

Faculté des bioingénieurs

Premiers tests d'un système IoT autonome et *low-cost* pour le phénotypage en parcelle d'agriculteur

Auteur : Cyril Evrard

Promoteur(s) : Pr. Xavier Draye (UCL/ELIA)
Pr. Pierre Defourny (UCL/ ELIE)

Lecteur(s) : Pr. Boris Adam (INRAe)
Tom Kenda (UCL/ELIE)

Année académique 2024-2025

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : sciences agronomiques

Remerciements

Je tiens tout d’abord à remercier Xavier Draye, sans qui ce travail n’aurait jamais pu aboutir. Merci pour votre bonne humeur, votre disponibilité et votre accompagnement tout au long de l’année. Ce projet a été l’un des plus enrichissants et formateurs de mon parcours académique, et cela, en grande partie grâce à vous.

Je souhaite aussi remercier toutes les personnes qui m’ont aidée, de près ou de loin, et qui ont contribué à l’aboutissement de ce projet :

Un grand merci à Tom Kenda et Pierre Defourny pour leur aide précieuse.

Je remercie Sébastien François pour le prêt du GPS RTK ainsi que pour la formation à son utilisation, Gorka Aguirre pour l’accès aux terrains de hockey et Hugues Falys pour la mise à disposition des différents champs d’essai.

Merci également à Simon De Jaeger pour son soutien dans la conception et l’impression 3D.

Enfin, je tiens à remercier Gaëlle pour sa présence sur le terrain lors des nombreuses visites en champ, ainsi que pour m’avoir coaché tant bien que mal en anglais.

Table des matières

1	Revue de la littérature	1
1.1	Introduction	1
1.2	Objectif du phénotypage	1
1.3	Méthode de phénotypage	2
1.3.1	Imagerie multispectrale	3
1.3.2	Lidar	4
1.3.3	Thermographie infrarouge	5
1.3.4	Caméra RGB	6
1.4	Plateformes de phénotypage	6
1.4.1	UAV	6
1.4.2	Satellite	7
1.4.3	Plateformes fixe et mobile	8
1.4.4	Comparatif	10
2	Objectifs	11
3	Matériel et Méthode	12
3.1	Piquet connecté : Hardware	12
3.1.1	Structure	12
3.1.2	Data-logger	12
3.1.3	Spectromètres	13
3.1.4	Capteur d'irradiance solaire	15
3.1.5	Capteur de réflectance des cultures	16
3.1.6	Capteur d'humidité et de température	16
3.1.7	Evolution du piquet connecté	16
3.2	Piquet connecté : Software	19
3.2.1	Évolution du piquet connecté	19
3.3	Expériences	24
3.3.1	Expérience 1	24
3.3.2	Expérience 2	25
3.3.3	Expérience 3	26
3.4	Conversion des données brutes en unités standard	29
3.5	Données de référence pour l'évaluation de la calibration	30
3.5.1	Pameseb	30
3.5.2	Mavospec Base	31
3.5.3	GrowScreen-Rhizo 3	32
3.5.4	Sentinel 2	33
3.6	Calibration des capteurs d'irradiance solaire	34
3.7	Calcul et calibration de la réflectance	35

3.7.1	Lumière incidente ($(L_{s,\lambda}^\downarrow)$)	35
3.7.2	Lumière réfléchie ($(L_{s,\lambda}^\uparrow)$)	37
3.8	Analyses statistiques	40
4	Résultats	41
4.1	Analyse de la cohérence temporelle	41
4.2	Analyse de la cohérence inter-piquets	43
4.2.1	Irradiance solaire	43
4.2.2	Température et humidité de l'air	46
4.3	Capacité du module d'alimentation	47
4.4	Calibration du capteur d'irradiance solaire	49
4.5	Analyse des mesures de réflectance	51
4.5.1	Données disponibles	51
4.5.2	Analyse de la réflectance - Capteur AS7343	55
4.5.3	Analyse de la réflectance - Capteur AS7265x	58
4.5.4	Conclusion	60
5	Discussion	61
5.1	Limitations et améliorations matérielles	61
5.2	Alignement spectral et erreurs associées dans la comparaison capteurs/Sentinel- 2	62
5.3	Comparaison avec d'autres études similaires	64
A	Annexes	I
A.1	To do list	III
A.1.1	Hardware	III
A.1.2	Méthodologie	IV
A.2	Analyse de la réflectance	V
A.2.1	AS7265x	V
A.2.2	AS7343	XVII

Table des figures

1.1	Principe de mesure de la réflectance spectrale - Source : Amato et al. (2015)	3
1.2	Principe de mesure des distances par technologie LiDAR - Source : Escadrone (2025)	4
1.3	Principe de mesure des températures par technologie infrarouge - Source : Cannard et al. (2017)	5
1.4	Principe de fonctionnement d'une caméra RGB - Source : Vina (2024)	6
1.5	DJI Phantom 4 Multispectral - Source : DJI (2019)	7
1.6	Piquet IoT de l'INRAE - Source : INRAE (2025)	9
1.7	Phénomobile - Source : INRAE (2023)	9
3.1	Piquet IoT Low-cost	12
3.2	Deux faces de la carte électronique du data logger	13
3.3	Réponse spectrale du spectromètre AS7343	14
3.4	Réponse spectrale du spectromètre AS7265x	15
3.5	Capteur d'irradiance solaire	15
3.6	Boîtier pour spectromètres V1	16
3.7	Module RTC DS3231	18
3.8	<i>Reed contact</i>	18
3.9	Visualisation du boîtier ABS fixé sur son support	19
3.10	Console UART - Version 1	20
3.11	Console UART - Version 2	21
3.12	Page de configuration du piquet	21
3.13	Page de configuration du piquet - suite	23
3.14	Tarière gouge monobloc et piquet installé en champ	24
3.15	Carte expérience 1	25
3.16	Groupe de piquets installés en champ - Expérience 1	25
3.17	Carte expérience 2	26
3.18	Groupe de piquets installés en champ - Expérience 2	26
3.19	GPS Leica 1200 sur le terrain	29
3.20	Réponse spectrale du satellite Sentinel-2 - Source : Hu et al. (2020)	33
3.21	Mavosepc et un piquet en champ	34
3.22	Vue satellite des terrains de hockey du Louvain-la-Neuve Hockey Club, issu de Google Maps	38
3.23	Terrain de hockey du Louvain-la-Neuve Hockey Club	38
3.24	Prise de mesures spectrales sur le terrain de hockey	39
3.25	Comparaison des réponses spectrales normalisées des capteurs AS7265x, AS7343 et Sentinel-2	39
4.1	Impact d'un léger décalage temporel sur la mesure d'irradiance solaire	41
4.2	L'horloge interne de l'ESP32 dérive progressivement de l'heure réelle	43

4.3	L'irradiance solaire est corrélée entre les différents capteurs - Expérience 2 (n=1862) - Bloc 1 en vert, Bloc 2 en orange	44
4.4	L'irradiance solaire est corrélée entre les différents capteurs - Expérience 3 (n=1954)	44
4.5	Analyse de corrélation entre capteurs d'irradiance solaire de la plateforme GrowScreen-Rhizo 3 (n=1152)	45
4.6	Les capteurs d'humidité de l'air sont corrélés entre eux - Expérience 2 (n=311) - Bloc 1 en vert, Bloc 2 en orange	46
4.7	Les capteurs de température de l'air sont corrélés entre eux - Expérience 2 (n=311) - Bloc 1 en vert, Bloc 2 en orange	47
4.8	Conditions atmosphériques rencontrées lors de l'expérience 2	48
4.9	La tensions des batteries reste stable malgré les conditions difficiles	48
4.10	Rechargement partiel des batteries malgré un ciel nuageux	49
4.11	Les capteurs d'irradiance solaire nécessitent une calibration individuelle	50
4.12	Corrélation entre le piquet 5 et le spectromètre Mavospec (n=30) - Canal F1 - $R^2 = 0.9917$	51
4.13	Image Sentinel-2 en proche infrarouge du 29 avril - Parcelle Terre Claus (contour bleu), issue du site BELCAM	52
4.14	Comparaison de l'évolution quotidienne des réflectances mesurées à 11h UTC+0 avec l'AS7343 et celles des satellites Sentinel-2A (vert), Sentinel- 2B (rouge) et Sentinel-2C (mauve)	53
4.15	Comparaison de l'évolution quotidienne des réflectances mesurées à 11h UTC+0 avec l'AS7265x et celles des satellites Sentinel-2A (vert), Sentinel- 2B (rouge) et Sentinel-2C (mauve)	54
4.16	Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343)	55
4.17	Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343)	56
4.18	Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343)	56
4.19	Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7343)	57
4.20	Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7343)	57
4.21	Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7343)	58
4.22	Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)	58
4.23	Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)	59
4.24	Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7265x)	59
5.1	Illustration de la réflexion diffuse et spéculaire (Source : Yelle (2017))	61
5.2	Schéma du capteur low-cost de Garrity et al. (2010)	62
5.3	La hauteur de la canopée varie tout au long de l'expérience	63
5.4	L'hypothèse d'un intercept nul amène une erreur non négligeable (Source : Lozano et al. (2025))	63
5.5	Performance du modèle pour l'estimation du GAI, LCC et CCC (Source : Li et al. (2024))	64

5.6	Différence moyenne de réflectance entre Landsat-8 et le piquet Arable Mark 2 sur l'ensemble des bandes (Source : Pathiranage et al. (2023))	65
-----	---	----

Liste des tableaux

1	Suivi des piquets - Expérience 1	25
2	Suivi des piquets - Expérience 2	26
3	Suivi des piquets - Expérience 3	27
4	Correspondance des bandes spectrales Sentinel-2 avec les canaux des spectromètres AS7343 et AS7265x	40
5	Décalage temporel des acquisitions au lancement de l'expérience	42
6	Écart moyen entre les capteurs et la station Pameseb pour la température et l'humidité	47
7	Dates de disponibilité des images Sentinel-2A, 2B et 2C	52
8	Tableau d'appréciation de la corrélation entre les spectromètres et Sentinel-2	60

1 Revue de la littérature

1.1 Introduction

Les êtres vivants, qu'ils soient animaux, végétaux ou microbiens, présentent des caractéristiques observables qui sont le résultat des interactions entre leur constitution génétique et l'environnement dans lequel ils se développent. Le terme « phénomène » représente l'ensemble de ces caractéristiques observables, tandis que le « génome » représente l'ensemble de l'information génétique. Appliqués à un individu, on utilise généralement les termes « phénotype » et « génotype ». Le « phénotypage » et le « génotypage » sont alors l'exercice de caractérisation du phénotype et du génotype. Dans le contexte des productions végétales, le phénotypage rassemble donc l'ensemble des opérations réalisées pour mesurer le développement, la croissance, le fonctionnement et, in fine, la performance des cultures (Renaud and Gueye, 2017).

Les quantités mesurées sont de nature très diverse : masse, concentration, taille de cohorte, flux, propriétés physiques... Le phénotypage traverse également les échelles : ces quantités peuvent concerner des molécules (e.g. teneur en chlorophylle) comme elles peuvent concerner la parcelle agricole (e.g. rendement à l'hectare). Enfin, les mesures peuvent être réalisées à un moment particulier de la saison (e.g. floraison ou récolte) ou en continu. On le verra plus loin, le phénotypage est donc fortement dirigé par les technologies de mesure disponibles et son périmètre a fortement évolué ces dernières décennies (Tardieu et al., 2017).

1.2 Objectif du phénotypage

Le phénotypage joue un rôle clé dans l'amélioration des cultures avec des applications qui s'étendent à plusieurs domaines (Tester and Langridge, 2010) (Furbank and Tester, 2011). Tout d'abord, il est essentiel dans la sélection variétale en permettant d'évaluer des traits spécifiques (taille, forme, couleur, résistance au stress) ou des marqueurs génétiques qui sont de bons prédicteurs de caractéristiques agronomiques souhaitables (Roby, 2023). Il contribue ainsi à la création de nouvelles variétés plus productives et/ou résilientes.

Ensuite, dans le cadre de l'agriculture de précision, le phénotypage est également un outil d'aide à la décision dans la gestion des cultures. En effet, les agriculteurs peuvent, par exemple, ajuster en temps réel l'irrigation, la fertilisation ou les traitements phytosanitaires en fonction des données phénotypiques collectées sur le terrain. Dans ce contexte, les méthodes utilisées sont souvent automatisées et rapides.

Enfin, le phénotypage permet une meilleure compréhension des mécanismes d'adaptation des plantes face à des conditions environnementales défavorables, telles que la sécheresse, la salinité ou encore les changements climatiques (Roby, 2023) (Labarrere, 2017).

Ces recherches relèvent davantage de la biologie végétale fondamentale et mobilisent des approches plus poussées pour étudier les réponses physiologiques des plantes aux stress biotiques et abiotiques.

Ainsi, le phénotypage relie la recherche scientifique aux applications pratiques, tout en répondant à des besoins variés selon les utilisateurs chercheurs, sélectionneurs ou agriculteurs — qui n’ont pas les mêmes objectifs ni les mêmes outils à leur disposition. Il s’impose comme un levier essentiel pour relever les défis agricoles actuels et futurs (Walter et al., 2017).

1.3 Méthode de phénotypage

Le phénotypage a connu une évolution au fil des ans avec deux méthodes principales : le phénotypage traditionnel et le phénotypage moderne. Chacune de ces approches présente des caractéristiques et des avantages particuliers.

Le phénotypage traditionnel, largement utilisé dans les programmes de sélection à grande échelle, repose sur des mesures qualitatives et quantitatives réalisées sur le terrain et sur des milliers d’hectares. Ces mesures incluent des traits tels que la hauteur des plantes, la verse, le rendement en grain ou encore la résistance aux maladies (Reynolds et al., 2020). Cette approche rigoureuse constitue la base de l’ensemble du progrès génétique agricole réalisé depuis le 19^e siècle. Du fait des contraintes de rapidité et de coût requises pour évaluer un très grand nombre de génotypes en essais multi-sites, le phénotypage traditionnel se limite à des variables essentielles. On peut lui reprocher le côté subjectif de certaines évaluations visuelles (Araus and Kefauver, 2018). Cependant, le phénotypage conventionnel restera un pilier incontournable de la sélection variétale.

Le phénotypage moderne, quant à lui, bénéficie des avancées technologiques récentes, avec l’utilisation de capteurs variés (imagerie multispectrale, drones, plateformes robotisées) permettant de mesurer des traits physiologiques et structurels des plantes avec une grande résolution spatiale et temporelle. Ces technologies produisent des données standardisées, réduisant les biais liés à la perception humaine (Araus and Kefauver, 2018) et offrant un potentiel pour des analyses plus fines et détaillées. Toutefois, ces innovations restent principalement cantonnées aux laboratoires de recherche publique et aux projets expérimentaux. Leur adoption par les sélectionneurs et agriculteurs à grande échelle est encore limitée et elles n’ont pas encore démontré un avantage significatif dans les programmes de sélection. Elles sont aujourd’hui perçues davantage comme des outils de recherche que comme des solutions opérationnelles concrètes, même si une communauté croissante espère qu’elles deviendront un « *game changer* » pour l’agriculture future.

1.3.1 Imagerie multispectrale

L'une des approches les plus avancées en phénotypage moderne est l'imagerie multispectrale. Cette technologie consiste à mesurer la lumière réfléchie ou émise par les plantes à travers plusieurs bandes spectrales qui peuvent couvrir des longueurs d'onde allant de la lumière visible à l'infrarouge proche et moyen (Esri, sd). Ces mesures sont basées sur la réflectance, celle-ci correspond à la proportion de lumière qui est renvoyée par la surface de la plante après avoir été éclairée par une source lumineuse. La réflectance est calculée en comparant l'intensité de la lumière réfléchie à celle de la lumière incidente. Grâce à cette réflectance, il est possible d'extraire des indices spectraux qui offrent des informations cruciales sur la santé, la croissance et les besoins des plantes. Ce type d'approche permet d'analyser des caractéristiques spécifiques des végétaux de manière rapide et non invasive.

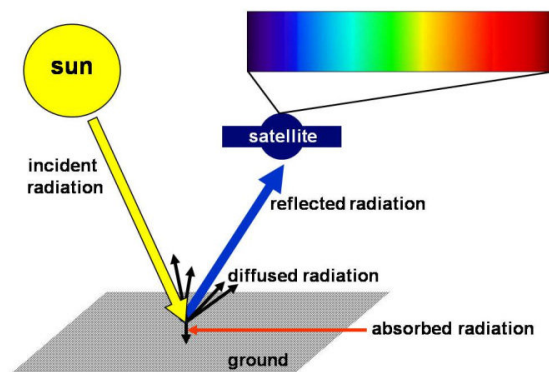


FIGURE 1.1 – Principe de mesure de la réflectance spectrale - Source : Amato et al. (2015)

Parmi les indices spectraux les plus couramment utilisés, l'un des plus importants est le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Ce dernier permet d'évaluer la santé de la végétation en mesurant la différence entre les bandes rouges (dans le spectre visible) et infrarouges proches. Un NDVI élevé indique une végétation dense, saine et vigoureuse ; tandis qu'un NDVI faible est souvent le signe de stress, de faiblesse de croissance ou de carences en nutriments (EOS, 2023b). Le NDVI est devenu un indicateur précieux pour surveiller l'état des cultures et détecter des anomalies de croissance, de stress hydrique, de maladies ou de pestes avant qu'ils n'affectent gravement les rendements des cultures (Naser et al., 2020) (Li et al., 2019).

Un autre indice pertinent est le NDMI (Normalized Difference Moisture Index). Celui-ci est spécifiquement utilisé pour évaluer le contenu en eau des plantes et détecter le stress hydrique. Le NDMI est calculé en utilisant la différence entre les bandes proches de l'infrarouge et de l'infrarouge moyen. Celles-ci sont en effet sensibles aux variations du contenu en eau des plantes. Un NDMI élevé indique une végétation bien hydratée, tandis qu'un NDMI faible est souvent le signe de stress hydrique ou de déshydratation des plantes. Le NDMI permet ainsi de compléter l'analyse de la santé des plantes en

fournissant des informations spécifiques sur leur statut hydrique (EOS, 2023a).

Ces indices permettent non seulement d'évaluer l'état général des cultures, mais aussi de suivre de près les changements dans leur bien-être physiologique, ce qui permet de faciliter l'adaptation des pratiques agricoles en fonction des besoins spécifiques des plantes. L'imagerie multispectrale offre donc une méthode efficace, rapide et non invasive pour surveiller l'évolution des cultures.

1.3.2 Lidar

Le capteur Lidar (Light Detection and Ranging) est une technologie, utilisée dans le domaine du phénotypage des plantes, qui permet d'obtenir des informations détaillées sur leur structure tridimensionnelle. Cette technologie fonctionne en émettant des faisceaux laser vers la surface des plantes et en mesurant le temps qu'il faut pour que les impulsions lumineuses se réfléchissent et retournent au capteur (Flamant, 2019). Cela permet de calculer la distance entre le capteur et la surface de la plante et ainsi offrir une image précise et détaillée de la structure végétale. L'un des principaux avantages du Lidar par rapport à d'autres technologies, comme l'imagerie multispectrale ou thermique, est sa capacité à fournir des données en trois dimensions (3D). Cet atout le rend essentiel pour analyser la structure spatiale des plantes et des cultures (Forero et al., 2022).

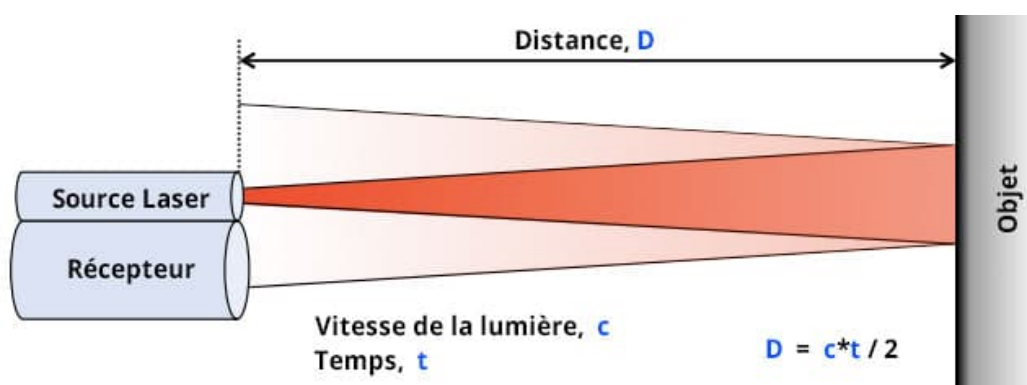


FIGURE 1.2 – Principe de mesure des distances par technologie LiDAR - Source : Escadrone (2025)

Les capteurs Lidar sont particulièrement efficaces pour évaluer plusieurs traits morphologiques des plantes. Tout d'abord, ils permettent de mesurer la hauteur des plantes, ce qui est un paramètre crucial pour suivre leur croissance et leur développement (Dhami et al., 2020). Le calcul de la densité des cultures est une autre application clé du Lidar. Cette méthode permet de mesurer la distribution spatiale des plantes dans un champ, ce qui influence directement la concurrence pour les ressources essentielles, telles que l'eau et les nutriments. Une densité optimale des cultures est favorable à leur croissance, car elle améliore l'utilisation des ressources disponibles (Lowe et al., 2021). Enfin, les capteurs Lidar permettent également d'estimer la biomasse végétale. En mesurant la hauteur et la

répartition des plantes, ces capteurs offrent la possibilité d'évaluer la biomasse produite par les cultures. Cette biomasse est un indicateur direct de la santé des plantes et de la productivité agricole. Comparativement aux méthodes traditionnelles de mesure, comme les récoltes manuelles ou les pesées de biomasse, le Lidar permet d'obtenir des estimations beaucoup plus rapides (Jin et al., 2020).

1.3.3 Thermographie infrarouge

Un type de capteur couramment utilisé dans le phénotypage des plantes est le capteur infrarouge qui mesure la température de la surface des plantes et du sol. Ces capteurs thermiques jouent un rôle essentiel dans la détection du stress thermique et de l'évapotranspiration, un processus clé pour le développement et la croissance des plantes. En surveillant la température, ces capteurs fournissent des données cruciales sur l'état hydrique des plantes, permettant ainsi d'identifier les zones susceptibles de subir une déshydratation ou une surchauffe (Maes and Steppe, 2012).

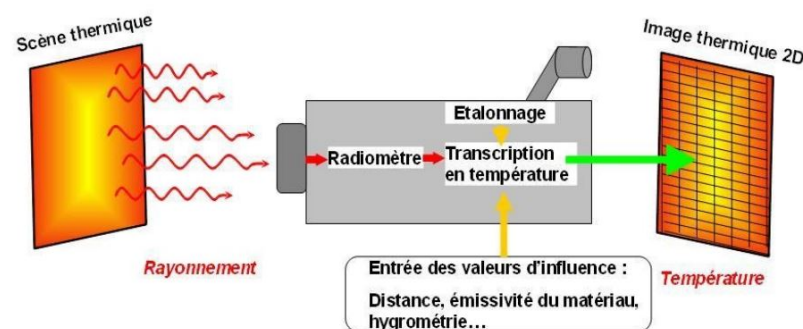


FIGURE 1.3 – Principe de mesure des températures par technologie infrarouge - Source : Cannard et al. (2017)

De plus, ces capteurs facilitent l'analyse de la variabilité thermique entre différentes plantes ou différentes conditions de culture, ce qui est un aspect essentiel pour le phénotypage des traits spécifiques liés à la tolérance à la chaleur et à l'humidité (Rashid et al., 2001). Les études portant sur l'utilisation de la température du couvert végétal pour évaluer l'état hydrique des plantes ont révélé une forte corrélation entre la température de la canopée et le statut hydrique des plantes. En effet, lorsqu'une plante subit un stress hydrique, la perte d'eau par transpiration diminue, ce qui entraîne une hausse de la température foliaire. La transpiration constitue en effet un mécanisme clé grâce auquel les plantes peuvent réguler leur température interne. Le Temperature Stress Day (TSD) est un indice développé pour quantifier ce stress hydrique à partir des mesures de température de la canopée. Ce système fonctionne en comparant la température de la culture, mesurée par thermographie infrarouge ou d'autres capteurs thermiques, avec la température d'une parcelle témoin, généralement bien irriguée, qui sert de référence (Kotchi, 2004).

1.3.4 Caméra RGB

Les caméras RGB (*Red, Green, Blue*) sont des dispositifs d'imagerie qui capturent des images en trois canaux de couleur, reproduisant ainsi la perception humaine des couleurs. En phénotypage, ces caméras sont largement utilisées en raison de leur capacité à fournir des images détaillées à un coût relativement faible. Elles permettent d'extraire des informations précises sur divers paramètres agronomiques.

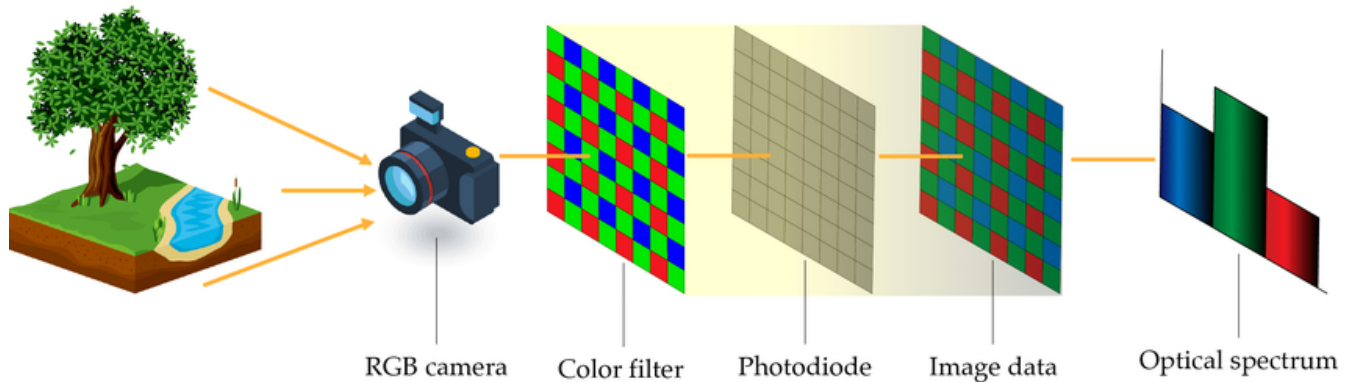


FIGURE 1.4 – Principe de fonctionnement d'une caméra RGB - Source : [Vina \(2024\)](#)

L'une de leurs principales applications est l'évaluation du rendement des cultures, notamment par le comptage des épis et l'estimation de la biomasse. Grâce aux avancées en traitement d'images et en intelligence artificielle, ces caméras permettent d'obtenir des estimations rapides et précises ([Stefański et al., 2024](#)). En associant les images RGB à des techniques de modélisation 3D, il est également possible d'obtenir des caractéristiques structurales des plantes, comme leur hauteur ou leur répartition spatiale ([Madec, 2019](#)).

Les caméras RGB trouvent également leur utilité dans le suivi du développement racinaire. En cultivant des plantes dans des rhizoboxes (boîtes transparentes contenant du sol), il est possible d'analyser l'évolution des racines sur de longues périodes. Cette approche offre une quantification rapide et économique de la croissance racinaire, ce qui est essentiel pour comprendre l'efficacité d'utilisation des ressources et la résistance aux stress environnementaux ([Bodner et al., 2017](#)).

1.4 Plateformes de phénotypage

Les capteurs utilisés pour le phénotypage moderne peuvent être installés sur différentes plateformes, offrant ainsi une grande flexibilité pour recueillir des données adaptées aux besoins spécifiques de la surveillance des cultures.

1.4.1 UAV

Les drones, ou véhicules aériens sans pilote (UAV), jouent un rôle essentiel en tant que plateformes de phénotypage agricole. Leur capacité à collecter des données à haute résolution et à analyser l'état des plantes avec une grande précision en font des outils incontournables pour évaluer les caractéristiques phénotypiques des cultures. Équipés de capteurs multispectraux, thermiques ou Lidar, les drones permettent de survoler de vastes surfaces en un temps réduit tout en offrant un suivi précis des caractéristiques étudiées.



FIGURE 1.5 – DJI Phantom 4 Multispectral - Source : [DJI \(2019\)](#)

Par exemple, le DJI Phantom 4 Multispectral est spécifiquement conçu pour l'agriculture de précision. Il combine les données de six capteurs distincts pour évaluer la santé des cultures, des plantes individuelles aux champs entiers. Le drone eBee X de senseFly est équipé du capteur multispectral RedEdge-MX et peut être utilisé dans les mêmes applications que le DJI Phantom 4 Multispectral. Par exemple, une étude a comparé l'efficacité des drones DJI P4M et senseFly eBee X dans la surveillance des cultures d'orge, en calculant les indices NDVI à partir des données recueillies par les deux UAVs. Les résultats ont montré une forte corrélation entre les deux systèmes. Cependant, le senseFly eBee X s'est distingué par ses performances supérieures dans la plupart des indicateurs évalués ([Sadenova et al., 2023](#)).

Cependant, malgré leurs avantages, l'utilisation des drones présente certaines limitations. L'autonomie de vol constitue l'une des principales contraintes. En effet, la durée de vol des modèles les plus courants, comme le DJI Phantom 4, est généralement comprise entre 20 et 30 minutes, en raison de la capacité des batteries ([DJI, 2025](#)). Cette autonomie restreint la surface analysable en une seule mission, ce qui oblige les utilisateurs à effectuer plusieurs vols ou à utiliser plusieurs drones simultanément. De plus, des conditions météorologiques telles que le vent, la pluie ou la couverture nuageuse peuvent altérer la qualité des images capturées, ce qui peut limiter la fiabilité des données ([Kedzierski et al., 2019](#)).

1.4.2 Satellite

Les satellites sont largement utilisés pour la surveillance à grande échelle car ils sont particulièrement adaptés à l'observation des cultures sur de vastes zones géographiques. Parmi eux, Sentinel-2, lancé par l'Agence spatiale européenne dans le cadre du programme Copernicus, est l'un des plus utilisés en agriculture. Équipé d'un capteur multispectral couvrant 13 bandes de longueurs d'onde, il fournit des images avec une résolution spatiale allant de 10 à 60 mètres et couvre de larges zones à un intervalle de cinq jours ([Drusch et al., 2012](#)). Grâce aux données de ce type de satellite, il est possible de mesurer des indices

végétatifs tels que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Cela permet d’offrir un aperçu global de la santé et du développement des cultures.

Cependant, bien que Sentinel-2 soit un outil puissant, il présente certaines limites pour le suivi précis des cultures agricoles notamment dans des petites parcelles et sous des conditions météorologiques variables. Les deux principaux défis sont sa résolution spatiale et la fréquence d’acquisition des images qui peuvent limiter la capacité à observer les cultures en détail.

La résolution spatiale de 10 mètres des images Sentinel-2 peut s’avérer insuffisante pour observer de manière détaillée les petites parcelles utilisées en expérimentation variétale. En effet, une parcelle dans ce contexte mesure souvent entre 10 et 20 m². Cette faible résolution peut masquer des variations fines entre variétés ou traitements et donc compromettre l’analyse de traits phénotypiques spécifiques (Vajsová et al., 2020). En revanche, pour l’observation de parcelles de production agricole, dont la taille est généralement beaucoup plus grande, cette résolution est largement suffisante pour détecter des différences à l’échelle intra-parcellaire.

Ensuite, la fréquence d’acquisition des images constitue un autre défi majeur. Bien que Sentinel-2 propose un passage tous les cinq jours, cet interval peut être insuffisant pour suivre certains phénomènes physiologiques. Ce problème peut être accentué par des conditions météorologiques défavorables qui réduit la disponibilité des images exploitables. Dans un contexte agricole, cette contrainte réduit la résolution temporelle des observations et diminue le suivi efficace des cultures. Les jours nuageux augmentent ainsi le risque d’obtenir des images partiellement ou totalement inutilisables ce qui peut perturber le suivi précis des cultures en champ.

Ces limitations de la résolution spatiale et de la fréquence d’acquisition des satellites limitent leur capacité à fournir des informations fiables et détaillées. Si Sentinel-2 est utile pour des analyses à plus grande échelle, il reste moins adapté aux applications de phénotypage de précision où les variations subtiles entre les plantes doivent être observées et mesurées avec une plus grande précision.

1.4.3 Plateformes fixe et mobile

Les plateformes de phénotypage fixes sont des installations stationnaires équipées de capteurs permettant une surveillance continue et détaillée des cultures. Elles sont particulièrement adaptées pour la collecte de données en temps réel et l’étude de certaines variables phénotypiques.

Dans le cadre du projet Phenome-Emphasis, l’INRAE a conçu un piquet connecté autonome (INRAE, 2025) qui utilise des technologies de l’Internet des objets (IoT) pour assurer une collecte et une transmission continue de données en temps réel. Ce dispositif est équipé de divers capteurs permettant de suivre l’évolution des cultures grâce à une

caméra RGB et un capteur multispectral mais également en enregistrant des informations météorologiques telles que la température, l'humidité, le rayonnement solaire et la vitesse du vent. Ces données sont transmises quotidiennement via un réseau GSM selon le modèle machine-to-machine (M2M) qui est une branche de l'IoT.

Les plateformes mobiles de phénotypage, quant à elle, regroupent des véhicules autonomes offrant une flexibilité pour l'analyse des cultures sur de vastes surfaces. Grâce à leur capacité à se déplacer librement à travers les champs, ces véhicules peuvent collecter des données à hautes résolutions. Cela permet une observation précise et dynamique des cultures ce qui est essentiel pour un suivi de leur développement sur de grandes surfaces.

Par exemple, la Phénomobile, développée en collaboration avec la société Hiphen, représente un projet majeur dans le domaine du phénotypage mobile (de Solan et al., 2015). Ce véhicule autonome est conçu pour effectuer des analyses en temps réel sur le terrain grâce à une combinaison de capteurs. Il permet d'évaluer des paramètres clés, tels que la croissance des plantes, la structure de la canopée avec une précision remarquable. Le système de navigation autonome de la Phénomobile lui permet de se déplacer de manière fluide et autonome tout en s'adaptant parfaitement aux caractéristiques topographiques du sol.



FIGURE 1.6 – Piquet IoT de l'INRAE - Source : [INRAE \(2025\)](#)



FIGURE 1.7 – Phénomobile - Source : [INRAE \(2023\)](#)

1.4.4 Comparatif

Critère	UAV (Drone)	Satellite (Sentinel-2)	Plateforme fixe (M2M - IoT)	Plateforme mobile (Phénomobile)
Prix d'acquisition	Moyen à élevé (3–20 k€)	Faible (accès libre)	Élevé (1 000 €)	Très élevé (~400 k€)
Résolution spatiale	Haute (1–10 cm)	Moyenne (10–60 m)	Très haute (mm à cm)	Très haute (mm à cm)
Résolution temporelle	Moyenne (selon fréquence des vols)	Moyenne (5 jours, météo dépendante)	Excellente (surveillance continue)	Moyenne (acquisition ponctuelle)
Surface couverte	Moyenne (10–100 ha par mission)	Très grande (échelle continentale)	Très faible (zone locale uniquement)	Moyenne à grande (selon autonomie)
Dépendance météo	Élevée (vent, pluie, nuages)	Élevée (nuages)	Faible	Faible
Variété des capteurs	Moyenne (RGB, multispectral, thermique, LiDAR – usage unitaire)	Faible (multispectral fixe)	Bonne (RGB, multispectral, thermique)	Haute (RGB, multispectral, thermique, Lidar)

2 Objectifs

L’objectif de ce mémoire s’inscrit dans une démarche plus large visant à compléter le tableau des outils de télédétection disponibles par le développement d’une plateforme IoT low-cost, qui peut être déployée en grand nombre sur un territoire, afin d’assurer une surveillance continue et autonome des parcelles agricoles. Ce système a pour ambition de pallier certaines limites des satellites, notamment en termes de résolution temporelle, tout en élargissant le spectre des données collectées grâce à l’intégration de capteurs variés.

