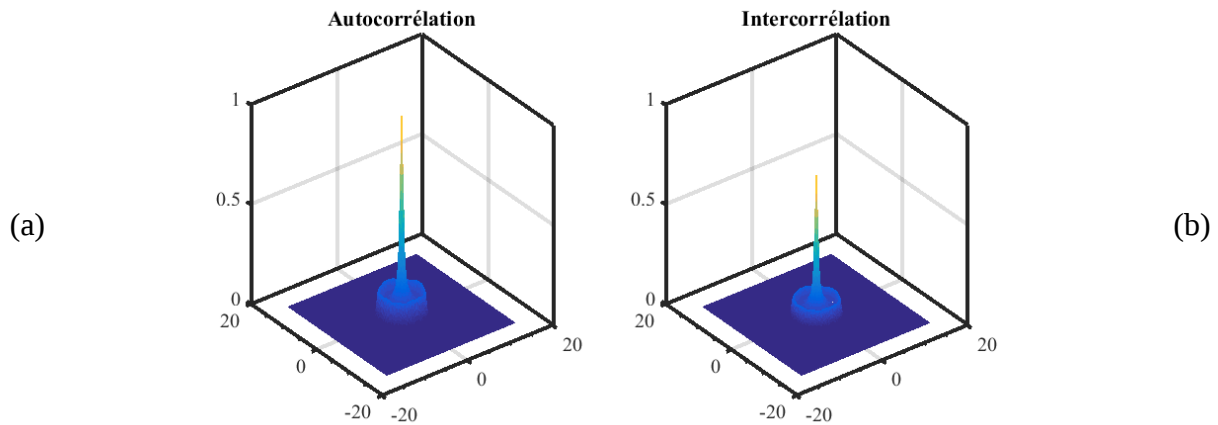


Figure 54 : (a) Le maillage de l'autocorrélation de la gaussienne de référence tronquée par l'anneau. (b) Le maillage de l'intercorrélation établit entre la deuxième gaussienne tronquée avec la première tronquée.

Les valeurs plus faibles mettent en évidence les zones où les anneaux présentent des différences significatives, que ce soit en termes d'amplitude ou de forme.

Le calcul du coefficient d'ajustement sera effectué par la suite, en utilisant les résultats de l'autocorrélation et de l'intercorrélation obtenus.

4. calcul du coefficient d'ajustement :

En divisant l'autocorrélation de la gaussienne de référence par l'intercorrélation des deux gaussiennes, nous obtenons le coefficient d'ajustement. Ce coefficient représente la relation entre les deux gaussiennes et indique l'ampleur de l'ajustement nécessaire pour aligner leurs amplitudes.

Par la suite nous obtenons :

$$\alpha = \frac{\text{Autocorrélation de la gaussienne de référence}}{\text{Intercorrélation des deux gaussiennes}} \quad (37)$$

Il est important de noter que cette méthode suppose que les deux gaussiennes sont similaires dans leur forme, à l'exception de leurs amplitudes comme dans notre cas.

Le coefficient d'ajustement, obtenu à partir de l'autocorrélation normalisée par l'intercorrélation, permet de rééchelonner la deuxième gaussienne afin de l'aligner sur la première en termes d'amplitude, tout en préservant leur similarité de forme.

En multipliant la deuxième gaussienne par ce coefficient, il est possible d'effectuer un ajustement proportionnel de son amplitude.

Pourquoi ne pas simplement utiliser un rapport des intensités pour le calcul du coefficient de compensation ? Cette approche, bien que simple, présente des limitations.

Tout d'abord, en calculant le rapport des intensités, nous ne prenons pas en compte l'impact du décalage du centre. Lorsque le centre de la gaussienne ne coïncide pas avec le centre de l'anneau, les valeurs tronquées de la gaussienne ne seront pas symétriques, affectant ainsi la

moyenne des valeurs tronquées. Cette approche ne tient pas compte des variations spatiales de la puissance laser.

En revanche, l'approche du rapport autocorrélation/intercorrélation présente des avantages. Tout d'abord, elle permet une compensation par l'autocorrélation, offrant ainsi une mesure de la similarité d'une gaussienne à elle-même à différents décalages. En calculant l'autocorrélation des deux gaussiennes tronquées, nous pouvons obtenir des informations sur leur forme et leur amplitude, même en cas de décalage.

De plus, en mesurant l'intercorrélation des deux gaussiennes tronquées, nous pouvons évaluer leur similitude l'une par rapport à l'autre. En comparant ensuite l'intercorrélation à l'autocorrélation, nous obtenons des informations sur la différence d'amplitude entre les deux gaussiennes.

Cependant, cette approche présente également des inconvénients. Elle est plus complexe à mettre en œuvre, nécessitant un traitement d'image avancé.

Algorithme de traitement pour le calcul du taux de réflectance

Comme déjà présenté dans la section 4.1.1, nous avons évoqué l'utilité de nos deux références interne et externe.

L'externe sera présente dans les deux acquisitions distinctes, il entoure à la fois :

- la référence : autour de la référence interne.
- l'échantillon : autour de l'échantillon végétal à étudier.

Dans cette section, j'introduis l'algorithme théorique développé pour calculer le taux de réflectance de l'échantillon, pixel par pixel, en prenant le coefficient d'ajustement.

Les étapes du protocole sont les suivantes :

1. mettre en place les deux références dans le porte échantillon dans le champ d'observation des imageurs MIR.
2. acquérir une image éclairée avec une image du fond pour isoler le flux de référence.

$$\rightarrow \widehat{Im_{référence}}(x, y, t, \lambda)$$

3. interpoler la gaussienne 2D ($\widehat{IG}$) de l'éclairage de référence isolé (2) suivant ce modèle :

$$\rightarrow \widehat{IG}(x, y, t, \lambda) = A(t, \lambda) \times e^{(-(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2})}$$

Critères d'évaluation : R^2

4. générer un masque binaire géométrique (M_{anneau}) pour isoler l'éclairage sur la référence externe.
 5. appliquer M_{anneau} (5) sur le $\widehat{IG}$ (3)
- $$\rightarrow \widehat{IG}(x, y, t, \lambda) * M_{anneau}(x, y)$$
6. calculer de l'autocorrélation de $\widehat{IG}(x, y, t, \lambda) * M_{anneau}(x, y)$.
 7. remplacer la référence interne par l'échantillon végétal.

8. acquérir une image éclairée avec une image du fond pour isoler le flux diffusé par l'échantillon végétal :

$$\rightarrow \widehat{Im_{\text{échantillon}}}(x, y, t, \lambda)$$

9. appliquer le masque binaire M_{anneau} (4) sur l'image du flux isolé $\widehat{Im_{\text{échantillon}}}$ (8)

$$\rightarrow \widehat{Im_{\text{échantillon}}}(x, y, t, \lambda) * M_{\text{anneau}}(x, y)$$

10. calculer l'intercorrélation entre $\widehat{Im_{\text{échantillon}}}(x, y, t, \lambda) * M_{\text{anneau}}(x, y)$ et $\widehat{IG}(x, y, t, \lambda) * M_{\text{anneau}}(x, y)$.

11. calculer le coefficient d'ajustement au flux diffusé de référence interpolé (3) sur la zone identique de la référence externe (6) et (10)

$$\rightarrow \hat{\alpha} = \frac{\text{autocorr}}{\text{intercorr}}$$

12. Appliquer le coefficient d'ajustement sur $\widehat{Im_{\text{échantillon}}}$ (8) pour asservir la fluctuation en puissance du laser

$$\rightarrow \widehat{Im_{\text{échantillon}}}(x, y, t, \lambda) \times \hat{\alpha}$$

13. générer un masque binaire de la zone d'intérêt situé à l'intérieur de l'anneau M_{ROI} :

$\rightarrow$ propriétés du masque :

$$\begin{aligned} \bullet \quad & \text{If } \widehat{IG}(x, y, t_1, \lambda) > \frac{A(t_1, \lambda)}{e^2} \rightarrow M_{ROI}(x, y) = 1 \\ \bullet \quad & \text{If } \widehat{IG}(x, y, t_1, \lambda) < \frac{A(t_1, \lambda)}{e^2} \rightarrow M_{ROI}(x, y) = 0 \end{aligned}$$

14. calculer le taux de réflectance de l'échantillon en normalisant $\widehat{Im_{\text{échantillon}}}$ par $\widehat{Im_{\text{référence}}}$ et en appliquant l'équation suivante :

$$\rho_{\text{échantillon}}(x, y, t, \lambda) = \frac{(\widehat{Im_{\text{échantillon}}}(x, y, t, \lambda) \times \hat{\alpha}) * M_{ROI}(x, y)}{\widehat{IG}(x, y, t, \lambda) * M_{ROI}(x, y)} \quad (38)$$

4.3. Résultats et discussions

Afin d'évaluer l'efficacité du protocole de traitement visant à réduire les fluctuations de puissance lors de différents balayages spectraux, une série de dix répétitions d'acquisition d'images a été réalisée.

Celles-ci ont été effectuées en utilisant différents modules laser, mais cette fois-ci sur l'étalon secondaire, plutôt que sur une feuille de plante.

Cette décision a été prise dans le but de mettre à l'épreuve le protocole sur un matériau stable, exempt d'absorption d'infrarouge, notamment en raison de la présence d'eau dans la feuille de plante.

La première acquisition de cette série a été définie comme la référence, à partir de laquelle toutes les autres images ont été alignées. Pour évaluer l'efficacité de cette méthode, la somme du flux global a été calculée sur tous les pixels situés à l'intérieur de la zone d'intérêt.

Les résultats de la puissance moyenne, accompagnés des barres d'erreur, pour ces neuf répétitions alignées sur la référence, sont présentés dans les graphiques de la figure 55 pour les modules laser QCL₁ (a) et QCL₂₃₄ (b).

Il est important de noter une réduction d'environ 20 % de la puissance globale par rapport au spectre moyen de puissance. Cette réduction est cohérente avec la réflectance de l'étalon secondaire, qui atteint environ 80 % par rapport à la référence commerciale, comme l'indique le graphique de réflectance dans la figure 49.

Lors de la comparaison des fluctuations de puissance avec celles acquises sur l'infragold, comme illustré dans la figure 47, une réduction significative de l'écart par rapport à la valeur moyenne est observée.

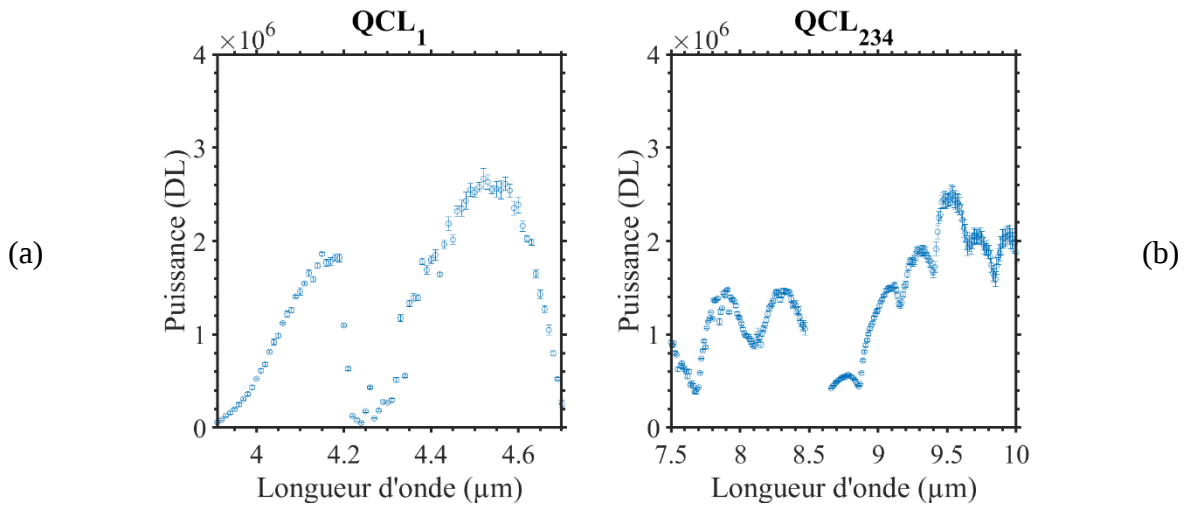


Figure 55 : Graphiques présentant la puissance moyenne de 9 balayages spectraux, avec les barres d'erreurs associées pour les modules laser (a) QCL₁ et (b) QCL₂₃₄, corrigés de la puissance en utilisant la méthode de compensation de la fluctuation par rapport à une référence.

Les fluctuations sont réduites à 2,8 % par rapport à une valeur initiale de 20 %, qui était observée sur l'infragold avant l'application de cette technique.

En conclusion, ces résultats confirment que le protocole de traitement utilisé offre une solution pour compenser les fluctuations de puissance par post-traitement, ce qui est essentiel pour obtenir des données de mesure précises dans le domaine imagerie hyperspectrale dans l'infrarouge [198], [199].

5. Conclusion

Dans le premier chapitre, nous avons exploré les sources d'incertitude liées aux composants optiques, à la source lumineuse et au phénomène du speckle généré par le laser lors de la mesure du taux de réflectance.

Dans le deuxième chapitre, nous avons quantifié un défaut dans les images résultant du fond thermique et du speckle :

- nous avons réussi à réduire ce défaut de 40 % grâce à notre méthode d'intégration avec un diffuseur rotatif.

- de plus, nous avons prévu d'utiliser une interpolation gaussienne 2D, après un filtrage numérique ajusté à la taille du grain de speckle, pour normaliser la réponse de l'échantillon et obtenir le taux de réflectance associé.
- cependant, pour les images de l'échantillon végétal éclairé, nous utiliserons uniquement l'éclairage résultant du passage du faisceau laser à travers le diffuseur rotatif, sans effectuer d'interpolation.

Dans ce chapitre, nous avons abordé les distorsions de mesure liées à l'utilisation d'une source laser à cascade quantique. Ces distorsions sont dues au déplacement du faisceau laser lors du balayage spectral, comme indiqué dans la 2.3, ainsi qu'aux fluctuations de puissance laser décrites dans la 3.2.

Pour corriger le déplacement du faisceau laser, nous avons étudié diverses techniques d'asservissement dans la littérature. Nous avons choisi d'utiliser des miroirs dorés motorisés adaptés à l'infrarouge, calibrables une seule fois en utilisant une table de consultation de position angulaire des miroirs, pour compenser les fluctuations constantes.

Nous avons caractérisé ce déplacement, obtenant une plage de 4 mm en x et en y avec une incertitude de 1 mm pour le premier QCL, et une plage de déplacement de 8 mm avec une incertitude de 2 mm.

Nous avons démontré que la position à une même longueur d'onde reste pratiquement constante, avec une incertitude de seulement 0,2 mm, et que le déplacement est cohérent lors du balayage spectral.

Après l'application de la correction, les fluctuations spatiales initiales ont été réduites à une plage de 1 mm, avec une incertitude de 0,5 mm, ce qui est acceptable pour des applications d'imagerie spectroscopique.

Bien que notre approche ne se focalise pas sur chaque longueur d'onde, mais plutôt sur des plages de longueurs d'onde, ce choix est justifié par des déplacements restant en dessous de 1 mm, ce qui reste acceptable pour les applications d'imagerie hyperspectrale active. Une perspective future pourrait être d'envisager une correction plus précise pour des applications médicales nécessitant une meilleure précision.

Pour résoudre les fluctuations de puissance, nous avons caractérisé les fluctuations de puissance à travers toutes les longueurs d'onde en utilisant l'infragold. Cette étude a révélé une fluctuation de 20 % sur le spectre.

Dans notre approche, nous avons d'abord éclairé la référence, puis l'échantillon, et normalisé les deux images du flux diffus obtenu. Cependant, en raison de ces fluctuations, nous devons ramener le deuxième signal au niveau du premier en utilisant un anneau de référence présent dans les deux images.

Cet anneau de référence est composé de notre étalon secondaire, fabriqué en salle blanche et caractérisé en termes de propriétés optiques par rapport à l'infragold. Il est utilisé lors de l'acquisition des images de référence et de l'échantillon.

Pour corriger l'éclairage par rapport à la référence, nous avons démontré que le faisceau laser conserve sa forme et sa position spatiale, mais présente des fluctuations d'amplitude. Nous avons donc calculé un coefficient d'ajustement pour compenser ces fluctuations.

Notre algorithme de compensation des fluctuations a permis de réduire les fluctuations du signal de 20 % à 2,8 % sur l'ensemble du spectre

Pour avancer vers notre objectif principal, nous intégrons toutes ces étapes dans notre équation d'extraction du taux de réflectance pixel par pixel. Dans le dernier chapitre de notre travail, nous évaluerons également notre système dans une application liée aux végétaux et nous discuterons de ses diverses applications possibles.

IV. Evaluation IHS avec une application agrophotonique

1. Objectifs

Dans ce chapitre, nous présentons la mise en œuvre de notre système dans les applications agrophotoniques, tel que caractérisée dans les chapitres précédents.

Notre objectif principal est de mesurer le taux de réflectance.

Pour ce faire, nous commençons par rappeler une relation de base entre le signal de l'échantillon et le signal de référence, déjà introduite dans le chapitre 1, nous proposons de compléter cette relation en introduisant les perturbations et incertitudes étudiées lors des chapitres précédents.

Ces incertitudes sont principalement liées au speckle, ainsi qu'à certains composants optoélectroniques.

Dans le chapitre 2, nous avons étudié la réduction du speckle sur une référence lambertienne en utilisant un diffuseur statique et en rotation. Nous avons réussi à réduire le contraste du speckle de 40% d'une valeur de départ avec le diffuseur en rotation dans la gamme spectrale du MIR.

Pour rappel, l'éclairage gaussien de référence dans l'équation, du taux de réflectance, est obtenu par interpolation gaussienne, précédée d'un filtre passe-bas qui tient compte de la taille des grains de speckle.

Dans le but d'améliorer la réduction du speckle, nous avons adopté une approche combinant la rotation d'un diffuseur réfléchissant avec l'utilisation d'un filtre passe-bas pour l'éclairage de référence.

Dans le chapitre 3, nous avons abordé les autres incertitudes liées à la source d'éclairage :

- Correction spatiale : Nous avons résolu les distorsions liées au déplacement du faisceau laser pendant le balayage spectral en utilisant des miroirs dorés motorisés adaptés à l'infrarouge, avec calibration initiale. Cela a permis de réduire les déplacements à une plage de 1 mm après correction.
- Correction des fluctuations de puissance : Nous avons identifié des fluctuations de puissance de 20 % sur l'ensemble du spectre. Pour y remédier, nous avons employé un anneau de référence composé d'un étalon secondaire, réduisant les fluctuations à 2,8 % sur l'ensemble du spectre. Nous avons confirmé la stabilité du déplacement à une même longueur d'onde et son suivi constant pour différentes longueurs d'onde grâce à notre étude de répétabilité. L'anneau de référence a été utilisé pour acquérir à la fois la référence et l'échantillon végétal.

Étant donné que nous avons déjà démontré que le faisceau laser conserve sa forme et sa position spatiale, mais présente des fluctuations d'amplitude, nous pouvons calculer un coefficient d'ajustement pour compenser ces fluctuations.

En utilisant la partie commune de l'anneau de référence présente sur le bord, nous pouvons ramener le flux acquis sur l'échantillon à la même échelle que le flux diffus de référence.

En conclusion, nous reprenons l'équation développée pour calculer le taux de réflectance, en mettant en avant les valeurs utilisées. Cette équation est essentielle pour déterminer avec précision le taux de réflectance pixel par pixel de l'échantillon étudié.

$$\rho(x, y, \lambda) = \frac{I_{éch_{mes}}(x, y, \lambda) - \left(I_{fond_{éch}}(x, y) \pm B_{fond_{éch}}(x, y) \right) \pm \Delta I_{échantillon}(x, y, \lambda) / B_{laser_{éch}}(x, y, \lambda)}{I_{réf_{mes}}(x, y, \lambda) - \left(I_{fond_{réf}}(x, y) \pm B_{fond_{réf}}(x, y) \right) \pm \Delta I_{réf_{érence}}(x, y, \lambda) / B_{laser_{réf}}(x, y, \lambda)} \quad (39)$$

Cette équation serait prise en compte pour le calcul du taux de réflectance pixel par pixel de l'échantillon végétal à étudier.

Nous tenons également à souligner d'autres aspects importants des performances de notre système d'imagerie.

La résolution spectrale est de 10 nm, conforme aux spécifications fournies par le fabricant de notre équipement. Il convient de noter que cette résolution est obtenue en utilisant notre source d'éclairage contrôlée plutôt que des filtres avec un éclairage passif [4], [99].

En ce qui concerne la résolution spatiale, suite à un étalonnage basé sur la taille réelle de l'échantillon et la dimension des pixels, la résolution spatiale est de 2 mm, avec une distance de 30 cm entre les capteurs et l'échantillon.

Cette résolution est comparable à celle d'un microscope optique standard, généralement de 0,2 à 0,5 mm [184], permettant l'analyse des informations spectrales spécifiques de chaque composant de la feuille tels que les nervures principales, les nervures secondaires, et la zone foliaire.

Les nervures principales assurent le transport des nutriments et de l'eau dans la feuille, les nervures secondaires sont des structures plus petites ramifiées à partir des nervures principales, et la zone foliaire est responsable de la photosynthèse. L'accès à ces informations spectrales est essentiel pour comprendre l'architecture et la physiologie des plantes pour analyser la croissance de la plante [200].

Notre évaluation du système visera à démontrer de manière précoce la capacité de détecter le stress hydrique des plantes et bien d'autres applications.

Ce chapitre est structuré en sections distinctes :

- caractérisation des échantillons végétaux
 - effets des conditions de sécheresse sur les échantillons végétaux,
 - impact des conditions de stress sur la réponse spectrale dans la plage infrarouge.
- méthodologie et équipement pour la mise en place d'un cahier des charges expérimental
 - composition et préparation des échantillons ainsi que l'application du stress,
 - description détaillée du banc optique utilisé,
 - déroulement de l'expérience sur une période de dix jours.
- comparaison des performances avec le dispositif hyperspectral antérieur.
- algorithmes d'extraction du taux de réflectance pixel par pixel.
- segmentation à partir des images de taux de réflectance.
- analyse et exploitation des résultats de taux de réflectance.

2. Caractérisation spectrale en eau de la végétation

Les plantes subissent des fluctuations environnementales, engendrant des stress impactant leur développement. Deux types de stress les affectent : les stress biotiques, causés par des organismes vivants, et abiotiques, résultant de facteurs environnementaux comme le manque d'eau.

Cette étude se concentre sur le "stress hydrique", résultant du manque d'eau. Je débute par décrire brièvement la structure des feuilles, puis aborde l'importance de l'eau pour les plantes et les conséquences du stress hydrique sur leur physiologie. Enfin, j'explore l'utilisation potentielle de l'infrarouge pour détecter l'état hydrique des plantes, améliorant ainsi la gestion du stress hydrique dans les cultures.

2.1. Structuration et constitution biochimique des feuilles

La structure d'une feuille comporte plusieurs couches entre les épidermes supérieur et inférieur, formant une barrière protectrice. La fine cuticule transparente de la couche externe régule l'évaporation pour maintenir un équilibre hydrique adéquat [201].

La figure 56 illustre le "parenchyme palissadique", avec des cellules allongées contenant la majorité des chloroplastes pour la photosynthèse. En contraste, le "parenchyme lacuneux" est composé de cellules variées, disposées de manière irrégulière, favorisant la circulation de l'oxygène (O_2), du dioxyde de carbone (CO_2), et de l'eau (H_2O) à travers la plante [202].

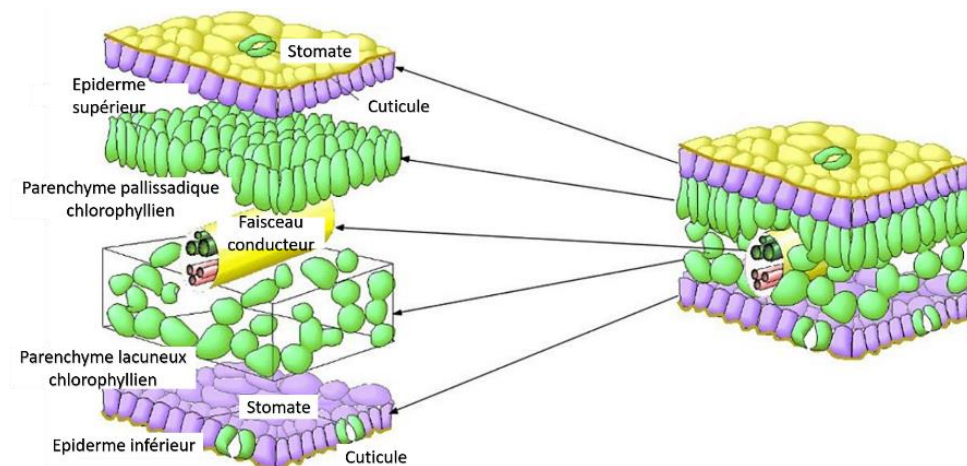


Figure 56 : Structure d'une feuille d'une plante [203]

Les stomates, constitués de deux cellules dans l'épiderme des feuilles, jouent un rôle crucial dans la régulation de la transpiration et les échanges gazeux [204], [205]. Ces échanges, connus sous le nom de photosynthèse, convertissent l'énergie solaire en substances nutritives [206], [207].

La photosynthèse absorbe le dioxyde de carbone et l'eau, produisant du dioxygène et des molécules organiques telles que le sucre [11], [12].

La figure 57 présente une illustration des stomates du Bégonia, montrant à la fois leur état ouvert et fermé, regroupés en paquets sur une feuille. Les stomates ouverts ont une longueur moyenne de 20 μm et une largeur variant de 5 à 15 μm [208], [209].

La taille des stomates, similaire à la longueur d'onde de notre gamme spectrale, permet d'obtenir des informations sur leur ouverture en mesurant la réflectance. Ces données sont utiles pour étudier la physiologie des plantes, notamment la détection du stress hydrique, où des stomates fermés augmentent la réflectance dans la bande infrarouge [210]. La régulation de leur ouverture dépend de facteurs environnementaux cruciaux :

- l'ouverture stomatique est induite par l'intensité lumineuse et se referme en l'absence de lumière.
- les stomates se ferment en réponse à une augmentation de la concentration de dioxyde de carbone (CO_2), lorsque la plante n'a plus besoin de CO_2 pour la photosynthèse.
- en cas de sécheresse du sol, les stomates se ferment pour réduire la transpiration et préserver l'humidité dans la plante.

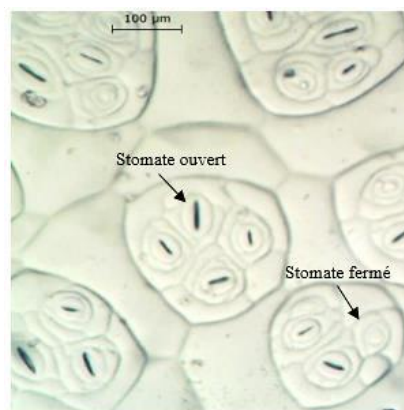


Figure 57 : Etat des stomates de la surface de feuille du Bégonia regroupés en paquet (Groupe Roulier).

La composition biochimique des feuilles comprend divers éléments. L'eau représente généralement entre 50% et 90% de la masse totale d'une feuille fraîche [211].

Ainsi, la mesure du contenu en eau constitue un indicateur fiable de l'état physiologique de la feuille [212]–[214].

En plus de l'eau, les feuilles contiennent d'autres constituants importants tels que la lignine, la cellulose et les pigments chlorophylliens [56], [204], [215]. Ces pigments chlorophylliens jouent un rôle essentiel dans l'absorption de la lumière nécessaire à l'activité photosynthétique.

2.2. Importance de l'eau pour la végétation

L'eau joue un rôle important dans trois fonctions principales des plantes : le transport des nutriments du sol vers les organes aériens, facilitant les échanges gazeux par évaporation au niveau des feuilles, et assurant la turgescence des cellules végétales.

La quantité d'eau nécessaire pour la croissance varie selon le type de culture et les conditions météorologiques. Par exemple, la production d'un kilogramme de salades requiert en moyenne 25 litres d'eau d'irrigation, tandis que les pommes de terre peuvent nécessiter jusqu'à 24 fois plus [216].

2.3. Stress hydrique et conséquences

En réponse au stress hydrique, les plantes déploient une série de modifications physiologiques, morphologiques et phénologiques.

Une stratégie défensive adoptée par les plantes est la fermeture de leurs stomates afin de minimiser les pertes en eau [217]–[219].

Cependant, cette fermeture entraîne également une limitation de l'entrée de dioxyde de carbone (CO_2), perturbant ainsi l'activité photosynthétique et entraînant une diminution du rendement.

En conséquence, l'énergie qui devait être dissipée par transpiration est emprisonnée, conduisant à une élévation de la température foliaire [205], [220].

Le stress hydrique exerce un impact direct sur la croissance des racines et provoque une réduction de la surface foliaire des plantes, une diminution du contenu en chlorophylle, ainsi qu'une réduction du taux de couverture du sol, qui représente la proportion de la surface du sol couverte par les feuilles.

Ces modifications contribuent à une diminution de la biomasse des plantes [205], [220]. De plus, le stress hydrique ralentit la croissance des plantes, pouvant même entraîner un arrêt complet de leur croissance.

Dans l'étude menée par Kotchi, une analyse comparative de l'activité photosynthétique a été réalisée entre des plantes soumises à un stress et des plantes témoins au stade de développement, voir la figure 58.

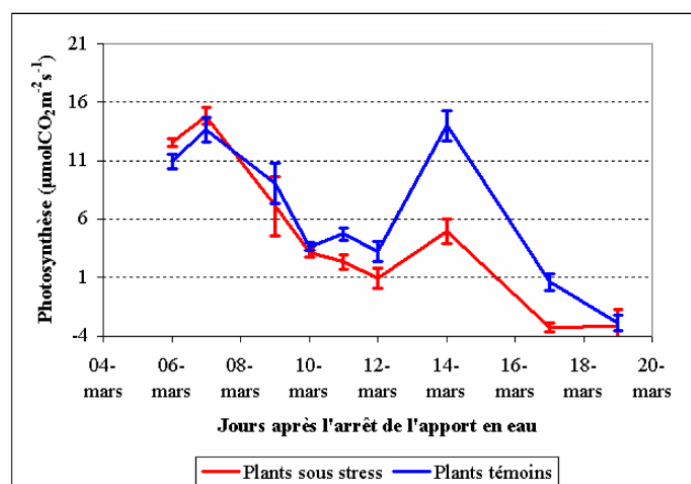


Figure 58 : Évolution de la photosynthèse des plantes témoins et des plantes stressées au développement des feuilles (Kotchi 2004). Les plantes témoins sont irriguées le 06, 10 et 13 mars.

Les résultats obtenus montrent qu'après huit jours de mesures, il y a une diminution détectable de l'activité photosynthétique chez les plantes soumises au stress, tandis que chez les plantes saines, cette activité varie en fonction du niveau d'irrigation appliqué [205].

2.4. Moyen de détection du stress hydrique

Diverses méthodes de détection du stress hydrique chez les plantes ont été étudiées dans la littérature scientifique, notamment l'imagerie visible [6], [221], l'imagerie de fluorescence

[225], [226], l'imagerie thermique [224], l'imagerie proche infrarouge [225], [226] et l'imagerie hyperspectrale [227]–[229].

Je me concentre principalement sur l'imagerie hyperspectrale infrarouge en raison de son potentiel pour caractériser le stress hydrique, comme le démontre notre étude antérieure portant sur la détection précoce du stress hydrique chez les tournesols [230].

L'infrarouge (3-16 μm) est couramment utilisé pour analyser les interactions moléculaires, et l'étude de Buitrago en 2017 [56] souligne l'intérêt des spectres infrarouges dans l'identification de caractéristiques foliaires telles que la teneur en eau et les molécules foliaires (lignine, cellulose).

Les molécules, ainsi que la teneur en eau, présentent des bandes d'absorption infrarouge dans la plage du moyen infrarouge (2,5 – 10 μm). Une étude sur des rhododendrons soumis à différents traitements a révélé des variations spectrales, notamment entre 7 et 14 μm , illustrées dans la figure 59, montrant une augmentation de l'émissivité suite à un traitement à température ambiante et sec (19°C) pendant trois et six mois.

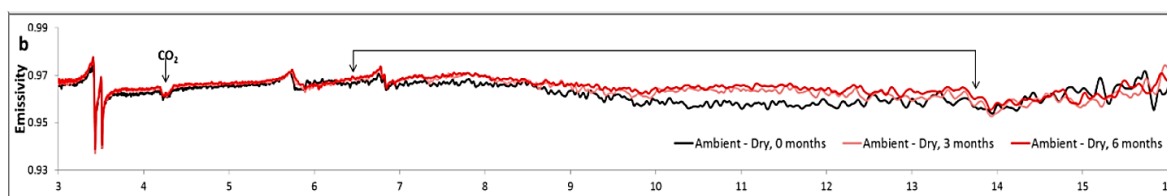


Figure 59 : Spectres moyens des feuilles de rhododendron pour un traitement sec de 3 à 6 mois [56].

En plus, Behmann [231] a souligné l'efficacité de l'imagerie hyperspectrale (430 à 890 nm) pour détecter le stress hydrique chez les plantes. Cette approche analyse les changements de réflectance spectrale des feuilles, permettant de classer les plantes bien arrosées et celles stressées.

