



Maison de la Télédétection
500 rue JF Breton
34090 Montpellier



ENSSAT Lannion
6 rue de Kerampont
22300 LANNION

Rapport de stage de fin d'étude

Mise au point d'un capteur optique pour le suivi du contenu biochimique foliaire

Jean-Malo Perrot
Photonique-ENSSAT Promotion 2022

effectué à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
(INRAE)
du 1 mars 2022 au 30 août 2022

Tuteurs en entreprise : Jean-Baptiste Féret
Ryad Bendoula

Correspondant ENSSAT : Jean-Marc Goujon

Soutenance le 8 septembre 2022



Remerciements

Je tiens ici à remercier les personnes qui m'ont aidé et soutenu au cours de mon stage et pour la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais tout d'abord remercier mon encadrant Jean-Baptiste Féret, chercheur à INRAE, pour son accueil dans l'UMR Tetis et son aide précieuse tout au long de mon stage. Nos échanges sur l'avancement de mon travail ont toujours illuminé la marche à suivre et clarifié beaucoup de mes doutes.

Je souhaiterais également remercier mon second encadrant Ryad Bendoula, directeur de recherche dans l'UMR ITAP. Son suivi et son accompagnement sur la partie optique m'ont beaucoup aidé.

Merci également à Daniel Mourad, assistant-ingénieur en contrôle-commande. Ses précieux conseils et son aide furent extrêmement bienvenue sur la partie pilotage.

De même, je tiens à remercier mes costagiaires de bureau et d'ailleurs, aux doctorants et autres agents de la MTD, qui se sont montrés très accueillants dès le début de mon stage. Ils ont toujours su répondre à mes questions ou me guider vers la personne compétente. Ils ont également représenté un cercle social important en dehors de mes journées de travail.

Soutien financier au projet de stage

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'Investissements d'Avenir portant la référence ANR-16-CONV-0004.

This work was supported by the French National Research Agency under the Investments for the Future Program, referred as ANR-16-CONV-0004.



Résumé

Les crises environnementales et le changement climatique influencent grandement la flore, impactant les secteurs agricoles, forestiers mais aussi la biodiversité. Pour suivre cette évolution environnementale, la comprendre, s'adapter et limiter notre influence, il est nécessaire de pouvoir suivre la physiologie des plantations, des forêts. Pour pouvoir suivre cette physiologie, il faut pouvoir estimer les différents facteurs biochimiques des plantes. Une des méthodes pour estimer ces facteurs foliaires est d'utiliser les propriétés optiques des feuilles des plantes.

Dans un contexte où les capteurs optiques portables effectuant ces tâches sont limités soit en terme d'estimation, soit en terme d'autonomie et de maniabilité, nous voulons mettre au point un nouveau capteur, en s'appuyant sur les dernières recherches, permettant d'estimer un plus grand nombre de constituants chimiques foliaires tout en conservant les atouts des capteurs portables existants. Pour cela nous nous appuierons sur une méthode d'inversion d'un modèle de simulation des propriétés optiques foliaires (PROSPECT) afin de trouver des informations spectrales pertinentes.

Abstract

Environmental crises and climate change greatly influence the flora, impacting the agricultural, forestry sectors and the biodiversity. To follow this environmental evolution, understand it, adapt and limit our influence it is necessary to be able to follow the physiology of plantations, forests. To be able to follow this physiology, it is necessary to estimate the different biochemical components of plants. One method of estimating these foliar constituents is to use the optical properties of plant leaves.

In a context where portable optical sensors performing these tasks are limited in terms of estimation of foliar chemical components or in terms of autonomy and maneuverability, we want to develop a new sensor, based on the latest research, to estimate a greater number of foliar chemical constituents while retaining the advantages of existing portable sensors. For this, we will use a method of inversion of a simulation model of foliar optical properties (PROSPECT) to find relevant spectral information.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte général	1
1.2	Contexte du sujet de stage	1
1.3	Problématiques scientifiques	2
2	Présentation de l'entreprise	4
2.1	Présentation d'INRAE, de l'UMR TETIS, de l'UMR ITAP et de l'équipe COMIC	4
2.1.1	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE)	4
2.1.2	L'UMR TETIS	4
2.1.3	L'UMR ITAP	5
2.1.4	L'équipe COMIC	5
2.2	Responsabilité sociétale d'INRAE	6
2.2.1	Application de la Responsabilité sociétale et environnemental au sein d'INRAE	6
2.2.2	Application de la responsabilité sociétale et environnementale au sein du projet de fin d'étude	7
3	Estimer la chimie foliaire à partir de mesures optiques	9
3.1	Les outils permettant d'estimer la chimie foliaire	9
3.1.1	Les capteurs portables	9
3.1.2	Les spectromètres	11
3.1.3	Tableau récapitulatif	12
3.2	Les méthodes	13
3.2.1	Les indices spectraux	13
3.2.2	Les méthodes multivariées	13
3.2.3	Les méthodes d'inversion de modèle physique	14
3.3	Le modèle PROSPECT	14
3.3.1	Présentation générale	14
3.3.2	Le modèle de couche d'Allen et al.	14
3.3.3	Le modèle en mode directe	17
3.3.4	L'inversion du modèle	17
4	Modélisation et définition des paramètres du futur capteur	19
4.1	Matériel	19
4.1.1	La base de données ANGERS	19
4.1.2	Outils de modélisation	19
4.2	Méthodes	19
4.2.1	Performances de référence	19
4.2.2	Plages et configuration spectrales	20
4.2.3	Critères statistiques permettant d'analyser les performances	20
4.2.4	Démarche	21
4.3	Exploitation du modèle (Résultats et discussion)	24
4.3.1	Estimations de référence	24
4.3.2	Estimation de la chlorophylle et des caroténoïdes	25

4.3.3	Estimation de la teneur en eau et en matière sèche sur la plage [1300-2400] nm	31
4.4	Synthèse de la partie modélisation	36
5	Développement du prototype de laboratoire	39
5.1	Contexte et objectifs	39
5.2	Matériels	39
5.2.1	La source	39
5.2.2	Le monochromateur	40
5.2.3	Les sphères intégrantes	41
5.2.4	Le spectromètre	42
5.2.5	L’interfaçage et pilotage	42
5.2.6	Les échantillons	42
5.2.7	La référence	42
5.3	Méthode	43
5.3.1	Le protocole expérimental	43
5.3.2	Les mesures de référence	43
5.4	Résultats et discussion	44
6	Conclusion générale	45
6.1	Conclusion quant à la réalisation du projet	45
6.2	Conclusion quant à mon expérience	45
7	Annexes	48
7.1	Annexe A	48
7.2	Annexe B	52
7.3	Annexe C	55

1 Introduction

1.1 Contexte général

Ce stage de 6 mois a été effectué dans le cadre de ma dernière année d'école d'ingénieur spécialisé en photonique et de ma seconde année de Master Sciences et Numérique pour la Santé, spécialité physique pour le biomédical. Il forme un complément important et essentiel dans le cadre de mes études. Il forme le pont vers le monde du travail et constitue une transition entre les études et le monde professionnel.

Du 1^{er} mars au 31 août 2022, j'ai effectué mon stage au sein de l'INRAE (Institut National de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) sous l'encadrement conjoint de Jean-Baptiste Féret et de Ryad Bendoula dans le centre Occitanie-Montpellier. J'ai été intégré dans l'UMR (Unité Mixte de Recherche) TETIS (Territoires, environnement, télédétection et information spatiale). Ses locaux sont situés à la Maison de la Télédétection à Montpellier.

Le sujet de mon stage s'intitule "Mise au point d'un capteur optique pour le suivi du contenu biochimique foliaire : aide au suivi de l'état physiologique et à la détection précoce de maladies".

L'objectif sera d'identifier l'information spectrale pertinente permettant d'accéder à la chimie d'une feuille afin de pouvoir suivre l'état de "santé" de la plante, en s'appuyant notamment sur des outils de modélisation physique permettant de lier les propriétés optiques de la feuille à son contenu biochimique.

1.2 Contexte du sujet de stage

Les crises environnementales associées au changement climatique et à l'érosion de la biodiversité influencent fortement le cycle de la végétation et le fonctionnement des agroécosystèmes, avec des impacts importants sur le secteur de l'agriculture et de la foresterie, mais aussi pour les écosystèmes naturels et semi-naturels. En effet le rythme des précipitations, leur volume ainsi que les variations de température impactent les pratiques agricoles en faisant évoluer rapidement l'environnement et les conditions de vie pour la flore. Afin de mieux comprendre la réponse de la végétation à ces facteurs environnementaux, et d'identifier des pistes pour adapter nos pratiques ou orienter les politiques de conservation et de production, il est nécessaire de se doter d'outils d'observation et de méthodes d'analyse des données collectées. La télédétection et proxydetection comprennent un ensemble de données et de méthodes associées permettant d'effectuer notamment l'observation de la surface terrestre et de la végétation à l'aide de différents capteurs et vecteurs. Le suivi de la végétation par satellite s'appuie particulièrement sur l'estimation fine de propriétés de la végétation pertinente pour renseigner sur son état physiologique et sanitaire, sa phénologie. Ces propriétés correspondent à un ensemble de traits chimiques foliaires, tels que la teneur en pigments et la teneur en eau du feuillage.

Dans la perspective du suivi opérationnel régulier de la végétation par télédétection satellite, l'étape de collecte de d'observation au sol est cruciale, afin de fournir des données d'apprentissage et de validation pour les méthodes s'appuyant sur des données spatialement exhaustives aéroportées et satellite. Dans le cas des pro-

propriétés chimiques du couvert, ces données d'observation peuvent être effectuées à l'aide de différents instruments plus ou moins coûteux et complexes. Les capteurs optiques portables existants sont simples d'utilisation, mais ne permettent de mesurer qu'un nombre limité de propriétés, se limitant généralement à un indicateur de teneur en chlorophylle foliaire. Les méthodes s'appuyant sur la spectrométrie foliaire permettent d'estimer le contenu foliaire d'une grande variété de constituants, mais nécessitent du matériel coûteux, une plus grande technicité, et sont difficilement utilisables sur le terrain pour des collectes intensives.

Les avancées récentes dans le domaine de la modélisation physique foliaire, permettant de mettre en relation les propriétés optiques foliaires à leur contenu chimique [al21a], permettent d'explorer des configurations optiques originales compatibles avec le développement de capteurs portables à bas coût, capables d'estimer une gamme étendue de constituants chimiques foliaires

Le modèle PROSPECT est le modèle physique de propriétés optiques foliaires le plus utilisé par la communauté de la télédétection. En mode 'direct', ce modèle permet de simuler les propriétés optiques d'une feuille à partir de ses propriétés biophysicochimiques, en s'appuyant sur une représentation simplifiée de la structure et de la chimie foliaire. Il est aussi possible d'inverser ce modèle, afin d'estimer les propriétés biophysicochimiques d'une feuille à partir d'une quantité plus ou moins grande d'information relative à ses propriétés optiques.

C'est à partir de cet outil de modélisation et des techniques d'inversion associées que nous allons travailler à la définition de configurations instrumentales optiques originales permettant d'estimer une gamme de constituants chimiques étendue.

Ce travail de stage s'inscrit donc dans un projet visant au développement d'un capteur robuste, portable, simple d'utilisation tout en étant précis, sensible et peu onéreux afin d'être accessible à un plus grand nombre. Ce capteur serait utile pour les agriculteurs afin leurs apporter une aide à la décision mais aussi pour les acteurs des domaines de l'écologie et de l'environnement, dans le but de collecter des indicateurs permettant le suivi de la végétation pour une grande variété de milieux, et préparer des méthodes opérationnelles s'appuyant sur les données de télédétection satellite.

Mon stage s'inscrit dans le cadre de développer un nouvel outil répondant à ces critères en exploitant une approche de modélisation numérique (PROSPECT) afin d'élaborer, dans un premier temps, un cahier des charges par la mise en place de simulations permettant d'identifier l'information spectrale pertinente pour ce nouveau capteur et dans un second temps proposer une première preuve de concept en laboratoire.

1.3 Problématiques scientifiques

A partir de ce contexte, nous souhaitons définir un cahier des charges pour un capteur accessible financièrement et d'utilisation, fiable et portable. Nous allons donc devoir définir une méthodologie afin d'exploiter le modèle PROSPECT pour définir les paramètres spectraux optimaux pour ce nouveau capteur. De même, il nous faudra définir l'architecture optique que nous allons utiliser pour estimer la chimie foliaire.

Une fois le cahier des charges et l'architecture définis nous élaborerons un banc

optique afin de faire une première preuve de concept.

Pour répondre à ces différentes problématiques, je vais vous présenter dans un premier temps l'entreprise dans laquelle j'ai évolué durant ce projet. Nous verrons ensuite l'état de l'art en termes de capteur et sur le modèle PROSPECT. Nous nous concentrerons ensuite sur le travail de simulation nécessaire à l'établissement du cahier des charges puis nous verrons ensuite l'élaboration de la preuve de concept.

L'organisation du travail pour la réalisation de ces différentes tâches est représentée sur le diagramme 1. Le détail des tâches est fourni en annexe A sur la figure 24.

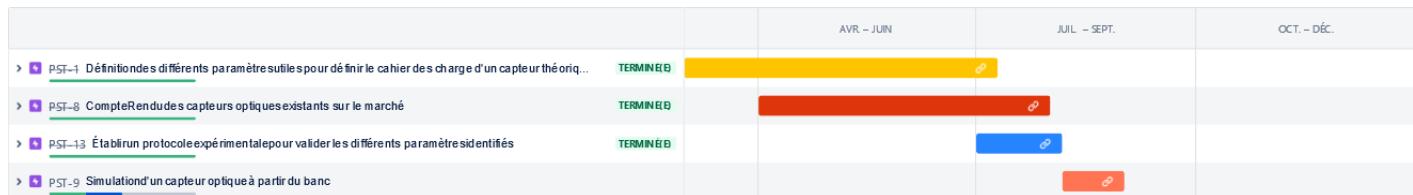


FIGURE 1 – Planning de l'avancée des travaux

2 Présentation de l'entreprise

2.1 Présentation d'INRAE, de l'UMR TETIS, de l'UMR ITAP et de l'équipe COMIC

Dans cette sous-partie, je vais vous détailler l'entreprise ainsi que les UMR que j'ai côtoyé durant mon stage et l'équipe COMIC qui m'a accompagné sur la mise en place de la preuve de concept.

2.1.1 Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE)

L'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) est un établissement public de recherche. Il est issu de la fusion de l'institut national de la recherche agronomique (INRA) et de l'institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (IRSTEA). Plus de 12 000 salariés répartis parmi 268 unités de recherche dans 18 centres régionaux en France métropolitaine et en outre-mer, en plus de son siège à Paris, travaillent pour INRAE. Cet institut se situe parmi les leaders mondiaux en sciences agricoles, alimentaire, de la faune et de la flore [INR19].

L'objectif de INRAE est de développer des solutions pour l'agriculture de demain, l'alimentation et la gestion des ressources dans un contexte où le climat évolue rapidement et où les sols s'appauvriscent. Elle travaille donc sur l'innovation mais aussi sur le conseil pour les politiques publiques impactant l'environnement afin de développer des systèmes agricoles et alimentaires pérennes dans le temps[INR19].

Plus précisément, si on se réfère au décret fondateur d'INRAE, ses missions sont de "réaliser, d'organiser et de coordonner, à son initiative ou à la demande de l'État, tous travaux de recherche scientifique et technologique dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation, de la forêt, de l'environnement, de l'eau, de la biodiversité, de la bioéconomie, de l'économie circulaire, de la gestion durable des territoires et des risques dans les champs de compétence de précipités" [Le 19].

L'organigramme de l'entreprise est fourni en annexe A, figure 20

2.1.2 L'UMR TETIS

Durant mon stage, j'ai donc été intégré au sein de l'UMR TETIS (Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale) dans ses locaux à la Maison de la Télédétection. TETIS est un laboratoire de recherche multidisciplinaire qui est axé sur les usages et l'analyse de l'information spatiale [TET21]. Il regroupe 4 organismes de recherche :

- **INRAE**
- **CIRAD** (Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement)
- **AgroParisTech** (Institut des sciences et industrie du vivante et de l'environnement)
- **CNRS** (Centre National de Recherche Scientifique)

J'ai pu remarquer la forte interdisciplinarité dans cette UMR au travers de présentation des travaux de mes collègues, que ça soit durant le café science, les doctoriales ou encore le stagiairothon. De même, au sein de mon bureau, mes costagiaires travaillaient sur des domaines bien divers comme l'agronomie, le traitement et l'analyse du langage naturel, l'écologie ou le suivi de population animale. J'ai moi-même eu l'occasion de présenter mes travaux durant le stagiairothon organisé à la Maison de la Télédétection.

L'organigramme de l'UMR TETIS est présenté en annexe, figure 21

2.1.3 L'UMR ITAP

Durant mon stage, j'ai été amené à travailler avec l'UMR ITAP (anciennement "Information, Technologies, Analyse environnementale, Procédés agricoles" et actuellement "Technologies et Méthodes pour les Agricultures de demain") dans laquelle se trouve l'équipe COMIC. Cette UMR est située sur l'ancien campus de l'IRSTEA et accueille des agents d'INRAE et de l'institut SupAgro de Montpellier. Elle est constituée d'environ 80 agents. L'UMR ITAP est principalement axée sur le développement des futures méthodes agricoles que ça soit à travers la métrologie environnementale ou bien la gestion de cet environnement. Elle est scindée en 4 équipes :

- Évaluation environnementale et sociale
- Modélisation et décision agro-environnementale
- Capteurs optiques pour les milieux complexes
- Procédés Environnement Pesticides Santé

2.1.4 L'équipe COMIC

L'équipe COMIC, pour Capteurs Optique pour les Milieux Complexes, m'a accueilli dans ses locaux pour la mise en place de mon banc optique pour pouvoir établir une preuve de concept. Elle est située sur l'ancien campus de l'IRSTEA à Montpellier.

COMICS est une équipe pluridisciplinaire appartenant à l'UMR ITAP (2.1.3) travaillant sur des systèmes de mesures optiques indirectes. La démarche usuelle de l'équipe est l'acquisition d'une mesure optique et la construction d'un modèle statistique mettant en lien la mesure et la grandeur d'intérêt pour obtenir un modèle d'estimation consistant.



FIGURE 2 – Schéma de principe d'une mesure optique indirecte multivariée [INR22]

Elle base principalement ses travaux sur la spectrométrie ultra-violet, visible, proche infrarouge (UV-VIS-NIR) et l'imagerie hyperspectrale. Dans le cadre

de mon stage, j'ai utilisé la partie spectrométrie qui consiste à l'acquisition d'un signal optique après interaction avec un milieu, ici théoriquement une feuille dans le spectre visible et proche infrarouge ([400 ; 900] nm).

2.2 Responsabilité sociétale d'INRAE

2.2.1 Application de la Responsabilité sociétale et environnemental au sein d'INRAE

Étant l'un des principaux acteurs des recherches pour les Objectifs de Développement Durable (ODD), INRAE s'est engagé de nouveau dans la responsabilité sociétale et environnementale (RSE) afin d'atteindre elle-même les ODD d'ici 2030.

La direction d'INRAE a adhéré à une charte d'expression publique, à la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et la charte de déontologie, d'éthique et d'intégrité scientifique INRAE. Ces chartes sont des engagements de la part de la direction qui veillent à ce que l'entreprise, et donc théoriquement son personnel, respecte les minima de l'intégrité de la personne, de l'environnement et de l'intégrité scientifique

Cela passe par un changement de en faisant évoluer son fonctionnement et ses pratiques des métiers. En 2021, INRAE a mis à jour sa stratégie RSE au travers d'un nouveau plan d'action.

Son plan d'action s'oriente autour de 4 axes majeurs :

- **Déployer une organisation permettant de la mise en œuvre de la stratégie RSE d'INRAE** : pour appliquer une politique de RSE au sein d'un organisme, il faut que chacun des membres de cet organisme soient au courant et que la politique définie puisse être applicable.

Pour répondre à ce besoin, INRAE a mis en place un comité d'orientation et de suivi de la RSE au sein de l'INRAE afin de suivre l'application de la stratégie dans l'organisme et de pouvoir conseiller la direction dans sa prise de décision et l'application de ces dernières. Afin de suivre au plus proche la stratégie de RSE, INRAE a mis en place une direction transversale dédiée à la RSE et relié aux responsables RSE de chaque unité.

- **Assurer la cohérence entre la recherche menée au sein de l'Institut, son fonctionnement et les pratiques de travail** : INRAE est un institut engagé dans la préservation de la biodiversité et plus globalement de l'environnement, qui apporte des conseils aux politiques et entreprises et fait des recherches sur ces sujets.

Cependant certaines pratiques concernant l'environnement évoluent lentement et dans le cadre de ses recherches INRAE est forcé d'enfreindre les conseils et conclusions de ses travaux qu'elle prodigue, que ça soit dans la gestion des eaux et des sols avec l'utilisation de certains pesticides ou plus simplement dans les déplacements lors de sorties de terrain ou de congrès, INRAE limite et encadre au mieux ces pratiques en réduisant au nécessaire l'utilisation de ces pratiques et en établissant un plan d'utilisation et de transport qui permet de suivre ces dernières.

De même, afin de rester cohérent, INRAE communique de manière transparente sur l'application de sa RSE.

— **Évaluer et maîtriser l'impact environnemental des activités de l'Institut pour en réduire les effets négatifs et accroître les effets positifs** : dans le cadre de suivi de l'application de la RSE, INRAE a mis en place un bilan gaz à effet de serre (BEGES) via la méthode du bilan carbone de l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), un accompagnement des unités pour les engager à réduire de leurs émissions via les responsables RSE. INRAE vise un objectif 0 carbone en 2030 et a mis en place politique de sensibilisation autour du gaspillage, du tri et de l'énergie via des affiches dans les locaux et une réunion de sensibilisation des nouveaux arrivants.

De même, INRAE a réalisé une mutualisation du parc automobile afin d'en réduire le nombre et faciliter l'entretien et a fait le choix cantine d'entreprise responsable en allant solliciter les producteurs locaux au maximum et choisissant des produits de saison.

— **Affirmer une politique sociale porteuse de sens et favorisant une qualité de vie au travail améliorée** : pour mettre en place une politique sociale visant une meilleure qualité de vie au travail et un bon esprit d'équipe, INRAE fait des assemblées générales mensuelles au niveau de chaque centre ainsi que des réunions au sein des UMR afin de faire le point, de favoriser le dialogue entre la direction et le personnel et transmettre les potentielles nouvelles directives.

De même, INRAE a obtenu le label européen HR Excellence de la Commission européenne. C'est une labellisation pour la gestion des ressources humaines (formation, prévention des risques psychosociaux, contratuels, recrutement, etc...). De plus, INRAE organise des évènements locaux et nationaux pour renforcer la cohésion, ses bâtiments sont adaptés aux personnes à mobilité réduite. INRAE mène une politique humaine et sociale d'égalité et de diversité, notamment au travers des échanges avec d'autres laboratoires et universités étrangères.

