

---

## **Implémentation d'un système d'imagerie multispectrale adapté au phénotypage de cultures en conditions extérieures et comparaison de deux méthodes de normalisation d'images**

**Auteur :** Perée, Tanguy

**Promoteur(s) :** Mercatoris, Benoît

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme :** Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2018-2019

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/7972>

---

*Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

**IMPLÉMENTATION D'UN SYSTÈME D'IMAGERIE  
MULTISPECTRALE ADAPTÉ AU PHÉNOTYPAGE DE  
CULTURES EN CONDITIONS EXTÉRIEURES ET  
COMPARAISON DE DEUX MÉTHODES DE  
NORMALISATION D'IMAGES**

**TANGUY PERÉE**

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER  
BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2018-2019**

**PROMOTEUR: B. MERCATORIS**

**CO-PROMOTEUR: S. DANDRIFOSSE**

« Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech. »

« Le présent document n'engage que son auteur. »

**IMPLÉMENTATION D'UN SYSTÈME D'IMAGERIE  
MULTISPECTRALE ADAPTÉ AU PHÉNOTYPAGE DE  
CULTURES EN CONDITIONS EXTÉRIEURES ET  
COMPARAISON DE DEUX MÉTHODES DE  
NORMALISATION D'IMAGES**

**TANGUY PERÉE**

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER  
BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2018-2019**

**PROMOTEUR: B. MERCATORIS**

**CO-PROMOTEUR: S. DANDRIFOSSE**

# Remerciements

En premier lieu, je souhaite remercier mes parents pour leur soutien moral, physique et financier indéfectible durant toutes mes études. C'est grâce à vous si je suis ce que je suis devenu et je ne pourrai sans doute jamais assez vous en remercier.

Ensuite je souhaite remercier Monsieur Mercatoris pour m'avoir offert la possibilité de faire un TFE à la carte dans son service en étant bien encadré. Ce qui m'amène à remercier Sébastien pour son encadrement et ses conseils durant toute la réalisation du TFE, merci d'avoir guidé mes pas.

Je souhaite aussi remercier l'ensemble des membres du GR pour leurs conseils et leur bonne humeur au quotidien, en particulier Rudy et Jean-François qui m'ont énormément aidé.

Je souhaite aussi remercier les autres Tfstes du GR, sans vous le local aurait été bien trop calme et ennuyant. Nos tournantes à 6-7 au ping-pong me manqueront.

Merci aussi à Clémence, ma co-labo depuis le début des études, pour son soutien et ses encouragements. Je suis content d'avoir eu l'opportunité de passer toutes mes études avec une personne aussi formidable.

Finalement je tiens aussi à remercier ma grande sœur pour les heures passées à relire ce travail.

# Résumé

Dans le cadre d'une agriculture de précision et plus précisément dans le cadre de phénotypage de champ, un système d'imagerie multispectrale est mis en place sur le terrain. L'ensemble des programmes sont réalisés et coordonnés grâce au langage Python. Une nouvelle méthode de normalisation des images basée sur les mesures d'un spectromètre bon marché est testée. Afin de comparer cette nouvelle méthode, la méthode plus classique de la référence blanche est elle aussi, mise en place sur le terrain. Le but de ces deux méthodes est d'obtenir des images de réflectances comparables à la littérature. Les mesures sont réalisées en conditions réelles dans un champ mais les objets d'études sont les références blanches et pas les épis de blé.

Lors des manipulations, il y a eu une erreur de programmation ainsi qu'un manque de connaissance d'une partie du matériel qui ont induit des erreurs dans les résultats.

Cependant, même si les résultats ne sont pas comparables à la littérature, il est possible de mettre en évidence que la méthode classique basée sur la référence blanche est plus précise que la nouvelle méthode basée sur le spectromètre mais moins fiable car il manque des images. La nouvelle méthode semble plus intéressante dans un contexte d'agriculture de précision automatisée mais sa précision doit être améliorée. Pour cela, dans les perspectives, des nouvelles manipulations et des nouveaux tests sont proposés.

# Abstract

In the context of precision farming and more specifically in the context of crop phenotyping, a multispectral imaging system has been set up in the field. All of the programs have been created and coordinated thanks to the Python language. A new image standardization method based on the measurements of a cheap spectrometer has been tested. In order to compare this new method, the more classic white reference method has also been implemented. The purpose of these two methods is to obtain reflectance images comparable to the literature. The measurements were made in real conditions in a field but the targets of the camera are the white references and not the ears of wheat.

During the manipulations, a programming error occurred and combined with a lack of knowledge of some of the materials, it led to errors in the results.

However, even if the results are not comparable to the literature, it has been possible to highlight that the classical method based on the white reference is more accurate than the new method based on the spectrometer but less reliable because some images were not acquired. The new method seems more interesting in the context of automated precision farming but its accuracy needs to be improved. For this, in the perspectives, new manipulations and new tests have been proposed.

# Table des matières

Introduction.....	8
La lumière : .....	9
L'image : .....	10
Quelques concepts et notions :.....	11
La normalisation d'image : .....	12
Objectif : .....	14
Matériel et méthode .....	15
Le champ : .....	15
Le matériel :.....	15
Références blanches :.....	16
La roue à filtres :.....	17
La caméra : .....	18
La mesure du rayonnement incident via un spectromètre :.....	20
Les méthodes de normalisation mises en place :.....	25
Software pour acquérir les images sur le terrain :.....	27
Résultat et discussion.....	29
Le spectromètre : .....	29
Le retrait du bruit du spectromètre .....	29
Test de saturation du spectromètre en conditions naturelles.....	30
L'étalonnage du spectromètre .....	32
Les méthodes de normalisation des images .....	35
La méthode de normalisation basée sur le spectromètre : .....	35
La méthode de normalisation basée sur la référence blanche :.....	39
Comparaison des deux méthodes et perspectives : .....	42
Conclusion .....	44
Bibliographie.....	45

## Table des figures

Figure 1 : Courbe de réflectance caractéristique d'une feuille saine d'une culture(Li et al., 2014). .....	8
Figure 2 : Le spectre électromagnétique avec un zoom sur la partie visible du spectre (Gonzalez et al., 2008).....	9
Figure 3 : Courbe d'étalonnage empirique basée sur deux cibles (Dao et al., 2019).....	13
Figure 4 : Photographie de la structure supportant l'ensemble du matériel .....	15
Figure 5 : Photographie de la référence blanche classique (gauche) et de la référence MAPIR (droite) .....	16
Figure 6 : Courbe de réflectance de la référence blanche « MAPIR » .....	16
Figure 7 : Photographie de l'intérieur de la boîte contenant la roue à filtres. ....	17
Figure 8 : Schéma des pièces imprimées en 3D s'attachant à la caméra (gauche) et au profi Bosch (droite).....	19
Figure 9 : Graphique du gain pour chaque longueur d'onde du filtre passe bande KG3.....	23
Figure 10 : Graphe de l'efficacité quantique de la caméra Mako U-130 reprise de la fiche technique	25
Figure 11 : Graphe du signal estimé d'un pixel en fonction de la densité lumineuse pour la longueur d'onde 500nm. ....	26
Figure 12 : organigramme de l'agencement des codes pour la prise d'image basée sur la normalisation avec une référence blanche.....	27
Figure 13 : organigramme de l'agencement des codes pour la prise d'image basée sur la normalisation avec la mesure du spectromètre .....	28
Figure 14 : Mesure du rayonnement avec le spectromètre dans le noir.....	29
Figure 15 : Ensemble de mesures du spectromètre en plein soleil avec 3 couches de téflons.....	30
Figure 16 : Ensemble de mesures du spectromètre en plein soleil avec 2 couches de téflons.....	31
Figure 17 : Graphiques des mesures du rayonnement d'une lampe au deutérium avec le spectromètre C12880 (à gauche) et le spectromètre MS-711 (à droite) dans une chambre noire. ....	32
Figure 18 : Graphiques des mesures du rayonnement du soleil le 23/05/19 avec le spectromètre C12880 (à gauche) et le spectromètre MS-711 (à droite).....	32
Figure 19 : Courbe d'étalonnage du spectromètre C12880.....	33
Figure 20 : Moyenne des erreurs sur les mesures du rayonnement solaire avec le spectromètre C12880 par rapport au spectromètre de référence.....	34
Figure 21 : Répartition des niveaux de gris mesuré sur la 1 <sup>ère</sup> référence blanche pour les photos acquises avec la méthode de normalisation basée sur la mesure du rayonnement incident via un spectromètre .....	35
Figure 22 : Répartition des niveaux de gris mesuré sur la 2 <sup>ème</sup> référence blanche (MAPIR) pour les photos acquises avec la méthode de normalisation basée sur la mesure du rayonnement incident via un spectromètre.....	36
Figure 23 : Photo prise le 08/07/19 avec la méthode de normalisation basée sur la référence blanche .....	37
Figure 24 : Répartition des niveaux de gris mesurés sur la 1 <sup>ère</sup> référence blanche pour les photos acquises avec la méthode de normalisation basée sur la convergence des niveaux de gris via la référence blanche. ....	39
Figure 25 : Répartition des niveaux de gris mesurés sur la 2 <sup>ème</sup> référence blanche pour les photos acquises avec la méthode de normalisation basée sur la convergence des niveaux de gris via la référence blanche. ....	40



# Introduction

Entre 2000 et 2016, il y a eu une augmentation considérable (plus du triple) de la valeur du commerce agricole mondial. La demande de produits agricoles a été stimulée par la forte croissance des économies émergentes et des pays en développement. La population mondiale étant attendue aux alentours des 9 milliards pour 2050, le commerce agricole ne va pas se restreindre ; au contraire, il va probablement devenir un sujet encore plus préoccupant (FAO, 2018).

Parmi ces produits agricoles, le blé est la céréale la plus produite et joue un rôle essentiel dans l'alimentation humaine ou agricole. Un accroissement de 1,2% de l'utilisation du blé par rapport à l'année précédente est attendu pour l'année 2019 (FAO, 2019).

L'agriculture de précision est une approche moderne de l'agriculture afin d'optimiser les quantités nécessaires d'intrants et par conséquent les coûts et les impacts environnementaux tout en gardant le même rendement à l'hectare. Le but est de définir, en temps réel, de manière locale et précise les caractéristiques du sol ou de la plante afin de pouvoir correctement agir sur une surface limitée et pas sur l'ensemble du champ. Les paramètres fréquemment étudiés sont les teneurs en macroéléments (azote, phosphore, potassium) ainsi que l'état sanitaire de la plante (maladie fongique ou ravage des insectes). Afin de les caractériser, l'idéal est d'utiliser une méthode de mesure non destructive. Une de ces méthodes est la prise d'image de réflectance de la plante. La figure 1 présente une courbe de réflectance typique de la feuille d'une plante.

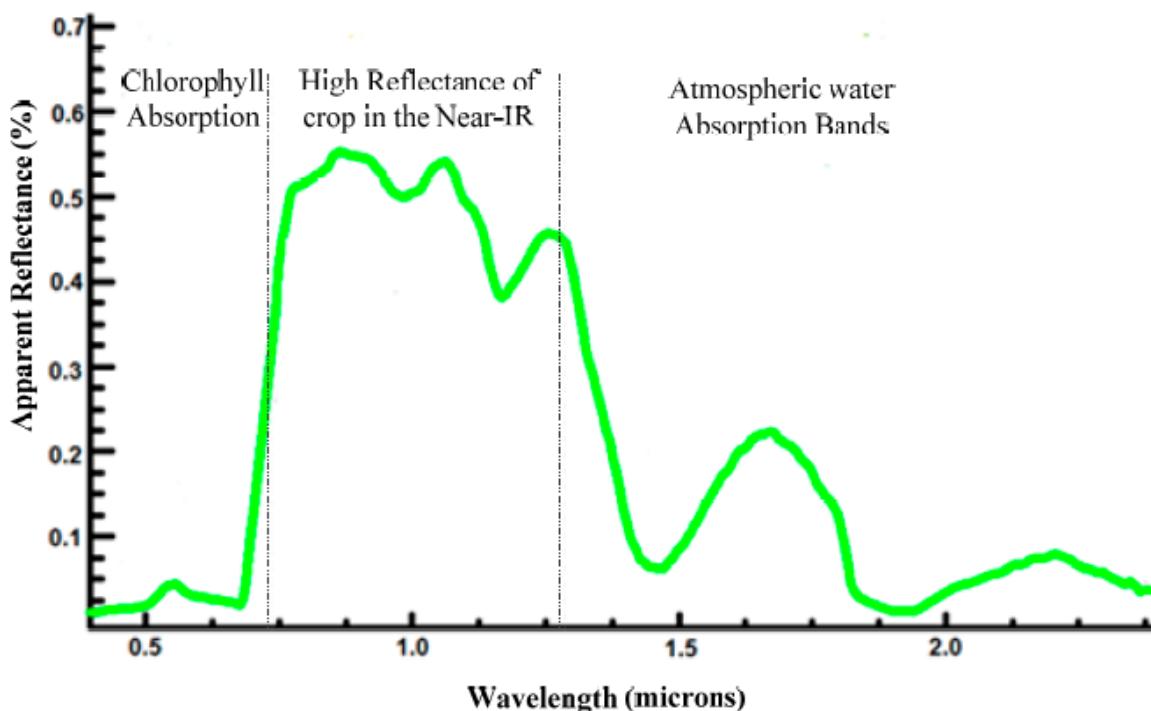


Figure 1 : Courbe de réflectance caractéristique d'une feuille saine d'une culture (Li et al., 2014).

Cette prise d'image peut se faire par proxidtection (à faible distance) ou par télédetection (satellite ou drone). En vue de pouvoir comparer les images acquises entre elles et avec la littérature, il est nécessaire de normaliser les images.

## La lumière :

Au début du XIX<sup>ème</sup> siècle, Maxwell mit en place des équations qui prédisent l'existence d'ondes électromagnétiques et leur comportement. Le spectre électromagnétique peut être exprimé en termes de longueur d'onde (en mètres), de fréquence (en Hertz) ou aussi d'énergie (en Joule ou en Electronvolts). La longueur d'onde ( $\lambda$ ) et la fréquence ( $\nu$ ) peuvent être reliées par l'équation suivante:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Avec  $c$  qui est la vitesse de la lumière ( $2.998 \cdot 10^8$  m/s)(Gonzalez et al., 2008).