Plus précisément, ce travail vise à tester et améliorer un prototype de plateforme IoT low-cost pouvant être équipée de plusieurs capteurs pour la surveillance des cultures de manière autonome et régulière. Ces plateformes prendront la forme de piquets destinés à être installés sur le terrain tout au long de la saison de culture. Chaque piquet sera équipé de divers capteurs permettant de collecter des données essentielles telles que la température et l’humidité de l’air, l’irradiance solaire, la réflectance des cultures et d’autres variables indicatrices de l’état de celle-ci.

Un second objectif de ce projet est d’acquérir et de calibrer la réflectance des cultures in situ à l’aide de ces plateformes. Les données recueillies seront comparées aux valeurs extraites des images du satellite Sentinel-2, afin d’évaluer la fiabilité et la complémentarité des mesures au sol. Cette analyse permettra de déterminer dans quelle mesure un piquet IoT peut reproduire ou affiner les observations satellitaires.

Enfin, le dernier objectif de ce travail est l’optimisation de la conception de ces piquets. L’idée est de maximiser leur facilité de fabrication et leur coût de production tout en garantissant qu’ils soient suffisamment robustes et efficaces pour être déployés en grand nombre sur le terrain pour un premier essai en grandeur nature dans le cadre du projet européen PHENET ([PHENET, 2025](#)).

3 Matériel et Méthode

3.1 Piquet connecté : Hardware

3.1.1 Structure

La structure du piquet développé à l’UCLouvain est composée de plusieurs éléments :

- Une canne à pêche qui constitue le support principal. Elle mesure 210 cm de long et 2,2 cm de diamètre à son extrémité la plus large.
- Un morceau de tuyau en PVC de 5 cm de diamètre et 45 cm de long, dans lequel est installé le data logger. Le tuyau est fixé sur la canne à pêche. Son extrémité supérieure est coupée à 45° et refermée par collage avec un panneau solaire de 4W. Son extrémité inférieure est refermée par un capuchon standard en PVC, perforé de plusieurs trous pour laisser passer les câbles.
- Un abri météorologique standard, fixé sur la canne à pêche, qui accueillera le capteur d’irradiance solaire ainsi que le capteur d’humidité et de température de l’air.



FIGURE 3.1 – Piquet IoT Low-cost

3.1.2 Data-logger

Le data logger est constitué des éléments suivants :

- Un PCB, conçu au laboratoire « Plant Ecology, eco-Physiology & sustainable Agronomy » (PEPA) de l’UCLouvain, qui constitue la carte principale intégrant tous les composants essentiels du système, dont les régulateurs de tension à 1,8 et 3,3V.
- Un microcontrôleur ESP32 de la société Espressif Systems. Il gère l’ensemble des opérations du data logger ainsi que la communication avec les différents capteurs ou modules. Il dispose de connexions Wi-Fi et Bluetooth et est équipé d’un processeur dual-core avec une fréquence pouvant atteindre 240 MHz. Il inclut également 512 Ko de RAM, un module de mémoire Flash de 4Mo ainsi que 8Mo de RAM statique (mémoire allouée aux variables durant l’exécution du code). Il est alimenté en 3,3V.
- Un module LoRa SX1278 RA-02, dispositif de communication sans fil basé sur la technologie LoRa (Long Range) , qui permet une communication fiable sur de longues distances. Il est équipé du circuit intégré SX1278 de Semtech, qui offre une

sensibilité élevée et une faible consommation d'énergie. Il est alimenté en 3,3V et communique via le protocole I2C. Ce module n'est pas utilisé dans ce travail.

- Une batterie lithium de 3,7 V et 2500 mAh.
- Un module de charge 03962A qui permet de charger la batterie en fournissant un courant de 1A avec arrêt automatique lorsque la charge atteint 4,2 V. Ce module protège également la batterie contre la surcharge et la décharge excessive. Il peut être alimenté en 5V via un port micro-USB ou directement par le courant fourni par notre panneau solaire.
- Deux boutons-poussoirs : l'un permet de réinitialiser le microcontrôleur, l'autre de le passer dans un mode permettant de le programmer.

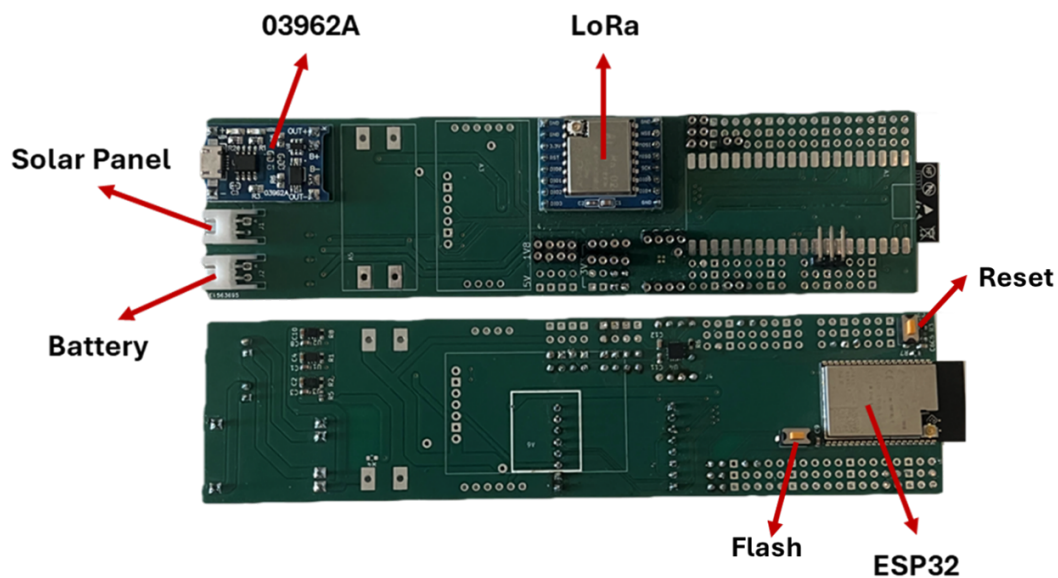


FIGURE 3.2 – Deux faces de la carte électronique du data logger

3.1.3 Spectromètres

a. AS7343

Le spectromètre AS7343, développé par AMS OSRAM, est un capteur spectral polyvalent à 14 canaux. Ce capteur couvre une plage spectrale allant d'environ 380 nm à 900 nm, comprenant 12 canaux dans le spectre visible (VIS) jusqu'au proche infrarouge (NIR), un canal clair et un canal de détection de scintillement.

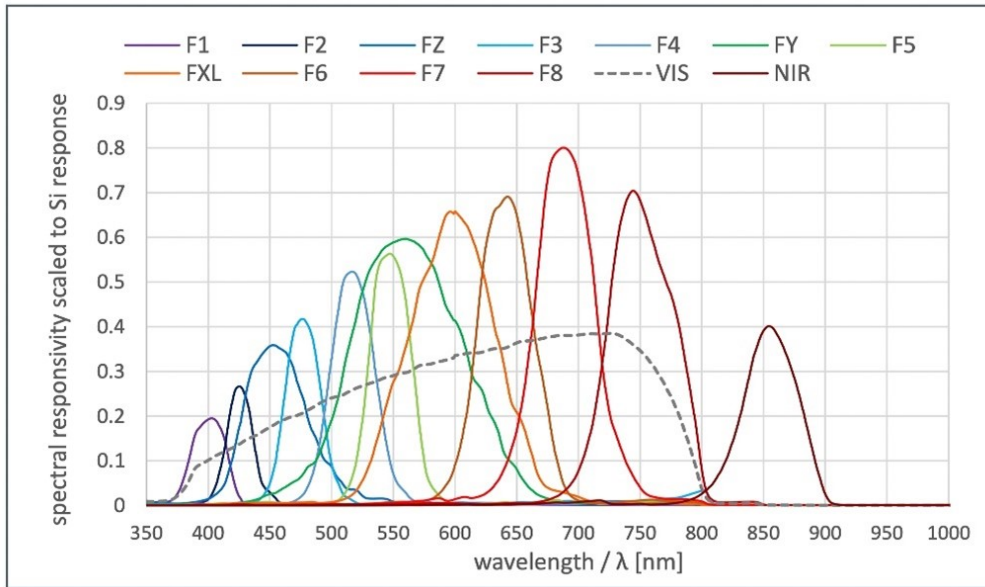


FIGURE 3.3 – Réponse spectrale du spectromètre AS7343

Ce spectromètre est installé sur un PCB conçu au laboratoire PEPA. Il communique avec le data logger via le protocole I2C et est alimenté en 1,8 V. Pour assurer la compatibilité avec notre microcontrôleur fonctionnant en 3,3 V, le signal I2C passe par un convertisseur.

Différents paramètres peuvent être ajustés par l'utilisateur pour optimiser l'utilisation du spectromètre :

- **ATIME (*Analog Integration Time*)** : détermine la durée pendant laquelle le capteur collecte la lumière avant de générer un signal. Un temps d'intégration plus long permet de capter davantage de lumière, améliorant ainsi la sensibilité du capteur, mais il peut aussi entraîner une saturation plus rapide si la luminosité est trop forte.
- **ASTEP (*Analog Step Count*)** : permet d'ajuster le temps d'intégration en agissant comme un multiplicateur de ATIME. Un ASTEP plus élevé augmente la durée de collecte de lumière, offrant ainsi un meilleur contrôle sur la sensibilité du capteur et la précision des mesures.
- **AGAIN (*Analog Gain*)** : permet d'ajuster le gain analogique appliqué au signal mesuré. Un gain plus élevé est utile dans des conditions de faible luminosité, tandis qu'un gain plus faible permet de limiter la saturation lorsque la lumière est intense.

b. AS7265x

Le spectromètre AS7265x, développé par AMS OSRAM, est un capteur multispectral composé de trois puces. Il offre un réseau de détection à 18 canaux couvrant des longueurs d'onde de 410 nm à 940 nm. Le AS72651 couvre les longueurs d'onde dans le proche infrarouge (NIR) de 600 nm à 870 nm, le AS72652 a une réponse spectrale de 560 nm

à 940 nm et le AS72653 couvre de 410 nm à 535 nm. L'ensemble complet offre ainsi 18 canaux avec une largeur à mi-hauteur (FWHM) de 20 nm.

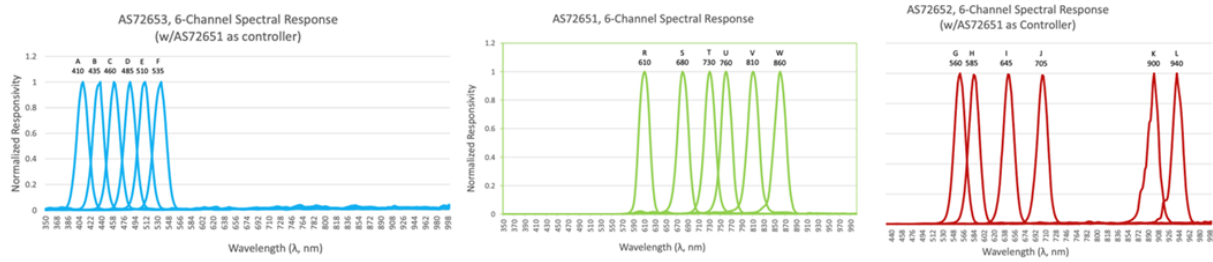


FIGURE 3.4 – Réponse spectrale du spectromètre AS7265x

Ces trois puces sont installées sur un PCB conçu au laboratoire PEPA. L'ensemble communique avec le microcontrôleur ESP32 via le protocole I2C et est alimenté en 3,3 V.

L'utilisateur peut modifier plusieurs paramètres pour optimiser l'utilisation du spectromètre, notamment :

- **Gain** : Ajuste le gain analogique appliqué au signal mesuré. Un gain plus élevé est utile dans des conditions de faible luminosité, tandis qu'un gain plus faible permet de limiter la saturation lorsque la lumière est intense.
- **Integration Time (ms)** : Détermine la durée pendant laquelle le capteur collecte la lumière avant de générer un signal. Un temps d'intégration plus long permet de capter davantage de lumière, améliorant ainsi la sensibilité du capteur, mais il peut aussi entraîner une saturation plus rapide si la luminosité est trop forte.

3.1.4 Capteur d'irradiance solaire

Le capteur d'irradiance solaire est basé sur le spectromètre AS7343. Celui-ci est fixé à l'extrémité d'un tube en PVC de 12 mm de diamètre et de 16 mm de long. À l'extrémité supérieure du tube, un disque de diffusion Optsaver-L57 de 10 mm de diamètre et de 3 mm d'épaisseur est installé. Le matériau Optsaver-L57, avec un taux de diffusion de 60 %, permet de répartir et rediriger la lumière incidente provenant de différentes directions vers le capteur. L'ensemble du montage est collé sur la face supérieure de l'abri météorologique, au niveau d'un trou percé au préalable, permettant le passage du disque diffuseur à l'extérieur. Ce dispositif a été conçu pour se rapprocher au maximum du comportement d'un correcteur de cosinus, et s'inspire de la conception du pyranomètre présenté dans cet article ([Dawson, 1981](#)).

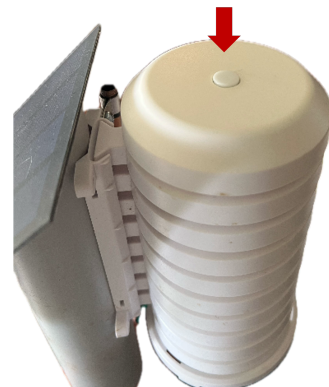


FIGURE 3.5 – Capteur d'irradiance solaire

3.1.5 Capteur de réflectance des cultures

Le capteur de réflectance des cultures se compose d'un boîtier contenant un spectromètre As7265x ainsi qu'un spectromètre As7343, qui sont utilisés pour effectuer les mesures de radiance de la canopée.

3.1.6 Capteur d'humidité et de température

Le capteur d'humidité et de température composé d'un PCB est installé dans l'abri météorologique. Celui-ci a pour but de protéger le capteur contre les précipitations et les rayonnements directs du soleil, ce qui permet de garantir la stabilité des mesures. Le PCB comporte un capteur de température et d'humidité de modèle SHT45 conçu par la société Sensirion. Il mesure l'humidité relative de 0 % à 100 % et les températures de -40°C à $+125^{\circ}\text{C}$. La précision de l'humidité relative est de $\pm 1,5$ % RH et celle de la température est de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. Ce capteur est conçu pour une utilisation à faible consommation d'énergie, ce qui le rend parfaitement adapté à notre utilisation. Il est alimenté en 3,3V et est contrôlé par notre ESP logger via le protocole de communication I2C.

3.1.7 Evolution du piquet connecté

a. Version 1

Fonctionnement général

Le fonctionnement du data logger est basé sur un cycle en deux étapes : une étape d'acquisition et de sauvegarde des mesures dans la mémoire Flash et une étape de repos (*deep sleep*) durant laquelle les capteurs ne sont plus alimentés et la consommation du module est réduite à 3mA. Dans le mode repos, seule l'horloge interne de l'ESP32 reste active. C'est elle qui se charge du réveil du module et du démarrage du cycle suivant.

Boîtier pour spectromètres

Le boîtier contenant les capteurs de réflectance des cultures est constitué d'une cornière en aluminium de 1 cm de largeur et de 12 cm de longueur. Ses deux extrémités sont fermées en collant deux morceaux de PVC. À l'intérieur, les deux spectromètres sont fixés contre des morceaux de polystyrène pour assurer leur maintien. La cornière est ensuite refermée par collage d'un morceau de polycarbonate. Deux trous sont percés à l'arrière du boîtier pour permettre le passage des câbles. L'étanchéité du boîtier est assurée par de la colle silicone. Le boîtier est collé sous le panneau solaire, lui donnant un angle de vi-

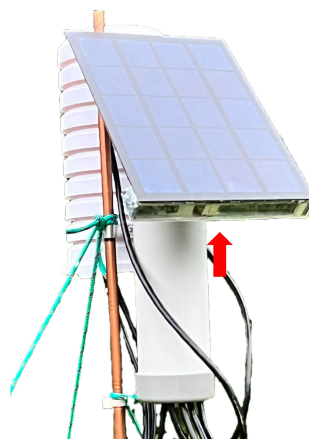


FIGURE 3.6 – Boîtier pour spectromètres V1

sion de 45°.

b. Version 2

Mesure de la tension des batteries

La batterie utilisée a une tension nominale de 3,7V mais les entrées GPIO (*General Purpose Input Output*) analogiques de l'ESP32 ne peuvent mesurer des tensions que dans la plage de 0 à 3.3V. Un diviseur de tension a donc été ajouté pour permettre au micro-contrôleur de mesurer la tension de la batterie.

Le diviseur de tension est constitué de deux résistances en série. La première résistance ($R_1 = 2\text{ k}\Omega$) est connectée entre la batterie et le GPIO de l'ESP32, tandis que la deuxième résistance ($R_2 = 2\text{ k}\Omega$) est connectée entre le GPIO et la masse (GND).

La tension de sortie (V_{out}) est donnée par la formule du diviseur de tension :

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

où V_{in} est la tension d'entrée, ici la tension de la batterie (environ 3.7V), et V_{out} est la tension mesurée par l'ESP32 sur le GPIO. Suivant les recommandations d'Espressif, nous avons également ajouté un condensateur de 0,1 μF entre V_{out} et la masse pour stabiliser la tension mesurée.

Amélioration de la gestion du temps

Pour pallier aux imprécisions de l'horloge interne de l'ESP32 (observées dans les premiers essais), nous avons installé un module RTC (*Real-Time Clock*) sur le data logger. Nous avons opté pour le module DS3231, qui fournit une heure précise grâce à son oscillateur à quartz compensé en température (TCXO). Ce module communique avec l'ESP32 via le protocole I2C en 3,3V. Son décalage théorique est d'environ une minute par an.

Certaines modifications ont dû être apportées à ce module. Tout d'abord, nous avons relié son alimentation directement à celle provenant de notre batterie principale. Cela nous permet de ne pas utiliser une pile bouton externe qui s'avère peu fiable et pourrait entraîner l'arrêt du module, causant ainsi la perte de l'heure en cas de faux contact.

Ensuite, nous avons dû déconnecter deux résistances sur le module. En effet, celui-ci possède des résistances de rappel sur les broches SDA et SCL, que nous avons décidé de retirer afin d'éviter des interférences avec la communication I2C. Il intègre également un circuit de charge pour la pile normalement embarquée. Cependant, comme nous n'utilisons pas cette dernière, nous avons choisi de déconnecter une résistance afin de désactiver ce système de recharge.

L'emplacement des résistances est indiqué sur la photo ci-dessous : celle de droite correspond au circuit de charge, tandis que celle de gauche est liée à la broche SDA, SCL.



FIGURE 3.7 – Module RTC DS3231

Les pistes correspondantes sur le PCB ont été coupées au scalpel sous un binoculaire.

Sortie manuelle du mode repos

Afin de pouvoir sortir manuellement le data logger du mode repos sans avoir à le réinitialiser ou à attendre le démarrage du cycle suivant, nous avons installé un interrupteur magnétique (*reed contact*). Celui-ci est connecté entre une broche GPIO et la masse. Lorsqu'un aimant est approché à l'extérieur du boîtier PVC, le contact se ferme, ce qui permet de réveiller le module.



FIGURE 3.8 – *Reed contact*

c. Version 3

Amélioration du boîtier pour spectromètres

Un nouveau boîtier a été conçu pour nos spectromètres mesurant la radiance de la canopée. La principale contrainte lors de sa fabrication était son étanchéité. Nous avons décidé de partir d'un boîtier standard en ABS et de le modifier.

La première modification a consisté à modéliser et imprimer en 3D un support pour positionner les capteurs à l'intérieur de celui-ci, ainsi qu'un autre support pour fixer l'ensemble à la structure de notre piquet. Cette modélisation 3D a été réalisée avec le logiciel SolidWorks (version 2024), tandis que l'impression 3D a été effectuée par frittage sélectif par laser (SLS - Selective Laser Sintering). Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec la plateforme CREDEM de l'UCLouvain ([Université catholique de Louvain, nd](#)), spécialisée dans le prototypage et les technologies de fabrication avancée.

Par la suite, une découpe a été effectuée sur la face avant du boîtier pour créer une ouverture permettant aux capteurs de prendre leurs mesures. Cette opération a été réalisée à l'aide d'une fraise positionnée sur une machine CNC. Afin de protéger les capteurs, une vitre a été fixée à l'ouverture. Il s'agit d'une lamelle de microscope, choisie pour sa transparence et sa capacité à protéger efficacement les capteurs.

Afin d'assurer l'étanchéité et de limiter la condensation à l'intérieur du boîtier lors de son utilisation sur le terrain, plusieurs mesures ont été mises en place. Le support a été conçu avec une protection pour éviter les infiltrations d'eau dans l'interstice de l'ouverture et un joint torique a été installé pour garantir une étanchéité parfaite. La lamelle de microscope a été soigneusement collée pour assurer sa fixation, tandis qu'un sachet micro-perforé contenant 3 g de silicagel a été placé à l'intérieur pour limiter l'humidité. Enfin, un trou a été percé sur le côté inférieur du boîtier à l'aide d'une CNC afin d'y fixer un presse-étoupe. Cette modification permet de faire passer les câbles nécessaires au fonctionnement des capteurs tout en garantissant l'étanchéité du boîtier.

Nous pouvons visualiser sur la figure 3.9 la représentation 3D du boîtier ABS fixé sur son support obtenu en impression 3D.

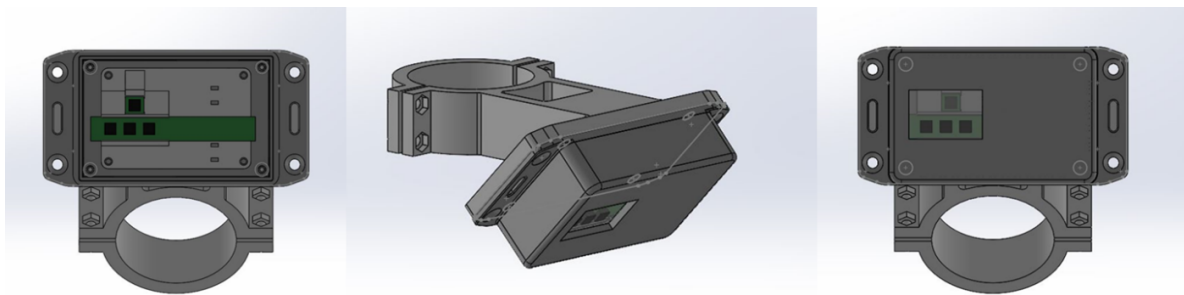


FIGURE 3.9 – Visualisation du boîtier ABS fixé sur son support

3.2 Piquet connecté : Software

La partie logicielle du piquet connecté a été développée au laboratoire PEPA. Le code a été écrit en langage C, puis compilé et téléchargé sur le microcontrôleur ESP32 à l'aide du logiciel ESP-IDF 5.1. Pour cela, nous utilisons la commande suivante dans le terminal PowerShell de Windows : `idf.py -p COM4 flash`. Avant d'exécuter la commande, il faut appuyer simultanément sur les boutons reset et flash, puis relâcher le bouton reset environ une seconde avant le bouton flash. Cette séquence permet de placer le microcontrôleur en mode flash.

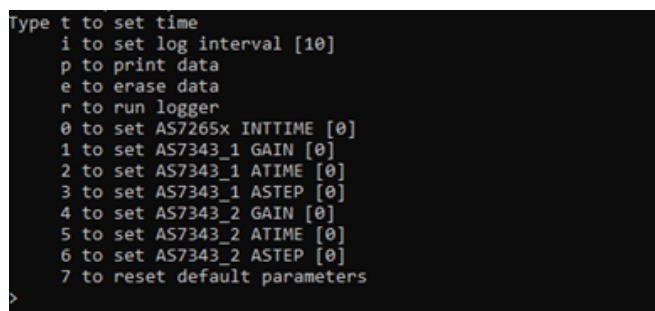
3.2.1 Évolution du piquet connecté

a. Version 1

Dans la première version du logiciel, toute la configuration du piquet connecté ainsi que la récupération des données se font via la console du logiciel ESP-IDF 5.1. Pour accéder à la console UART, on utilise la commande : `idf.py -p COM4 monitor`. Ensuite, nous appuyons sur le bouton reset du microcontrôleur pour redémarrer le module qui lance une console simplifiée.

Une fois dans la console, plusieurs fonctions sont proposées :

- **t** : permet de régler l'horloge interne du microcontrôleur ESP32.
- **i** : définit, en secondes, l'intervalle entre deux prises de mesures.
- **p** : affiche l'ensemble des données des capteurs enregistrées dans la mémoire du microcontrôleur. Ces données sont présentées de manière brute directement dans la console.
- **e** : efface toutes les données enregistrées par les capteurs dans la mémoire flash du microcontrôleur.
- **r** : lance le data logger, qui commence alors son cycle de mesures.
- **0 à 6** : permettent de configurer les différents paramètres des trois spectromètres installés sur le piquet connecté.
- **7** : rétablit l'ensemble des paramètres listés ci-dessus à leurs valeurs par défaut, à l'exception de l'heure.



```
type t to set time
i to set log interval [10]
p to print data
e to erase data
r to run logger
0 to set AS7265x INTTIME [0]
1 to set AS7343_1 GAIN [0]
2 to set AS7343_1 ATIME [0]
3 to set AS7343_1 ASTEP [0]
4 to set AS7343_2 GAIN [0]
5 to set AS7343_2 ATIME [0]
6 to set AS7343_2 ASTEP [0]
7 to reset default parameters
>
```

FIGURE 3.10 – Console UART - Version 1

b. Version 2

Dans la seconde version du logiciel, toute la configuration du piquet connecté ainsi que la récupération des données se font également via la console du logiciel ESP-IDF 5.1. Dans cette version, il est possible d'accéder à la console soit en appuyant sur le bouton reset, soit en activant le relais magnétique.

Une fois dans la console, certaines fonctions diffèrent de la version précédente :

- **t** : permet de régler l'horloge du module DS3231.
- **s** : permet de définir l'heure et la date de la première mesure effectuée par le piquet. Avant cette date et heure, le microcontrôleur reste en mode deep sleep. Le format à saisir est : yyyy mm dd hh mm
- **r** : lance une prise de mesure qui ne sera pas sauvegardée dans la mémoire flash. Cela permet de vérifier que tous les capteurs fonctionnent correctement.
- **q** : quitte la console et fait entrer le microcontrôleur en mode deep sleep jusqu'à l'heure et la date de réveil précédemment définies.

```

Type t to set time
s to set start time (first measurement) [1900-01-00T00:00:00+01:00]
i to set log interval [600]
p to print data
e to erase data
r to run logger once
q to quit console
0 to set AS7265x INTTIME [0]
1 to set AS7343_1 GAIN [0]
2 to set AS7343_1 ATIME [0]
3 to set AS7343_1 ASTEP [0]
4 to set AS7343_2 GAIN [0]
5 to set AS7343_2 ATIME [0]
6 to set AS7343_2 ASTEP [0]
7 to reset default parameters

```

FIGURE 3.11 – Console UART - Version 2

c. Version 3

Dans cette troisième version du logiciel, la configuration du piquet connecté ainsi que la récupération des données se font via une page HTML accessible via un point d'accès Wi-Fi émis par le piquet.

Pour déclencher le point d'accès lors de la première configuration, il est nécessaire d'appuyer sur le bouton reset. Une fois la première configuration terminée, l'activation du relais magnétique par un aimant permet de réactiver ce point d'accès. Ce dernier reste actif pendant 30 secondes en l'absence de connexion. Pour fermer le point d'accès et relancer le data logger, il suffit de se déconnecter du réseau Wi-Fi.

Pour accéder à la page de configuration, il faut être connecté au point d'accès Wi-Fi et entrer l'adresse suivante dans le navigateur : *http://192.168.4.1/index.html*

FIGURE 3.12 – Page de configuration du piquet

La première section, intitulée *LOGGER*, de la page de configuration est dédiée à la gestion de l'heure. Elle affiche l'heure actuelle du module DS3231, au format YYYY-MM-DD T HH :MM :SS. À noter que l'heure affichée est en UTC+0.

La ligne *Logger start* indique la date et l'heure de la prochaine mesure. Il est possible de modifier cette date et cette heure en cliquant dessus, puis en les sélectionnant dans un menu déroulant.

Pour enregistrer cette nouvelle date de démarrage et synchroniser l'heure du module DS3231 avec celle du système utilisé pour la connexion (GSM ou ordinateur), il est nécessaire de cliquer sur le bouton « *Synchronize logger time* ».

La deuxième section, intitulée *DEVICES*, permet de configurer et de contrôler l'ensemble des appareils connectés au data-logger. Pour enregistrer les paramètres modifiés, il est nécessaire de cliquer sur le bouton « *Update settings and acquire* ». Lors de cette action, chaque appareil effectue une mesure, qui n'est cependant pas enregistrée dans la mémoire flash du contrôleur. Cette mesure est affichée sous l'intitulé « *Last acquisition* ».

Les différents paramètres modifiables de l'appareil « Module » sont :

- **Board-Id** permet de modifier le nom du point d'accès Wi-Fi généré par le piquet. Il est recommandé d'attribuer un nom différent à chaque piquet. En effet, si plusieurs piquets portent des noms similaires et génèrent simultanément un point d'accès à proximité les uns des autres, cela peut entraîner un dysfonctionnement du programme.
- **Log_interval_s** permet de définir l'intervalle de temps entre deux mesures. Cette valeur doit être renseignée en secondes.
- **Wakeup_to_read_delay_s** permet de définir le délai entre le réveil du piquet (sortie du mode deep sleep) et le début des mesures. Ce délai est nécessaire pour laisser au contrôleur le temps de s'initialiser et de préchauffer ses capteurs. Cette valeur doit également être renseignée en secondes.
- **Vbat_v** permet de définir la tension initiale de la batterie. Cette tension doit être mesurée manuellement à l'aide d'un multimètre avant l'installation de celle-ci sur le PCB. Elle doit être renseignée dans ce champ et exprimée en volts. Elle est utilisée pour calibrer le pont diviseur.

Les différents paramètres modifiables de l'appareil « Spectro11 » (AS7343) sont :

- **Gain**
- **Nb_cycles** qui correspond à *Analog Step Count*
- **Cycle_ms** qui correspond à *Analog Integration Time*

Les différents paramètres modifiables de l'appareil « Spectro18 » (AS7265X) sont :

- **Int_time_ms** qui correspond à *Integration Time*

- **Gain**

Les données fournies dans « Last acquisition » sont :

- **Module** : [Tension de la batterie (V)]
- **T_RH** : [Température de l'air (C°) , Humidité de l'air (%)]
- **Spectro11** : [Valeurs brutes mesurées aux canaux : "F1", "F2", "FZ", "F3", "F4", "FY", "F5", "FXL", "F6", "F7", "F8", "NIR", "VIS"]
- **Spectro18** : [Valeurs brutes mesurées aux longueurs d'onde (nm) : 410, 435, 460, 485, 510, 535, 560, 585, 610, 645, 680, 705, 730, 760, 810, 860, 900, 940]

La section intitulée « SPIFFS UPLOAD » permet d'importer certains fichiers dans la mémoire flash du contrôleur. Ces fichiers peuvent être, par exemple, la page index.html ou le fichier de configuration du module (config.txt) dans lequel sont listés l'ensemble des capteurs. Cela permet de modifier ces fichiers sans avoir à reflasher le contrôleur ESP32.

The screenshot displays a web interface for configuring an ESP32. It consists of three main sections:

- SPIFFS UPLOAD**: Includes a text instruction 'To load 'index.html', use the uri /upload.html', a 'Choose File' button, the text 'no file selected', and an 'Upload on Logger' button.
- SPIFFS DOWNLOAD**: Features a dropdown menu set to 'Text', an empty input field, and 'Download' and 'Display' buttons.
- OTA FIRMWARE UPDATE**: Contains a 'Choose File' button, the text 'no file selected', an 'Upload' button, and a progress bar.

 At the bottom, there is a 'Go to Upload page' button.

FIGURE 3.13 – Page de configuration du piquet - suite

La section intitulée « SPIFFS DOWNLOAD » permet de visualiser ou de télécharger les fichiers présents dans la mémoire flash du contrôleur. Il est possible de les récupérer au format texte ou CSV. Pour télécharger les données enregistrées des mesures des différents capteurs, il sera nécessaire de récupérer le fichier nommé « data.txt ».

Enfin, la section « OTA FIRMWARE UPDATE » permet d'installer une nouvelle version du logiciel sur le microcontrôleur ESP32 via la connexion WiFi sans devoir reprogrammer le contrôleur à l'aide d'un ordinateur et de la console ESP-IDF 5.1. Cependant, cette fonctionnalité n'a pas encore été testée.

3.3 Expériences

Pour la mise en place des piquets connectés sur le terrain, un pré-trou est creusé à l'aide d'une tarière gouge monobloc de 30 mm de diamètre. La base des piquets est enfoncée à environ 40 cm de profondeur et ceux-ci sont maintenus en position à l'aide de trois tendeurs. Chaque tendeur est composé d'une corde en nylon de 2,7 m de long et de 4 mm de diamètre, fixée au sol à l'aide d'un piquet de tente.

Lors de l'installation, les panneaux solaires ainsi que les capteurs de réflectance des cultures ont été orientés vers le sud afin d'optimiser leur exposition.



FIGURE 3.14 – Tarière gouge monobloc et piquet installé en champ

3.3.1 Expérience 1

Cette première expérience avait pour objectif d'installer et de tester nos piquets en conditions réelles, de collecter des données brutes et de réaliser une première comparaison avec des mesures de référence, notamment celles d'une station Pameseb située à proximité. L'expérimentation a débuté le 3 août 2024 à 20 h et s'est achevée le 13 août 2024 à 20 h. Lors de celle-ci, la version 1 des piquets a été déployée sur une prairie permanente, nommée Bergerie (SIGEC 2023 : 162746), appartenant aux fermes universitaires de Louvain. Cette parcelle accueille également la station Pameseb de Louvain-la-Neuve. Les piquets ont été disposés en deux groupes de cinq, séparés d'environ 100 mètres. À l'intérieur de chaque groupe, ils étaient espacés de 2 mètres. À la suite d'un problème technique, le piquet numéro 6 n'a pas pu être installé.

TABLE 1 – Suivi des piquets - Expérience 1

Piquet	Bloc	Remarques
1	2	RAS
2	1	Eau dans le boîtier des spectromètres / Désinstallé le 05/08/2024 à 14h30
3	2	RAS
4	1	Condensation dans le boîtier des spectromètres
5	1	Condensation dans le boîtier des spectromètres
6	N/A	Problème technique / Non installé
7	2	Eau dans le boîtier des spectromètres
8	1	Eau dans le boîtier des spectromètres / Désinstallé le 12/08/2024 à 15h
9	2	RAS
10	1	RAS

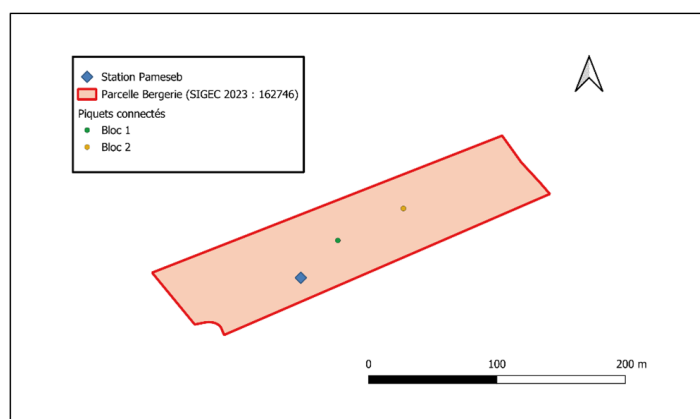


FIGURE 3.15 – Carte expérience 1



FIGURE 3.16 – Groupe de piquets installés en champ - Expérience 1

3.3.2 Expérience 2

Dans cette deuxième expérience, nous avons cherché à tester la version 2 de nos piquets, la capacité du système d'alimentation autonome face à des conditions climatiques défavorables (faibles rayonnement et température) mais également à évaluer l'impact d'un écart géographique plus important sur la cohérence de nos mesures. Nous avons également initié un premier essai de calibration de notre capteur d'irradiance solaire.