Au sein de l'entreprise, il y a 49% de femmes et les femmes gagnent 10% de moins que les hommes (tout confondu : temps de travail, poste, expériences, etc...).

En annexe A se trouve le tableau de la norme ISO 26000, apportant des détails sur la RSE d'INRAE.

2.2.2 Application de la responsabilité sociétale et environnementale au sein du projet de fin d'étude

Au sein de mon projet de fin d'étude, j'ai eu l'occasion de voir quelques applications de la responsabilité sociétale et environnementale d'INRAE. Tout d'abord j'ai eu, avec mes costagiaires, une réunion de présentation de l'entreprise, de sensibilisation vis-à-vis de l'environnement et de prévention des comportements à risques, notamment les risques incendies dans une région où la sécheresse estivale est de mise.

Des installations pour les personnes à mobilité réduite telle que des rampes ou ascenseurs étaient présentes. De même pour la gestion des déchets organiques (reste du repas à midi, etc...) un bac à composte dans la cours de la Maison de la Télédétection était installé.

Pour la restauration, la cantine était partagée avec un autre institut : l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Les repas sont constitués à partir de produits français (viande, poisson et légume). Pour les fruit et les légumes, le restaurateur passe deux fois par semaine chez le maraîcher afin d'obtenir des produits frais et de saison.

Des événements sociaux sont organisés régulièrement comme c'est le cas des cafés sciences, événement bi-mensuel où un chercheur présente ses travaux autour d'un café, des doctoriales, événement annuel où ceux sont les doctorants qui présentent leurs thèses et après les présentation, un repas commun est organisé dans la cours ou encore le stagiairothon, événement annuel où cette fois ceux sont les stagiaires, dont je faisais parti, qui présentons nos sujets après quoi un repas était aussi organisé. Une "DataParty" a été organisée pour sensibiliser le personnel à l'intégrité scientifique vis à vis des données en ligne. Durant cette DataParty, un café était aussi organisé afin de pouvoir discuter avec les responsables de l'organisation sur ce thème et comment l'appliquer correctement (utilisation et dépôt de données en ligne, licences, etc...)

La présence de personnel étranger est aussi très forte à la Maison de la Télédétection, de nombreux partenariats avec des universités africaines, européennes ou asiatiques sont faits. J'ai eu le plaisir durant mon stage d'accueillir, d'échanger et de sympathiser avec des stagiaires vietnamiens, italiens, malgaches et congolais. L'internationalité présente dans le bureau m'a permis d'apprendre à dépasser la barrière de la langue et d'en apprendre toujours plus sur chacun.

Mon intégration au sein de la Maison de la Télédétection s'est très bien déroulée, les doctorants, mes costagiaires, mes tuteurs et généralement toutes les personnes que j'ai pu rencontrer au fil de mon stage m'ont toujours bien accueilli.

3 Estimer la chimie foliaire à partir de mesures optiques

Afin d'estimer la chimie foliaire, il existe différentes méthodes et outils avec des utilisations différentes.

comme mentionné plus tôt, il existe différents types de capteurs optiques permettant d'estimer la chimie foliaire, que l'on regroupera dans deux catégories : les capteurs portables, qui permettent d'estimer un nombre réduit de constituants chimiques foliaires à partir de mesures optiques parcimonieuses, et les spectrophotomètres, qui mesurent les propriétés optiques sur des plages spectrales étendues du domaine visible à l'infrarouge avec un échantillonnage très fin, et permettent l'estimation d'un plus grand nombre de constituants chimique foliaire.

On peut identifier dans la littérature une grande variété de méthodes permettant d'estimer la chimie foliaire par mesures optiques, que nous regrouperons dans trois grandes familles de méthodes par souci de simplicité : les méthodes basées sur les indices spectraux, les méthodes multivariées basées sur des modèles statistiques et d'apprentissage automatique, et les méthodes basées sur l'inversion de modèles physiques comme PROSPECT.

Je vais vous présenter les différents outils et méthodes dans les parties à venir.

3.1 Les outils permettant d'estimer la chimie foliaire

3.1.1 Les capteurs portables

Les capteurs optiques portables sont généralement des capteurs type leaf-clip, qui intègrent des diodes et des récepteurs dans une pince, qui lorsqu'elle est en contact avec une feuille, permet de calculer un indicateur associé à un nombre réduit de constituants chimiques foliaires, généralement un seul avec des mesures in-situ et non destructives. L'indicateur se compose souvent d'un ratio d'absorbance, de réflectance ou de transmittance selon l'architecture du capteur entre deux longueurs d'onde. Soit M la mesure, λ_1 et λ_2 les longueurs d'onde utilisées par le capteur, l'indicateur peut s'écrire :

$$\text{Indicateur} = \frac{M_{\lambda_2} - M_{\lambda_1}}{M_{\lambda_2} + M_{\lambda_1}} \quad (1)$$

Je vais vous présenter quelques grandes marques de capteurs.

3.1.1.1 SPAD

Le SPAD pour Soil Plant Analysis Development a été mis au point par la société japonaise KONICA MINOLTA. Il existe plusieurs types de SPAD dont la différence se fait sur la communication (port USB, RS 232, etc), la mémoire et la géolocalisation.

Il permet entre autre de savoir si de l'engrais est nécessaire afin de pouvoir limiter son usage tout en étant productif. Pour cela, il détermine la quantité relative de chlorophylle présente en mesurant l'absorbance de la feuille en deux longueurs d'onde. En utilisant ces deux absorbances, le SPAD calcule une valeur numérique qui est proportionnelle à la quantité de chlorophylle présente dans la feuille. La chlorophylle étant étroitement liée l'état nutritionnel de la plante

(teneur en composés azotés). Une plante avec plus de chlorophylle aura donc plus de nutriment et probablement une meilleure santé et moins besoin d'engrais.

Il utilise pour ses mesures deux diodes électroluminescentes (LEDs), l'une à 650 nm et l'autre à 940 nm. Son récepteur est une photodiode en silicium. Il effectue une mesure locale (zone de mesure de 6 mm²).

3.1.1.2 atLEAF

L'atLEAF est un capteur similaire au SPAD. Il utilise des mesures d'absorbance pour déterminer la teneur en chlorophylle d'une feuille. Il est issu de la société du même nom atLEAF.

Son usage est similaire au SPAD c'est-à-dire qu'il va permettre, de la même manière, via la teneur en chlorophylle, de déterminer les changements de statut de la plante, s'il y a l'apparition d'un stress ou non, si la plante manque de composés azotés et donc de nutriments, si l'engrais est nécessaire et de connaître l'état physiologique de la feuille.

Il utilise deux LEDs, l'une à 660 nm et la seconde à 940 nm. Son récepteur est aussi une photodiode en silicium.

3.1.1.3 DUALEX

Le DUALEX est un capteur optique élaboré par l'entreprise FORCE-A (Fluorescence and Optoelectronics Research for the Communication between Eco-physiology and Agriculture).

Comme les précédents, c'est un capteur portable leaf-clip de mesures non destructives. Cependant ce dernier permet de mesurer plus de composants que les précédents. Effectivement, il permet de déterminer la concentration en chlorophylle mais aussi en flavonols et en anthocyanes qui sont deux autres constituants chimiques foliaires de la famille des polyphénols permettant de mieux apprécier la physiologie de la plante [al21b].

Pour effectuer ces différentes mesures, le DUALEX utilise un ensemble de 5 LEDs et des mesures de transmittance et de fluorescence.

La fluorescence de la chlorophylle dans le proche infrarouge est mesurée sous une première excitation de référence par la lumière non absorbée par les polyphénols. Elle est comparée à un deuxième échantillonnage qui est la lumière absorbée par les polyphénols (par exemple vert pour les anthocyanes ou ultra-violet pour les flavonols). Seule une fraction de cette lumière atteint la chlorophylle dans le mésophylle (partie interne de la feuille) et peut générer la fluorescence de la chlorophylle dans le proche infrarouge. Ce principe de mesure est appelé effet de dépistage de polyphénols sur fluorescence chlorophylle.

Son usage rentre dans le même cadre que le SPAD ou le atLEAF, à savoir suivre l'état physiologique d'une plante. Cependant il est plus utilisé cette fois dans les instituts de recherche en sciences végétale (agronomie, écologie, physiologie) pour des études sur le stress abiotique (stress lié à un changement de l'environnement, gel, sécheresse, etc...). Il fournit directement un indice sur l'état de la plante : le NBI (Nitrogen Balanced Index) qui est utilisé dans de nombreuses recherches sur la physiologie des plantes. C'est un rapport entre la teneur en flavonols et en chlorophylle.

3.1.2 Les spectromètres

L'autre grande famille d'outils permettant d'estimer la chimie foliaire à partir de la mesure de leurs propriétés optiques correspond aux spectromètres. Les spectromètres utilisent une large bande spectrale pour analyser les propriétés optiques de la feuille et en estimer les composants. Les analyses chimiques foliaires utilisant la spectrométrie s'appuient généralement sur des mesures optiques, un domaine spectral étendu, allant du visible à l'infrarouge, généralement entre 350 nm et 2500 nm.

Un spectromètre est composé d'une source, d'un élément dispersif ou d'un monochromateur, de fentes pour régler sa résolution et d'un photodétecteur pour effectuer la mesure.

Il peut être complété avec des sphères d'intégration par exemple afin de pouvoir mesurer la réflectance et la transmittance directionnelles hémisphériques d'un échantillon avec précision sans que le faisceau issu de la source et la lumière transmise ou réfléchie par l'échantillon viennent perturber la mesure à cause de ses caractéristiques directionnelles.

En effet, à ce jour, il est supposé que la réflexion spéculaire des feuilles modifie la distribution angulaire de la lumière réfléchie par cette dernière. Or on considère souvent la surface de la feuille comme lambertienne, c'est-à-dire que le détail de la surface de la feuille n'est pas du même ordre de grandeur que la longueur d'onde utilisée pour l'étudier et donc que la lumière sera réfléchie de manière isotrope. Cela peut introduire une mauvaise interprétation.

Pour se prémunir de cela, les sphères d'intégration permettent de casser l'information spatiale tout en préservant la puissance lumineuse.

L'avantage des spectromètres est qu'il permet de balayer une large gamme de longueurs d'onde avec une fine résolution. Cela lui permet d'estimer plus de composants et plus précisément. Ses inconvénients sont que c'est un matériel coûteux, qui nécessite un protocole d'utilisation et que le transport du matériel sur le terrain n'est pas des plus aisés pour ceux transportables voir impossible si ce dernier est monté sur un banc.

Je vais vous présenter à présent le spectromètre ASD FieldSpec, qui sera utilisé dans cette étude pour servir de référence à la preuve de concept. Ses caractéristiques techniques seront spécifiées à ce moment.

3.1.2.1 L'ASD FieldSpec

L'ASD (Analytical Spectral Device) FieldSpec est un spectromètre portatif permettant de faire des mesures in-situ, non destructive sur les feuilles.

Cet instrument mesure l'intensité lumineuse dans la gamme spectrale correspondant au domaine 350-2500 nm. Il a été directement conçu pour la télédétection sur terrain afin d'acquérir des spectres visibles dans le proche infrarouge (VNIR) et l'infrarouge de courtes longueurs d'onde (SWIR). Il utilise une sonde fibrée afin de faciliter les manipulations et de limiter les pertes de signal.

Les ASD FieldSpec sont des spectromètres « post-dispersifs ». En effet, les spectromètres portatifs sont généralement utilisés en dehors d'un environnement de laboratoire et sont donc exposés à des niveaux de lumière ambiante beaucoup plus élevés. Dans presque tous les cas, une partie de cette lumière ambiante va pénétrer dans l'échantillon. Les erreurs produites par cette lumière ambiante

sont bien plus importantes pour un spectromètre pré-dispersif que pour un spectromètre post-dispersif.

Dans un spectromètre pré-dispersif, l'échantillon est éclairé par une lumière monochromatique (dispersion en amont de l'échantillon). La lumière diffusée ou transmise par l'échantillon est ensuite recueillie et transmise au détecteur de l'instrument. La lumière ambiante qui a pénétré dans l'échantillon va être aussi transmise au détecteur. Ainsi, l'éclairage monochromatique de l'instrument et toutes les longueurs d'onde de la lumière parasite ambiante sont livrés au détecteur.

Étant donné que le signal de lumière ambiante peut représenter une grande fraction du signal de lumière total mesuré par le détecteur, elle est la source d'erreur majeure. Le calfeutrage de l'échantillon pour minimiser la lumière ambiante empêche souvent l'utilisation de sonde à fibre optique.

Dans un spectromètre post-dispersif, l'échantillon est éclairé par une lumière blanche. La lumière diffusée ou transmise à travers l'échantillon est ensuite dispersée et livrée à la fente d'entrée du spectromètre de l'instrument.

Comme pour le spectromètre pré-dispersif, la lumière ambiante qui pénètre dans l'échantillon mesuré est également recueillie. La différence est que dans l'instrument post-dispersif, seule la lumière parasite ambiante de même longueur d'onde que celle mesurée par le détecteur est ajoutée au signal résultant de l'éclairage de l'échantillon par l'instrument (dispersion en aval de l'échantillon). Ainsi, le signal de lumière ambiante parasite représente une petite fraction du signal de lumière total mesuré par le détecteur.

3.1.3 Tableau récapitulatif

Capteurs	Chlorophylle	Polyphénols	Autres composants	Gamme spectrale (nm)
DUALEX	oui	oui	non	380-500-620-710-810
atLEAF	oui	non	non	660-940
SPAD	oui	non	non	650-940
ASD FS	oui	oui	oui	[350-2500]

3.2 Les méthodes

Il existe une multitude de méthodes pour faire le lien entre les propriétés optiques foliaires et les propriétés chimiques de la feuille. Parmi ces méthodes, il ressort 3 grandes familles qui sont majoritairement utilisées que je vais vous présenter. Il y a les indices spectraux, les méthodes multivariées et les méthodes d'inversion de modèle physique.

3.2.1 Les indices spectraux

Les indices spectraux sont les indicateurs les plus simples permettant de faire le lien entre propriétés optiques et chimie foliaire.

Ils utilisent un nombre réduit de bandes spectrales et sont assez précis lors de l'estimation de C_{ab} (teneur en chlorophylle ab), de C_{xc} (teneur en caroténoïdes), de EWT (Equivalent Thickness Water, teneur en eau) et de la LMA (Leaf Mass per Area, teneur en matière sèche).

Les formes les plus utilisées pour cette méthode sont la mesure (réflectance, absorbance ou transmittance) et la différence de la mesure sur sa somme (équation 1). Ces mesures optiques sont ensuite reliées au contenu chimique par unité de surface foliaire avec des relations statistiques simples, type régression linéaire, polynomiale ou exponentielle.

De nombreuses études portent sur l'estimation de C_{ab} à l'aide d'indices spectraux [Sus10], soulignant l'importance de la chlorophylle pour sa grande influence sur les propriétés optiques foliaires dans le visible et sa participation aux processus physiologiques.

La littérature propose de nombreux indices spectraux utilisant diverses combinaisons de longueurs d'onde, de sorte que le choix de celui qui convient est difficile.

De plus, la plupart des indices sont testés sur une seule espèce ou un seul type de végétation, ils ne sont donc pas largement applicables en raison de la dépendance de la relation sur un ensemble de données expérimentales.

Le principal inconvénient des indices spectraux est le manque de généralisation lié au fait qu'ils reposent sur une base empirique et sont donc spécifiques à la base de données avec laquelle les relations statistiques ont été ajustées.

3.2.2 Les méthodes multivariées

Les méthodes multivariées sont une autre grande famille des méthodes d'estimation des propriétés foliaires et regroupent de nombreuses méthodes comme les méthodes d'apprentissage automatique et les réseaux neuronaux [Eli15] (branches de l'intelligence artificielle) mais celle encore plus couramment utilisée à ce jour reste la régression des moindres carrés partiels ou PLS (Partial Least Square ou Projection to Latente Strucure).

La PLS est une méthode statistique qui détermine la contribution relative de chaque constituant à la réflectance ou la transmittance [al09][al08a].

La PLS utilise un spectre continu sur toute la gamme que l'on souhaite étudier (gamme solaire par exemple) plutôt qu'une analyse bande par bande. Le nombre de mesures requis est donc beaucoup plus important que pour les indices spectraux (qui n'en nécessitent que 2 ou 4 bandes spectrales généralement).

Le modèle résultant associe un coefficient à chaque longueur d'onde.

Lorsqu'elle est appliquée à des données expérimentales, l'approche générale de PLS permet théoriquement une meilleure évaluation de la chimie que les indices spectraux, mais il y a un risque de sur-ajustement qui peut conduire à des relations inexactes entre les propriétés optiques et chimiques lors de la vérification du modèle sur un jeu de données très différent de celui servant à l'établissement du modèle.

Pour diminuer ce risque, il est possible d'utiliser la somme des erreurs résiduelles de prédiction des carrés (PRESS) et de la minimiser pour déterminer le nombre de facteurs dans l'analyse PLS.

3.2.3 Les méthodes d'inversion de modèle physique

Les méthodes d'inversion de modèle physique sont la dernière méthode que je vais vous présenter.

Son approche consiste à l'inversion d'un modèle qui simule les propriétés optiques des feuilles à partir des constituants chimiques foliaires.

L'inversion du modèle vise à trouver l'ensemble optimal de variables biochimiques d'entrée, en comparant les propriétés optiques modélisées par le modèle à celles mesurées des feuilles.

Elle va venir minimiser l'erreur entre les propriétés mesurées et modélisée.

Nous allons détailler à présent le modèle physique de transfert radiatif PROSPECT et son inversion, que nous utiliserons, dans la partie suivante qui font partie de ces méthodes d'inversion.

3.3 Le modèle PROSPECT

3.3.1 Présentation générale

Le modèle PROSPECT (Leaf Optical PROPERTIES SPECTra) repose sur un modèle de couches : un modèle comprenant une couche unique a été proposé par Allen et Al. en 1969 [al69], et amélioré en 1970 pour le généraliser à N couches [al70].

Il permet de simuler la réflectance et la transmittance directionnelles hémisphériques d'une feuille à partir du contenu surfacique foliaire d'un certain nombre de constituants chimiques et d'un paramètre de structure, N, correspondant au nombre de couches homogènes séparées par de l'air. L'ensemble de ce modèle permettant de prendre en compte correctement la complexité anatomique foliaire. Son utilisation majeure dans la télédétection repose sur sa simplicité de résolution tout en prenant en compte la structure interne de la feuille.

En inversant ce modèle, nous pouvons estimer le contenu chimique foliaire à partir de mesure de transmittance et/ou de réflectance.

3.3.2 Le modèle de couche d'Allen et al.

Le modèle de couche part du principe que la feuille forme une couche compacte, semi-transparente avec des surfaces parallèles et rugueuses. De même, on suppose que la lumière incidente est isotrope.

L'expression de la réflectance totale de la couche R peut être calculer en sommant les réflexions et réfractions successives que va subir le faisceau en pénétrant dans la couche. Le faisceau incident, en arrivant sur la surface de la couche, va être partiellement réfléchi et partiellement transmis. La partie transmise va être partiellement transmise et partiellement réfléchie à la seconde interface et ainsi de suite. On obtient alors pour la réflectance totale l'équation (2) :

$$R = r_{12} + t_{12}\tau r_{21}t_{21}\tau + t_{12}\tau r_{21}\tau r_{21}\tau t_{21}\tau + \dots \quad (2)$$

$$R = r_{12} + t_{12}t_{21}r_{21}\tau^2(1 + r_{21}^2\tau^2 + r_{21}^4\tau^4 + \dots) \quad (3)$$

$$R = r_{12} + \frac{t_{12}t_{21}r_{21}\tau}{1 - r_{21}^2\tau^2} \quad (4)$$

Avec r_{12} et t_{12} la réflectance et la transmittance moyenne du milieu 1 vers 2 (même chose pour r_{21} et t_{21}). τ représente la partie du faisceau transmise à travers le milieu. De la même manière, on peut écrire la transmittance totale T de la couche qui sera la somme de toutes les transmissions élémentaires. Cela nous donne l'équation (5) :

$$T = t_{12}t_{21}\tau + t_{12}\tau r_{21}\tau r_{21}\tau t_{21} + \dots \quad (5)$$

$$T = t_{12}t_{21}\tau^2(1 + r_{21}^2\tau^2 + r_{21}^4\tau^4 + \dots) \quad (6)$$

$$T = \frac{t_{12}t_{21}\tau}{1 - r_{21}^2\tau^2} \quad (7)$$

On peut calculer r_{12} à l'aide des équations de Fresnel pour un faisceau incident avec un angle θ et l'indice de réfraction n du milieu. De même on peut déduire t_{12} avec la relation $r_{12} = 1 - t_{12}$. En utilisant la relation $t_{21} = \frac{t_{12}}{n^2}$, on peut déduire t_{21} et r_{21} . τ est relié au coefficient d'absorption k de la couche par la loi de Beer-Lambert.

Nous avons donc la transmittance et la réflectance de la couche qui dépendent uniquement de l'indice de réfraction de la couche n et de son coefficient d'absorption k .

Ce modèle à une couche permet de représenter fidèlement une feuille compacte comme les feuilles de maïs. Cependant, il ne permet de modéliser les propriétés optiques de feuilles moins denses. C'est pour cela que Allen et al [al70] ont généralisé le modèle à une couche à un modèle à N couches séparées par N-1 couches d'air. Les couches d'air permettent de prendre en compte la complexité de la feuille et de modéliser une diffusion isotrope au sein de la feuille.

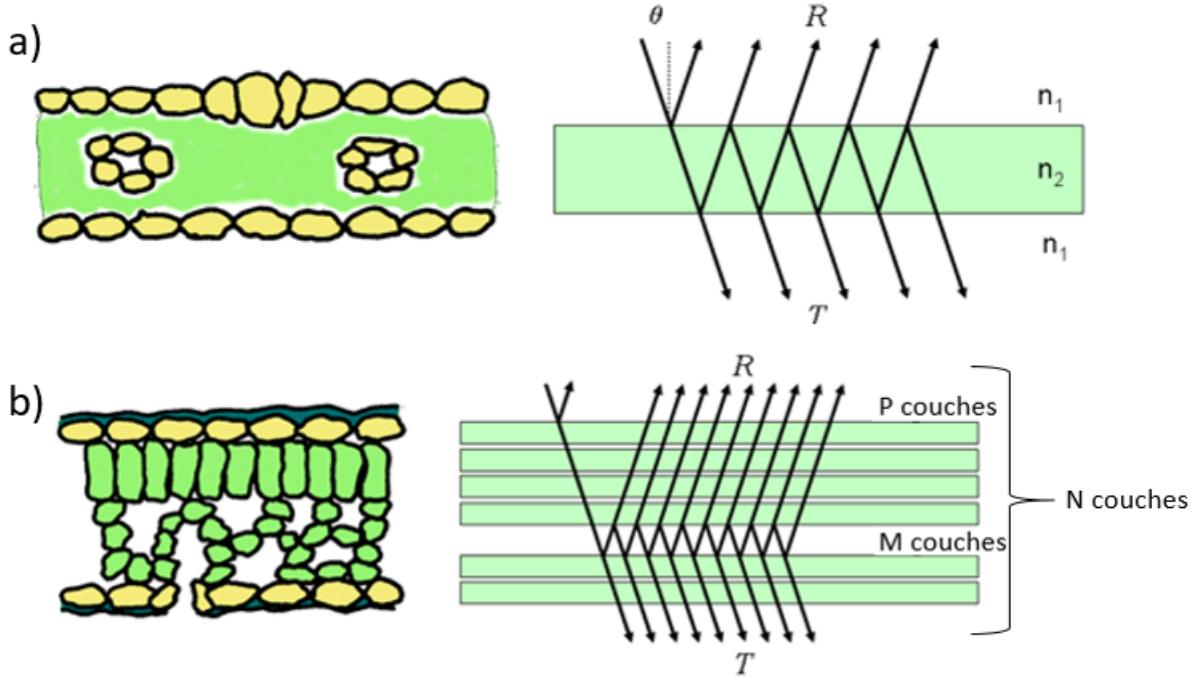


FIGURE 3 – Représentation du modèle à une couche pour une feuille compacte (a) et à N couches pour une feuille non-compacte(b), [Ust08]

Un tel modèle a été résolu pour la réflectance et la transmission par le mathématicien Stokes [Sto60] en utilisant un ensemble de $N = M + P$ couches. Avec ce modèle, on obtient la réflectance totale $R = R(M + P)$ et la transmittance totale $T = T(M + P)$ de cet ensemble en fonction des réflectances et transmittances des deux sous-ensembles constitués de M et P couches.