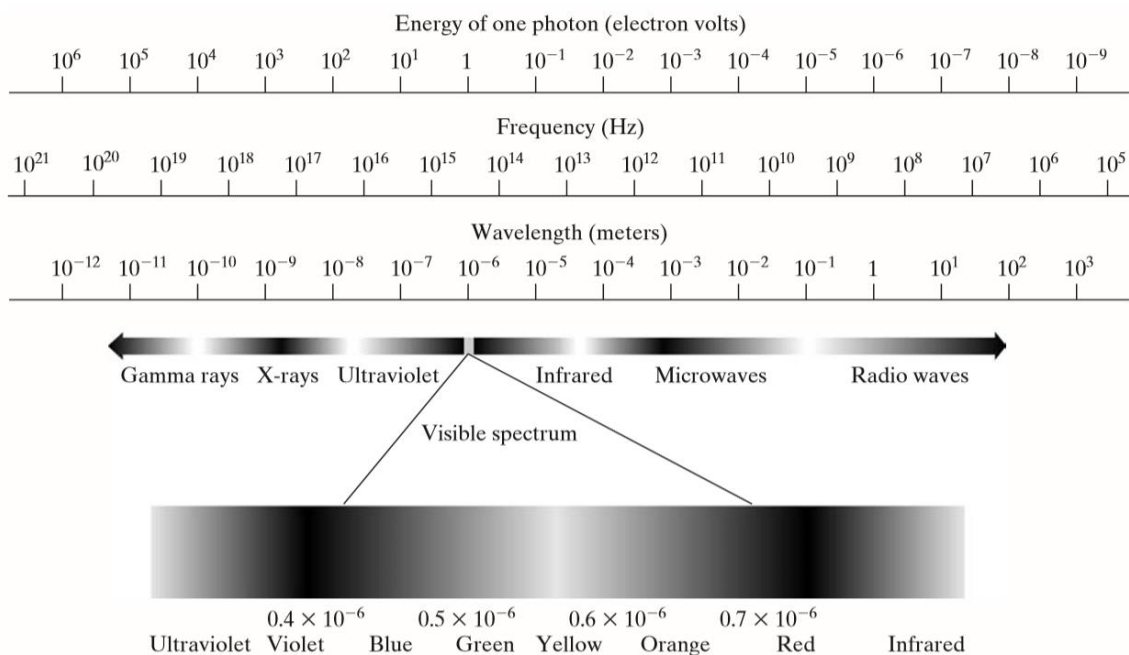


Figure 2 : Le spectre électromagnétique avec un zoom sur la partie visible du spectre (Gonzalez et al., 2008).

L'ensemble du spectre électromagnétique repris en figure 2 est généralement divisé en plusieurs zones dissemblables par leurs utilisations.

Tous les phénomènes lumineux ne sont pas expliqués pas la théorie de Maxwell. Dans un premier temps, une théorie corpusculaire de la lumière avait été proposée par Newton mais, par manque de preuves, cette théorie fut rejetée. Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, l'énergie transportée par la lumière a été quantifiée par Planck et Einstein, prouvant que la lumière a des propriétés particulières. La particule de la lumière est appelée un photon et son énergie (en Joule) est donnée par l'expression suivante:

$$E = h * \nu$$

Avec  $h$  la constante de Planck ( $6,626 * 10^{-34}$  J s) et  $\nu$  la fréquence citée précédemment. Cette énergie est proportionnelle à la fréquence, une particule avec une très haute fréquence possède donc énormément d'énergie, ce qui explique pourquoi les rayons gammas sont si dangereux pour les êtres vivants ([Openstax physics, 2019](#)). En photographie cette dualité est très importante, car les deux propriétés de la lumière sont exploitées.

## L'image :

Une image, d'un point de vue informatique, est un ensemble de pixels (*picture element*) eux-mêmes caractérisés par trois variables: leur position  $(x,y)$  et leur intensité. Il s'agit donc d'une fonction de la forme  $f(x,y)$  dont l'amplitude  $f$  est une quantité scalaire positive. La fonction  $f(x,y)$  est dépendante de deux aspects majeurs. Le premier est la source d'illumination  $i(x,y)$  de la scène étudiée, en effet, la signification physique de l'amplitude  $f$  de l'image dépend de cette source d'énergie mesurée par le capteur. Le deuxième est le ratio  $r(x,y)$  de cette énergie que la scène étudiée va réémettre, autrement dit la réflectance (ou facteur de réflexion) de l'objet. Le produit de ces deux dernières fonctions donnent la fonction de l'image :

$$f(x,y) = i(x,y) * r(x,y)$$

Avec  $i$  ayant une valeur non nulle et finie :

$$0 < i(x,y) < \infty$$

Et  $r$  variant de 0 (absorption totale) à 1 (absorption nulle) :

$$0 < r(x,y) < 1$$

(Gonzalez et al., 2008)

## Quelques concepts et notions :

« Le rayonnement spectral est le flux de rayonnement dans un faisceau par unité de longueur d'onde et par unité de surface et angle solide de ce faisceau, et est exprimé en unités internationales [ $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ ] » (Schaepman-Strub et al., 2006).

Le réflectance est le rapport entre le rayonnement sortant d'un objet [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] et le rayonnement spectral incident [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]. En prenant en compte la loi de la conservation d'énergie, ce rapport est toujours compris entre 0 et 1 (Schaepman-Strub et al., 2006).

« L'efficacité quantique est la probabilité qu'un photon d'une certaine longueur d'onde produise une paire électron/trou sur le capteur » (Shaheen et al., 2001). Il s'agit donc du rapport entre le nombre de photons incidents à un capteur et le nombre d'électrons induits sortant de ce capteur. Cette notion dépend des photons et est donc par conséquent dépendante de la longueur d'onde. Ce rapport est souvent exprimé en pourcentage.

Le temps d'exposition, temps d'intégration ou encore historiquement le temps de pause est la durée durant laquelle un capteur est exposé au rayonnement. Typiquement, l'œil possède un temps d'intégration très court, seule une fraction de seconde est nécessaire pour combiner l'énergie lumineuse et envoyer l'image au cerveau. L'avantage des appareils électroniques actuels est de pouvoir ajuster ce temps d'exposition afin de détecter des objets ternes ou au contraire trop lumineux (Openstax astronomy, 2019).

Le signal en électron des pixels d'une caméra peut-être défini comme le produit de l'efficacité quantique, de la taille du pixel au carré ainsi que de la densité lumineuse (<https://www.flir.com/discover/iis/machine-vision/how-to-evaluate-camera-sensitivity>).

$$\text{Signal (e}^-) = \text{Densité lumineuse} \left( \frac{\text{photons}}{\mu\text{m}^2} \right) * \text{taille pixel } (\mu\text{m}^2) \\ * \text{efficacité quantique} \left( \frac{\text{e}^-}{\text{photons}} \right)$$

## La normalisation d'image :

L'utilisation d'images, et par conséquent la normalisation d'images, se fait dans de multiples disciplines scientifiques telles que la médecine, l'astronomie, la biologie moléculaire, les sciences de l'environnement ou encore la neuroscience. Chaque discipline a ses propres contraintes afin de correctement normaliser les images. Dans certains cas, la normalisation consiste en une correction d'une distorsion géométrique (Caldelli et al., 2000), dans d'autre cas il s'agit d'une correction de la valeur des pixels pour prendre en compte un phénomène physique (Thompson et al., 2018) ou encore un étalonnage pour faire correspondre les nombres digitaux à des unités internationales (Piron et al., 2008). La normalisation d'image est un concept assez étendu, il n'y a pas une technique universelle : cela dépend à la fois de la discipline et de l'objectif à atteindre. La suite de ce chapitre se focalise sur la normalisation d'image pour les sciences de l'environnement, ce qui consiste la plupart du temps à obtenir des images de réflectance de plantes ou de paysages.

Le nombre de procédés nécessaire à la normalisation de l'image dépend du type d'image utilisée, de la technique appliquée et de l'environnement de l'objet d'étude, des images peuvent par exemple être acquise au sol, en haute altitude (Ryan et al., 2017) ou même du sol mais en ciblant des objets aquatiques (Caras et al., 2013).

En termes de type d'images utilisées, lorsque des images Rouge-Vert-Bleu (RVG) sont préférées à des images monochromatiques, une étape supplémentaire est nécessaire : passer du modèle RVG au modèle Teinte-Saturation-Intensité (TSI). Ces deux modèles sont convertibles mais l'avantage du modèle TSI est qu'il ne faut traiter que l'intensité des pixels, plutôt que sa perception relative des valeurs des couleurs (Joshi et al., 2017).

En ce qui concerne la technique appliquée, plus la différence d'altitude entre le capteur et la cible augmente, plus l'hypothèse que l'atmosphère n'influence pas la mesure devient fautive. Lorsque qu'une image est prise à partir d'un avion ou d'un satellite plutôt qu'à partir du sol, il faut prendre en compte l'influence atmosphérique, c'est-à-dire l'influence des gaz et aérosols sur les mesures (Thompson et al., 2018). Dans ce cas-là, la première étape consiste à convertir les nombres digitaux en rayonnement sur le capteur et ensuite de convertir ce rayonnement sur le capteur en réflectance de la surface en retirant les effets atmosphériques. Pour cela, la méthode basée sur la courbe d'étalonnage empirique semble être la plus efficace afin d'obtenir des données comparables aux données de réflectance collectées sur le terrain (Dao et al., 2019). Un exemple de courbe d'étalonnage empirique basé sur deux références de réflectances différentes est donné dans la figure 3.

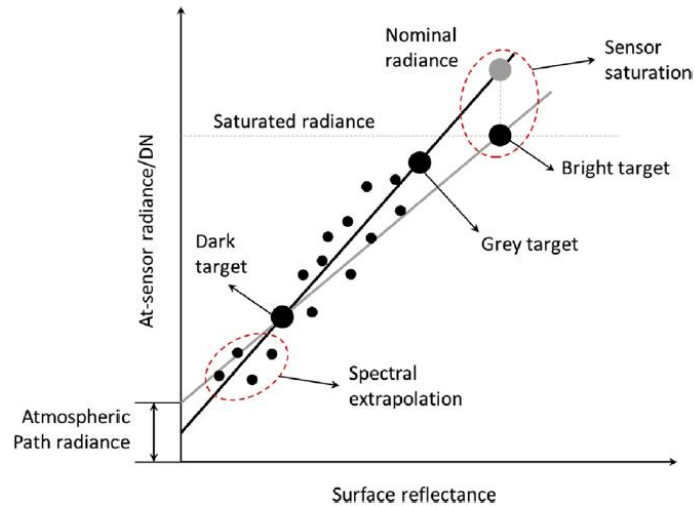


Figure 3 : Courbe d'étalonnage empirique basée sur deux cibles (Dao et al., 2019).

Toujours dans le cas de mesures aériennes, une autre méthode légèrement différente consiste à utiliser une cible de normalisation. La réflectance de la cible est estimée comme elle serait mesurée au sol sans biais atmosphérique. Ensuite, un calcul d'un biais moyen est réalisé entre la cible de normalisation et l'image Landsat pour chaque bande spectrale au-dessus de la zone d'intérêt (Potapov et al., 2012).

En ce qui concerne les mesures au sol ou à faible altitude, la méthode la plus courante est basée sur une référence blanche. Le paramètre d'exposition du capteur est typiquement ajusté pour que l'intensité de la zone la plus claire de l'image, c'est-à-dire la référence blanche, atteigne un certain niveau de saturation pour détecter tous les objets de l'étude (Leemans et al., 2017). Cependant, lorsque l'exposition du capteur est ajustée sur un objet dont la réflectance est très haute, la sensibilité du capteur à la variation d'énergie réfléchie est réduite significativement. De fait, les signaux des objets sont seulement enregistrés dans une plage d'intensité étroite à cause de la limitation du capteur (Dao et al., 2019). Malgré tout, cela reste une méthode fiable et maîtrisée dans les bonnes conditions, ce qui explique sa popularité dans le monde scientifique. Une autre méthode possible pour des mesures au sol consiste à prendre des images non normalisées, enregistrer le temps d'exposition utilisé ainsi que le rayonnement incident pour ensuite, en post-traitement, normaliser l'image en prenant en compte ces deux paramètres.

Afin d'éviter toutes les contraintes liées à la normalisation, certains scientifiques préfèrent ne pas normaliser les images et utiliser des ratios de bandes spectrales tel que, notamment, le célèbre NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Lunetta et al., 2002). Une normalisation d'image est souvent nécessaire à cause des conditions variantes d'illuminations en condition extérieures. Une autre méthode pour éviter cette normalisation est l'utilisation d'une lumière artificielle à l'extérieur et de bloquer le rayonnement incident, ainsi, le même temps d'exposition peut donc être constamment utilisé, permettant ainsi la comparaison des images entre elles et avec la littérature (Piron et al., 2008).

Le MID (Multiband Image Difference) quant à lui combine l'utilisation d'images normalisées et la comparaison de bandes spectrales (Lunetta et al., 2002).

## **Objectif :**

Dans le cadre de ce travail, la méthode de proxidétection sur du froment est investiguée. Plus précisément, le but de cette étude se résume en trois objectifs principaux :

Premièrement, mettre en place un système d'acquisition d'images sur le terrain. Cet objectif se découle en deux grands axes :

1. La partie software qui consiste à programmer la communication et la coordination de l'ensemble des appareils qui interviennent dans la suite des objectifs.
2. La partie hardware qui consiste à assurer la stabilité physique de l'ensemble des appareils.

Deuxièmement, développer une méthode de mesure en champ pour une roue à filtres avec normalisation basée sur un nouveau spectromètre.

Troisièmement, comparer cette méthode, développée au deuxième objectif, à l'approche plus classique de normalisation des images grâce à une référence blanche.

# Matériel et méthode

## Le champ :

Les images sont acquises en champ afin d'être en conditions extérieures et car ce rapport s'inscrit dans une thématique globale d'agriculture de précision. Cependant, les cibles principales de la caméra sont les références blanches et pas les épis.

Le champ est situé à Lonzée en 50°33'12.8"N et 4°44'30.9"E. L'essai variétal de 2019 s'est porté sur le froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.). L'essai comporte 29 variétés différentes, 3 modalités de date de semis ainsi que 3 modalités de traitement fongique. Il y a en tout 4 répétitions qui forment les 4 blocs de l'expérimentation. Le champ a été semé avec une densité de 250 grains/m<sup>2</sup>.

## Le matériel :

Afin d'acquérir des images dans un champ, une structure métallique capable de supporter l'ensemble du matériel est réalisée. Ci-dessous, une photo légendée du matériel utilisé. L'ensemble du matériel est détaillé point par point dans la suite du chapitre.

