Contribution à la télédétection passive de la fluorescence chlorophyllienne des végétaux

Fabrice Daumard

▶ **To cite this version:**

Fabrice Daumard. Contribution à la télédétection passive de la fluorescence chlorophyllienne des végétaux. Interfaces continentales, environnement. Ecole Polytechnique X, 2010. Français. NNT : . pastel-00563244

HAL Id: pastel-00563244
https://pastel.hal.science/pastel-00563244

Submitted on 4 Feb 2011

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

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

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
ParisTech

THESE DE DOCTORAT DE L'ECOLE POLYTECHNIQUE

Présentée par

Fabrice Daumard

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Ecole Polytechnique

Spécialité : Physique, Télédétection, Environnement

Contribution à la télédétection passive de la fluorescence chlorophyllienne des végétaux

---

Soutenue le 30 juin 2010 devant le jury composé de :

Vincent Cassé	Directeur du LMD	Président
Frédéric Baret	Directeur de Recherche, INRA	Rapporteur
Stéphane Jacquemoud	Professeur, Université Paris Diderot, IPGP	Rapporteur
Ismaël Moya	Directeur de Recherche, LMD	Directeur de thèse
Yves Brunet	Directeur de Recherche, INRA	Examinateur
Philippe Dubuisson	Professeur, LOA	Examinateur

Thèse préparée au Laboratoire de Météorologie Dynamique
Ecole Polytechnique

A mes parents,

A Katia

« Cette fois, c'est fini !»
Bill Watterson

Remerciements

Je remercie tout d'abord mon directeur de thèse Ismaël Moya pour m'avoir accueilli dans l'équipe Fluorescence du LMD et pour sa disponibilité tout au long de ces années de travail.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers tous les membres du jury, Stéphane Jacquemoud et Frédéric Baret qui ont accepté la lourde tâche d'être rapporteurs mais également Yves Brunet, Philippe Dubuisson et Vincent Cassé, qui devront eux aussi parcourir ces quelques pages…

Je remercie Abderrahmane Ounis et Yves Goulas de m'avoir fait une place dans cette équipe et de m'avoir apporté une aide précieuse pendant ma thèse.

Je remercie particulièrement Sébastien Champagne avec qui j'ai beaucoup travaillé et qui n'a jamais désespéré malgré les accumulations de problèmes que l'on a connues !

Je remercie également Antoine Fournier pour son aide et ses encouragements. Je lui souhaite à mon tour bon courage pour les mois à venir.

Au-delà des membres de l'équipe, je voudrais remercier chaleureusement Eliane Rier et Martine Roux pour leur énergie, leur dynamisme et les nombreux services qu'elles m'ont rendus. Je les remercie tout particulièrement puisque c'est grâce à Eliane que j'ai découvert la salsa et que tout cela a été possible grâce à Martine, présidente de l'association PalaiseauSalsa. J'en profite pour remercier Davidou et toute la troupe des MamboParadisio qui m'ont fait passer d'excellents moments le vendredi midi/soir, en particulier pendant la période de rédaction.

Je remercie mes parents de m'avoir amené/poussé/tiré/traîné jusque là : c'est vrai qu'on a une belle vue d'ici ! Leur amour et leur soutien m'a toujours permis de repartir de plus belle quelles que soient les circonstances.

Je remercie du fond du cœur ma compagne, Katia, pour son soutien inconditionnel, sa présence et sa patience exceptionnelle. Je la remercie également pour les illustrations qu'elle a bien voulu faire pour ce manuscrit avec, entre autres, son « plus beau nuage du monde ».

Je remercie Tartine et Pépito qui m'ont recueilli et requinqué à coups de tartes aux fraises et de côtes de porc !

Je remercie mes amis qui m'ont permis de penser à autre chose lors de trop rares soirées. Bonjour à Line Raguin née pendant cette thèse et que je n'ai pas beaucoup vue ces derniers temps.

Je remercie toutes les personnes qui m'ont demandé « où j'en étais » de la rédaction de mon manuscrit et encore plus toutes celles qui ne m'ont rien demandé !

Et pour terminer je remercie celle qui a toujours été là et qu'on oublie trop souvent, celle qui m'a le plus soutenu : ma chaise !

Fabrice Daumard

Liste des abréviations et acronymes

[Chl] :	Concentration en chlorophylle
ADP :	Adénosine Diphosphate
AOT :	Aerosol Optical Thickness (Epaisseur optique des aérosols)
APAR :	Absorbed PAR (quantité de PAR absorbée)
ATP :	Adénosine triphosphate
CCD :	Charge Coupled Device
Chl :	Chlorophylle
ChlF :	Fluorescence chlorophyllienne
FF687 :	Fraction de fluorescence à 687 nm
FF760 :	Fraction de fluorescence à 760 nm
fAPAR :	Fraction de PAR absorbée
FLD :	Fraunhofer Line Discriminator
FLP :	Fraunhofer Line Principle
FLIDAR:	Fluorescence LIDAR
F_0 :	Fluorescence à l'obscurité
F_m :	Fluorescence maximale pour une feuille adaptée à l'obscurité
F'_m :	Fluorescence maximale pour une feuille adaptée à la lumière
Fs, Ft:	Fluorescence stationnaire
FWHM:	Full Width Half Maximum (Largeur à mi-hauteur)
GPS:	Global Positioning System
IR:	Infrarouge
LAI:	Leaf Area Index (Indice foliaire)
LED:	Light Emitting Diode

LHC: Light Harvesting Complex

LIDAR: LIght Detection And Ranging

LIF: Laser Induced Fluorescence (fluorescence induite par laser)

LSF: Leaf Spectro Fluorimeter

MODTRAN: Moderate TRANsmission code

NADP: Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate

NADP+: Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate, forme oxydée

NADPH: Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate, forme réduite

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NPQ: Non Photochemical Quenching

ΦF_0 : Rendement de fluorescence minimal à l'obscurité

ΦF_m : Rendement de fluorescence maximal sur feuille adaptée à l'obscurité

$\Phi F'_m$: Rendement de fluorescence maximal sur feuille adaptée à la lumière

ΦF_s : Rendement de fluorescence stationnaire

PAM: Pulse Amplitude Modulation

PAR: Photosynthetically Active Radiation (Radiation actives pour la photosynthèse)

PRI : Physiological Reflectance Index

PSI : Photosystème I

PSII : Photosystème II

qN : Quenching non-photochimique de la fluorescence

qP : Quenching photochimique de la fluorescence

SMARTS : Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine

SNR : Signal to Noise Ratio (Rapport signal sur bruit)

USB : Universal Serial Bus

UV : Rayonnement ultraviolet

VIS : Visibilité météorologique

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales

ESA : European Space Agency (Agence Spatiale Européenne)

INRA : Institut National de Recherche en Agronomie

LMD : Laboratoire de Météorologie Dynamique

NASA : National Aeronautices and Space Administration

Table des matières

Liste des abréviations et acronymes 7

Introduction générale 15

CHAPITRE I 23

Introduction 23

1.1 Photosynthèse 23

1.2 La fluorescence 32

1.3 Propriétés spectrales des feuilles et du couvert végétal 41

1.4 Télédétection des couverts végétaux 43

1.5 Conclusion 46

CHAPITRE II 51

Mesure passive 51

2.1 Principe général 51

2.2 Mesure passive de la fluorescence 55

2.3 Application du FLP 62

2.4 Calcul de la fluorescence 77

2.5 Conclusion 92

CHAPITRE III 99

Corrections atmosphériques 99

3.1 Propagation du rayonnement dans l'atmosphère 99

3.2 Mesure à distance de la fluorescence 108

3.3 Mesures à différentes altitudes 110

3.4 Modélisation 116

3.5 Etude de sensibilité 120

3.6 Validation du modèle 136

3.7 Estimation des différentes contributions au signal mesuré 152

3.8 Application à la mesure de la fluorescence 166

3.9 Corrections atmosphériques 169

3.10 Conclusion 177

CHAPITRE IV 183

Mesures avionnées 183

4.1 AirFLEX 183

4.2 Campagne CEFLES2 185

4.3 Campagne CEFLES2 – Traitement des données 194

4.4 Campagne CEFLES2 – Implémentation des corrections atmosphériques 196

4.5 Campagne CEFLES2 – Calcul de la fluorescence 204

4.6 Campagne CEFLES2 – Résultats 209

4.7 Conclusions 225

CHAPITRE V 231

Mesures au sol 231

5.1 Plateforme de mesure G-FLEX, Avignon 231

5.2 Instruments de mesures passives au sol 233

5.3 TriFLEX 241

5.4 Campagne de mesure, été 2008 258

5.5 Sorgho grain : Stress hydrique 258

5.6 Sorgho fourrager : Croissance 268

5.7 Quelques réflexions sur le signal 280

5.8 Conclusions 292

Conclusion générale 297

ANNEXES 305

Annexe A Position des canaux de mesure, nouvel algorithme 307

Annexe B Evaluation des différentes contributions au signal mesuré en fonction de l'altitude 317

Annexe C Contribution de l'environnement en fonction de sa réflectance 333

Annexe D Evaluation de l'importance des corrections atmosphériques 335

Annexe E Evaluation de la précision nécessaire pour l'évaluation des corrections atmosphériques 341

Annexe F Récupérations des données d'élévation de terrain 345

Annexe G Algorithme de détection de survol 347

Annexe H Boîtier permettant de simuler le débranchement/branchement d'un périphérique USB 349

Annexe I Calibration des spectromètres 351

Annexe J Calibration – fonction instrumentale 355

REFERENCES 361

Introduction générale

Introduction générale

Par son activité photosynthétique, la végétation occupe une place très importante dans le cycle du carbone. Dans le contexte de la modélisation du climat, l'estimation du bilan des échanges de CO_2 entre atmosphère et végétation est l'un des enjeux les plus importants de la télédétection de la végétation. L'écosystème terrestre absorbe environ 120 Gt de carbone chaque année par photosynthèse (Janzen, 2004) ; on parle de Production Primaire Brute (GPP, Gross Primary Production). Environ 50% de ce carbone est par la suite relâché dans un temps très court par la respiration (généralement dans le cycle jour-nuit). On appelle Production Primaire Nette (NPP, Net Pimary Production) la quantité de carbone restante (voir *Figure 0.1*). A moyen terme (plusieurs années) la respiration du sol rejette dans l'atmosphère une partie de ce carbone. Il reste alors ce qu'on appelle la Production Nette de l'Ecosystème (NEP, Net Ecosystem Production). Les changements de l'écosystème sur le long terme et les perturbations (activités anthropogéniques, climat, événements) relâchent la majeure partie de la NEP sur une échelle de temps de l'ordre d'une centaine d'années. Le carbone restant est la Production Nette du Biome (NBP, Net Biome Production), le biome désignant un ensemble d'écosystèmes caractéristique d'une aire biogéographique et de conditions climatiques et écologiques. Malgré la grande incertitude quant à l'impact des activités humaines sur ces processus, il semble qu'à l'échelle globale, les activités de photosynthèse conduisent à la création d'un puits de carbone : une partie du carbone pris à l'atmosphère reste fixé dans les écosystèmes.

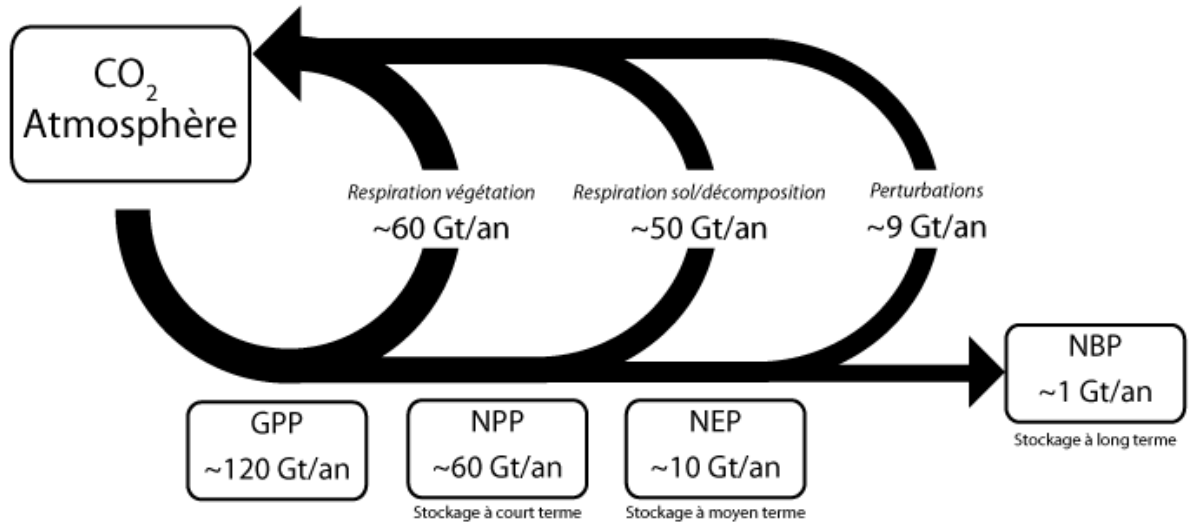


Figure 0.1 *Cycle du carbone terrestre. La GPP extrait environ 120 Gt/an de carbone de l'atmosphère et en rejette la moitié par la respiration de la végétation. Des 60 Gt/an restantes, 50 Gt/an sont rejetés par la respiration du sol. Sur les 10 Gt/an restants, environ 9 Gt/an sont rejetés par les perturbations (activités anthropogéniques, climat, événements). Le reste, le NBP ~1Gt/an, représente le carbone stocké sur le long terme (d'après IGBP Terrestrial Carbon Working Group, 1998).*

La fixation du CO_2 par la photosynthèse est le premier processus de fixation du carbone en importance et son estimation est primordiale pour la prédiction de l'évolution de la quantité de CO_2

présente dans l'atmosphère. L'incertitude sur le fonctionnement de la photosynthèse a donc un fort impact sur l'estimation du stockage de carbone à long terme.

On sait que l'observation actuelle des surfaces continentales par les satellites permet de caractériser l'état du couvert végétal (recouvrement, indice foliaire, interception de la lumière, dans certains cas biomasse) mais pas son fonctionnement. Les feuilles vertes réfléchissent fortement la part proche infrarouge du rayonnement solaire, mais très peu sa partie visible, absorbée par la chlorophylle. De ce fait, elles présentent un fort contraste de réflectance avec les roches ou le sol nu, qui est utilisé pour déterminer des «indices de végétation». Mais on ne sait pas discriminer de cette façon une forêt qui absorbe beaucoup de CO_2 car elle est en bon état physiologique, d'une forêt similaire mais qui fait très peu de photosynthèse parce que le sol est trop sec ou que la température est trop basse ou trop élevée. En général, la photosynthèse des couverts naturels ne fonctionne pas au maximum de ses capacités. Par exemple, il a été estimé que l'émission de CO_2 d'une forêt boréale durant la saison de développement pouvait être atténuée jusqu'à 44% lors d'un stress dû au gel (Bergh et al., 1998). Au sol on sait mesurer les échanges de CO_2 d'une feuille, de branches ou de portions de couvert enfermées dans des chambres. On sait également mesurer les échanges d'un couvert végétal à l'aide de tours à flux équipées d'appareils de mesures micrométéorologiques. Mais le défi actuel est de pouvoir généraliser ces mesures à l'échelle régionale puis continentale, ce qui n'est réalisable actuellement qu'à l'aide de modèles avec des possibilités très limitées de validation. D'où l'intérêt de développer de nouvelles méthodes de mesure et une instrumentation adaptée permettant d'obtenir ces échanges de CO_2, ou au moins un indice de performance de la photosynthèse.

Par la photosynthèse les plantes utilisent l'énergie lumineuse pour synthétiser les composants organiques dont elles ont besoin. Cependant toute l'énergie lumineuse absorbée n'est pas utilisée pour la photosynthèse : une partie est perdue par fluorescence. Cette émission lumineuse entre en compétition avec les autres voies de désexcitation de l'énergie absorbée que sont la photochimie et la dissipation thermique (Kautsky et Hirsch, 1931). In vivo, la fluorescence de la chlorophylle est variable et est ainsi un indicateur du fonctionnement photosynthétique de la plante. Depuis plusieurs dizaines d'années, la photosynthèse est quantifiée de manière routinière au niveau de la feuille par la mesure de l'émission de la fluorescence chlorophyllienne Papageorgiou et Govindjee, 2004. Pour illustrer les informations que l'on peut obtenir d'une mesure de fluorescence, la *Figure 0***.2** montre la corrélation entre la fluorescence et l'assimilation de CO_2 au niveau de la feuille pour différents types de végétation (Flexas et al., 2002). L'enjeu actuel est de pouvoir étendre la mesure de la fluorescence à l'échelle du couvert, de la parcelle et de la région afin de tirer parti de la relation entre fluorescence et photosynthèse pour l'estimation de la productivité végétale.

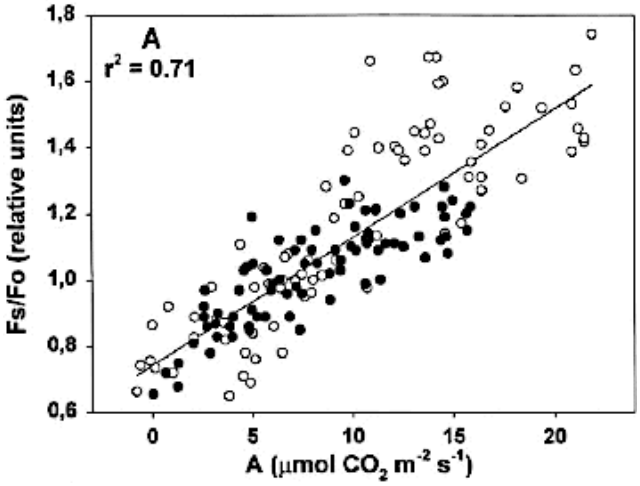


Figure 0.2 *Relation entre la fluorescence stationnaire normalisée par la fluorescence à l'obscurité (Fs/Fo) (voir CHAPITRE I) et l'assimilation de CO_2 (A). Les mesures se font au niveau de la feuille. Les données proviennent de cinq espèces différentes : Vitis vinifera, Quercus ilex, Celtis australis, Solanum melongena et Pistacia terebinthus (d'après Flexas et al., 2002).*

En plus de fournir des données pour les modèles dans le cadre de l'étude du cycle du carbone, l'estimation de l'activité photosynthétique de la végétation peut être utilisée à plus petite échelle. A l'échelle locale (champs) ou régionale, l'évaluation des caractéristiques biophysiques de la végétation trouve des applications très diversifiées : agriculture de précision, gestion des ressources agricoles et forestières, suivi des écosystèmes.

Le groupe Fluorescence du LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique) a une expérience de plus de 20 ans de la mesure et de l'étude du signal de fluorescence. Il a en particulier mis au point une méthode de mesure passive de la fluorescence induite par le rayonnement solaire, qui exploite les variations du spectre au niveau des bandes d'absorption de l'oxygène atmosphérique autour de 687 (bande O_2-B) et 760 nm (bande O_2-A) Moya et al., 1999, Evain et al., 2001, Evain et al., 2002, Evain et al., 2004, Moya et al., 2004, Louis et al., 2005. La fluorescence de la végétation est très faible devant la lumière réfléchie (quelques pourcents). La méthode de mesure passive consiste à mesurer dans des zones spectrales de faible luminosité : dans des bandes d'absorption atmosphériques. Au fond de ces bandes, le flux solaire est minimisé : la part de fluorescence dans le signal mesuré sur la végétation augmente et devient quantifiable. L'émission de fluorescence induit un comblement du fond de la bande d'absorption et la mesure passive consiste à le mesurer.

Le défi est d'une part de l'ordre de la mesure car il faut être capable de séparer la fluorescence du flux réfléchi par la végétation, alors que l'émission de fluorescence représente une faible partie du signal réfléchi. Il est d'autre part de l'ordre de l'interprétation des signaux mesurés en termes d'activité photosynthétique. Le groupe Fluorescence et Télédétection a développé de nombreux instruments de mesure passives de la fluorescence et participe activement au projet de mission spatiale FLEX (FLuorescence EXplorer) dans le cadre du programme Earth Explorer Core Missions de l'ESA (European Space Agency). Si les premiers instruments étaient destinés à la mesure de fluorescence au niveau du sol, en 2004 l'équipe construit AirFLEX, un capteur destiné aux mesures avionnées. Les premiers vols eurent lieu en été 2005.

C'est dans ce contexte que j'ai débuté ma thèse en 2006. Les premières mesures avionnées de fluorescence venaient d'être faites et une triple problématique se posait :

- Comment optimiser la méthode de calcul de fluorescence ? Comment optimiser la mesure ?
- Quels sont les effets de l'atmosphère sur le signal de fluorescence ? Quelle méthode pour retrouver la fluorescence ?
- Interprétation des mesures au niveau du couvert (la fluorescence est bien connue au niveau de la feuille mais beaucoup moins au niveau du couvert végétal).

Les travaux effectués au cours de cette thèse s'articulent autour de trois thèmes : la méthode de mesure de la fluorescence, les corrections atmosphériques pour les mesures avionnées et l'interprétation des signaux de fluorescence.

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres :

Le chapitre I présente quelques notions indispensables concernant les mécanismes de photosynthèse et d'émission de fluorescence.

Le chapitre II, *Mesures passives*, est consacré à la description et à l'étude de la méthode de mesure passive et des algorithmes qui lui sont associés pour retrouver la fluorescence.

Le chapitre III, *Corrections atmosphériques*, constitue une étude des effets atmosphériques sur le signal de fluorescence lors de sa mesure à distance.

Le chapitre IV, *Mesures avionnées*, décrit la campagne de mesure avionnées CEFLES2, les instruments et les méthodes utilisés ainsi que les premiers résultats. Les mesures avionnées permettent d'avoir un échantillonnage spatial de la végétation mais ne permettent pas d'étudier l'évolution de la végétation sur de longue période. Ce constat a conduit à la réalisation d'une plateforme de mesure au sol.

Le chapitre V, *Mesures au sol*, présente une plateforme de mesure au sol développée en collaboration avec l'INRA. Cette plateforme et l'instrument de mesure passive développé pour l'occasion permettent la mesure en continu de la fluorescence sur de longues périodes. Les résultats des premières campagnes de mesure sont présentés dans ce chapitre.

Chapitre I

Introduction

Chapitre I : Introduction

1.1 **Photosynthèse** 23

1.1.1 Découverte de la photosynthèse 23

1.1.2 Structure des feuilles, lieu de la photosynthèse 24

1.1.3 Fonctionnement de la photosynthèse 27

1.1.4 Les mécanismes de régulation – Quenching non-photochimique 31

1.2 **La fluorescence** 32

1.2.1 Les plantes à l'origine de la découverte de la fluorescence 33

1.2.2 Fluorescence des végétaux 34

1.2.3 Fluorescence chlorophyllienne 35

1.2.4 Utilisation de la fluorescence chlorophyllienne comme sonde du fonctionnement photosynthétique 37

1.2.5 Fluorescence et chlorophylle, rapport d'émission Rouge/Proche Infrarouge 40

1.3 **Propriétés spectrales des feuilles et du couvert végétal** 41

1.4 Télédétection des couverts végétaux 43

1.4.1 Les indices spectraux, NDVI et PRI 43

1.4.2 Télédétection active de la fluorescence 45

1.5 **Conclusion** 46

CHAPITRE I

Introduction

1.1 Photosynthèse

1.1.1 Découverte de la photosynthèse

Les premières traces d'intérêt pour les processus de fonctionnement des plantes datent de l'antiquité : par analogie avec les animaux dont la vie dépend de la nourriture qu'ils consomment, Aristote pensait que les plantes trouvaient leur nourriture dans le sol. Cependant, il a fallu attendre le milieu du XVII^{ème} siècle pour qu'une première expérience biologique rigoureuse montre que la plante ne se nourrit pas uniquement à partir du sol : en 1648, Van Helmont publie les résultats d'une expérimentation ayant consisté à cultiver un saule pendant cinq ans dans un récipient contenant de la terre et ne recevant que de l'eau pure pendant toute la durée de l'expérience. La terre, pesée au début et à la fin de l'expérience, ne montre qu'une très faible diminution de la masse (57 grammes), sans rapport avec la croissance de l'arbre dont la masse s'est accrue de plus de 74 kg. L'interprétation de ces résultats, proposée par Stephen Hales au siècle suivant (1727), est que la plante emprunte la plus grande part de sa nourriture à l'air ambiant au travers des feuilles. Il admet que la lumière reçue par les feuilles peut jouer un rôle dans le processus.

Plusieurs découvertes dans les années suivantes (1750-1780) préparent et fondent les recherches des pionniers de la photosynthèse (Priestley, Ingen-Housz). Scheele montre en 1773 que l'air est composé de deux gaz, l'un inerte, l'azote, tandis que l'autre entretient les combustions : c'est l'air vital ou oxygène. Lavoisier, entre 1772 et 1782, aboutit aux mêmes résultats et propose une définition de l'oxydation et de la respiration mais la découverte de l'oxygène revient à Priestley, un pasteur anglais spécialiste des gaz. Une célèbre expérience de Priestley ouvre la voie à la découverte de la photosynthèse. En 1771, il met en évidence la capacité des plantes à « purifier » à la lumière l'air vicié : il mit un brin de menthe dans de l'air où une chandelle s'était consumée et il trouva que dix jours plus tard une autre chandelle pouvait être allumée dans le même air. L'interprétation de Priestley était que les plantes consomment les émanations délétères issues de la combustion de la matière organique. Il élargit ses observations et montra que l'air « purifié » par la végétation n'était « pas du tout gênant pour une souris ». Ces expériences expliquaient pour la première fois comment l'air restait pur et supportable pour la vie malgré la respiration des animaux et la combustion de feux. Le moyen de purification utilisé par la nature pour arriver à ce résultat est la végétation. Il reprendra plus tard ses travaux sur la purification de l'air et observera la production de bulles de gaz d'air vital par une « matière verte », des algues unicellulaires, déposée sur les parois de ses récipients. En 1781, il démontre clairement la production d'oxygène par des algues vertes illuminées. On lui remit une médaille pour ses découvertes et la citation disait « Par ces découvertes, nous sommes assurés qu'aucune plante ne croit en vain […] mais qu'elle nettoie et purifie notre atmosphère. » (Raven et al., 2003).

Ingen-Housz et Sénebier reprennent les observations de Priestley et élaborent une expérimentation plus rigoureuse. En 1779 Ingen-Housz, entreprend une série d'expériences qui lui permettent de montrer que la fonction purificatrice des plantes sur l'atmosphère ne s'exerce qu'à la lumière. Il établit

clairement que les feuilles rejettent sous éclairement des bulles d'air vital, purifiant ainsi une atmosphère viciée. Cette propriété ne concerne que les parties vertes des plantes et non les racines, fleurs, etc. A l'obscurité, les plantes comme les animaux rendent l'air impropre à la vie. Il découvre ainsi la respiration des végétaux. Vers 1782, Sénebier est le premier à affirmer que le gaz carbonique est fixé à la lumière par les organismes photosynthétiques et représente une nourriture pour la plante.

Vers 1804, de Saussure montre le rôle joué par les racines dans l'apport d'éléments minéraux aux plantes. Il émet l'hypothèse que de l'eau se lie au carbone du CO_2 lors de la synthèse de molécules d'origine photosynthétique et en particulier les glucides, ce qui l'amène à la notion de synthèse d'hydrates de carbone. N. de Saussure est également le premier à réaliser des mesures de quantité de CO_2/O_2 échangées par les plantes pendant l'activité photosynthétique. Il remarque qu'elles sont sensiblement égales. Ce n'est qu'en 1864 que Boussingault établit de façon rigoureuse que le rapport CO_2/O_2 est voisin de 1.

En 1818, Pelletier et Caventou isolent le « principe vert des feuilles », responsable de la photosynthèse et proposent de l'appeler chlorophylle. Des observations au microscope mettent en évidence la présence dans les cellules, de corps verts de forme définie de quelques micromètres de diamètre contenant de la chlorophylle, les chloroplastes. Ce ne sera qu'en 1862 que J. von Sachs démontrera que la photosynthèse se déroule dans des organites microscopiques, les chloroplastes, contenus dans les cellules des feuilles. Ils contiennent la chlorophylle et synthétisent de l'amidon à la lumière.

Soixante ans après les premières découvertes, la connaissance de la nutrition des plantes a fait des progrès considérables. En 1842, la notion de cycle du carbone est complétée par la conception d'un flux d'énergie. R. von Mayer écrit « La nature a trouvé un moyen de stocker l'énergie contenue dans les rayons du soleil atteignant la terre. Elle a couvert l'écorce terrestre d'organismes vivants qui utilisent la lumière du soleil pour la stocker sous forme chimique. ». A partir de 1864 il établit une première équation de la photosynthèse :

$$CO_2 + H_2O + lumière \longrightarrow matière\ organique + O_2 + énergie\ chimique \qquad (I.1)$$

En considérant les échanges gazeux de CO_2 et O_2, cette réaction globale apparaît comme l'inverse des réactions moléculaires de la respiration (Rabinowitch, 1945). Le terme de photosynthèse est inventé en 1893 par Charles Reid Barnes.

1.1.2 Structure des feuilles, lieu de la photosynthèse

Chez les plantes à fleurs (angiospermes) on distingue deux groupes. Les monocotylédones et les dicotylédones (le cotylédon est un organe embryonnaire commun à toutes les plantes). Les différences entre ces deux familles sont présentes à tous les niveaux : graine, tige, fleurs, racines, structure des feuilles … Une feuille peut être décrite comme la superposition de plusieurs couches distinctes dont la structure varie selon le groupe. La *Figure I.1*, donne la structure de la feuille pour les deux groupes et la *Figure I.2* est une coupe de feuille de tomate observée au microscope électronique à balayage. La feuille est protégée par deux épidermes, l'épiderme supérieur (face adaxiale) et l'épiderme inférieur (face abaxiale), qui encadrent le mésophylle. Les cellules du mésophylles se concentrent du côté recevant la lumière. Les espaces intercellulaires de chaque couche sont remplis d'air saturé en humidité. Chez les dicotylédones, dont les feuilles poussent généralement de façon assez horizontale, la partie supérieure du mésophylle, le parenchyme palissadique, est constitué de cellules allongées et ordonnées, tandis que la partie inférieure, le parenchyme lacuneux, est plus lacunaire. La structure des

monocotylédones, dont les feuilles poussent de façon relativement verticale, est plus symétrique, avec peu de différences entre le côté adaxial et le côté abaxial on n'observe le plus souvent qu'un seul parenchyme, plus ou moins lacuneux. Les cellules d'une feuille ont une dimension typique de 15 x 15 x 80 µm pour les cellules palissadiques et 18 x 15 x 20 µm pour les cellules du parenchyme spongieux.

Les feuilles sont recouvertes d'une cuticule étanche aux échanges gazeux qui permet de limiter la perte d'eau par évapotranspiration. Les parenchymes, lieux de la photosynthèse, sont mis en relation dans la feuille vers l'extérieur (échanges gazeux) par les stomates (voir *Figure I.3*) et vers l'intérieur par les nervures. Il y a deux types de tissus conducteurs. Les phloèmes dont le rôle est essentiellement l'exportation vers les puits des photosynthétats solubles (principalement le saccharose) et les vaisseaux du xylème. Ces derniers assurent l'alimentation des feuilles en eau et en éléments minéraux puisés par les racines dans le sol. L'eau des vaisseaux du xylème représente une colonne d'eau ininterrompue depuis les poils absorbants des racines jusqu'aux feuilles. Ces deux zones peuvent se trouver à plusieurs mètres les unes des autres, jusqu'à 100 m chez certain séquoias de Californie (Farineau et al., 2006). L'eau monte dans les vaisseaux essentiellement grâce au phénomène d'évapotranspiration : c'est le rejet de vapeur d'eau par les stomates ouvert qui induit la montée du liquide dans les vaisseaux.

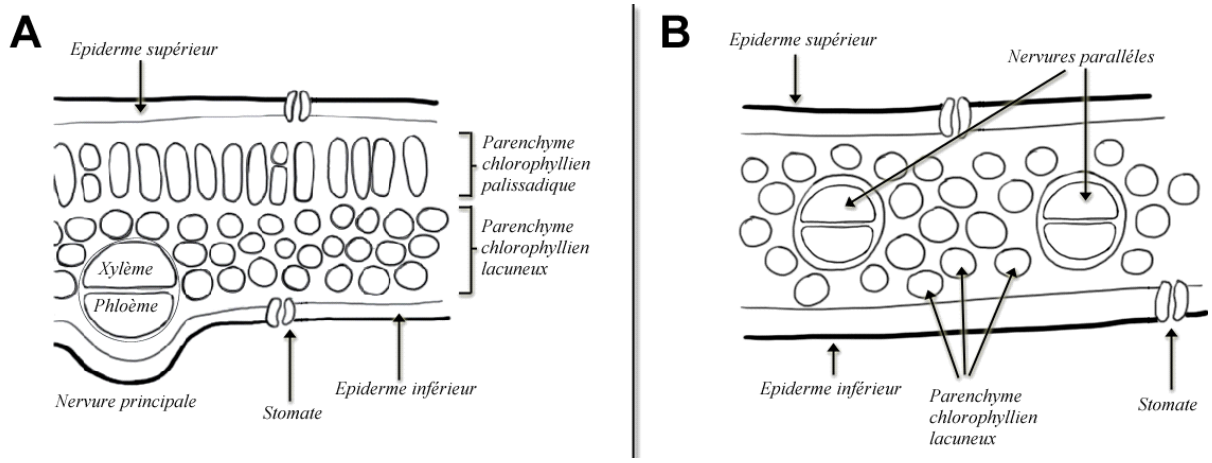


Figure I.1 *Structure schématique d'une feuille de type A : Dicotylédone, B : Monocotylédone.*

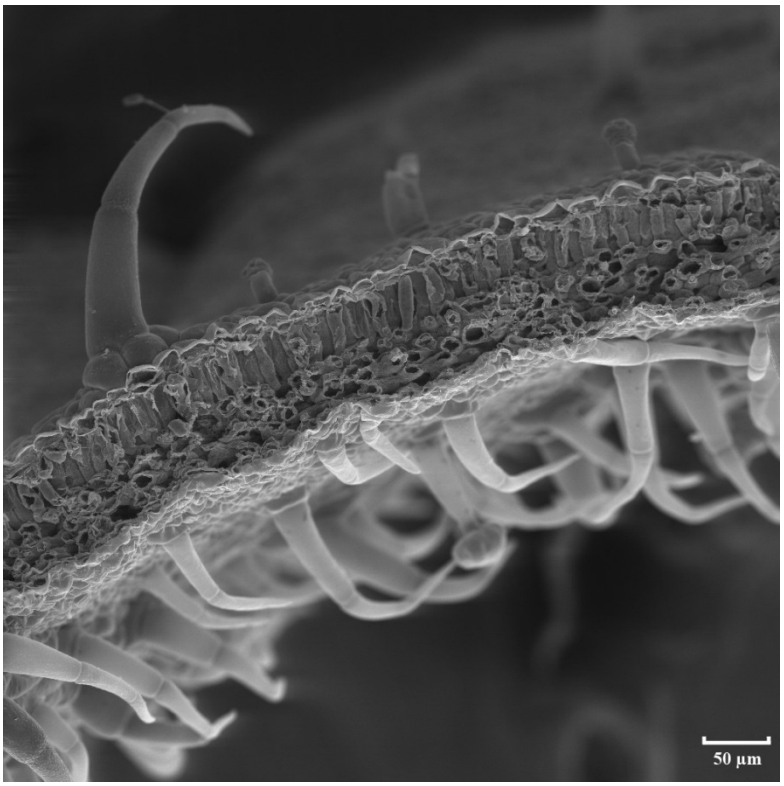


Figure I.2 *Coupe d'une feuille de tomate (dicotylédone) observée avec un microscope électronique à balayage. On y distingue l'épiderme supérieur, le mésophile avec le parenchyme chlorophyllien palissadique et le parenchyme lacuneux, et l'épiderme inférieur. Louisa Howard, Dartmouth College, E.M. Facility.*

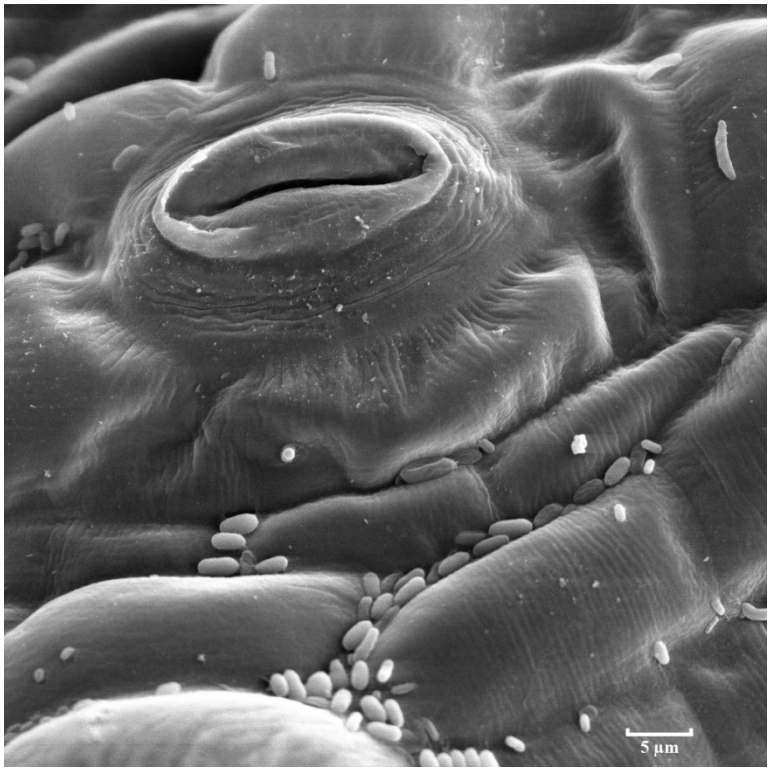


Figure I.3 *Un stomate d'une feuille de tomate observée à l'aide d'un microscope électronique à balayage. Louisa Howard, Dartmouth College, E.M. Facility.*

La photosynthèse se déroule dans un organite spécialisé, le chloroplaste (*Figure I.4*). Les chloroplastes ont une forme de lentille de 3 à 10 µm de diamètre et de 1 à 2 µm d'épaisseur (Lawlor, 1993). Ils sont délimités par une double enveloppe, composée d'une membrane externe, perméable aux métabolites de faible poids moléculaire, et d'une membrane interne délimitant une matrice intra-chloroplastique, le stroma (voir *Figure I.4.B*). A l'intérieur des chloroplastes se trouvent des bicouches lipidiques, les lamelles, qui forment un réseau de vésicules fermées, les thylakoïdes, et définissent deux phases sans communication immédiates, l'espace stromatique et l'espace intrathylakoïdal, ou lumen. Par endroits, les lamelles s'accolent pour former des empilements de disques, les grana, qui restent en relation de continuité avec les lamelles non accolées. Ces membranes contiennent les pigments photosynthétiques qui absorbent l'énergie lumineuse et les protéines nécessaires. Toutes les chlorophylles sont liées à des protéines au sein de complexes qui assurent la conversion de cette énergie en énergie chimique.

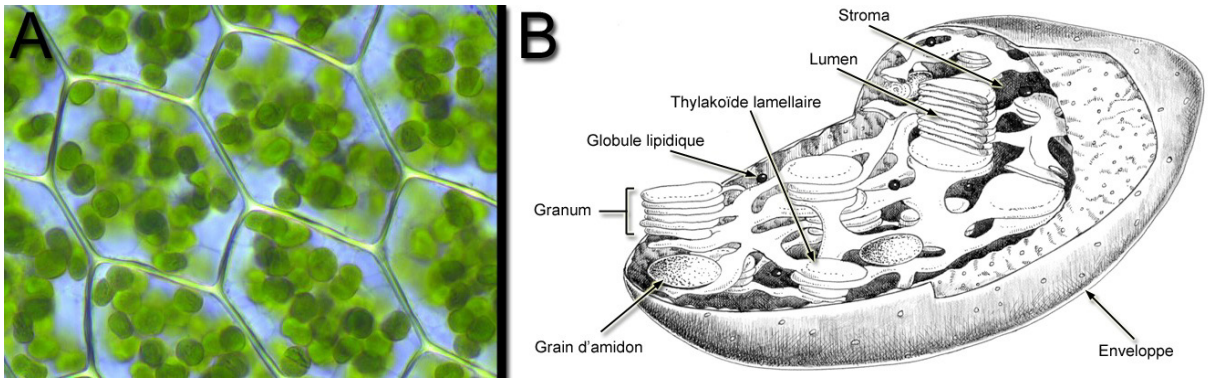


***Figure I.4 A**. Chloroplastes dans des cellules végétales. **B**. Représentation schématique d'un chloroplaste.*

1.1.3 Fonctionnement de la photosynthèse

La photosynthèse est le processus par lequel les organismes chlorophylliens synthétisent de la matière organique en utilisant l'énergie lumineuse. Pour cette synthèse ils utilisent l'eau tirée du sol et du CO_2 tiré de l'atmosphère. Le bilan global de la photosynthèse est décrit par l'équation :

$$6\,CO_2 + 12\,H_2O \xrightarrow{h\nu} C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 + 6\,H_2O \qquad (I.2)$$

La photosynthèse utilise l'énergie lumineuse pour extraire l'hydrogène de l'eau qui, associée au CO_2, forment des produits carbonés nécessaires au développement de la plante ($C_6H_{12}O_6$). Cette synthèse est accompagnée de production d'oxygène.

A l'heure actuelle on divise les nombreuses réactions qui constituent la photosynthèse en deux processus : les réactions de transfert d'énergie qui forment la phase lumineuse ou phase claire (à cause de l'importance de la lumière pendant ces réactions) et les réactions de fixation du carbone qui forment la phase métabolique, appelée par opposition phase sombre. Le terme « phase sombre » est un abus de langage car la fixation du carbone par réduction dépend principalement de l'énergie récoltée au cours de la phase lumineuse.

La phase lumineuse est caractérisée par le déroulement d'une activité photochimique correspondant au déclenchement de transferts d'électrons dans des chaines d'oxydo-réduction après capture de

l'énergie électromagnétique des photons. Ces transferts d'électrons permettent la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique sous la forme de NADPH (Nicotinamide-Adénine-Dinucléotide-Phosphate) et d'ATP (Adénosine TriPhosphate).

La phase sombre (métabolique) est celle au cours de laquelle l'utilisation de cette énergie permet d'assurer le déroulement des voies de synthèse des principaux constituants du monde végétal. Pendant les réactions de fixation de carbone, l'énergie de l'ATP sert à unir le dioxyde de carbone à une molécule organique et le potentiel réducteur de NADPH est utilisé pour réduire en sucre simple les atomes de carbone dès leur fixation. Durant ce processus, l'énergie chimique de l'ATP et du NADPH est utilisée pour la synthèse de molécules adaptées au transport (sucre) et au stockage (amidon).

Les réactions de photosynthèse s'effectuent dans les chloroplastes, plus exactement autour des thylakoïdes : les réactions photochimiques ont lieu dans la membrane thylakoïdale et les réactions biochimiques au sein du stroma. La *Figure I.5* donne un aperçu global de la photosynthèse : l'énergie absorbée par les molécules de chlorophylle dans les membranes des thylakoïdes est utilisée indirectement pour actionner la synthèse d'ATP. Simultanément, à l'intérieur du thylakoïde, l'eau est scindée en oxygène gazeux et en atomes d'hydrogène. Les électrons sont finalement acceptés par $NADP^+$ et H^+ et forment le NADPH. Dans les réactions de la phase sombre qui ont lieu dans le stroma du chloroplaste, les sucres sont synthétisés à partir du CO_2 et de l'hydrogène apporté par NADPH dans un processus activé par l'ATP et le NADPH.

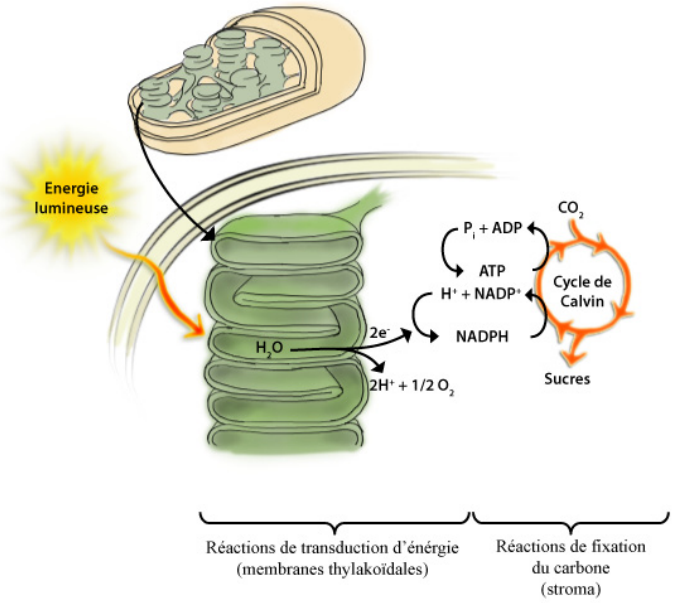


Figure I.5 *Schéma global du fonctionnement de la photosynthèse.*

L'appareil photosynthétique est organisé en plusieurs sous-unités situées le long des membranes thylakoïdales et reliées par des transporteurs : les photosystèmes, le cytochrome b_6/f et l'ATP synthase. Un photosystème comprend environ 250 à 400 molécules de pigment et se compose de deux parties : un complexe antennaire et un centre réactionnel. Le complexe antennaire (ou LHC pour Light Harvesting Complex) est constitué de complexes protéines-pigments, chlorophylles *a*, *b* et caroténoïdes, qui collectent l'énergie lumineuse et la canalisent vers le centre réactionnel.

Le centre réactionnel est formé d'un complexe de protéines et de chlorophylle qui permet la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique. Tous les pigments d'un photosystème peuvent absorber les photons mais dans chaque photosystème, seule une paire de molécules de chlorophylle-*a* peut effectivement utiliser l'énergie lumineuse. Lorsque l'énergie lumineuse est absorbée par une molécule de pigment, elle est transportée de proche en proche par résonnance jusqu'à atteindre la paire de molécules de chlorophylle spéciale du centre réactionnel. Ce transfert est souvent nommé transfert d'excitons. Lorsque l'une de ces molécules absorbe l'énergie, un électron est porté au niveau d'énergie supérieur et transféré à une molécule acceptrice, ce qui déclenche le flux d'électrons. La molécule de chlorophylle est alors oxydée et chargée positivement.

Il y a deux types de photosystème : le photosystème I (PSI) et le photosystème II (PSII), numérotés dans l'ordre de leur découverte. La majorité des PSII se trouvent dans les empilements granaires tandis que la plupart des PSI se situent dans les lamelles. Généralement les deux photosystèmes fonctionnent simultanément et de manière continue. Ils sont liés dans leur fonctionnement par une chaîne de transport d'électrons. Dans le photosystème I, les molécules de chlorophylle spéciales du centre réactionnel sont nommées P_{700}, « P » pour pigment et « 700 » qui indique le pic d'absorption optimal en nanomètres. Pour le photosystème II, les molécules de chlorophylle particulières sont appelées P_{680}.

La *Figure I.6* donne une vue schématique dite en Z de l'interaction entre les deux photosystèmes et des réactions de la phase lumineuse.

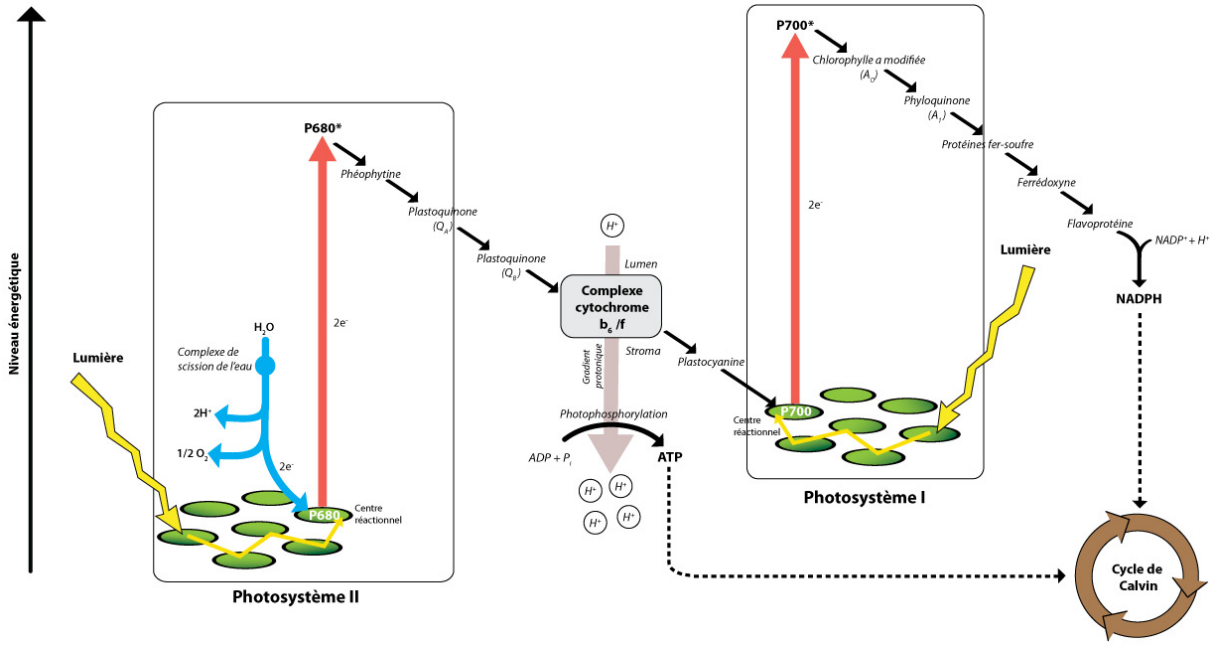


Figure I.6 *Représentation schématique dites « en Z » du transport d'électrons photosynthétiques (d'après Raven et al., 2003).*

Les premières étapes de la photosynthèse ont lieu au niveau du photosystème II. Les antennes contiennent entre 200 et 300 molécules de chlorophylle-*a*. Leur rôle est d'absorber l'énergie lumineuse, qui est ensuite transférée vers le centre réactionnel. Celui-ci contient une paire de molécules de chlorophylle-*a* (P_{680}), entourée de deux protéines D1 et D2, de deux phéophytines *a*, d'une plastoquinone fortement liée, Q_A et d'une plastoquinone plus faiblement liée, Q_B. La protéine D1 possède une tyrosine active d'un point de vue redox. L'excitation de P_{680} induit une séparation de charges, un électron étant transféré de P_{680} à la phéophytine *a* puis à la plastoquinone Q_A. L'oxydant P^+_{680} créé par la séparation de charges est réduit par un électron donné par la tyrosine, qui est ensuite

réduite par un électron de l'eau. Du côté accepteur du photosystème, l'électron est ensuite transféré de Q_A^- à Q_B au cours d'une réaction plus lente. Après avoir reçu deux électrons, Q_B lie deux protons provenant du lumen et se dissocie pour rejoindre le pool des plastoquinones situé dans la membrane. La chaîne des transporteurs membranaires se poursuit avec le cytochrome b_6f et une plastocyanine, protéine soluble du lumen, qui est le donneur du PSI.

Le PSI réalise une séparation de charges en utilisant l'énergie absorbée au niveau des antennes et transférée jusqu'au centre réactionnel. L'électron est ensuite transféré à la ferrédoxine qui permet la réduction de $NADP^+$ en NADPH par la ferrédoxine-NADP réductase. Le transfert d'électron entre les transporteurs de la chaîne photosynthétique s'effectue dans le sens des potentiel rédox, sauf au niveau des PSI et PSII où l'énergie lumineuse permet d'effectuer des sauts énergétiques.

Le transfert d'électrons génère un gradient de protons transmembranaire avec passage de protons du stroma vers le lumen. L'énergie contenue dans ce gradient est utilisé par l'ATP synthase pour la synthèse de l'ATP à partir d'ADP et de phosphate inorganique.

L'énergie chimique produite lors du transfert photosynthétique d'électrons permet ensuite la synthèse de carbohydrates à partir de CO_2. La transformation du dioxyde de carbone en composés organiques se fait au cours d'un processus nommé cycle de Calvin. L'enzyme clé du cycle est appelée RuBisCO. Une vue schématique du cycle est donné sur la *Figure I.7*.

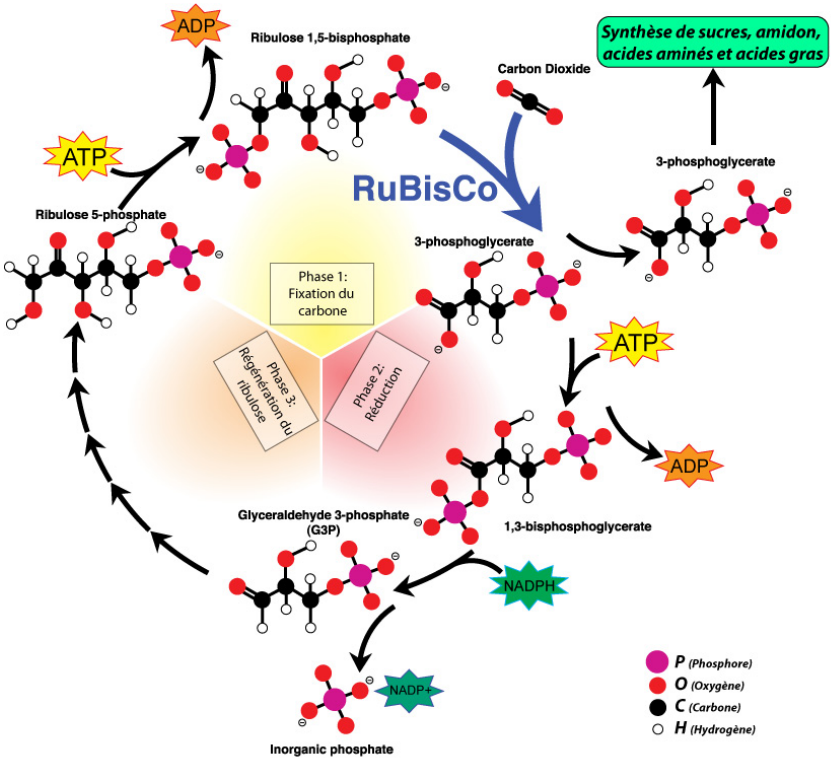


Figure I.7 *Cycle de Calvin (adapté de l'illustration de Michael David Jones, http://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_Calvin).*

1.1.4 Les mécanismes de régulation – Quenching non-photochimique

L'énergie lumineuse absorbée par la plante n'est pas entièrement utilisée pour la photosynthèse. Les plantes disposent de mécanismes de régulation permettant de dissiper l'excès d'énergie absorbée. En effet, en conditions naturelles, la végétation est soumise à d'importantes intensités lumineuses et l'absorption d'un excès d'énergie lumineuse par rapport à leurs capacités photosynthétiques se produit régulièrement. C'est notamment le cas en été par beau temps autour du midi solaire, ou bien au début du printemps, par temps clair, lorsque le froid ralentit leur activité photosynthétique. Les mécanismes de régulation sont le seul moyen dont disposent les plantes pour se protéger, et sont donc indispensables à leur survie.

On peut considérer que la conversion photochimique est en compétition avec ces mécanismes de régulation pour l'utilisation de l'énergie absorbée. Lorsque la chlorophylle est excitée trois voies de désexcitation entrent en compétition : la photosynthèse, on parle alors de quenching[1] photochimique, le quenching non-photochimique qui se traduit par l'augmentation de la dissipation thermique et la fluorescence. La *Table I.1* donne une idée de la répartition de l'énergie lumineuse pour deux états physiologiques différents.

	Répartition de l'énergie lumineuse absorbée	
	Fonctionnement maximal de la photosynthèse	Photosynthèse bloquée
Photosynthèse	84 %	0 %
Chaleur	14 %	88 %
Fluorescence	2 %	12 %

Table I.1 *Répartition de l'énergie lumineuse absorbée par le PSII entre les trois voies de désexcitation principales lorsque la photosynthèse fonctionne de manière optimale et lorsqu'elle est complètement bloquée (d'après Rosema et al., 1991).*

Intéressons nous aux trois principaux processus responsables du quenching non-photochimique (NPQ). Pour des articles de revue, voir Horton et al., 1996, Pospisil, 1997, Müller et al., 2001.

La composante majoritaire du NPQ est le quenching énergétique (qE) (pour une revue voir : Holt et al., 2004, Horton et al., 2008). Il apparaît en quelques minutes et relaxe en 1 ou 2 minutes à l'obscurité. Une forte lumière induit un pH transmembranaire bas (pH~5) (énergisation de la membrane ou ΔpH) à la suite d'une accumulation de protons dans le lumen. L'énergisation de la membrane active plusieurs mécanismes, dont la conversion de la violaxanthine en zéaxanthine (cycle des xanthophylles) et un changement conformationnel du LHCII. Ces modifications de structure ont pour conséquence une augmentation de la dissipation de l'énergie par voie thermique. Ce quenching assure une protection contre la photoinhibition du PSII.

Sous un stress prolongé de forte lumière qE est remplacée par la photoinhibition (qI), qui relaxe au bout d'un temps beaucoup plus long (pour une revue voir : Aro et al., 1993, Murata et al., 2007, Tyystjärvi, 2008). La baisse d'efficacité photosynthétique par photoinhibition est le résultat d'un endommagement du PSII. Le fonctionnement du PSII fait que le centre réactionnel, et notamment la

[1] Un quenching (terme anglo-saxon qui signifie déclin ou extinction) est un processus permettant de réduire une grandeur physique, ici la quantité d'énergie disponible

protéine D1, est régulièrement dégradée à la suite d'une oxydation. La durée de vie du centre réactionnel est plus courte en forte lumière et la synthèse de nouvelles protéines étant assez lente, ceci conduit à une baisse de la photosynthèse. L'intensité de la photoinhibition dépend de l'équilibre entre les dommages dus à la lumière et leur réparation.

Un autre mécanisme existe en faible lumière. Une partie des LHCII est mobile et peut se détacher du PSII et migrer dans la membrane vers le PSI. Cette migration est appelée changement d'état (qT) Allen, 1992; Wollman, 2001, elle entraine une modification de la section efficace d'absorption relative du PSI et du PSII et a pour effet de diminuer l'absorption d'énergie par le PSII. La mobilité des LHCII dépend de leur état de phosphorylation, contrôlée par une kinase. Ce phénomène tend à disparaître pour des lumières plus fortes lorsque qE augmente.

Tout ces processus de régulation de l'excès d'énergie absorbée traduisent le fonctionnement de la plante. Ils sont en compétition avec la photosynthèse mais également avec l'émission de fluorescence de la chlorophylle. C'est ce qui fait tout l'intérêt de cette dernière.

1.2 La fluorescence

La fluorescence est une émission lumineuse provoquée par une excitation. Elle est l'une des transitions radiatives possibles après absorption d'un photon. Le diagramme de Perrin-Jablonski donné sur la *Figure I.8* permet de visualiser les différents processus de transitions entre états électroniques.

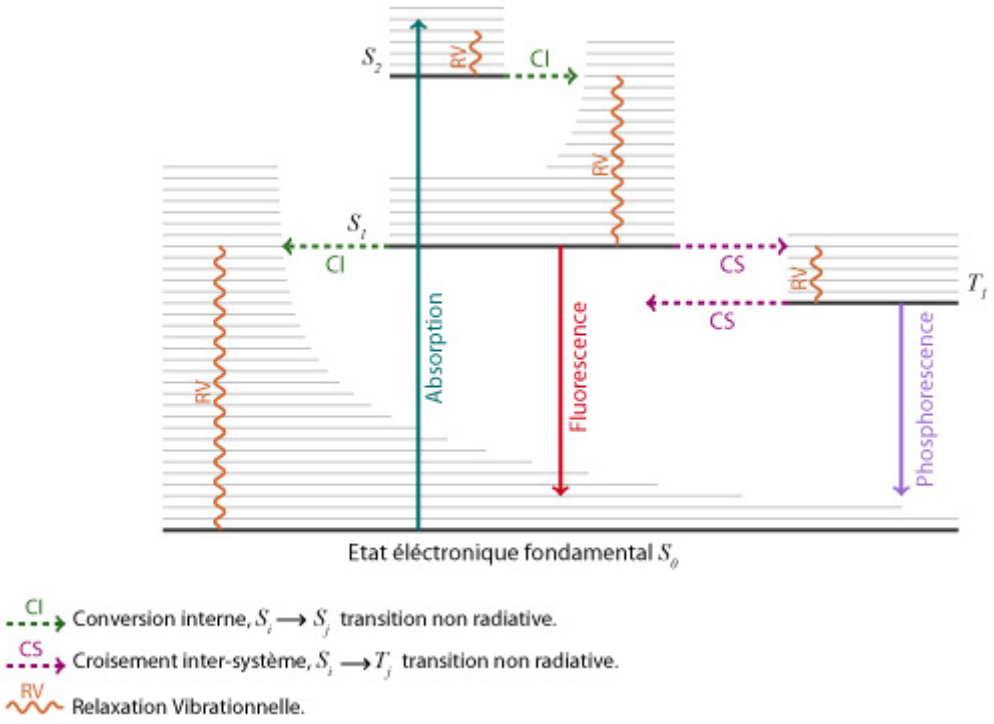


Figure I.8 *Diagramme de Perrin-Jablonski représentant les phénomènes photophysiques possibles dans un état excité (d'après Vallverdu, 2009).*

L'ensemble des processus photophysiques se divise en deux familles. Les processus radiatifs, représentés en trait plein, dans lesquels le système absorbe ou émet un photon et les processus non radiatifs, représentés en traits pointillés, dans lesquels aucun échange de photons n'a lieu. Ces processus non radiatifs sont souvent nommés processus de désactivation de la fluorescence, dans le sens ou s'ils se produisent l'émission d'un photon n'a pas lieu.

La transition $S_0 \rightarrow S_n$ correspond à l'absorption d'un photon. Après l'absorption d'un photon, la molécule est portée dans un état S_n électroniquement et vibrationnellement excité. Elle relaxe alors très rapidement (10^{-15} s – 10^{-12} s) son excédent d'énergie vibrationnelle par des collisions avec l'environnement pour se placer dans le niveau vibrationnel le plus bas de S_1.

La fluorescence correspond à la transition radiative entre S_1 et un des niveaux vibrationnels de l'état fondamental S_0. Elle a généralement lieu à partir du niveau vibrationnel de S_1 le plus bas. Le spectre de fluorescence est donc décalé vers les grandes longueurs d'onde par rapport au spectre d'absorption. Ce décalage du spectre de fluorescence, exprimé en nombre d'onde, est appelé déplacement de Stokes. Il est important de souligner que l'émission d'un photon est un processus aussi rapide que l'absorption d'un photon (10^{-15}s). Cependant, les molécules excitées résident dans l'état S_1 pendant un certain temps (entre quelques dizaines de picosecondes à quelques centaines de nanosecondes) selon le type de molécule et de milieu avant de se désexciter par l'une des voies disponibles. Ainsi, après excitation d'une population de molécules par une impulsion lumineuse extrêmement brève, l'intensité de fluorescence décroît exponentiellement avec un temps caractéristique reflétant la durée de vie moyenne des molécules dans l'état excité.

La fluorescence est en compétition avec deux autres processus : la conversion interne entre l'état S_1 et l'état S_0 et un croisement inter-systèmes entre l'état S_1 et l'état triplet T_1 qui peut être suivi soit de la phosphorescence soit d'un autre croisement inter-systèmes de T_1 vers S_1. La phosphorescence se différencie de la fluorescence par un temps caractéristique plus long, d'une microseconde à quelques secondes. De plus, l'état T_1 ayant une énergie plus basse que l'état S_1, le spectre de phosphorescence se situe dans une gamme de longueurs d'ondes plus grande que celle de la fluorescence.

La fluorescence est très utilisée dans le domaine de la biologie comme outil d'analyse non invasif, notamment depuis la découverte de molécules fluorescentes pouvant être utilisées comme sondes. Dans le cas des plantes, cette technique est d'autant plus intéressante que les feuilles contiennent naturellement des molécules fluorescentes et qu'elles font partie du système de régulation de la photosynthèse.

1.2.1 Les plantes à l'origine de la découverte de la fluorescence

La découverte de la fluorescence est intimement liée aux plantes. En effet, les premiers rapports faisant état d'une émission de type fluorescence sont basés sur l'observation d'extraits de plantes. En 1521, le Mexique est sous le contrôle des colons espagnols. La civilisation mexicaine à une longue culture d'utilisation des plantes médicinales et ce nouveau savoir suscite l'intérêt les colons. Le Dr. Nicolas Baurisata Monardes, praticien reconnu à Séville, profita de sa proximité avec le seul port d'échange espagnol pour obtenir des échantillons d'espèces de plantes. En 1565, il publia un livre (Monardes, 1565) décrivant l'usage médical qui pouvait être fait de plus de 80 sortes de plantes américaines. Dans ce livre, il décrit une décoction préparée à partir du bois, *Lignum nephriticum*, d'un de ces arbres, *Eysenhardtia polystachya*, pour soigner les maladies rénales. Il note alors qu'une demi-heure après avoir mis le bois dans l'eau pure, celle-ci prend une teinte bleuâtre bien que le bois soit de couleur blanche. Il indique également que cette teinte se renforce avec le temps. Ces remarques sont considérées comme le premier signalement de l'émission de fluorescence. Les mêmes observations avaient été faites par Bernardino de Sahagun, un missionnaire franciscain installé dans la « Nouvelle Espagne ». Celui-ci réalisa une importante étude ethnologique intitulée « Historia General de las Cosas de Nueava Espana » et y compila toutes les connaissances acquises pendant ses recherches sur l'histoire, la religion, l'agriculture, la technologie et les pratiques médicales du Mexique. Ce manuscrit ne fut publié que trois cents ans plus tard, mais on y trouvait déjà une observation similaire à celle de

Monardes concernant une décoction à base de *coatli* qui donnait une couleur bleue à l'eau. Pour une description plus complète des premières observations de fluorescence on pourra se référer à Acuña et Amat-Guerri, 2008.

Bien plus tard, en 1833, Sir David Brewster, décrit un phénomène remarquable qu'il a découvert et qu'il nomme « dispersion interne » : il observe qu'en dirigeant un faisceau de lumière sur une solution de chlorophylle, celle-ci se colore en rouge au passage des rayons lumineux, ce qui contraste fortement avec la couleur verte naturelle du liquide. Il observera par la suite un comportement similaire avec différentes solutions de légumes, huiles essentielles et même pour quelques solides. Quelques années plus tard, Sir John Herschel découvre que la partie supérieure d'une solution de sulfate de quinine, qui apparaît transparente observée en transmission, se colore en bleu lorsqu'elle est exposée aux rayons du soleil. La partie supérieure étant la partie où les rayons pénètrent dans la solution.

L'investigation de ces phénomènes est poursuivie plus tard par Sir George Gabriel Stokes. C'est de ses travaux que proviennent la majorité de nos connaissances actuelles sur le sujet. Stokes réalise une expérience très simple : dans une salle obscure, il fait apparaitre le spectre solaire par le biais d'un prisme ; il déplace ensuite un tube contenant une solution de sulfate de quinine dans les régions de l'espace ou la lumière est rouge, orangée, jaune, verte et bleue. Dans toute cette partie du spectre aucun phénomène particulier ne se produit, la solution se comporte comme de l'eau. Par contre, dans le violet et en dépassant le violet (c'est-à-dire dans les UV), de la lumière bleuâtre est émise. Il prouve ainsi que cette émission a pour origine l'absorption du rayonnement UV. Il aboutit à l'idée que cet effet ne pouvait être dû à une dispersion par les particules de la solution comme le pensait Brewster et que les propriétés optiques du rayonnement « dispersé » étaient différentes du rayonnement l'ayant créé. Il publia en 1852 un article dans lequel il introduit pour la première fois le terme fluorescence.

1.2.2 Fluorescence des végétaux

On distingue deux types de fluorescence chez les végétaux : la fluorescence chlorophyllienne dans la partie rouge du spectre (de 630 à 800nm) (RF : Red Fluorescence, FRF : Far Red Fluorescence) et la fluorescence bleu-verte (BGF : Blue-Green Fluorescence). La fluorescence chlorophyllienne est émise par la chlorophylle contenue dans le mésophylle et la fluorescence bleu-verte (de 400 à 630nm) par différentes molécules de la famille des phényl-propanoïdes situées dans l'épiderme et les nervures (voir *Figure I.9*).

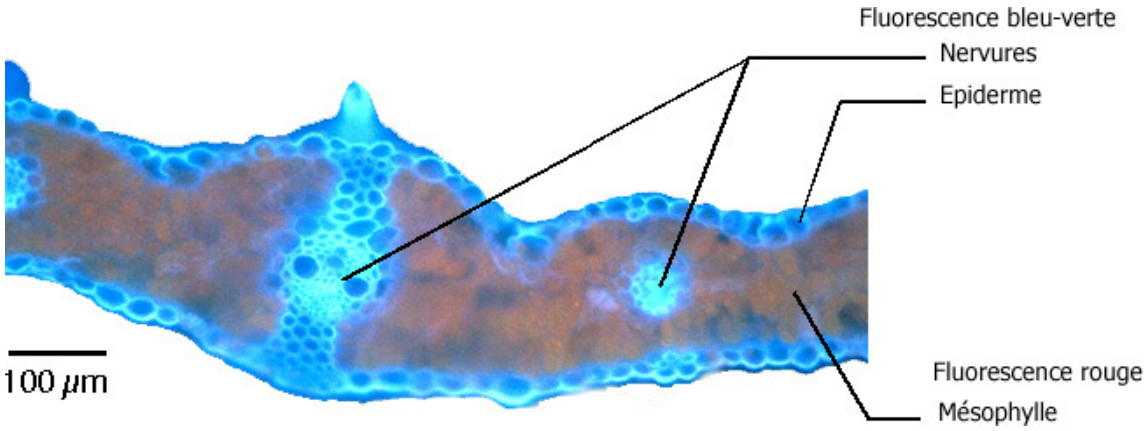


Figure I.9 *Coupe transversale d'une feuille de blé sous excitation UV à 365 nm.*

Sous excitation UV, les végétaux émettent les deux types de fluorescence. Les intensités relatives des deux types de fluorescence dépendent notamment de l'espèce, de l'âge et des conditions de cultures passées et présentes de la plante. La *Figure I.10* illustre l'émission de fluorescence obtenue sous excitation UV pour deux types de plantes. On voit bien la variation relative des contributions de fluorescence en fonction de l'espèce végétale.

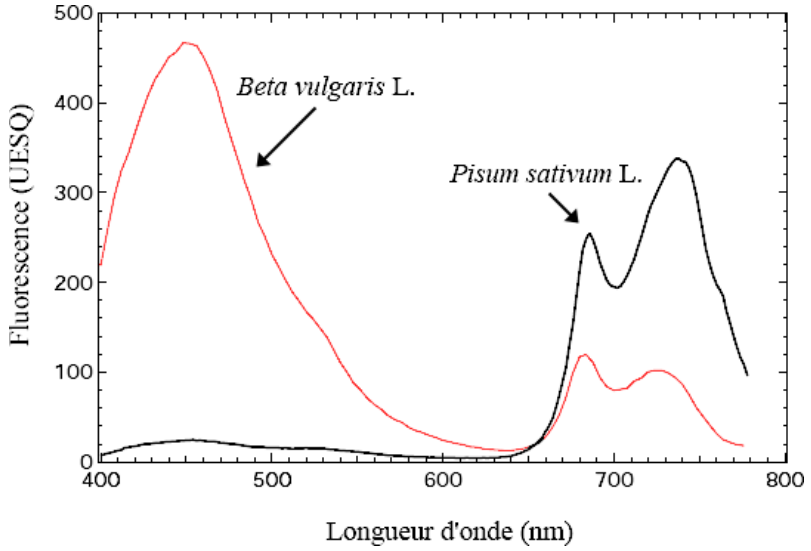


Figure I.10 *Spectre d'émission de fluorescence de deux feuilles excitées dans l'UV, à 355 nm. Face adaxiale (supérieure) d'une feuille de pois (Pisum sativum L.) et d'une feuille de betterave (Beta vulgaris L.). Les spectres de fluorescence sont exprimés en unités équivalentes de sulfate de quinine (UESQ), où mille unités représentent la fluorescence de 1 µM de sulfate de quinine dans une cuve de 1 cm de trajet optique, excitée à 347.5 nm et émise à 450 nm dans les mêmes conditions de mesure que les spectres (Cerovic et al., 1999).*

La fluorescence rouge des végétaux provient uniquement de la chlorophylle *a*. En effet, les autres pigments présents dans les antennes des deux photosystèmes (chlorophylle *b* et caroténoïdes) transfèrent l'énergie qu'ils ont absorbée à la chlorophylle *a*. L'émission de fluorescence rouge est donc appelée fluorescence chlorophyllienne. Au contraire de la fluorescence rouge, la fluorescence bleu-verte a une origine très hétérogène. De nombreux fluorophores dans différents compartiments de la feuille peuvent y participer. Les investigations sur cette émission de fluorescence n'ont débuté que récemment (Chappelle et al., 1984, Cerovic et al., 1999).

La fluorescence bleu-verte n'est pas en lien direct avec le fonctionnement photosynthétique de la plante au contraire de la fluorescence chlorophyllienne. C'est pourquoi, dans la suite de cette thèse nous ne nous intéresserons qu'à la fluorescence chlorophyllienne, c'est-à-dire dans le rouge et le proche infrarouge.

1.2.3 Fluorescence chlorophyllienne

La *Figure I.11* donne l'émission de fluorescence chlorophyllienne d'une feuille de sorgho. Cette émission est caractérisée par deux pics d'émission de fluorescence. Le premier est centré autour de 683-685 nm et le second autour de 735-740 nm. Bien qu'il existe une hétérogénéité de l'émission de fluorescence de la chlorophylle *a* due à l'existence des deux photosystèmes, la fluorescence à température ambiante provient majoritairement du photosystème II (Butler, 1978, Krause et Weis, 1984, Krause et Weis, 1991). Seule une petite partie de la fluorescence dans le proche infrarouge vient du photosystème I. Pour les états de faible fluorescence la contribution maximale du PSI est de

l'ordre de 30%. Quand la fluorescence est maximale, la contribution du PSI est de l'ordre de 6% (Pfundel, 1998, Agati et al., 2000, Moise et Moya, 2004b, Moise et Moya, 2004a). La contribution du PSI à la fluorescence participe pas à la fluorescence variable : son rendement est constant quelle que soit l'activité photosynthétique (Krause et Weis, 1991).

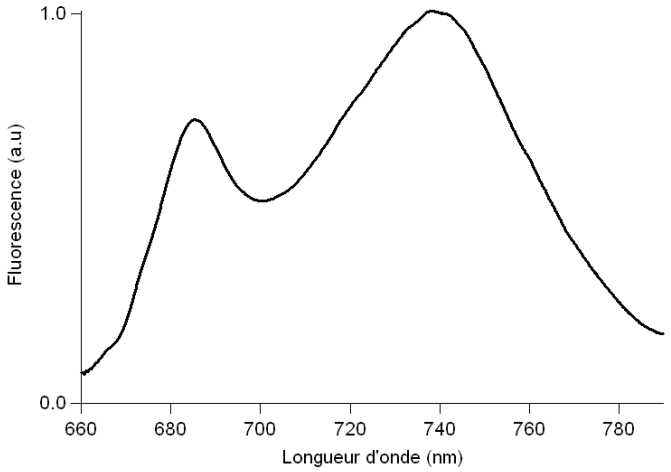


Figure I.11 *Emission de fluorescence d'une feuille de sorgho ([Chl]=42.4 µg.cm^{-2}). Mesure effectué avec le Leaf SpectroFluorimeter (éclairement solaire, voir CHAPITRE V).*

Les changements de rendement de fluorescence (ΦF) ont été observés pour la première fois par Kautsky en 1931 (Kautsky et Hirsch, 1931) lorsque l'ont fait passer une plante de l'obscurité à la lumière. Cette transition induit une augmentation rapide du rendement de fluorescence qui atteint un maximum pendant une période de l'ordre de la seconde avant de relaxer lentement. Cette augmentation est due à la diminution rapide des accepteurs d'électron dans la chaine d'oxydoréduction du PSII. En effet, après que le PSII ait absorbé la lumière, il n'est plus capable d'en absorber tant que l'accepteur Q_A est dans l'état réduit (n'a pas transféré son électron à l'accepteur suivant), on dit que le centre réactionnel est fermé. La fermeture des centres réactionnels diminue l'efficacité photosynthétique de la plante ce qui induit l'augmentation du rendement de fluorescence pour pouvoir dissiper l'énergie absorbée.

Après cette forte augmentation, le rendement de fluorescence diminue lentement jusqu'à atteindre un niveau stationnaire (ΦF_S). Deux phénomènes expliquent ce quenching de la fluorescence. Le premier est l'augmentation du taux de transfert d'électrons ; il augmente à cause de l'activation par la lumière d'enzymes impliqués dans le métabolisme du carbone et dans l'ouverture des stomates : c'est le quenching photochimique (qP). Le deuxième phénomène est l'augmentation de l'efficacité de la dissipation thermique : le quenching non photochimique (qN). Ces processus font diminuer le rendement de fluorescence jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint, on parle alors de fluorescence stationnaire. Bien que la durée de la transition entre le pic de fluorescence et l'état stationnaire varie d'une espèce à l'autre il est typiquement de l'ordre de 15 à 20 minutes (Maxwell et Johnson, 2000).

Le rendement de fluorescence *in vivo* est donc *variable* et c'est de ces variations que l'on peut extraire une information sur la capacité du système photosynthétique à convertir l'énergie. La méthode de l'impulsion saturante, tire partie de ces variations et des mécanismes sous-jacents pour évaluer le fonctionnement photosynthétique de la plante.

1.2.4 Utilisation de la fluorescence chlorophyllienne comme sonde du fonctionnement photosynthétique

Considérons un ensemble de centres PSII éclairés, susceptibles de transformer en énergie chimique l'énergie excitonique circulant dans leurs antennes. Plusieurs processus concourent à la désactivation des états excités. Ils sont caractérisés par leur constante de vitesse (fraction de la quantité d'état excité transformé par unité de temps) : k_F pour la fluorescence, k_D pour la dissipation thermique, k_T pour le transfert d'excitons vers d'autres molécules, k_Q pour différents quenchers de la fluorescence et k_P pour la conversion photochimique. On peut écrire l'émission de la fluorescence comme :

$$F = I_a \frac{k_F}{k_F + k_D + k_T + k_Q[Q] + k_P[Q_A]} \qquad (I.3)$$

Avec I_a, le rayonnement absorbé, $[Q]$ la concentration de quenchers et $[Q_A]$ la concentration en Q_A oxydés. L'émission de fluorescence est affectée par trois types de processus : les processus non-photochimiques, responsables du quenching non-photochimique représentés par $k_D + k_T + k_Q[Q]$, la fluorescence et la photochimie.