Le flux lumineux, arrivant par le haut, arrive sur les M couches, est partiellement réfléchi et partiellement transmis. La fraction $T(M)$ arrive sur les P couches, la fraction $T(M)R(P)$ est réfléchie, et la fraction $T(M)T(P)$ transmise. La fraction $T(M)R(P)$ arrive par dessous sur les M couches, la nouvelle fraction $T(M)R(P)T(M)$ étant transmise, et la fraction $T(M)R(P)R(M)$ est reflétée, et ainsi de suite.

De la même manière, en sommant les différents termes participant à la réflectance totale, ce qui permet d'écrire :

$$R = R(M) + T(M)R(P)T(M) + T(M)R(P)R(M)R(P)T(M) + \dots \quad (8)$$

qui forme une suite géométrique de raison $R(M)R(P) < 1$, soit

$$R = R(M) + \frac{T(M)^2 R(P)}{1 - R(M)R(P)} \quad (9)$$

Nous avons la même chose pour la transmittance totale avec les termes qui y participent, cela nous donne :

$$T = T(M)T(N) + T(M)R(M)R(P)T(N) + \dots \quad (10)$$

qui forme une suite géométrique de raison $R(M)R(P) < 1$, soit

$$T = \frac{T(M)T(P)}{1 - R(M)R(P)} \quad (11)$$

Les équations (9) et (11) forme un système qui se résout grâce aux équations de Stokes [Sto60] qui va relier la réflectance et la transmittance des M (ou P) couches à la réflectance ou la transmittance d'une couche élémentaire. Pour utiliser un tel modèle il nous faut donc connaître l'indice de réfraction n d'une couche, le coefficient d'absorption associé k ainsi que le nombre de couches N et l'incidence du faisceau θ .

3.3.3 Le modèle en mode directe

PROSPECT a été conçu partir de ce modèle de couche par Jacquemoud et Baret en 1990 [SJ90] et est largement utilisé dans la télédétection.

C'est l'un des premiers modèles à utiliser l'interaction lumière-matière et à simuler précisément la réflectance et la transmittance hémisphériques pour les feuilles dans la gamme spectrale [400-2500] nm.

Il prend en entrée le coefficient spécifique d'absorption k_i de chaque composant i , ils sont représentés en Annexe A, figure 23, l'indice de réfraction n , les concentrations surfaciques C_i des différents constituants et l'angle d'incidence de faisceau α .

Différentes versions du modèle PROSPECT ont été développées depuis la première version développée par Jacquemoud et Baret [FB90] pour pouvoir estimer plus de constituants comme dissocier les protéines des constituants carbonés, l'ensemble formant la matière sèche, estimer la teneur en caroténoïdes, etc... La version utilisée durant ce stage est la version D. En l'inversant, elle permet d'estimer les anthocyanes, les caroténoïdes, la chlorophylle, la teneur en eau, la masse sèche de la feuille, ainsi que son paramètre de structure N[al08b].

3.3.4 L'inversion du modèle

Le modèle PROSPECT permettant de réaliser la simulation des propriétés optiques foliaires suffisamment précises, Jacquemoud et Baret ont décidé de l'inverser pour obtenir les propriétés chimiques foliaires à partir de leurs propriétés optiques [FB90]. Cette inversion du modèle cherche à minimiser la différence entre la transmittance et la réflectance mesurées et la réflectance et la transmittance modélisées par PROSPECT. En clair, la transmittance et la réflectance simulées vont dépendre du paramètre foliaire (par exemple la teneur en chlorophylle) en entrée, en faisant évoluer ce paramètre, la transmittance et la réflectance modélisées vont plus ou moins s'éloigner des valeurs mesurées. Lorsque l'erreur est minimum, on regarde quel est le paramètre en entrée. Pour cela, ils ont donc cherché à minimiser la fonction de mérite Δ^2 (12) :

$$\Delta^2 = \sum_{\lambda} [R_{mes}(\lambda) - R_{modélisé}(\lambda, C)]^2 + [T_{mes}(\lambda) - T_{modélisé}(\lambda, C)]^2 \quad (12)$$

Où R_{mes} et T_{mes} sont les données expérimentales de ses expériences et $R_{modélisé}$ et $T_{modélisé}$ sont les données simulées par le modèle PROSPECT et C la teneur

d'un paramètre dans la feuille.

La fiabilité de cette inversion n'est pas dépendante du niveau de concentration d'un composant et est constante. Cependant, comme limite elle suppose que la distribution des constituants est homogène dans la feuille et que la rugosité de la surface est constante. Cela n'est pas exactement le cas, néanmoins l'inversion du modèle PROSPECT est utilisée largement utilisée dans le monde de la recherche et reste un modèle très fiable à ce jour, et cela, avec la majorité des feuilles.

4 Modélisation et définition des paramètres du futur capteur

4.1 Matériel

4.1.1 La base de données ANGERS

La base de données ANGERS est une base de données regroupant 308 échantillons de feuille issue des 39 plantes vivant en climat tempéré (alentour d'Angers [INR09]).

Elle est composée des données optiques des feuilles, c'est-à-dire des coefficients de transmission et de réflexion directionnels hémisphériques. A ces propriétés optiques sont associées les propriétés biochimiques foliaires suivantes :

- La teneur surfacique en chlorophylles a et b (C_{ab} ou CHL)
- La teneur surfacique en caroténoïdes (C_{xc} ou CAR)
- La masse surfacique (LMA, Leaf Mass per Area)
- La teneur en eau (EWT, Equivalent Water Thickness)

Ces propriétés chimiques ont été obtenues par mesure destructive en laboratoire. Elle est échantillonnée tous les nanomètres de 400 nm jusqu'à 2450 nm.

Elle constitue la base de données sur laquelle on s'appuiera pour la suite afin d'établir notre cahier des charges pour le prototype. Lorsqu'on parlera de mesure, on se référera à cette base de données dans la partie 4.

4.1.2 Outils de modélisation

Pour établir le cahier des charges de notre capteur optique, nous allons utiliser le langage de programmation R avec l'environnement de développement RStudio avec sa version 1.3.1093.

Nous utiliserons le modèle "PROSPECT-D" et son inversion associée développée par M. Féret et M. de Boissieu. [Boi17] pour faire tourner le modèle d'inversion.

4.2 Méthodes

4.2.1 Performances de référence

Pour nous guider, nous avons établi des estimations de référence. Ces estimations vont définir notre point de départ et notre objectif dans un premier temps. Elles sont décrites ci-dessous :

-REF#1 : performances obtenues en utilisant les données de propriétés optiques complètes, c'est-à-dire en utilisant la réflectance et la transmittance foliaire avec un échantillonnage correspondant à une mesure tous les nanomètres entre 400 nm et 2450 nm

-REF#2 : performances obtenues en utilisant la configuration spectrale d'inversion optimale définie dans la littérature (Feret et al., 2019 ; Spafford et al., 2021), qui correspond à l'utilisation d'un domaine spectral spécifique à chaque constituant permettant d'améliorer les performances par rapport à l'utilisation des données de propriétés optiques complètes.

Dans notre cas, la REF#1 correspond à des performances que l'on va chercher si possible à améliorer en travaillant sur les caractéristiques spectrales instru-

mentales car il a été démontré que cette information spectrale complète permettait une estimation sous optimale de la chimie foliaire. La REF#2 correspond aux performances optimales, on peut donc s'attendre à ce qu'elle soit difficilement atteignable sous la contrainte d'un échantillonnage spectral réduit sur un domaine spectral plus important, mais l'erreur relative par rapport à ces performances optimales permettra de mieux caractériser la dégradation des performances.

4.2.2 Plages et configuration spectrales

Durant notre étude, nous allons tester différentes plages et configurations spectrales. D'après la littérature on peut diviser en deux grandes plages spectrales le domaine d'utilisation de PROSPECT[\[al21a\]](#). Nous avons dans le domaine visible et légèrement dans le proche infra-rouge une participation essentiellement des pigments (caroténoïdes et chlorophylle dans notre cas) et dans le proche infrarouge nous avons une participation spectrale essentiellement de l'eau (EWT) et de la matière sèche (LMA).

Nous avons donc décidé, en accord avec la littérature, de couper la plage de 400 nm à 2450 nm en deux plages plus restreintes afin de réduire le volume de données et le temps de calcul nécessaire aux inversions. Une plage pour l'estimation des pigments foliaires allant de 400 nm à 900 nm et une plage pour l'EWT et la LMA allant de 1300 nm à 2450. Pour la LMA et l'EWT, nous étudierons aussi la plage de 1300 nm à 1700 nm dans l'optique d'élaborer un capteur ne nécessitant pas de photodiodes refroidies qui sont plus chères.

De la même manière, avec l'inversion du modèle PROSPECT il est possible d'utiliser uniquement la réflectance R ou uniquement la transmittance T avec une estimation a-priori du nombre de structure de la feuille N. L'estimation a-priori de N nécessite une mesure de réflectance 1131 à ou de transmittance à 1121 [\[Boi17\]](#). Dans un souci de simplification et de non-redondance sur le futur capteur, nous explorerons aussi ces configurations.

4.2.3 Critères statistiques permettant d'analyser les performances

Pour chaque constituant chimique foliaire (C_{ab} , C_{xc} , EWT et LMA.), et pour chaque échantillonnage spectral, nous calculerons un ensemble de critères statistiques.

1. Corrélation par rapport aux données de référence : Pour chaque composant, le carré du coefficient de corrélation, appelé coefficient de détermination (R^2), entre les données de référence et les estimations peut être calculé. Les données et les estimations étant censées être dépendante linéairement, ce coefficient permet d'estimer le pourcentage de variance entre les deux jeux.
2. NRMSE relatif aux données expérimentales : L'erreur quadratique moyenne normalisée (Normalized Root Mean Square Error, NRMSE) entre les données expérimentales et les estimations permet d'observer la dispersion/précision des estimations par rapport aux mesures. Elle est normalisée par la différence entre les valeurs inter quartiles.

4.2.4 Démarche

Pour la simulation, nous allons reprendre le modèle PROSPECT dans son fonctionnement inverse que nous allons appliquer à la base de données ANGERS (4.1.1).

4.2.4.1 Étape 1 : influence de l'échantillonnage spectral sur l'estimation de la composition chimique foliaire

Dans un premier temps, nous regarderons l'impact de l'évolution du pas d'échantillonnage sur la précision du modèle. Cela nous permettra de regarder la stabilité du modèle en fonction de l'échantillonnage. Ça nous permettra de savoir jusqu'à quel point on peut espacer les mesures en vue de réduire au maximum les mesures optiques dans un soucis de faisabilité (capteur portable, maniable) et de prix.

Cette étape permettra de répondre aux différentes questions suivantes :

1. Comment la dégradation du pas d'échantillonnage influence-t-elle l'estimation de la chimie foliaire par inversion de PROSPECT ?
2. L'influence de la dégradation du pas d'échantillonnage est-elle différente selon les constituants foliaires à estimer ?
3. Peut-on identifier un échantillonnage spectral optimal correspondant à un compromis permettant de minimiser l'information spectrale nécessaire et l'erreur d'estimation de la composition chimique foliaire

En partant des données échantillonnées avec un pas de 1 nm, nous avons sous-échantilloné les mesures de réflectance et de transmittance foliaire progressivement, en utilisant systématiquement les plages spectrales prédéfinies dans la partie 4.2.2.

Le sous-échantillonnage spectral a été défini par un pas régulier de 1 nm jusqu'à 50 nm.

4.2.4.2 Étape 2 : influence de la translation de l'échantillonnage spectral sur l'estimation de la composition chimique foliaire

Une fois cela réalisé, nous fixerons un pas choisi en fonction des résultats obtenus précédemment. Puis nous réaliserons un décalage de cet échantillonnage afin d'observer l'évolution de la précision du modèle à pas fixé. Cette partie visera à regarder le comportement de l'erreur sur l'estimation afin de voir s'il y a un décalage de l'échantillonnage privilégié et donc si potentiellement il y a une plage spectrale optimale pour estimer un composant.

Cela nous permettra de répondre aux questions :

1. Comment la translation du pas d'échantillonnage influence-t-elle la dégradation de l'estimation de la chimie foliaire par inversion de PROSPECT ?
2. Y'a t'il un décalage qui permet d'optimiser l'estimation en déplaçant l'échantillonnage sur une longueur d'onde pertinente ?

En partant des données échantillonnées avec un pas de 1 nm, nous avons sous-échantilloné les mesures de réflectance et de transmittance foliaire progressivement.

Nous prendrons ensuite pris le pas associé au minima de la NRMSE sur l'estimation des composants pour le sous-échantillonnage. A partir de ce pas, nous

allons introduire un décalage afin de ratisser tout le spectre et trouver le meilleur décalage afin de minimiser l'erreur.

Si la NRMSE était déjà au minimum alors nous conserverions les multiples de ce pas additionné à la longueur d'onde initiale (400 nm pour les pigments et 1300 nm pour les matières). Sinon nous changerons cette longueur d'onde initiale par la longueur d'onde initiale plus la translation effectuée pour trouver le minima.

4.2.4.3 Étape 3 : influence de la sélection de l'information spectrale sur l'estimation de la composition chimique foliaire

Une fois la meilleure "position" d'échantillonnage trouvée pour ce pas, nous enlèverons des longueurs d'onde afin de sélectionner uniquement celles qui sont utiles à l'estimation du composant considéré. Cela permettra les longueurs d'onde optimales afin d'identifier et de quantifier un composant. L'idéal est d'obtenir le minimum de longueurs d'onde afin de réduire le nombre de sources et donc de LEDs nécessaire au capteur.

Cette étape viendra répondre à la question : quelle est l'information minimale nécessaire permettant une estimation correcte de la chimie de la feuille.

En partant des données sous-échantillonnées avec un pas optimal et un échantillonnage translaté selon les composants afin de réduire au mieux l'erreur de l'estimation, nous allons venir supprimer une longueur d'onde parmi celles restantes. Nous allons faire une "Backward stepwise selection" : à partir des N longueurs d'onde, on passe à $N-1, N-2, \dots$ jusqu'à une longueur d'onde en enlevant systématiquement et de manière récursive la longueur d'onde la moins signifiante afin de diminuer le nombre au maximum de longueur d'onde utile à l'estimation des traits chimiques foliaires. Pour cela, on se basera sur la NRMSE au fil de cette diminution afin de désélectionner les longueurs d'onde moins pertinentes.

4.2.4.4 Étape 4 : influence de la résolution spectrale sur l'estimation de la composition foliaire

Par la suite, nous appliquerons une gaussienne à chaque longueur d'onde précédemment sélectionnées afin de simuler le profil spectrale d'une diode laser à cet emplacement. Nous ferons évoluer la largeur à mi-hauteur de la gaussienne jusqu'à la limite d'erreur que nous considérons comme acceptable. Cette étape permettra d'obtenir des caractéristiques techniques des diodes à utiliser (longueur d'onde centrale, largeur à mi-hauteur maximale).

Nous allons donc regarder le comportement de la NRMSE en fonction de la largeur à mi-hauteur une fois que nous aurons déterminé la configuration minimale nécessaire à l'estimation de la chimie de la feuille.

4.2.4.5 Récapitulatif Au terme de ces différentes étapes, nous devrions avoir la configuration optimale pour estimer chaque composant de manière générale (sur tout type de feuille).

Les différentes étapes sont récapitulées dans le tableau 1 et au travers du schéma de la figure 6.

N° d'étape	Expérience	Objectif
1	Variation du pas	Déterminer l'impact de l'écart de l'échantillonnage spectral
2	Translation de l'échantillonnage	Identifier des lots de longueur d'onde utiles
3	Sélection de longueur d'onde	Réduire le lot de longueur d'onde utile au maximum
4	Application d'une gaussienne	Simuler une diode laser et regarder l'impact sur l'estimation

TABLE 1 – Tableau récapitulatif des étapes d'établissement du cahier des charges

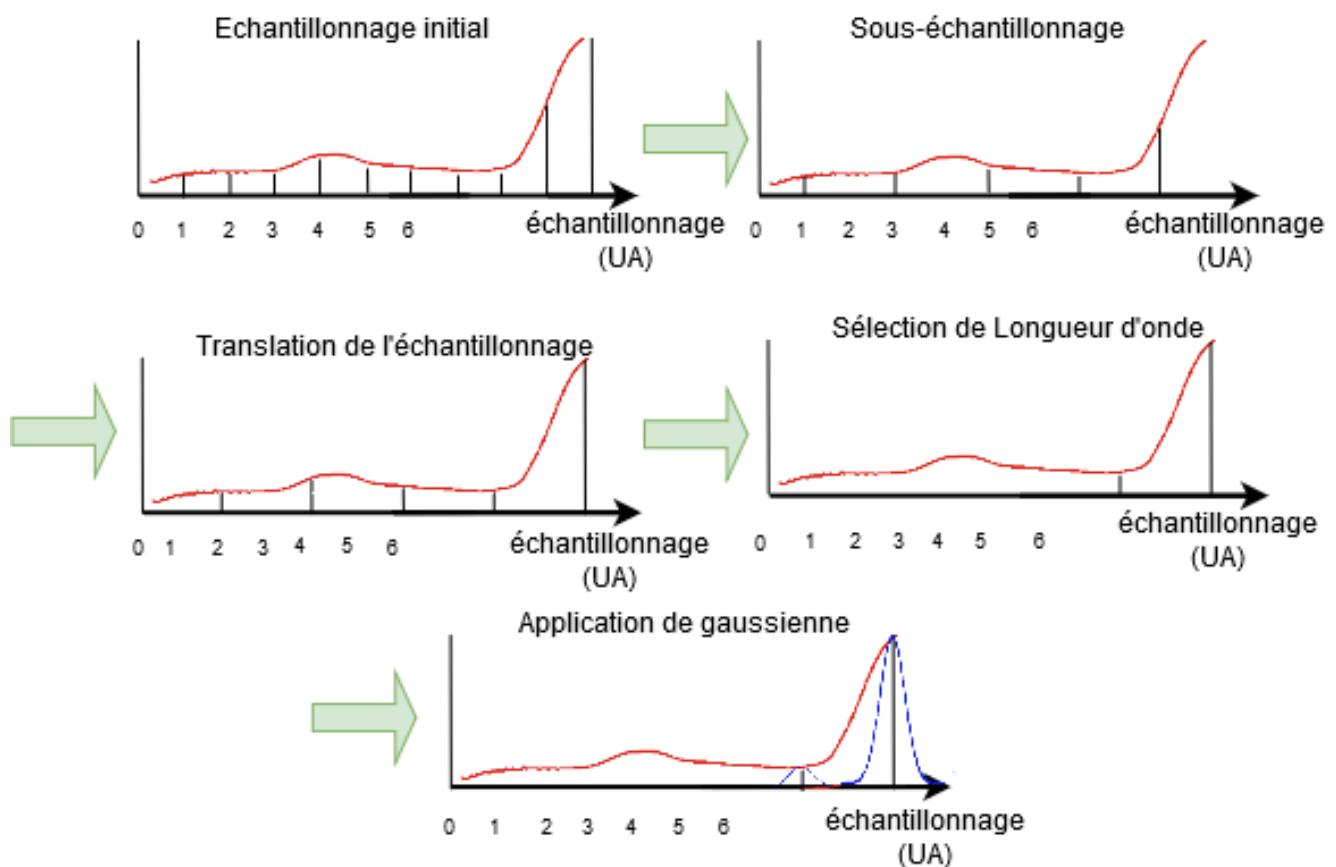


FIGURE 4 – Schéma récapitulatif des différentes étapes pour l'établissement du cahier des charges - Échantillonnage initiale : situation de départ, Sous-échantillonnage : Variation du pas (n°1 dans le tableau 1), Translation de l'échantillonnage : Translation de l'échantillonnage (n°2 dans le tableau 1), Sélection de longueur d'onde : Sélection de longueur d'onde (n°3 dans le tableau 1), Application de gaussienne : Application d'une gaussienne (n°4 dans le tableau 1)

4.3 Exploitation du modèle (Résultats et discussion)

4.3.1 Estimations de référence

4.3.1.1 Référence REF#1

Les données de référence REF#1 sont issues d'une inversion avec toute l'information spectrale. Elles peuvent être optimisées en choisissant plus finement les informations. elles constituent une base sur laquelle nous allons travailler. La figure ci-dessous permet de visualiser cette référence pour chaque constituant.