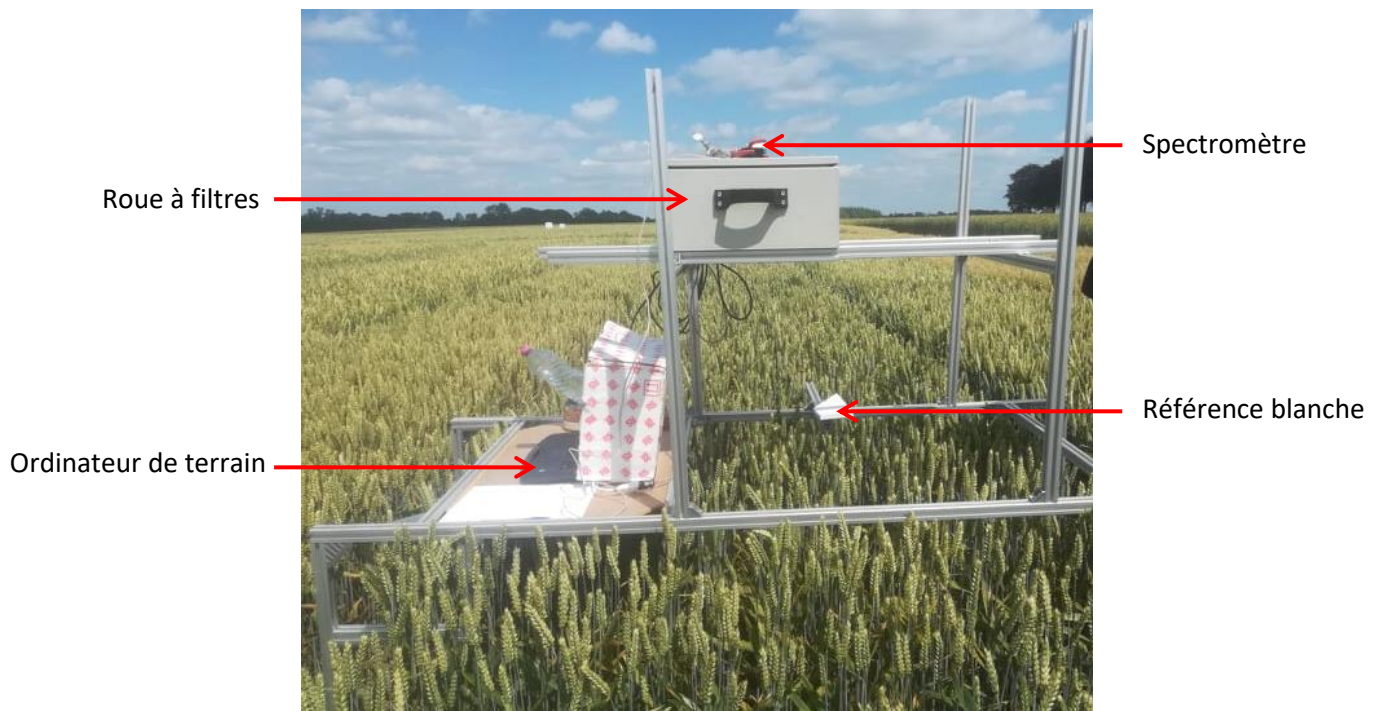


Figure 4 : Photographie de la structure supportant l'ensemble du matériel



## Références blanches :

Deux références blanches sont utilisées sur le terrain (seule une des deux est visible sur la photo précédente) et sont reprises dans la figure 5.



Figure 5 : Photographie de la référence blanche classique (gauche) et de la référence MAPIR (droite)

La première est un bout de plastique blanc facile à attacher et positionner mais dont la réflectance précise n'est pas connue. Néanmoins elle est pratique à utiliser pour la méthode de normalisation basée sur la référence blanche de par sa mobilité (le soleil bougeant rapidement sur une journée). La deuxième est une cible d'étalonnage « MAPIR » dont la courbe de réflectance est donnée dans la figure 6. Cette référence permet d'avoir une comparaison précise entre les valeurs mesurées et réelles.

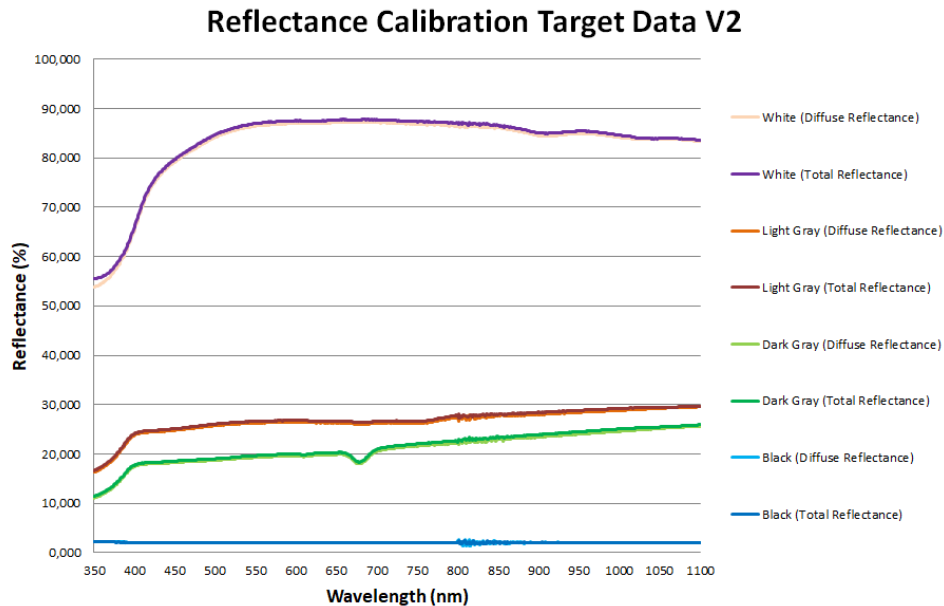


Figure 6 : Courbe de réflectance de la référence blanche « MAPIR »

### La roue à filtres :

L'intérieur de la boîte contenant la roue à filtres est composé d'un moteur, d'une batterie, de la roue à filtres et enfin de la caméra qui est attachée par une pièce imprimée en 3D à un profil Bosch. La figure 7 est une photo de l'intérieur de la boîte à filtre.

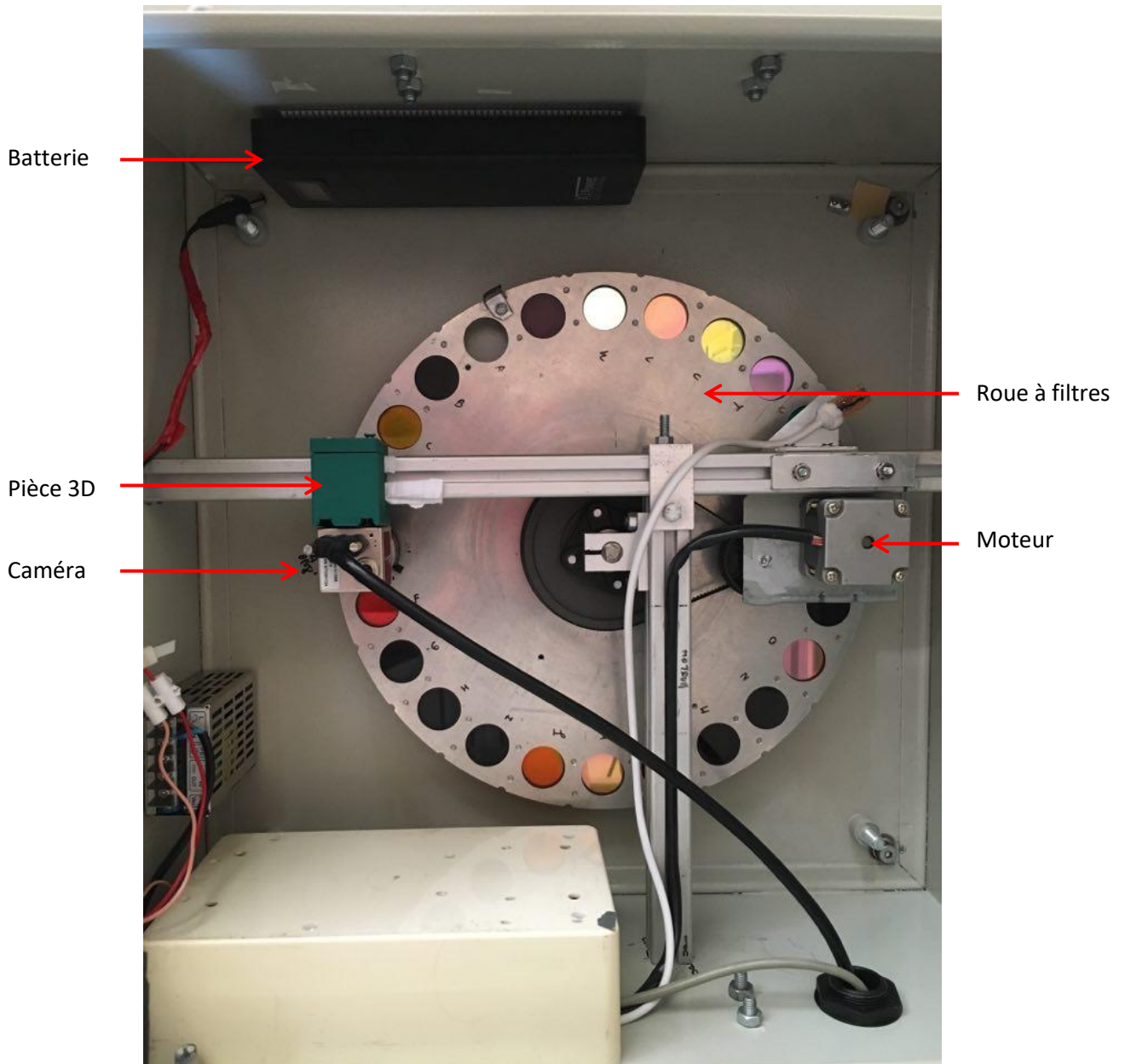


Figure 7 : Photographie de l'intérieur de la boîte contenant la roue à filtres.

Il s'agit d'un instrument permettant de sélectionner divers filtres optiques allant de 450 à 950 nm. Il y a en tout 22 filtres qui sont repris dans le tableau 1. Les filtres sont soit à bande large (de 80 à 100nm) soit à bande étroite (de 40 à 50nm). Cet instrument est utilisé afin d'identifier des longueurs d'onde caractéristiques de réponses physiologiques des plantes telles qu'une carence en azote ou une maladie fongique. La caméra et le moteur sont contrôlés par des codes écrits en Python en version 3.7.1. L'ensemble des fiches techniques des filtres n'est pas disponible.

Tableau 1 : Liste des filtres de la roue à filtre.

Longueur d'onde (nm)	Identifiant	Largeur (nm)
450	S	50
500	V	40
550	T	50
600	R	50
650	F	40
700	Q	50
750	E	40
800	W	50
850	H	40
900	I	40
950	D	40
450	U	80
500	O	80
550	K	80
600	C	80
650	J	80
700	L	80
750	X	80
800	N	100
850	G	100
900	M	100
950	P	100

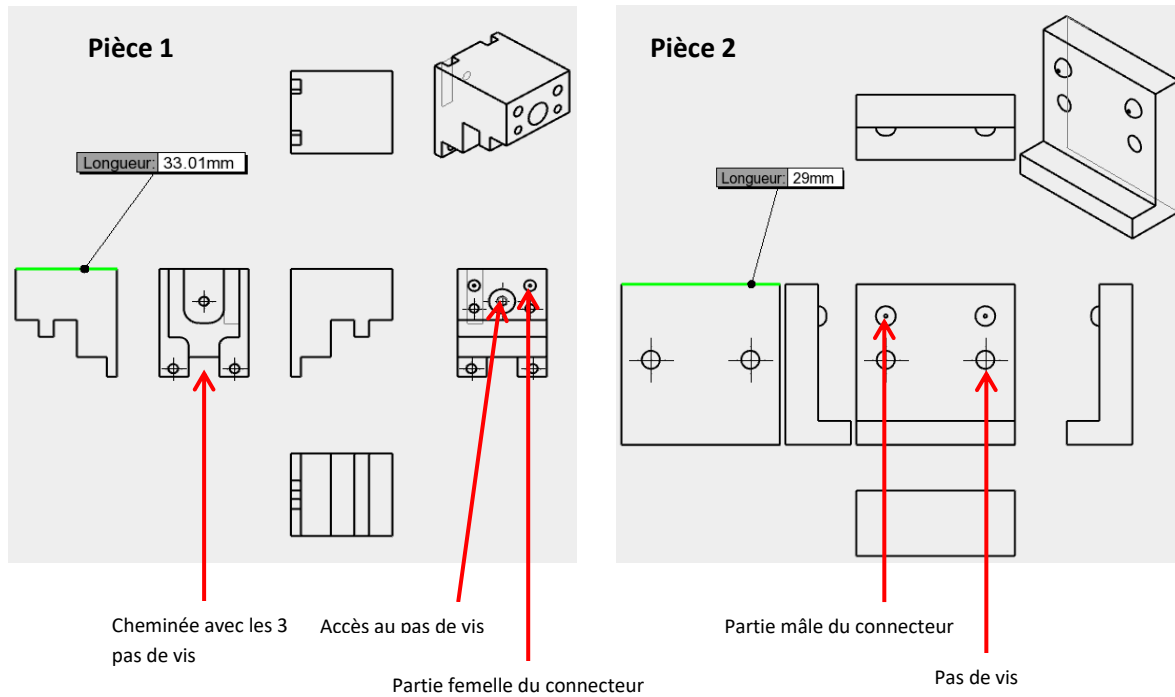
### La caméra :

Il s'agit d'une caméra *Mako U-130* développée par « *Allied Vision* ». Ce modèle prend uniquement des images en niveaux de gris. Certains éléments importants de sa fiche technique sont repris dans le tableau 2.

Tableau 2 : Caractéristiques de la caméra Mako U-130.

Caractéristiques	Mako U-130
Résolution	1280 x 1024
Taille de pixel	4.8 µm * 4.8 µm
Efficacité quantique à 529 nm	50%
Capacité de saturation	6300 e <sup>-</sup>
Seuil de sensibilité absolue	9 e <sup>-</sup>
Gamme de température opératoire	+5 à +45 C°
Format des pixels	Mono8/Mono10p
Capteur d'image	CMOS

Afin de répondre à des contraintes techniques, la caméra doit être placée précisément dans la boîte, deux pièces sont imprimées en 3D. Les plans de ces pièces sont repris en figure 8. La pièce 1 est la pièce à laquelle s'accroche directement la caméra. Elle possède trois pas de vis pour s'y attacher ainsi qu'une « cheminée » afin de faire circuler l'air pour éviter une surchauffe. De l'autre côté de cette même pièce, il y a un grand trou pour pouvoir accéder à un des pas de vis susmentionné, ainsi que deux autres pas de vis afin de relier les deux pièces ensemble autour du profil Bosch. Finalement sur cette même face il y a aussi la partie « femelle » de connecteurs sous forme de demi-sphères. Ces connecteurs ont pour but de faciliter l'emboîtement des deux pièces. La pièce 2, quant à elle, ne possède que deux pas de vis et deux connecteurs « mâles » afin de relier les deux pièces.



**Figure 8 : Schéma des pièces imprimées en 3D s'attachant à la caméra (gauche) et au profil Bosch (droite).**

### La mesure du rayonnement incident via un spectromètre :

Le spectromètre utilisé lors de ce travail est le mini-spectromètre C12880MA de la société « HAMAMATSU ».



Dans le tableau 3 sont reprises les informations importantes de la fiche technique du C12880MA.

**Tableau 3 : Caractéristiques du spectromètre C12880MA.**

<b>Caractéristiques</b>	<b>C12880MA</b>
Gamme de longueur d'onde	340 à 850 nm
Nombre de pixels	288
Résolution optique	<15 nm
Poids	5g
Gamme de température opératoire	+5 à +50 C°
Température de contrôle	absent
Temps d'exposition	1 à 1100 ms
Capteur	CMOS

Sur le terrain, cette cellule est placée dans un boîtier pratique imprimé en 3D, ce qui la protège. Au sommet de cette boîte, juste au-dessus de la cellule, du téflon est mis en place pour ses propriétés de diffusion de lumière, ce qui le rend idéal comme « tête » de spectromètre (Tsai et al., 2008).