Le rendement de fluorescence s'écrit :

$$\Phi F = \frac{k_F}{k_F + k_D + k_T + k_Q[Q] + k_P[Q_A]} \qquad (I.4)$$

Et le rendement photochimique :

$$\Phi P = \frac{k_P[Q_A]}{k_F + k_D + k_T + k_Q[Q] + k_P[Q_A]} \qquad (I.5)$$

Lorsque tous les centres réactionnels sont ouverts (Q_A oxydés) et donc disponibles pour la photochimie, la capacité de désactivation par voie photochimique est maximale. On a alors $k_P[Q_A] \gg k_F + k_D + k_T$ et le rendement de fluorescence est donc minimal. Ce rendement minimal est noté ΦF_0. On peut le mesurer sur des plantes adaptées à l'obscurité. Lorsque tous les centres réactionnels sont fermés (Q_A réduit) la capacité de désactivation par photochimie est nulle : $k_P[Q_A] = 0$, le rendement de fluorescence est alors maximal, on note ce rendement ΦF_m. Il peut être mesuré lorsque l'éclairement est suffisamment intense pour saturer la photosynthèse.

En pratique, ces mesures sont généralement faites avec un éclairement connu, il est alors plus commode d'utiliser les intensités de fluorescence (F_s, F_0, F_m) plutôt que les rendements ($\Phi F_s, \Phi F_0, \Phi F_m$). Dans la suite nous utiliserons donc les intensités de fluorescence.

Penchons nous à présent sur la méthode de l'impulsion saturante, qui permet de mesurer ces paramètres et de comprendre les interactions entre photochimie et fluorescence. La *Figure I.12* décrit cette méthode.

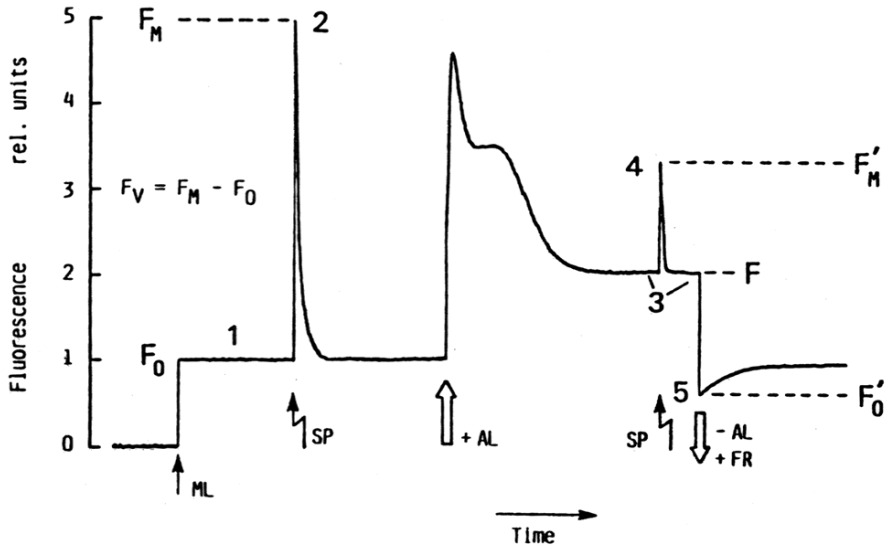


Figure I.12 *Cinétique d'induction de fluorescence type, pour la détermination du rendement photochimique optimal (Fv/Fm) et effectif (ΔF/Fm'). ML : mise en marche de la lumière analytique (début de mesure de la fluorescence) ; SP : impulsion lumineuse saturante ; AL : lumière actinique non-saturante; FR : lumière rouge-lointain. Cette lumière est absorbée préférentiellement par le PSI, et donc excite très peu le PSII. FR est utilisée ici pour drainer complètement les électrons du pool de plastoquinones lors de l'extinction de la lumière actinique. Le niveau F_0' est alors inférieur à F_0 en raison des phénomènes de désactivation thermique qui sont encore actifs (d'après Kooten et Snel, 1990).*

La plante est tout d'abord adaptée à l'obscurité. Puis, en éclairant cette plante avec une lumière analytique, (une lumière d'intensité constante et très faible qui n'induit pas de changement d'activité photosynthétique) on peut faire une mesure de F_0 (fluorescence à l'obscurité). La valeur non nulle de F_0 traduit principalement l'émission de fluorescence pendant la migration d'excitons dans l'antenne avant la capture par le centre réactionnel. Cette émission peut inclure également la contribution des chlorophylles qui ne sont pas connectées aux centres réactionnels du PSII et qui ne sont donc pas fonctionnelles photosynthétiquement (Clayton, 1969, Lavorel et Joliot, 1972). C'est le cas par exemple, des centres du PSII dont la chlorophylle n'est pas encore intégrée dans les complexes protéiques pendant le verdissement des plantes (Marder et al., 1995, Briantais et al., 1996) ou pour les centres qui ne sont pas fonctionnels (Lazar, 1999). F_0 peut augmenter sous certaines conditions de stress : une augmentation faible signifiera une diminution partiellement réversible de la photochimie du PSII alors qu'une forte augmentation signifiera une déconnexion irréversible des complexes du LHCII (Briantais et al., 1996).

Une fois cette mesure effectuée on envoie une impulsion saturante (2 à 3 fois l'intensité maximale du soleil pendant 1 à 2 secondes). Comme décrit précédemment, cette impulsion sature la photosynthèse, $k_P[Q_A] \sim 0$, ce qui permet de déterminer le niveau maximum de fluorescence F_m. Il faut noter que la désactivation thermique pour ces deux mesures est minimale et constante car elle ne se met en place qu'après un certain temps d'exposition. De ces deux mesures on déduit l'efficacité de capture des excitons par les centres réactionnels ouverts du PSII, c'est-à-dire le rendement photochimique optimal. Il s'écrit :

$$\phi P = \frac{F_m - F_0}{F_m} = \frac{F_v}{F_m} \qquad (I.6)$$

Avec F_v , la fluorescence variable, la variation maximale de fluorescence.

Pour une plante dont la photosynthèse fonctionne bien la valeur de ϕP est typiquement comprise entre 0.80 et 0.86 (Björkman et Demmig, 1987, Genty et al 1989, Pfundel, 1998, Agati et al., 2000). ϕP est mesuré lorsque la plante est à l'obscurité (photosynthèse inactive). Cependant, lorsque la plante est à la lumière les autres processus de désactivation, qui sont liés au fonctionnement de l'appareil photosynthétique, se mettent en place. Le rendement photochimique est alors inférieur à ϕP. Pour caractériser la plante en état de fonctionnement d'autres mesures sont faites avec une lumière actinique (lumière du soleil ou toute autre source lumineuse activant la photosynthèse). Comme nous l'avons vu précédemment la transition entre obscurité et lumière induit une augmentation de fluorescence, c'est l'effet Kautsky (voir *Figure I.12*), puis une relaxation vers un état stationnaire F_s, F_T ou F selon les notations.

Genty et al., 1989, ont montré que le rendement photochimique effectif (c'est-à-dire le rendement à la lumière, dans des conditions standard de fonctionnement) pouvait être mesuré à partir de la fluorescence stationnaire et de la fluorescence maximale à la lumière F'_m. Pour mesurer F'_m on envoie donc une impulsion saturante. Le rendement effectif s'écrit :

$$\phi P_{eff} = \frac{F'_m - F_s}{F'_m} = \frac{\Delta F}{F'_m} \qquad (I.7)$$

L'augmentation de fluorescence ΔF correspond à la fermeture des centres réactionnels restés ouverts dans l'état stationnaire. ϕP_{eff} permet de mesurer le rendement de la photosynthèse (Schreiber et Bilger, 1993), mais il faut garder en tête que c'est plus précisément une mesure du rendement quantique du flux d'électrons photosynthétiques du PSII.

Après la mesure de F'_m, la lumière actinique est coupée et un éclairement dans le rouge-lointain est activé. Cette lumière est absorbée préférentiellement par le PSI, et excite donc très peu le PSII. Cette lumière est utilisée pour drainer complètement les électrons du pool de plastoquinones lors de l'extinction de la lumière actinique. Le niveau F'_0 atteint est alors inférieur à F_0 en raison des phénomènes de désactivation thermique qui sont encore actifs. La mesure de F'_0 permet de retrouver le quenching photochimique qui mesure le nombre de centre réactionnels ouverts du PSII :

$$qP = \frac{F'_m - F_s}{F'_m - F'_0} \qquad (I.8)$$

On en déduit le quenching non photochimique :

$$qN = 1 - \frac{F'_m - F_s}{F'_m - F'_0} \qquad (I.9)$$

Que l'on peut aussi écrire selon la définition de Stern-Volmer :

$$qN = \frac{F_m}{F'_m} - 1 \qquad (I.10)$$

1.2.5 Fluorescence et chlorophylle, rapport d'émission Rouge/Proche-Infrarouge

La *Figure I.13.A* donne le spectre d'absorption de la chlorophylle et le spectre d'émission de fluorescence de chloroplaste en solution diluée. Elle montre que le spectre d'absorption et le spectre d'émission de fluorescence de la chlorophylle se chevauchent dans la partie rouge (λ < 720 nm). Ce chevauchement a pour conséquence que l'émission de fluorescence est susceptible d'être réabsorbée par la chlorophylle elle-même. Pour la chlorophylle en solution cette réabsorption va dépendre de la concentration en chlorophylle.

Dans une feuille cette réabsorption a évidemment lieu aussi et même de manière plus forte car la concentration de la chlorophylle est bien plus importante qu'en solution. Dans une feuille, lorsque la fluorescence est émise, elle est donc en partie réabsorbée à l'intérieur de la feuille (voir *Figure I.13.B*) par les autres molécules de chlorophylle. C'est principalement la fluorescence dans le rouge qui est réabsorbée. Ce qui a pour conséquence que la fluorescence à 685 nm provient d'une couche mince de la surface de la feuille tandis que la fluorescence à 735 nm provient de toute la profondeur de la plante (Malkin et al., 1981, Briantais et al., 1986).

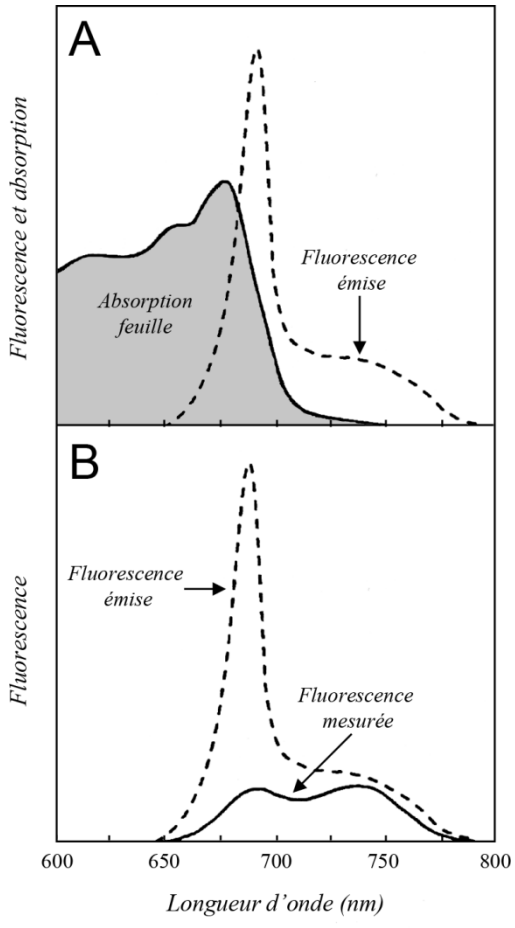


Figure I.13 *Illustration de l'effet de la réabsorption de la fluorescence chlorophyllienne mesurée sur des feuilles. En pointillés est représenté le spectre de fluorescence tel qu'il est émis par une suspension diluée de chloroplaste. Il est comparé au spectre d'absorption de la feuille (**A**) et à la fluorescence réellement mesurée au niveau de la feuille (**B**) (d'après Buschmann et Lichtenthaler, 1998).*

Le rapport d'émission de fluorescence Rouge/Proche Infrarouge (R/PIR) est la première signature introduite par Lichtenthaler et al., 1986. Il à été montré que ce rapport dépend de la concentration en chlorophylle et de la structure de la feuille : lorsque la concentration en chlorophylle augmente, le rapport R/PIR diminue (Gitelson et al., 1998). Cette anticorrélation est particulièrement marquée pour des valeurs de contenu en chlorophylle inférieure à 30 $g.cm^{-2}$ (Gitelson et al., 1998).

Signalons qu'il a également été montré que dans certain cas, le rapport R/PIR montrait des variations de plus faible amplitude pour un même contenu en chlorophylle. Ainsi il a été observé une variation au cours du cycle diurne (Valentini et al., 1994, Agati et al., 1995) et lors d'un stress induit par la température (Agati et al., 1995, Agati et al., 2000).

1.3 Propriétés spectrales des feuilles et du couvert végétal

L'interaction des feuilles avec le rayonnement incident se traduit par des phénomènes d'absorption, de réflexion, de transmission et de diffusion. La diffusion du rayonnement par la feuille est due essentiellement aux discontinuités d'indice de réfraction existant entre les parois hydratées des cellules (n=1.4), l'eau libre dans les espaces intercellulaires (n=1.33) et l'air des lacunes du parenchyme lacuneux (n=1) ainsi qu'à la diffusion par les organites contenues dans le cytoplasme (grana, mitochondries...). L'absorption est principalement liée à la présence de pigments photosynthétiques (voir *Figure I.14*), à l eau et à la matière sèche (Fourty et Baret, 1998, Baret et Fourty, 1997).

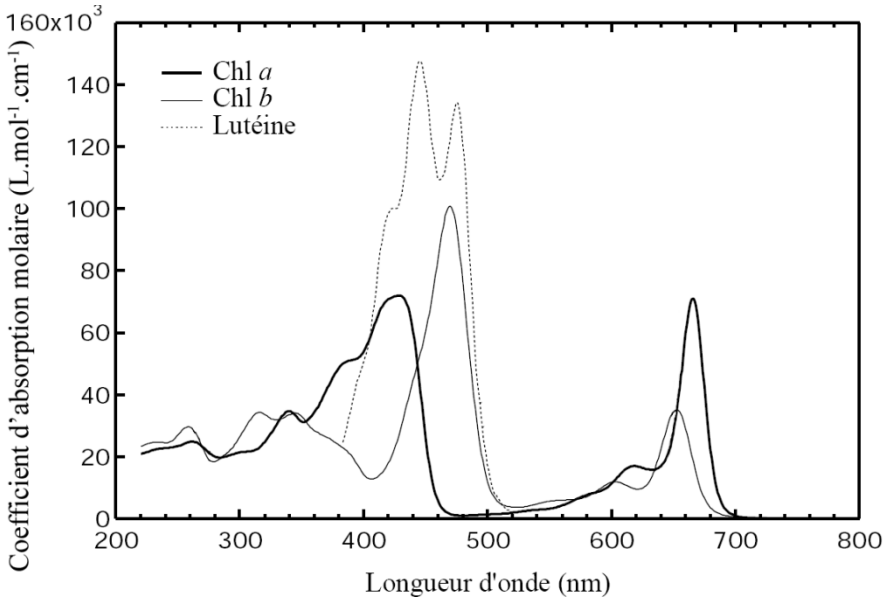


Figure I.14 *Spectres d'absorption des pigments photosynthétiques. Les chlorophylles a et b sont en solution dans le méthanol. Parmi les caroténoïdes présents dans les antennes, seul le spectre d'absorption de la lutéine (en solution dans l'éthanol) est représenté, car les spectres d'absorption des caroténoïdes sont très proches (Lichtenthaler, 1987).*

Pour ces raisons les spectres de la végétation se caractérisent par une même allure typique. On distingue trois zones spectrales.

- *UV-Visible (300-700 nm) :* Dans ce domaine, la feuille manifeste une faible réflectance et transmittance due à une forte absorption du rayonnement par les pigments foliaires. Les polyphénols, contenus dans l'épiderme, absorbent le rayonnement UV proche, les pigments

(chlorophylle a et b, caroténoïdes) absorbent l'UV, le visible et le proche infrarouge (300-700 nm), plus faiblement entre 500 et 600 nm.

- *Proche infrarouge (700-1300 nm):* Il s'agit d'une zone de faible absorption. Le niveau du plateau de réflectance (plateau proche infrarouge) dépend essentiellement de la structure anatomique de la feuille (taille des cellules, des espaces intercellulaires, nombre d'interfaces)

- *Moyen infrarouge (1300-2500 nm) :* Le moyen infrarouge est fortement absorbé par l'eau, et par des macromolécules (lignine, cellulose, protéines, etc.).

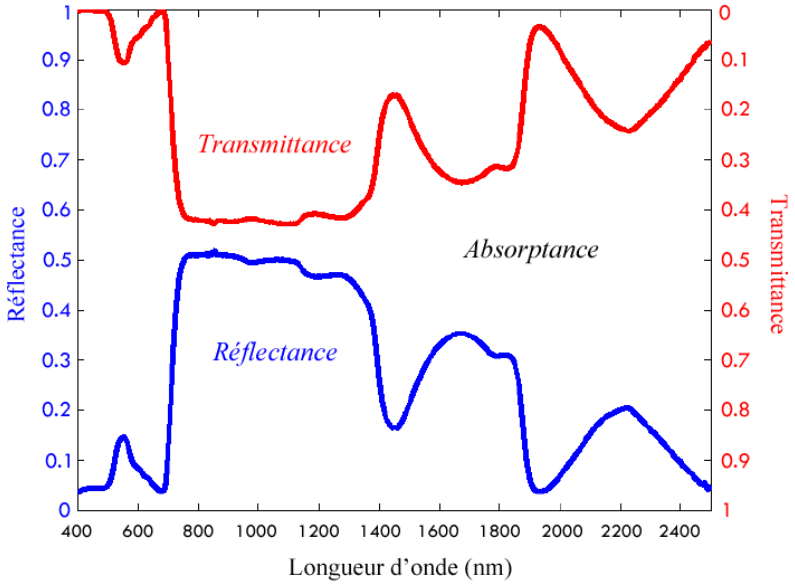


Figure I.15 *Spectres de réflectance et de transmittance d'une feuille fraîche de trèfle des prés (Trifolium pratense) (d'après Jacquemoud et al., 2009).*

Les propriétés optiques d'un couvert végétal sont très complexes. Elles dépendent des propriétés optiques et géométriques de chacun des éléments du couvert, mais aussi de l'interaction entre ces différents éléments. De ce fait, la réponse spectrale des couverts végétaux et en particulier le spectre de réflectance dépend étroitement de l'architecture et de la géométrie du couvert, de son taux de couverture, mais aussi des propriétés optiques du sol sous-jacent.

- **Indice de surface foliaire, Leaf Area Index (LAI)**

Le LAI caractérise la surface d'échange (eau, carbone, rayonnement) avec l'atmosphère. Il est défini comme la surface cumulée, sur toute la hauteur du couvert, des faces adaxiales des feuilles par unité de surface de sol. Il a été défini pour la première fois par Watson, 1947 et est maintenant largement utilisé en écophysiologie pour modéliser le fonctionnement des couverts, puisque ce sont essentiellement les feuilles qui conditionnent l'évapotranspiration et les flux de carbone entre la biosphère et l'atmosphère (Rosenberg et al., 1983). Le LAI varie typiquement de 0 pour un sol nu à une valeur maximale de 5-6 pour une culture annuelle, et peut dépasser 15 dans le cas des forêts tropicales. En général, lorsque l'indice foliaire augmente, la réflectance du couvert diminue dans le visible et le moyen infrarouge, et augmente dans le proche infrarouge. Pour une culture annuelle, la variation de la réflectance en fonction du LAI atteint un seuil dépendant du domaine spectral considéré : 3 dans le visible et le moyen infrarouge, 5 ou 6 dans le proche infrarouge (voir *Figure I.***16**).

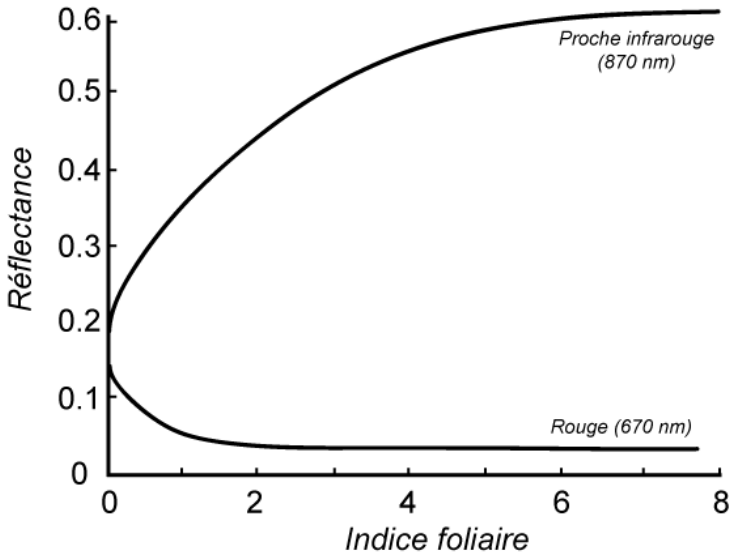


Figure I.16 *Evolution de la réflectance d'un couvert végétal dans le rouge et le proche infrarouge en fonction de l'indice foliaire (LAI) (d'après Guyot, 1989).*

1.4 Télédétection des couverts végétaux

1.4.1 Les indices spectraux, NDVI et PRI

Les caractéristiques très marquées du spectre de réflectance du couvert ont été utilisées pour définir des indices de végétation. Ce sont des combinaisons de valeurs de réflectance acquises dans plusieurs bandes spectrales, destinées à corréler la réflectance spectrale à des caractéristiques de la végétation via des relations simples. Ces indices sont une approche empirique de l'interprétation des données de télédétection. Les canaux les plus utilisés sont le rouge et le proche infrarouge, où le contraste avec le sol est le plus prononcé. Les plus utilisés sont le PIV (Perpendicular Vegetation Index) de Richardson et Wiegand, 1977, le TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index) de Baret et Guyot, 1991 et surtout le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) de Tucker, 1979.

- **NDVI**

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R} \qquad (I.11)$$

où ρ_R et ρ_{PIR} sont les réflectances dans le rouge et le proche infrarouge. Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et 1.

Le NDVI est l'indice le plus communément utilisé pour rendre compte de la présence de végétation en télédétection. Il s'appuie sur la forte différence de réflectance de la végétation entre le visible et le proche infrarouge (le red-edge). Le NDVI permet essentiellement de détecter la présence de végétation : sa valeur sera proche de 0 dans le cas d'un sol nu qui n'a pas de fort changement de réflectance entre le rouge et le proche infrarouge alors qu'elle sera supérieure en présence de végétation. La réflectance du sol est plus grande que celle des feuilles dans le rouge et plus faible dans l'infrarouge. Lorsque la végétation est en phase active de croissance, la contribution du sol au spectre de réflectance global mesuré décroît, au profit de celle de la végétation. Au cours de cette phase, la

réflectance mesurée diminue dans les domaines du visible et de l'infrarouge moyen, alors qu'elle augmente dans la région du proche infrarouge (voir *Figure I.17*). Le NDVI augmentera avec la couverture du sol. La saturation des signaux de réflectance est atteinte pour un LAI de 2 dans le visible et un LAI de 5 dans l'infrarouge. Le NDVI est donc utilisable jusqu'à un LAI de 5 (voir *Figure I.***16**).

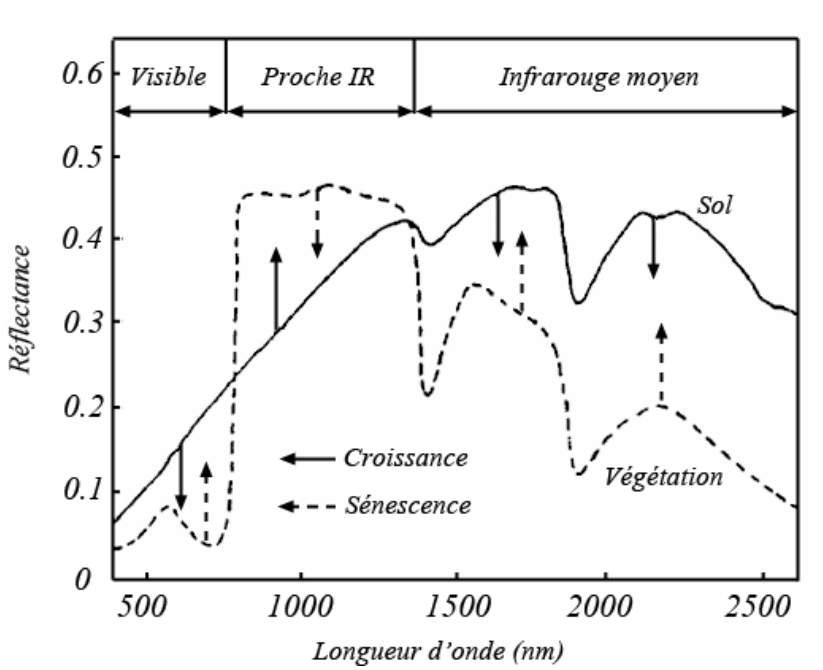


Figure I.17 *Sens d'évolution de la réflectance d'un couvert végétal au cours de la phase active de croissance et de la sénescence (d'après Guyot, 1989).*

Le NDVI est souvent utilisé comme indicateur de biomasse, de la lumière absorbée (APAR) ou de la capacité photosynthétique du couvert suivant les interprétations qui sont faites. Cependant cet indice ne permet pas d'accéder aux processus physiologiques dynamiques. C'est pourquoi le PRI, un indice sensible aux variations de l'activité photosynthétique à court terme a été introduit.

- **PRI (Physiological Reflectance Index)**

Le PRI (Gamon et al., 1992) est un indice basé sur les changements de réflectance de la partie verte du spectre. Il est défini comme la variation relative de la réflectance à 531 nm par rapport à la réflectance à 570 nm:

$$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}} \qquad (I.12)$$

Les causes physiologiques de ce changement de réflectance ont commencé à être étudiées dans les années 1990. Ce changement de réflectance a été associé à deux mécanismes impliqués dans la dissipation d'énergie par voie thermique. L'apparition d'un gradient de pH au niveau de la membrane des thylakoïdes induit des changements rapides dans l'état d'agrégation des complexes chlorophylle-protéine des antennes qui provoquent une variation de l'absorbance centrée sur la plage 531-535 nm. Un deuxième phénomène, le changement de l'état d'époxidation des xanthophylles et leur accumulation, est accompagné de variations de l'absorbance centrées sur la plage 505-515 nm

(Morales et al., 1990, Ruban et al., 1993). Ces variations d'absorbance induisent une variation de la réflectance dans une large bande autour de 531 nm.

Gamon et al., 1990 ont été les premiers à montrer que des variations rapides de la réflectance de feuilles ou de couvert autour de 531 nm, en réponse à des variations de la lumière incidente, pouvaient être détectées à distance, par des mesures passives, en utilisant un radiomètre portable.

La composante principale du PRI est reliée à la composante du quenching non-photochimique (NPQ, Non-Photochemical Quenching) liée au cycle des xanthophylles, ce qui en fait un outil intéressant pour la détection des variations dynamiques du système de photo-protection. Evain et al., 2004, ont également montré que le PRI était un bon indicateur de la fermeture des stomates, mécanisme de protection de la plante déclenché en cas de stress hydrique permettant de limiter la déperdition en eau.

1.4.2 Télédétection active de la fluorescence

Actuellement, la grande majorité des mesures de fluorescence se font de manière active. C'est-à-dire en utilisant une source de lumière artificielle pour exciter la fluorescence. La méthode PAM (Pulse-Amplitude-Modulation) (Schreiber et al., 1986, Schreiber, 1986) est la technique de référence pour la mesure du rendement de fluorescence des plantes dans leurs milieux naturels. Utilisée à l'origine pour les mesures par contact, c'est sur ce principe que reposent les instruments actifs de mesure à distance.

Depuis l'avènement des lasers impulsionnels, la fluorescence induite par laser (LIF, Laser-induced fluorescence) a été largement utilisée comme sonde non-destructive et non intrusive pour l'étude des différents mécanismes de fonctionnement de la végétation en général, et de la photosynthèse en particulier. Ainsi, des Lidars (Light Detection And Ranging) spécifiques à la télédétection active de la fluorescence, appelés par extension FLIDAR (Fluorescence Lidar) ont été développés par différents groupes de recherche. Les premières mesures en champs ont été faites par Measures et al (1973). Depuis, plusieurs instruments ont été développés spécifiquement. Par exemple, Ounis et al., 2001 ont développé un LIDAR (DE-FLIDAR) excitant à deux longueurs d'onde dans l'UV et le vert. Le DE-FLIDAR permet de mesurer simultanément la fluorescence chlorophyllienne, la fluorescence bleue-vert, mais aussi l'absorption UV de l'épiderme foliaire.

Le FIPAM (Frequency Induced Pulse Amplitude Modulation) est un FLIDAR basé sur la méthode de *light-doubling* permettant de mesurer la fluorescence variable jusqu'à une distance de 5 m (Cavender-Bares et al., 1999, Flexas et al., 2000, Ounis, 2001, Apostol et al., 2001, Moya et al., 2004). Le FIPAM est basé sur une diode laser et permet la mesure de F_s et F_0 à une fréquence de 1Hz. Il permet également, en augmentant la fréquence jusqu'a 100 kHz, de faire des mesures en saturant la fluorescence (F_m, F_m').

La méthode LIFT (Laser Induced Fluorescence Transient) a été développée par Kolber et al., 2005. Elle est basée sur un système de type LIDAR, éclairant la végétation à l'aide d'une diode laser à 660 nm. La collection du signal se fait grâce à un télescope de 250 mm Ce système mesure les variations de fluorescence induites par l'augmentation de la fréquence de l'excitation. Pour des raisons de sécurité oculaire, ce système ne peut saturer la photosynthèse mais en ajustant la transition de fluorescence sur un modèle, il est possible de retrouver les paramètres F_0 et F_m et d'en déduire le rendement photochimique. L'instrument développé autour de cette méthode peut être utilisé au sol ou

depuis un avion, auquel cas la source lumineuse est une matrice de 60 diodes générant une puissance d'excitation de 40 W. Depuis un avion l'instrument permet une mesure sur une surface de 1 m par 1.5 m à une altitude de 150 m.

Si les instruments actifs de contact ou de mesure à distance sont utilisés de manière routinière, il est important de noter que le rayon d'action de ces instruments est plus souvent limité à quelques dizaines de mètres, et que les mesures au niveau de la plante entière et du couvert végétal sont encore très minoritaires. En particulier l'utilisation de ces instruments pour des mesures à plus grande échelle est problématique : depuis une plateforme satellitale, de tels systèmes nécessiteraient des lasers de forte énergie dont les caractéristiques sont difficilement réalisables dans l'état actuel de nos technologies. Une estimation faite par Ounis, 2001a montré qu'une détection par laser du niveau de fluorescence stationnaire en présence de lumière ambiante nécessiterait des impulsions lasers d'au moins 10 Joules depuis un satellite à 258 km d'altitude pour une évaluation suffisamment sensible. La réalisation d'un tel instrument est encore peu envisageable. Les objectifs actuels étant d'avoir un diagnostic du fonctionnement de la végétation à l'échelle du globe grâce à la fluorescence, les efforts de recherche se sont naturellement tournés vers les techniques de mesures passives, qui devraient permettre une mesures depuis l'espace (voir projet FLEX, Drusch et al., 2008).

1.5 Conclusion

Les plantes utilisent la lumière pour enclencher les réactions nécessaires à la synthèse de composés organiques dont elles ont besoin grâce au processus de photosynthèse. Elles bénéficient de plusieurs mécanismes de protection qui leur permettent de dissiper l'excès d'énergie lumineuse absorbée. D'autre part, les molécules de chlorophylle qui initient les réactions de photosynthèse, perdent une partie de l'énergie absorbée par émission de fluorescence. Cette émission est donc en compétition pour l'utilisation de l'énergie absorbée avec les mécanismes de régulation et la photosynthèse. Ainsi les variations d'émission de fluorescence trahissent le fonctionnement de l'appareil photosynthétique des plantes. Nous avons présenté dans ce chapitre les informations qui peuvent être obtenues à partir de ces variations et la manière de les obtenir.

En télédétection, la plupart des indices utilisés sont basés sur le flux réfléchi par la végétation, autrement dit le flux qui n'a pas été utilisé par la végétation. S'ils permettent d'estimer la quantité de végétation, son taux de couverture et dans certains cas une situation de stress (PRI), ils ne sont pas directement liés au processus de photosynthèse. C'est ce qui fait l'intérêt de la fluorescence : c'est une lumière émise par la plante provenant du cœur du système photosynthétique. Sa mesure permet d'avoir des indications plus précises sur le fonctionnement de la végétation.

La mesure de la fluorescence par contact se fait de manière routinière. Si les instruments actifs disponibles actuellement permettent de mesurer la fluorescence jusqu'à une distance 300 m, les limites technologiques actuelles ne permettent pas d'envisager facilement la mesure active depuis un satellite. C'est pourquoi les efforts se penchent actuellement vers la mesure passive de la fluorescence.

Chapitre II

Mesure passive

Chapitre II : Mesure passive

2.1 **Principe général** 51
2.1.1 Calcul de la fluorescence – Méthode FLD standard 52
2.1.2 Bandes d'absorption 53
2.2 **Mesure passive de la fluorescence** 55
2.2.1 Capteurs 55
2.2.2 Type de détecteur 58
2.2.3 Mesure dans les bandes de l'oxygène 60
2.3 **Application du FLP** 62
2.3.1 Variations de profondeur 64
2.3.2 Effet de la non-constance de la fluorescence dans la bande 66
2.3.3 Erreur sur la fluorescence induite par l'incertitude sur α et β 66
2.3.4 Génération d'un set de données synthétiques 68
2.3.5 Caractéristiques des canaux de mesures : fluorescence minimale détectable 71
2.3.6 Fluorescence minimale détectable et largeur des canaux 73
2.3.7 Canaux de mesures : détermination d'une configuration optimale 73
2.4 **Calcul de la fluorescence** 77
2.4.1 Système d'équations 78
2.4.2 Application - Bande O_2-A 84
2.4.3 Application - Bande O_2-B 86
2.4.4 Quelques précisions concernant l'algorithme 88
2.5 **Conclusion** 92

Mesure passive

Les mesures actives ont pour facteur limitant la puissance nécessaire pour exciter la cible de manière satisfaisante. Cette limite devient prépondérante lorsqu'il s'agit de faire des mesures à partir d'un avion ou d'un satellite. C'est pourquoi la communauté s'intéressant à la télédétection de la fluorescence s'est tournée vers les mesures passives, c'est-à-dire une mesure utilisant le soleil comme source d'excitation.

2.1 Principe général

Il s'agit donc de détecter la fluorescence induite par le soleil dans le flux lumineux venant d'une cible végétale. Le rendement de fluorescence d'une feuille étant très faible (inférieur à 1% de l'énergie absorbée), l'émission de fluorescence est en général négligeable devant le flux réfléchi par la végétation. Il existe cependant des zones du spectre solaire dans lesquelles la fluorescence émise par la végétation n'est pas négligeable devant le flux réfléchi. Il s'agit de zones spectrales dans lesquelles le flux lumineux venant du soleil a été absorbé. On parle de raies de Fraunhofer du nom du physicien qui, le premier, les a étudiées en détail. Ces bandes d'absorption peuvent se former soit dans l'atmosphère du soleil (c'est le cas par exemple des bandes d'absorption H_α, H_β), soit pendant la traversée de l'atmosphère terrestre, on parle alors de bandes d'absorption atmosphériques.

Au fond de ces bandes d'absorption, là ou le flux lumineux est le plus faible, l'émission de fluorescence n'est plus négligeable devant le flux réfléchi et il devient alors plus facile de la détecter. La contribution de la fluorescence étant proportionnellement plus forte au fond de la bande qu'au bord, la forme de la bande d'absorption après interaction avec la végétation sera modifiée. Il y aura un comblement du fond de la bande par l'émission de fluorescence : c'est la quantification de ce comblement qui permet la mesure de la fluorescence.

On s'intéresse donc à la modification du profil de la bande d'absorption entre le spectre de la lumière incidente et le spectre renvoyé par la végétation. Pour être plus précis, on s'intéresse à la modification de la profondeur de la bande d'absorption. La profondeur est définie comme le rapport entre le flux au bord de la bande et le flux au fond de la bande. On a, pour le flux indicent (voir *Figure II.1.a*):

$$P_{\mathrm{r}} = \frac{Flux\ bord}{Flux\ fond} \qquad (II.1)$$

Au premier ordre, la réflexion du flux incident sur la végétation ne modifie pas la profondeur. En effet, la réflectance étant un facteur multiplicatif au bord et au fond elle est annulée par le rapport (voir *Figure II.1.b*). Par contre, la contribution de la fluorescence étant additive on a, après réflexion du rayonnement par la végétation :

$$P_c = \frac{Flux\ bord + fluorescence}{Flux\ fond + fluorescence} \qquad (II.2)$$

Et donc, $P_r \neq P_c$: la profondeur de la bande d'absorption dans le spectre du flux lumineux venant de la végétation sera plus faible que la profondeur dans le spectre du flux incident (voir *Figure II.1.d*) : c'est l'effet de comblement par la fluorescence. Il est alors possible d'estimer la fluorescence en mesurant ce comblement.

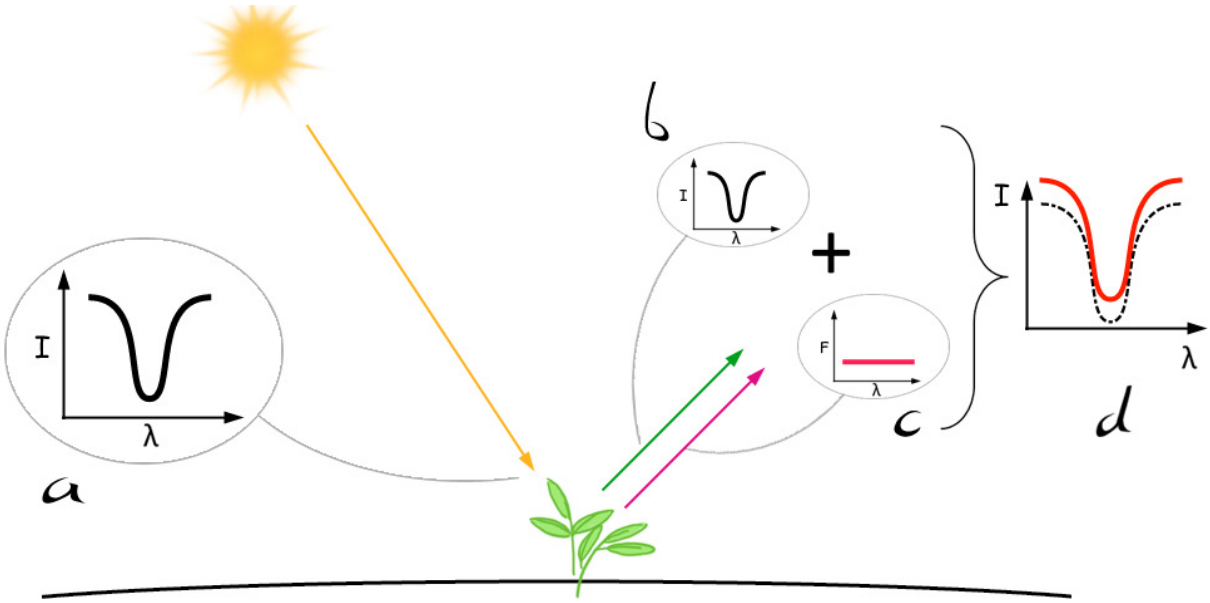


Figure II.1 *Représentation schématique du Fraunhofer Line Principle (FLP) pour la mesure de la fluorescence. Le flux incident* ***(a)*** *est réfléchi par la végétation* ***(b)*** *sans modification notable au premier ordre de la forme du spectre. L'ajout de la fluorescence de la végétation* ***(c)*** *modifie le spectre total lorsqu'on observe la végétation* ***(d****, le spectre vert est la somme de la fluorescence et du flux réfléchi)*

Cette méthode, permettant de détecter une émission propre d'un objet, a été proposée pour la première fois par Link, 1951 en 1951, il s'agissait de mettre en évidence une composante due à la luminescence du sol lunaire dans le flux solaire réfléchi par la lune. Link, 1951 proposait alors d'utiliser les fortes raies H_α, K et H pour effectuer les mesures. Ce principe est connu dans la littérature sous le nom de Fraunhofer Line Principle (FLP) ou principe des raies de Fraunhofer.

2.1.1 Calcul de la fluorescence – Méthode FLD standard

Considérons le profil d'une bande d'absorption idéale, vue dans le flux incident, telle que présentée dans la *Figure II.1.a*. Soit L_1^r, le flux au bord de cette bande d'absorption (longueur d'onde λ_1, *r* pour référence) et L_2^r le flux au fond de cette bande (longueur d'onde λ_2). Considérons maintenant une plante observée sous cet éclairement. Soit ρ, la réflectance de la plante définie comme le rapport entre le flux réfléchi par la plante dans un angle solide donné et le flux réfléchi par une surface lambertienne d'albédo 1 dans les mêmes conditions. Supposons dans un premier temps que ρ est constante sur l'intervalle λ_1, λ_2. Le flux réfléchi s'écrit donc $\rho \times L_1^r$ et $\rho \times L_2^r$. Soit L_1, le flux total provenant de la plante à la longueur d'ondeλ_1 et L_2, le flux total provenant de la plante à la longueur d'onde λ_2 (voir *Figure II.1.b* en vert) . Si on considère que la fluorescence *f* ne varie pas entre $\lambda_1$et λ_2, on a :

$$\begin{cases} L_1 = \rho \times L_1^r + f \\ L_2 = \rho \times L_2^r + f \end{cases} \qquad (II.3)$$

De fait, les premiers calculs de fluorescence associée au FLP, introduits par Plascyk, 1975 ont été faits en considérant que réflectance et fluorescence sont constantes sur l'intervalle de longueur d'onde choisi. Grâces à ces deux approximations le système *(II.3)* se résout facilement et permet de retrouver à la fois ρ et *f*. On a pour la réflectance :

$$\rho = \frac{L_1 - L_2}{L_1^r - L_2^r} \qquad (II.4)$$

Et pour la fluorescence :

$$f = \frac{L_2 L_1^r - L_1 L_2^r}{L_1^r - L_2^r} \qquad (II.5)$$

On peut également exprimer la fluorescence et la réflectance en fonction de la profondeur de la bande d'absorption dans le flux incident $P_r = \frac{\mathrm{L_1^r}}{\mathrm{L_2^r}}$ et de la profondeur de la bande dans le flux venant de la végétation $P_c = \frac{\mathrm{L_1}}{\mathrm{L_2}}$. On obtient alors :

$$\rho = \frac{L_2(P_r - 1)}{L_1^r - L_2^r} \qquad (II.6)$$

Et

$$f = \frac{L_1(P_\mathrm{r} - P_c)}{P_c(P_r - 1)} \qquad (II.7)$$

On le voit ici, en supposant que fluorescence et réflectance sont constantes sur la gamme de longueurs d'onde de mesure il est extrêmement facile de découpler la fluorescence du flux réfléchi en utilisant le principe du FLP.

2.1.2 Bandes d'absorption

Comme nous l'avons dit, il existe deux grandes familles de bande d'absorption : les raies qui sont créées par les constituants de l'atmosphère solaire et les bandes d'absorption atmosphériques qui sont créées lors de la traversée de l'atmosphère terrestre. De par leur origine différente, la forme de ces bandes ne dépend pas des mêmes paramètres. Ainsi, les constituants responsables de la formation des raies dans l'atmosphère solaire étant absents de l'atmosphère terrestre, elles sont quasiment identiques en tous points de l'atmosphère terrestre et ne dépendent au premier ordre que de l'activité solaire. Quasiment identiques seulement, puisqu'en réalité on observe un effet de comblement de ces raies lors de la traversée de l'atmosphère (Grainger et Ring, 1962). Cet effet appelé *Ring Effect* est principalement attribué à la diffusion Raman rotationnelle (DDR) par les molécules de N_2, O_2 et CO_2 (Brinkman, 1968). Sioris et Evans, 2000, Sioris et al., 2003 ont étudié l'effet du comblement sur différentes bandes d'absorption et dans le contexte de la mesure passive de la fluorescence. Ce comblement, de l'ordre de 3%, bien que non négligeable est cependant sans commune mesure avec les effets observables sur les bandes d'absorption atmosphériques. En effet, les bandes d'absorption atmosphériques se formant au cours de la traversée de l'atmosphère, leur forme dépend fortement du point d'observation, de la visée et de la position du soleil.

Bien sûr toutes ces bandes ne sont pas toutes équivalentes pour l'application du FLP. La détection d'une émission propre d'un objet grâce au principe FLP, que cela soit la lune ou la végétation, sera d'autant plus aisée que la bande d'absorption utilisée sera profonde et large, maximisant ainsi la contribution de l'émission propre. La *Table II.1* donne les principales caractéristiques de bandes susceptibles d'être utilisées pour la mesure de la fluorescence des végétaux.

Nom de la bande	Longueur d'onde (nm)	FWHM (nm)	Intensité par rapport au continuum (%)	Intensité fluorescence ($mW.m^{-2}.nm^{-1}$)
H Ca II	396.8	1.44	4.1	0.5
G Ca I	422.7	0.15	2.4	1
Hγ HI	434.0	0.35	17	1.23
Hβ HI	486.1	0.132	14	1.1
B1 MgI	518.4	0.16	7	0.7
Hα HI	656.3	0.144	16	0.2
O_2-B	687	0.7	30 à 60 *	2
FeI	685.5	0.012	44	2
FeI	738.9	0.021	41	2.2
O_2-A	760.5	1	5 à 25 *	1

** O_2-A et O_2-B étant des bandes d'absorption atmosphériques, leur intensité dépend de la masse d'air traversée par les rayons lumineux. Pour un point d'observation donné, cette quantité de masse d'air varie selon la position du soleil.*

Table II.1 *Principales caractéristiques de bandes d'absorption au niveau du sol (Moya et al., 2001). La colonne FWHM (Full Width Half Maximum) donne la largeur à mi hauteur.*

Le choix va donc porter sur les bandes les plus profondes, les plus larges mais également les mieux placées au regard du spectre d'émission de fluorescence. La *Figure II.2*, présente un spectre solaire obtenu avec MODTRAN4 et un spectre d'émission de fluorescence caractéristique.

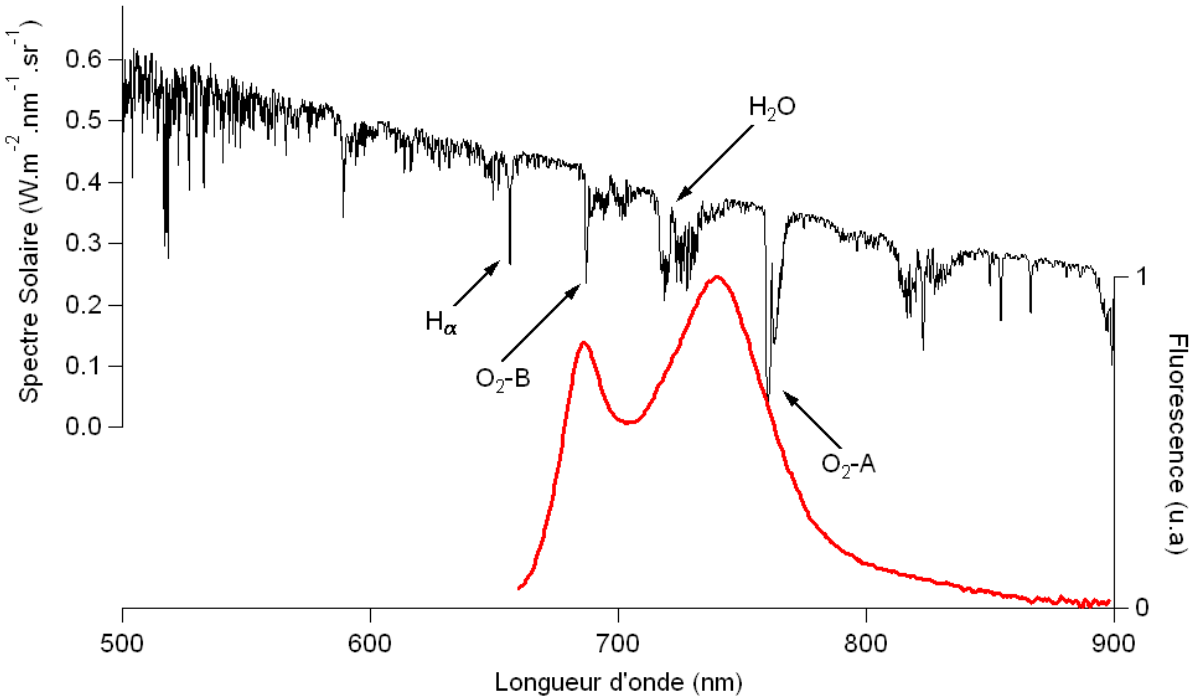


Figure II.2 *Spectre solaire (en noir) et émission de fluorescence (en rouge).*

On voit clairement sur cette figure que plusieurs bandes sont particulièrement bien placées : la bande H_α (656.3 nm) au début du spectre d'émission, la bande de l'eau entre les deux pics d'émission et les bandes A et B de l'oxygène. La bande H_α a été la première bande à être utilisée pour la mesure de la fluorescence de la végétation (McFarlane et al., 1980). La bande de l'eau, elle, n'a jamais été utilisée. Ceci est dû d'une part à sa nature qui induit une forte variabilité difficilement prévisible due à la répartition de la vapeur d'eau dans l'atmosphère et d'autre part, à la concurrence des bandes de l'oxygène, mieux placées par rapport au spectre d'émission de fluorescence. En effet, la bande O_2-B, à 687 nm, correspond au premier pic d'émission de la fluorescence chlorophyllienne. La bande O_2-A, à 760 nm quant à elle, est située légèrement à droite du second pic d'émission à 735 nm. De plus, comme l'indique la *Table II.1*, ces bandes sont particulièrement larges : 0.7 nm pour la bande B et 1 nm pour la bande A. Elles sont également assez marquées, ainsi pour la bande A on observe jusqu'à 95% d'atténuation du rayonnement incident. La contribution de la fluorescence dans ces bandes est donc particulièrement importante. Elles permettent également de mesurer la fluorescence à deux longueurs d'onde différentes, offrant ainsi la possibilité d'estimer, par exemple, le contenu en chlorophylle (Lichtenthaler et Rinderle, 1988).

2.2 Mesure passive de la fluorescence

2.2.1 Capteurs

Le premier instrument conçu pour la mesure passive de la fluorescence de la végétation a été développé en 1976 par la société Perkin-Elmer : le Fraunhofer Line Discriminator (FLD) (Watson et al., 1974, Plascyk, 1975, Plascyk et Gabriel, 1975) (voir *Figure II.3*). Il est constitué d'un interféromètre de type Fabry-Pérot dont la bande spectrale de transmission est de 0.07 nm. L'instrument possède deux voies d'observation : la première, dirigée vers le ciel mesure la profondeur de référence et la seconde dirigée vers le sol pour la mesure des signaux en provenance de la

végétation. Les premières mesures ont été faites dans la raie de Fraunhofer à 486 nm. Plascyk, 1975 étudia également les caractéristiques instrumentales nécessaires pour une mesure satellitale dans la bande H_α. Le FLD fut utilisé plus tard dans la bande H_α, pour caractériser l'effet d'un stress hydrique sur des cultures d'agrumes (McFarlane et al., 1980). Ils observèrent, depuis une plate forme de 12 m au dessus du sol, une augmentation du signal de fluorescence corrélée avec la résistance stomatique sur des champs de citronnier soumis à un stress hydrique.

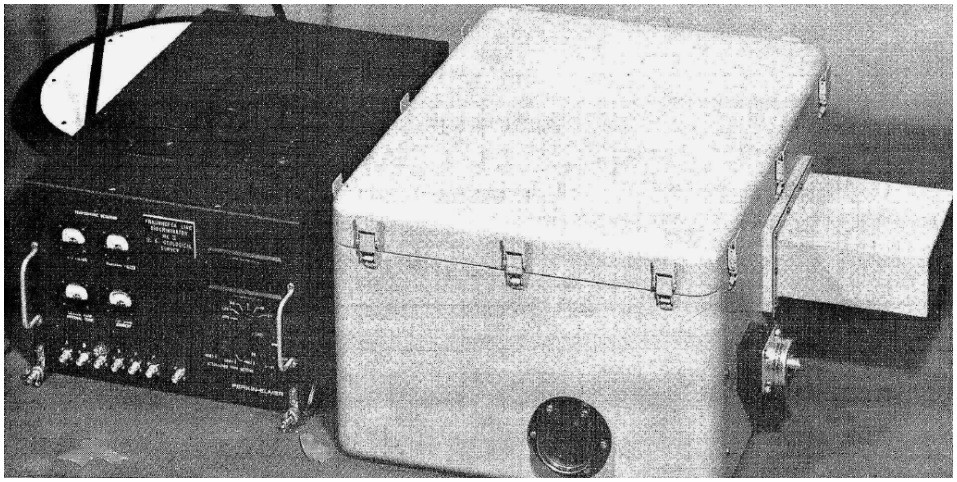


Figure II.3 *Le Fraunhofer Line Discriminator Mark II (FLD II) (Plascyk et al, 1975)*

En 1994, à l'aide d'un spectromètre, Buschmann et al., 1994, étudient la cinétique des inductions de fluorescence. Il rend compte de la contribution de la fluorescence à la réflectance apparente : bien que faible au regard du flux réfléchi, la fluorescence apporte une contribution sensible à la réflectance apparente de la végétation.

En 1996, avec les nouvelles avancées en électronique, Carter et al., 1996 présentent un nouvel instrument pour la mesure dans la bande O_2-B (687 nm). Peu d'informations sont disponibles, on sait seulement que l'instrument utilise deux canaux centrés au centre de la bande d'absorption. Le premier, destiné à la mesure du fond de la bande fait 1 nm de large et le second 5 nm. Les mesures qu'ils présentent consistent à observer l'effet de l'administration d'un herbicide (DCMU) sur des feuilles de vigne et de palmier. Ils observèrent une augmentation de la fluorescence en présence de l'herbicide tandis que la réflectance n'évoluait pas, indiquant un contenu en chlorophylle stable. L'augmentation de fluorescence est interprétée comme une variation correspondant à la baisse de capacité photosynthétique causée par l'herbicide.

En 1999, Moya et al., 1999 (Moya et al., 2004), présentent un instrument basé sur des filtres interférentiels et sur des photodiodes, conçu pour la mesure dans la bande O_2-A (760 nm) (voir *Figure II.4*). Pour tester les capacités de l'instrument passif, des mesures actives à l'aide du FIPAM furent réalisées en même temps, sur une même feuille. Les résultats montrent une très bonne corrélation entre les deux signaux mesurés. La possibilité de mesurer dans la bande B avec le même instrument à également été testée avec succès. Cet instrument a également été utilisé au niveau du couvert, pour mesurer l'effet du traitement au DCMU d'un plant de maïs (Evain et al., 2002)

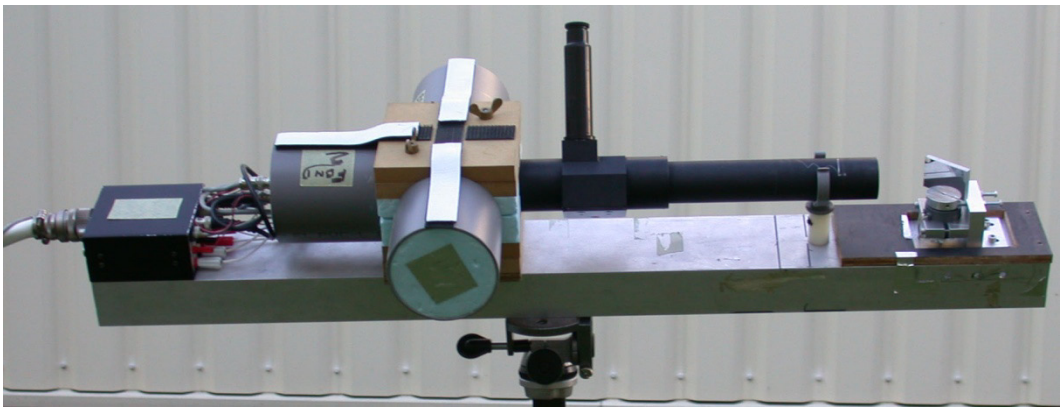


Figure II.4 *Le bidétecteur (Moya et al., 2004)*

En 2000, Zarco-Tejada et al., 2000, utilisent un spectromètre d'une résolution de 0.5nm pour découpler la réflectance et la fluorescence sur une feuille de laurier. Un filtre passe haut à 695 nm permet d'éclairer la feuille sans exciter la fluorescence, ils obtiennent ainsi un spectre de réflectance sans fluorescence. De cette manière, ils évaluent la contribution de la fluorescence à la réflectance et à la transmittance autour de 750 nm. Les auteurs observent également un double pic dans la région 690 - 710 nm de la dérivée de la réflectance apparente. Ces pics sont interprétés comme la manifestation de la contribution de la fluorescence et il est proposé d'utiliser ce paramètre pour la détection de stress hydrique (Zarco-Tejada et al., 2003).

Les mesures simultanées de la fluorescence dans les deux bandes d'absorption de l'oxygène ont été introduites en 2001, (Evain et al., 2001). Les auteurs présentent un instrument nommé Passive Multi-wavelength Fluorescence Detector (PMFD) (voir *Figure II.5*), basé sur des filtres interférentiels, capable de mesurer simultanément la fluorescence dans les bandes O_2-A et O_2-B ainsi que le PRI. Il fut utilisé avec succès pour observer la reprise de l'activité photosynthétique de la forêt boréale durant le printemps 2002 au cours d'une campagne organisé par l'ESA (SIFLEX). Il fut observé une augmentation de la fluorescence dans la bande O_2-A corrélée avec l'augmentation du contenu en chlorophylle. D'autre part le PRI et l'assimilation de CO_2 montrèrent une grande corrélation. Cette corrélation est interprétée comme la relaxation d'un QNP de longue durée induit par l'acclimatation au froid auquel le PRI est sensible (Louis et al., 2005).

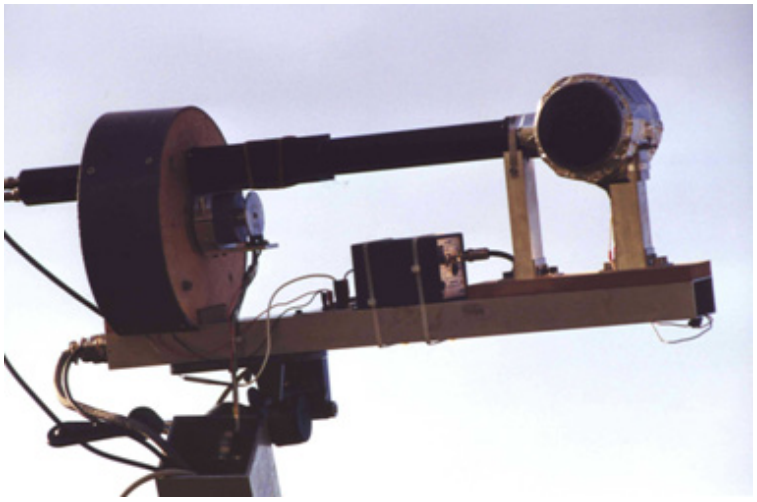


Figure II.5 *Photo du PMFD (Passive Multi-wavelength Fluorescence Detector)*

Le premier capteur avionné de mesure passive de fluorescence dans les bandes de l'oxygène, AirFLEX, fut conçu en 2004 (Moya et al., 2006). AirFLEX est un capteur basé sur l'utilisation de filtres interférentiels et de photodiodes. Il est capable de mesurer la fluorescence dans les deux bandes d'absorption de l'oxygène. Il a participé aux campagnes de mesure SEN2FLEX en 2005 (Moya et al., 2006) et CEFLES2 en 2007 (Rascher et al., 2009) organisées par l'ESA. Une description détaillée de l'instrument pourra être trouvée au CHAPITRE IV.

En 2005, Perez-Priego et al., 2005, présentent des mesures destinées à mesurer le comblement de la bande O_2-A par la fluorescence de la végétation au moyen d'un spectromètre haute résolution (0.06 nm FWHM). Les mesures, faites sur la couronne d'oliviers, mettent en évidence que le comblement de la bande est sensible à la variation diurne de la fluorescence mesurée à l'aide d'un instrument indépendant. Ils mettent ainsi en évidence la relation entre fluorescence et comblement de la bande O_2-A.

En 2006, Meroni et Colombo, 2006, présentent des mesures simultanées de fluorescence dans les deux bandes de l'oxygène à l'aide de spectromètres haute résolution (0.06 nm FWHM). Les mesures, au niveau de la feuille, font état d'une forte augmentation de la fluorescence lors de l'inhibition du photosystème II par un herbicide (DCMU). Ce système a également été utilisé pour évaluer l'utilité de la mesure passive de fluorescence pour la mesure de stress induit par l'ozone (Meroni et al., 2008a). Les auteurs rapportent que le stress est visible sur les signaux de fluorescence ainsi que sur le PRI avant que l'apparition des symptômes ne soit visible.

2.2.2 Type de détecteur

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, deux types de capteurs sont essentiellement utilisés pour la mesure de fluorescence : d'une part les capteurs à base de filtres et d'autre part les capteurs dispersifs (spectromètres). Historiquement l'utilisation des capteurs dispersifs pour la mesure passive de la fluorescence s'est faite plus tard. En fait il a fallu attendre l'apparition des premiers spectromètres commerciaux miniaturisés ayant une résolution suffisante pour que l'étude de ce type de capteurs pour la mesure de la fluorescence débute. Ces spectromètres sont facilement transportables sur le terrain et leur taille en fait des capteurs faciles à intégrer dans un ensemble plus conséquent.

Les capteurs dispersifs ont plusieurs avantages sur les systèmes à filtre : d'une manière générale un spectromètre donne plus d'informations puisqu'il résout la bande d'absorption, il est donc possible d'imaginer des méthodes pour retrouver la fluorescence qui utilisent toute les caractéristiques de la bande. D'autre part si leur résolution est suffisante, on peut utiliser ces bandes d'absorption pour auto-calibrer en longueur d'onde le spectromètre, ce qui n'est pas négligeable dans le cas d'un système embarqué, voire d'un satellite.

Les systèmes à filtres ont de leur coté l'avantage de ne pas avoir de limitation pour la collection de la lumière : contrairement aux systèmes dispersifs ils n'ont pas de fente d'entrée. La capacité à collecter la lumière est le premier facteur limitant la détectabilité pour un capteur. On peut évaluer cette capacité en calculant l'étendue d'un système optique.

L'étendue est définie comme le produit de l'angle solide par la surface de la pupille d'entrée (voir *Figure II.6*):

$$E = S \times d\Omega \qquad \textit{(II.8)}$$

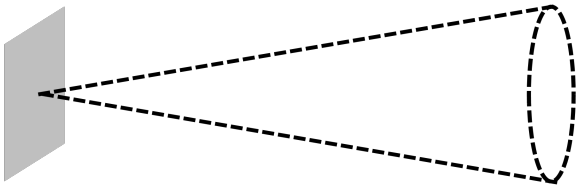


Figure II.6 *Représentation de la notion d'étendue : produit de l'angle solide et de la surface de la pupille d'entrée d'un système optique*

A titre d'exemple la *Table II.2* donne l'étendue calculée pour deux systèmes utilisés couramment pour la mesure de la fluorescence : le capteur AirFLEX et un spectromètre Ocean Optics HR2000+ avec une fente d'entrée de 0.05 mm. On voit clairement que l'étendue est en faveur du système à filtre, AirFLEX ayant une étendue 100 fois plus importante que celle du spectromètre. Bien sur cette comparaison va dépendre du spectromètre utilisé, on peut imaginer l'utilisation d'un spectromètre ayant une plus grande fente d'entrée mais elle illustre le fait que, par nature, la capacité à collecter la lumière est bien plus grande pour un système à filtre que pour un système dispersif.

La mesure passive de la fluorescence étant une mesure très sensible, le rapport signal sur bruit instrumental doit être le meilleur possible pour espérer pouvoir mesurer le petit comblement de raie induit par la fluorescence. C'est pourquoi il est essentiel de maximiser la collection de la lumière. On ne peut ainsi pas attendre la même précision d'un capteur basé sur un spectromètre comme le HR2000+ donné en exemple et le capteur AirFLEX. Toute la question est alors de savoir quelle précision il est nécessaire d'atteindre pour l'application envisagée.

	Taille pupille d'entrée (mm)	Surface pupille d'entrée (mm²)	Demi-angle d'entrée (rad)	Angle solide (sr)	Etendue (mm².sr)
AirFLEX	Ø=19	284	0.0175	9.62×10^{-4}	0.27
Spectromètre Ocean Optics HR2000+ (FWHM 0.5 nm)	1 × 0.05	0.05	0.124	0.048	0.0024

Table II.2 *Comparaison de l'étendue d'AirFLEX et d'un spectromètre Ocean Optics HR200+ de résolution 0.5nm ayant une fente d'entrée de 0.05 mm*

La mesure passive de la fluorescence étant une mesure extrêmement sensible, il nous a paru préférable d'étudier dans un premier temps les capteurs basés sur des filtres si l'on veut pouvoir envisager de la mesurer depuis une plateforme satellitale. Dans la suite de ce mémoire nous allons donc raisonner en partant du principe que l'on mesure avec un système à filtre c'est-à-dire avec un nombre fini de canaux largement inferieur à ce que l'on peut s'attendre à avoir avec un système dispersif.

2.2.3 Mesure dans les bandes de l'oxygène

Le principe de la mesure passive de la fluorescence dans les bandes d'absorption de l'oxygène repose sur la quantification de la modification de la profondeur de ces bandes. Pour quantifier cette modification, la mesure de la profondeur de référence, c'est-à-dire sans contribution de fluorescence, est essentielle puisqu'elle donne le niveau zéro de fluorescence. Dans le cadre de la mesure dans les bandes de l'oxygène il convient d'avoir en tête les principales causes de variation de leur profondeur.

Les bandes d'absorption de l'oxygène se forment lorsque le flux lumineux en provenance du soleil traverse l'atmosphère. De par le fait, la quantité de flux absorbé dépend de la quantité d'atmosphère traversée ; de la masse d'air entre le soleil et le point que l'on observe. En un point donné, lorsque le soleil est au zénith (midi solaire), la quantité de masse d'air traversée est minimale, la profondeur sera donc minimale (voir *Figure II.7.b*). Le matin et le soir, la quantité de masse d'air traversée est plus importante et la profondeur de la bande est plus grande (voir *Figure II.7.a*).

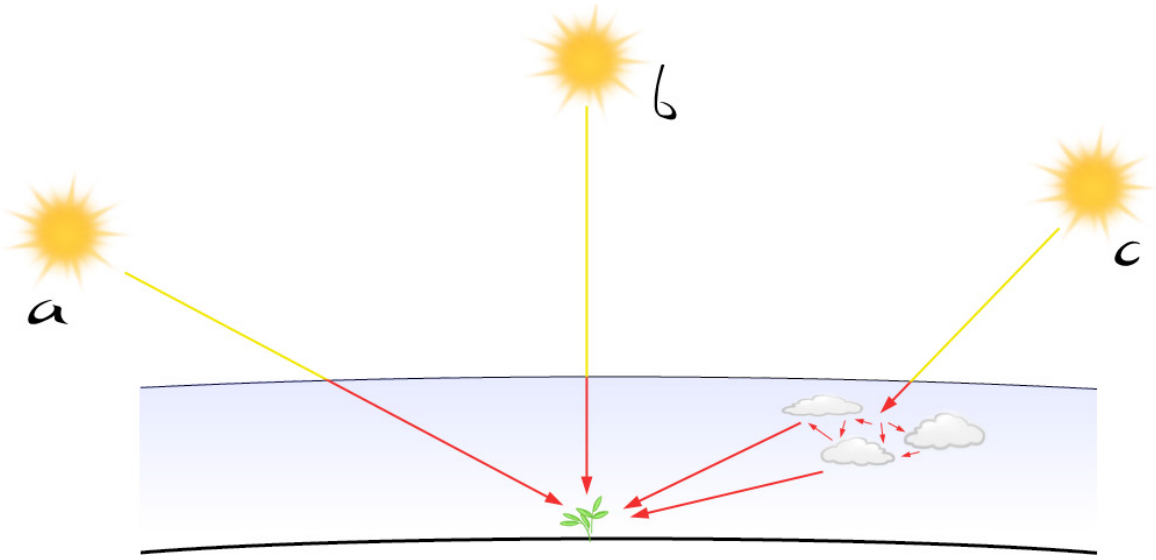


Figure II.7 *Illustration de différents types de trajets optiques* ***a,b*** *: deux positions du soleil différentes impliquent des trajets optiques différents.* ***c****. La diffusion par les nuages, les aérosols, etc, augmente le trajet optique.*

La position du soleil variant tout au long de la journée il en résulte un cycle diurne des profondeurs. La *Figure II.8* présente un tel cycle pour les deux bandes de l'oxygène un jour de beau temps.

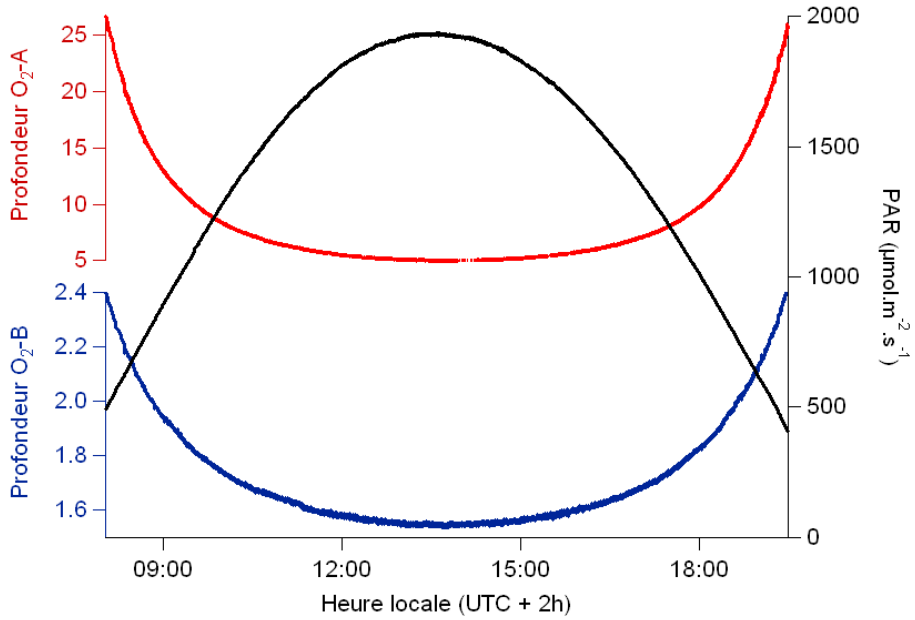


Figure II.8 *Profondeur des deux bandes de l'oxygène mesurées avec l'instrument TriFLEX sur une référence blanche non fluorescente (PVC) le 3 aout 2008 à Avignon. Heure locale, le midi solaire correspond à 14h. La courbe bleue correspond à la profondeur dans la bande O_2-B et la courbe rouge à la profondeur dans la bande O_2-A.*

Par ailleurs, le rayonnement solaire global est la somme de deux contributions : le rayonnement direct et le rayonnement diffus. Ce dernier résulte de la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par les constituants de l'atmosphère (molécules, aérosols, nuages). Le trajet optique moyen du rayonnement diffus est par nature plus grand que celui du rayonnement direct. Il sera donc plus absorbé et la profondeur de la bande d'oxygène associée au rayonnement diffus est plus grande. La profondeur du rayonnement global étant la résultante de la profondeur associée au rayonnement direct et au rayonnement diffus, tout changement de la quantité d'un des rayonnements modifie la profondeur observée.

La proportion des deux rayonnements varie en fonction de la position d'observation, des conditions atmosphériques et de l'heure. Le matin et le soir, la proportion de rayonnement diffus est plus importante, accentuant ainsi l'effet de cycle diurne dû à la position du soleil. De même en présence de nuages, la proportion de rayonnement diffus augmente (voir *Figure II.7.c*). La *Figure II.9* illustre cette variation, il s'agit de mesures faites par le capteur TriFLEX sur une cible non fluorescente un jour nuageux. On voit clairement les profondeurs augmenter lorsque le rayonnement global diminue. Cet effet se superpose à la décroissance globale de la profondeur due au cycle diurne (on est avant le midi solaire).

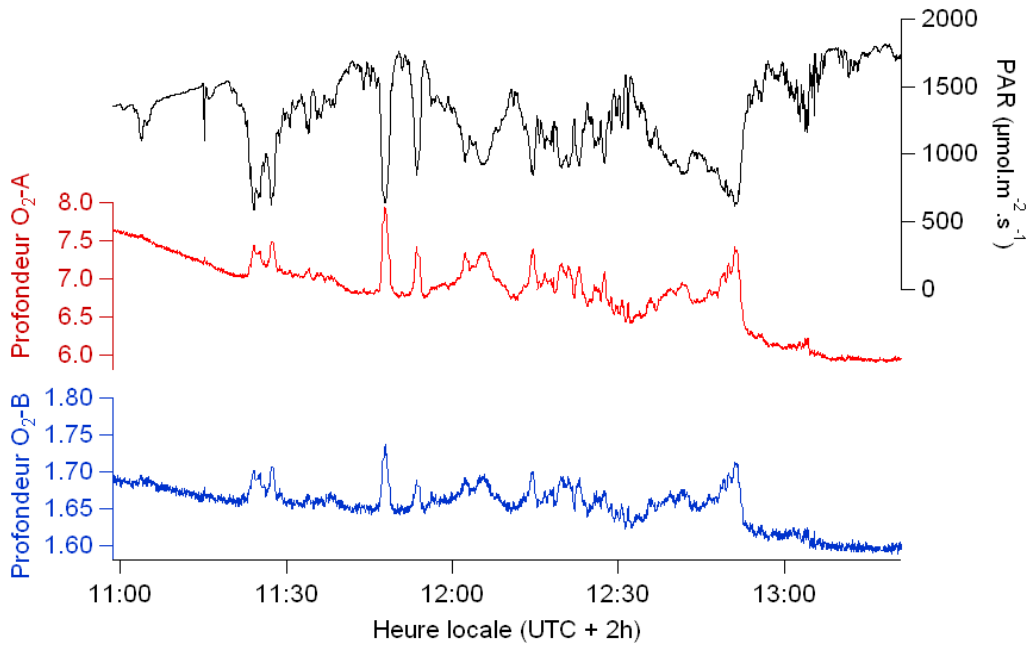


Figure II.9 *Profondeurs des deux bandes de l'oxygène mesurées avec l'instrument TriFLEX sur une référence blanche non fluorescente (PVC) un jour nuageux, le 5 septembre 2008 à Avignon. Heure locale. On voit l'effet des nuages sur le PAR et les profondeurs : le PAR diminue et les profondeurs augmentent à cause de la diffusion par les nuages qui augmente le trajet optique moyen. La courbe bleue correspond à la profondeur dans la bande O_2-B et la courbe rouge à la profondeur dans la bande O_2-A.*

Il faut également noter que l'environnement de la mesure peut contenir des éléments diffusant susceptibles de modifier la mesure : bâtiments, arbres, voitures, etc.

Pour toutes ces raisons, la mesure passive de la fluorescence dans les bandes de l'oxygène exige une grande attention quant à la mesure de la profondeur de référence. Pour pouvoir quantifier le comblement de la bande, il est indispensable que la profondeur sans fluorescence représente réellement la profondeur du rayonnement éclairant la plante. On utilise généralement une surface de référence blanche, plane, non fluorescente, placée au plus proche de la végétation observée de manière à être dans le même climat lumineux. De plus, pour éviter des décorrélations entre la mesure sur la référence et la mesure sur la cible, il faut que les deux mesures soient prises dans un intervalle de temps le plus court possible.

2.3 Application du FLP

Au paragraphe 2.1.1, nous avons présenté la méthode dite standard utilisée jusqu'à très récemment. Cette méthode fait deux approximations : elle considère la fluorescence et la réflectance constantes tout le long de la bande d'absorption. Bien sûr, plus l'écart de longueur d'onde entre les deux canaux de mesures sera faible, plus cette approximation sera réalisée. La réflectance et la fluorescence n'étant pas constantes le long des bandes d'absorption, ces deux approximations induisent des erreurs sur la fluorescence retrouvée : par exemple, si on considère la réflectance constante sur l'intervalle et qu'elle ne l'est pas, toute variation de réflectance sera interprétée comme une contribution de fluorescence. Il en va de même pour la fluorescence.

On peut tenir compte de ces variations à l'aide de deux coefficients. Considérons que la réflectance du canal du bord vaut α celle du fond, $\rho_1 = \alpha \times \rho_2$, et que pour la fluorescence on définisse β tel que $f_1 = \beta \times f_2$. La *Figure II.10* donne une représentation schématique des coefficients α et β. Bien que les variations de réflectance et de fluorescence soient différentes dans les deux bandes de l'oxygène, les variations se font toujours dans le même sens lorsque les deux canaux sont placés dans l'ordre de la *Figure II.10*. On aura donc toujours $\alpha < 1$ et $\beta > 1$.

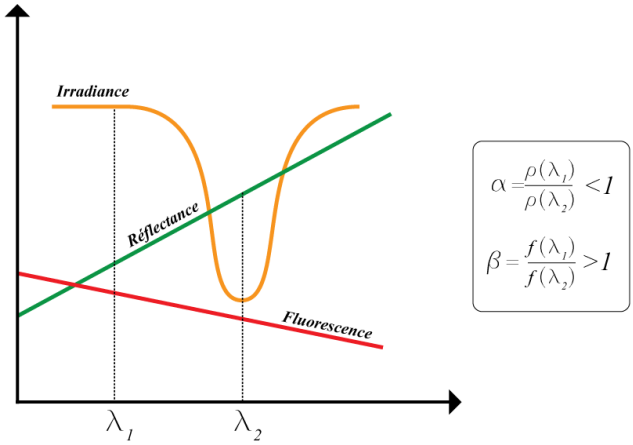


Figure II.10 *Vue schématique des différentes grandeurs impliquées dans la mesure : fluorescence, réflectance et spectre solaire.*

Avec ces nouveaux coefficients, le système *(II.3)* devient :

$$\begin{cases} L_1 = \alpha \times \rho L_1^r + \beta f \\ L_2 = \rho L_2^r + f \\ P_c = \dfrac{L_1}{L_2} \\ P_r = \dfrac{L_1^r}{L_2^r} \end{cases} \qquad (II.9)$$

L'expression *(II.7)* devient alors :

$$f = \frac{L_1(P_c - \alpha P_r)}{P_c(\beta - \alpha P_r)} \qquad (II.10)$$

Si l'on connait les coefficients α et β on est alors capable de calculer la fluorescence à partir de la mesure des profondeurs. Voyons à présent comment varie cette profondeur.