Une étude a utilisé des images hyperspectrales de 12 plantes d'orge cultivées dans des conditions contrôlées, réparties en trois groupes selon leur niveau d'irrigation.

Les images, enregistrées sous un éclairage contrôlé avec une résolution spectrale d'environ 4 nm sur 120 bandes, ont été prises quotidiennement pendant 20 jours, commençant un jour après la réduction de l'eau.

Les résultats, représentés dans la figure 60, utilisent une classification des images visibles avec le bleu pour les zones non stressées à forte teneur en chlorophylle, le rouge pour les zones fortement stressées, et le blanc pour les pixels de fond supprimés.

Cette approche combinée à l'imagerie hyperspectrale a permis une détection du stress hydrique, avec une distinction entre les plantes témoins et les plantes stressées à partir du 8ème jour.

La gamme spectrale MIR n'était pas exploitée dans l'imagerie hyperspectrale. Ainsi, nous avons décidé de mettre en place un système d'imagerie hyperspectrale infrarouge pour caractériser le stress hydrique chez les plantes [10].

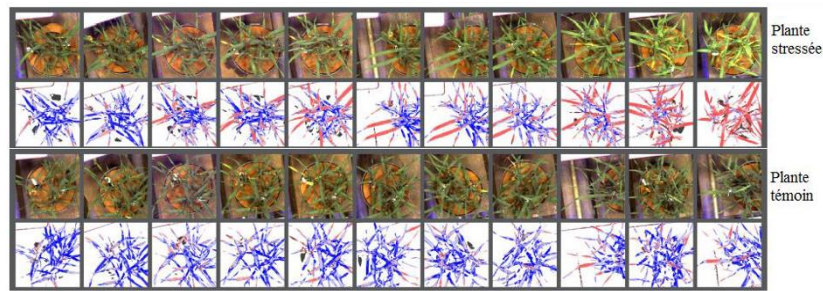


Figure 60 : Images d'orge sur 11 jours : 1ère rangée, plante stressée ; 3ème rangée, plante témoin ; 2ème et 4ème rangées, fausses couleurs des étiquettes prédites [231].

Dans la section suivante, je décrirai brièvement l'expérience d'évaluation de mon système, couvrant les caractéristiques des échantillons végétaux, leur environnement de croissance, la méthodologie de stress hydrique, et les étapes d'extraction de l'information spectrale avec le calcul du taux de réflectance des feuilles pixel par pixel. Ces informations seront essentielles pour l'interprétation des résultats.

3. Matériel et méthodes

Mon objectif est d'observer l'évolution des spectres de réflectance en fonction du stress hydrique sur différentes zones d'intérêt définies par le spécialiste. Ensuite, je vise à détecter de manière précoce le stress hydrique avant qu'il ne soit visible à l'œil humain.

Pour cela, j'ai appliqué deux régimes d'irrigation à deux groupes distincts de tournesols :

- les plantes de référence : soumises à un régime d'irrigation régulière maintenant le sol à 80 % de sa capacité maximale de rétention d'eau, également connue sous le nom de capacité au champ.
- les plantes stressées : privées d'irrigation et, depuis le pesage quotidien des pots, l'extraction du pourcentage d'eau est estimée.

Voici une description détaillée de ces éléments.

3.1. Mise en culture des échantillons végétaux

Le protocole de mise en culture a été établi avec notre partenaire industriel. Les plantes de tournesols ont été cultivées dans une chambre à 28 °C, 60 % d'humidité et 550 ppm de CO₂ (voir figure 61).

La chambre était équipée de :

- un système de ventilation pour renouveler l'air et réguler la température et l'humidité,
- un système d'éclairage, comprenant des LED avec trois spectres lumineux (380 à 500 nm, 430 à 700 nm, 600 à 800 nm) et une lampe à décharge.

Le système d'éclairage était automatisé par une console de gestion permettant de contrôler l'allumage et l'extinction des lumières au cours de la journée.

Les plantes étaient soumises à un cycle d'éclairage de 16 heures par jour, suivi de 8 heures d'obscurité.



Figure 61 : Croissance des plantes de tournesols au laboratoire dans une chambre de culture.

Les plantes ont été pré-cultivées pendant quatre semaines dans ces conditions afin de favoriser le développement de feuilles suffisamment larges pour les mesures ultérieures. Toutes les plantes ont été arrosées avec la même quantité d'eau.

3.2. Application du stress hydrique

Au début de l'expérimentation, toutes les plantes suivent une alimentation identique. Cinq plantes sont séchées pour extraire le poids sec, représentant le poids du sol, de la plante et du pot, déterminé par la moyenne de leur poids après 1 mois sans irrigation.

Le poids total est la somme du poids sec et du poids de l'eau ajouté. En utilisant le poids total du pot de la plante arrosée jusqu'à saturation (100% CC), nous calculons la quantité d'eau ajoutée, manifestée par l'écoulement d'eau. Le poids de l'eau à saturation est calculé par l'équation suivante :

$$Poids_{total_{100\% CC}} = Poids_{sec} + Poids_{eau_{100\% CC}} \quad (40)$$

Selon l'équation 40, le poids de l'eau nécessaire pour atteindre la saturation est de 2600 g. Ce poids est essentiel pour le calcul de la quantité d'eau à ajouter, établissant un régime hydrique d'irrigation "contrôlé".

Une alimentation régulière pour une croissance normale des plantes correspond à 80 % de la capacité au champ (CC) en eau. Cela permet également de calculer le % de CC des plantes subissant un stress hydrique, exclues de l'irrigation. Un simple calcul détermine le poids d'eau à ajouter pour atteindre une alimentation "contrôlée" de 80 % de CC, équivalent à 2100 g.

$$\begin{aligned} Poids_{eau_{100\% CC}} &= 2600 \text{ g} \rightarrow 100\% \\ Poids_{eau_{80\% CC}} &\rightarrow 80\% \end{aligned} \quad (41)$$

Pendant l'expérimentation, les plantes sont réparties en deux groupes : cinq avec une

alimentation hydrique normale (plantes témoins) et cinq sans irrigation pour une alimentation hydrique réduite (plantes stressées).

Les pots sont pesés individuellement une fois par jour et irrigués pour maintenir un poids cible de 3200 g pour les plantes contrôlées. Les plantes stressées sont pesées pour déterminer leur % de CC en eau, selon l'équation 42, tout au long de l'expérience.

$$\% \text{ de } CC_{\text{calculé}} = \frac{(Poids_{\text{mesuré}} - Poids_{\text{sec}}) \times 100\%}{Poids_{\text{eau } 100\% \text{ CC}}} \quad (42)$$

Le graphique dans la figure 62 présente l'évolution du stress hydrique chez les plantes stressées.

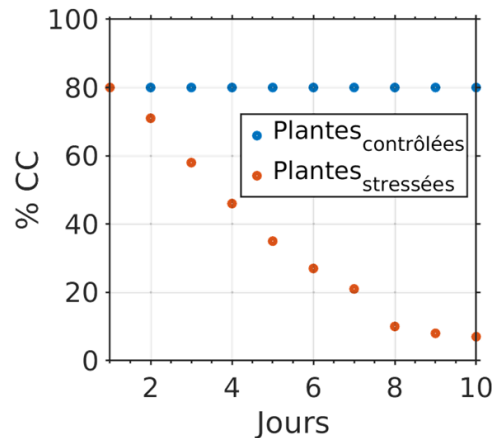


Figure 62 : Evolution journalière du pourcentage de capacité au champ des plantes.

Nous avons observé qu'au fil des jours, dans la figure 62, le % de CC des plantes stressées diminue progressivement, jusqu'à atteindre un plancher, où les stomates se referment pour éviter la perte d'eau [232]. Au premier jour, il est identique à celui des plantes témoins, puis il diminue jusqu'à atteindre une valeur de 5 % de CC.

Cette diminution est due à la réduction du poids des plantes, causée par l'absorption de l'eau et l'assèchement progressif.

Jusqu'à présent dans cette partie, j'ai abordé le sujet de l'échantillon à étudier. Dans ce qui suit, je décris le protocole d'acquisition des images hyperspectrales.

3.3. Acquisition des cubes spectraux

Les plantes, réparties en deux groupes (témoins et stressées), feront l'objet d'acquisitions d'images quotidiennes sur les deux faces de deux feuilles par plante, totalisant 2 faces et 20 feuilles par jour.

Ces mesures se poursuivront jusqu'à l'apparition visible de signes de stress, comme la turgescence ou le flétrissement des feuilles.

L'organigramme de la figure 63 résume la procédure.

Des réglages initiaux, notamment de la source laser, sont nécessaires. Ensuite, la première caméra refroidie, opérant entre 3 et 5 μm , est activée avec un temps d'intégration de 700 μs pour éviter la saturation du détecteur. L'acquisition d'images entre 7,5 et 11 μm avec la caméra bolométrique est ensuite réalisée, comme récapitulé dans le tableau 17.

Tableau 17 : Spécifications des gammes spectrales.

Spécifications	[3 – 5 μm]	[7,5 – 11 μm]
Caméra	FLIR SC5000	FLIR A65
Temps d'intégration	700 μs	-
Résolution spectrale	10 nm	10 nm
Nombre total de longueurs d'onde	81	351
Volume de stockage par image	160 Ko	640 Ko

Ces images sont automatiquement nommées et enregistrées dans des fichiers spécifiques pour chaque type de plante, en vue d'un traitement ultérieur. Le tableau 18 résume la quantité d'acquisitions et les délais correspondants.

Tableau 18 : Quantité des échantillons, volume des données et délais d'acquisition.

Caractéristiques	Plante contrôlée	Plante stressée
Nombre de plantes	5	5
Nombre de faces/feuille	2	2
Nombre de feuilles/plante	2	2
Quantité d'eau	2.2 Kg	-
Durée de mesure/face	2 min	2 min
Nombre de répétition des mesures	10	10
Nombre total d'images	86400	86400
Volume de stockage de données	47,1 Go	47,1 Go

Outre les échantillons, une acquisition de référence est réalisée sur l'étalon secondaire au début de chaque journée d'expérience. Cela entraîne un volume total de toutes les images de 96,5 Go, comprenant un total de 177 120 images.

Le tableau 19 illustre une comparaison numérique de performance avec la thèse précédente [9].

Les deux expériences ont utilisé un nombre équivalent de plantes et de feuilles. Cependant, dans notre étude, nous avons pu examiner les deux faces de chaque feuille, car elles présentent une composition différente de stomates.

Les résultats indiquent une réduction significative du temps d'acquisition, passant de 22 minutes par mesure à seulement 2 minutes. L'amélioration, qui impacte la durée d'acquisition, est principalement due à l'arrêt de la prise d'une image de fond pour chaque longueur d'onde, se limitant à l'acquisition d'une seule en amont de chaque balayage spectral. Ceci est rendu possible par le fait que la dérive thermique du fond reste négligeable ($\sim 1\%$ du signal local).

En outre, comme démontré dans les chapitres 2 et 3, des améliorations ont été apportées pour optimiser les artefacts liés au speckle et à l'éclairage, tels que le déplacement du faisceau laser et les fluctuations de puissance afin d'acquérir notre mesure du taux de réflectance.

Tableau 19 : Comparaison de quantités de données avec la thèse précédente.

Caractéristiques	Thèse précédente	Thèse HI2
Nombre de plantes	10	10
Nombre de faces/feuille	1	2
Nombre de feuilles/plante	2	2
Durée de mesure/face	22 min	2 min
Nombre de répétition des mesures	11	10
Nombre totale des images	21021	177120
Volume de stockage de données	11,4 Go	96,5 Go
Résolution spectrale	40 nm – 50 nm	10 nm
Nombre total des longueurs d'onde	91	432

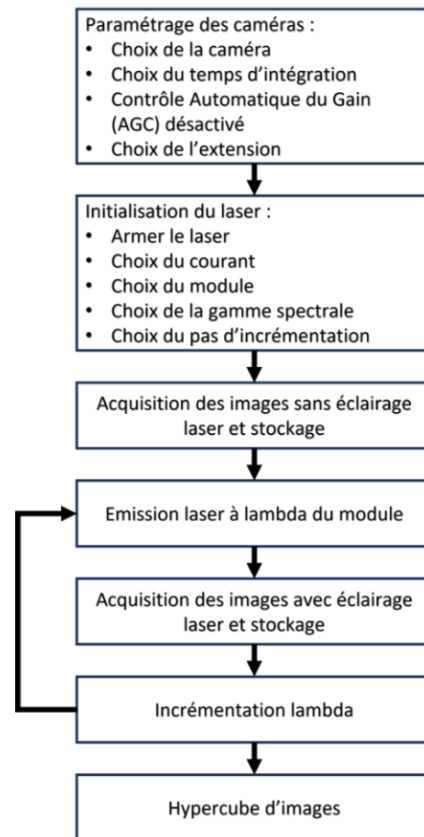


Figure 63 : Organigramme du processus d'acquisition des images.

4. Chaîne de traitement des images

Dans la section précédente, j'ai présenté le processus d'acquisition des images de notre expérience. L'objectif est de calculer le taux de réflectance, qui ne peut pas être extrait directement à partir des images. Ainsi, un protocole de traitement est nécessaire pour effectuer ce calcul.

Les étapes à suivre dans l'ordre pour parvenir à la mesure du taux de réflectance pixel par pixel sont détaillées dans la 4.1 du chapitre 3.

Un paramètre essentiel à caractériser dans toute application de détection est le rapport signal sur bruit.

4.1. Evaluation du rapport signal sur bruit sur référence

Certaines applications, telles que la télédétection environnementale, l'imagerie médicale, ainsi que l'imagerie hyperspectrale, nécessitent des niveaux spécifiques de rapport signal sur bruit (SNR) pour fonctionner de manière optimale :

- télédétection environnementale :
 - imagerie satellite : un SNR de 20 dB à 30 dB est souvent considéré comme adéquat pour détecter des caractéristiques environnementales à partir d'images satellites [233].
 - lidar aéroporté : un SNR de 25 dB à 35 dB peut être nécessaire pour des applications de cartographie précise de la topographie ou de la végétation [234].
- imagerie médicale :
 - IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) : un SNR de 60 dB à 80 dB est souvent recherché pour obtenir des images de haute qualité [235], [236].
 - tomographie par émission de positrons (TEP) : Un SNR d'environ 20 dB à 30 dB est généralement nécessaire pour des images TEP de qualité diagnostique [237].
- imagerie hyperspectrale :
 - télédétection hyperspectrale aéroportée : un SNR de 20 dB à 30 dB est souvent souhaité pour distinguer efficacement les différentes caractéristiques du paysage [238], [239].

Dans le cadre de notre application, la précision de nos mesures dépend principalement du SNR (rapport signal/bruit).

Calcul pratique du SNR pixel par pixel :

Une soustraction systématique des images de fond thermique est effectuée, pour chaque longueur d'onde, afin d'isoler le signal laser. Ceci présente l'image d'intensité en fonction des pixels :

$$I(\widehat{x, y}, \lambda) \quad (43)$$

Une région d'intérêt est définie par l'étalement du faisceau laser gaussien diffusé par la référence secondaire, déjà décrit dans le chapitre 2 : $I_{ROI}(\widehat{x, y}, \lambda)$. Cette région est définie par l'étalement effectif de la tâche, calculée comme l'amplitude maximale divisée par e^2 . Elle englobe les pixels correspondants.

L'équation du SNR pixel par pixel peut être exprimée de la manière suivante :

$$SNR(x, y, \lambda)(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{I(\widehat{x, y}, \lambda)}{\sigma_{Bruit}(x, y, \lambda)} \right) \quad (44)$$

Où :

- $I(\widehat{x, y}, \lambda)$: représente l'intensité d'un pixel de l'image dépourvue de son fond thermique.
- σ_{Bruit} : Le bruit associé au fond thermique et au bruit signal (ROI) :
 - Le bruit du fond est caractérisé par l'écart-type des pixels sur $I(\widehat{x, y}, \lambda)$, sur la région dépourvue du signal $I_{Hors ROI}(\widehat{x, y}, \lambda)$

$$\sigma_{Bruit\ fond}(x, y, \lambda) = \sqrt{\frac{\sum_{m,n} \left(I_{Hors ROI}(\widehat{x, y}, \lambda) - \overline{I_{Hors ROI}(\lambda)} \right)^2}{Nombre_{pixel\ Hors\ ROI}}} \quad (45)$$

- dans la ROI, le bruit est caractérisé par l'écart-type des pixels présents :

$$\sigma_{Bruit\ signal}(x, y, \lambda) = \sqrt{\frac{\sum_{m,n} \left(I_{ROI}(x, y, \lambda) - \overline{I_{ROI}(\lambda)} \right)^2}{Nombre_{pixel\ ROI}}} \quad (46)$$

$$\rightarrow \sigma_{Bruit}(x, y, \lambda) = \sqrt{\sigma_{Bruit\ fond}(x, y, \lambda)^2 + \sigma_{Bruit\ signal}(x, y, \lambda)^2} \quad (47)$$

J'applique ce calcul sur une image acquise à 8 μm sur la référence secondaire et soustraite de son fond thermique. Le résultat du SNR pixel par pixel est illustré dans la figure 64.

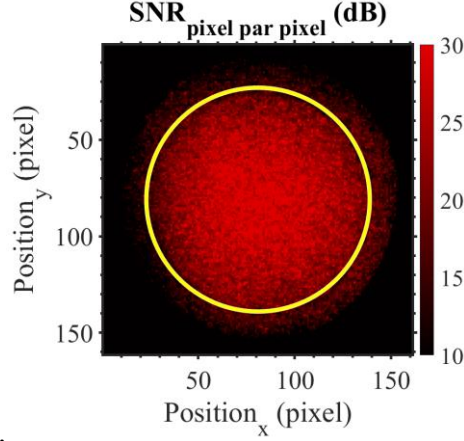


Figure 64 : SNR pixel par pixel sur la référence secondaire à 8 μm . Le cercle jaune délimite la ROI, qui présente une valeur supérieure à 10 dB.

La ROI est délimitée par un cercle jaune, montrent des valeurs de supérieures à 25 dB à l'intérieur et égales ou inférieures à l'extérieur.

Ces résultats suggèrent des SNR, comparable à la littérature (20-30 dB) pour des applications hyperspectrales similaires, et plus particulièrement pour notre cas d'application, détaillé dans la partie 4.1.

Conformément aux chapitres 2 et 3, où la forme constante de la tache laser gaussienne diffusée est démontrée suivant le balayage spectral, un SNR global est calculé dans la ROI plutôt qu'une image pixel par pixel sur chaque longueur d'onde.

Ce calcul extrait les valeurs du SNR dans la ROI en utilisant l'équation suivante :

$$SNR\ (dB) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\overline{I_{ROI}(x, y, \lambda)}}{\sigma_{Bruit}} \right) \quad (48)$$

Où :

- $\overline{I_{ROI}(x, y, \lambda)}$: représente la moyenne des intensités des pixels dans la ROI :

$$\overline{I_{ROI}(x, y, \lambda)} = \frac{\sum_{m,n} I_{ROI}(m, n, \lambda)}{Nombre_{pixel\ ROI}} \quad (49)$$

Avec le même calcul de bruit déjà détaillé précédemment (4.1).

La figure 65 illustre les résultats du SNR sur la référence avant et après les améliorations du système en terme réduction des artefacts caractérisés (instrumentale et par traitement d'image) lors des mesures précédentes.

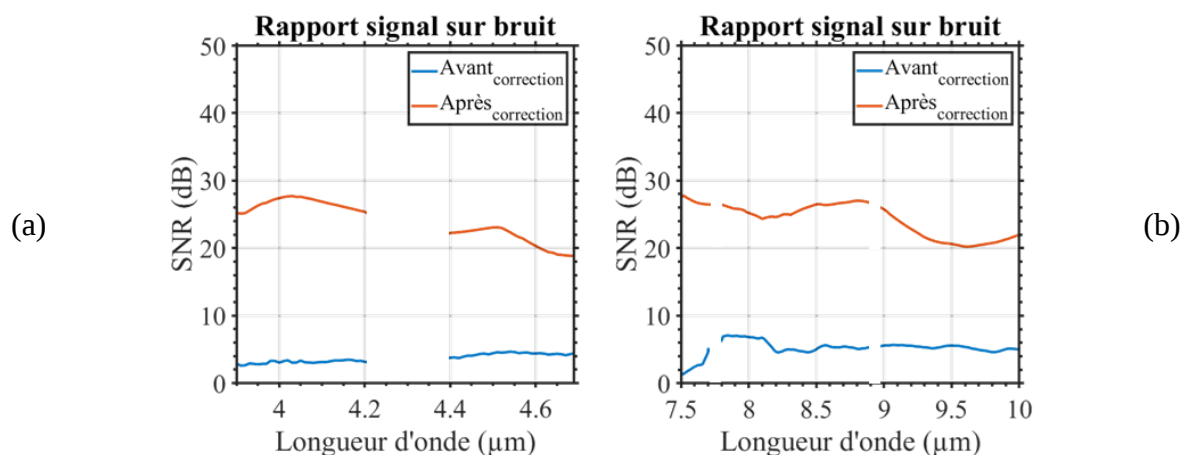


Figure 65 : SNR avant et après la réduction des artefacts sur les modules QCL₁ (a) et QCL₂₃₄ (b) sur les acquisitions effectuées sur la référence spectrale.

Les graphiques démontrent une amélioration du SNR calculé dans la région d'intérêt par rapport au point de départ initial, où les artefacts n'avaient pas été caractérisés ni optimisés. Une plage de SNR entre 20 et 30 dB représente une valeur comparable aux exigences des applications de détection, lesquelles requièrent des SNR de l'ordre de 20 à 30 dB, comme indiqué dans la section 4.1 [238]–[240].

4.2. Evaluation du SNR spécifique à la végétation

Par la suite, le SNR sur la réponse du taux de réflectance de l'échantillon végétal est illustré dans la figure 66. Il est observé que le SNR pour différentes longueurs d'onde des modules laser reste constamment au-dessus de la valeur seuil de 10 dB, considérée comme acceptable dans les applications d'imagerie active pour les plantes [241], [242].

Cependant, des fourchettes de longueurs d'onde ont été identifiées avec un SNR inférieur à ce seuil, notamment :

- la plage entre 4,23 et 4,29 μm, expliquée par l'absorption de ces longueurs d'onde par le dioxyde de carbone (CO₂).
- les plages entre 7,7 et 7,8 μm et entre 8,64 et 8,72 μm, où les longueurs d'onde se situent à l'extrémité des modules lasers (QCL₂, QCL₃), présentant un flux non significatif pour l'imagerie des plantes.

En raison de ces constatations, ces plages de longueurs d'onde sont exclues de notre analyse. Ainsi, j'obtiens des spectres de réflectance spécifiques à chaque jour, type de plante, face de la feuille (supérieure ou inférieure) et statut de la plante (témoin ou stressée).

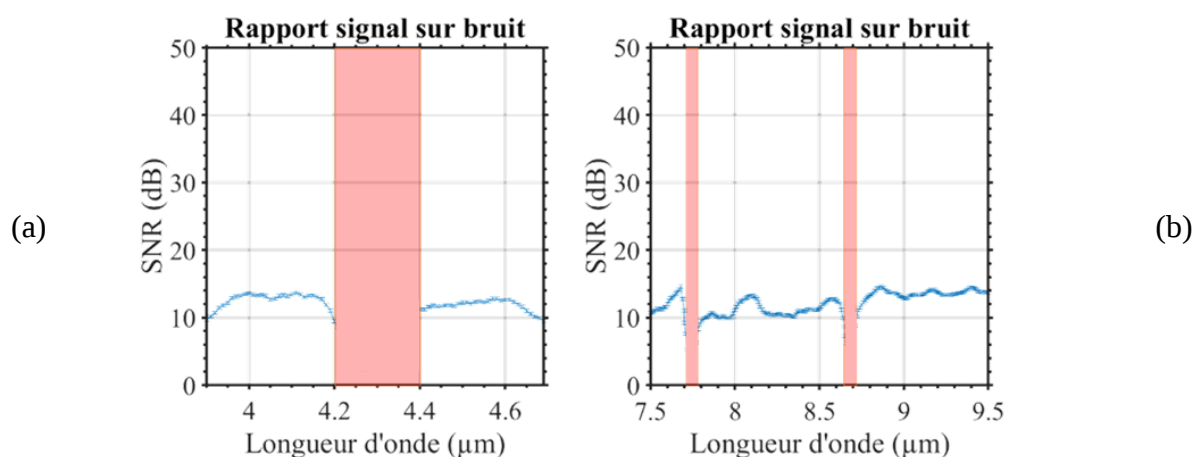


Figure 66 : SNR du taux de réflectances des plantes en fonction des différentes longueurs d'onde pour les modules laser (a) QCL₁ et (b) QCL₂₃₄.

L'intérêt d'avoir un tel SNR se traduit par le signal du taux de réflectance pixel par pixel sur l'image.

Dans la figure 67, une image visible est au centre (b). À gauche, une image du flux laser diffusé sur une feuille de tournesol à 8 μm, acquise avec le montage optique de la thèse précédente, et à droite, avec le banc optique de la thèse actuelle après l'application des différentes approches pour calculer le taux de réflectance, également à 8 μm.

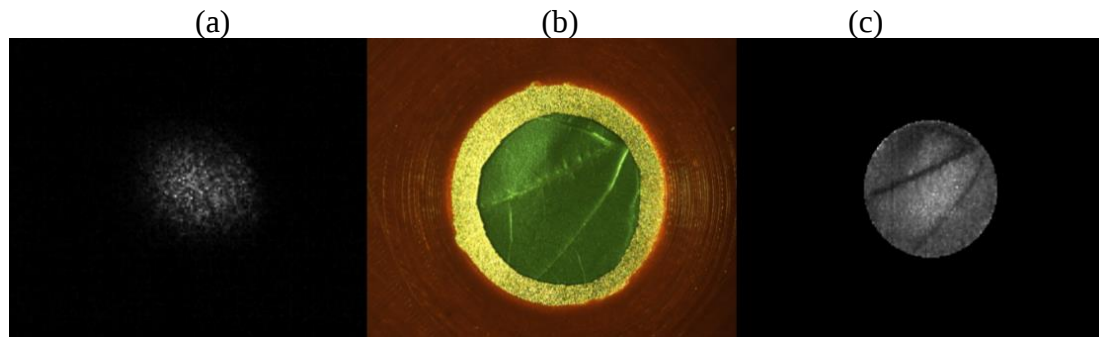


Figure 67 : (a) Image acquise à 8 μm durant la thèse précédente. (b) Image visible de l'échantillon avec la référence externe autour. (c) Taux de réflectance calculé depuis une image acquise à 8 μm au cours de la présente thèse.

Ainsi, la présence du speckle est visuellement détectable dans l'image de la figure 67(a). En revanche, le taux de réflectance de la feuille végétale, calculé depuis le flux laser diffusé dans la figure 67(c), reflète l'aspect de l'image visible, permettant ainsi de détecter et de visualiser les nervures et les zones foliaires.

Cela a ouvert la voie à la segmentation des différentes zones de la plante, comme annoncé au début de ce chapitre, afin de mieux comprendre la sensibilité de chaque zone au stress hydrique.

4.3. Méthode de seuillage et identification des zones

Dans cette partie, nous exposons les informations extraites d'une image présentant le taux de réflectance végétal, selon différentes zones d'intérêt.

Dans le contexte de la classification des nervures de feuilles de plantes, notre objectif est d'identifier la nervure principale et la zone foliaire, en excluant le fond noir qui est déjà mis à part, car il se trouve en dehors de la région d'intérêt (ROI).

Le choix de la méthode de seuillage peut grandement influencer la qualité des résultats [243] :

- seuillage global
La méthode de seuillage global utilise un seul seuil pour l'ensemble de l'image. Bien que simple, elle peut être sensible aux variations d'éclairage et aux détails indésirables.
- seuillage local (adaptatif)
Les méthodes de seuillage adaptatif ajustent le seuil localement en fonction des propriétés locales de l'image. Cela peut rendre le processus plus robuste aux variations locales, bien que le réglage des paramètres soit nécessaire.
- méthode d'Otsu
La méthode d'Otsu est basée sur la variance interclasse, cherchant à maximiser la variance entre les classes d'objet et d'arrière-plan pour déterminer un seuil optimal de manière automatique et adaptative.
Dans le contexte du taux de réflectance pixel par pixel $\rho(x, y)$, à une longueur d'onde 8 μm dans cet exemple, de la feuille de plante,
La formule de la variance interclasse ($\sigma_w^2(t)$) est définie comme suit :

$$\sigma_w^2(t) = w_1(t) \times w_2(t) \times [\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2 \quad (50)$$

Où :

- $w_1(t)$ et $w_2(t)$ sont les poids des classes d'objet et d'arrière-plan (proportion des pixels appartenant à l'objet et à l'arrière-plan),
- $\mu_1(t)$ et $\mu_2(t)$ sont les moyennes des intensités de pixels dans ces classes.
- t agit comme un seuil de séparation, divisant les niveaux de gris de l'image en deux classes. En ajustant t , la méthode d'Otsu cherche à maximiser la variance interclasse.

Les chercheurs combinent ces techniques de seuillage avec des opérations morphologiques pour avoir une segmentation relativement adéquate à la forme de l'objet identifié [244].

Erosion :

L'érosion est une opération mathématique qui consiste à réduire la taille des objets dans une image en utilisant un noyau structurant. Mathématiquement, l'érosion $((\rho \ominus B))$ de l'image de réflectance ρ avec un noyau B est définie par :

$$(\rho \ominus B)(x, y) = \min_{(i, j) \in B} \{\rho(x + i, y + j)\} \quad (51)$$

L'érosion enlève les pixels les moins lumineux et réduit les objets à leur forme la plus simple, ce qui particulièrement utile pour éliminer les pixels isolés.

Dilatation :

La dilatation est une opération qui agrandit les objets dans une image. Mathématiquement, la dilatation $((\rho \oplus B))$ de l'image de réflectance ρ avec un noyau B est définie par :

$$(\rho \oplus B)(x, y) = \max_{(i,j) \in B} \{\rho(x + i, y + j)\} \quad (52)$$

La dilatation remplit les lacunes entre les pixels et connecte les parties séparées des objets, améliorant ainsi la continuité et la connectivité des structures.

Les opérations d'érosion et de dilatation, appliquées combinées, peuvent éliminer le bruit et remplir les trous dans une image. En utilisant séquentiellement la méthode d'Otsu, l'érosion et la dilatation, on parvient à identifier efficacement la nervure principale et la zone foliaire des feuilles de plantes [245], [246].

Les images (a) et (b) de la figure 68 présentent respectivement le taux de réflectance pixel par pixel d'une feuille de plante, ainsi que la classification des zones discernées depuis la réponse spectrale.

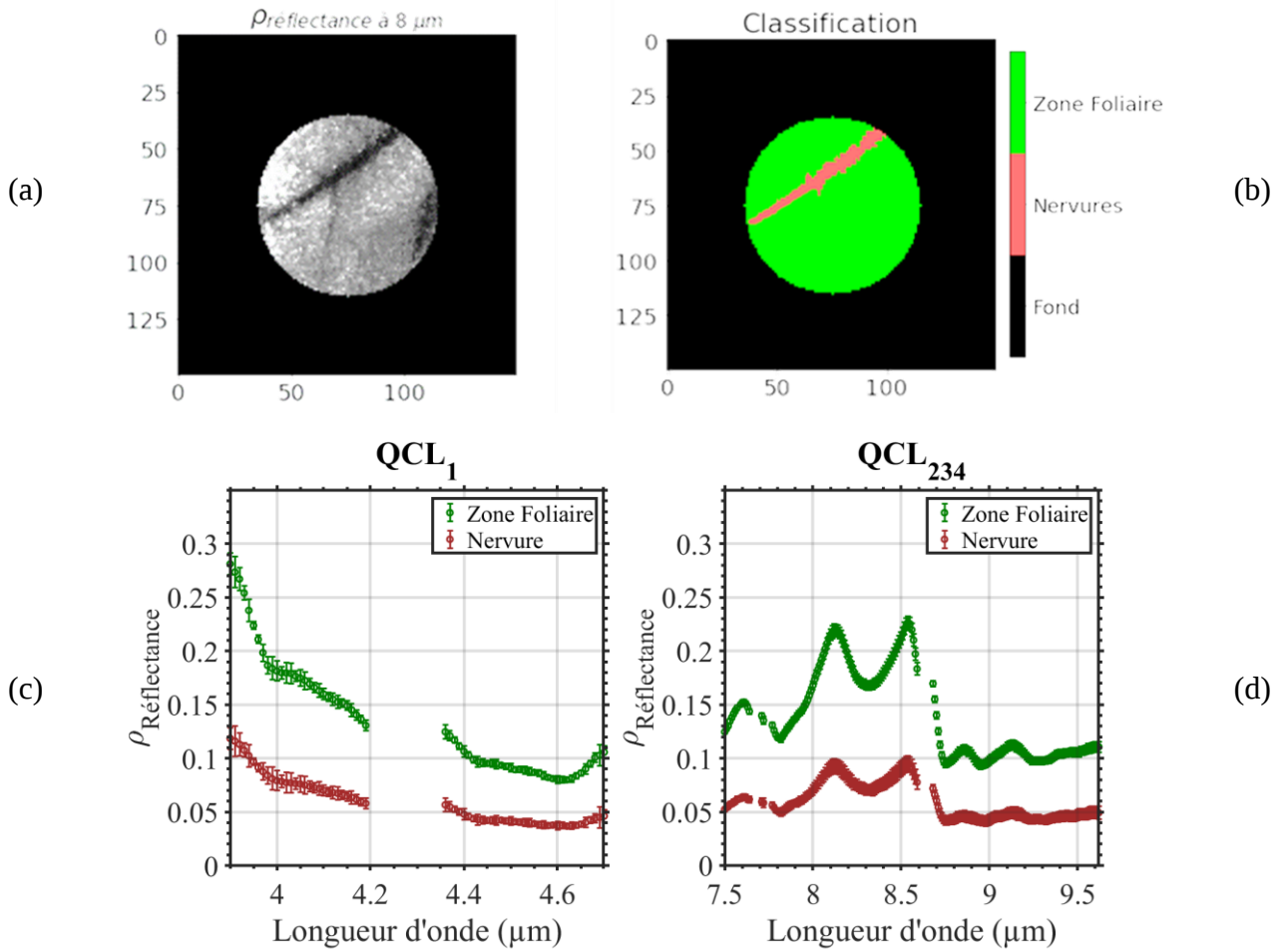


Figure 68 : (a) La réflectance acquise sur une feuille de plante à 8 μm. (b) Classification des zones discernées : foliaire et nervures. (c) et (d) réponse spectrale du taux de réflectance de différentes zones en fonction des gammes de longueurs d'onde allant de 3,9 jusqu'à 4,7 et 7,5 jusqu'à 9,7 μm respectivement.