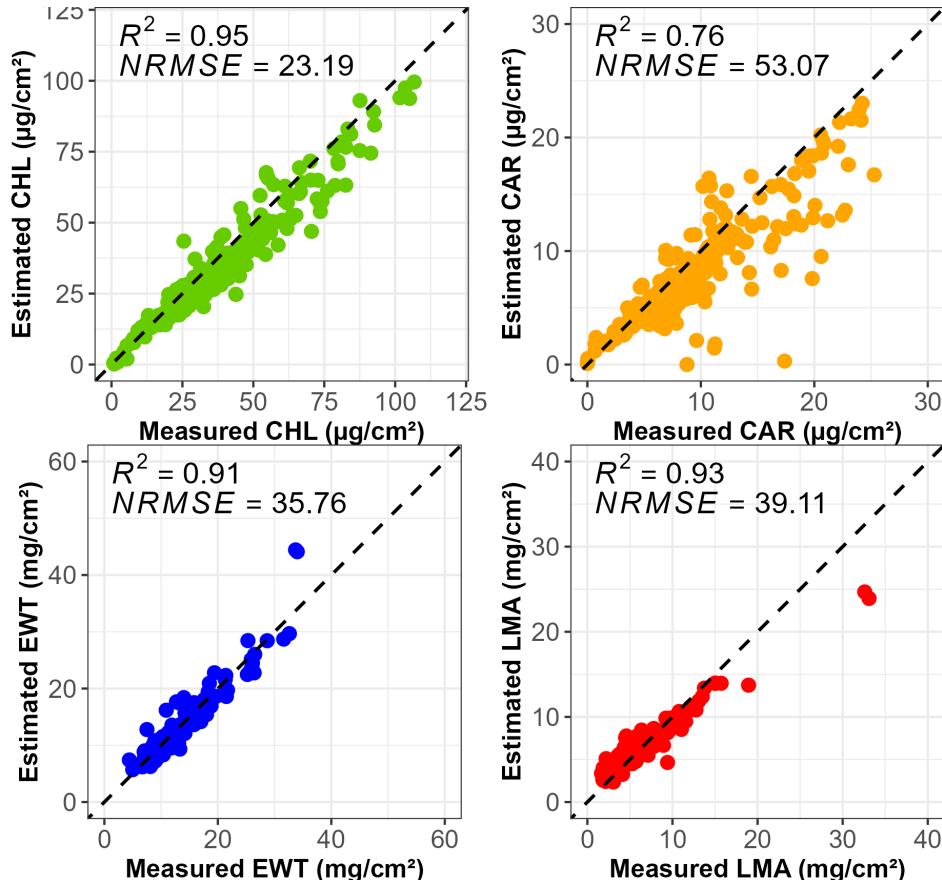


FIGURE 5 – Estimation de référence REF#1 en fonction des mesures

On remarque sur la figure que malgré le fait que les résultats soient parfaitables, on obtient tout de même une tendance. Les estimations ont une corrélation assez forte avec les mesures, excepté pour la masse surfacique. On remarque que pour la matière sèche et la teneur en eau l'estimation sur les valeurs extrêmes est assez fastidieuse.

4.3.1.2 Référence REF#2

Les estimations de références REF#2 sont faites à partir de l'information spectrale optimale. La plage spectrale optimale pour la chlorophylle est de 700 nm à 720 nm, celle pour les caroténoïdes est de 520 nm à 560 nm et pour la teneur en eau et les caroténoïdes, la plage s'étend de 1700 nm à 2400 nm.

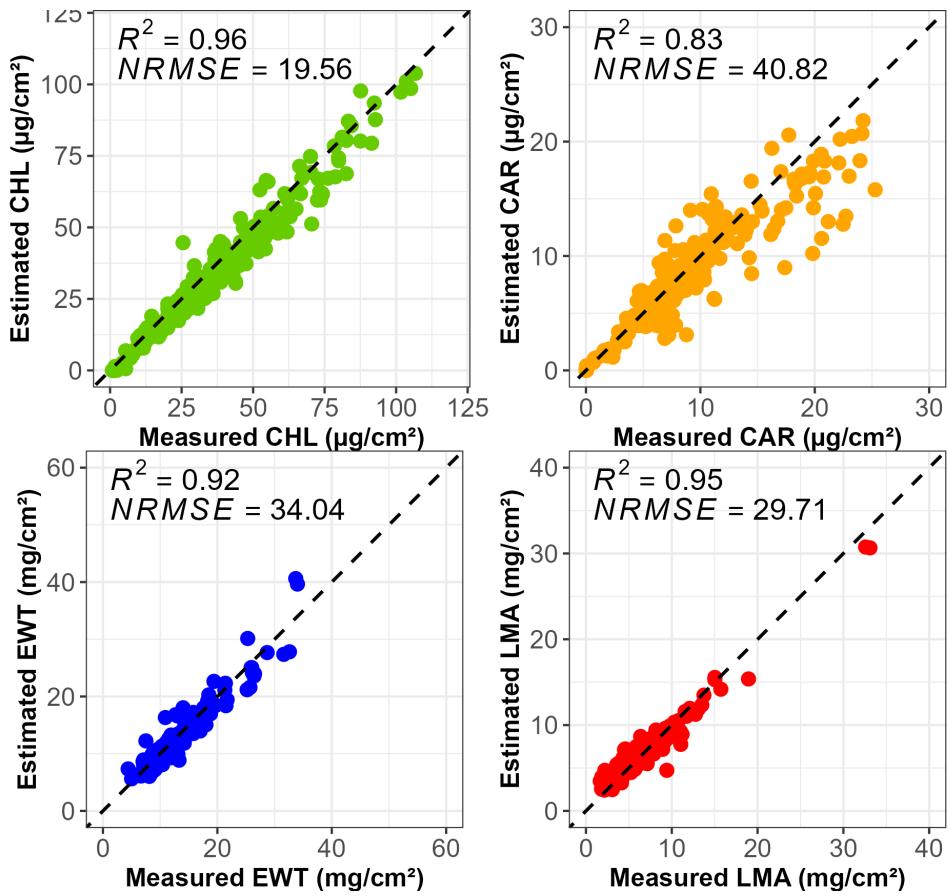


FIGURE 6 – Estimation de référence REF#2 en fonction des mesures

Elle constituent notre objectif théorique. On remarque que par rapport à REF#1 nous avons un meilleur coefficient de détermination et une erreur quadratique plus faible. C'est donc que l'estimation est plus juste et plus précise. On remarque aussi que pour les valeurs extrêmes l'estimation de la matière fraîche et de la matière sèche est plus précise. Lorsque l'on voudra simuler un capteur on prendra cette estimation comme référence basse.

4.3.2 Estimation de la chlorophylle et des caroténoïdes

Dans cette section nous allons nous référer à la méthode développée lors de la partie 4.2.4. Nous allons estimer les pigments foliaires (chlorophylle et caroténoïdes) en étudiant la plage spectrale [400-900] nm afin de parvenir à une configuration optimale.

4.3.2.1 Première étape : Influence du sous-échantillonnage sur la qualité de l'estimation des composants foliaires

1. Contexte

La base de données ANGERS 4.1.1 est échantillonnée avec un pas de 1 nanomètre entre 400 et 2450 nm. Dans cette partie nous allons espacer l'échantillonnage pour regarder le comportement la racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE 4.2.1) entre les estimations et les mesures de la base de données. Pour cela, nous allons augmenter le pas

d'échantillonage de 1 nm par 1 nm jusqu'à 50 nm sur la plage des pigments (partie 4.2.2).

2. Analyse

Nous allons regarder et analyser les résultats obtenus avec les différents pas. Pour ce faire nous nous appuierons sur la NRMSE par rapport aux mesures de référence comme critère d'évaluation de la qualité de l'estimation. En réalisant cette simulation nous obtenons les courbes de la figure 7.

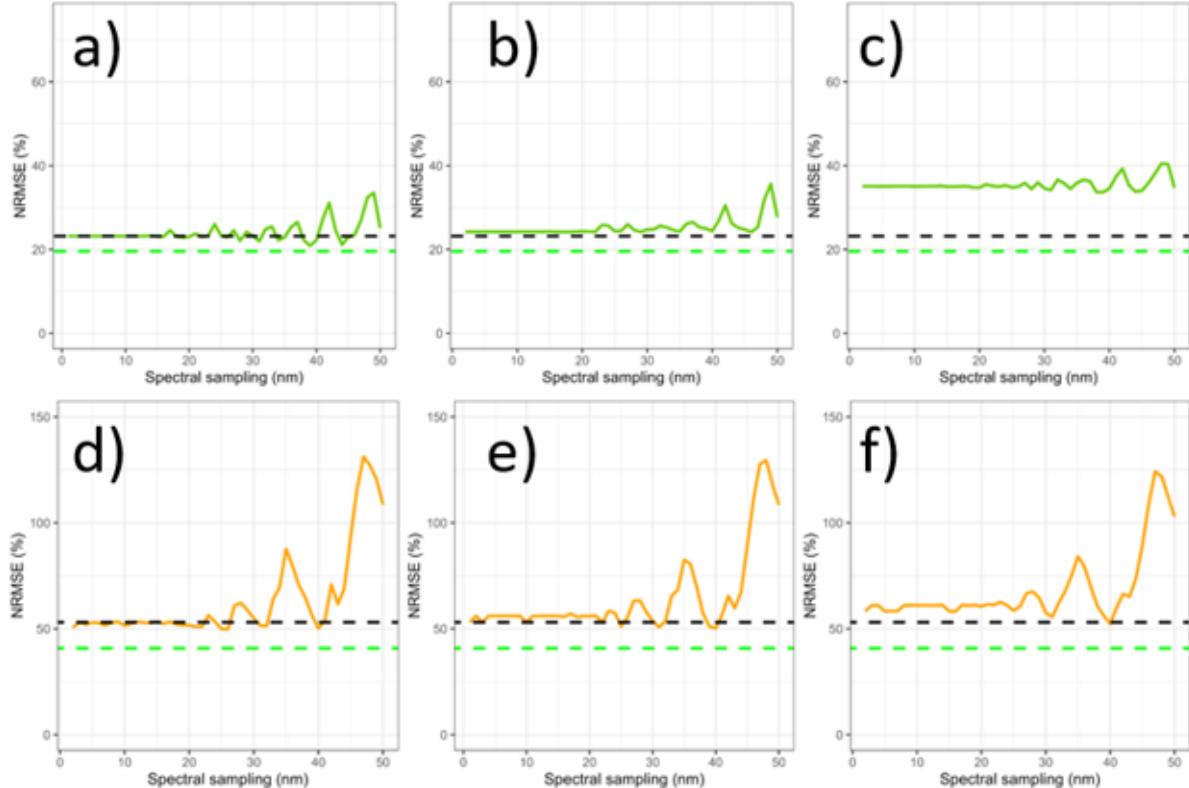


FIGURE 7 – Évolution de la NRMSE (%) en fonction du pas d'échantillonnage. a) estimation de CHL avec R&T, b) estimation de CHL avec R, c) estimation de CHL avec T, d) estimation de CAR avec T, e) estimation de CAR avec R, f) estimation de CAR avec T

Sur la figure 7, nous avons en pointillés verts l'estimation REF#2 (4.3.1.2) et en pointillés noirs l'estimation REF#1(4.3.1.1). La courbe verte est l'évolution de la NRMSE pour la chlorophylle, en orange, celle pour les caroténoïdes. On peut remarquer qu'entre les différentes configurations spectrales (RT, uniquement R avec estimation au préalable de N, uniquement T avec estimation au préalable de N), nous avons un profil d'évolution commun.

On remarque néanmoins que l'estimation des caroténoïdes avec uniquement la transmittance semble difficile (NRMSE minimum à 38% contre 21% et 23% dans le cas de RT et d'uniquement R). On remarque aussi qu'avec un certain pas, nous pouvons estimer aussi bien voir mieux un composant qu'avec toute la gamme [400-900] nm. En effet, on remarque sur la figure 7,a) un minimum pour un pas de 38 nm qui est en dessous de notre référence REF1 (ce n'est pas le seul mais c'est le minimum de la courbe). Cela se

retrouve sur les différents graphes, on en déduit que l'on peut minimiser de l'information optique sans détériorer nos estimations.

Le profil des graphes est aussi intéressant, nous avons une période de pseudo-constance puis à partir d'un certain pas, nous avons des motifs en forme de ponts qui vont en s'agrandissant et en s'élargissant. La pseudo stabilité qui précède ces pseudo-oscillations peut nous renseigner quant à la largeur d'une plage spectrale contenant de l'information pertinente. Effectivement, durant cette pseudo-stabilité, l'échantillonnage est suffisamment fin pour que l'on tombe systématiquement dans cette plage.

On remarque aussi que les pas des minima sont spécifiques à chaque composant et configuration. Il faudra donc faire une étude sur chacun d'entre eux.

4.3.2.2 Deuxième étape : Influence de la translation de l'échantillonnage sur la qualité de l'estimation des composants foliaires

1. Contexte

Après avoir sous-échantillonné la plage spectrale, nous avons choisi de prendre le pas d'échantillonnage permettant de minimiser la NRMSE pour chacun des composants et chacune des configurations. Nous allons maintenant effectuer un balayage avec notre peigne d'échantillonnage pour savoir s'il n'y a pas d'information plus pertinente avec ce pas dans notre plage [400-900]nm. Cette translation s'effectuera ira jusqu'au pas d'échantillonnage trouver lors de l'étape suivante. Si l'on dépasse ce pas, nous nous retrouvons au stade initial moins la première longueur d'onde.

2. Analyse

De manière générale, on remarque que lorsqu'on effectue une translation, nous obtenons un motif en cloche. Avec cette translation, on affine l'estimation en venant regarder chaque longueur d'onde via la translation. De ce fait, si une information spectrale plus importante était entre deux échantillonnages, la translation viendra la mettre en évidence.

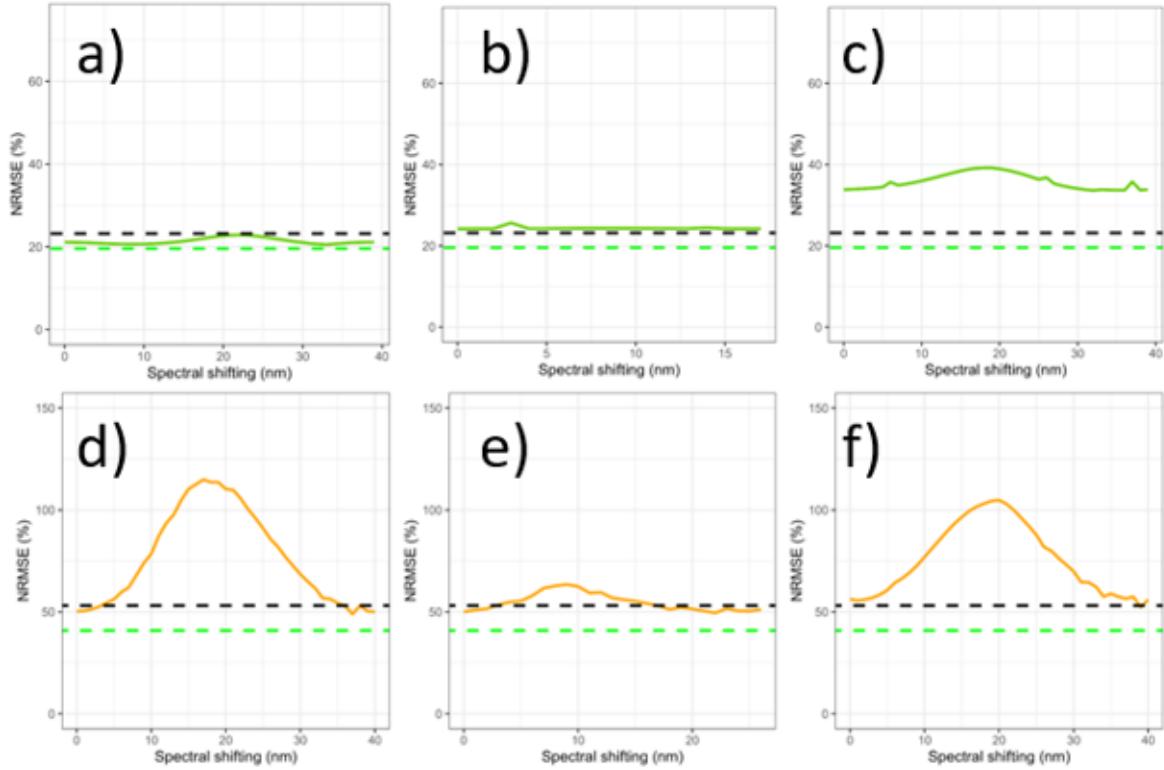


FIGURE 8 – Évolution de la NRMSE en fonction de la translation de l'échantillonnage.

a) estimation de CHL avec R&T, b) estimation de CHL avec R, c) estimation de CHL avec T, d) estimation de CAR avec R&T, e) estimation de CAR avec R, f) estimation de CAR avec T

Comme on peut le voir sur la figure 8, il existe un minima pour la NRMSE lorsque l'on fait translater le peigne d'échantillonnage. Ce minima se trouve souvent au début ou à la fin, par exemple sur la figure 8, a), le minima de la NRMSE pour l'estimation de la chlorophylle avec la réflectance et la transmittance se situe à 33 nm de translation.

On remarque que l'on revient à la NRMSE de départ ou quasiment à la même valeur au bout de la translation, ce qui est cohérent puisqu' apparemment il n'y a pas d'information spectrale pertinente aux alentours de 400 nm pour les pigments [al08b].

4.3.2.3 Troisième étape : Sélection des longueurs d'onde pertinentes parmi les lots sélectionnés

1. Contexte

En partant des données sous-échantillonées et translatées selon les composants afin de réduire au mieux l'erreur de l'estimation, nous allons venir supprimer une longueur d'onde parmi celle restante regarder la NRMSE, la remettre et en supprimer une autre puis sélectionner le lot de longueur d'onde qui sera le moins impacté par la suppression d'une longueur d'onde et recommencer jusqu'à n'avoir qu'une seule longueur d'onde. On note les longueurs d'onde supprimées dans l'ordre afin de pouvoir estimer un lot qui permettra une bonne estimation

2. Analyse

En agissant de la sorte, nous devrons identifier les longueurs d'onde qui nuisent à l'estimation parmi celles restantes et celles qui permettent une estimation optimale des composants selon la configuration. Nous pourrons ainsi choisir les longueurs d'onde que nous utiliserons par la suite.

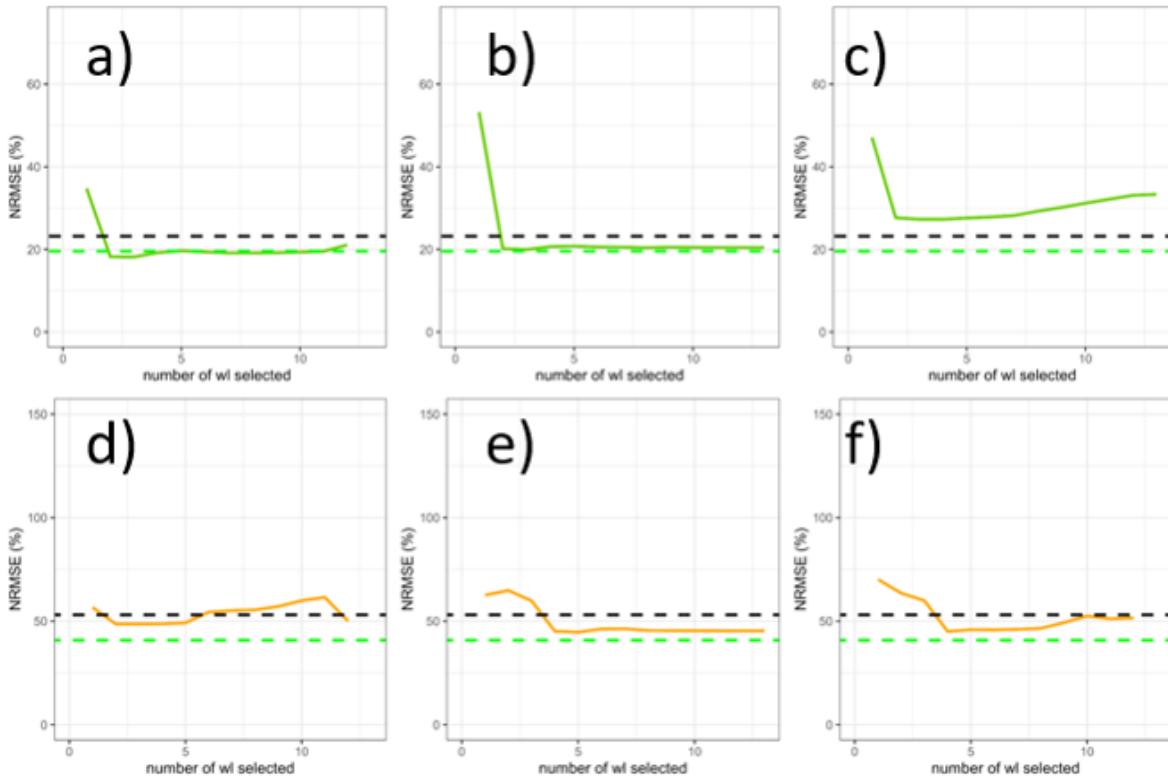


FIGURE 9 – NRMSE (%) en fonction du nombre de longueurs d'onde sélectionnées par importance.

a) estimation de CHL avec R&T, b) estimation de CHL avec R, c) estimation de CHL avec T, d) estimation de CAR avec R&T, e) estimation de CAR avec R, f) estimation de CAR avec T

La figure 9 met en évidence qu'en supprimant certaines longueurs d'onde nous pouvons améliorer la justesse des estimations pour chaque composant. On remarque aussi qu'avec une seule longueur d'onde nous dégradons notre estimation par rapport à 2 ou plus longueurs d'onde.

Effectivement, l'inversion du modèle PROSPECT devient plus compliquée avec une seule longueur d'onde car le modèle repose sur un système de minimisation de la fonction de Mérite 3.3.4. Il existe donc plusieurs profils de feuilles pouvant minimiser cette erreur entre la modélisation et la mesure liée au fait que les participations des composants à la transmittance et la réflectance de la feuille s'additionne. Avec 2 longueurs d'onde, l'inversion est donc plus précise.

Avec R et T, nous avons une bonne estimation de CAR avec uniquement 2 longueurs d'onde, il nous en faut 4 pour l'estimation avec juste R et de même avec juste T.

4.3.2.4 Quatrième étape : Influence de la résolution spectrale sur la qualité de l'estimation des composants foliaires

1. Contexte

A présent que nous avons identifié l'information spectrale optimale selon notre méthode pour les différents pigments et les différentes configurations, nous allons appliquer un filtre gaussien à ces longueurs d'onde afin de simuler une LED laser centrée sur ces longueurs d'onde. Nous ferons varier la largeur à mi-hauteur (LMH ou FWHM en anglais pour full width at half maximum) de ce filtre gaussien afin de simuler différents profils de LED et voir comment évolue l'erreur quadratique moyenne normalisée en fonction de ce profil. Cela permettra de voir jusqu'à quelle largeur à mi-hauteur nous pouvons aller tout en préservant une bonne estimation spectrale.

2. Analyse

En appliquant ce filtre, on remarque sur la figure 10 que la NRMSE suit une tendance parabolique. De même on remarque un plateau au début de la courbe, cela vient du fait que les mesures optiques foliaires de la base de données ont été réalisées avec un spectromètre dont la résolution est de 3 nm dans le visible et de 12 nm dans l'infrarouge.