2.3.1 Variations de profondeur

Il y a deux sources de variations significatives de la profondeur : les variations de réflectance de la végétation le long de la bande d'absorption et la contribution de la fluorescence.

- ***Variation due à la réflectance***

Le lien entre variation de profondeur et variation de réflectance peut être exprimé facilement : si la profondeur de l'irradiance vaut P, la profondeur après réflexion sur la végétation vaut αP. Autrement dit, si la réflectance varie de 1 % ($\alpha = 0.99$) entre les deux canaux de mesure, elle induit une variation de profondeur de 1 %. La correspondance entre la valeur de α, la variation de profondeur qu'elle induit et la fluorescence équivalente est donnée sur la *Figure II.11*.

Regardons maintenant comment la fluorescence fait varier la profondeur.

- ***Variation due à la fluorescence***

Si on suppose que réflectance et fluorescence sont constantes on peut exprimer la fluorescence en fonction de la différence des profondeurs $\Delta P = P_r - P_c$. L'équation *(II.10)* devient :

$$f = -\rho L_1^r \frac{\Delta P}{(1 + \Delta P - P)} \qquad (II.11)$$

Où P est la profondeur de référence, ΔP la différence entre cette profondeur et la profondeur mesurée sur la végétation, L_1^r la radiance mesurée au bord de la bande d'absorption sur la référence et ρ la réflectance de la végétation au fond de la bande d'absorption. On peut alors très facilement lier fluorescence et variation de profondeur. Pour évaluer l'expression *(II.11)* nous avons utilisé des données issues de MODTRAN pour le spectre solaire, ces données seront présentées dans la section 2.3.4. Les valeurs des différents paramètres utilisés sont données dans la *Table II.3*.

Paramètre	Bande - A	Bande - B
ρ	0.5	0.04
L_1^r (W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1})	0.35	0.43
L_2^r (W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1})	0.06	0.26
Profondeur	5.83	1.65

Table II.3 *Paramètres utilisés pour les calculs d'erreur. Les valeurs de flux sont issues de simulation MODTRAN4 faites au midi solaire. Les flux sont retrouvés L_1^r, L_2^r en intégrant sur 0.5 nm à 687 nm et 1 nm à 760 nm. Longueurs d'onde des canaux : 685 nm, 687.15 nm, 758.15 nm, 760.45 nm.*

La relation entre variation de profondeur et fluorescence est tracée sur la *Figure II.11*. On remarque que pour une même valeur de fluorescence, la variation de profondeur est plus importante dans la bande O_2-B que dans la bande O_2-A. Cela peut paraitre surprenant puisque la bande O_2-A est bien plus profonde que la bande O_2-B. En fait, cet effet s'explique par la différence de réflectance de la végétation entre les deux bandes de l'oxygène : si on prend les valeurs de la *Table II.3*, le flux réfléchi au fond de la bande O_2-B est de $0.26 \times 0.04 \approx 0.01$ W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1} alors qu'il est de $0.06 \times 0.5 = 0.03$ W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1} dans la bande O_2-A. Ainsi, la contribution de la fluorescence par rapport au flux

réfléchi sera plus importante dans la bande O_2-B entrainant une variation de profondeur plus importante.

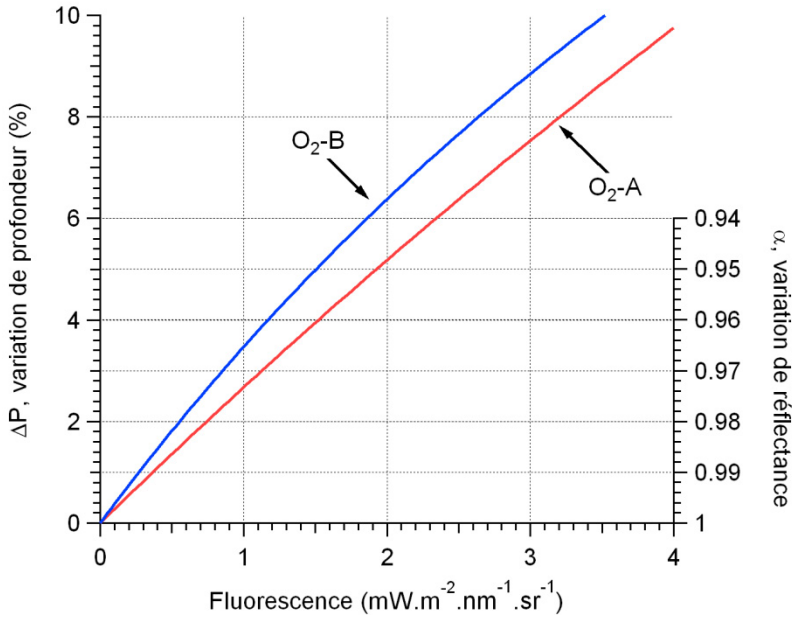


Figure II.11 *Relation entre fluorescence et variation de profondeur et relation entre variation de réflectance et variation de profondeur. Les calculs ont été faits au midi solaire.*

Cette figure permet également de mettre en regard la variation de la profondeur et la valeur de α induisant cette variation. Ainsi une variation de réflectance de 2 % ($\alpha = 0.98$) équivaut à la variation de profondeur (2 %) induite par une fluorescence de 0.55 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ dans la bande O_2-B et de 0.75 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ dans la bande O_2-A.

La valeur de α va dépendre de la végétation, mais également de l'écart entre les canaux de mesure. Sur la *Figure II.11*, l'échelle des α est représentative des valeurs typiques que prendra α . Cette figure montre clairement que si on ne tient pas compte des variations de réflectance le long de la bande de l'oxygène on aura une fluorescence additionnelle qui sera du même ordre de grandeur que la fluorescence réelle. Pour les valeurs de fluorescence les plus basses, la variation de profondeur sera plus la conséquence de la variation de la réflectance que de la présence de fluorescence.

De cette étude on retiendra que :

- Le flux réfléchi par la végétation étant plus faible dans la gamme de longueurs d'ondes de la bande O_2-B, la fluorescence induit une variation plus importante de profondeur dans la bande O_2-B que dans la bande O_2-A.

- La végétation (réflectance et fluorescence) induira une variation de profondeur maximale de l'ordre de 10-15 % dans les deux bandes de l'oxygène.

- L'approximation sur la réflectance est une approximation forte, susceptible de générer des erreurs importantes lorsqu'elle n'est pas exactement réalisée. Il sera donc nécessaire de tenir compte des variations de réflectance pour pouvoir effectuer une mesure correcte.

2.3.2 Effet de la non-constance de la fluorescence dans la bande

On a proposé de tenir compte de la variation de la fluorescence le long de la bande d'absorption grâce au coefficient β. Regardons l'effet de ce coefficient sur l'estimation de la fluorescence. La *Figure II.12* donne l'erreur sur la fluorescence retrouvée en faisant l'approximation de la constance de la fluorescence sur la bande d'absorption en fonction de sa variation réelle représentée par le coefficient β.

On voit que, même dans le cas d'une grande variation de fluorescence le long de la bande d'absorption (β=*1.05* représente une variation de 5%), l'erreur induite sur la fluorescence retrouvée, bien que non négligeable, reste limitée, en particulier dans la bande O_2-A. Pour β=1.05 on aura une erreur de 8% dans la bande O_2-B et de 1% dans la bande O_2-A.

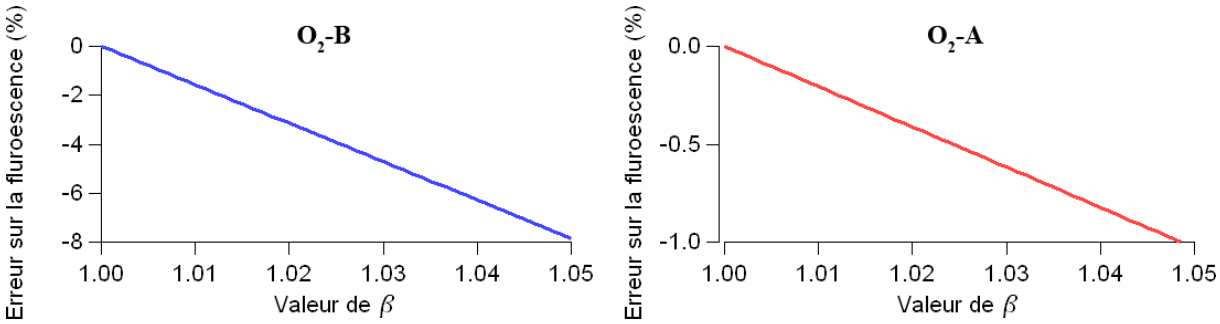


Figure II.12 *Erreur induite par l'estimation « fluorescence constante » le long des bandes d'absorption en fonction de la variation réelle représentée par le coefficient β.*

2.3.3 Erreur sur la fluorescence induite par l'incertitude sur α et β

Même si la réflectance et la fluorescence sont très variables en fonction du type de végétation, de son état et de la configuration de la mesure, les rapports de réflectance et de fluorescence varient peu. Les différentes mesures que nous avons effectuées, sur une même espèce, montrent une variation de ces paramètres inférieure au pourcent. Estimons à présent l'erreur induite par une incertitude sur les facteurs α et β.

L'erreur sur la fluorescence calculée, en fonction de l'incertitude sur ces facteurs est donnée par la somme quadratique des erreurs sur chaque paramètre :

$$\Delta f = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} dx_i\right)^2} \qquad (II.12)$$

Pour la fluorescence on a :

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \alpha}\Delta\alpha\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \beta}\Delta\beta\right)^2} \qquad (II.13)$$

Admettons que l'erreur relative sur α et β soit de x. L'erreur sur la fluorescence calculée s'exprime sous la forme suivante en substituant *(II.10)* dans *(II.12)*:

$$\Delta f = x\sqrt{\frac{{L_2^r}^2\left(f^2\beta^2 + \rho^2\alpha^2{L_1^r}^2\right)}{(\alpha L_1^r - \beta L_2^r)^2}} \qquad (II.14)$$

L'expression *(II.14)* sera évaluée en utilisant les valeurs données dans la *Table II.3* pour les flux, les spectres de réflectance et de fluorescence donnés dans la section 2.3.7 sont utilisés pour déterminer les valeurs de α et β et nous ferons les calculs pour une fluorescence de 2 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$.

La *Figure II.13* présente les résultats dans la bande O_2-A pour une incertitude de 0.5 % sur les paramètres α et β (partie gauche). Ces résultats montrent que :

- L'erreur sur la fluorescence dépend très faiblement de l'incertitude sur β alors que l'incertitude sur α induit des erreurs bien plus importantes.

- Le sens de variations des erreurs avec les valeurs de α et β indique qu'il est préférable que ces paramètres soit proches de 1 pour minimiser les effets de l'incertitude. On aura donc intérêt à garder aussi proches que possible les deux canaux de mesure.

La *Figure II.13* donne également l'erreur totale en fonction de l'incertitude sur α et β (on prend la même incertitude relative pour les deux paramètres). L'erreur augmente rapidement avec l'incertitude : 3% d'incertitude entraine une erreur supérieure à 50% sur la fluorescence. Il faut cependant noter qu'une incertitude de 3% sur la variation de réflectance constitue un cas extrême : cela représente plus le passage d'un type de végétation à un autre que la variabilité d'une même végétation.

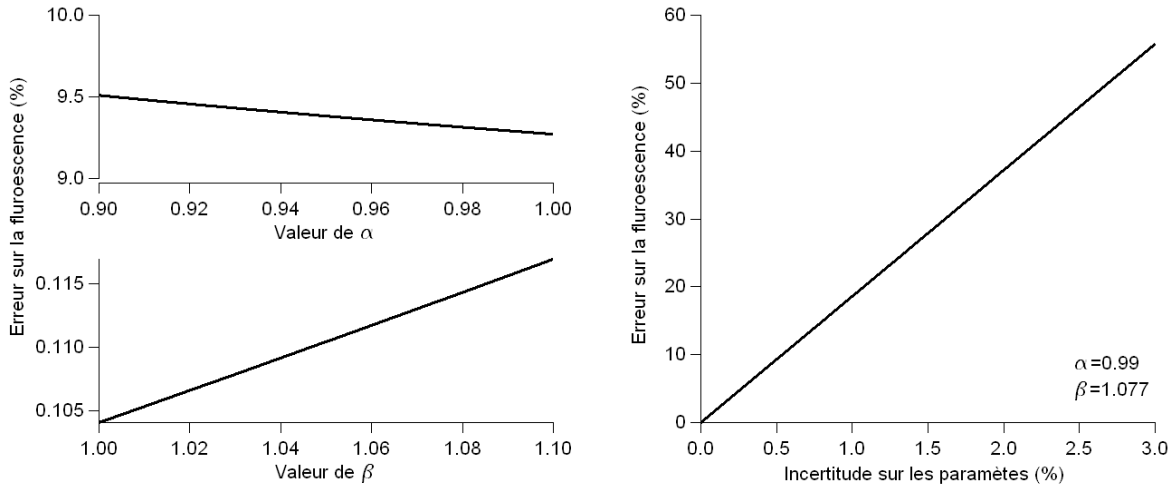


***Figure II.13 A gauche** : erreur sur la fluorescence dans la bande O_2-A pour une incertitude de 0.5% sur les coefficients α et β en fonction de la valeur de ces mêmes coefficient. **A droite** : Erreur totale en fonction de l'incertitude sur les paramètres α et β (même incertitude relative pour les deux paramètres).*

La *Figure II.14* donne les mêmes relations entre erreur sur la fluorescence et incertitude sur α et β pour la bande O_2-B. Les résultats sont en tout points semblables à ce que nous avons obtenus pour la bande O_2-A avec toutefois des erreurs légèrement inférieures.

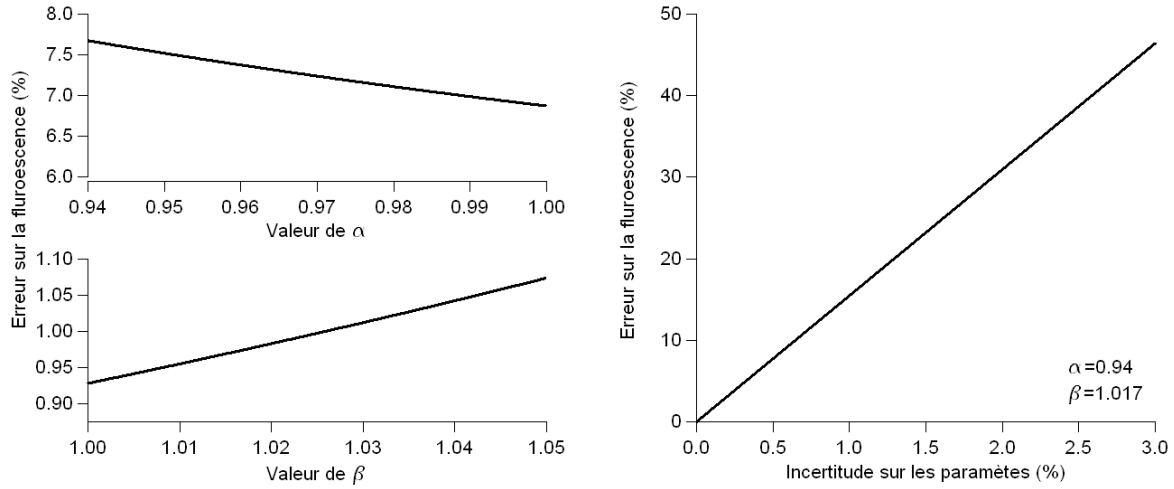


***Figure II.14 A gauche** : erreur sur la fluorescence dans la bande O_2-B pour une incertitude de 0.5% sur les coefficients α et β en fonction de la valeur de ces mêmes coefficient. **A droite** : Erreur totale en fonction de l'incertitude sur les paramètres α et β (même incertitude relative pour les deux paramètres).*

De manière générale, la fluorescence étant un facteur additif (et faible par rapport au flux total), une erreur d'appréciation de la variation de la fluorescence a des conséquences qui restent limitées sur le calcul de la fluorescence. A l'opposé, la réflectance étant un facteur multiplicatif par rapport au flux incident, son rôle est bien plus important, toute variation spectrale de réflectance entre le bord et le fond non prise en compte change l'estimation du flux réfléchi, la différence étant alors automatiquement attribuée à de la fluorescence.

2.3.4 Génération d'un set de données synthétiques

Dans la suite de ce chapitre nous allons utiliser un set de données synthétiques permettant d'étudier le calcul de la fluorescence. Ces données seront générées à partir d'un spectre de réflectance, d'un spectre d'émission de fluorescence et de spectres d'irradiance solaire. La mesure sur la végétation sera obtenue en multipliant l'irradiance par la réflectance puis en ajoutant la fluorescence. Il ne restera plus qu'à intégrer ce spectre sur les canaux de mesures choisis (la transmission des canaux sera une gaussienne).

- ***Réflectance***

La réflectance utilisée est présentée sur la *Figure II.15*. Il s'agit d'une réflectance mesurée par l'instrument TriFLEX (voir CHAPITRE V) sur un couvert de blé. C'est une réflectance représentative de ce que l'on peut mesurer sur la végétation. La contribution de la fluorescence à cette réflectance a été enlevée.

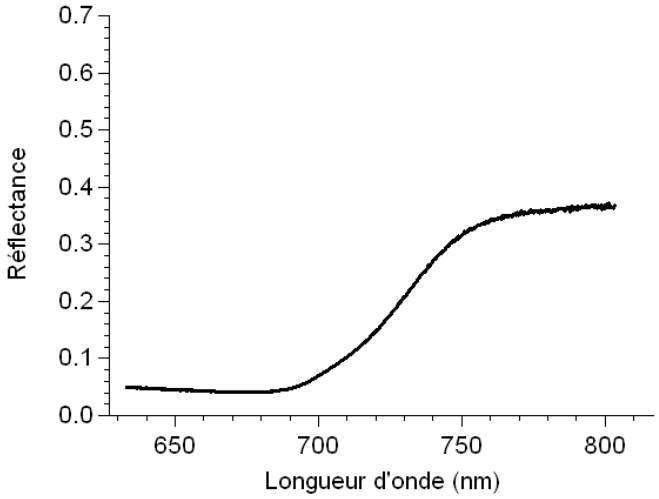


Figure II.15 *Réflectance du couvert de blé utilisé pour la modélisation. NDVI=0.79*

- ***Irradiance***

Les spectres solaires utilisés pour les calculs sont des spectres solaires fournis par MODTRAN4 dans une configuration standard (voir *Table II.4*) calculés à 9 h, 12 h et 18 h heure de Greenwich. La *Figure II.16* donne les différents spectres solaires dans les deux bandes d'absorption. Le spectre solaire à 18h (6 h après le midi solaire) présente le flux le plus faible et les profondeurs les plus fortes, particulièrement dans la bande O_2-A où le flux au fond de la bande est extrêmement atténué. Le spectre solaire à 9 h (3 h avant le midi solaire) est un cas intermédiaire entre le flux maximal (midi solaire) et le cas choisi à 18 h.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Calculation option	Correlation-K	*Solar irradiance source*	File Sun 2
Correlation-K speed	Slow	*Triangular filter width*	2 cm^{-1}
Model Atmosphere	MidLatSummer	*Aerosol model*	Rural – VIS=23 km
Type of atmospheric path	Slant path to ground	*Other aerosols features*	Default
Mode of Execution	Radiance w/ Scattering	*Ground altitude above sea*	0.001 km
Multiple scattering	MS on Flux at observer	*Observer Height*	0.002 km
Atmospheric profile	All to default	*Zenith angle*	180°
Water Vapor	Default	*FWHM of slit function*	1 cm^{-1}
CO2 Mixing ration	365 ppmv	*Slit function type*	Triangular
Scattering algorithm	Disort	*Aerosol phase function*	Mie
Disort Streams	16	*Day of year*	213
T° at first boundary	Default	*Observer Latitude*	43.91
Surface albedo	1	*Observer Longitude*	4.879

Table II.4 *Paramètres utilisés pour la configuration de MODTRAN4. Latitude et longitude correspondent à la position de l'INRA d'Avignon (Montfavet, France). Le jour 213 est un 31 juillet (année bissextile).*

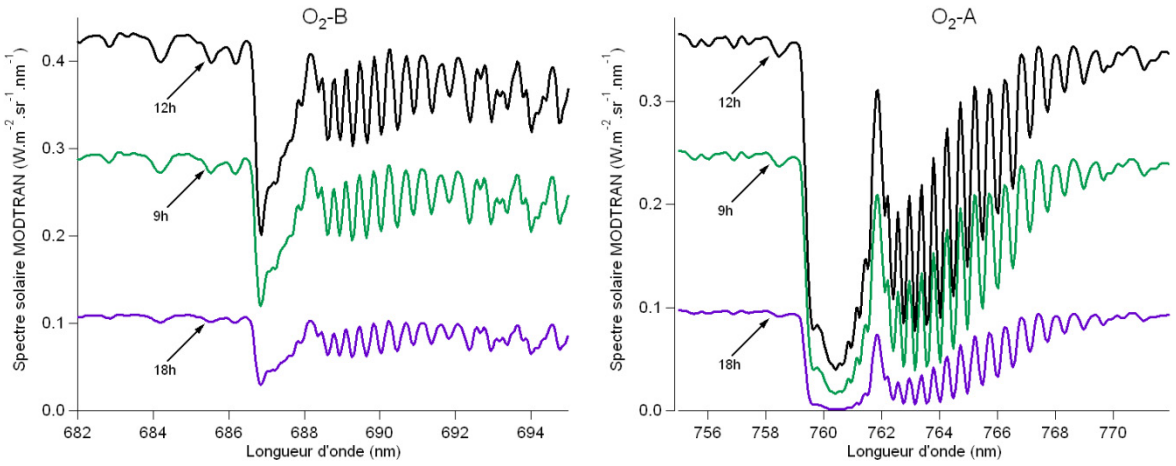


Figure II.16 *Spectres solaires utilisés pour les calculs, générés par MODTRAN4. La résolution à été dégradée pour la visualisation uniquement.*

- ***Fluorescence***

Le spectre de flurorescence utilisé est un spectre de fluorescence générique acquis avec l'instrument LSF (Leaf Spectro Fluorimeter, voir CHAPITRE V). Il a été choisi parce que représentatif de la forme générale du spectre d'émission de fluorescence.

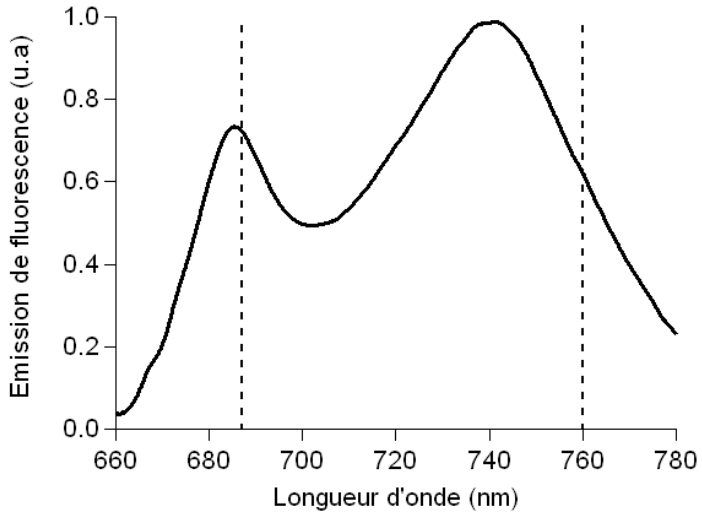


Figure II.17 *Spectre de fluorescence utilisé pour les calculs. Acquis le 30 aout 2008, sur la face adaxiale d'une feuille de sorgo fourrager (sorghum solarius) après adaptation à la lumière avec un PAR de 764 µmol.m^{-2}.s^{-1}. Le contenu en chlorophylle était de 54.7 µg.cm^{-2}. Les lignes en pointillés sont positionnées à 687 et 760 nm.*

Dans la suite ce spectre sera utilisé pour obtenir la fluorescence dans les différents canaux de mesure. Lorsqu'on indiquera qu'une valeur de fluorescence de 2 mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1} a été choisie pour le canal du fond, il faudra comprendre que ce spectre aura été normalisé de manière à avoir cette valeur pour la longueur d'onde du canal du fond.

2.3.5 Caractéristiques des canaux de mesures : fluorescence minimale détectable

Plaçons-nous dans le cas idéal où nous connaissons les facteurs α et β. Il s'agit maintenant pour nous de choisir la longueur d'onde des canaux de mesures ainsi que la largeur de ces canaux. De manière générale, l'expression du signal mesuré par un capteur au niveau du sol peut se mettre sous la forme :

$$L = \frac{1}{\int S(\lambda)d\lambda}\int S(\lambda)\left[\frac{\rho(\lambda)}{\pi}I(\lambda) + f(\lambda)\right]d\lambda \qquad (II.15)$$

Avec : λ longueur d'onde

L en $W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$

$S(\lambda)$ spectre de transmission du filtre (ou fonction de transfert pour un système dispersif)

$\rho(\lambda)$ réflectance de la cible, supposée lambertienne

$I(\lambda)$ intensité lumineuse incidente en $W.m^{-2}.nm^{-1}$

$f(\lambda)$ fluorescence de la cible en $W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$

Le facteur $\frac{1}{\int S(\lambda)d\lambda}$ permet de ramener à l'unité de mesure de bande spectrale.

Dans le cas de filtre la fonction $S(\lambda)$ est en général proche d'une gaussienne. Pour l'application du FLP, le choix de la longueur d'onde du canal au bord n'est, a priori, pas un problème : pour ce canal, l'essentiel est de minimiser la contribution de la fluorescence, il faut donc choisir une longueur d'onde sur le continuum qui ne présente pas d'accident, permettant ainsi de maximiser le flux. Pour le canal du fond, le problème est un peu plus complexe : si l'ont disposait d'un capteur parfait, il suffirait de se placer au plus fort de la bande d'absorption avec une largeur extrêmement fine, maximisant ainsi la part de fluorescence dans le flux mesuré. Cependant, pour un capteur réel, il faut tenir compte de sa capacité de détection autrement dit de son rapport signal sur bruit, SNR (Signal to Noise Ratio). En effet, pour un capteur réel, minimiser le flux revient à maximiser l'erreur de mesure. Il faut donc trouver un compromis entre la maximisation du signal de fluorescence dans le flux mesuré et l'erreur sur ce flux mesuré.

Si l'ont considère que les incertitudes sur les flux mesurés ne sont pas corrélées, l'incertitude sur la valeur de la fluorescence sera la somme quadratique des incertitudes sur les mesures de flux, soit :

$$df = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial L_1}\Delta L_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L_2}\Delta L_2\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L_1^r}\Delta L_1^r\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L_2^r}\Delta L_2^r\right)^2} \qquad (II.16)$$

Cela donne pour l'incertitude totale df :

$$dF = \sqrt{\frac{\Delta {L_1}^2 + \alpha^2\left({P_r}^2\Delta {L_2}^2 + \rho^2\left(\Delta {L_1^r}^2 + {P_r}^2\Delta {L_2^r}^2\right)\right)}{(\beta - \alpha P_r)^2}} \qquad (II.17)$$

Si l'on considère maintenant que le seul bruit de mesure est un bruit de photon, les incertitudes ΔL seront proportionnelles à $\sqrt{N}$ avec N le nombre de photon. On peut maximiser df en remarquant que $\Delta L_1 < \Delta L_1^r$ et $\Delta L_2 < \Delta L_2^r$. Et si l'on écrit en plus que $\Delta L_1^r = \sqrt{P_r} \times \Delta L_2^r$ on obtient :

$$df \leq \sqrt{\frac{P_r \Delta {L_2^r}^2 \left(1 + \alpha^2 \left(P_r + \rho^2 (1 + P_r)\right)\right)}{(\beta - \alpha P_r)^2}} \qquad (II.18)$$

Pour pouvoir mesurer la fluorescence il faut que $f \geq df$:

$$f \geq \Delta L_2^r \sqrt{\frac{P_r \left(1 + \alpha^2 \left(P_r + \rho^2 (1 + P_r)\right)\right)}{(\beta - \alpha P_r)^2}} \qquad (II.19)$$

Puisqu'on considère uniquement le bruit de photon, le rapport signal sur bruit sera proportionnel à $\sqrt{N_2^r}$, on a donc :

$$\frac{\Delta L_2^r}{L_2^r} = \frac{1}{\sqrt{N_2^r}} \qquad (II.20)$$

Et donc en combinant *(II.19)* et *(II.20)* on obtient :

$$f \geq \frac{L_2^r}{\sqrt{N_2^r}} \sqrt{\frac{P_r \left(1 + \alpha^2 \left(P_r + \rho^2 (1 + P_r)\right)\right)}{(\beta - \alpha P_r)^2}} \qquad (II.21)$$

La fluorescence minimum détectable vaut donc :

$$F_{min} = \frac{L_2^r}{\sqrt{N_2^r}} \sqrt{\frac{P_r \left(1 + \alpha^2 \left(P_r + \rho^2 (1 + P_r)\right)\right)}{(\beta - \alpha P_r)^2}} \qquad (II.22)$$

Cette expression nous donne un critère quantifiable pour placer nos canaux et choisir leur largeur. L'évaluation du nombre de photons dans l'expression F_{min} dépend des caractéristiques optiques de l'instrument : de son étendue et du temps d'intégration. En posant que K_F est la fluorescence minimale pour un instrument ayant une pupille d'entrée de 1 m², d'angle solide un stéradian et intégrant le flux sur 1 seconde. On peut exprimer la fluorescence minimale donnée dans l'équation *(II.22)* en faisant apparaitre les caractéristiques de l'instrument de mesure :

$$F_{min} = \frac{K_F}{\sqrt{E \Delta t}} \qquad (II.23)$$

Avec E l'étendue de l'instrument (voir 2.2.2) et Δt le temps d'intégration.

Dans la suite, la fluorescence minimale sera représentée par le coefficient K_F.

2.3.6 Fluorescence minimale détectable et largeur des canaux

Regardons l'évolution de K_F en fonction de la largeur des canaux. Pour cela nous utilisons les données générées à partir des données que nous avons présentées dans la section 2.3.4. Nous considérons la transmission des canaux comme des filtres gaussiens parfaits dont l'intégrale de la transmission vaut 1. La largeur des canaux bord et fond est la même. La *Figure II.18* illustre les variations de K_F avec la largeur des canaux pour le canal bord placé à 685 nm et le canal du fond à 687.05 nm.

La forte croissance de la courbe lorsque la largeur des filtres tend vers zéro indique que lorsque les filtres ne sont pas assez larges, le faible rapport signal sur bruit dégrade la détectabilité de la fluorescence. De même au delà d'une certaine largeur, le minimum détectable augmente légèrement, ce qui traduit le fait que la proportion de fluorescence dans le flux mesuré diminue. On voit clairement qu'il existe une largeur optimale qui se trouve autour de 0.6 nm. Malgré cela, augmenter la largeur des canaux au delà de la largeur optimale n'entraine pas d'augmentation significative du minimum de fluorescence détectable.

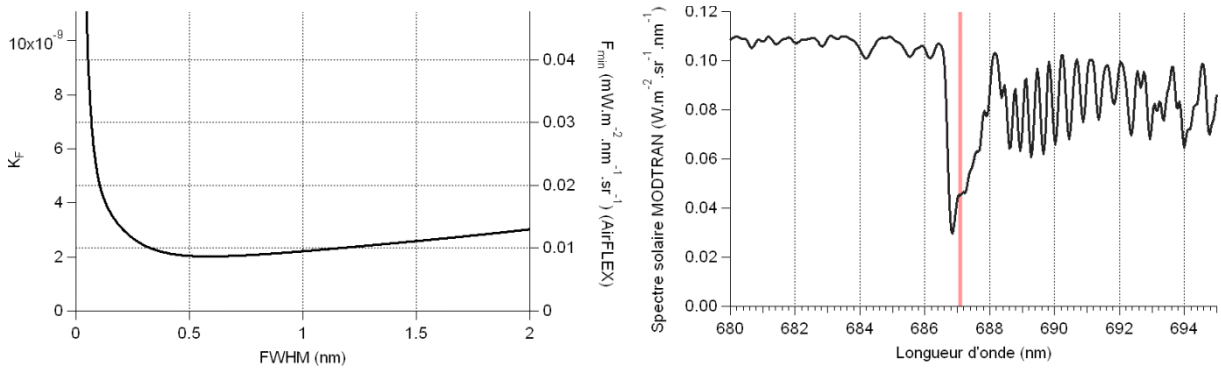


Figure II.18 *K_F et fluorescence minimum mesurable dans la bande O_2-B en fonction de la largeur des canaux pour un capteur avec les caractéristiques optiques d'AirFLEX (E=0.27 mm^2.sr, Δt=0.2 s). Le canal bord est à 685 nm et le canal fond est à 687.05 nm.* ***A droite*** *: spectre solaire, le trait vertical indique 687.05 nm.*

2.3.7 Canaux de mesures : détermination d'une configuration optimale

Pour généraliser un peu ces résultats nous allons chercher à minimiser K_F sur des sets de données représentant différentes conditions de mesures. Pour cela nous avons utilisés les différents spectres solaires présentés dans la section 2.3.4 (9h, 12h, 18h) et différent spectres de réflectance présentés dans l'Annexe A . Afin de simplifier la présentation des résultats nous ne présenterons que ceux qui ont été obtenus avec le spectre de réflectance du blé. Bien entendu ces résultats sont représentatifs de ce qui à été obtenu pour les autres types de réflectance.

Pour chaque set de données nous cherchons donc à minimiser K_F en modifiant la configuration des canaux afin de déterminer la configuration optimale (largeur des canaux et position en longueur d'onde). Il faut garder à l'esprit que la position du canal en dehors de la bande d'absorption devra être choisie la plus proche possible du canal du fond afin de minimiser les erreurs induites par l'incertitude sur les paramètres α et β comme nous l'avons vu à la section 2.3.3. Quelque soit le résultat de la minimisation de K_F, nous chercherons donc à rapprocher le plus possible le canal du bord du canal du fond.

- ***Bande d'absorption O_2-B***

Pour la recherche du minimum nous faisons varier la position du canal au bord entre 680 et 686 nm par pas de 0.05 nm. La position du canal du fond entre 686.5 et 690 nm par pas de 0.05 nm. La largeur des canaux varie entre 0 et 3 nm par pas de 0.05 nm. La *Table II.5* présente les résultats obtenus.

Heure	Paramètres des canaux (O_2-B)			
	Longueur d'onde bord (nm)	Longueur d'onde fond (nm)	FWHM (nm)	K_F ($\times 10^9$)
9h	680	687.15	0.90	1.11
12h	680	687.15	0.70	1.65
18h	680	687.15	0.75	0.47

Table II.5 *Paramètres optimaux pour la détection de la fluorescence dans la bande B de l'oxygène. La recherche de ces paramètres est faite entre 680 et 686 nm par pas de 0.05 nm pour la longueur d'onde du bord, entre 686.5 et 690 nm par pas de 0.05 nm pour la longueur d'onde du fond et entre 0 et 3 nm pour la largeur par pas de 0.05nm.*

On voit que quelle que soit l'heure, les longueurs d'onde optimales des canaux sont les mêmes. D'autre part, on voit que la largeur optimale décroit lorsque la profondeur est plus importante (le matin et le soir) : le flux au fond de la bande diminuant, la réduction de la largeur de bande devient la façon la plus « rentable » d'améliorer la détection. De fait, la fluorescence minimum détectable décroit d'un facteur 3 entre 12h et 18h.

La largeur optimale des canaux est située entre 0.7 et 0.9 nm selon l'heure de la mesure (donc en fonction de la profondeur). En observant que K_F est quasiment identique pour les largeurs comprises entre 0.6 nm et 0.9 nm on choisira plutôt une largeur dans la tranche basse de cet intervalle qui donnera le meilleur compromis entre détectabilité et plage horaire de mesure.

La valeur de 680 nm trouvée pour la longueur d'onde du canal du bord n'est pas idéale pour le calcul de la fluorescence puisque, comme nous l'avons vu à la section 2.3.3, il vaut mieux minimiser la variation de réflectance entre le bord et le fond en cherchant à placer le canal du bord plus près du fond. En pratique, la longueur d'onde la plus proche du canal du fond que l'on peut utiliser sans trop altérer la précision de mesure se situe aux alentours de 685 nm (on passe d'un K_F de $1.65.10^{-9}$ à un K_F de 2.10^{-9}).

Nous retiendrons donc comme configuration optimale: filtre bord à 685 nm, filtre fond à 687.15 nm et largeur de ~0.7 nm. La *Figure II.19* illustre cette configuration.

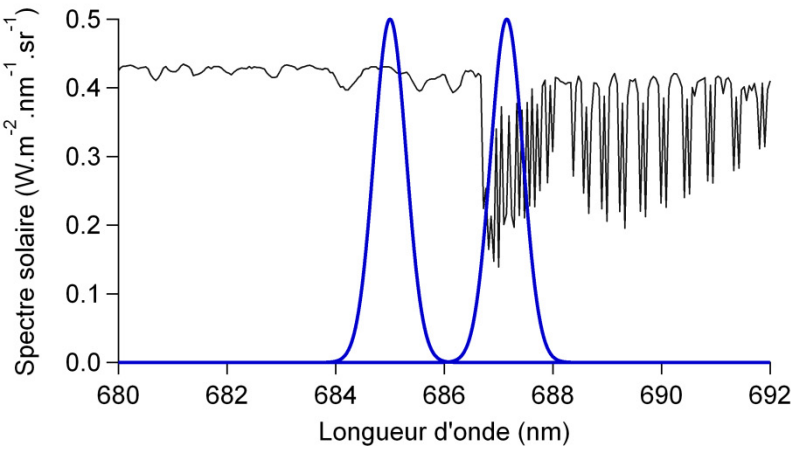


Figure II.19 *Filtre optimum obtenu pour la bande O_2-B (filtre bord à 680 nm, filtre fond à 687.15 nm et largeur de 0.7 nm).*

- ***Bande d'absorption O_2-A***

Heure	Paramètres des canaux (O_2-A)			
	Longueur d'onde bord (nm)	Longueur d'onde fond (nm)	FWHM (nm)	K_F ($\times 10^{10}$)
9h	758.05	760.45	0.9	1.67
12h	758.10	760.45	1	2.72
18h	758.00	760.45	0.70	0.47

Table II.6 *Paramètres optimaux pour la détection de la fluorescence dans la bande A de l'oxygène. La recherche de ces paramètres est faite entre 750 et 759 nm par pas de 0.05 nm pour la longueur d'onde du bord, entre 759.2 et 770 nm par pas de 0.05 nm pour la longueur d'onde du fond et entre 0 et 3nm pour la largeur par pas de 0.05 nm.*

La *Table II.6* regroupe les résultats obtenus pour la bande O_2-A. Cette fois encore les positions spectrales des canaux obtenues sont très proches quelle que soit la configuration : autour de 758 nm pour le canal bord et 760.45 pour le canal du fond. Comme dans le cas de la bande O_2-B, la fluorescence minimum détectable varie entre la mesure au midi solaire (profondeur minimale, K_F maximum) et la mesure à 18h (profondeur maximale, K_F minimum).

Les largeurs optimales obtenues sont par contre assez variables : on passe de 1 nm à 12 h à 0.7 nm à 18h. On peut interpréter ce changement en termes de part de fluorescence dans le flux au fond : la profondeur étant suffisamment forte, le fait de resserrer la largeur des canaux augmente fortement la part de fluorescence dans le flux au fond et optimise la détection.

Il se pose donc le problème du choix de la largeur de bande, l'idéal étant de 0.7 nm pour une grande profondeur et 1 nm pour les profondeurs plus faibles. La *Figure II.20* montre la variation de K_F en fonction de la largeur à 12h et à 18h. On voit que la courbe à 18h est relativement monotone sur l'intervalle 0.5-1 nm. On peut donc augmenter la largeur des canaux afin d'améliorer la détection aux

alentours du midi solaire sans dégrader significativement la détectabilité pour les profondeurs plus importantes. On aura donc plutôt tendance à choisir une largeur de canaux de 1 nm.

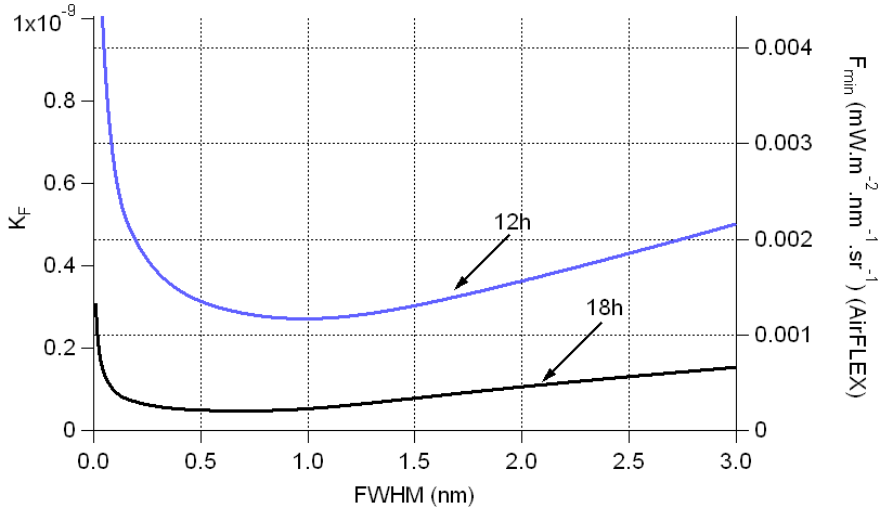


Figure II.20 *K_F et fluorescence minimum mesurable dans la bande O_2-A en fonction de la largeur des canaux pour un capteur avec les caractéristiques optiques d'AirFLEX (E=0.27 mm^2.sr, Δt=0.2 s). Le fond est à 760.45 nm et le bord à 758.1 nm. La courbe bleue correspond à une mesure à 12h et la courbe noire à une mesure à 18h.*

On peut noter que la position du canal du bord n'influence que très faiblement la fluorescence minimum détectable. Comme le montre la *Figure II.21* on peut indifféremment placer le canal du bord entre 755 nm et 758 nm. On aura donc tendance à choisir une longueur d'onde autour de 758.1 pour optimiser la mesure au midi solaire et minimiser la distance avec le canal du fond.

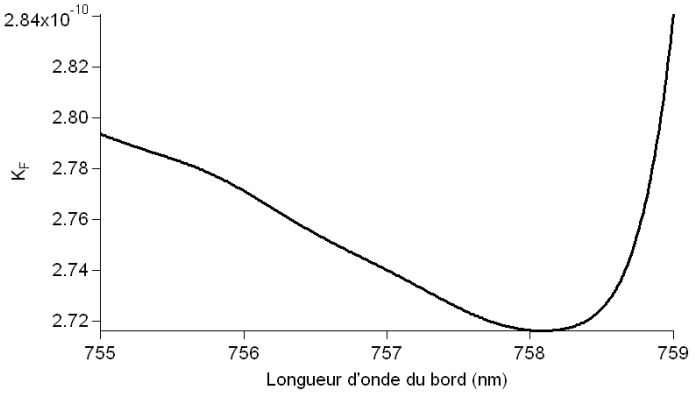


Figure II.21 *Variation de K_F en fonction de la position du canal du bord pour la mesure de la fluorescence dans la bande O_2-A. Le canal du fond est à 760.45 nm et la largeur des canaux est de 1 nm.*

La configuration offrant le meilleur compromis pour la mesure dans la bande O_2-A est donc : 760.45 nm pour le canal du fond, 758.1 nm pour le canal du bord et une largeur de 1 nm pour les deux canaux, la *Figure II.22* illustre cette configuration.

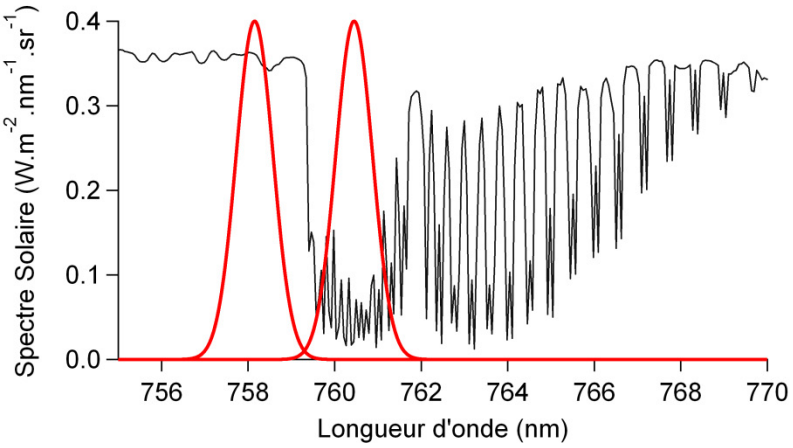


Figure II.22 *Filtres optimum obtenus pour la bande O_2-A (760.45 nm pour le canal du fond, 758.1 nm pour le canal du bord et une largeur de 1 nm pour les deux canaux).*

- ***Conclusion***

A présent, nous avons une idée plus précise de la manière de choisir les canaux de mesure. Les principaux apports de cette étude sont la détermination des valeurs de fluorescence minimum détectable en fonction des paramètres optiques du capteur et la valeur des largeurs optimales obtenues. Si la position des canaux est susceptible de changer en fonction des hypothèses que l'on voudra faire sur la réflectance et la fluorescence, la valeur des largeurs optimales obtenues découlent directement de la forme des bandes d'absorption et de leurs modifications au cours de la journée. Elle ne variera pas significativement du moment que la position du canal du fond reste la position optimale (i.e. au maximum de l'absorption).

Il faut maintenant se pencher sur le calcul de la fluorescence. L'hypothèse faite jusqu'à présent était que l'on connaissait les facteurs α et β. Cette hypothèse sous entend que l'on connaît parfaitement le spectre de réflectance et de fluorescence de la cible sur laquelle on veut justement mesurer ces paramètres ! Il nous faut donc une méthode pour s'affranchir de cette connaissance. C'est ce que nous allons essayer de mettre en place dans la partie suivante.

2.4 Calcul de la fluorescence

Les premiers calculs de fluorescence ont été faits en utilisant la méthode standard présentée au paragraphe 2.1.1. C'est-à-dire en utilisant deux canaux de mesure et en faisant l'hypothèse que la réflectance et la fluorescence étaient constantes sur l'intervalle de longueur d'onde défini par la position des deux canaux. On a vu dans les sections 2.3.1, 2.3.2 et 2.3.3 que les erreurs induites par ces hypothèses sur l'estimation de la fluorescence pouvaient être assez importantes. C'est pourquoi plusieurs méthodes permettant de mieux estimer la fluorescence ont été proposées.

Moya et al., 2006, proposent d'utiliser des facteurs de corrections α et β (correspondant aux α et β que nous avons introduits) pour tenir compte de la forme des spectres de fluorescence et de réflectance lors des premières mesures faites avec l'instrument AirFLEX. Ces facteurs sont alors déterminés en utilisant une moyenne de mesures faites au sol sur différents types de végétation. La correction ainsi obtenue permet de tenir compte au premier ordre de la forme des spectres et rend compte de la variation relative de fluorescence entre les différentes espèces survolées.

AirFLEX étant pourvu de trois canaux de mesure pour chaque bande d'absorption, il a également été proposé d'utiliser la troisième bande pour estimer la réflectance au fond de la bande. Pour cela, il

suffit de négliger la fluorescence dans les canaux du bord et de considérer que la réflectance varie linéairement. La réflectance au fond est alors obtenue par interpolation linéaire entre la réflectance du bord et la réflectance du fond.

En 2008, Alonso et al., 2008, proposent une méthode pour l'estimation de ces facteurs dans la bande O_2-A. Elle nécessite de pouvoir résoudre le spectre de réflectance apparente de la végétation autour de la bande d'absorption. En utilisant les longueurs d'onde peu affectées par la contribution de la fluorescence, on interpole la réflectance apparente dans la zone d'absorption, ce qui permet de déduire le facteur α de manière approchée (le facteur de correction entre réflectance au bord de la bande et réflectance au fond). On en déduit également par la suite le facteur de correction pour la fluorescence β qui s'exprime en fonction de α. Les auteurs font également une étude de sensibilité qui indique que le calcul de fluorescence est très sensible aux erreurs sur α et peu sensible aux erreurs sur β. Le meilleur résultat est obtenu avec une interpolation de la réflectance de type spline.

Meroni et Colombo, 2006, proposent, en disposant d'un spectromètre haute résolution, (FWHM ~0.06 nm), d'utiliser l'ensemble de l'information disponible pour chaque bande. Dans un premier temps, ils construisent un système d'équation du type $\vec{L} = \rho \times \vec{I} + f$, qui est un équivalent de la méthode standard (ρ et f constant). Le système est résolu par la méthode des moindres carrés (OLS). Cette approche donne de bons résultats dans la bande O_2-A mais moins bons dans la bande O_2-B. Ils proposent alors de réécrire l'équation en supposant cette fois que la réflectance et la fluorescence dépendent linéairement de la longueur d'onde. L'amélioration est visible dans la bande O_2-A, mais il subsiste des inconsistances dans la bande O_2-B.

Mazzoni et al., 2006, en utilisant un spectromètre ayant une résolution encore meilleure (FWHM ~0.03 nm), proposent une autre méthode de calcul équivalente à la détermination du facteur α, sans toutefois tenir compte du facteur β. La première étape consiste à déterminer une ligne de base dans la radiance et l'irradiance mesurées. Cette ligne est définie par interpolation de la radiance entre chaque maximum dans la bande d'absorption. En effet, les auteurs considèrent qu'un pic de radiance dans la bande d'absorption correspond à une absence d'absorption. Un rapport de réflectance est alors calculé pour chaque longueur d'onde et ajusté par un polynôme. La fluorescence est ensuite retrouvée en utilisant ce polynôme comme réflectance.

2.4.1 Système d'équations

Plusieurs algorithmes permettant de mesurer la fluorescence ont été proposés. Si la mesure est faite avec un système dispersif, ils utilisent généralement l'ensemble des informations pour déduire la forme de la réflectance afin d'appliquer le FLP avec une bonne estimation de la réflectance, sans la contribution de la fluorescence. Un système de mesure basé sur des filtres, lui, ne peut fournir autant d'informations qu'un système dispersif. Nous nous sommes donc posé la question de définir une méthode permettant de calculer la fluorescence en ayant un nombre restreint de canaux de mesure.

Admettons que notre instrument de mesure acquiert les signaux provenant de la végétation en utilisant N canaux. Pour chaque canal i, nous pouvons écrire l'équation suivante, exprimant le flux mesuré :

$$L_i = \frac{\rho_i I_i}{\pi} + f_i \qquad (II.24)$$

Avec :

L_i le flux mesuré dans le canal *i*

ρ_i la réflectance de la cible pour le canal *i*

I_i le flux solaire incident pour le canal *i*

f_i la fluorescence de la cible dans le canal *i*

Toutes ces grandeurs sont évidemment les grandeurs intégrées sur la fonction de transfert du canal.

Admettons maintenant qu'une mesure simultanée soit faite par le même capteur sur une cible de référence non fluorescente. Pour chaque mesure on peut écrire :

$$L_i^r = \frac{\rho_i^r I_i}{\pi} \qquad \textit{(II.25)}$$

Avec :

L^r_i le flux mesuré dans le canal *i* sur la référence

ρ^r_i la réflectance de la cible pour le canal *i* sur la référence

L'équation *(II.6)* peut alors s'exprimer sous la forme :

$$L_i = \frac{\rho_i L_i^r}{\rho_i^r} + f_i \qquad \textit{(II.26)}$$

La réflectance de la référence ρ_i^r est connue, mesurée en laboratoire par exemple. Supposons pour la suite − afin de simplifier les équations − qu'elle est constante et vaut 1. L'équation *(II.26)* se réécrit :

$$L_i = \rho_i L_i^r + f_i \qquad \textit{(II.27)}$$

Dans cette expression ρ_i et f_i sont des inconnues, L_i et L^r_i sont mesurées. En considérant l'ensemble des mesures, ont peut former un système de *N* équations de type *(II.27)*. Ce système comporte donc *N* équations et *2N* inconnues, l'ensemble des $\rho_i,\ f_i$: $\{(\rho_i, f_i), i \in \{1 \dots N\}\}$. Avec ces seules équations ce système est sous déterminé. Pour pouvoir le résoudre, il est nécessaire de faire des hypothèses sur la fluorescence et sur la réflectance établissant une relation entre les différents canaux.

L'hypothèse $\rho = cst$ et $f = cst$ permet de résoudre le système dès que *N=2*, c'est le calcul que l'on a présenté au paragraphe 2.1.1. Mais l'évaluation de la fluorescence par cette méthode est fortement biaisée.

Les spectres de fluorescence et de réflectance présentent des différences significatives entre la zone spectrale de la bande O_2-A et celle de la zone O_2-B. C'est pourquoi nous allons discuter dans un premier temps du cas de la bande d'absorption O_2-A puis dans un deuxième temps du cas de la bande O_2-B. Les calculs se feront indépendamment dans chacune des bandes.

- ***O_2-A, modèle de fluorescence***

Le modèle de fluorescence va être basé sur la connaissance de la forme générale du spectre d'émission. Nous voulons mesurer la fluorescence au fond de la bande. Nous allons donc exprimer la fluorescence dans les autres canaux (f_i) en fonction de la fluorescence au fond (f_{IN}). On écrit, pour chaque canal excepté celui du fond :

$$f_i = K_i f_{IN} \qquad (II.28)$$

K_i étant un coefficient qui sera obtenu sur un spectre d'émission de fluorescence moyen.

Bien que le spectre d'émission de fluorescence dépende de nombreux paramètres tel que le contenu en chlorophylle, l'intensité lumineuse, la contribution relative PSI/PSII, la pente du spectre d'émission de fluorescence est relativement constante au voisinage de la bande O_2-A quel que soit le type de végétation observée (Moya et al., 2006). A plus forte raison la variabilité de la pente pour une même espèce est également faible (voir *Figure II.23*). Ainsi la variabilité réelle des coefficients K_i est très faible.

On peut en plus arguer du fait que l'erreur induite par l'incertitude sur ces facteurs est relativement limitée, comme on l'a vu au paragraphe 2.3.3. Alonso et al., 2008 a également montré que cette variabilité n'avait que des effets très limités sur l'évaluation de la fluorescence.

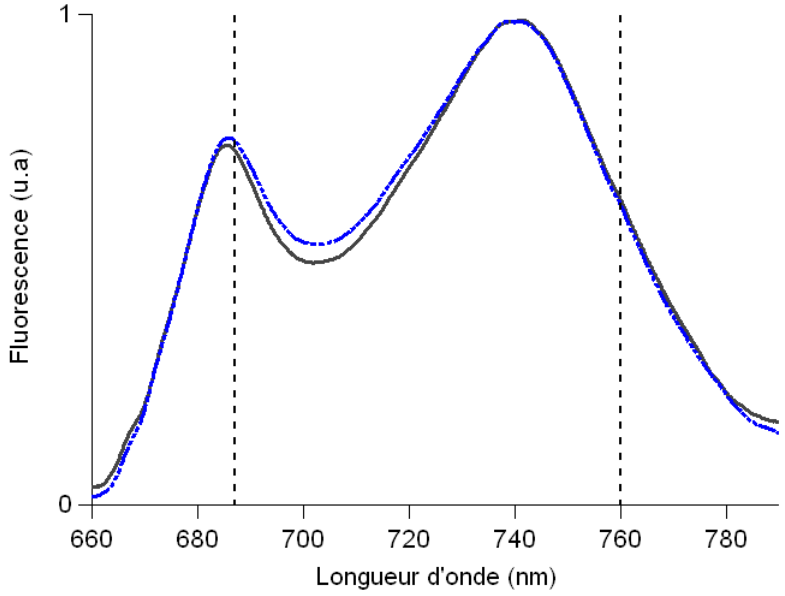


Figure II.23 *Spectre d'émission de fluorescence de faces adaxiales de feuilles de sorgo fourrager (sorghum solairus) acquis par l'instrument Leaf Spectro Fluorimeter (LSF) après adaptation à la lumière. Courbe noire : acquis le 30 aout 2008, PAR : 764 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$, [Chl] :54.7 $\mu g.cm^{-2}$. Courbe bleue : acquis le 27 aout 2008, PAR : 1244 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$, [Chl] : 49.6 $\mu g.cm^{-2}$. Les lignes verticales sont positionnées à 687nm et 760 nm.*

On a donc maintenant le système suivant :

$$\begin{cases} L_i = \rho_i L_i^r + f_i \quad , i \in \{1 \dots N\} \\ f_i = K_i f_{IN} \quad , i \in \{1 \dots N, i \neq IN\} \end{cases} \qquad (II.29)$$

Le modèle de fluorescence apporte *N-1* équation et *0* inconnues. Nous avons donc maintenant *2N-1* équation et *2N* inconnues mais le système est toujours sous déterminé. Il faut maintenant introduire un modèle de réflectance.

- ***O_2-A, modèle de réflectance***

La réflectance de la végétation varie quasi linéairement avec la longueur d'onde au voisinage de la bande O_2-A (voir *Figure II.24*). Meroni et Colombo, 2006, Meroni et al., 2008b ont d'ailleurs utilisé cette affirmation pour construire leur calcul de fluorescence. On va donc introduire cette variation linéaire de la réflectance dans notre système d'équation en écrivant :

$$\rho_i = a\lambda_i + b \qquad \textit{(II.30)}$$

Le système *(II.29)* devient donc :

$$\begin{cases} L_i = \rho_i L_i^r + f_i \quad , i \in \{1 \dots N\} \\ f_i = K_i \mathrm{f_{IN}} \ , i \in \{1 \dots N, i \neq IN\} \\ \rho_i = a\lambda_i + b \quad , i \in \{1 \dots N\} \end{cases} \qquad \textit{(II.31)}$$

Ce modèle de réflectance apporte *N* équations et *2* inconnues. Le système total *(II.31)* possède donc maintenant *3N-1* équations et *2N+2* inconnues. Le système devient soluble si *3N-1* $\geq$ *2N+2*, autrement dit pour *N* $\geq$ *3*. Le système est maintenant soluble avec trois canaux.

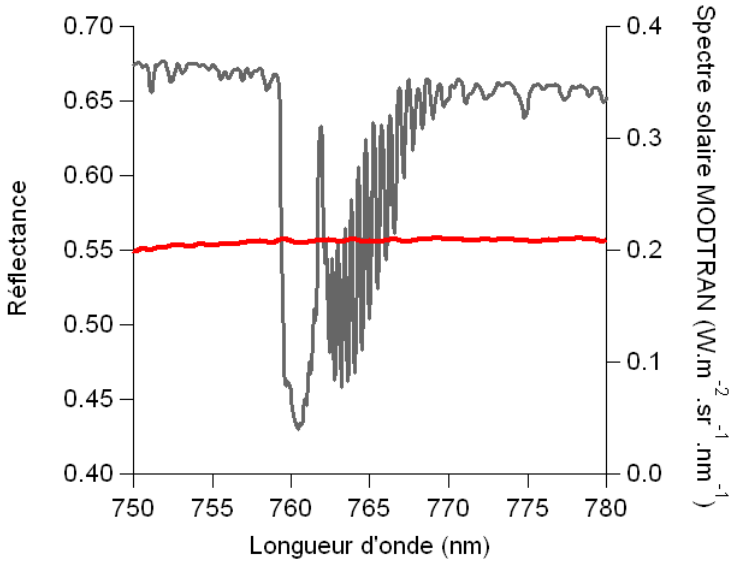


Figure II.24 *Réflectance de la végétation et spectre solaire de la bande O_2-A généré par MODTRAN4.*

La solution du système *(II.31)* s'écrit :

$$f_{IN} = \frac{L_3 L_1^r L_2^r \rho_3^r(\lambda_1 - \lambda_2) + L_1 L_2^r L_3^r \rho_1^r(\lambda_2 - \lambda_3) + L_2 L_1^r L_3^r \rho_2^r(\lambda_3 - \lambda_1)}{K_1 L_2^r L_3^r \rho_1^r(\lambda_2 - \lambda_3) + L_1^r(K_3 L_2^r \rho_3^r(\lambda_1 - \lambda_2) + L_3^r \rho_2^r(\lambda_3 - \lambda_1))} \qquad \textit{(II.32)}$$

Les indices 1 et 3 correspondent à des canaux en dehors de la bande d'absorption et l'indice 2 correspond au canal du fond.

- ***Calcul dans la bande O_2-B***

Le raisonnement pour définir les modèles dans la bande O_2-B est similaire. Bien que le spectre de fluorescence dans la zone spectrale O_2-B présente une plus grande variabilité (voir *Figure II.23*), on utilise le même type de modèle que dans la bande O_2-A. En fait, il semble raisonnable de penser qu'étant donné que les canaux de mesure se trouvent dans une gamme de longueurs d'onde assez restreinte, la déformation du spectre d'émission due à sa variabilité naturelle est, à peu de chose près, un facteur multiplicatif. Ce facteur multiplicatif étant le même pour tous les canaux, on s'attend à ce que le modèle de fluorescence reste valide. On va donc, de la même manière que pour la bande O_2-A, déterminer des coefficients K_i pour la zone spectrale O_2-B.

En fait le seul changement sera pour le modèle de réflectance. On voit clairement sur la *Figure II.25* qu'un modèle linéaire ne peut rendre compte de la variation de fluorescence dans cette gamme de longueurs d'onde. On va donc choisir d'exprimer la réflectance sous la forme d'un polynôme. L'ordre du polynôme doit être au moins de 2 pour pouvoir rendre compte de la variation de type parabolique de la réflectance. On écrit donc :

$$\rho_i = a\lambda_i{}^2 + b\lambda_i + c \qquad (II.33)$$

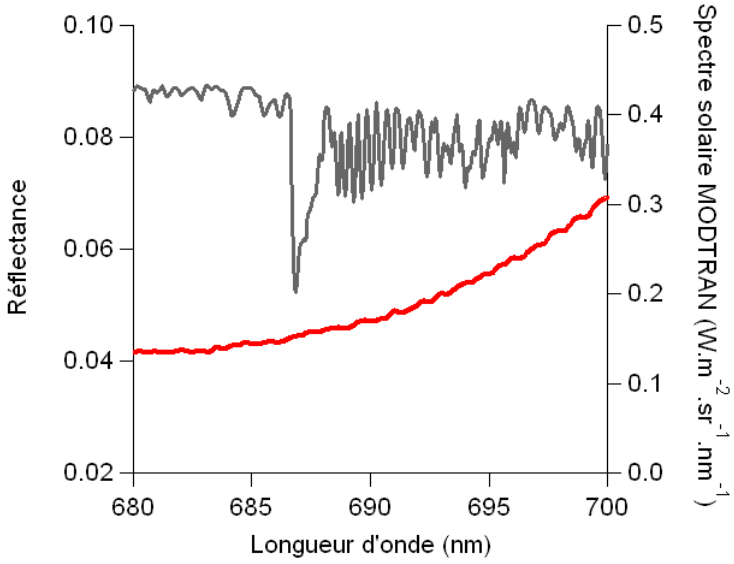


Figure II.25 *Réflectance de la végétation et spectre solaire de la bande O_2-B généré par MODTRAN4.*

On a donc maintenant le système suivant :

$$\begin{cases} L_i = \rho_i L_i^r + f_i \quad , i \in \{1 \dots N\} \\ f_i = K_i \mathrm{f_{IN}} \quad , i \in \{1 \dots N, i \neq IN\} \\ \rho_i = a\lambda_i{}^2 + b\lambda_i + c \quad , i \in \{1 \dots N\} \end{cases} \qquad (II.34)$$

Cette fois le modèle de réflectance apporte *N* équations et *3* inconnues. Le système total *(II.34)* possède donc maintenant *3N-1* équations et *2N+3* inconnues. Le système devient soluble si $3N\text{-}1 \geq 2N+3$, autrement dit pour $N \geq 4$. Le système permettant de calculer la fluorescence dans la bande O_2-B est donc soluble si on utilise 4 canaux.

La solution du système *(II.34)* s'écrit :

$$f_{IN} = \frac{N}{D} \tag{II.35}$$

Avec :

$$\begin{aligned} N = {} & L_3 L_1^r L_2^r L_4^r \rho_3^r (\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_4)(\lambda_2 - \lambda_4) \\ & + L_3^r \big[-\lambda_4 L_1^r L_2^r \rho_4^r (\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3) \\ & + L_4^r (\lambda_3 - \lambda_4) \big(L_1 L_2^r \rho_1^r (\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_4) \\ & + L_2 L_1^r \rho_2^r (\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_1) \big) \big] \end{aligned} \tag{II.36}$$

$$\begin{aligned} D = {} & L_1^r \big[L_2^r (\lambda_1 - \lambda_2) \big(K_4 L_3^r \rho_4^r (\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_3 - \lambda_2) + L_4^r \rho_3^r (\lambda_1 - \lambda_4)(\lambda_2 - \lambda_4) \big) \\ & - K_2 L_3^r L_4^r \rho_2^r (\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_1 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4) \big] \\ & + K_1 L_2^r L_3^r L_4^r \rho_1^r (\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4) \end{aligned} \tag{II.37}$$

On peut noter que les équations *(II.32)* et *(II.35)*, ne dépendent pas des paramètres des modèles de réflectance (les coefficients des polynômes). En fait l'introduction du modèle de réflectance permet de relâcher les contraintes : il n'est plus nécessaire de connaître la réflectance ou de l'interpoler à partir d'approximations, il suffit juste de faire une hypothèse sur sa *forme*. Cette manière de faire permet de plus d'avoir un système qui ne dépend pas d'un type de végétation en particulier. En effet, la réflectance, bien qu'elle diffère en intensité d'une végétation à l'autre, a toujours le même type de forme.

On peut également observer que bien que quatre canaux soit suffisants pour retrouver la fluorescence il n'y a pas de limitation stricte. On peut utiliser plus de canaux et avoir un système surdéterminé ou bien utiliser plus de canaux et utiliser un modèle de réflectance d'un ordre plus élevé. De manière générale, on peut écrire le système *(II.34)* sous la forme :

$$\begin{cases} L_i = \rho_i L_i^r + f_i \quad , i \in \{1 \dots N\} \\ f_i = K_i f_{IN} \quad , i \in \{1 \dots N, i \neq IN\} \\ \rho_i = \sum_{i=1}^{N-1} c_i {\lambda_i}^{i-1} \quad , i \in \{1 \dots N\} \end{cases} \tag{II.38}$$

Un tel système comporte *3N-1* équations et *3N-1* inconnues, il est soluble quel que soit *N*. Ce système est la généralisation des systèmes *(II.31)* et *(II.34)*.

Nous avons introduit une nouvelle manière de formuler le calcul de la fluorescence en utilisant le FLP. Cette nouvelle formulation nécessite d'utiliser plus de deux canaux de mesures. Dans la section suivante nous nous proposons de déterminer la configuration optimale des canaux en évaluant l'erreur faite sur la fluorescence.

2.4.2 Application - Bande O_2-A

Les données utilisées ont été générées à partir des éléments que nous avons déjà présentés au paragraphe 2.3.4. Le spectre de fluorescence utilisé pour les calculs est normalisé de manière à avoir une valeur de 2 $mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ à 760 nm. Il faut noter également que les calculs ont été faits pour trois types de réflectance. On trouvera une présentation plus détaillée des résultats et de la démarche dans l'Annexe A. Nous ne donnerons ici que les principaux résultats.

L'équation *(II.32)* nous permet de retrouver la fluorescence avec trois canaux de mesures en faisant l'hypothèse que la variation de réflectance le long de la bande est linéaire. Les calculs effectués dans le paragraphe 2.3.5 nous donnent déjà la position de deux canaux (758.1 nm, 760.45 nm), ainsi que la largeur optimale (1 nm). Il ne reste plus qu'à placer le troisième canal. La *Figure II.26* donne l'erreur moyenne sur la fluorescence et sur la réflectance en fonction de la longueur d'onde du troisième canal (voir détail des calculs dans l'Annexe A). Cette erreur moyenne est calculée à partir des résultats obtenus avec les trois réflectance et pour les trois heures de mesure. Les barres d'erreur sont la déviation standard.

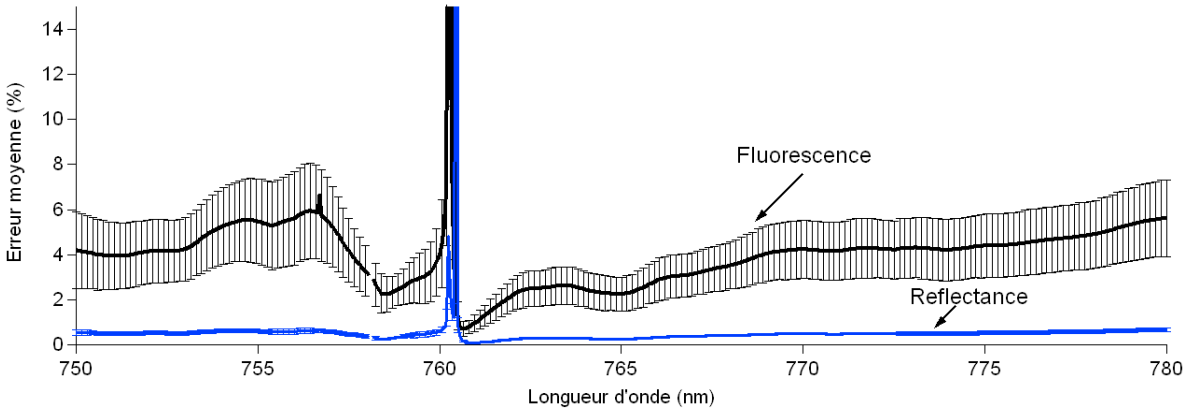


Figure II.26 *Pourcentage d'erreur moyen et déviation standard pour la fluorescence et la réflectance retrouvée à l'aide de l'équation (II.32) sur l'ensemble des données générées artificiellement.*

On voit sur cette figure que l'erreur moyenne sur la réflectance est < 1% et dépend peu de la longueur d'onde du troisième canal. Ce n'est pas le cas pour la fluorescence.

Deux zones semblent être favorables pour la position du troisième canal : une zone assez petite près du fond de la bande, autour de 761 nm et une zone aux alentour de 765 nm. La zone à 761 nm étant proche de la longueur d'onde du fond, un léger décalage vers la gauche peut rendre la mesure totalement inutilisable. La zone à 765 nm, bien que présentant une erreur moyenne un peu plus élevée semble être plus favorable. Cette longueur d'onde est toutefois encore dans la zone de la bande d'absorption. La structure de la bande étant plus complexe dans cette zone, on préférera en sortir pour éviter des problèmes lors des corrections atmosphériques. Celle-ci s'étendant jusqu'à environ 770 nm on choisira donc plutôt une longueur d'onde au delà. Dans ce cas l'erreur sur la fluorescence sera de l'ordre de 4%.

Un autre critère pouvant être utile pour faire un choix est la sensibilité de notre modèle à l'erreur sur les coefficients de fluorescence. En effet, notre modèle nécessite la connaissance de deux coefficients liant la fluorescence dans les canaux en dehors de la bande d'absorption à la fluorescence dans la bande d'absorption. L'erreur sur la fluorescence est proportionnelle à l'erreur sur ces

coefficients. Le coefficient de proportionnalité (K_{erreur}) est donné sur la *Figure II.27* (si le coefficient vaut 0.5, une erreur de 2% sur les coefficients entraîne une erreur de 1% sur la fluorescence).

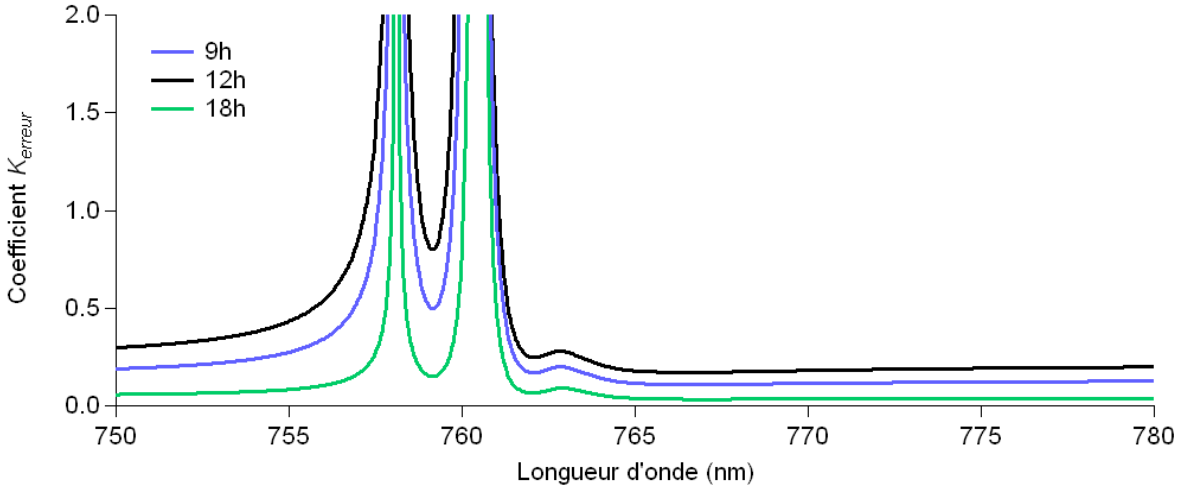


Figure II.27 *Coefficient de proportionnalité entre l'incertitude sur les coefficients du modèle de fluorescence et l'erreur sur la fluorescence dans la bande O_2-A.*

La *Figure II.27* montre que la sensibilité aux erreurs sur le modèle de fluorescence sera assez faible du moment que la position du canal est située sur la droite de la bande d'absorption. La zone à 761 nm dont on avait parlé précédemment est là aussi une zone sensible à laquelle il faudrait préférer une zone de longueur d'onde >765 nm.

On voit par ailleurs que notre algorithme est relativement peu sensible aux erreurs sur les coefficients du modèle de fluorescence. Ainsi, si le troisième canal est placé à une longueur d'onde > 765 nm, on aura une erreur sur la fluorescence inférieure au quart de l'incertitude sur les coefficients du modèle de fluorescence.

La *Figure II.28* illustre la position des canaux de mesure optimaux que l'on vient de déterminer (758.1 nm, 760.45 nm, 770 nm, FWHM : 1 nm).

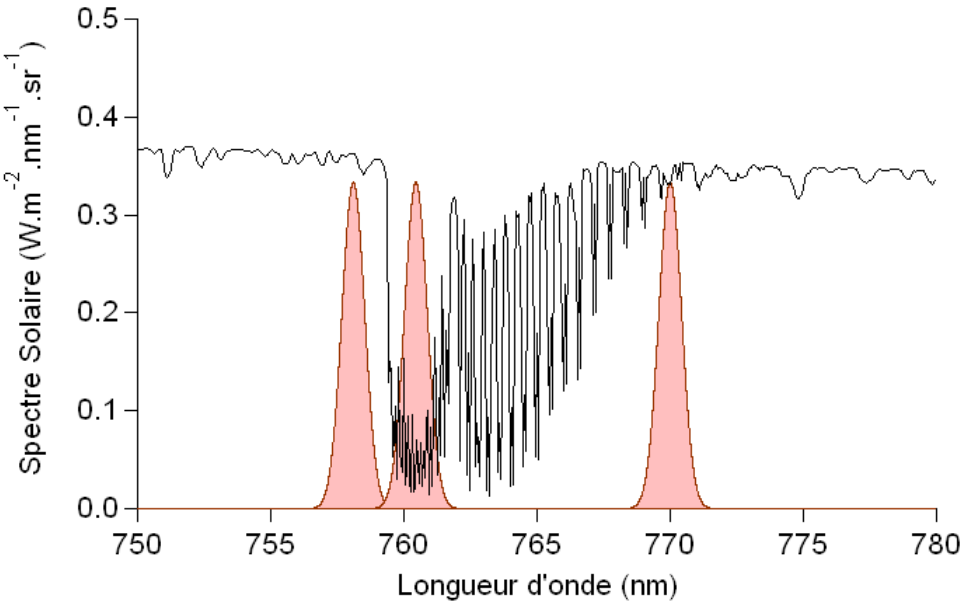


Figure II.28 *Filtre de transmission des canaux selon la configuration optimale déterminée pour la bande O_2-A (758.1 nm, 760.45 nm, 770 nm, FWHM : 1 nm).*

2.4.3 Application - Bande O_2-B

Nous allons maintenant nous intéresser à l'application de l'équation *(II.35)* pour la mesure de la fluorescence dans la bande O_2-B. Le spectre de fluorescence utilisé pour les calculs est normalisé de manière à avoir une valeur de 1.5 $mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ à 687 nm. Nous allons, de la même manière que précédemment, donner les principaux résultats, on retrouvera les détails dans l'Annexe A. Dans cette annexe nous recherchons les positions spectrales des canaux permettant de minimiser l'erreur sur la fluorescence. Les trois premiers canaux ont été placés, la *Figure II.29* donne l'erreur moyenne sur la fluorescence et sur la réflectance en fonction de la longueur d'onde du quatrième canal. Cette erreur moyenne est calculée à partir des résultats pour les trois réflectances et pour les trois heures de mesure. Les barres d'erreur sont la déviation standard.

On voit qu'une zone favorable se dégage pour le dernier canal entre 708 et 711 nm. Dans cette zone, l'erreur moyenne est inferieure à 2% pour la fluorescence et inférieure à 0.5% pour la réflectance.

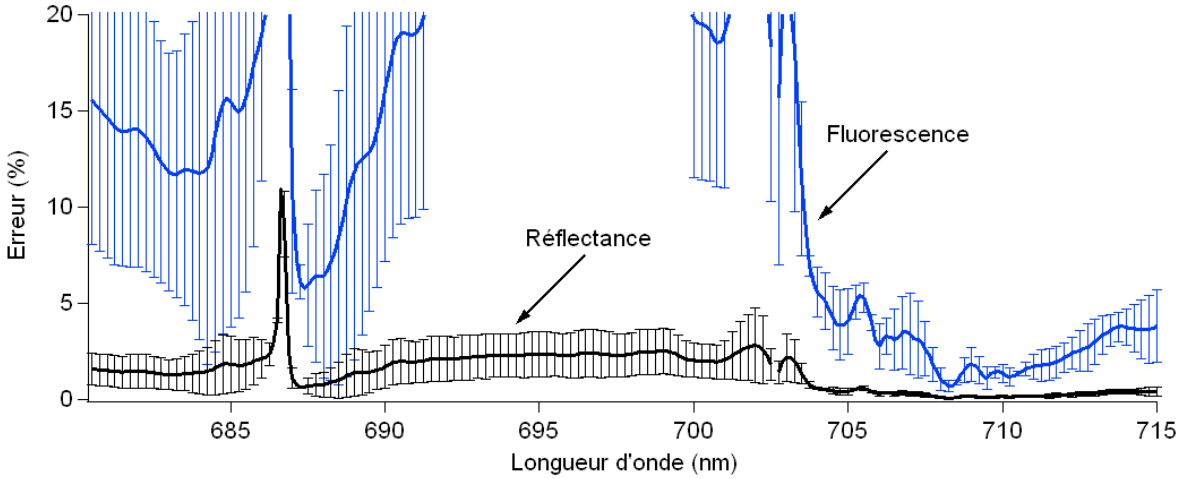


Figure II.29 *Moyennes de l'erreur sur la fluorescence (courbe bleue) et sur la réflectance (courbe noire) pour les trois types de réflectance (moyenne des valeurs absolues) en fonction de la longueur d'onde du dernier canal. Largeur des canaux : 0.7 nm, position des trois premiers canaux : 686.3 nm, 687.15 nm, 702.6 nm.*

De même que dans la bande d'absorption O_2-A, on peut calculer l'erreur induite par une erreur sur les coefficients K_i tenant compte de la variation de la fluorescence le long de la bande d'absorption. Les résultats sont présentés sur la *Figure II.30*, ce graphique donne le coefficient de proportionnalité liant l'incertitude sur les coefficients K_i à l'erreur générée sur la fluorescence.