Par la suite, les graphiques (c) et (d) exposent la réponse spectrale du taux de réflectance de ces différentes zones, en fonction des plages de longueurs d'onde de 3,9 à 4,7 μm et de 7,5 à 9,7 μm.

Dans mon étude, j'ai observé que le taux de réflectance varie d'une zone à une autre tout en présentant des similitudes dans leurs tendances.

J'ai discerné des variations dans le taux de réflectance entre différentes zones, tout en observant des tendances générales similaires. Les nervures principales et secondaires, qui jouent un rôle dans le transport hydrique au sein de la plante, affichent des taux de réflectance inférieurs par rapport à la surface de la feuille.

Cette disparité découle de l'influence significative de l'eau, qui absorbe le signal. En contraste, les régions de la surface foliaire présentant une faible teneur en eau montrent une absorption réduite, conduisant ainsi à des taux de réflectance plus élevés.

Ces constatations suggèrent la faisabilité d'établir des seuils de segmentation pour la détection automatisée des zones distinctes dans les images.

Cette approche ouvre la perspective d'une classification d'images fondée sur les signatures spectrales uniques de chaque zone, facilitant ainsi l'identification des différentes compositions caractéristiques de chacune d'entre elles.

5. Exploitation des signatures spectrales

Nous obtenons une image représentant la réflectance pixel par pixel de l'échantillon végétal.

Initialement, nous présentons les réponses spectrales acquises pour chaque échantillon en calculant la moyenne du taux de réflectance des zones discernées dans la zone d'intérêt de l'image, correspondant à la composition de la feuille de la plante.

Dans la figure 69, nous présentons les spectres moyens du taux de réflectance pour différentes zones discernées, accompagnées de leurs barres d'erreur.

Chaque spectre présenté est la moyenne de la réponse spectrale des différentes plantes/feuilles/faces soit 10 échantillons au total, suivant un même régime de stress.

Mathématiquement, nous calculons ces spectres comme suit :

Pour chaque position dans la zone foliaire/nervure, nous calculons la moyenne spectrale $\bar{\rho}_\lambda$ en prenant la moyenne des spectres à travers toutes les combinaisons de plante (p), feuille (fe), et face (fa) pour chaque jour :

$$\bar{\rho}_\lambda = \frac{1}{P \times F \times L} \sum_{p=1}^P \sum_{fe=1}^F \sum_{fa=1}^L \rho_{p,fe,fa,\lambda} \quad (53)$$

L'écart-type mesure la variabilité autour de la moyenne du taux de réflectance $\bar{\rho}_\lambda$, qui sera présenté sous forme de barres d'erreur dans les graphiques, est calculé de cette manière :

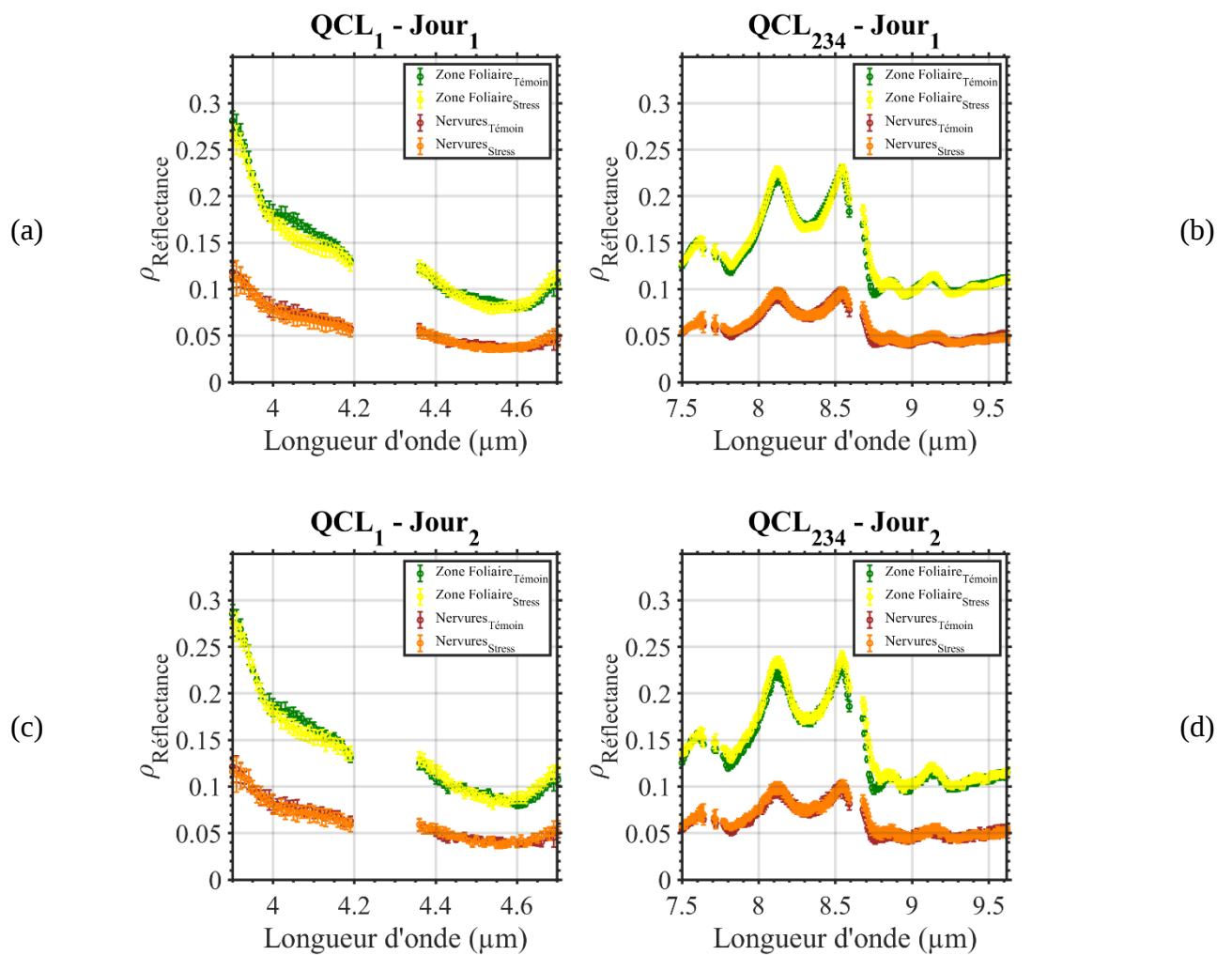
$$\Delta_\lambda = \sqrt{\frac{1}{P \times F \times L - 1} \sum_{p=1}^P \sum_{fe=1}^F \sum_{fa=1}^L (\rho_{p,fe,fa,\lambda} - \bar{\rho}_\lambda)^2} \quad (54)$$

Ces spectres sont répartis comme suit :

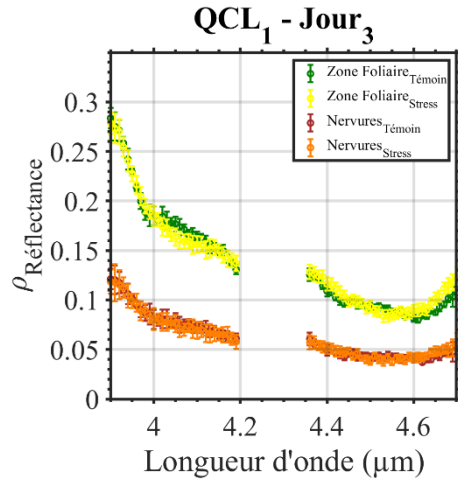
- zone foliaire des feuilles sur les deux faces des plantes témoins : courbe en vert foncé.
- zone foliaire des feuilles sur les deux faces des plantes stressées : courbe en jaune.
- nervures des feuilles sur les deux faces des plantes témoins : courbe en marron.
- nervures des feuilles sur les deux faces des plantes stressées : courbe en orange.

Chaque image dans la figure 69 présente la réponse en fonction du jour d'acquisition et des longueurs d'onde définies par les modules lasers dans deux gammes spectrales de mesure : de 3,9 à 4,7 μm et de 7,5 à 9,7 μm , avec une résolution spectrale de 10 nm respectivement.

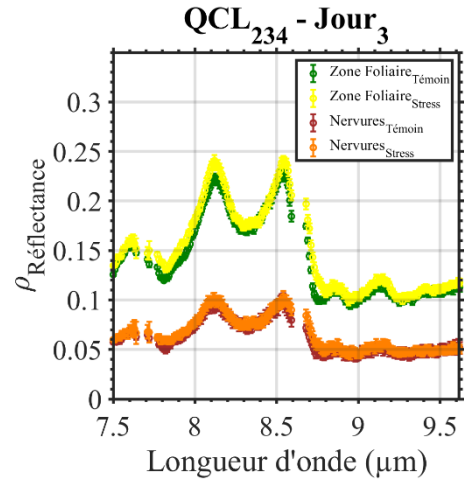
En référence à la figure 62, on observe que la réponse spectrale des zones foliaires reflète davantage les longueurs d'onde du MIR que les nervures. Cela est perceptible à l'échelle de la double portion réfléchiée par les nervures, comme indiqué par les graphes.



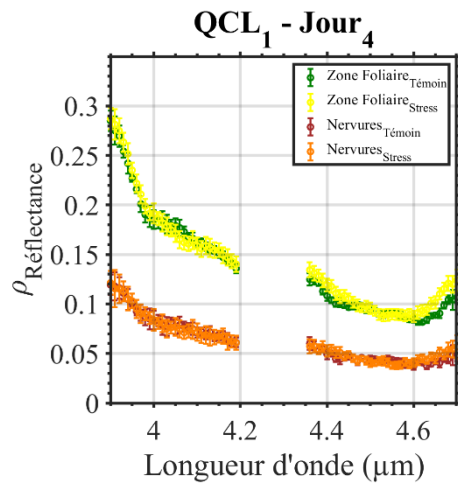
(e)



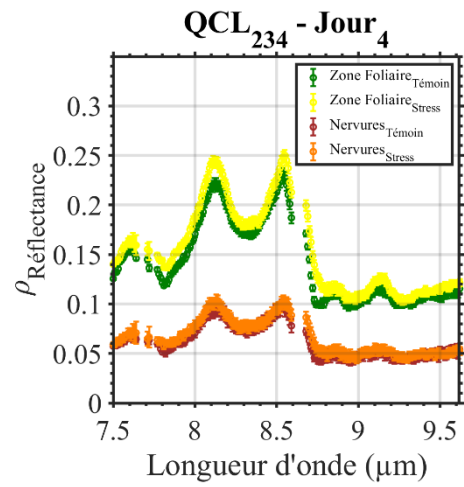
(f)



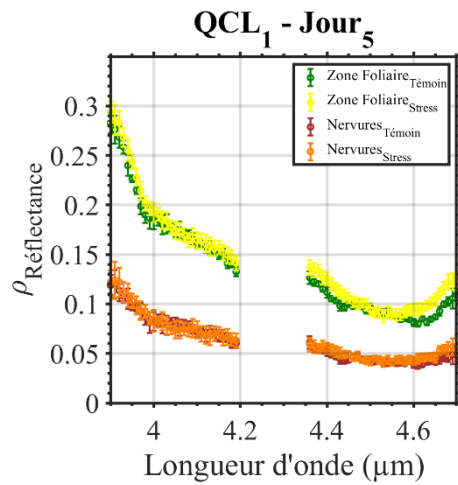
(g)



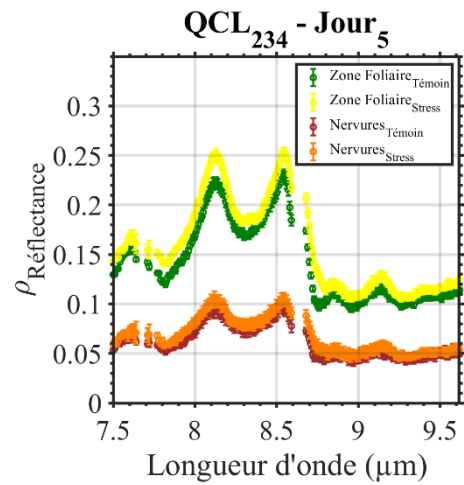
(h)



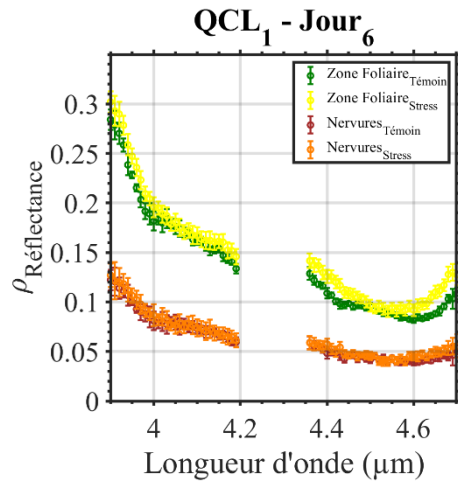
(i)



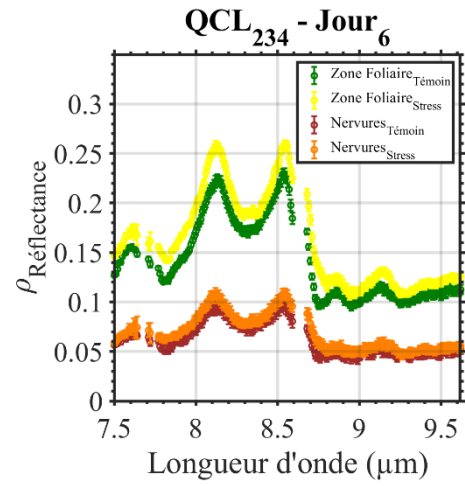
(j)



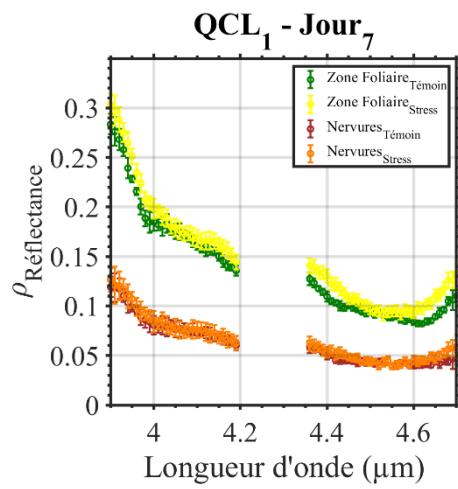
(k)



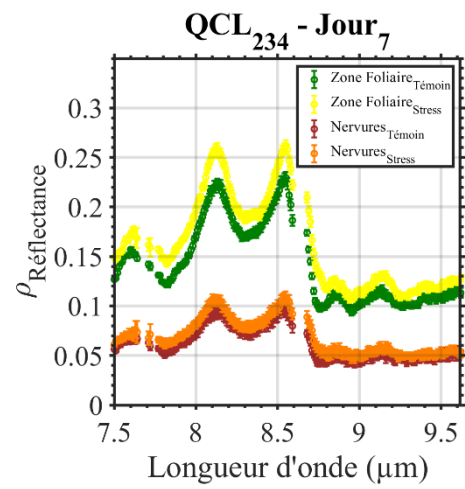
(l)



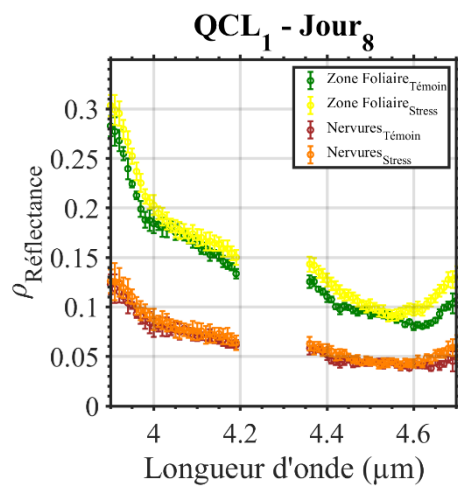
(m)



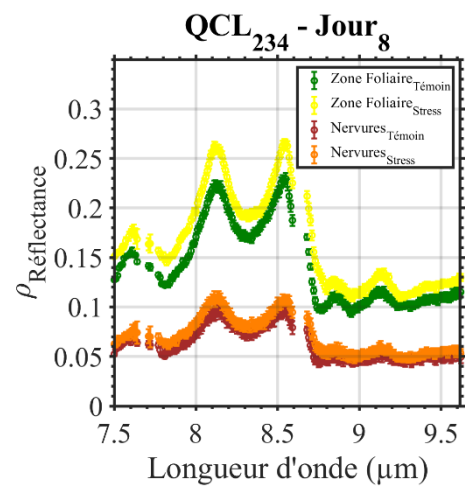
(n)



(o)



(p)



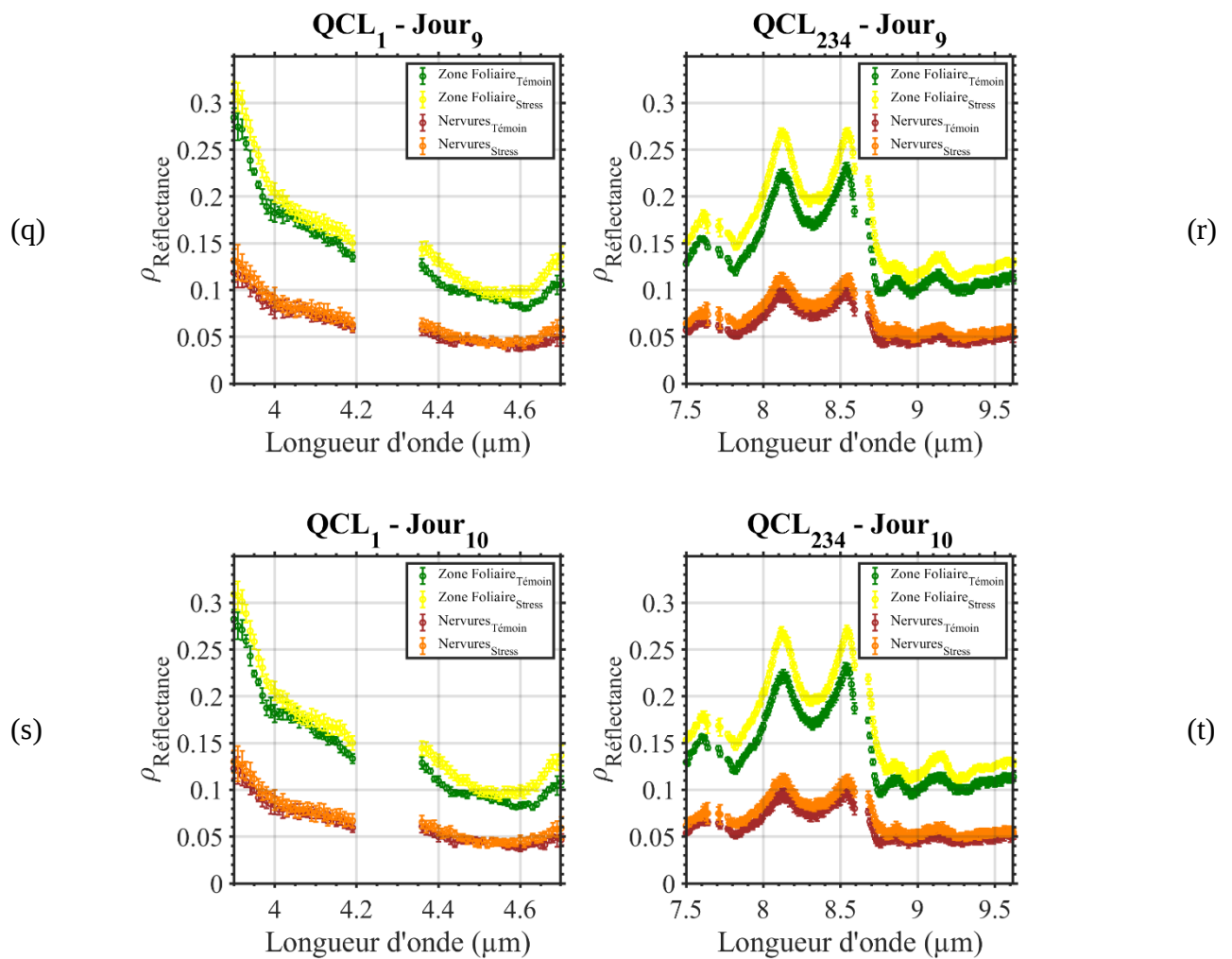


Figure 69 : Évolution journalière des spectres moyens de réflectance entre la zone foliaire et les nervures au fil des jours suivants les différents régimes d'irrigation appliqué.

Dans le détail, durant les trois premiers jours [1-3], les plantes présentent des spectres moyens des mêmes discernées zones sous des conditions d'irrigation identiques, indiquant une interaction similaire avec le rayonnement MIR.

Au quatrième jour, les zones des plantes soumises au stress hydrique montrent un décalage positif par rapport à celles maintenues sous le même régime d'irrigation, avec une valeur de 45 % de CC associée à cette journée, comme extrait de la figure 62.

- pour la gamme spectrale entre 3,9 et 4,5 μm :
 - une différence d'environ 11% de décalage entre les spectres moyens de la zone foliaire des plantes stressées par rapport à celles des témoins est observée.
 - ce décalage est présent pour la zone nervure qui présente une augmentation de l'ordre de 19% par rapport au témoin, qui reste quasiment stable en raison du maintien de son irrigation.
- dans la gamme spectrale de 7,5 à 9,7 μm :
 - une différence d'environ 10% de décalage entre les spectres moyens de la zone foliaire des plantes stressées par rapport à celles des témoins est observée.

- ce décalage est présent pour la zone nervure, qui présente une augmentation de l'ordre de 23% par rapport au témoin.

Ce décalage observé démontre que ces gammes spectrales contribuent à la détection du stress hydrique.

Au fur et à mesure que les jours de l'expérience avancent, les spectres moyens de la zone foliaire des plantes stressées présentent une allure similaire à ceux des plantes témoins, mais avec une tendance à augmenter le décalage.

Ce décalage continue à croître au moment où le stress hydrique demeure visible à partir du huitième jour qui se traduit par 17% de CC depuis le graphe de la figure 62, et l'expérimentation est arrêtée au dixième jour :

- à ce stade, pour la gamme spectrale entre 3,9 et 4,5 μm :
 - une différence d'environ 20% de décalage entre les spectres moyens de la zone foliaire des plantes stressées par rapport à celles des témoins est observée.
 - ce décalage est présent pour la zone nervure, qui présente une augmentation de l'ordre de 34% par rapport au témoin, lequel reste quasiment stable en raison du maintien de son irrigation.
- dans la gamme spectrale de 7,5 à 9,7 μm :
 - une différence d'environ 16% de décalage entre les spectres moyens de la zone foliaire des plantes stressées par rapport à celles des témoins est observée.
 - ce décalage est présent pour la zone nervure, qui présente une augmentation de l'ordre de 29% par rapport au témoin

Les observations des réponses spectrales des zones discernables sur les feuilles des plantes stressées et des témoins deviennent plus distinguables à partir du quatrième jour pour les deux gammes spectrales.

L'absence d'eau favorise la réflectance dans différents spectres moyens en fonction de la composition des feuilles végétales.

En cas de stress hydrique, les plantes réduisent leur transpiration, ce qui diminue la quantité d'eau dans les nervures et à la surface des feuilles. Cette adaptation entraîne une augmentation de la réflectance infrarouge des nervures en raison de la concentration accrue de lignine et de cellulose [248], [249].

Simultanément, la réflectance dans le visible et l'infrarouge proche de la surface foliaire diminue progressivement au fil du temps en raison de la concentration accrue de chlorophylle [250]. Ces observations sont illustrées dans les graphiques suivants.

L'analyse comparative des réponses spectrales des nervures et de la zone foliaire constitue un moyen de détecter le stress hydrique au cours de l'expérimentation. Ces deux structures réagissent différemment au stress hydrique.

Plus précisément, les nervures absorbent la lumière dans l'infrarouge proche, tandis que la zone foliaire la réfléchit dans cette région du spectre. Cette variation explique pourquoi la réflectance de la zone foliaire dépasse celle des nervures.

Pour récapituler ces résultats, la figure 70 présente les spectres de réflectance des zones discernées "nervure" et "zone foliaire" en fonction des gammes spectrales des lasers QCL₁ et

QCL₂₃₄. Sur chaque graphique de la figure, trois spectres sont affichés, représentant chacun la moyenne des spectres acquis pour la zone respective à trois jours différents : le spectre bleu correspond au premier jour, le spectre orange au quatrième jour et le spectre jaune au dixième jour.

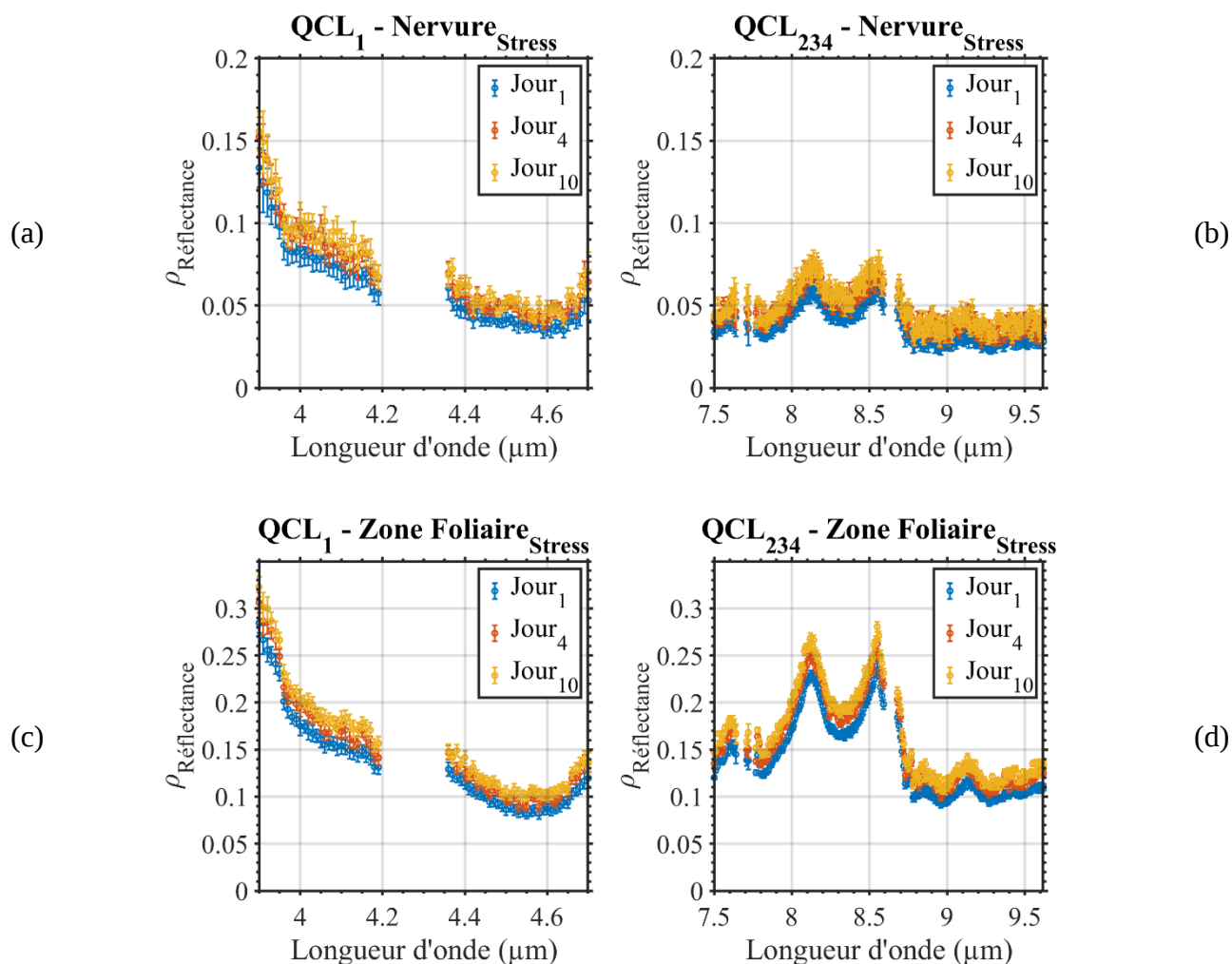


Figure 70 : Les spectres de réflectance ont été enregistrés les jours 1, 4 et 10 pour la zone de nervure sous stress dans la gamme spectrale du QCL1 (a) et des QCL234 (b), ainsi que pour la zone foliaire sous stress dans la gamme spectrale du QCL1 (c) et des QCL234 (d).

Pour chaque graphique, les trois spectres présentent une allure similaire, mais avec une augmentation relative de la valeur à chaque longueur d'onde en termes de réflectance.

Afin d'étudier cette évolution de manière temporelle sur les dix jours d'expérimentation, je calcule la valeur moyenne de réflectance pour les deux zones discernées dans les deux gammes spectrales de l'étude, se concentrant uniquement sur les plantes stressées.

La figure 71 présente deux graphiques illustrant la réponse spectrale moyenne de la réflectance en fonction des jours de l'expérimentation.

Les points oranges représentent la réponse moyenne de la réflectance pour la zone foliaire, tandis que les points bleus représentent la zone des nervures. Les lignes pleines orange et bleue

montrent la valeur de référence, calculée au premier jour, pour mettre en évidence le décalage positif subi par les plantes stressées.

Cette valeur reste relativement constante pour les plantes témoins, qui sont arrosées régulièrement tout au long des dix jours.

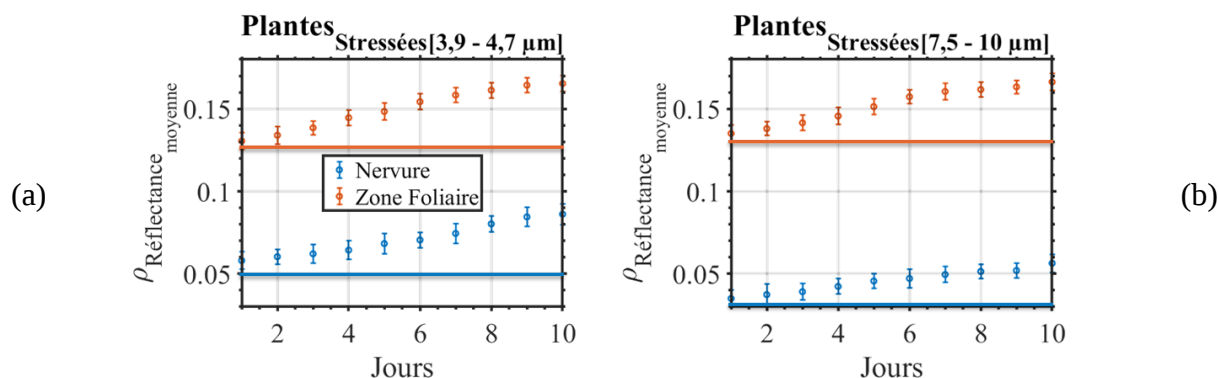


Figure 71 : Evolution temporelle de la réflectance moyenne.

Le premier graphique (a) présente la première gamme spectrale de 3,9 à 4,7 μm , tandis que le deuxième graphique (b) couvre la gamme spectrale de 7,5 à 10 μm .

Nous observons une augmentation de la valeur moyenne au fil des jours : de 0,135 à 0,162 pour la zone foliaire et de 0,051 à 0,082 pour la zone des nervures dans la première gamme spectrale, et de 0,020 à 0,061 dans la deuxième gamme.

Cela correspond à un décalage positif de 20 % pour la zone foliaire et de 34 % pour la zone des nervures par rapport au premier jour, au dixième jour.

Ces observations suggèrent qu'une détection précoce est possible dès le quatrième jour de stress hydrique, étant donné que l'augmentation est de 11 % pour la zone foliaire et de 24 % pour la zone des nervures. Ces données sont résumées dans le tableau 20

Tableau 20 : Tableau récapitulatif des réflectances moyennes suivant les jours des zones discernées.