En vue de pouvoir utiliser le spectromètre sur le terrain, il y a quatre étapes cruciales à accomplir. La première est de communiquer avec le spectromètre. Pour cela un code sur Python (3.7.1) est réalisé. La deuxième est de faire fi du bruit de fond. La troisième est de vérifier que le spectromètre fonctionne en conditions extérieures. Finalement, la dernière est d'étalonner l'appareil. En effet, jusque-là, l'appareil ne communique que des valeurs mesurées brutes, autrement dit, des valeurs qui varient avec l'intensité lumineuse mais celles-ci n'ont pas d'unités à proprement parler. Les quatre prochains paragraphes ont pour but de détailler ces quatre étapes.

### Communication avec le spectromètre :

L'ensemble de la communication avec le spectromètre est réalisée à l'aide de la version 3.7.1 du langage *Python* et du module *pySerial*. Il s'agit d'un module possédant des fonctions pour communiquer avec tous les appareils qui possèdent des ports séries.

La communication avec le spectromètre se fait de manière assez classique : une instruction est envoyée, la cellule reconnaît cette instruction, agit en fonction de cette dernière et ensuite prépare sa réponse en retour dans un buffer (qui est une mémoire tampon en informatique). Il faut ensuite aller lire ce buffer, et l'effacer une fois que l'information est lue afin d'éviter des problèmes d'écrasement de données.

L'appareil reconnaît deux types d'instructions différentes : l'initialisation de la cellule et l'acquisition des données.

L'initialisation se fait en envoyant une commande déterminant le temps d'intégration voulu pour effectuer la mesure. Le temps d'intégration correspond à la durée durant laquelle la cellule va être soumise à un rayonnement. Il est donc nécessaire de choisir un grand temps d'intégration dans le cas d'un faible rayonnement. Cette étape d'initialisation est obligatoire à l'allumage de l'appareil mais n'est pas obligatoire entre chaque mesure. Cela peut néanmoins être nécessaire dans le cas de conditions d'illumination fortement changeantes nécessitant des temps d'intégration différents mais il s'agit dans ce cas-là d'une décision reposant sur l'esprit critique de l'utilisateur et pas une condition au bon fonctionnement de l'appareil.

En ce qui concerne l'acquisition des données, elle se fait via une seconde instruction. La méthodologie du programme pour cette commande est exactement la même que pour la première, néanmoins la différence principale du code repose sur la taille du buffer à lire. Dans l'initialisation le buffer est en fait composé que d'une seule ligne, signifiant que l'initialisation s'est effectuée correctement ou pas, dans ce cas-ci le buffer est beaucoup plus gros et il faut donc trier les informations. Les données enregistrées dans le buffer sont la valeur de rayonnement pour chacun des 288 pixels du spectre ainsi que la température de l'ensemble de la cellule et le temps d'intégration utilisé.

## Bruit de fond

A partir d'ici, les informations reçues du spectromètre sont triées mais les valeurs brutes contiennent à la fois l'information désirée mais aussi le bruit de fond.

Le bruit de fond est un signal indépendant de la mesure qui se superpose au signal mesuré par le capteur. Ce signal parasite est fonction du temps d'intégration et de la température. Il est spécifique à chaque spectromètre et plus précisément à chaque pixel du spectromètre. Afin de se débarrasser de ce signal parasite qui influence les mesures, il y a deux méthodes possibles : soit faire deux mesures, une en conditions illuminées suivie de près par une dans le noir et faire la différence entre les deux ; soit estimer le bruit sur base du temps d'intégration et de la température mesurée et de nouveau faire la différence entre la mesure et le bruit. La deuxième méthode est choisie afin d'avoir un spectromètre plus pratique à utiliser sur le terrain.

Cette estimation du bruit pour un pixel peut être exprimée par une équation du premier degré dont voici l'équation :

$$\text{Bruit} = p(T) + m(T) * t_i$$

Avec :

« T » la température de la cellule.

« t<sub>i</sub> » le temps d'intégration

Le bruit dépend linéairement avec le temps d'intégration, « p » qui est l'ordonnée à l'origine dépend linéairement avec la température et enfin « m » qui est la pente dépend exponentiellement avec la température. Voici les paramètres « p » et « m » de manière plus détaillée :

$$p = c * T + d$$

$$m = e^{a*T} * e^b$$

Avec :

« a », « b », « c », « d » des paramètres empiriques.

« T » la température de la cellule.

Afin d'obtenir les coefficients empiriques pour chaque pixel, le spectromètre est placé dans une cuve de température contrôlée et dans le noir complet. Dans un premier temps, seul le temps d'intégration est changé et des mesures sont réalisées, puis différentes températures sont testées, ce qui a permis d'isoler les valeurs des paramètres. Chaque pixel du spectromètre possède donc ces 4 paramètres empiriques.

### Le spectromètre en conditions extérieures

La troisième étape à réaliser afin de pouvoir utiliser le spectromètre en condition d'illumination naturelle est de s'assurer que les pixels ne saturent pas et que seules les longueurs d'onde d'intérêt aient un impact sur la mesure. Tout d'abord, en ce qui concerne la saturation :

Il est souhaitable d'avoir un temps d'intégration minimal sur le terrain pour réduire le bruit (même si il est corrigé, autant qu'il soit minimal). Il est donc nécessaire de vérifier que le spectromètre ne soit pas en saturation lorsque le temps d'exposition est minimal mais il ne faut pas non plus que le signal soit trop faible avec ce temps d'exposition. Différents scénarios sont testés et sont présentés dans les résultats.

Afin d'éviter l'influence potentielle de longueurs d'ondes non mesurées par le spectromètre sur les longueurs d'onde mesurées, un filtre passe bande (figure 9) est appliqué sur le capteur C12880. Ainsi, seules les longueurs d'onde d'intérêt passent par le filtre et atteignent le capteur.

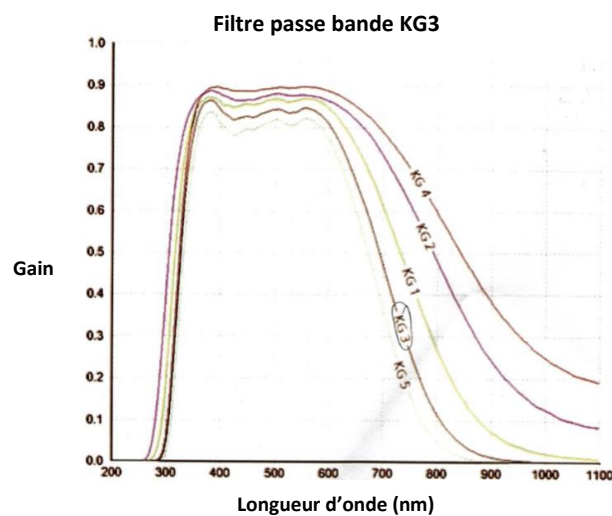


Figure 9 : Graphique du gain pour chaque longueur d'onde du filtre passe bande KG3.

Le capteur C12880 possède une gamme de longueurs d'onde allant de 307 à 881 nm. Le filtre KG3 possède une pente forte aux alentours de 300 nm, ce qui convient parfaitement au capteur du spectromètre. Par contre, la partie passe-bas du filtre commence sa coupure aux alentours des 600 nm et la finit aux alentours des 800 nm. Ce qui signifie que la mesure qui concerne la partie supérieure à 600 nm du spectromètre possède une intensité inférieure et que le bruit a donc un impact relatif plus grand. Ce point mérite d'être mentionné dans ce paragraphe mais est détaillé plus en profondeur dans la partie étalonnage du spectromètre.



### L'étalonnage du spectromètre

Ce paragraphe décrit la dernière étape nécessaire afin de pouvoir utiliser le spectromètre. La communication est établie, le bruit est retiré et la saturation est gérée mais jusque-là le spectromètre ne donne que des données brutes, c'est-à-dire un signal qui varie en fonction du rayonnement mais qui est sans unité. Afin de pouvoir étalonner l'appareil, un autre spectromètre, l'« EKO MS-711 », considéré comme une référence, est utilisé. Quelques caractéristiques importantes de ce spectromètre sont reprises dans le tableau 4.

**Tableau 4 : Caractéristiques du spectromètre EKO MS-711**

<b>Caractéristiques</b>	<b>MS-711</b>
Gamme de longueur d'onde	300 à 1100 nm
Précision sur la longueur d'onde	+/- 0,2nm
Résolution optique	<7 nm
Gamme de température opératoire	-10 à +50 C°
Température de contrôle	25°C
Temps d'exposition	10 à 5000 ms
Champ de vision	180°

Le but de cet étalonnage est d'obtenir une densité de flux en  $W/m^2$  par  $\mu m$  correspondant au spectre solaire. Dans une chambre noire, une lampe au deutérium est utilisée car elle possède un pic de rayonnement à 657 nm. Une mesure est effectuée avec l'appareil de référence, pour vérifier que le pic est toujours à 657 nm, et une mesure est effectuée sur le C12880 pour contrôler si le pic mesuré se situe bien sur la bonne longueur d'onde.

Ensuite, un jeu de donnée d'étalonnage est acquis à l'extérieur, lors d'une journée ensoleillée, avec les deux appareils et une courbe d'étalonnage est créée à partir de ces mesures. L'ensemble des mesures et des graphiques sont présentés dans les résultats.

## Les méthodes de normalisation mises en place :

Deux méthodes différentes de normalisation des images acquises en conditions de lumière naturelle sont mises en place. L'objectif de ces méthodes est d'obtenir des images sur lesquelles un objet aura toujours la même valeur de pixel indépendamment des conditions météorologiques. Pour cela, il est nécessaire d'ajuster le temps d'exposition de la caméra en fonction de la luminosité. Le gain et la focale de la caméra reste des constantes dans le cadre de ce travail.

La 1<sup>ère</sup> méthode mise en place est basée sur la mesure du rayonnement solaire par un spectromètre et sur les caractéristiques intrinsèques de la caméra. Les caractéristiques en question sont :

- la taille des pixels :  $4.8\mu\text{m} * 4.8\mu\text{m}$
- la capacité de saturation des pixels : 6300 électrons
- l'efficacité quantique pour chaque longueur d'onde qui est reprise dans la figure 10 :

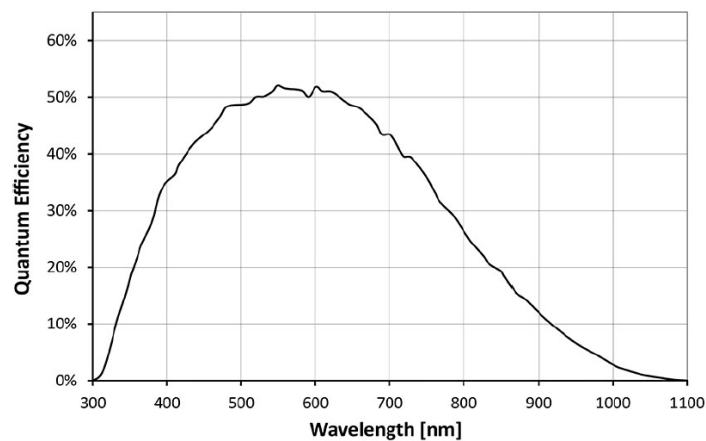


Figure 10 : Graphe de l'efficacité quantique de la caméra Mako U-130 reprise de la fiche technique

Le signal des pixels de la caméra est défini par l'équation suivante (cfr état de l'art) :

$$\text{Signal } (e^-) = \text{Densité lumineuse} \left( \frac{\text{photons}}{\mu\text{m}^2} \right) * \text{taille pixel } (\mu\text{m}^2) \\ * \text{efficacité quantique} \left( \frac{e^-}{\text{photons}} \right)$$

Si ce signal atteint la capacité de saturation des pixels, c'est-à-dire 6300  $e^-$  alors le pixel est saturé ce qui se traduit par une valeur de 255 (codée en 8 bit) sur l'image. Le but est donc de contrôler la densité lumineuse qui atteint le capteur afin d'atteindre une valeur cible de niveau gris des pixels. La consigne est définie arbitrairement à 235 afin de garder une marge de sécurité. Cette valeur de 235 se traduit donc en électrons par une valeur de 5800. Afin d'illustrer, la figure 11 reprend un graphe du signal en fonction de la densité lumineuse pour la longueur d'onde de 500nm.

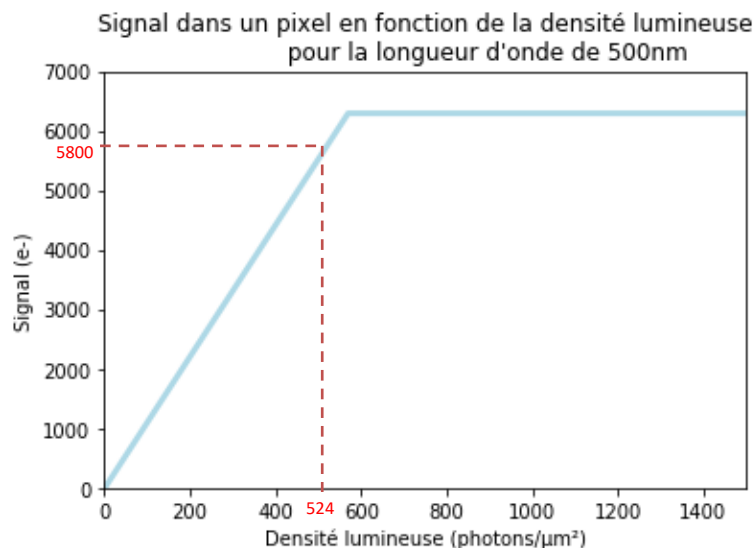


Figure 11 : Graphe du signal estimé d'un pixel en fonction de la densité lumineuse pour la longueur d'onde 500nm.

Une densité lumineuse est un nombre de photons par unité de surface mais en faisant intervenir la constante de Planck, il est possible de mettre en évidence l'énergie que chaque photon possède en fonction de sa longueur d'onde (cfr chapitre sur la lumière). La densité lumineuse peut donc être transformée en une densité d'énergie en  $J/m^2$ . La mesure du rayonnement incident par le spectromètre est en  $W/m^2$  pour chaque longueur d'onde. Le quotient de la densité d'énergie désirée par le rayonnement incident permet donc d'obtenir une durée qui est le temps d'exposition de la caméra. Cela signifie qu'avec ce temps d'exposition, un objet réfléchissant 100% de la lumière incidente aura une valeur de 5800 électrons donc une valeur de 235 en niveau de gris sur l'image.

La 2<sup>ème</sup> méthode est un procédé itératif qui se base sur une référence blanche. La caméra prend une image avec un certain temps d'exposition et la valeur des pixels de la référence blanche est mesurée. La valeur de la consigne est définie à  $235 \pm 6$  (erreur de 5%), si la valeur des pixels de la référence blanche est comprise dans l'intervalle de la consigne alors l'algorithme s'arrête et prend une image, si ce n'est pas le cas, l'algorithme tente de converger vers la consigne en adaptant le temps d'exposition. La signification de cette méthode de normalisation est légèrement différente de la précédente, dans ce cas-ci, la valeur de 235 est attribuée à un objet ayant la même réflectance que la référence blanche. Cependant, la référence blanche est imparfaite et n'a pas une réflectance de 100% pour toutes les longueurs d'onde (mais elle s'en rapproche au maximum). Afin d'obtenir une image de réflectance absolue comparable avec la littérature, il faut donc réaliser une règle de trois en prenant en compte la réflectance de la référence blanche pour chaque longueur d'onde.