On voit que l'erreur induite sur la fluorescence par l'incertitude sur les coefficients du modèle de fluorescence (les K_i) est plus élevée dans la bande O_2-B que dans la bande O_2-A. Ceci était attendu au vu des résultats présentés dans la section 2.3.2. Il n'y pas de zone minimisant particulièrement l'erreur, on peut donc s'attendre à une erreur supplémentaire sur la fluorescence à midi de l'ordre de 4 fois l'erreur sur les K_i.

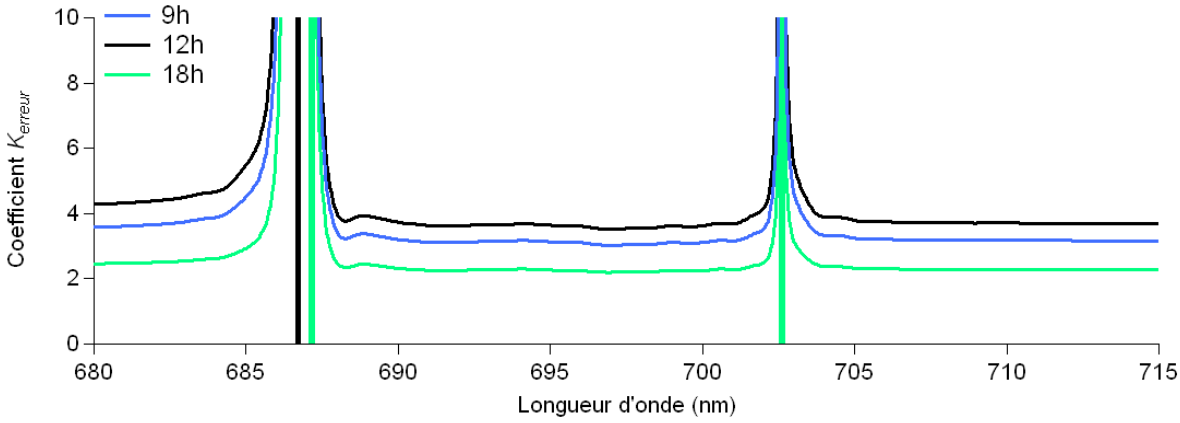


Figure II.30 *Coefficient de proportionnalité entre l'incertitude sur les coefficients du modèle de fluorescence et l'erreur sur la fluorescence dans la bande O_2-B en fonction de la longueur d'onde du dernier canal. Largeur des canaux : 0.7 nm, position des trois premiers canaux : 686.3 nm, 687.15 nm, 702.6 nm.*

La *Figure II.31* illustre la position des canaux de mesure optimaux que l'on vient de déterminer (voir *Table II.7*).

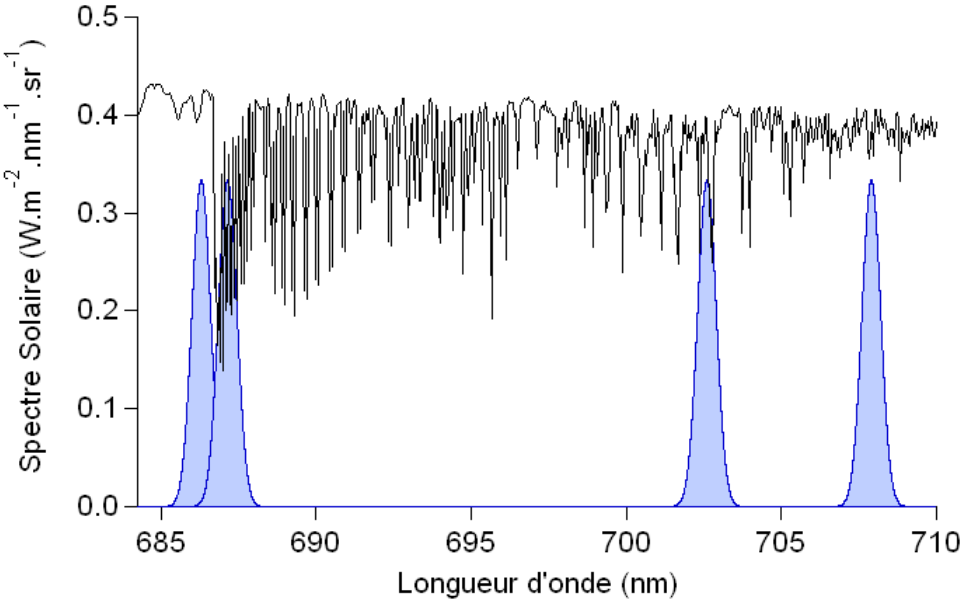


Figure II.31 *Filtre de transmission des canaux selon la configuration optimale déterminée pour la bande O_2-B (686.3 nm, 687.15 nm, 702.6 nm, 707.9 nm, FWHM : 0.7 nm).*

Nous avons donc déterminé une configuration de mesure optimale pour chaque bande, qui permet de retrouver la fluorescence avec la meilleure précision possible. Ces configurations sont reportées dans la *Table II.7*.

Configuration des canaux de mesure		
	Longueur d'onde (nm)	FWHM (nm)
Bande O_2-A	758.10	1
	760.45	1
	770.00	1
Bande O_2-B	686.30	0.7
	687.15	0.7
	702.60	0.7
	707.90	0.7

Table II.7 *Configuration optimale pour la mesure de la fluorescence avec les algorithmes présentés dans la section 2.4.1.*

2.4.4 Quelques précisions concernant l'algorithme

Nous avons jusque là présenté un nouvel algorithme permettant de mesurer la fluorescence en utilisant quelques canaux de mesure : trois pour la bande O_2-A et quatre pour la bande O_2-B. Les simulations ont permis de déterminer les positions optimales des canaux en utilisant des réflectances de couvert de végétation différentes. Se pose alors la question de connaître les limitations de cet algorithme. Est-il applicable à tout type de réflectance ? Comment varie l'erreur en fonction de l'intensité de l'émission de fluorescence ? Quelle est sa sensibilité au bruit de mesure ?

- ***Application à différents type de réflectance***

Le modèle de réflectance dans les deux bandes est différent. Nous avons choisi un modèle linéaire dans la bande O_2-A et un modèle parabolique dans la bande O_2-B.

De manière générale, si le modèle de réflectance n'est pas capable de rendre compte de la variabilité des spectres de fluorescence, on pourra toujours « augmenter ses capacités » en ajoutant un canal de mesure et en augmentant l'ordre du polynôme utilisé. Pour pouvoir donner une estimation du nombre de canaux minimum nécessaire il faudra faire un travail plus conséquent à partir d'un grand nombre de spectres de réflectance au niveau du couvert.

D'autre part, on peut noter que comme la réflectance du sol varie quasi linéairement avec la longueur d'onde sa contribution à la réflectance au niveau du couvert ne devrait pas perturber les calculs faits avec notre modèle.

- ***Cibles non fluorescentes***

Il peut être intéressant de savoir ce que donne notre algorithme lorsqu'on est en présence d'une cible non fluorescente, un champ nu par exemple. Notre algorithme doit nous donner une fluorescence négligeable.

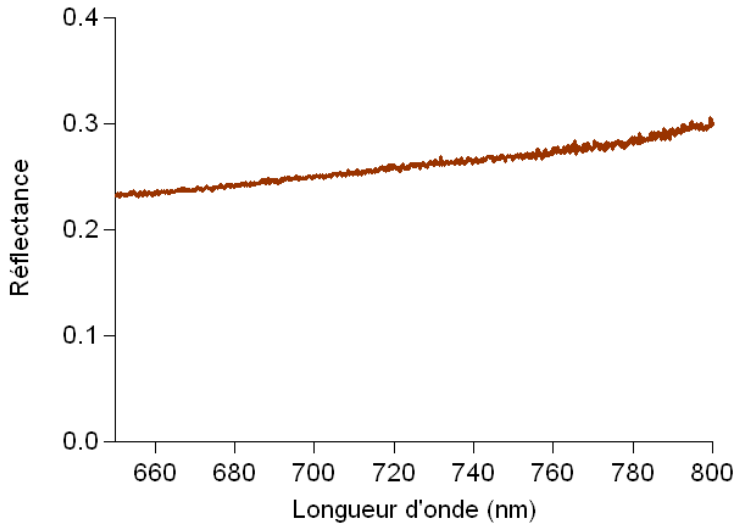


Figure II.32 *Réflectance typique d'un champ nu*

La *Figure II.32* présente une réflectance typique de champ nu. Elle est linéaire avec la longueur d'onde, légèrement croissante. Sa valeur est d'environ 0.25 à 687 nm et 0.27 à 760 nm. Nous allons donc appliquer notre algorithme sur deux réflectances de type linéaire : la première sera une droite d'équation $y = 0.00039877\mathrm{x} - 0.02922$ qui correspond au fit de la réflectance de la *Figure II.32* et la seconde sera une réflectance constante de 0.8 qui correspondra, par exemple à une cible de référence type PVC non fluorescent.

Pour la simulation, les K_i sont tirés du spectre de fluorescence mais celui-ci n'est pas ajouté au flux réfléchi. On simule ainsi l'utilisation de l'algorithme général sur une surface non fluorescente. Les résultats sont reportés *Table II.8*. On y voit qu'effectivement les fluorescences retrouvées sont négligeables et que l'erreur sur la réflectance est très faible. Notre algorithme est donc applicable sur des cibles non fluorescentes sans précautions particulières à prendre.

Type de réflectance	Fluorescence retrouvée ($mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$)		Réflectance retrouvée	
	Bande O_2-B	Bande O_2-A	Bande O_2-B	Bande O_2-A
Sol nu	$9.1 .10^{-3}$	$5.4 .10^{-3}$	0.245 *(erreur ~0.01%)*	0.27 *(erreur ~0.6‰)*
Réflectance constante (0.8)	$1.2 .10^{-3}$	$1.5 .10^{-2}$	0.8	0.8

Table II.8 *Fluorescence et réflectance retrouvées dans les deux bandes de l'oxygène en utilisant l'algorithme décrit à la section 2.4.1 et la configuration des canaux de la Table II.7 sur une cible non fluorescente. La simulation a été faite pour l'irradiance à 12h.*

- ***Variation de l'erreur avec l'intensité de l'émission de fluorescence***

Dans les simulations, nous avons utilisé une valeur d'intensité de fluorescence fixe standard de 1.5 $mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ pour la bande O_2-B et 2 $mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ pour la bande O_2-A. Bien entendu l'erreur sur la fluorescence retrouvée dépend de l'intensité de l'émission de fluorescence : elle sera d'autant plus difficile à mesurer qu'elle sera faible. Nous avons donc calculé, à titre d'exemple, l'erreur sur la fluorescence en fonction de l'intensité de la fluorescence dans les deux bandes de l'oxygène pour la réflectance du blé, au midi solaire. Le résultat est présenté sur la

*Figure II.***33**, l'erreur sur la réflectance étant quasi constante elle n'est pas montrée ici.

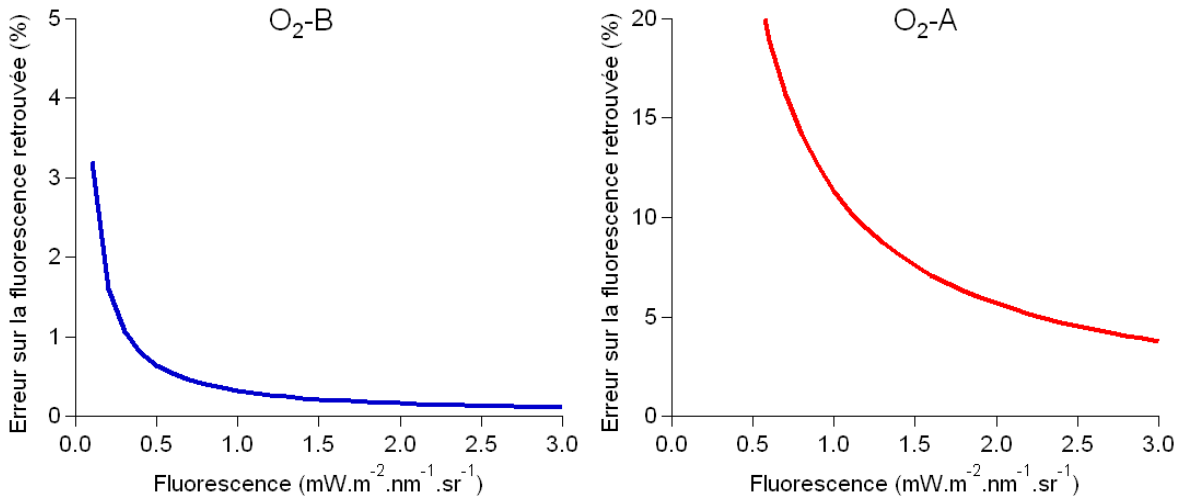


Figure II.33 *Erreur sur la fluorescence en fonction de l'intensité de l'émission de fluorescence pour un couvert de blé, à 12h. Bande O_2-B à gauche, O_2-A à droite.*

L'erreur sur la fluorescence décroît avec l'augmentation de l'intensité de l'émission dans les deux bandes. Si l'erreur n'est pas pénalisante dans la bande O_2-B pour les faibles intensités, elle l'est plus dans la bande O_2-A.

- ***Sensibilité au bruit***

Jusqu'à présent nous avons fait nos simulations sans ajouter de bruit à nos données. Nous n'avons pas, pour le moment, d'idée sur l'effet du bruit de mesure. Nous allons donc regarder comment varie l'erreur sur la fluorescence et réflectance en fonction du bruit de mesure. Nous avons utilisé une valeur

d'intensité de fluorescence standard de 1.5 $mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ pour la bande O_2-B et 2 $mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ pour la bande O_2-A

Le bruit que nous allons ajouter à nos mesures est un bruit aléatoire. Lorsque nous indiquons un bruit de mesure de 0.7 $mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$, il faut entendre que nous ajoutons à notre mesure un bruit appartenant à la gamme ± 0.7 $mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$. Le bruit est ajouté à la fois sur le spectre d'irradiance et sur le spectre de radiance de la végétation. Le rapport signal sur bruit indiqué est donné par rapport au flux incident dans le canal le plus proche du canal du fond (686.3 nm). Nous avons fait pour chaque type de réflectance et chaque heure de mesure 100 simulations dans la configuration quatre canaux. Bien sûr, l'erreur moyenne sur ces 100 simulations tend vers l'erreur que l'on a obtenue grâce au choix de la position des canaux, ce qui nous intéresse ici c'est la dispersion de l'erreur. Les résultats étant similaires quels que soient le spectre d'irradiance et le spectre de réflectance utilisés, nous reportons dans la table, les résultats pour le blé à midi uniquement.

Les valeurs indiquées dans la *Table II.9* sont la déviation standard de l'erreur, sur la réflectance et sur la fluorescence, pour les 100 simulations dans la bande O_2-B. La *Table II.10* présente les mêmes résultats dans le cadre de la mesure dans la bande O_2-A.

Bruit ($mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$)	SNR	Dev. Std Erreur fluorescence (%)	Dev. Std Erreur réflectance (%)
1.5	120	47.5	0.39
0.7	260	22.5	0.19
0.35	515	11	0.09
0.1	1800	3.2	0.03

Table II.9 *Déviation standard de l'erreur sur la fluorescence et sur la réflectance pour 100 simulations de mesure de fluorescence en utilisant 4 canaux dans la bande O_2-B. Le rapport signal sur bruit (SNR) est donné par rapport au flux incident à 683 nm.*

Bruit ($mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$)	SNR	Dev. Std Erreur fluorescence (%)	Dev. Std Erreur réflectance (%)
2.0	90	55.0	0.070
1.5	120	36.5	0.046
0.7	260	19.0	0.024
0.35	515	9.0	0.012
0.1	1800	2.7	0.003

Table II.10 *Déviation standard de l'erreur sur la fluorescence et sur la réflectance pour 100 simulations de mesure de fluorescence en utilisant de 3 canaux dans la bande O_2-A. Le rapport signal sur bruit (SNR) est donné par rapport au flux incident à 758.1 nm.*

Dans les deux cas, on voit que l'erreur sur la réflectance est négligeable en comparaison de l'erreur sur la fluorescence. On voit également que la mesure de la fluorescence est une mesure extrêmement sensible, un rapport signal sur bruit de 260 ne permet qu'une mesure qu'à 20% près. Un tel rapport signal sur bruit et comparable avec ceux annoncés pour les spectromètres commerciaux (un HR200+, Ocean Optics, a un SNR maximum annoncé à 300). Bien sûr, il est possible de moyenner les signaux pour obtenir une meilleure précision mais cette méthode trouve vite ses limites lors de mesures en conditions naturelles. Une mesure plus précise de fluorescence nécessite avant tout des systèmes plus performants.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit la méthode de mesure passive dans les bandes de l'oxygène. Elle s'appuie sur la mesure de la variation de la profondeur de la bande d'absorption après interaction avec la végétation. Il a été établi que la variation de la profondeur après interaction avec la végétation autour du midi solaire, entraînerait une variation maximale de profondeur de l'ordre de 10-15 %. Deux effets viennent principalement modifier la profondeur : le premier effet, celui qui nous intéresse, est la contribution de la fluorescence. Le second effet est la petite variation de réflectance de la végétation le long de la bande d'absorption. Nous avons vu que cela pouvait entrainer une variation de profondeur supérieure à la variation induite par la fluorescence. Il est donc très important de tenir compte de ces variations de réflectance.

Une première manière de tenir compte des variations de réflectance et de fluorescence a été présentée. Elle consiste à introduire deux coefficients exprimant les variations de fluorescence et de réflectance entre les deux canaux de mesure. L'erreur sur la fluorescence induite par l'incertitude sur ces coefficients a été estimée dans la section 2.3.3. Pour une variabilité de 0.5 % de ces paramètres, on s'attend à une erreur sur la fluorescence inférieure à 10 % dans les deux bandes. Tout le problème est donc de pouvoir estimer ces paramètres.

Nous avons vu que plusieurs méthodes de calcul utilisant un spectre bien résolu en longueur d'onde ont été proposées. Elles visent toutes à obtenir une estimation du spectre de réflectance et rencontrent quelques difficultés dans la bande O_2-B.

En nous plaçant dans l'optique de l'utilisation d'un système à filtre, nous avons présenté un nouvel algorithme de calcul : il permet la mesure de fluorescence en utilisant seulement quelques canaux (à partir de 3 dans la bande O_2-A et 4 dans la bande O_2-B), tout en prenant en compte la forme de la réflectance et de la fluorescence. Son originalité est qu'il n'y a pas besoin de calculer explicitement la réflectance, il suffit de faire une hypothèse sur sa forme au voisinage des bandes d'absorption. La fluorescence mesurée s'exprime ainsi sans faire apparaître de terme de réflectance de la végétation.

Toujours dans l'optique de faire une mesure dans quelques canaux de mesures, nous avons déterminé la largeur des filtres permettant de détecter la plus faible émission de fluorescence. Des largeurs de 0.7 nm dans la bande O_2-B et de 1 nm dans la bande O_2-A offrent le meilleur compromis de détectabilité entre les mesures faites au midi solaire et les mesures faites pour des profondeurs des bandes de l'oxygène plus importantes.

Le positionnement en longueur d'onde des canaux a été étudié dans l'objectif de minimiser l'erreur sur la fluorescence et la réflectance retrouvées. La configuration optimale obtenue est reportée

Table II.7. Les limitations de cette configuration et les adaptations qu'il est possible de faire ont été discutées dans la section 2.4.4.

La sensibilité au bruit de notre algorithme a également été présentée, il apparaît que la mesure est particulièrement sensible et que le rapport signal sur bruit de l'instrument est un critère essentiel pour une bonne mesure. Un rapport signal sur bruit de 260 (équivalent à ce que l'on peut obtenir avec des spectromètres commerciaux) ne permet de retrouver la fluorescence qu'avec une erreur potentielle de l'ordre de 20 % tandis qu'un rapport signal sur bruit de 1800 permet de la retrouver avec une erreur avoisinant les 3 %. Ces résultats confortent l'idée qu'il est préférable, tant que cela est possible, d'utiliser des systèmes à filtres pour la mesure de la fluorescence.

Chapitre III

Corrections atmosphériques

Chapitre III :

Corrections atmosphériques

3.1 **Propagation du rayonnement dans l'atmosphère** 99
3.1.1 Quelques définitions 99
3.1.2 L'atmosphère terrestre 102
3.2 **Mesure à distance de la fluorescence** 108
3.2.1 Ce qui change au niveau du signal 108
3.2.2 Détermination de la profondeur de référence 110
3.3 **Mesures** 110
3.3.1 Evolution des flux en fonction de l'altitude 113
3.3.2 Evolution des profondeurs des bandes de l'oxygène en fonction de l'altitude 115
3.4 **Modélisation** 116
3.4.1 MODTRAN 116
3.4.2 MODTRAN - Décalage en longueur d'onde 117
3.5 **Etude de sensibilité** 120
3.5.1 Variations induites par une erreur de calibration 121
3.5.2 Modèle – Modèle d'atmosphère 122
3.5.3 Modèle – Constituants de l'atmosphère 123
3.5.4 Modèle – Pression et température 126
3.5.5 Modèle – Aérosols 131
3.5.6 Conclusion de l'étude de sensibilité 134
3.6 **Validation du modèle** 136
3.6.1 Mesures des cycles diurnes 136
3.6.2 Intégration dans MODTRAN des données mesurées 138
3.6.3 Utilisation de l'AOT pour rendre compte des aérosols 141
3.6.4 Mesure de la transmission des filtres de TerFLEX 145
3.6.5 Résultats 147
3.6.6 Conclusion – Validation de MODTRAN 151
3.7 **Estimation des différentes contributions au signal mesuré** 152
3.7.1 Equation du transfert radiatif 152
3.7.2 Evaluation quantitative à l'aide de MODTRAN 154

3.7.3 Contribution de l'atmosphère 155
3.7.4 Contribution de l'environnement 156
3.7.5 Transmission 159
3.7.6 Découplage des transmissions 164
3.7.7 Conclusions 165
3.8 **Application à la mesure de la fluorescence** 166
3.8.1 Conclusions 169
3.9 **Corrections atmosphériques** 169
3.9.1 Calibration 169
3.9.2 Méthode de correction 170
3.9.3 Réflectance 170
3.9.4 Evolution de la réflectance 172
3.9.5 Correction - Sol nu 173
3.9.6 Correction - Végétation 174
3.9.7 Correction – conclusion 176
3.10 **Conclusion** 177

Corrections atmosphériques

Nous avons jusqu'à présent considéré que la mesure se faisait au niveau du sol. Il serait cependant très restrictif de ne pas pouvoir étudier la fluorescence à plus grande échelle, par exemple la fluorescence au niveau d'un ou de plusieurs champs. Pour cela, il est indispensable d'éloigner le capteur de la végétation. Le premier capteur avionné, AirFLEX, à été développé par l'équipe en 2004 et avec lui est venue la nécessité de l'étude de la modification du signal lorsque l'on fait les mesures à distance.

Lorsqu'on envisage de faire une mesure passive de la fluorescence à distance, la première remarque que l'on fait est assez déplaisante : l'absorption par l'oxygène, qui crée la bande d'absorption si utile à la mesure de la fluorescence, va se retourner contre nous. En effet, dès que l'on s'éloigne du sol l'oxygène absorbe le signal de fluorescence émis par les plantes. L'effet néfaste de cette « réabsorption » sera maximum dans la zone d'intérêt de nos mesures, puisque nous comptons extraire le signal de fluorescence de la zone où l'absorption est maximale.

En fait, pour une mesure à distance, plusieurs effets induits par l'atmosphère et ses constituants vont perturber la mesure. Dans ce chapitre nous nous proposons d'identifier ces effets, d'estimer leur importance et de voir s'il est possible de les quantifier et d'en tenir compte dans le calcul de fluorescence. Cette étude sera faite à l'aide du modèle de transfert radiatif par bandes MODTRAN.

3.1 Propagation du rayonnement dans l'atmosphère

Puisque nous nous intéressons à la propagation du flux lumineux dans l'atmosphère, nous allons dans un premier temps donner brièvement la définition de ce que l'on entend par absorption, diffusion, extinction et transmission. Dans une deuxième partie nous décrirons le milieu de propagation, l'atmosphère terrestre, et donnerons les principales caractéristiques de la propagation du flux lumineux dans ce milieu.

3.1.1 Quelques définitions

- **Absorption**

L'absorption résulte de l'interaction entre les photons du rayonnement incident et les constituants du milieu de propagation (atomes, molécules, etc.). L'absorption conduit à la disparition du photon incident. L'énergie correspondante est gagnée par l'atome absorbant sous forme d'énergie cinétique et d'augmentation de l'énergie interne, il y donc élévation de température. La désexcitation de l'atome produit une émission radiative proportionnelle à celle du corps noir à la température atteinte.

Considérons un faisceau lumineux *monochromatique* qui traverse un milieu absorbant d'épaisseur *dx*. Du fait des propriétés absorbantes du milieu, le nombre des photons du rayonnement incident se réduit tout au long du trajet. On peut écrire que l'intensité du rayonnement à la position $x+dx$ vaut :

$$I(x+dx) = I(x) - dI(x) \qquad (III.1)$$

Où *dI* correspond à l'intensité lumineuse absorbée par le milieu. L'intensité absorbée est proportionnelle à l'intensité incidente *I(x)*, à l'épaisseur du milieu absorbant *dx* et à un paramètre *k*, représentant l'absorption du milieu à cette longueur d'onde. On appellera *k* le coefficient d'absorption linéique (en m^{-1}). On écrit ainsi:

$$dI(x) = k(x)I(x)dx \qquad (III.2)$$

De ces deux équations, on déduit que, pour un trajet d'épaisseur *X*, on a :

$$I(X) = I(0)e^{-\int_0^X k(x)dx} \qquad (III.3)$$

De cette relation on déduit la loi de Bouguer-Beer-Lambert, plus connue sous le nom de loi de Beer. Cette loi décrit l'atténuation de l'intensité d'un faisceau monochromatique traversant un milieu translucide, homogène et isotrope (dans un tel milieu *k* ne dépend pas de *x*).

$$I = I_0 e^{-kX} \qquad (III.4)$$

La transmission est définie dans le cas général comme :

$$\tau_a(X) = \frac{I(X)}{I(0)} = e^{-\int_0^X k(x)dx} \qquad (III.5)$$

Si le milieu est homogène, la transmission s'écrit :

$$\tau_a(X) = e^{-kX} \qquad (III.6)$$

- **Diffusion**

La diffusion est, avec l'absorption, la principale cause d'affaiblissement du rayonnement électromagnétique. Après interaction avec une particule ou une molécule un photon peut être diffusé, c'est-à-dire renvoyé dans une direction qui peut être sensiblement différente de la direction d'incidence. Nous nous intéresserons ici à la diffusion dite élastique. C'est-à-dire que l'énergie du photon n'est pas modifiée après interaction : il n'y a pas de changement de longueur d'onde. Une diffusion qui s'accompagne d'un changement d'énergie est appelée diffusion Raman.

L'évaluation de la diffusion est facilitée si on fait l'hypothèse que l'objet diffusant est sphérique. Les équations de Maxwell à résoudre s'expriment alors en coordonnées sphériques et la symétrie en facilite la résolution. La solution est simple dans le cas d'un objet diffusant dont la taille est bien inférieure à la longueur d'onde de l'onde incidente. Elle à été proposée par Sir John William Strutt Rayleigh en 1871 (Rayleigh, 1871). L'intensité diffusée est alors proportionnelle à $\frac{1}{\lambda^4}$. La *Figure III.1.a* présente la distribution angulaire de la diffusion Rayleigh pour un rayonnement provenant de la gauche. Cette diffusion ne privilégie pas de direction particulière, la distribution angulaire de l'énergie diffusée est relativement homogène. La direction du rayonnement incident est un axe de symétrie de la distribution du rayonnement.

Quand la taille de la particule est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du rayonnement incident la formulation de Rayleigh n'est plus suffisante. Une théorie plus générale a été

introduite par Lorenz (Lorenz, 1890) et Mie (Mie, 1908). Elle est appelée la théorie/diffusion de Lorenz-Mie. Cette diffusion est beaucoup moins dépendante de la longueur d'onde que la diffusion de Rayleigh. Par contre elle est fortement anisotrope : elle privilégie la diffusion vers l'avant. Cette direction sera d'autant plus privilégiée que l'objet diffusant sera grand (voir *Figure III.***1**.*c*). Les solutions fournies par la diffusion de Mie sont exactes pour des sphères ou des géométries simples (cylindrique etc.), pour des cas plus complexes, elles ne sont pas analytiques et on est souvent limité à des approches numériques.

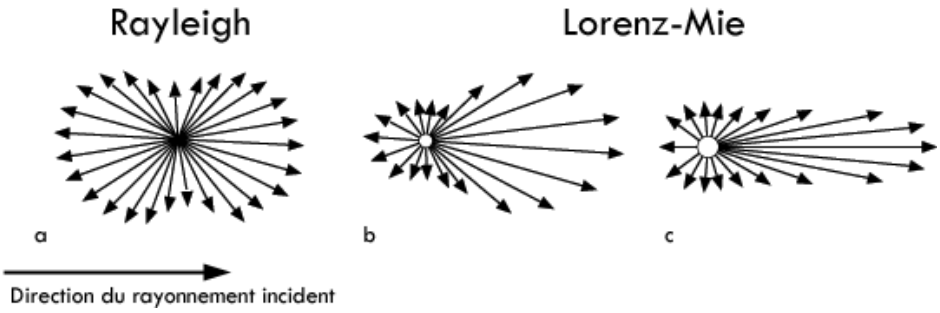


Figure III.1 *Diffusion en fonction de la taille de l'objet diffusant.* ***a****. Objet petit devant la longueur d'onde du rayonnement : diffusion Rayleigh.* ***b****. La taille de l'objet est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du rayonnement incident : diffusion de Lorenz-Mie.* ***c****. objet encore plus grand*

La distribution angulaire du rayonnement diffusé est une caractéristique propre à l'objet diffusant. Pour caractériser cette distribution on utilise la fonction de phase. La fonction de phase décrit la probabilité $P(\theta)$ pour qu'un photon soit diffusé dans une direction θ après interaction avec un objet diffusant. θ est l'angle entre la direction incidente et la direction une fois diffusé. Il existe plusieurs conventions de normalisation. Nous choisirons pour notre part, la convention utilisée par le modèle de transfert radiatif MODTRAN :

$$\int_{4\pi} P(\theta) d\theta = 1 \qquad (III.7)$$

Dans l'atmosphère les différents types de diffusions ont lieu, la diffusion Rayleigh principalement pour les composants gazeux et la diffusion de Lorenz-Mie pour les aérosols. Il convient également de souligner qu'un même photon peut être diffusé plusieurs fois; on parlera alors de diffusion multiple.

- **Extinction**

Lorsqu'un rayonnement traverse un milieu absorbant et diffusant, la perte totale de rayonnement dans la direction incidente est la somme des pertes par absorption et des pertes par diffusion. L'ensemble de ces pertes est appelée extinction. On définit donc le coefficient d'extinction de la façon suivante :

$$\gamma(x) = k(x) + \beta(x) \qquad (III.8)$$

Où k est le coefficient d'absorption moléculaire et β coefficient d'extinction par diffusion

La transmission globale s'écrit alors :

$$\tau(x) = \tau_a(x) \times \tau_d(x) \qquad (III.9)$$

Où τ_a et τ_d désignent respectivement la transmission spectrale et la transmission de diffusion du milieu de propagation.

On peut également définir l'épaisseur optique qui donne une indication sur le degré de transparence du milieu. L'épaisseur optique vaut :

$$\delta = -\ln\left(\frac{I(X)}{I(0)}\right) = \int_0^X \gamma(x)dx \qquad (III.10)$$

3.1.2 L'atmosphère terrestre

Figure III.2 *Atmosphère terrestre vue depuis l'espace. Earth Sciences and Image Analysis Laboratory, NASA Johnson Space Center*

L'atmosphère terrestre est l'enveloppe gazeuse entourant la Terre solide. Elle ne possède pas de limite supérieure bien définie car sa densité diminue graduellement vers l'espace. Même aux très hautes altitudes des traces de gaz légers subsistent. Ces derniers sont d'ailleurs trop légers pour être retenus par la gravité : en fait l'atmosphère s'évapore continuellement dans le milieu interplanétaire tout en étant renouvelé en permanence par le dégazage de la surface, par des transformations de nature biotique ainsi que par les éruptions volcaniques. La partie dense de l'atmosphère se résume à une mince couche puisqu'environ 99 % de la masse totale de l'atmosphère se situe sous une altitude de 30 km.

On peut considérer l'atmosphère comme une superposition de couches dont les limites sont fixées selon les inversions de régime thermique en fonction de l'altitude. On a de bas en haut :

- *La troposphère* : allant de la surface du globe jusqu'à une altitude de 8-15 km. La température dans cette couche décroît avec l'altitude. Son épaisseur varie entre 13 km et 16 km à l'équateur et entre 7 km et 8 km aux pôles. Elle contient environ 80 % de la masse d'air totale et la quasi-totalité de la vapeur d'eau. C'est dans cette couche que se produisent les phénomènes météorologiques (nuages, pluies etc.). La troposphère est animée de puissants mouvements qui brassent l'air en permanence : des mouvements verticaux, liés à des contrastes de températures (processus convectifs) et des mouvements horizontaux, engendrés par des différences de pression atmosphérique au niveau du sol. L'essentiel des interactions entre l'atmosphère et la surface terrestre se produisent dans la partie la plus basse de la troposphère : la couche limite

atmosphérique qui ne dépasse pas 2-3 km. Il s'agit de la partie de l'atmosphère dans laquelle la présence du sol perturbe le champ de vitesse du vent

- *La stratosphère* : elle s'étend entre la troposphère et une altitude de 40 km à 60 km. Dans cette couche la température croit avec l'altitude jusqu'à environ 0°C. L'augmentation de la température est occasionnée par l'énergie dégagée par la réaction de transformation de l'oxygène en ozone sous l'action du rayonnement ultraviolet. C'est une région ou surviennent d'intenses processus radiatifs, dynamiques et chimiques, dans laquelle le mélange horizontal des composants gazeux se produit plus rapidement qu'à la verticale.

- *La mésosphère* : comprise entre 50 km d'altitude et 80 km. C'est une zone de transition entre l'atmosphère et l'espace. La température décroît avec l'altitude et atteint son point le plus froid aux alentour de -90 °C. La densité de la mésosphère est très faible.

Il existe encore quelques couches : la thermosphère, ionosphère, exosphère mais ces couches sont au delà de notre zone d'intérêt : les processus que nous prenons en compte n'y ont pas lieu. En général la frontière entre atmosphère et espace est placée entre 100 km et 120 km.

La composition gazeuse de l'atmosphère dans la troposphère et dans la stratosphère demeure à peu près fixe en fonction de l'altitude en raison du brassage occasionné par les mouvements convectifs verticaux. L'air sec se compose de 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 0.93 % d'argon, 0.038 % de dioxyde de carbone et de plusieurs autres gaz à l'état de traces. La vapeur d'eau, l'ozone et le CO_2 constituent les gaz à grande variabilité et jouent un rôle crucial dans l'équilibre radiatif car ils sont hautement absorbants.

En plus de sa composante gazeuse, l'atmosphère contient également une composante particulaire : les aérosols. Les aérosols sont des particules liquides ou solides en suspension dans l'air. Ils sont déplacés par les vents à partir de leur site d'émission au sol. Les particules qui forment les aérosols sont très variées : différentes en origine, en taille, et en propriétés. Ces composés gazeux et particulaires sont des composés optiquement actifs, ils sont responsables de l'absorption et de la diffusion des radiations électromagnétiques.

Dans l'atmosphère, l'extinction du rayonnement résulte de l'interaction avec les différents constituants, que ce soit les molécules de gaz, les aérosols, la pluie, etc.… De la même manière que l'on a séparé le phénomène de diffusion et le phénomène d'absorption on peut traiter séparément l'absorption de chaque constituant. La transmission globale de l'atmosphère sera alors le produit des transmissions individuelles de chaque constituant. Dans les calculs de transfert radiatif aussi bien que dans la discussion des différents processus, on sépare généralement les phénomènes liés aux composants gazeux de l'atmosphère des phénomènes liés aux particules (aérosols). Nous allons donc tout d'abord parler de l'absorption moléculaire.

- **Extinction moléculaire**

La radiation qui nous intéresse provient du soleil. C'est la source de lumière la plus importante dans la gamme spectrale 0.3 μm - 3 μm. Son émission est comparable à celle d'un corps noir à une température de l'ordre de 5600 K. La *Figure III.3* présente le spectre solaire hors atmosphère ainsi que le spectre solaire au niveau du sol. On y voit la création des bandes d'absorption par les composants de l'atmosphère. L'absorption dans la région UV est principalement due à l'absorption de l'ozone et de l'oxygène. Dans le visible l'absorption est occasionnée par l'oxygène, l'ozone et l'eau. Dans l'infrarouge l'absorption est due en grande partie à la vapeur d'eau et au CO_2.

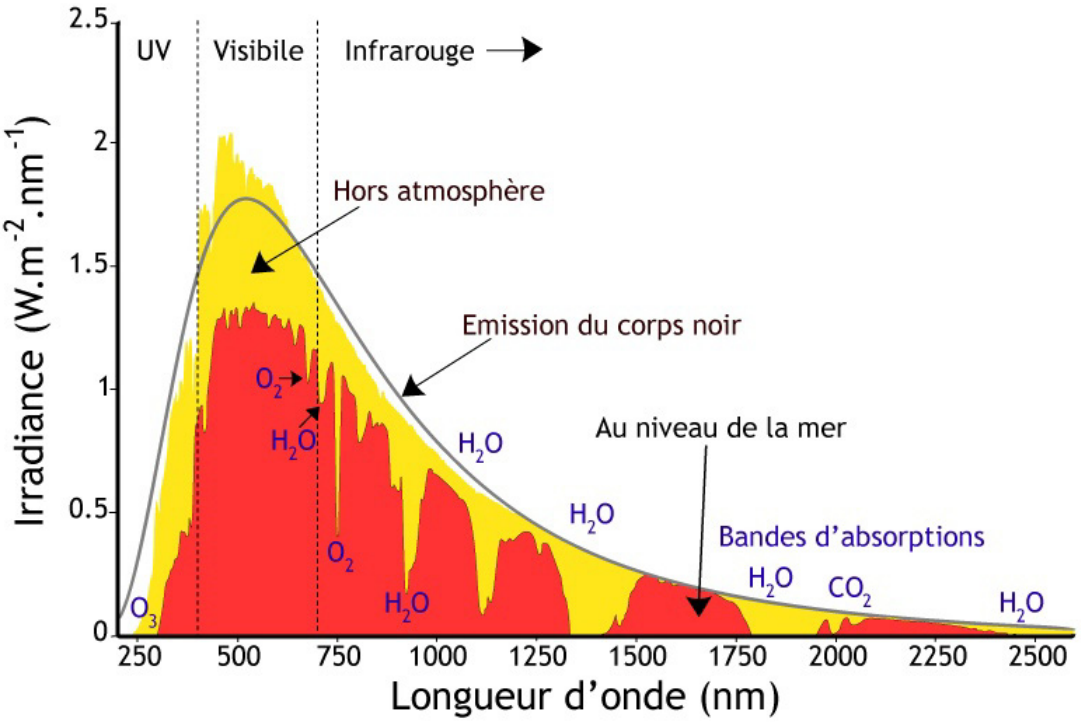


Figure III.3 *Irradiance solaire hors atmosphère, au niveau de la mer et courbe d'émission du corps noir à 5525 K. D'après American Society for Testing and Materials (ASTM) Terrestrial Reference Spectra (http://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight)*

Le spectre d'absorption des gaz consiste en une superposition de raies correspondant à différents niveaux d'énergie : les niveaux d'énergie dus aux transitions électroniques, à la vibration des atomes et à la rotation des molécules. L'intensité de chacune de ses raies dépend de la probabilité de transition ainsi que de l'occupation de l'état initial. Les molécules sont généralement en mouvement (agitation thermique) et en interaction (collisions), ainsi, le spectre de chaque transition électronique, à l'origine monochromatique, va subir un élargissement spectral par effet doppler et un élargissement dû aux collisions entre les molécules. Ces deux effets vont modifier la forme des raies. Pour une raie, le coefficient d'absorption va donc dépendre de la température et de la pression ; on l'écrit sous la forme :

$$k(\sigma, P, T) = S(T) \times f(\sigma, P, T) \qquad (III.11)$$

Où σ est le nombre d'onde (cm^{-1}), $S(T)$ est l'intensité de la raie d'absorption à une température T et $f(\sigma, P, T)$ est son profil de raie.

$$S(T) = S_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^n e^{-\frac{hcE}{k_B} \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \qquad (III.12)$$

Avec S_0, l'intensité à la température T_0, T_0 température de référence, h la constante de Planck, c la vitesse de la lumière, k_B la constante de Boltzmann, E l'énergie du niveau bas de la transition et n est une constante dépendant de la molécule (n vaut 1 pour une molécule linéaire et 3/2 pour une molécule triatomique).

Dans les basses couches l'élargissement des raies est dû essentiellement aux processus collisionnels. Dans ce cas le profil de raie prend la forme d'une lorentzienne :

$$f(\sigma, P, T) = \frac{1}{\pi} \frac{\delta\sigma}{(\sigma - \sigma_0)^2 + \delta\sigma^2} \qquad \textit{(III.13)}$$

Avec $\delta\sigma$, demi-largeur à mi-hauteur. On montre que cette largeur dépend de la pression et de la température :

$$\delta\sigma = \frac{P}{P_0}\left(\frac{T}{T_0}\right)^a \delta\sigma(P_0, T_0) \qquad \textit{(III.14)}$$

avec *a* coefficient dépendant de la molécule.

En haute altitude l'élargissement de la raie est dû majoritairement à l'effet Doppler ; le profil est alors donné par la relation :

$$f(\sigma, T) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \times \delta\sigma} e^{-\left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\delta\sigma}\right)^2} \qquad \textit{(III.15)}$$

Et cette fois,

$$\delta\sigma = \sigma(P_0, T_0) \times \sqrt{\frac{2k_B T}{m}} \qquad \textit{(III.16)}$$

avec *m* masse de la molécule.

Dans le cas général $f(\sigma, P, T)$ est un profil de Voigt (convolution entre une lorentzienne et une gaussienne).

Les molécules des différents gaz de l'atmosphère contribuent également à l'atténuation du rayonnement par diffusion de la lumière. Du fait de la faible taille des molécules cette diffusion est une diffusion de type Rayleigh.

La *Figure III.4* donne le spectre solaire dans les bandes d'absorption de l'oxygène atmosphérique tel qu'il a été mesuré au niveau du sol par Delbouille et al., 1973.

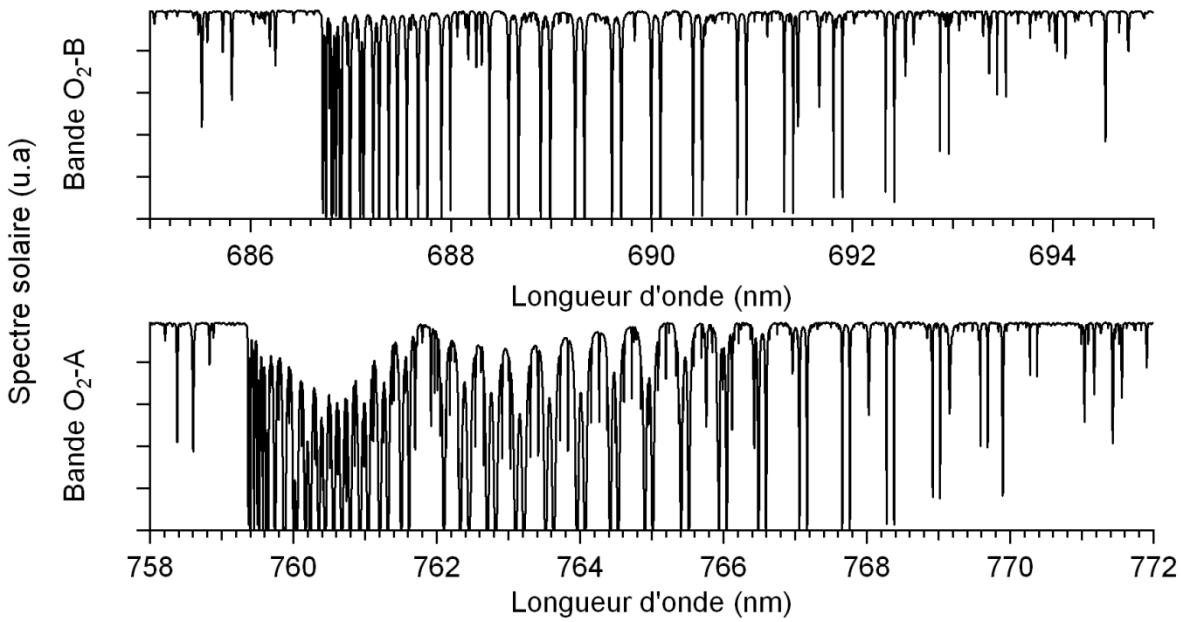


Figure III.4 *Spectre solaire dans les bandes d'absorption de l'oxygène atmosphérique, mesuré au niveau du sol. D'après Delbouille et al., 1973.*

Nous nous sommes penchés jusqu'ici sur les constituants gazeux de l'atmosphère. Ce sont des candidats idéals pour la modélisation : leur distribution verticale de concentration est stable sur de grandes échelles et leur nature est bien connue. Ainsi, leurs propriétés de diffusion et d'absorption sont bien comprises et aisément modélisables. Nous allons à présent nous intéresser aux composants particulaires : les aérosols.

- **Extinction par les aérosols**

Figure III.5 *Transport d'aérosols désertiques depuis le nord de l'Afrique vers les îles Canaries, vraie couleur. Terra MODIS, 17 février 2004. NASA.*

On définit les aérosols atmosphériques comme les populations de particules solides et liquides en suspsension dans l'air à l'exception des gouttelettes d'eau et des cristaux de glaces composant les nuages et les brouillards. Ils peuvent être d'origine naturelle ou anthropique (pollution par exemple). Ce sont des composants complexes de l'atmosphère : à l'inverse des consituants gazeux, leur taille, leur quantité, et leurs propriétés optiques sont très variables. Leurs dimensions varient d'une centaine de micromètres à 10^{-3} µm pour des complexes de quelques molécules (Pancrati, 2003). D'un point de vue radiatif, les plus petits aérosols ont une faible influence ; mais ils sont plus nombreux. A l'inverse,

les gros aérosols ont un fort impact individuel mais sont beaucoup moins nombreux. Pour le transfert radiatif on s'intéresse principalement aux aérosols dont la taille est comprise entre 0.1 µm et 1 µm.

Les formes des aérosols sont très variées : les particules liquides sont sphériques mais les particules solides ont des formes complexes, irrégulières. Les aérosols sont actuellement modélisés comme une distribution de particules sphériques en utilisant la thérorie de Lorenz-Mie. Il n'y a pas, pour le moment, de mesure assez précise mettant en défaut cette approximation.

Comme nous l'avons vu plus haut, la manière dont un objet diffuse la lumière est fortement liée au rapport entre sa taille et la longueur d'onde incidente. Ainsi la distribution en taille d'une population d'aérosols est un paramètre essentiel pour estimer l'impact qu'ils vont avoir sur le transfert radiatif atmosphérique. Sans entrer dans les détails on peut signaler que trois fonctions sont couramment utilisées pour décrire leur distribution en taille : la loi de puissance de Junge, la distribution gamma modifiée (MGD) et la distribution log-normale (LND).

En télédétection les paramètres les plus utilisés pour la caractérisation des aérosols sont : leur fonction de phase, leur épaisseur optique à 550 nm (Aérosol Optical Thickness : AOT) ainsi que la visibilité météorologique. La notion de fonction de phase a déjà été introduite plus haut. En ce qui concerne l'AOT, il s'agit de l'épaisseur optique $\int_{sol}^{\infty} \gamma(z)dz$ telle que définie plus haut, obtenue en ne considérant que l'extinction par les aérosols à 550 nm.

La visibilité météorologique est définie comme la distance pour laquelle le contraste optique de l'image d'un objet diminue à 2 % de ce qu'il devrait être s'il était proche de nous. La visibilité est mesurée à 550 nm, longueur d'onde correspondant au maximum du spectre solaire (Martinez-Lozano et al., 2001). Elle est donnée par la formule de Koschmieder (Koschmieder, 1924) :

$$Visibilité\ météorologique = \frac{1}{Ext_{550}} \ln \frac{1}{\varepsilon} \qquad (III.17)$$

avec ε le seuil de contraste (0.02) et Ext_{550} le coefficient d'extinction à 550 nm ce qui donne :

$$Visibilité\ météorologique = \frac{3.912}{Ext_{550}} \qquad (III.18)$$

Les propriétés optiques des aérosols, leur concentration ainsi que leur répartition spatiale et temporelle sont fortement liées à leur origine. La plupart des sources d'aérosols se trouvent au niveau du sol. Par conséquent, la troposphère contient une grande quantité d'aérosols. Leur concentration et leur type varient fortement dans le temps et l'espace en fonction de leurs conditions de production et du transport. Le phénomène de sédimentation dû à la gravité contribue à éliminer progressivement les particules de plus grandes dimensions en fonction de l'altitude. De fait, la concentration en aérosols chute rapidement avec l'altitude. On trouve des aérosols de petite dimension dans la stratosphère. Ils sont produits principalement par le processus de conversion gaz-particule et par les injections issues des éruptions volcaniques. Une petite partie de ces aérosols est d'origine extraterrestre. Leur concentration maximale se trouve dans une région appellée couche d'aérosols de Junge (vers 20 km d'altitude). Leur durée de vie varie de quelques mois à quelques années.

3.2 Mesure à distance de la fluorescence

3.2.1 Ce qui change au niveau du signal

Dans toute la suite, nous considérons un capteur mesurant en visée verticale à une certaine altitude *h*. Bien sur, les mêmes phénomènes se produisent lorsque la visée n'est pas verticale. La *Figure III.6* montre les différents chemins optiques suivis par les photons détectés par le capteur.

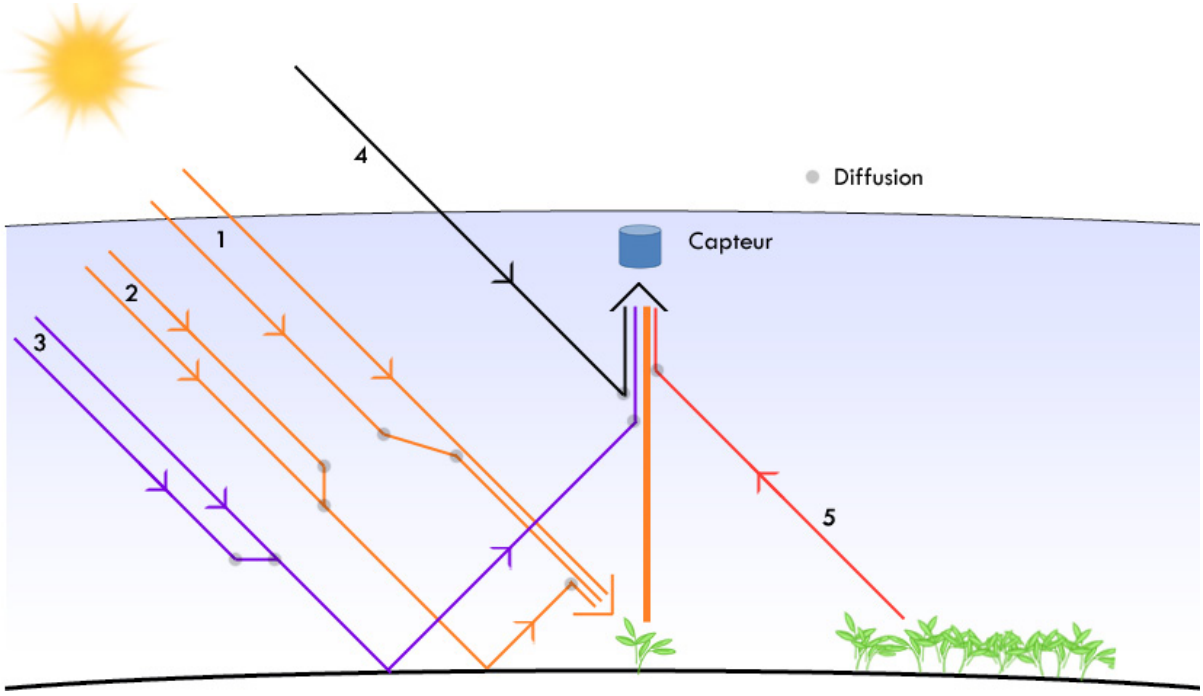


Figure III.6 *Vue schématique des différentes contributions au signal mesuré par le capteur*

La contribution qui nous intéresse dans le flux mesuré sera le flux venant de la cible (en orange sur la figure). La cible est principalement éclairée par le rayonnement direct et le rayonnement diffus (voir trajet 1 de la *Figure III.6*), mais également par une contribution venant de l'environnement : une partie du flux lumineux réfléchi par l'environnement de la cible est diffusé vers elle (voir trajet 2 de la *Figure III.6*). Le flux mesuré provenant de la cible, est donc la partie réfléchie vers le capteur de ces contributions.

Lorsqu'on mesure à distance, trois effets vont modifier le signal d'origine : l'extinction du signal réfléchi par la végétation, la contribution de l'atmosphère (trajet 4 de la *Figure III.6*) et la contribution de l'environnement (trajet 3 de la *Figure III.6*).

- ***Extinction du signal***

Le premier effet atmosphérique, en comparaison avec une mesure faite au sol, sera l'extinction (absorption et diffusion) du signal venant de la plante le long du trajet cible-capteur. Cette extinction sera fonction de l'altitude du capteur et de l'état de l'atmosphère.

- ***Contribution de l'atmosphère*** *(trajet n°4, Figure III.6)*

La contribution de l'atmosphère (*path radiance)* est due à la rétrodiffusion vers le capteur d'une partie du flux lumineux avant qu'il n'interagisse avec le sol (voir trajet 4 de la *Figure III.6*). Cette rétrodiffusion se fait dans la masse d'air comprise entre la cible et le capteur. Sa contribution dépend donc uniquement de l'altitude et des conditions atmosphériques. Elle ne dépend ni de la cible, ni de l'environnement de la cible.

La proportion de cette contribution au signal total sera d'autant plus importante que le flux réfléchi par la cible sera faible.

- ***Contribution de l'environnement*** *(trajet n°2 et 3, Figure III.6) :*

L'environnement contribue de deux manières au signal mesuré:

- Contribution à l'éclairement de la cible : une partie du flux réfléchi par l'environnement est rétrodiffusée vers la cible (puis réfléchie par le capteur) (voir *Figure III.6.2*). Cette contribution existe toujours, ce n'est pas un effet de la mesure à distance.

- Une partie du flux réfléchi par l'environnement est diffusé par les composants de l'atmosphère vers le capteur sans avoir interagi avec la cible (voir *Figure III.6.3*). Cette contribution dépend directement de la quantité de masse d'air entre la cible et le capteur, donc de l'altitude. On l'appelle *adjacency effect.*

Ces deux contributions dépendent des conditions atmosphériques et de la réflectance de l'environnement de la cible. La part de la contribution de l'environnement dans le signal total dépend directement du contraste entre la cible et l'environnement : si la cible a une réflectance faible et l'environnement une réflectance forte, la contribution de l'environnement sera importante et inversement.

Et, puisqu'on s'intéresse à des cibles fluorescentes, on peut signaler également dans les contributions ne provenant pas de la cible, la diffusion de la fluorescence émise par la végétation dans son voisinage (voir *Figure III.6*, trajet 5). Dans la suite nous ne tiendrons pas compte de cette contribution. Cependant, bien que faible, elle peut probablement représenter une fraction substantielle de la fluorescence émise par la cible lorsque la cible est entourée de végétation.

On peut réécrire l'équation *(II.15)* présentée au CHAPITRE II section 2.3.5, pour tenir compte des différents effets atmosphériques. Cette fois la radiance mesurée par le capteur s'écrit :

$$L = \frac{1}{\int S(\lambda) d\lambda} \times \int S(\lambda) \times \left[\tau(\lambda) \times \left[\frac{\rho(\lambda)}{\pi} \times I(\lambda) + f(\lambda) \right] + ATM(\lambda) + ENV(\lambda) \right] d\lambda \qquad (III.19)$$

Avec :

λ longueur d'onde

L radiance mesurée au niveau du capteur dans la direction de visée en $W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$

$S(\lambda)$ transmission du filtre (ou fonction de transfert pour un système dispersif)

$\tau(\lambda)$ transmission de l'atmosphère entre le sol et l'altitude de mesure

$\rho(\lambda)$ réflectance de la cible supposée lambertienne

I(λ) intensité lumineuse incidente au niveau du sol en $W.m^{-2}.nm^{-1}$ (somme du flux direct et du flux diffus)

f(λ) fluorescence de la cible au niveau du sol en $W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$

ATM*(λ)* la contribution de l'atmosphère au signal (par rétrodiffusion) au niveau du capteur en $W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$

ENV(λ) la contribution de l'environnement au signal au niveau du capteur en $W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$

Le facteur $\frac{1}{\int S(\lambda)d\lambda}$ permet de ramener à l'unité de mesure de bande spectrale.

Les corrections atmosphériques visent à obtenir les flux au niveau du sol à partir des flux mesurés à une certaine altitude. Autrement dit il va falloir estimer la transmission, la contribution de l'atmosphère et de l'environnement afin de corriger le signal mesuré.

3.2.2 Détermination de la profondeur de référence

Il nous faut à présent aborder le problème du choix de la référence. Au sol nous avions une référence blanche non fluorescente à côté de notre cible qui nous permettait d'avoir une estimation du flux incident. En altitude, il y a deux manières de faire une mesure de référence : on peut soit mesurer le flux incident à l'altitude *h*, l'irradiance, (en visant vers le haut) soit prendre la radiance d'une cible non fluorescente au sol.

Pour pouvoir mesurer l'irradiance notre instrument doit être capable de regarder en haut et en bas en même temps. Ce type de mesure n'est pas évident à mettre en place en utilisant un seul capteur, surtout à bord d'un avion. De plus, bien qu'elle contienne la majeure partie de l'éclairement de la cible, la mesure de l'irradiance en altitude ne tiendra pas compte de l'éclairement de la cible par l'environnement.

Mesurer la radiance d'une cible non fluorescente au voisinage de la végétation permet d'avoir une estimation du flux de référence tenant compte des conditions atmosphériques locales. En appliquant les mêmes facteurs de correction aux mesures de référence et à la mesure sur la végétation, les erreurs introduites sur le modèle seront les mêmes sur les deux flux et il n'y aura pas d'effet différentiel. Cette méthode a cependant l'inconvénient, dans le cas de mesures avionnées de dépendre entièrement de la présence de champs sur la ligne de vol. Si la mesure dure longtemps, ces champs doivent être suffisamment nombreux et régulièrement répartis durant le vol. Il faut être sûr d'avoir, au voisinage de la végétation, une mesure représentant les conditions locales d'éclairement.

Pour obtenir une valeur de profondeur de référence, on peut également utiliser un résultat issu de la modélisation. Si elle était suffisamment précise, la modélisation de la profondeur des bandes de l'oxygène permettrait d'avoir tout le long du vol une profondeur de référence. On peut alors envisager d'utiliser la profondeur mesurée sur des champs nus pour vérifier/calibrer les profondeurs modélisées.

3.3 Mesures à différentes altitudes

En juin 2005 à Barrax (près d'Albacete, Espagne), a eu lieu la campagne SEN2FLEX (Sentinel-2 Fluorescence Experiment) organisée par l'ESA. C'est pendant cette campagne que l'instrument AirFLEX a volé pour la première fois. Le site de Barrax est un site idéal pour les mesures de

fluorescence au niveau du champ. En effet, c'est une zone d'agriculture avec de larges champs cultivés circulaires (voir *Figure III.7*). Les champs ont des transitions nettes et il est facile de les identifier. Pendant trois jour, des vols ont été effectués à la même heure et suivant le même parcours, à quelques dizaines de mètres près (ce qui est largement inférieur à la taille des champs).

Cette première campagne de mesure avionnée a été l'occasion de faire des mesures à différentes altitudes. Ainsi pendant 4 jours, des vols reproduisant la même trajectoire ont été répétés entre 300 m et 3000 m. Ces vols étaient destinés à observer la modification du signal avec l'altitude. Dans le même temps, des mesures visant à définir les conditions atmosphériques étaient effectuées. Parmi celles-ci citons :

- Des radiosondages : deux sondes (Vaisala RS80) étaient lâchées chaque jour, chargées de mesurer la pression, la température et l'humidité.
- Caractérisation du contenu en aérosol : un LIDAR pour le profil vertical, un CIMEL CE-318 pour l'AOT (Aereosol Optical Thickness) et le contenu en eau, et un photomètre Microtops II configuré pour mesurer le contenu en ozone, le contenu en vapeur d'eau et l'AOT à 1020 nm.

Le 3 juin 2005 la zone d'observation a été survolée à quatre altitudes différentes : 300 m, 600 m, 1200 m et 3000 m aux alentours du midi solaire. La trajectoire suivie est montrée sur la *Figure III.7*. La zone de mesure est la grande ligne droite SO-NE, au centre la figure.

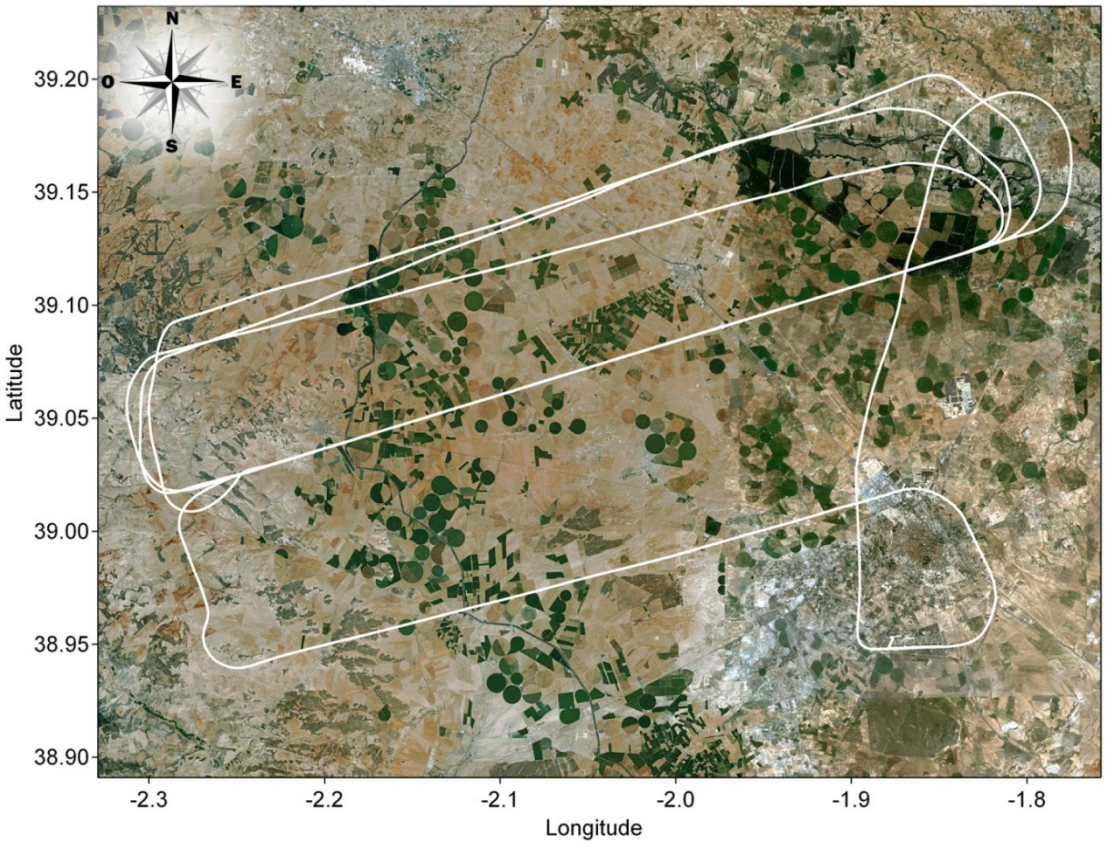


Figure III.7 *Ligne de vol suivie le 3 juin 2005. Latitude et longitude sont exprimées en degrés décimaux. Image de Google Earth. Cette image n'est pas représentative de l'état de la végétation au moment de la mesure.*

Dans la suite nous allons nous intéresser à une portion représentative de la ligne de vol. Cette portion a été choisie car elle contient un champ de blé vert (NDVI ~ 0.85) et un champ nu (NDVI ~ 0). Les valeurs des profondeurs mesurées sur cette zone à 300 m d'altitude sont présentées sur la *Figure III.8*. On voit clairement la variation de profondeur lorsque l'on passe de la végétation au champ nu. La profondeur passe de 1.45 (O_2-B) et 4.3 (O_2-A) sur le champ nu à 1.38 (O_2-B) et 4.09 (O_2-A) sur le blé.

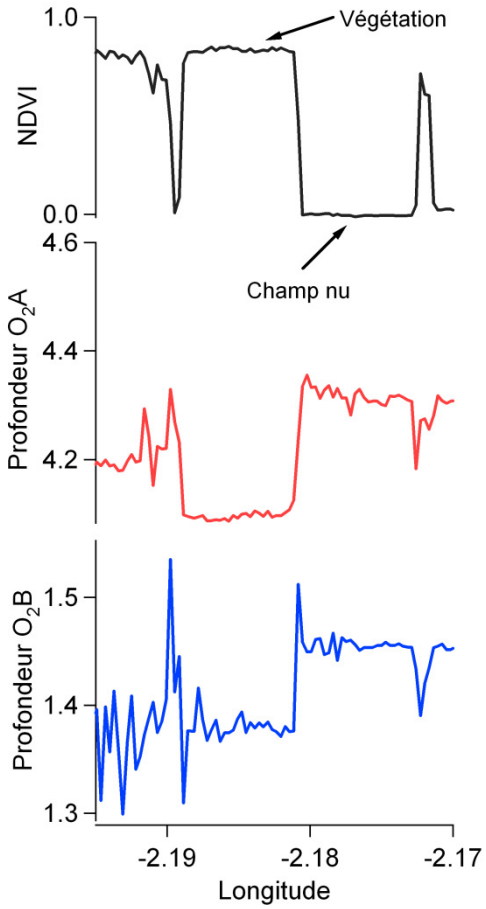


Figure III.8 *Détails de la variation des profondeurs de l'oxygène pour une portion de ligne de vol à une altitude de 300m. Les signaux sont présentés en fonction de la longitude : sur une portion aussi petite la latitude varie de façon négligeable.*

La *Figure III.9* présente les signaux de profondeurs pour les survols aux différentes altitudes. Dans les deux bandes la profondeur augmente avec l'altitude. On voit également l'effet de l'intégration spatiale (à 300 m le diamètre du spot au sol est de l'ordre de 10 m, alors qu'il est de l'ordre de 100 m à 3000 m) le signal semble moins « bruité » à 3000 m et on voit que les transitions se font plus tôt.

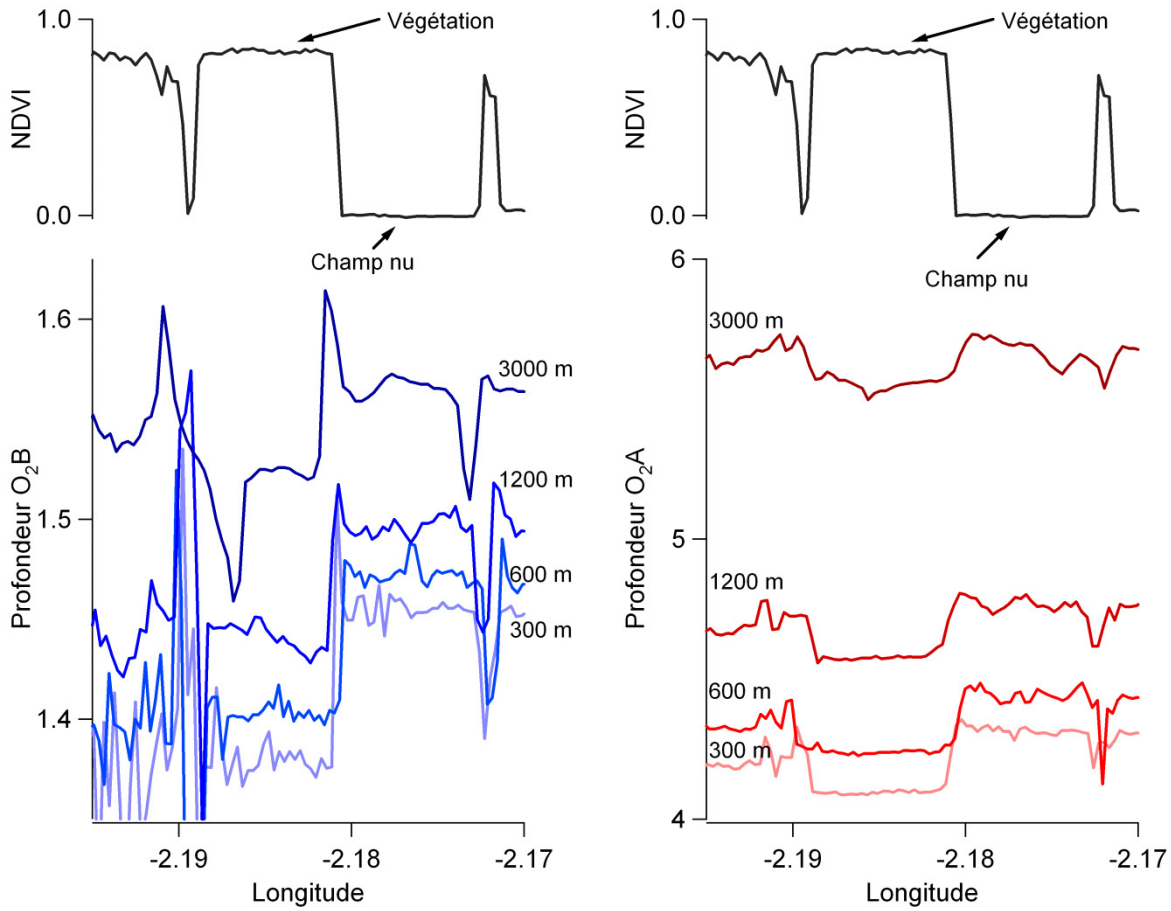


Figure III.9 *Profondeurs mesurées aux différentes altitudes pour la portion de ligne de vol choisie.*

3.3.1 Evolution des flux en fonction de l'altitude

La *Figure III.10* donne l'évolution des flux mesurés sur le champ nu dans les deux bandes de l'oxygène. Les flux sont obtenus en intégrant toutes les mesures faites sur le champ. Les barres d'erreurs représentent la déviation standard des valeurs mesurées.

Cette figure montre que, dans les deux bandes de l'oxygène, le flux au bord des bandes a tendance à augmenter avec l'altitude, alors que le flux au fond a tendance à diminuer. L'augmentation des flux aux bords semble indiquer que les pertes – qui se font essentiellement par diffusion dans ces gammes de longueurs d'onde – sont compensées par les contributions de l'atmosphère et de l'environnement. Cela est possible si la réflectance de la cible est suffisamment faible pour que les contributions de l'atmosphère et de l'environnement ne soient pas négligeables devant le flux réfléchi. Un champ nu a une réflectance de l'ordre de 0.25 à 687 nm et 760 nm.

Le flux réfléchi au fond des bandes est encore plus faible que le flux au bord et dans ce cas, comme le montre la *Figure III.10*, la diminution du flux due à l'absorption est plus forte que les contributions additives de l'atmosphère et de l'environnement, de sorte que le flux au fond des bandes diminue avec l'altitude.

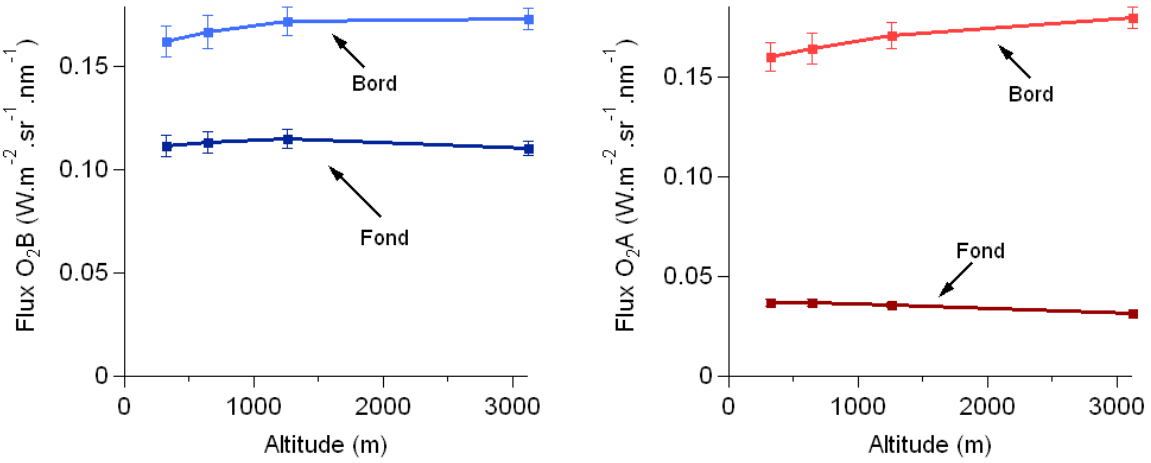


Figure III.10 *Evolution des flux en fonction de l'altitude pour les deux bandes de l'oxygène, mesurés par AirFLEX le 3 juin 2005 au dessus d'un champ nu.*

La *Figure III.11* montre l'évolution des flux en fonction de l'altitude pour le champ de blé. Le comportement des flux est cette fois assez différent, principalement dans la bande O_2-B. Dans cette bande, les flux au bord de la bande et au fond augmentent tout les deux avec l'altitude. L'augmentation est très marquée, le flux au bord varie d'un facteur supérieur à 2 entre 300 m et 3000 m. Ce comportement s'explique par la faible réflectance de la végétation dans cette gamme de longueurs d'onde : elle est de l'ordre de 0.04 à 687 nm. En conséquence, le flux réfléchi est très faible et les contributions de l'environnement et de l'atmosphère deviennent majoritaires.

Dans la bande O_2-A, le comportement est similaire à celui que l'on avait sur le champ nu, à ceci près que la réflectance de la végétation étant plus forte (entre 0.4 et 0.6) l'évolution du flux au bord est moins influencée par les contributions de l'atmosphère et de l'environnement. Le flux ne varie quasiment pas entre 300 et 3000 m. Au fond, le flux diminue plus rapidement, dominé par les effets d'absorption particulièrement forts dans cette bande.

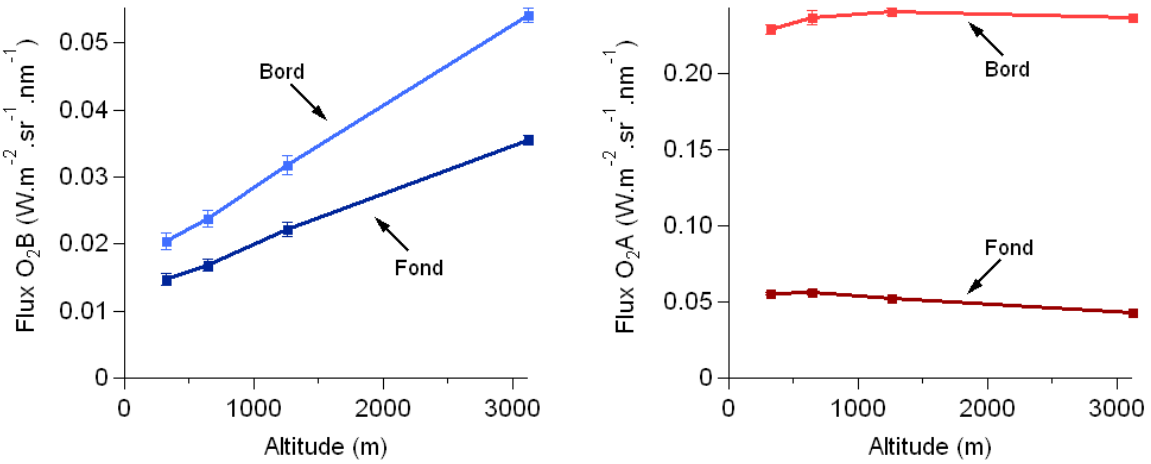


Figure III.11 *Evolution des flux en fonction de l'altitude pour les deux bandes de l'oxygène, mesurés par AirFLEX le 3 juin 2005 au dessus de végétations.*

On voit grâce à ces mesures que l'évolution des signaux en fonction de l'altitude va dépendre de nombreux paramètres : la réflectance de la cible, la réflectance de l'environnement et les conditions atmosphériques. Selon les valeurs de ces paramètres, on voit que le comportement des signaux pourra

changer du tout au tout, comme le montrent les différences de comportement dans la bande O_2-B entre le champ nu et la végétation. Ainsi chaque contribution devra être évaluée précisément et aucune ne devra être négligée pour pouvoir rendre compte de la modification des signaux avec l'altitude.

3.3.2 Evolution des profondeurs des bandes de l'oxygène en fonction de l'altitude

La *Figure III.12* présente la variation de la profondeur dans les deux bandes de l'oxygène en fonction de l'altitude pour une mesure sur un champ nu (NDVI ~ 0) et sur le champ de blé (NDVI ~0.85).