Zone discernée	Module laser Gamme spectrale	Réflectance moyenne / décalage (%)		
		Jour 1	Jour 4	Jour 10
Nervure	QCL ₁	0.061	0.073 / 19 %	0.082 / 34 %
	QCL ₂₃₄	0.037	0.046 / 24 %	0.048 / 29 %
Foliaire	QCL ₁	0.135	0.151 / 11 %	0.162 / 20 %
	QCL ₂₃₄	0.141	0.156 / 10 %	0.164 / 16 %

Ces données nous permettront de déduire le temps de réponse au stress, d'observer l'adaptation de la plante au stress, d'évaluer la gravité du stress et de suivre son évolution au fil du temps en fonction de la quantité de % de CC [251], [252].

Ainsi à la suite, nous pourrions le lier à la capacité de prédire, à partir de ces rapports, la manifestation du stress dès le quatrième/cinquième jour. Cette manifestation se traduit par une variation des champs de teneur en eau, se situant entre 45-38%, permettant ainsi une détection précoce du stress hydrique chez les plantes avant un point irréversible.

Compte tenu du nombre de plantes utilisées, cela n'est pas suffisant pour obtenir un modèle prédictif robuste. En général, nous considérons qu'un modèle prédictif est robuste s'il est formé sur un ensemble de données comportant au moins 100 observations. Cependant, l'objectif de la thèse était de fiabiliser un système de mesure afin de permettre des campagnes de mesures plus prometteuses.

Une étude intitulée "Analyse spectro-temporelle" est incluse en annexe 12. Cette étude analyse les décalages spectraux en réponse au stress et à la composition des feuilles. Des ratios entre les composantes de la feuille sont calculés pour évaluer ces relations sous l'influence du stress, fournissant ainsi des informations précises sur l'évolution temporelle des réponses spectrales.

6. Conclusion

Plusieurs aspects sont abordés dans ce chapitre, tous convergeant vers un objectif commun : la caractérisation des échantillons végétaux. Cela inclut une analyse de l'impact des conditions de stress hydrique sur la réponse spectrale dans le MIR.

Initialement, la méthodologie et l'équipement nécessaires à la mise en place du cahier des charges expérimentales ont été détaillés. Cela englobe la composition et la préparation des échantillons, l'application du stress, la description du banc optique utilisé, et le déroulement de l'expérience sur une période de dix jours.

Une comparaison des performances avec un dispositif hyperspectral antérieur a été réalisée, mettant particulièrement en évidence le rapport signal/bruit (SNR), ouvrant ainsi la voie à l'aspect spatial de l'analyse et à la segmentation des différentes zones de l'image hyperspectrale acquise.

Ce point est très important car il introduit de nouveaux concepts et ouvre de nouvelles perspectives d'applications par rapport à notre point de départ. L'apport spatial mentionné dans ce contexte, dans le domaine du MIR, nous permettra d'étudier simultanément différentes zones de la surface éclairée afin de caractériser la composition.

Les sections suivantes ont traité des algorithmes d'extraction du taux de réflectance pixel par pixel, de la segmentation à partir des images de taux de réflectance, ainsi que de l'analyse et de l'exploitation des résultats de taux de réflectance.

Les spectres des différentes zones de la surface foliaire et des nervures ont été analysés au fil des jours sous les régimes d'irrigation témoin et stressé, révélant des décalages de réflectances relativement significatives, dès le quatrième jour.

En accord avec la littérature sur la physiologie des feuilles, les observations ont souligné une diminution de l'absorption des rayons infrarouges par les feuilles en cas de stress hydrique, influençant les réponses spectrales.

L'examen des spectres moyens des différentes composantes de la feuille a permis d'extraire les influences du stress hydrique sur les différentes zones. Cette analyse approfondie a permis de corréler ces influences avec la capacité de prédire la manifestation du stress dès le quatrième jour, offrant ainsi une détection précoce avant un point irréversible, surpassant en rapidité une étude antérieure similaire.

Grâce aux approches adoptées dans cette thèse, nous avons pu exploiter les images hyperspectrales non seulement dans les dimensions spectrales mais aussi spatiales tout au long des différentes phases d'expérimentation, permettant ainsi des études temporelles sur des zones variées.

L'objectif de la thèse, qui était d'améliorer le système IHS actif dans l'infrarouge et d'ouvrir de nouvelles perspectives, a été pleinement atteint. Cependant, il convient de souligner que l'objectif principal n'était pas de parvenir à des conclusions d'ordre biologique. L'analyse de nos résultats de campagnes de mesure pour caractériser les différents stades de développement des feuilles ainsi que les différentes faces de la feuille sera confiée à notre partenaire industriel.

Conclusion générale

Ce travail aborde les fondements nécessaires à la compréhension de l'imagerie hyperspectrale active, en se basant sur une analyse bibliographique.

Dans cette première partie de l'étude, le contexte de l'imagerie hyperspectrale (IHS) active est établi, et les concepts clés sont définis à partir d'une revue approfondie de la littérature.

Les applications de l'imagerie hyperspectrale sont explorées, en mettant particulièrement l'accent sur l'agrophotonique en raison de la collaboration avec le Centre Mondial de l'Innovation Roullier (CMI).

Malgré le fort potentiel de l'IHS en agriculture, son utilisation généralisée est entravée par des défis majeurs : le coût élevé des équipements et la compréhension incomplète des variations techniques et des erreurs dans les données, notamment liées au phénomène du speckle, à l'éclairage et au balayage spectral.

Cette thèse vise à quantifier ces artefacts, proposer des solutions pour les atténuer et ainsi améliorer la précision de la mesure du taux de réflectance.

Dans un deuxième temps, nous abordons les artefacts de l'imagerie hyperspectrale active en infrarouge, en mettant l'accent sur le speckle et ses effets spectraux.

Malgré les applications informatives du speckle, ses effets néfastes sur les systèmes d'imagerie sont soulignés. Des méthodes numériques basées sur des filtres ont été utilisées pour réduire son impact, bien que certaines ne soient pas applicables à toutes les gammes spectrales. Des approches optiques visant à superposer les motifs de speckle et une méthode de normalisation de l'éclairage sont présentées.

L'ajout d'un diffuseur rotatif a montré une réduction significative du speckle. L'évaluation des méthodes s'est appuyée sur son contraste et a montré des améliorations substantielles, notamment une réduction de celui-ci de 40%.

Enfin, l'éclairage de référence pour le calcul du taux de réflectance des échantillons végétaux a été amélioré en combinant la rotation du diffuseur avec un filtre passe-bas, préservant la résolution spatiale des images d'échantillons.

Dans un troisième temps, nous avons abordé les distorsions liées à l'utilisation d'une source laser à cascade quantique, incluant le déplacement du faisceau lors du balayage spectral et les fluctuations de puissance.

Nous avons compensé le déplacement avec des miroirs motorisés calibrables, réduisant les fluctuations à 1 mm. Pour les fluctuations de puissance, caractérisées à 20%, nous avons utilisé un anneau de référence et un algorithme de compensation, réduisant les fluctuations à 2,8%.

Ces corrections sont intégrées dans notre équation d'extraction du taux de réflectance pixel par pixel en vue d'applications, notamment liées aux végétaux.

Enfin, nous avons étudié la caractérisation des échantillons végétaux et l'établissement d'un cahier des charges expérimental. Cela a inclus l'analyse des effets de la sécheresse sur les échantillons et l'impact du stress sur leur réponse spectrale infrarouge.

Un cahier des charges expérimental a détaillé la méthodologie et l'équipement nécessaires, couvrant la composition des échantillons, l'application du stress, la description du banc optique, et l'expérience sur dix jours.

Les algorithmes d'extraction du taux de réflectance pixel par pixel, la segmentation à partir des images de taux de réflectance, et l'analyse des résultats ont été abordés. Les spectres des zones foliaires et des nervures ont révélé des décalages relativement (10 %) significatifs dès le quatrième jour sous stress hydrique, confirmant la diminution de l'absorption infrarouge.

L'examen des spectres moyens a permis d'extraire les influences du stress sur différentes zones, permettant une détection précoce dès le quatrième jour, surpassant les études antérieures. Cette approche intègre la dimension temporelle, spectrale et spatiale, offrant une vision précise de l'interaction lumineuse avec les structures de la feuille.

Cette thèse était pluridisciplinaire, regroupant différents domaines tels que la conception optique, la mise en place d'architecture, l'automatisation et la synchronisation, l'organisation, le traitement d'image, l'autonomie et la recherche afin de surmonter tous les artefacts de mesure rencontrés, qui ont dégradé l'image. Elle englobe également la connaissance physiologique des plantes, la mise en place de lieux de croissance, l'établissement des plans d'expérimentation, ainsi que l'extraction des taux de réflectance et l'interprétation qui en découle.

Au cours de cette thèse, quatre étudiants en fin d'études d'ingénieur photonique ont participé à certaines parties du projet. Même après mon départ, une étude de détection du stress hydrique a été menée, avec des mesures effectuées sur les plantes plusieurs fois par jour pour étudier la réponse spectrale des plantes tout au long du cycle journalier.

Ce travail ouvre des perspectives passionnantes dans divers domaines d'application. Traditionnellement, les applications de détection de molécules se fondent sur l'identification de pics d'absorption dans le domaine spectral. Cependant, cette recherche propose une approche novatrice en explorant le potentiel de l'infrarouge pour détecter la présence de molécules excitées dans cette plage spectrale, de manière pixel par pixel.

L'utilisation de techniques de classification peut permettre la détection précise de ces molécules sensibles, ouvrant ainsi la voie à de multiples applications potentielles.

Une application prometteuse de cette technologie serait la création d'un prototype pour un système de détection moins coûteux en se limitant aux bandes spectrales caractéristiques spécifiques pour chaque besoin.

De plus, cette recherche pourrait être étendue pour étudier la réponse spectrale des plantes tout au long de leur cycle journalier, notamment en ce qui concerne l'évapotranspiration. Cette compréhension fine des réponses spectrales des plantes pourrait avoir un impact significatif sur les pratiques agricoles, en permettant une gestion plus précise de l'irrigation et des ressources.

En outre, ce système pourrait être utilisé pour détecter des zones hétérogènes dans différents environnements, comme les surfaces agricoles, les zones urbaines ou les écosystèmes naturels. Cette capacité de détection fine pourrait être précieuse dans divers domaines, de l'agriculture de précision à la surveillance environnementale.

Enfin, l'exploitation de l'aspect informationnel du speckle pourrait ouvrir de nouvelles perspectives dans la caractérisation des matériaux et d'autres cibles. Cette approche pourrait être appliquée dans des domaines tels que l'analyse des sols, la détection de défauts dans les matériaux de construction ou la surveillance des structures civiles.

En somme, les résultats de cette recherche offrent un éventail d'applications potentielles, allant de l'agriculture à la surveillance environnementale en passant par la caractérisation des matériaux, ouvrant ainsi de nouvelles voies pour l'innovation technologique et scientifique.

Annexes

1. Laser à cascade quantique

Le **laser à cascade quantique** (QCL pour « Quantum Cascade Laser ») est un laser à semi-conducteurs caractérisé par sa structure en cascade de puits quantiques [168], est capable d'émettre sur un large domaine spectral entre 2 et 20 μm et nécessite un système de refroidissement [253], [254]. Pour fonctionner en source monochromatique accordable, le QCL est associé à une optique sélective en longueur d'onde généralement une cavité externe permettant la sélection de la longueur d'onde d'émission avec des niveaux de puissance allant jusqu'à 400 mW comme montré sur la figure 72.

A titre d'exemple, Phillips et Ho [255] ont montré que l'utilisation d'un système d'imagerie hyperspectrale active combinant un laser QCL à cavité externe largement accordable dans l'infrarouge moyen (9,30-10,15 μm) et une caméra bolométrique permet de détecter la vapeur de méthanol par acquisition « snapshot » des hypercubes contenant des images à 300 longueurs d'onde.

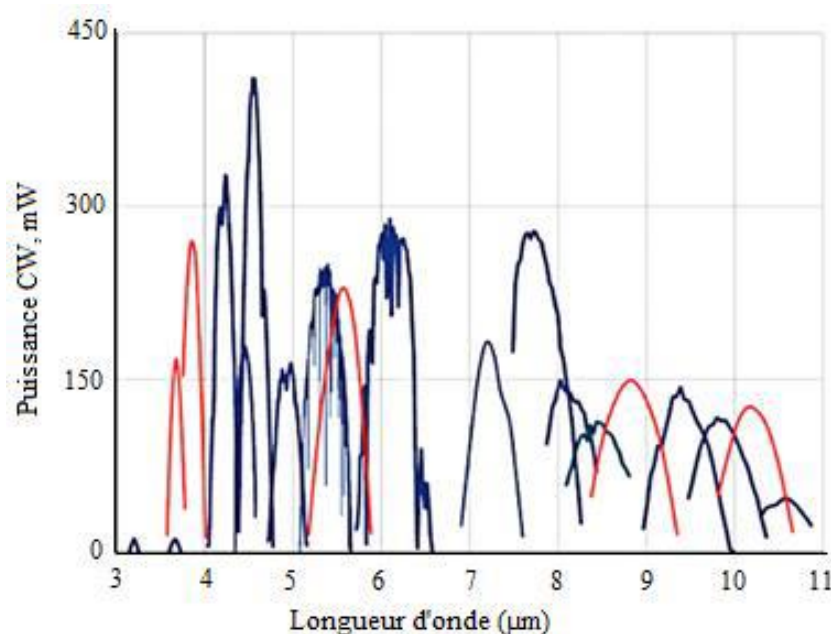


Figure 72 : Spectres de puissance d'un laser QCL accordable opérant entre 3 μm et 11 μm [Daylight solutions].

2. Caractéristiques du QCL MIRCAT

Les courbes ci-dessous présentent les caractéristiques de notre laser données par le constructeur. Il est constitué de 4 modules :

- le premier module du laser fonctionne entre 3,9 et 4,7 μm en mode pulsé avec une puissance maximale de 11 mW.
- les trois derniers modules fonctionnent dans différentes régions spectrales en mode pulsé ou continu :
 - ❖ entre 6,73 et 7,75 μm : avec une puissance maximale qui dépasse 350 mW.

- ❖ entre 7,69 et 8,64 μm : avec une puissance maximale qui dépasse 250 mW.
- ❖ entre 8,39 et 11 μm : avec une puissance maximale d'environ 150 mW.

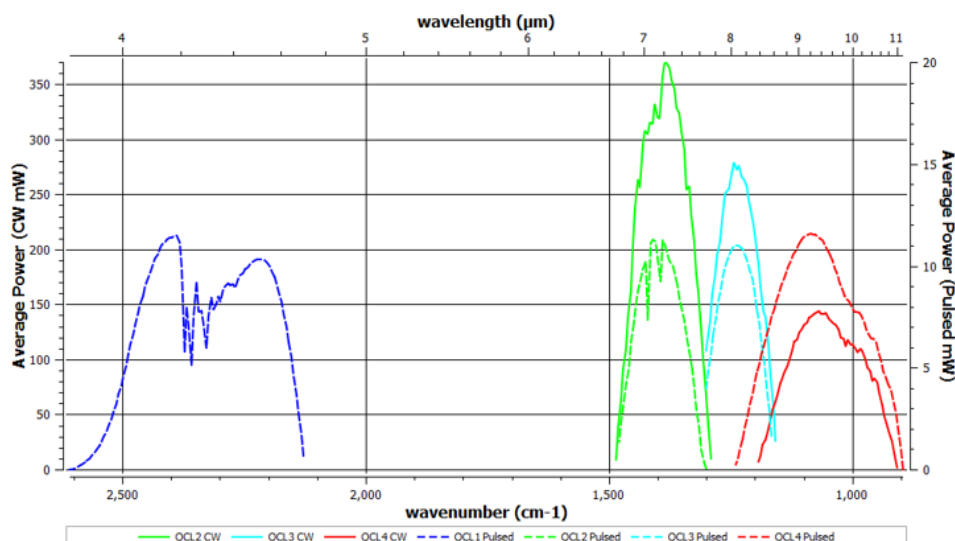


Figure 73 : Courbes de puissance des 4 modules du laser QCL données par le constructeur.

Les quatre modules du laser QCL fonctionnent dans des plages spectrales différentes. Toutes les caractéristiques de ce laser sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 21 : Caractéristiques techniques du laser QCL (Daylight solution MIRAT).

Spécifications techniques	QCL ₁	QCL ₂	QCL ₃	QCL ₄
Modes de fonctionnement	Pulsé	Pulsé/continu	Pulsé/continu	Pulsé/continu
Gamme spectrale (μm)	3,83 – 4,7	6,73 – 7,75	7,69 – 8,64	8,39 - 11
Puissance moyenne (mW)	11	350 (continu) 11 (pulsé)	280 (continu) 11 (pulsé)	140 (continu) 7 (pulsé)
Puissance partagée entre les QCLs	Jusqu'à 6 mW en pulsé Jusqu'à 100 mW en continu			
Plage de répétition des impulsions	100 Hz à 1 MHz			
Rapport cyclique	10%			
Largeur de raie	< 1 cm^{-1} (FWHM) pour le mode pulsé < 100 MHz (FWHM) pour le mode continu			
Stabilité de pointé laser	< 2 mrad			
Taille du faisceau	< 2,5 mm (rayon d'intensité $1/e^2$, valeur typique, dépendance selon λ)			
Divergence du faisceau	< 4 mrad (plein angle, largeur d'intensité $1/e^2$, dépendance selon λ , mesurée à $\lambda = 4 \mu\text{m}$)			
Température	19 °C			
Gamme de courant (mA)	950	325 (pulsé) 480 (continu)	460 (pulsé) 575 (continu)	1350 (pulsé) 1550 (continu)

3. Propriétés des images de fond

3.1. Référence lambertienne

La figure 74-a représente l'image de fond de la référence lambertienne acquise par la caméra SC5000 (3-5 μm) au format 16 bits (65536 DL). Le profil de la ligne tracée au milieu de l'image représente une amplitude moyenne de l'ordre de 500 DL. Ce niveau faible détecté par la caméra est dû au temps d'intégration utilisé pour éviter la saturation du détecteur lors de l'acquisition de $I_{\text{réf_mes}}$, pour laquelle la valeur du signal est élevée : $t_i = 75 \mu\text{s}$.

La figure 74-b illustre l'image de fond acquise sous 14 bits (16384 DL) par la caméra bolométrique A65 (7,5-13 μm). Le profil de la ligne tracée sur l'image représente une intensité moyenne I_{fond} de l'ordre de 3000 DL.

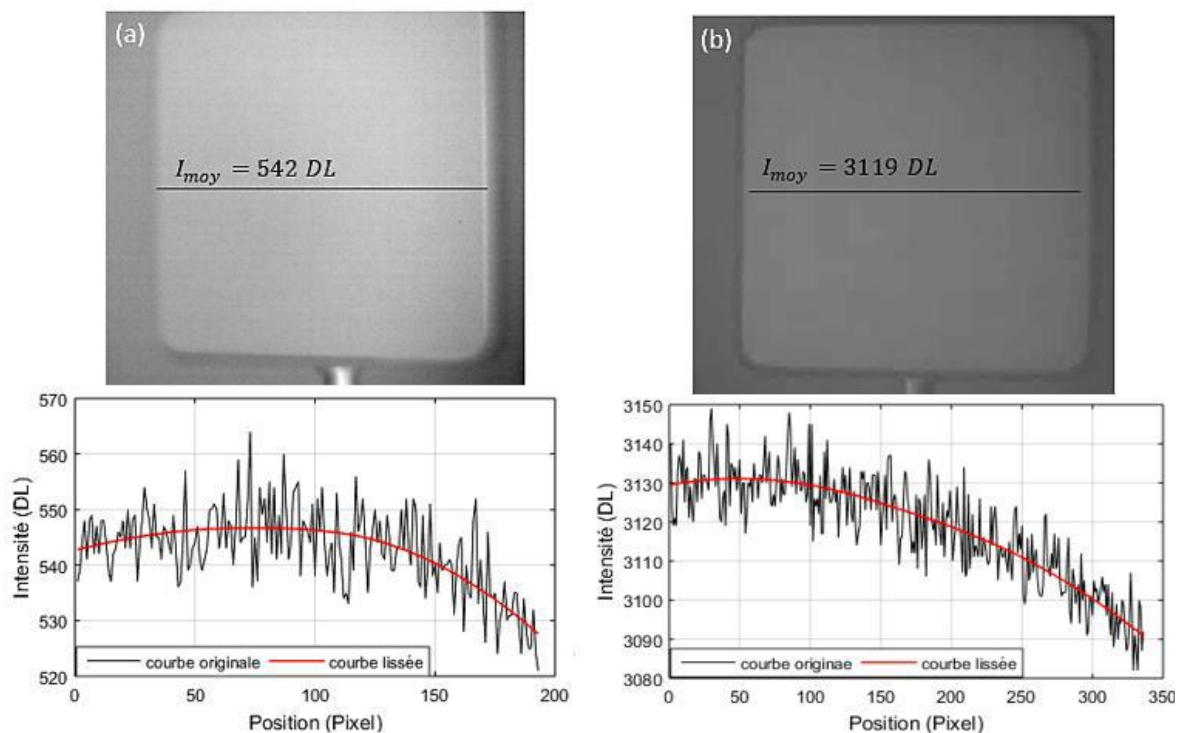


Figure 74 : (a) Image de fond de la surface de référence, prise par la caméra SC5000 et le profil d'intensité de la ligne tracée au milieu avant et après lissage. (b) Image de fond prise par la caméra A65 et le profil d'intensité de la ligne tracée au milieu avant et après lissage.

Nous souhaitons isoler puis caractériser en amplitude le bruit haute fréquence présent dans les images. Nous appliquons un lissage, puis une soustraction du signal lissé, et obtenons les tracés montrés sur la figure 75 ci-dessous.

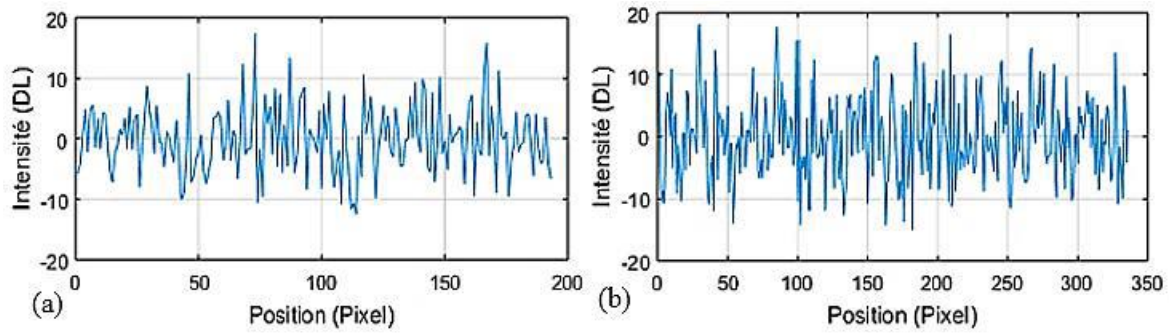


Figure 75 : Bruit typique présent sur l'image de fond. (a) prise par la caméra SC5000 (3-5 μm). (b) prise par la caméra A65 (7,5-13 μm).

Le bruit typique montré sur la figure 75 présente un écart-type $B_{\text{fond}}(x,y)$ de 6 DL pour l'image de fond prise par la caméra SC5000, et 7 DL pour celle prise par la caméra A65.

Nous ferons par la suite l'hypothèse que l'incertitude associée au bruit reste inchangée sur chaque mesure, si le temps d'intégration reste identique.

3.2. Echantillon végétal

De même, la figure 76-a montre l'image de fond de l'échantillon prise par le détecteur refroidi opérant entre 3 et 5 μm ; au-dessous le profil de la ligne tracée sur la surface de l'échantillon qui représente une amplitude moyenne de 8307 DL. La figure 76-b représente l'image de fond acquise par la caméra A65, dans la gamme spectrale entre 7,5 et 13 μm , d'une amplitude moyenne de 2349 DL.

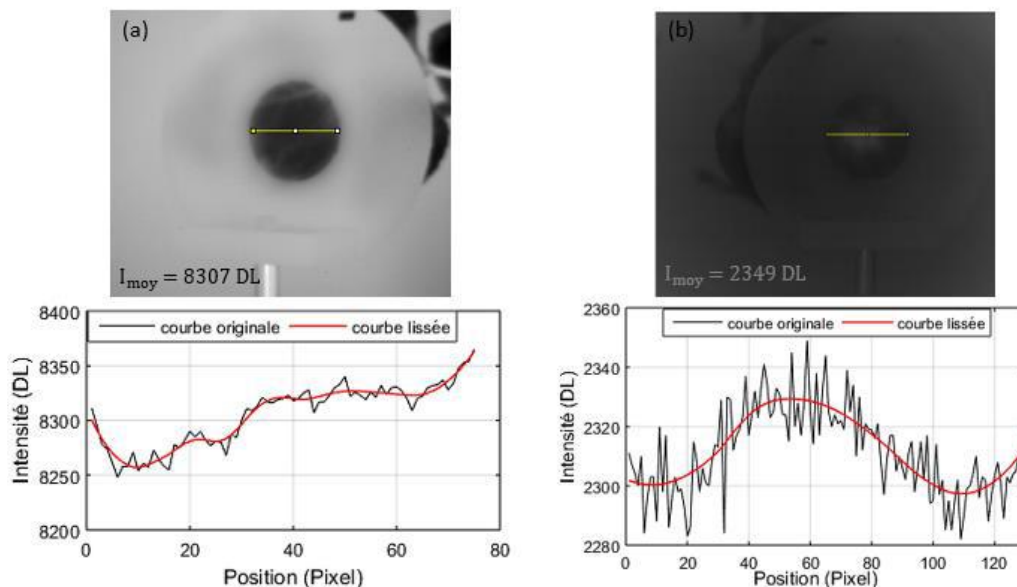
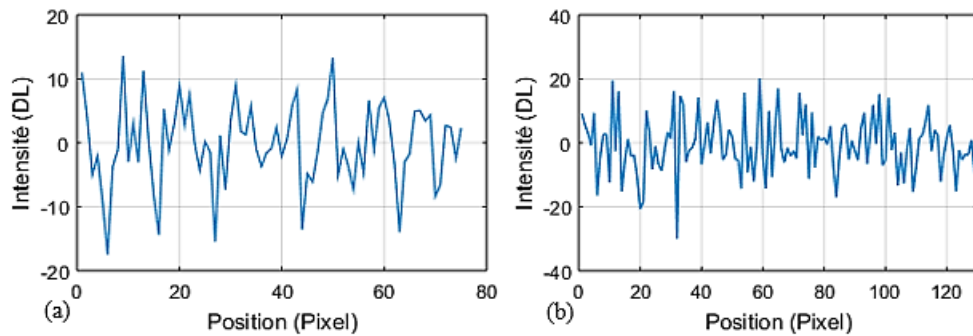


Figure 76 : (a) Image de fond de l'échantillon prise par la caméra SC5000 et profil d'intensité de la ligne tracée, avant et après lissage. (b) Image de fond de l'échantillon prise par la caméra A65 et profil d'intensité de la ligne tracée, avant et après lissage.

Après lissage du signal obtenu sur chaque image par régression locale, nous obtenons le bruit présenté sur la figure 77. Nous observons que les variations d'intensité locale de l'échantillon obligent à un compromis entre le lissage et la préservation du bruit.



*Figure 77 : Bruit typique présent sur l'image de fond de l'échantillon.
(a) prise par la caméra SC5000 (3-5 μm).
(b) prise par la caméra A65 (7,5-13 μm).*

Nous observons que le bruit présent sur l'image de fond de l'échantillon prise entre 3 et 5 μm (figure 77-a) présente un écart-type de 6 DL, et un écart type 9 DL sur le profil d'image prise par le bolomètre entre 7,5 et 13 μm (figure 77-b).

4. Caractérisation de la dérive thermique

Dans le cadre d'estimations du taux de réflectance, les images de fond doivent être acquises régulièrement, pour compenser les éventuelles dérives thermiques de la scène ou autres défauts de répétabilité. Ces derniers peuvent provenir notamment de :

- Fluctuations thermiques lentes de la scène au cours de la journée (cycle horaire ou journalier).
- Transfert thermique du laser sur l'échantillon ou sur la référence.
- Dérives liées aux caméras et à leur compensation interne en température.

Nous avons souhaité évaluer ce second effet sur les deux gammes de longueur d'onde traitées, pour les puissances maximales disponibles (cas les plus défavorables) :

11 mW à $\lambda = 4 \mu\text{m}$ et 280 mW à $\lambda = 8 \mu\text{m}$.

Dans les conditions usuelles d'acquisition ($T_{\text{amb}} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$, éclairage laser durant 0,17 s), une série d'images a été acquise pour une durée de 15 minutes pour mettre en évidence une éventuelle dérive d'intensité ΔI sur la zone d'éclairement matérialisée en rouge.

5. Images de fond sur la surface de référence

La surface de référence est un bloc métallique fortement diffusant, seule une faible fraction ($< 8 \%$) de la puissance incidente est absorbée et transformée en chaleur. La dérive thermique due au laser peut alors être négligée.

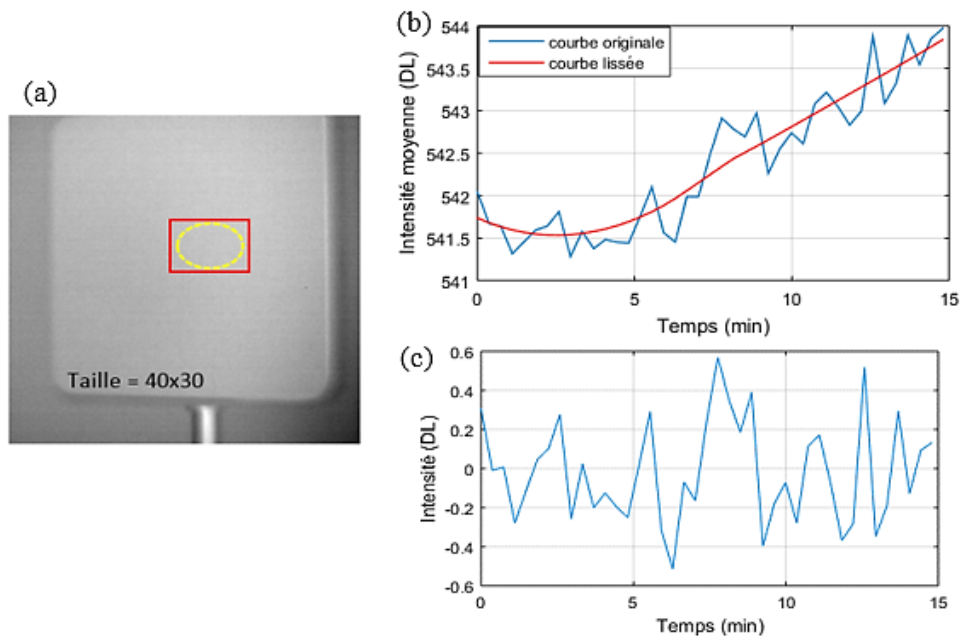


Figure 78 : (a) Zone de mesure (rouge) sur l'image de référence observée par la caméra SC5000, en pointillé la position de la tache laser.
 (b) Intensité moyenne représentant la dérive thermique observée sur 3 à 5 μm pour une durée de 15 minutes d'acquisition.
 (c) Variation autour de la moyenne spatiale des mesures.

La courbe de la figure 78-b montre la dérive thermique du signal collecté par l'imageur refroidi acquise entre 3 et 5 μm après allumage et extinction du laser (0,17 s). La figure 78-c représente l'incertitude associée à la moyenne spatiale sur la zone tracée. Nous observons sur la courbe rouge une variation lente ΔI de 2,7 DL sur 15 minutes, qui est inférieure à l'incertitude du signal acquis par le détecteur ($B_{fond} = 6$ DL). Nous obtenons également après lissage de la courbe originale par régression locale et soustraction, l'incertitude de répétition montrée sur la figure 78-b d'un écart-type de 0,3 DL.

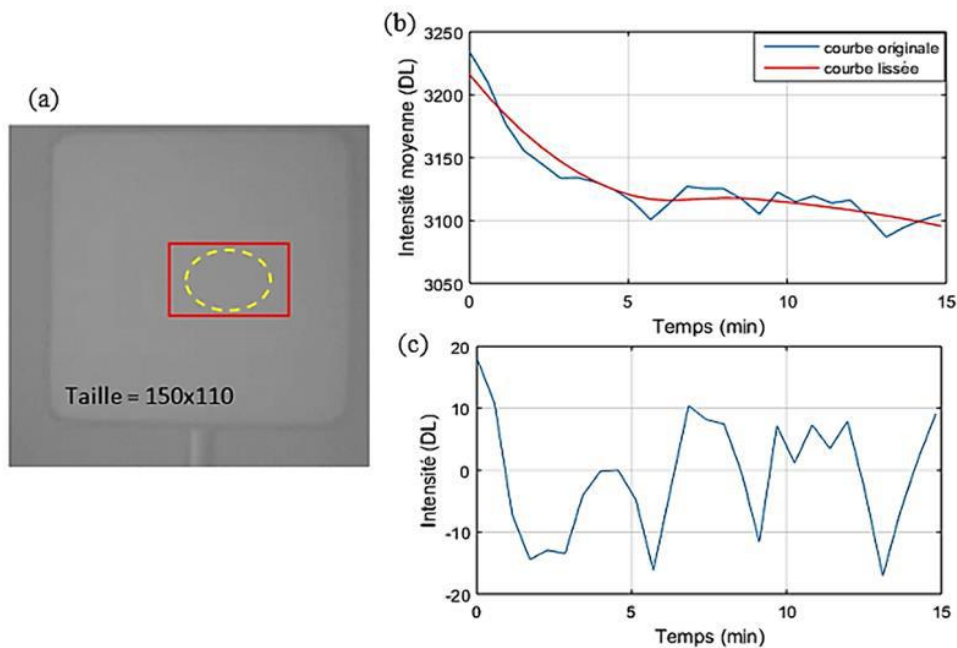


Figure 79 : (a) Zone de mesure (en rouge) sur l'image de référence observée par la caméra A65, en pointillé la position de la tache laser.
 (b) Intensité moyenne représentant la dérive thermique observée sur 7,5 à 13 μm pour une durée de 15 minutes d'acquisition.
 (c) Variation de la moyenne spatiale des mesures de la dérive thermique.