## Software pour acquérir les images sur le terrain :

Une interface graphique est créée afin de pouvoir facilement contrôler l'ensemble des appareils sur le terrain. Les interactions entre les différents programmes sont rapidement détaillées dans ce paragraphe. Afin de faciliter la visibilité, deux organigrammes distincts sont créés et sont présentés dans les figures 12 et 13. Seules les commandes majeures y sont reprises.

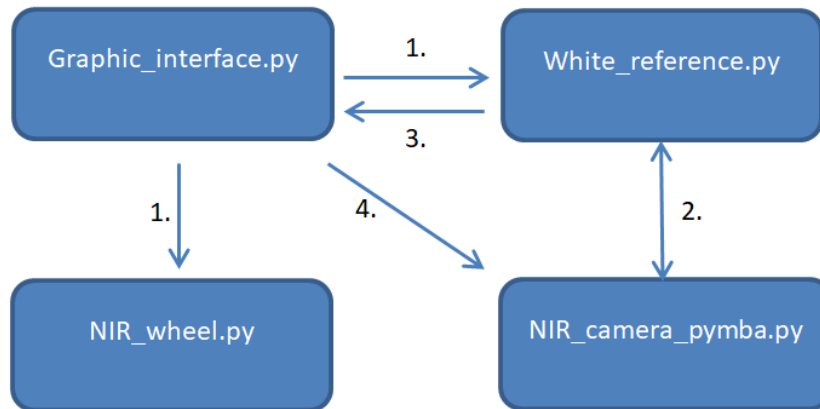
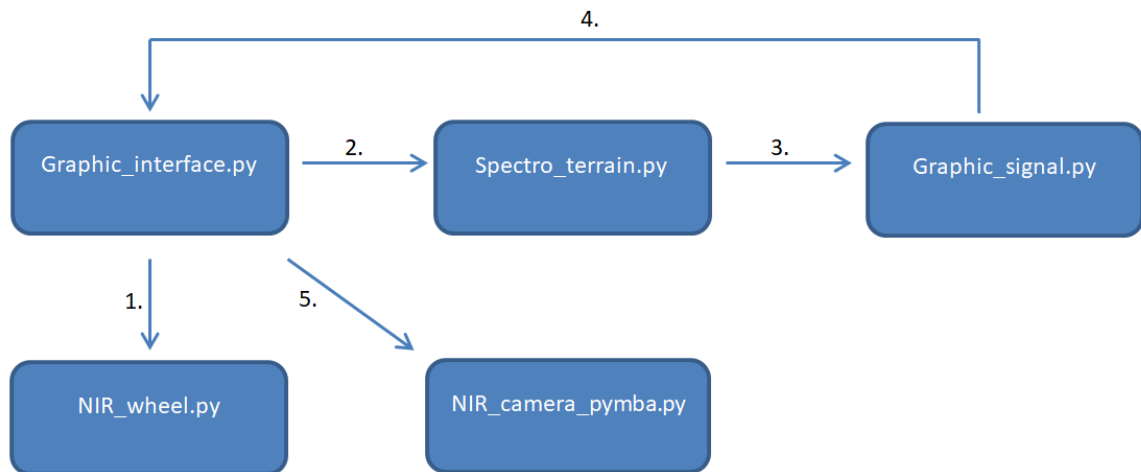


Figure 12 : organigramme de l'agencement des codes pour la prise d'image basée sur la normalisation avec une référence blanche.

1. L'utilisateur sélectionne un ensemble de filtres préenregistrés. L'information est relayée à deux codes. Le code « NIR\_wheel .py » dirige la roue vers le premier filtre de la liste.
2. Le code « White\_reference.py » teste de prendre une image avec un temps d'exposition (« NIR\_camera\_pymba.py »). Si la valeur de la référence blanche est comprise dans l'intervalle [229 ; 241], alors le code passe à l'étape 3. Sinon, le code continue d'essayer de converger en testant un nouveau temps d'exposition en fonction du temps d'exposition précédent ainsi que de la valeur précédente de la référence blanche.
3. Le temps d'exposition nécessaire est relayé à l'interface graphique.
4. L'interface graphique commande à la caméra de prendre une image et la sauvegarde dans un fichier. Ensuite, il y a un retour à l'étape 2 avec le filtre suivant et ainsi de suite jusqu'à ce que l'ensemble des filtres soient passés.



**Figure 13 : organigramme de l'agencement des codes pour la prise d'image basée sur la normalisation avec la mesure du spectromètre**

1. L'utilisateur sélectionne un ensemble de filtres préenregistrés. L'information est relayée au code « NIR\_wheel .py » qui dirige la roue vers le premier filtre de la liste.
2. L'interface graphique commande au code « Spectro\_terrain.py » de mesurer le rayonnement incident et d'enregistrer l'information dans un fichier Excel.
3. Ensuite, les mesures du rayonnement sont transférées vers « Graphic\_signal.py » et le code va déterminer le temps d'exposition nécessaire en fonction du rayonnement incident et du filtre utilisé.
4. Le temps d'exposition nécessaire est relayé à l'interface graphique.
5. L'interface graphique commande à la caméra de prendre une image et la sauvegarde dans un fichier. Ensuite, il y a un retour à l'étape 2 avec le filtre suivant et ainsi de suite jusqu'à ce que l'ensemble des filtres soient passés.

Une fois que les images sont acquises sur le terrain, les niveaux de gris des références blanches sont mesurés sur l'ensemble des images.

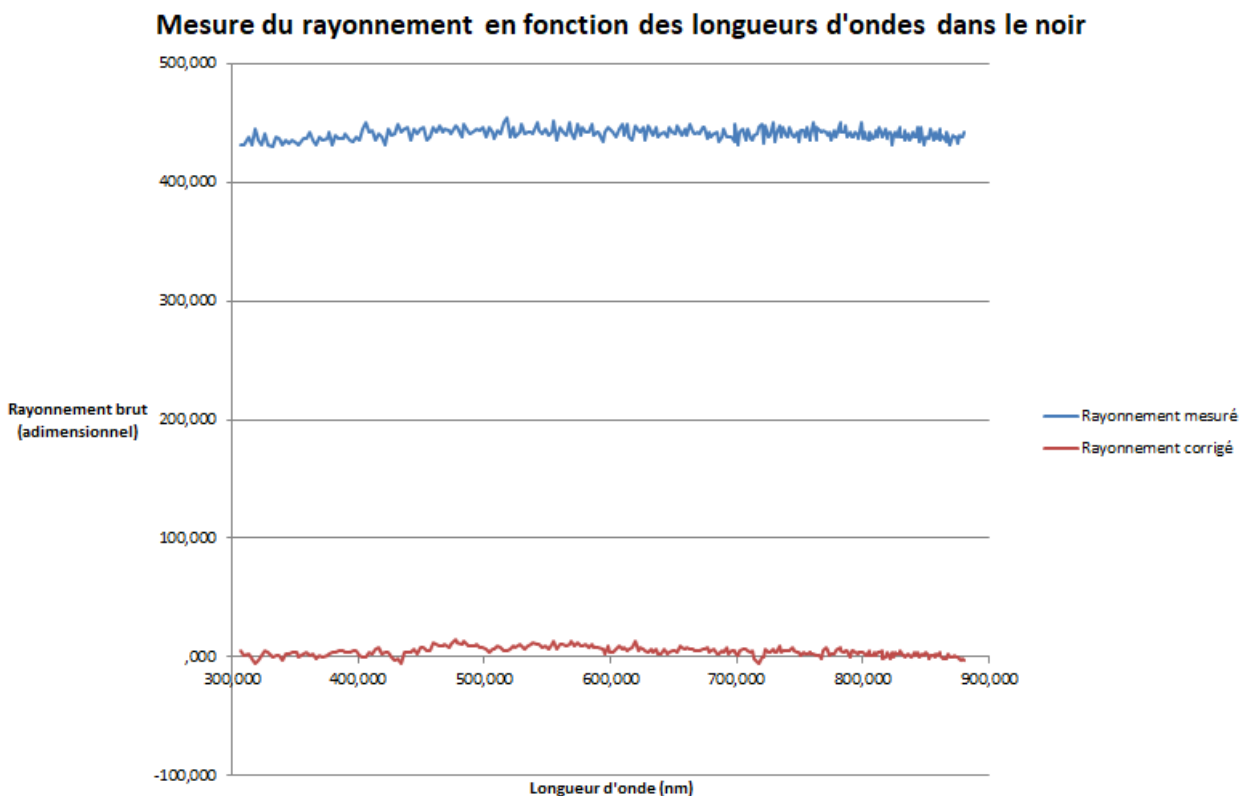
# Résultat et discussion

## Le spectromètre :

### Le retrait du bruit du spectromètre

Cette estimation du bruit est entièrement dépendante de la température, du temps d'intégration mais aussi, comme dit précédemment, des composants du spectromètre. Il n'est donc pas à exclure que la mesure des paramètres empiriques doive être réalisée à nouveau dans le cas d'une détérioration de l'appareil au cours du temps.

Une fois que le bruit est obtenu, il suffit de le soustraire à la mesure réalisée. La figure 14 est un graphe d'une mesure du rayonnement dans le noir pour visualiser le bruit initial et la correction effectuée.



**Figure 14 : Mesure du rayonnement avec le spectromètre dans le noir.**

L'information évidente de la figure 14 est que le bruit est quasiment entièrement retiré. Il reste malgré tout un faible bruit, le signal ne vaut pas exactement zéro pour chaque pixel. Ce reste peut-être dû à la précision des différents appareils ayant servi à la détermination des paramètres empiriques ainsi qu'à la variabilité intrinsèque du spectromètre.

### Test de saturation du spectromètre en conditions naturelles

Au-dessus de la cellule du spectromètre, du téflon est ajouté afin d'amoindrir et de diffuser le rayonnement entrant. Le graphe repris dans la figure 15 illustre une série de mesures réalisées à différents temps d'intégration en plein soleil avec 3 couches de téflons.

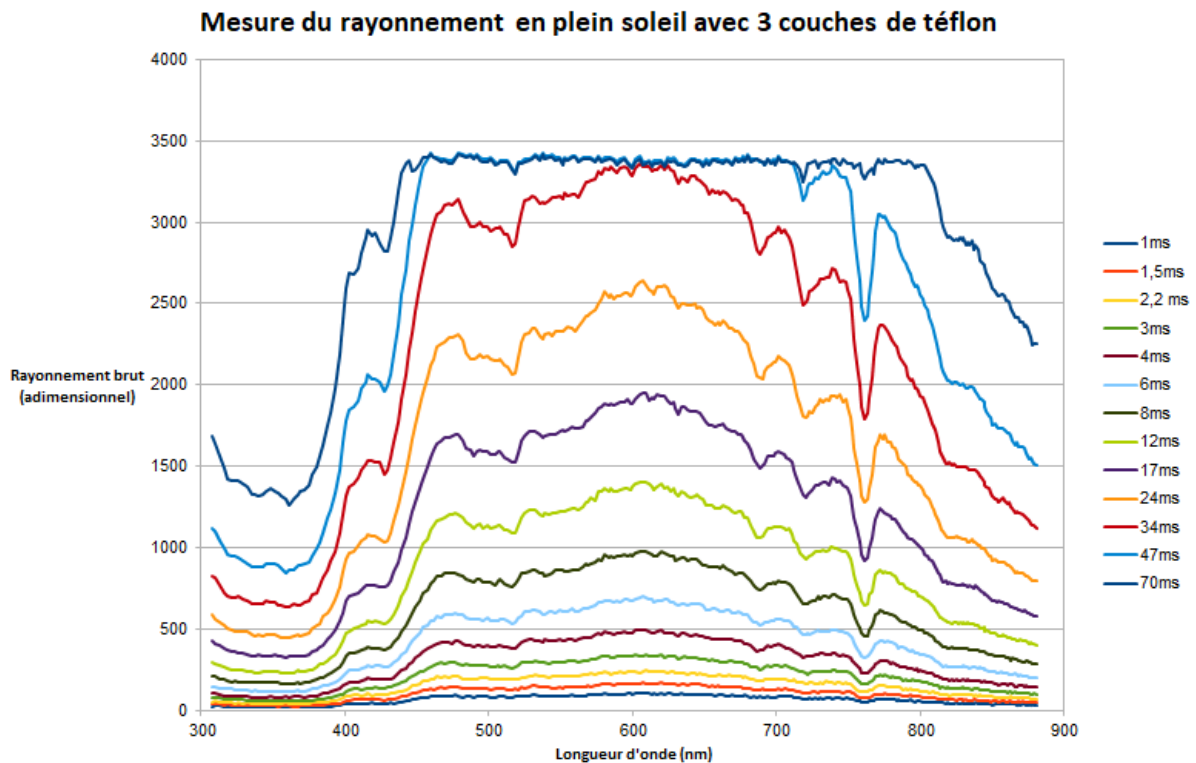


Figure 15 : Ensemble de mesures du spectromètre en plein soleil avec 3 couches de téflons.

Sur le graphe de la figure 15, il est clairement visible que la saturation arrive assez tard (11<sup>ème</sup> temps d'intégration sur les 20 possibles), ce qui est positif, cela montre qu'il ne faut pas ajouter de couche supplémentaire de téflon. Cependant, le signal pour les plus faibles temps d'intégration est beaucoup trop atténué hors ce sont ceux-là qui sont les plus intéressants afin de réduire le bruit.