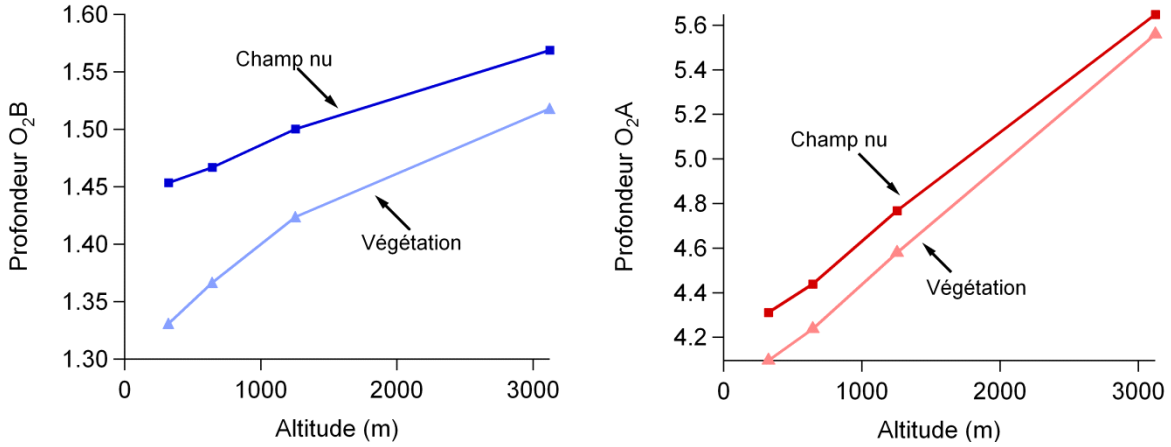


Figure III.12 *Variation de la profondeur dans les bandes de l'oxygène mesurée sur un champ nu et sur la végétation par AirFLEX, en fonction de l'altitude de mesure. Données du 3 juin 2005 à BARRAX.*

Pour la bande O_2-B, la variation de profondeur entre 300 m et 3000 m sur le blé est de l'ordre de 10 % et elle est de l'ordre de 7 % sur le champ nu. Cette différence de comportement peut être imputée comme nous l'avons déjà vu à la différence de réflectance qu'il y a à 687 nm entre le champ nu (réflectance ~0.25) et la végétation (réflectance ~0.04) : les flux mesurés sur la végétation sont très faibles et ils seront bien plus modifiés par les contributions de l'atmosphère et de l'environnement que les flux sur le champ nu. Ces effets seront discutés dans les sections suivantes. Les mesures sur les deux types de cibles étant faites successivement, on peut considérer en première approximation que la variation de profondeur induite par la fluorescence est représentée par l'écart entre ces deux courbes. On voit alors que la variation de profondeur induite par le changement d'altitude (entre 300 et 3000 m) est du même ordre de grandeur que la variation induite par la fluorescence.

Pour la bande O_2-A, on voit que la variation de profondeur induite par la fluorescence est bien plus faible que la variation due au changement d'altitude. Le passage de 300 m à 3000 m entraîne une variation de profondeur de l'ordre de 30% pour le champ nu et de 35 % sur la végétation.

Ces mesures à différentes altitudes mettent en évidence l'influence des phénomènes de transfert radiatif dans l'atmosphère qui viennent modifier le signal lorsqu'on mesure à distance. Ces processus n'agissent pas de la même manière dans la bande O_2-A et dans la bande O_2-B et induisent des changements de profondeurs qui sont du même ordre de grandeur ou supérieurs aux changements induits par la présence de végétation. On voit donc bien qu'il est important de pouvoir en tenir compte dans les calculs de fluorescence.

Pour faire des mesures à distance il faut donc pouvoir estimer ces différentes contributions, ce que nous nous proposons de faire en utilisant un code de transfert radiatif. Ce code de transfert radiatif va

être utilisé pour tenir compte principalement des effets d'absorption dans les bandes de l'oxygène. Il faut donc s'assurer qu'il permet de modéliser cette absorption avec suffisamment de précision. A cette fin, des mesures dédiées à la validation de ce modèle pour notre problème ont été effectuées durant la campagne SEN2FLEX. Elles seront présentées dans la section 3.6.1.

Nous allons dans un premier temps nous pencher sur le modèle qui a été retenu.

3.4 Modélisation

3.4.1 MODTRAN

MODTRAN *(MODerate Spectral Resolution Atmospheric TRANsmittance Algorithm*), est un code de transfert radiatif par bande développé conjointement par *Spectral Sciences, Inc* et le *Air Force Laboratory/Space Vehicles Directorate (AFRL/VS)*. Il s'agit d'une amélioration du modèle LOWTRAN7 (LOW resolution TRANsmittance 7) (Kneizys et al., 1988). Sa résolution est de 20 cm^{-1} dans l'UV (200 nm - 440 nm) et de 2 cm^{-1} pour les plus grandes longueurs d'onde. MODTRAN 4 utilise la base de données HITRAN96 (High resolution TRANsmittance) (Rothman, 1998) pour son modèle de bande. La version 4 de MODTRAN (Berk et al., 1987; Berk et al., 1998; Berk et al., 2003) est la dernière version accessible au public. La version 5 a été développée mais n'était pas disponible au moment de cette étude.

MODTRAN décrit l'atmosphère en symétrie sphérique, comme une succession de couches homogènes. Chaque couche est caractérisée par son altitude, une valeur de pression, température et de concentration des différents constituants de l'atmosphère.

Pour notre problème de modélisation dans les bandes de l'oxygène, la bonne prise en compte des phénomènes d'extinction (absorption et diffusion) est primordiale. L'absorption est directement responsable de la création de ces bandes. La diffusion va augmenter le trajet optique donc augmenter l'absorption et la profondeur des bandes. Le couplage entre ces deux effets doit être pris en compte pour l'estimation des profondeurs des bandes de l'oxygène. MODTRAN répond à ce besoin dans le sens où il prend en compte de manière précise l'extinction due aux molécules et aux aérosols pour chaque trajet optique, c'est-à-dire qu'il tient compte de l'extinction entre deux diffusions consécutives. Pour ce qui est de la diffusion multiple, DISORT (DIScrete Ordinate Radiative Transfer) (Stammes et al., 1988) a été intégré dans MODTRAN 4. DISORT est utilisé par MODTRAN pour prendre en compte la diffusion multiple dans chaque couche. Le résultat étant utilisé pour forcer la couche suivante.

Dans les phénomènes de diffusion multiple les aérosols jouent un rôle important. Pour les aérosols, MODTRAN divise par défaut l'atmosphère en quatre couches : 0-2 km : aérosols de couche limite, 2-10 km aérosols troposphériques, 10-30 km aérosols stratosphériques, 30-100 km : aérosols mésosphériques. Plusieurs modèles ont été implantés dans MODTRAN permettant de définir les aérosols dans la couche limite ; il s'agit des modèles standards : rural, maritime, urbain, troposphérique et désertique (Shettle et Fenn, 1979). Dans les couches supérieures des profils saisonniers sont automatiquement sélectionnés. On peut alors faire varier la quantité d'aérosol en utilisant le paramètre de visibilité météorologique. Il est également possible d'entrer manuellement des données d'aérosols comme nous le verrons plus tard.

Pour ce qui est de la surface, MODTRAN permet de définir le pixel cible comme une surface lambertienne ayant un certain albédo, mais il permet également de définir une BRDF. Il est également

possible dans MODTRAN 4 de tenir compte des effets d'environnement. : on peut choisir pour le pixel cible une certaine réflectance et faire de même pour l'environnement.

Nous avons donc retenu MODTRAN comme modèle pour la modélisation des phénomènes atmosphériques car il est capable de résoudre les bandes de l'oxygène et de tenir compte des effets de diffusion, extinction. Ces effets sont primordiaux lorsqu'on s'intéresse à des bandes d'absorption atmosphériques. La version que nous utilisons est la version 4 (v1r1).

MODTRAN va être utilisé pour évaluer la variation des bandes de l'oxygène dans différentes conditions. Sa validation se fera en considérant la forte variation de profondeur au cours du cycle diurne. Nous allons dans un premier temps faire une étude de sensibilité afin de déterminer quels sont les paramètres importants dans l'estimation de la profondeur de l'oxygène. Nous considérerons à la fois les paramètres atmosphériques et les paramètres caractérisant l'instrument.

3.4.2 MODTRAN - Décalage en longueur d'onde

Lorsqu'il s'agit de modéliser la profondeur des bandes de l'oxygène mesurée par AirFLEX, il est primordial de connaître parfaitement la position et la largeur des canaux. Un léger décalage en longueur d'onde peut induire de fortes erreurs sur l'estimation de la profondeur modélisée (voir section suivante).

Les premiers résultats que nous avons obtenus lorsque nous nous sommes attelés à la modélisation des signaux de TerFLEX n'étaient franchement pas bons. Nous avons donc commencé par vérifier systématiquement toutes les sources d'erreurs possibles en ce qui concerne la connaissance des caractéristiques de l'instrument. Après quelques efforts de calibration (voir section 3.6.4) nous en sommes arrivés à nous poser des questions sur les données renvoyées par MODTRAN. En traçant une radiance renvoyée par MODTRAN en face de la transmission des filtres de TerFLEX nous avons eu la mauvaise surprise de voir que les filtres au fond étaient assez mal placés : une partie des filtres était clairement dans la pente gauche de la bande d'absorption. La position n'était absolument pas optimale.

Les filtres ayant été positionnés par l'analyse d'un spectre solaire donné par Delbouille et al., 1973 (que l'on peut retrouver ici : http://bass2000.obspm.fr/solar_spect.php), et la longueur d'onde centrale mesurée étant celle attendue, nous nous sommes demandé si l'erreur ne venait pas de MODTRAN. Nous avons donc comparé le spectre donné par Delbouille et al., 1973 à un spectre renvoyé par MODTRAN. Il est important de noter que ce qui nous intéresse est de détecter un éventuel décalage en longueur d'onde. Nous nous intéressons donc à la position des minima et maxima et non à leur intensité. Dans la suite nous ne présentons que les résultats obtenus dans la bande B de l'oxygène (687 nm), mais les mêmes constatations ont été faites dans la bande A. La *Figure III.13* permet de comparer un spectre renvoyé par MODTRAN et le spectre solaire donné par Delbouille et al., 1973. Sur cette figure, la résolution du spectre solaire de référence a été légèrement dégradée pour permettre la visualisation. On voit clairement que le spectre renvoyé par MODTRAN semble décalé vers les grandes longueurs d'ondes de l'ordre de 0.2 nm. Ce qui est assez important pour fausser complètement l'estimation du flux au fond de la bande d'absorption !

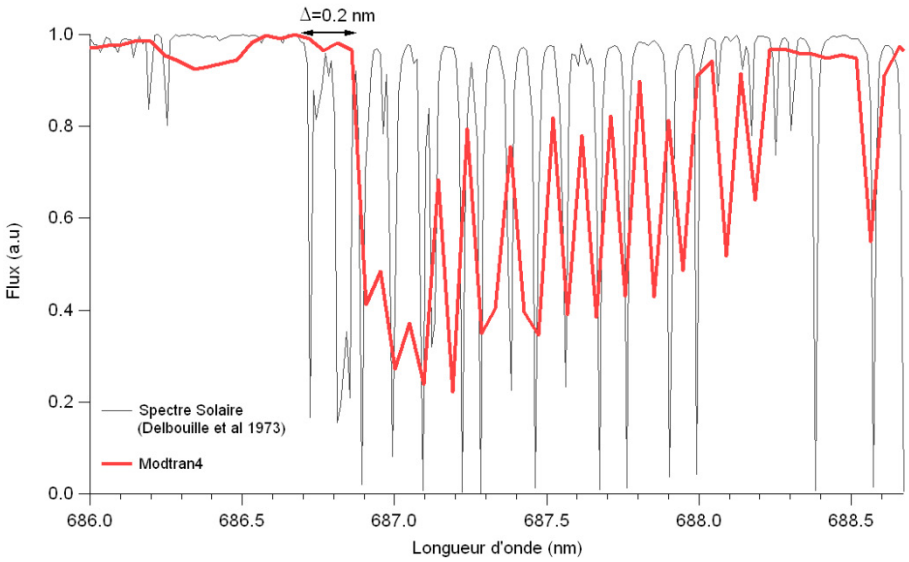


Figure III.13 *Comparaison entre un spectre solaire donné par MODTRAN4 (v1r1) et le spectre solaire donné par Delbouille et al., 1973. (La résolution du spectre à été dégradée pour permettre la visualisation).*

Après avoir constaté ce décalage nous avons décidé de faire une mesure de spectre solaire afin d'avoir une troisième source permettant de trancher entre les deux spectres. La mesure a été faite le 5 octobre 2007 à Palaiseau. Il s'agit d'une mesure en réflexion sur une plaque de Spectralon à l'aide d'un spectromètre Ocean Optics HR4000 et d'une fibre optique. Ce spectromètre couvre la plage de longueur d'onde 652 nm - 699 nm pour 2048 pixels (0.023 nm/pixel). Sa fente d'entrée fait 5 µm de largeur et sa FWHM est de l'ordre de 0.1 nm. Le spectromètre a été calibré en longueur d'onde en utilisant une lampe de calibration fibrée Mercure-Argon (Mikropack). Nous avons utilisé la raie de l'argon à 696.543 nm pour le calibrer et mesurer sa réponse instrumentale. Le spectromètre était régulé en température à 24.7° C aussi bien pendant la calibration que pendant l'acquisition du spectre solaire de manière à s'assurer qu'il n'y aurait pas de déviation en longueur d'onde due à un changement de température.

Pour permettre la comparaison, le spectre donné par Delbouille et al., 1973 a été convolué avec la fonction de réponse du spectromètre. La comparaison est présentée sur la *Figure III.14*. On voit sur cette figure que la corrélation entre les deux spectres est bonne : l'écart moyen est de 0.03 nm, bien inférieur aux 0.2 nm constatés entre MODTRAN et le spectre de référence. Cet écart est dans l'ordre de grandeur des incertitudes quant à la calibration en longueur d'onde. Il semble donc bien que le spectre renvoyé par MODTRAN soit décalé en longueur d'onde par rapport à la réalité.

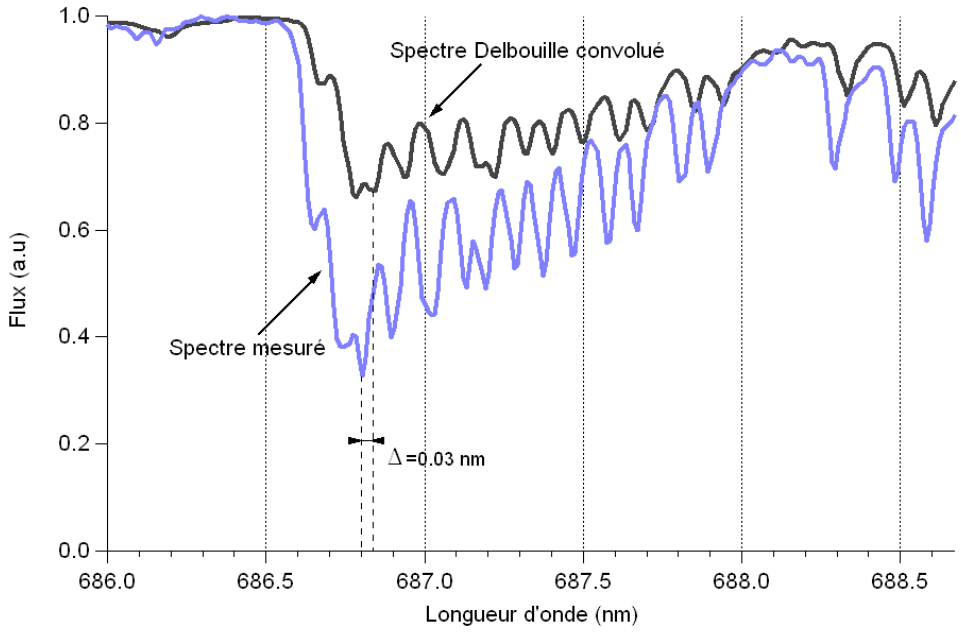


Figure III.14 *Comparaison entre une mesure de radiance du spectre solaire effectuée à l'aide d'un spectromètre haute résolution et le spectre solaire donné par Delbouille et al., 1973 convolué par la fonction instrumentale du spectromètre.*

En calculant une fonction de corrélation entre le spectre de MODTRAN et le spectre solaire de référence (Delbouille et al., 1973), nous avons déterminé le décalage entre ces deux spectres pour les bandes O_2-A et O_2-B. La *Table III.1* présente ces résultats.

	Décalage (nm)
Bande O_2-B	0.188
Bande O_2-A	0.203

Table III.1 *Décalage en longueur d'onde entre le spectre de référence donné par Delbouille et al., 1973 et les spectres renvoyés par MODTRAN dans les bandes de l'oxygène.*

Tous les spectres générés par MODTRAN présentés dans ce manuscrit sont corrigés de ce décalage en utilisant la valeur la plus proche de la zone spectrale analysée.

3.5 Etude de sensibilité

Avant de nous pencher sur la validation du modèle, nous avons réalisé une étude de sensibilité pour savoir quels sont les paramètres influençant la profondeur des bandes. Dans toute la suite la configuration par défaut de MODTRAN est celle présentée dans la *Table III.2*. Les données de position, d'élévation, d'altitude et de dates correspondent à la position de TerFLEX (voir section 3.6.1) durant la campagne SEN2FLEX.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Calculation option	Correlation-K	*Solar irradiance source*	File Sun 2
Correlation-K speed	Slow	*Triangular filter width*	2 cm^{-1}
Model Atmosphere	MidLatSummer	*Aérosol model*	Rural – VIS=23 km
Type of atmospheric path	Slant path to ground	*Other aérosols features*	Default
Mode of Execution	Radiance w/ Scattering	*Ground altitude above sea*	0.696 km
Multiple scattering	MS on Flux at observer	*Observer Height*	0.698 km
Atmospheric profile	All to default	*Zenith angle*	180°
Water Vapor	Default	*FWHM of slit function*	1 cm^{-1}
CO2 Mixing ration	365 ppmv	*Slit function type*	Triangular
Scattering algorithm	Disort	*Aérosol phase function*	Mie
Disort Streams	16	*Day of year*	153
T° at first boundary	Default (298K)	*Observer Latitude*	39.05
Surface albedo	1	*Observer Longitude*	2.10

Table III.2 *Paramètres utilisés pour la configuration de MODTRAN4. La latitude et la longitude correspondent à la position de TerFLEX durant la campagne SEN2FLEX. Le jour 153 est un 2 juin.*

Les simulations se feront principalement au midi solaire, qui est la plage horaire la plus favorable pour la mesure du point de vue de la variabilité des bandes d'absorption (qui est faible entre 11 h et 13 h, heure solaire). Dans la suite nous allons utiliser, pour la configuration des canaux de mesures (position, largeur), les valeurs correspondant à la configuration de TerFLEX. Cependant, afin de rester dans le cas général, nous n'utiliserons pas les fonctions de transmission des filtres de TerFLEX réelles, mais des gaussiennes de largeur équivalente (0.5 nm dans la bande O_2-B et 1 nm dans la bande O_2-A).

Pour estimer l'importance du paramètre que l'on analyse, la variation de profondeur induite par le paramètre sera comparée :

- à l'incertitude sur les profondeurs dues à l'intercalibration du capteur. Elle est de l'ordre de 1% sur les profondeurs
- à la variation de profondeur induite par la végétation.

La grande majorité des mesures de fluorescence faites au cours de cette thèse donnent des fluorescences maximales autour de 2-3 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$. D'après l'étude faite dans la section 2.3.1 du CHAPITRE II, une variation de profondeur de 1 % équivaut à une fluorescence comprise entre 0.25 et 0.35 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$, cela représente une incertitude de 10 % sur la fluorescence. Ce qui est une

valeur raisonnable pour l'estimation de la fluorescence. On retiendra donc au final que les variations de profondeurs supérieures au pourcent seront significatives vis-à-vis du signal de fluorescence.

3.5.1 Variations induites par une erreur de calibration

- ***Calibration en longueur d'onde***

La position en longueur d'onde des canaux de mesures est une donnée obtenue par calibration du capteur. Afin de connaître la précision nécessaire à cette calibration il faut estimer la variation de profondeur induite par un décalage en longueur d'onde. La *Figure III.15* présente cette variation en fonction du décalage en longueur d'onde. Ce décalage s'applique aux deux canaux de mesure. La principale contribution de cette variation est bien entendu le décalage appliqué au canal du fond. On voit sur cette figure qu'un décalage de ± 0.2 nm induit jusqu'à 5 % de variation pour la bande O_2-B et jusqu'à 10 % dans la bande O_2-A. La bande O_2-A étant bien plus prononcée que la bande O_2-B, l'erreur due à un décalage en longueur d'onde est plus importante. De telles variations sont, au minimum, du même ordre de grandeur que la variation introduite par la fluorescence, il est donc important de connaitre la position des canaux avec une précision bien meilleure que 0.2 nm pour pouvoir simuler une mesure avec un capteur.

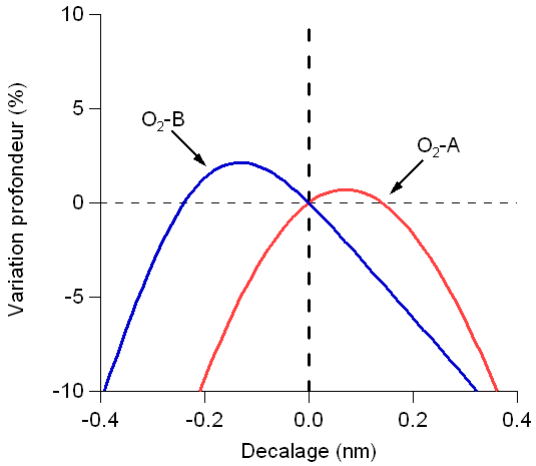


Figure III.15 *Variation de la profondeur du rayonnement incident en fonction du décalage en longueur d'onde des filtres TerFLEX. En bleu pour la bande O_2-B, en rouge pour la bande O_2-A.*

- ***Forme de la transmission des filtres***

De même que la position des canaux, leur largeur est un paramètre qui sera obtenu après calibration du capteur. S'il est mal connu il peut lui aussi entraîner des erreurs sur la modélisation des profondeurs. La *Figure III.16* donne la variation de profondeur induite par un changement de largeur des filtres. Cette fois une erreur de 0.2 nm pour la largeur induit une erreur de 3 % pour la bande O_2-B et de 10 % pour la bande O_2-A. Ces variations sont importantes par rapport aux variations dues à la végétation. Une mesure précise de la largeur des filtres est nécessaire.

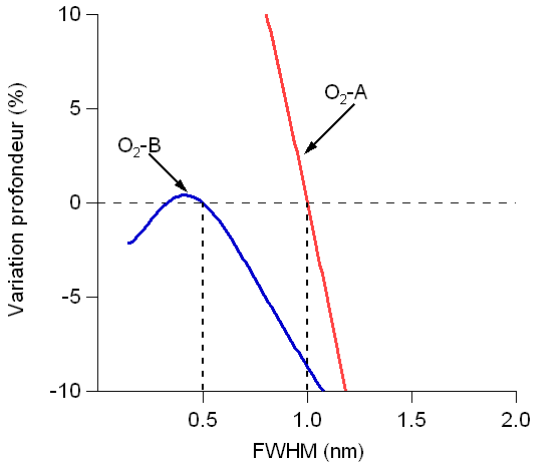


Figure III.16 *Variation de la profondeur du rayonnement incident en fonction de la largeur des filtres TerFLEX. En bleu pour la bande O_2-B, en rouge pour la bande O_2-A. Les traits verticaux donnent la valeur réelle de la largeur des filtres (0.5 nm pour la bande O_2-B et 1nm pour la bande O_2-A).*

Passons maintenant à la sensibilité aux paramètres atmosphériques.

3.5.2 Modèle – Modèle d'atmosphère

Le premier paramètre à entrer lorsque l'on configure MODTRAN est le type d'atmosphère que l'on souhaite utiliser. MODTRAN propose six types d'atmosphère standards : Tropical , 1976 US standard, MidLatitude Summer, MidLatitude Winter, SubArtic Summer, SubArtic Winter (McClatchey et al., 1972). Ces modèles permettent de définir les principales caractéristiques atmosphériques: profil de pression, profil de température, contenu en vapeur d'eau, ainsi que la composition et le profil des différents gaz constituants l'atmosphère. Nous avons donc étudié la variation de profondeur lorsqu'on change de modèle. La *Table III.3* donne les résultats obtenus pour une simulation faire à 12 h. Etant donné qu'au midi solaire la masse d'air traversée est minimale, les effets induits par les changements de modèle atmosphérique sont minimisés. Pour ne pas nous baser uniquement sur une masse d'air minimale nous avons fait les mêmes calculs à 16 h ; ils sont présentés dans la *Table III.4*. Dans ces deux tables, les colonnes « variation » se rapportent à la profondeur obtenue pour l'atmosphère MidLatSummer.

Modèle	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
Tropical	1.492	4.716	0.07 %	0.42 %
MidLat Summer	1.491	4.696	–	–
MidLat Winter	1.491	4.767	~0 %	1.5 %
SubArtic Summer	1.489	4.682	-0.13 %	-0.3 %
SubArtic Winter	1.488	4.745	-0.2 %	1 %
1976 US Standard	1.492	4.745	0.07 %	1 %

Table III.3 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction des différents types d'atmosphères proposées par MODTRAN. Simulation faite à 12h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues pour le modèle MidLatSummer.*

Modèle	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
Tropical	1.663	7.526	0.18 %	0.60 %
MidLat Summer	1.660	7.481	–	–
MidLat Winter	1.663	7.631	0.18 %	2 %
SubArtic Summer	1.658	7.445	-0.12 %	-0.48 %
SubArtic Winter	1.659	7.570	-0.06 %	1.19 %
1976 US Standard	1.663	7.570	0.18 %	1.19 %

Table III.4 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction des différents types d'atmosphères proposées par MODTRAN. Simulation faite à 16h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues pour le modèle MidLatSummer.*

On voit que, aussi bien à 16 h qu'à midi, les variations de profondeurs dans la bande O_2-B sont faibles, inférieures à 0.2 %. Dans la bande O_2-B, le choix du modèle n'est donc pas un paramètre sensible. Dans la bande O_2-A les variations peuvent atteindre 2% ce qui devient non négligeable à la fois devant la précision du capteur et devant les variations de profondeurs induites par la végétation. Cependant, cette variation de 2 % intervient pour des modèles qui sont radicalement opposés (MidLat Summer/Winter) il n'y a donc pas lieu d'y voir un problème de choix du modèle.

Dans la suite, dans l'idée de modéliser les cycles diurnes des profondeurs tels qu'ils ont été mesurés pendant la campagne SEN2FLEX, nous utiliserons par défaut le modèle MidLatSummer (la campagne ayant eu lieu en Espagne et en été).

3.5.3 Modèle – Constituants de l'atmosphère

Les modèles d'atmosphère agissent de manière globale sur l'ensemble des paramètres atmosphériques. On peut maintenant regarder plus en détail quels sont les paramètres importants. MODTRAN permet d'assigner un profil pour chaque constituant de l'atmosphère. Il n'est cependant pas forcément utile de tous les analyser. En effet seuls les composants présentant des caractéristiques d'extinction aux alentours des longueurs d'onde des bandes de l'oxygène sont susceptibles de modifier leur profondeur. La *Figure III.17* présente les spectres de transmission des composants : O_2, CO_2, H_2O et O_3 pour la traversée de l'atmosphère (les autres composants ne présentent pas de caractéristiques particulières dans cette zone spectrale). Cette figure illustre la position des bandes d'absorption de l'oxygène et on voit qu'une bande de l'eau est assez proche : elle chevauche même la traîne de la bande O_2-B. Il serait donc intéressant de s'intéresser à l'influence du contenu en eau sur la profondeur modélisée. L'ozone présente une légère variation du spectre sur toute la gamme de longueur d'onde, on peut donc s'y intéresser également. Il s'agit d'une large bande d'absorption située entre 450 nm et 850 nm : la bande de Chappuis (Le Naour, 1996). Le CO_2 par contre ne présente aucune variation.

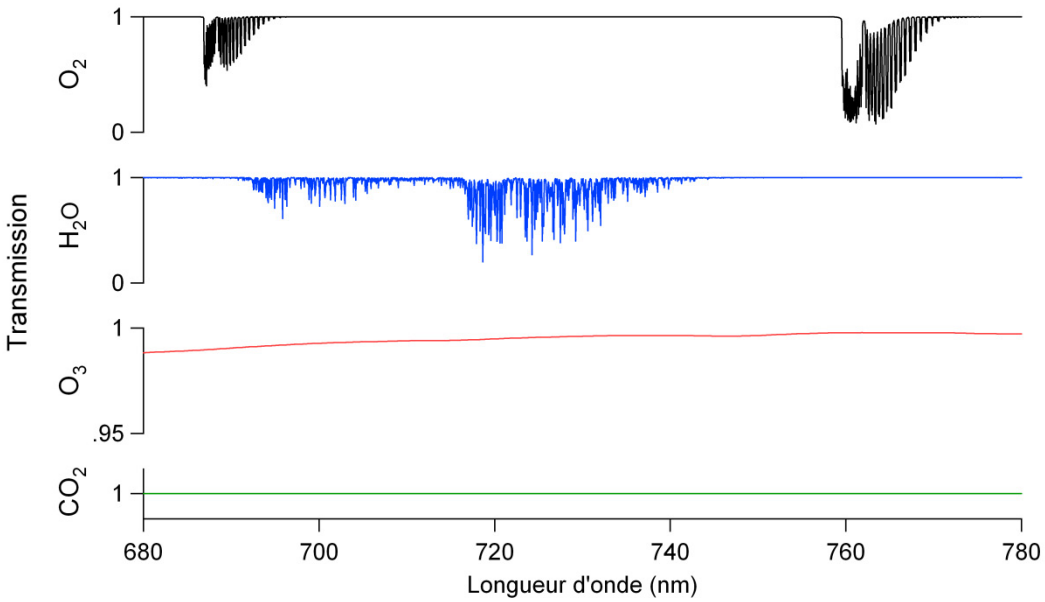


Figure III.17 *Transmission de l'O_2, de H_2O, O_3 et CO_2 contenus dans l'atmosphère pour la traversée de l'atmosphère selon les paramètres MODTRAN présentés à la Table III.2*

- ***Contenu en eau***

MODTRAN permet de définir le contenu en eau intégré sur la colonne d'air. On va donc regarder les modifications de profondeurs associées à un changement de ce paramètre. Le contenu en eau est donné en g.cm^{-2}. La modélisation sera faite pour des valeurs de contenu en eau de 0.001 g.cm^{-2} à 6 g.cm^{-2} (valeur minimale admise par MODTRAN et valeur maximale d'après des observations rapportées par Seidel, 2002). Les *Table III.5* et *Table III.6* présentent les résultats pour les profondeurs et les variations par rapport à la valeur par défaut. Dans tous les cas, les variations sont inférieures à 0.02 %, malgré des variations de contenu en eau très grandes. En pratique on pourra donc se dispenser de faire une mesure de contenu en eau : l'utilisation de la valeur par défaut (définie par MODTRAN) sera largement suffisante.

Contenu en eau (g.cm^{-2})	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
0.001	1.49037	4.69606	-0.02 %	~0 %
6	1.49052	4.69605	-0.01 %	< 0.01 ‰
Default	1.4907	4.69606	–	–

Table III.5 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du contenu en eau. Simulation faite à 12h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en laissant la valeur par défaut.*

Contenu en eau ($g.cm^{-2}$)	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
0.001	1.66003	7.48171	-0.02 %	0.01 %
6	1.66060	7.48095	-0.01 %	< 0.01 ‰
Default	1.66034	7.48094	–	–

Table III.6 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du contenu en eau. Simulation faite à 16h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en laissant la valeur par défaut.*

- ***Contenu en ozone***

L'épaisseur de la couche d'ozone dépend des conditions photochimiques et dynamiques de l'atmosphère. Elle subit de fortes variations aussi bien dans le temps que dans l'espace. Ces variations sont d'origine naturelle et anthropogénique. L'épaisseur de la couche d'ozone suit un cycle annuel corrélé à la circulation générale dans la stratosphère. Ainsi la couche d'ozone est plus fine en Octobre-Novembre et son épaisseur est maximale en Mars-Avril (http://ozone.meteo.be). La variation d'un jour à l'autre de l'épaisseur de cette couche peut aller jusqu'à 20% sous nos latitudes.

D'une manière générale le contenu en ozone à la surface du globe est compris entre 0.15 atm-cm et 0.5 atm-cm (Qu, 2007) [2]. Nous avons donc regardé les variations de profondeur induites par l'utilisation de ces valeurs extrêmes plutôt que la valeur par défaut. Les résultats sont reportés dans les *Table III.7* et *Table III.8*. La variation maximale est de 0.05% dans la bande O_2-B pour des contenus en ozone correspondant à des cas extrêmes. Cette amplitude de variation est bien supérieure aux 20 % de variations du contenu en ozone observables au cours de la journée. Les valeurs en elles-mêmes sont très éloignées de ce que l'on peut avoir sous nos latitudes. Dans de telles conditions, et vu la faible variation de profondeur, on peut conclure que l'on peut utiliser la valeur par défaut sans faire d'erreur significative sur la modélisation de la profondeur.

Contenu en ozone (atm-cm)	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
0.15	1.4911	4.69682	0.03 %	0.02 %
0.5	1.4901	4.69539	- 0.04 %	- 0.01 %
Default	1.4907	4.69606	–	–

Table III.7 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du contenu en ozone. Simulation faite à 12h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en laissant la valeur par défaut.*

[2] 0.5 atm-cm signifie que si l'on ramène l'ensemble du contenu en ozone de la colonne d'air à la surface de la terre à une température de 0°C et à une pression d'une atmosphère alors la couche ainsi formée à une épaisseur de 0.5cm

Contenu en ozone (atm-cm)	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
0.15	1.66116	7.48262	0.05 %	0.02 %
0.5	1.65959	7.47926	- 0.05 %	- 0.02 %
Default	1.66034	7.48094	–	–

Table III.8 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du contenu en ozone. Simulation faite à 16h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en laissant la valeur par défaut.*

3.5.4 Modèle – Pression et température

Le spectre d'absorption de la molécule d'oxygène consiste en une superposition de raies appartenant à différents spectres de transitions électroniques (rotationnelles, vibrationnelles). L'intensité de chacune de ces raies dépend de la probabilité de transition ainsi que de l'occupation de l'état initial. L'occupation de l'état initial est dépendante de la température (voir Funk, 2000). D'autre part, le spectre de chaque transition électronique, à l'origine monochromatique, va subir un élargissement spectral sous l'influence de deux effets: un élargissement par effet doppler et un élargissement dû aux collisions entre les molécules. Ces deux effets vont modifier la forme des raies. L'effet Doppler est dû à l'agitation thermique et dépend donc essentiellement de la température, l'élargissement dû aux collisions dépend lui à la fois de la température et de la pression. On pourra se référer aux travaux de Funk, 2000 pour plus de précisions sur ces phénomènes dans le cas de l'oxygène. Pression et température sont donc des paramètres modifiant la forme et l'intensité des raies des transitions électroniques qui constituent in fine les bandes d'absorption de l'oxygène.

Il est d'ailleurs intéressant de noter que la bande O_2-A est utilisée par plusieurs équipes pour déterminer la pression à la surface du globe. La méthode consiste à caractériser l'absorption en deux endroits de la bande O_2-A : au maximum d'absorption et dans la traîne. Cette mesure peut se faire de manière passive ou active. Il a été établi que le rapport entre ces deux mesures est fortement corrélé avec la pression à la surface (Barton et Scott, 1986, Bréon et Bouffiès, 1996). En comparant la pression retrouvée à la pression attendue, il est possible de détecter la présence de nuages et donc de mesurer la pression à la surface des nuages, cette méthode est largement utilisée pour les mesures satellitales : POLDER (Vanbauce et al., 1998), MOS (Dubuisson et al., 2001), GOME (Koelemeijer et al., 2002), MERIS (Dubuisson et al., 2003) et SCIAMACHY (van Diedenhoven et al., 2005).

Il est donc intéressant de voir comment la profondeur modélisée varie en fonction de la température et de la pression.

MODTRAN divise l'atmosphère en une série de couches et assigne à chaque couche, entre autres, une pression et une température. Par défaut, MODTRAN divise l'atmosphère en 36 couches. Mais il est possible, en entrant ses propres paramètres, de porter ce nombre à 90. Le nombre de couches intervient directement dans la modélisation des phénomènes d'extinction. On peut donc penser qu'en augmenter le nombre permet une meilleure approximation de ces phénomènes. Nous avons dans un premier temps porté le nombre de couches à son maximum afin d'estimer l'effet de la résolution verticale sur la modélisation. Nous avons donc redéfini les couches et leurs paramètres en nous basant sur l'atmosphère standard MidLat Summer (voir *Figure III.18*). En augmentant le nombre de couches nous avons également redéfini leurs positions en suivant une loi exponentielle afin d'avoir une meilleure résolution dans les couches basses de l'atmosphère (voir *Figure III.18.B*). La première

conséquence pratique de ce changement est l'augmentation du temps de calcul : en passant de 36 couches à 90 couches il est augmenté de 140%.

Les *Table III.9* et *Table III.10* donnent les résultats obtenus à 12h et à 16h simplement en changeant le nombre de couches et en les redistribuant. Les variations sont faibles, inférieures à 0.2 %. Dans la suite de ce mémoire nous utiliserons une division en 90 couches. Cependant, dans un cadre opérationnel, la mise en concurrence de l'augmentation du temps de calcul par rapport au gain de précision fera clairement pencher pour l'utilisation par défaut de 36 couches.

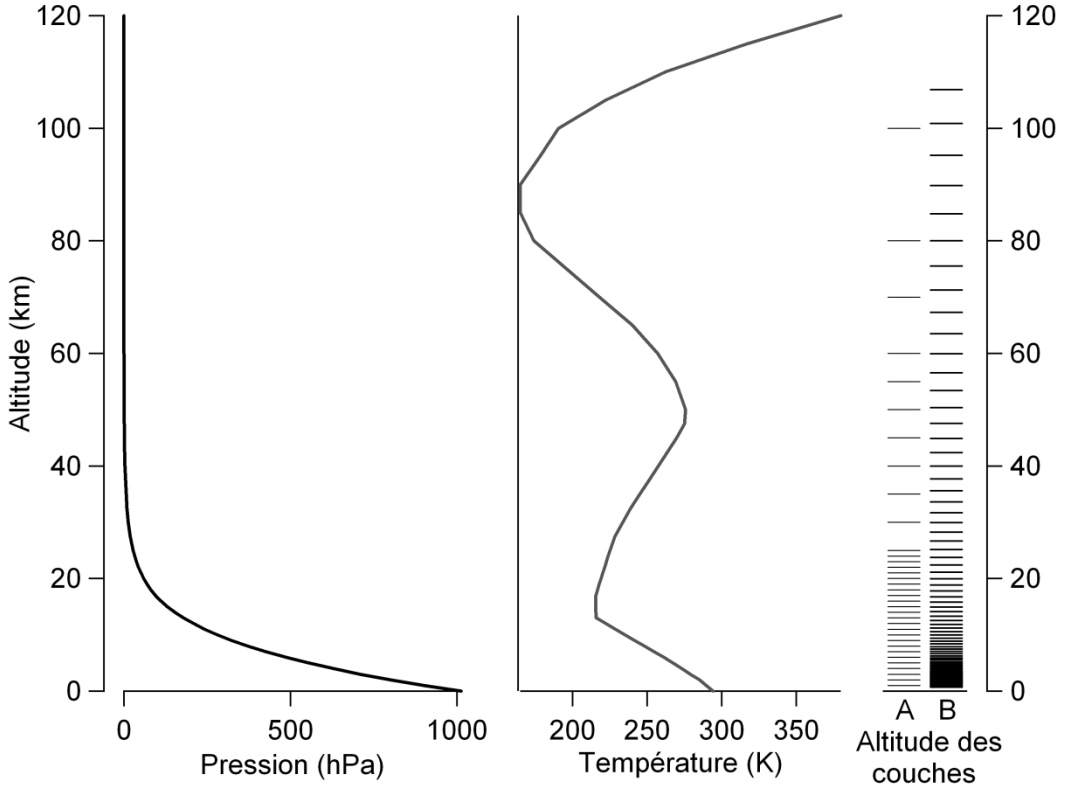


Figure III.18 *Profil de pression et de température pour l'atmosphère standard MidLatSummer. A droite du graphe est représentée la distribution des couches par défaut de MODTRAN (A) et la distribution de couches qui à été redéfinie (B).*

Nombre de couches	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
36	1.4907	4.69606	–	–
90	1.4912	4.70127	0.03 %	0.11 %

Table III.9 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du nombre de couches utilisées pour décrire l'atmosphère. Simulation faite à 12h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en laissant la valeur par défaut.*

Nombre de couches	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
36	1.660	7.4810	–	–
90	1.661	7.4925	0.03 %	0.15 %

Table III.10 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du nombre de couches utilisées pour décrire l'atmosphère. Simulation faite à 16h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en laissant la valeur par défaut.*

Nous avons jusqu'ici utilisé le profil d'atmosphère MidLatSummer (Kantor et Cole, 1962). Ce profil a été créé pour compléter le profil standard U.S Standard Atmosphere proposé en 1962 et dont la dernière révision date de 1976. Le profil MidLat Summer a pour avantage de tenir compte de la saison: elle a été définie a partir de mesures faites durant les mois d'été dans des stations proches de 45 °N. L'atmosphère U.S Standard, elle, est une moyenne sur l'année. Le modèle d'atmosphère donne, pour chaque couche d'atmosphère la pression et la température de sa limite inférieure. Voyons à présent comment sont construites ces données.

Les modèles d'atmosphère standard considèrent que, dans chaque couche, la température varie linéairement avec l'altitude; on définit ainsi un gradient thermique. Ce gradient thermique, exprimé en degrés par kilomètre traduit la variation de température en fonction du changement d'altitude. Bien sûr, ce gradient thermique est différent dans chaque couche. Par exemple, selon l'atmosphère standard ISA (International Standard Atmosphere, norme ISO 2533:1975) définie par l'Organisme International de Normalisation (ISO), ce gradient thermique vaut -6.5 °C/km pour des altitudes inférieures à 11 km, 0 °C entre 11 km et 20 km, etc. La connaissance des gradients thermiques permet ainsi de reconstruire étape par étape un profil de température à partir de la température au sol. Ainsi on peut écrire pour une couche :

$$T(h_1) = T(h_0) + G_T \times \Delta h \qquad (III.20)$$

Avec T température, G_T gradient de température dans la couche, h_1 et h_0 altitudes ($h_1 > h_0$) et $\Delta h = h_1 - h_0$

Le calcul de la pression à la base de chaque couche est effectué en utilisant la loi connue en aéronautique sous le nom de « formule du nivellement barométrique ». Cette loi s'établit simplement à partir de l'équation hydrostatique et de la loi des gaz parfaits. En combinant ces deux équations on obtient :

$$\int_{P(h_0)}^{P(h_1)} \frac{dP}{P} = \int_{h_0}^{h_1} \frac{Mg}{RT} dh \qquad (III.21)$$

Avec, M masse molaire moyenne des gaz de l'atmosphère (0.02896 $kg.mol^{-1}$), g accélération de la pesanteur (9.807 $m.s^{-2}$), R constante des gaz parfaits (8.314 $J.K^{-1}.mol^{-1}$), T la température en Kelvin, P la pression en hPa, h_0 et h_1 deux altitudes.

La masse molaire moyenne des gaz de l'atmosphère (M) est pratiquement constante dans l'atmosphère. Cependant, dans la troposphère, la variation d'humidité peut faire changer légèrement sa valeur. Pour tenir compte de cette variation de M, on utilise la température virtuelle au lieu de la température réelle. La température virtuelle est la température qu'aurait l'air sec s'il possédait la même

masse volumique et la même pression que l'air humide. On a la relation suivante entre température et température virtuelle :

$$T_v = \frac{T}{\left(1 - 0.379 \times \frac{e}{P}\right)} \qquad \textit{(III.22)}$$

Avec T_v température virtuelle, e pression partielle de vapeur d'eau, P pression. La constante 0.379 dépend de la composition de l'atmosphère. En pratique, au delà d'une altitude de 10km la différence entre température virtuelle et température réelle devient négligeable.

De *(III.21),* en utilisant maintenant la température virtuelle et en considérant qu'elle varie linéairement on obtient :

$$P(h_1) = P(h_0) \times \left(\frac{T_v}{T_v + G_{T_v} \times \Delta h}\right)^{\frac{Mg}{R \times G_{T_v}}} \qquad \textit{(III.23)}$$

Avec G_{Tv} gradient thermique de la température virtuelle, $\Delta h = h_1 - h_0$, et T_v la température virtuelle. Si le gradient thermique est nul on a alors :

$$P(h_1) = P(h_0) e^{-\frac{Mg \times \Delta h}{RT_v}} \qquad \textit{(III.24)}$$

Pour tenir compte du fait que l'accélération de la pesanteur diminue avec l'altitude on utilise des altitudes géopotentielles[3] plutôt que des altitudes géométriques. On passe de l'altitude à l'altitude géopotentielle en utilisant la formule :

$$h_p = \frac{R_E \times h}{R_E + h} \qquad \textit{(III.25)}$$

Avec h altitude géométrique, h_p altitude géopotentielle, R_E rayon de la terre.

La donnée des gradients de température et les formules *(III.20)*, *(III.23)* et *(III.24)* permettent donc, à partir d'une pression et d'une température de référence, de reconstruire le profil vertical de la pression et de la température. Il suffit pour cela d'appliquer ces formules à la base de chaque couche d'atmosphère définie dans le modèle en utilisant les valeurs obtenues pour la couche précédente. Dans la suite, lorsque cela sera nécessaire, c'est ainsi que nous procéderons; en utilisant les données du modèle MidLat Summer.

- ***Pression***

Nous allons maintenant nous pencher sur les variations introduites par un changement de pression. La pression atmosphérique varie principalement en fonction de l'altitude - à basse altitude, la pression varie de 1 hPa tout les 8 mètres environ - mais elle varie également au cours de la journée. La pression suit un cycle diurne présentant deux maxima vers 10 h et 22 h. L'amplitude de ce cycle est maximale à

[3] L'altitude géopotentielle (h_p) est l'altitude à laquelle soulever la masse m à g = g_0 *constant* pour lui apporter une énergie potentielle égale à celle qu'elle aurait si elle avait amenée à l'altitude h pour g variant avec l'altitude. Ce qui se traduit par l'équation : $\int_0^h mg(h)dh = mg_0 \times h_p$.

l'équateur où elle peut atteindre 5 hPa et est inférieures à 1 hPa dans les régions tempérées. Notons par ailleurs que ces variations seront masquées par les variations dues aux perturbations atmosphériques, l'amplitude de celles-ci pouvant atteindre quelques dizaines d'hectopascals.

Le principal paramètre à connaitre pour pouvoir définir la pression dans des conditions météorologiques standard sera l'altitude. Nous supposons cependant que cette donnée est connue et nous nous intéresserons à de plus faibles variations de pressions. Ces faibles variations de pression peuvent représenter une erreur de mesure ou bien, en l'absence de mesure, l'écart entre le modèle et la réalité. Dans un premier temps nous allons donc appliquer un changement de pression de ± 5 hPa, par rapport à la pression par défaut. Le profil de pression est construit au moyen des équations introduites plus haut. La *Table III.11* donne les résultats obtenus à 12 h et la *Table III.12* donne les résultats à 16 h. On peut voir que les variations sont bien plus importantes que celles engendrées par les autres paramètres atmosphériques dont nous avons parlé jusqu'à présent. Les variations sont également supérieures d'un facteur quatre dans la bande O_2-A par rapport à la bande O_2-B. L'amplitude de variation considérée (± 5 hPa) est très forte, c'est le maximum observable par beau temps dans les régions tropicales durant un cycle diurne. L'effet sera moindre sous nos latitudes. On voit cependant que la pression est un paramètre dont il faut tenir compte pour une modélisation précise des profondeurs.

Pression à la surface (hPa)	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
935.7 (Défaut)	1.4912	4.7013	–	–
- 5 hPa	1.4871	4.6623	- 0.3 %	- 0.8 %
+ 5 hPa	1.4952	4.7563	0.3 %	1.2 %

Table III.11 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction de la pression à l'altitude de mesure. Simulation faite à 12h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en laissant la valeur par défaut.*

Pression à la surface (hPa)	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
935.7 (Défaut)	1.6608	7.4925	–	–
- 5 hPa	1.6566	7.4118	- 0.3 %	- 1 %
+ 5 hPa	1.6684	7.6073	0.4 %	1.5 %

Table III.12 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction de la pression à l'altitude de mesure. Simulation faite à 16h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en laissant la valeur par défaut.*

On a considéré pour nos calculs des variations qui correspondent à l'amplitude maximale des variations diurne de la pression. Cependant, entre le niveau de la mer et une altitude de 1 km la pression varie d'une centaine d'hectopascal. Cette variation est bien plus importante et l'on comprend alors que, pour ce qui est de l'influence de la pression sur la modélisation, le paramètre important est l'altitude à laquelle la mesure est effectuée : il faut donc une mesure précise de l'élévation. Une variation de 5 hPa correspond à un changement d'élévation de l'ordre de 50 m.

- ***Température***

Nous allons maintenant nous intéresser aux effets dus à un changement de température. Nous allons donc changer la température au niveau du sol et refaire les calculs. A l'altitude de modélisation (0.696 m), la température par défaut est de 17.85 °C. Afin de rester dans des conditions réalistes quant à la mesure de la fluorescence, nous allons étudier une variation de température comprise entre -5 °C et +10 °C. La *Table III.13* et la *Table III.14* montrent les résultats obtenus à 12 h et à 16 h. Pour les deux heures de modélisation les résultats sont similaires et les variations bien que légèrement supérieures à 16 h, restent du même ordre de grandeur. On voit que la dépendance à la température est assez forte dans la bande O_2-A : une variation de 10°C induit une variation de profondeur de l'ordre de 2 %. Cette variation est du même ordre de grandeur que la variation induite par la fluorescence de la végétation. Il sera donc nécessaire de bien prendre en compte le paramètre température, à la fois pour la modélisation du cycle diurne des profondeurs mais également pour le calcul des corrections atmosphériques à appliquer.

Température (°C)	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
17 .85 (Défaut)	1.4912	4.7013	–	–
12.85	1.4941	4.7552	0.2 %	1.1 %
27.85	1.4869	4.6161	- 0.3 %	- 1.8 %

Table III.13 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction de la température à l'altitude de mesure. Simulation faite à 12 h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en laissant la valeur par défaut.*

Température (°C)	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
17 .85 (Défaut)	1.6608	7.4925	–	–
12.85	1.6659	7.6027	0.3 %	1.5 %
27.85	1.6551	7.3263	- 0.3 %	- 2.2 %

Table III.14 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction de la température à l'altitude de mesure. Simulation faite à 16 h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en laissant la valeur par défaut.*

3.5.5 Modèle – Aérosols

MODTRAN permet de prendre en compte les aérosols. Pour rendre compte à la fois de leur origine et de leur distribution verticale MODTRAN utilise quatres couches d'aérosols : les aérosols de couches limites entre 0 km et 3km, les aérosols troposphériques entre 2 km et 11 km, les aérosols stratosphériques entre 10 km et 35 km et les aérosols mésosphériques entre 30 km et 100 km. Par défaut MODTRAN définit automatiquemet les caractéristiques des couches superieures. Par ailleurs, MODTRAN embarque plusieurs modèles d'aérosols qui peuvent être utilisés pour caractériser les aérosols de la couche limite. Les modèles sont les modèles standard : rural, urbain, désertique, côtier (Shettle et Fenn, 1979). La *Figure III.19* montre la répartition de la concentration des aérosols par

défaut. Dans MODTRAN, pour modifier la concentration en aérosols on utilise le paramètre VIS - pour visibilité météorologique - exprimé en kilomètres. La visibilité modifie la distribution verticale des aérosols dans la couche inférieure (entre 0 et 3 km) ; la valeur par défaut est de 23 km. Augmenter cette valeur revient à diminuer le contenu en aérosols et réciproquement. Lorsque la visibilité est comprise entre 2 km et 10 km la concentration en aérosols est indépendante de l'altitude jusqu'à 1 km. Pour des visibilités supérieures à 23 km (conditions de ciel clair), la distribution verticale est exponentielle. Pour les couches au dessus de la couche limite les caractéritiques des aérosols sont moins dépendantes des conditions météorologiques et géographiques. En conséquence, la distribution verticale de la concentration est soumise uniquement à des changements saisonniers. La distribution verticale de la concentration en aérosols est présentée dans la *Figure III.19* pour deux valeurs de visibilité : 23 km et 5 km. On voit clairement que la concentration dans la couche la plus basse augmente lorsque la visibilité diminue. On voit également la décroissance du contenu en aérosols avec l'altitude ainsi que la couche de Junge dont nous avons parlé plus haut aux alentour de 20 km.

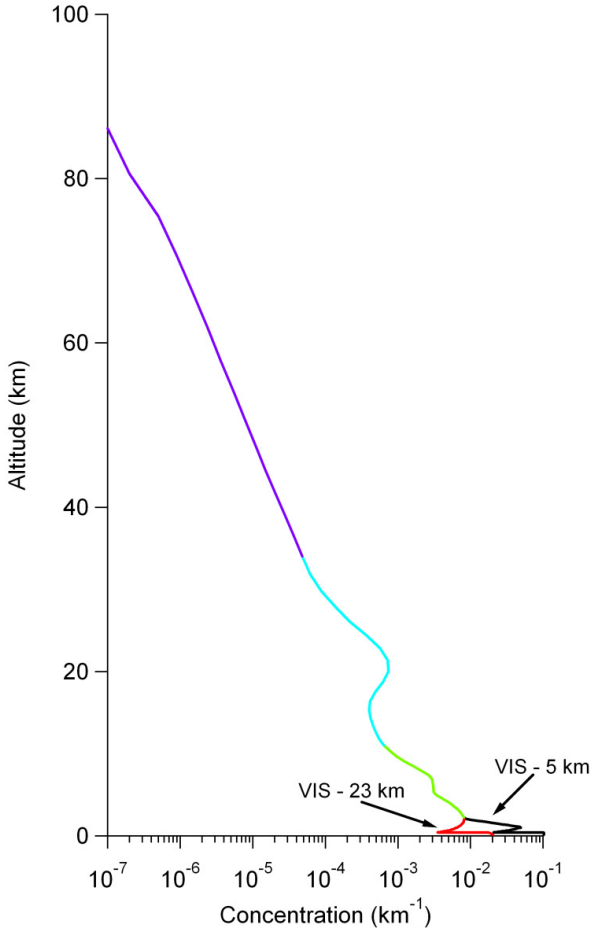


Figure III.19 *Distribution verticale de la concentration en aérosol dans MODTRAN4. Aérosols de type rural, visibilité 23 km et 5 km. Les changements de couleur correspondent aux quatre couches d'aérosols définies par défaut dans MODTRAN*

Afin d'estimer l'impact du contenu en aérosols sur la modélisation de la profondeur, nous avons calculé la variation de profondeur en fonction de la visibilité météorologique. La *Figure III.20* donne la variation par rapport à la valeur par défaut utilisée jusque là (23 km), pour deux heures de modélisation, 12 h et 16 h. On voit que les variations peuvent être importantes, en particulier pour la bande O_2-A. Pour la télédétection de fluorescence, qui se fait préférentiellement par ciel clair, on peut estimer que l'erreur maximale induite par une erreur sur la visibilité sera inférieure à 0.5 % dans la

bande O_2-B et inférieure à 2 % dans la bande O_2-A. Ces erreurs sont conséquentes vis-à-vis de la mesure de fluorescence : il sera donc important de tenir compte du contenu en aérosols.

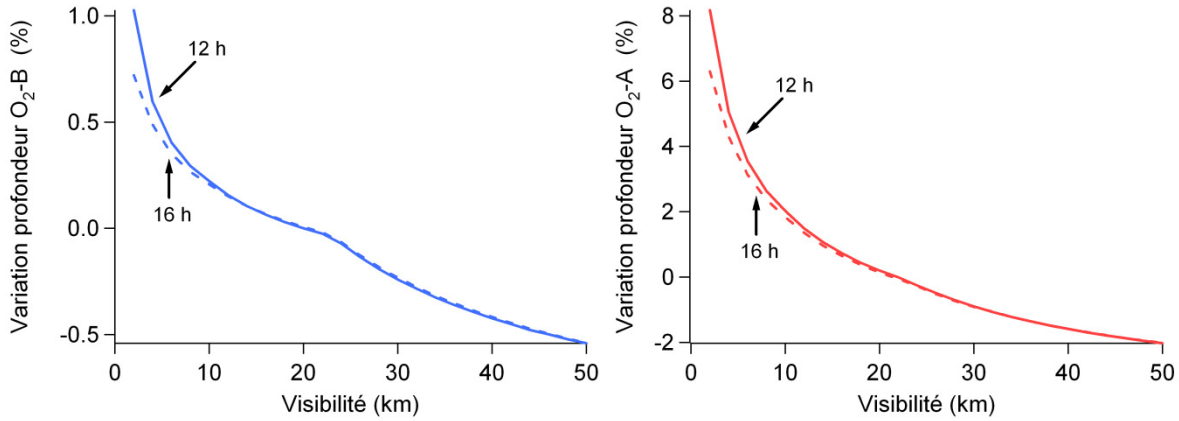


Figure III.20 *Variation de la profondeur dans les deux bandes de l'oxygène en fonction de la visibilité, par rapport à la valeur par défaut de 23 km. Modèle d'aérosol : rural, heure de simulation 12h (courbe pleine) et 16 h (en pointillé).*

La visibilité permet de jouer sur le contenu en aérosols mais ne permet pas de modifier leurs propriétés optiques (spectre d'extinction, fonction de phase, etc…). Comme nous l'avons dit plus haut, plusieurs modèles sont inclus dans MODTRAN et permettent de définir les caractéristiques des aérosols selon le type d'environnement : rural, maritime ou urbain. Nous avons donc calculé les profondeurs des bandes de l'oxygène pour les différents modèles. Les résultats sont présentés dans les *Table III.15* et *Table III.16*. Ils sont comparés au modèle par défaut, le modèle rural. On voit que la bande O_2-A est plus sensible au changement de modèle que la bande O_2-B. Les variations induites ne sont pas négligeables vis-à-vis de l'influence de la végétation sur les profondeurs. Il sera donc important de connaître la quantité d'aérosols pour paramétrer correctement la visibilité, puis il conviendra de choisir le modèle adéquat pour décrire les propriétés optiques des aérosols.

Modèle d'aérosol	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
Rural	1.4912	4.7013	–	–
Maritime	1.4931	4.7277	0.1 %	0.6 %
Urbain	1.4794	4.6255	- 0.8 %	- 1.6 %

Table III.15 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du modèle d'aérosols, la visibilité est fixée à 23 km. Simulation faite à 12 h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en utilisant le modèle « rural »*

Modèle d'aérosol	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
Rural	1.6608	7.4925	–	–
Maritime	1.6635	7.5422	0.2 %	0.7 %
Urbain	1.6468	7.3650	- 0.8 %	- 1.7 %

Table III.16 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du modèle d'aérosols, la visibilité est fixée à 23 km. Simulation faite à 16 h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en utilisant le modèle « rural ».*

3.5.6 Conclusion de l'étude de sensibilité

La *Table III.17* résume les résultats de l'étude de sensibilité en donnant pour chaque paramètre la variation de profondeur maximale constatée et la fluorescence équivalente. C'est la valeur de fluorescence induisant la variation de profondeur correspondante. On gardera en tête que :

- Le choix du modèle d'atmosphère et du modèle d'aérosols est important. Cependant, les modèles étant très caractéristiques, ce choix ne devrait pas être un réel problème.

- La connaissance du contenu en eau et du contenu en ozone n'est pas nécessaire : de grandes variations n'induisent que des erreurs négligeables

- La connaissance de la température est importante, en particulier dans la bande O_2-A.

- La connaissance de la pression est également très importante, en particulier dans la bande O_2-A. Les variations de pressions avec l'altitude étant bien plus importantes que les variations de pressions diurnes (sans perturbations météo), il sera nécessaire d'avoir une valeur précise de l'élévation du terrain.

- La connaissance de la visibilité est également importante. Elle traduit la quantité d'aérosols présents dans l'atmosphère et influence particulièrement la profondeur dans la bande O_2-A.

- La bonne calibration des filtres du capteur est primordiale. La mauvaise évaluation de la position ou de la largeur des filtres est la plus grande source d'erreur.

Paramètre	Amplitude de variation	Variation Profondeur		Fluorescence équivalente ($mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$)	
		O_2-B	O_2-A	O_2-B	O_2-A
Modèle d'atmosphère	–	1.8 %	2.5 %	0.5	0.9
Contenu en eau	0.001 – 6 $g.cm^{-2}$	0.03 %	0.01 %	0.08	0.004
Contenu en ozone	0.15 – 0.5 atm-cm	0.1 %	0.04 %	0.03	0.01
Pression	± 5 hPa	0.7 %	2.5 %	0.19	0.9
Température	12.85 – 27.85 °C	0.6 %	3.7 %	0.16	1.39
Visibilité	5 – 50 km	1 %	6 %	0.27	2.3
Modèle d'aérosol	–	1 %	2.4 %	0.27	0.89

Table III.17 *Tableau récapitulatif de l'étude de sensibilité. La variation de profondeur est la variation maximale constatée. La fluorescence équivalente représente la valeur de fluorescence nécessaire pour induire une telle variation sur le flux réfléchi par la végétation.*

D'une manière générale, on voit que la profondeur des bandes de l'oxygène va être influencée par un certain nombre de paramètres dont les variations naturelles peuvent induire des modifications de profondeurs de l'ordre de grandeur de celles générées par la fluorescence, en particulier dans la bande O_2-A. Dans ces conditions il parait peu opportun d'utiliser MODTRAN pour générer une profondeur de référence dans le cadre de mesures avionnées. On préférera utiliser une cible au sol non fluorescente qui traduira les conditions d'éclairement locales.

3.6 Validation du modèle

Nous avons vu quels étaient les paramètres importants pour la modélisation des profondeurs des bandes de l'oxygène. Nous allons donc introduire tous les paramètres mesurés durant la campagne dans MODTRAN (aérosol, pression et température) et utiliser les transmissions des filtres réels de TerFLEX pour essayer de retrouver les profondeurs mesurées durant la campagne SEN2FLEX.

3.6.1 Mesures des cycles diurnes

Pendant la campagne de mesure, l'instrument TerFLEX a été déployé au sol (39° 03' 30'' N, 2° 05' 24'' W) dans l'un des champs survolé. Son objectif était de mesurer la variation diurne des profondeurs à 687 nm et 760 nm. Pour ce faire il a été placé en visée verticale 1.5 mètre au dessus d'une plaque de Spectralon fixée au niveau du sol (voir *Figure III.21*). A cette hauteur la taille du spot sur le Spectralon est d'environ 20 cm. Pour éviter les ombres sur le Spectralon, le support de TerFLEX a été orienté selon un axe Nord-Sud. Le cycle diurne des profondeurs a été acquis pendant trois jours, les 1, 2 et 3 juin 2005.

Figure III.21 *TerFLEX dans sa configuration de mesure pendant la campagne SEN2FLEX*

Les mesures acquises le 2 juin 2005 sont présentées *Figure III.22* pour la bande O_2-B et *Figure III.23* pour la bande O_2-A. On y retrouve la profondeur ainsi que le PAR acquis simultanément. La courbe de PAR met en évidence la présence de nuages le matin jusque vers 10h. Pendant cet épisode nuageux on voit que les profondeurs sont en anti-corrélation avec le PAR, traduisant l'augmentation du chemin optique moyen lors de la présence de nuages.

Dans la bande O_2-B la profondeur passe de 1.32 au midi solaire à 1.46 à 18 h ce qui représente une variation de l'ordre de 10 %. Dans la bande O_2-A l'absorption étant plus forte, la variabilité diurne est plus forte : on passe de 4.11 au midi solaire à 6.21 à 18 h, ce qui représente une variation de 50 %. Les incertitudes sur la calibration radiométrique de TerFLEX permettent de donner ces profondeurs à ± 1% dans la bande O_2-B et à ± 1.5 % dans la bande O_2-A.

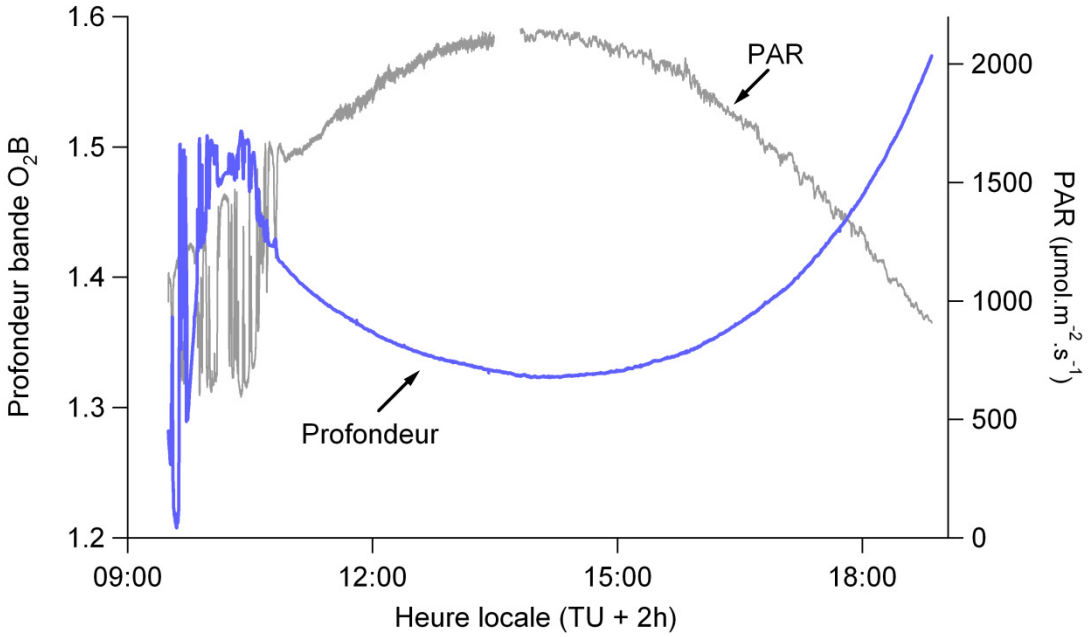


Figure III.22 *Profondeur de la bande d'absorption de l'oxygène O_2-.B. Mesure faites par TerFLEX, le 02 juin 2005 à Barrax (Espagne).*

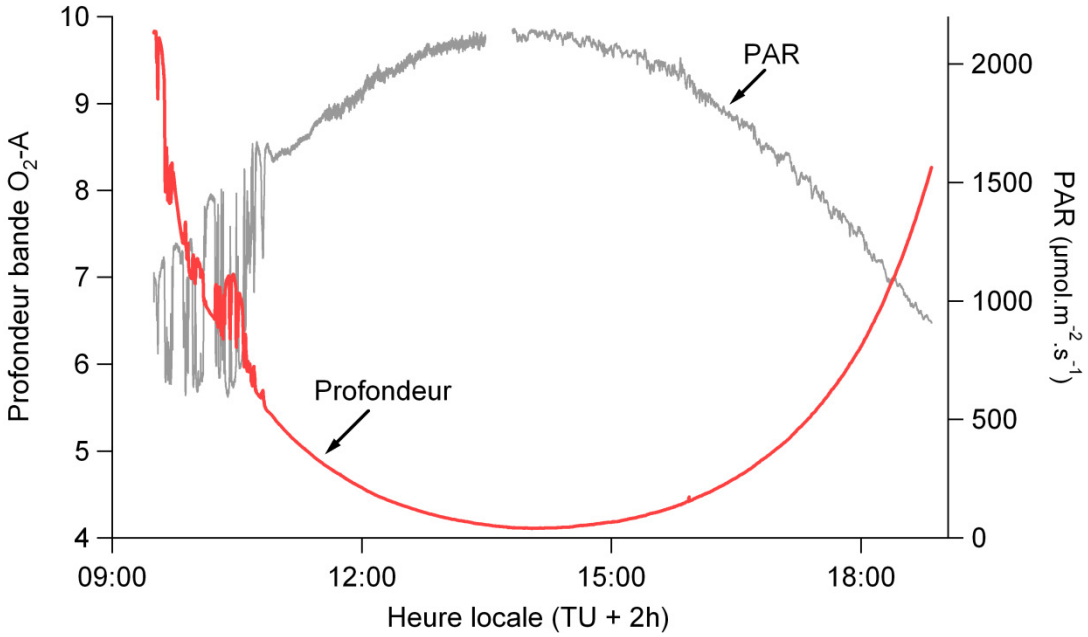


Figure III.23 *Profondeur de la bande d'absorption de l'oxygène O_2-A. Mesure faites par TerFLEX, le 02 juin 2005 à Barrax (Espagne).*

3.6.2 Intégration dans MODTRAN des données mesurées

- ***Mesure ballon***

Une équipe de l'Université de Valence (Espagne), a procédé chaque jour à deux lâchers de ballons équipés de sondes de mesure (radiosondage). Ces sondes ont permis, entre autres, de mesurer la température et la pression en fonction de l'altitude. Le 2 juin 2005, deux radiosondages ont été effectués, l'un à 7h du matin et le second à 11h. Les données acquises à 11 h sont présentées dans la *Figure III.24*. La sonde a fonctionné jusqu'à une altitude d'environ 20 km.

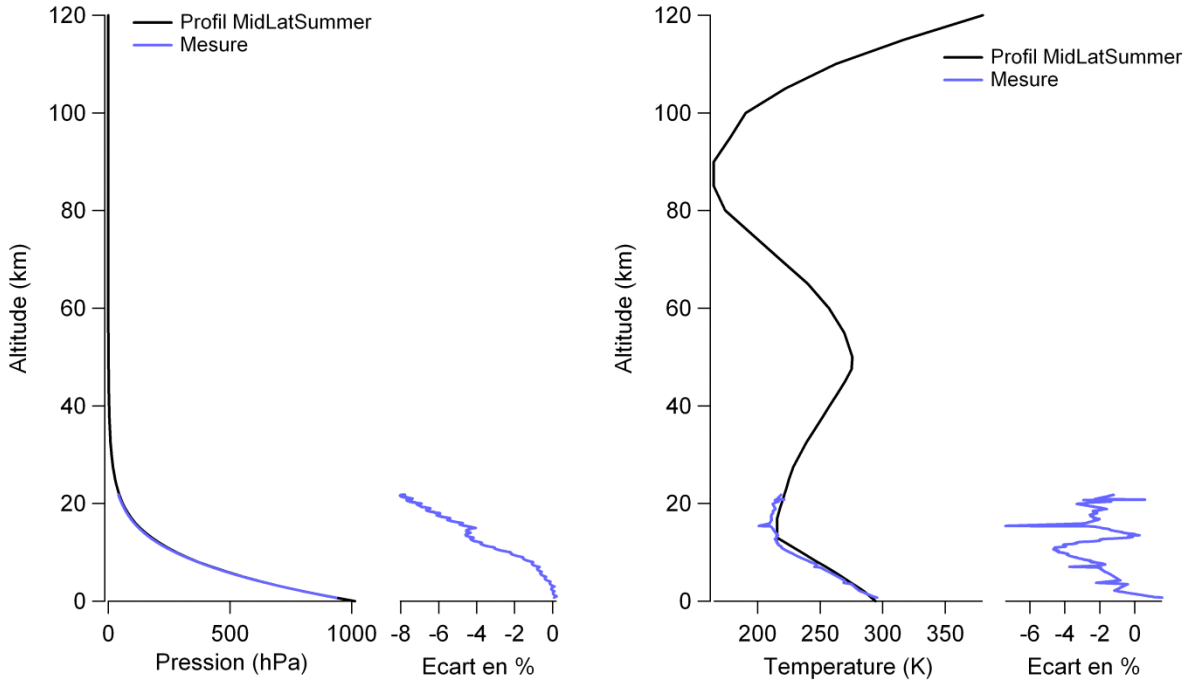


Figure III.24 *Profils verticaux de pression et température mesurées par une sonde ballon (en violet) comparés aux profils par défaut du modèle MidLat Summer (en noir).*

N'ayant pas de données plus précises en termes de variations de température et de pression au cours de la journée, nous utiliserons les données du second sondage (11 h) pour l'ensemble de la journée. Les mesures n'allant que jusqu'à une altitude de 20 km, nous appliquons les équations données plus haut à partir de la dernière couche d'atmosphère paramétrée pour prolonger les profils, jusqu'à l'altitude de 120 km.

Les profils de pression et de température ne sont pas des données faciles à obtenir. Pour des mesures avionnées, ce type de données ne sera pas disponible à moins d'embarquer des instruments dédiés. On aura, au mieux, une valeur de pression et de température au sol. On peut donc se demander si cela suffit pour modéliser la profondeur. Pour répondre à cette question nous avons effectué plusieurs simulations en utilisant soit les profils réels, soit les profils reconstruits à partir des valeurs mesurées au sol.

Les résultats des différentes simulations sont présentés *Table III.18*. Dans cette table, l'indication « Profil mesuré» signale que le profil mesuré a été utilisé et une indication de type « 936 hPa (Sol) » indique que le profil a été reconstruit à partir de cette valeur au niveau du sol.

Pression	Température	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
Profil mesuré	Profil mesuré	1.4930	4.7456	–	–
936 hPa (Sol)	22°C (Sol)	1.4898	4.6704	- 0.2 %	- 1.5 %
Défaut (935.7 hPa)	Défaut (17.85 °C)	1.4912	4.7013	- 0.1 %	- 0.9 %
Profil mesuré	22 °C (Sol)	1.4782	4.5256	- 1 %	- 4.6 %
936 hPa (Sol)	Profil mesuré	1.4938	4.7553	0.05 %	0.2 %

Table III.18 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction des paramètres utilisés pour décrire la pression et la température. Simulation faite à 12h. L'indication « Profil mesuré» signale que le profil mesuré a été utilisé et une indication de type « 936 hPa (Sol) » indique que le profil a été reconstruit à partir de cette valeur au niveau du sol. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en utilisant les profils mesurés à l'aide d'un ballon de radiosondage le 02 juin 2005 à 11 h.*

On remarque qu'utiliser les valeurs au sol ou les valeurs par défaut de MODTRAN induit une erreur de l'ordre de 0.2 % pour la bande O_2-B et de l'ordre de 1 % pour la bande O_2-A. En pratique, nous n'aurons pas les profils verticaux de température et de pression : on utilisera donc soit des valeurs au sol, soit les valeurs par défaut de MODTRAN. Les variations de profondeur obtenues dans ces deux configurations donnent donc un ordre de grandeur de l'incertitude qu'on peut attendre sur les profondeurs modélisées.

Les deux autres simulations effectuées en mélangeant des profils mesurés et des profils reconstruits à partir de la valeur au sol sont intéressantes. En utilisant uniquement le profil de pression mesuré et en reconstruisant le profil de température à partir de sa valeur au sol, les erreurs obtenues sont assez grandes. En effectuant l'opération inverse, les erreurs sont cette fois beaucoup plus faibles (< 0.2 %). La variation de la pression avec l'altitude est très stable et peut être déduite de la seule mesure au sol avec une bonne précision. Par contre, la variabilité du profil de la température peut être bien plus importante. Cette variabilité ne peut être reproduite par notre modèle et elle semble influencer la profondeur des bandes de l'oxygène. Ceci montre clairement que le profil de température est une indication importante pour la modélisation dans les bandes de l'oxygène.

- ***Aérosols***

Lors de la campagne à Barrax les mesures réalisées par l'équipe Solar Radiation Unit de l'université de Valence (Espagne) ont été utilisées pour caractériser le contenu en aérosols. L'obtention des caractéristiques détaillées des aérosols a été effectuée par Roberto Pedrós de l'université de Valence.

Les données du spectrophotomètre LiCor 1800 (mesure de l'irradiance solaire) et du photomètre Microtops II (mesure du contenu d'ozone) ont tout d'abord été utilisées dans le but de retrouver l'épaisseur optique des aérosols en suivant la méthode décrite par Martinez-Lozano et al., 2001. Le spectrophotomètre mesure en permanence l'irradiance solaire. De cette mesure, on déduit l'épaisseur optique totale en inversant la loi exponentielle de Bouger-Lambert-Beer *(III.4)* :

$$I = I_0 e^{-kd}$$

Avec I irradiance mesurée, I_0 irradiance au sommet de l'atmosphère, k coefficient d'extinction et d la masse d'air relative. I_0 est obtenue en utilisant le modèle SMARTS2 (Gueymard, 1995). Une fois l'épaisseur optique retrouvée on passe au coefficient d'extinction k en utilisant la masse d'air d calculée grâce à la formule empirique de Kasten et Young, 1989.

Le coefficient d'extinction total peut être exprimé comme la somme de plusieurs coefficients rendant compte de la contribution des différents constituants/phénomènes participant à l'extinction du rayonnement. On écrit :

$$k = k_R + k_a + k_{O_3} + k_{NO_2}$$

Avec k_R extinction de la diffusion moléculaire (Rayleigh), k_a extinction due aux aérosols, k_{O3} extinction due à l'absorption de l'O_3, et k_{NO2} extinction due à l'absorption de NO_2.

Pour retrouver l'épaisseur optique des aérosols, il faut estimer chaque épaisseur optique associée à chaque phénomène/espèce (la relation épaisseur optique – coefficient d'extinction est donnée par l'équation *(III.10)*). L'épaisseur optique associée au contenu en ozone est obtenue en utilisant les mesures effectuées par le Microtops II et les coefficients d'absorption tirés de Anderson et Mauersberger, 1992. L'épaisseur optique associée à la diffusion moléculaire est estimée en utilisant l'approximation proposée par Bodhaine et al., 1999. Pour l'épaisseur optique associée au NO_2, les coefficients d'absorption sont tirés de Davidson et al., 1988 et de Schneider et al., 1987. Le contenu en NO_2 est extrait de l'atmosphère de référence MidLatitude Summer de LOWTRAN 7 (Kneizys et al., 1988).

Une fois l'épaisseur optique des aérosols obtenue, il faut retrouver leur composition : pour cela on utilise le modèle OPAC (Hess et al., 1998). Le modèle OPAC (***O**ptical **P**roperties of **Aérosol**s and **C**louds*) contient les propriétés microphysiques et optiques de plusieurs composants d'aérosols. Les caractéristiques des aérosols qui nous intéressent sont retrouvées en déterminant, par minimisation (méthode Nelder et Mead, 1965), un mélange de ces composants dont l'épaisseur optique calculée correspondra à celle mesurée. On accédera ainsi aux propriétés et à la composition en aérosols au moment de la mesure.

Les propriétés d'aérosols retrouvées et utilisées dans MODTRAN sont :

- La fonction de phase : définie pour différentes longueurs d'onde (entre 400 nm et 800 nm par pas de 50 nm)
- Les coefficients d'absorption, d'extinction et le paramètre d'asymétrie pour 5 longueurs d'onde : 300 nm, 337.1 nm, 500 nm, 550 nm, 694.3 nm et 1060 nm.

La *Table III.19*, présente les résultats obtenus par la simulation MODTRAN en incluant les données d'aérosols issues des radiosondages par rapport aux résultats obtenus en utilisant le modèle d'aérosol rural et une visibilité de 23 km.