L'expérimentation a débuté le 13 décembre 2024 à 16 h et s'est achevée le 26 décembre 2024 à 14 h. Lors de celle-ci, nous avons installé la version 2 de nos piquets connectés. Cette version ne comprenait pas de capteur destiné à la mesure de la réflectance de la canopée.

Le premier bloc a été installé dans la prairie permanente, nommée Bergerie (SIGEC

2023 : 162746). Les piquets étaient espacés de 1,5 m les uns des autres. Le second bloc a été déployé dans un champ de froment d'hiver, appelé Longue Autoroute (SIGEC 2023 : 216667), situé à environ 500 mètres de la prairie permanente. Les piquets ont été installés à 20 mètres les uns des autres. En raison d'un problème technique, les piquets 1 et 10 n'ont pas pu être installés. L'expérimentation a donc été réalisée avec deux groupes de quatre piquets.

TABLE 2 – Suivi des piquets - Expérience 2

Piquet	Bloc	Remarques
1	N/A	Problème technique / Non installé
2	1	Eau dans le boîtier data-logger
3	1	Eau dans le boîtier data-logger
4	1	Eau dans le boîtier data-logger
5	1	Condensation dans le boîtier data-logger
6	2	N/A
7	2	Condensation dans le boîtier data-logger
8	2	Condensation dans le boîtier data-logger
9	2	N/A
10	N/A	Problème technique / Non installé

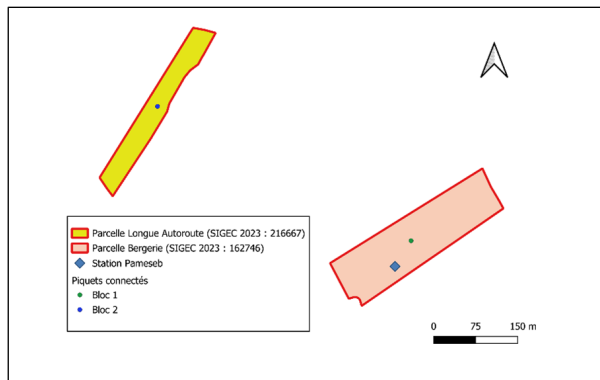


FIGURE 3.17 – Carte expérience 2



FIGURE 3.18 – Groupe de piquets installés en champ - Expérience 2

3.3.3 Expérience 3

Cette troisième expérience avait plusieurs objectifs. Tout d'abord, il s'agissait de tester les modifications matérielles et logicielles apportées à la version 3 du piquet. Nous avons également souhaité entamer une calibration plus précise de notre capteur d'irradiance solaire, ainsi qu'une comparaison des mesures de réflectance avec les données fournies par

le satellite Sentinel-2. Pour ce faire, nous avons veillé à positionner les piquets exactement au centre des pixels de 10 m x 10 m de Sentinel-2.

L'expérimentation a débuté le 12 mars 2025 à 12 h et s'est achevée le 2 mai 2025 à 9h. Lors de celle-ci, la version 3 des piquets a été déployée sur un champ de froment d'hiver, nommé Terre Claus (SIGEC 2023 : 116395), appartenant aux fermes universitaires de Louvain. Les piquets n'ont pas pu collecter des données en continu en raison de certains problèmes logiciels, ainsi que du fait que nous avons dû les désinstaller pendant plusieurs jours pour permettre à l'agriculteur de réaliser ses traitements phytosanitaires.

TABLE 3 – Suivi des piquets - Expérience 3

Piquet	Remarques
1	RAS
2	Irradiance solaire disponible à partir du 08/04/2025
3	RAS
4	RAS
5	Réflectance AS7343 disponible à partir du 08/04/2025
6	Installé à partir du 08/04/2025 / Pas de donnée entre le 12 et 28/04/2025
7	Installé à partir du 08/04/2025
8	Problème technique / Non installé
9	Problème technique / Non installé
10	Installé à partir du 08/04/2025

a. Sélection des parcelles

Pour cette troisième expérience, nous avons souhaité identifier deux parcelles des fermes universitaires couvertes par la même culture sur des modes de gestions différents et présentant une hétérogénéité spatiale. L'idée était, d'une part, de positionner les piquets de manière à ce qu'ils couvrent une gamme importante de valeurs de réflectance et, d'autre part, de pouvoir mesurer la variance intra-champ et une différence entre mode de gestion. Les données historiques de Sentinel ont été utilisées pour choisir ces deux parcelles.

Un dataframe a été conçu par le laboratoire ENGE de l'UCLouvain. Ce dataframe regroupe, pour chaque parcelle des fermes universitaires de l'UCLouvain et pour chaque année où cette parcelle a été occupée par un couvert, la valeur moyenne du LAI (Indice de Surface Foliaire) de chaque pixel sur la période de février-mars.

Un modèle statistique a été ajusté, par le laboratoire PEPA, à l'aide du package R ASREML pour chaque année depuis 2017. Ce modèle, conçu avec une variance hétérogène, prend en compte les variations intra-parcelle notamment dues aux différences de conditions climatiques ou de sol. L'objectif a été d'appliquer ce modèle année par année,

afin d'éviter de comparer une parcelle d'une année sèche avec une parcelle d'une année humide, garantissant ainsi la validité des comparaisons.

Une fois les modèles ajustés, nous avons procédé à la comparaison des parcelles au sein de chaque année afin d'identifier les paires présentant des différences significatives en termes de LAI. Toutefois, en raison du faible nombre de parcelles ayant un couvert végétal au cours des différentes années et de leur disponibilité pour l'installation de l'expérience, les résultats de cette analyse n'ont pas permis d'identifier cette paire de parcelles.

C'est pourquoi nous avons décidé de n'utiliser qu'une seule parcelle disponible sur les fermes universitaires, qui était implantée avec une froment d'hiver, précédemment occupée par un couvert de trèfle, lui-même précédé d'un colza.

b. Sélection des pixels

Afin de sélectionner des pixels contrastés au sein de notre parcelle, la première étape a été de récupérer le shapefile de la parcelle, tiré du parcellaire agricole anonyme et fourni par Tom Kenda. Ce shapefile a été modifié pour inclure un tampon négatif de 10 mètres autour de la parcelle, afin d'éviter les biais liés aux effets de bordure dans les analyses futures.

Nous avons ensuite utilisé un raster représentant l'indice de surface foliaire (LAI), également fourni par Tom Kenda. Ce raster a été modifié pour ne conserver que les pixels correspondant à la parcelle d'intérêt. Pour ce faire, nous avons utilisé la fonction "*Clip raster by mask*" dans QGIS, permettant de découper le raster et de ne garder que la zone correspondant à la parcelle sélectionnée.

Enfin, nous avons appliqué une symbologie afin de distinguer les pixels en cinq catégories en fonction de leur indice de surface foliaire. Nous avons ensuite sélectionné manuellement deux pixels par groupe pour placer nos dix piquets.

c. Calcul des coordonnées géographiques du centre des pixels

Afin de calculer les coordonnées géographiques du centre des pixels, nous sommes repartis du raster représentant l'indice de surface foliaire (LAI) de la parcelle.

Après cette modification, nous avons créé une nouvelle couche composée de points situés précisément au centre de chaque pixel du raster modifié. Cette étape a été réalisée grâce à la fonction *Raster to Point* dans QGIS, qui transforme chaque pixel du raster en un point dont les coordonnées géographiques correspondent au centre de chaque pixel.

Enfin, pour obtenir les coordonnées géographiques exactes (latitude et longitude) de ces points, nous avons utilisé la fonction *Add Geometry Attributes* de QGIS. Cette fonction permet d'ajouter les coordonnées géographiques de chaque point à la table d'attributs de la nouvelle couche créée.

d. Recherche des coordonnées sur le terrain

Afin de positionner les piquets précisément sur le terrain, nous avons utilisé un GPS Leica 1200. Il s'agit d'un système de positionnement GNSS de haute précision, conçu pour les professionnels de la topographie et des travaux publics. Ce système permet de réaliser des levés et des implantations sur le terrain avec une précision centimétrique grâce à la technologie RTK (*Real-Time Kinematic*).

Le GPS était connecté au réseau Walcort (*WAllonia Continuously Operating Reference System*), un système de stations GNSS de référence couvrant la Région wallonne, qui offre des corrections RTK pour un positionnement de précision centimétrique.

Nos coordonnées ont été importées dans le terminal au format Lambert 72, ce qui nous a permis de nous diriger précisément vers les points souhaités sur le terrain. Ces points ont ensuite été matérialisés par un fanion, afin de marquer l'emplacement exact des futurs piquets.



FIGURE 3.19 – GPS Leica 1200 sur le terrain

3.4 Conversion des données brutes en unités standard

Notre capteur d'humidité et de température de l'air fournit déjà des données en unités standard (% et °C). En revanche, pour les spectromètres, il a été nécessaire de convertir les données brutes recueillies (raw counts) en une unité standard (W/m^2). Pour cela, les documentations des deux spectromètres utilisés proposent des méthodes similaires.

La documentation du spectromètre AS7265x fournit, pour chaque canal, une valeur exprimée en $\text{counts}/(\mu\text{W}/\text{cm}^2)$ qui a été mesurée avec un gain de 16x et un temps d'intégration de 166 ms. En utilisant ces informations ainsi que les valeurs de gain et de temps d'intégration utilisées lors de la prise de mesures, il a été possible de recalculer une nouvelle valeur par canal, exprimée en $\text{counts}/(\text{W}/\text{m}^2)$.

Pour le spectromètre AS7343, la démarche a été similaire. Sa documentation fournit

le nombre de counts mesuré par canal lorsqu'il est exposé à une source de 155 mW/m² avec un temps d'intégration de 27,8 ms et un gain de 1,024x. Afin de déterminer le temps d'intégration réellement utilisé lors de nos mesures, il a été nécessaire d'appliquer la formule ci-dessous, en tenant compte du fait que Astep et Atime sont définis par l'utilisateur du spectromètre. En utilisant l'ensemble de ces informations, il a également été possible de recalculer une nouvelle valeur par canal, exprimée en counts/(W/m²).

$$\text{Integration Time (ms)} = (\text{ATIME} + 1) \times (\text{ASTEP} + 1) \times 2,78 \mu\text{s}$$

Cette méthode de conversion est spécifiquement conçue pour un spectromètre sans diffuseur. Or, notre capteur d'irradiance solaire en est équipé et ce diffuseur absorbe une partie de l'énergie. Dû à cette absorption, la conversion fournie par la documentation devient donc incorrecte. De plus, cette conversion n'est qu'une équation linéaire qui sera remplacée lors de la calibration de nos différents capteurs. Lors de la présentation des résultats des expériences 1 et 2, Les données fournies par les spectromètres seront converties à l'aide de la méthode présentée. Lors de l'expérience 3, nous utiliserons notre fonction de calibration, que nous présenterons plus loin.

3.5 Données de référence pour l'évaluation de la calibration

3.5.1 Pameseb

Le réseau Pameseb (Plateforme d'Agrométéorologie au Service de l'Environnement et de la Biodiversité) est une association sans but lucratif (ASBL) dédiée à la promotion de l'agrométéorologie. Cette discipline se concentre sur l'étude des interactions entre la météorologie et les pratiques agricoles à l'échelle des parcelles en région wallonne. Depuis sa fondation, Pameseb s'engage activement dans l'enregistrement et la diffusion de données météorologiques provenant de ses 41 stations réparties à travers la Wallonie.

Dans le cadre de cette étude, la station météorologique située à Louvain-la-Neuve a été choisie comme source principale de données. Ces données ont été utilisées pour effectuer une première comparaison et calibration pour notre capteur d'irradiance solaire et notre capteur de température et d'humidité de l'air.

La station Pameseb est équipée d'un Pyranomètre Silicium SP Lite2 conçu pour mesurer avec précision le rayonnement solaire en W/m² dans diverses conditions météorologiques. Le SP Lite2 est particulièrement adapté aux domaines météorologique, hydrologique et agricole, ainsi qu'à l'évaluation du potentiel énergétique solaire. Grâce à son diffuseur conique, il offre une excellente réponse directionnelle (cosinus) et facilite l'écoulement de l'eau de pluie, réduisant ainsi les besoins d'entretien et de nettoyage.

Les pyranomètres qui équipent le réseau Pameseb mesurent le rayonnement solaire global, incluant le rayonnement direct, diffus et réfléchi, dans une gamme spectrale allant de

400 à 1100 nm. Bien que sa gamme spectrale soit limitée par son détecteur à photodiode, ses performances sont comparables à celles d'un pyranomètre à thermopile de seconde classe ISO9060, particulièrement par temps clair et dégagé.

Dans le réseau Pameseb, les données de température et d'humidité relative de l'air sont fournies par le capteur modèle HMP155 fabriqué par Vaisala. Ce capteur est protégé par une structure solide et un filtre en téflon fritté, permettant d'empêcher l'intrusion d'eau liquide, de poussière et de saleté. Afin de garantir un environnement de mesure optimal, la sonde est placée dans un abri MeteoShield - Professional, conçu par Barani Design.

3.5.2 Mavospec Base

Le MAVOSPEC BASE de Gossen Metrawatt est un spectromètre portable équipé d'un capteur CMOS couvrant une plage spectrale de 380 à 780 nm avec une résolution physique d'environ 1,72 nm et une résolution utile de 5 nm. Il peut être utilisé manuellement ou commandé via les protocoles HID (Human Interface Device) ou CDC (Communication Device Class).

Dans le cadre de ce projet, ce spectromètre sera utilisé pour calibrer de manière relative nos spectromètres mesurant l'irradiance solaire. Pour ce faire, nous avons développé un code Python permettant d'automatiser à intervalles réguliers la prise de mesures spectrales et la sauvegarde des résultats dans un fichier « .csv ». Ce code s'exécutera sur un Raspberry Pi 4 auquel le MAVOSPEC BASE sera connecté en USB et commandé via le protocole de communication HID. Il a été développé à l'aide du SDK fournis par l'entreprise Gossen.

Afin d'établir la connexion avec notre périphérique, nous avons utilisé plusieurs fonctions de la bibliothèque « hid ». Tout d'abord, la fonction `hid.device()` permet de créer un objet pour interagir avec le périphérique. Ensuite, la fonction `hid.device.open(vendor_id, product_id, serial_number=None)` est utilisée pour ouvrir la communication en utilisant les identifiants vendeur (VID) et produit (PID). Les identifiants du spectromètre MAVOSPEC BASE sont 0x1CD7 pour son VID et 0x4001 pour son PID. Ces valeurs permettent d'identifier de manière unique le périphérique lors de la connexion via le protocole HID.

Ensuite, nous avons utilisé la fonction `hid.device.write(device,[data])` pour envoyer des commandes à notre spectromètre. La documentation du SDK propose une multitude de commandes mais certaines adaptations ont été nécessaires pour que celles-ci soient correctement traitées par notre programme. Nous avons tout d'abord dû convertir les commandes du format hexadécimal en format décimal. Ensuite, nous avons ajouté un octet égal à 0 au début de chaque commande. Enfin, il a été nécessaire de compléter la commande avec des octets égaux à zéro afin que celle-ci fasse 65 octets de long. Deux commandes ont été utilisées dans ce programme : la première pour lancer une mesure et la seconde pour récupérer les données mesurées.

Commande pour prendre une mesure :

```
write_data(h, [0, 178, 0, 1, 0, 64] + [0] * 59)
```

Commande pour récupérer une mesure :

```
write_data(h, [0, 40, 0, 1, 0, 1] + [0] * 59)
```

Afin de récupérer les données, nous avons utilisé la fonction `hid.read(device, length)`. Cette fonction permet de collecter les données brutes par paquets de 65 octets. Étant donné que la mesure du spectre dépasse cette taille, nous avons dû lire ces données par segments avant de réassembler les données complètes.

Chaque mesure brute du spectre est un nombre flottant au format IEEE 754 (32 bits), représenté par 4 octets. Nous commençons par convertir ces 4 octets en un entier à l'aide de la fonction `int.from_bytes()`, en précisant que l'ordre des octets doit être en Little Endian (`byteorder='little'`). Enfin, nous convertissons cet entier en flottant à l'aide de la fonction `struct.unpack()`. Une fois les données brutes du spectre entièrement converties, nous les enregistrons dans un fichier au format .csv à l'aide de la fonction `csv.writer()` de la bibliothèque `csv`.

Enfin, pour automatiser la prise de mesures, nous générons une liste d'horaires en fonction de l'intervalle souhaité ainsi que des dates et heures de début et de fin de mesures. Ces horaires déterminent les instants précis où lancer un cycle de mesure du spectre. Nous utilisons ensuite la fonction `datetime.now()` pour comparer l'heure actuelle aux horaires définis et déclencher les mesures au bon moment.

3.5.3 GrowScreen-Rhizo 3

Nous avons pris contact avec les responsables de la plateforme GrowScreen-Rhizo 3 afin d'obtenir un jeu de données provenant de plusieurs capteurs industriels de rayonnement photosynthétique, dans le but d'estimer la variabilité acceptable entre capteurs de référence.

GrowScreen-Rhizo 3 est une plateforme de phénotypage automatisée permettant d'analyser simultanément et de manière non invasive la croissance et l'architecture des racines et des parties aériennes des plantes cultivées en rhizotrons remplis de sol.

Les serres sont également équipées de 56 capteurs d'irradiance solaire, modèle SL 190 fabriqué par LI-COR. Ce pyranomètre utilise une photodiode en silicium pour mesurer le rayonnement solaire global, couvrant une gamme spectrale de 400 à 1100 nm. Il est conçu pour capter à la fois le rayonnement direct et diffus. Les mesures sont exprimées en photon flux density ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$).

3.5.4 Sentinel 2

Sentinel-2 est une mission du programme Copernicus de l'Union européenne dédiée à l'observation de la Terre. Cette mission repose sur une constellation de trois satellites : Sentinel-2A, lancé en juin 2015, Sentinel-2B lancé en mars 2017 et Sentinel-2C lancé tout récemment en septembre 2024. L'objectif principal de Sentinel-2 est de fournir des images multispectrales à haute résolution avec un temps de revisite rapide pour offrir une couverture continue de la surface terrestre.

Les satellites Sentinel-2 sont équipés d'un instrument multispectral (MSI) qui mesure la lumière dans 13 bandes spectrales couvrant des longueurs d'onde allant de 443 nm à 2190 nm. En fonction de la bande spectrale, la résolution spatiale des images varie de 10 m à 60 m. Par exemple, les bandes les plus fines, telles que la bande B2 à 490 nm, la B3 à 560 nm et la B4 à 665 nm ont une résolution de 10 m, tandis que d'autres bandes, comme les bandes d'infrarouge, ont une résolution de 20 m ou 60 m.

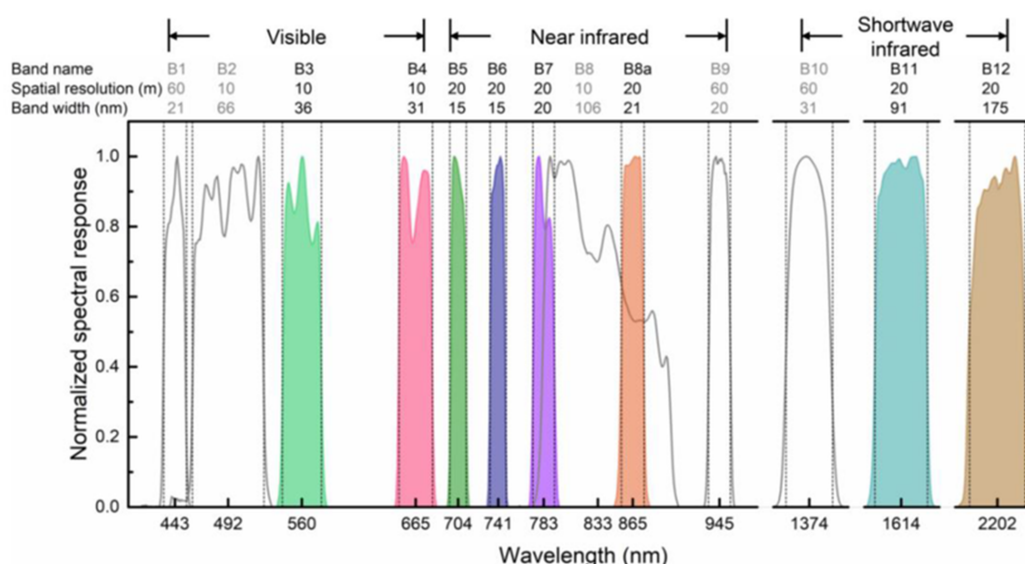


FIGURE 3.20 – Réponse spectrale du satellite Sentinel-2 - Source : [Hu et al. \(2020\)](#)

Le temps de revisite de la constellation est d'environ 5 jours à l'équateur lorsque Sentinel-2A et Sentinel-2B sont en opération. Avec l'ajout de Sentinel-2C, ce temps de revisite est encore amélioré.

Les données brutes de réflectance fournies par les satellites Sentinel-2A et Sentinel-2B sont traitées par le logiciel MAJA (*Multi-temporal Atmospheric Correction Algorithm*), développé par CESBIO et le CNES. MAJA est un logiciel de correction atmosphérique conçu pour produire des réflectances de la surface terrestre (niveau 2A) à partir des images satellitaires top-of-atmosphere orthorectifiées (niveau 1C). Son rôle principal est de détecter les nuages et leurs ombres, d'estimer l'épaisseur optique des aérosols (AOT) et la vapeur d'eau afin de corriger les images en compensant les effets atmosphériques tels

que l'absorption et la diffusion.

Les données brutes de réflectance fournies par le satellite Sentinel-2C sont quant à elles traitées par le logiciel Sen2Cor. Ce logiciel de correction atmosphérique, développé par l'ESA, transforme les images brutes (niveau 1C) en réflectances de la surface terrestre (niveau 2A), en corrigeant les effets atmosphériques tels que l'absorption, la diffusion et l'impact des nuages.

3.6 Calibration des capteurs d'irradiance solaire

Nous avons connecté le spectromètre Mavospec à un Raspberry Pi pour automatiser la prise de mesures, dans un champ dégagé, sans aucune structure pouvant générer de l'ombre sur nos capteurs. Les mesures de calibration ont été réalisées par temps clair et sans nuages, entre 14h et 19h, avec un intervalle de 10 minutes entre chaque mesure, soit un total de 30 mesures. Les piquets à calibrer étaient positionnés dans le même champ, à moins de 50 mètres du spectromètre Mavospec.

Une fois les données d'irradiance spectrales récupérées (en $\text{mW}/\text{m}^2/\text{nm}$, avec un pas spectral de 5 nm), nous les avons intégrées sur les différentes bandes spectrales correspondant à celles du capteur AS7343, afin d'obtenir une valeur d'irradiance globale (en W/m^2) pour chaque bande. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel R, dans lequel nous avons développé une fonction permettant d'estimer l'intégrale d'une fonction à partir de points discrets, selon la méthode des rectangles moyens.

Cette fonction prend en entrée deux vecteurs : x , représentant les longueurs d'onde, et y , correspondant aux valeurs de l'irradiance spectrale. Elle commence par calculer les intervalles entre les longueurs d'onde à l'aide de $\text{diff}(x)$, ce qui fournit les largeurs des petits rectangles. Ensuite, elle détermine la hauteur moyenne de chaque intervalle en calculant la moyenne des valeurs de y successives via la formule $(y[-1] + y[-\text{length}(y)]) / 2$. Enfin, l'intégrale est estimée en multipliant chaque largeur par la hauteur moyenne correspondante, puis en sommant l'ensemble des aires ainsi obtenues.

Ensuite, afin de trouver la relation entre nos données brutes fournies par notre capteur d'irradiance solaire et l'irradiance spectrale intégrée par bande du spectromètre Mavospec, nous avons créé un modèle de régression linéaire. Pour cela, nous avons utilisé la fonction $\text{lm}()$ sous R, qui permet d'ajuster une droite aux points mesurés. Dans notre cas, les



FIGURE 3.21 – Mavosepc et un piquet en champ

données issues du capteur représentaient la variable indépendante (axe des x), tandis que les valeurs d'irradiance de référence calculées à partir du spectromètre constituaient la variable dépendante (axe des y).

Ce modèle nous a permis d'estimer les coefficients de la droite de régression (pente et intercept), ce qui définit la relation mathématique entre les deux sources de données. Le coefficient de détermination R^2 a également été calculé afin d'évaluer la qualité de l'ajustement. Une fois ces paramètres obtenus, nous avons formulé, pour chaque bande spectrale et pour chaque piquet, une équation de calibration sous la forme [Données calibrées = (a*Données brutes) + b]. Cette formule permet de convertir les mesures brutes du capteur en une estimation d'irradiance en W/m^2 .

3.7 Calcul et calibration de la réflectance

La réflectance spectrale d'une surface, notée $(r_{s,\lambda})$ est le rapport entre la lumière réfléchie par la surface ($L_{s,\lambda}^\uparrow$) et la lumière incidente ($L_{s,\lambda}^\downarrow$). (λ) représente la bande spectrale (Lozano et al., 2025).

3.7.1 Lumière incidente ($(L_{s,\lambda}^\downarrow)$)

Nous mesurons la lumière incidente à l'aide de notre capteur d'irradiance solaire, équipé d'un correcteur cosinus. Celui-ci permet de collecter la lumière provenant de l'ensemble de l'hémisphère (180°). Nous normalisons cette mesure en la divisant par 2π , ce qui permet de l'exprimer par unité d'angle solide. Cette normalisation est nécessaire pour rendre la mesure indépendante de l'angle d'incidence, ce qui permet de comparer les intensités lumineuses collectées quelle que soit la position du capteur par rapport à la source lumineuse.

Comme mentionné précédemment, la lumière réfléchie et la lumière incidente doivent être mesurées dans des bandes spectrales communes. Cependant, nous utilisons le spectromètre AS7343 pour mesurer l'irradiance, tandis que le spectromètre AS7265X et AS7343 est utilisé pour mesurer la lumière incidente. Pour les données provenant du spectromètre AS7343, aucun traitement n'a été nécessaire. Cependant, afin de pouvoir calculer la réflectance à l'aide des données fournies par le spectromètre AS7265X plusieurs opérations ont été nécessaires.

a. Analyse de la réponse spectrale

Pour déterminer la réponse spectrale spécifique de chaque instrument à différentes longueurs d'onde, la documentation des spectromètres fournit des graphiques de responsivité pour chaque canal (voir partie hardware). Afin de numériser les différents graphiques, nous avons utilisé le logiciel WebPlotDigitizer (V4). C'est un outil en ligne permettant d'extraire des données numériques à partir d'images de graphiques.

Nous avons d'abord récupéré l'image du graphique à analyser en prenant une capture d'écran avec la plus haute résolution possible. Ensuite, nous avons importé cette image dans WebPlotDigitizer via l'option "*Load Image*" et défini celui-ci comme un « 2D (X-Y) Plot ». Une fois l'image importée, nous avons procédé à la calibration des axes afin de permettre au logiciel d'interpréter correctement les données. Cette étape consiste à définir graphiquement les points de référence minimaux et maximaux sur les axes X et Y et en indiquant leurs valeurs numériques correspondantes.

Après la calibration, nous avons utilisé les outils du logiciel pour extraire les points de données. WebPlotDigitizer offre une détection automatique des points présents sur la courbe en fonction de la détection de la couleur de celle-ci. Cependant, il a parfois été nécessaire de procéder manuellement en cliquant sur les points d'intérêt pour garantir une meilleure précision. Une fois les données extraites, elles ont été exportées en format CSV. Afin d'obtenir des courbes avec des valeurs à intervalles réguliers sur l'axe des X, il a été nécessaire de réaliser un post-traitement des données initialement fournies par WebPlotDigitizer. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel R (version 4.3.1) afin d'interpoler les valeurs et ainsi obtenir des points homogènement répartis selon un pas défini.

Tout d'abord, nous avons importé les données extraites de WebPlotDigitizer à partir d'un fichier CSV. Ce fichier contenait deux colonnes : la première représentant les longueurs d'onde (en nm) (axe x) et la seconde correspondant aux valeurs de réponse spectrale associées (axe y). Après l'importation, nous avons converti ces colonnes en valeurs numériques pour assurer une manipulation correcte des données.

Ensuite, nous avons défini les paramètres de rééchantillonnage, en spécifiant une longueur d'onde de départ et un pas de longueur d'onde afin d'obtenir une distribution régulière des points sur l'axe des X. Une nouvelle séquence de longueurs d'onde a été générée à l'aide de la fonction `seq()`, garantissant ainsi un espacement uniforme des points de mesure.

Enfin, pour associer une réponse spectrale aux nouvelles longueurs d'onde, nous avons utilisé une interpolation cubique via la fonction `spline()`. Cette méthode permet d'estimer les valeurs intermédiaires de manière réaliste ; évitant ainsi les ruptures dans la courbe et assurant une transition continue entre les points existants.

Pour pouvoir comparer les réponses spectrales entre les différents instruments, nous avons ensuite normalisé les courbes de responsivité à 1. Cela permet de rendre les courbes directement comparables, indépendamment des différences d'échelle entre les spectromètres.

b. Comparaison des bandes spectrales

Pour comparer les différentes bandes spectrales, nous avons superposé les courbes de responsivité des deux spectromètres sur un même graphique, ce qui a permis de visualiser les correspondances et les différences entre leurs bandes spectrales.

Pour les bandes spectrales communes, nous avons calculé la surface sous la courbe à l'aide du logiciel R, dans lequel nous avons développé une fonction permettant d'estimer l'intégrale d'une fonction à partir de points discrets, selon la méthode des rectangles moyens.

Cette fonction prend en entrée deux vecteurs : x , représentant les longueurs d'onde, et y , correspondant aux valeurs de réponses spectrales. Elle commence par calculer les intervalles entre les longueurs d'onde à l'aide de $\text{diff}(x)$, ce qui fournit les largeurs des petits rectangles. Ensuite, elle détermine la hauteur moyenne de chaque intervalle en calculant la moyenne des valeurs de y successives via la formule $\frac{y[-1] + y[-\text{length}(y)]}{2}$. Enfin, l'intégrale est estimée en multipliant chaque largeur par la hauteur moyenne correspondante, puis en sommant l'ensemble des aires ainsi obtenues.

Une fois les surfaces obtenues, nous avons pu établir une relation permettant de déterminer la proportion d'énergie mesurée par le spectromètre AS7343 dans la même bande spectrale que le spectromètre AS7265X. Pour mesurer cette relation, nous avons divisé la surface obtenue sous la courbe de AS7343 par celle obtenue sous la courbe de AS7265X.

3.7.2 Lumière réfléchie ($L_{s,\lambda}^\uparrow$)

Nous mesurons la lumière réfléchie à l'aide de deux spectromètres différents : l'AS7343 et l'AS7265X. Normalement, pour mesurer la réflectance, ces deux spectromètres devraient nous fournir des données en $\text{W/m}^2/\text{sr}$, comme le fait notre capteur d'irradiance solaire. Cependant, plusieurs difficultés techniques nous empêchent pour l'instant d'obtenir ces données dans cette unité.

Tout d'abord, le calcul de l'angle de vue mesuré par nos spectromètres est difficile à réaliser avec précision dû au manque de diffuseur ou d'ouverture standardisée. En effet, nous savons que le spectromètre AS7265X a un angle de vision approximatif de 45° , tandis que le spectromètre AS7343 présente un angle approximatif de 180° . Toutefois, vu la conception de nos boîtiers, ces angles sont encore influencés.

Ensuite, bien que l'angle d'installation des capteurs soit fixe à 45° , la hauteur de ces capteurs par rapport à la canopée varie en fonction du développement de la culture. Actuellement, nous ne sommes pas encore en mesure de mesurer cette hauteur de manière précise.

De plus, la calibration de nos capteurs pose également problème. En effet, pour pouvoir les calibrer et convertir nos *Digital Numbers* en unités standard, il nous faudrait un spec-

tromètre calibré possédant le même angle de vision que nos spectromètres low-cost. Sinon, un adaptateur permettant de brancher une fibre optique sur ces spectromètres pourrait nous permettre de les calibrer avec précision.

Pour toutes ces raisons, nous avons décidé, pour le reste du calcul de la réflectance et de sa calibration, de n'utiliser pour l'instant que les *Digital Numbers* fournis par nos spectromètres dans les différentes plages de longueur d'onde. Nous faisons donc l'hypothèse que les angles de vision et d'installation des spectromètres sont similaires entre nos différents piquets. De plus, nous négligerons l'évolution de la hauteur de la canopée et approximerons la hauteur de nos capteurs par rapport à celle-ci à 2 m.

a. Calibration des réflectances

Nous avons décidé de calibrer nos mesures de réflectance par rapport à l'instrument multispectral du satellite Sentinel-2B. Pour ce faire, nous avons recherché une grande surface horizontale présentant un profil lambertien, avec une réflectance stable au cours du temps. Après plusieurs recherches, nous avons trouvé le terrain de hockey du Louvain-la-Neuve Hockey Club. Ce terrain, mesurant 55 m sur 90 m, permet au satellite de capter plusieurs pixels de 10 m par 10 m sur sa surface.



FIGURE 3.22 – Vue satellite des terrains de hockey du Louvain-la-Neuve Hockey Club, issu de Google Maps



FIGURE 3.23 – Terrain de hockey du Louvain-la-Neuve Hockey Club

Afin de calibrer nos mesures de réflectance, nous avons positionné chaque piquet individuellement dans un pixel sur le terrain. Nous avons orienté les capteurs vers le sud et à une hauteur de 2 m, afin de standardiser l'installation par rapport à nos expériences. Pour chaque piquet, nous avons effectué 10 mesures successives.



FIGURE 3.24 – Prise de mesures spectrales sur le terrain de hockey

Nous avons ensuite calculé la moyenne des 10 mesures d'irradiance solaire et de lumière réfléchie pour chaque bande spectrale commune aux canaux à 10 m de résolution du satellite Sentinel-2 (B2, B3, B4 et B8), puis calculé l'irradiance en appliquant la formule suivante : Réflectance = $\frac{L_{\text{réfléchiée}}}{L_{\text{incidente}}}$

En connaissant la réflectance de la surface du terrain, nous avons pu déterminer, pour chaque bande spectrale et chaque piquet, le facteur de correction nécessaire pour la calibration.

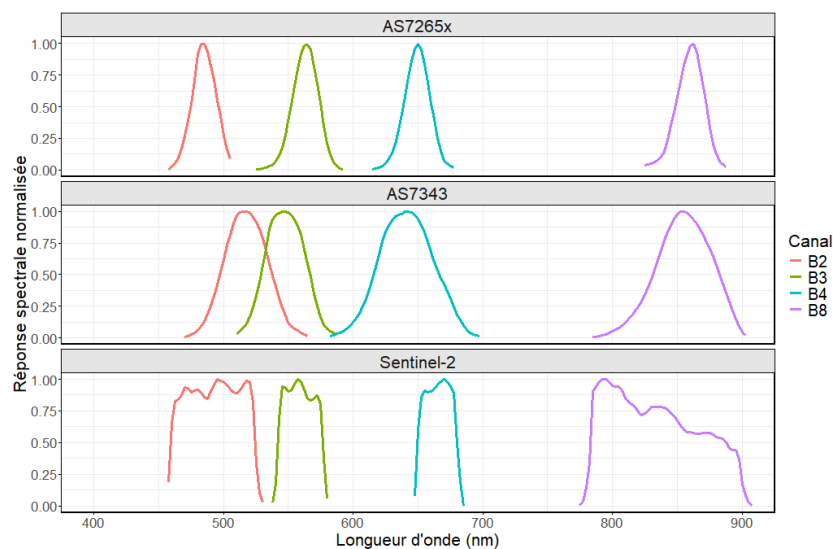


FIGURE 3.25 – Comparaison des réponses spectrales normalisées des capteurs AS7265x, AS7343 et Sentinel-2

TABLE 4 – Correspondance des bandes spectrales Sentinel-2 avec les canaux des spectromètres AS7343 et AS7265x

Bande Sentinel-2	AS7343 (canal)	AS7265x (longueur d'onde)
B2	F4	485 nm
B3	F5	560 nm
B4	F6	645 nm
B8	NIR	860 nm

3.8 Analyses statistiques

Lors de ce travail, les différentes analyses statistiques et la génération de graphiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R.