Dans le cas du QCL1 émettant une puissance de 11 mW à 4 μm en mode pulsé, la dérive thermique (ΔT) induite est donc comparable voire inférieure au bruit d'acquisition du pixel (B_{fond}).

De même pour la caméra bolométrique initialement éteinte, une séquence d'images a été prise pour un éclairage à 8 μm , le QCL 3 éclaire la référence lambertienne avec un flux total réparti de 280 mW. Le profil de l'intensité moyenne est présenté sur la figure 79-b.

Nous constatons qu'il existe un temps de stabilisation de la caméra A65, d'environ 5 minutes, après lequel la dérive lissée (en rouge) représente une variation ΔI de 25 DL sur 10 minutes.

Nous avons confirmation que les dérives lentes sont négligeables. De même, l'opération de moyennage limite le défaut de répétabilité à moins de 0,3 % du signal, Nous observons également que la détection entre 3 et 5 μm bénéficie d'une meilleure répétabilité que la détection bolométrique entre 7,5 et 13 μm . Ceci peut être lié aux technologies des caméras. Rappelons que ces observations concernent une moyenne spatiale des zones d'intérêt.

6. Images éclairées sur la surface de référence

Nous allons maintenant évaluer la stabilité de l'évaluation moyennée des images avec laser, acquises dans les mêmes conditions. La figure 80 ci-dessous montre la zone de mesure sur la surface de la référence lambertienne avec une amplitude maximale de 2500 DL pour l'image présentée.

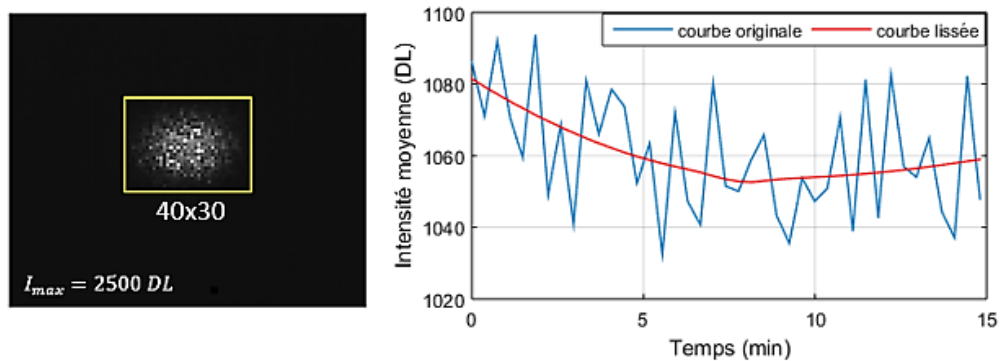


Figure 80 : Profil de l'évolution de la moyenne des images éclairées à 4 μm sur la zone de mesure de l'image à gauche pour une durée de 15 minutes d'acquisition.

Sur une série d'images acquises durant 15 minutes (6 images/minute), nous observons un défaut de répétabilité d'amplitude maximale ΔI_{max} de 61 DL, d'écart type (autour de la courbe lissée) 25 DL, soit environ 2,4 % de la valeur moyenne du signal laser lissé.

De même pour les images prises à $8\ \mu\text{m}$ (4 images/minute), la figure 81 présente le profil du défaut de répétabilité sur la zone de mesure d'une amplitude maximale de 8968 DL montrée sur l'image de gauche.

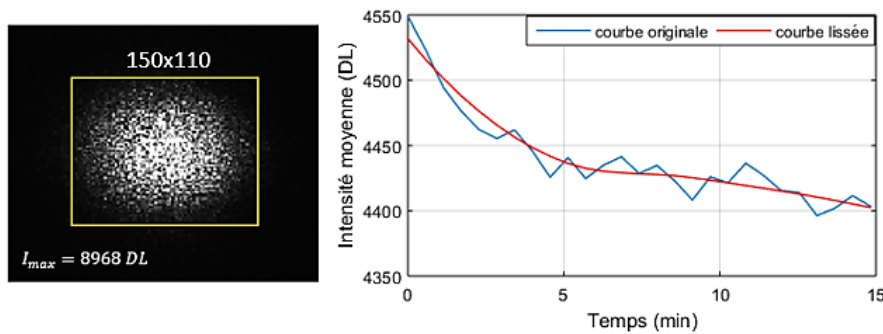


Figure 81 : Intensité moyenne représentant des images éclairées à $8\ \mu\text{m}$ pour une durée de 15 minutes d'acquisition.

Nous observons une dérive thermique ΔI de 45 DL après la stabilisation du détecteur infrarouge (environ 5 minutes), et une incertitude sur la moyenne de la zone de 10 DL, soit environ 0,2 % du signal moyen.

Nous pouvons confirmer que les dérives thermiques sont d'amplitude négligeable sur la surface de référence, pendant la durée de l'expérience.

L'opération de moyennage spatial réduit l'incertitude des mesures d'images de fond à moins de 0,3 % du signal.

Parallèlement, le moyennage sur les images laser occasionne un défaut de répétabilité résiduel de l'ordre inférieur à 1,4 %.

L'illumination laser de la surface de référence et de l'échantillon s'effectue sous forme d'un faisceau monochromatique initialement gaussien, dont le profil est légèrement déformé par le passage dans l'optique à miroirs.

La figure 79 présente l'image de la surface éclairée de la référence lambertienne à $4\ \mu\text{m}$ acquise par la caméra refroidie sur la bande spectrale entre 3 et $5\ \mu\text{m}$ après soustraction de fond. Nous remarquons une allure générale gaussienne.

Le profil de la figure 79 à $4\ \mu\text{m}$ est d'amplitude maximale (I_{max}) de 5101 DL. La courbe rouge présente une interpolation gaussienne. L'ondulation maximale due au speckle B_{laser} est de l'ordre de 1500 DL, soit près de 30 % de l'amplitude maximale du signal.

De même, nous représentons ci-dessous l'image du faisceau laser à $8\ \mu\text{m}$ projeté sur la surface de référence, acquis par la caméra bolométrique A65 sur la bande spectrale entre 7,5 et $13\ \mu\text{m}$, après soustraction du fond.

L'amplitude maximale du signal de la gaussienne est 11240 DL pour l'image (b), avec une ondulation due au speckle d'environ 1750 DL, soit environ 15 %.

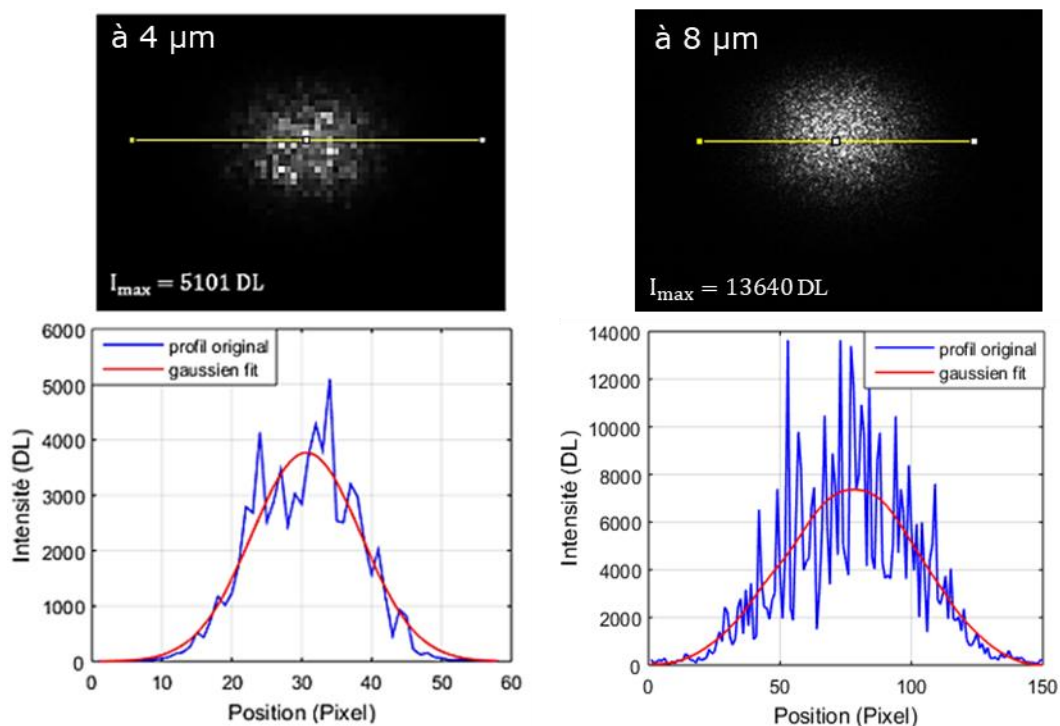


Figure 82 : Speckle présent sur la surface de l'infragold pris à 4 μm et à 8 μm avec une coupe centrale pour la présentation de l'allure de la distribution d'intensité selon les pixels avec son interpolation gaussienne.

7. Applications d'imagerie exploitant le speckle

Plusieurs chercheurs ont utilisé le principe du contraste de speckle pour développer des techniques de mesure. Dans cette partie, quelques techniques sont présentées dans le tableau 22 inspiré de [106] les résumant mais ne seront pas détaillées.

Tableau 22: Un résumé des différentes techniques qui utilisent le speckle comme source d'information.

Technique	Abréviation	Domaine	Principe
Analyse de contraste par speckle laser [256], [257]	LASCA	Spatial	Le contraste est déterminé dans 1 image sur 7×7 pixels.
Imagerie par speckle laser [258]	LSI	Temporel	Le contraste est déterminé en 1 pixel suivant 25 ou 49 images.
Analyse du contraste temporel par speckle laser [259]	LSTCA	Temporel	Le contraste est déterminé dans un pixel sur une séquence d'images.
Imagerie de perfusion par speckle laser [260], [261]	LSPI	Spatial et temporel	Combinaison de LASCA et LSI.
Débitmètre à speckle laser [262]	LSFG	Spatial et temporel	Le contraste est déterminé sur la base d'une zone de 3×3 pixels dans 3 images de speckle.
Contraste dérivé spatial avec moyennage [263]	SDCav	Spatial	Le contraste est déterminé en fonction de la moyenne d'une séquence d'images LASCA.

Analyse temporelle du contraste par speckle laser [264]	tLASCA	Spatial et temporel	Le contraste est déterminé en fonction de la moyenne d'une séquence d'images LSI.
---	--------	---------------------	--

Ces techniques reposent sur le principe du changement temporel du motif de speckle dynamique. La dynamique du motif de speckle contient des informations sur le mouvement des particules diffusées dans l'échantillon. Lorsque certaines des particules diffusantes sont en mouvement (par exemple, les cellules sanguines), le motif de speckle fluctue dans le temps.

Ce tableau met en exergue l'importance du paramètre statistique du « contraste » dans le speckle.

8. Fiche pratique – Tableau de consultation

Tous les équipements optoélectroniques sont intégrés à la chaîne de mesure en les interfaçant sur LabViewTM en utilisant des cartes d'acquisition DAQ de NI (National Instruments) pour :

1. allumer le laser, l'armer, le paramétrer :
 - température
 - gamme spectrale (module laser choisi)
 - courant à définir
 - résolution spectrale
 - vérification des longueurs d'onde émises par le laser
2. activer la rotation du diffuseur.
3. paramétrer les positions en x et en y des miroirs motorisés selon le tableau de consultation correspondant au module laser choisi.
 - tableau de consultation :
 - ajuster les tensions/la position des miroirs, suivant X et Y, en fonction des longueurs d'onde pour aligner le centre de l'éclairage avec le centre de l'infragold en vue de centraliser l'éclairage.
4. sélectionner la caméra à utiliser adéquate à la gamme spectrale utilisée dans le balayage.
5. synchroniser l'acquisition d'image après validation du protocole et sauvegarder les images acquises dans des fichiers précis.

9. Etalon externe - éclairage simultané

Cette méthode impliquait l'utilisation d'une lame séparatrice voir figure 83.

Le faisceau laser est guidé par des miroirs dorés plans pour atteindre le diffuseur en rotation. A la suite, il est focalisé sur la lame séparatrice pour pouvoir éclairer la référence commerciale et l'échantillon végétal en étude.

Le séléniure de zinc est le composant principal des lames séparatrices dans l'infrarouge, il présente une absorbance de 30% dans notre gamme de longueur d'onde MIR.

La partie résiduelle est répartie en 50 : 50 (transmission : réflexion).

Le flux, collecté de la réflexion de la feuille végétale, est noyé dans l'image du fond sans éclairage laser (~15 D.L.).

Par la suite, nous ne pourrions pas utiliser ces configurations pour illuminer la référence et l'échantillon.

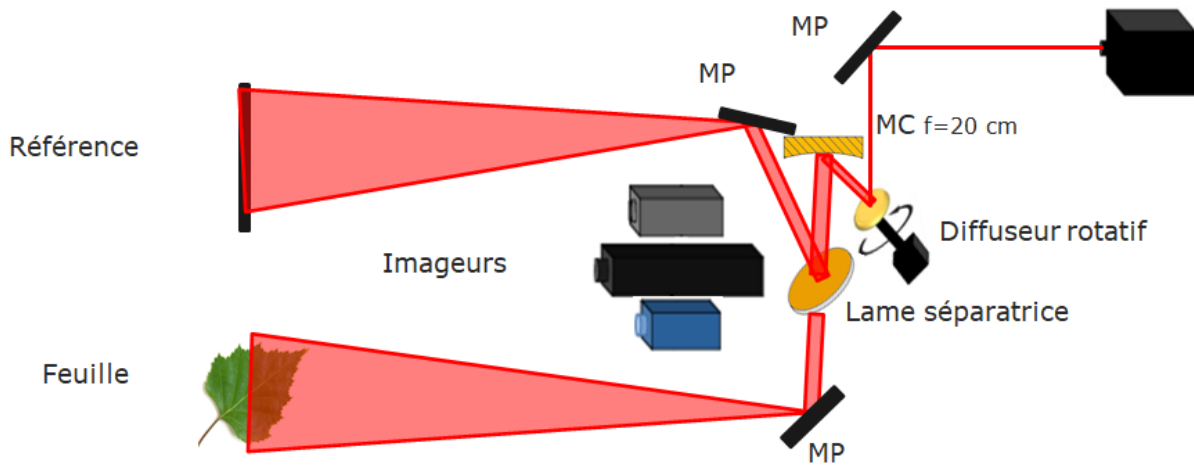


Figure 83 : Configuration utilisant une lame séparatrice. MP : miroir plan, MC : miroir concave.

10. Fabrication de la référence secondaire

Pour créer notre propre étalon secondaire, nous avons utilisé une image micrographie pour estimer la taille moyenne des grains présents sur la référence commerciale "infragold".

Ensuite, nous avons acheté des papiers de verre avec des grains de taille similaire ($\sim 30 \mu\text{m}$).

Cependant, les propriétés optiques de ces papiers de verre différaient, ce qui nous a conduits à réaliser un dépôt d'or par pulvérisation cathodique afin d'harmoniser leurs caractéristiques réfléchissantes.

La pulvérisation cathodique est une technique couramment utilisée pour déposer des matériaux minces, comme des métaux, sur des substrats tels que des échantillons [265].

Pour le dépôt d'or sur notre échantillon, nous avons utilisé une cathode en or et un gaz inerte, généralement de l'argon, dans une chambre de pulvérisation sous vide.

La pression à l'intérieur de la chambre était très basse ($\sim 10^{-2}$ Pa) pour réduire les interactions indésirables entre les gaz et les atomes éjectés lors de la pulvérisation cathodique, ce qui permettait d'obtenir des dépôts plus uniformes et purs sur le substrat.

La figure 84 illustre le protocole du dépôt d'or sur le substrat composé du papier de verre.

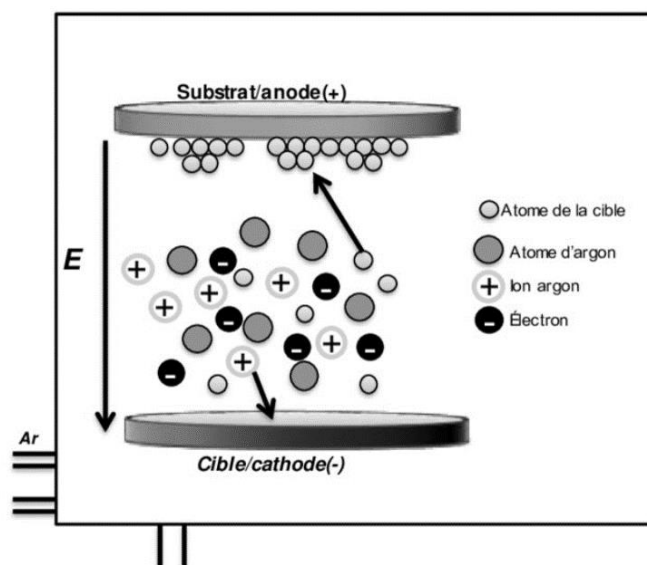


Figure 84 : Illustration de la méthode de pulvérisation cathodique [266].

Les ions Ar^+ du plasma généré par l'ionisation du gaz inerte bombardent la surface de la cathode en or, ce qui arrache des atomes d'or de la surface de la cathode.

Ces atomes d'or éjectés s'accumulent ensuite sur la surface de l'échantillon, formant une couche mince d'or.

Nous avons maîtrisé le dépôt d'or pour ne pas réduire la taille des grains, et son épaisseur moyenne était d'environ 50 nm pour obtenir une surface réfléchissante malléable que nous avons découpée autour de la cible de notre étude.

11. Etalement du laser sur l'Infragold

Cette configuration expérimentale a permis la mesure du flux diffusé de référence du faisceau.

Pour vérifier que les autres paramètres de l'équation ne varient pas de la même manière que la puissance, nous avons extrait les étalements en X et en Y, en parallèle avec le critère d'évaluation " R^2 ".

Ce critère quantifie l'efficacité de notre interpolation gaussienne (3.1) par rapport à l'éclairage laser. Les graphiques de la figure 85 illustrent cette analyse.

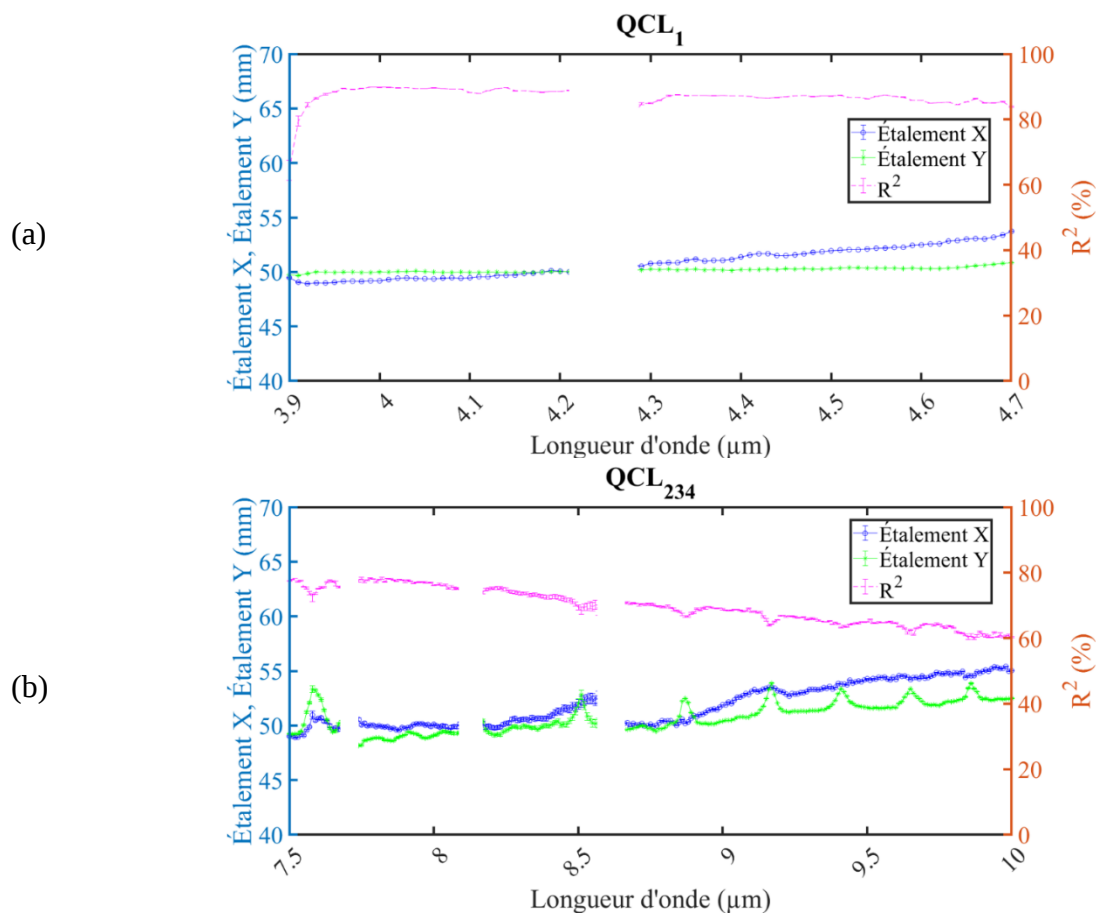


Figure 85 : Les étalements suivant X et Y ainsi que le coefficient de détermination R^2 en fonction de la longueur d'onde suivant les modules lasers (a) QCL₁ (b) QCL₂₃₄.

12. Etude temporelle de rapport de spectre

Dans cette section, nous avons analysé les décalages spectraux en réaction au stress et à la composition des feuilles.

Pour ce faire, nous allons calculer des ratios afin d'évaluer ces relations sous l'influence du stress, fournissant ainsi des informations précises sur l'évolution temporelle des réponses spectrales.

Dans les sections suivantes, je présente une analyse spectrotemporelle utilisant les modules laser QCL₁ et QCL₂₃₄. Cette analyse porte sur le rapport entre la surface foliaire et les nervures en réponse au stress, décomposée par jour, notamment :

- rapport Surface foliaire/les nervures en fonction du stress
 - jour
 - témoin : Spectre moyen foliaire / spectre moyen nervure
 - stressé : Spectre moyen foliaire / spectre moyen nervure
- intercomposantes sous stress
 - jour
 - foliaire : spectre moyen témoin / spectre moyen stressé
 - nervure : spectre moyen témoin / spectre moyen stressé

12.1. Analyse spectrotemporelle du rapport foliaire par les nervures

Le rapport quotidien est calculé par le ratio moyen du taux de réflectance spectrale entre la zone foliaire et les nervures, sous différents régimes d'irrigation : le témoin représenté par la courbe verte et le stressé par la courbe en marron suivant les formules suivantes :

$$\begin{aligned}\rho_{MoyenRégime}(\lambda) &= \frac{\bar{\rho}_{Surface\ FoliaireRégime}(\lambda) \pm \Delta_{Surface\ FoliaireRégime}(\lambda)}{\bar{\rho}_{NervureRégime}(\lambda) \pm \Delta_{NervureRégime}(\lambda)} \\ &= \frac{\bar{\rho}_{Surface\ FoliaireRégime}(\lambda)}{\bar{\rho}_{NervureRégime}(\lambda)} \pm \Delta_{\rho_{MoyenRégime}}(\lambda)\end{aligned}\quad (55)$$

$$\Delta_{MoyenRégime}(\lambda) = \frac{\bar{\rho}_{Surface\ FoliaireRégime}(\lambda)}{\bar{\rho}_{NervureRégime}(\lambda)} \times \sqrt{\left(\frac{\Delta_{Surface\ FoliaireRégime}(\lambda)}{\bar{\rho}_{Surface\ FoliaireRégime}(\lambda)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{StressZone}(\lambda)}{\bar{\rho}_{NervureRégime}(\lambda)}\right)^2}\quad (56)$$

Les résultats quotidiens sont présentés dans les graphiques de la figure 86, selon les longueurs d'onde des modules laser QCL₁ et QCL₂₃₄.

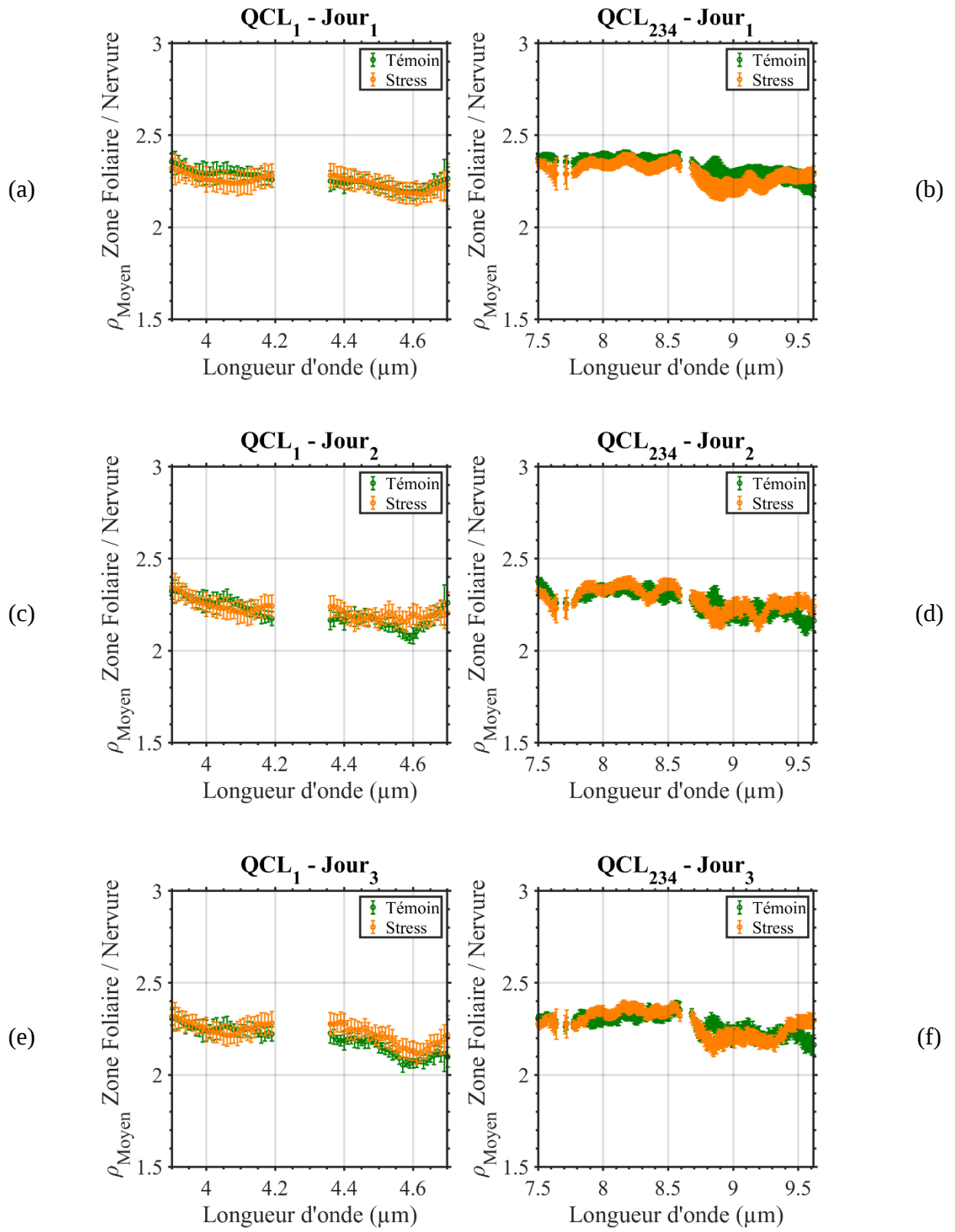
Les données révèlent une information constante pendant toute la période d'expérimentation, indiquant que la zone foliaire réfléchit au moins deux fois plus de lumière que les nervures, soulignant ainsi leur différence de fonction dans la photosynthèse, comme le montre le rapport qui fluctue autour de la valeur ~2,4.

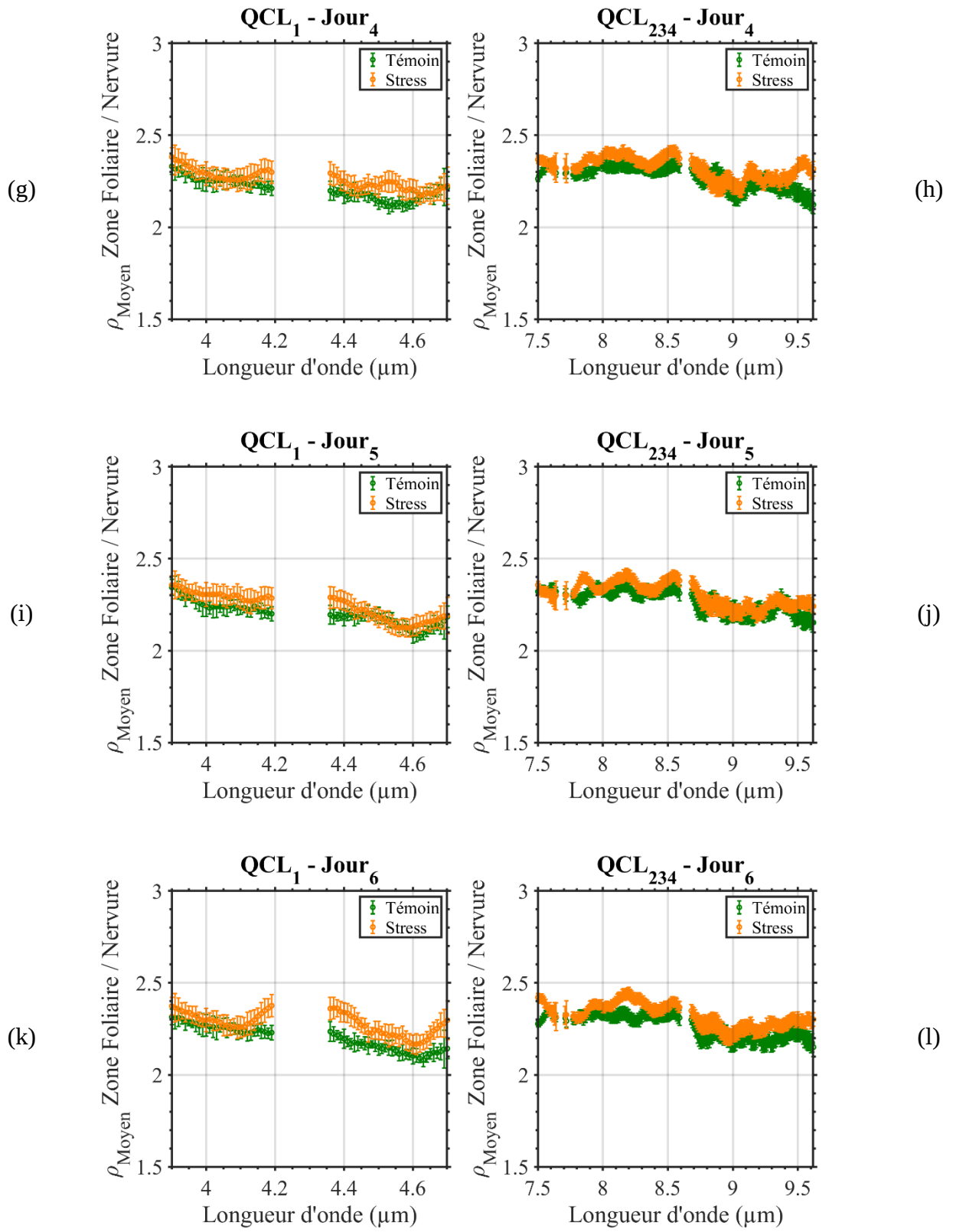
Les barres d'erreurs illustrent la dispersion par rapport à la valeur moyenne calculée des différents spectres de taux de réflectance d'une même zone, en fonction des divers régimes d'irrigation. Les valeurs, ne dépassant pas 10% de la moyenne, sont considérées comme acceptables.

Au cours des trois premiers jours, les courbes des témoins et stressés se chevauchent, suggérant une stabilité du rapport, en raison d'une teneur en eau de 60%, comme illustré dans la figure 62.

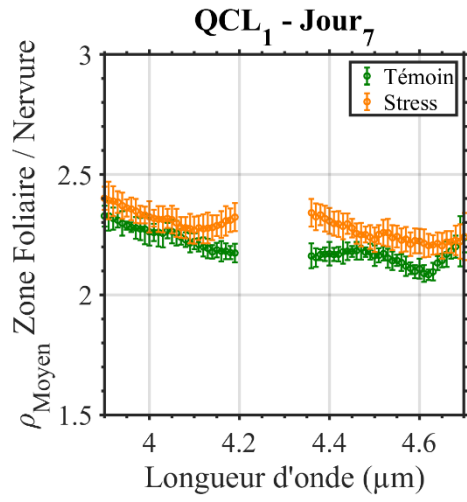
À partir du quatrième jour, le rapport du groupe stressé augmente légèrement, dépassant celui du témoin, mais avec une allure similaire.