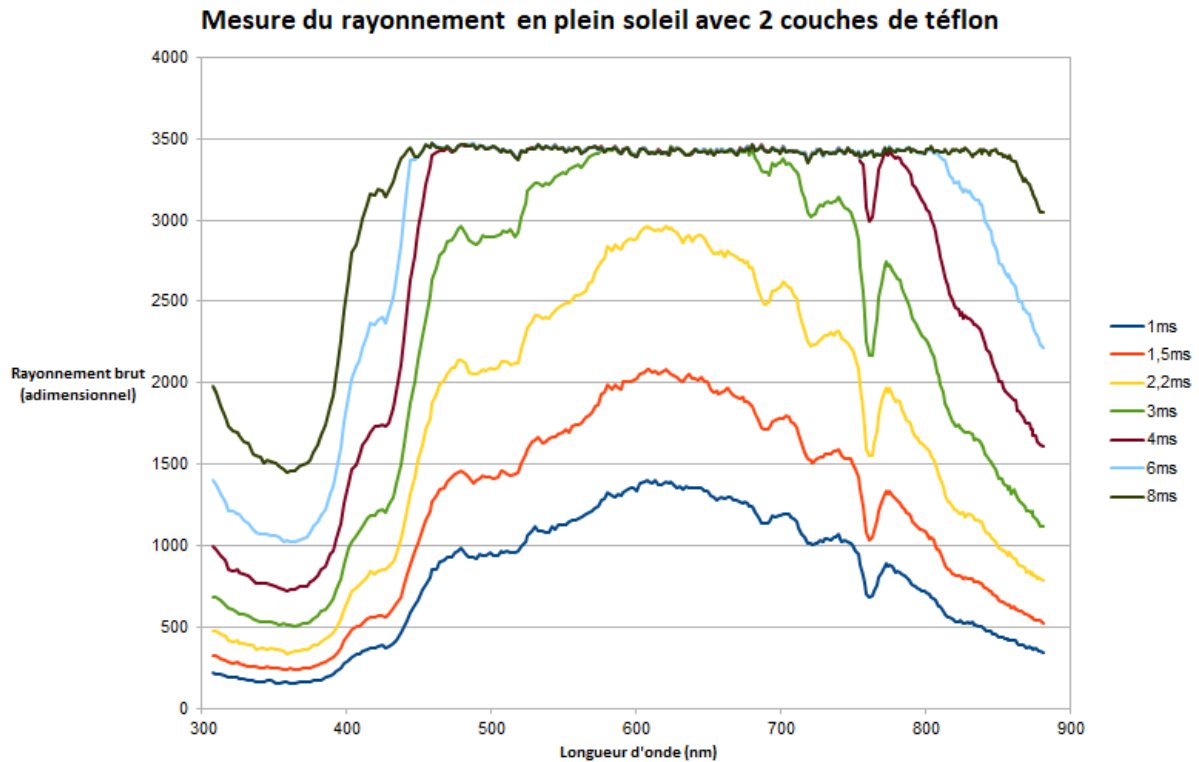


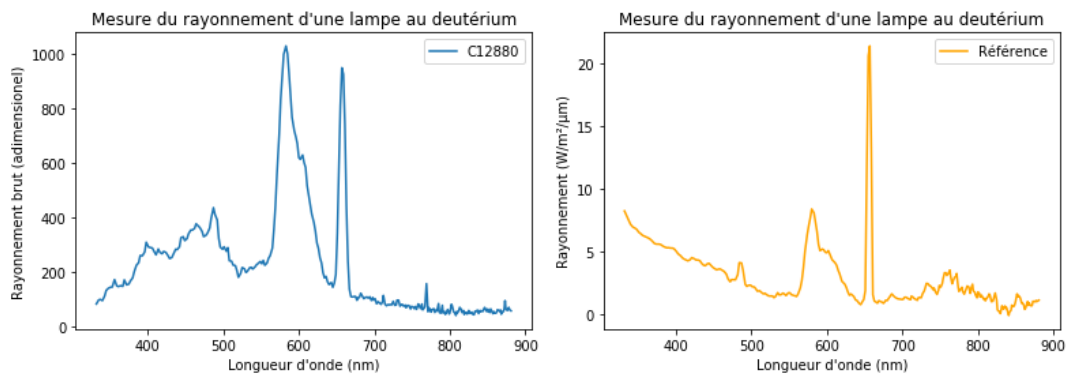
Figure 16 : Ensemble de mesures du spectromètre en plein soleil avec 2 couches de téflons

Le graphe de la figure 16 illustre une autre série de mesures réalisées avec 2 couches de téflon. Dans ce scénario-là, le temps d'exposition de 2,2 ms semble idéal, le signal est grand sans être saturé et il reste deux plus petits temps d'intégration si nécessaire. En effet, ces tests ont été réalisés mi-mai, il est possible que ce rayonnement, considéré comme maximal, soit en fait inférieur au rayonnement maximal de juillet ou d'août. Il est donc important de garder une porte de sortie dans le cas où malgré tout, le spectromètre saturerait sur le terrain.



## L'étalonnage du spectromètre

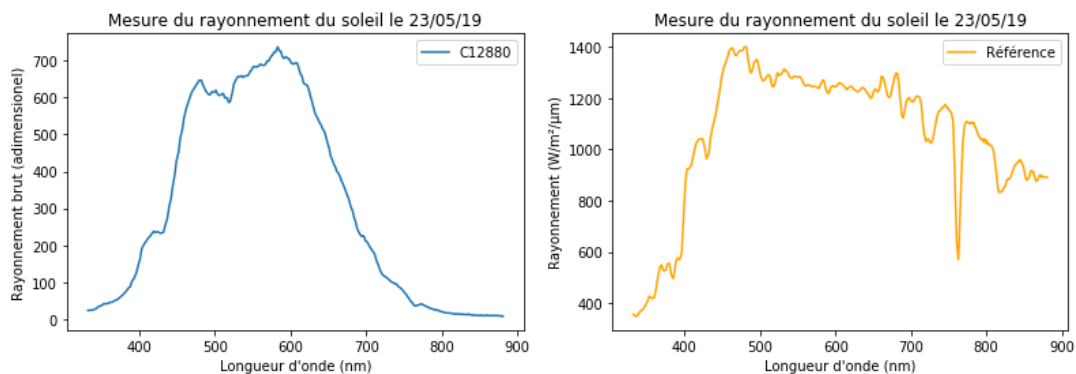
La figure 17 ci-dessous reprend les deux mesures effectuées en chambre noire avec une lampe au deutérium pour vérifier la concordance des pics d'intensité lumineuse. Malgré que les intensités ne soient pas les mêmes, ce qui est discuté par après, le pic du deutérium est mesuré à la bonne longueur d'onde et ne nécessite donc pas de correction.



**Figure 17 : Graphiques des mesures du rayonnement d'une lampe au deutérium avec le spectromètre C12880 (à gauche) et le spectromètre MS-711 (à droite) dans une chambre noire.**

La forte différence d'intensité visible entre les deux graphiques de la figure 17 s'explique par le grand temps d'intégration (90ms) nécessaire pour capturer le faible rayonnement (en comparaison au soleil) de la lampe. Pour éviter cette dépendance, les mesures effectuées par le C12880 sont divisées par le temps d'intégration.

La figure 18 reprend le jeu de donnée d'étalonnage acquis à l'extérieur, lors d'une journée ensoleillée avec les deux spectromètres.



**Figure 18 : Graphiques des mesures du rayonnement du soleil le 23/05/19 avec le spectromètre C12880 (à gauche) et le spectromètre MS-711 (à droite).**

Le coefficient d'étalonnage pour chaque longueur d'onde est calculé en divisant la mesure de référence par la mesure du C12880. Ce qui donne la courbe d'étalonnage reprise dans la figure 19.

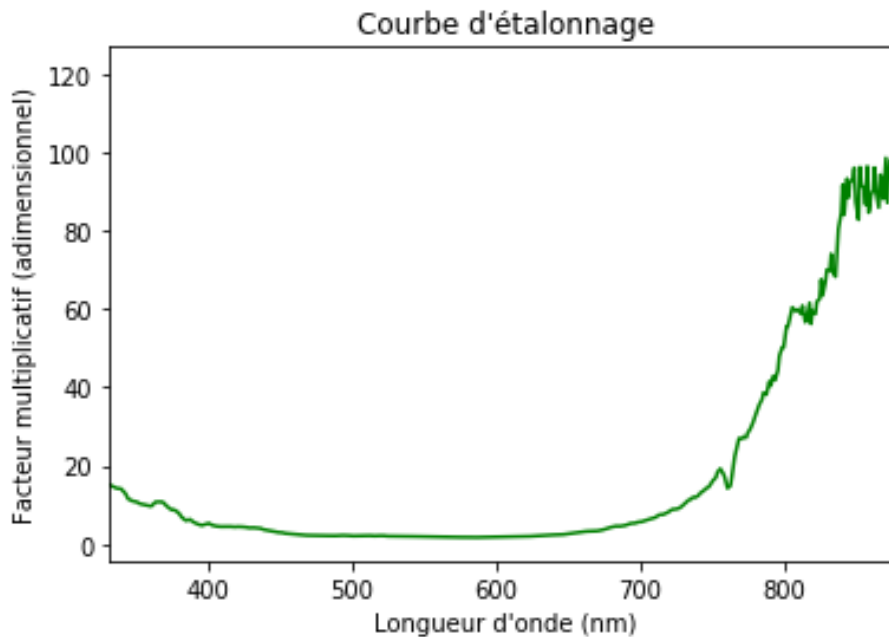


Figure 19 : Courbe d'étalonnage du spectromètre C12880.

La courbe d'étalonnage de la figure 19 présente trois zones distinctes : la zone avant 400nm, la zone entre 400 et 700nm et enfin la zone supérieure à 700nm.

La première zone possède un facteur multiplicatif important de presque x 20. Cela peut s'expliquer par la proximité avec la première coupure du filtre passe bande. En effet, malgré que la pente théorique du filtre soit forte, il est possible que les premières mesures aux alentours des 300nm soient partiellement coupées par le filtre. Cette partie du signal nécessite donc un facteur multiplicatif plus important afin d'approcher le spectre solaire. Cela peut sembler problématique, car un facteur multiplicatif important signifie aussi une amplification importante du bruit. Néanmoins, ces longueurs d'onde ne sont pas exploitées lors de ce travail car le premier filtre de la roue à filtre est de 450nm avec une largeur de 50nm donc la première valeur utilisée est celle de la longueur d'onde 425nm située dans la deuxième zone.

La deuxième zone présente un facteur multiplicatif assez faible, cela signifie que la mesure du spectre solaire du spectromètre C12880 s'approche déjà assez fort de celui de la référence. Il s'agit donc de la zone dont le bruit est le plus faiblement amplifié et par conséquent le rapport signal sur bruit (SNR) le plus important. La mesure du spectre qui va de 400 à 700 nm est donc la plus fiable.

La troisième zone présente, quant à elle, un facteur multiplicatif très important, surtout après 750nm. Cela s'explique à nouveau par le filtre KG3 appliqué sur le spectromètre. A partir de 750nm, il n'y a donc quasiment que du bruit qui est amplifié. Cette bande du spectre n'est donc plus considérée car elle présente une trop grande source d'incertitude sur la mesure.

Dans le but de vérifier si l'étalonnage est correct, trois sets de données de validation sont acquis au soleil et à l'ombre le 24/05/19. Il s'agit à nouveau d'une journée fortement ensoleillée. L'erreur de la mesure est calculée en pourcentage par rapport à la référence et la figure 20 reprend la moyenne de ces erreurs pour les trois sets de données au soleil et pour les trois sets de données à l'ombre. Il y est remarquable que les mesures au soleil présentent une faible erreur, en moyenne moins de 4%. À l'opposé, les mesures à l'ombre possèdent une erreur plus conséquente et avec une plus grande variabilité. Cela peut s'expliquer par le fait que les mesures sont effectuées complètement à l'ombre d'un bâtiment, il n'y a donc absolument aucun rayonnement direct alors que lors de l'étalonnage les mesures sont effectuées exclusivement avec du rayonnement direct. Néanmoins cette erreur serait sans doute encore plus importante sans les couches de téflon qui diffusent partiellement le rayonnement incident au capteur.

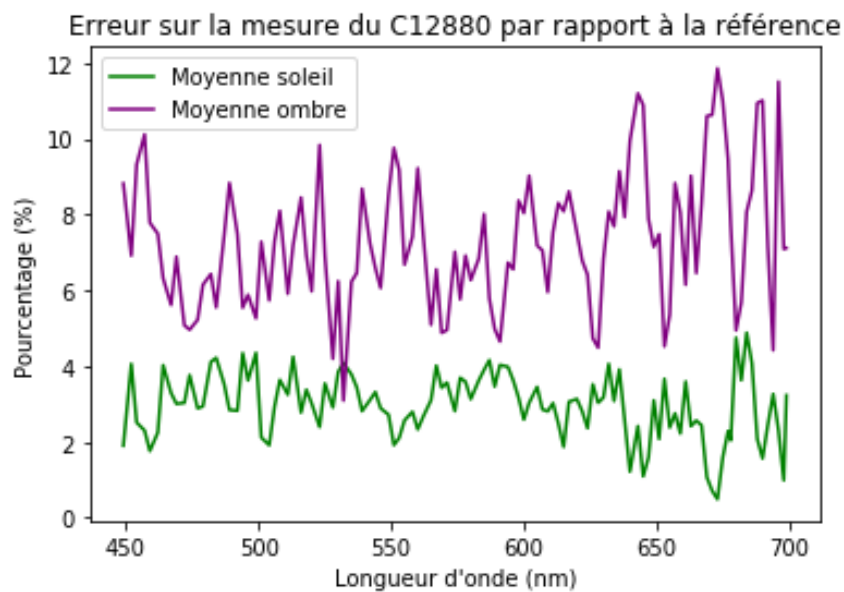
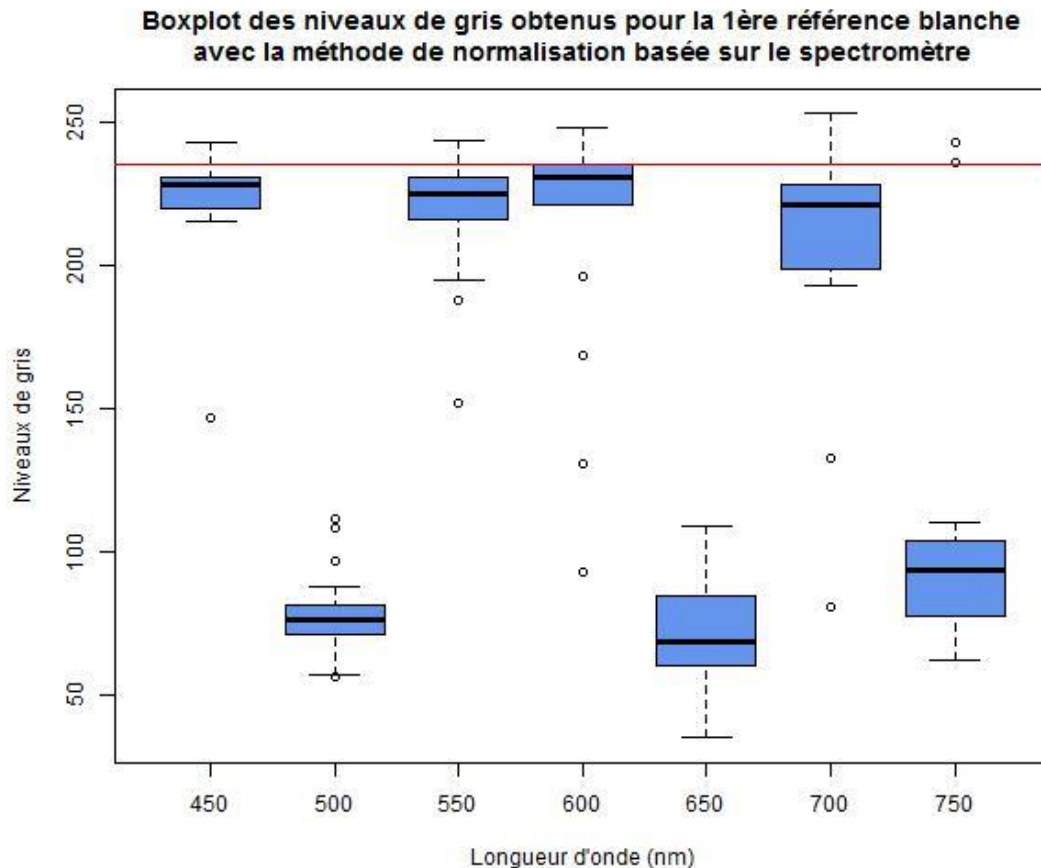


Figure 20 : Moyenne des erreurs sur les mesures du rayonnement solaire avec le spectromètre C12880 par rapport au spectromètre de référence.

## Les méthodes de normalisation des images

### La méthode de normalisation basée sur le spectromètre :

Les figures 21, 22, 24 et 25 présentent les résultats obtenus le 08/07/19, sur base de 17 répétitions d'images. Cette journée se caractérise par une très forte alternance de nuages.