Modèle d'aérosol	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
Issu des mesures	1.4867	4.6593	–	–
Rural	1.4912	4.7013	0.3 %	0.9 %

Table III.19 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du modèle d'aérosol. La visibilité est fixée à 23 km. Simulation faite à 12 h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en utilisant les données d'aérosols issues des mesures in situ.*

On peut maintenant se demander s'il est nécessaire d'avoir toutes ces informations concernant les aérosols. Dans un cadre opérationnel de telles données ne seront probablement pas disponibles. La *Table III.20* donne les profondeurs calculées en utilisant chaque modèle avec sa valeur de visibilité par défaut, comparées à la profondeur obtenue en utilisant les données d'aérosols complètes. On peut voir que dans notre cas, le modèle rural semble le plus adapté. Si dans ce cas précis nous aurions effectivement choisi le modèle rural plutôt que les deux autres, il n'en reste pas moins que ces modèles restent des modèles moyens et qu'ils peuvent ne pas être adaptés à toutes les situations.

Modèle d'aérosol	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
Mesures	1.4867	4.6593	–	–
Rural (VIS – 23 km)	1.4912	4.7013	0.3 %	0.9 %
Maritime (VIS – 23 km)	1.4931	4.7280	0.4 %	1.5 %
Urbain (VIS – 5 km)	1.4634	4.6210	- 1.5 %	- 0.8 %

Table III.20 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du modèle d'aérosols, la visibilité est la visibilité par défaut des modèles. Simulation faite à 12 h. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en utilisant les données mesurées.*

3.6.3 Utilisation de l'AOT pour rendre compte des aérosols

Nous allons maintenant nous poser la question de savoir quelles données d'aérosols sont nécessaires. Nous avons pour l'instant utilisé soit les données d'aérosols complètes, issues de mesures in situ, soit un modèle. Un cas intermédiaire serait l'utilisation de l'épaisseur optique des aérosols. En l'absence de système de mesure dédié, l'AOT peut être par exemple obtenue grâce au réseau AERONET (Aérosol RObotic NETwork, http://aeronet.gsfc.nasa.gov, Holben, 1998). Le réseau AERONET est un réseau de photomètres solaires créé par la NASA et le regroupement PHOTONS. AERONET fournit en continu des données d'AOT sur l'ensemble des stations dispersées sur le globe (voir *Figure III.25*).

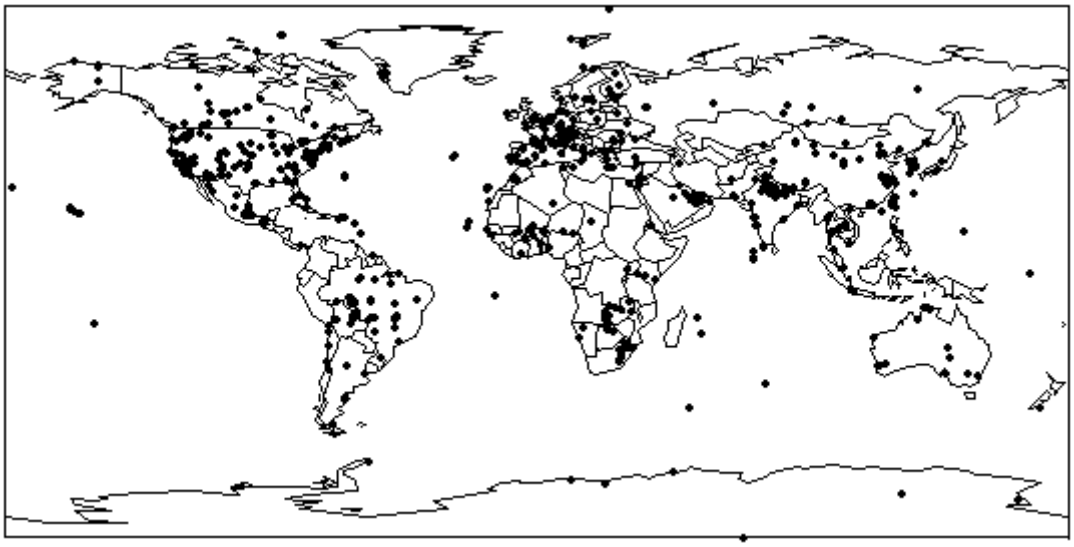


Figure III.25 *Position des stations AERONET en 2009 (http://aeronet.gsfc.nasa.gov)*

Nous allons donc nous intéresser aux améliorations de la modélisation avec l'ajout de l'AOT. L'AOT ne peut être donnée directement comme paramètre d'entrée d'une simulation MODTRAN : le seul moyen de changer la concentration en aérosols est de jouer sur le paramètre visibilité. Par contre, dans ses sorties, MODTRAN donne la transmission des aérosols et l'AOT s'en déduit directement d'après *(III.10)*. Il est alors possible, en faisant varier la visibilité, d'établir une fonction reliant AOT et visibilité. Cette fonction dépendra bien sûr du modèle d'aérosol utilisé. La *Figure III.26* présente ces relations à 550 nm et à 700 nm pour les trois modèles.

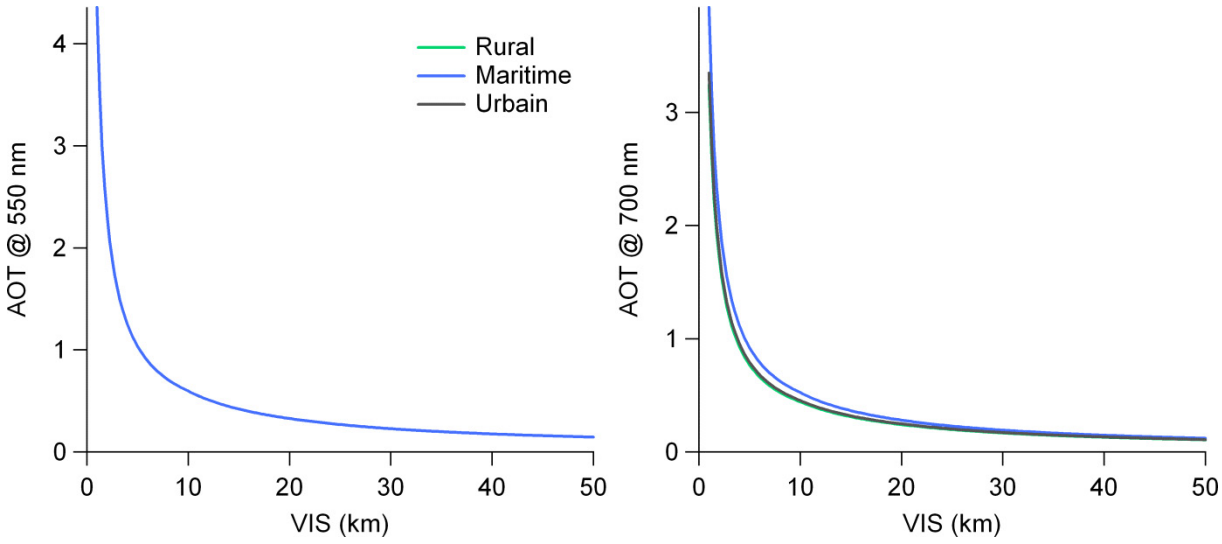


Figure III.26 *Epaisseur optique des aérosols à 550 nm et 700 nm en fonction de la visibilité pour les trois modèles d'aérosols incorporés dans MOTRAN.*

Nous avons ainsi calculé pour chaque modèle une visibilité équivalente donnant la même AOT que celle mesurée le 2 juin 2005. Puis, afin d'évaluer si cette donnée était suffisante pour bien tenir compte du contenu en aérosol, nous avons calculé les profondeurs correspondantes. Ce jour là, au midi solaire, l'AOT à 550 nm était de 0.235, l'AOT à 700 nm était de 0.231. A titre d'indication la visibilité

mesurée était de 29.57 km. Les résultats à 550 nm sont reportés dans la *Table III.21* et les résultats à 700 nm dans la *Table III.22*.

Modèle d'aérosol - Visibilité	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
Mesures - 29.57 km	1.4867	4.6593	–	–
Rural – 28.82 km	1.4887	4.6701	0.13 %	0.23 %
Maritime – 28.83 km	1.4901	4.6907	0.23 %	0.67 %
Urbain – 28.82 km	1.4792	4.6110	- 0.5 %	- 1 %

Table III.21 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du modèle d'aérosols. La visibilité indiquée a été définie à partir de la relation entre VIS et AOT à* ***550 nm*** *établie pour chaque modèle. Simulation faite à 12 h, le* ***2 juin 2005****. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en utilisant les données mesurées.*

Modèle d'aérosol - Visibilité	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
Mesures – 29.57 km	1.4867	4.6593	–	–
Rural – 21.01 km	1.4916	4.7106	0.33 %	1.1 %
Maritime – 24.58 km	1.4922	4.7159	0.37 %	1.2 %
Urbain – 21.58 km	1.4788	4.6256	- 0.53 %	- 0.72 %

Table III.22 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du modèle d'aérosol. La visibilité indiquée a été définie à partir de la relation entre VIS et AOT à* ***700 nm*** *établie pour chaque modèle. Simulation faite à 12 h, le* ***2 juin 2005****. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en utilisant les données mesurées.*

On voit que l'erreur la plus faible est obtenue avec le modèle rural, en utilisant l'AOT à 550 nm. Cette erreur est réduite d'un facteur 3 par rapport à l'erreur faite en utilisant la visibilité par défaut. Bien sûr ce résultat est très circonstanciel et on peut se demander si pour des conditions atmosphériques différentes, avec plus ou moins d'aérosols, le modèle rural reste la meilleure solution. Nous avons eu la chance, pendant la campagne de mesure, d'avoir trois jours de mesure assez différents en termes de contenu en aérosols. Ce qui va nous permettre d'étendre un peu ce résultat. La *Table III.23* donne les AOT à 550 et 700 nm ainsi que les visibilités mesurées pour les trois jours. On voit que la quantité d'aérosols a augmenté durant ces trois jours. Nous allons effectuer le même travail que celui effectué pour le 2 juin afin de voir si dans ces autres cas l'utilisation du modèle rural et de l'AOT à 550 nm donne les meilleurs résultats.

Date	AOT à 550 nm	AOT à 700 nm	Visibilité mesurée
1er juin 2005	0.151	0.147	44.11 km
2 juin 2005	0.235	0.231	29.57 km
3 juin 2005	0.331	0.323	18.32 km

Table III.23 *Epaisseur optique des aérosols et visibilité mesurées au cours de la campagne de mesure. Les AOT sont données à 550 nm et 700 nm. Les mesures ont été effectuées au midi solaire.*

La *Table III.24* et la *Table III.25* donnent les profondeurs modélisées le 1er juin 2005 en utilisant les différents modèles d'aérosols et l'AOT à 550 nm et 700 nm respectivement. On voit cette fois encore que le modèle donnant les meilleurs résultats est le modèle rural utilisé avec l'AOT à 550 nm.

Modèle d'aérosol - Visibilité	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
Mesures - 44.11 km	1.4838	4.6261	–	–
Rural – 47.65 km	1.4841	4.6198	0.02 %	- 0.13 %
Maritime – 47.65 km	1.4849	4.6323	0.07 %	0.13 %
Urbain – 47.65 km	1.4784	4.5862	- 0.36 %	- 0.8 %

Table III.24 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du modèle d'aérosols. La visibilité indiquée a été définie à partir de la relation entre VIS et AOT à* ***550 nm*** *établie pour chaque modèle. Simulation faite à 12 h, le* ***1er juin 2005****. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en utilisant les données mesurées.*

Modèle d'aérosol - Visibilité	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
Mesures – 44.11 km	1.4838	4.6261	–	–
Rural – 34.56 km	1.4868	4.6512	0.2 %	0.5 %
Maritime – 40 km	1.5047	4.6508	1.4 %	0.5 %
Urbain – 35.43 km	1.4788	4.6013	- 0.33 %	- 0.5 %

Table III.25 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du modèle d'aérosols. La visibilité indiquée a été définie à partir de la relation entre VIS et AOT à* ***700 nm*** *établie pour chaque modèle. Simulation faite à 12 h, le* ***1er juin 2005****. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en utilisant les données mesurées.*

La *Table III.26* et la *Table III.27* donnent les profondeurs modélisées le 3 juin 2005 en utilisant les différents modèles d'aérosols et l'AOT à 550 nm et 700 nm respectivement. A nouveau, le modèle donnant le meilleur résultat est le modèle rural avec l'AOT à 550 nm.

Modèle d'aérosol - Visibilité	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
Mesures - 18.32 km	1.4879	4.7246	–	–
Rural – 19.74 km	1.4913	4.7152	0.2 %	- 0.2 %
Maritime – 19.74 km	1.4935	4.7515	0.4 %	0.6 %
Urbain – 19.74 km	1.4775	4.6243	- 0.7 %	- 2.1 %

Table III.26 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du modèle d'aérosols. La visibilité indiquée a été définie à partir de la relation entre VIS et AOT à* ***550 nm*** *établie pour chaque modèle. Simulation faite à 12 h, le* ***3 juin 2005****. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en utilisant les données mesurées.*

Modèle d'aérosol - Visibilité	Profondeur O_2-B	Profondeur O_2-A	Variation O_2-B	Variation O_2-A
Mesures – 18.32 km	1.4879	4.7246	–	–
Rural – 14.33 km	1.4926	4.7515	0.3 %	0.6 %
Maritime – 17.14 km	1.4945	4.7681	0.4 %	0.9 %
Urbain – 14.77 km	1.4746	4.6255	- 0.9 %	- 2 %

Table III.27 *Profondeurs des bandes de l'oxygène modélisées en fonction du modèle d'aérosols. La visibilité indiquée a été définie à partir de la relation entre VIS et AOT à* ***700 nm*** *établie pour chaque modèle. Simulation faite à 12 h, le* ***3 juin 2005****. Les colonnes « variation » se réfèrent aux profondeurs obtenues en utilisant les données mesurées.*

Les résultats montrent que, pour les différentes visibilités, le modèle rural reste celui qui donne les meilleurs résultats. On peut cependant noter que les résultats sont meilleurs lorsque la visibilité est grande (peu d'aérosols). Ainsi dans la bande O_2-B l'erreur passe de 0.02 % pour une visibilité de 44 km à 0.2 % pour une visibilité de 18 km. Dans tout les cas, l'écart entre les valeurs de profondeurs obtenues en utilisant le modèle par rapport à celles obtenues en utilisant les données détaillées est inférieur à 0.3 %. On peut se demander si cet écart n'est pas lui-même inférieur à l'erreur induite par l'incertitude sur les données détaillées d'aérosols. Si tel est le cas, l'utilisation de données détaillée n'apportera aucune précision supplémentaire par rapport à un modèle standard. On peut donc penser que l'utilisation de modèles d'aérosols plutôt que de données détaillées des propriétés optiques des aérosols sera suffisante pour la majorité des cas, à condition d'identifier correctement le modèle à utiliser.

3.6.4 Mesure de la transmission des filtres de TerFLEX

Nous avons vu dans la section 3.5.1 que la position et la largeur des filtres est une donnée très importante pour la modélisation des profondeurs. Nous avons donc apporté un soin particulier à la mesure des formes des filtres de transmission de TerFLEX. La mesure se fait à l'aide d'un spectromètre Ocean Optics HR4000 (620 nm – 810 nm, 3648 pixels). Ce spectromètre était thermo régulé et sa calibration spectrale a été faite à l'aide d'une lampe Mercure-Argon. Cette même lampe à permis de mesurer sa réponse impulsionnelle aux voisinages des bande de l'oxygène en utilisant les raies à 690.752 nm (Hg) et 763.51 nm (Ar). La mesure faite par un spectromètre est la convolution du

signal réel par sa réponse instrumentale. Les principaux effets de cette convolution sont un élargissement des filtres mesurés. Etant donné la précision nécessaire sur les largeurs de filtres il a été nécessaire de corriger la mesure des spectres des filtres par la réponse instrumentale du spectromètre : nous avons donc procédé à une déconvolution pour retrouver les filtres réels.

La mesure donnée par le spectromètre est la convolution du signal observé par sa fonction de réponse, ainsi, pour notre mesure de transmission, au pixel numéro *x* on aura une valeur

$$T_{mesurée}(x) = \int Rep(x-t) \times T_{réelle}(t)dt \qquad (III.26)$$

avec *Rep* la réponse impulsionnelle et $T_{réelle}$ la transmission réelle.

Connaissant $T_{mesurée}$ et *Rep*, il est possible, en faisant une hypothèse sur la transmission réelle, de faire une déconvolution afin de la retrouver.

Etant donné que les filtres de TerFLEX sont proches d'une gaussienne nous avons choisi de les modéliser par une somme de gaussiennes. En convoluant ce modèle par la fonction de réponse impulsionnelle mesurée on obtient :

$$T'_{mod}(x) = \int Rep(x-t) \times T_{mod}(t)dt \qquad (III.27)$$

Il suffit ensuite d'ajuster les paramètres du modèle de manière à ce que T'_{mod} soit égal à T_{mes} pour retrouver le filtre réel. L'ajustement des paramètres est effectué par minimisation de l'erreur entre T'_{mod} et T_{mes} grâce à la routine Mathematica « NonLinearRegress ».

Les résultats de la déconvolution sont résumés dans la *Table III.28*. On note que la largeur des filtres a bien été diminuée après la déconvolution. On peut noter également que les filtres à 760 nm après déconvolution ont été décalés en longueur d'onde de manière plus importante que les filtres à 687 nm. Cela est dû à la forte asymétrie de la réponse impulsionnelle du spectromètre à 760 nm. Cette asymétrie est moins importante à 687 nm.

	Réduction largeur (nm)	Décalage (nm)
Bord 687	0.15	-0.038
Fond 687	0.18	0.037
Bord 760	0.18	0.106
Fond 760	0.20	0.09

Table III.28 *Résultats de la déconvolution sur les spectres de transmission des filtres de TerFLEX.*

3.6.5 Résultats

Une fois les transmissions des filtres de TerFLEX obtenues nous avons introduit dans le modèle MODTRAN les différentes mesures effectuées en termes de pression, température et aérosols. Pour refléter l'erreur sur la mesure de transmission des filtres, nous avons considéré que la position des filtres est connue à ± 0.05 nm.

Lors de la mesure, TerFLEX était au milieu d'un champ comme l'illustre la *Figure III.21*. En conséquence nous avons choisi d'introduire dans MODTRAN un environnement dont la réflectance serait celle d'une cible végétale. Nous avons donc choisi par défaut les valeurs de réflectance de 0.04 ± 0.01 à 687 nm et 0.5 ± 0.1 à 760 nm. Les résultats de la modélisation des cycles diurnes avec ces paramètres sont donnés dans la *Figure III.27* pour la bande O_2-B et dans la *Figure III.28* pour la bande O_2-A. Les barres d'erreurs représentent l'erreur totale : incertitude sur la position des filtres et incertitude sur la valeur de la réflectance de l'environnement. Sur ces figures, il ne faut pas tenir compte des mesures avant 11 h : avant cette heure la présence de nuages rend caduque la modélisation car elle tient pas compte de la possible présence de nuages.

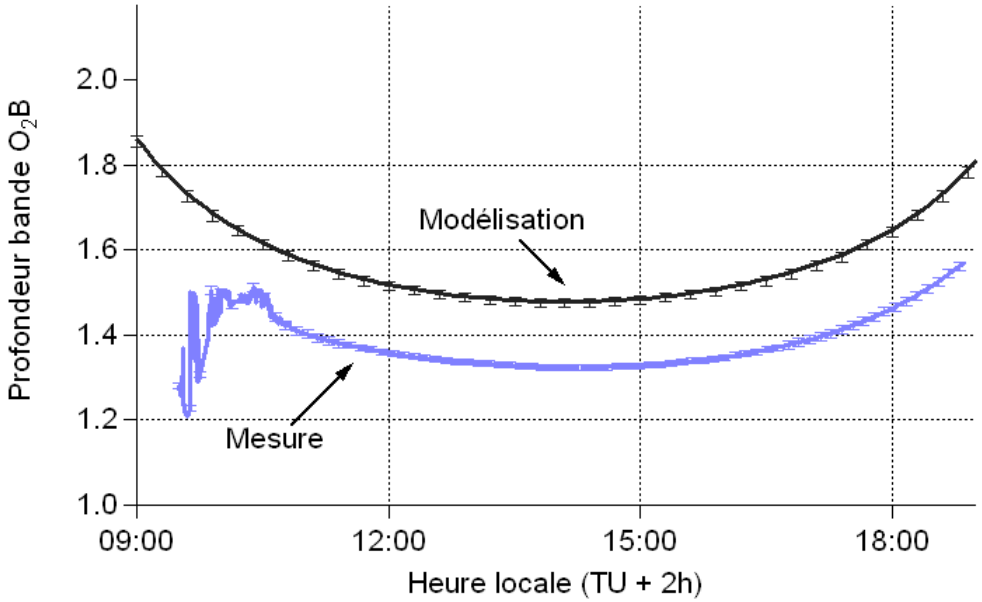


Figure III.27 *Cycle diurne de la profondeur de la bande O_2-B mesuré le 2 juin 2005 à Barrax (Espagne) (en bleu) et modélisation du cycle diurne à l'aide de MODTRAN (en noir).*

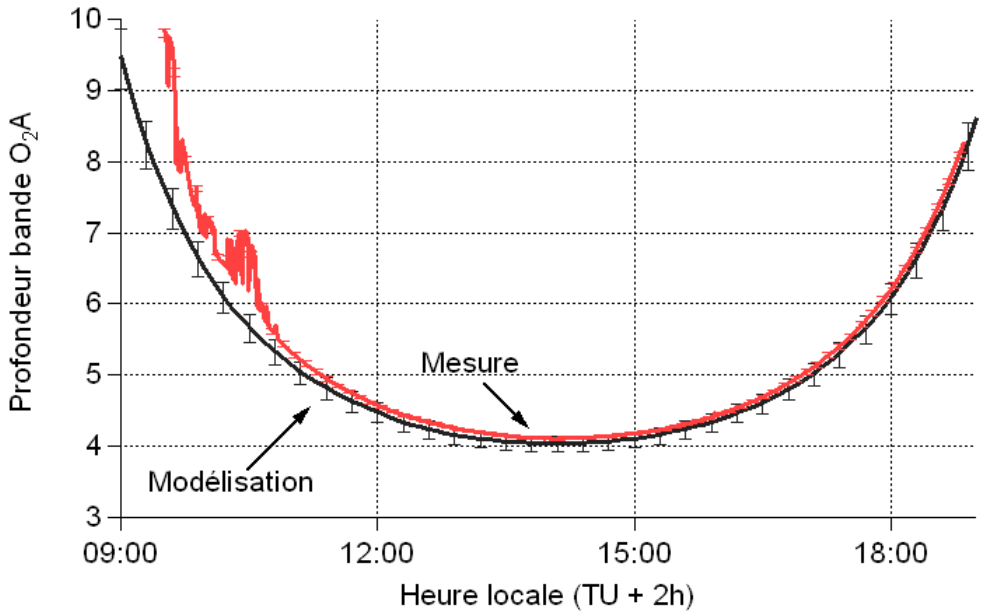


Figure III.28 *Cycle diurne de la profondeur de la bande O_2-A mesuré le 2 juin 2005 à Barrax (Espagne) (en rouge) et modélisation du cycle diurne à l'aide de MODTRAN (en noir).*

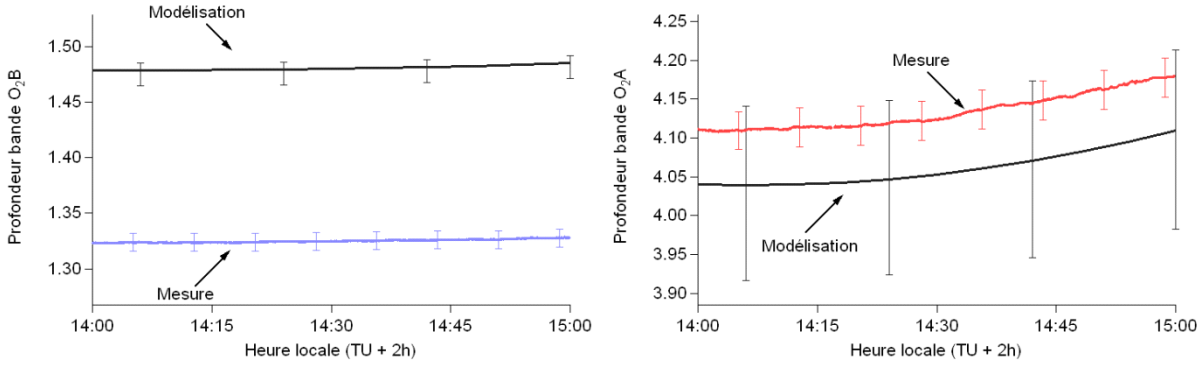


Figure III.29 *Détails des cycles diurnes modélisés et mesurés dans les deux bandes de l'oxygène.*

La *Figure III.29* est un zoom autour de 14h30. Elle permet de mieux apprécier la corrélation entre mesure et modèle. L'écart est de l'ordre de 11% dans la bande O_2-B et de l'ordre de 1.5% dans la bande O_2-A. La modélisation du cycle diurne de la bande O_2-A donne de bons résultats : en tenant compte des erreurs possibles sur la modélisation on retrouve les valeurs mesurées. Dans la bande O_2-B les résultats sont moins bons : même en tenant compte des différentes sources d'erreur dans la modélisation on reste 10 % au dessus des valeurs mesurées. Des résultats identiques ont été obtenus pour les deux autres jours de mesure.

Si en termes de valeurs les profondeurs modélisées ne correspondent pas exactement aux valeurs mesurées, la forme du cycle diurne modélisé suit parfaitement la forme du cycle diurne mesuré. La *Figure III.30* illustre ce fait en présentant la corrélation entre profondeur mesurée et profondeur modélisée. On trouve dans les deux cas une corrélation de l'ordre de 0.999. Des résultats identiques ont été obtenus pour les deux autres jours de mesure.

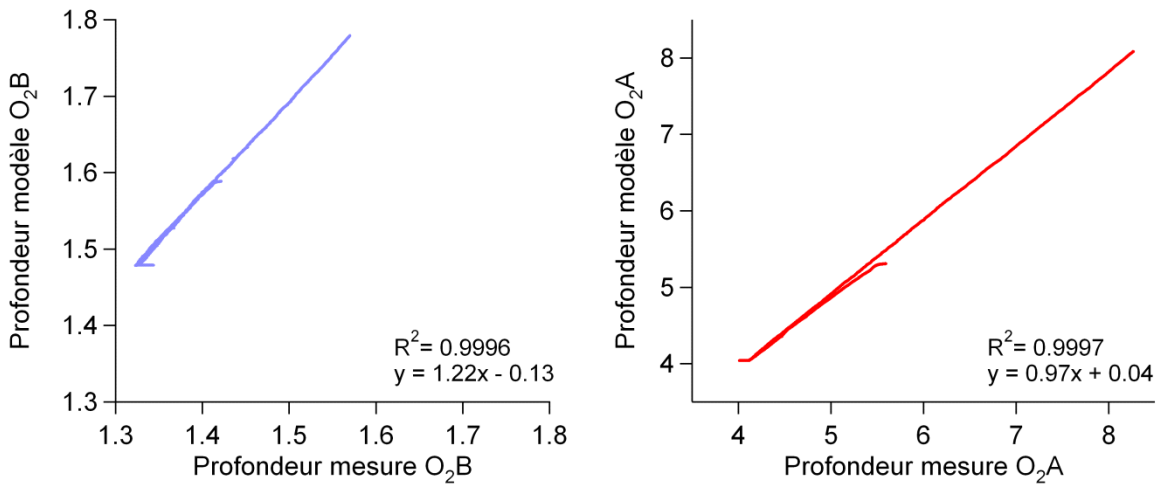


Figure III.30 *Corrélation entre mesure et modèle au cours de la journée du 2 juin 2005. Bande O_2-B à gauche et bande O_2-A à droite.*

A ce stade on peut mettre en cause, soit le modèle, soit la calibration de TerFLEX. Pour essayer de trancher on peut examiner la corrélation entre les flux mesurés et les flux modélisés. La *Figure III.31* et la *Figure III.32* permettent d'étudier cette corrélation. Les différents flux ont été normalisés afin de pouvoir comparer leurs variations.

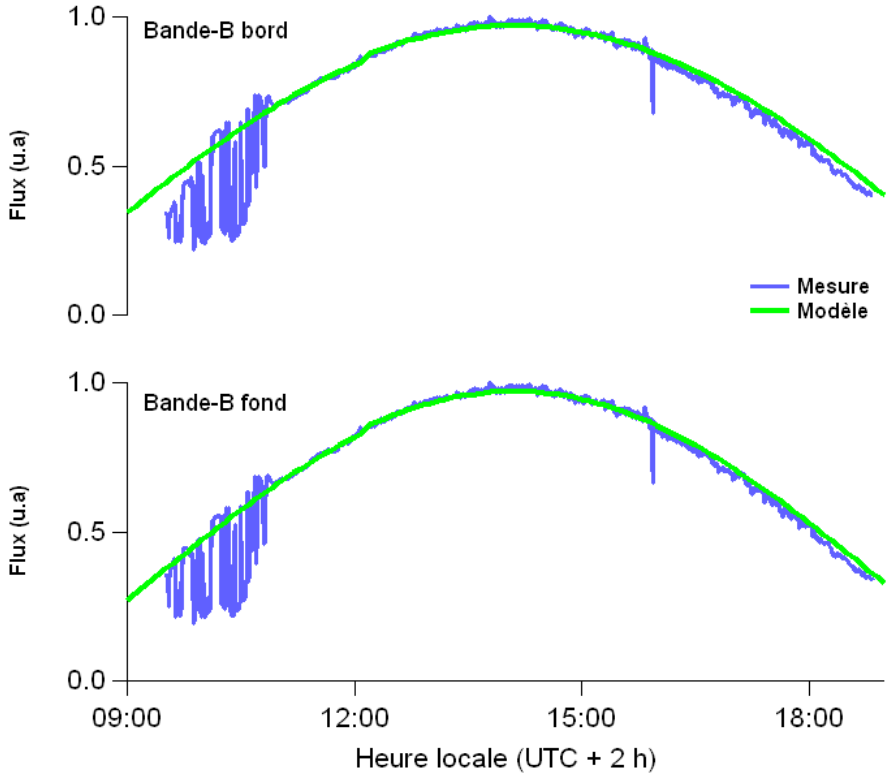


Figure III.31 *Comparaison radiance modélisé/radiance mesuré le 2 juin 2005 à Barrax dans la bande O_2-B.*

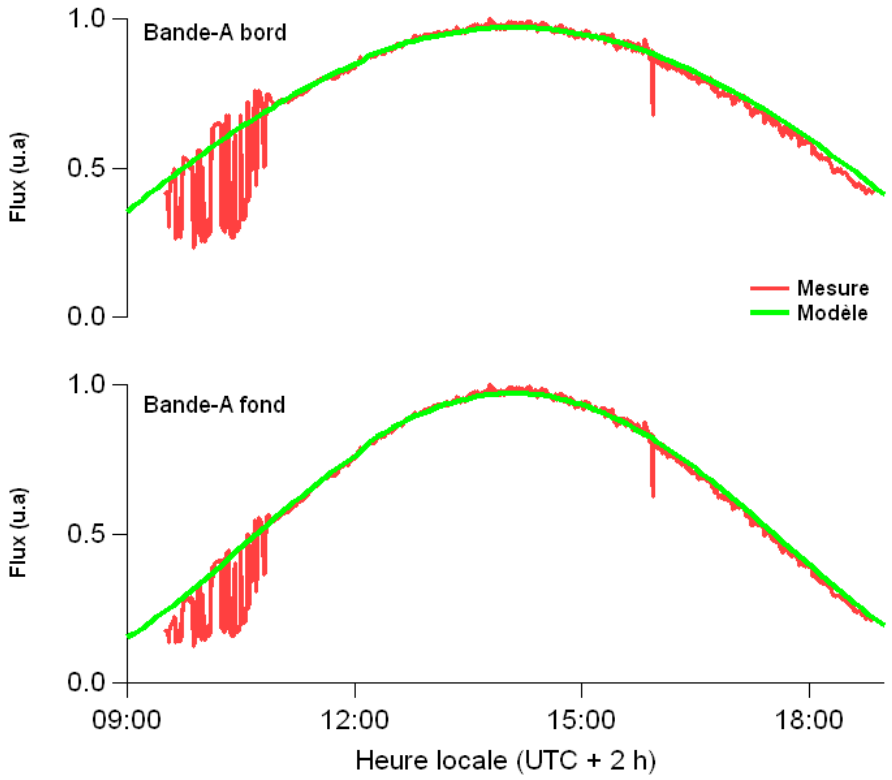


Figure III.32 *Comparaison radiance modélisée/radiance mesurée le 2 juin 2005 à Barrax dans la bande O_2-A.*

On voit sur ces figures que les cycles diurnes des flux modélisés et mesurés sont en bon accord. En particulier il n'y pas de divergence forte pour les canaux au fond. La variation du flux au fond de la bande dépendant très fortement de la position et de la forme du filtre de transmission, cela montre que calibration des filtres de transmission de TerFLEX est bonne. Le problème ne serait donc pas du côté de la mesure des filtres de transmission.

Se pose maintenant la question de savoir si la calibration relative des canaux est bonne. En effet, pour obtenir des unités radiométriques, TerFLEX est calibré en utilisant un corps noir. Cela donne pour chaque canal un coefficient permettant de passer des unités TerFLEX à des unités radiométriques.

Pour investiguer ce problème, nous avons calculé le rapport entre le flux mesuré et le flux modélisé. Ce rapport est ensuite ramené à 1 pour le canal du bord dans la bande O_2-B. La *Table III.29* donne les valeurs des rapports à 14 h (midi solaire).

Canal	Rapport mesure/modèle O_2-B	Rapport mesure/modèle O_2-A
Bord	1	0.96
Fond	**0.89**	0.95

Table III.29 *Ecarts entre mesure et modèle dans les deux bandes de l'oxygène au midi solaire, les valeurs ont été normalisées à 1 pour le canal au bord dans la bande O_2-B.*

On constate que ce rapport est proche pour les deux canaux de la bande O_2-A et que ces rapports sont proches de celui du bord de la bande O_2-B.

Par contre, pour le canal au fond à 687 nm le rapport est inférieur de 11 %. Deux explications peuvent être avancées :

- MODTRAN ne rend pas bien compte du flux au fond de la bande O_2-B
- la calibration de TerFLEX pour ce canal n'est pas bonne

Etant donné qu'on retrouve avec MODTRAN les cycles diurnes dans la bande O_2-A, qu'on retrouve également la forme des cycles des profondeurs et des flux, on peut penser que le problème vient plutôt d'un problème de calibration du capteur. En effet, nous ne voyons pas de raison particulière pour que, dans un seul canal, MODTRAN ne rende pas bien compte de la valeur du flux, tout en rendant compte de sa variation diurne.

3.6.6 Conclusion – Validation de MODTRAN

Pour pouvoir tenir compte au mieux des conditions atmosphériques pendant les mesures effectuées, nous avons intégré les données d'aérosols et les profils de température et de pression dans MODTRAN. L'effort de caractérisation de l'atmosphère a été important pendant cette campagne et on ne peut s'attendre à avoir de telles données pour des mesures avionnées de fluorescence. L'intégration des données dans MODTRAN et leur impact sur la modélisation a permis de conclure que :

- La connaissance de la température et de la pression au niveau du sol permet d'avoir une incertitude sur la profondeur inférieure à 1%.

- On peut rendre compte du contenu en aérosols à partir de la mesure de l'AOT, à condition de pouvoir identifier le modèle d'aérosol le plus proche des conditions réelles.

Si le problème de calibration empêche d'avoir une valeur exacte dans la bande O_2-B pour les mesures faites pendant la campagne SEN2FLEX, l'excellente corrélation des variations de profondeurs mesurées et modélisées indique que MODTRAN est capable de rendre compte des variations diurnes des profondeurs de l'oxygène. Il y a donc tout lieu de penser que MODTRAN rend compte des phénomènes d'absorption dans les bandes de l'oxygène avec la précision suffisante pour notre utilisation.

3.7 Estimation des différentes contributions au signal mesuré

Nous allons maintenant nous pencher sur l'évaluation des différentes contributions au signal mesuré. Dans un premier temps nous expliciterons chaque contribution en fonction des paramètres photométriques de l'atmosphère et de la surface. Puis nous évaluerons quantitativement ces contributions à l'aide de MODTRAN. Nous redonnons ci-dessous la figure résumant la provenance des différentes contributions au signal mesuré par le capteur.

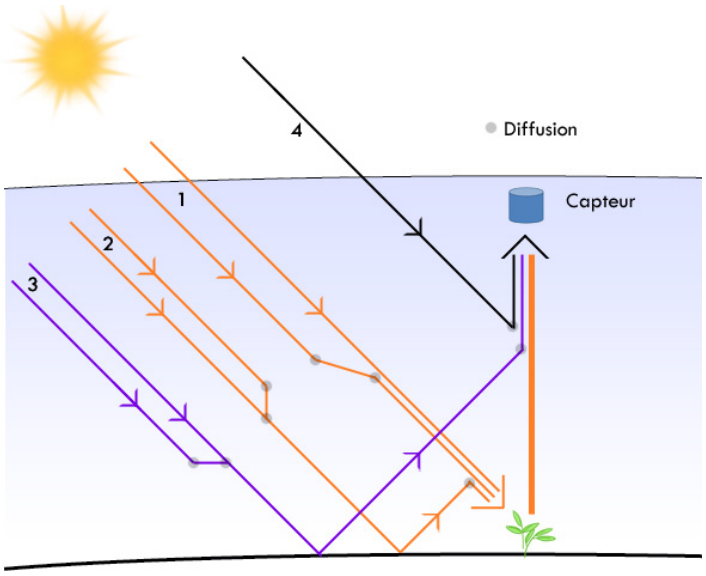


Figure III.33 *Vue schématique des différentes contributions au signal mesuré par le capteur.* ***Trajet 1 et 2*** *: éclairement de la cible (1- par le soleil, 2- par l'environnement).* ***Trajet 3*** *: Contribution de l'environnement.* ***Trajet 4*** *: Contribution de l'atmosphère.*

3.7.1 Equation du transfert radiatif

Nous avons donné dans la section 3.2.1 une équation donnant les différentes contributions au signal mesuré par le capteur *(III.19*). Nous allons maintenant revenir un peu plus en détail sur l'établissement de cette équation. Dans la suite nous supposerons que toute les surfaces considérées (cible et environnement) sont uniformes et lambertiennes. Nous nous plaçons du point de vue de la cible observée par notre capteur, en visée au nadir. Toutes les formules sont données pour un faisceau monochromatique.

- **Eclairement de la cible par le soleil :** Trajet 1, *Figure III.33*

Chaque élément du sol reçoit un éclairement qui est la somme de trois termes : l'éclairement direct, l'éclairement diffus et l'éclairement diffusé par son environnement et rétrodiffusés par l'atmosphère. Soit I_0 l'éclairement solaire hors atmosphère et θ_s l'angle solaire zénithal. L'éclairement qui en résulte sur notre cible s'écrit :

$$I_S = T(\theta s)\, I_0 \cos\theta_s \qquad (III.28)$$

Avec $T(\theta_s)$, transmission le long du trajet soleil-cible.

- **Eclairement de la cible par l'environnement :** Trajet 2, *Figure III.33*

L'éclairement réfléchi par l'environnement et rétrodiffusé par l'atmosphère vers la cible s'écrit :

$$I_{env} = T(\theta_s) I_0 \cos\theta_s \sum_{n=1}^{\infty} (r_a \rho_e)^n \qquad (III.29)$$

Avec ρ_e réflectance apparente de l'environnement et r_a albédo hémisphérique de l'atmosphère. La somme sur n représente les différentes interactions possibles entre l'environnement et l'atmosphère avant que le flux lumineux n'éclaire notre cible.

- **Eclairement total de la cible, radiance**

L'éclairement total de la cible, I vaut donc :

$$I = I_S + I_{env} \qquad (III.30)$$

$$I = T(\theta_s) I_0 \cos\theta_s + T(\theta_s) I_0 \cos\theta_s \sum_{n=1}^{\infty} (r_a \rho_e)^n \qquad (III.31)$$

Que l'on peut réécrire :

$$I = \frac{T(\theta_s) I_0 \cos\theta_s}{1 - r_a \rho_e} \qquad (III.32)$$

La radiance de la cible lambertienne, noté L^+, sera donnée par :

$$L^+ = \frac{\rho}{\pi} \frac{T(\theta_s) I_0 \cos\theta_s}{1 - r_a \rho_e} \qquad (III.33)$$

- **Contribution de l'atmosphère :** Trajet 4, *Figure III.33*

La radiance propre de l'atmosphère s'écrit :

$$ATM = \frac{\rho_a}{\pi} I_0 \cos\theta_s \qquad (III.34)$$

Avec ρ_a représentant la réflectance apparente de l'atmosphère dans les conditions d'observation.

- **Contribution de l'environnement :** Trajet 3, *Figure III.33*

Si l'on néglige le fait que l'environnement est lui même éclairé par la cible, la contribution de l'environnement est donnée par :

$$ENV = \frac{\rho_e}{\pi} T(\theta_s) I_0 \cos\theta_s \sum_{n=0}^{\infty} (r_a \rho_e)^n \qquad (III.35)$$

Qui se réécrit :

$$ENV = \frac{\rho_e}{\pi} \frac{T(\theta_s) I_0 \cos\theta_s}{1 - r_a \rho_e} \qquad (III.36)$$

- **Signal mesuré au niveau du capteur**

Exprimons maintenant le flux atteignant le capteur. Il sera la somme de trois contributions : le flux réfléchi par la cible et transmis au capteur, le flux réfléchi par l'environnement et transmis de manière diffuse vers le capteur (*ENV*) et la radiance propre de l'atmosphère (*ATM*) (flux réfléchi par l'atmosphère avant interaction avec le sol). La contribution de la cible est simplement la part transmise du flux réfléchi L^+ :

$$T_r L^+ \qquad (III.37)$$

Avec T_r la transmission le long du trajet cible-capteur.

Au final, on aura, au niveau du capteur :

$$L = T_r \frac{\rho}{\pi} \frac{T(\theta_s) I_0 \cos\theta_s}{1 - r_a \rho_e} + \frac{\rho_e}{\pi} \frac{T(\theta_s) I_0 \cos\theta_s}{1 - r_a \rho_e} + \frac{\rho_a}{\pi} I_0 \cos\theta_s \qquad (III.38)$$

Ou, plus simplement en combinant avec *(III.32)*:

$$L = T_r \frac{\rho}{\pi} I + \frac{\rho_e}{\pi} I + \frac{\rho_a}{\pi} I_0 \cos\theta_s \qquad (III.39)$$

Et, en ajoutant la fluorescence puis en intégrant sur la transmission du filtre du capteur, on retrouve l'équation *(III.19*).

$$L = \frac{1}{\int S(\lambda) d\lambda} \int S(\lambda) \left(T_r(\lambda) \left(\frac{\rho(\lambda)}{\pi} I(\lambda) + f(\lambda) \right) + \frac{\rho_e(\lambda)}{\pi} I(\lambda) + \frac{\rho_a(\lambda)}{\pi} I_0(\lambda) \cos\theta_s \right) d\lambda \qquad (III.40)$$

3.7.2 Evaluation quantitative à l'aide de MODTRAN

Afin de simplifier nous allons reprendre les notations de l'équation *(III.19*), tout en ajoutant les dépendances des différents termes. :

$$L(z,t,\rho,\rho_e) = \frac{1}{\int S(\lambda) d\lambda} \int S(\lambda) T(\lambda, z) \left(\frac{\rho(\lambda)}{\pi} I(\lambda, t, \rho_e) + f(\lambda) \right) d\lambda + ENV(z,t,\rho_e) + ATM(z,t) \qquad (III.41)$$

Avec z, l'altitude de mesure et t l'heure de la mesure (remplace la dépendance en θ_s, angle zénithal solaire). Bien sûr, chacun des termes dépend également des conditions atmosphériques. Les paramètres ρ_a et r_a étant l'expression de ces conditions nous les avons volontairement omis dans l'équation *(III.41)*. De même, la dépendance avec l'angle de visée n'est pas indiquée puisque nous considérons uniquement le cas d'une visée au nadir.

Dans la suite nous allons indiquer la manière dont MODTRAN va être utilisé pour extraire les informations intéressantes. Pour illustrer la variation de ces paramètres en fonction de l'altitude nous utiliserons des simulations faites à partir de la configuration indiquée *Table III.2*. Toutes les simulations seront faites au midi solaire. Pour être un peu plus général, le niveau du sol sera ramené au niveau de la mer (élévation nulle) et nous utiliserons, comme pour l'étude de sensibilité, des filtres gaussiens de largeur équivalente aux filtres d'AirFLEX (0.5 nm dans la bande O_2-B et 1 nm dans la bande O_2-A). Nous utiliserons la notation suivante :

- B687 se réfère au canal au bord de la bande d'absorption O_2-B
- F687 se réfère au canal au fond de la bande d'absorption O_2-B
- B760 se réfère au canal au bord de la bande d'absorption O_2-A
- F760 se réfère au canal au fond de la bande d'absorption O_2-A

De manière générale, les relations en fonction de l'altitude seront données jusqu'à l'altitude de saturation (généralement entre 30 km et 40 km).

3.7.3 Contribution de l'atmosphère

La contribution de l'atmosphère est la contribution la plus simple à prendre en compte. C'est la contribution qui existe indépendamment de la surface. On a :

$$ATM(z,t) = L(z,t,\rho,\rho_e)\big|_{\substack{\rho=0 \\ \rho_e=0}} \qquad (III.42)$$

Il suffit donc dans MODTRAN de faire une simulation en choisissant une surface d'albédo nul (cible et environnement) pour obtenir la contribution de l'atmosphère. Cette contribution reste dépendante de l'altitude, de l'heure et des conditions atmosphériques. La *Figure III.34* donne pour chaque canal la valeur de la contribution atmosphérique en fonction de l'altitude. Cette figure donne également la part de cette contribution dans le signal total pour le cas d'une cible et d'un environnement uniforme ayant une réflectance de 1. La contribution maximale se situe entre 2 % et 7 %. Bien sûr, la contribution de l'atmosphère étant indépendante de la surface, sa contribution relative au signal total sera d'autant plus forte que la réflectance de la cible sera faible. Cette contribution devrait donc être beaucoup plus importante lorsqu'on observera la végétation dans les gammes de longueurs d'onde de la bande O_2-B. Nous y reviendrons un peu plus loin.

La *Figure III.34* indique également que la contribution de l'atmosphère est plus importante dans les canaux de fond de bande que dans les canaux de bord. On voit donc que globalement, l'atmosphère aura tendance, comme la fluorescence, à combler les bandes d'absorption.

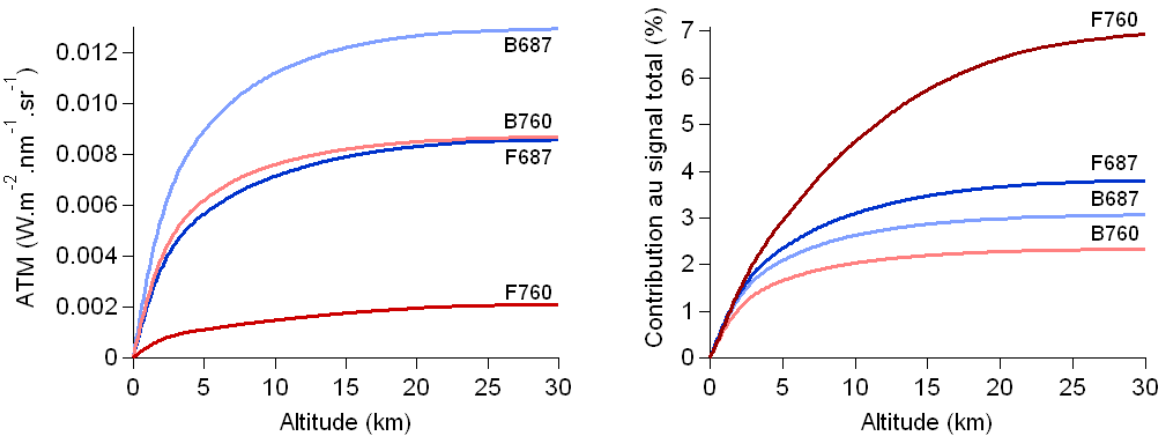


Figure III.34 *Evolution de la contribution propre de l'atmosphère en fonction de l'altitude et contribution au signal total en fonction de l'altitude pour une surface lambertienne uniforme de réflectance 1.*

3.7.4 Contribution de l'environnement

On a vu que l'environnement contribuait de deux manières au signal. La première notée *ENV*, traduit la diffusion vers le capteur du rayonnement incident réfléchi par l'environnement. Cette contribution s'obtient facilement à partir de l'équation *(III.41)* en écrivant :

$$ENV(z,t,\rho_e) = L(z,t,\rho,\rho_e)|_{\rho=0} - ATM(z,t) \qquad (III.43)$$

MODTRAN permettant de définir une réflectance pour la cible et une réflectance pour l'environnement, cette contribution est obtenue facilement en choisissant une réflectance nulle pour la cible et en soustrayant au résultat la contribution de l'atmosphère.

Tout le problème de l'estimation de la contribution de l'environnement va donc reposer sur l'estimation de la réflectance moyenne de l'environnement. Pour pouvoir déterminer la réflectance moyenne de l'environnement, il faut non seulement connaître la réflectance de l'environnement en tous points mais également estimer la contribution relative de chacun de ces points au signal.

Tanre et al., 1981 ont proposé une formulation permettant d'évaluer la réflectance moyenne de l'environnement en fonction des paramètres atmosphériques. Cette formulation a été utilisée ensuite pour tenir compte des effets d'environnement dans le modèle 6S (Vermote et al., 1997). Pour une cible circulaire, placée à l'origine, l'expression de la réflectance moyenne est donnée en coordonnées polaires par :

$$\rho_e(z) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{\infty} \rho(r,\varphi)\frac{dF(r,z)}{dr}drd\varphi \qquad (III.44)$$

Avec $\rho(r,\varphi)$ réflectance de l'environnement au point de coordonnées (r,φ) et $F(r,z)$ fonction d'environnement représentant la probabilité pour qu'un photon envoyé depuis l'espace soit diffusé et atteigne la surface dans un cercle de rayon r autour de la cible. Par le principe inverse cette fonction correspond également aux photons issus d'un cercle de rayon r dans l'environnement de la cible et diffusés vers le capteur situé à une altitude z.

La fonction $F(r,z)$ dépend des propriétés optiques de l'atmosphère, en particulier des propriétés de diffusion des gaz et des particules et de leur répartition en fonction de l'altitude. Tanre et al., 1981 séparent donc en deux contributions cette fonction. Bien que dans notre cas, le fort couplage entre absorption et diffusion empêche de réellement séparer la contribution des aérosols de l'effet de l'absorption gazeuse, nous reproduisons dans la *Figure III.35* les résultats issus de Vermote et al., 1997 pour ce qui concerne l'évolution de ces fonctions avec l'altitude du capteur.

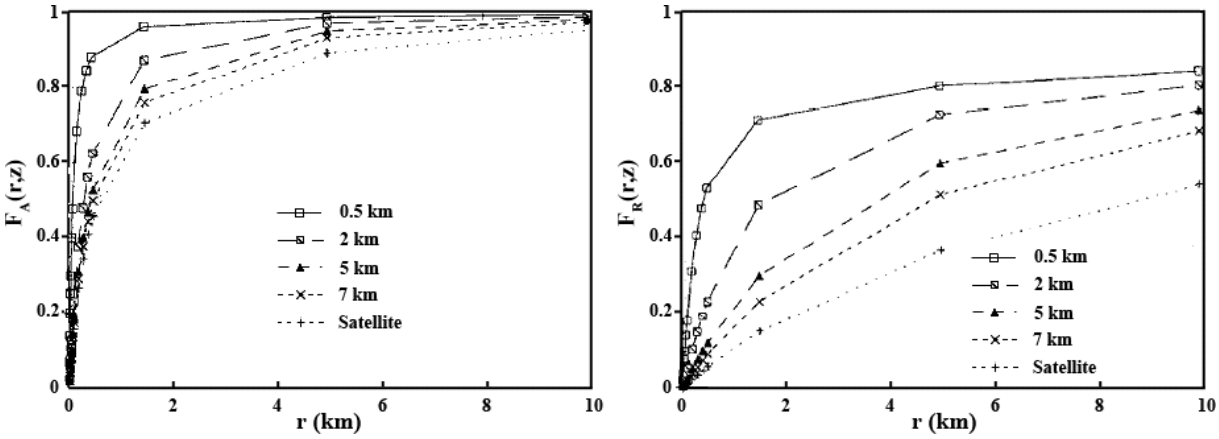


Figure III.35 *Variation des fonctions d'environnement pour différentes altitudes du capteur. A gauche, fonction d'environnement associée à une atmosphère contenant uniquement des aérosols $F_A(z,r)$. A droite, fonction d'environnement associée à une atmosphère moléculaire pure $F_R(z,r)$. D'après Vermote et al., 1997.*

La *Figure III.35* illustre le fait que la partie de l'environnement contribuant le plus est la partie la plus proche de la cible et qu'à mesure que l'on éloigne le capteur du sol, l'étendue de l'environnement contribuant au signal augmente. Ces indications donnent l'ordre de grandeur des distances qu'il faudra considérer pour tenir compte des effets d'environnement. On retiendra de cette figure que :

- Pour un capteur à 500 m d'altitude, 80 % de l'environnement contribuant au signal se situe à une distance maximum de la cible de l'ordre de 1 km pour la composante associée aux aérosols et 10 km pour la composante moléculaire.

- Pour un capteur hors atmosphère, cette distance tend vers 4 km pour la composante associée aux aérosols tandis que la contribution des 10 premiers kilomètres pour l'atmosphère moléculaire tombe à 40 %.

La fonction $F(r,z)$ est donc une combinaison des deux fonctions $F_A(z,r)$ et $F_R(z,r)$, pondérées par la capacité de transmission par diffusion de l'atmosphère à la longueur d'onde considérée. La fonction d'environnement sera fortement différente selon que l'on regardera au fond de la bande d'oxygène ou au bord. Une étude poussée de cette fonction d'environnement sera alors nécessaire pour permettre de tenir compte efficacement de la contribution de l'environnement dans le signal mesuré depuis un avion. MODTRAN ne permet pas de rentrer sa propre fonction d'environnement. Il n'offre qu'un seul paramètre d'entrée pour tenir compte de l'environnement : sa réflectance ρ_e. Dans MODTRAN, l'environnement est considéré comme uniforme et on ne peut pas entrer de distribution des réflectances.

On pourra cependant penser que, dans le cas de vol à basse altitude la cible est de même nature que l'environnement et on pourra ainsi utiliser la valeur de réflectance de la cible pour évaluer la contribution de l'environnement.

Revenons à présent sur l'estimation donnée par MODTRAN de la contribution de l'environnement. La *Figure III.36* donne les contributions pour chaque canal, ainsi que la part de cette contribution dans le signal total pour une cible et un environnement identique de réflectance 1 ($\rho = \rho_e = 1$). On voit que la contribution de l'environnement est supérieure d'un facteur 2 à la contribution de l'atmosphère dans les mêmes conditions.

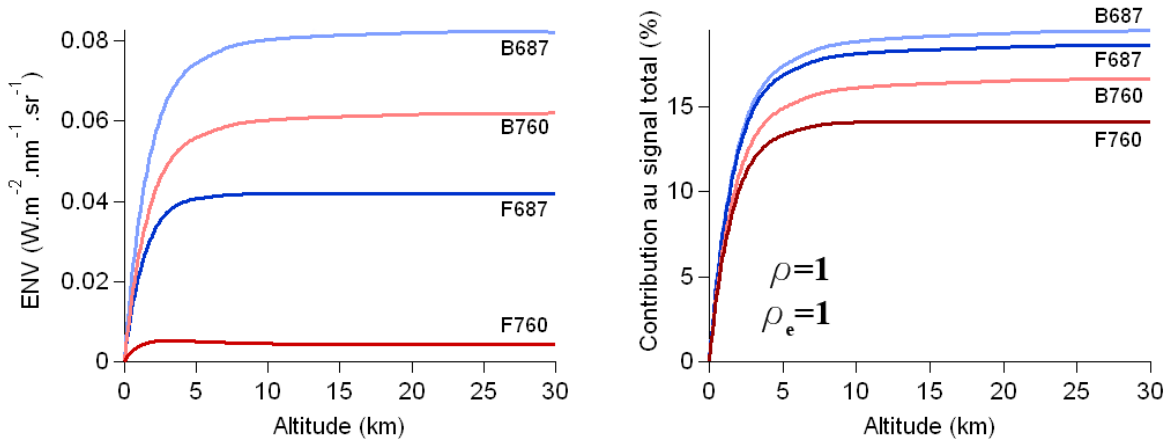


Figure III.36 *Evolution de la contribution de l'environnement en fonction de l'altitude et contribution au signal total en fonction de l'altitude pour* $\rho = \rho_e = 1$.

Bien que ces valeurs correspondent à un cas idéal dans lequel il n'y a pas de différence entre la réflectance de la cible et la réflectance de l'environnement. On retiendra que :

- La contribution de l'environnement est plus importante au bord des bandes d'absorption qu'au fond.

- Lorsque la cible a la même réflectance que son environnement, la part de l'environnement dans signal total est comprise entre 10 % et 20 %.

- ***Seconde contribution de l'environnement***

La seconde contribution de l'environnement est sa contribution à l'éclairement de la cible. Cette contribution, donnée par l'équation *(III.29)*, ne dépend pas de l'altitude de mesure. On la calculera donc au niveau du sol en écrivant :

$$ENV_2(t, \rho_e) = L(z, t, \rho, \rho_e)|_{z=0} - L(z, t, \rho, \rho_e)|_{\substack{z=0 \\ \rho_e=0}} \qquad (III.45)$$

Cette contribution se calcule à partir du flux réfléchi par un sol homogène (même réflectance pour l'environnement et la cible) auquel on soustrait le flux réfléchi par la cible lorsqu'elle n'est pas éclairée par l'environnement $L(z, t, \rho, \rho_e)|_{\substack{z=0 \\ \rho_e=0}}$ on obtient alors le flux réfléchi par la cible provenant de l'éclairement de l'environnement. La *Figure III.37* donne cette contribution en fonction de la réflectance de l'environnement.

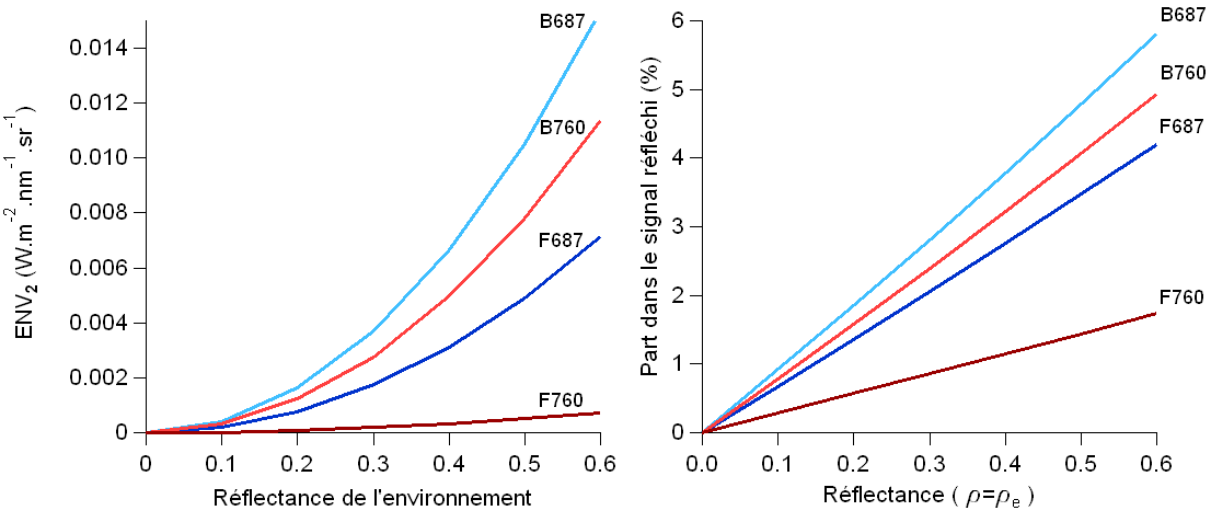


Figure III.37 *Flux réfléchi par la cible provenant de l'éclairement de l'environnement en fonction de la réflectance de l'environnement et part dans le rayonnement réfléchi par la cible avec* $\rho = \rho_e$.

La plus grande contribution sera pour une cible végétale dans la bande O_2-A. Pour une réflectance de 0.6 elle représente 5 % du signal total réfléchi par la cible. Cette contribution étant la conséquence de multiples diffusions, elle n'a pas la même profondeur que le flux solaire directement réfléchi par la cible. Le fait de tenir compte de cet éclairement induit une modification de l'ordre de 2 % de la profondeur du flux solaire réfléchi seul.

Dans la bande O_2-B, les plus fortes réflectances que nous aurons à traiter seront pour des champs nus, aux alentours de 0.25, comme le montre la *Figure III.37*, l'influence sera moins importante. De fait, la contribution de l'éclairement modifie la profondeur du flux solaire réfléchi de moins de 0.5 %.

On voit que cet éclairement de la cible n'est pas négligeable devant les modifications de profondeur induites par la fluorescence. Cependant il faut avoir en tête que si la profondeur de référence est acquise dans le même climat lumineux que la profondeur sur la végétation, alors elle rend compte de l'éclairement de la végétation, donc elle contient cette contribution. Il n'y aura alors pas de correction à faire. Par contre si on veut utiliser MODTRAN pour générer des profondeurs de référence, il faudra pouvoir estimer cette contribution avec précision.

3.7.5 Transmission

- **Transmission mesurée par un capteur**

Soit $T(\lambda, z)$, la transmission à l'altitude z et à la longueur d'onde λ. Soit $\varphi(\lambda)$, le flux au niveau du sol et soit $S(\lambda)$ la transmission du capteur à la longueur d'onde λ . Le flux mesuré par le capteur à l'altitude z=0 sera :

$$\frac{1}{\int S(\lambda)\, d\lambda} \int S(\lambda)\varphi(\lambda)\, d\lambda \qquad \textit{(III.46)}$$

Et à l'altitude z :

$$\frac{1}{\int S(\lambda)\, d\lambda} \int T(\lambda, z)S(\lambda)\varphi(\lambda)\, d\lambda \qquad \textit{(III.47)}$$

Par conséquent, la transmission mesurée par ce capteur T_{eff} (pour transmission effective) sera :

$$T_{eff} = \frac{\int T(\lambda, z) S(\lambda) \varphi(\lambda)\, d\lambda}{\int S(\lambda) \varphi(\lambda)\, d\lambda} \quad \textit{(III.48)}$$

T_{eff} est le rapport entre la radiance mesurée à l'altitude de mesure et la radiance qui serait mesurée au niveau du sol. Elle peut être évaluée de manière simple dans deux cas limites :

- Si la transmission réelle $T(\lambda, z)$ est une constante, elle peut être sortie de l'intégrale et on a alors directement la valeur $T_{eff} = T(z)$.

- Si le flux $\varphi(\lambda)$ est une constante sur l'intervalle de longueur d'onde on a alors simplement :

$$T_{eff} = \frac{\int T(\lambda, z) S(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda) d\lambda} \quad \textit{(III.49)}$$

Dans tous les autres cas T_{eff}, va dépendre du flux au niveau du sol $\varphi(\lambda)$. Il est important de remarquer que T_{eff} ne dépend pas de l'intensité de ce flux mais de sa *forme* (pour $\varphi(\lambda) = cst$, la transmission ne dépend pas de la valeur de $\varphi(\lambda)$).

- **Application à la mesure de la fluorescence**

Après avoir évalué les contributions de l'atmosphère et de l'environnement il reste à évaluer la transmission du rayonnement entre la cible et le capteur. Après correction de la contribution de l'atmosphère et de l'environnement l'expression de la radiance pour un canal s'écrit :

$$L^*(z) = \frac{1}{\int S(\lambda) d\lambda} \int S(\lambda) T(\lambda, z) \left(\frac{\rho(\lambda)}{\pi} I(\lambda, t, \rho_e) + f \right) d\lambda \quad \textit{(III.50)}$$

D'après *(III.49)* on a :

$$T_{eff} = \frac{\int S(\lambda) T(\lambda, z) \left(\frac{\rho(\lambda)}{\pi} I(\lambda, t, \rho_e) + f \right) d\lambda}{\int S(\lambda) \left(\frac{\rho(\lambda)}{\pi} I(\lambda, t, \rho_e) + f \right) d\lambda} \quad \textit{(III.51)}$$

Le fait que cette transmission effective dépende de la radiance a pour conséquence immédiate que la transmission effective dépend de l'heure : en effet, pour les canaux au fond des bandes, le spectre lumineux subit une déformation au cours de la journée (la profondeur des bandes de l'oxygène varie). On écrira donc que la transmission dépend de l'altitude et de l'heure : $T_{eff}(z, t)$.

La radiance de notre cible comprend, comme nous l'avons vu précédemment, trois termes : l'éclairement solaire réfléchi, l'éclairement de l'environnement réfléchi et la contribution de la fluorescence. Les formes spectrales de ces contributions sont différentes: au fond des bandes, l'éclairement solaire et la contribution de l'environnement sont marqués par l'absorption de l'oxygène alors que l'émission de fluorescence est supposée constante. Sur les canaux des bords ces différences sont moins marquées.

Etant donné que les formes spectrales des contributions sont différentes, on peut définir pour chacun des termes contribuant à la radiance de la cible une transmission effective. Ainsi on appellera T_r la transmission associée au flux solaire réfléchi (I_S), T_{env} la transmission associée à l'éclairement de l'environnement (I_{env}) et T_{fluo} la transmission associée à la contribution de la fluorescence. Les réflectance de la cible et de l'environnement sont considérées constantes sur la largeur des canaux. La *Table III.30* donne la définition de ces transmissions effectives.

Transmission	Définition	
Transmission associée au flux solaire réfléchi	$T_r(z,t) = \frac{\int S(\lambda)\, T(\lambda,z)\, I_S(\lambda,t)\, d\lambda}{\int S(\lambda)\, I_S(\lambda,t)\, d\lambda}$	*(III.52)*
Transmission associée à l'éclairement de l'environnement	$T_{env}(z,t) = \frac{\int S(\lambda)\, T(\lambda,z)\, I_{env}(\lambda,t,\rho_e)\, d\lambda}{\int S(\lambda)\, I_{env}(\lambda,t,\rho_e)\, d\lambda}$	*(III.53)*
Transmission associée à la fluorescence	$T_{fluo}(z) = \frac{\int S(\lambda)\, T(\lambda,z)\, f\, d\lambda}{\int S(\lambda)\, f\, d\lambda}$	*(III.54)*

Table III.30 *Définition des transmissions effectives associées à chaque composante du signal mesuré par le capteur.*

On remarquera que $T_r(z,t)$ et $T_{env}(z,t)$ ne dépendent pas de la réflectance de l'environnement ou de la cible.

La transmission effective totale à une altitude z, pour une cible de réflectance ρ, un environnement de réflectance ρ_e et une fluorescence constante f (en W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}) s'exprime en fonction des différentes transmissions :

$$T_{eff}(z,t) = \frac{T_r(z)\int S(\lambda)\frac{\rho}{\pi} I_S(\lambda,t)|_{z=0}\, d\lambda + T_{env}(z)\int S(\lambda)\frac{\rho}{\pi} I_{env}(\lambda,t,\rho_e)|_{z=0}\, d\lambda + T_{fluo}(z) f}{\int S(\lambda)\,\frac{\rho}{\pi} I_S(\lambda,t)|_{z=0}\, d\lambda + \int S(\lambda)\frac{\rho}{\pi} I_{env}(\lambda,t,\rho_e)|_{z=0}\, d\lambda + f} \quad \textit{(III.55)}$$

- ***Evaluation des transmissions associées au flux réfléchi par la cible***

MODTRAN permet d'obtenir les différentes transmissions que l'on a définies plus haut. Les transmissions associées au flux solaire réfléchi et à l'éclairement de l'environnement s'obtiennent facilement en calculant ces flux au sol et à l'altitude souhaitée puis en en faisant le rapport.

- ***Evaluation de la transmission associée à la fluorescence, T_{fluo}***

Dans tous nos calculs nous considérons que la fluorescence est constante sur la largeur des canaux de mesures. Cela signifie que T_{fluo} ne dépend pas de la valeur de la fluorescence. Pour l'évaluer il faut évaluer la transmission d'un flux constant au niveau du sol. MODTRAN ne permet pas de simuler

une émission au niveau du sol et nous sommes donc obligés d'utiliser une astuce qui va permettre d'avoir un spectre constant après réflexion par le sol. Pour cela, il suffit de donner au sol, une réflectance telle qu'elle compense exactement les variations du spectre solaire ($I(\lambda,z)|_{z=0} \times \rho(\lambda) = cst$). Ainsi, après réflexion nous aurons un spectre constant semblable à une émission de fluorescence au niveau du sol. La transmission de la fluorescence sera le rapport entre le flux mesuré à l'altitude z et ce flux constant au niveau du sol.

- ***Evolution de la transmission totale avec l'altitude***

La *Figure III.38* présente la transmission effective dans chacun des canaux de mesure d'AirFLEX en fonction de l'altitude. Le calcul a été effectué pour un environnement de réflectance 1 et une fluorescence de 4 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$. La transmission effective atteint ainsi une valeur de 0.74 pour B687, 0.62 pour F687, 0.78 pour B760 et 0.33 pour F760.

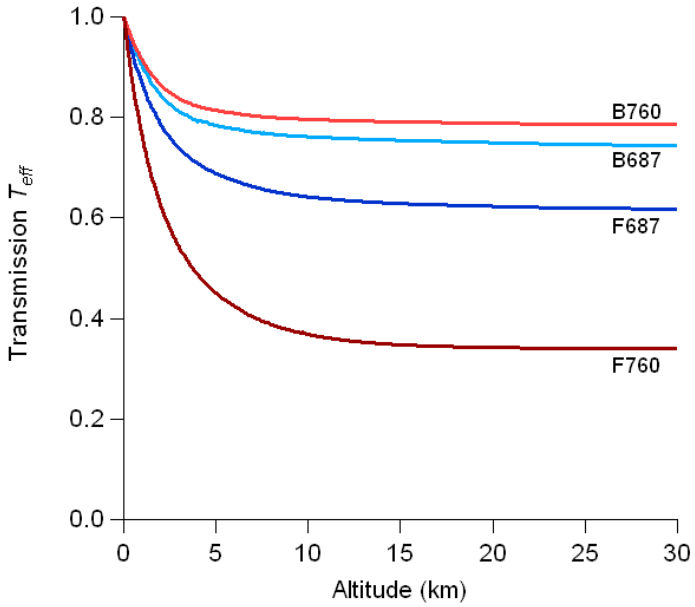


Figure III.38 *Transmission totale pour les différents canaux de mesure d'AirFLEX. Cette transmission a été calculée pour une fluorescence de 4 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ dans les deux bandes et la réflectance de l'environnement vaut 1.*

- ***Evolution des différentes transmissions avec l'altitude***

Les *Figure III.39* et *Figure III.40* donnent, pour chaque canal, l'évolution des différentes transmissions que nous avons définies $T_r(z,t)$ (flux solaire réfléchi), T_{env} (éclairement de l'environnement réfléchi) et T_{fluo} (transmission pour la fluorescence).

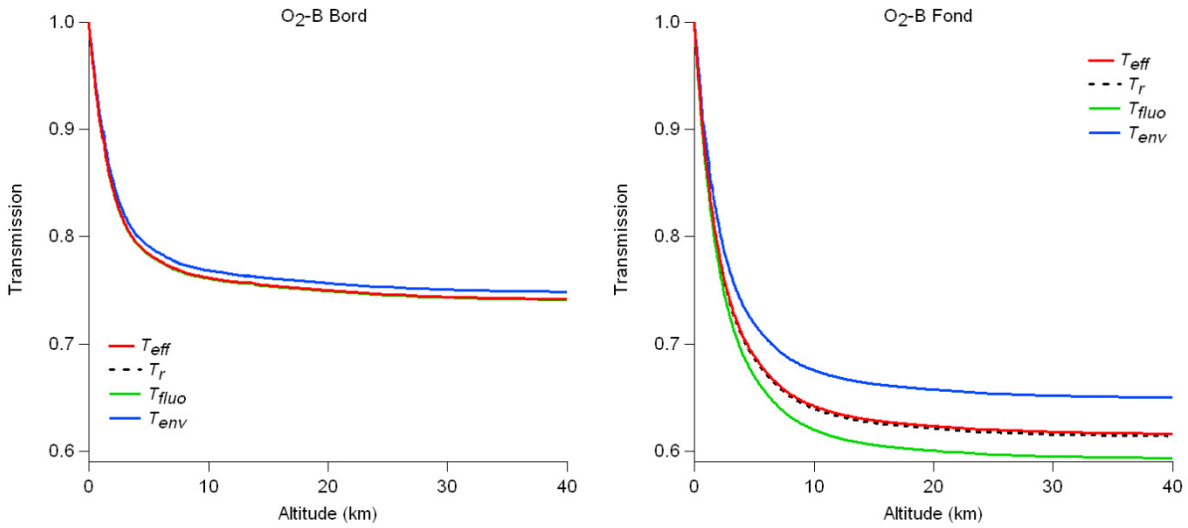


Figure III.39 *Evolution des différentes transmissions associées aux flux formant la radiance de la végétation pour les canaux de la bande O_2-B et écart entre T_{eff} et T_r. Les calculs ont été faits pour une réflectance d'environnement de 1 et une fluorescence de 4 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$.*

Pour la bande O_2-B on constate, comme attendu, que l'écart entre les différentes transmissions est bien plus important quand on regarde le canal du fond. C'est la conséquence directe de la différence de forme du spectre, fortement marqué par la bande d'absorption. La transmission associée à la fluorescence est celle qui est la plus faible, tandis que celle associée à l'environnement est la plus élevée. La transmission associée au flux solaire réfléchi se situe entre les deux. On voit en particulier qu'elle est très proche de la transmission effective : l'écart maximal est de -0.4 % pour la bande du fond et -0.1 % pour la bande au bord ($T_r(z,t) < T_{eff}(z,t)$). Pour la bande O_2-A (*Figure III.40*) les résultats sont très similaires.

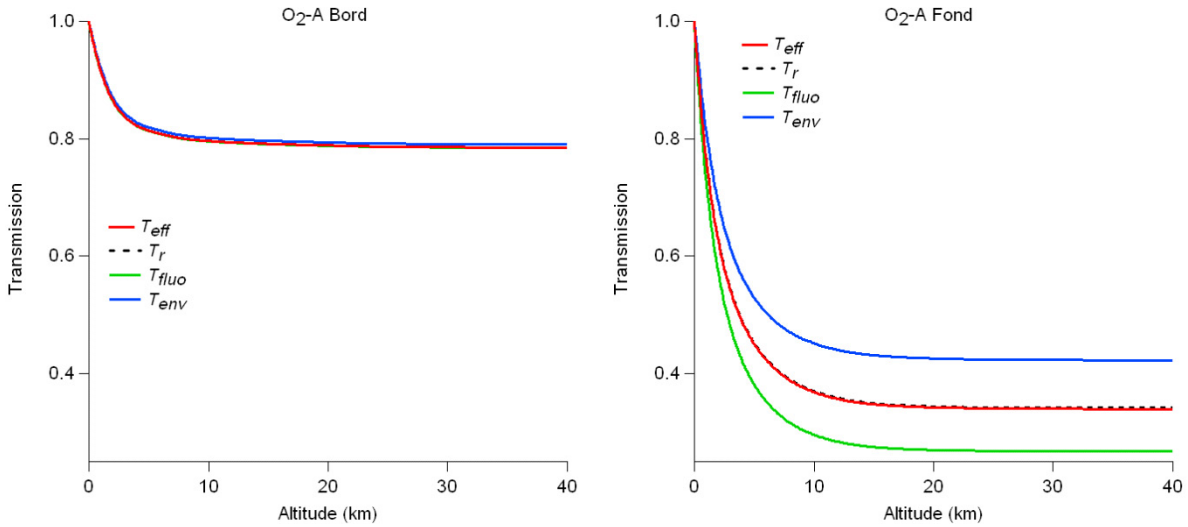


Figure III.40 *Evolution des différentes transmissions associées aux flux formant la radiance de la végétation pour les canaux de la bande O_2-A et écart entre T_{eff} et T_r. Les calculs ont été faits pour une réflectance d'environnement de 1 et une fluorescence de 4 $mW.m^{-2}.\ nm^{-1}.sr^{-1}$.*

3.7.6 Découplage des transmissions

Nous rappelons ici l'équation donnant la transmission effective :

$$T_{eff}(z,t) = \frac{T_r(z)\int S(\lambda)\frac{\rho}{\pi}I(\lambda,t)|_{z=0}\,d\lambda + T_{env}(z)\int S(\lambda)\frac{\rho}{\pi}I_{env}(\lambda,t,\rho_e)|_{z=0}\,d\lambda + T_{fluo}(z)f}{\int S(\lambda)\frac{\rho}{\pi}I(\lambda,t)|_{z=0}\,d\lambda + \int S(\lambda)\frac{\rho}{\pi}I_{env}(\lambda,t,\rho_e)|_{z=0}\,d\lambda + f} \quad (III.56)$$

C'est cette transmission qu'il faut évaluer pour corriger notre signal. Cependant on remarque que cette transmission, en plus de dépendre de l'altitude, dépend de la réflectance de la cible et de fluorescence ce qui pose un problème pour son évaluation. Une solution est de découpler la mesure de la fluorescence de l'évaluation de la transmission. Considérons $T_{Sol+Env}$, la transmission associée au flux réfléchi total uniquement (flux solaire et contribution de l'environnement) :

$$T_{Sol+Env}(z,t,\rho_e) = \frac{\left(I_{sol}(z,t) + I_{env}(z,t,\rho_e)\right)}{\left(I_{sol}(z,t)|_{z=0} + I_{env}(z,t,\rho_e)|_{z=0}\right)} \quad (III.57)$$

En plus de l'altitude et de l'heure cette transmission ne dépend que de la réflectance de l'environnement. Etant donné que la contribution de l'éclairement de l'environnement est très faible devant le flux solaire réfléchi on peut se demander s'il est vraiment nécessaire d'en tenir compte. La *Figure III.41* donne la variation de $T_{Sol+Env}$ en fonction de la réflectance de l'environnement, ρ_e, à une altitude de 300 m.