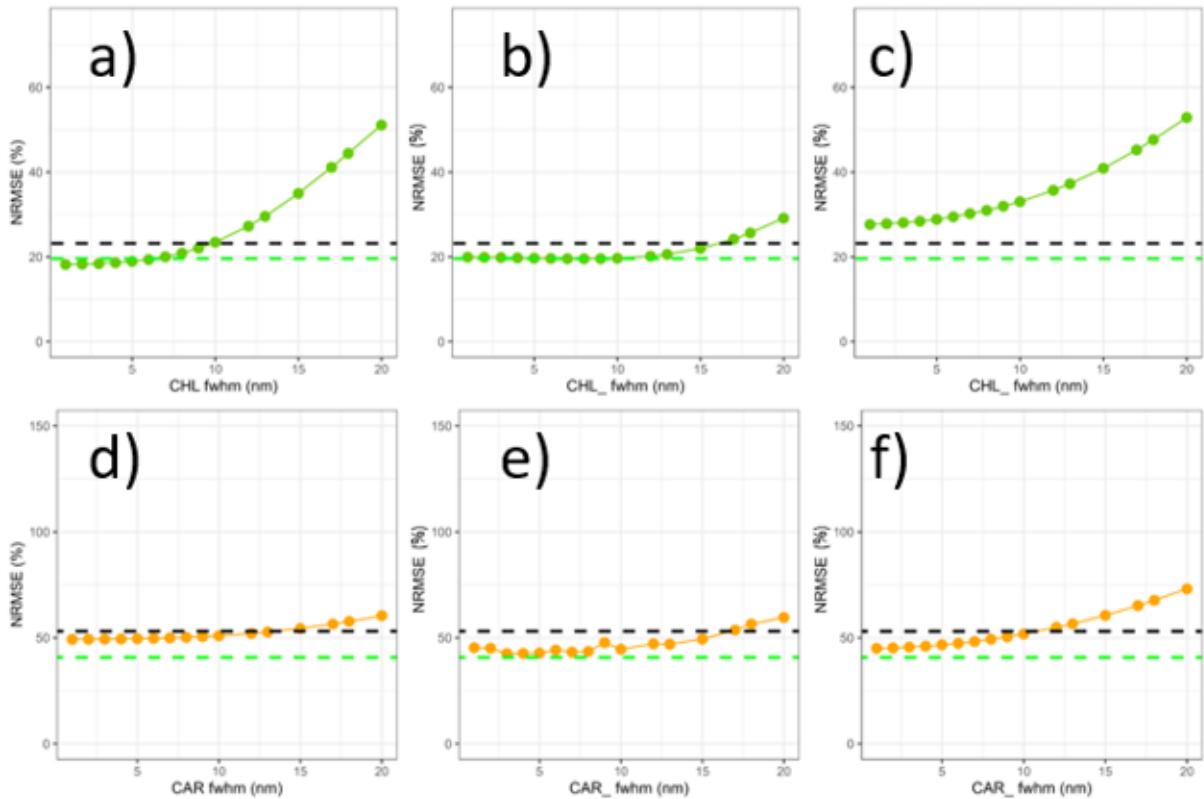


FIGURE 10 – NRMSE (%) en fonction de la largeur à mi hauteur de la gaussienne appliquée aux lots de longueurs d'onde.

a) estimation de CHL avec R&T, b) estimation de CHL avec R, c) estimation de CHL avec T, d) estimation de CAR avec R&T, e) estimation de CAR avec R, f) estimation de CAR avec T

De la même manière, on peut observer sur la figure 10 que nous pou-

vons obtenir la même qualité d'estimation avec une source dont le profil spectral gaussien a une LMH de 10 nm que lorsqu'on fait une estimation sur l'ensemble de la gamme [400-900] nm. Or à cette étape, nous utilisons au plus un lot de 4 longueurs d'onde pour réaliser l'estimation. Nous avons réussi à diviser par plus de 100 la quantité d'information spectrale nécessaire pour obtenir la même qualité d'estimation pour les pigments.

4.3.3 Estimation de la teneur en eau et en matière sèche sur la plage [1300-2400] nm

Nous allons appliquer la même méthode que les pigments, à savoir la méthode développée en partie [4.2.4](#) en nous concentrant cette fois sur la teneur en eau (EWT) et la teneur en matière sèche (LMA). Pour ce faire nous nous pencherons sur la plage spectrale [1300-2400] nm et nous la comparerons à la plage [1300-1700] nm à la fin.

4.3.3.1 Première étape : Influence du sous-échantillonnage sur la qualité de l'estimation d'EWT et de la LMA

1. Contexte

Nous allons reprendre le même contexte que lors de la partie [4.3.2.1](#) en utilisant la plage spectrale [1300-2400] nm.

2. Analyse

Après estimation, en regardant l'évolution de la NRMSE en fonction du pas d'échantillonnage, nous obtenons la figure [11](#).

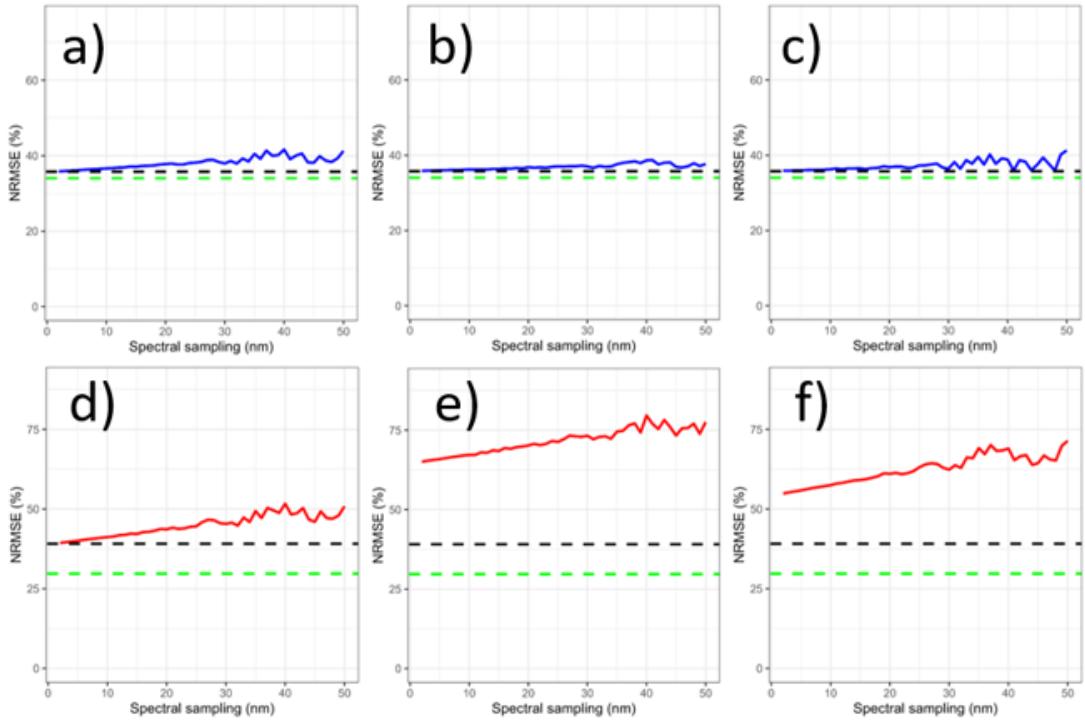


FIGURE 11 – Évolution de la NRMSE (%) en fonction du pas d'échantillonnage. a) estimation de CHL avec R&T, b) estimation de EWT avec R, c) estimation de EWT avec T, d) estimation de LMA avec R&T, e) estimation de LMA avec R, f) estimation de LMA avec T, pointillés vert : REF#2, pointillés noir : #1

On remarque que l'estimation d'EWT à l'air plutôt satisfaisante dans toutes les configurations alors que l'estimation de la LMA semble compliquée (NRMSE élevée quelque soit le pas) lorsque l'on supprime l'une des propriétés optiques. Nous obtenons néanmoins le même profile de courbe que pour les pigments (partie 4.3.2.1 avec les mêmes déductions et analyses qui en découlent quant aux minima.

4.3.3.2 Deuxième étape : Influence de la translation de l'échantillonnage sur la qualité de l'estimation d'EWT et de la LMA

1. Contexte

Nous allons de nouveau effectuer une translation du peigne d'échantillonnage afin de s'assurer d'obtenir les meilleurs lots de longueurs d'onde.

2. Analyse

Après avoir effectuer nos estimations en translatant, nous traçons l'évolution de la NRMSE en fonction de la translation de l'échantillonnage. Nous obtenons la figure 12

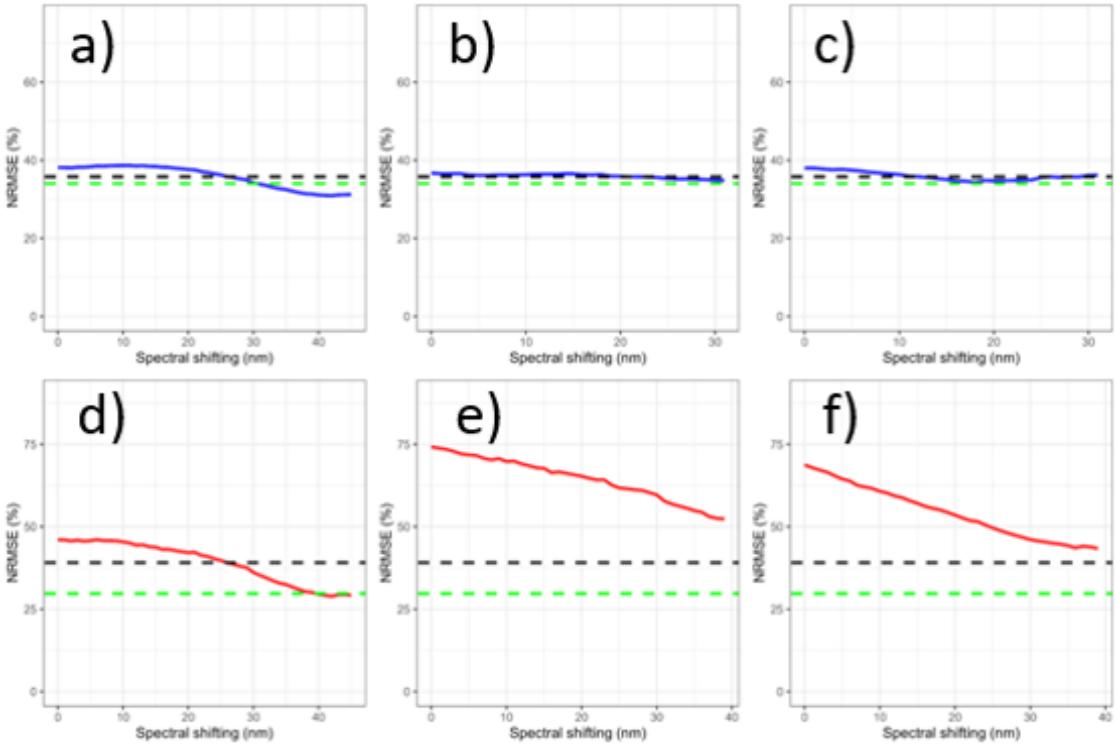


FIGURE 12 – Évolution de la NRMSE en fonction de la translation de l'échantillonnage.

a) estimation de EWT avec R&T, b) estimation de EWT avec R, c) estimation de EWT avec T, d) estimation de LMA avec R&T, e) estimation de LMA avec R, f) estimation de LMA avec T

Comme on peut le voir sur la figure 12, le profil de l'évolution de la NRMSE est décroissant quelque soit le composant. Cela vient du fait qu'il n'y pas d'information spectrale permettant l'estimation d'EWT et de la LMA dans la gamme [1300-1350] nm et que cette gamme vient dégrader l'estimation. De la même manière qu'on avait une qualité d'estimation peu correcte pour la LMA lors de l'étape précédente, on retrouve cela en début de translation. On note cependant une belle amélioration de la qualité de l'estimation pour la LMA notamment avec T lors qu'on s'approche d'une translation de 50 nm.

A la fin de cette étape nous avons donc un lot spécifique à chaque configuration sur lesquelles nous allons appliquer l'étape 3.

4.3.3.3 Troisième étape : Sélection des longueurs d'onde pertinentes parmi les lots sélectionnés

1. Contexte

En partant des lots sélectionnés à l'étape précédente, nous allons venir appliquer la "Backward stepwise selection".

2. Analyse

En traçant la NRMSE par rapport au nombre de longueur d'onde sélectionnées pour l'estimation nous obtenons la figure 13

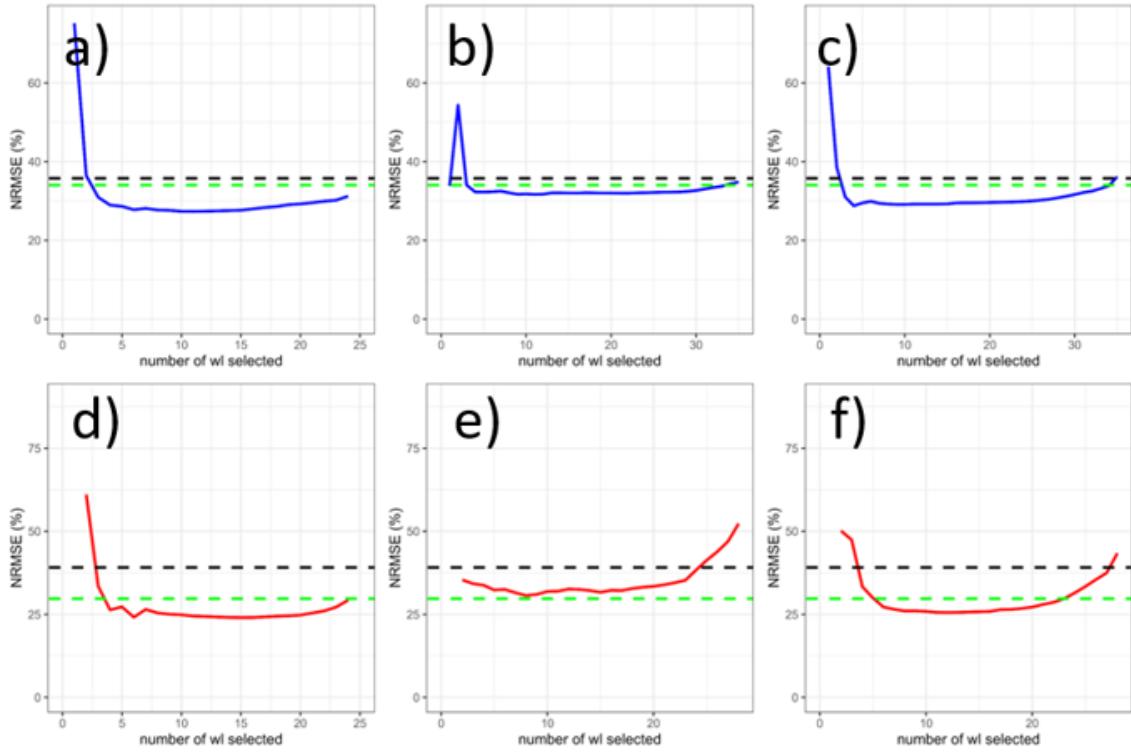


FIGURE 13 – NRMSE (%) en fonction du nombre de longueurs d’onde sélectionnées par importance.
 a) estimation de EWT avec R&T, b) estimation de EWT avec R, c) estimation de EWT avec T, d) estimation de LMA avec R&T, e) estimation de LMA avec R, f) estimation de LMA avec T

La figure 13 permet de mettre en évidence que les conclusions qui s’appliquaient aux pigments s’appliquent aussi à la LMA et l’EWT. De plus, on remarque que quelque soit la configuration, nous avons réussi à trouver un ensemble de longueurs d’onde (4 longueurs d’onde pour les 2 constituants) permettant d’obtenir des résultats similaires ou mieux qu’avec l’inversion optimisée de PROSPECT 4.3.1.2.

4.3.3.4 Quatrième étape : Influence de la résolution spectrale sur la qualité d’EWT et de la LMA

1. Contexte

A présent que nous avons identifié l’information spectrale optimale, nous allons appliquer un filtre gaussien à ces longueurs d’onde et faire varier la largeur à mi-hauteur de ce filtre gaussien afin de voir comment évolue la NRMSE en fonction de ce profil.

2. Analyse

En traçant la NRMSE en fonction de la LMH de la gaussienne, on remarque sur la figure 10 que la NRMSE suit toujours une tendance parabolique. De même on remarque toujours un plateau au début de la courbe à cause de la résolution spectrale de la base de données ANGERS.

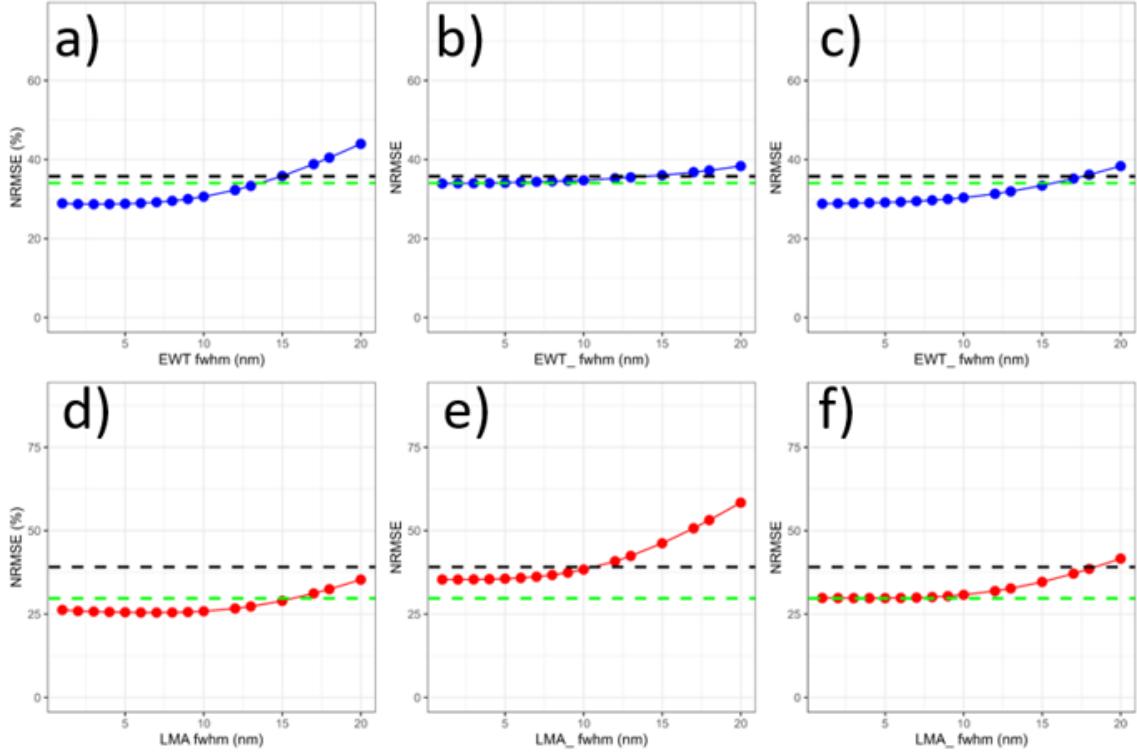


FIGURE 14 – NRMSE (%) en fonction de la largeur à mi hauteur de la gaussienne appliquée aux lots de longueurs d’onde.

a) estimation de EWT avec R&T, b) estimation de EWT avec R, c) estimation de EWT avec T, d) estimation de LMA avec R&T, e) estimation de LMA avec R, f) estimation de LMA avec T

On note aussi que nous pouvons obtenir la même qualité d'estimation avec une LMH de 15 nm que la référence REF#1. Nous avons réussi en utilisant au plus 5 longueurs d'onde à faire aussi bien qu'avec toute la plage [1300-2400] nm.

4.3.3.5 Analyse des résultats sur la plage [1300-1700] nm et comparaison avec la plage [1300-2400] nm

Pour la plage spectrale [1300-1700] nm, les composants étudiés sont la teneur en eau et la teneur en matière sèche, les résultats des différentes étapes sont représentés sur les figures 26, 27, 28 et 29 en Annexes B. La méthodologie suivie est celle détaillée dans la partie 4.2.4.

Pour cette gamme spectrale, nous parvenons au bout la 4^{ème} étape à obtenir une NRMSE inférieur à celle de REF#1 pour EWT en appliquant une gaussienne de largeur à mi-hauteur de 20 nm. Pour la LMA, les résultats sont moins concluants, excepté avec la configuration R&T. Nous ne parvenons pas à estimer aussi bien qu'avec toute la plage [1300-2400] nm (REF#1 : NRMSE = 39.11 %). Dans le cas de R&T, l'estimation est presqu'aussi bonne que REF#1 (NRMSE = 40.2%).

La difficulté d'estimer correctement la LMA vient en partie du fait que sa plage de variation spectrale varie assez peu en fonction de sa concentration surfacique [Eli15]. De plus la gamme [1300-1700] nm n'est pas vraiment appropriée pour cette estimation [al19].

4.4 Synthèse de la partie modélisation

Pour conclure la partie modélisation, afin d'obtenir des estimations correctes des différents composants chimiques foliaires nous avons intérêt à utiliser une configuration nécessitant uniquement la réflectance avec une estimation au préalable de N pour les pigments et une configuration en transmittance avec une estimation au préalable de N pour la matière fraîche et la matière sèche. Pour l'estimation de la matière fraîche (teneur en eau) nous pouvons nous restreindre à la gamme [1300-1700] nm cependant pour la LMA, il va falloir rester sur la gamme [1300-2400] nm si l'on souhaite un estimation fiable.

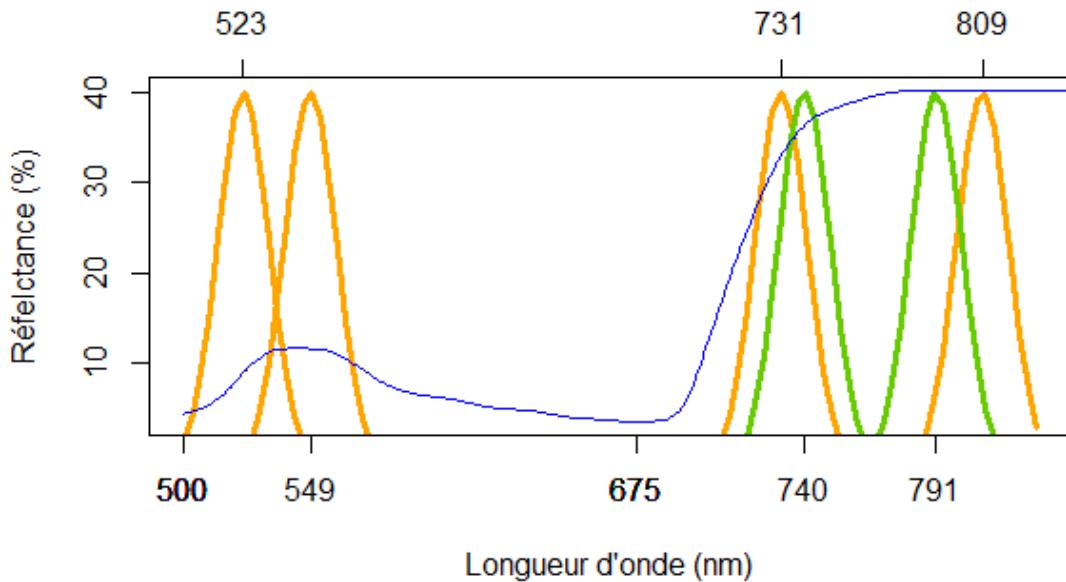


FIGURE 15 – Les différentes longueurs d'onde nécessaire quant à l'estimation de la teneur en caroténoïdes (orange) et en chlorophylle (vert) avec un spectre de réflexion d'une feuille standard (bleu)

Sur la figure 15, on remarque que les longueurs d'onde identifiées sont dans des endroits de variation de la réflectance, il va y avoir une sensibilité spectrale à ces endroits en fonction des constituants (figure 25) et dans un endroit où il y aura peu de variation (791 nm et 809 nm) afin d'obtenir une estimation de référence (cette zone varie en fonction du nombre de structure et cette variation est assez faible, figure 25).