**Figure 21 : Répartition des niveaux de gris mesuré sur la 1<sup>ère</sup> référence blanche pour les photos acquises avec la méthode de normalisation basée sur la mesure du rayonnement incident via un spectromètre**

Premièrement, la droite rouge à la valeur 235 est la valeur maximum qu'un objet ayant une réflectance de 100% pourrait atteindre. Cela correspond à la consigne de 5800 sur 6300 électrons.

Deuxièmement, dans la figure 21, la réflectance précise de cette référence blanche n'est pas connue, il est donc plus intéressant de regarder la répartition globale des boxplots ainsi que les valeurs extrêmes qui sont représentées par des points blancs creux. Il y a en effet, quelques valeurs fortement éloignées de l'ensemble des points, cela s'explique par la variabilité de la météo. En effet, malgré que chaque photo soit précédée directement d'une mesure du rayonnement, l'alternance rapide des nuages a provoqué des mauvaises interprétations du rayonnement, ce qui résulte en un certain nombre d'images soit trop sombres, soit saturées. Ce nombre d'images incorrectement normalisées est néanmoins assez faible (1 à 4 sur 17 répétitions) surtout lorsque l'on considère que les conditions météorologiques sont les pires possibles pour ce genre de mesure.

Troisièmement, en ce qui concerne les hauteurs des boxplots, celles-ci donnent une indication sur la variabilité des mesures : plus elles sont grandes, plus la répartition des mesures est dispersée. Les valeurs des filtres 650, 700 et 750nm présentent une plus grande variabilité, cela s'explique par la précision de la mesure du spectromètre. À cause du filtre passe bande KG3 qui est appliqué sur le spectromètre, les mesures de rayonnement à partir de 650nm possèdent une plus grande erreur que les autres. D'ailleurs, l'élément le plus limitant en terme de précision dans cette chaîne d'acquisition est le spectromètre, c'est donc lui qui détermine majoritairement la hauteur des boxplots. De plus, pour des raisons logistiques dans le software, il y a un délai de 2 secondes minimum entre la mesure du rayonnement et la prise de la photo. Ce qui est dans ces conditions météorologiques suffisant pour induire une variabilité non négligeable.

Finalement, les filtres 500, 650 et 750 possèdent des valeurs fortement inférieures à la consigne, néanmoins, vu que la valeur de la réflectance de cette référence blanche n'est pas connue, ce phénomène est détaillé dans la figure 22.

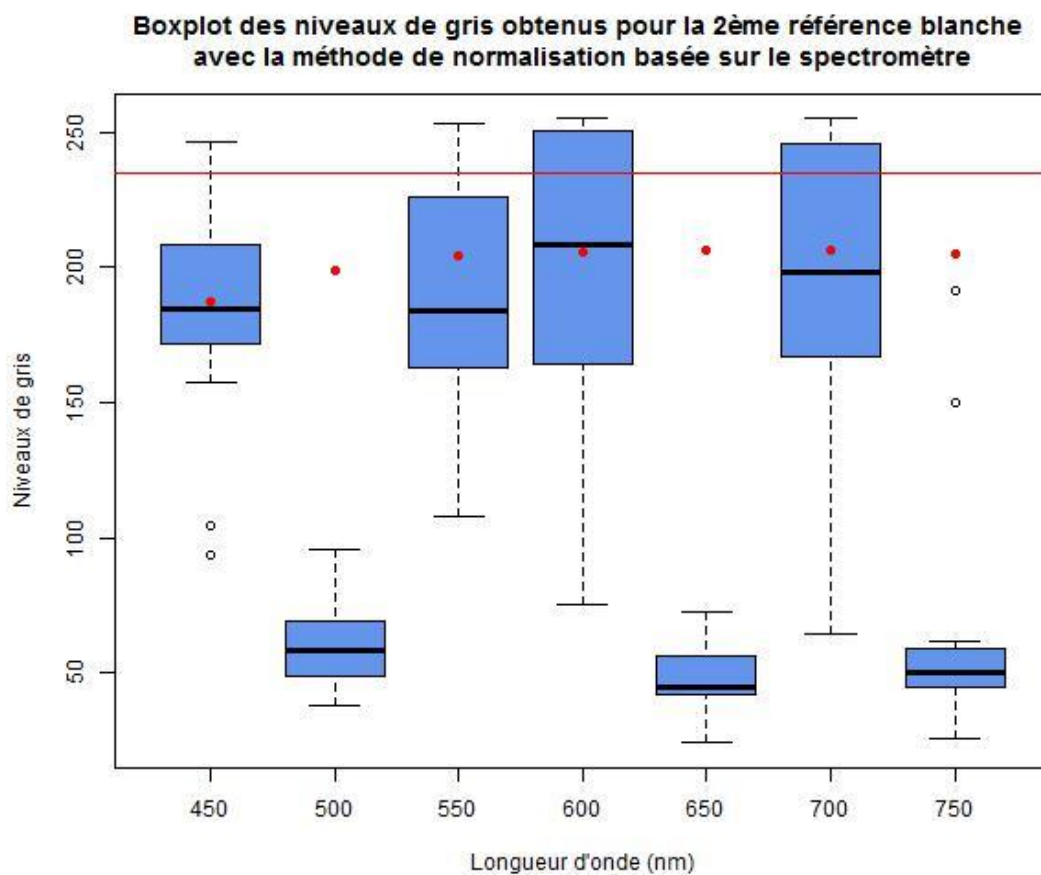


Figure 22 : Répartition des niveaux de gris mesuré sur la 2<sup>ème</sup> référence blanche (MAPIR) pour les photos acquises avec la méthode de normalisation basée sur la mesure du rayonnement incident via un spectromètre

La figure 22 est créée sur base des mêmes images que la figure 21, cependant, la position de la 2<sup>ème</sup> référence blanche est située bien plus en bordure du champ de vision de la caméra comme le prouve la photo reprise dans la figure 23. Cela induit qu'une partie de la région d'intérêt possède un effet de bordure, influençant les valeurs des pixels. De plus, la 2<sup>ème</sup> référence est beaucoup moins stable sur le terrain, induisant une plus grande variabilité dans sa position et donc dans les valeurs des pixels de la région d'intérêt.



Figure 23 : Photo prise le 08/07/19 avec la méthode de normalisation basée sur la référence blanche

Toujours à propos de la figure 22, la droite à la valeur 235 est de nouveau la valeur maximum qu'un objet ayant une réflectance de 100% pourrait atteindre et les points rouges représentent la valeur de la réflectance de la 2<sup>ème</sup> référence blanche retranscrits sur l'échelle allant de 0 à 235. Il s'agit donc des valeurs à atteindre en théorie. Les valeurs des médianes des filtres 450, 550, 600 et 700 sont à la consigne ou légèrement inférieure à la consigne, cela peut s'expliquer par le gain des filtres. En effet, ceux-ci sont imparfaits et ne laissent pas passer 100% de l'intensité lumineuse. Cependant, une comparaison chiffrée n'est pas possible : les gains ne sont pas connus car les fiches techniques des différents filtres ne sont pas disponibles. Les filtres 500, 650 et 750 présentent quant à eux des valeurs beaucoup plus basses que les autres et surtout fortement éloignées de la consigne. En analysant la chaîne d'acquisition, il en ressort 7 sources possibles d'erreur :

1. Le rayonnement incident. Il n'y a pas de différences fondamentales en termes de valeurs énergétiques entre ces longueurs d'ondes. Cette hypothèse est rejetée.
2. La mesure du rayonnement incident. Le spectromètre est imparfait mais son imperfection se traduit par une plus grande variabilité des mesures. En regardant les courbes de validation, rien ne laisse penser qu'un écart important pourrait apparaître pour les longueurs d'ondes 500, 650 et 750nm. Cette hypothèse est rejetée.
3. L'objet d'étude. Il s'agit de la référence blanche et elle n'a pas changé entre chaque longueur d'onde. Cette hypothèse est rejetée.
4. La réfraction. La réflectance de la référence blanche est connue et surtout est constante peu importe l'angle utilisée. Cette hypothèse est rejetée.

5. Les filtres. Les fiches techniques des filtres utilisés n'étaient pas disponibles. Néanmoins la largeur de la bande passante des filtres est connue. Le seul point commun entre les filtres 500, 650 et 750nm est qu'il possède une largeur de bande passante de 40nm alors qu'elle est de 50nm pour les autres filtres. Il est donc possible qu'il ne s'agisse pas du même fournisseur et que donc ces filtres-là ne possèdent éventuellement pas non plus la même transparence, c'est-à-dire qu'ils ne laissent pas passer la même intensité de lumière que les autres filtres.
6. La caméra. La caméra ne possède pas la même efficacité quantique pour chaque longueur d'onde mais cette information est dans la fiche technique et est prise en compte dans le programme. Cette hypothèse est rejetée.
7. Le programme. Il n'y a pas de différence fondamentale dans le software entre chaque filtre. La seule différence est la prise en compte de la largeur du filtre pour déterminer le temps d'exposition mais cela ne permet pas d'expliquer le phénomène. Cette hypothèse est rejetée.

Il n'y a donc qu'une seule hypothèse qui n'est pas rejetée à l'analyse de la chaîne d'acquisition. À cause d'une erreur dans le programme de l'autre méthode, cette hypothèse est discutée dans les figures 24 et 25.

### La méthode de normalisation basée sur la référence blanche :

Les figures 24 et 25 représentent respectivement la valeur des pixels de la première référence et de la seconde référence pour la méthode de normalisation basée sur la référence blanche. Pour rappel, cette méthode permet de converger vers un temps d'exposition en mesurant directement la valeur des pixels de la référence blanche. Cela implique donc que, peu importe l'opacité d'un filtre, la référence blanche est censée atteindre la valeur de la consigne (235 avec 5% de précision) quitte à devoir prendre un temps d'exposition énorme.

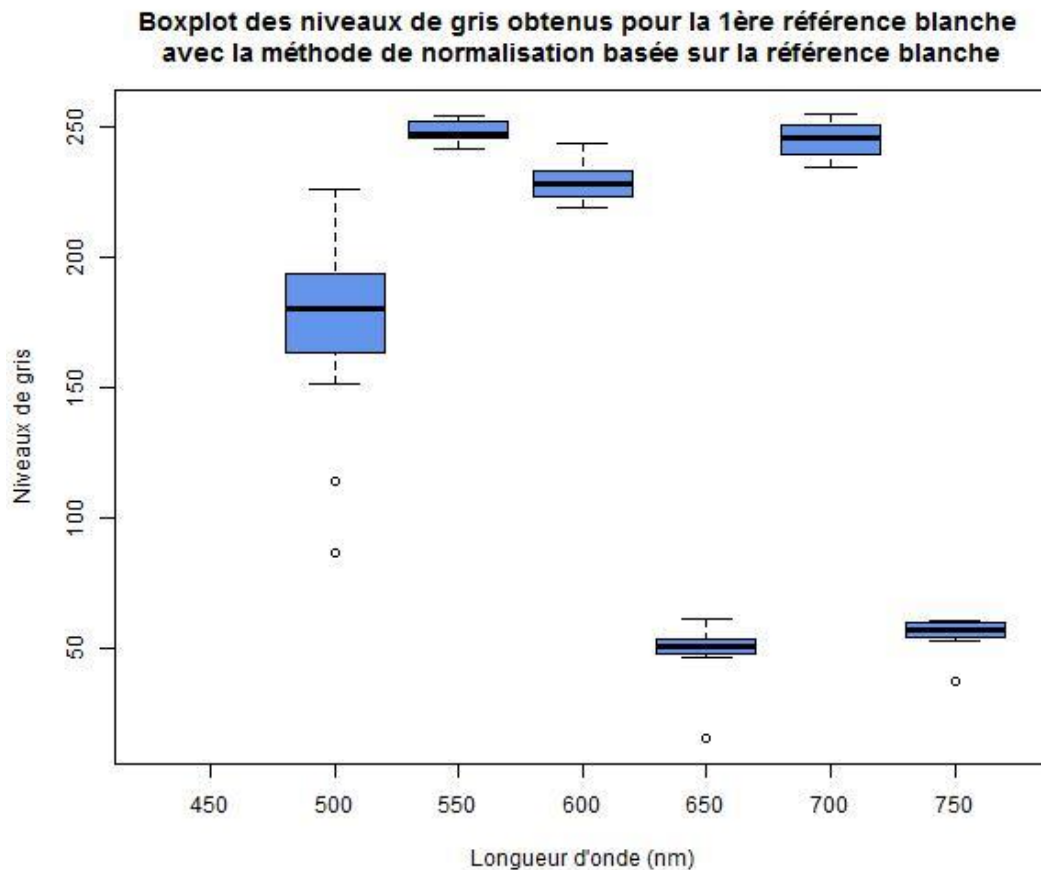
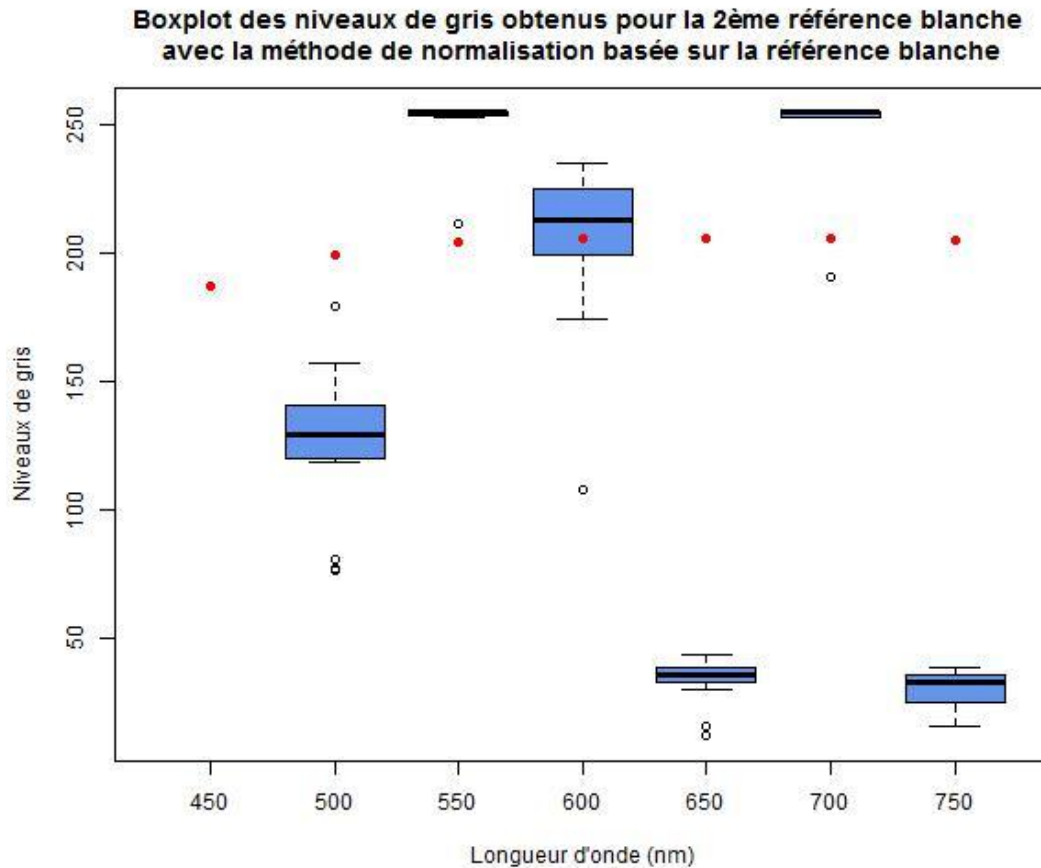


Figure 24 : Répartition des niveaux de gris mesurés sur la 1<sup>ère</sup> référence blanche pour les photos acquises avec la méthode de normalisation basée sur la convergence des niveaux de gris via la référence blanche.