Pour visualiser les différentes corrélations, nous avons utilisé un scatter plot matriciel. Il nous a permis de visualiser la relation entre différentes variables et de quantifier leur degré de similitude à l'aide des coefficients de détermination (R^2) et des équations des régressions linéaires.

Pour cela, une fonction a été développée. Son rôle est de calculer et d'afficher, sur chaque graphique de dispersion, la valeur de R^2 ainsi que l'équation de la régression linéaire. Cette fonction commence par extraire les valeurs des variables à comparer : l'une en abscisse (x) et l'autre en ordonnée (y). Ensuite, elle ajuste une régression linéaire à l'aide de la fonction `lm( $y \sim x$ )`, ce qui permet d'évaluer dans quelle mesure les données d'une variable sont prédictibles à partir des autres.

Une fois le modèle ajusté, la fonction extrait le coefficient de détermination R^2 , qui indique la qualité de l'ajustement, ainsi que l'équation de la régression. Ces informations sont ensuite affichées directement sur chaque scatter plot sous forme de texte.

L'ensemble de ces calculs est intégré à une autre fonction, qui permet de générer automatiquement une matrice de scatter plots montrant chaque variable en fonction des autres. Dans la partie supérieure de cette matrice, les valeurs de R^2 et de pente sont ajoutées.

Afin de visualiser l'évolution temporelle d'une ou plusieurs variables, un graphique a été généré à l'aide de la fonction `ggplot()` du package `ggplot2`.

Afin de visualiser les écarts absolus entre différents capteurs ou sources de données, nous commençons par calculer l'écart absolu entre leurs mesures, c'est-à-dire la valeur positive de leur différence $|\text{capteur1} - \text{capteur2}|$. En R, cela se fait à l'aide de la fonction `abs()`. Ensuite, pour obtenir une mesure globale de ces écarts, nous calculons la moyenne des écarts absolus à l'aide de la fonction `mean()`.

4 Résultats

4.1 Analyse de la cohérence temporelle

Lors de l'étude de la cohérence des données fournies par la première version de nos piquets, nous avons pu déceler divers problèmes liés aux conceptions matérielle et logicielle. Parmi ceux-ci, un décalage entre les acquisitions était attendu dès la phase de conception mais nous avons estimé qu'il serait négligeable et sans impact notable sur l'analyse.

Cependant, comme le montre la figure 4.1, les piquets capturent des variations transitoires d'irradiance solaire au cours de la journée, mais tous les piquets ne les montrent pas, alors qu'ils sont situés l'un à côté de l'autre. Celles-ci viennent vraisemblablement de nébulosités passagères.

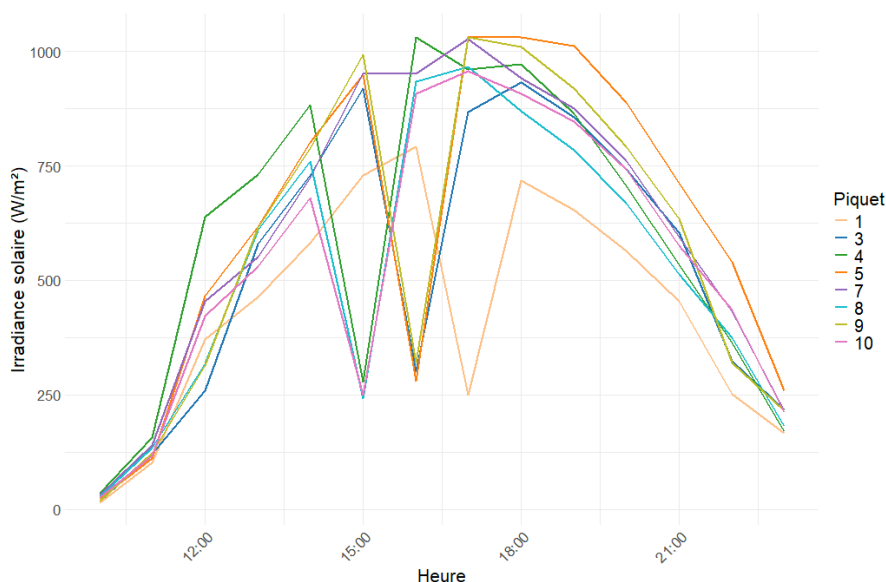


FIGURE 4.1 – Impact d'un léger décalage temporel sur la mesure d'irradiance solaire

Lors de la configuration de la première version de nos piquets, nous renseignons l'heure actuelle et la consigne d'intervalle entre deux acquisitions, ensuite le piquet commence immédiatement à prendre des mesures. Comme cette configuration ne peut être réalisée simultanément pour l'ensemble des piquets, un décalage de plusieurs minutes apparaît entre les acquisitions. Ce décalage est visible dans le tableau 5, qui présente les heures de prise de mesure au début de l'expérience.

TABLE 5 – Décalage temporel des acquisitions au lancement de l'expérience

Piquet	Date et heure
1	2024-08-03 20 :08 :14
3	2024-08-03 20 :06 :05
4	2024-08-03 20 :04 :09
5	2024-08-03 20 :04 :22
7	2024-08-03 20 :08 :08
8	2024-08-03 20 :04 :37
9	2024-08-03 20 :02 :17
10	2024-08-03 20 :08 :18

Étant donné que les différents piquets n'effectuent pas leurs acquisitions simultanément, certaines variations ne sont pas captées par tous les piquets et ce décalage de quelques minutes influence l'analyse comparative. Dans les versions deux et trois du piquet, une date et une heure de démarrage des mesures ont été définies afin de synchroniser parfaitement les prises de mesure.

Afin de valider la précision de l'horloge interne de nos piquets, nous avons comparé l'irradiance solaire, dans le canal visible, mesurée par l'un de nos piquets connectés à celle enregistrée simultanément par la station Pameseb de Louvain-la-Neuve. La récurrence et la régularité des variations d'irradiance au cours de la journée en font un indicateur fiable pour détecter d'éventuelles dérives temporelles.

Suite à cette analyse, nous avons constaté une dérive temporelle dans les mesures. Comme le montre la figure 4.2, les deux courbes étaient parfaitement synchronisées au début de l'expérience. Cependant, après 10 jours de fonctionnement, un décalage est apparu, qui indique que l'horloge de l'ESP32 présentait une dérive d'environ 12 minutes par jour. La précision de l'horloge du contrôleur ESP32 n'étant pas suffisante pour notre application, un module « *Real Time Clock* » a donc été intégré dans les versions 2 et 3 de nos piquets.

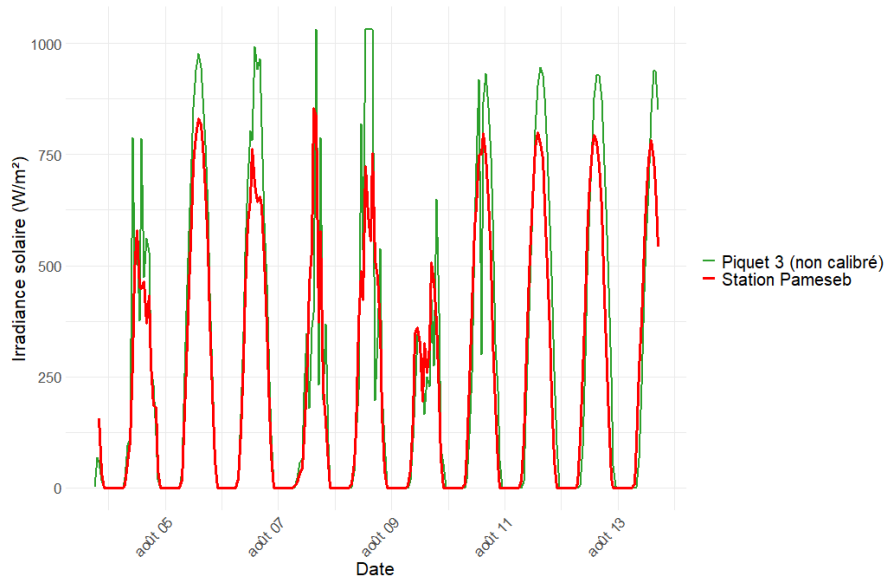


FIGURE 4.2 – L’horloge interne de l’ESP32 dérive progressivement de l’heure réelle

4.2 Analyse de la cohérence inter-piquets

Avant de comparer les données fournies par nos piquets à celles issues du satellite Sentinel-2, nous avons évalué la variabilité des capteurs embarqués afin de s’assurer de leur cohérence et de leur fiabilité pour une telle comparaison. Pour ce faire, nous avons utilisé les données issues des expériences 2 et 3 dans lesquelles les piquets intègrent des améliorations permettant de corriger les problèmes de cohérence temporelle précédemment identifiés.

4.2.1 Irradiance solaire

Nous pouvons donc, pour la mesure de l’irradiance solaire, étudier la variabilité entre nos piquets. Comme le montrent les figures 4.3 et 4.4, nous obtenons des R^2 compris entre 0,90 et 0,99.

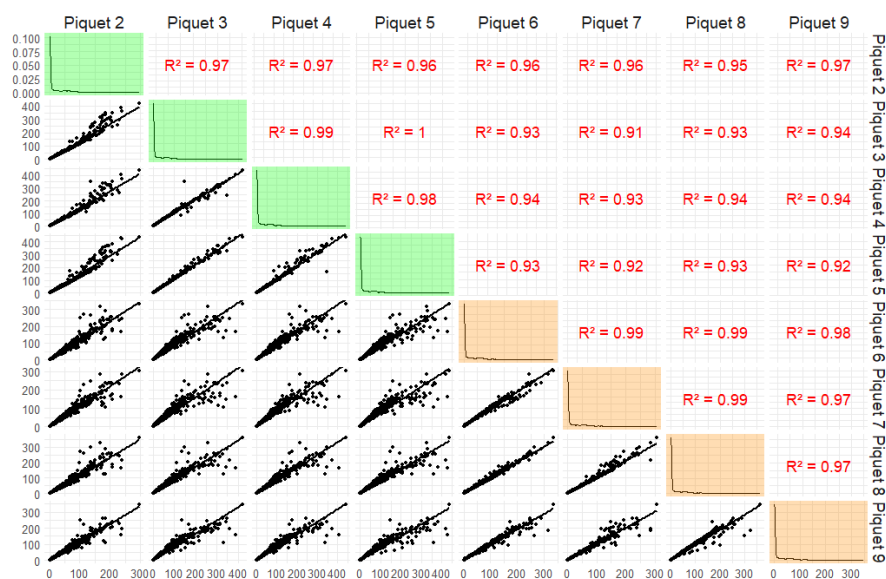


FIGURE 4.3 – L'irradiance solaire est corrélée entre les différents capteurs - Expérience 2 (n=1862) - Bloc 1 en vert, Bloc 2 en orange

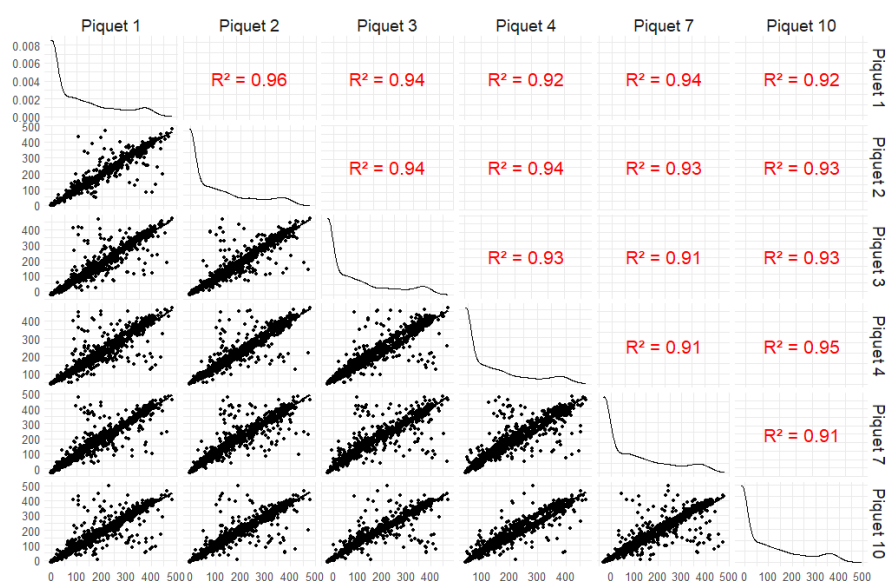


FIGURE 4.4 – L'irradiance solaire est corrélée entre les différents capteurs - Expérience 3 (n=1954)

Dans le but d'interpréter ces valeurs de R^2 , nous avons comparé la variabilité de 10 capteurs d'irradiance solaire commerciaux de la marque LI-COR présents sur la plateforme GrowScreen-Rhizo 3. Lors de cette analyse, nous avons trouvé des R^2 entre 0,94 et 0,99.

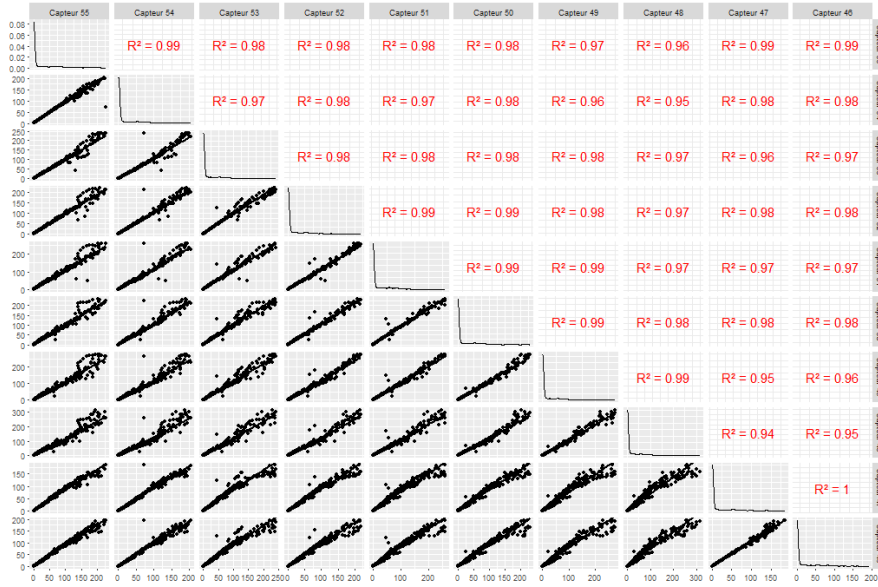


FIGURE 4.5 – Analyse de corrélation entre capteurs d’irradiance solaire de la plateforme GrowScreen-Rhizo 3 (n=1152)

Pour analyser les figures 4.3, 4.4 et 4.5 et en tirer des conclusions, il est important de rappeler certains éléments. Tout d’abord, les mesures de l’expérience 2 et de la plateforme GrowScreen-Rhizo 3 ont été réalisées en hiver, sous une couverture nuageuse. On peut émettre l’hypothèse que le R^2 plus faible observé dans l’expérience 3 (menée entre mars et avril 2025) par rapport à l’expérience 2 (réalisée en décembre 2024) soit lié aux conditions météorologiques. En effet, par temps nuageux, l’intensité lumineuse est significativement réduite et seule la lumière diffuse parvient au capteur. Cette situation pourrait non seulement dégrader la corrélation entre les capteurs, mais également entraîner une saturation de leur réponse dans certaines conditions.

Par ailleurs, on se rappellera que les piquets étaient répartis en deux groupes distants de 500 m. Les valeurs les plus faibles de R^2 observées lors de l’expérience 2 correspondent à des paires de piquets situés dans des blocs différents. Pour les piquets d’un même bloc, le R^2 est toujours supérieur à 0,96. Cela suggère qu’une distance géographique de quelques centaines de mètres peut avoir un impact significatif sur la corrélation entre les capteurs d’irradiance solaire. Ce facteur pourrait également expliquer en partie les corrélations observées lors de l’expérience 3, où les piquets étaient parfois espacés de plus de 200 mètres.

Ainsi, grâce à ces différents résultats, nous pouvons conclure que la variabilité de nos capteurs d’irradiance solaire low-cost est tout à fait acceptable en comparaison de la variabilité des capteurs commerciaux. De plus, nous avons soulevé l’hypothèse que la lumière directe, non atténuée par les nuages, ainsi que la distance géographique pourraient influencer de manière non négligeable la corrélation entre capteurs.

4.2.2 Température et humidité de l'air

Pour l'analyse des données de température et d'humidité de l'air, nous nous sommes limités à l'expérience 2, dans laquelle les piquets du bloc 1 étaient situés à proximité de la station Pameseb, utilisée comme référence. Comme le montrent les figures 4.6 et 4.7, les coefficients de détermination (R^2) varient entre 0,97 et 0,99. En comparant ensuite les valeurs des piquets à celles de la station Pameseb de Louvain-la-Neuve, les R^2 obtenus se situent entre 0,97 et 0,98 pour la température et entre 0,87 et 0,90 pour l'humidité. A nouveau, les valeurs de R^2 les plus faibles proviennent des piquets du bloc 2, situés à environ 500 mètres de la station Pameseb, tandis que ceux du bloc 1, placés à moins de 15 mètres, présentaient une corrélation nettement plus élevée.

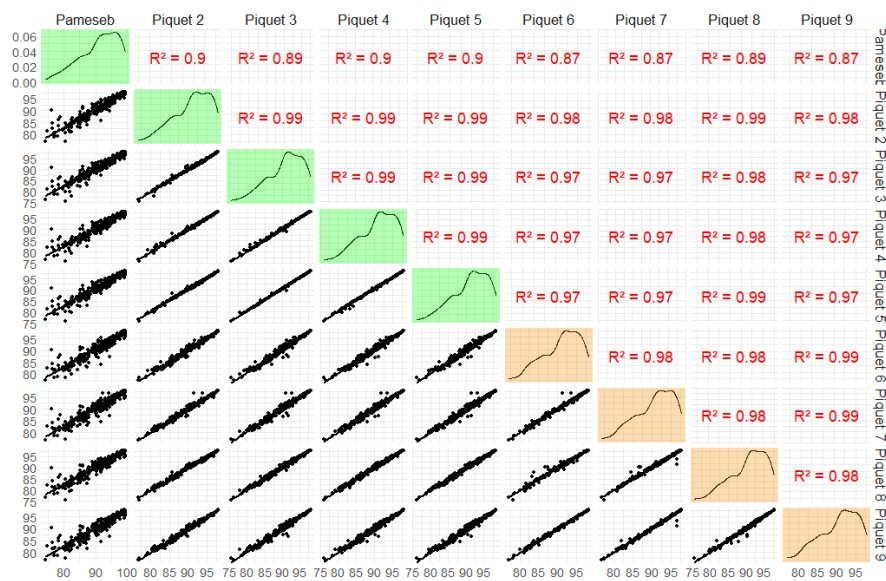


FIGURE 4.6 – Les capteurs d'humidité de l'air sont corrélés entre eux - Expérience 2 (n=311)
- Bloc 1 en vert, Bloc 2 en orange

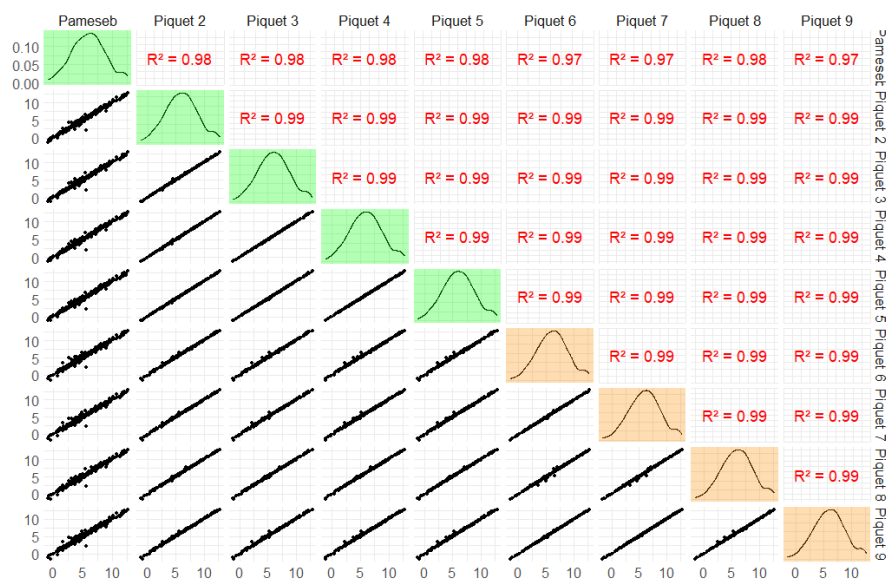


FIGURE 4.7 – Les capteurs de température de l'air sont corrélés entre eux - Expérience 2 (n=311) - Bloc 1 en vert, Bloc 2 en orange

Nous pouvons donc conclure que nos capteurs présentent une très bonne corrélation entre eux.

Afin de déterminer si une calibration des piquets est nécessaire, nous avons analysé la moyenne de la valeur absolue des différences entre chaque capteur et la station Pameseb. Comme le montre le tableau 6, la moyenne des différences absolues, que ce soit pour la température ou l'humidité, reste globalement inférieure à la précision annoncée par le fabricant ($\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ pour la température et $\pm 1,5\%$ RH pour l'humidité). À noter que les piquets 6, 7, 8 et 9 n'étaient pas situés à proximité immédiate de la station de référence, mais à environ 500 mètres. Nous pouvons donc conclure qu'aucune calibration n'est nécessaire.

TABLE 6 – Écart moyen entre les capteurs et la station Pameseb pour la température et l'humidité

	Piquet 2	Piquet 3	Piquet 4	Piquet 5	Piquet 6	Piquet 7	Piquet 8	Piquet 9
Humidité (%)	1,53	1,53	1,56	1,47	1,66	1,71	1,61	1,72
Température ($^{\circ}\text{C}$)	0,24	0,23	0,23	0,23	0,27	0,26	0,24	0,26

4.3 Capacité du module d'alimentation

La charge et le maintien de la charge des batteries alimentant nos piquets ont constitué un véritable défi pour ce projet. En effet, lors de la conception du piquet connecté de l'INRAe, des problèmes d'alimentation dus à des conditions climatiques défavorables ont été rencontrés. Cela les a contraints à redimensionner leur batterie.

Lors de l'expérience 2, nous avons suivi la tension de la batterie installée sur chaque

piquet. Cette expérience était particulièrement propice à cette surveillance car les conditions atmosphériques étaient défavorables à la charge et au maintien de la charge. En effet, selon les données de la station Pameseb de Louvain-la-Neuve, la température moyenne de l'air lors de l'expérience était de 5°C avec des minimas à -1°C. De plus, l'irradiance solaire moyenne était de 18,04 W/m². Lors de la première expérience, cette irradiance moyenne était de 235,3 W/m². La figure 4.8 illustre les conditions atmosphériques rencontrées.



FIGURE 4.8 – Conditions atmosphériques rencontrées lors de l'expérience 2

Comme nous pouvons le voir sur la figure 4.9, lors de cette expérience, malgré les conditions difficiles, la variation de tension des batteries a été limitée à 0.14 V lors de leurs 13 jours sur le terrain.

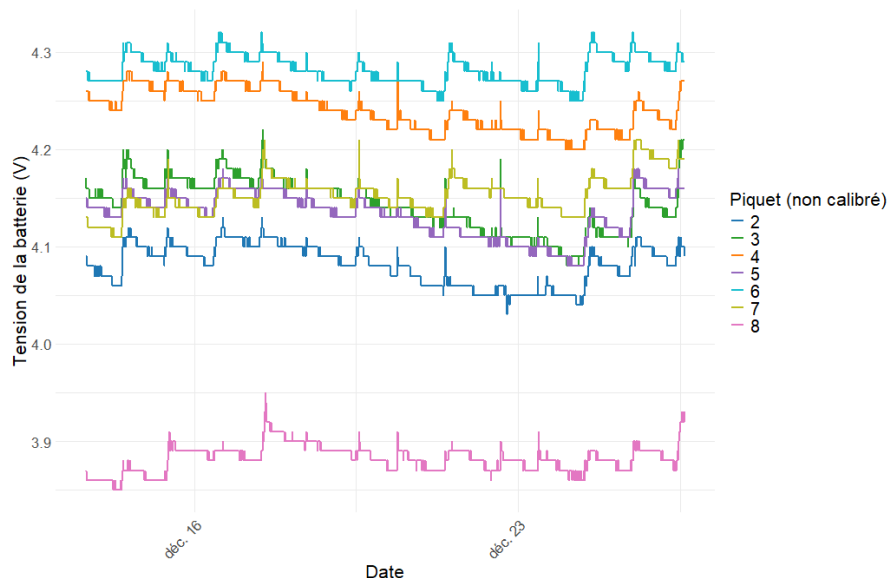


FIGURE 4.9 – La tensions des batteries reste stable malgré les conditions difficiles

Nous observons également sur la figure 4.10 que malgré un ciel complètement nuageux le 16 décembre 2024, les panneaux solaires ont réussi à recharger partiellement nos batteries. Selon le piquet, la tension de celles-ci a augmenté de 0,02 V à 0,05 V au cours de la journée.

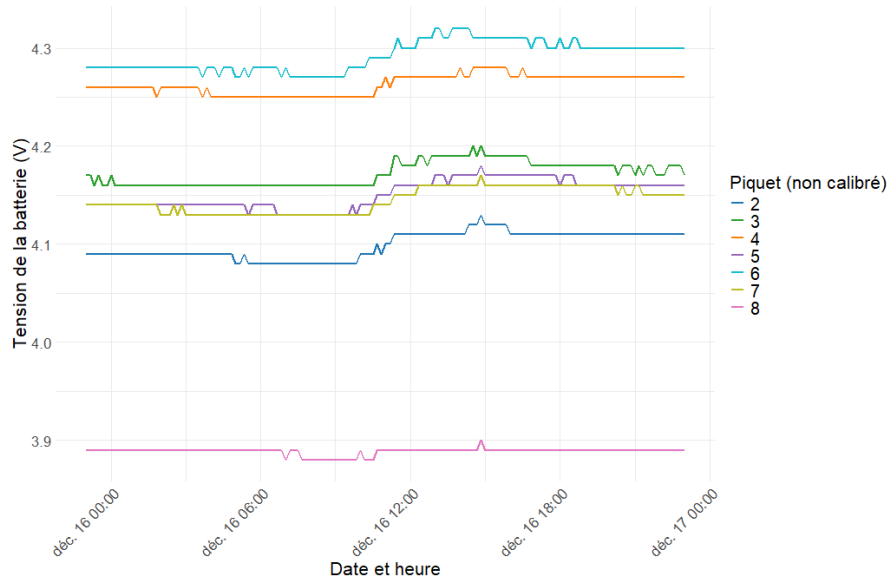


FIGURE 4.10 – Rechargement partiel des batteries malgré un ciel nuageux

Lors de l'expérience 2, notre pont de résistance avait été calibré pour un seul piquet et cette calibration avait été appliquée à l'ensemble des piquets. Par la suite, nous avons calibré le pont de résistance de chacun des piquets séparément. Nous pouvons donc conclure que le dimensionnement de nos batteries était suffisant pour assurer le fonctionnement du piquet dans sa configuration actuelle. Ce résultat devra donc être revérifié lorsque le piquet disposera d'autres fonctionnalités telles que la communication LoRa et l'ajout de nouveaux capteurs (LIDAR, caméra RGB).

4.4 Calibration du capteur d'irradiance solaire

Lorsque nous avons comparé l'irradiance solaire fournie par la station Pameseb et celle mesurée par l'ensemble de nos piquets lors de l'expérience 2, nous avons observé sur la figure 4.11 que, bien que les mesures soient globalement cohérentes entre les différents piquets et avec la station Pameseb, des écarts absolus subsistent entre eux. Une calibration précise de chaque piquet est donc nécessaire.

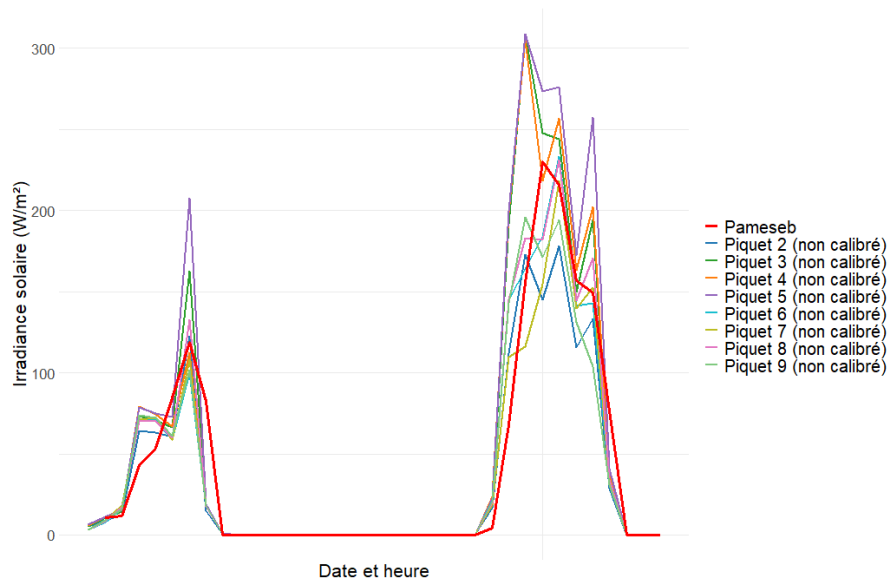


FIGURE 4.11 – Les capteurs d’irradiance solaire nécessitent une calibration individuelle

En utilisant le spectromètre Mavospec comme référence, nous avons pu estimer une relation linéaire propre à chaque canal et chaque spectromètre. Cette équation permet de corriger les mesures. Comme le montre le tableau ci-dessous, le coefficient de détermination (R^2) de ces équations linéaires varie entre 0,9917 et 0,999. Cela confirme la forte corrélation entre nos capteurs low-cost et le spectromètre commercial, validant ainsi la pertinence de la calibration réalisée ainsi que la précision de nos capteurs. Comme on peut le constater, les canaux F8 et NIR ne figurent pas dans le tableau. En effet, il n’a pas été possible de les calibrer en raison des limitations spectrales du spectromètre Mavospec.

La figure 4.12 illustre la corrélation entre le canal F1 du piquet 5 (combinaison présentant le coefficient de détermination le plus faible) et les mesures de référence fournies par le spectromètre Mavospec.

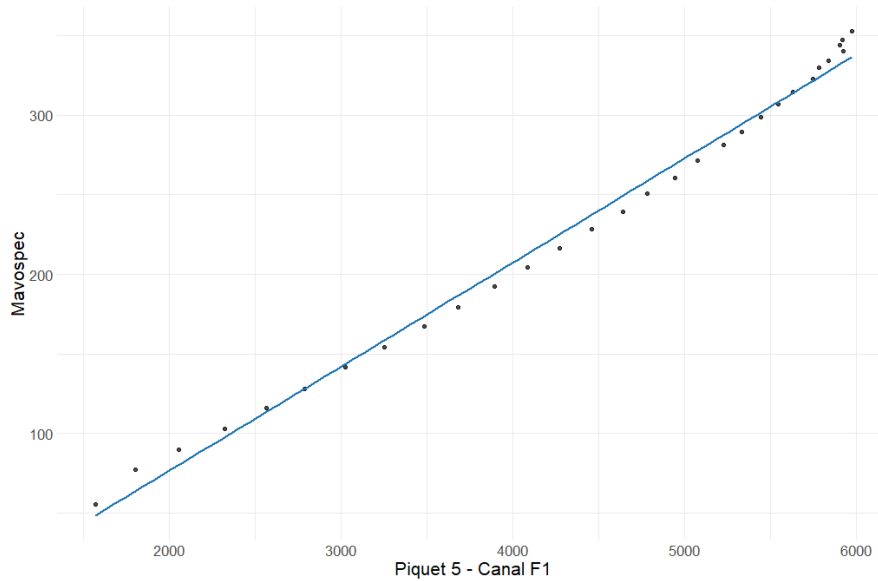


FIGURE 4.12 – Corrélation entre le piquet 5 et le spectromètre Mavospec ($n=30$) - Canal F1 - $R^2= 0.9917$

Nous pouvons constater que la corrélation est très bonne. L'allure cosinusoidale des données suggère que notre correcteur cosinus n'est pas suffisamment performant. Nous remarquons également que lorsque les valeurs d'irradiance sont élevées, l'erreur et la précision de notre capteur se dégradent quelque peu.

4.5 Analyse des mesures de réflectance

4.5.1 Données disponibles

Durant l'expérience 3, nous avons pu recueillir des images satellites Sentinel-2 couvrant 9 jours différents. Plus précisément, nous disposons de trois images issues de Sentinel-2C, sept images de Sentinel-2B, ainsi que deux images de Sentinel-2A, prises les mêmes jours que celles de Sentinel-2B. En raison de cette quantité limitée de données, il n'a pas été possible de réaliser une analyse statistique approfondie, telle qu'une régression linéaire avec calcul du coefficient de détermination (R^2). L'interprétation des résultats repose donc sur une analyse qualitative des tendances observées. Dans cette analyse, nous nous concentrons principalement sur les canaux B4 (correspondant au rouge) et B8 (proche infrarouge) car ceux-ci sont les plus couramment utilisés pour le calcul d'indices de végétation tels que le NDVI. L'ensemble des résultats détaillés est toutefois disponible en annexes.

TABLE 7 – Dates de disponibilité des images Sentinel-2A, 2B et 2C

Date	Sentinel2A	Sentinel2B	Sentinel2C
20-03-2025		V	
25-03-2025			V
27-03-2025	V	V	
09-04-2025		V	
11-04-2025			V
19-04-2025		V	
26-04-2025	V	V	
29-04-2025		V	
01-05-2025			V



FIGURE 4.13 – Image Sentinel-2 en proche infrarouge du 29 avril - Parcelle Terre Claus (contour bleu), issue du site BELCAM

Comme le montre le tableau 3, tous les piquets n'ont pas bénéficié du même nombre de données exploitables, en raison de problèmes techniques ou de dates d'installation différées. Par conséquent, seuls les piquets 1, 2, 3, 4, 7 et 10 seront présentés dans la suite des résultats.