On peut faire un constat assez similaire avec l'EWT et la LMA. Comme on peut le voir sur la figure 16, nous avons toujours des pics situés dans des zones de variation et des zones de stabilité.

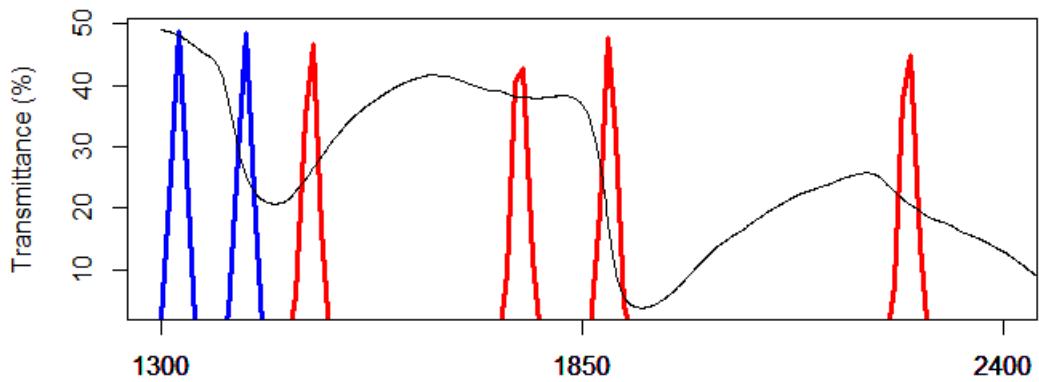


FIGURE 16 – Les différentes longueurs (nm) d'onde nécessaire quant à l'estimation de la teneur en eau (bleu) et matière sèche (rouge) avec un spectre de transmission d'une feuille standard (noir)

Lorsque l'on affiche les estimations optimales en fonction des valeurs mesurés nous obtenons la figure 17

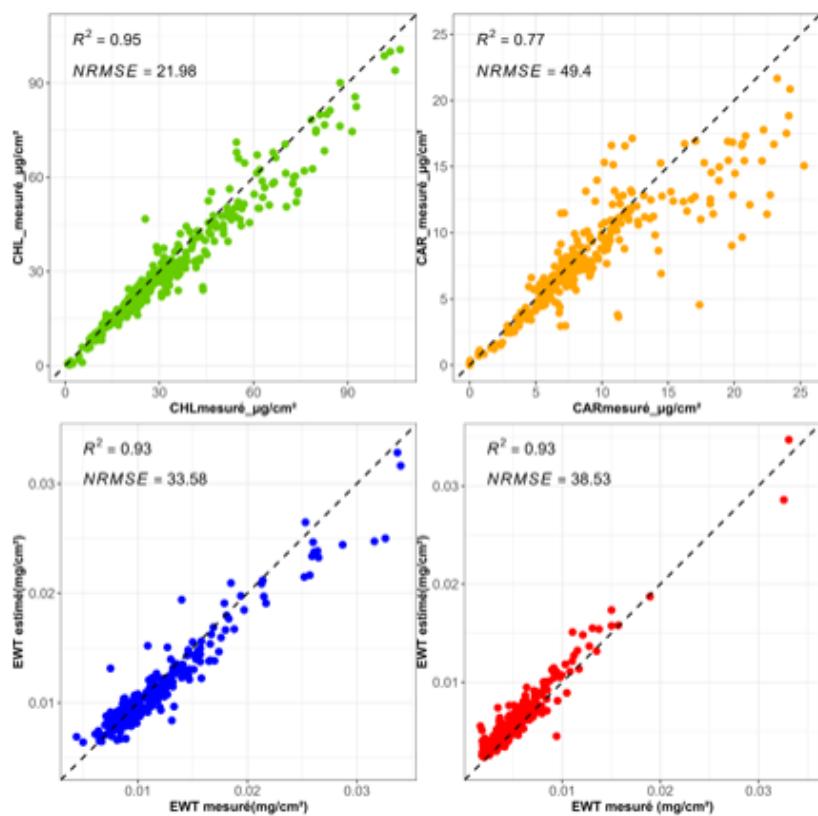


FIGURE 17 – Les différentes estimations en fonction des mesures de la base de données ANGERS

Finalement, avec un lot de 12 longueurs d'onde nous sommes parvenu à, théoriquement, obtenir aussi bien qu'avec toute la plage spectrale (notre REF#1) avec des sources ayant une largeur spectrale de 15 nm pour les pigments et 20 nm pour la LMA et l'EWT. De même nous sommes parvenue à estimer l'EWT avec des longueurs d'onde dans le très proche infra-rouge (inférieur à 1,7 µm) ce qui est encourageant pour estimer ce trait foliaire sans que cela soit onéreux ou encombrant (nécessité de détecteur dans la plage [1700-2400] nm qui sont plus chère et refroidit donc plus encombrant). Il faudra soit cependant faire un compromis sur la LMA soit accepter le fait d'ajouter les diodes et photo-diode supplémentaires pour obtenir cette qualité d'estimation.

5 Développement du prototype de laboratoire

5.1 Contexte et objectifs

A présent que nous avons établi un cahier des charges pour confectionner notre capteur optique, nous voulons établir une preuve de concept afin de valider les paramètres identifiés dans la section 4. Nous allons nous concentrer sur les longueurs associées à la chlorophylle et aux caroténoïdes qui ont des longueurs d'onde dans le visible dans la configuration R&T.

Pour cela nous allons utiliser un capteur ayant déjà été éprouvé : un ASD FieldSpec 3 qui servira à fournir des mesures de référence et monter un banc optique en parallèle afin de pouvoir comparer les mesures du banc à celle de l'ASD.

L'objectif final idéal serait d'obtenir un banc qui fournissent des mesures fortement corrélées avec les mesures de l'ASD.

Notre banc optique pour l'établissement de notre preuve de concept est constitué d'une source à spectre large qui agit dans le visible, d'un monochromateur, de deux sphères intégrantes reliées à un commutateur optique qui lui-même est relié à un spectromètre.

L'ensemble sera piloté par ordinateur à l'aide du logiciel Labview permettant d'interfacer les différents éléments et de les piloter.

Nous allons dans un premier temps détailler les différents éléments du banc afin de mieux les comprendre, ainsi que l'ASD, puis dans un second temps nous verrons les premiers résultats obtenus.

5.2 Matériels

Dans cette sous-section nous allons voir les différents éléments qui composent notre banc optique ainsi que l'ASD (partie 3.1.2.1) que nous allons utiliser pour faire les mesures de référence. Nous verrons aussi l'interfaçage et le pilotage du banc.

5.2.1 La source

La source est une lampe à arc Mercure-Xenon de chez Newport, modèle 67005. Elle fonctionne avec son alimentation allant d'une puissance de 50 à 500 Watts (électrique), les optique de condensation, un réflecteur et un ventilateur pour la refroidir. Durant les manipulations sa puissance d'alimentation est de 300 Watts. Son spectre est représenté sur la figure 18.

Spectre d'émission de la lampe HgXe

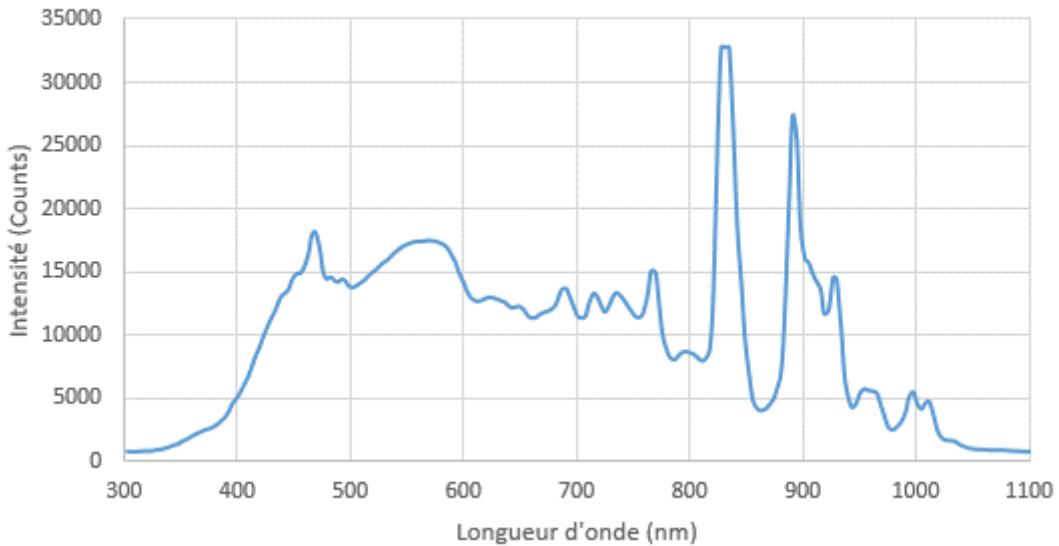


FIGURE 18 – Spectre d'émission de la lampe 67005 avec ampoule à arc HgXe de chez Newport mesuré avec le MMS 1

Comme on peut le voir sur la figure 18, la source utilisée émet de 350 nm environ jusqu'à 1000 nm. Nous pourrons donc utiliser cette source afin de mesurer la réflectance et la transmittance.

Cette source émettant dans l'ultra-violet avec un fort rayonnement, des lunettes de protection sont une sécurité à prendre afin de préserver les yeux.

5.2.2 Le monochromateur

Un monochromateur est un dispositif optique qui transmet une bande spectrale très fine, théoriquement on voudrait une longueur d'onde, sélectionnée mécaniquement parmi un spectre. Il joue un rôle de disperseur et de sélectionneur de longueur d'onde.

Notre monochromateur vient de chez Newport, c'est le modèle 74125.

Le spectromètre est constitué de différents éléments, il a une roulette pouvant contenir jusqu'à 5 filtres et un shutter en amont, un jeu de 3 réseaux en réflexion, des miroirs et des fentes en entrée et en sortie.

Le rôle des filtres en entrée est de sélectionner la gamme spectrale que l'on souhaite étudier afin d'éviter d'obtenir en sortie la longueur d'onde que l'on souhaite (dans l'ordre 1) et les ordres supérieurs des longueurs d'onde diviseurs de celle étudiée. La formule des réseaux (13) nous l'explique. On a :

$$a(\sin(\theta_p) - \sin(i)) = p\lambda \quad (13)$$

avec

- a : l'espace entre deux traits du réseau, on retrouve parfois la densité de traits $\frac{1}{a}$
- θ_p : l'angle de l'ordre p , un entier relatif
- i : l'angle d'incidence de faisceau sur le réseau

- λ : la longueur d'onde étudiée

A partir de cette équation, on en déduit que si l'on étudie la longueur d'onde 800 nm dans l'ordre 1, on retrouvera au même endroit la longueur d'onde 400 nm dans l'ordre 2 ainsi que la longueur d'onde 200 nm dans l'ordre 4, etc.. qui vont participer au signal reçu par l'échantillon et fausser la mesure.

On déduit aussi que pour un ordre donné, chaque longueur d'onde est à un emplacement précis différent des autres longueurs d'onde.

Les filtres viennent donc couper les longueurs d'onde parasites afin de ne garder que la longueur d'onde voulue en sortie du monochromateur.

Les différents filtres sont des passe-bas fréquentielles donc des passe-hauts en terme de longueurs d'onde et on les fréquences de coupure suivante :

- Filtre 1 : longueur d'onde de coupure : 375 nm
- Filtre 2 : longueur d'onde de coupure : 715 nm
- Filtre 3 : longueur d'onde de coupure : 1000 nm

De même, nous disposons d'un jeu de trois réseaux ayant une densité de 1200 traits par mm et les caractéristiques suivantes :

- Réseau 1 : longueur de Blaze : 350 nm, plage d'utilisation [200-1400] nm
- Réseau 2 : longueur de Blaze : 750 nm, plage d'utilisation [450-1400] nm
- Réseau 3 : longueur de Blaze : 1250 nm, plage d'utilisation [750-2500] nm

Pour notre étude, nous avons choisi de partir sur une résolution en sortie de 10 nm. Cette résolution a été vérifiée avec le spectromètre.

5.2.3 Les sphères intégrantes

La sortie du monochromateur est relié à un jeu de deux sphères intégrantes entre lesquelles on placera l'échantillon à utiliser.

Elles servent à collecter toute la lumière issue de la réflexion ou de la transmission de la feuille sur 2π sr afin d'obtenir la réflectance et la transmittance hémisphériques de l'échantillon.

Pour une sphère de rayon r , avec un coefficient de réflexion ρ et un flux lumineux incident ϕ , l'irradiance (densité surfacique du flux lumineux, en W/m^2) initiale réfléchie est égale à :

$$E_1 = \rho \frac{\phi}{4\pi r^2} \quad (14)$$

A chaque réflexion le coefficient de réflexion augmente de manière exponentielle, de telle sorte que l'on a, à la $n^{ième}$ réflexion :

$$E_n = \rho(1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots + \rho^n) \frac{\phi}{4\pi r^2} \quad (15)$$

L'augmentation du coefficient de réflexion suit une série géométrique de raison $\rho < 1$, on a donc en sortie [Sch07] :

$$E = \frac{\rho}{1 - \rho} \frac{\phi}{4\pi r^2} \quad (16)$$

A partir de l'équation (16), on peut remonter au coefficient de réflexion de l'échantillon en mesurant le flux d'incidence avec une sphère vide, puis avec l'échantillon. C'est grâce à cela que l'on pourra ensuite utiliser PROSPECT pour estimer les composants.

5.2.4 Le spectromètre

Le spectromètre utilisé est un MMS 1. Il a une plage d'utilisation de 305 nm à 1150 nm ainsi qu'une résolution d'environ $\Delta = 3.3$ nm en théorie. Cette résolution s'est avérée être exacte (test avec un laser HeNe, émission à 632.8 nm).

Calibré avec une lampe HgAr, il devait initialement servir à vérifier le bon fonctionnement et la calibration du monochromateur. Finalement, il nous a servi comme détecteur dans le montage en nous évitant un montage avec une photodiode et un amplificateur. Il servira au passage de double référence avec le monochromateur pour la longueur d'onde centrale. Étant donné que sa résolution spectrale est inférieure à celle du monochromateur, cela n'est pas un inconvénient.

5.2.5 L'interfaçage et pilotage

L'interfaçage et le pilotage du banc a été réalisé sur LabView 2021. C'est un logiciel qui utilise le code graphique "G".

A partir de l'interface réalisée (voir figure 30, on peut piloter le monochromateur (filtre, réseau et longueur d'onde en sortie), ainsi que choisir la fibre qui sera utilisée pour la mesure (Transmittance ou Réflectance) et lire la mesure sur le spectromètre.

Elle permet d'enregistrer la mesure en format ".csv" ce qui la rend exploitable en "R" ou en tableau Excel.

La réalisation de la face arrière 31 a nécessité de comprendre le fonctionnement le protocole de communication des différents appareils, de gérer les potentielles erreurs, comme une nouvelle requête au monochromateur alors que ce dernier n'a pas fini de répondre à la précédente ainsi que d'établir les différents couples réseau ; filtre qui seront utilisés afin que le changement soit automatisé en fonction de la longueur d'onde et l'acquisition des mesures.

5.2.6 Les échantillons

Comme échantillons pour la mise à l'épreuve de notre preuve de concept, nous allons utiliser des échantillons tissus issus de matériel spécialisé dans la chasse et la photographie animale.

Des échantillons de feuille ne seront pas présents. Cela est lié au manque de temps pour effectuer une collecte et de matériel pour conserver le feuille au mieux.

5.2.7 La référence

La référence de notre banc optique sera constitué de l'ASD FieldSpecto 3 associé à une sphère d'intégration pour effectuer les mesures de réflectance et de transmittance hémisphériques. Ce matériel est de référence dans le milieu de la télédétection et de la proxydétection pour ce type de mesure, il est commun de le retrouver dans les instituts travaillant dans ces domaines. Ce spectromètre à une résolution de 3 nm dans le visible et 10 nm dans le proche infrarouge. Il a un pas d'échantillonnage de 1.4 nm dans la plage [350-1000]. Durant nos mesures nous seront dans cette plage : les longueurs d'onde que l'on va étudier sont 518 nm, 557 nm, 714 nm et 849 nm.

Pour observer et analyser les données, nous utiliserons le logiciel RS3. L'ensemble permet de mesurer la réflectance et la transmittance hémisphériques sur la plage spectrale de 350 nm à 2500 nm et coûte aux alentours de 60 000€.

5.3 Méthode

5.3.1 Le protocole expérimental

Une fois le banc optique calibré (en annexe C, figure 32) et monté, J'ai choisi d'effectuer les premières mesures sur la réflectance et la transmittance. J'ai donc choisi les longueurs d'onde associées à la configuration R&T pour la chlorophylle (714 nm et 849 nm) et les caroténoïdes (518 nm et 557 nm). J'ai ensuite suivi le protocole ci-dessous afin d'effectuer les différentes mesures. Le protocole pour expérimental pour récupérer les mesures de réflectance et transmittance hémisphériques est le suivant :

- Allumer les différents éléments (alimentation de la source, monochromateur, spectromètre)
- Régler la puissance de l'alimentation de la source sur 300 Watts
- Ouvrir le fichier monoc.vi et lancer le VI
- Rentrer le nom de dossier de sauvegarde
- Rentrer les longueurs d'onde voulues dans l'interface LabView (ou utiliser les valeurs par défaut : bouton "Générer Lambda")
- Rentrer le temps d'intégration souhaité ou appuyer sur le "Générer Ri0_t" ou "Générer Ti0_t"
- Mettre les lunettes de protection appropriées pour les UV
- Lancer la mesure la luminosité dans les sphères lampe éteinte (bruit de fond) et lampe allumée (blanc) en fermant la première sphère avec le bouchon réfléchissant puis en appuyant sur "Séquence Ri0".
- Puis lorsque la mesure est finie mettre le bouchon sur la seconde sphère et recommencer en appuyant cette fois sur "Séquence Ti0" .
- Placer l'échantillon entre les sphères d'intégration et noter son sens (quelle face va réfléchir, dans quel sens se fait la transmission).
- Rentrer le nom de l'échantillon dans l'emplacement prévu à cet effet sur l'interface
- Lancer la mesure la luminosité dans les sphères lampe allumée et éteinte en appuyant sur "Séquence Ri et Ti".
- Changer le sens de l'échantillon et recommencer pour faire les mesures sur les deux faces.

Les données sauvegardées sont ensuite traitées sur R pour obtenir la réflectance et la transmittance hémisphérique afin d'être comparées aux mesures de référence.

5.3.2 Les mesures de référence

Les mesures de références faites avec l'ASD FieldSpect 3 en suivant le protocole d'utilisation du manuel. Les données récupérées sont sauvegardées dans un fichier binaire et un traitement avec R a été nécessaire afin de les exploiter.

5.4 Résultats et discussion

Nous avons donc effectué les tests sur des échantillons tissus. Nous avons obtenu la réflectance et la transmittance pour 4 longueurs d'onde avec le banc (518 nm, 557 nm, 740 nm et 849 nm). Avec l'ASD nous avons fait l'acquisition de toute la plage spectrale [400-900] nm. La figure 19 nous montront l'exemple pour un échantillon, le N14.

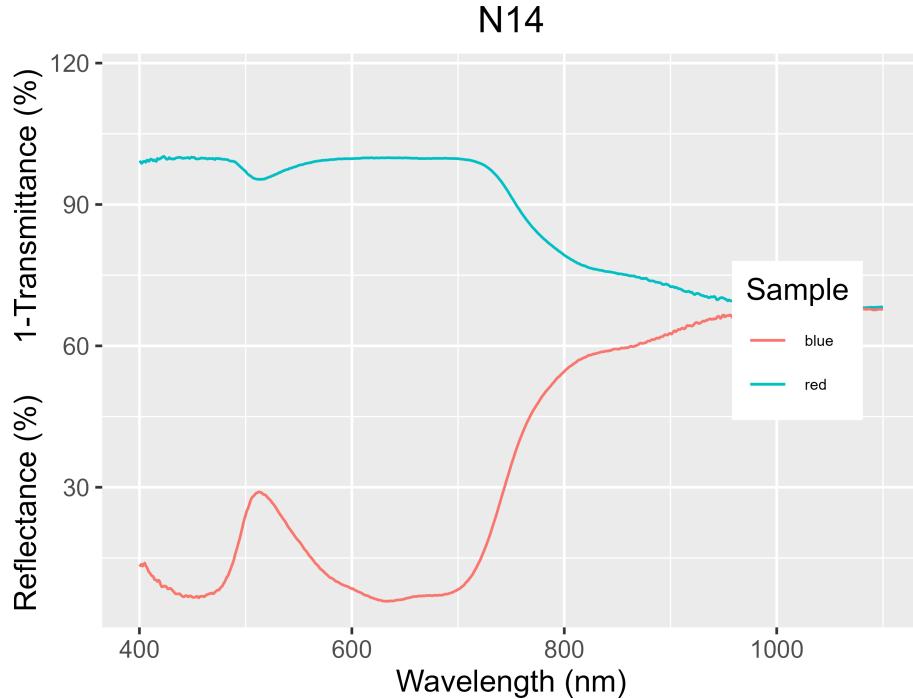


FIGURE 19 – Mesures de réflectance et de transmittance hémisphérique avec l'ASD FieldSpec 3 d'un échantillon, en bleu nous avons $(1-T)$ et en rouge nous avons R

En se référant aux différentes mesures effectuées nous avons obtenue les résultats dans le tableau 5.4

Longueurs d'onde	R banc (%)	R ASD (%)	T banc (%)	T ASD (%)
518 nm	24.7	28.42	5.1	4.66
557 nm	13.9	16.47	1.7	1.29
740 nm	23.6	27.19	4.6	4.3
849 nm	56.3	59.34	25.0	24.58

On remarque dans le tableau 5.4 que les mesures de réflectance sont sous-estimées par le banc et que les mesures de transmittance sont légèrement surestimées par rapport aux mesures ASD. On note aussi que l'absorbance a augmenté avec le banc pour toutes les expériences.

On peut donc en déduire qu'une partie des différences de mesures entre le banc et l'ASD vient du fait que le montage de l'ASD est spécialement conçu pour ce type de mesure et donc qu'il minimise les fuites alors que le montage du banc, notamment au niveau des sphères d'intégration, est peu adapté. L'échantillon

étant coincé entre les sphères, il est fort possible qu'une partie de la lumière se soit échappée par la et donc soit considérée comme absorbé par l'échantillon et que cette fuite ne soit pas prise en compte par les mesures de blanc car dans ce cas les sphères sont fermées par un bouchon réfléchissant.

La preuve de concept nous a permis d'obtenir des résultats qui ne collaient pas parfaitement avec les mesures de références, cependant, en identifiant les causes de divergence des mesures, elle est encourageante pour la suite.