Cette divergence persiste tout au long de l'expérience, tandis que le rapport du témoin demeure globalement stable. La discussion de ces observations se trouve après les figures ci-dessous.

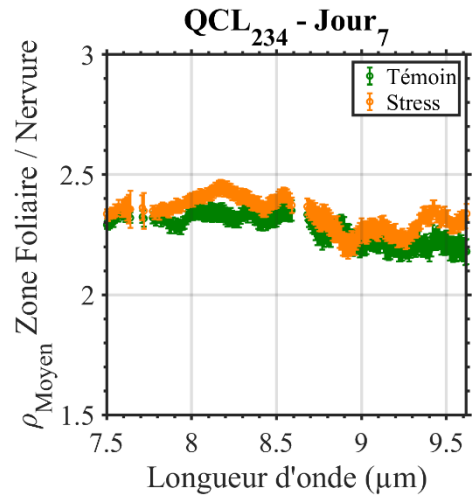




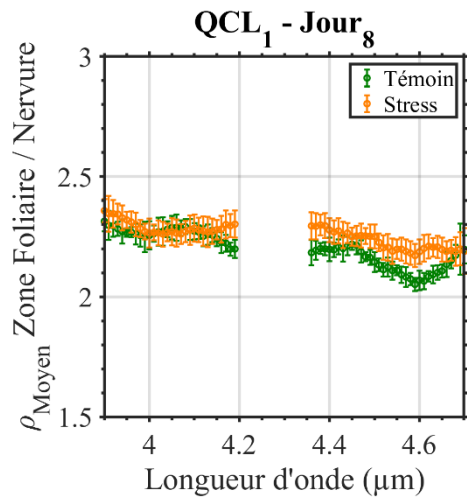
(m)



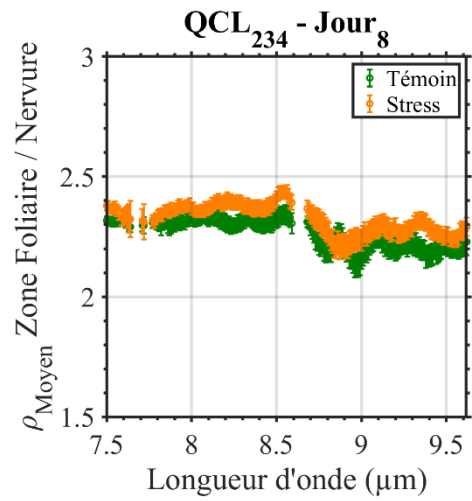
(n)



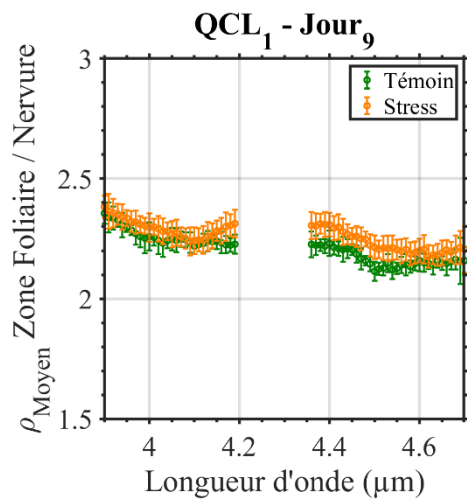
(o)



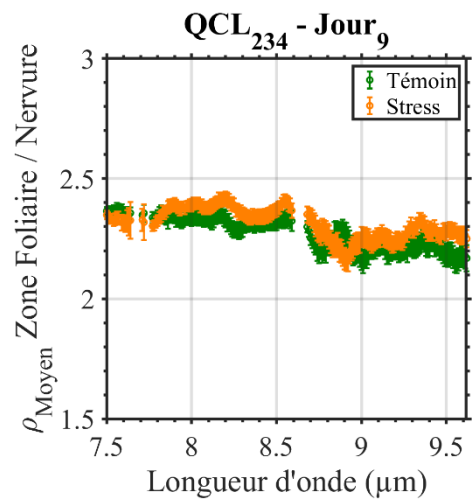
(p)



(q)



(r)



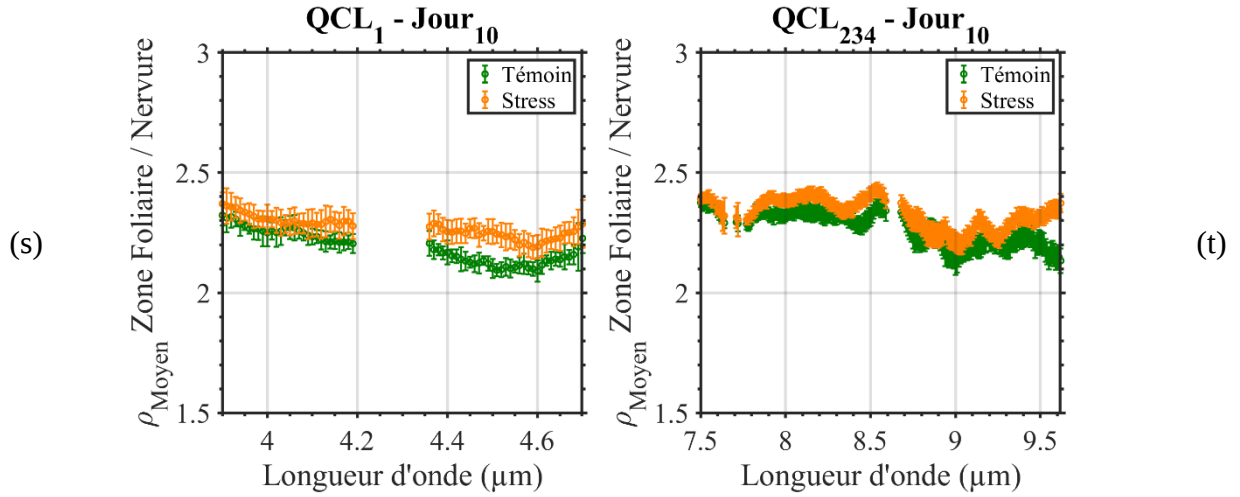


Figure 86 : Évolution du rapport moyen des spectres de réflectance entre la zone foliaire et les nervures au fil des jours. Chaque échantillon représente une plante, avec deux mesures sur chacune des deux faces des deux feuilles, montrant les différences de réflectance entre les plantes témoins et celles soumises au stress hydrique.

Plusieurs hypothèses émergent, notamment des distorsions spectrales observées principalement chez les plantes stressées, suggérant un lien avec l'impact du stress hydrique sur les réponses spectrales des plantes dans l'infrarouge.

Selon la littérature sur la physiologie des feuilles, en cas de stress hydrique et d'absence d'eau, les feuilles absorbent moins les rayons infrarouges et réfléchissent davantage.

Ce rapport entre deux zones distinctes de la feuille, différentes dans leur composition, interagit différemment sous stress.

Certains chercheurs soulignent que dans les applications de spectroscopie, les surfaces foliaires peuvent être plus réfléchissantes que les nervures, notamment dans l'infrarouge moyen et lointain [251], [267], justifié par la rugosité accrue de la surface foliaire qui augmente la réflectance en dispersant davantage la lumière.

D'autres chercheurs notent qu'avec la réduction de l'eau, la concentration de lignine et de cellulose augmente, ces composants organiques réfléchissant davantage dans l'infrarouge. Cela est attribuable à la composition des surfaces foliaires, qui contiennent plus de chlorophylle que les nervures [268], [269].

12.2. Analyse spectrotemporelle du rapport inter-composantes sous stress

Dans cette section, nous examinons le rapport inter-composantes sous stress hydrique. Ce rapport offre une indication des longueurs d'onde susceptibles de subir des distorsions ou des changements brusques sous stress.

Nous calculons le ratio des spectres moyens du taux de réflectance pour deux éléments clés :

$$\rho_{MoyenZone}(\lambda) = \frac{\bar{\rho}_{TémoinZone}(\lambda) \pm \Delta_{TémoinZone}(\lambda)}{\bar{\rho}_{StressZone}(\lambda) \pm \Delta_{StressZone}(\lambda)} = \frac{\bar{\rho}_{TémoinZone}(\lambda)}{\bar{\rho}_{StressZone}(\lambda)} \pm \Delta_{\rho_{MoyenZone}}(\lambda) \quad (57)$$

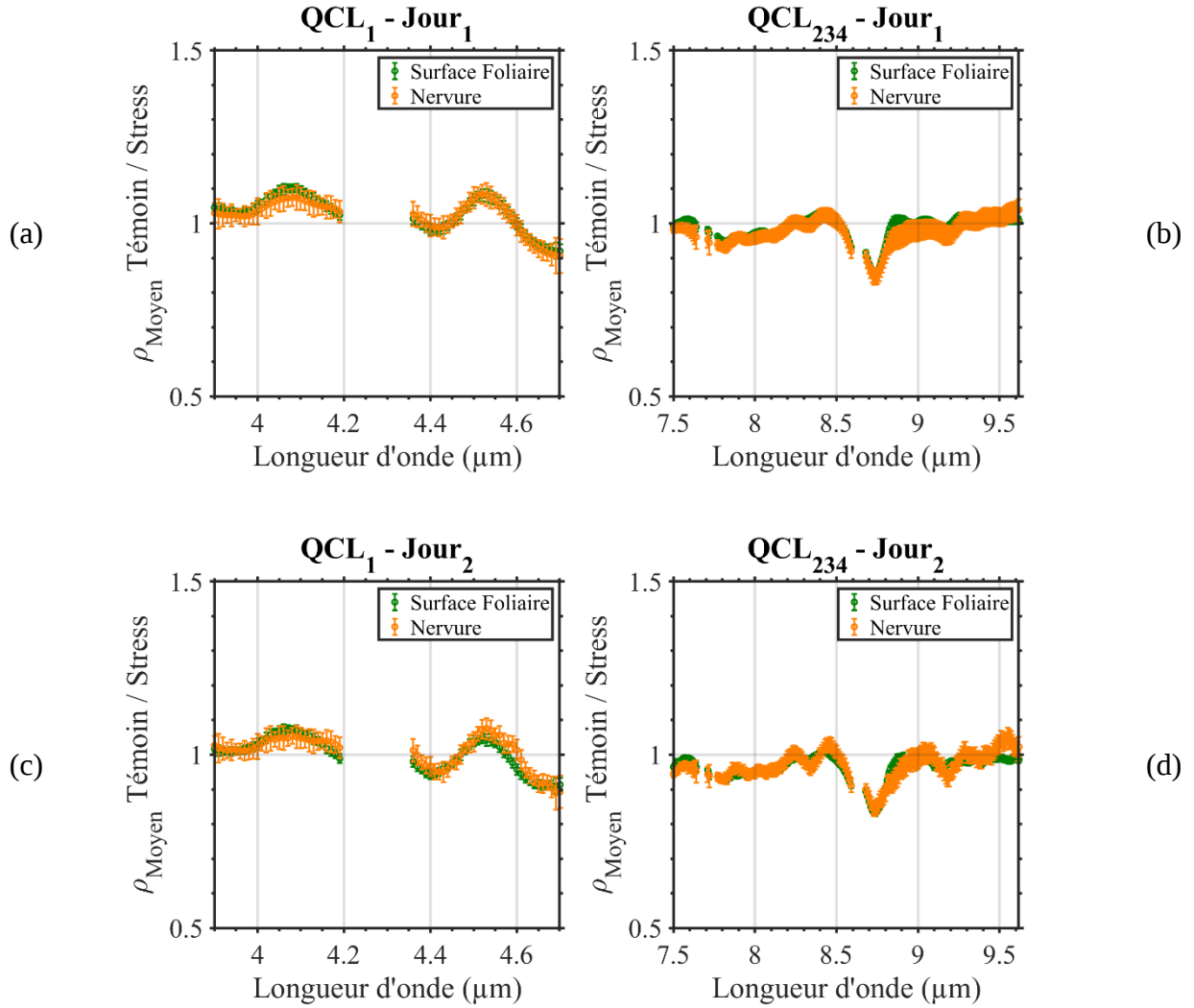
$$\Delta_{\rho_{MoyenZone}}(\lambda) = \frac{\bar{\rho}_{TémoinZone}(\lambda)}{\bar{\rho}_{StressZone}(\lambda)} \times \sqrt{\left(\frac{\Delta_{TémoinZone}(\lambda)}{\bar{\rho}_{TémoinZone}(\lambda)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{StressZone}(\lambda)}{\bar{\rho}_{StressZone}(\lambda)}\right)^2} \quad (58)$$

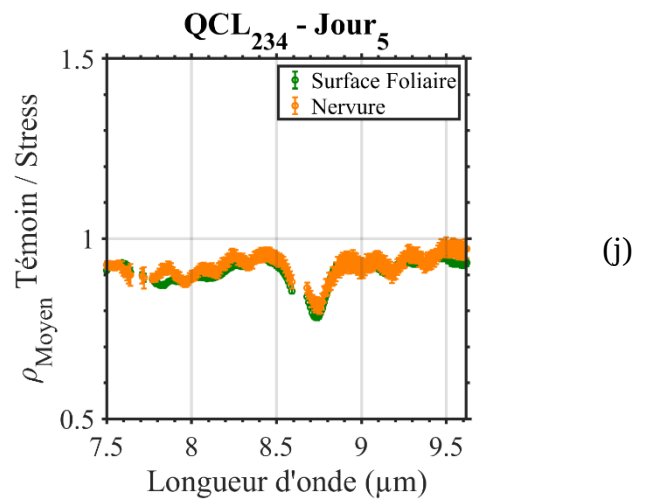
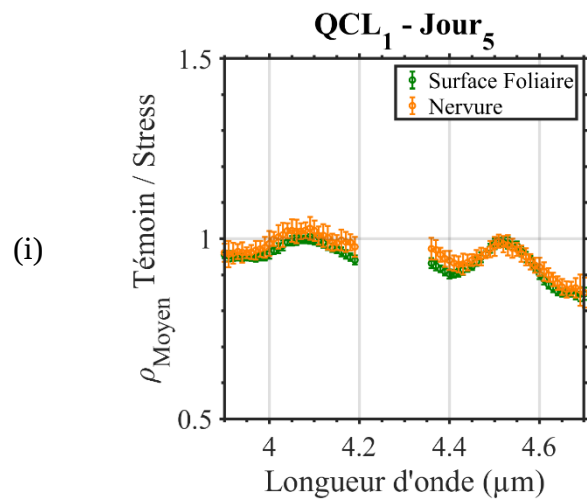
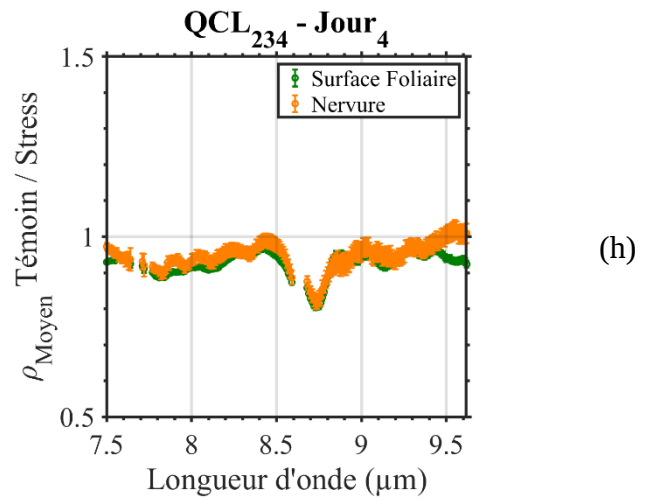
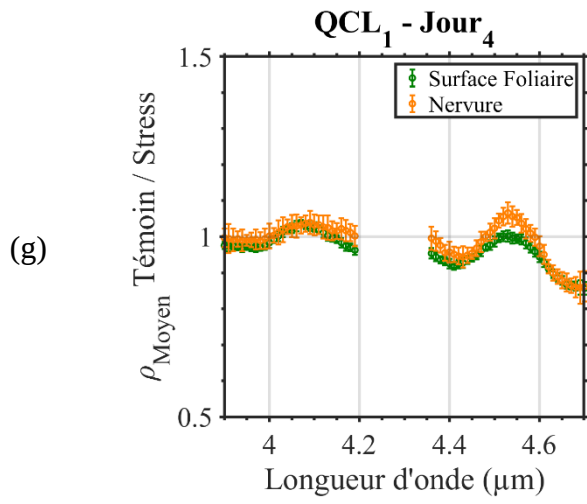
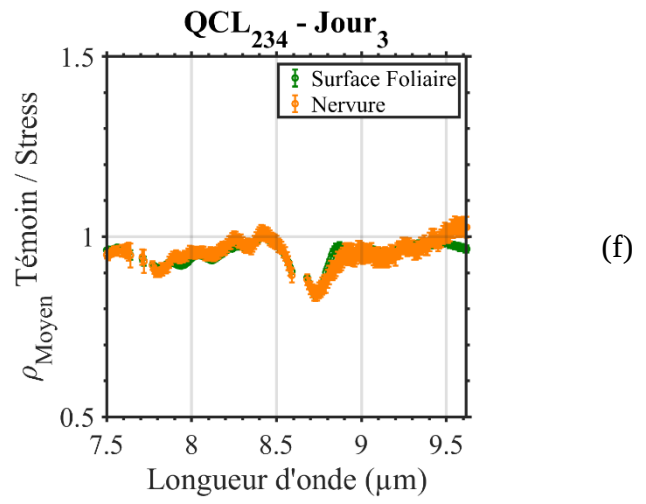
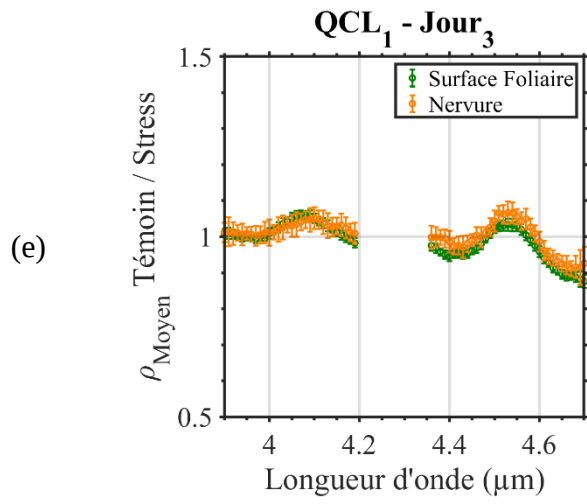
La surface foliaire (Témoin/Stressé), représentée par la courbe verte.

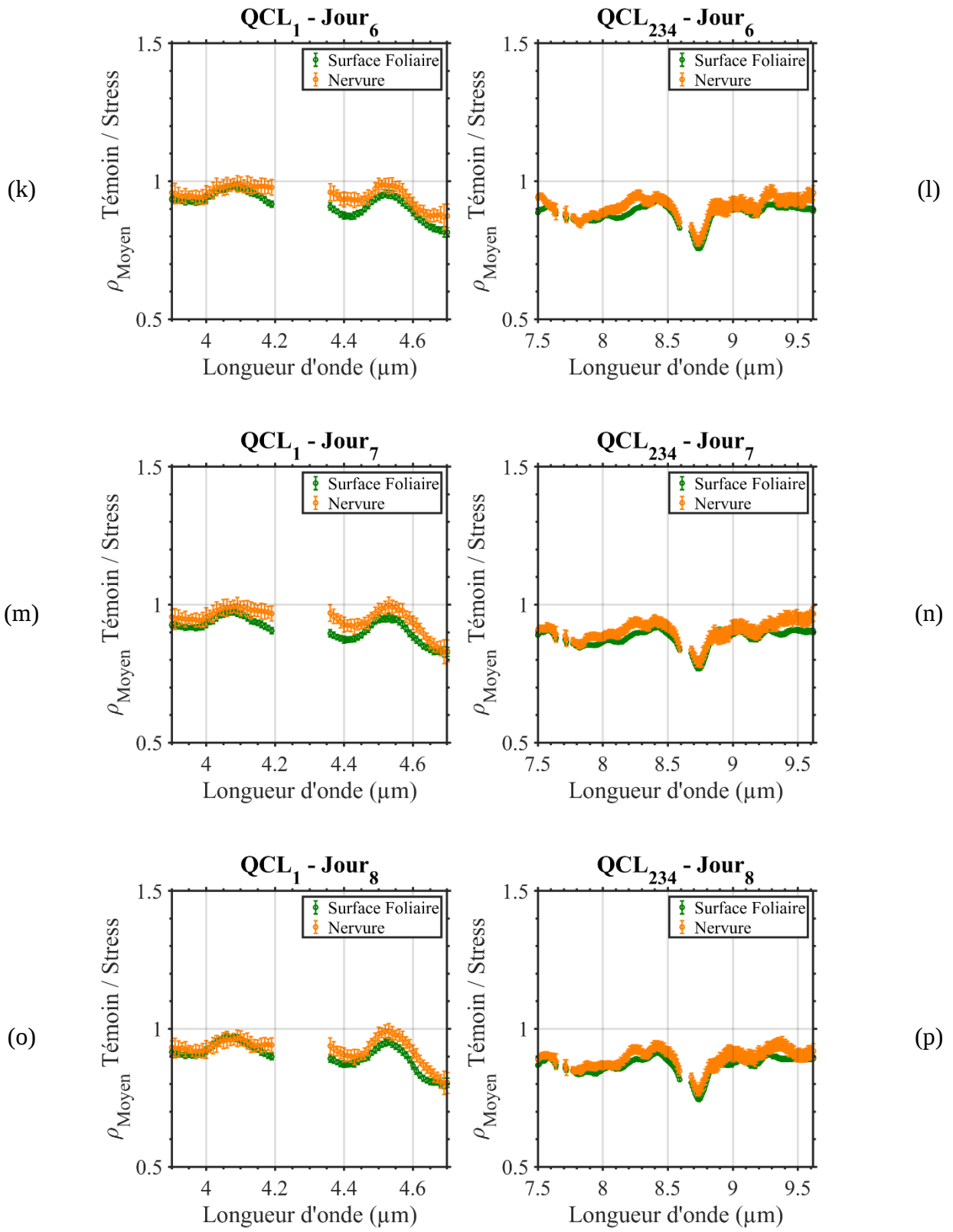
- Les nervures (Témoin/Stressé), représentées par la courbe marron.

Les barres d'erreur illustrent la dispersion par rapport à la valeur moyenne calculée des différents spectres de taux de réflectance d'une même zone, en fonction des divers régimes d'irrigation. Les valeurs, ne dépassant pas 10% de la moyenne, sont considérées comme acceptables. Les résultats pour chaque jour de mesure sont présentés figure 87.

Les données révèlent une fluctuation du rapport autour de 1, étant donné qu'il s'agit du rapport d'une même zone soumise à différents régimes d'irrigation pendant toute la période d'expérimentation. L'interprétation de ces résultats est présentée ci-dessous.







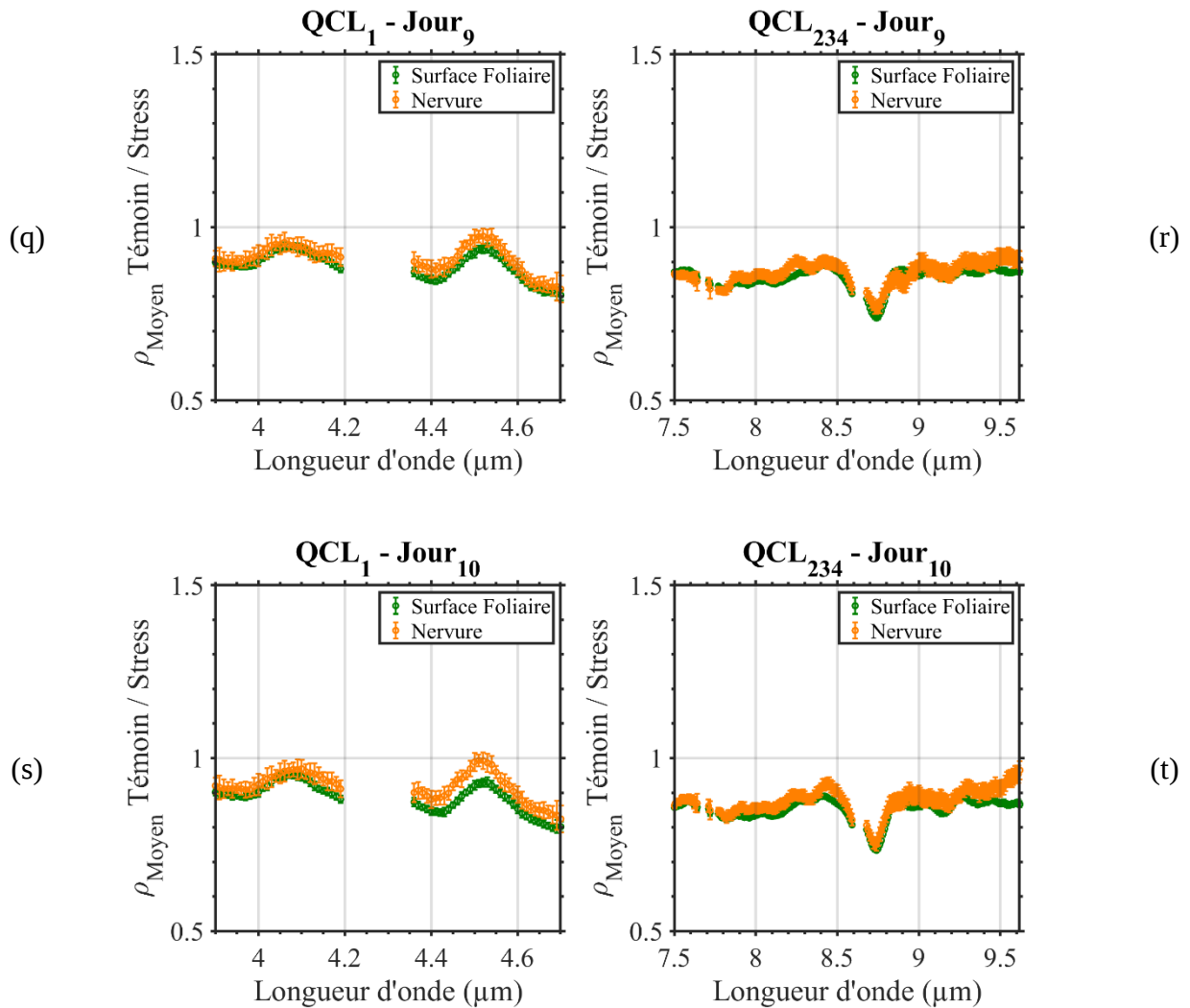


Figure 87 : Évolution du rapport moyen des spectres de réflectance entre les plantes témoins et stressées pour les deux zones, foliaire et nervures, au fil des jours. Chaque échantillon représente une plante, avec deux mesures sur chacune des deux faces des deux feuilles, mettant en évidence les différences de réflectance entre les plantes témoins et celles soumises au stress hydrique.

Les barres d'erreur illustrent la dispersion par rapport à la valeur moyenne calculée des différents spectres de taux de réflectance d'une même zone, en fonction des divers régimes d'irrigation. Les valeurs, ne dépassant pas 10% de la moyenne, sont considérées comme acceptables.

Au cours des trois premiers jours, les courbes des témoins et des éléments sous stress se chevauchent, suggérant une stabilité du rapport en raison d'une teneur en eau de 60%, non détectable, comme illustré dans la figure 62.

À partir du quatrième jour, les rapports de la surface foliaire et des nervures montrent une allure similaire avec une tendance décroissante suivant les longueurs d'onde.

Les rapports des deux zones, foliaire et nervures, diminuent progressivement au fil des jours d'expérimentation, passant d'un point de départ à une échelle de 1 à une valeur de 0,8.

Un point notable est que le rapport de la surface foliaire devient inférieur à celui des nervures. Cela s'explique par le fait que la surface foliaire sous stress réfléchit davantage, réduisant ainsi la valeur du rapport entre le témoin et le stress par rapport aux nervures.

Nous observons le début des distorsions spectrales des rapports, apparaissant dès le quatrième et cinquième jour dans la plage spectrale de 7,8 à 8,8 μm . Par la suite, ce décalage se manifeste pratiquement sur l'ensemble des longueurs d'onde, confirmant également par Buitrago qu'il ne s'agit pas de longueurs spécifiques, mais plutôt d'une influence sur une gamme spectrale étendue [212].

L'analyse des rapports entre la surface foliaire et les nervures a souligné une différence marquée dans leur réponse aux conditions de stress hydrique. Les données ont révélé que la surface foliaire réfléchit au moins deux fois plus de lumière que les nervures, indiquant leur divergence fonctionnelle dans la photosynthèse. Des variations dans le rapport entre les deux zones ont été observées, avec une augmentation légère dans le groupe stressé à partir du quatrième jour.

L'analyse ultérieure des rapports entre les zones foliaires et les nervures a mis en lumière une augmentation du rapport dans la surface foliaire stressée par rapport à la nervure stressée, confirmant ainsi l'impact différencié du stress hydrique. Cette tendance s'est poursuivie avec le temps, avec des distorsions spectrales détectées dès le quatrième jour dans une plage spectrale spécifique, évoluant ensuite sur l'ensemble des longueurs d'onde.

Références

- [1] M. C. Hunter, R. G. Smith, M. E. Schipanski, L. W. Atwood, et D. A. Mortensen, « Agriculture in 2050: Recalibrating Targets for Sustainable Intensification », *BioScience*, vol. 67, n° 4, p. 386-391, avr. 2017, doi: 10.1093/biosci/bix010.
- [2] M. A. Altieri et C. I. Nicholls, « The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate », *Climatic Change*, vol. 140, n° 1, p. 33-45, janv. 2017, doi: 10.1007/s10584-013-0909-y.
- [3] A. Chawade *et al.*, « A transnational and holistic breeding approach is needed for sustainable wheat production in the Baltic Sea region », *Physiologia Plantarum*, vol. 164, n° 4, p. 442-451, déc. 2018, doi: 10.1111/pp1.12726.
- [4] Buitrago Acevedo, M.F. *et al.*, « Infrared spectroscopy of leaf traits », University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), 2018. doi: 10.3990/1.9789036545341.
- [5] O. Tregoat, N. Ollat, G. Grenier, et C. Van Leeuwen, « Etude comparative de la précision et de la rapidité de mise en oeuvre de différentes méthodes d'estimation de la surface foliaire de la vigne », *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, vol. 35, n° 1, Art. n° 1, 2001.
- [6] M.-A. Bourgeon, « Conception et évaluation d'un dispositif d'imagerie multispectrale de proxidtection embarqué pour caractériser le feuillage de la vigne », PhD Thesis, Université de Bourgogne, 2015.
- [7] A. Zygielbaum, « Detection and measurement of water stress in vegetation using visible spectrum reflectance », *Theses and Dissertations in Geography*, p. 4, 2009.
- [8] G. Bitelli, A. Simone, F. Girardi, et C. Lantieri, « Laser Scanning on Road Pavements: A New Approach for Characterizing Surface Texture », *Sensors*, vol. 12, n° 7, Art. n° 7, juill. 2012, doi: 10.3390/s120709110.
- [9] C. E. Fakir, « Imagerie hyperspectrale active basée sur un laser QCL largement accordable dans l'infrarouge moyen », phdthesis, Université Rennes 1, 2020. Consulté le: 21 septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03275041>
- [10] C. E. Fakir *et al.*, « Active hyperspectral mid-infrared imaging based on a widely tunable quantum cascade laser for early detection of plant water stress », *OE*, vol. 60, n° 2, p. 023106, févr. 2021, doi: 10.1117/1.OE.60.2.023106.
- [11] L. Song *et al.*, « An Integrated Solution of UAV Push-Broom Hyperspectral System Based on Geometric Correction with MSI and Radiation Correction Considering Outdoor Illumination Variation », *Remote Sensing*, vol. 14, n° 24, Art. n° 24, janv. 2022, doi: 10.3390/rs14246267.
- [12] A. F. H. Goetz, G. Vane, J. E. Solomon, et B. N. Rock, « Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing », *Science*, vol. 228, n° 4704, p. 1147-1153, juin 1985, doi: 10.1126/science.228.4704.1147.
- [13] Y. W. Wang, N. P. Reder, S. Kang, A. K. Glaser, et J. T. C. Liu, « Multiplexed Optical Imaging of Tumor-Directed Nanoparticles: A Review of Imaging Systems and Approaches », *Nanotheranostics*, vol. 1, n° 4, p. 369-388, août 2017, doi: 10.7150/ntno.21136.
- [14] M. Govender, K. Chetty, et H. Bulcock, « A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies », *Water SA*, vol. 33, n° 2, p. 145-151, avr. 2007, doi: 10.10520/EJC116430.