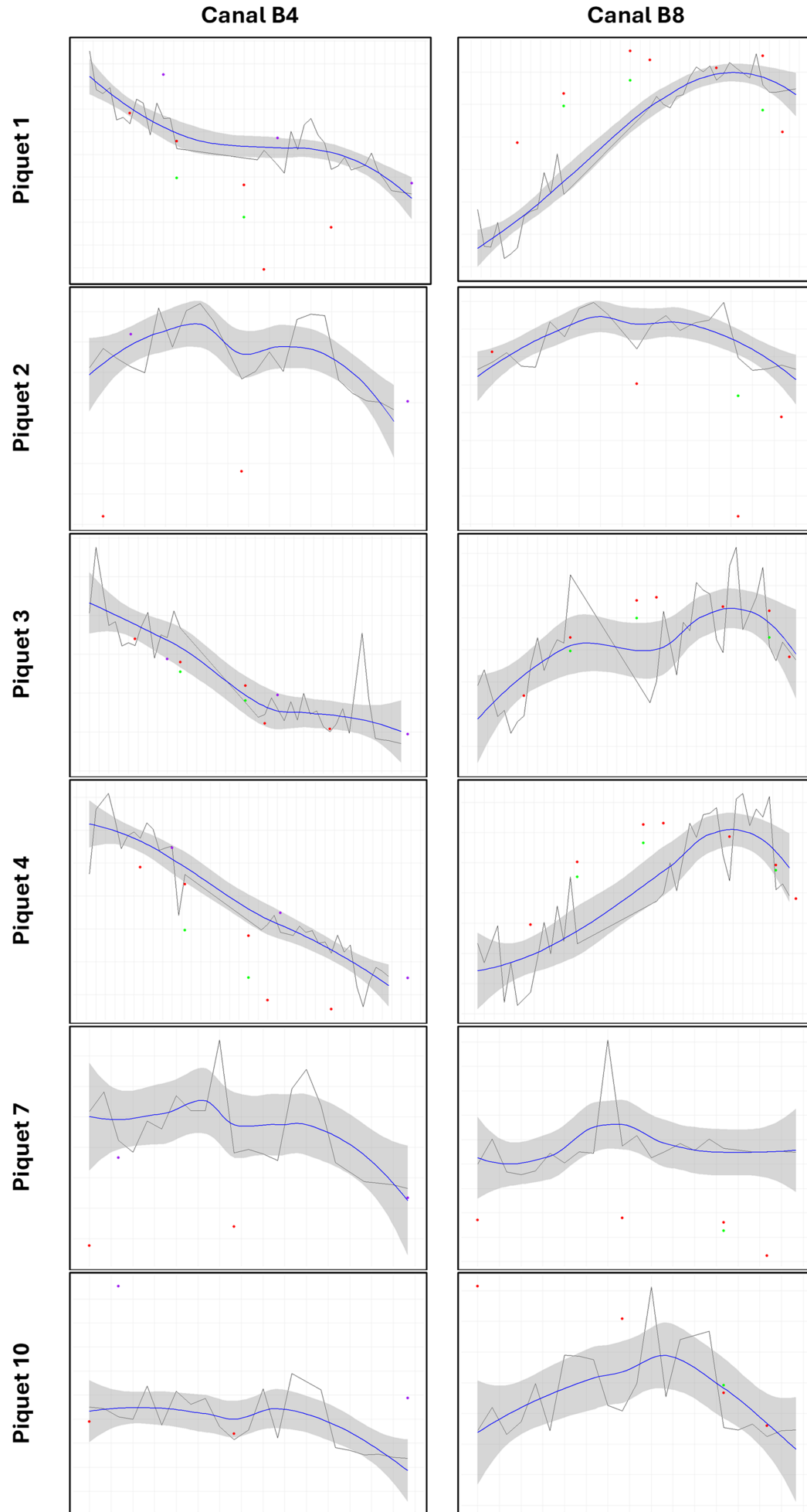


FIGURE 4.14 – Comparaison de l'évolution quotidienne des réflectances mesurées à 11h UTC+0 avec l'AS7343 et celles des satellites Sentinel-2A (vert), Sentinel-2B (rouge) et Sentinel-2C (mauve)

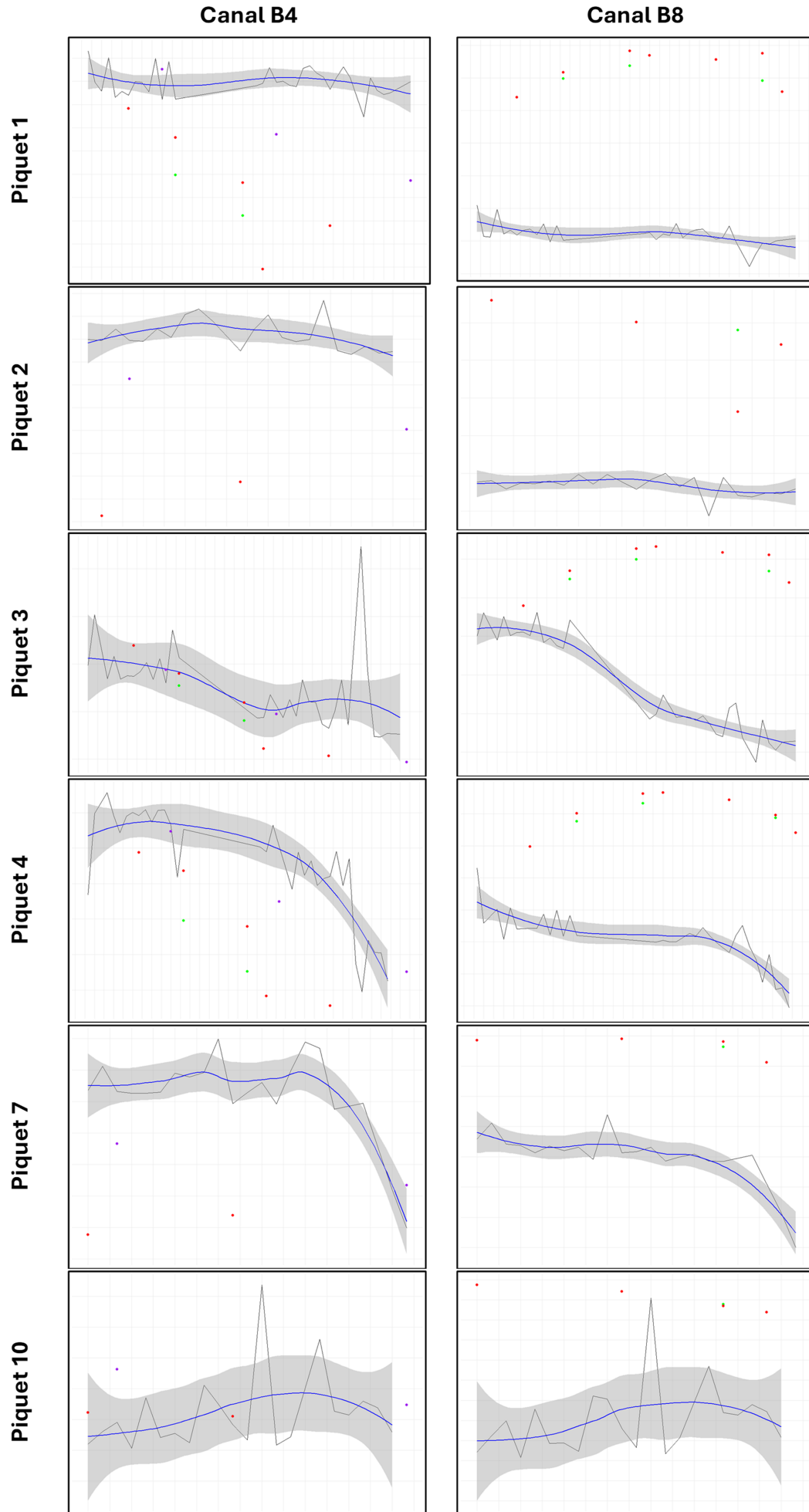


FIGURE 4.15 – Comparaison de l'évolution quotidienne des réflectances mesurées à 11h UTC+0 avec l'AS7265x et celles des satellites Sentinel-2A (vert), Sentinel-2B (rouge) et Sentinel-2C (mauve)

4.5.2 Analyse de la réflectance - Capteur AS7343

Nous pouvons observer sur la figure 4.16 représentant les réflectances du canal B4 du spectromètre AS7343 pour le piquet 3 que malgré de fortes fluctuations d'un jour à l'autre, lorsque nous traçons une courbe lissée des données à l'aide d'une régression locale (« *loess* »), nous obtenons une tendance générale claire.

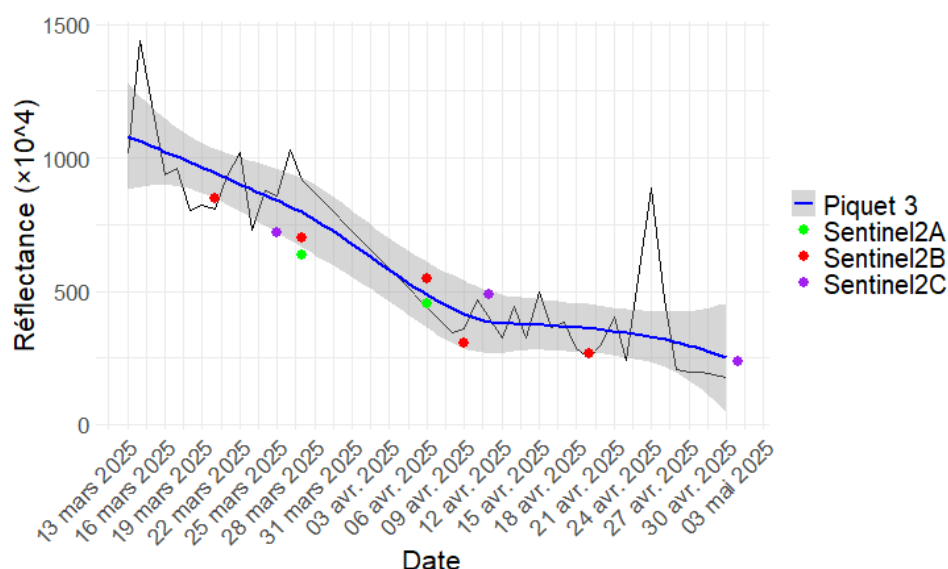


FIGURE 4.16 – Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343)

Les valeurs Sentinel2A, Sentinel2B ainsi que les valeurs de Sentinel2C suivent globalement la tendance de cette courbe lissée et se trouvent majoritairement à l'intérieur de l'intervalle de confiance associé à cette courbe. Cependant, pour le canal B4, seul le piquet 3 se trouve dans ce cas de figure.

Comme le montre la figure 4.17, lorsque l'on compare les réflectances du piquet 4 mesurées avec le canal B4 du spectromètre AS7343 aux données des satellites Sentinel-2B et Sentinel-2C, on observe que, bien que nos mesures soient globalement cohérentes avec celles de Sentinel-2C, des fluctuations peuvent également apparaître dans les données des deux satellites, comme on peut le voir avec la mesure du satellite Sentinel-2B le 9 avril. On peut retrouver cette situation également pour le canal B4 du piquet 1, 2 et 7.

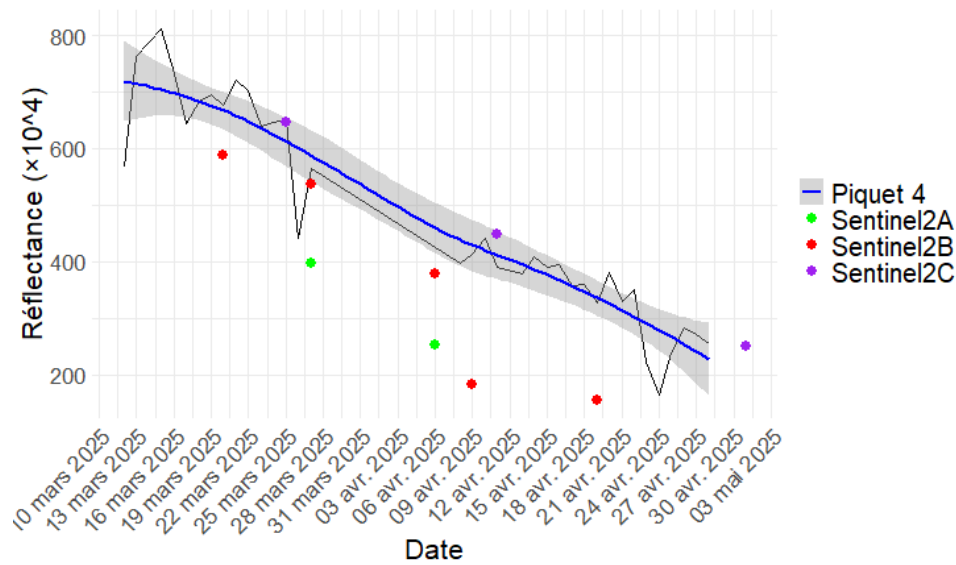


FIGURE 4.17 – Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343)

Bien que certains piquets soient bien corrélés avec les données provenant de Sentinel pour le canal B4 du spectromètre AS7343, ce n'est pas le cas de tous. En effet, comme nous pouvons le voir sur la figure 4.18, le canal B4 du piquet 1 présente des écarts significatifs par rapport aux mesures des satellites, ce qui montre que la corrélation n'est pas systématique pour l'ensemble des piquets. Cependant, les mesures restent cohérentes dans leur tendance générale pour le canal B4 de l'ensemble des piquets : lorsque la réflectance mesurée par notre piquet diminue, les données de Sentinel-2 ne montrent pas une augmentation inverse, et vice versa.

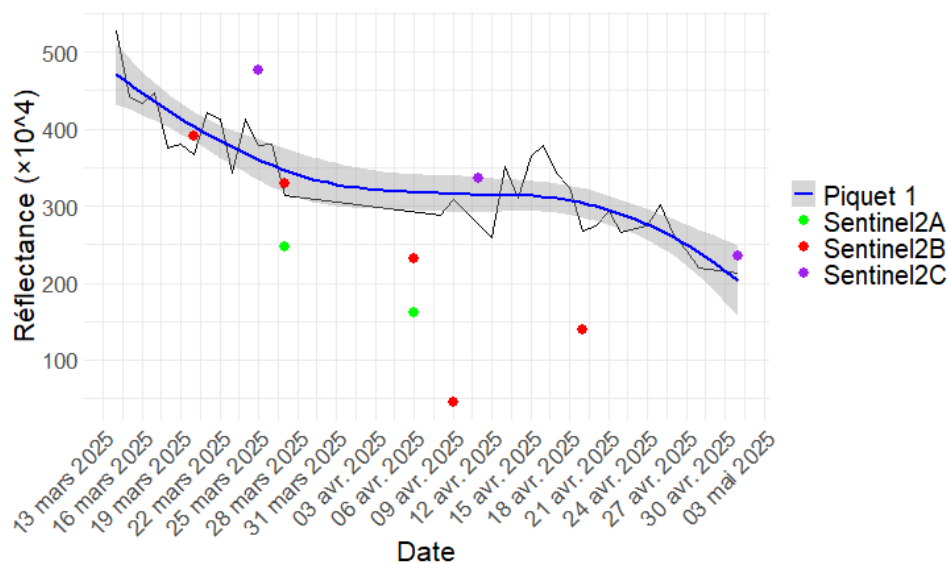


FIGURE 4.18 – Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343)

Les figures 4.19 et 4.20 représentent les valeurs de réflectance pour le canal B8 du

spectromètre AS7343, sur les piquets 3 et 4. Comme nous pouvons le voir, la cohérence des mesures est réduite par rapport au canal B4. Cela pourrait venir d'une part que la calibration effectuée à l'aide d'une seule surface de référence, dans notre cas un terrain de hockey, n'est pas assez efficace. De plus, on observe une variabilité plus importante des mesures d'un jour à l'autre par rapport au canal B4. Toutefois, malgré une calibration imparfaite et une variabilité élevée, les mesures restent globalement cohérentes avec celles de Sentinel pour l'ensemble des piquets, excepté pour le piquet 2, comme le montre la figure 4.21.

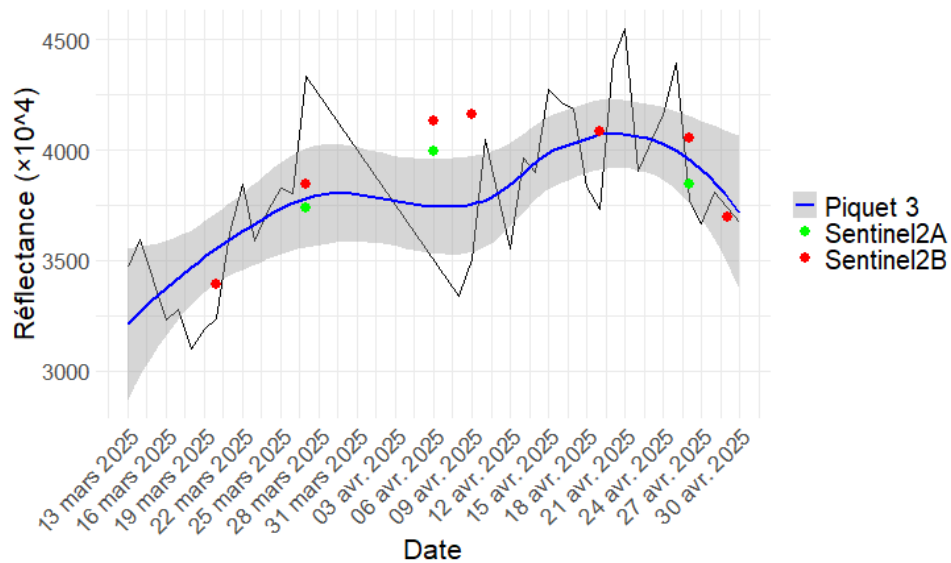


FIGURE 4.19 – Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7343)

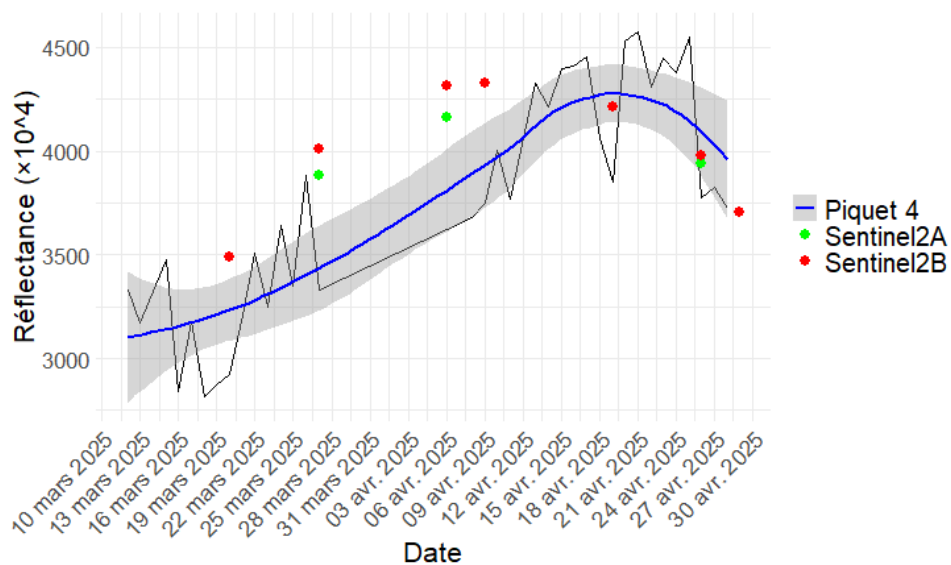


FIGURE 4.20 – Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7343)

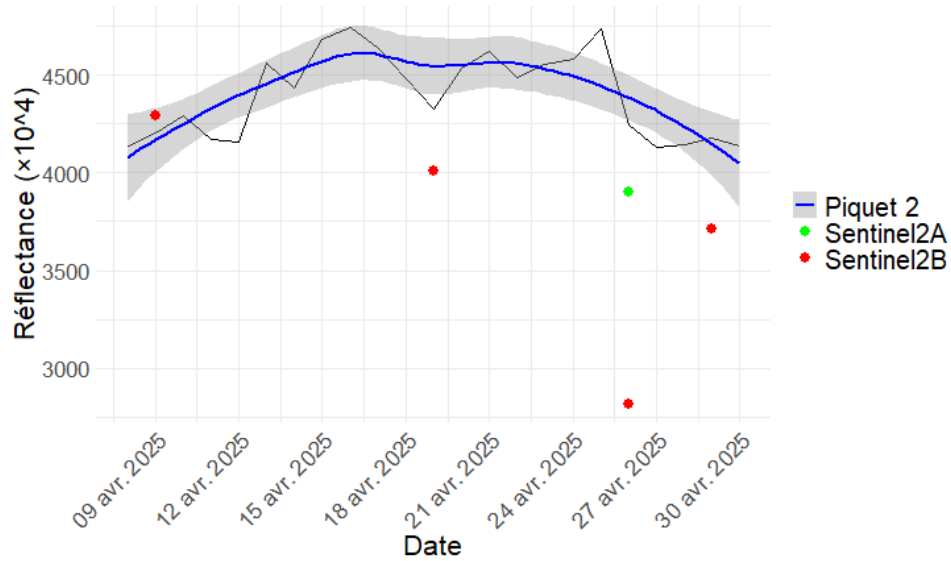


FIGURE 4.21 – Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7343)

4.5.3 Analyse de la réflectance - Capteur AS7265x

Les figures 4.22 et 4.23 présentent les valeurs de réflectance , pour le canal B4 du spectromètre AS7265, sur les piquets 3 et 4. On constate que les mesures du spectromètre AS7265 suivent peu la tendance des données Sentinel, en particulier lorsqu'on les compare aux résultats du spectromètre AS7343 présentés précédemment. Par ailleurs, les variations journalières des valeurs de réflectance sont plus marquées avec le spectromètre AS7265 qu'avec l'AS7343.

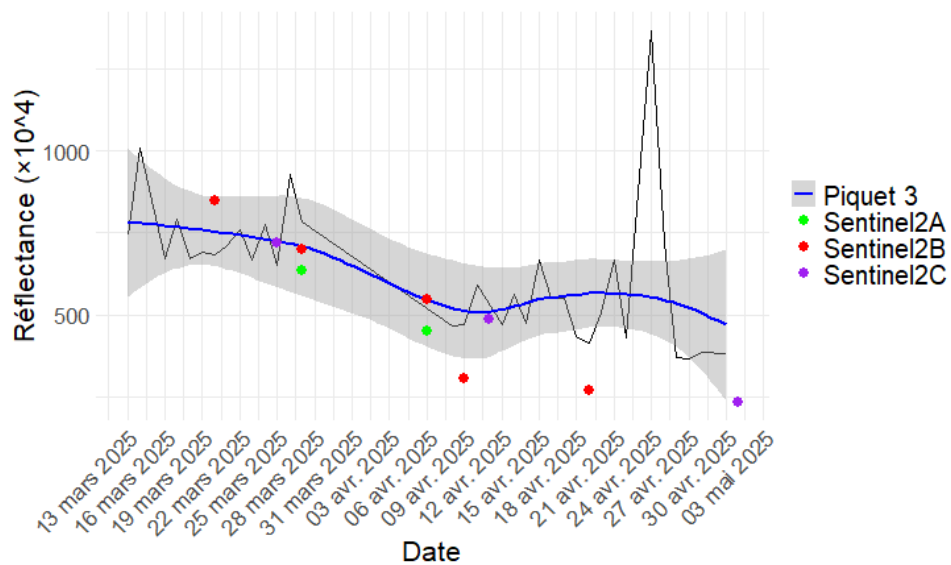


FIGURE 4.22 – Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)

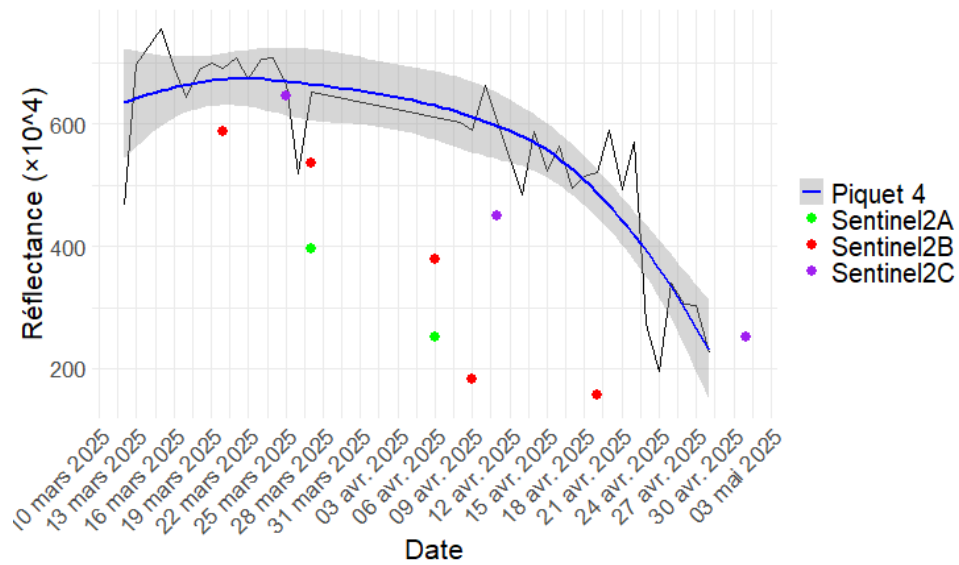


FIGURE 4.23 – Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)

Sur la figure 4.24, nous visualisons les valeurs de réflectance pour le canal B8 du spectromètre AS7265, au niveau du piquet 3. Bien que la variabilité journalière ne semble pas clairement plus élevée que celle observée avec le spectromètre AS7343, les mesures obtenues sont en totale contradiction avec les données fournies par Sentinel. En effet, alors que les valeurs du satellite montrent une tendance à la hausse, celles enregistrées par le piquet suivent une trajectoire inverse, ce qui traduit une absence complète de cohérence entre les deux sources de données. Pour le canal B8, cette absence de cohérence peut être observée chez l'ensemble des piquets.

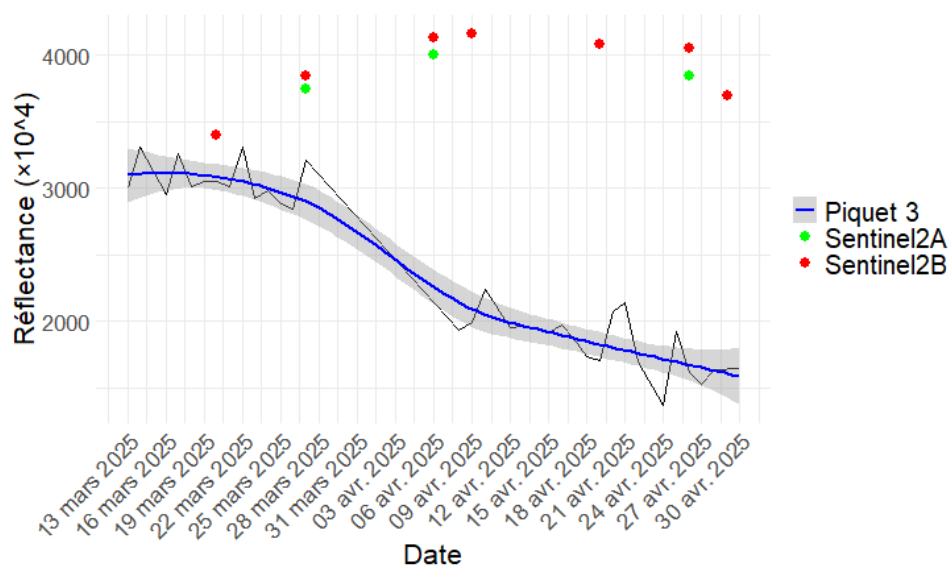


FIGURE 4.24 – Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7265x)

4.5.4 Conclusion

Afin de synthétiser l'analyse des données de réflectance obtenues sur les différents canaux, piquets et spectromètres, un tableau d'appréciation a été créé à la figure 8. Celui-ci permet d'évaluer la corrélation entre les mesures issues des spectromètres et celles fournies par les satellites Sentinel-2. Les niveaux d'appréciations sont exprimés selon une échelle allant de +++ (très bonne corrélation) à — — — (absence de corrélation).

TABLE 8 – Tableau d'appréciation de la corrélation entre les spectromètres et Sentinel-2

Piquet	AS7343		AS7265	
	B4	B8	B4	B8
1	+	+	— —	— — —
2	+	—	—	— — —
3	+++	++	++	— — —
4	++	++	+	— — —
7	—	—	— —	— —
10	+	—	+	— — —

5 Discussion

5.1 Limitations et améliorations matérielles

L'analyse des résultats menée sur la première version des piquets connectés a révélé une limite matérielle et logicielle affectant la qualité des mesures. Un décalage temporel entre les acquisitions des différents piquets, initialement jugé négligeable, s'est avéré suffisamment important pour fausser certaines comparaisons. Ce problème a été résolu dans les versions ultérieures par l'intégration d'un module RTC (*Real-Time Clock*) et une synchronisation précise du démarrage des dispositifs.

Concernant la mesure de l'irradiance solaire, les données collectées ont montré une variabilité globalement acceptable, avec des coefficients de détermination proche de ceux des capteurs commerciaux de type LI-COR. Cela confirme la fiabilité des capteurs low-cost utilisés. Cependant, cette cohérence reste sensible à plusieurs facteurs externes. D'une part, les conditions météorologiques modifient la répartition entre lumière directe et diffuse, ce qui peut affecter les mesures. D'autre part, la distance géographique entre les piquets, généralement considérée comme négligeable lorsqu'elle est inférieure à 10 km ([Draye, 2025](#)), semble ici avoir un impact significatif. En effet, selon l'étude de [Lohmann et al. \(2016\)](#), la variabilité spatio-temporelle de l'irradiance peut entraîner des fluctuations rapides que des capteurs éloignés ne parviennent pas à enregistrer de manière fiable. Ces résultats suggèrent qu'un suivi localisé, à l'échelle de chaque parcelle, pourrait être pertinent. Une telle approche, rendue possible grâce à l'utilisation de capteurs low-cost, serait particulièrement utile si la variable « irradiance » joue un rôle clé dans l'essai.

Plusieurs limitations matérielles ont été mises en évidence. D'abord, le correcteur cosinus perd en précision lorsque l'irradiance est élevée. Ensuite, les spectromètres utilisés pour mesurer la lumière réfléchie ne sont pas équipés de diffuseurs, alors qu'ils sont conçus principalement pour capter la lumière diffuse.

Or, si la majorité de la lumière réfléchie par la canopée est effectivement diffuse, certaines surfaces végétales peuvent renvoyer la lumière solaire de manière directionnelle, un phénomène appelé réflexion spéculaire.

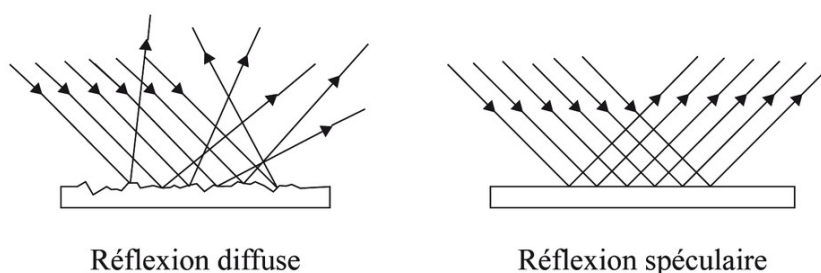


FIGURE 5.1 – Illustration de la réflexion diffuse et spéculaire (Source :[Yelle \(2017\)](#))

Pour limiter cet effet, [Garrity et al. \(2010\)](#), dans le cadre du développement d'un capteur low-cost pour la mesure continue d'indices de végétation, ont équipé leurs spectromètres de diffuseurs afin d'homogénéiser la lumière avant qu'elle n'atteigne le capteur.

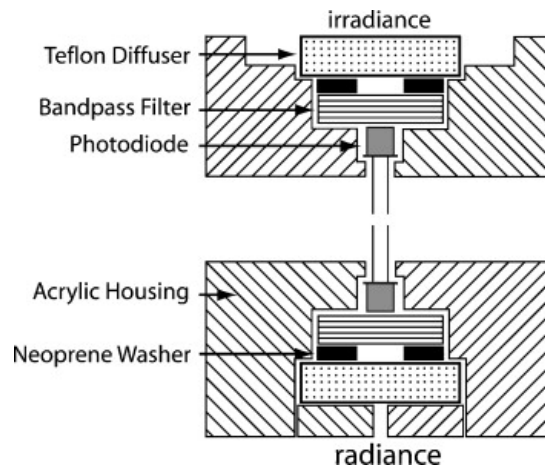


FIGURE 5.2 – Schéma du capteur low-cost de [Garrity et al. \(2010\)](#)

Face à ces différentes limitations, une liste de propositions d'améliorations matérielles est présentée en A.1, afin d'orienter les évolutions des futures versions des piquets.

5.2 Alignement spectral et erreurs associées dans la comparaison capteurs/Sentinel-2

L'analyse des résultats de réflectance a révélé des différences entre les capteurs utilisant un spectromètre AS7343 ou AS7265x. Les mesures obtenues à l'aide de l'AS7343 présentent une meilleure corrélation avec les données du satellite Sentinel-2, en comparaison avec celles fournies par l'AS7265x. Cette différence peut s'expliquer par plusieurs facteurs d'ordre technique et méthodologique.

Le calcul de la réflectance repose sur les mesures fournies par le spectromètre AS7343, qui est utilisé à la fois pour mesurer l'irradiance solaire et la lumière réfléchie. Cela garantit une homogénéité spectrale dans les canaux utilisés pour le calcul de la réflectance. Cependant, le calcul de la réflectance utilisant le spectromètre AS7265x utilise également un spectromètre AS7343 pour mesurer l'irradiance, cela crée un décalage entre les longueurs d'onde mesurées et donc une source potentielle d'erreur.

Par ailleurs, les bandes spectrales de l'AS7265x sont plus étroites et moins bien alignées avec les bandes Sentinel-2. En revanche, celles du AS7343, bien qu'également décalées, couvrent une plage spectrale plus large, ce qui pourrait expliquer sa meilleure performance globale. Malgré cela, la corrélation avec Sentinel-2 reste améliorable.

Enfin, aucun facteur d'ajustement spectral (SBAF) n'a été appliqué pour harmoniser les bandes spectrales de nos capteurs avec celles de Sentinel-2, ce qui limite la comparabilité

directe des données.

Plusieurs approximations ont été identifiées :

- L'angle de vue de nos capteurs de réflectance n'a pas été défini avec précision, alors qu'il détermine la surface mesurée par le capteur. Cet angle dépend directement de la hauteur des cultures, qui varie au fil du temps. Comme l'illustre la figure 5.3, la hauteur du couvert végétal a varié de manière significative au cours de l'expérimentation, constituant ainsi un biais qui évolue dans le temps.



FIGURE 5.3 – La hauteur de la canopée varie tout au long de l'expérience

- La calibration des réflectances a été réalisée en utilisant le terrain de hockey de Louvain-la-Neuve comme unique surface de référence. Cependant, comme l'a démontré [Lozano et al. \(2025\)](#) dans sa présentation sur une méthode de calibration radiométrique pour drone, cette approche repose sur l'hypothèse que l'ordonnée à l'origine de l'équation de calibration est nulle. Or, cette approximation introduit une erreur qui peut s'avérer non négligeable, comme l'illustre la figure 5.4.

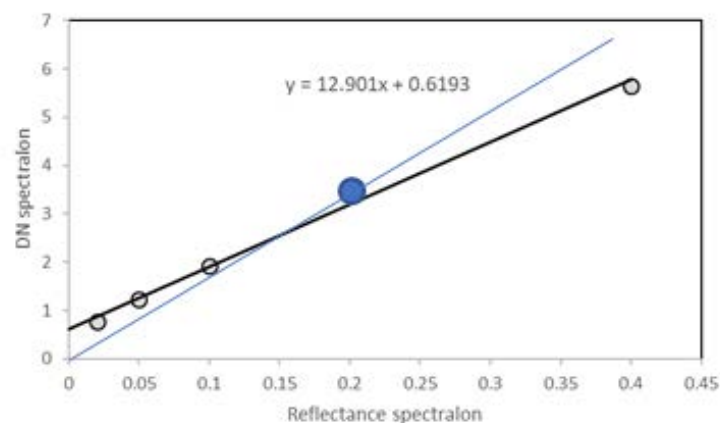


FIGURE 5.4 – L'hypothèse d'un intercept nul amène une erreur non négligeable (Source : [Lozano et al. \(2025\)](#))

5.3 Comparaison avec d'autres études similaires

Deux autres études ont exploité de manière différente des piquets équipés de spectromètres.