6 Conclusion générale

6.1 Conclusion quant à la réalisation du projet

Finalement, la partie de modélisation et de simulation du capteur nous a apporté des résultats satisfaisants en nous prouvant qu'il est possible avec quelques longueurs d'onde choisies judicieusement et l'inversion du modèle PROSPECT d'obtenir des résultats à la hauteur de l'inversion optimisée [al21a][Boi17] sur la base de données ANGERS. La littérature scientifique sur le sujet m'a été d'une grande aide pour établir une méthodologie pour l'obtention d'un cahier des charges pour le futur capteur.

La partie optique nous a donné des résultats encourageant sur la première étape. Cependant, il faut encore optimiser le banc et le tester sur la configuration optimale de chaque composant sur des feuilles. On pourra alors continuer en testant des LEDs et récepteurs du marché et utiliser les travaux sur l'utilisation de PROSPECT avec des mesures bi-directionnelles [Bou07] pour obtenir un capteur portable leaf-clip conforme au cahier des charges.

6.2 Conclusion quant à mon expérience

Ce premier stage dans le monde de la recherche aura été une excellente expérience. J'ai beaucoup apprécié le côté interdisciplinaire du travail des différentes personnes que j'ai côtoyées. La découverte plus approfondie au fil des conversations avec mes collègues et conférences auxquelles j'ai assisté m'ont enrichi et ont attisé ma curiosité. De même, mettre mes compétences, et les améliorer, au service de l'environnement, de l'agriculture et aussi de l'écologie m'ont apporté un sentiment de gratification et d'accomplissement.

Au fil de ce stage, j'ai pu acquérir de nouvelles compétences, que ça soit dans la programmation avec R, dans le monde de l'environnement, mais aussi dans les relations professionnelles et dans l'autonomie et l'organisation du travail. Accompagné par mes tuteurs, j'ai pu me former sur les divers sujets comme les modèles physiques, notamment PROSPECT que j'ai utilisé, la biologie appliquée aux feuilles, l'état de l'art de l'estimation des composants foliaires.

Références

- [Sto60] G. G. STOKES. *On the Intensity of the Light Reflected from or Transmitted through a Pile of Plates.* <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112176>>. [Online ; accessed 22-april-2022]. 1860.
- [al69] Allen et AL. *Interaction of isotropic light with a compact plant leaf, Journal of the Optical Society of America.* <<https://doi.org/10.1364/JOSA.59.001376>>. [Online ; accessed 22-april-2022]. 1969.
- [al70] Allen et AL. *Mean Effective Optical Constants of Cotton Leaves.* <<https://doi.org/10.1364/JOSA.60.000542>>. [Online ; accessed 22-april-2022]. 1970.
- [FBa90] S.Jacquemoud & F.BARET. *PROSPECT : A model of leaf optical properties spectra.* <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/003442579090100Z>>. [Online ; accessed 19-January-2022]. 1990.
- [SJa06] S.JACQUEMOUD. *LED - Modeling leaf optical properties.* <<http://teledetection.ipgp.jussieu.fr/opticleaf/models.htm>>. [Online ; accessed 15-January-2022]. 2006.
- [Bou07] Laurent Alain BOUSQUET. *Mesure et modélisation des propriétés optiques spectrales et directionnelles des feuilles.* <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi61-z01uf5AhVN0YUKHUenCUAQFnoECAYQAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ipgp.fr%2Fjacquemoud%2Fpublications%2Fthese_Bousquet_2007.pdf&usg=A0vVaw15CeVkYCGEX0EiH0F5hNcK>. [Online ; accessed 02-july-2022]. 2007.
- [Sch07] John R. SCHOTT. *Remote Sensing : The Image Chain Approach.* Oxford University Press, 2007.
- [al08a] Asner et AL. *Spectral and chemical analysis of tropical forests : Scaling from leaf to canopy levels.* <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.07.003>>. [Online ; accessed 3-August-2022]. 2008.
- [al08b] Feret et AL. *PROSPECT-4 and 5 : Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments.* <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.012>>. [Online ; accessed 26-junary-2022]. 2008.
- [Ust08] S.Jacquemoud & Susan L. USTIN. *MODELING LEAF OPTICAL PROPERTIES.* <http://photobiology.info/Jacq_Ustin.html>. [Online ; accessed 16-January-2022]. 2008.
- [al09] Asner et AL. *Leaf chemical and spectral diversity in Australian tropical forests.* <<https://doi.org/10.1890/08-0023.1>>. [Online ; accessed 12-july-2022]. 2009.
- [INR09] INRA. *ANGERS Leaf Optical Properties Database.* <<https://ecosis.org/package/angers-leaf-optical-properties-database--2003->>>. [Online ; accessed 9-april-2022]. 2009.

- [Sus10] John A. Gamon SUSAN L. USTIN. *Remote sensing of plant functional types*. <<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03284.x>>. [Online ; accessed 12-arpil-2022]. 2010.
- [Eli15] Gilles de Rosny ELIAN CONEJO Jean-Pierre Frangi. *Neural network implementation for a reversal procedure for water and dry matter estimation on plant leaves using selected LED wavelengths*. Applied Optics, 2015.
- [Boi17] Féret & de BOISSIEU. *An R package for the simulation of leaf optical properties based on their biochemical and biophysical properties using the PROSPECT leaf model*. <<https://jbferet.gitlab.io/prospect/>>. [Online ; accessed 02-March-2022]. 2017.
- [al19] Féret & AL. *Estimating leaf mass per area and equivalent water thickness based on leaf optical properties : potential and limitations of physical modeling and machine learning*. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/am/pii/S0034425718305030>>. [Online ; accessed 19-march-2022]. 2019.
- [INR19] INRAE. *Page d'accueil du site INRAE*. <<https://www.inrae.fr/>>. [Online ; accessed 12-junary-2022]. 2019.
- [Le 19] Edouard Philippe LE PREMIER MINISTRE. *Décret n° 2019-1046 du 10 octobre 2019 relatif à l'organisation et au fonctionnement de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, agronomie et l'environnement*. <<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000039207211>>. [Online ; accessed 12-august-2022]. 2019.
- [al21a] Spafford et AL. *Spectral subdomains and prior estimation of leaf structure improves PROSPECT inversion on reflectance or transmittance alone*. <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112176>>. [Online ; accessed 07-March-2022]. 2021.
- [al21b] Zoran et AL. *A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids*. <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1399-3054.2012.01639.x>>. [Online ; accessed 16-august-2022]. 2021.
- [TET21] TETIS. *Organigramme fonctionnel - UMR TETIS / 2021-2026*. <<https://www.umr-tetis.fr/index.php/en/>>. [Online ; accessed 2-august-2022]. 2021.
- [INR22] INRAE. *Présentation de l'équipe ITAP*. <<https://www6.montpellier.inrae.fr/itap/>>. [Online ; accessed 16-december-2021]. 2022.

7 Annexes

7.1 Annexe A

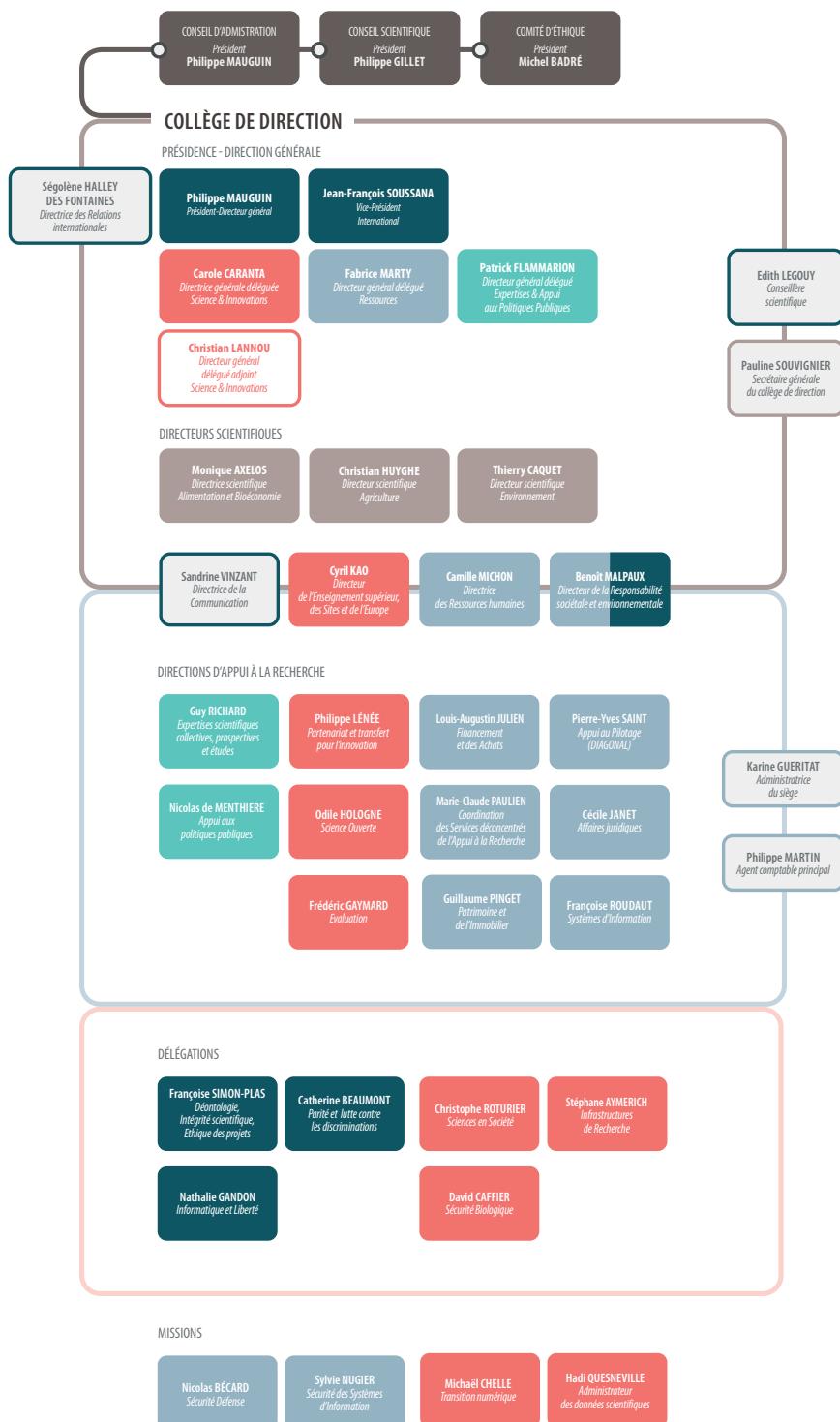
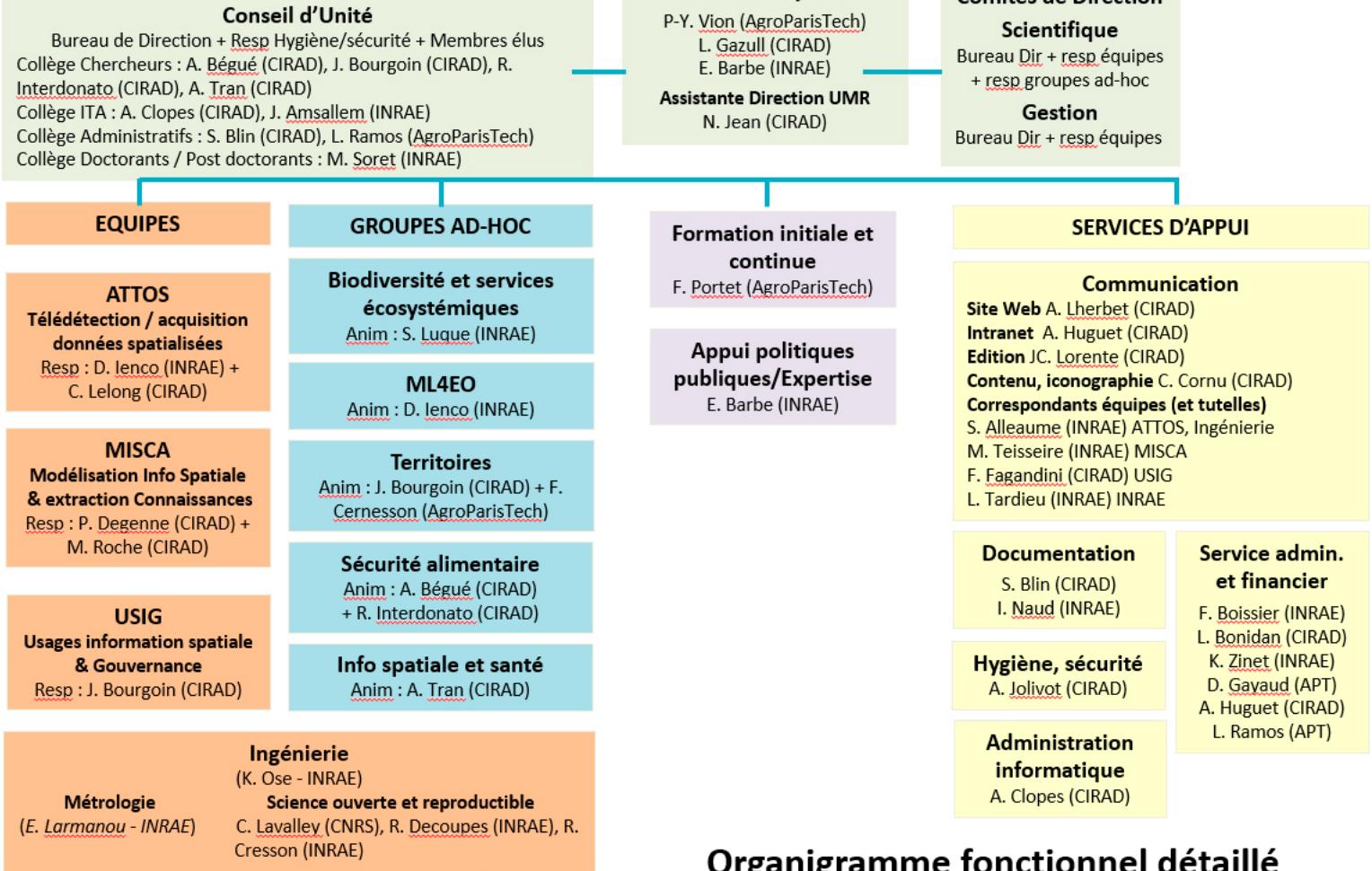


FIGURE 20 – Organigramme d'INRAE à l'échelle nationale, [empty citation]



Organigramme fonctionnel détaillé

UMR TETIS / 2021-2026

MAJ : juin 2022

FIGURE 21 – Organigramme de l'UMR TETIS, [TET21]

Annexe Responsabilité Sociétale des Entreprises
(détailant les éléments donnés en synthèse rédigée dans le rapport)

Il vous est demandé de ne remplir qu'une partie de ce référentiel RSE de la norme ISO 26000 applicable aux entreprises. Seules les cases non-grises de la 6ème colonne sont à remplir. Parmi ces 22 cases, vous remplissez 10 cases, dont obligatoirement les 8 cases au fond saumon. Vous complétez ce tableau en remplaçant au moins 5 cases au fond blanc. Les éléments facultifs de cette colonne devront être donnés en bibliographie ou renvoyez en lien hypertexte à des sections/figures du rapport. Si l'entreprise n'a pas mis en place de dispositif correspondant à une ligne à remplir (saumon), l'indiquer explicitement par Non Pris En Compte.

Une synthèse de cette grille doit être rédigée en fin du chapitre introductif du rapport, en une demi-page, et pointer vers ce tableau.

Critères	Exemples	Constaté dans l'entreprise / Non Pris En Compte	réservé enseignant Oulhman
1. Gouvernance			
Les dirigeants de l'entreprise ont défini des valeurs, cohérentes avec les principes du Développement Durable.	Adhésion à certaines chartes RSE, obtention de certains labels RSE	obtention des labels HR Excellence, Alliance et Egalité-Diversité, Adhésion à un charte d'expression publique, à la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et la charte de déontologie, d'éthique et d'intégrité scientifique INRAE	
Une approche stratégique a été définie, déclinée en plan d'actions et objectifs.	Création d'une instance spécifique, nomination d'un responsable RSE, nomination de référents RSE par service, diagnostic ISO 26000,	Création d'un comité d'orientation et de suivi (COS RSE) pour apporter un conseil au PDG et un appui à la Direction, Création d'une direction transversale RSE, présence de responsable RSE	
Des indicateurs (environnement, sociaux, économiques...) sont suivis régulièrement pour piloter les activités de l'entreprise.	Bilan gaz à effet de serre, plan de déplacement...	Bilan gaz à effet de serre (BEGES) via la méthode du bilan carbone de l'ADEME, accompagnement des unités à engager des actions de réduction de leurs émissions via les responsables RSE, mutualisation du parc automobile, cantine d'entreprise	
2. Droits de l'Homme			
L'entreprise prévient la discrimination, notamment vis à vis des groupes vulnérables, dans ses relations avec ses collaborateurs et l'ensemble de ses partenaires (usagers, clients, fournisseurs, sociétés parentes...).	Measures en faveur de l'intégration : des personnes handicapées, des minorités visibles, des jeunes sans qualification, des chômeurs de longue durée, des migrants... Mesure en faveur de la parité homme/femme, de l'équilibre de la pyramide des âges... Meilleure intégration des employés handicapés vis à vis du minimum légal Différentiel en % et à poste équivalent entre le salaire des hommes et celui des femmes...	Evenements et initiatives locales et nationales pour renforcer la cohésion, labellisation adaptée aux PME, politique humaine et sociale d'égalité et de diversité. 40% des salariés sont avec d'autres laboratoires et partenaires étrangers, 40% des femmes au sein de l'entreprise, les femmes gagnent 10% de moins que les hommes (tout compris), moyenne d'âge de 48 ans	
3. Relations et conditions de travail			
L'entreprise favorise et entretient le dialogue social avec ses collaborateurs et l'ensemble des personnes concernées par ses activités.	Existence d'une organisation favorisant le dialogue avec les salariés et la prise en compte de leurs attentes (réunions internes, boîtes à idées, consultations internes, ...)	Journées mensuelles d'assemblée générale, réunion d'unité régulière pour favoriser le dialogue et faire le point	
L'entreprise prend toutes les mesures nécessaires pour garantir la santé et la sécurité des personnes (éléments de protection individuelle, préventive, ergonomie des postes de travail, risques psychosociaux...).	Modélisation de mise en place d'un suivi médical régulier des employés, mesures d'amélioration de l'ergonomie des postes de travail, renseignement annuel du risque unique, identification des postes de travail présentant des risques de sensibilisation et de formation des personnes en matière de prévention des risques...	Label européen HR Excellence de la Commission européenne : labellisation pour la gestion des ressources humaines (formation, prévention des risques psychosociaux, contractuel, recrutement...)	
4. Environnement - Transition écologique			
L'entreprise a identifié les différents types de pollutions engendrées par ses activités et les impacts qu'elles peuvent avoir sur l'environnement. Elle prend les mesures nécessaires pour les prévenir et les réduire.	Politique de réduction et de tri des déchets, traitement des effluents avant rejets...	objectif 0 carbone en 2030, politique de sensibilisation autour du gaspillage, du tri et de l'énergie	
L'entreprise a identifié les différentes ressources consommées par ses activités, produits et services (eau, matières premières, énergie, etc.) et les mesures d'actions visant à réduire et optimiser ces consommations.	DéTECTEURS de présence éclairant circulations, boutons poussoirs dans sanitaires, efficacité des consommations eau / électricité, acteurs responsables ...	tableau de bord du suivi des consommations énergétiques à l'échelle de chaque bâtiment, rénovation et isolation	
L'entreprise a identifié les impacts de ses activités sur les changements climatiques. Elle prend des mesures permettant de les réduire.	Réalisation du bilan gaz à effet de serre, définition d'un plan de déplacement, participation financière aux frais de transport en commun, mesures pour limiter l'empreinte carbone liée à l'utilisation des services et produits commercialisés par l'entreprise...	Bilan gaz à effet de serre (BEGES) via la méthode du bilan carbone de l'ADEME, accompagnement des unités à engager des actions de réduction de leurs émissions via les responsables RSE, mutualisation du parc automobile, cantine d'entreprise responsable...	
5. Loyauté des pratiques			
6. Questions relatives aux consommateurs			
L'entreprise sensibilise ses consommateurs, clients ou usagers aux enjeux du Développement Durable en lien avec ses activités, services ou produits.	Journal de Marque utilisateur sensibilisant à ces questions, communication de l'entreprise sur des enjeux du développement durable	Communication de l'entreprise sur les enjeux du développement durable, politique de sensibilisation sur le développement durable, présence de panneaux explicatifs, d'évenements sur le sujet	
7. Communauté et développement local			
L'entreprise prend en compte les contextes spécifiques locaux. Elle participe à la vie des territoires sur lesquels elle est implantée et/ou aux communautés (physiques et virtuelles) au sein desquelles elle opère.	Sponsoring d'associations, d'événements. Participation aux forums de recherche d'emploi, aux animations et structures des technopôles. Echanges avec les partenariats établissements d'enseignement...	partenariat étroit avec SupAgro et AgroParisTech, présence de l'INRAE sur des forums de recherche d'emploi, site INRAE spécifique à chaque région, implication dans le campus Agropolis	
L'entreprise s'implique dans la création d'emplois et le développement des compétences sur ses territoires d'implantation.	Conventions avec établissements d'enseignements et collectivités, rattachage taxes	Conventions avec l'université de Montpellier, mise à disposition de matériels et d'espace pour SupAgro et AgroParisTech	
L'entreprise utilise ses ressources matérielles et immatérielles pour développer les savoirs, savoir-faire et technologies du territoire.	DéSSEMINATION de technologies et compétences, mise à disposition d'équipements...	Production de données en source ouverte sous license GPL, participation à des conférences et séminaires	
L'entreprise prend les mesures nécessaires pour éliminer les impacts négatifs de ses activités sur la santé des habitants. Elle agit pour la préserver.	Measures de prévention et protection contre émissions polluantes, nuisances sonores...	Prévention des personnes concernées lors d'émissions polluantes ou toxiques	

FIGURE 22 – Détails de la RSE d'INRAE selon la norme ISO 26000, image au format PDF, possibilité de zoomer dessus