- [15] A. A. Gowen, C. P. O'Donnell, P. J. Cullen, G. Downey, et J. M. Frias, « Hyperspectral imaging – an emerging process analytical tool for food quality and safety control », *Trends in Food Science & Technology*, vol. 18, n° 12, p. 590-598, déc. 2007, doi: 10.1016/j.tifs.2007.06.001.
- [16] P. W. Yuen et M. Richardson, « An introduction to hyperspectral imaging and its application for security, surveillance and target acquisition », *The Imaging Science Journal*, vol. 58, n° 5, p. 241-253, oct. 2010, doi: 10.1179/174313110X12771950995716.
- [17] M. Diem *et al.*, « Molecular pathology via IR and Raman spectral imaging », *Journal of Biophotonics*, vol. 6, n° 11-12, p. 855-886, 2013, doi: 10.1002/jbio.201300131.
- [18] S. Vishnu, R. R. Nidamanuri, et R. Bremananth, « Spectral material mapping using hyperspectral imagery: a review of spectral matching and library search methods », *Geocarto International*, vol. 28, n° 2, p. 171-190, avr. 2013, doi: 10.1080/10106049.2012.665498.
- [19] M. Kubik, « Chapter 5 Hyperspectral Imaging: A New Technique for the Non-Invasive Study of Artworks », in *Physical Techniques in the Study of Art, Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 2, D. Creagh et D. Bradley, Éd., in *Physical Techniques in the study of Art, Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 2. , Elsevier, 2007, p. 199-259. doi: 10.1016/S1871-1731(07)80007-8.
- [20] J. Jia *et al.*, « Tradeoffs in the Spatial and Spectral Resolution of Airborne Hyperspectral Imaging Systems: A Crop Identification Case Study », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, p. 1-18, 2022, doi: 10.1109/TGRS.2021.3096999.
- [21] L. D. Medus, M. Saban, J. V. Francés-Víllora, M. Bataller-Mompeán, et A. Rosado-Muñoz, « Hyperspectral image classification using CNN: Application to industrial food packaging », *Food Control*, vol. 125, p. 107962, juill. 2021, doi: 10.1016/j.foodcont.2021.107962.
- [22] D. Wu et D.-W. Sun, « Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review — Part I: Fundamentals », *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 19, p. 1-14, juill. 2013, doi: 10.1016/j.ifset.2013.04.014.
- [23] A. Y. Khaled, S. Abd Aziz, S. K. Bejo, N. M. Nawî, I. A. Seman, et D. I. Onwude, « Early detection of diseases in plant tissue using spectroscopy – applications and limitations », *Applied Spectroscopy Reviews*, vol. 53, n° 1, p. 36-64, janv. 2018, doi: 10.1080/05704928.2017.1352510.
- [24] S. A. D. M. Zahir, A. F. Omar, M. F. Jamlos, M. A. M. Azmi, et J. Muncan, « A review of visible and near-infrared (Vis-NIR) spectroscopy application in plant stress detection », *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 338, p. 113468, mai 2022, doi: 10.1016/j.sna.2022.113468.
- [25] Park, Bosoon and Abbott, Judith A and Lee, Kang-Jin and Choi, Chang-Hyun and Choi, et Kyu-Hong, « Near-infrared spectroscopy to predict soluble solids and firmness in apples », *2002 ASAE Annual Meeting*, 2002.
- [26] R. Masot *et al.*, « Design of a low-cost non-destructive system for punctual measurements of salt levels in food products using impedance spectroscopy », *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 158, n° 2, p. 217-223, mars 2010, doi: 10.1016/j.sna.2010.01.010.
- [27] D. Sylla, « Fusion de données provenant de différents capteurs satellitaires pour le suivi de la qualité de l'eau en zones côtières. Application au littoral de la région PACA », thesis, Toulon, 2014. Consulté le: 2 octobre 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2014TOUL0013>

- [28] M. Soltani, *Partitionnement des images hyperspectrales de grande dimension spatiale par propagation d'affinité*. Rennes 1, 2014. Consulté le: 18 juillet 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2014REN1S099>
- [29] P. Mishra, M. S. M. Asaari, A. Herrero-Langreo, S. Lohumi, B. Diezma, et P. Scheunders, « Close range hyperspectral imaging of plants: A review », *Biosystems Engineering*, vol. 164, p. 49-67, déc. 2017, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.09.009.
- [30] A. Lowe, N. Harrison, et A. P. French, « Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress », *Plant Methods*, vol. 13, n° 1, p. 80, oct. 2017, doi: 10.1186/s13007-017-0233-z.
- [31] P. V. Manley, V. Sagan, F. B. Fritschi, et J. G. Burken, « Remote Sensing of Explosives-Induced Stress in Plants: Hyperspectral Imaging Analysis for Remote Detection of Unexploded Threats », *Remote Sensing*, vol. 11, n° 15, Art. n° 15, janv. 2019, doi: 10.3390/rs11151827.
- [32] S. Sabzi, R. Pourdarbani, M. H. Rohban, G. García-Mateos, J. Paliwal, et J. M. Molina-Martínez, « Early Detection of Excess Nitrogen Consumption in Cucumber Plants Using Hyperspectral Imaging Based on Hybrid Neural Networks and the Imperialist Competitive Algorithm », *Agronomy*, vol. 11, n° 3, Art. n° 3, mars 2021, doi: 10.3390/agronomy11030575.
- [33] K. E. Jang *et al.*, « Field Application of a Vis/NIR Hyperspectral Imaging System for Nondestructive Evaluation of Physicochemical Properties in 'Madoka' Peaches », *Plants*, vol. 11, n° 17, Art. n° 17, janv. 2022, doi: 10.3390/plants11172327.
- [34] M. B. Stuart, M. Davies, M. J. Hobbs, T. D. Pering, A. J. S. McGonigle, et J. R. Willmott, « High-Resolution Hyperspectral Imaging Using Low-Cost Components: Application within Environmental Monitoring Scenarios », *Sensors*, vol. 22, n° 12, Art. n° 12, janv. 2022, doi: 10.3390/s22124652.
- [35] F. Vasefi, N. MacKinnon, et D. L. Farkas, « Chapter 16 - Hyperspectral and Multispectral Imaging in Dermatology », in *Imaging in Dermatology*, M. R. Hamblin, P. Avci, et G. K. Gupta, Éd., Boston: Academic Press, 2016, p. 187-201. doi: 10.1016/B978-0-12-802838-4.00016-9.
- [36] H. Akbari, K. Uto, Y. Kosugi, K. Kojima, et N. Tanaka, « Cancer detection using infrared hyperspectral imaging », *Cancer Science*, vol. 102, n° 4, Art. n° 4, avr. 2011, doi: 10.1111/j.1349-7006.2011.01849.x.
- [37] R. Baissa, K. Labbassi, P. Launeau, B. Ouajhain, et A. Gaudin, « Analyse hyperspectrale des carbonates jurassiques dans le Haut Atlas atlantique marocain : exemple du Lias inférieur de la formation d'Arigh Ouzla (bassin d'Essaouira) », *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 342, n° 12, Art. n° 12, déc. 2010, doi: 10.1016/j.crte.2010.10.001.
- [38] X. Prieto-Blanco, C. Montero-Orille, B. Couce, et R. de la Fuente, « Analytical design of an Offner imaging spectrometer », *Opt. Express, OE*, vol. 14, n° 20, Art. n° 20, oct. 2006, doi: 10.1364/OE.14.009156.
- [39] Y. Garini, I. T. Young, et G. McNamara, « Spectral imaging: Principles and applications », *Cytometry Part A*, vol. 69A, n° 8, Art. n° 8, 2006, doi: 10.1002/cyto.a.20311.
- [40] « IR Bandpass Filters: 1.75 - 12.00 μm Central Wavelength ». Consulté le: 4 décembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.thorlabs.com>
- [41] K. Wang, B. Yong, X. Gu, P. Xiao, et X. Zhang, « Spectral Similarity Measure Using Frequency Spectrum for Hyperspectral Image Classification », *IEEE Geoscience and*

- Remote Sensing Letters*, vol. 12, n° 1, p. 130-134, janv. 2015, doi: 10.1109/LGRS.2014.2329183.
- [42] P. Ghamisi *et al.*, « Advances in Hyperspectral Image and Signal Processing: A Comprehensive Overview of the State of the Art », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 5, n° 4, p. 37-78, déc. 2017, doi: 10.1109/MGRS.2017.2762087.
- [43] B. (ed) Charrier *et al.*, *Observation spatiale pour l'agriculture en Afrique: potentiels et défis*. AFD, 2016. Consulté le: 1 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://agritrop.cirad.fr/579494/>
- [44] D. Min *et al.*, « Early decay detection in fruit by hyperspectral imaging–Principles and application potential », *Food Control*, vol. 152, p. 109830, oct. 2023, doi: 10.1016/j.foodcont.2023.109830.
- [45] T. Dartois, M. Giordanengo, J.-L. Ribet, et U. D. Bello, « Design of the infrared imaging chain for the PRISM hyperspectral imager », in *Infrared Technology and Applications XXVI*, SPIE, déc. 2000, p. 547-560. doi: 10.1117/12.409896.
- [46] N. A. Hagen et M. W. Kudenov, « Review of snapshot spectral imaging technologies », *OE*, vol. 52, n° 9, Art. n° 9, sept. 2013, doi: 10.1117/1.OE.52.9.090901.
- [47] S. Ravel, « Démixage d'images hyperspectrales en présence d'objets de petite taille », déc. 2017, Consulté le: 2 octobre 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01743754>
- [48] J. S. Pearlman, P. S. Barry, C. C. Segal, J. Shepanski, D. Beiso, et S. L. Carman, « Hyperion, a space-based imaging spectrometer », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, n° 6, Art. n° 6, juin 2003, doi: 10.1109/TGRS.2003.815018.
- [49] M. Herring, T. Chrien, V. Duval, et T. Krabach, « Imaging spectrometry: concepts and system trade-offs », juill. 1993, doi: 10.1117/12.148117.
- [50] R. Sarić *et al.*, « Applications of hyperspectral imaging in plant phenotyping », *Trends in Plant Science*, vol. 27, n° 3, p. 301-315, mars 2022, doi: 10.1016/j.tplants.2021.12.003.
- [51] Liang. Gao et R. T. Smith, « Optical hyperspectral imaging in microscopy and spectroscopy – a review of data acquisition », *Journal of Biophotonics*, vol. 8, n° 6, p. 441-456, 2015, doi: 10.1002/jbio.201400051.
- [52] D. Manea et M. A. Calin, « Hyperspectral imaging in different light conditions », *The Imaging Science Journal*, vol. 63, n° 4, p. 214-219, mai 2015, doi: 10.1179/1743131X15Y.0000000001.
- [53] A. Zahavi, A. Palshin, D. C. Liyanage, et M. Tamre, « Influence of Illumination Sources on Hyperspectral Imaging », in *2019 20th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, mai 2019, p. 1-5. doi: 10.1109/REM.2019.8744086.
- [54] J. A. Giordmaine et R. C. Miller, « Tunable Coherent Parametric Oscillation in LiNbO_3 at Optical Frequencies », *Phys. Rev. Lett.*, vol. 14, n° 24, Art. n° 24, juin 1965, doi: 10.1103/PhysRevLett.14.973.
- [55] A. K. Goyal *et al.*, « Laser-based long-wave-infrared hyperspectral imaging system for the standoff detection of trace surface chemicals », *OE*, vol. 59, n° 9, p. 092003, mai 2020, doi: 10.1117/1.OE.59.9.092003.
- [56] M. F. B. Acevedo, T. A. Groen, C. A. Hecker, et A. K. Skidmore, « Identifying leaf traits that signal stress in TIR spectra », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 125, p. 132-145, 2017.
- [57] J. M. Hoffmann, X. Yin, J. Richter, A. Hartung, T. W. W. Maß, et T. Taubner, « Low-Cost Infrared Resonant Structures for Surface-Enhanced Infrared Absorption

- Spectroscopy in the Fingerprint Region from 3 to 13 μm », *J. Phys. Chem. C*, vol. 117, n° 21, p. 11311-11316, mai 2013, doi: 10.1021/jp402383h.
- [58] F. Wang, C. Zhao, H. Yang, H. Jiang, L. Li, et G. Yang, « Non-destructive and in-site estimation of apple quality and maturity by hyperspectral imaging », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 195, p. 106843, avr. 2022, doi: 10.1016/j.compag.2022.106843.
- [59] M. Ruett *et al.*, « Hyperspectral imaging for high-throughput vitality monitoring in ornamental plant production », *Scientia Horticulturae*, vol. 291, p. 110546, janv. 2022, doi: 10.1016/j.scienta.2021.110546.
- [60] N. Modir *et al.*, « LED-based hyperspectral endoscopic imaging », in *Optical Biopsy XX: Toward Real-Time Spectroscopic Imaging and Diagnosis*, SPIE, mars 2022, p. 47-58. doi: 10.1117/12.2609023.
- [61] D. Rybitwa, A. Wawrzyk, M. Łobacz, M. Machoy, D. Zeljaś, et S. Wilczyński, « Hyperspectral imaging and directional reflectance for predicting interaction of laser radiation with biodeteriorated objects threatening human health », *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 173, p. 105440, sept. 2022, doi: 10.1016/j.ibiod.2022.105440.
- [62] F. F. Sizov *et al.*, « Mercury–cadmium–telluride thin layers as subterahertz and infrared detectors », *OE*, vol. 54, n° 12, Art. n° 12, déc. 2015, doi: 10.1117/1.OE.54.12.127102.
- [63] K. F. Hulme et J. B. Mullin, « Indium antimonide—A review of its preparation, properties and device applications », *Solid-State Electronics*, vol. 5, n° 4, p. 211-IN10, juill. 1962, doi: 10.1016/0038-1101(62)90104-1.
- [64] S. H. Hwang, J. C. Shin, J. D. Song, W. J. Choi, J. I. Lee, et H. Han, « Detection wavelength tuning of InGaAs/GaAs quantum dot infrared photodetector with thermal treatment », *Microelectronics Journal*, vol. 36, n° 3, Art. n° 3, mars 2005, doi: 10.1016/j.mejo.2005.02.006.
- [65] R. J. Dorn *et al.*, « The CRIRES InSb megapixel focal plane array detector mosaic », in *Optical and Infrared Detectors for Astronomy*, SPIE, sept. 2004, p. 510-517. doi: 10.1117/12.551501.
- [66] Y. Renème *et al.*, « XPS investigation of surface changes during thermal aging of Natural Gas Vehicle catalysts: Influence of Rh addition to Pd », *Surface and Interface Analysis*, vol. 42, n° 6-7, p. 530-535, 2010, doi: 10.1002/sia.3215.
- [67] « Single Point Detectors - HORIBA ». Consulté le: 13 avril 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.horiba.com/us/en/scientific/products/osd/optical-components/single-point-detectors/>
- [68] W. Yang, L. Duan, G. Chen, L. Xiong, et Q. Liu, « Plant phenomics and high-throughput phenotyping: accelerating rice functional genomics using multidisciplinary technologies », *Current Opinion in Plant Biology*, vol. 16, n° 2, p. 180-187, mai 2013, doi: 10.1016/j.pbi.2013.03.005.
- [69] M. Matzrafi *et al.*, « Hyperspectral Technologies for Assessing Seed Germination and Trifloxysulfuron-methyl Response in *Amaranthus palmeri* (Palmer Amaranth) », *Frontiers in Plant Science*, vol. 8, 2017, Consulté le: 22 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.00474>
- [70] C. Nansen, G. Zhao, N. Dakin, C. Zhao, et S. R. Turner, « Using hyperspectral imaging to determine germination of native Australian plant seeds », *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 145, p. 19-24, avr. 2015, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2015.02.015.

- [71] X. Li, H. Xu, L. Feng, X. Fu, Y. Zhang, et C. Nansen, « Using proximal remote sensing in non-invasive phenotyping of invertebrates », *PLOS ONE*, vol. 12, n° 5, p. e0176392, mai 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0176392.
- [72] J. A. Gamon, J. Peñuelas, et C. B. Field, « A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency », *Remote Sensing of Environment*, vol. 41, n° 1, p. 35-44, juill. 1992, doi: 10.1016/0034-4257(92)90059-S.
- [73] P. Rischbeck, S. Elsayed, B. Mistele, G. Barmeier, K. Heil, et U. Schmidhalter, « Data fusion of spectral, thermal and canopy height parameters for improved yield prediction of drought stressed spring barley », *European Journal of Agronomy*, vol. 78, p. 44-59, août 2016, doi: 10.1016/j.eja.2016.04.013.
- [74] A. Chawade, J. van Ham, H. Blomquist, O. Bagge, E. Alexandersson, et R. Ortiz, « High-Throughput Field-Phenotyping Tools for Plant Breeding and Precision Agriculture », *Agronomy*, vol. 9, n° 5, Art. n° 5, mai 2019, doi: 10.3390/agronomy9050258.
- [75] K. Kawamura, H. Asai, T. Yasuda, P. Khanthavong, P. Soisouvanh, et S. Phongchanmixay, « Field phenotyping of plant height in an upland rice field in Laos using low-cost small unmanned aerial vehicles (UAVs) », *Plant Production Science*, vol. 23, n° 4, p. 452-465, oct. 2020, doi: 10.1080/1343943X.2020.1766362.
- [76] A. Khan, A. D. Vibhute, S. Mali, et C. H. Patil, « A systematic review on hyperspectral imaging technology with a machine and deep learning methodology for agricultural applications », *Ecological Informatics*, vol. 69, p. 101678, juill. 2022, doi: 10.1016/j.ecoinf.2022.101678.
- [77] S. Shabala, *Plant Stress Physiology, 2nd Edition*. CABI, 2017.
- [78] G. Lassalle, « Monitoring natural and anthropogenic plant stressors by hyperspectral remote sensing: Recommendations and guidelines based on a meta-review », *Science of The Total Environment*, vol. 788, p. 147758, sept. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147758.
- [79] Y. Huang, L. Yuan, K. N. Reddy, et J. Zhang, « In-situ plant hyperspectral sensing for early detection of soybean injury from dicamba », *Biosystems Engineering*, vol. 149, p. 51-59, sept. 2016, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.06.013.
- [80] M. Zovko, U. Žibrat, M. Knapič, M. B. Kovačić, et D. Romić, « Hyperspectral remote sensing of grapevine drought stress », *Precision Agric*, vol. 20, n° 2, p. 335-347, avr. 2019, doi: 10.1007/s11119-019-09640-2.
- [81] J. Wang *et al.*, « Evaluation of quinclorac toxicity and alleviation by salicylic acid in rice seedlings using ground-based visible/near-infrared hyperspectral imaging », *Plant Methods*, vol. 16, n° 1, p. 30, mars 2020, doi: 10.1186/s13007-020-00576-7.
- [82] K. Yu *et al.*, « Hyperspectral Canopy Sensing of Wheat Septoria Tritici Blotch Disease », *Frontiers in Plant Science*, vol. 9, 2018, Consulté le: 22 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.01195>
- [83] A. Förster, J. Behley, J. Behmann, et R. Roscher, « Hyperspectral Plant Disease Forecasting Using Generative Adversarial Networks », in *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, juill. 2019, p. 1793-1796. doi: 10.1109/IGARSS.2019.8898749.
- [84] A. F. Cheshkova, « A review of hyperspectral image analysis techniques for plant disease detection and identification », *Vavilovskii Zhurnal Genet Selektii*, vol. 26, n° 2, p. 202-213, mars 2022, doi: 10.18699/VJGB-22-25.
- [85] H. Zhu, B. Chu, C. Zhang, F. Liu, L. Jiang, et Y. He, « Hyperspectral Imaging for Presymptomatic Detection of Tobacco Disease with Successive Projections Algorithm

- and Machine-learning Classifiers », *Sci Rep*, vol. 7, n° 1, Art. n° 1, juin 2017, doi: 10.1038/s41598-017-04501-2.
- [86] S. E. El-Hendawy *et al.*, « Evaluation of wavelengths and spectral reflectance indices for high-throughput assessment of growth, water relations and ion contents of wheat irrigated with saline water », *Agricultural Water Management*, vol. 212, p. 358-377, févr. 2019, doi: 10.1016/j.agwat.2018.09.009.
- [87] O. Vergara-Diaz, T. Vatter, S. C. Kefauver, T. Obata, A. R. Fernie, et J. L. Araus, « Assessing durum wheat ear and leaf metabolomes in the field through hyperspectral data », *The Plant Journal*, vol. 102, n° 3, p. 615-630, 2020, doi: 10.1111/tbj.14636.
- [88] « Glucose uptake to guard cells via STP transporters provides carbon sources for stomatal opening and plant growth », *EMBO reports*, vol. 21, n° 8, p. e49719, août 2020, doi: 10.15252/embr.201949719.
- [89] S. P. Hurley, M. Horney, et A. Drake, « Using hyperspectral imagery to detect water stress in vineyards », in *Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping IV*, SPIE, mai 2019, p. 61-72. doi: 10.1117/12.2518660.
- [90] K.-R. Yu *et al.*, « The impact of aging on primate hematopoiesis as interrogated by clonal tracking », *Blood*, vol. 131, n° 11, p. 1195-1205, mars 2018, doi: 10.1182/blood-2017-08-802033.
- [91] D. Zhang, Q. Wang, F. Lin, X. Yin, C. Gu, et H. Qiao, « Development and Evaluation of a New Spectral Disease Index to Detect Wheat Fusarium Head Blight Using Hyperspectral Imaging », *Sensors*, vol. 20, n° 8, Art. n° 8, janv. 2020, doi: 10.3390/s20082260.
- [92] X. Feng *et al.*, « Non-destructive Determination of Shikimic Acid Concentration in Transgenic Maize Exhibiting Glyphosate Tolerance Using Chlorophyll Fluorescence and Hyperspectral Imaging », *Frontiers in Plant Science*, vol. 9, 2018, Consulté le: 22 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.00468>
- [93] A. N. Noor Azmi, S. K. Bejo, M. Jahari, F. M. Muharam, I. Yule, et N. A. Husin, « Early Detection of Ganoderma boninense in Oil Palm Seedlings Using Support Vector Machines », *Remote Sensing*, vol. 12, n° 23, Art. n° 23, janv. 2020, doi: 10.3390/rs12233920.
- [94] S. Gutiérrez, A. Wendel, et J. Underwood, « Spectral filter design based on in-field hyperspectral imaging and machine learning for mango ripeness estimation », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 164, p. 104890, sept. 2019, doi: 10.1016/j.compag.2019.104890.
- [95] B. Li *et al.*, « Above-ground biomass estimation and yield prediction in potato by using UAV-based RGB and hyperspectral imaging », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 162, p. 161-172, avr. 2020, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2020.02.013.
- [96] S. Thomas *et al.*, « Quantitative assessment of disease severity and rating of barley cultivars based on hyperspectral imaging in a non-invasive, automated phenotyping platform », *Plant Methods*, vol. 14, n° 1, p. 45, juin 2018, doi: 10.1186/s13007-018-0313-8.
- [97] X. Deng *et al.*, « Detection of Citrus Huanglongbing Based on Multi-Input Neural Network Model of UAV Hyperspectral Remote Sensing », *Remote Sensing*, vol. 12, n° 17, Art. n° 17, janv. 2020, doi: 10.3390/rs12172678.
- [98] J. Y. Barnaby *et al.*, « Vis/NIR hyperspectral imaging distinguishes sub-population, production environment, and physicochemical grain properties in rice », *Sci Rep*, vol. 10, n° 1, Art. n° 1, juin 2020, doi: 10.1038/s41598-020-65999-7.

- [99] S. Fabre, A. Lesaignoux, A. Olioso, et X. Briottet, « Influence of Water Content on Spectral Reflectance of Leaves in the 3–15- μm Domain », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, n° 1, p. 143-147, janv. 2011, doi: 10.1109/LGRS.2010.2053518.
- [100] C. Escriba, « Conception, réalisation et caractérisation de capteurs infrarouges à thermopiles : application à la détection de présence passive dans l’habitat », Theses, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2005. Consulté le: 3 octobre 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00088644>
- [101] J. Goodman, « Statistical Properties of Laser Speckle Patterns », *Laser Speckle and Related Phenomena*, vol. 9, p. 57, déc. 1963, doi: 10.1007/BFb0111436.
- [102] E. G. Rawson, A. B. Nafarrate, R. E. Norton, et J. W. Goodman, « Speckle-free rear-projection screen using two close screens in slow relative motion », *J. Opt. Soc. Am., JOSA*, vol. 66, n° 11, p. 1290-1294, nov. 1976, doi: 10.1364/JOSA.66.001290.
- [103] Y. Kuratomi *et al.*, « Speckle reduction mechanism in laser rear projection displays using a small moving diffuser », *J. Opt. Soc. Am. A, JOSAA*, vol. 27, n° 8, p. 1812-1817, août 2010, doi: 10.1364/JOSAA.27.001812.
- [104] B. Ruffing, « Application of speckle-correlation methods to surface-roughness measurement: a theoretical study », *J. Opt. Soc. Am. A, JOSAA*, vol. 3, n° 8, p. 1297-1304, août 1986, doi: 10.1364/JOSAA.3.001297.
- [105] J. W. Goodman, *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*. Roberts and Company Publishers, 2007.
- [106] M. Draijer, E. Hondebrink, T. van Leeuwen, et W. Steenbergen, « Review of laser speckle contrast techniques for visualizing tissue perfusion », *Lasers Med Sci*, vol. 24, n° 4, p. 639, déc. 2008, doi: 10.1007/s10103-008-0626-3.
- [107] D. Briers *et al.*, « Laser speckle contrast imaging: theoretical and practical limitations », *JBO*, vol. 18, n° 6, p. 066018, juin 2013, doi: 10.1117/1.JBO.18.6.066018.
- [108] A. F. Fercher et J. D. Briers, « Flow visualization by means of single-exposure speckle photography », *Optics Communications*, vol. 37, n° 5, p. 326-330, juin 1981, doi: 10.1016/0030-4018(81)90428-4.
- [109] Q. Liu, S. Chen, B. Soetikno, W. Liu, S. Tong, et H. F. Zhang, « Monitoring Acute Stroke in Mouse Model Using Laser Speckle Imaging-Guided Visible-Light Optical Coherence Tomography », *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 65, n° 10, p. 2136-2142, oct. 2018, doi: 10.1109/TBME.2017.2706976.
- [110] H. Loutfi *et al.*, « Real-time monitoring of bacterial growth kinetics in suspensions using laser speckle imaging », *Scientific Reports*, vol. 10, n° 1, Art. n° 1, janv. 2020, doi: 10.1038/s41598-019-57281-2.
- [111] P. Singh et R. Shree, « Analysis and effects of speckle noise in SAR images », in *2016 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication, Automation (ICACCA) (Fall)*, sept. 2016, p. 1-5. doi: 10.1109/ICACCAF.2016.7748978.
- [112] Z. Li, P. Zhong, X. Tang, J. Ling, J. Chen, et G. He, « Effect of the Speckle Size on the Quality of Speckle Pattern in DSPI System », *IEEE Access*, vol. PP, p. 1-1, août 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935754.
- [113] W.-F. Hsu et M.-C. Chou, « Optimizing the parameters for measuring laser speckle and speckle contrast », *Appl. Opt., AO*, vol. 53, n° 22, p. E26-E32, août 2014, doi: 10.1364/AO.53.000E26.
- [114] Y. Tang, F. Xu, G. Li, Y. He, et H. Gu, « Correlation analysis of the temporal dynamics of subcutaneous blood perfusion and skin temperature in post-occlusion reactive

- hyperaemia test », *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 80, p. 104390, févr. 2023, doi: 10.1016/j.bspc.2022.104390.
- [115] Z. Ge, N. Meng, L. Song, et E. Y. Lam, « Dynamic laser speckle analysis using the event sensor », *Appl. Opt., AO*, vol. 60, n° 1, p. 172-178, janv. 2021, doi: 10.1364/AO.412601.
- [116] Q. B. Li et F. P. Chiang, « Three-dimensional dimension of laser speckle », *Appl. Opt., AO*, vol. 31, n° 29, p. 6287-6291, oct. 1992, doi: 10.1364/AO.31.006287.
- [117] C. A. Nader, « Approche multiparamètre de l'analyse du champ de speckle et applications », PhD Thesis, 2016.
- [118] Y. Piederriere, « Etude du speckle de milieux diffusants liquides. Application à la détermination de paramètres biophysiques », PhD Thesis, Université de Bretagne occidentale-Brest, 2003.
- [119] H.-A. Chen, J.-W. Pan, et Z.-P. Yang, « Speckle reduction using deformable mirrors with diffusers in a laser pico-projector », *Opt. Express, OE*, vol. 25, n° 15, p. 18140-18151, juill. 2017, doi: 10.1364/OE.25.018140.
- [120] D. A. Boas et A. K. Dunn, « Laser speckle contrast imaging in biomedical optics », *JBO*, vol. 15, n° 1, p. 011109, janv. 2010, doi: 10.1117/1.3285504.
- [121] J.-S. Lee, « Speckle Suppression And Analysis For Synthetic Aperture Radar Images », *OE*, vol. 25, n° 5, p. 636-643, mai 1986, doi: 10.1117/12.7973877.
- [122] A. C. Völker, P. Zakharov, B. Weber, F. Buck, et F. Scheffold, « Laser speckle imaging with an active noise reduction scheme », *Opt. Express, OE*, vol. 13, n° 24, p. 9782-9787, nov. 2005, doi: 10.1364/OPEX.13.009782.
- [123] Y. Lu, R. W. Liu, F. Chen, et L. Xie, « Learning a Deep Convolutional Network for Speckle Noise Reduction in Underwater Sonar Images », in *Proceedings of the 2019 11th International Conference on Machine Learning and Computing*, in ICMLC '19. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, févr. 2019, p. 445-450. doi: 10.1145/3318299.3318358.
- [124] H. Kato et J. W. Goodman, « Nonlinear filtering in coherent optical systems through halftone screen processes », *Appl. Opt., AO*, vol. 14, n° 8, p. 1813-1824, août 1975, doi: 10.1364/AO.14.001813.
- [125] A. N. Hoshyar, A. Al-Jumaily, et A. N. Hoshyar, « Comparing the Performance of Various Filters on Skin Cancer Images », *Procedia Computer Science*, vol. 42, p. 32-37, janv. 2014, doi: 10.1016/j.procs.2014.11.030.
- [126] Y. Smara, « Réduction du speckle dans les images radar SAR: concepts et algorithmes », 2005. Consulté le: 9 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/R%C3%A9duction-du-speckle-dans-les-images-radar-SAR-%3A-et-Smara/7afb1452daa2dbbf3afa142297a8c60d2ac7191b>
- [127] M. Atlan, « Coherent optical imaging in scattering media », sept. 2005.
- [128] M. Bergounioux, « Quelques méthodes de filtrage en Traitement d'Image ». 24 février 2011. Consulté le: 9 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-00512280>
- [129] J. C. Dainty, *Laser Speckle and Related Phenomena*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [130] H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, et H. Hatanaka, « Dependency of speckle reduction by wavelength diversity on angular diversity in laser projection system », *Journal of the Society for Information Display*, vol. 26, n° 4, p. 237-245, 2018, doi: 10.1002/jsid.652.