Tout d'abord, le piquet développé par Bosch et l'INRAE dans le cadre du projet Hiphen, présenté dans l'étude de [Li et al. \(2024\)](#), ne visait pas à obtenir des réflectances calibrées mais à prédire des variables biophysiques. Ils ont utilisé les données brutes provenant des canaux de leur spectromètre AMS pour entraîner un réseau de neurones artificiels, avec des mesures de référence collectées in situ. Ce modèle a permis d'estimer des indicateurs agronomiques tels que le *Green Area Index* (GAI), le *Leaf Chlorophyll Content* (LCC) et le *Canopy Chlorophyll Content* (CCC), avec des coefficients de détermination élevés ($R^2 = 0,86$ pour le GAI, $0,93$ pour le CCC, et $0,52$ pour le LCC).

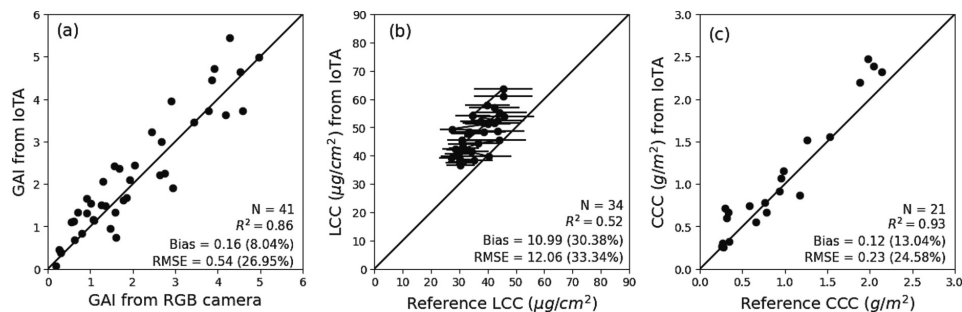


FIGURE 5.5 – Performance du modèle pour l'estimation du GAI, LCC et CCC (Source : [Li et al. \(2024\)](#))

Dans l'étude de [Pathiranage et al. \(2023\)](#), la calibration des données de réflectance obtenues à partir du piquet Arable Mark 2 a été effectuée à l'aide d'un spectroradiomètre de référence (ASD). Après cette calibration, un facteur d'ajustement spectral (SBAF) a été calculé à partir d'une base de données hyperspectrales couvrant 20 ans. Ce facteur a ensuite été appliqué afin d'harmoniser les mesures du piquet avec celles des capteurs du satellite Landsat-8. Cette méthode a permis d'obtenir une bonne correspondance entre la réflectance mesurée par le piquet Arable et celle fournie par Landsat-8, comme l'illustre la figure 5.6. Il est toutefois important de noter que, comme dans notre étude, la surface mesurée par le piquet est inférieure à la taille d'un pixel Landsat-8 (900 m²).

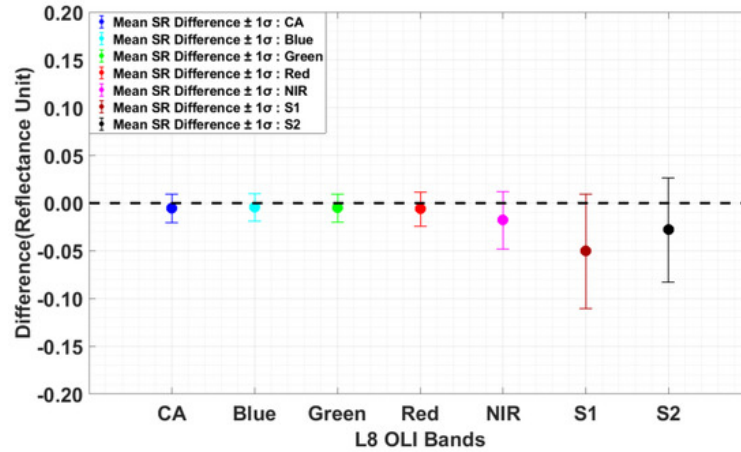


FIGURE 5.6 – Différence moyenne de réflectance entre Landsat-8 et le piquet Arable Mark 2 sur l'ensemble des bandes (Source : [Pathiranage et al. \(2023\)](#))

Ces deux études illustrent bien deux approches possibles dans l'utilisation de notre piquet : d'une part, le calcul précis de la réflectance, et d'autre part, l'utilisation de données brutes combinées à un modèle pour estimer directement des indices végétaux. Dans le cadre du projet Phenet, un groupe de chercheurs s'est confronté au même dilemme lorsqu'ils ont voulu comparer les données fournies par le satellite PlanetScope (pixels de 9 m²) à celles du satellite Sentinel-2 (pixels de 100 m²). La comparaison directe des réflectances ne donnait pas de résultats probants, tandis que la comparaison des indices végétaux issus des réflectances propres à chaque satellite a produit des résultats significatifs ([Weiss, 2025](#)).

Dans le cadre de nos piquets connectés, ces différentes approches constituent un bon point de départ pour concevoir une nouvelle phase d'expérimentation. Cependant, si nous souhaitons à nouveau comparer nos mesures avec celles du satellite Sentinel-2, il sera nécessaire de mener un travail approfondi sur le positionnement des piquets. En effet, la surface d'échantillonnage des piquets est inférieure à 4 m², alors qu'un pixel Sentinel-2 couvre 100 m². Il serait donc nécessaire de positionner précisément les piquets dans les zones du pixel les plus représentatives des valeurs satellitaires, plutôt que de les placer de manière arbitraire au centre de ceux-ci. Afin de concevoir ces futures expérimentations, une liste d'améliorations méthodologiques sera présentée en annexes.

A Annexes

Table des figures

A.0	Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7265x)	. . .	V
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7265x)	. . .	V
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7265x)	. . .	VI
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7265x)	. . .	VI
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7265x)	. . .	VII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7265x)	. . .	VII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7265x)	. . .	VIII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7265x)	. . .	VIII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7265x)	. . .	IX
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7265x)	. . .	IX
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7265x)	. . .	X
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7265x)	. . .	X
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)	. . .	XI
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)	. . .	XI
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)	. . .	XII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)	. . .	XII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)	. . .	XIII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)	. . .	XIII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7265x)	. . .	XIV
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7265x)	. . .	XIV
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7265x)	. . .	XV
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7265x)	. . .	XV
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7265x)	. . .	XVI
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7265x)	. . .	XVI
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7343)	. . .	XVII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7343)	. . .	XVII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7343)	. . .	XVIII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7343)	. . .	XVIII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7343)	. . .	XIX
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7343)	. . .	XIX
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7343)	. . .	XX
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7343)	. . .	XX
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7343)	. . .	XXI
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7343)	. . .	XXI

A.0	Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7343) . .	XXII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7343) .	XXII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343) .	XXIII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343) .	XXIII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343) .	XXIV
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343) .	XXIV
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343) . .	XXV
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343) .	XXV
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B5 (AS7343) .	XXVI
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B5 (AS7343) .	XXVI
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B5 (AS7343) .	XXVII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B5 (AS7343) .	XXVII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B5 (AS7343) .	XXVIII
A.0	Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B5 (AS7343)	XXVIII

A.1 To do list

A.1.1 Hardware

- Tropicaliser la carte PCB du data-logger ou bien étanchéifier le boîtier la contenant afin d'éviter l'humidité et la condensation. Celle-ci est une source d'oxydation pouvant provoquer des dysfonctionnements de la carte électronique.
- Installer des presse-étoupes pour l'ensemble des câbles entrant dans le boîtier du data-logger.
- Souder les fils des capteurs directement sur la carte PCB pour éviter qu'ils se déconnectent lors de l'installation. Ce problème s'est produit à plusieurs reprises et peut entraîner une absence de données prolongée s'il n'est pas identifié rapidement.
- Souder les deux extrémités du module DS3231 pour éviter les faux contacts. Ceux-ci peuvent entraîner la perte de la date et de l'heure et provoquer ainsi l'arrêt des mesures.
- Rallonger le câble du panneau solaire afin de faciliter l'installation.
- Standardiser l'emplacement du *contact reed*.
- Installer un diffuseur devant les spectromètres mesurant la lumière réfléchie et calculer précisément l'angle de prise de vue afin de l'intégrer dans le calcul de la réflectance.
- Développer et installer un Lidar pour mesurer la hauteur de la canopée et intégrer ce paramètre dans le calcul de la réflectance.
- Modifier les deux pièces développées et imprimées en 3D pour le boîtier des spectromètres afin qu'elles soient parfaitement ajustées. Augmenter l'espace entre la vitre et les spectromètres, allonger le bras de support du boîtier et épaissir les parois de protection pour les rendre moins cassantes.
- Installer et configurer un module GSM afin de recevoir à distance des informations sur l'état du piquet. Cela permet d'éviter des déplacements quotidiens sur le terrain et de réagir rapidement en cas de défaut pour minimiser les pertes de données.
- Installer un piquet de diamètre supérieur afin d'éviter l'utilisation de tendeurs.
- Développer un système permettant au piquet de se coucher lors du passage d'un pulvérisateur. Cela permettrait de laisser les piquets sur le terrain plus longtemps, d'éviter les pertes de données sur plusieurs jours et de réduire le temps consacré à la désinstallation et à la réinstallation.

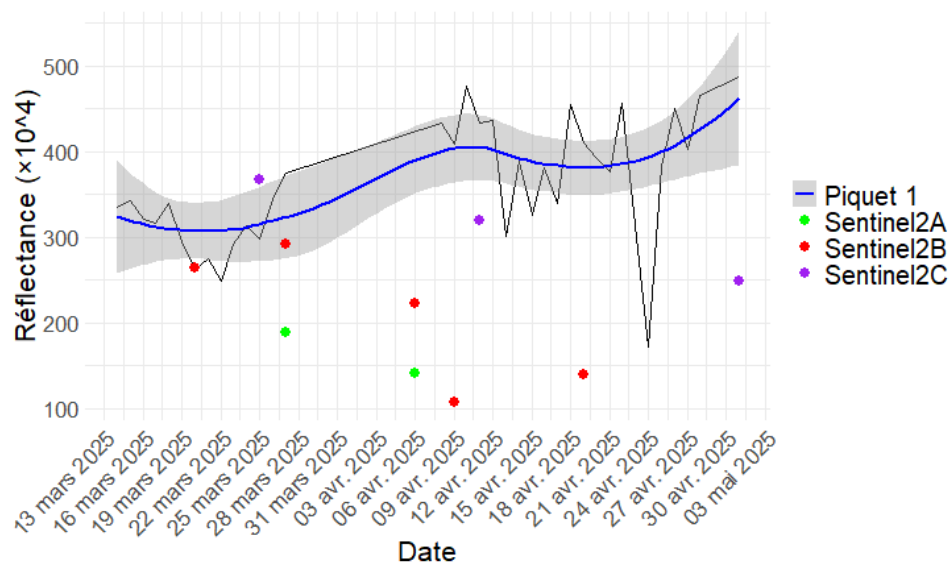
A.1.2 Méthodologie

- Recalibrer le capteur d'irradiance solaire à l'aide d'un spectromètre couvrant le proche infrarouge (NIR).
- Calibrer les mesures de réflectance à l'aide de plusieurs surfaces de référence, en suivant la méthode décrite par [Lozano et al. \(2025\)](#).
- Utiliser un spectroradiomètre (ASD FieldSpec) pour vérifier sur le terrain la précision des mesures de réflectance effectuées par nos piquets.
- Développer et tester l'utilisation du spectromètre AS7265x pour mesurer l'irradiance solaire, puis le combiner avec un spectromètre AS7265x dédié à la lumière réfléchie afin d'évaluer la fiabilité des mesures de réflectance et les comparer avec celles fournies par le spectromètre AS7343.
- Appliquer une correction *Spectral Band Adjustment Factor* (SBAF) aux données issues des spectromètres afin d'aligner leurs différents canaux entre eux et avec ceux du satellite Sentinel-2, comme présenté dans l'étude de [Pathiranage et al. \(2023\)](#).
- Calculer des indices végétaux à partir des données brutes, puis les comparer à des données de référence, comme illustré dans l'étude de [Li et al. \(2024\)](#).
- Rechercher une méthode pour positionner précisément les piquets dans la partie la plus représentative du pixel Sentinel-2, plutôt que de les placer arbitrairement au centre.

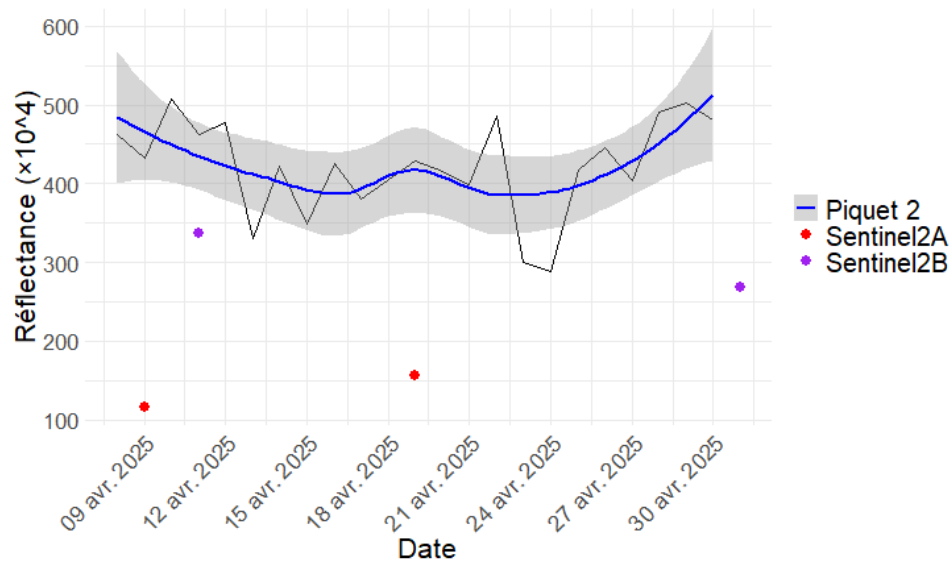
A.2 Analyse de la réflectance

A.2.1 AS7265x

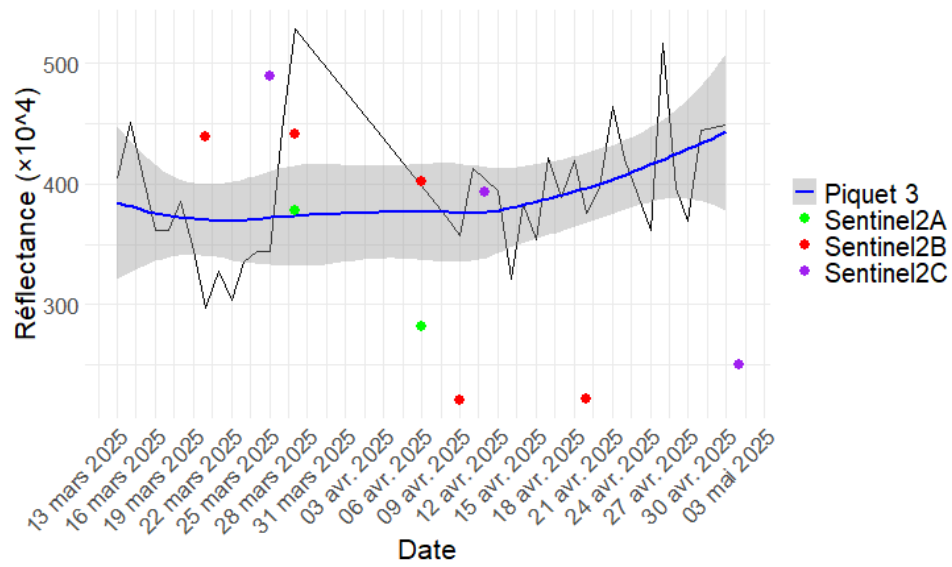
Canal B2



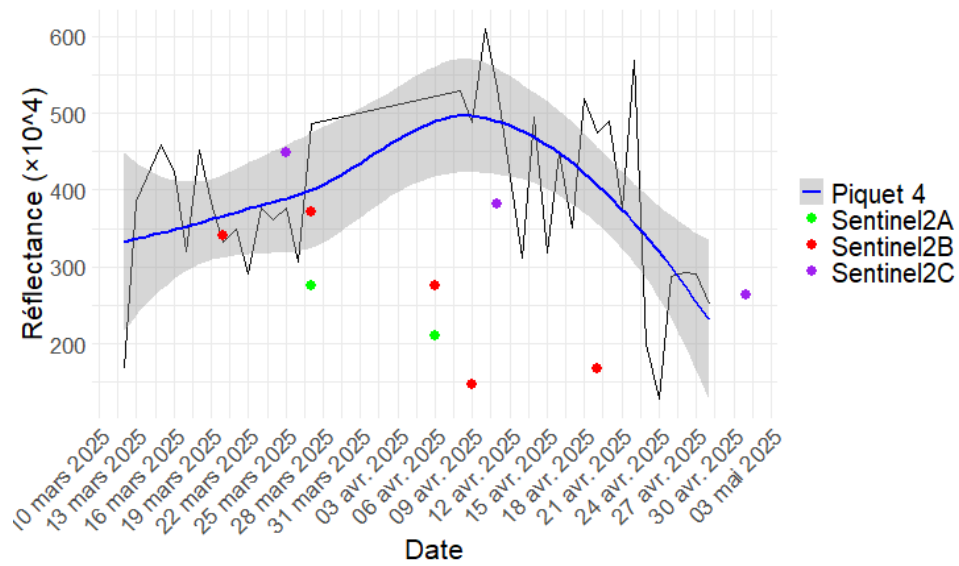
Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7265x)



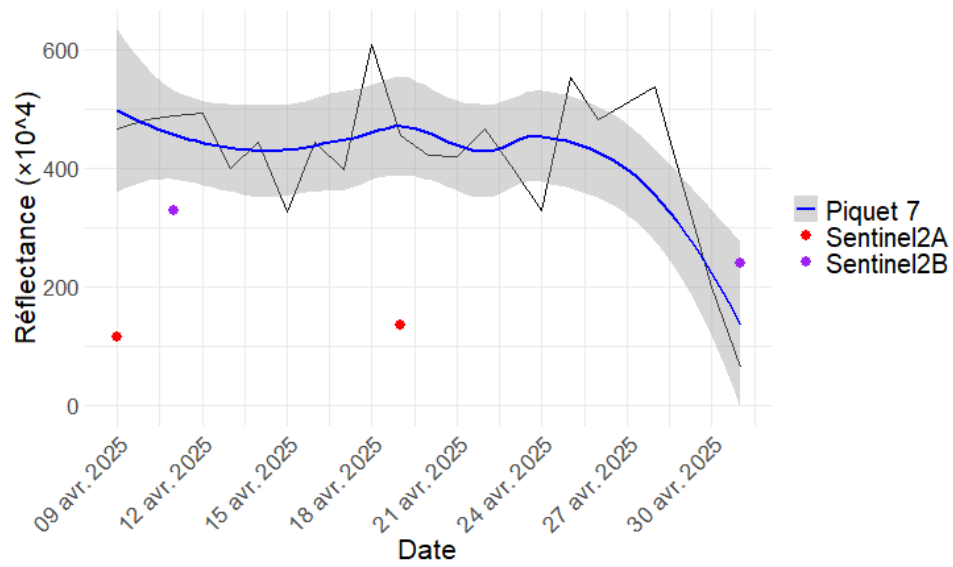
Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7265x)



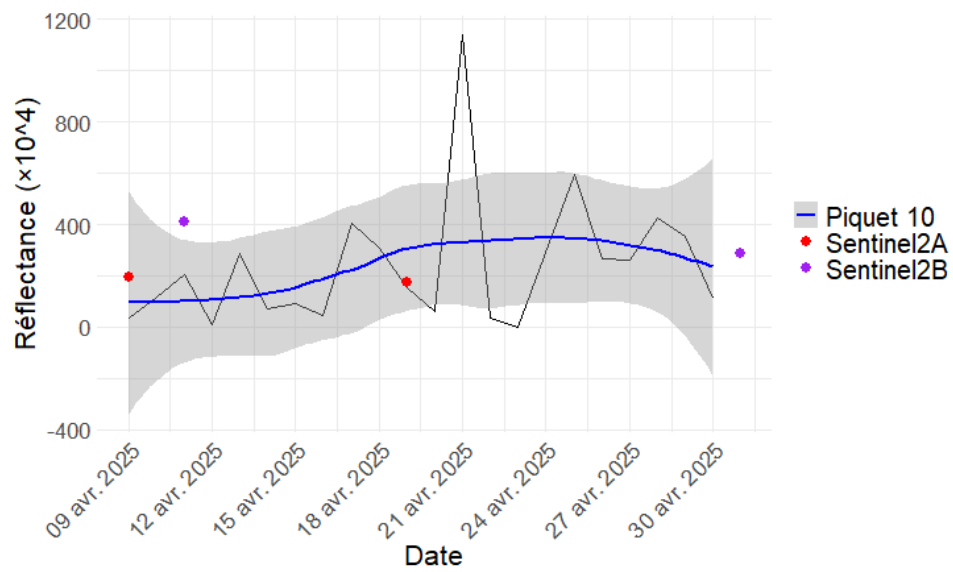
Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7265x)



Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7265x)

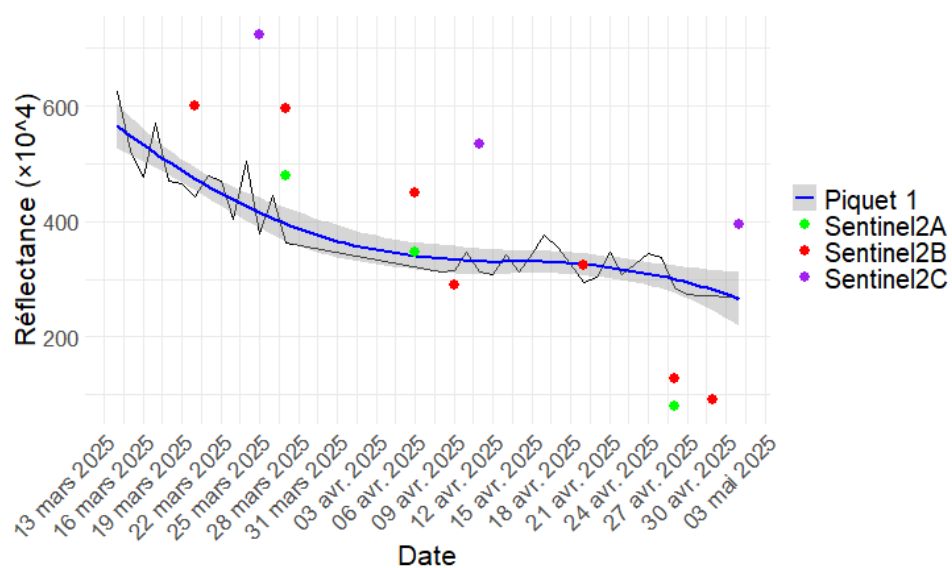


Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7265x)

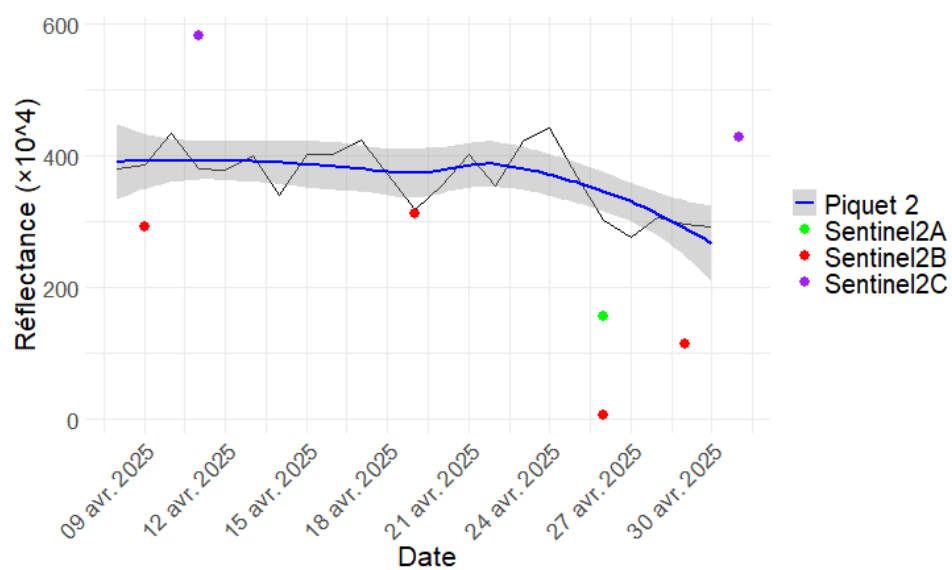


Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7265x)

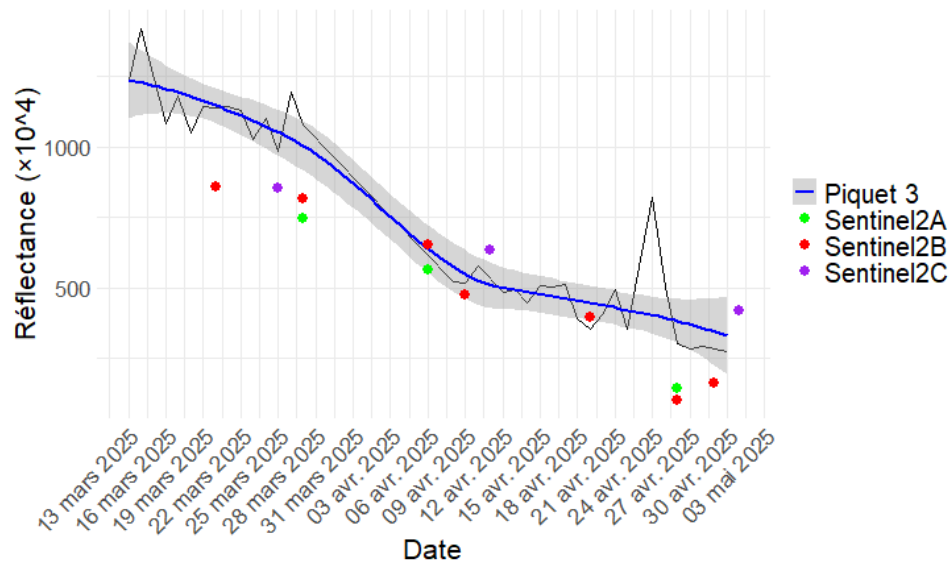
Canal B3



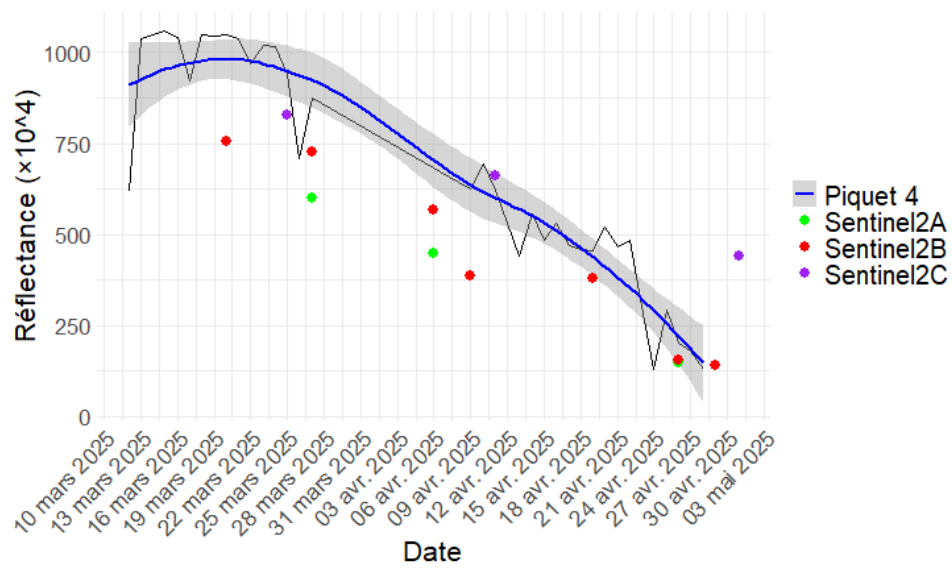
Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7265x)



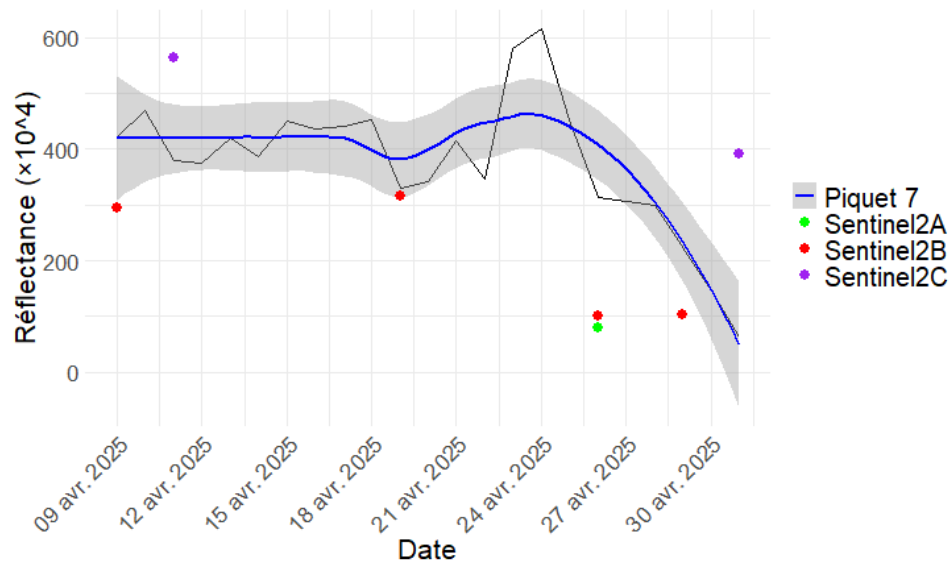
Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7265x)



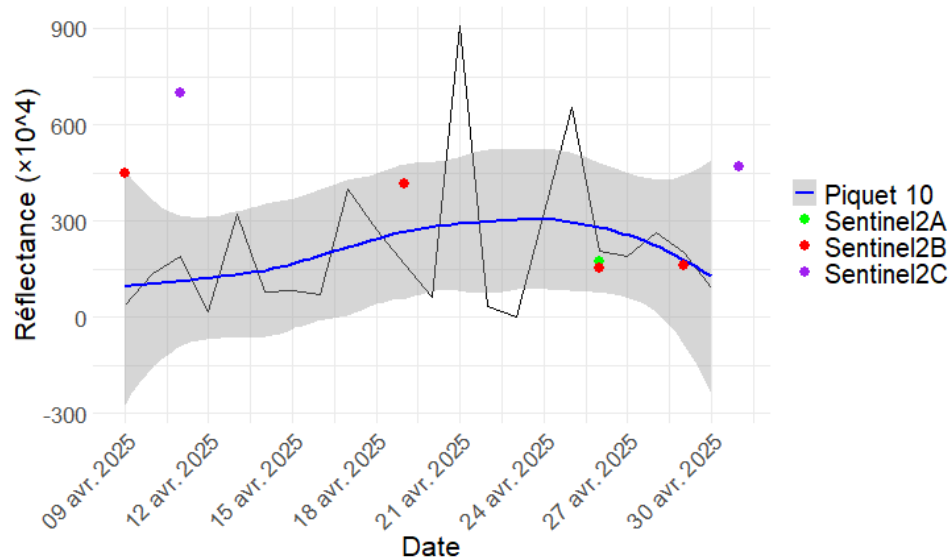
Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7265x)



Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7265x)

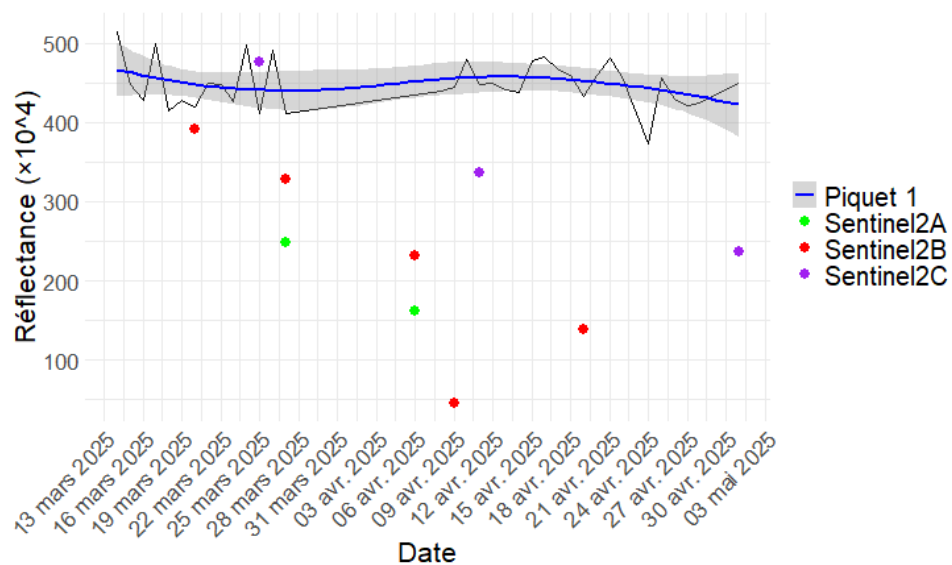


Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7265x)

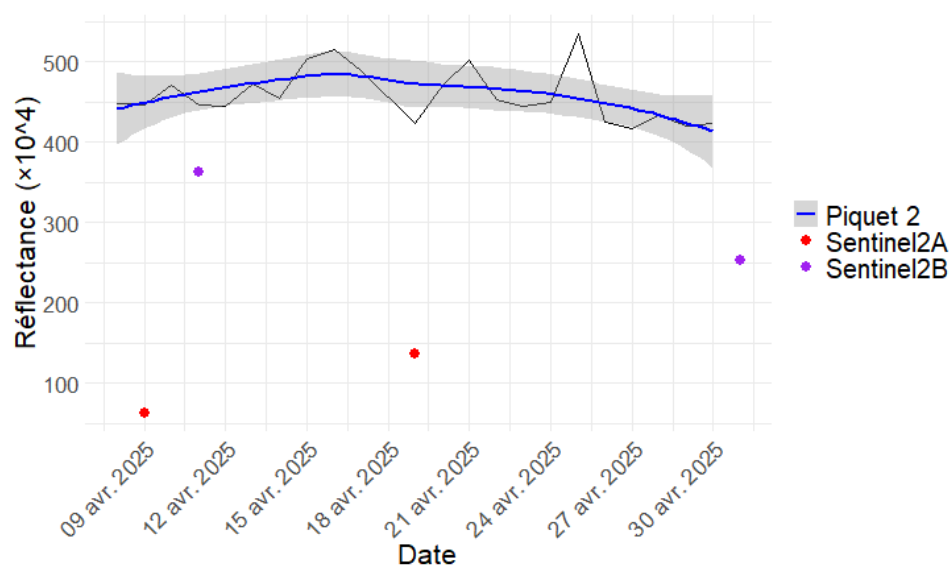


Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7265x)