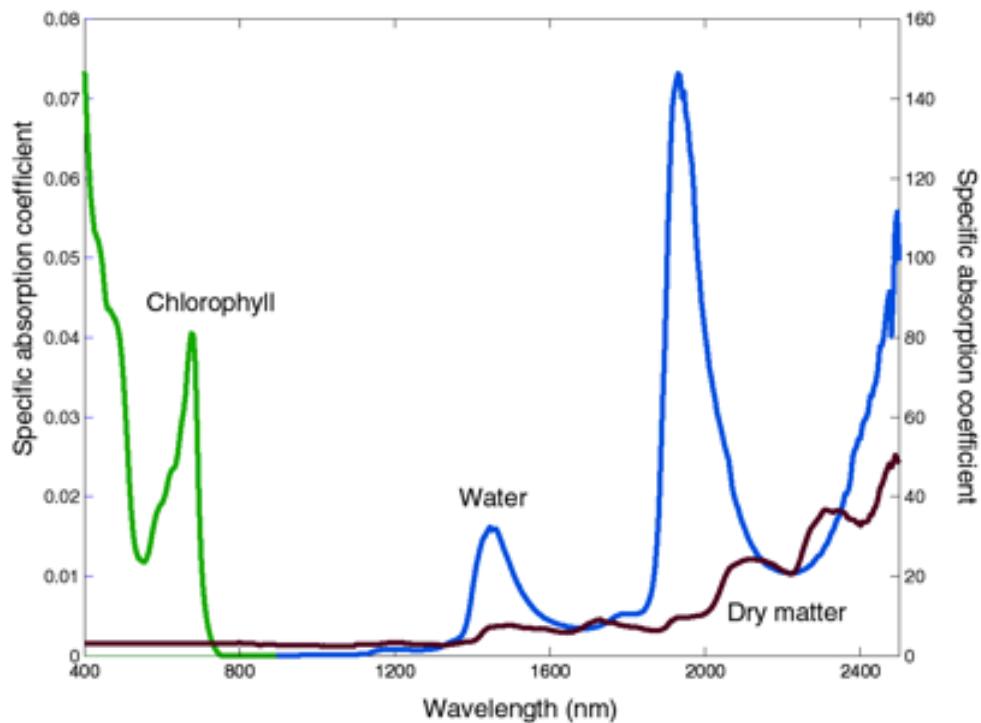


FIGURE 23 – Coefficient d'absorption spécifique des différents composants chimiques foliaires en fonction de la longueur d'onde, [Ust08]



FIGURE 24 – Diagramme de GANT détaillé du projet de fin d'études

7.2 Annexe B

Les codes m'ayant permis de réaliser la partie modélisation sont répertoriés dans ce Git dans la branche JMP : <https://github.com/JMPerrot/Specifications-Development>

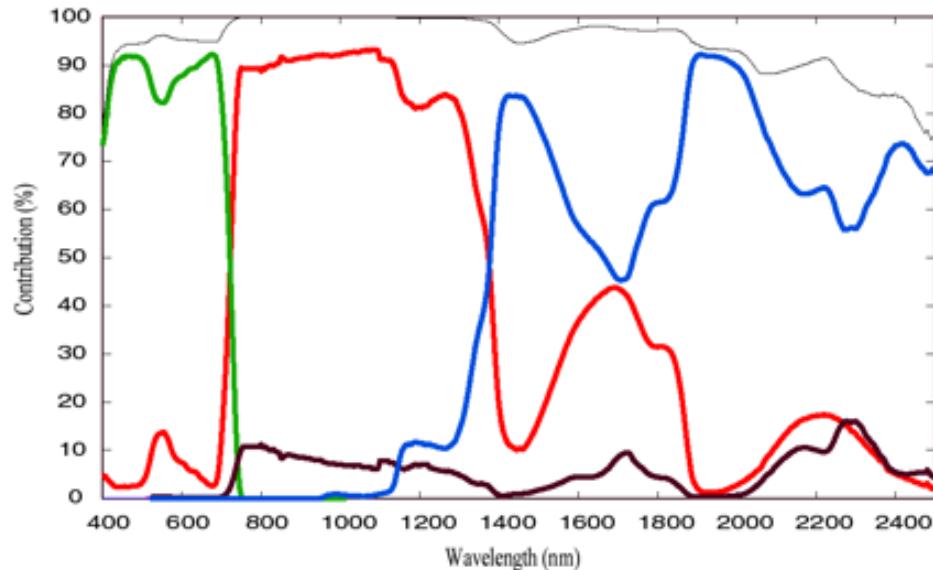


FIGURE 25 – Contribution de la Réflectance en fonction des constituants chimiques foliaires et de la longueurs d'onde

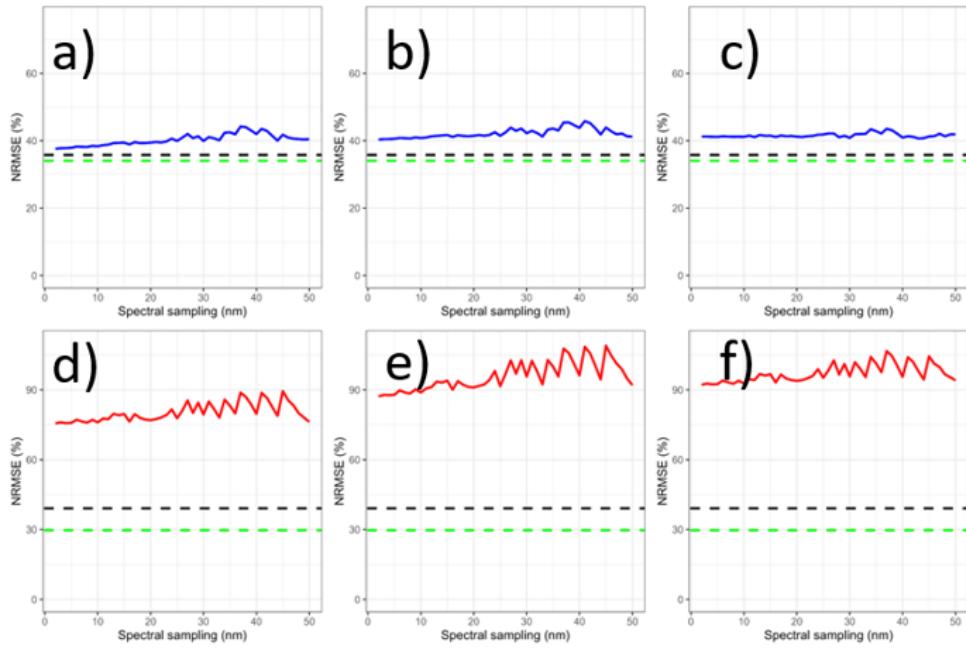


FIGURE 26 – NRMSE (%) en fonction du pas d'échantillonage pour la gamme [1300-1700] nm.

a) estimation de EWT avec R&T, b) estimation de EWT avec R, c) estimation de EWT avec T, d) estimation de LMA avec R&T, e) estimation de LMA avec R, f) estimation de LMA avec T

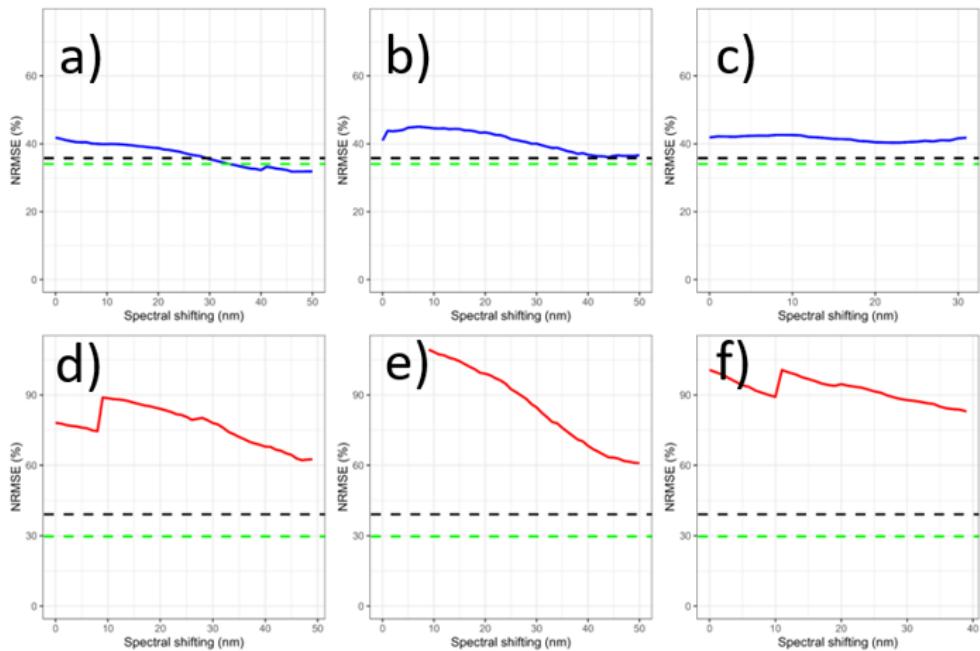


FIGURE 27 – NRMSE (%) en fonction de la translation de l'échantillonnage pour la gamme [1300-1700] nm.

a) estimation de EWT avec R&T, b) estimation de EWT avec R, c) estimation de EWT avec T, d) estimation de LMA avec R&T, e) estimation de LMA avec R, f) estimation de LMA avec T

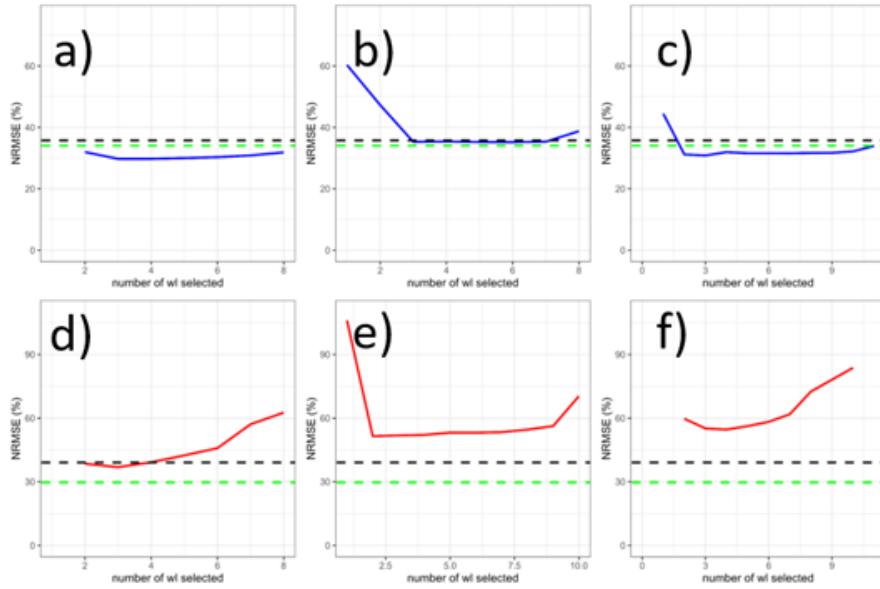


FIGURE 28 – NRMSE (%) en fonction du nombre de longueurs d’onde sélectionnées pour l’estimation pour la gamme [1300-1700] nm.
 a) estimation de EWT avec R&T, b) estimation de EWT avec R, c) estimation de EWT avec T, d) estimation de LMA avec R&T, e) estimation de LMA avec R, f) estimation de LMA avec T

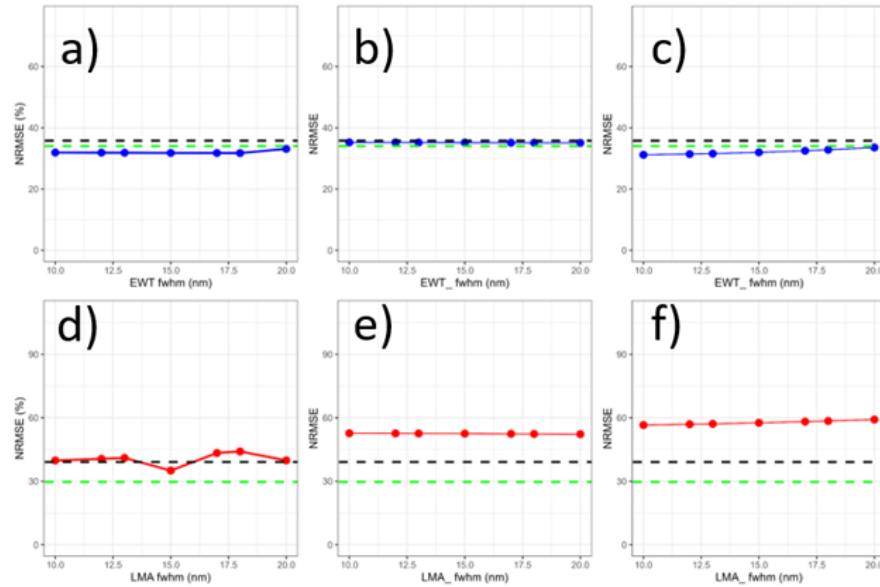


FIGURE 29 – NRMSE (%) en fonction de la largeur à mi hauteur de la gaussienne appliquée aux lots de longueurs d’onde.
 a) estimation de EWT avec R&T, b) estimation de EWT avec R, c) estimation de EWT avec T, d) estimation de LMA avec R&T, e) estimation de LMA avec R, f) estimation de LMA avec T

7.3 Annexe C

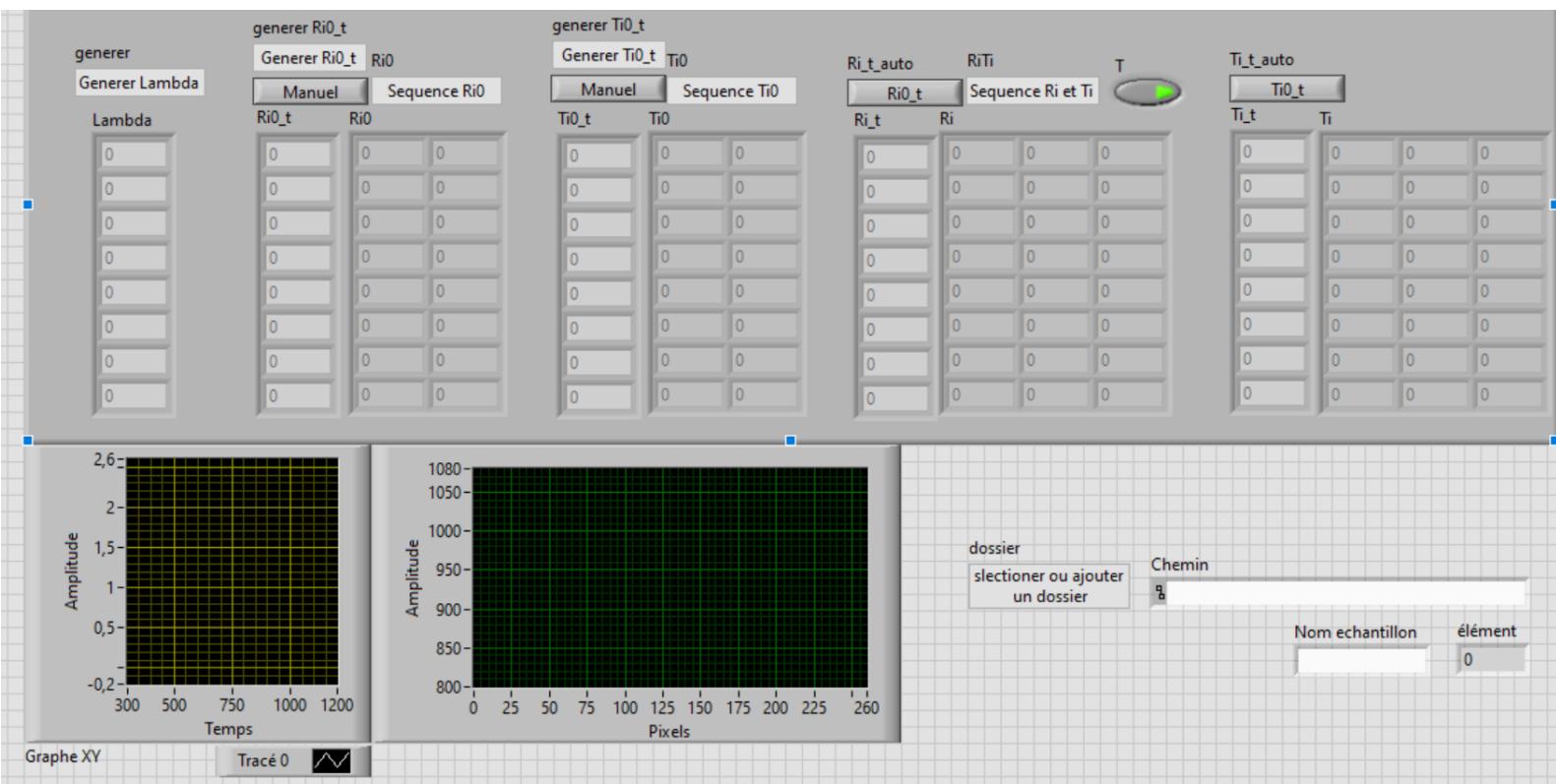


FIGURE 30 – Interface LabView, face avant : interface utilisateur

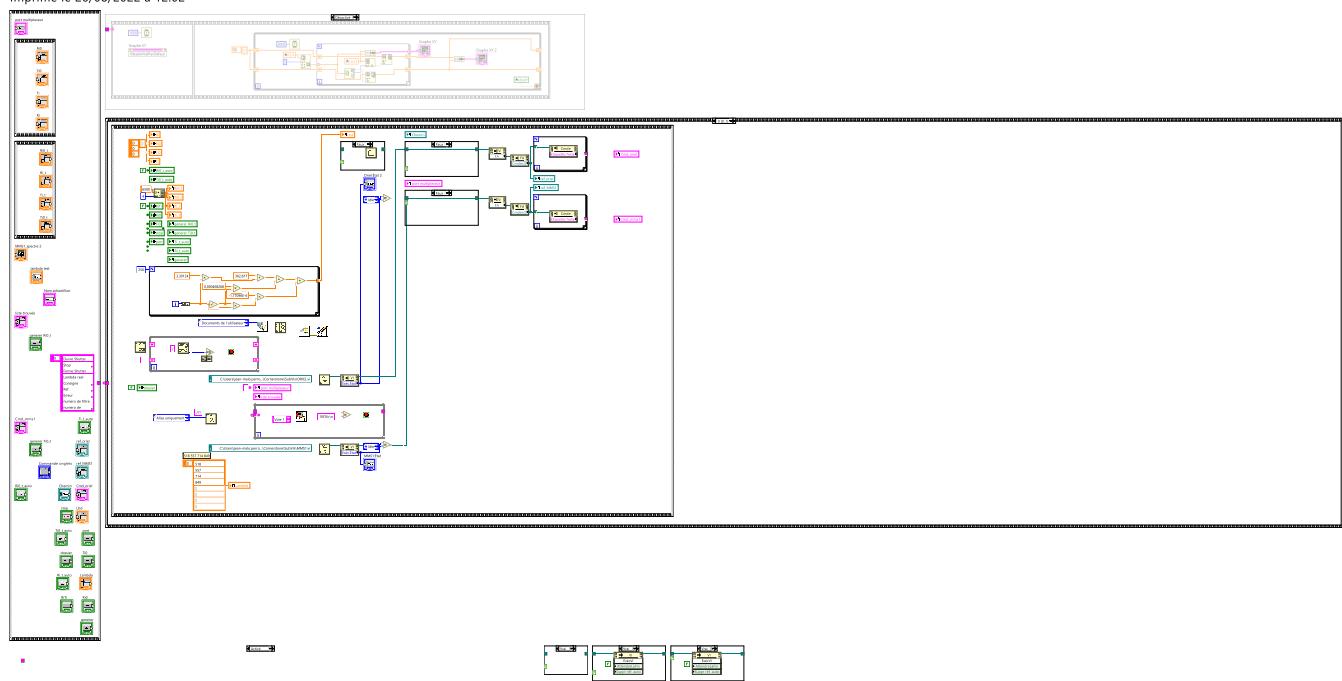


FIGURE 31 – Interface LabView, face arrière : VI principal, code "G"

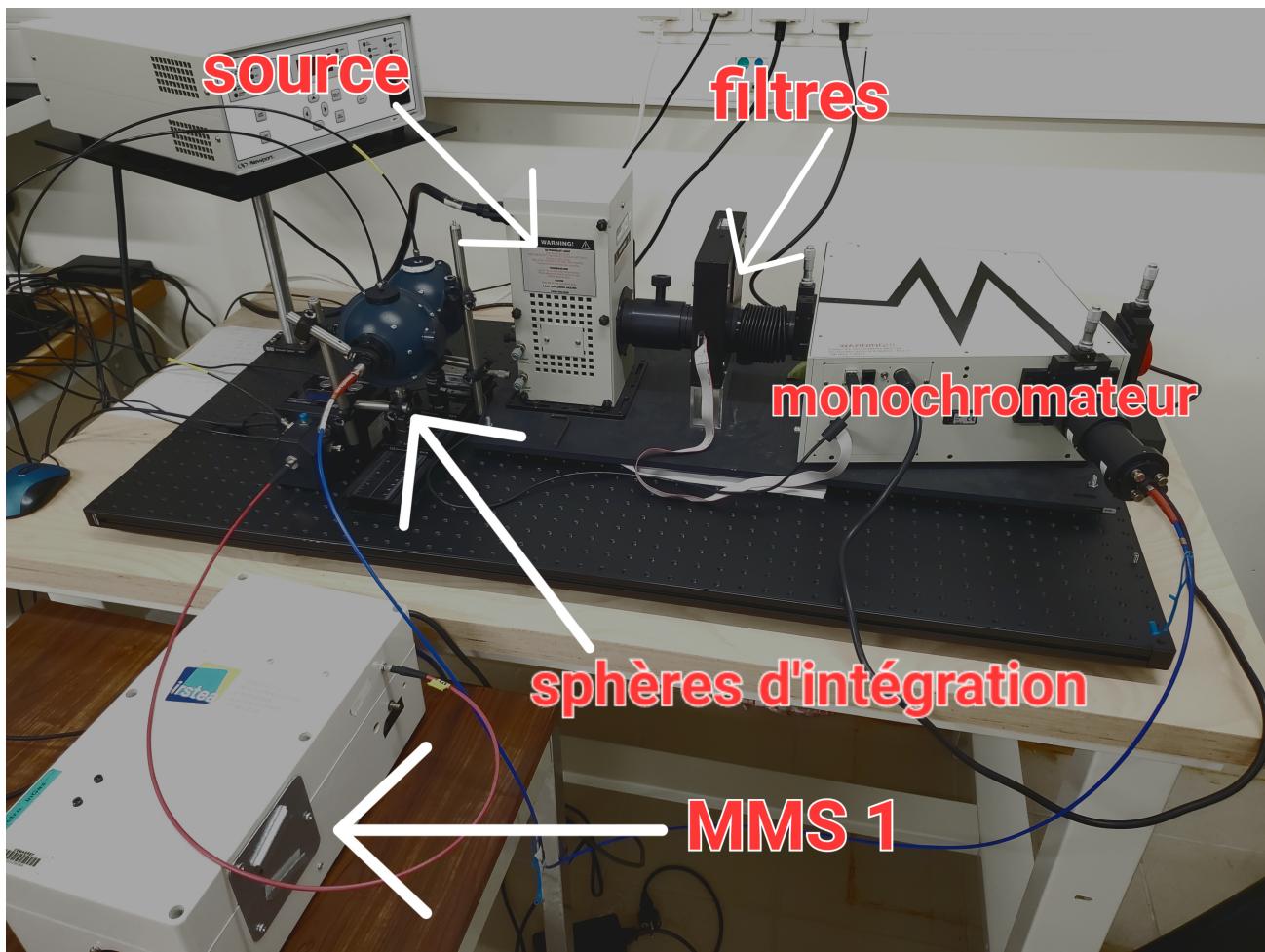


FIGURE 32 – Banc optique monté pour tester les combinaisons de longueurs d'onde identifiées