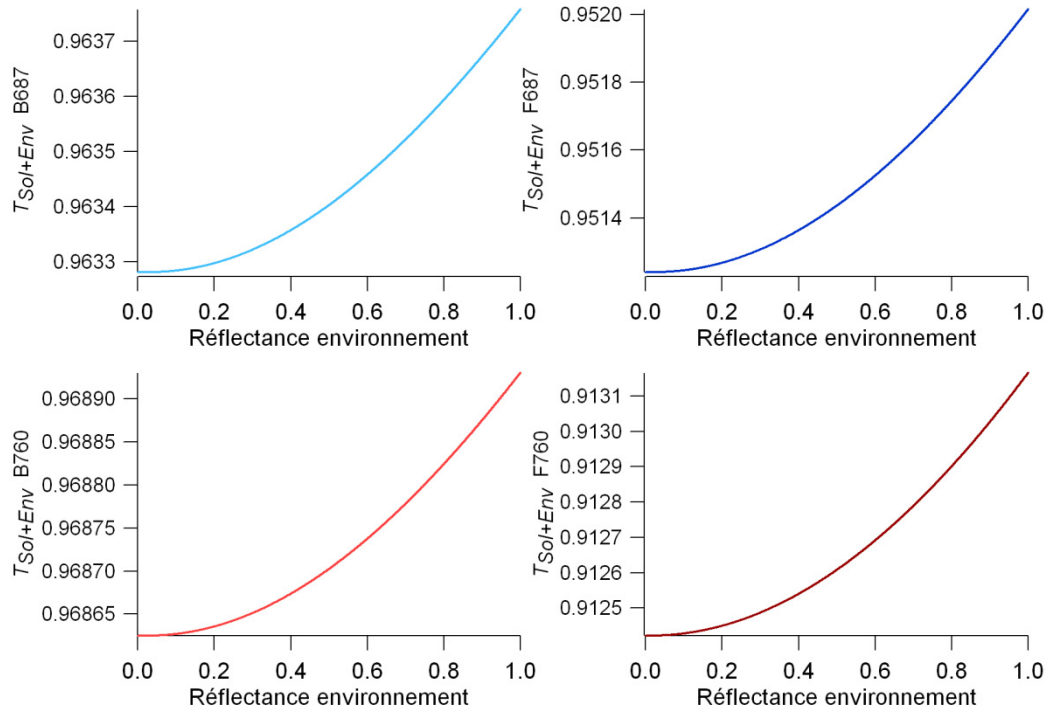


Figure III.41 *Evolution de la transmission effective $T_{Sol+Env}$ à 300 m d'altitude en fonction de la réflectance de l'environnement.*

On voit sur cette figure que la variation maximale pour les différents canaux est très faible, inférieure à 0.1 % entre une réflectance nulle (pas de contribution de l'environnement à l'éclairement

de la cible) et une réflectance de 1. Cette variation de la transmission sera la même quelque soit l'altitude de mesure. On pourra donc finalement négliger la contribution de l'environnement à l'éclairement de la cible pour évaluer cette transmission. On utilisera donc $T_r(z,t)$ à la place de $T_{Sol+Env}(z,t,\rho_e)$. Exprimons maintenant le flux au niveau du capteur en introduisons cette transmission.

- ***Mise en équation***

En découplant les transmissions, le flux à l'altitude *z* après avoir été corrigé des contributions de l'environnement et de l'atmosphère s'exprime sous la forme :

$$L(z) = T_r(z,t)\left(\frac{\rho}{\pi} I(\lambda,t,\rho_e) + \frac{T_{fluo}(z,t)}{T_r(z,t,\rho_e)} f\right) \qquad \textit{(III.58)}$$

Où $T_{fluo}(z,t)$ est la transmission associée à la fluorescence telle que définie par l'équation *(III.54)*. Comme nous l'avons vu, elle ne dépend pas de la fluorescence. La correction de la transmission se fera alors en deux temps : la première étape consiste à corriger le flux total en divisant le flux mesuré par $T_r(z,t)$ on obtient alors:

$$L(0) = \frac{L(z)}{T_r(z,t)} = \left(\frac{\rho}{\pi} I(\lambda,t,\rho_e) + f'\right) \qquad \textit{(III.59)}$$

Et on a la relation :

$$f' = \frac{T_{fluo}(z,t)}{T_r(z,t)} f \qquad \textit{(III.60)}$$

Dans sa forme, l'équation *(III.59)* est équivalente à ce que l'on a établi au niveau du sol. On peut donc définir un système comme on l'a exposé dans le CHAPITRE II permettant de calculer f'. Il ne restera plus, dans un deuxième temps, qu'à corriger f' pour retrouver la fluorescence, *f*, en utilisant l'équation *(III.60)*.

3.7.7 Conclusions

Nous avons donné la manière dont MODTRAN peut être utilisé pour extraire les différentes informations dont nous avons besoin pour corriger les signaux des effets de l'atmosphère.

Nous avons discuté du problème de l'évaluation de la transmission. Nous avons souligné le fait que la transmission vue par un capteur dépend de la forme spectrale du flux avant son absorption au sein du milieu de propagation. On retiendra qu'au final, on peut tenir compte de l'absorption du signal en calculant deux transmissions effectives : une transmission associée au flux réfléchi par la cible et une transmission associé à la fluorescence.

La contribution de l'atmosphère est simple à obtenir et ne dépend que des conditions atmosphériques.

La contribution de l'environnement pour une cible et un environnement ayant la même réflectance contribue pour 10 à 20 % du signal total.

Il faut cependant noter que les résultats présentés jusqu'ici ont été obtenus en considérant une surface uniforme de réflectance 1. L'importance relative de chacun des termes contribuant au signal étant fortement lié à la réflectance de la cible et de l'environnement, nous allons poursuivre l'analyse en nous rapprochant des conditions rencontrées lors de la mesure de la fluorescence à distance.

3.8 Application à la mesure de la fluorescence

Les parts relatives des différentes contributions dépendent fortement de la réflectance de la cible et de la réflectance de l'environnement. Dans la suite, afin de simplifier les écritures, nous adopterons la notation suivante : le signal mesuré au niveau du capteur sera écrit comme :

$$L = I_{sol} + ENV_2 + ATM + ENV + fluo \qquad (III.61)$$

Avec I_{sol}, le flux solaire réfléchi par la cible, ENV_2 l'éclairement dû à l'environnement réfléchi par la cible, ATM la contribution de l'atmosphère, ENV la contribution de l'environnement et $fluo$, la contribution de la fluorescence s'il y a lieu. Toutes ces grandeurs s'entendent à l'altitude de mesure et sont intégrées sur les transmissions des canaux du capteur.

Afin de simplifier la discussion nous nous intéresserons à deux types de cible/environnement : un champ vert et un champ nu. Nous définissons donc dans la *Table III.31* les valeurs que nous utiliserons alternativement pour la cible et pour l'environnement. Lorsque la cible est la végétation, la fluorescence utilisée au niveau du sol est de 2 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ pour la bande O_2-A et 1.5 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ dans la bande O_2-B.

Type d'objet	Réflectance O_2-B	Réflectance O_2-A
Végétation	0.04	0.5
Champ nu	0.25	0.28

Table III.31 *Réflectances utilisées pour l'étude de l'importance des différentes contributions dans le signal mesuré par le capteur.*

Dans l'Annexe B quatre cas limites sont étudiés : deux cas idéaux dans lesquelles la surface est soit une surface de type champ nu uniforme (*Figure III.42.A*), soit une surface végétale uniforme (*Figure III.42.B*). Deux cas plus complexes dans lesquelles on observera soit un champ nu entouré de végétation (*Figure III.42.C*), soit de la végétation entourée de champ nu (*Figure III.42.D*).

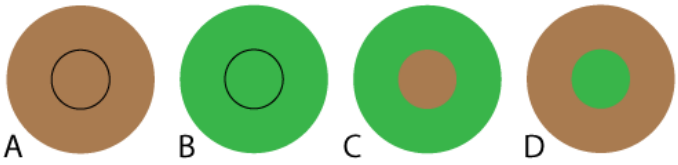


Figure III.42 *Les différentes configurations de mesures qui seront considérées dans la suite.* ***A*** *: surface uniforme de type champ nu.* ***B*** *: surface uniforme végétale.* ***C*** *: Champ nu entouré de végétation.* ***D*** *: Végétation entourée de champs nu.*

Nous ne présentons ici que les cas extrêmes pour chacune des bandes. Un cas extrême représente le plus fort contraste entre cible et environnement.

- ***Bande O_2-B, Cas D : Végétation entourée de sol nu***

Pour la bande O_2-B le plus fort contraste est obtenu lorsqu'on observe de la végétation (réflectance 0.04) entourée de champ nu (réflectance 0.28). La *Figure III.43* présente l'évolution des différentes contributions en fonction de l'altitude et la *Table III.32* donne les valeurs exactes pour trois altitudes. Dans ce cas, la contribution de l'environnement est prédominante dans le signal, elle devient supérieure au flux provenant de la cible dès 2 km d'altitude et représente jusqu'à 40 % du signal total. En y ajoutant la contribution de l'atmosphère on atteint près de 70 % du signal. Dans ce cas on le voit, le signal est totalement dominé par les effets atmosphériques, la contribution de l'atmosphère seule est supérieure à la contribution de la fluorescence dès 300 m d'altitude. Un tel scénario montre l'importance de la correction de ces effets pour une mesure satellitale et indique clairement que l'estimation de la contribution de l'environnement sera l'un des problèmes majeurs de la mesure en altitude dans la bande O_2-B. Hors atmosphère, le signal de fluorescence représentera moins de 3.5 % du signal mesuré.

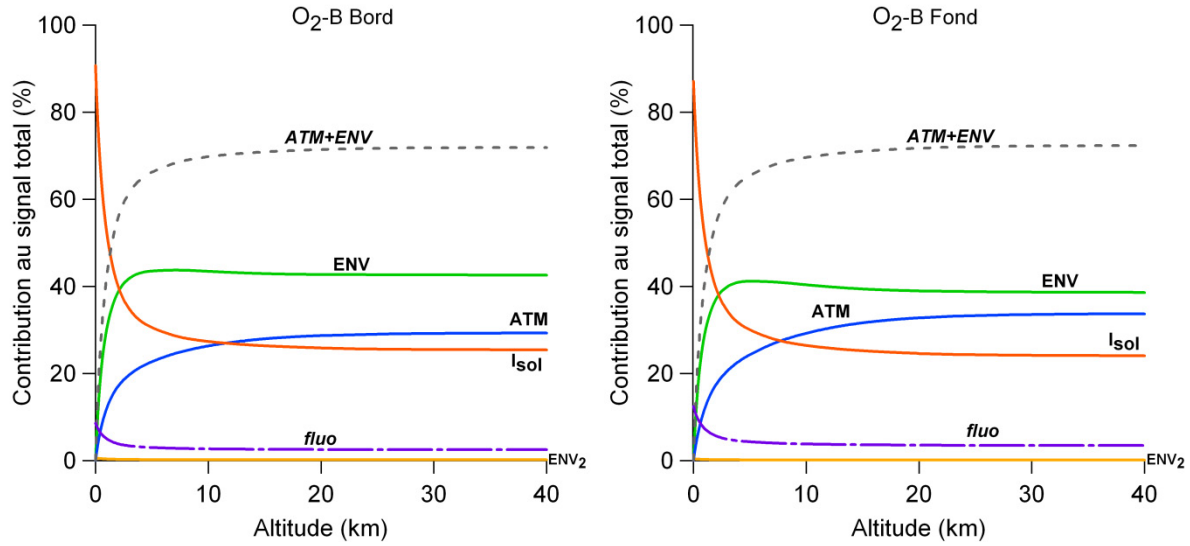


Figure III.43 *Evolution de la part relative des différentes contributions dans le signal total en fonction de l'altitude pour la bande O_2-B. La simulation a été faite pour une cible de type végétation et un environnement de type sol nu (voir Table III.31,Figure III.42.D). La courbe en pointillés représente la somme des contributions ne contenant pas d'information sur la cible (ATM+ENV).*

Altitude	*Bord*			*Fond*		
	I_{sol}	*ATM+ENV*	*f*	I_{sol}	*ATM+ENV*	*F*
300 m	73 %	19.5 %	7 %	71 %	19 %	10 %
3000 m	35 %	61.5 %	3 %	34 %	60.5 %	5 %
> 40 km	25.5 %	72 %	2.5 %	24 %	72 %	3.5 %

Table III.32 *Part des différentes contributions dans le signal total pour trois altitudes dans la bande O_2-B. La simulation a été faite pour une cible de type végétation et un environnement de type sol nu (voir Table III.31, Figure III.42.D).*

- ***Bande O_2-A, Cas C : Sol nu entouré de végétation***

Pour la bande O_2-A le plus fort contraste est obtenu lorsqu'on mesure sur un sol nu (réflectance 0.28) entouré de végétation (réflectance 0.5). La configuration de mesure (sol nu entouré de végétation) correspond à une mesure de profondeur de référence : le sol nu étant non fluorescent on peut l'utiliser comme cible permettant de définir une profondeur sans fluorescence. La *Figure III.44* présente l'évolution des différentes contributions en fonction de l'altitude et la *Table III.33* donne les valeurs exactes pour trois altitudes. Dans cette configuration de mesure les contributions de l'environnement et de l'atmosphère sont également très importantes sans toutefois être majoritaires. Elles représentent environ 40% du signal à 20 km d'altitude. Contrairement à ce que l'on avait dans le cas précédant dans la bande O_2-B, la part de ces contributions à basse altitude est plus faible : elle ne représente que 5% du signal à 300 m. Les résultats présentés ici montrent que dans l'objectif d'utiliser les sols nu comme référence il sera important de pouvoir estimer correctement la contribution de l'environnement.

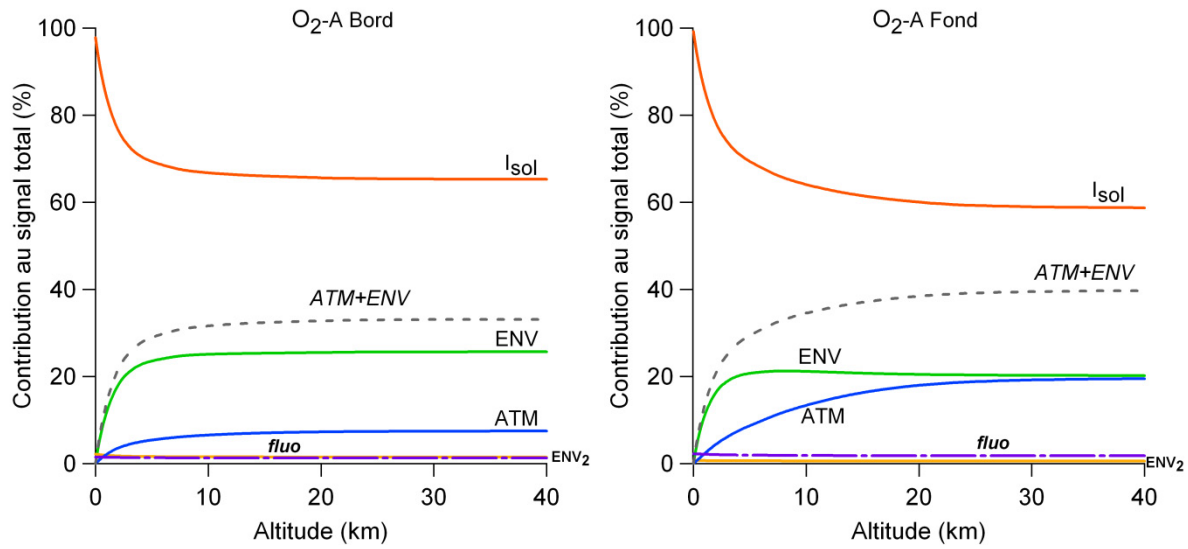


Figure III.44 *Evolution de la part relative des différentes contributions dans le signal total en fonction de l'altitude pour la bande O_2-A. La simulation a été faite pour une cible de type champ nu et un environnement de type végétation (voir Table III.31, Figure III.42.C). La courbe en pointillés représente la somme des contributions ne contenant pas d'information sur la cible (ATM+ENV). La courbe fluorescence ne figure qu'à titre indicatif, elle donne la contribution au signal total s'il contenait de la fluorescence.*

Altitude	*Bord*		*Fond*	
	I_{sol}	*ATM+ENV*	I_{sol}	*ATM+ENV*
300 m	92.5 %	5%	94 %	5 %
3000 m	73 %	25.5 %	74 %	25 %
> 40 km	65 %	33 %	58.5 %	40 %

Table III.33 *Part des différentes contributions dans le signal total pour trois altitudes dans la bande O_2-A. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type champ nu (voir Table III.31, Figure III.42.C).*

L'ensemble des résultats obtenus pour les quatre cas défini dans la *Figure III.42* sont étudiés en Annexe B. L'évolution des différentes contributions et leur part dans le signal total sont données et discutées. Nous ne présentons ici que les conclusions issues de cette étude.

3.8.1 Conclusions

Quatre cas limites ont été étudiés. Pour chaque cas, nous avons donné les évolutions des différentes contributions en fonction de l'altitude. Nous avons également regardé la part de chaque contribution au signal mesuré au niveau du capteur. On pourra retenir que :

- Les contributions ne contenant pas d'information sur la cible (contributions de l'atmosphère et d'environnement) ne peuvent être négligées qu'au niveau du sol. En altitude ces contributions peuvent être plus importantes que celle de la cible.

- La mesure sur la végétation est particulièrement sensible dans la bande O_2-B à la fois à la contribution de l'atmosphère et à la contribution de l'environnement.

- A l'inverse, dans la bande O_2-A, la mesure sur champ nu est particulièrement sensible à la présence de végétation dans l'environnement.

La contribution de l'atmosphère est facilement évaluable avec MODTRAN. Le signal peut donc être corrigé de cette contribution.

La contribution de l'environnement est plus difficile à évaluer : il faut connaitre la réflectance moyenne de l'environnement. Cette réflectance moyenne va dépendre des caractéristiques de la surface, mais aussi de l'altitude de mesure (voir section 3.7.4). Les caractéristiques de la surface peuvent être évaluées en utilisant un capteur imageur ou tout autre dispositif additionnel permettant d'avoir une image large autour de la cible afin de caractériser la réflectance de l'environnement.

3.9 Corrections atmosphériques

Nous allons à présent utiliser MODTRAN pour corriger les profondeurs mesurées durant la campagne SEN2FLEX et présentées dans la section 3.3.2. Nous nous intéresserons tout d'abord à la correction des profondeurs mesurées sur le champ nu, puis aux mesures effectuées sur le champ de blé. Rappelons que cette portion de vol est représentative de ce que l'on observe sur l'ensemble du vol et que des résultats similaires peuvent être obtenus tout le long du vol.

3.9.1 Calibration

Pendant la première campagne de mesure SEN2FLEX l'objectif était principalement d'étudier les variations de profondeur induites par la végétation et les effets atmosphérique plutôt que d'avoir une mesure quantitative de la fluorescence. Ainsi la calibration de AirFLEX faite pour cette campagne n'a pas été effectuée en unités radiométriques : elle a été faite uniquement en unités relatives afin d'inter-calibrer les canaux de mesures.

Cette absence de calibration pose problème pour la correction des effets atmosphériques, en particulier pour la correction des contributions de l'environnement et de l'atmosphère. Nous avons donc mis au point une procédure permettant d'obtenir une mesure en unité radiométrique.

Cette procédure se base sur une mesure de réflectance faite pendant la campagne sur un champ nu survolé par AirFLEX. Cette réflectance a été utilisée pour simuler, avec MODTRAN, les flux dans les

canaux d'AirFLEX à 300 m d'altitude en supposant que l'environnement était identique au champ nu. En comparant flux simulés et flux mesurés nous avons trouvé le même écart de l'ordre de 30 % ± 1% pour tous les canaux. Nous avons donc choisi d'appliquer un facteur de correction multiplicatif aux mesures afin de les ramener dans la « base » de notre modèle. Ce coefficient a été calculé avec la mesure effectuée dans le canal du bord de la bande O_2-B (c'est dans ce canal que les effets d'environnement seront minimisés pour une mesure sur champs nu). Ce coefficient est par la suite appliqué à l'ensemble des mesures et à l'ensemble des canaux.

Cette « calibration » est importante pour pouvoir corriger des effets atmosphériques mais ne change en rien l'interprétation du résultat que nous attendons de ces corrections atmosphériques : le coefficient a été calculé en un seul point et est multiplicatif. Par conséquent, il ne change pas les variations relatives des signaux mesurés (variations avec l'altitude, avec la cible, etc…). Ainsi, si MODTRAN ne rend pas compte de ces variations nous n'arriverons pas à corriger les signaux.

3.9.2 Méthode de correction

- **Estimation des paramètres de correction**

Les corrections s'appliquent sur les flux. Le calcul des différentes contributions et de la transmission est fait pour chaque point de mesure grâce à MODTRAN. La simulation se fait en utilisant toutes les informations collectées durant la campagne de mesure (aérosols, profils de température/pression). La contribution de l'atmosphère et le calcul de la transmission ne posent pas de problème particulier. L'évaluation se fait avec les méthodes données dans la section 3.7. La contribution de l'environnement est un peu plus délicate à calculer. Son évaluation sera discutée dans les sections suivantes.

- **Correction en temps**

Les mesures n'ayant pas été faites au même moment, il y a une correction supplémentaire en temps pour tenir compte de la variation naturelle des profondeurs entre les mesures. Les profondeurs, préalablement corrigées de l'environnement, de la contribution de l'atmosphère et de la réabsorption, sont ramenées à l'heure de référence (l'heure du premier survol) en les multipliant par le coefficient suivant :

$$C_{temps} = \frac{P_{mod}(t_{ref})}{P_{mod}(t_{mesure})} \qquad \textit{(III.62)}$$

Avec P_{mod} profondeur modélisée, t_{ref} heure de référence et t_{mesure} heure de mesure.

3.9.3 Réflectance

Nous avons vu que la contribution de l'environnement dans le signal dépend de la réflectance moyenne des surfaces entourant la cible. Pour pouvoir discuter de ces effets sur la mesure, nous avons besoin d'avoir une idée de la réflectance de la surface autour de notre zone d'intérêt. Nous avons donc cherché à l'estimer sur la ligne de vol (15 km), à partir du premier survol effectué à 300 m d'altitude. Nous ne chercherons pas à avoir une valeur exacte de la réflectance mais plutôt une information sur ses variations autour de la zone d'intérêt.

Afin de pouvoir négliger la contribution de la fluorescence, nous calculerons les réflectances grâce aux canaux au bord des bandes d'absorption et, puisque nous sommes à basse altitude, nous faisons l'hypothèse que la réflectance de l'environnement est égale à celle de la cible (voir section 3.7.4).

Dans la gamme des réflectances qui nous intéresse on peut écrire la contribution de l'environnement sous la forme (voir l'Annexe C):

$$ENV(\rho) = \rho C_{env} \qquad \textit{(III.63)}$$

Avec C_{env} un coefficient donnant la contribution de l'environnement pour une réflectance ρ donnée. On peut donc exprimer le flux mesuré à la $n^{\text{ième}}$ mesure sous la forme :

$$L_n = \rho_n (C_{env} + T_r I)_n + ATM_n \qquad \textit{(III.64)}$$

Après avoir corrigé de l'atmosphère il reste :

$$L'_n = \rho_n (C_{env} + T_r I)_n \qquad \textit{(III.65)}$$

Le temps de survol des 15 km étant court (4 minutes) et les mesures ayant été faites aux alentours du midi solaire, on fait l'hypothèse que l'irradiance n'a pas changé durant le survol de ces 15 km. L'altitude du vol ayant été particulièrement stable (± 10 m), on fait également l'hypothèse que T_r ne varie pas significativement. On a donc :

$$(C_{env} + T_r \times I)_n = cst \qquad \textit{(III.66)}$$

Et, puisqu'on connaît ρ_n sur le champ nu on peut estimer le terme $(C_{env} + T_r I)$ à partir des mesures faites sur le champ nu :

$$(C_{env} + T_r \times I)_n = \frac{L'_{champ\ nu}}{\rho_{champ\ nu}} \qquad \textit{(III.67)}$$

Une fois que ce terme $(C_{env} + T_r \times I)$ est connu, on déduit la réflectance pour chaque mesure à partir de la valeur de flux mesuré corrigée de l'atmosphère grâce à l'équation *(III.64)* :

$$\rho_n = \frac{(L_n - ATM_n)\rho_{champ\ nu}}{L'_{champ\ nu}} \qquad \textit{(III.68)}$$

La *Figure III.45* présente les réflectances obtenues autour de la zone que nous utilisons pour notre étude.

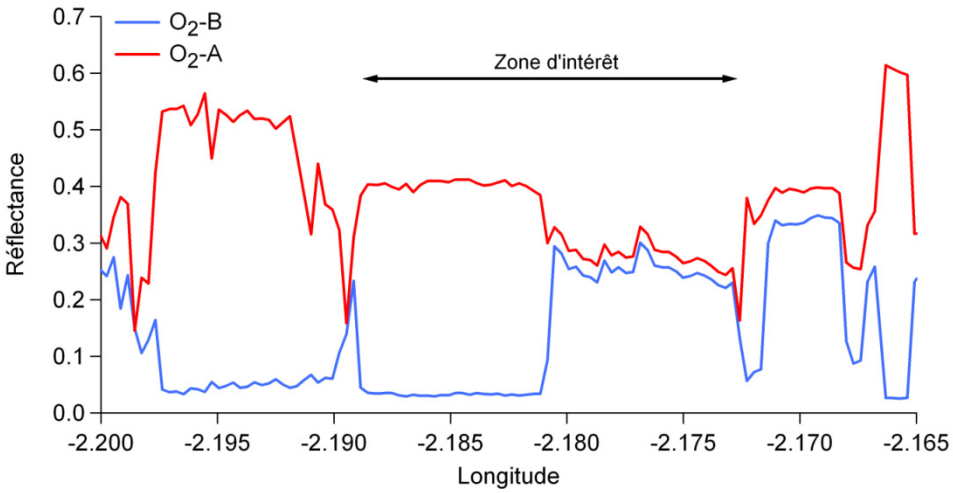


Figure III.45 *Réflectances autour de notre zone d'intérêt. Ces réflectances ont été retrouvées à partir des mesures faites à 300 m en considérant que l'éclairement n'a pas varié pendant la mesure et que le champ nu a une réflectance de 0.25 à 687 nm et 0.28 à 760 nm.*

3.9.4 Evolution de la réflectance

On a vu que la surface de l'environnement contribuant au signal augmentait avec l'altitude (voir section 3.7.4). La réflectance moyenne de l'environnement va donc dépendre de la taille de la zone au sol que l'on considère. Afin d'avoir une estimation de la réflectance moyenne avec la taille de cette zone nous avons calculé la réflectance moyenne de l'environnement en moyennant les réflectances obtenues sur une portion vol autour de la cible. Cette zone est définie par la distance à la cible *r*. Ainsi la réflectance moyenne à 1 km représente la moyenne des réflectances sur une zone (portion de vol) de rayon 1 km centrée au niveau de la cible.

Il est important de noter que cette moyenne n'est pas celle qu'il faut considérer pour estimer la contribution de l'environnement : elle ne tient pas compte de la pondération en fonction de la distance qu'il faut introduire pour tenir compte des propriétés de diffusion de l'atmosphère. On peut cependant l'utiliser pour avoir une idée de l'environnement de la cible.

- **Par rapport au champ nu**

La *Figure III.46* donne l'évolution de cette réflectance moyenne en fonction du rayon de la zone considérée autour du champ nu. A 687 nm la réflectance moyenne diminue sous l'effet de la végétation : la réflectance de la végétation est plus faible que celle du champ nu et fait donc diminuer la moyenne. A l'inverse, à 760 nm la réflectance moyenne a tendance à augmenter.

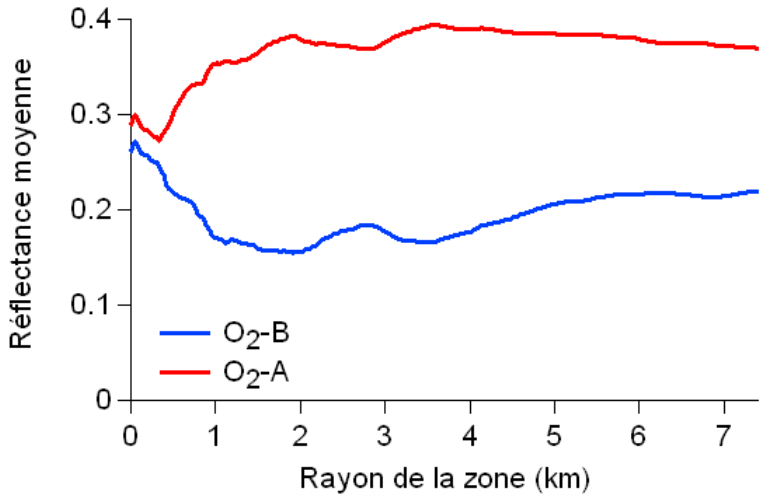


Figure III.46 *Réflectance moyenne en fonction du rayon de la zone considérée autour du champ nu.*

- **Par rapport au champ de blé**

La *Figure III.47* donne l'évolution de la réflectance moyenne en fonction du rayon de la zone considérée autour du champ de blé. On voit sur cette figure la forte influence des champs nus sur la réflectance à 687 nm: elle augmente d'un facteur 6 entre un rayon de 0 km et un rayon de 2 km. A 760 nm l'influence des champs nus se fait moins sentir et la diminution de la réflectance est bien plus lente.

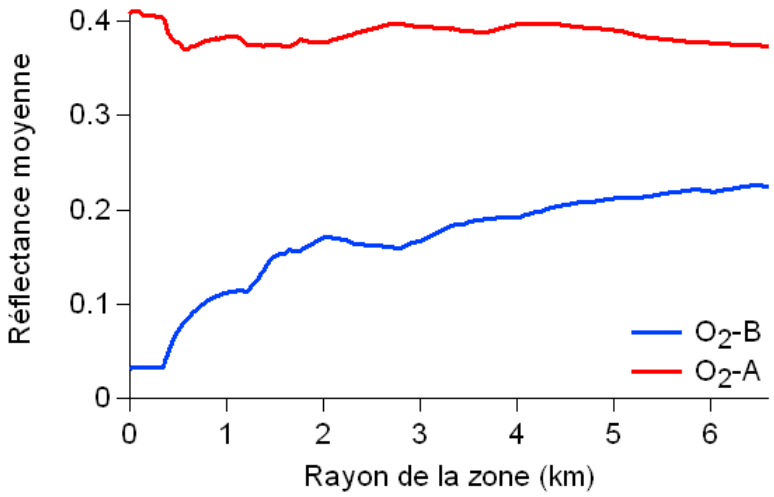


Figure III.47 *Réflectance moyenne en fonction du rayon de la zone considérée autour du champ de blé.*

3.9.5 Correction - Sol nu

Commençons par regarder ce que donne la correction des profondeurs mesurées sur le sol nu. Dans le cas du sol nu, on s'attend à ce que l'évaluation de la réflectance de l'environnement pose problème plutôt pour la bande O_2-A, puisque c'est dans cette bande que le contraste entre champ nu et végétation sera le plus fort. Dans un premier temps nous avons choisi de prendre une réflectance moyenne de 0.25 dans la bande O_2-B et de 0.28 dans la bande O_2-A pour toutes les altitudes de mesures. Ces valeurs correspondent à la réflectance du champ nu.

Les valeurs de profondeurs obtenues après corrections sont présentées pour les deux bandes de l'oxygène sur la *Figure III.48*.

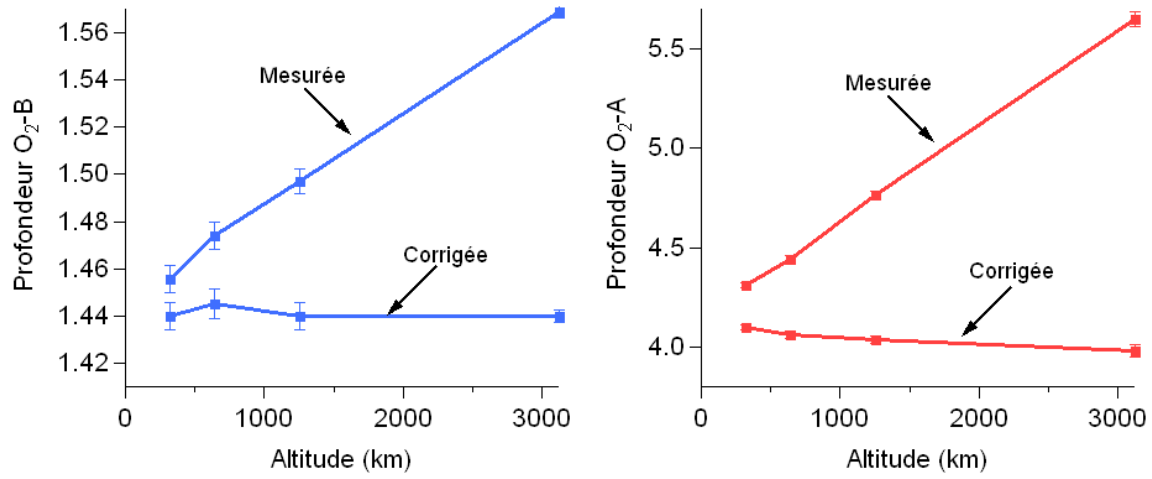


Figure III.48 *Profondeurs mesurées sur le champ nu en fonction de l'altitude et profondeurs obtenues après corrections des effets atmosphériques. A gauche : profondeur O_2-B. A droite : profondeur O_2-A.*

Pour la bande O_2-B on voit que les profondeurs retrouvées sont très proches : l'écart maximal entre les profondeurs corrigées est de 0.35 % alors qu'il était de 7 % pour les profondeurs non corrigées. On peut donc dire que la correction permet de retrouver les mêmes profondeurs quelque soit l'altitude de mesure.

Dans la bande O_2-A l'écart maximal des profondeurs corrigées est de 2.8 % alors qu'il était de 30 % pour les profondeurs non corrigées. Si la variation de profondeur a été fortement diminuée, on remarque que la profondeur corrigée décroît légèrement avec l'altitude. On peut penser que cette variabilité est due à une mauvaise évaluation des effets d'environnement. Nous approfondirons la question de l'évaluation de l'environnement dans la section suivante.

On peut par ailleurs noter que la profondeur au sol retrouvée pour la bande O_2-A est proche de celle mesurée par TerFLEX : la profondeur corrigée depuis les mesures à 300 m donne 4.09 et la profondeur mesurée au sol par TerFLEX était de 4.13 au moment du survol. Pour la bande O_2-B la profondeur retrouvée, 1.44, est plus proche de la profondeur modélisée (1.46) que de la profondeur mesurée (1.32) par TerFLEX, probablement à cause des problèmes de calibration de TerFLEX dont nous avons parlé précédemment.

3.9.6 Correction - Végétation

Nous allons à présent nous pencher sur les résultats obtenus sur le champ de blé.

L'estimation des réflectances faites dans la section 3.9.3 indique que notre champ de blé a une réflectance de 0.03 à 687 nm et de 0.4 à 760 nm. Dans un premier temps, nous avons effectué la correction en utilisant ces valeurs pour la réflectance moyenne de l'environnement à toutes les altitudes.

D'autre part, puisque nous sommes sur une cible végétale, nous avons tenu compte de la fluorescence pour l'évaluation de la transmission. Pour la calculer nous avons utilisé une fluorescence de 2 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ pour la bande O_2-A et 1.5 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ dans la bande O_2-B.

Les résultats obtenus avec cette configuration sont présentés dans la *Figure III.49*.

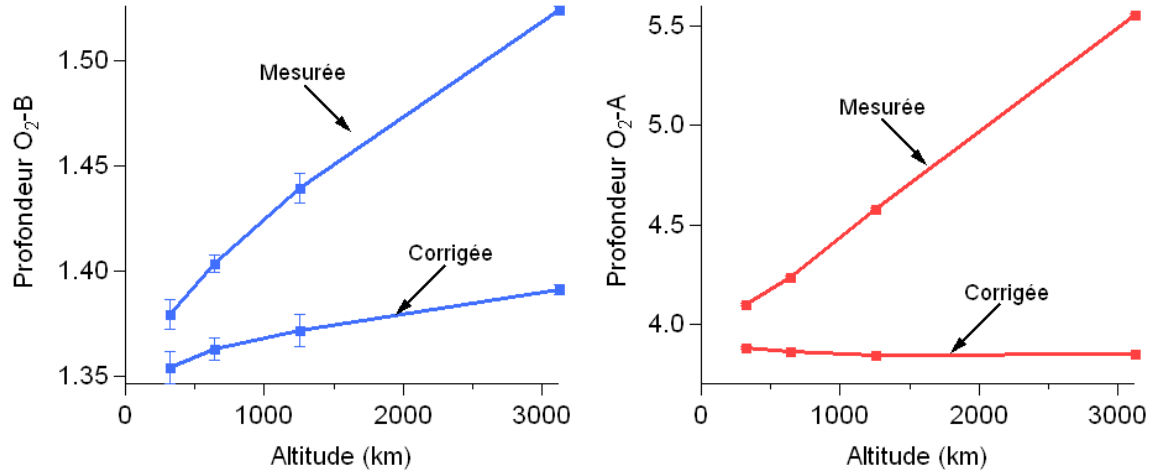


Figure III.49 *Profondeurs mesurées sur le champ de blé en fonction de l'altitude et profondeurs obtenues après corrections des effets atmosphériques. A gauche : profondeur O_2-B. A droite : profondeur O_2-A.*

Dans la bande O_2-A l'écart maximal pour la profondeur corrigée est ramené à 1.5 % au lieu de 35 % sans correction.

Par contre, l'écart maximal dans la bande O_2-B pour la profondeur corrigée est de 2.8 % au lieu de 10 % pour la profondeur non corrigée. Bien que réduit, cet écart reste significatif : il reste assez fort en comparaison de la variation des profondeurs sans correction. On peut imputer cette variation à l'évolution de la réflectance moyenne de l'environnement avec l'altitude. Nous allons donc vérifier si cette hypothèse est réaliste.

Nous avons calculé, pour chaque altitude, la profondeur corrigée en fonction de la réflectance de l'environnement. Les résultats sont présentés sur la *Figure III.50*. On voit que la variabilité des profondeurs corrigées avec la réflectance de l'environnement est très forte.

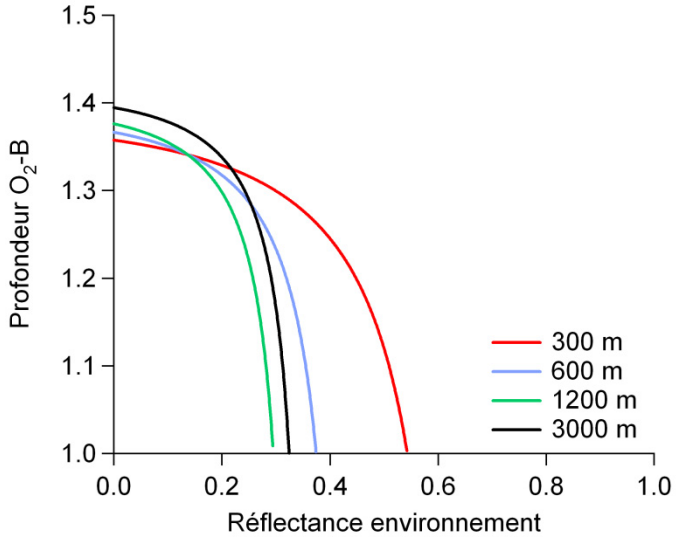


Figure III.50 *Evolution des profondeurs corrigées à chaque altitude en fonction de la réflectance de l'environnement. Profondeurs corrigées depuis les mesures sur le champ de blé.*

Faisons maintenant l'hypothèse que la réflectance de l'environnement à l'altitude la plus basse (300 m) est de 0.03. On a directement sur la *Figure III.50* la profondeur correspondante. On cherche alors à savoir comment faire évoluer la réflectance de l'environnement avec l'altitude pour retrouver la même profondeur.

La *Figure III.51* présente un zoom de la *Figure III.50*. La réflectance de 0.03 est indiquée, ainsi que la profondeur correspondante à 300 m. On voit que pour obtenir la même profondeur il va falloir augmenter la réflectance moyenne au fur et à mesure que l'altitude augmente. La réflectance moyenne de l'environnement à utiliser en fonction de l'altitude de mesure permettant d'obtenir la même profondeur au sol est donnée à droite de la *Figure III.51*. On voit qu'elle croît jusqu'à atteindre une réflectance de 0.17. Cette évolution est réaliste vis-à-vis de l'estimation de l'évolution de la réflectance de l'environnement qui a été faite et présentée dans la *Figure III.47*. On peut donc penser qu'avec une bonne évaluation de la réflectance moyenne de l'environnement, on est capable de corriger les signaux mesurés.

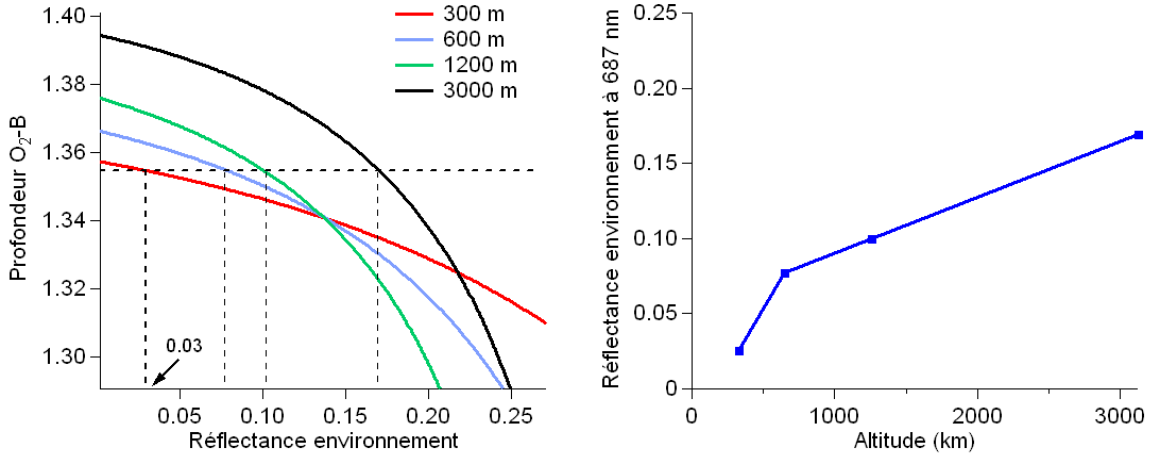


Figure III.51 *Détail de l'évolution des profondeurs corrigées à chaque altitude en fonction de la réflectance de l'environnement à gauche. A droite : réflectance moyenne de l'environnement en fonction de l'altitude permettant d'obtenir après correction la même profondeur.*

3.9.7 Correction – conclusion

Nous avons donc présenté les résultats donnés par l'utilisation de MODTRAN pour la correction de la variation des profondeurs avec l'altitude. Cette correction s'est faite sur deux types de cibles : une cible non fluorescente et une cible fluorescente. Dans les deux cas, la variation des profondeurs corrigées est fortement réduite par rapport à la variation naturelle avec l'altitude. On retiendra que :

- MODTRAN peut être utilisé pour la correction des effets atmosphériques sur la profondeur des bandes de l'oxygène. La correction des mesures faites jusqu'à une altitude de 3 km donne de bons résultats. Il faudra cependant être capable d'estimer la réflectance de l'environnement.

- Dans le cas de la mesure sur un champ nu dans la bande O_2-B et dans le cas de la mesure sur une cible végétale dans la bande O_2-A, on peut faire l'hypothèse que la réflectance de l'environnement est la même que celle de la cible. La variabilité des profondeurs corrigées avec cette approximation est dans l'ordre de grandeur du bruit de mesure.

- Une bonne évaluation de la réflectance de l'environnement sera nécessaire pour pouvoir corriger les mesures lors de la mesure sur un champ nu dans la bande O_2-A et lors de la mesure sur de la végétation dans la bande O_2-B.

3.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents phénomènes venant perturber la mesure de la fluorescence à distance, en visée au nadir. Nous avons présenté des mesures donnant l'évolution des radiances et des profondeurs des bandes de l'oxygène avec l'altitude. Ces mesures indiquent une forte variabilité de chacune de ces grandeurs avec l'altitude.

- Nous avons utilisé des mesures au sol de cycle diurne des profondeurs des bandes d'absorption pour valider le modèle MODTRAN dans le contexte de la modélisation des profondeurs des bandes de l'oxygène. Nous avons évalué la sensibilité de la modélisation à plusieurs paramètres. Il ressort de cette étude que :

    - La calibration du capteur est la source d'erreur la plus forte. La position et la forme des filtres de transmission utilisés pour la mesure doivent être connues avec la plus grande précision pour pouvoir retrouver les radiances mesurées avec MODTRAN.

    - La température et la pression sont des paramètres importants pour la modélisation dans les bandes de l'oxygène. A défaut d'avoir un profil vertical pour ces deux grandeurs, il sera important d'en avoir une mesure précise en un point donné pour pouvoir reconstruire les profils.

    - La pression au sol dépend au premier chef de l'élévation du sol. Il sera donc nécessaire d'avoir un modèle d'élévation de terrain précis.

    - Les aérosols jouent un rôle important dans l'estimation de la profondeur. La donnée de l'AOT à 550 nm devrait être suffisante pour pouvoir en tenir compte, tant que les mesures se font dans des conditions « standard » et qu'il est ainsi possible d'identifier le modèle d'aérosol à utiliser.

    - Le contenu en eau et en ozone n'influence pas la profondeur des bandes de l'oxygène.

- Nous avons mentionné au début de ce chapitre l'utilisation d'un modèle pour obtenir une profondeur de référence (sans fluorescence). Au vu des résultats sur la sensibilité du modèle il semble plus judicieux d'utiliser des mesures faites sur champ nu à proximité de la végétation.

- Nous avons ensuite décrit la manière d'obtenir les différentes contributions au signal avec MODTRAN. Nous avons étudié l'évolution de ces contributions avec l'altitude pour quatre configurations de mesures extrêmes. Il en ressort qu'à cause de la faible réflectance de la végétation à 687 nm la mesure dans la bande O_2-B est fortement influencée par la contribution de l'atmosphère et de l'environnement. Il en va de même pour les mesures sur champ nu dans la bande O_2-A.

- Nous avons appliqué les indications données au long de ce chapitre pour corriger les profondeurs mesurées pendant la campagne SEN2FLEX sur un champ de blé et sur un champ nu :

    - La correction permet de retrouver les profondeurs au niveau du sol. On a vu que pour une altitude de mesure allant jusqu'à 3000 m, les corrections permettent de retrouver la profondeur au niveau du sol avec une précision satisfaisante.
    - La précision dépendra grandement de l'estimation de la réflectance moyenne de l'environnement.

- On peut noter qu'à 3000 m on a environ 50 % des « effets atmosphériques totaux ». On peut donc penser que l'extension de ces résultats à des altitudes plus élevées ne devrait pas poser de problème au niveau de la modélisation de l'atmosphère.

L'information la plus importante ressortant de cette étude est que les contributions de l'atmosphère et de l'environnement ne peuvent être négligées devant le signal de fluorescence. Si la contribution de l'atmosphère ne dépend que des conditions atmosphériques, la contribution de l'environnement dépend de la réflectance du voisinage de la cible ce qui en fait une contribution sujette à de fortes variations. Pour son estimation il sera donc essentiel de pouvoir caractériser l'environnement autour du spot de notre capteur. Le développement de nouveaux capteurs devrait donc se faire sur la base de systèmes imageurs.

Chapitre IV

Mesures avionnées

Chapitre IV : Mesures avionnées

4.1 **AirFLEX** 183

4.2 **Campagne CEFLES2** 185

4.2.1 Description de la campagne 185

4.2.2 Mesures au sol 186

4.2.3 Mesures avionnées 187

4.2.4 Les vols 192

4.3 **Campagne CEFLES2 – Traitement des données** 194

4.4 **Campagne CEFLES2 – Implémentation des corrections atmosphériques** 196

4.4.1 Mise en équation 202

4.5 **Campagne CEFLES2 – Calcul de la fluorescence** 204

4.6 **Campagne CEFLES2 – Résultats** 209

4.6.1 Profondeur, fluorescence, reproductibilité 210

4.6.2 Analyse d'une portion de vol, de la mesure au sol à la mesure avionnée 212

4.6.3 Echelle globale 216

4.6.4 Classification des espèces, extraction des données 220

4.6.5 Variations des paramètres de fluorescence par espèce 221

4.7 **Conclusions** 225

Mesures avionnées

Dans les chapitres précédents nous avons discuté de la méthode de mesure passive de la fluorescence et de la manière de corriger le signal lorsque l'on fait les mesures à distance. Dans ce chapitre nous allons présenter le travail et les résultats obtenus lors de la campagne de mesures avionnées CEFLES2. Il s'agit de la seconde campagne avionnée utilisant le capteur AirFLEX. La présentation du système de mesure et du traitement des données sera l'occasion de présenter l'implémentation opérationnelle des corrections atmosphériques et un algorithme permettant de retrouver la fluorescence avec trois canaux de mesure. Les premiers résultats de la campagne concernant la mesure de la fluorescence depuis un avion seront également présentés.

4.1 AirFLEX

AirFLEX (voir *Figure IV.1.A*) est un capteur destiné à la mesure passive de la fluorescence. Il a été conçu par l'équipe en 2005 dans le cadre du Earth Observation Program de l'ESA. C'est un capteur à six canaux basés sur des filtres interférentiels. Les canaux sont physiquement indépendants mais sont tous conçus de la même manière : après un filtre interférentiel Omega Optical (Brattleboro, VT, USA) couplé à un filtre large bande (Schott RG645) destiné à réduire le rayonnement parasite, une lentille fait converger le flux lumineux vers une photodiode. Il s'agit d'une photodiode silicium amplifiée PIN de 2.54 mm de diamètre (HUV 1100 BG, Perkin-Elmer, France). La surface d'entrée utile est un disque de 19 mm de diamètre. La partie optique est placée dans une enceinte permettant la thermorégulation à 40 ± 0.1 °C. Cette régulation se fait au moyen d'un contrôleur de température PID (Minco), elle permet de s'assurer de la stabilité optique des filtres afin d'éviter un décalage en longueur d'onde sous l'effet de la température.

La *Figure IV.1.B* présente la tête optique d'AirFLEX. Cette tête optique est utilisée en conjonction d'un « nez » limitant la lumière parasite. Sur la *Figure IV.1.A*, la tête optique se situe sous la protection en PVC blanche, le nez étant toute la partie en aluminium en dessous. Ce nez contient une série de baffles peintes en noir (voir *Figure IV.1.C*) permettant de piéger la lumière parasite.

AirFLEX permet donc la mesure dans les deux bandes de l'oxygène avec trois canaux par bande. La configuration des canaux de mesure est donnée dans la *Table IV.1*. Le champ de vue d'AirFLEX est de 34 mrad (angle total), ce qui correspond à une empreinte au sol d'environ 10 m à 300 m d'altitude. Deux instruments identiques ont été réalisés par l'équipe : AirFLEX baptisé ainsi car principalement utilisé pour les mesures avionnée et TerFLEX plutôt destiné à faire des mesures au niveau du sol.

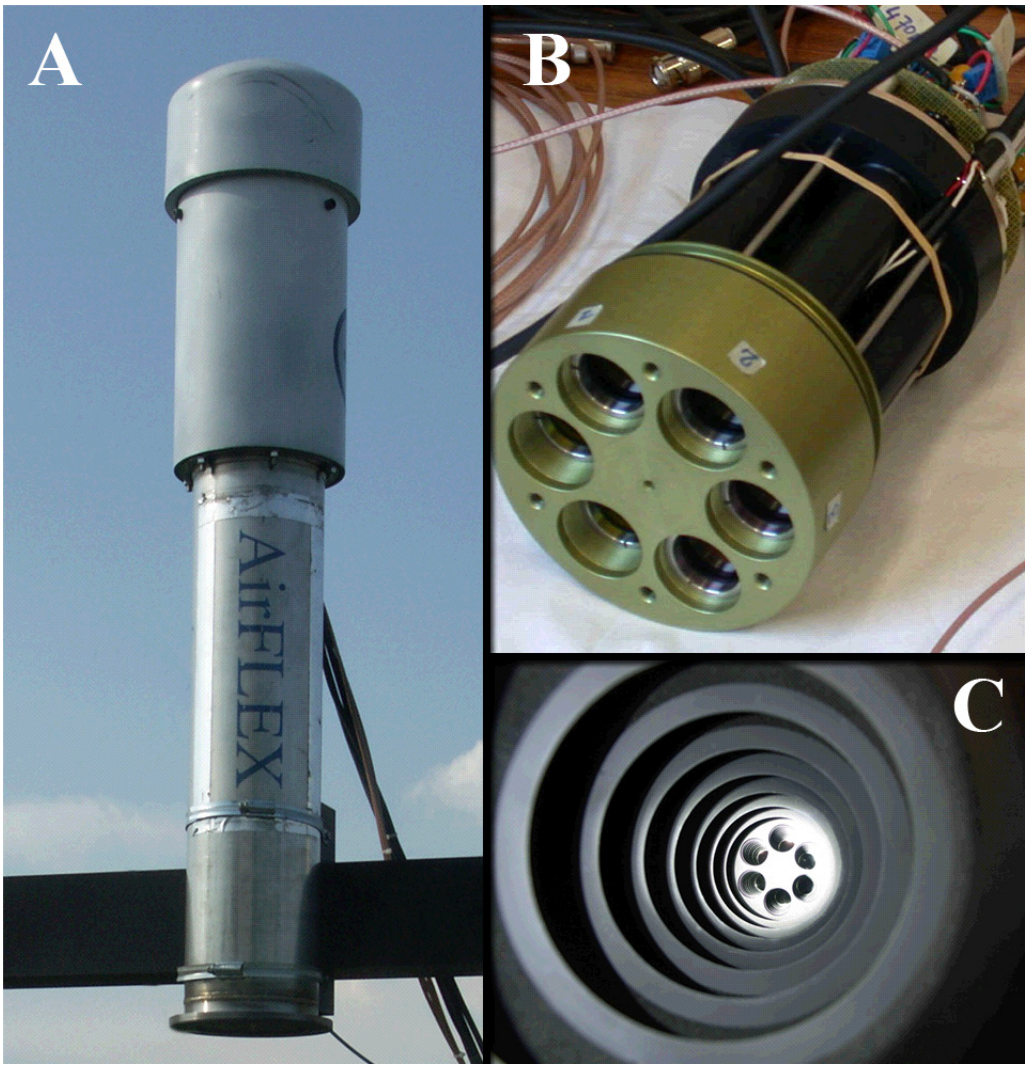


Figure IV.1 *Le capteur AirFLEX. A : AirFLEX monté pour l'utilisation au sol. B : Tête optique. On peut y voir l'entrée des six canaux de mesure. La tête optique se situe sous la protection en PVC blanche dans la photo A. C : Entrée du nez d'AirFLEX : le système de baffle permettant de limiter les rayonnements parasites. On voit au fond l'entrée des six canaux de mesure de la tête optique.*

	Configuration des canaux de mesure d'AirFLEX		
	Position	Longueur d'onde (nm)	FWHM (nm)
Bande O_2-B	Bord 1	685.545	0.523
	Fond	687.137	0.54
	Bord 2	694.114	5.742
Bande O_2-A	Bord 1	757.191	1.132
	Fond	760.39	1.022
	Bord 2	770.142	1.937

Table IV.1 *Configuration des canaux de mesures d'AirFLEX. Position des filtres interférentiels et largeur à mi-hauteur.*

AirFLEX a été utilisé pour la première fois durant la campagne SEN2FLEX, qui s'est déroulée en 2005 en Espagne. C'est durant cette campagne que les premières mesures avionnées dans les deux bandes de l'oxygène ont été faites simultanément. Comme nous l'avons vu précédemment, cette campagne a également été l'occasion d'acquérir des mesures pour l'évaluation des effets atmosphériques sur les profondeurs des bandes de l'oxygène.

Cette campagne a permis d'acquérir des signaux de fluorescence sur différents types de champs. Des mesures faites au sol en même temps ont permis d'apprécier les différences entre la mesure au niveau de la feuille et la mesure au niveau du couvert. Les résultats de cette campagne sont donnés dans Moya et al., 2010. Nous ne parlerons pas de ces résultats ici étant donné que des résultats similaires ont été obtenus durant la campagne CEFLES2. La campagne SEN2FLEX s'est faite sur de larges champs cultivés. Par rapport à cette première campagne, la campagne CEFLES2 avait pour ambition de faire des mesures en partie sur de la végétation naturelle (forêt).

4.2 Campagne CEFLES2

L'ESA, dans le contexte de son programme « Earth Observation Envelope Program » coordonne un certains nombre de campagnes de mesures au sol et avionnées. Ces campagnes, inscrites dans le contexte « Terre, Océan, Atmosphère » peuvent avoir différents objectifs tels que l'obtention de données pour le développement d'un nouvel algorithme, la calibration/validation d'un capteur, la simulation de futures missions spatiales d'observation de la Terre, etc… C'est dans ce cadre que s'est inscrite la campagne CEFLES2.

4.2.1 Description de la campagne

La campagne CEFLES2 (CarboEurope, FLEx, Sentinel-2), est la réunion de deux expérimentations supportées par l'ESA, FLEX (FLuorescence EXplorer) et Sentinel-2, ainsi que de CERES (CarboEurope Regional Experiment Strategy).

L'objectif de CERES est la quantification des sources et puits de CO_2 à l'échelle régionale. Des avions sont utilisés pour mesurer les concentrations ainsi que les flux de CO_2 en conjonction avec des stations aux sols. Les données sont ensuite utilisées pour établir un bilan régional du CO_2 au moyen de modèles atmosphériques méso-échelles. La première campagne CERES a eu lieu en 2005 (Dolman et al., 2006) et c'est au sein de la campagne CEFLES2 que s'est faite la seconde campagne CERES.

Sentinel-2 est une mission spatiale du programme GMES (Global Monitoring for Environment and Security, http://www.esa.int/esaLP/LPgmes.html) dont le lancement est prévu en 2012. La partie Sentinel-2 de la campagne CEFLES2 avait pour objectif la récolte d'informations permettant de définir et de valider les spécificités techniques de l'instrument MSI (MultiSpectral Instrument) de la mission Sentinel-2, ainsi que l'analyse des performances des algorithmes de traitement des données.

Nous allons nous intéresser plus particulièrement à la partie FLEX de la campagne puisque c'est à cette partie que notre équipe a participé. FLEX est une mission qui a été proposée dans le cadre de l'appel à candidats pour le programme Earth Explorer Mission de l'ESA (http://www.esa.int/esaCP/SEMHQH9ATME_index_0.html). FLEX avait pour principal objectif la mesure de la fluorescence de la végétation à l'échelle du globe. FLEX a été sélectionné en pré-phase A mais n'a finalement pas été retenue pour les phases suivantes. L'objectif de la partie FLEX au sein de CEFLES2 a été de fournir des données quantitatives de fluorescence pour la préparation des études en vue du projet FLEX. Plus concrètement voici quelque uns des principaux objectifs spécifiques :

- Mesure de la fluorescence sur différents types de végétation naturelle pour l'étude des signaux et de leur variabilité.
- Etablissement d'une relation entre les flux de fluorescence mesurés et l'activité photosynthétique et idéalement avec les échanges de CO_2 mesurés entre le sol et l'atmosphère.
- Analyse des performances de la mesure passive et définition des spécifications techniques nécessaires à une mesure depuis l'espace.

La campagne de mesure a eu lieu en France dans la région des Landes. La *Figure IV.2* donne la classification du sol de la zone dans laquelle les mesures ont été effectuées. On voit que la majeure partie de la zone de mesures est couverte par la forêt des Landes, forêt constituée en particulier de pins. Le reste de la zone de mesure étant constituée de champs de culture et de vignes

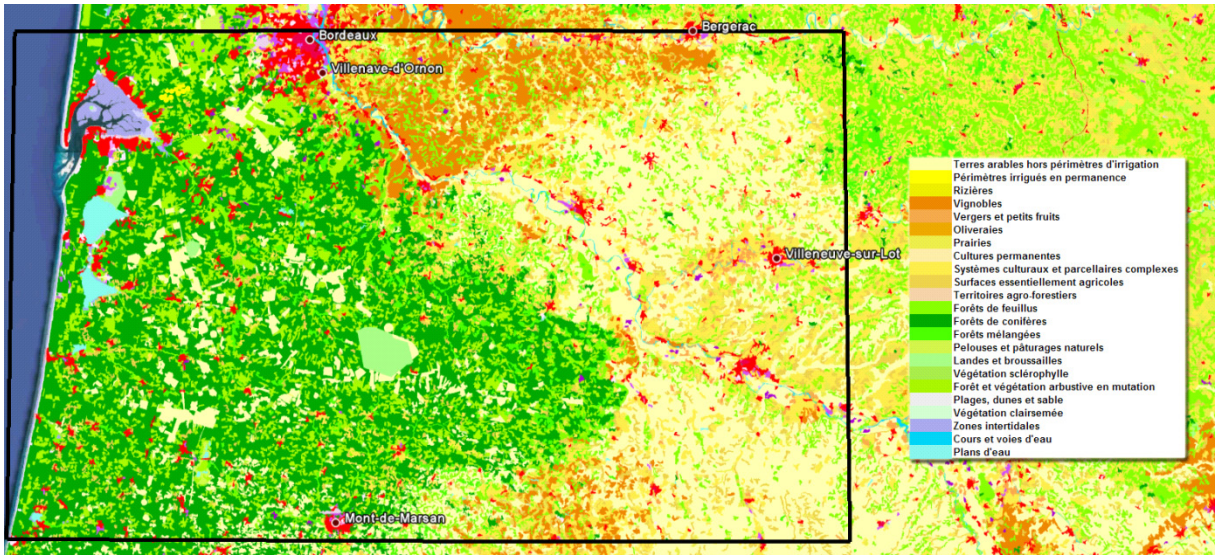


Figure IV.2 *Classification du terrain, zone de mesure de la campagne CEFLES2. Classification CORINE (http://www.ifen.fr/bases-de-donnees/occupation-des-sols-corine-land-cover.html).*

La campagne s'est déroulée en trois parties : en avril, juin et septembre 2007. Notre équipe a été impliquée dans ces trois parties. Nous étions en charge de la réalisation de trois types de mesures :

- Mesures avionnées avec AirFLEX.
- Mesure de la profondeur des bandes de l'O_2 au sol avec TerFLEX.
- Mesure de spectre d'émission de fluorescence de feuilles pour la caractérisation de la végétation.

4.2.2 Mesures au sol

Plusieurs types de mesures ont été faites au niveau du sol :

- Un instrument de mesure passive de la fluorescence a été déployé pendant la campagne d'Avril à côté de l'aéroport de Villeneuve-sur-Lot. Cet instrument, appelé SpectroFLEX, sera décrit dans le chapitre suivant. Il permet de mesurer en continu la fluorescence dans les deux bandes de l'oxygène.
- Des mesures d'émission de fluorescence ont été effectuées sur quelques uns des champs survolés par AirFLEX. Les mesures ont été faites à l'aide du LSF (Leaf Spectro Fluorimeter) qui sera également décrit dans le chapitre suivant. Il permet d'obtenir un spectre d'émission de fluorescence d'une feuille sous excitation solaire.

- L'instrument TerFLEX a été déployé au sol et a mesuré la profondeur des bandes de l'oxygène en visée au nadir sur une plaque non fluorescente de référence en Spectralon. Ces mesures pourront être utilisées comme base du calcul de fluorescence : elles donnent la profondeur de référence au niveau du sol durant chacun des vols.

4.2.3 Mesures avionnées

Les mesures de flux de CO_2 ont été effectuées par deux SkyArrow (voir *Figure IV.3*) (Iniziative Industriali Italiane, Rome, Italie) (voir Gioli et al., 2006). Ils sont équipés de capteurs permettant la mesure de la vitesse du vent sur trois axes, la mesure de la température, la mesure des concentrations en CO_2 et de la vapeur d'eau. Deux capteurs permettent la mesure du PAR, l'un est orienté vers le haut et l'autre vers le bas. La température de la surface du sol est également mesurée, à l'aide d'un thermomètre infrarouge. Ils sont aussi équipés d'un GPS permettant de géo localiser les mesures. Le flux de CO_2 est retrouvé à partir des mesures de concentrations de CO_2 et de vitesses du vent (voir Gioli et al., 2006).

Figure IV.3 *Les SkyArrow utilisés pendant la campagne de mesure CEFLES2 pour la mesure des flux de CO_2.*

Les mesures avionnées de fluorescence ont été faites à bord d'un Piper Seneca (voir *Figure IV.4*), un avion bimoteur capable d'embarquer en temps normal 6 personnes. Il a été adapté pour les besoins de la campagne et permettait au final d'embarquer 4 personnes (deux pilotes et deux expérimentateurs) en plus des différents instruments de mesure. La vitesse de l'avion pendant les trois parties de la campagne était d'environ 60 $m.s^{-1}$ (216 $km.h^{-1}$).

Figure IV.4 *Le Piper Seneca utilisé pendant la campagne CEFLES2 pour les mesures avionnées de fluorescence.*

Le Piper embarquait les instruments destinés aux mesures de fluorescence et à la caractérisation de la cible. Cela comprenait : AirFLEX, un spectromètre permettant d'acquérir la radiance de la cible, une caméra thermique, une camera vidéo permettant d'avoir une image du sol et un système de positionnement : GPS et centrale inertielle. Les différents instruments et l'installation dans l'avion sont montrés dans la *Figure IV.5*.

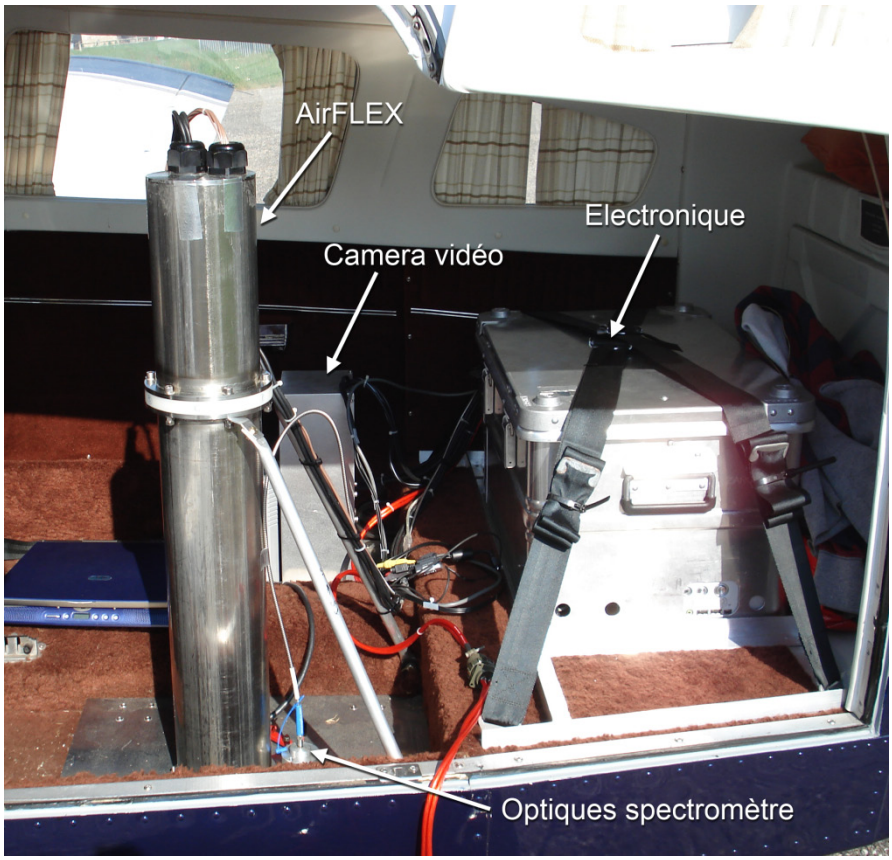


Figure IV.5 *Systèmes embarqués à bord de l'avion de mesure. La carlingue de l'avion a été percée en deux endroits pour permettre aux différents instruments (AirFLEX, spectromètre, caméra thermique, caméra vidéo) de faire leurs mesures. La caméra thermique se situe à coté de la caméra vidéo, elle est cachée par AirFLEX sur cette photo.*

Le spectromètre était un USB2000+ (Ocean Optics) capable de mesurer entre 200 nm et 890 nm avec une FWHM de 2 nm. Sa fente d'entrée était de 25 µm. La chaine optique est composée d'une lentille permettant d'ajuster le champ de vue sur celui d'AirFLEX, d'une fibre optique (ouverture numérique 0.22, diamètre de cœur 1 mm) et d'un obturateur. Le spectromètre était piloté par un programme en JAVA qui permettait à un operateur de contrôler visuellement les mesures : le temps d'intégration du spectromètre était fixé par l'operateur de manière à ce que le signal ne sature pas. Grâce à la grande dynamique de ce spectromètre, une fois le temps d'intégration défini, il n'est généralement pas nécessaire de l'adapter au cours du vol. Les mesures de courant à l'obscurité sont déclenchées par l'expérimentateur, elles s'effectuent en même temps sur AirFLEX et le spectromètre.

La camera vidéo (Sony) permet d'avoir une image de la cible survolée. Afin de pouvoir synchroniser image et mesure, un numéro de mesure a été incrusté dans l'image enregistrée grâce au montage donné dans la *Figure IV.6*. Ce numéro de mesure est incrémenté grâce a un trigger délivré par la carte d'acquisition d'AirFLEX.

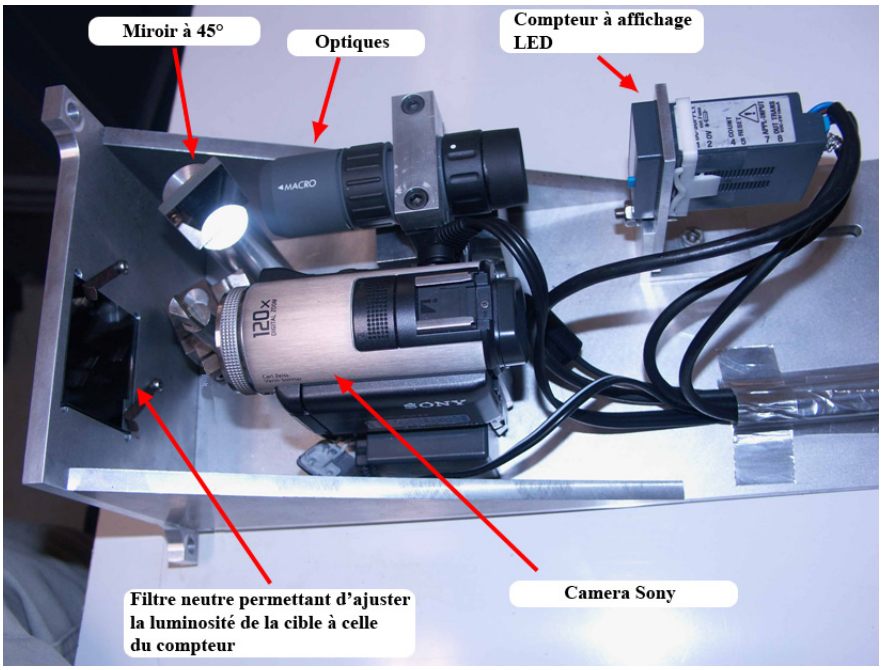


Figure IV.6 *Système d'acquisition vidéo permettant d'avoir une image de la cible contenant le numéro de mesure en cours grâce à un compteur digital à affichage LED.*

La *Figure IV.7* présente à titre d'illustration une image extraite du flux vidéo obtenue avec le montage caméra-compteur à LED. On peut y voir l'affichage du compteur à LED incrusté à droite de l'image.

Figure IV.7 *Image issue de la caméra vidéo embarquée avec AirFLEX. Le numéro incrusté à droite correspond précisément à une acquisition d'AirFLEX faite au moment ou l'image a été enregistrée : il est ainsi possible d'associer une mesure à une image représentant la cible.*

La commande et l'acquisition d'AirFLEX s'effectuent par le biais d'une carte d'acquisition National Instrument (NI PCIe-6559 A DAQ) et d'un programme en LabView 7 (National Instrument).

La *Figure IV.8* détaille le fonctionnement général du système mis en place pour contrôler les différents instruments.

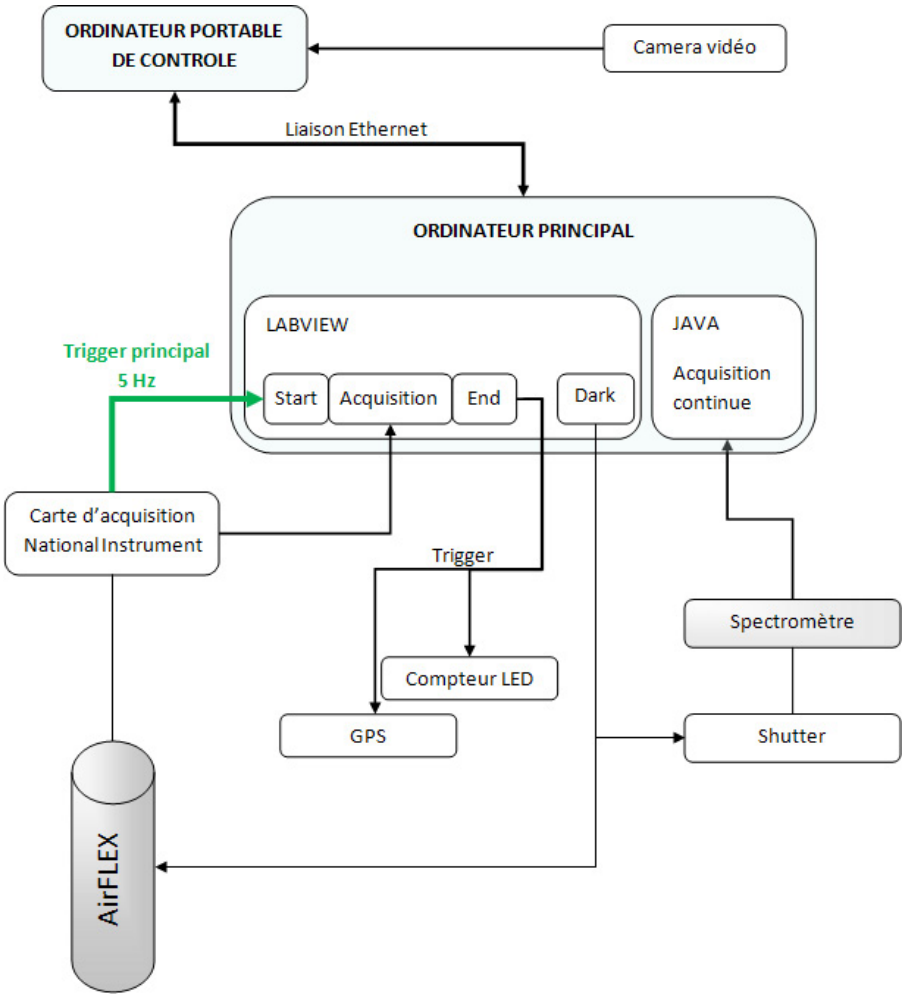


Figure IV.8 *Fonctionnement de l'acquisition des données pour nos instruments embarqués dans l'avion : AirFLEX, spectromètre et caméra vidéo.*

Un ordinateur « principal », contenu dans la boîte électronique, exécute les deux programmes principaux : le programme en JAVA pilotant le spectromètre et le programme en LabView pilotant AirFLEX. La carte d'acquisition génère un signal d'horloge à 5 Hz tout au long du vol. C'est ce signal qui déclenche l'acquisition des mesures d'AirFLEX. A la fin de l'acquisition un trigger est envoyé au GPS, qui enregistre alors la position dans son propre fichier, et au compteur qui incrémente le nombre affiché. Le programme LabView enregistre ensuite les données mesurées en leur assignant un numéro de mesure qui correspond au numéro affiché par le compteur. On pourra donc de cette manière établir la correspondance entre les données AirFLEX et les images vidéo. Les mesures de courant à l'obscurité sont faites manuellement à la demande de l'opérateur. Lorsqu'elles sont demandées l'obturateur d'AirFLEX se ferme ainsi que celui du spectromètre. Une série de mesures est faite et les obturateurs sont ouverts automatiquement à la fin.

L'ordinateur principal est enfermé dans la boite contenant tous les éléments électroniques nécessaires à l'alimentation des instruments et à l'acquisition des données. Il est contrôlé en connectant un ordinateur portable par liaison Ethernet grâce au logiciel de contrôle à distance

Timbuktu (Netopia, http://www.netopia.com/software/products/tb2/). L'ordinateur portable est également responsable de l'enregistrement de la vidéo grâce à une carte d'acquisition vidéo Pinnacle.

4.2.4 Les vols

Au total 14 vols ont été faits : 10 vols en avril 2007, 2 vols en juin 2007 et 1 vol en septembre 2007. Les conditions atmosphériques ont été favorables pour les vols d'avril et de septembre. En revanche, les vols effectués en juin se sont déroulés dans des conditions météorologiques difficiles : le temps était à l'orage, les nuages étaient nombreux. Les conditions nécessaires à la bonne qualité des données n'étaient pas réunies : l'altitude de vol et la ligne de vol n'ont pu être respectées dans les tentatives d'éviter les orages et les conditions de luminosité étaient extrêmement changeantes. En conséquence, les données de fluorescence sont très difficilement exploitables pour les vols de juin. Le premier vol ayant été interrompu nous n'utiliserons que les données acquises durant le second vol.

Une ligne de vol a été définie en début de campagne. Elle prévoit le survol de différentes zones cultivées et d'une portion de la forêt des Landes. Des boucles sont prévues permettant de survoler plusieurs fois les zones importantes pour accumuler les points de mesure. Les zones importantes étaient les zones dans lesquelles travaillaient les équipes au sol chargées de caractériser les champs.

Les vols ont une durée moyenne de 2 heures. Si la reproductibilité de la ligne de vol n'est pas un problème pour la partie forêt, il est important de repasser sur les mêmes champs à la fois lors des boucles mais également d'un vol à l'autre. En avril la reproductibilité des lignes de vol s'est avérée faible : l'avion passe dans un couloir d'un kilomètre autour de la ligne de vol idéale. Pour les campagnes suivantes, le système de contrôle de positionnement a été amélioré et la reproductibilité est passée à 20-30 m.

La *Figure* IV.9 présente la zone de mesure et les lignes de vol suivies pour chacun des 14 vols effectués. On y distingue la forêt des landes dans la partie ouest et les champs cultivés dans la partie est. La zone de fort recouvrement au sud-est de Marmande est la zone de champ cultivé dans laquelle les équipes au sol réalisaient leurs mesures. Plusieurs boucles au dessus de ces champs étaient effectuées chaque jour.