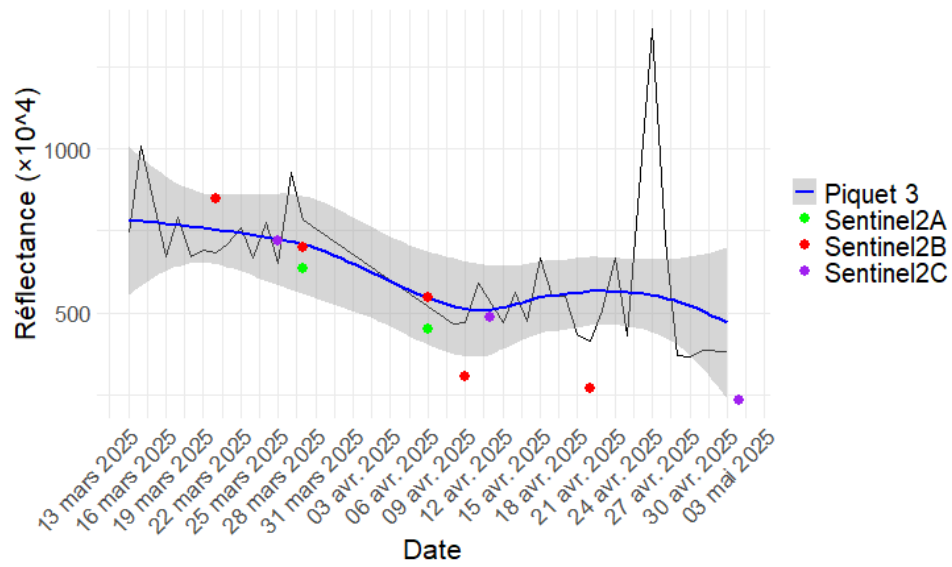
Canal B4



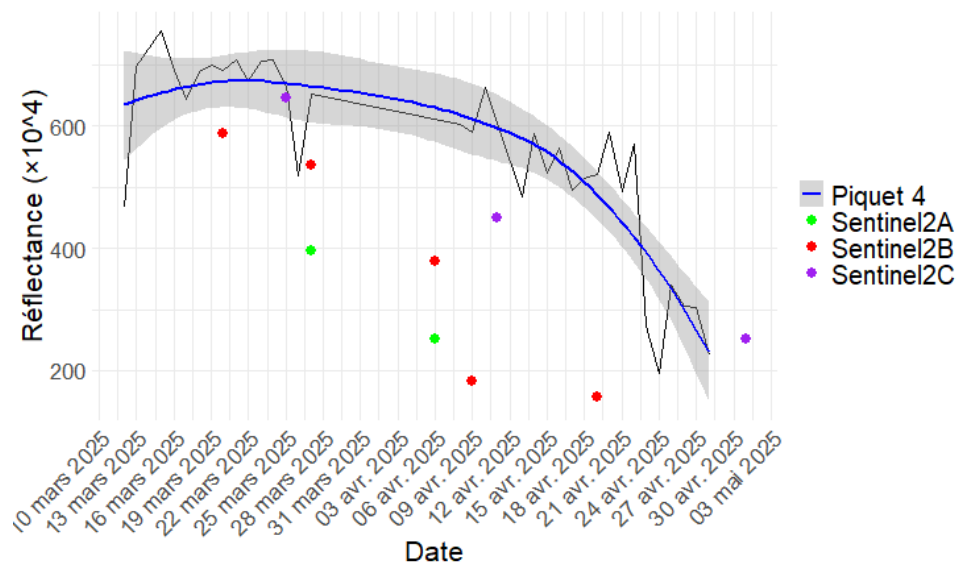
Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)



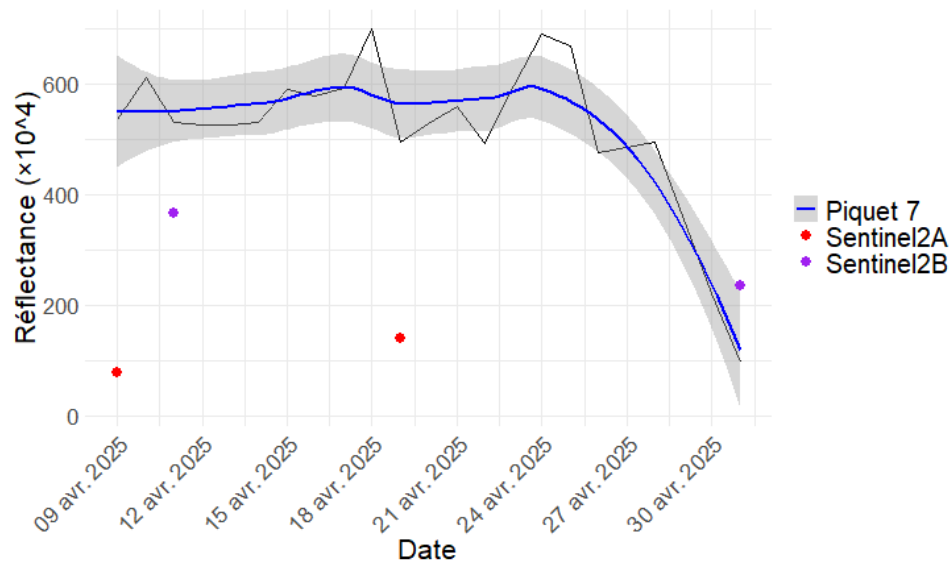
Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)



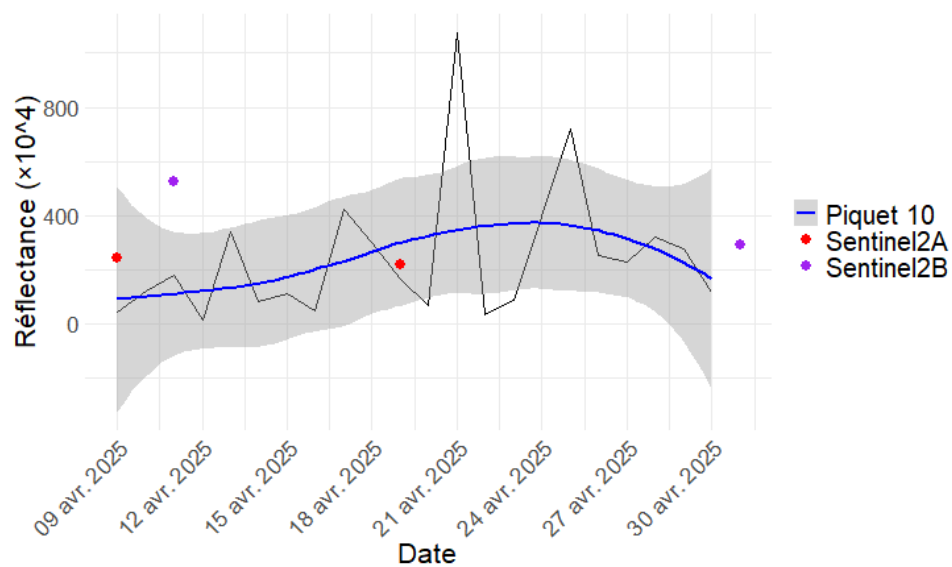
Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)



Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)

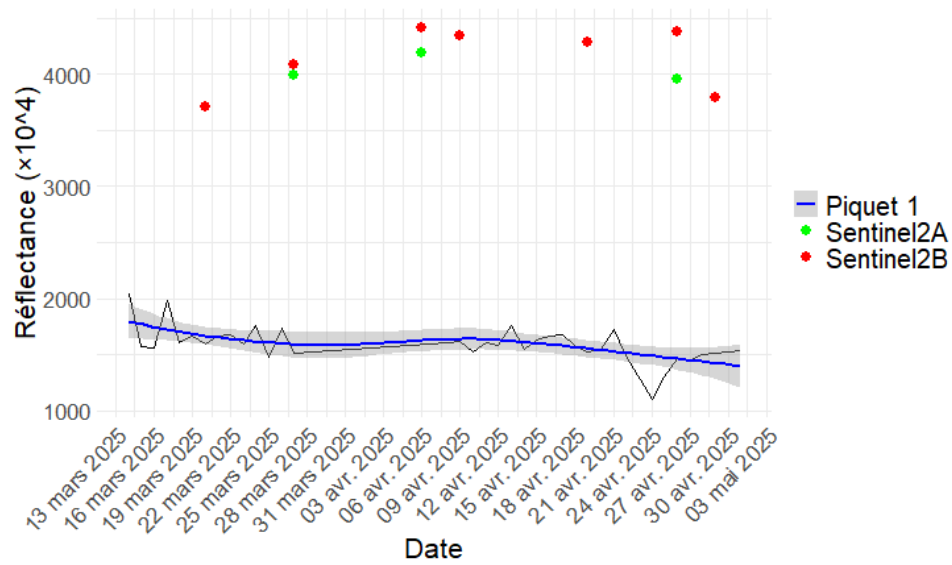


Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)

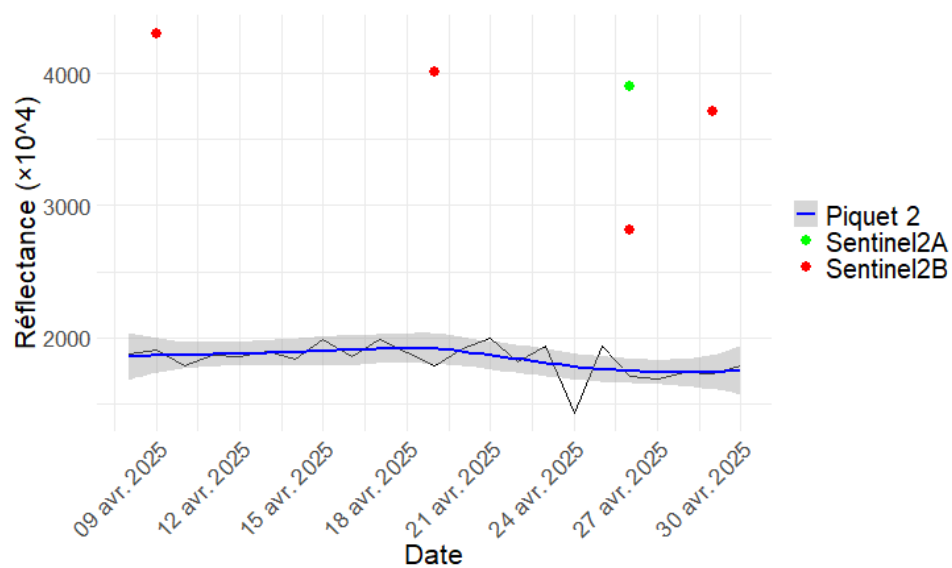


Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7265x)

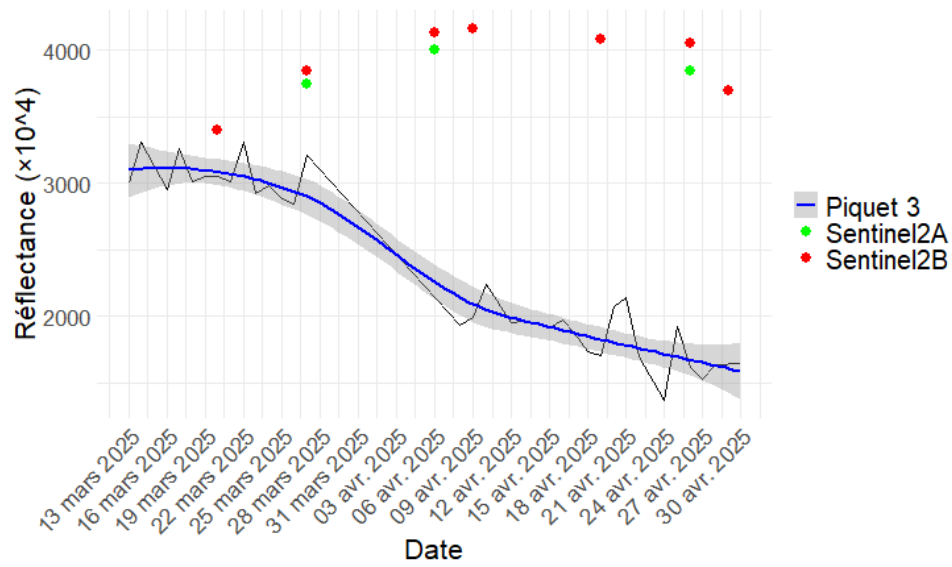
Canal B8



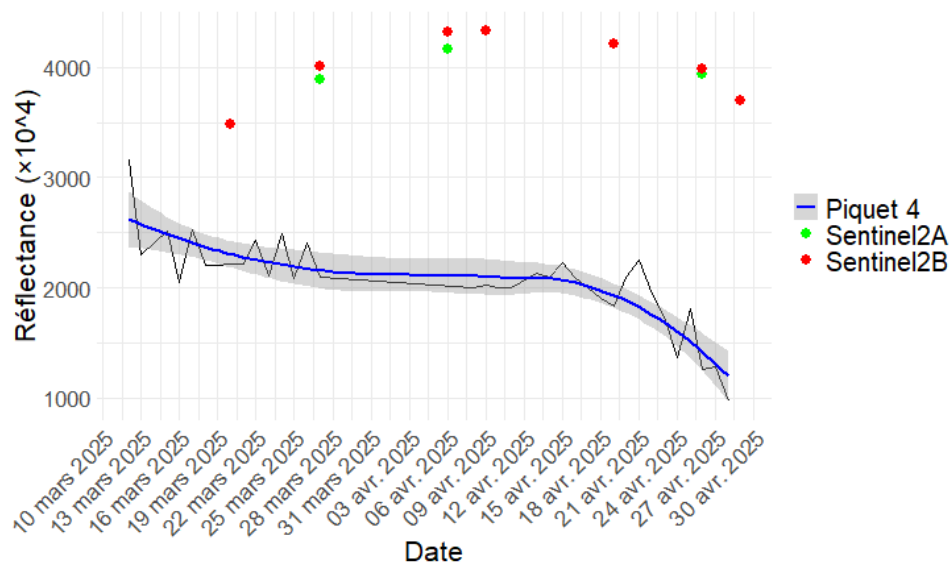
Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7265x)



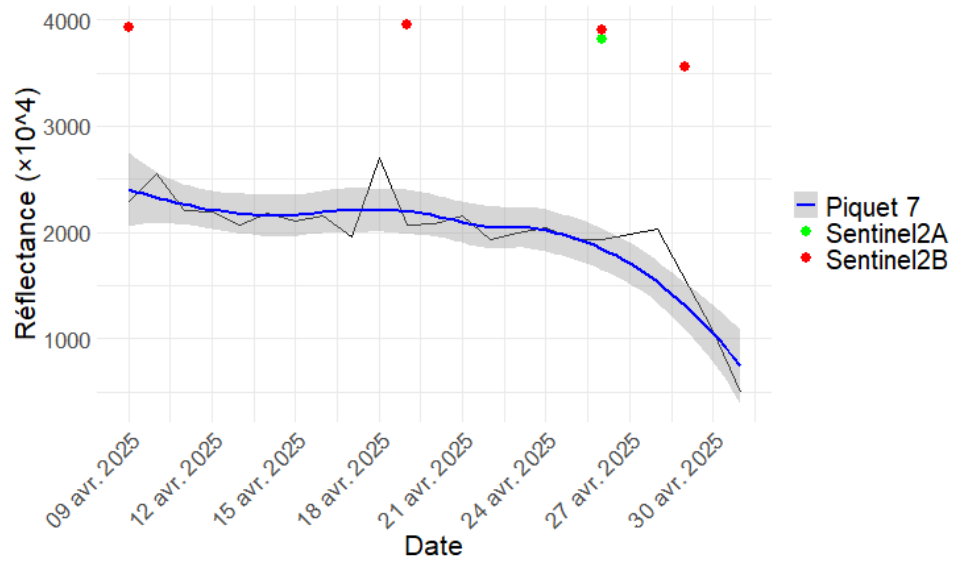
Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7265x)



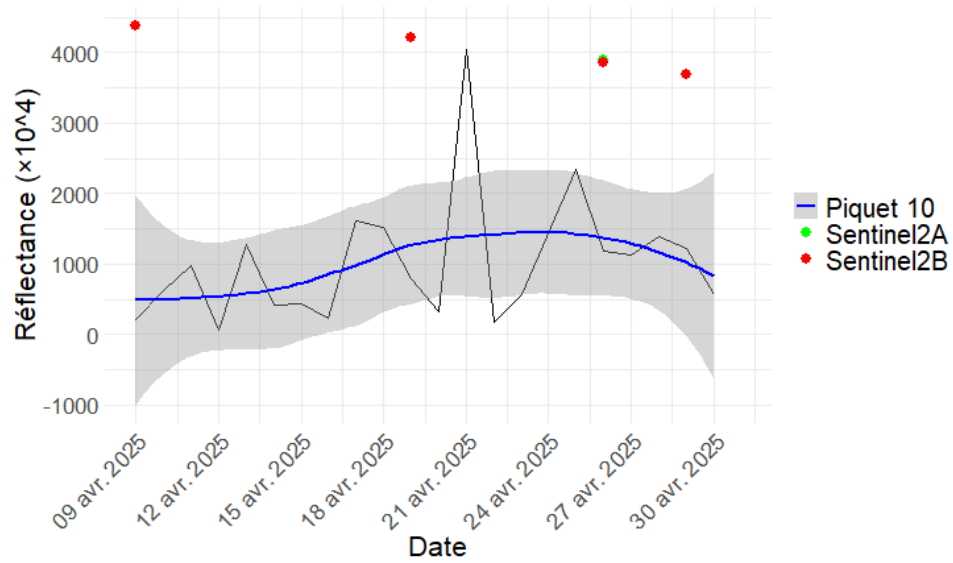
Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7265x)



Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7265x)



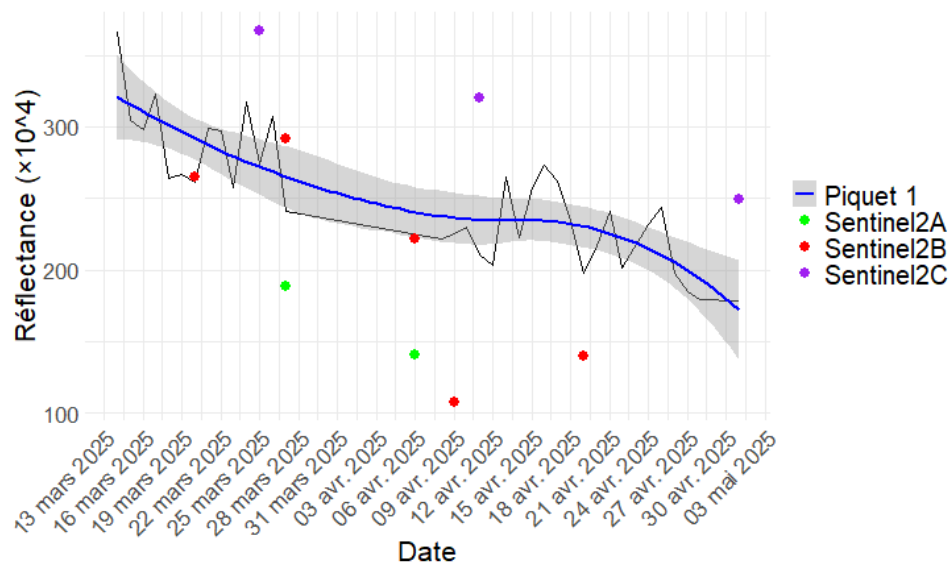
Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7265x)



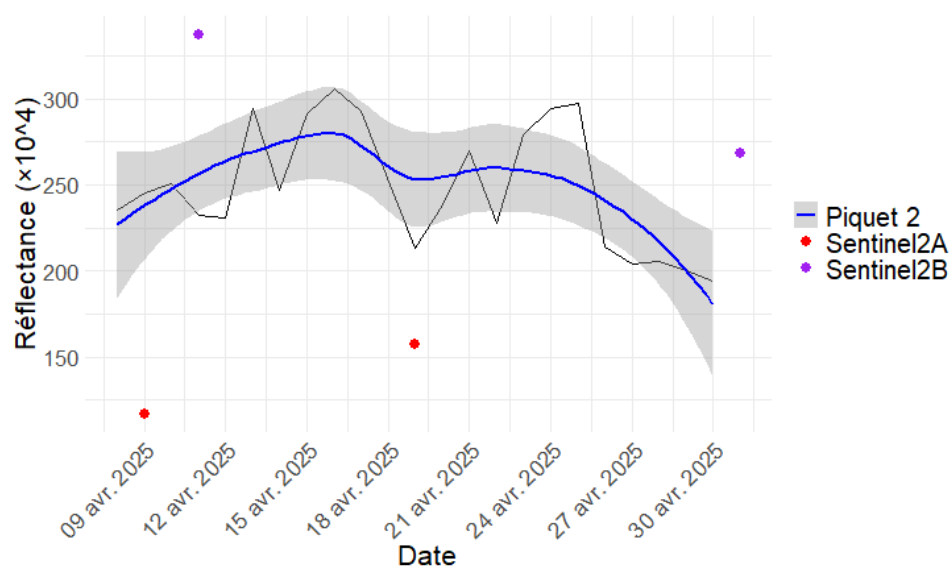
Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7265x)

A.2.2 AS7343

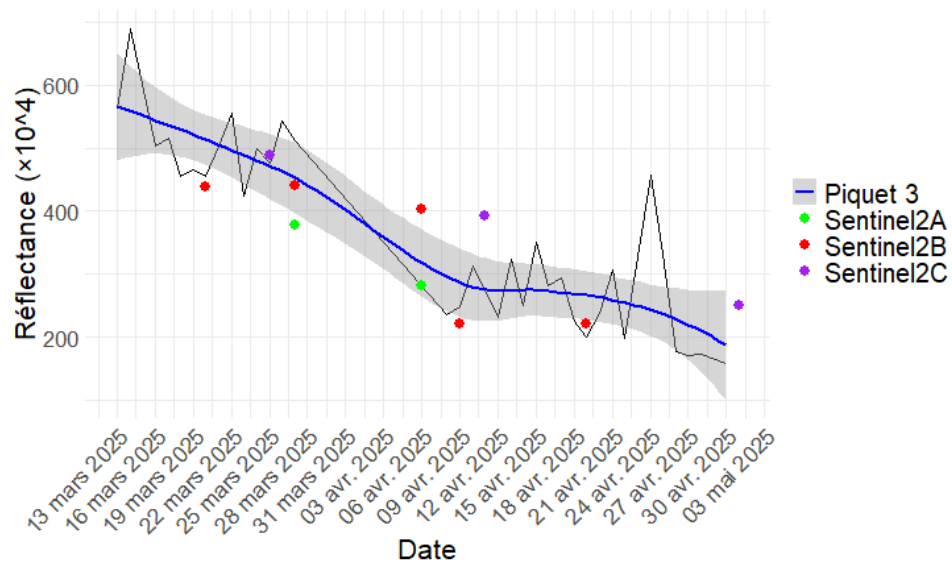
Canal B2



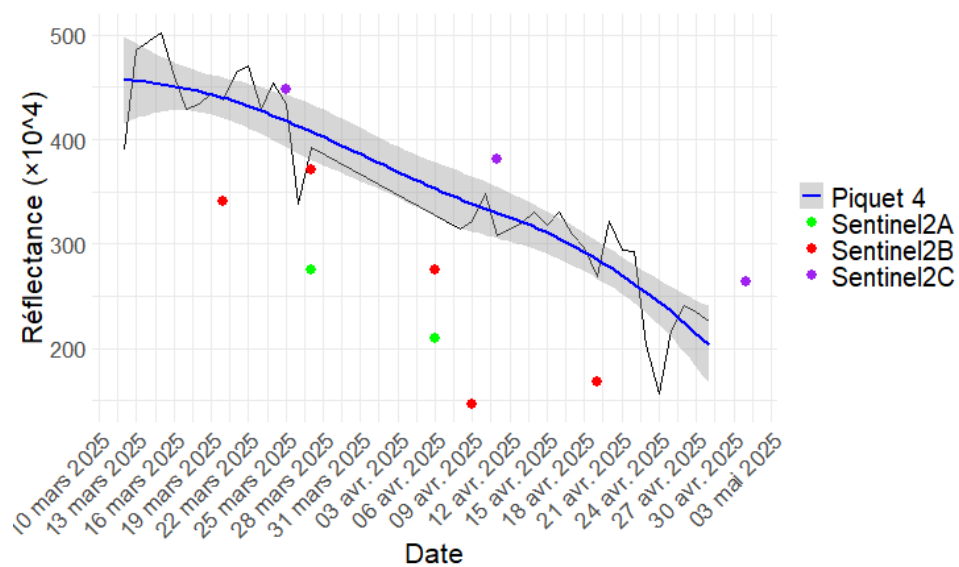
Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7343)



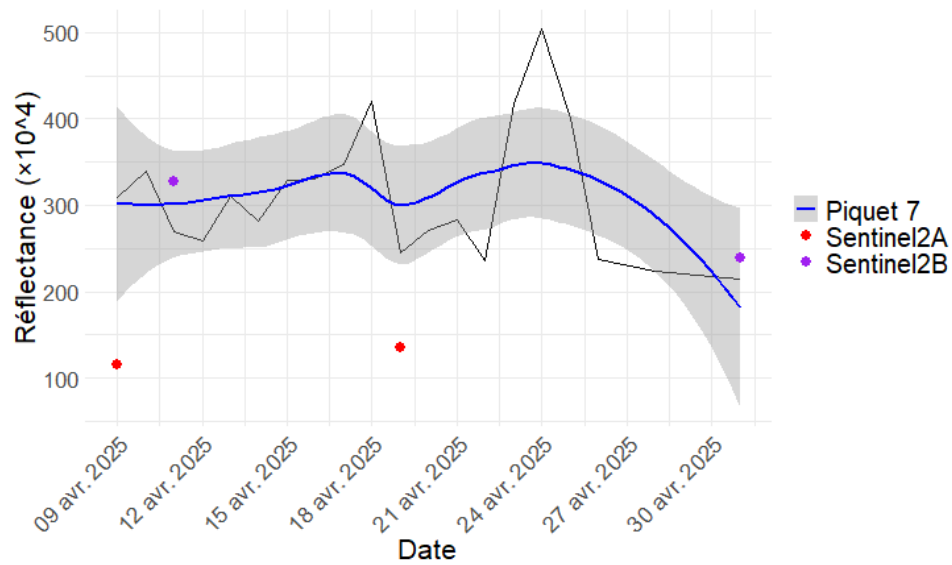
Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7343)



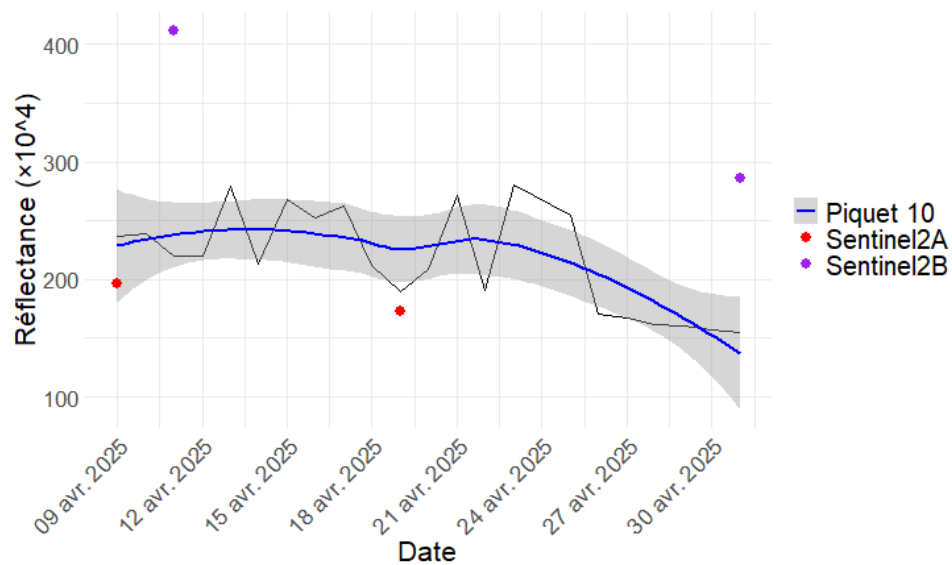
Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7343)



Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7343)

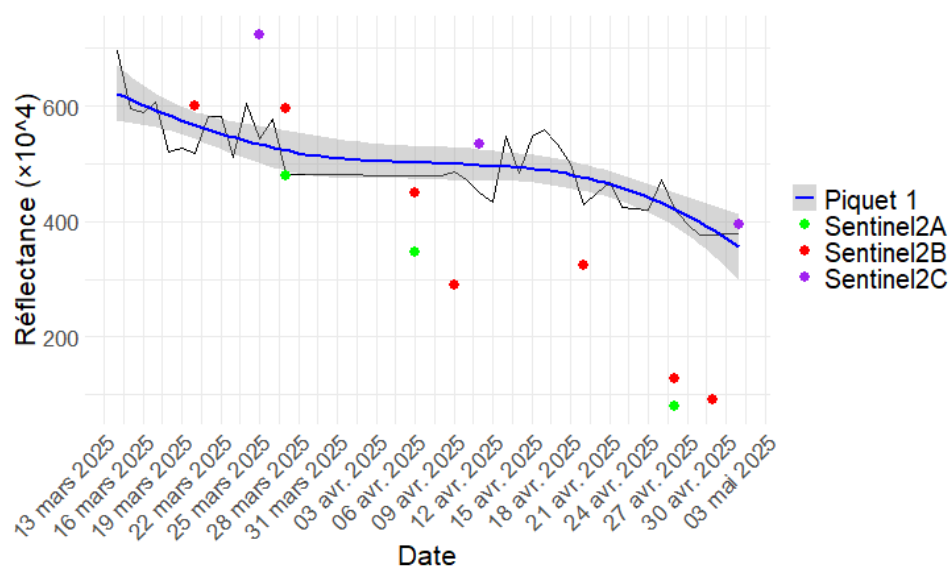


Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7343)

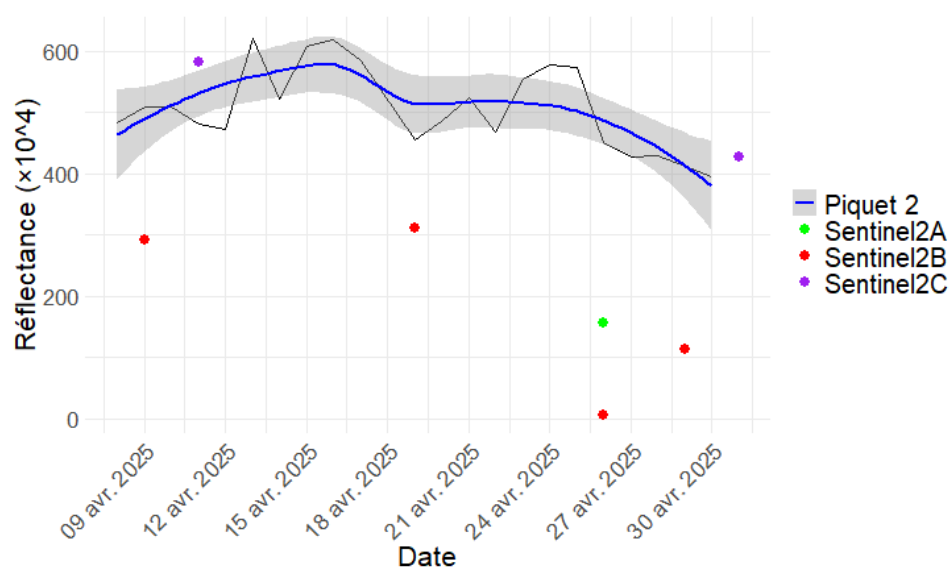


Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B2 (AS7343)

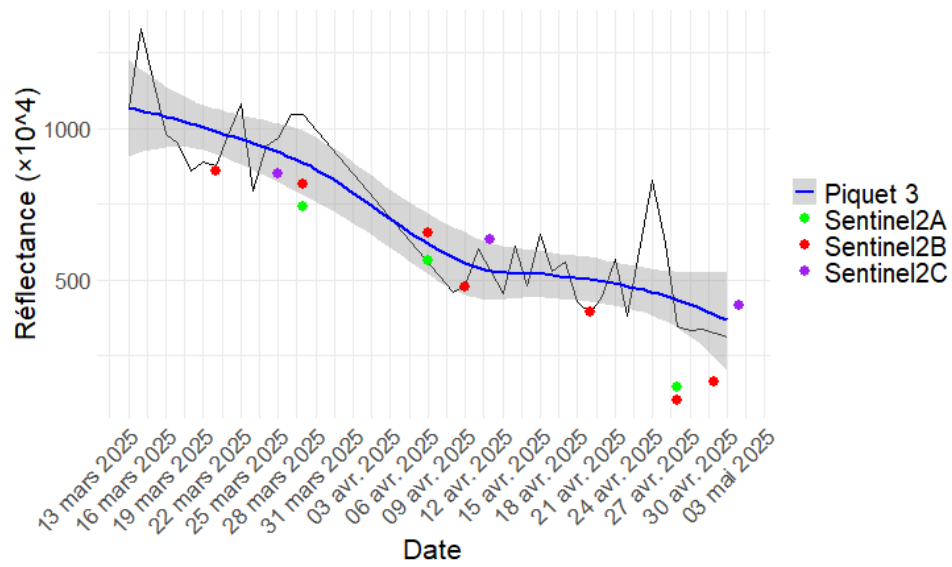
Canal B3



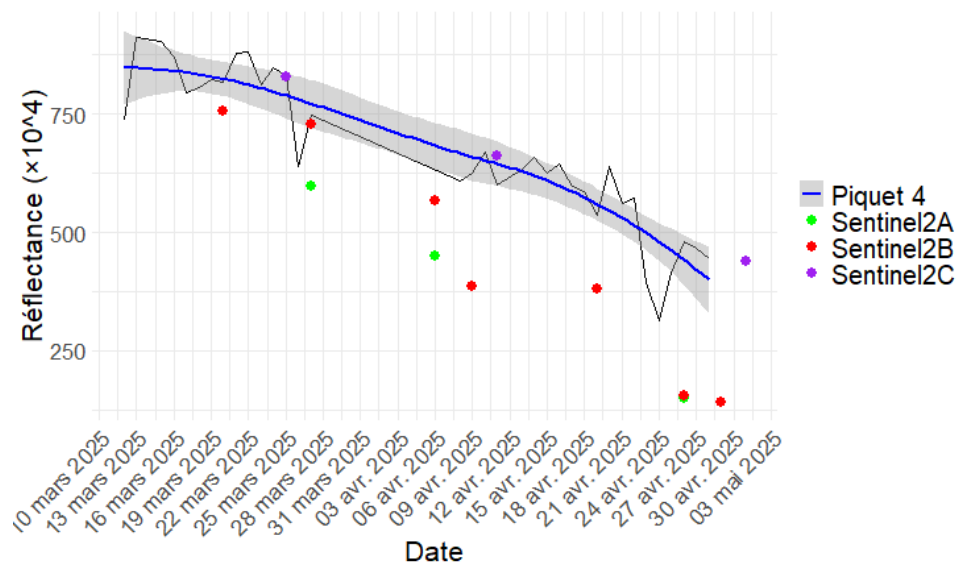
Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7343)



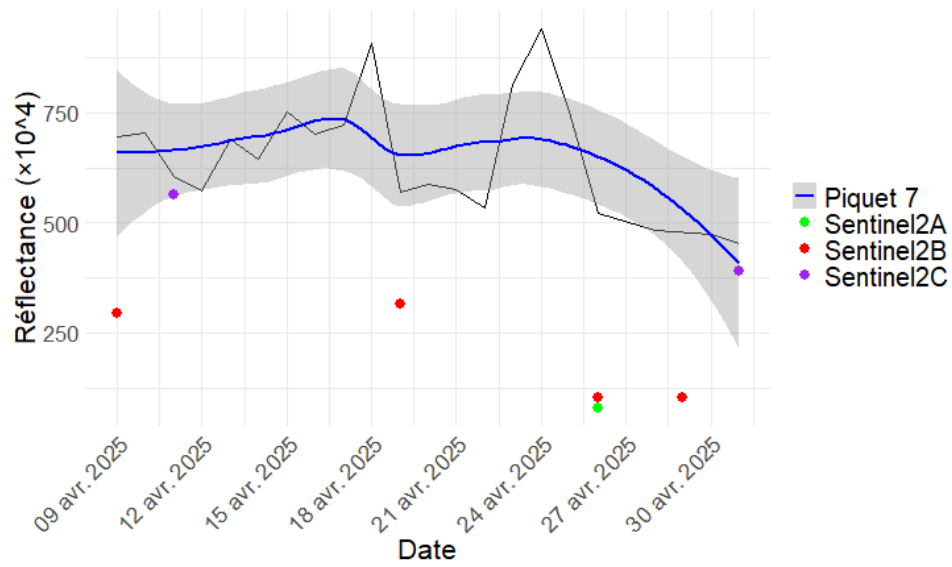
Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7343)