- [131] T.-T.-K. Tran, Ø. Svensen, X. Chen, et M. N. Akram, « Speckle reduction in laser projection displays through angle and wavelength diversity », *Appl. Opt., AO*, vol. 55, n° 6, p. 1267-1274, févr. 2016, doi: 10.1364/AO.55.001267.
- [132] N. E. Yu *et al.*, « Speckle noise reduction on a laser projection display via a broadband green light source », *Opt. Express, OE*, vol. 22, n° 3, p. 3547-3556, févr. 2014, doi: 10.1364/OE.22.003547.
- [133] D. V. Kuksenkov, R. V. Roussev, S. Li, W. A. Wood, et C. M. Lynn, « Multiple-wavelength synthetic green laser source for speckle reduction », in *Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications X*, SPIE, févr. 2011, p. 87-98. doi: 10.1117/12.887545.
- [134] M. Hjeij, L. Poffo, B. Billiot, R. L. Page, P. Besnard, et J.-M. Goujon, « Mid-infrared speckle reduction technique for hyperspectral imaging », in *Optics, Photonics and Digital Technologies for Imaging Applications VII*, SPIE, mai 2022, p. 100-104. doi: 10.1117/12.2621817.
- [135] M. N. Akram, Z. Tong, G. Ouyang, X. Chen, et V. Kartashov, « Laser speckle reduction due to spatial and angular diversity introduced by fast scanning micromirror », *Appl. Opt., AO*, vol. 49, n° 17, p. 3297-3304, juin 2010, doi: 10.1364/AO.49.003297.
- [136] A. Arienzo, F. Argenti, et L. Alparone, « Impact of a Spatial Decorrelation of the Noise on the Performance of Despeckling Filters for Polarimetric SAR Data », juin 2019, p. 1113-1121. doi: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017856.
- [137] A. Descloux, K. Großmayer, et A. Radenovic, « Parameter-free image resolution estimation based on decorrelation analysis », *Nature Methods*, vol. 16, sept. 2019, doi: 10.1038/s41592-019-0515-7.
- [138] F. Riechert, « Speckle Reduction in Projection Systems ». Consulté le: 7 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000012434>
- [139] L. Deng *et al.*, « Speckle reduction in laser projection based on a rotating ball lens », *Optics & Laser Technology*, vol. 135, p. 106686, mars 2021, doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106686.
- [140] « Potassium Bromide Windows ». Consulté le: 14 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.thorlabs.com>
- [141] Y. Yoon, C. J. Breshike, C. A. Kendziora, R. Furstenberg, et R. A. McGill, « Reduction of speckle noise and mitigation of beam wander in tunable external cavity quantum cascade lasers using rotating diamond/KBr pellet coupled with multimode fiber », *Opt. Express, OE*, vol. 27, n° 6, p. 8011-8020, mars 2019, doi: 10.1364/OE.27.008011.
- [142] J. T. Boobhun, D. E. Otten, W. Skinner, et D. G. Lancaster, « Short-wavelength infrared reflectance spectroscopy of minerals by supercontinuum illumination and speckle reduction », *Minerals Engineering*, vol. 156, p. 106528, sept. 2020, doi: 10.1016/j.mineng.2020.106528.
- [143] S. Kim et Y.-G. Han, « Suppression of speckle patterns based on temporal angular decorrelation induced by multiple beamlets with diverse optical paths », *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 64, n° 4, p. 527-531, févr. 2014, doi: 10.3938/jkps.64.527.
- [144] D. J. Hansford, Y. Jin, S. J. Elston, et S. M. Morris, « Enhancing laser speckle reduction by decreasing the pitch of a chiral nematic liquid crystal diffuser », *Sci Rep*, vol. 11, n° 1, Art. n° 1, mars 2021, doi: 10.1038/s41598-021-83860-3.
- [145] H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, H. Hatanaka, et K. Yamamoto, « Theoretical calculation and experimental investigation of speckle reduction by multiple wavelength

- lasers in laser projector with different angular diversities », *J. Opt.*, vol. 21, n° 4, p. 045602, févr. 2019, doi: 10.1088/2040-8986/ab04d9.
- [146] R. Voelkel et K. Weible, « Laser Beam Homogenizing: Limitations and Constraints », *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 7102, sept. 2008, doi: 10.1117/12.799400.
- [147] J. Li, « Design of optical engine for LCOS laser display with rotated diffuser plate », *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 55, n° 1, p. 138-141, 2013, doi: 10.1002/mop.27221.
- [148] C.-Y. Chen, W.-C. Su, C.-H. Lin, M.-D. Ke, Q.-L. Deng, et K.-Y. Chiu, « Reduction of speckles and distortion in projection system by using a rotating diffuser », *OPT REV*, vol. 19, n° 6, p. 440-443, nov. 2012, doi: 10.1007/s10043-012-0075-x.
- [149] J. Giger, « Laser Speckle Reduction based on electroactive polymers », The 1st Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'12), Yokohama, Japan, 26 avril 2012.
- [150] S. Kubota et J. W. Goodman, « Very efficient speckle contrast reduction realized by moving diffuser device », *Appl. Opt.*, AO, vol. 49, n° 23, p. 4385-4391, août 2010, doi: 10.1364/AO.49.004385.
- [151] J.-W. Pan et C.-H. Shih, « Speckle reduction and maintaining contrast in a LASER pico-projector using a vibrating symmetric diffuser », *Opt. Express*, OE, vol. 22, n° 6, p. 6464-6477, mars 2014, doi: 10.1364/OE.22.006464.
- [152] S.-Y. Tu, H. Y. Lin, et M.-C. Lin, « Efficient speckle reduction for a laser illuminating on a micro-vibrated paper screen », *Appl. Opt.*, AO, vol. 53, n° 22, p. E38-E46, août 2014, doi: 10.1364/AO.53.000E38.
- [153] F. Zhang *et al.*, « Fabrication of a Chalcogenide Glass Microlens Array for Infrared Laser Beam Homogenization », *Materials*, vol. 14, n° 20, Art. n° 20, janv. 2021, doi: 10.3390/ma14205952.
- [154] J. Zhou *et al.*, « Investigation on Speckle-Free Imaging at the Output of a Multimode Fiber under Various Mode Excitation Conditions », *Photonics*, vol. 8, n° 5, Art. n° 5, mai 2021, doi: 10.3390/photonics8050171.
- [155] S. Schwarz, B. Götzendorfer, S. Rung, C. Esen, et R. Hellmann, « Compact Beam Homogenizer Module with Laser-Fabricated Lens-Arrays », *Applied Sciences*, vol. 11, n° 3, Art. n° 3, janv. 2021, doi: 10.3390/app11031018.
- [156] B. Kondász, B. Hopp, et T. Smausz, « Homogenization with coherent light illuminated beam shaping diffusers for vision applications: spatial resolution limited by speckle pattern », *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, vol. 14, n° 1, p. 27, nov. 2018, doi: 10.1186/s41476-018-0095-7.
- [157] S. Si *et al.*, « Laser speckle reduction via TiO₂-sapphire composite rotating wheel in laser projection », *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 105, n° 6, p. 4512-4520, 2022, doi: 10.1111/jace.18375.
- [158] C. J. Breshike *et al.*, « Active LWIR hyperspectral imaging and algorithms for rapid standoff trace chemical identification », in *Algorithms, Technologies, and Applications for Multispectral and Hyperspectral Imagery XXV*, SPIE, mai 2019, p. 163-171. doi: 10.1117/12.2518720.
- [159] C. A. Kendziora, R. Furstenberg, M. Papantonakis, V. Nguyen, J. Byers, et R. A. McGill, « Infrared photothermal imaging spectroscopy for detection of trace explosives on surfaces », *Appl. Opt.*, AO, vol. 54, n° 31, p. F129-F138, nov. 2015, doi: 10.1364/AO.54.00F129.

- [160] M. F. Witinski *et al.*, « Portable standoff spectrometer for hazard identification using integrated quantum cascade laser arrays from 6.5 to 11 μm . », *Opt. Express*, OE, vol. 26, n° 9, p. 12159-12168, avr. 2018, doi: 10.1364/OE.26.012159.
- [161] F. Capasso, « High-performance midinfrared quantum cascade lasers », *OE*, vol. 49, n° 11, p. 111102, nov. 2010, doi: 10.1117/1.3505844.
- [162] C. J. Breshike, C. A. Kendziora, R. Furstenberg, V. Nguyen, et R. A. McGill, « Stabilizing infrared quantum cascade laser beams for standoff detection applications », in *Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XIV*, SPIE, janv. 2017, p. 47-55. doi: 10.1117/12.2251592.
- [163] R. Furstenberg, C. A. Kendziora, M. R. Papantonakis, V. Nguyen, J. Byers, et R. A. McGill, « Trace explosives detection using photo-thermal infrared imaging spectroscopy (PT-IRIS): theory, modeling, and detection algorithms », in *Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XVI*, SPIE, mai 2015, p. 126-137. doi: 10.1117/12.2177270.
- [164] Y. Yoon, C. J. Breshike, C. A. Kendziora, R. Furstenberg, et R. A. McGill, « Control of quantum cascade laser sources in stand-off detection of trace explosives », in *Next-Generation Spectroscopic Technologies XII*, SPIE, mai 2019, p. 61-72. doi: 10.1117/12.2518734.
- [165] L. J. Mawst et D. Botez, « High-Power Mid-Infrared ($\lambda \sim 3\text{-}6 \mu\text{m}$) Quantum Cascade Lasers », *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, n° 1, p. 1-25, févr. 2022, doi: 10.1109/JPHOT.2021.3132261.
- [166] R. Furstenberg, C. A. Kendziora, M. R. Papantonakis, V. Nguyen, et R. A. McGill, « Characterization and control of tunable quantum cascade laser beam parameters for stand-off spectroscopy », in *Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XVII*, SPIE, mai 2016, p. 113-124. doi: 10.1117/12.2224003.
- [167] L. Han *et al.*, « Frequency stabilization of quantum cascade laser for spectroscopic CO₂ isotope analysis », *Infrared Physics & Technology*, vol. 91, p. 37-45, juin 2018, doi: 10.1016/j.infrared.2018.03.016.
- [168] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, et A. Y. Cho, « Quantum Cascade Laser », *Science*, vol. 264, n° 5158, p. 553-556, avr. 1994, doi: 10.1126/science.264.5158.553.
- [169] C. A. Kendziora, R. Furstenberg, M. Papantonakis, V. Nguyen, et R. A. McGill, « Broadband infrared imaging spectroscopy for standoff detection of trace explosives », in *Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications VIII*, SPIE, mai 2016, p. 430-439. doi: 10.1117/12.2224049.
- [170] J. Yang *et al.*, « Boundary-Induced Auxiliary Features in Scattering-Type Near-Field Fourier Transform Infrared Spectroscopy », *ACS Nano*, vol. 14, n° 1, p. 1123-1132, janv. 2020, doi: 10.1021/acsnano.9b08895.
- [171] X. Meng, G. Cao, X. Li, et Q. Lv, « 2-D Scanning Galvanometer Error Analysis and Its Correction », *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1345, n° 2, p. 022068, nov. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1345/2/022068.
- [172] S. Ni *et al.*, « High-speed and widefield handheld swept-source OCT angiography with a VCSEL light source », *Biomed. Opt. Express*, BOE, vol. 12, n° 6, p. 3553-3570, juin 2021, doi: 10.1364/BOE.425411.
- [173] S. Ni *et al.*, « Volumetric directional optical coherence tomography », *Biomed. Opt. Express*, BOE, vol. 13, n° 2, p. 950-961, févr. 2022, doi: 10.1364/BOE.447882.

- [174] R. Müller, C. A. Kendziora, et R. Furstenberg, « Feedback stabilization of quantum cascade laser beams for stand-off applications », in *Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications IX*, SPIE, mai 2017, p. 591-603. doi: 10.1117/12.2262202.
- [175] N. O. Moussa *et al.*, « Spatiotemporal beam self-cleaning for high-resolution nonlinear fluorescence imaging with multimode fiber », *Sci Rep*, vol. 11, p. 18240, sept. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-96753-2.
- [176] P. Maré, M. Żuchowska, et L. R. Jaroszewicz, « Reflective Properties of a Polymer Micro-Transducer for an Optical Fiber Refractive Index Sensor », *Sensors (Basel)*, vol. 20, n° 23, p. 6964, déc. 2020, doi: 10.3390/s20236964.
- [177] C. Inc, « Lasers: Understanding the Basics ». Consulté le: 27 août 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.photonics.com/Articles/Lasers_Understanding_the_Basics/a25161
- [178] C. Hill, M. Harris, et K. Ridley, « Fiber-based 1.5 μm lidar vibrometer in pulsed and continuous modes », *Applied Optics - APPL OPT*, vol. 46, juill. 2007, doi: 10.1364/AO.46.004376.
- [179] N. V. Tkachenko, « Chapter 12 - Emission spectroscopy with optical gating methods », in *Optical Spectroscopy*, N. V. Tkachenko, Éd., Amsterdam: Elsevier Science, 2006, p. 217-236. doi: 10.1016/B978-044452126-2/50036-8.
- [180] C. J. Breshike, C. A. Kendziora, R. Furstenberg, V. Nguyen, A. Kusterbeck, et R. A. McGill, « Infrared backscatter imaging spectroscopy of trace analytes at standoff », *Journal of Applied Physics*, vol. 125, n° 10, p. 104901, mars 2019, doi: 10.1063/1.5079622.
- [181] C. J. Breshike, C. A. Kendziora, R. Furstenberg, V. Nguyen, et R. A. McGill, « Methodology for using active infrared spectroscopy in standoff detection of trace explosives », in *Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XVIII*, SPIE, mai 2017, p. 1018302. doi: 10.1117/12.2262199.
- [182] Li, Y., « Remote laser spectroscopy at standoff distances for heritage applications. », *Nottingham Trent University (United Kingdom)*, 2022.
- [183] G. Mathieu, M. Dupoy, S. Bonnet, V. Rebuffel, J.-L. Coll, et M. Henry, « MID infrared multispectral imaging for tumor tissue detection », in *Imaging, Manipulation, and Analysis of Biomolecules, Cells, and Tissues XIX*, SPIE, mars 2021, p. 126-132. doi: 10.1117/12.2577221.
- [184] C. J. Breshike *et al.*, « Rapid detection of infrared backscatter for standoff detection of trace explosives », in *Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XXI*, SPIE, mai 2020, p. 249-255. doi: 10.1117/12.2558485.
- [185] C. J. Breshike *et al.*, « Hyperspectral imaging using active infrared backscatter spectroscopy for detection of trace explosives », *OE*, vol. 59, n° 9, p. 092009, juill. 2020, doi: 10.1117/1.OE.59.9.092009.
- [186] M. Bergoin, « Application du concept de raffinage végétal au safran du Quercy (*Crocus sativus*) pour la valorisation intégrée des potentiels aromatiques et colorants », phd, 2005. Consulté le: 27 août 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000251/>
- [187] C. DURANT, « Etude expérimentale de la propagation d'un faisceau fin dans les matériaux photoréfractifs: application à la limitation optique. », Université de Metz, 2002.
- [188] T. S. Mansuripur *et al.*, « Single-mode instability in standing-wave lasers: The quantum cascade laser as a self-pumped parametric oscillator », *Phys. Rev. A*, vol. 94, n° 6, p. 063807, déc. 2016, doi: 10.1103/PhysRevA.94.063807.

- [189] F. Wang, X. Qi, Z. Chen, M. Razeghi, et S. Dhillon, « Ultrafast Pulse Generation from Quantum Cascade Lasers », *Micromachines*, vol. 13, n° 12, Art. n° 12, déc. 2022, doi: 10.3390/mi13122063.
- [190] L. Boiso, M. Sanga, et J. Hedman, « DTT quenches the passive reference signal in real-time PCR », *Forensic Science International: Genetics Supplement Series*, vol. 5, p. e5-e6, déc. 2015, doi: 10.1016/j.fsigss.2015.09.003.
- [191] L. Hou, S. Kagami, et K. Hashimoto, « A Signal Normalization Technique for Illumination-Based Synchronization of 1,000-fps Real-Time Vision Sensors in Dynamic Scenes », *Sensors (Basel)*, vol. 10, n° 9, p. 8719-8739, sept. 2010, doi: 10.3390/s100908719.
- [192] Z. Kang *et al.*, « Coordinate Normalization of Live-Cell Imaging Data Reveals Growth Dynamics of the Arabidopsis Zygote », *Plant and Cell Physiology*, p. pcad020, mars 2023, doi: 10.1093/pcp/pcad020.
- [193] J. Ashburner et K. J. Friston, « Voxel Based Morphometry », in *Encyclopedia of Neuroscience*, L. R. Squire, Éd., Oxford: Academic Press, 2009, p. 471-477. doi: 10.1016/B978-008045046-9.00306-5.
- [194] P. Andričević, E. L. Sellwood, M.-C. Eppes, M. Kook, et M. Jain, « Passive atomic-scale optical sensors for mapping light flux in ultra-small cavities », *Sci Rep*, vol. 13, p. 5309, mars 2023, doi: 10.1038/s41598-023-32010-y.
- [195] M. M. Rahman, G. J. Hay, I. Couloigner, B. Hemachandran, et J. Bailin, « A comparison of four relative radiometric normalization (RRN) techniques for mosaicing H-res multi-temporal thermal infrared (TIR) flight-lines of a complex urban scene », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 106, p. 82-94, août 2015, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.05.002.
- [196] X.-F. Liu, M.-F. Li, X.-R. Yao, W.-K. Yu, G.-J. Zhai, et L.-A. Wu, « High-visibility ghost imaging from artificially generated non-Gaussian intensity fluctuations », *AIP Advances*, vol. 3, n° 5, p. 052121, mai 2013, doi: 10.1063/1.4807655.
- [197] B. E. A. Saleh et M. C. Teich, « Fundamentals of photonics », *NASA STI/Recon Technical Report A*, vol. 92, p. 35987, janv. 1991.
- [198] Y. Liu *et al.*, « Combined laser-induced breakdown spectroscopy and hyperspectral imaging with machine learning for the classification and identification of rice geographical origin », *RSC Adv*, vol. 12, n° 53, p. 34520-34530, doi: 10.1039/d2ra06892c.
- [199] Y. Zhao, S. Kusama, Y. Furutani, W.-H. Huang, C.-W. Luo, et T. Fuji, « High-speed scanless entire bandwidth mid-infrared chemical imaging », *Nat Commun*, vol. 14, n° 1, Art. n° 1, juill. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-39628-6.
- [200] A.-K. Mahlein, U. Steiner, C. Hillnhütter, H.-W. Dehne, et E.-C. Oerke, « Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases », *Plant Methods*, vol. 8, n° 1, p. 3, janv. 2012, doi: 10.1186/1746-4811-8-3.
- [201] L. A. Bousquet, « Mesure et modélisation des propriétés optiques spectrales et directionnelles des feuilles », PhD Thesis, Paris 7, 2007.
- [202] S. Guillouet, A. Haincaud, et F. Moreau, « La Photosynthèse ». Consulté le: 10 mars 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://kelnoize.free.fr/Page1.html>
- [203] R. Prat et F. Moreau, « La photosynthèse : généralités », Planet-Vie, Sorbonne Université. Consulté le: 29 janvier 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://planet-vie.ens.fr/article/1507/photosynthese-generalites>

- [204] G. Damour, « Bases théoriques et approches expérimentales de la modélisation des effets de la contrainte hydrique sur les échanges gazeux foliaires du manguier et du litchi », PhD Thesis, Université de la Réunion, 2008.
- [205] Kotchi, « Détection du stress hydrique par thermographie infrarouge. Application à la culture de la pomme de terre ». Consulté le: 16 janvier 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/22198/22198.html>
- [206] F. Daumard, « Suivre l'activité photosynthétique des végétaux depuis l'espace? Une piste fluorescente ». 2014.
- [207] É. Bartholomé, « Contribution aux méthodes de suivi par télédétection satellitaire des rendements régionaux des cultures céréalières pluviales en Afrique soudano-sahélienne », PhD Thesis, Université catholique de Louvain, 1989.
- [208] C. Piel, « Diffusion du CO₂ dans le mésophylle des plantes à métabolisme C₃ », PhD Thesis, Paris 11, 2002.
- [209] A. Wild et G. Wolf, « The Effect of Different Light Intensities on the Frequency and Size of Stomata, the Size of Cells, the Number, Size and Chlorophyll Content of Chloroplasts in the Mesophyll and the Guard Cells during the Ontogeny of Primary Leaves of *Sinapis alba* », *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie*, vol. 97, n° 4, p. 325-342, mai 1980, doi: 10.1016/S0044-328X(80)80006-7.
- [210] P. A. Davis, S. Caylor, C. W. Whippo, et R. P. Hangarter, « Changes in leaf optical properties associated with light-dependent chloroplast movements », *Plant, Cell & Environment*, vol. 34, n° 12, p. 2047-2059, 2011, doi: 10.1111/j.1365-3040.2011.02402.x.
- [211] Hobilalaina, Rabetsira, Rabibisoa, et Raharimalala, « Importance de l'Eau Dans La Plante », Scribd. Consulté le: 19 février 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scribd.com/doc/15967180/Importance-de-l-Eau-Dans-La-Plante>
- [212] M. F. Buitrago, T. A. Groen, C. A. Hecker, et A. K. Skidmore, « Changes in thermal infrared spectra of plants caused by temperature and water stress », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 111, p. 22-31, janv. 2016, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.11.003.
- [213] S. Ullah, M. Schlerf, A. K. Skidmore, et C. Hecker, « Identifying plant species using mid-wave infrared (2.5–6µm) and thermal infrared (8–14µm) emissivity spectra », *Remote Sensing of Environment*, vol. 118, p. 95-102, mars 2012, doi: 10.1016/j.rse.2011.11.008.
- [214] F. Gerber, « Estimation du contenu en eau de la végétation par télédétection hyperspectrale dans le infrarouge », PhD Thesis, Institut de Physique du Globe (Paris), 2011.
- [215] J. Soukupova, B. N. Rock, et J. Albrechtova, « Spectral characteristics of lignin and soluble phenolics in the near infrared- a comparative study », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, n° 15, Art. n° 15, janv. 2002, doi: 10.1080/01431160110104683.
- [216] A. Mokrani, « L'eau et les activités agricoles », Planet-Vie. Consulté le: 16 janvier 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://planet-vie.ens.fr/content/eau-activites-agricoles>
- [217] O. M. Grant, L. Tronina, H. G. Jones, et M. M. Chaves, « Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes », *J Exp Bot*, vol. 58, n° 4, Art. n° 4, mars 2007, doi: 10.1093/jxb/erl153.
- [218] S. Kotak, J. Larkindale, U. Lee, P. von Koskull-Döring, E. Vierling, et K.-D. Scharf, « Complexity of the heat stress response in plants », *Current Opinion in Plant Biology*, vol. 10, n° 3, Art. n° 3, juin 2007, doi: 10.1016/j.pbi.2007.04.011.
- [219] N. P. Huner et W. Hopkins, « Introduction to Plant Physiology », *John Wiley & Sons, NY*, vol. 5, n° 1, Art. n° 1, 2009.

- [220] G. Bertrand, « Caractérisation des réponses adaptatives à la contrainte hydrique dans le Sud-Est de l'Amazonie chez trois espèces fourragères cultivées en monoculture et en association : *brachiaria brizantha*, *Leucaena leucocephala* et *Arachis pintoï* », phdthesis, Université Paris-Est, 2009. Consulté le: 10 mars 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00504177>
- [221] B. Bellon De La Cruz, « Une approche multiscalaire par télédétection pour la cartographie et la caractérisation des systèmes agricoles à l'échelle régionale », PhD Thesis, Université de Montpellier, 2018.
- [222] C. Rousseau *et al.*, « High throughput quantitative phenotyping of plant resistance using chlorophyll fluorescence image analysis », *Plant Methods*, vol. 9, n° 1, Art. n° 1, 2013.
- [223] Y. Goulas, « La fluorescence des végétaux ». 2012.
- [224] Z. Servadio, « Apports de l'imagerie à haute résolution spectrale et spatiale dans les bilans de volume et bilans radiatifs au Piton de La Fournaise », PhD Thesis, La Réunion, 2011.
- [225] S. Han et F. Cointault, « Détection précoce de maladies sur feuilles par traitement d'images », in *Orasis, Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur*, Cluny, France, juin 2013. Consulté le: 21 janvier 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00829402>
- [226] C. Guénette, « Évaluation du potentiel de l'infrarouge spectral pour la détection hâtive du stress nutritif chez les végétaux de grandes cultures. Application à la culture de la pomme de terre », PhD Thesis, Université Laval, 2003.
- [227] M. Cubero-Castan, « Etude du démélange en imagerie hyperspectrale infrarouge », thesis, Grenoble, 2014. Consulté le: 14 janvier 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2014GRENT068>
- [228] J. Huang, H. Liao, Y. Zhu, J. Sun, Q. Sun, et X. Liu, « Hyperspectral detection of rice damaged by rice leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis*) », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 82, p. 100-107, mars 2012, doi: 10.1016/j.compag.2012.01.002.
- [229] O. Matsuda, A. Tanaka, T. Fujita, et K. Iba, « Hyperspectral imaging techniques for rapid identification of *Arabidopsis* mutants with altered leaf pigment status », *Plant and Cell Physiology*, vol. 53, n° 6, Art. n° 6, 2012.
- [230] C. E. Fakir, « Active hyperspectral imaging based on widely tunable QCL laser in mid-infrared range », phdthesis, Université Rennes 1, 2020. Consulté le: 25 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-03275041>
- [231] J. Behmann, J. Steinrücken, et L. Plümer, « Detection of early plant stress responses in hyperspectral images », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 93, p. 98-111, juill. 2014, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.03.016.
- [232] L. T. Bertolino, R. S. Caine, et J. E. Gray, « Impact of Stomatal Density and Morphology on Water-Use Efficiency in a Changing World », *Frontiers in Plant Science*, vol. 10, 2019, Consulté le: 21 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00225>
- [233] D. A. Gomez-Morales et O. Acevedo-Charry, « Satellite remote sensing of environmental variables can predict acoustic activity of an orthopteran assemblage », *PeerJ*, vol. 10, p. e13969, sept. 2022, doi: 10.7717/peerj.13969.
- [234] S. L. Ustin et E. M. Middleton, « Current and near-term advances in Earth observation for ecological applications », *Ecol Process*, vol. 10, n° 1, p. 1, 2021, doi: 10.1186/s13717-020-00255-4.

- [235] P. Shokrollahi, J. M. Drake, et A. A. Goldenberg, « Signal-to-noise ratio evaluation of magnetic resonance images in the presence of an ultrasonic motor », *Biomed Eng Online*, vol. 16, p. 45, avr. 2017, doi: 10.1186/s12938-017-0331-1.
- [236] S. E. Forshult, *Magnetic Resonance Imaging – MRI – An Overview*. Fakulteten för teknik- och naturvetenskap, 2007. Consulté le: 24 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kau:diva-1203>
- [237] J. J. Vaquero et P. Kinahan, « Positron Emission Tomography: Current Challenges and Opportunities for Technological Advances in Clinical and Preclinical Imaging Systems », *Annu Rev Biomed Eng*, vol. 17, p. 385-414, 2015, doi: 10.1146/annurev-bioeng-071114-040723.
- [238] W. J. Moses, J. H. Bowles, R. L. Lucke, et M. R. Corson, « Impact of signal-to-noise ratio in a hyperspectral sensor on the accuracy of biophysical parameter estimation in case II waters », *Opt. Express, OE*, vol. 20, n° 4, p. 4309-4330, févr. 2012, doi: 10.1364/OE.20.004309.
- [239] J. Piper, P. W. T. Yuen, et D. James, « Signal to Noise Ratio of a Coded Slit Hyperspectral Sensor », *Signals*, vol. 3, n° 4, Art. n° 4, déc. 2022, doi: 10.3390/signals3040045.
- [240] B. Rasti, P. Scheunders, P. Ghamisi, G. Licciardi, et J. Chanussot, « Noise Reduction in Hyperspectral Imagery: Overview and Application », *Remote Sensing*, vol. 10, n° 3, Art. n° 3, mars 2018, doi: 10.3390/rs10030482.
- [241] D. K. Iakovidis *et al.*, « Roadmap on signal processing for next generation measurement systems », *Meas. Sci. Technol.*, vol. 33, n° 1, p. 012002, nov. 2021, doi: 10.1088/1361-6501/ac2dbd.
- [242] J. K. Manattayil *et al.*, « Non-Destructive Classification of Diversely Stained Capsicum annum Seed Specimens of Different Cultivars Using Near-Infrared Imaging Based Optical Intensity Detection », *Sensors*, vol. 18, n° 8, Art. n° 8, août 2018, doi: 10.3390/s18082500.
- [243] E. Prasetyo, R. D. Adityo, N. Suciati, et C. Fatichah, « Mango leaf image segmentation on HSV and YCbCr color spaces using Otsu thresholding », in *2017 3rd International Conference on Science and Technology - Computer (ICST)*, juill. 2017, p. 99-103. doi: 10.1109/ICSTC.2017.8011860.
- [244] R. J. Nesaratnam et C. Bala Murugan, « Identifying leaf in a natural image using morphological characters », in *2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*, mars 2015, p. 1-5. doi: 10.1109/ICIIECS.2015.7193115.
- [245] C. S. Pereira, R. Morais, et M. J. C. S. Reis, « Pixel-Based Leaf Segmentation from Natural Vineyard Images Using Color Model and Threshold Techniques », in *Image Analysis and Recognition*, A. Campilho, F. Karray, et B. ter Haar Romeny, Éd., in Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 96-106. doi: 10.1007/978-3-319-93000-8_12.
- [246] L. Kaiyan, W. Junhui, C. Jie, et S. Huiping, « Measurement of Plant Leaf Area Based on Computer Vision », in *2014 Sixth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, janv. 2014, p. 401-405. doi: 10.1109/ICMTMA.2014.99.
- [247] I. M. Scotford et P. C. H. Miller, « Applications of Spectral Reflectance Techniques in Northern European Cereal Production: A Review », *Biosystems Engineering*, vol. 90, n° 3, p. 235-250, mars 2005, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2004.11.010.

- [248] S. Ma *et al.*, « Application of the water-related spectral reflectance indices: A review », *Ecological Indicators*, vol. 98, p. 68-79, mars 2019, doi: 10.1016/j.ecolind.2018.10.049.
- [249] L. Liu, B. Song, S. Zhang, et X. Liu, « A Novel Principal Component Analysis Method for the Reconstruction of Leaf Reflectance Spectra and Retrieval of Leaf Biochemical Contents », *Remote Sensing*, vol. 9, n° 11, Art. n° 11, nov. 2017, doi: 10.3390/rs9111113.
- [250] J. Zhang, W. Han, L. Huang, Z. Zhang, Y. Ma, et Y. Hu, « Leaf Chlorophyll Content Estimation of Winter Wheat Based on Visible and Near-Infrared Sensors », *Sensors*, vol. 16, n° 4, Art. n° 4, avr. 2016, doi: 10.3390/s16040437.
- [251] G. S. Mabizela *et al.*, « Response of *Cyclopia subternata* to drought stress – assessment of leaf composition, proteomics and product quality », *South African Journal of Botany*, vol. 161, p. 96-112, oct. 2023, doi: 10.1016/j.sajb.2023.07.042.
- [252] N. Daman, « Only time will tell: leaf stress indices derived from leaf-level hyperspectral measurements in a California vineyard demonstrate diurnal sensitivity patterns », UC Davis, 2023. Consulté le: 1 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://escholarship.org/uc/item/12z3g9mx>
- [253] L. Bizet, « Spectrométrie laser avec sources moyen infrarouge largement accordables et application à la détection de gaz », thesis, Reims, 2019. Consulté le: 16 octobre 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2019REIMS010>
- [254] M. Hermes *et al.*, « Mid-IR hyperspectral imaging for label-free histopathology and cytology », *J. Opt.*, vol. 20, n° 2, Art. n° 2, janv. 2018, doi: 10.1088/2040-8986/aaa36b.
- [255] M. C. Phillips et N. Hô, « Infrared hyperspectral imaging using a broadly tunable external cavity quantum cascade laser and microbolometer focal plane array », *Opt. Express, OE*, vol. 16, n° 3, Art. n° 3, févr. 2008, doi: 10.1364/OE.16.001836.
- [256] J. D. Briers, « Laser Doppler and time-varying speckle: a reconciliation », *J. Opt. Soc. Am. A, JOSAA*, vol. 13, n° 2, p. 345-350, févr. 1996, doi: 10.1364/JOSAA.13.000345.
- [257] J. D. Briers et S. Webster, « Quasi real-time digital version of single-exposure speckle photography for full-field monitoring of velocity or flow fields », *Optics Communications*, vol. 116, n° 1, p. 36-42, avr. 1995, doi: 10.1016/0030-4018(95)00042-7.
- [258] H. Cheng, Q. Luo, S. Zeng, S. Chen, J. Cen, et H. Gong, « Modified laser speckle imaging method with improved spatial resolution », *JBO*, vol. 8, n° 3, p. 559-564, juill. 2003, doi: 10.1117/1.1578089.
- [259] C. Zheng, L. W. Lau, et J. Cha, « Dual-display laparoscopic laser speckle contrast imaging for real-time surgical assistance », *Biomed. Opt. Express, BOE*, vol. 9, n° 12, p. 5962-5981, déc. 2018, doi: 10.1364/BOE.9.005962.
- [260] K. R. Forrester, C. Stewart, J. Tulip, C. Leonard, et R. C. Bray, « Comparison of laser speckle and laser Doppler perfusion imaging: Measurement in human skin and rabbit articular tissue », *Med. Biol. Eng. Comput.*, vol. 40, n° 6, p. 687-697, nov. 2002, doi: 10.1007/BF02345307.
- [261] K. R. Forrester, J. Tulip, C. Leonard, C. Stewart, et R. C. Bray, « A laser speckle imaging technique for measuring tissue perfusion », *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 51, n° 11, p. 2074-2084, nov. 2004, doi: 10.1109/TBME.2004.834259.
- [262] N. Konishi, Y. Tokimoto, K. Kohra, et H. Fujii, « New Laser Speckle Flowgraphy System Using CCD Camera », *OPT REV*, vol. 9, n° 4, p. 163-169, juill. 2002, doi: 10.1007/s10043-002-0163-4.
- [263] Y. K. Tan, W. Z. Liu, Y. S. Yew, S. H. Ong, et J. S. Paul, « Speckle image analysis of cortical blood flow and perfusion using temporally derived contrasts », in 2004

- International Conference on Image Processing, 2004. ICIP '04.*, oct. 2004, p. 3323-3326 Vol. 5. doi: 10.1109/ICIP.2004.1421825.
- [264] T. M. Le *et al.*, « New Insights into Image Processing of Cortical Blood Flow Monitors Using Laser Speckle Imaging », *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 26, n° 6, p. 833-842, juin 2007, doi: 10.1109/TMI.2007.892643.
- [265] E. Bergmann, « Method of depositing a hard coating of a metal, deposition target for such a method and piece of jewellery comprising such a coating », EP0038294A2, 21 octobre 1981 Consulté le: 15 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/EP0038294A2/en>
- [266] K. AOUDI, « Développement d'une nouvelle génération de revêtements ultra-durs. Etude de leur comportement tribologique et anticorrosif », 2018.
- [267] S. Bergsträsser *et al.*, « HyperART: non-invasive quantification of leaf traits using hyperspectral absorption-reflectance-transmittance imaging », *Plant Methods*, vol. 11, n° 1, p. 1, janv. 2015, doi: 10.1186/s13007-015-0043-0.
- [268] J. C. M. S. Moura, C. A. V. Bonine, J. De Oliveira Fernandes Viana, M. C. Dornelas, et P. Mazzafera, « Abiotic and Biotic Stresses and Changes in the Lignin Content and Composition in Plants », *Journal of Integrative Plant Biology*, vol. 52, n° 4, p. 360-376, 2010, doi: 10.1111/j.1744-7909.2010.00892.x.
- [269] A. B. dos Santos *et al.*, « Water Stress Alters Lignin Content and Related Gene Expression in Two Sugarcane Genotypes », *J. Agric. Food Chem.*, vol. 63, n° 19, p. 4708-4720, mai 2015, doi: 10.1021/jf5061858.