**Figure 25 : Répartition des niveaux de gris mesurés sur la 2<sup>ème</sup> référence blanche pour les photos acquises avec la méthode de normalisation basée sur la convergence des niveaux de gris via la référence blanche.**

Ce n'est cependant pas le cas dans les figures 24 et 25. Or, il est clairement visible qu'une consigne est atteinte, sinon les données seraient beaucoup plus dispersées. De plus, cette consigne n'est pas modifiée dans le code, il s'agit de la même pour tous les filtres. Le problème se situe donc après que le temps d'exposition soit déterminé. Il s'agit en fait d'une erreur de programmation, la convergence se fait sur un filtre X mais ensuite c'est le filtre X+1 qui est amené par la roue et c'est avec ce filtre X+1 que le temps d'exposition calculé est utilisé.

Le tableau 5 synthétise cette erreur et la conséquence sur l'énergie, le temps d'exposition et la valeur des pixels. Les filtres avec un passe bande de 50nm de large sont spécifiés dans le tableau 5 par le terme « Normal », alors que les filtres avec un passe bande de 40nm de large sont spécifiés par le terme « Opaque ».

Tableau 5 : Synthèse de l'erreur de programmation avec les conséquences sur la valeur des pixels des références blanches des photos

<b>Filtre sur lequel le programme a convergé (nm)</b>		<b>450</b>	<b>500</b>	<b>550</b>	<b>600</b>	<b>650</b>	<b>700</b>	
Hypothèse sur le filtre	Absent	Normal	Opaque	Normal	Normal	Opaque	Normal	
Energie sur le capteur	$E_1 = E_{tot}$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	$E_7$	
<b>Filtre sur lequel la photo est réellement prise (nm)</b>		<b>450</b>	<b>500</b>	<b>550</b>	<b>600</b>	<b>650</b>	<b>700</b>	<b>750</b>
Hypothèse sur le filtre	Normal	Opaque	Normal	Normal	Opaque	Normal	Opaque	Opaque
Energie sur le capteur	$<E_{tot}$	$<E_2$	$>E_3$	$E_4$	$<E_5$	$>E_6$	$<E_7$	$<E_7$
Valeur des pixels estimée	Basse	Basse	Saturée	Ok	Basse	Saturée	Basse	Basse

En ce qui concerne la 4ème colonne du tableau 5, par exemple, le temps d'exposition est déterminé avec le filtre 500nm qui est considéré comme «Opaque » selon l'hypothèse. Il est donc nécessaire d'avoir une grande énergie,  $E_3$ , et donc un grand temps d'exposition afin d'atteindre la valeur de 235 +- 5%. Or, ce grand temps d'exposition est ensuite réellement utilisé sur le filtre 550nm qui est considéré comme « Normal ». Il y a donc une plus grande quantité d'énergie que prévu sur le capteur car le filtre « Normal » laisse passer plus d'énergie, ce qui a pour conséquence de saturer l'image.

L'ensemble des valeurs des pixels qui sont estimées dans la dernière ligne du tableau 5 se retrouve parfaitement dans les figures 24 et 25. Cette erreur permet donc de mettre en évidence l'opacité des filtres dont la largeur vaut 40nm et donc par conséquent de confirmer l'hypothèse émise dans le chapitre précédent.

Il manque néanmoins les valeurs pour le filtre 450nm dans les figures 24 et 25, le programme n'a jamais réussi à converger vers la consigne à cause de la trop grande quantité d'énergie reçue puisqu'il n'y avait pas de filtre saturant ainsi l'image.

Les boxplots de la figure 24 et 25 présentent une hauteur beaucoup plus faible que les boxplots de la figure 21 et 22. Cela signifie que la précision de cette méthode (+-5%) est bien meilleure que celle basée sur le spectromètre. Néanmoins, l'algorithme prend de 2 à 5 minutes pour réussir à converger, s'il arrive à converger. A cause des conditions météorologiques, l'algorithme du programme a parfois énormément de difficulté à converger vers un temps d'exposition. Dans certains cas, l'algorithme est même incapable de converger, résultant en un nombre conséquent de données manquantes. Ainsi, les filtres 650, 700 et 750nm ont respectivement eu 14, 10 et 7 données sur les 17 prévues. Le filtre 450 n'a aucune donnée disponible mais cela est dû à l'erreur de manipulation cité précédemment.

### Comparaison des deux méthodes et perspectives :

Dans le tableau 6, un ensemble de critères est repris afin de comparer les deux méthodes de normalisation. En ce qui concerne l'erreur par rapport à la consigne, elle est calculée en ne considérant pas les valeurs extrêmes et est discutée par après.

Tableau 6 : Tableau de critères comparant la méthode de normalisation basée sur le spectromètre et celle basée sur la référence blanche.

Méthode de normalisation	Spectromètre	Référence blanche
Temps d'acquisition	2 minutes /cycle	2 à 5 minutes / cycle
Pourcentages d'images acquises	100%	41 à 100%
Erreur par rapport à la consigne	Maximum +- 31%	Maximum +- 5 %
Gamme de longueurs d'onde possible	450 à 750nm (bande passante du filtre KG3 appliqué sur le spectromètre)	450 à 950nm (c'est-à-dire tous les filtres de la roue)
Praticité sur le terrain	Très pratique, le matériel se met facilement en place et ne doit plus être bougé par après.	Pas pratique, il faut adapter la position de la référence blanche en fonction du soleil et de l'ombre de la structure tout en la gardant stable.

En résumé, la méthode de normalisation basée sur le spectromètre est beaucoup plus rapide et plus pratique sur le terrain. De plus, 100% des échantillons sont toujours acquis, il n'y a pas de données manquantes. Cependant, la gamme de longueurs d'onde possible est limitée par le filtre qui doit être appliqué au spectromètre et par la gamme possible du spectromètre. À première vue, cette limitation n'est pas bien grave mais la roue à filtres est choisie pour ce travail car elle possède en tout 22 filtres. Malgré qu'elle soit plus encombrante et plus lourde qu'une caméra avec des filtres intégrés, elle en reste plus intéressante grâce à sa gamme de longueurs d'onde possible. À partir du moment où le nombre de filtre est limité, l'intérêt de la roue à filtres sur le terrain diminue grandement.

Une autre faiblesse de la méthode basée sur le spectromètre est l'hypothèse qu'il y a une relation directe entre les nombres digitaux de l'image et la surface de réflectance, cette hypothèse peut être justifiée si la caméra a été calibrée et corrigée selon une certaine méthodologie (Ryan et al., 2017).

En outre, et c'est en plus le point le plus important, la précision laisse à désirer. Dans cette valeur de 31% se retrouve à la fois la précision du spectromètre pour estimer le rayonnement mais aussi le délai entre la mesure du rayonnement et la prise d'image. Néanmoins cette précision peut être largement améliorée :

- En prenant en compte l'opacité des filtres, la médiane se rapprochera de la consigne. Un test avec une lumière d'intensité constante et connue est facilement envisageable pour résoudre ce problème sans accéder aux fiches techniques.
- En optimisant le code, il y a moyen de gagner de précieuses secondes entre la mesure du rayonnement et la prise d'image ce qui aura pour conséquence de réduire la variabilité des mesures.
- Afin de réduire la variabilité, il est sans doute aussi possible d'améliorer la mesure du rayonnement par le spectromètre en travaillant sur l'étalonnage initial.
- Pour correctement isoler l'erreur de précision due au spectromètre par rapport à l'erreur de délai, il suffit de réaliser une série de mesures en conditions constantes parfaitement ensoleillées. Dans ce scénario-là, un délai de 3 à 4 secondes entre la mesure du rayonnement et la prise d'image peut être considéré comme négligeable, les conditions météorologiques restant les mêmes.

L'avantage majeur de la méthode de normalisation basée sur la référence blanche repose donc sur sa précision et sa gamme de longueurs d'onde possible malgré la faible praticité sur le terrain. En ce qui concerne l'algorithme de convergence de la méthode de normalisation de la référence blanche, il est sans aucun doute possible d'améliorer la vitesse de convergence et par conséquent la précision. En effet, la précision de cette méthode n'est limitée que par la vitesse de convergence, si l'algorithme converge instantanément, il est possible d'avoir une erreur de moins d'1%. Rajouter un pyranomètre, pour juste avoir une idée de l'intensité du rayonnement (pas sa répartition), peut être une piste pour améliorer cette méthode (Ryan et al., 2017).

La méthode de normalisation basée sur le spectromètre nécessite de connaître parfaitement les caractéristiques du matériel utilisé (caméra et filtres) mais ne nécessite aucun travail à posteriori des images. L'autre méthode, quant à elle, nécessite d'avoir un objet dont la réflectance est connue (et grande) sous chaque angle et pour chaque longueur d'onde sur l'image afin de pouvoir réaliser une règle de trois à posteriori pour avoir une image de réflectance. Par contre, une connaissance minimale de la caméra et des filtres est suffisante. La connaissance du matériel à disposition peut donc être un critère décisif pour le choix de la méthode.

Pour conclure cette comparaison, la méthode de normalisation basée sur le spectromètre ne pourra être préférée à celle de la référence blanche que si la précision du spectromètre est largement améliorée. Dans ce cas-là, le côté pratique du spectromètre permettrait même d'avoir un système complètement automatique qui ne devrait pas tenir compte de la position relative de la structure par rapport au soleil.

# Conclusion

Le système d'acquisition a été mis en place en conditions d'illuminations réelles dans un champ, l'interface graphique contrôlant correctement l'ensemble des appareils.

La comparaison des deux méthodes a permis de mettre en évidence le manque de précision, et donc le manque de fiabilité, de la nouvelle méthode de normalisation basée sur les mesures du spectromètre. Néanmoins, ces résultats sont influencés par une connaissance non exhaustive d'une partie du matériel utilisé. Des nouvelles manipulations et des nouveaux tests sont proposés afin d'améliorer cette précision et surtout afin d'avoir des résultats plus significatifs.

Cependant, si cette précision atteint celle de la méthode basée sur la référence blanche ( $\pm 5\%$ ), la méthode de normalisation basée sur le spectromètre sera sans doute à préférer sur le terrain de par sa stabilité (100% d'images acquises) et sa vitesse d'exécution. De plus, cette méthode est beaucoup plus pratique car elle ne dépend pas de la position du soleil, ce qui la rend plus facilement automatisable dans un système d'agriculture de précision.

# Bibliographie

- Caldelli R., Bamib M., Bartolini E. & Piva A., 2000. Matching in the Frequency Domain Y4.
- Caras T. & Karnieli A., 2013. Ground-level spectroscopy analyses and classification of coral reefs using a hyperspectral camera. *Coral Reefs* **32**(3), 825–834.
- Dao P.D., He Y. & Lu B., 2019. Maximizing the quantitative utility of airborne hyperspectral imagery for studying plant physiology: An optimal sensor exposure setting procedure and empirical line method for atmospheric correction. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **77**(September 2018), 140–150.
- FLIR, 2019. How to evaluate camera sensitivity. <https://www.flir.com/discover/iis/machine-vision/how-to-evaluate-camera-sensitivity>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019. Tighter cereal supplies in 2019/20 mostly on reduced maize production. <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/>, (01/07/2019).
- Gonzalez R.C., Woods R.E., Mcdowell L., Galligan T. & Hall P.P., 2008. *Digital Image Processing Library of Congress Cataloging-in-Publication Data on File*, 103.
- Joshi S. & Karule P.T., 2017. Review of preprocessing techniques for fundus image analysis. *Adv. Model. Anal. B* **60**(3), 593–612.
- Leemans V., Marlier G., Destain M.-F., Dumont B. & Mercatoris B., 2017. Estimation of leaf nitrogen concentration on winter wheat by multispectral imaging. *Hyperspectral Imaging Sensors Innov. Appl. Sens. Stand. 2017* **10213**, 102130I.
- Li L., Zhang Q. & Huang D., 2014. A review of imaging techniques for plant phenotyping. *Sensors (Switzerland)* **14**(11), 20078–20111.
- Lunetta R.S., Ediriwickrema J., Johnson D.M., Lyon J.G. & McKerrow A., 2002. Impacts of vegetation dynamics on the identification of land-cover change in a biologically complex community in North Carolina, USA. *Remote Sens. Environ.* **82**(2–3), 258–270.
- Openstax, 2019. Astronomy. <https://openstax.org/details/books/astronomy>, (02/07/2019).
- Openstax, 2019. University Physics Volume 3. <https://openstax.org/details/books/universityphysics-volume-3>, (02/07/2019)
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2018. La situation des marchés des produits agricoles, commerce agricole, changement climatique et sécurité alimentaire. <http://www.fao.org/3/I9542FR/i9542fr.pdf>, (01/07/2019).
- Piron A., Leemans V., Kleynen O., Lebeau F. & Destain M.F., 2008. Selection of the most efficient wavelength bands for discriminating weeds from crop. *Comput. Electron. Agric.* **62**(2), 141–148.
- Potapov P. V., Turubanova S.A., Hansen M.C., Adusei B., Broich M., Altstatt A., Mane L. & Justice C.O., 2012. Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000-2010, with Landsat ETM+ data. *Remote Sens. Environ.* **122**, 106–116.
- Ryan J.C., Hubbard A., Box J.E., Brough S., Cameron K., Cook J.M., Cooper M., Doyle S.H., Edwards A., Holt T., Irvine-Fynn T., Jones C., Pitcher L.H., Rennermalm A.K., Smith L.C., Stibal M. & Snooke

- N., 2017. Derivation of High Spatial Resolution Albedo from UAV Digital Imagery: Application over the Greenland Ice Sheet. *Front. Earth Sci.* **5**(May), 1–13.
- Schaepman-Strub G., Schaepman M.E., Painter T.H., Dangel S. & Martonchik J. V., 2006. Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies. *Remote Sens. Environ.* **103**(1), 27–42.
- Shaheen S.E., Brabec C.J., Sariciftci N.S., Padinger F., Fromherz T. & Hummelen J.C., 2001. 2.5% Efficient Organic Plastic Solar Cells. *Appl. Phys. Lett.* **78**(6), 841–843.
- Thompson D.R., Natraj V., Green R.O., Helmlinger M.C., Gao B.C. & Eastwood M.L., 2018. Optimal estimation for imaging spectrometer atmospheric correction. *Remote Sens. Environ.* **216**(May), 355–373.
- Tsai B.K., Allen D.W., Hanssen L.M., Wilthan B. & Zeng J., 2008. A comparison of optical properties between solid PTFE (Teflon) and (low density) sintered PTFE. *Reflection, Scatt. Diffr. from Surfaces* **7065**(January 2014), 70650Y.