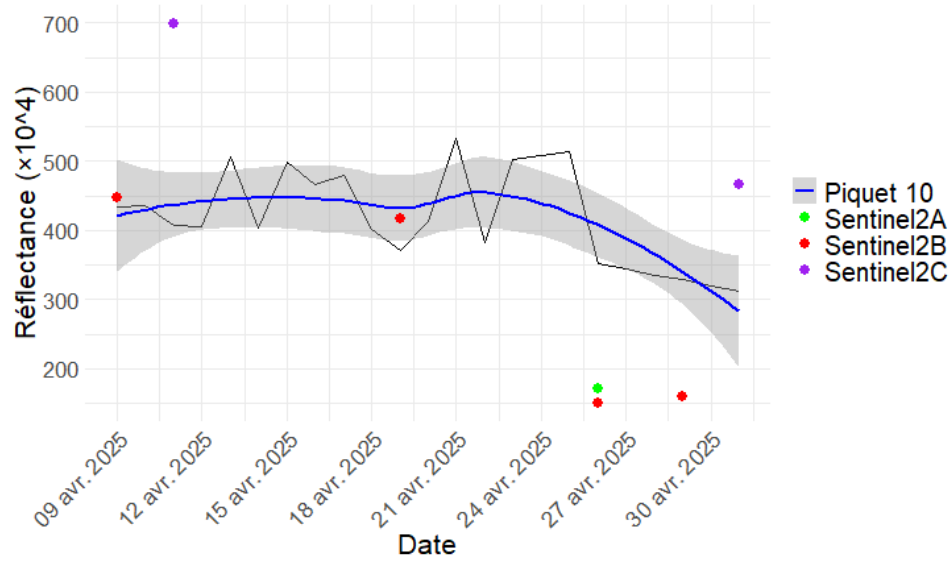
Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7343)



Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7343)

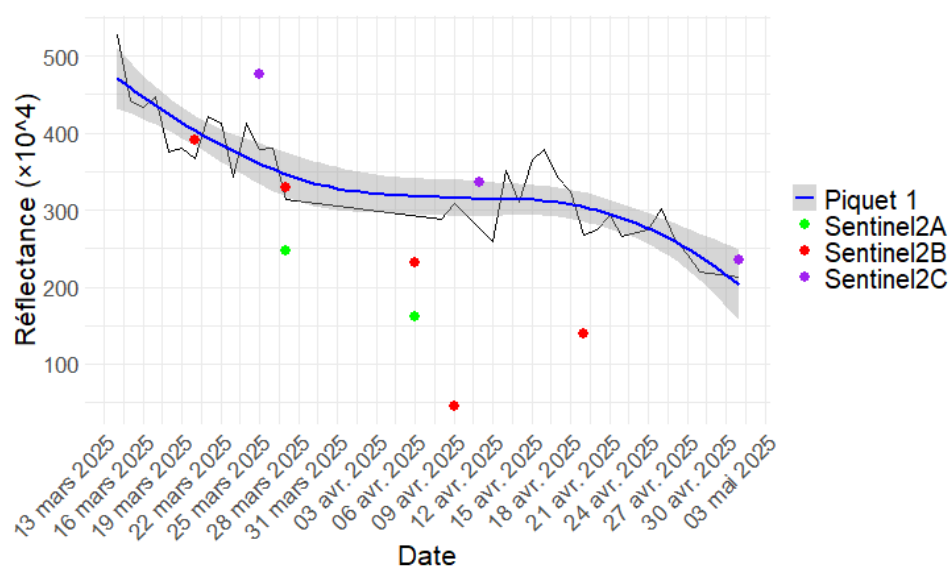


Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7343)

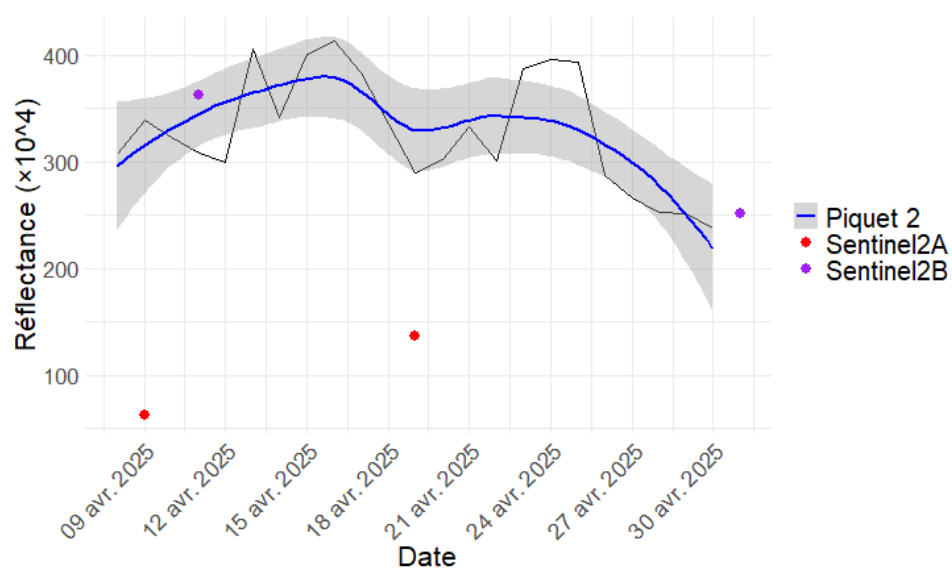


Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B3 (AS7343)

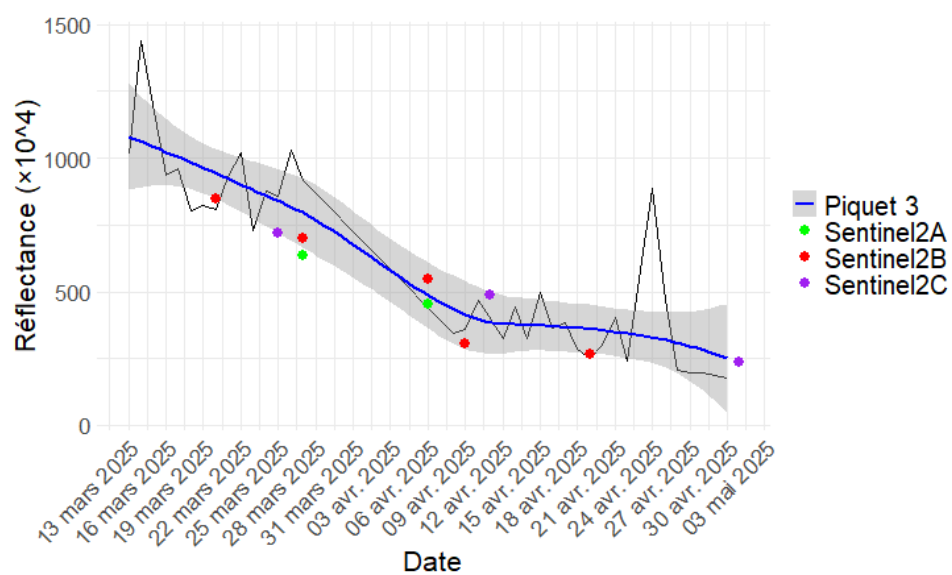
Canal B4



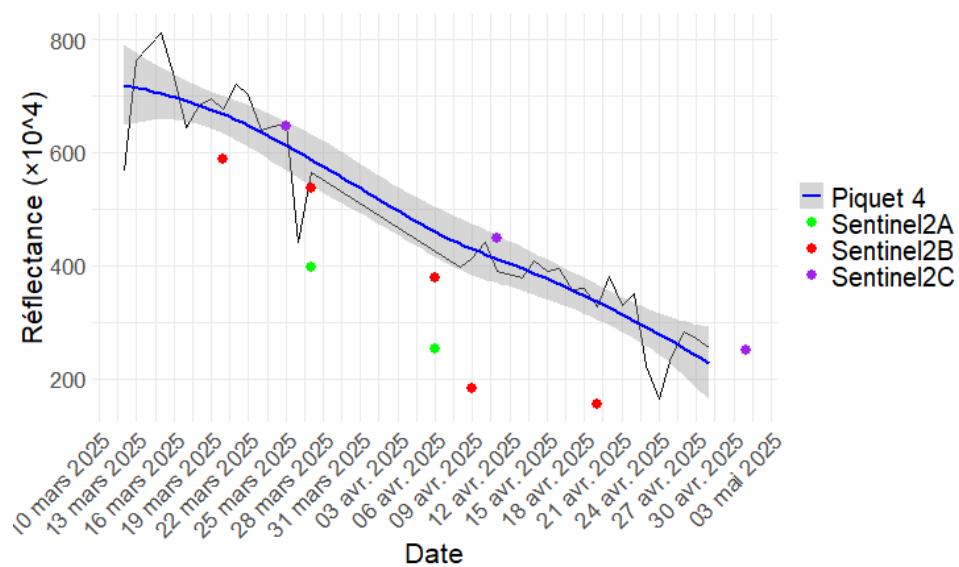
Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343)



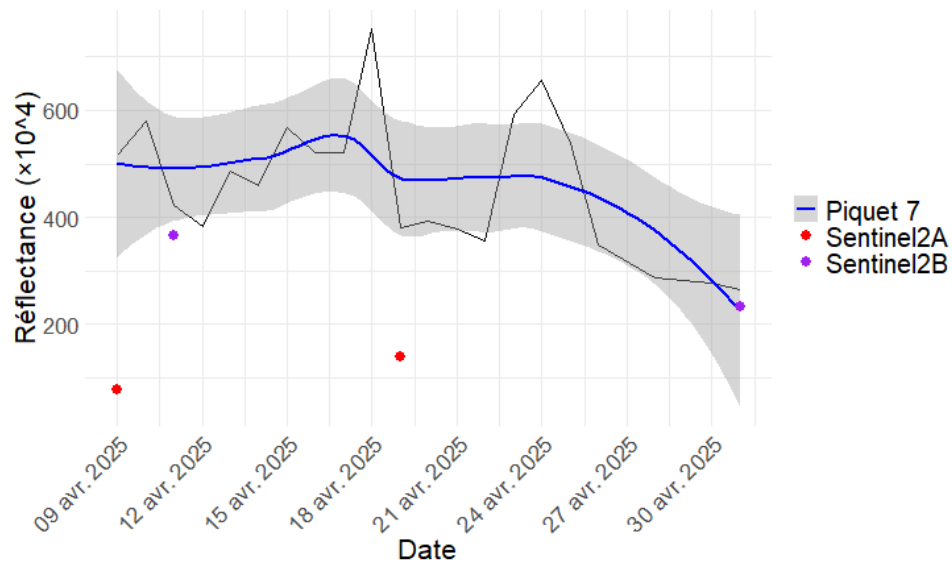
Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343)



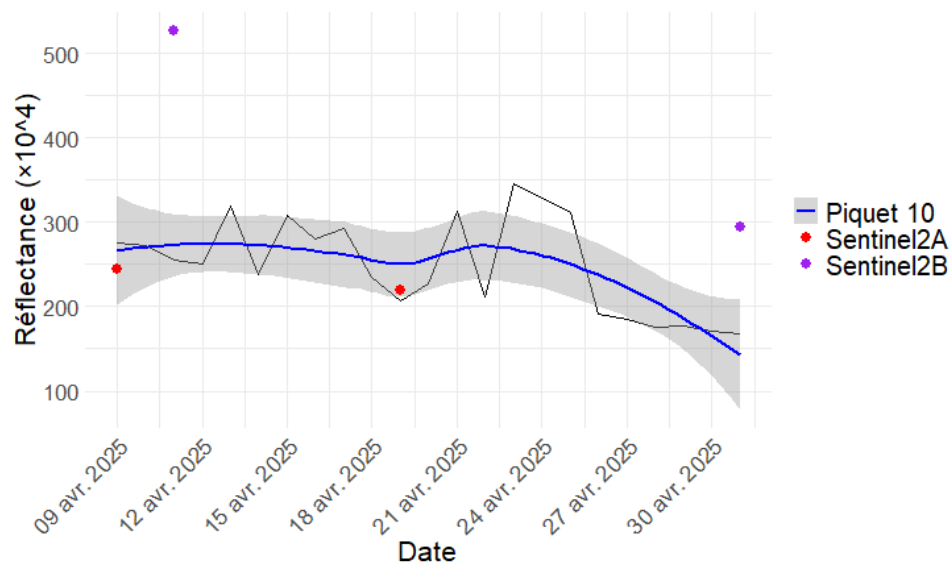
Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343)



Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343)

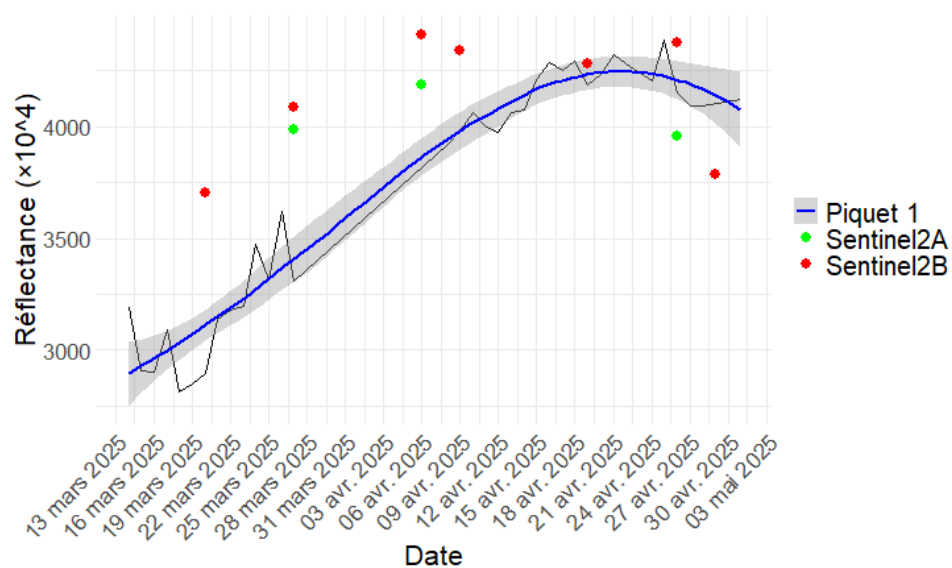


Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343)

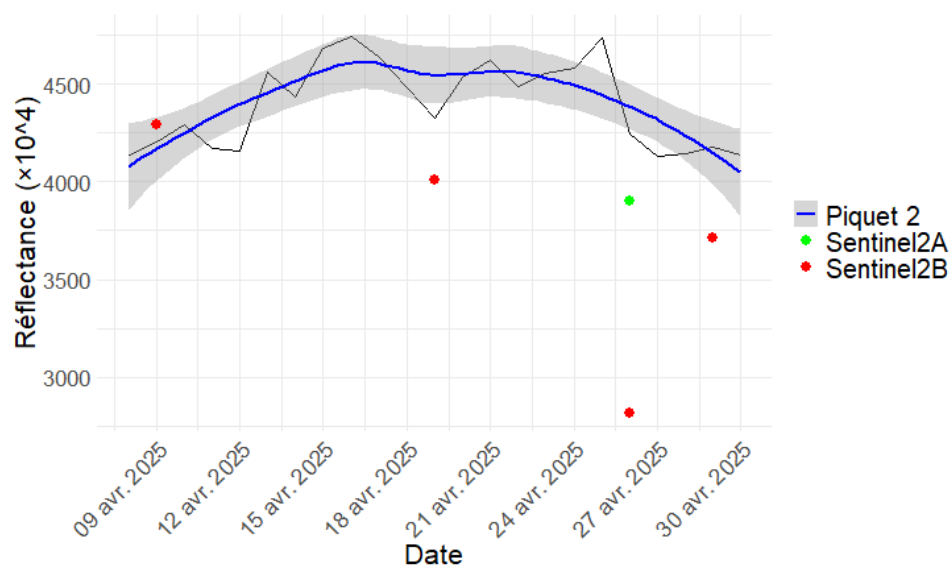


Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B4 (AS7343)

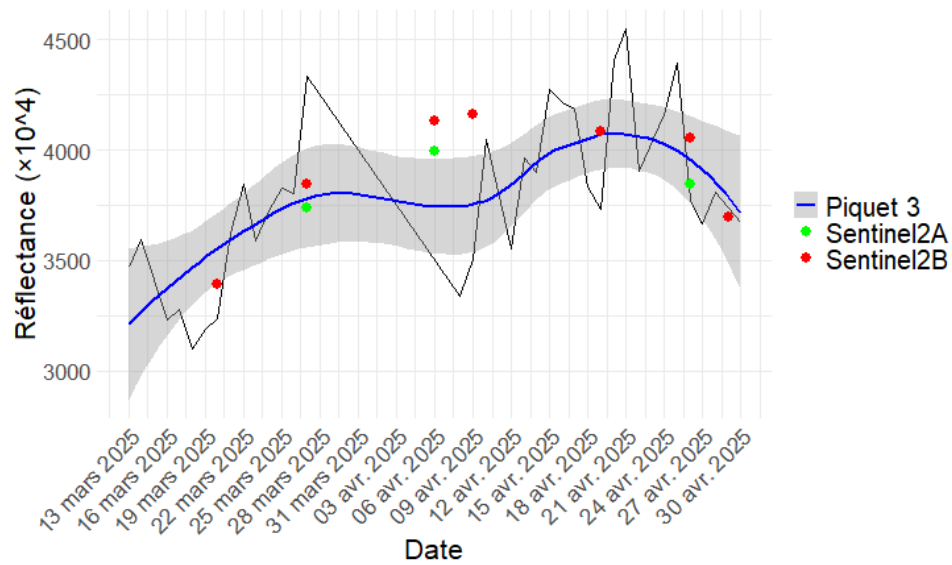
Canal B8



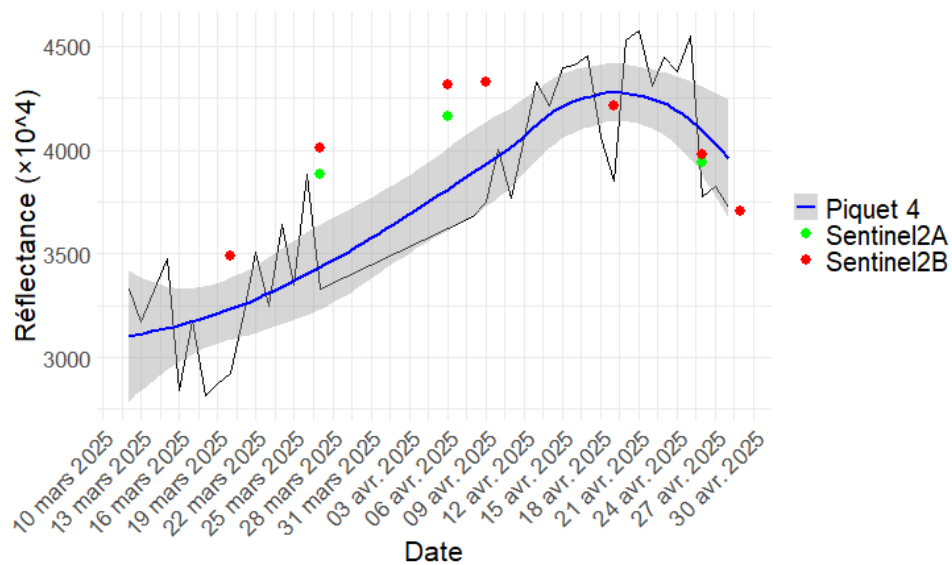
Réflectance mesurée par le piquet 1 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7343)



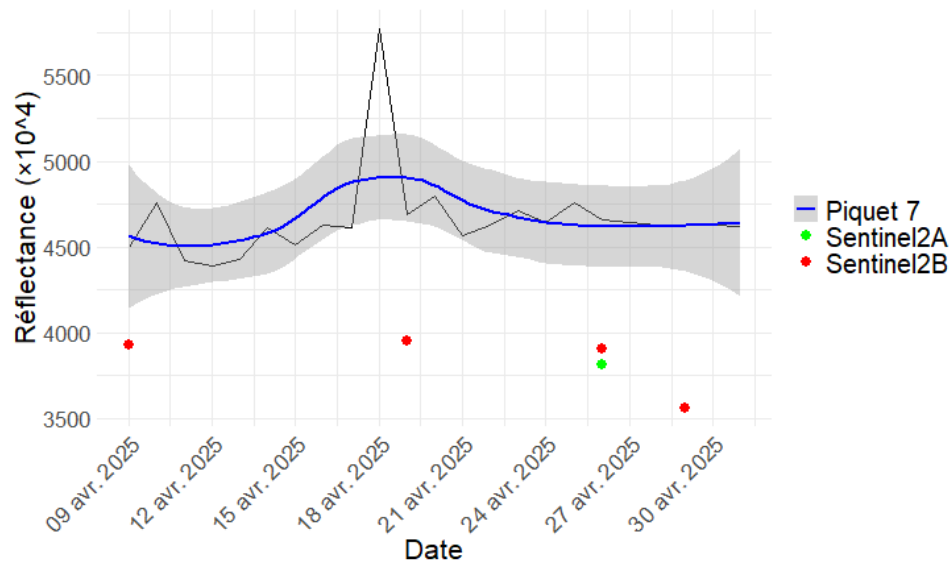
Réflectance mesurée par le piquet 2 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7343)



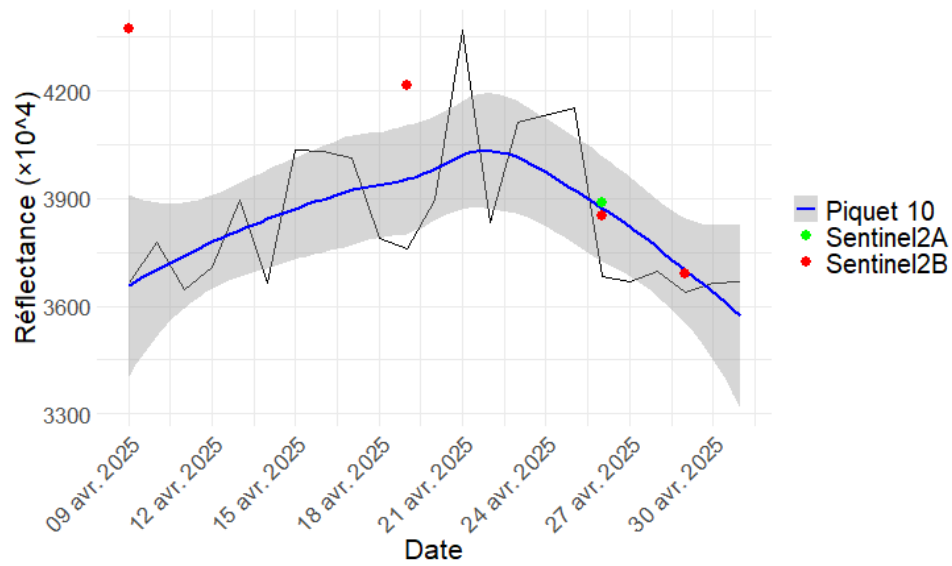
Réflectance mesurée par le piquet 3 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7343)



Réflectance mesurée par le piquet 4 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7343)



Réflectance mesurée par le piquet 7 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7343)



Réflectance mesurée par le piquet 10 et Sentinel-2 - Canal B8 (AS7343)

Références

- Amato, F., Havel, J., Gad, A.-A., and El-Zeiny, A. (2015). Remotely sensed soil data analysis using artificial neural networks : A case study of el-fayoum depression, egypt. *International Journal of Geo-Information (IJGI)*, 4 :677–696.
- Araus, J. L. and Kefauver, S. C. (2018). Breeding to adapt agriculture to climate change : Affordable phenotyping solutions. *Current Opinion in Plant Biology*, 45 :237–247. Special issue : AGRI 2017.
- Bodner, G., Alsalem, M., Nakhforoosh, A., Arnold, T., and Leitner, D. (2017). RGB and spectral root imaging for plant phenotyping and physiological research : Experimental setup and imaging protocols. *Journal of Visualized Experiments (JoVE)*, (126) :56251.
- Cannard, H., Benchet, R., Gerbaud, F., Grivaud, S., and Macor, L. (2017). Contrôle par thermographie infra-rouge des doubles soudures avec canal central des géomembranes plastomères / control of double join with central duct of plastomeric geomembrane by infrared thermography. Présentation, CETE de l’Est - LRPC de Strasbourg, SIPLAST, EGC-GALOPIN. Collaboration entre CETE de l’Est, SIPLAST et EGC-GALOPIN.
- Dawson, F. H. (1981). An inexpensive photosynthetic irradiance sensor for ecological field studies. *Hydrobiologia*, 81(1) :71–76.
- de Solan, B., Baret, F., Thomas, S., and Beauchêne, K. (2015). Phenomobile-v1 : A fully automated high throughput phenotyping system. In *EPPN Plant Phenotyping Symposium*, Barcelona, Spain. Conference presentation.
- Dhami, H. and et al. (2020). Crop height and plot estimation for phenotyping from unmanned aerial vehicles using 3d lidar. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 2643–2649, Las Vegas, NV, USA.
- DJI (2019). P4 multispectral. <https://ag.dji.com/p4-multispectral>. Consulté le 3 juin 2025.
- DJI (2025). P4 multispectral – support produit. <https://www.dji.com/be/support/product/p4-multispectral>. Consulté en juin 2025.
- Draye, X. (2025). Communication personnelle. Communication orale. Communication personnelle, juin 2025.
- Druide informatique (2022). *Antidote 11*. Logiciel utilisé pour la révision linguistique du mémoire, incluant les corrections orthographiques, grammaticales, syntaxiques et les reformulations.

- Drusch, M., Bello, U. D., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., and Bargellini, P. (2012). Sentinel-2 : Esa’s optical high-resolution mission for gmes operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120 :25–36.
- EOS (2023a). NDMI : L’indice d’humidité par différence normalisée. <https://eos.com/fr/make-an-analysis/ndmi/>. Consulté le 5 juin 2025.
- EOS (2023b). NDVI dans l’agriculture, formule de calcul et l’utilisation. <https://eos.com/fr/make-an-analysis/ndvi/>. Consulté le 5 juin 2025.
- Escadrone (2025). Guide du lidar aéroporté par drone professionnel. <https://escadrone.com/publication/guide-lidar-drone/>. Consulté le 3 juin 2025.
- Esri (s.d.). Image multispectrale. <https://support.esri.com/fr-fr/gis-dictionary/multispectral-image>. Consulté le 5 juin 2025.
- Flamant, P. H. (2019). Comprendre la science du lidar. *Photoniques*, 97 :40–44. Publié en ligne le 4 septembre 2019.
- Forero, M. G., Murcia, H. F., Méndez, D., and Betancourt-Lozano, J. (2022). Lidar platform for acquisition of 3d plant phenotyping database. *Plants*, 11(17) :2199. Submission received : 1 July 2022 / Revised : 26 July 2022 / Accepted : 10 August 2022 / Published : 25 August 2022.
- Furbank, R. T. and Tester, M. (2011). Phenomics – technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends in Plant Science*, 16(12) :635–644.
- Garrity, S. R., Vierling, L. A., and Bickford, K. (2010). A simple filtered photodiode instrument for continuous measurement of narrowband ndvi and pri over vegetated canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(3) :489–496.
- Hu, Q., Yang, J., Xu, B., Huang, J., Memon, D.-M. S., Yin, G., Zeng, Y., Zhao, J., and Ke, L. (2020). Evaluation of global decametric-resolution lai, fapar and fvc estimates derived from sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 12 :912.
- INRAE (2023). Utilisation de la phéno-mobile. <https://pheno3c.hub.inrae.fr/description-de-la-plateforme/utilisation-de-la-phenomobile>. Consulté le 3 juin 2025.
- INRAE (2025). Piquets connectés : une innovation au service de l’agriculture de précision. <https://www.inrae.fr/actualites/piquets-connectes-innovation-au-service-lagriculture-precision>. Consulté le 3 juin 2025.
- Jin, S., Su, Y., Song, S., Xu, K., Hu, T., Yang, Q., Wu, F., Xu, G., Ma, Q., Guan, H., Pang, S., Li, Y., and Guo, Q. (2020). Non-destructive estimation of field maize biomass

- using terrestrial lidar : an evaluation from plot level to individual leaf level. *Plant Methods*, 16(1) :69.
- Kedzierski, M., Wierzbicki, D., Sekrecka, A., Fryskowska, A., Walczykowski, P., and Siwert, J. (2019). Influence of lower atmosphere on the radiometric quality of unmanned aerial vehicle imagery. *Remote Sensing*, 11(10) :1214. Publisher : MDPI AG.
- Kotchi, S. O. (2004). Détection du stress hydrique par thermographie infrarouge : Application à la culture de la pomme de terre. Mémoire de maîtrise en sciences géomatiques, Université Laval, Québec, Canada. Faculté de foresterie et géomatique.
- Labarrere, B. (2017). *Comment les plantes répondent et s'adaptent aux changements climatiques : étude aux marges froides (subantarctique)*. PhD thesis, Université de Rennes 1.
- Li, C., Li, H., Li, J., Lei, Y., Li, C., Manevski, K., and Shen, Y. (2019). Using NDVI percentiles to monitor real-time crop growth. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162 :357–363.
- Li, W., Weiss, M., Jay, S., Wei, S., Zhao, N., Comar, A., Lopez-Lozano, R., Solan, B. D., Yu, Q., Wu, W., and Baret, F. (2024). Daily monitoring of effective green area index and vegetation chlorophyll content from continuous acquisitions of a multi-band spectrometer over winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 300 :113883.
- Lohmann, G. M., Monahan, A. H., and Heinemann, D. (2016). Local short-term variability in solar irradiance. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(10) :6365–6379. Published : 25 May 2016.
- Lowe, T., Moghadam, P., Edwards, E., and Williams, J. (2021). Canopy density estimation in perennial horticulture crops using 3d spinning lidar slam. *Journal of Field Robotics*. First published : 06 January 2021.
- Lozano, R. L., Jay, S., Weiss, M., and Zhang, H. (2025). Radiometric calibration of multispectral uav images.
- Madec, S. (2019). *Phénotypage au champ des traits structurels du blé par imagerie RGB à résolution millimétrique*. Thèse de doctorat, Université d'Avignon, Avignon, France. Soutenance le 25 juin 2019.
- Maes, W. H. and Steppe, K. (2012). Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture : a review. *Journal of Experimental Botany*, 63(13) :4671–4712. Published : 14 August 2012.
- Naser, M. A., Khosla, R., Longchamps, L., and Dahal, S. (2020). Using ndvi to differentiate wheat genotypes productivity under dryland and irrigated conditions. *Remote Sensing*, 12.

- Pathiranaage, D. S., Leigh, L., and Pinto, C. T. (2023). Evaluation of low-cost radiometer for surface reflectance retrieval and orbital sensor's validation. *Remote Sensing*, 15(9) :2444. Number : 9 ; Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- PHENET (2025). Phenet – tools and methods for extended plant phenotyping and envirotyping services of european research infrastructures. <https://www.phenet.eu/en>. Consulté le 5 juin 2025.
- Rashid, A., Stark, J. C., Tanveer, A., and Mustafa, T. (2001). Use of canopy temperature measurements as a screening tool for drought tolerance in spring wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*. First published : 25 December 2001.
- Renaud, S. and Gueye, F. (2017). Intérêts et techniques du phénotypage multi-échelle pour la compréhension de réponses physiologiques et l'identification de gènes d'intérêt.
- Reynolds, M., Chapman, S., Crespo-Herrera, L., Molero, G., Mondal, S., Pequeno, D. N. L., Pinto, F., Pinera-Chavez, F. J., Poland, J., Rivera-Amado, C., Saint Pierre, C., and Sukumaran, S. (2020). Breeder friendly phenotyping. *Plant Science*, 295 :110396. Special issue : Food Security under Climate Change.
- Roby, C. (2023). Le phénotypage : processus clé en amélioration des plantes. <https://blog.vegenov.com/2023/11/le-phenotypage-processus-cle-en-amelioration-des-plantes/>. Vegenov.
- Sadenova, M. A., Beisekenov, N. A., Anuarbekov, T. B., Kapasov, A. K., and Kulenova, N. A. (2023). Study of unmanned aerial vehicle sensors for practical remote application of earth sensing in agriculture. *Chemical Engineering Transactions*, 98 :243–248.
- Stefański, P., Ullah, S., Matysik, P., and Rybka, K. (2024). Triticale field phenotyping using RGB camera for ear counting and yield estimation. *Journal of Applied Genetics*, 65(2) :271–281.
- Tardieu, F., Cabrera-Bosquet, L., Pridmore, T., and Bennett, M. (2017). Plant phenomics, from sensors to knowledge. *Current Biology*, 27(15) :R770–R783.
- Tester, M. and Langridge, P. (2010). Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science*, 327(5967) :818–822.
- Université catholique de Louvain (n.d.). CREDEM – conception, réalisation et essais de dispositifs Électro-mécaniques. <https://www.uclouvain.be/fr/plateformes-technologiques/credem>. Consulté le 15 mars 2025.
- Vajsová, B., Fasbender, D., Wirnhardt, C., Lemajic, S., and Devos, W. (2020). Assessing spatial limits of sentinel-2 data on arable crops in the context of checks by monitoring. *Remote Sensing*, 12(14) :2195.

- Vina, A. (2024). Caméras de vision par ordinateur : types et applications. <https://www.ultralytics.com/fr/blog/computer-vision-cameras-and-their-applications>. Consulté le 3 juin 2025.
- Walter, A., Finger, R., Huber, R., and Buchmann, N. (2017). Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(24) :6148–6150. Publisher : Proceedings of the National Academy of Sciences.
- Weiss, M. (2025). Discussion dans le cadre du projet phenet. Communication orale. Échange informel, mai 2025.
- Yelle, B. (2017). *Éléments d’optique géométrique et ophtalmique*. Centre collégial de développement de matériel didactique (CCDMD), Montréal, 3 édition. Figure 2.1.

Premiers tests d'un système IoT autonome et *low-cost* pour le phénotypage en parcelle d'agriculteur

Cyril EVRARD

Résumé

Dans un contexte agricole en pleine transformation, la collecte de données précises et continues sur le développement des cultures est devenue un enjeu crucial. Le phénotypage, qui permet de caractériser le comportement des plantes, joue un rôle fondamental dans l'amélioration variétale et l'optimisation des pratiques agricoles. Toutefois, les outils traditionnels présentent des limites, notamment en termes de coût, de résolution temporelle et de complexité de mise en œuvre.

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche visant à pallier ces limitations par le développement d'un système IoT autonome et *low-cost*, capable d'assurer un suivi régulier des cultures directement en champ. Le dispositif proposé prend la forme de piquets connectés équipés de différents capteurs (spectromètres, capteurs d'irradiance solaire, d'humidité et de température), conçus pour collecter des données de manière continue et autonome.

L'objectif principal de ce travail est de tester la faisabilité de cette solution en conditions réelles. Une attention particulière a été portée à la calibration des capteurs de réflectance, dans le but de comparer les mesures *in situ* avec les données satellites issues de Sentinel-2. Ce croisement des sources d'information vise à évaluer la complémentarité des données collectées au sol par rapport à la télédétection satellitaire.

Une série d'améliorations matérielles et logicielles ont été apportées au prototype afin d'assurer sa fiabilité, sa robustesse et sa facilité d'utilisation sur le terrain. Les résultats obtenus montrent que ce type de système peut constituer une solution prometteuse pour le phénotypage à grande échelle, notamment dans le cadre de projets de recherche comme PHENET. Des pistes d'amélioration sont proposées, notamment en ce qui concerne la calibration et la validation à partir de données de référence terrain.