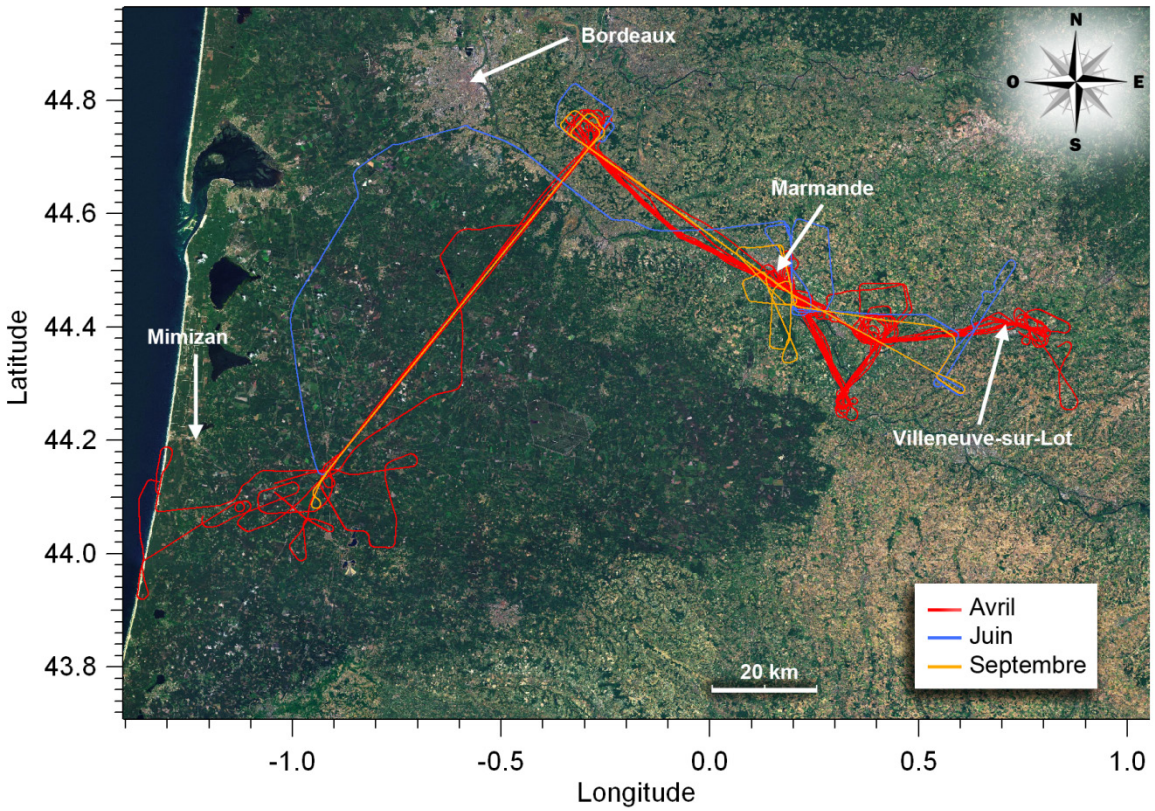


Figure IV.9 *Lignes de vol durant les trois parties de la campagne CEFLES2.*

La *Figure IV.10* donne les heures de début et de fin de vols pour les trois mois de la campagne. Elle illustre la volonté, durant la campagne d'avril, de répartir les vols sur l'ensemble de la journée dans l'objectif de caractériser les variations des signaux au cours de la journée.

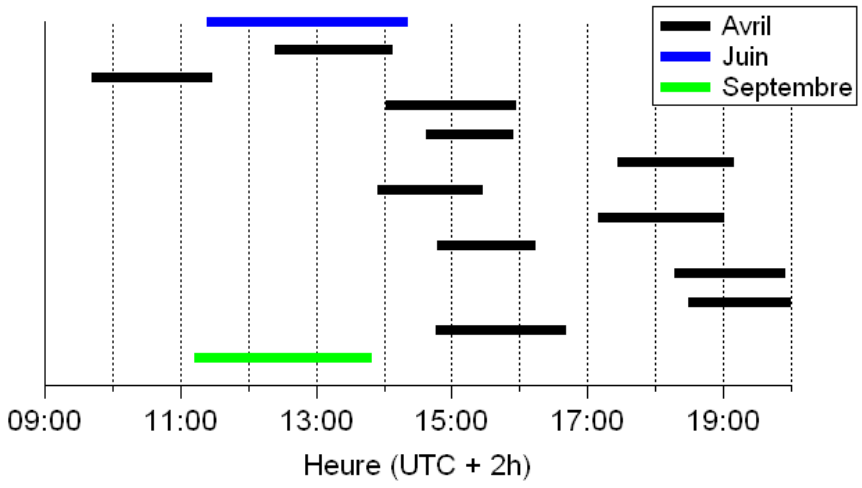


Figure IV.10 *Heure et durées des vols de la campagne CEFLES2*

4.3 Campagne CEFLES2 – Traitement des données

Le traitement des données CEFLES2 comporte quatre étapes : le géoréférencement, l'extraction des références, les corrections atmosphériques et le calcul de la fluorescence. Dans cette partie nous allons décrire les deux premières étapes : le géoréférencement et l'extraction des références. L'implémentation des corrections atmosphériques et le calcul de la fluorescence seront présentés dans les sections suivantes.

- **Géoréférencement**

Par géoréférencement, nous entendons l'action d'associer à chaque mesure d'AirFLEX un set de coordonnées : latitude, longitude, altitude du capteur et élévation du terrain. Un GPS était embarqué dans l'avion, l'acquisition des coordonnées (latitude, longitude, altitude) était déclenchée par un signal généré après chaque mesure d'AirFLEX. Lorsqu'il reçoit ce signal le GPS enregistre la position dans un fichier. Chaque ligne du fichier correspond donc à une mesure d'AirFLEX. Une fois l'association mesure/position de l'avion faite, il ne reste plus qu'à ajouter la donnée de l'élévation au dessus du niveau de la mer. La récupération des données d'élévation se fait grâce à un serveur web mettant à disposition les données de la mission Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/) menée conjointement par la US National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) et la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Ces données ont été acquises par Space Shuttle Endeavour en Février 2000. Les données ont une résolution de 3 secondes d'arc au sol (approximativement 90 m) et 7 à 15 mètres de résolution verticale. La récupération de l'élévation à partir de ces données, basée sur un service web, est décrite dans l'Annexe F.

- **Extraction des mesures de référence**

Une fois ces données collectées le traitement des données passe à la seconde étape : l'extraction des références. La mesure passive de fluorescence nécessite deux évaluations de la profondeur des bandes de l'oxygène : une évaluation sur une référence non fluorescence et une évaluation sur la végétation. Pour des mesures faites au niveau du sol, on alterne généralement mesure sur la végétation et mesure sur un panneau de référence non fluorescent (voir CHAPITRE V). La mesure sur le panneau de référence, dont la réflectance est connue, permet d'évaluer l'éclairement auquel est soumise la végétation et d'obtenir une mesure de référence de la profondeur des bandes sans contribution de fluorescence. Lors des mesures avionnées avec AirFLEX, aucune mesure sur un panneau de référence n'est faite. En fait ces mesures seraient difficiles à faire dans un avion à la fois pour des raisons pratiques et des raisons tenant plus à la qualité de la mesure. Il faudrait forcement mettre cette référence sur la partie supérieure de l'avion pour qu'elle ne soit pas dans l'ombre de l'avion, ce qui impliquerait de percer une seconde fois la carlingue. De plus cela rend difficile l'utilisation d'un seul instrument pour ces deux mesures. D'un point de vue de la qualité de la mesure on peut également remarquer que le rayonnement mesuré dans ces conditions n'est pas le rayonnement au niveau du sol : il « manque » tous les effets radiatifs entre l'altitude de l'avion et le sol. Il serait donc nécessaire de corriger ces données à l'aide d'un modèle de transfert atmosphérique.

Deux solutions peuvent être envisagées.

- L'utilisation des données acquises par TerFLEX. Durant la campagne, TerFLEX a mesuré les profondeurs des bandes d'absorption de l'oxygène au niveau du sol sur une surface de référence en Spectralon. Nous voyons cependant quelques inconvénients majeurs à l'utilisation de ces données : elles ne sont pas acquises au même endroit que les mesures faites par AirFLEX. TerFLEX est fixe et on ne peut pas être sûr que les conditions atmosphériques dans

lesquels se trouve TerFLEX soient les mêmes que celles dans lesquelles mesures AirFLEX. La présence de nuages, les conditions locales d'aérosols, la variabilité de l'élévation du terrain induisent des changements de profondeur dont TerFLEX ne peut pas rendre compte.

- La seconde solution consiste à utiliser les champs nus survolés comme référence. Les champs nus sont non fluorescents. Les mesures effectuées sur ces champs permettent donc d'avoir une évaluation des profondeurs sans fluorescence en tenant compte des conditions locales d'éclairement. De plus elles sont prises dans les mêmes conditions que les mesures sur la végétation. C'est cette seconde méthode que nous avons retenue pour le traitement des données de la campagne CEFLES2. Elle a également été utilisée pour le traitement des données durant la campagne SEN2FLEX.

L'extraction des références consiste donc à identifier les champs nus dans les mesures et à générer des valeurs de références tout au long du vol à partir des données obtenues sur ces champs nus. Les champs nus sont repérés automatiquement grâce au NDVI : dans un premier temps un intervalle de valeur du NDVI correspondant à des champs nus (NDVI ~ 0) est établi manuellement en observant conjointement les images de la vidéo et les mesures faites par AirFLEX. Une fois cet intervalle défini, on extrait automatiquement toutes les mesures correspondant à un NDVI dans cet intervalle. On a ainsi pour chacun des canaux acquis par AirFLEX des valeurs de référence tout au long du vol. On interpole ensuite ces valeurs sur l'ensemble du vol de manière à définir pour chaque point de mesure une valeur de référence.

La *Figure IV.11* donne les références trouvées sur les lignes de vol en avril et en septembre. On peut voir qu'il y avait beaucoup plus de champs nus en avril qu'en septembre. L'absence de champs nus sur une longue portion de trajet peut poser un problème : l'interpolation d'un champ à l'autre devient hasardeuse et on ne peut plus vraiment dire que l'on tient compte des conditions d'éclairement locales. Ce problème est l'un de ceux qu'il faudra résoudre pour les futures missions avionnées et spatiales. Une piste est l'utilisation d'un système imageur : en mesurant sur une plus grande surface on augmente les chances de mesurer sur des surfaces de référence.

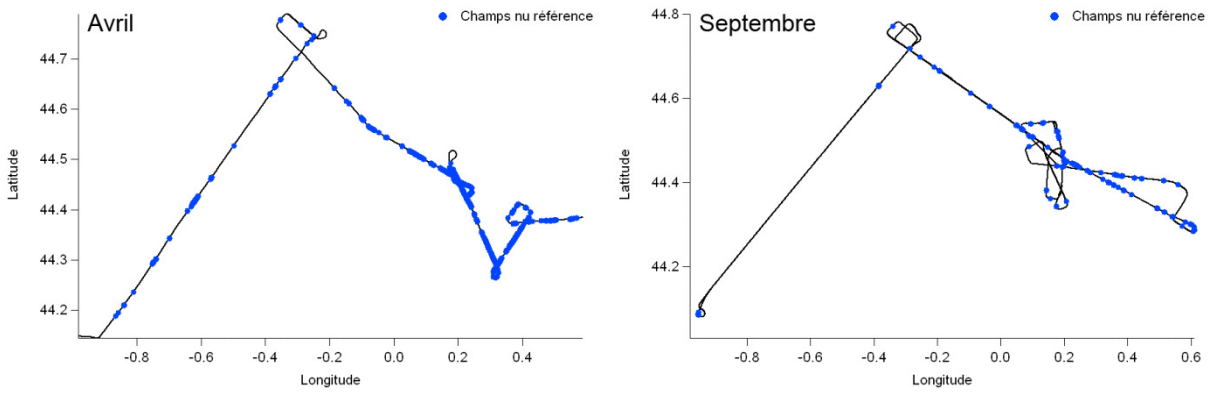


Figure IV.11 *Champs nus pouvant servir de référence trouvés sur les lignes de vol en Avril (à gauche) et en Septembre (à droite).*

4.4 Campagne CEFLES2 – Implémentation des corrections atmosphériques

Nous avons présenté dans le CHAPITRE III les effets induits par la présence de l'atmosphère. Nous avons exprimé la valeur des radiances mesuré en altitude comme :

$$L = T_r \left(\frac{\rho}{\pi} I + \frac{T_F}{T_r} f \right) + ATM + ENV \qquad (IV.1)$$

Avec T_r la transmission effective du rayonnement réfléchi par la cible, $T_F = T_{fluo}$ (selon la notation du CHAPITRE III) la transmission effective de la fluorescence, *ATM* la contribution de l'environnement et *ENV* la contribution de l'environnement. L'impact des corrections atmosphériques sur l'estimation de la fluorescence a été étudiée dans l'Annexe D.

Il s'agit à présent de corriger les signaux des effets de l'atmosphère. Il va donc falloir évaluer ces différents effets (contribution de l'atmosphère, de l'environnement et transmissions). En plus de dépendre des conditions atmosphériques, ils vont dépendre de la configuration de la mesure : altitude de la mesure, élévation du sol, position géographique de l'avion, heure et réflectance de l'environnement. Tous ces paramètres vont varier au cours du vol et chaque point de mesure constitue une combinaison unique de ces paramètres. Dans l'idéal il faudrait donc, pour chaque point de mesure, calculer chacun des termes de correction. Bien sûr cette approche n'est pas du tout réaliste : le temps de calcul nécessaire serait bien trop long et rien ne justifie une telle précision aux vues de la faible connaissance que l'on a sur les paramètres caractérisant l'atmosphère : en effet, durant cette campagne aucune mesure permettant de caractériser précisément l'état de l'atmosphère n'a été faite. Dans la suite nous utiliserons donc une atmosphère standard, avec les valeurs par défaut : *MidLatitudeSummer* pour le modèle d'atmosphère et *Rural-23 km* pour le modèle d'aérosols.

Reprenons l'équation *(IV.1)* et examinons les dépendances de chacun des termes de correction atmosphériques.

T_r dépend de l'heure puisque nous avons vu que cette transmission dépend de la forme du spectre solaire au niveau du sol. Pour les mêmes raisons, on peut penser qu'elle est influencée par la position géographique de la mesure. Elle dépend également de l'altitude et de l'élévation du terrain.

T_F ou T_{fluo} selon la notation du CHAPITRE III est la transmission effective de la fluorescence. Elle ne dépend que de la masse d'air entre la végétation et le détecteur, par conséquent elle ne dépend que de l'élévation et de l'altitude.

ATM, la radiance propre de l'atmosphère dépend de l'éclairement solaire donc du temps et de la position de mesure. Elle dépend également de la masse d'air sous le capteur donc de l'altitude et de l'élévation.

La contribution de l'environnement, ENV, générée depuis le sol par l'éclairement solaire et transmise vers le capteur par diffusion dans la masse d'air sous le capteur dépend de tous les paramètres : temps, position, altitude, élévation et réflectance de l'environnement.

La *Table IV.2* récapitule les différentes dépendances de chacun des termes.

Dépendance des différents paramètres de corrections atmosphérique					
	Temps	Position géographique	Altitude	Elévation	Réflectance de l'environnement
T_r	✔	✔	✔	✔	
T_F			✔	✔	
ATM	✔	✔	✔	✔	
ENV	✔	✔	✔	✔	✔

Table IV.2 *Dépendance des différents paramètres à évaluer pour les corrections atmosphériques.*

On pourrait penser qu'on peut réduire la dépendance en altitude et élévation à un seul terme, une hauteur d'air, qui serait la différence de ces deux valeurs ; cependant ce n'est pas tout à fait le cas : la concentration en aérosols au niveau du sol dépend de l'élévation du sol. Ainsi une masse d'air de 100 m comptée à partir du niveau de la mer ne contient pas la même quantité d'aérosols qu'une masse d'air de 100 m comptée à partir de 400 m d'altitude. C'est également vrai pour les quantités de gaz, etc…

Chacun des termes de corrections atmosphériques va donc être fonction de plusieurs paramètres. Prenons comme exemple la contribution de l'atmosphère. On peut écrire que pour le canal *i* la contribution de l'atmosphère pour la $N^{ième}$ mesure s'exprime en fonction des différents paramètres de vol :

$$ATM_i(N) = ATM_i(t, latitude, longitude, altitude, élévation) \qquad (IV.2)$$

Ces paramètres varient tous indépendamment. Afin de simplifier les calculs il faudrait pouvoir exprimer la contribution de l'atmosphère à partir d'une contribution par défaut, corrigée par un certain nombre de termes permettant de tenir compte de l'écart de chaque paramètre de vol par rapport aux paramètres par défaut. On va donc chercher à exprimer la contribution de l'atmosphère sous la forme d'une composition de fonction :

$$\begin{aligned} ATM_i(N) = {} & C_{elev_i}(élévation) \circ C_{alt_i}(altitude) \circ C_{long_i}(longitude) \\ & \circ C_{lat_i}(latitude) \circ C_{h_i}(t) \circ ATM_{def} \end{aligned} \qquad (IV.3)$$

Avec C_x les fonctions de correction et ATM_{def} la valeur par défaut.

Dans l'expression *(IV.3)* chaque fonction ne dépend que d'un seul paramètre. Il faut vérifier qu'il est possible de découpler de cette manière les influences de chaque paramètre. Il faut par exemple s'assurer que la variation due à l'heure soit la même quelle que soit la position géographique de la mesure et si ce n'est pas le cas établir une relation simple permettant de limiter le nombre de calculs nécessaire.

L'étude sera faite en utilisant les caractéristiques du vol effectué le 15 septembre 2007. L'empreinte de ce vol s'inscrit dans un rectangle de 130 km × 90 km. Le vol a duré environ 2 h 30 à

partir de 11 h du matin, heure locale (UTC + 2h). Les extrema des différents paramètres caractérisant le vol et le terrain sont reportés dans la *Table IV.3*.

Variabilité des conditions de mesure					
	Temps (h)	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Elévation (m)
Extremum	9.2 – 11.8	44.08 – 44.78	-0.95 – 0.61	446.1 – 482.1	0 – 216
Valeur moyenne	10.5	44.43	-0.17	464.1	108

Table IV.3 *Valeurs maximales et valeur moyenne des paramètres de vol : heure, latitude, longitude, altitude, élévation du sol.*

Une étude de sensibilité, menée dans l'Annexe E, à montré qu'à 300 m, pour avoir une incertitude sur la fluorescence inférieure à 10 % il fallait avoir une incertitude sur les termes de corrections atmosphériques elle-même inférieure à 10 %. Dans la suite, les approximations faites devront donc tenir compte de cette limite.

- **Réflectance de l'environnement**

Le paramètre le plus simple à séparer des autres est la réflectance de l'environnement. La dépendance de la contribution de l'environnement à la réflectance de l'environnement ne dépend pas de la position du capteur ni de l'altitude de mesure ni des autres paramètres : la réflectance de l'environnement est un paramètre multiplicatif vis-à-vis des autres dépendances de la contribution de l'environnement. Nous ne parlerons donc pas de la réflectance de l'environnement dans cette étude. En revanche il faut préciser que tous les résultats donnés seront obtenus pour une réflectance d'environnement de 1. La relation entre réflectance de l'environnement et contribution de l'environnement étant quasi linéaire (voir Annexe C), il suffira de multiplier le flux par la réflectance voulue pour adapter le résultat au contexte voulu.

- **Position géographique de la mesure**

Commençons par la dépendance à la position géographique de la mesure. Nous avons calculé les différents termes de correction atmosphériques pour un ensemble de position correspondant à la zone de vol. Ces résultats ont été regroupés en fonction de la latitude sur la *Figure IV.12* pour le canal de mesure au fond de la bande d'absorption O_2-A, représentatif de ce que l'on observe sur les autres canaux. La dispersion verticale des valeurs correspond à la dépendance en longitude.

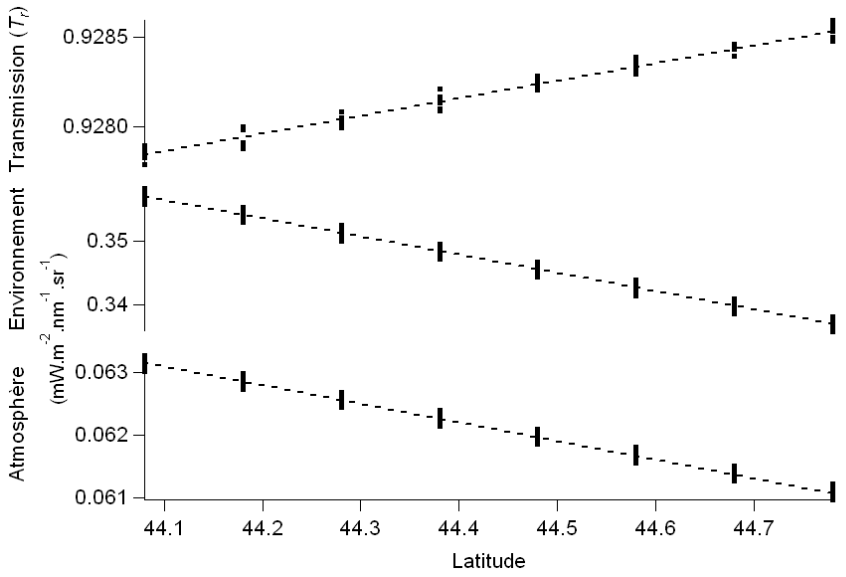


Figure IV.12 *Variation des paramètres de corrections atmosphériques pour le canal du fond de la bande O_2-A en fonction de la latitude. La dispersion verticale traduit la variation avec la longitude.*

On remarque tout d'abord que les variations en fonction de la position sont très faibles : inférieures à 0.1 % pour la transmission, de l'ordre de 6.5 % pour la contribution de l'environnement et de l'ordre de 3.8 % pour la contribution de l'atmosphère. Ces variations sont en deçà de la barre de 10 % d'incertitude que nous avons fixée. On remarque également que les variations induites par la position sont principalement liées au changement de latitude : la variation principale est linéaire avec la latitude et il reste une très faible dispersion fonction de la longitude pour chaque latitude[4]. On peut donc sans mal estimer les variations induites par la position à partir de deux calculs effectués aux extrema de latitude du vol, les autres positions se déduiront par interpolation linéaire en négligeant les variations induites par la longitude.

Il faut à présent nous assurer que les variations induites par les autres paramètres ne dépendent pas de la position géographique de la mesure.

- **Heure de mesure**

La *Figure IV.13* donne les variations des paramètres de corrections atmosphériques en fonction de l'heure et pour les deux positions les plus éloignées : Sud-Est en pointillé et Nord-Ouest en trait plein. La variation avec l'heure de mesure est faible pour la transmission : 0.75 % au maximum pour le canal au fond de la bande O_2-A. C'est également ce canal qui présente les variations les plus fortes en ce qui concerne la contribution de l'environnement et de l'atmosphère. Elles sont de l'ordre de 36 % pour l'atmosphère et de 67 % pour l'environnement. On remarque également que si les valeurs des différents paramètres ne sont pas exactement les mêmes pour les deux positions, l'allure des variations en fonction de l'heure est similaire (on a une corrélation supérieure à 0.99). Cela indique que les variations dues à l'heure ne dépendent pas de la position.

[4] Cet effet peut s'expliquer en observant que sous nos latitudes, l'angle zénithal solaire est toujours inférieur à son azimut. On fera donc plus varier la distance observateur-soleil en se déplaçant en latitude qu'en longitude. Cet effet n'existe plus à l'équateur.

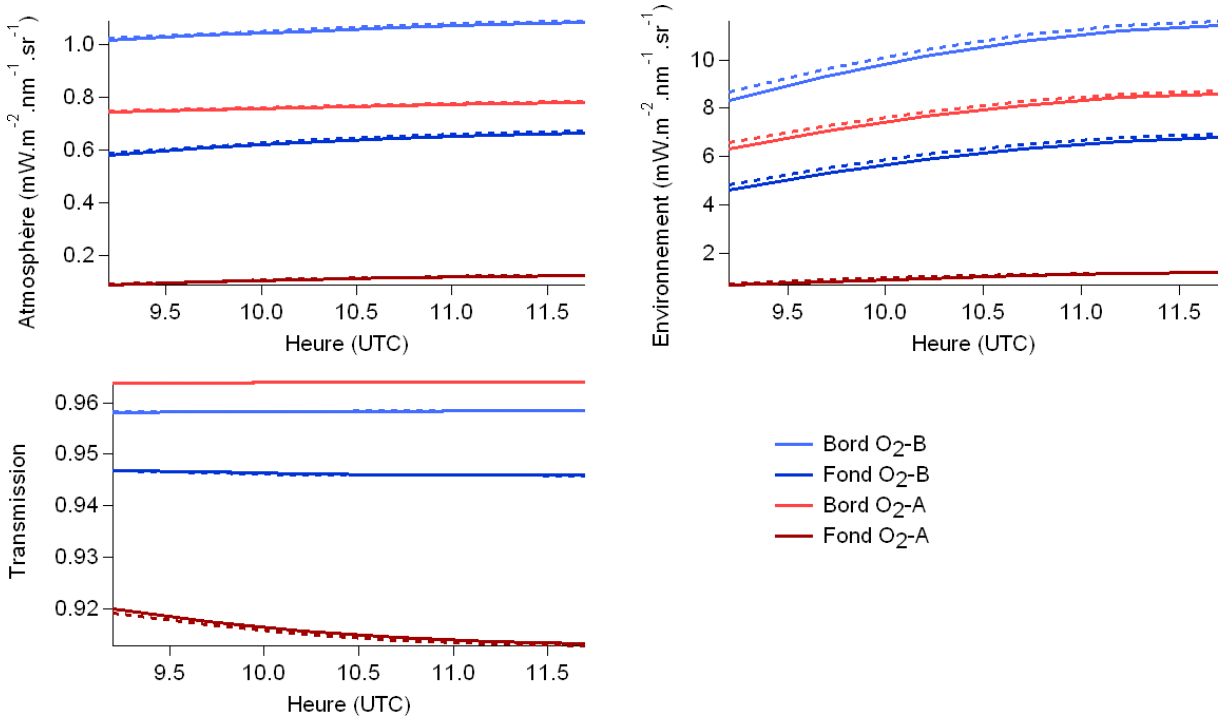


Figure IV.13 *Variation des paramètres de corrections atmosphériques en fonction de l'heure pour deux positions de mesures. En pointillé position Sud-Est, en trait plein position Nord-Ouest.*

Maintenant que l'on sait que les variations selon l'heure peuvent s'exprimer indépendamment de la position de mesure il faut s'assurer que cette variation ne dépend pas non plus de l'altitude et de l'élévation.

La variation avec l'heure a donc été calculée pour la masse d'air maximale (élévation minimale et altitude maximale) et pour la masse d'air minimale (élévation maximale et altitude minimale). La corrélation entre les variations horaires dans les deux configurations est excellente comme le montre la *Figure IV.14*. La forme des variations dues à l'heure reste la même quelles que soient les valeurs des autres paramètres (élévation, altitude, position).

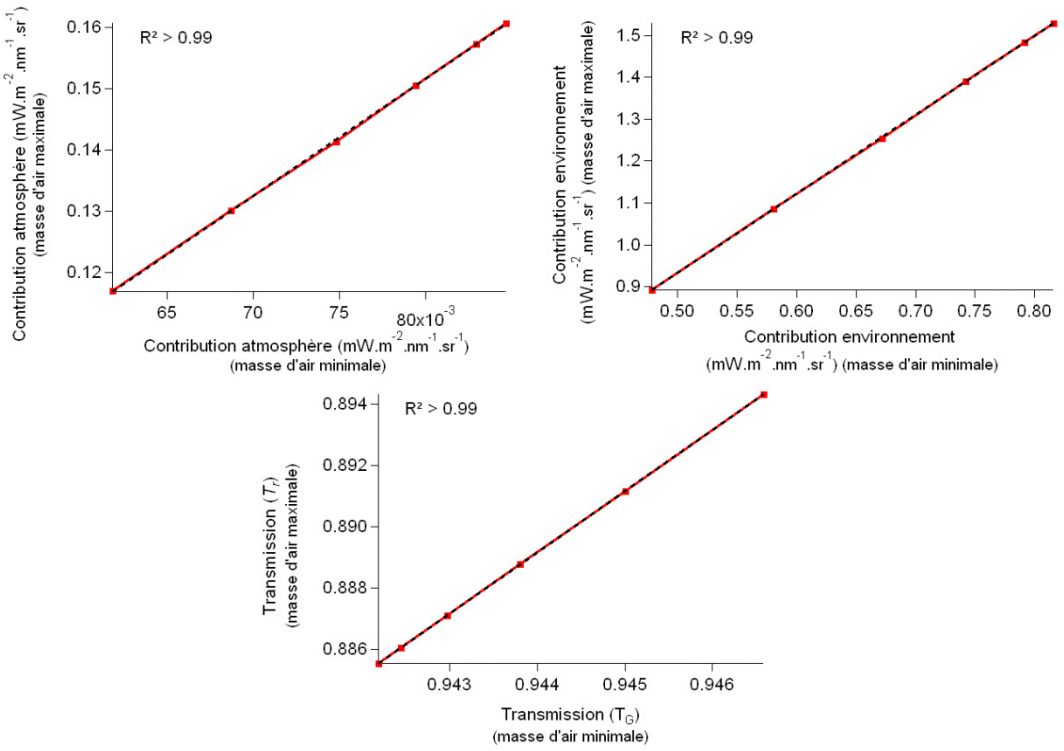


Figure IV.14 *Corrélation entre les variations horaires pour deux configurations de mesure. Masse d'air maximale (élévation 0m, altitude : 482 m) et masse d'air minimale (élévation : 216 m, altitude 446 m).*

Ces résultats montrent que la dépendance à l'heure des différents paramètres de correction atmosphérique reste la même quelles que soient les conditions de mesure. En prenant toujours comme exemple la contribution de l'atmosphère, on peut maintenant écrire :

$$ATM_i = C_{h_i}(t) \circ ATM_i(latitude, altitude, élévation) \qquad (IV.4)$$

Avec $C_{h_i}(t)$ la variation induite par l'heure de mesure pour le canal *i* (fonction du temps, *t*).

- **Altitude, élévation**

Etudions maintenant les variations induites par l'altitude et l'élévation. La variation induite par ces paramètres est essentiellement due à la quantité de masse d'air entre le sol et le capteur. Dans le cas des mesures effectuées le 15 septembre 2007 durant la campagne CEFLES2, la plus grande variabilité de masse d'air est induite par les changements d'élévation : l'altitude de l'avion reste la même durant tout le vol à 40 m près alors que l'élévation se situe entre 0 m et 216 m. La *Figure IV.15* donne la variation des différents paramètres de corrections atmosphériques en fonction de l'élévation pour l'altitude de mesure maximale. Les variations maximales sont de l'ordre de 60% pour la contribution de l'atmosphère et de l'environnement. Elles sont de 6 % pour la transmission de la fluorescence (T_F) et de 5 % pour la transmission (T_r). Ces variations sont linéaires et on peut facilement en tenir compte à partir des calculs faits pour les valeurs minimale et maximale de l'élévation en utilisant une interpolation linéaire.

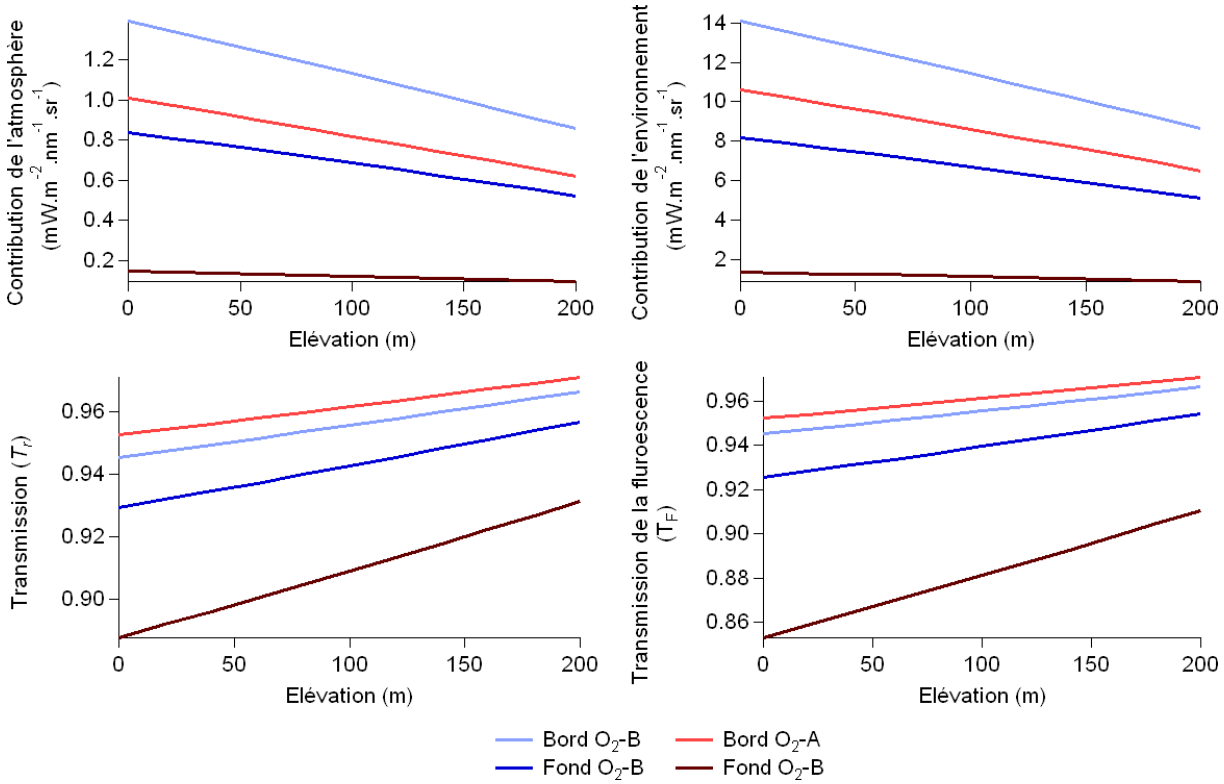


Figure IV.15 *Variations des différents paramètres de corrections atmosphériques avec l'élévation (pour une altitude de mesure de 482 m).*

Il faut maintenant s'assurer que ces variations ne dépendent pas de l'altitude et de la position du capteur. Nous avons donc recalculé ces variations pour différentes hauteurs de mesure. Les résultats montrent que si les valeurs des paramètres changent en passant de 446 m à 482 m d'altitude, la variation due à l'élévation reste la même (on a encore une fois une corrélation supérieure à 0.99 entre la variation à 446 m et la variation à 482 m). En conséquence, on peut découpler les paramètres altitude et élévation.

4.4.1 Mise en équation

De la même manière que l'on peut découpler les paramètres altitude et élévation on peut découpler de ces paramètres les variations dues au positionnement du capteur et ainsi de suite. Chaque paramètre de vol induit donc une variation découplée des variations des autres paramètres.

Tous les paramètres, mis à part l'heure, induisent des variations linéaires qui peuvent être estimées à partir de deux calculs faits pour les valeurs maximale et minimale du paramètre de vol considéré. Au final on se propose d'estimer les paramètres de corrections atmosphériques de la manière suivante : un premier calcul est fait pour une valeur par défaut des paramètres de vol (longitude moyenne, latitude minimale, élévation minimale, altitude minimale, heure minimale) puis on applique une série de corrections pour tenir compte de l'écart entre la valeur par défaut du paramètre et la valeur réelle. On a alors, par exemple pour la contribution de l'atmosphère de la $N^{ième}$ mesure dans le canal i :

$$ATM_i(N) = C_{h_i}(\Delta t) \circ C_{lat_i}(\Delta lat) \circ C_{alt_i}(\Delta h) \circ C_{elev_i}(\Delta Elev) \circ ATM_{def_i} \qquad (IV.5)$$

Avec $C_{lat}(\Delta lat)$ la correction due à la variation de latitude par rapport à la position par défaut (dans notre cas la latitude minimale), $\Delta lat = lat - lat_{min}$. Avec lat la latitude du point de mesure. L'équation suivante donne l'expression de $C_{lat}(\Delta lat)$ (toujours dans le cadre de l'estimation de la contribution de l'atmosphère). La variable x est la valeur du paramètre auquel on applique la correction. En pratique on le remplace par ATM_{def}.

$$C_{lat}(\Delta lat, x) = x\left(1 + \frac{\Delta lat}{(lat_{min} - lat_{max})}\left(1 - \frac{ATM(lat_{max})}{ATM_{def}}\right)\right) \quad (IV.6)$$

Avec lat_{min} , lat_{max} les latitudes minimales et maximales durant le vol et $ATM(lat_{max})$ la contribution de l'atmosphère calculée pour la latitude maximale. Les expressions des autres corrections sont similaires. Pour la correction induite par l'altitude $C_{alt}(\Delta h)$ on a:

$$C_{alt}(\Delta alt, x) = x\left(1 + \frac{\Delta alt}{(alt_{min} - alt_{max})}\left(1 - \frac{ATM(alt_{max})}{ATM_{def}}\right)\right) \quad (IV.7)$$

Et pour la correction due à l'élévation :

$$C_{elev}(\Delta elev, x) = x\left(1 + \frac{\Delta elev}{(elev_{min} - elev_{max})}\left(1 - \frac{ATM(elev_{max})}{ATM_{def}}\right)\right) \quad (IV.8)$$

La correction en temps $C_h(\Delta t, x)$ ne s'exprime pas simplement puisque la dépendance à l'heure n'est pas linéaire. On pourra cependant l'approximer en évaluant la variation avec l'heure pour quatre valeurs différentes et en faisant une interpolation entre chacune de ces valeurs.

Bien sûr, la composition de fonctions définie dans l'équation *(IV.3)* est commutative. On peut donc écrire directement :

$$ATM_i(N) = \frac{C_h\left(\Delta t, ATM_{def}\right)}{{ATM_{def}}^3\left((alt_{max} - alt_{min})(lat_{max} - lat_{min})(elev_{max} - elev_{min})\right)} Co \quad (IV.9)$$

Avec :

$$\begin{aligned} Co = &\left(ATM_{def}(alt_{max} - alt_{min} - \Delta alt) + \Delta alt \times ATM(alt_{max})\right) \\ &\times \left(ATM_{def}(lat_{max} - lat_{min} - \Delta lat) + \Delta lat \times ATM(lat_{max})\right) \\ &\times \left(ATM_{def}(elev_{max} - elev_{min} - \Delta elev) + \Delta elev \times ATM(elev_{max})\right) \end{aligned} \quad (IV.10)$$

Au final, pour chacun des paramètres de correction atmosphérique, on aura 8 simulations MODTRAN à faire : 1 calcul pour la valeur par défaut, 1 calcul pour la dépendance en position, 1 calcul pour la dépendance à l'altitude, 1 calcul pour la dépendance à l'élévation et 4 calculs pour la dépendance à l'heure.

L'étude de l'erreur sur la fluorescence en fonction des incertitudes sur les paramètres de corrections atmosphériques faites dans l'Annexe E nous indique qu'une telle précision n'est pas nécessaire pour

obtenir une bonne précision sur les mesures. Cependant, le nombre de calculs étant particulièrement faible il est facile de tenir compte de manière précise des variations des différents paramètres de corrections atmosphériques avec les paramètres de vol. Au final on atteint une erreur/incertitude inférieure à 0.2 % sur l'évaluation des transmissions et inférieure à 5 % pour l'évaluation des contributions de l'atmosphère et de l'environnement.

La généralisation de cette manière d'implémenter les corrections atmosphériques doit être étudiée pour le cas de vols à plus haute altitude. On peut penser que même si le nombre de calculs nécessaires augmente légèrement, on pourra toujours définir des interpolations permettant de simplifier les calculs tout en gardant une précision suffisante. D'autre part, il conviendra également d'étudier la possibilité de regrouper les paramètres latitude, longitude et heure sous un seul paramètre qui serait l'angle zénithal solaire. En procédant de cette manière il ne faudra pas oublier que les conditions atmosphériques changent en fonction de la position et de l'heure, ce qui est « masqué » par l'utilisation d'un seul paramètre comme l'angle zénithal solaire.

Une fois ces calculs effectués, chacun des flux obtenus par AirFLEX est corrigé des différents effets atmosphériques. Les vols se faisant à basse altitude nous ferons l'approximation que la réflectance de l'environnement est égale à celle de la cible pour estimer la contribution de l'environnement.

4.5 Campagne CEFLES2 – Calcul de la fluorescence

A présent que les corrections atmosphériques sont faites il faut calculer la fluorescence. Nous avons présenté dans le CHAPITRE II une méthode de calcul permettant de retrouver la fluorescence en exploitant des mesures faites dans plusieurs canaux autour des bandes d'absorption. Nous avons vu que la première méthode proposée, la méthode de Plascyk utilisant deux canaux de mesure par bande, n'est pas satisfaisante : l'hypothèse de réflectance de la végétation constante sur toute la bande d'absorption induit une erreur significative sur la fluorescence calculée. Si dans la bande O_2-A, trois canaux sont suffisants pour décrire la variation de la réflectance de la végétation, nous avions vu qu'il fallait augmenter le nombre de canaux de mesure dans la bande O_2-B afin d'utiliser un modèle de réflectance polynomial.

Nous allons à présent nous pencher sur une méthode de calcul de fluorescence au moyen des mesures faites par AirFLEX. Avec AirFLEX, nous avons des mesures dans trois canaux autour de chacune des bandes d'absorption : un canal sur le bord gauche, un canal au fond de la bande d'absorption et un canal sur le bord droit. Nous avons vu dans le CHAPITRE II la formulation d'un système permettant de retrouver la fluorescence avec trois canaux dans la bande O_2-A et avec au moins quatre canaux dans la bande O_2-B. Ce qui pose un premier problème dans la bande O_2-B. Un second problème va se poser à cause de l'absence de mesure de référence sur une cible de réflectance connue. Regardons tout d'abord comment résoudre ce problème dans la bande O_2-A.

- ***Calcul dans la bande O_2-A***

En reprenant les notations introduites dans le CHAPITRE II nous pouvons exprimer la radiance mesurée par AirFLEX sous la forme :

$$L_i = \frac{\rho_i I_i}{\pi} + f_i \qquad (IV.11)$$

Avec

L_i la radiance mesurée dans le canal i, ρ_i la réflectance de la cible pour le canal i, I_i le flux solaire incident pour le canal i, f_i la fluorescence de la cible dans le canal i.

Pour les mesures de référence on a :

$$L_i^r = \frac{\rho_i^r I_i}{\pi} \qquad (IV.12)$$

Mais cette fois à l'inverse des mesures faites sur une référence, nous ne connaissons pas la valeur de la réflectance. On ne peut donc pas déduire directement I_i de ces mesures. Il nous faudra alors introduire un modèle de réflectance pour le sol nu (les mesures de référence) et un modèle de réflectance pour la végétation. Comme nous l'avons vu la réflectance du sol nu est plutôt linéaire. On écrira donc :

$$\rho_i^r = c\lambda_i + d \qquad (IV.13)$$

Avec c et d coefficients inconnus.

Comme ce que nous avons fait dans le CHAPITRE II nous pouvons donc écrire un système d'équations reliant les différentes grandeurs mesurées :

$$\begin{cases} L_i = \dfrac{\rho_i I_i}{\pi} + f_i \quad , i \in \{1,2,3\} \\ L_i^r = \dfrac{\rho_i^r I_i}{\pi} \quad , i \in \{1,2,3\} \\ \rho_i = a\lambda_i + b \quad , i \in \{1,2,3\} \\ \rho_i^r = c\lambda_i + d \quad , i \in \{1,2,3\} \\ f_i = K_i f_{IN} \quad , i \in \{1,3\} \end{cases} \qquad (IV.14)$$

L'ignorance des réflectances sur la mesure des références induisant un degré de liberté supplémentaire pour les rayonnements incidents I_i, ce système ne peut être résolu en l'état. Il faut donc introduire une relation liant les rayonnements incidents entre eux. Il est évidemment exclu d'introduire une relation liant l'éclairement au bord de la bande d'absorption à l'éclairement au fond : cela reviendrait à fixer la valeur de la profondeur que l'on veut justement mesurer. Nous introduisons donc la relation suivante :

$$I_1 = mI_3 \qquad (IV.15)$$

Avec I_1, I_3 les rayonnements incidents aux bords de la bande d'absorption et m un coefficient. Ce coefficient sera déterminé par MODTRAN. Il relie deux canaux de mesure situés en dehors de la bande d'absorption atmosphérique ; il est très stable vis-à-vis des changements de conditions

atmosphériques : les longueurs d'onde étant relativement proches, la diffusion se fera de la même manière dans les deux bandes.

Avec ce nouveau système la fluorescence au fond de la bande d'absorption s'écrit :

$$f = \frac{\left(L_3 L_2^r(\lambda_2 - \lambda_1) + L_2 L_3^r\left((\lambda_1 - \lambda_2) + mL_1^r(\lambda_2 - \lambda_3)\right) + mL_1 L_2^r(\lambda_3 - \lambda_2)\right)}{\left(L_3^r(\lambda_1 - \lambda_2) + mL_1^r(\lambda_2 - \lambda_3) + L_2^r\left(K_3(\lambda_2 - \lambda_1) + mK_1(\lambda_3 - \lambda_2)\right)\right)} \quad \textit{(IV.16)}$$

Le canal au fond de la bande est le n°2. Cette expression de la fluorescence ne tient pas compte du facteur dû aux corrections atmosphériques $\frac{T_F}{T_r}$ qu'il faut lui appliquer.

- ***Calcul dans la bande O_2-B***

Si les mesures faites par AirFLEX sont suffisantes pour adapter facilement les calculs présentés dans le CHAPITRE II à la bande O_2-A, ce n'est pas le cas dans la bande O_2-B. Avec trois canaux on ne peut faire qu'une approximation linéaire alors que l'on a vu que la réflectance de la végétation autour de la bande O_2-B était plutôt parabolique. Tout ce que nous avons dit pour la bande O_2-A reste valable pour la bande O_2-B mis à part le modèle de réflectance qu'il faut donc modifier.

Nous présentons ici un nouveau modèle de réflectance, empirique, permettant de calculer la fluorescence avec seulement trois canaux de mesure. Ce modèle doit pouvoir rendre compte de la réflectance des cibles survolées : principalement de la végétation, avec toute la variabilité de spectres de réflectance qu'elle peut avoir, et des champs nus. Il faut donc que ce modèle puisse s'adapter à des réflectances aussi bien linéaires que paraboliques. Le NDVI est l'indice le plus utilisé pour discriminer la présence de végétation dans la scène observée. C'est un indice qui varie avec la réflectance de végétation. Nous avons donc choisi de l'utiliser comme paramètre dans notre modèle. Voici le modèle de réflectance choisi :

$$\rho(\lambda) = a + b\left[(c_1 + c_2\lambda + c_3\lambda^2)NDVI + \lambda e^{-C_{NDVI}(NDVI + offset_{NDVI})}\right] \quad \textit{(IV.17)}$$

Avec $\rho(\lambda)$, la réflectance à la longueur d'onde λ , a et b inconnues du modèle. c_1, c_2, c_3 sont des coefficients connus, C_{NDVI} et $offset_{NDVI}$ sont des coefficients d'ajustement permettant la décroissance rapide de l'exponentielle avec le NDVI (C_{NDVI}>*1*). Cette équation s'applique sur les trois canaux de mesures. Comme elle n'introduit que deux inconnues, le système peut être résolu.

L'équation *(IV.17)* est basée sur l'expression suivante :

$$(c_1 + c_2\lambda + c_3\lambda^2)NDVI + \lambda e^{-C_{NDVI}(NDVI + offset_{NDVI})} \quad \textit{(IV.18)}$$

Les coefficients *a* et *b* permettent ensuite au modèle de s'adapter aux mesures. L'expression est basée sur une description parabolique de la réflectance de la végétation : $(c_1 + c_2\lambda + c_3\lambda^2)$ les coefficients c_1, c_2, c_3 peuvent être déterminés sur un spectre moyen de la réflectance de la végétation (pour un indice NDVI élevé). La multiplication par le NDVI et l'ajout de l'expression $\lambda e^{-C_{NDVI}(NDVI + offset_{NDVI})}$ donnent les propriétés suivantes au modèle :

$$\lim_{NDVI \to 0} \rho(\lambda) = a + b\lambda \qquad (IV.19)$$

Autrement dit lorsque le NDVI est faible on tend vers un modèle de réflectance linéaire. Et on a également :

$$\lim_{NDVI \to 1} \rho(\lambda) = a + b(c_1 + c_2\lambda + c_3\lambda^2) \qquad (IV.20)$$

Lorsque le NDVI augmente, on tend vers un modèle parabolique.

Le coefficient C_{NDVI} est un coefficient choisi pour permettre la décroissance rapide de l'exponentielle avec le NDVI et le paramètre $offset_{NDVI}$ permet d'ajuster un peu plus finement cette décroissance. Le modèle passe ainsi d'une description linéaire de la réflectance pour les NDVI faibles à une description parabolique pour les NDVI élevés. Les valeurs des paramètres utilisées dans la suite sont données dans la *Table IV.4*.

Valeurs des paramètres pour le calcul dans la bande O_2-B		
Paramètre	*Valeur*	*Description*
c_1	36.933	Coefficients définissant le polynôme du second ordre reproduisant la forme générale du spectre de réflectance de la végétation.
c_2	-0.10876	
c_3	8.014×10^{-5}	
C_{NDVI}	30	Coefficient permettant la décroissance rapide de l'exponentielle.
$offset_{NDVI}$	*0*	Offset à appliquer sur les valeurs de NDVI dans l'exponentielle.
m	Calcul MODTRAN	Coefficient reliant les flux des canaux en dehors de la bande d'absorption.

Table IV.4 *Valeurs des paramètres utilisés pour le calcul de la fluorescence dans la bande O_2-B durant la campagne CEFLES2.*

Pour vérifier le comportement de notre modèle en fonction des spectres rencontrés, nous avons utilisé les données acquises pendant la campagne CEFLES2 : les spectres acquis par le spectromètre. Grâce à un spectre solaire généré par MODTRAN nous obtenons les réflectances apparentes de différentes cibles. Nous avons choisi des cibles avec des NDVI allant de 0.13 à 0.85 et nous avons utilisé notre modèle pour reproduire ces données. Les résultats, présentés dans la *Figure IV.16* illustrent les capacités de notre modèle à s'adapter à différents types de spectres de réflectance (en unité arbitraire). On voit que notre modèle est capable de rendre compte aussi bien d'une réflectance quasi linéaire (NDVI : 0.13) que d'une réflectance « plus parabolique » (NDVI : 0.85).

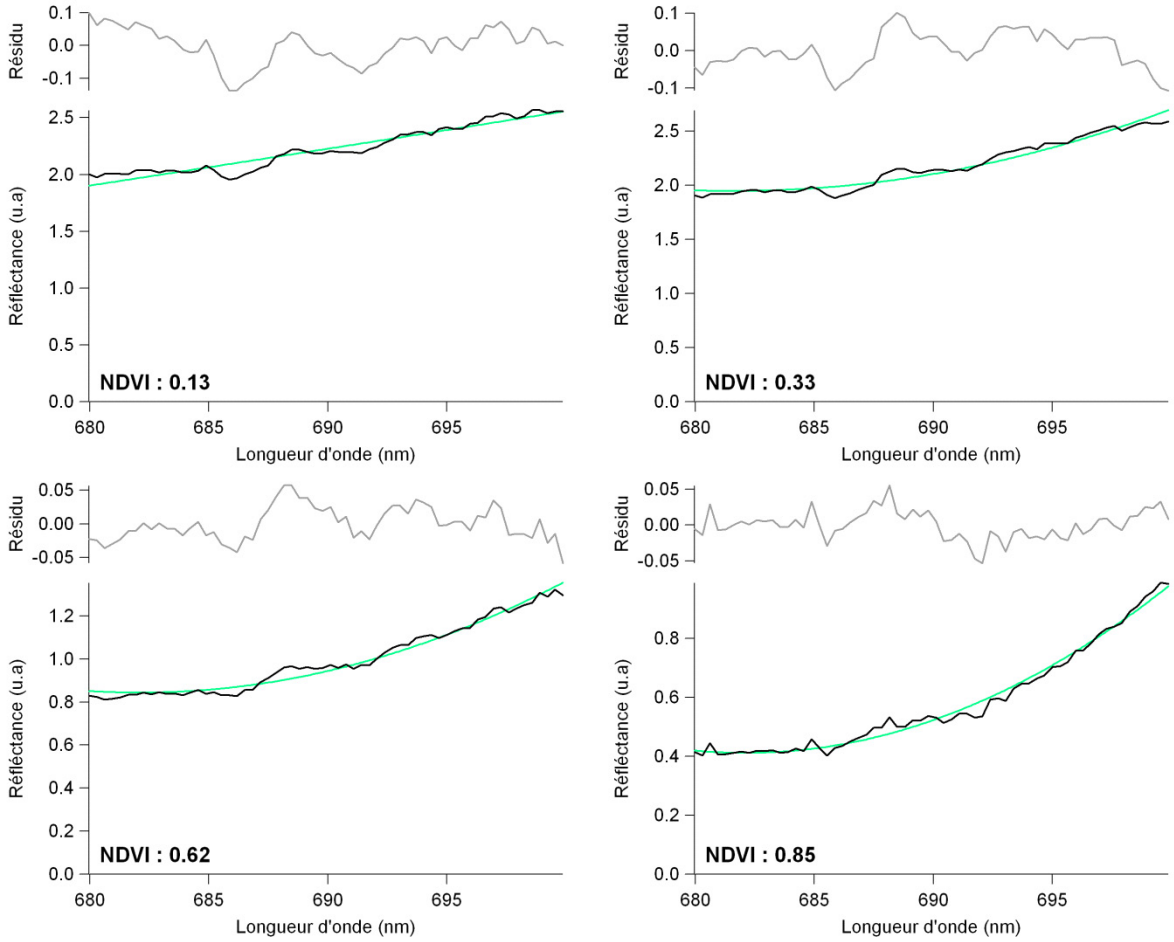


Figure IV.16 *Illustration de la capacité du modèle de réflectance choisi pour les mesures AirFLEX dans la bande O_2-B à rendre compte des différentes réflectances rencontrées durant le vol. Le NDVI varie pour ces quatre mesures entre 0.13 et 0.85. Comparaison entre réflectance apparente de la végétation mesurée depuis l'avion (unité arbitraire) et le fit de cette réflectance par notre modèle.*

L'expression de la fluorescence avec ce modèle de réflectance est la suivante :

$$f = \frac{N}{D} \tag{IV.21}$$

Avec :

$$\begin{aligned} N = -L_2 \Big(1 + NDVI e^{C_{NDVI}(NDVI+offset_{NDVI})}\big(c_2 + c_3(\lambda_1+\lambda_3)\big)\Big)\big(mL_1^r(\lambda_2-\lambda_3) \\ + L_3^r(\lambda_1-\lambda_2)\big) \\ + L_2^r\Big(L_3(\lambda_1-\lambda_2)\big(1 \\ + NDVI e^{C_{NDVI}(NDVI+offset_{NDVI})}\big(c_2 + c_3(\lambda_1+\lambda_2)\big)\Big) \\ + mL_1(\lambda_2-\lambda_3)\big(1 \\ + NDVI e^{C_{NDVI}(NDVI+offset_{NDVI})}\big(c_2 + c_3(\lambda_2+\lambda_3)\big)\big)\Big) \end{aligned} \tag{IV.22}$$

Et

$$
\begin{aligned}
D = m(\lambda_2 - \lambda_3)\Big(&-L_1^r + K_1 L_2^r \\
&+ NDVI e^{C_{NDVI}(NDVI + offset_{NDVI})}\Big(-L_1^r\big(c_2 + c_3(\lambda_1 + \lambda_3)\big) \\
&+ K_1 L_2^r\big(c_2 + c_3(\lambda_2 + \lambda_3)\big)\Big)\Big) \\
&+ (\lambda_1 - \lambda_2)\Big(-L_3^r + K_2 L_2^r \\
&- NDVI e^{C_{NDVI}(NDVI + offset_{NDVI})}\Big(L_3^r\big(c_2 + c_3(\lambda_1 + \lambda_3)\big) \\
&- K_2 L_2^r\big(c_2 + c_3(\lambda_1 + \lambda_2)\big)\Big)\Big)
\end{aligned}
\qquad \textit{(IV.23)}
$$

Au final l'utilisation de ces algorithmes pour le calcul de fluorescence à la place du calcul FLP standard introduit par Plascyk (deux canaux, réflectance et fluorescence constante, voir section 2.1.1 du CHAPITRE II) entraîne une estimation de la fluorescence plus faible de l'ordre de 10-20 % dans la bande O_2-A et de l'ordre de 50-60 % dans la bande O_2-B. La réduction est moins importante dans la bande O_2-A puisque dans cette bande l'approximation de réflectance constante est plus proche de la réalité (réflectance linéaire) que dans le cas de la bande O_2-B où la réflectance réelle de la végétation est plutôt parabolique.

4.6 Campagne CEFLES2 – Résultats

L'un des objectifs de la campagne CEFLES2 était de corréler les mesures de fluorescence aux mesures de CO_2. Cependant, l'interprétation des données de CO_2 et surtout leur mise en relation avec les données de fluorescence ne sont pas faciles à mettre en œuvre. Les données de CO_2 ne sont pas directement représentatives de la zone de mesures d'AirFLEX. En effet, comme le montre la *Figure IV.17* , les mesures de CO_2 sont représentatives d'une zone bien plus large, dépendant entre autres, de la direction et de l'intensité du vent. L'analyse et la mise en relation du CO_2 et de la fluorescence est complexe et est toujours en cours actuellement. Nous ne présenterons donc pas de données de CO_2 dans ces résultats. Nous présenterons uniquement les résultats obtenus à partir des mesures d'AirFLEX.

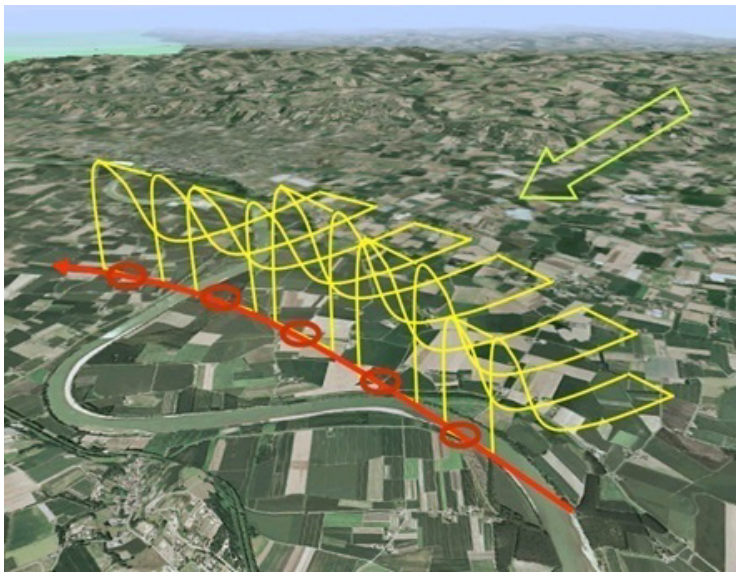


Figure IV.17 *Illustration des zones de mesures pour AirFLEX (en rouge) et pour les mesures de CO2 (en jaune) depuis un avion. La mesure de CO2 est représentative de la zone sous la courbe jaune, la forme de la courbe donnant la pondération en fonction de la distance par rapport à la trace au sol. Cette zone dépend de la direction du vent et la pondération de son intensité.*

Les données obtenues durant la campagne CEFLES2 sont la somme des données récoltées pendant les 13 vols. Nous nous intéresserons tout d'abord aux données issues d'un seul vol. Pour cela, comme précédemment, nous utiliserons les données issues du vol du 15 septembre 2007.

4.6.1 Profondeur, fluorescence, reproductibilité

Lors de cette campagne de mesure nous avons pu observer dans les mesures faites par AirFLEX un bruit marqué, principalement corrélé avec le passage d'un champ à un autre. Nous avons attribué ces pics dans les données à un léger désalignement des canaux d'AirFLEX. En effet, chacun des canaux d'AirFLEX est physiquement indépendant et un léger désalignement des canaux a pour conséquence que leurs champs de vue au sol ne sont pas tout à fait identiques. Ce désalignement n'est pas important si la cible est homogène. Cependant lorsque l'on passe d'un champ à l'autre la transition n'est pas vue en même temps par les deux canaux ce qui entraîne un effet de différenciation dont le résultat est un pic dans les mesures. Cela est particulièrement visible lors d'une transition d'un champ à l'autre mais on l'observe également, dans une moindre mesure, dans un même champ lorsqu'il n'est pas homogène. Pour diminuer ces effets nous avons appliqué un lissage à l'ensemble des données de fluorescence. Ce lissage explique les légers déphasages que l'on pourra observer entre les mesures de NDVI et les mesures de fluorescence.

La *Figure IV.18* donne l'évolution des profondeurs des bandes de l'oxygène pour une portion de vol. Elle met également en correspondance le NDVI mesuré et les images issues de la vidéo du vol, permettant d'identifier les champs et les transitions d'un champ à l'autre. Cette portion de vol est représentative de la zone de champs cultivés qui a été choisie pour les mesures au sol. On voit sur cette figure une très bonne anticorrélation entre NDVI et profondeurs. Lorsque le NDVI est bas (peu de végétation), la profondeur augmente. Elle est maximum pour le NDVI le plus faible. Lorsque le NDVI augmente on observe la modification de la profondeur par la fluorescence : elle diminue. En passant du champ nu au champ de haricots, on observe une diminution de profondeur de l'ordre de 3.5 % dans la bande O_2-A et de l'ordre de 9 % dans la bande O_2-B. Comme nous l'avons déjà observé, malgré la plus grande profondeur de la bande O_2-A, la variation de profondeur est plus importante dans la bande

O_2-B puisqu'on cumule l'effet de comblement de la bande d'absorption par la fluorescence et de la variation de réflectance entre le canal du bord et le canal du fond. Cela illustre une fois de plus la nécessité de tenir compte de cette variation de réflectance autour de la bande O_2-B pour retrouver la fluorescence. On remarque également que si la profondeur dans la bande O_2-A reste la même en passant du champ de maïs au champ de haricots, ce n'est pas le cas pour la profondeur dans la bande O_2-B. Cela peut traduire soit un niveau de fluorescence différent entre les deux champs soit une variation de réflectance dans la zone de la bande O_2-B. Les valeurs de fluorescence sont données dans la *Figure IV.19*.

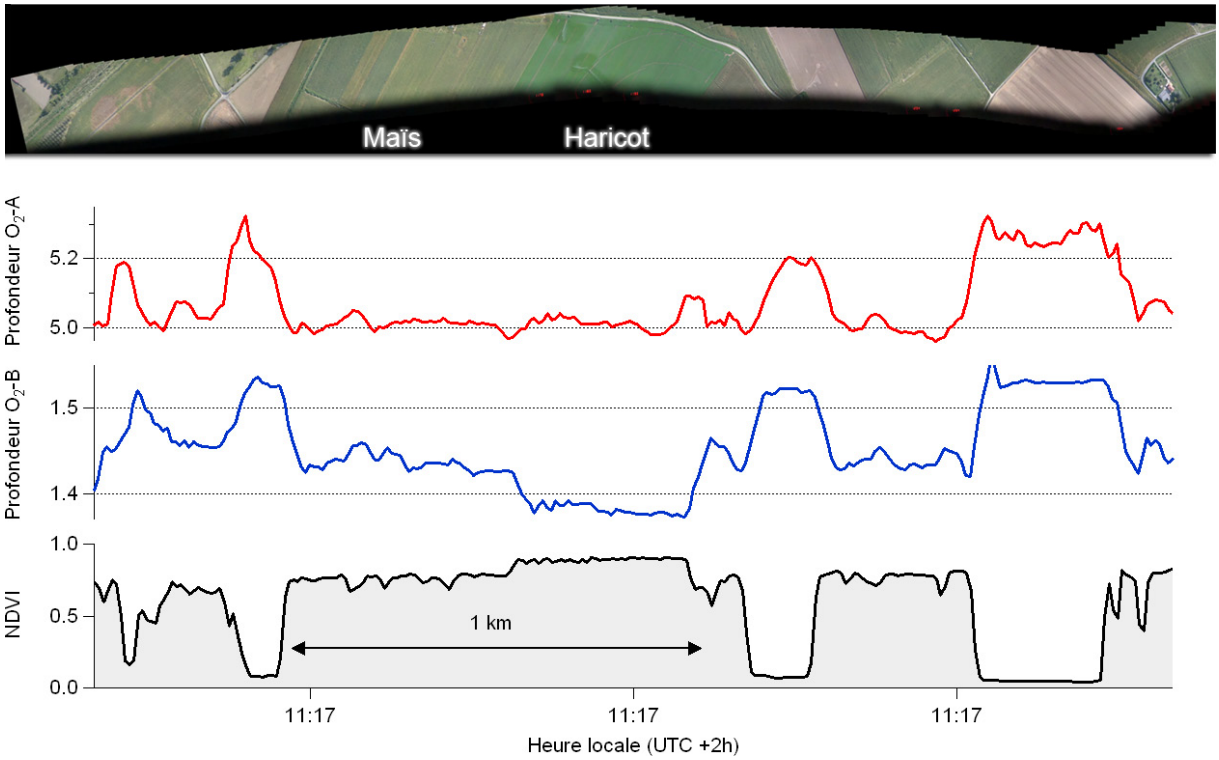


Figure IV.18 *Evolution des profondeurs mesurées par AirFLEX et du NDVI sur une portion de vol, passage de champs nu à des champs cultivés. Vol du 15 septembre 2007.*

La *Figure IV.19* présente les données de fluorescence et du NDVI pour deux survols de la même zone. Elle illustre l'excellente reproductibilité des mesures et est représentative de ce que l'on observe sur l'ensemble du vol. Les valeurs de fluorescence pour les champs cultivés sont comprises entre 0.25 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ et 1 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$. Cette fois la corrélation avec le NDVI n'est plus la même entre les deux bandes d'absorption. La fluorescence dans la bande O_2-A semble bien corrélée mais l'analyse est plus compliquée dans la bande O_2-B. Le champ de haricots à un NDVI légèrement plus élevé que le champ de maïs (0.9 pour le champ de haricot, 0.78 Pour le champ de maïs) et sa fluorescence dans la bande O_2-A est plus élevée. Par contre sa fluorescence dans la bande O_2-B est plus faible. Les deux fluorescences ne semblent pas porter la même information. Nous allons nous pencher plus en avant sur ces comportements des deux fluorescences dans la section suivante en analysant une autre portion de vol.

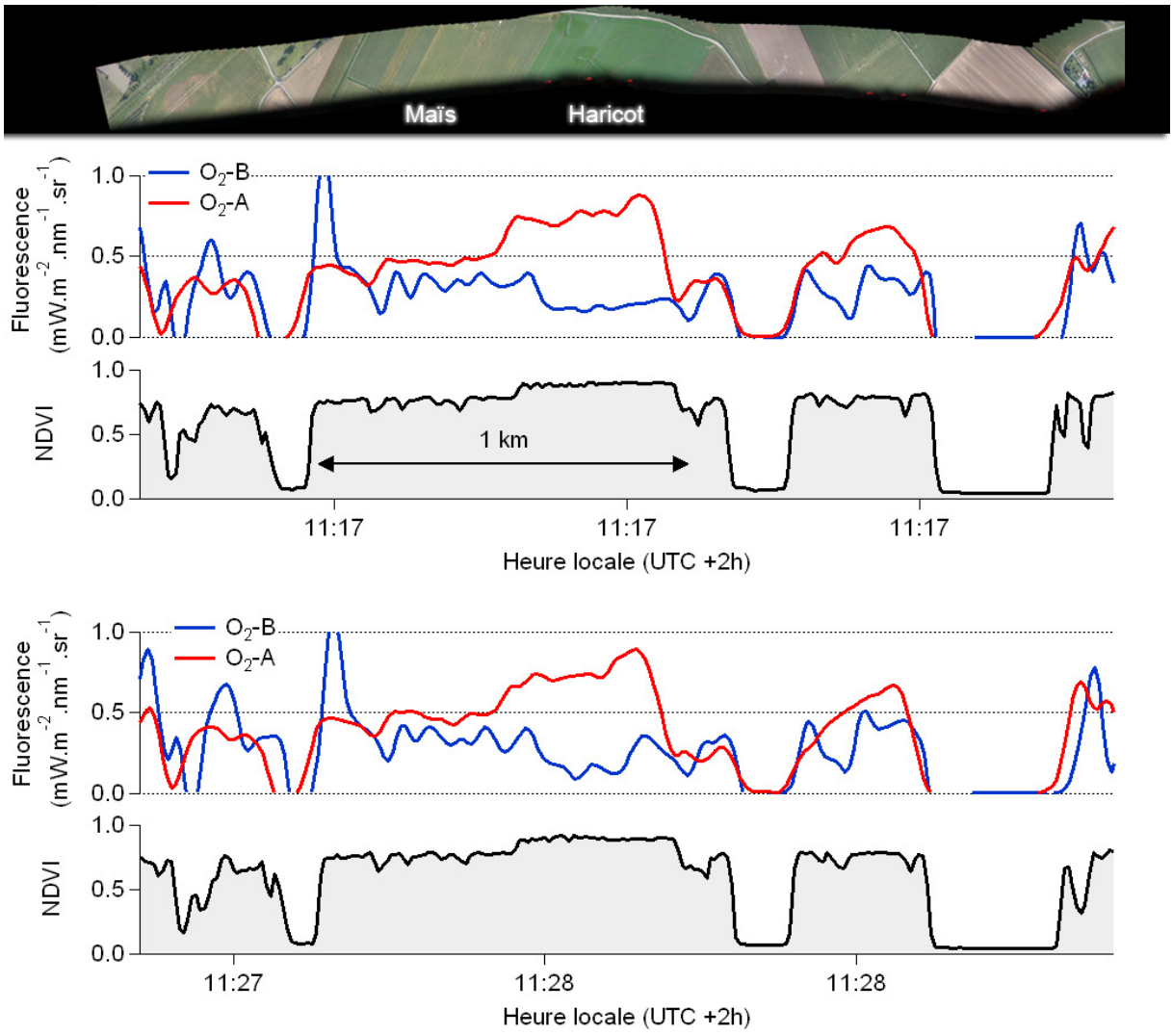


Figure IV.19 *Evolution des flux de fluorescence dans les deux bandes de l'oxygène et du NDVI pour deux survols de la même zone. On note l'excellente reproductibilité des mesures. Vol du 15 septembre 2007.*

4.6.2 Analyse d'une portion de vol, de la mesure au sol à la mesure avionnée

La *Figure IV.20* présente une autre portion du vol du 15 septembre 2007. Sur cette portion de vol, plus courte que les précédentes, nous survolons trois champs : deux champs de maïs et un champ de haricots. Les images permettent de se faire une idée de la différence visible entre les différents champs : le champ de haricot semble plus homogène que les champs de maïs qui semblent « striés ». Ces stries proviennent de leur mode de culture en rang. Le champ de haricots est lui aussi disposé en rang mais le haricot étant une culture planophile, il à tendance à occuper l'espace horizontalement, réduisant l'impression visuelle des rangs. Le maïs est lui une culture plutôt érectophile et se développe principalement verticalement.

Le premier champ de maïs a un NDVI moyen de 0.62 alors que le second a un NDVI de 0.74. Le champ de haricots quant à lui a un NDVI de 0.9. Les images montrent d'ailleurs que le premier champ de maïs est en début de sénescence, ce qui explique la faible valeur du NDVI. Les valeurs de fluorescence de ce premier champ sont, en moyenne, plus basses que celle des autres champs. Lors du passage au champ de haricot on voit une forte augmentation de la fluorescence dans la bande O_2-A et une baisse de la fluorescence dans la bande O_2-B. Lors du passage au deuxième champ de maïs, la

fluorescence dans la bande O_2-A reste stable tandis que la fluorescence dans la bande O_2-B augmente et atteint les 1 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$, contre 0.4 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ sur le champ de haricots. Ces fortes variations de fluorescence ne se reflètent pas sur les variations de NDVI. Ceci suggère que la mesure des deux fluorescences contient une information additionnelle par rapport au NDVI. Le rapport des fluorescences, Fs687/Fs760, change significativement d'une culture à l'autre.

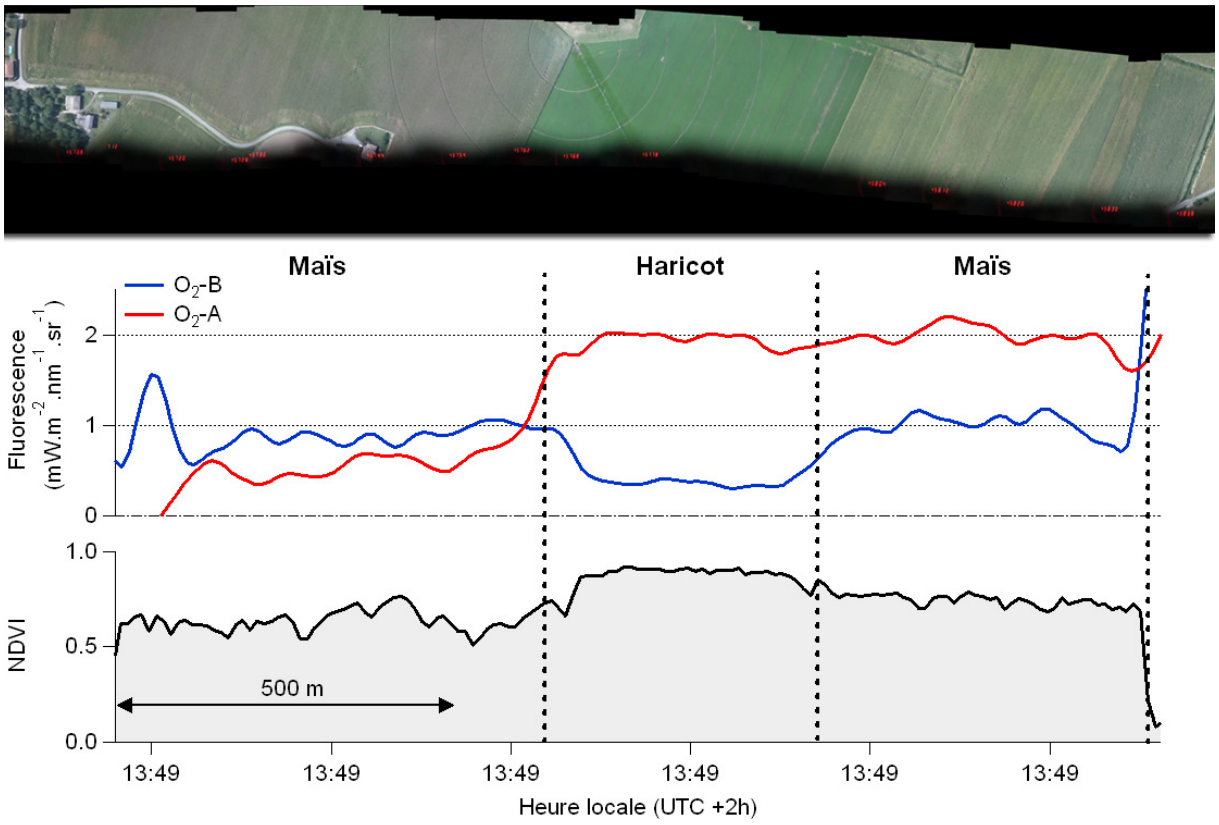


Figure IV.20 *Fluorescence, NDVI et image issues de la vidéo enregistrée pendant le vol pour trois champs cultivés : deux champs de maïs et un champ de haricots. Vol du 15 septembre 2007.*

La mesure de la fluorescence dans les deux bandes de l'oxygène permet de calculer le rapport de fluorescence. Ce rapport est connu pour être un bon estimateur du contenu en chlorophylle au niveau de la feuille (Lichtenthaler et al., 1986, Gitelson et al., 1998). La réabsorption de la fluorescence à 687 nm par la chlorophylle induit une diminution du rapport Fs687/Fs760 lorsque le contenu en chlorophylle augmente. De fait, pour un même éclairement, la forme du spectre de fluorescence dans la zone spectrale de la bande O_2-B va dépendre de la quantité de chlorophylle et de l'organisation de la chlorophylle au sein de la feuille. La *Figure IV.21* donne le spectre d'émission de fluorescence de la feuille pour trois espèces. Ces spectres ont été acquis durant la campagne CEFLES2 grâce à l'instrument LSF (voir CHAPITRE V). Les spectres choisis ont été acquis dans les mêmes conditions lumineuses et les feuilles utilisées ont des contenus en chlorophylle similaires. Les spectres ont été normalisés par leur valeur à 740 nm et sont représentatifs de ce qui a été observé sur l'ensemble des mesures faites durant la campagne. On voit sur cette figure que la forme de l'émission de fluorescence dans le proche infrarouge ne varie pas d'une espèce à l'autre. Par contre, on voit que la forme du spectre dans le rouge varie significativement entre le maïs et le haricot alors que maïs et blé ont un spectre beaucoup plus proche. Cette différence de spectre traduit probablement une différence d'organisation de la structure de la feuille. On notera que maïs et blé sont des monocotylédones alors que le haricot est une dicotylédone.

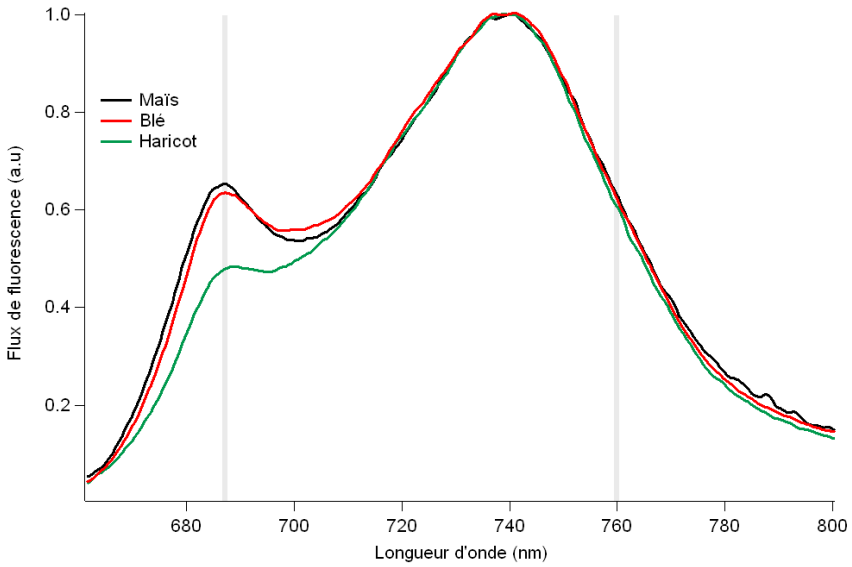


Figure IV.21 *Spectre d'émission de fluorescence pour trois types de végétation : une feuille de maïs ([Chl]=48.4 µg.cm^{-2}), une feuille de haricot ([Chl]=42.2 µg.cm^{-2}) et une feuille de blé ([Chl]=41.9 µg.cm^{-2}).Les spectres ont été normalisés à 740 nm. Face adaxiale des feuilles. Mesures faites après adaptation à la lumière au moyen de l'instrument LSF (voir CHAPITRE V) pour un PAR d'environ 1700 µmol.m^{-2}.s^{-1}.*

On peut maintenant se demander si la différence du spectre d'émission de fluorescence suffit à expliquer la différence entre le rapport de fluorescence sur le champ de maïs et sur le champ de haricot. Les spectres présentés dans la *Figure IV.21* ont justement été acquis au moment où ces champs étaient survolés par AirFLEX. On peut donc comparer les valeurs des rapports de fluorescence au niveau de la feuille et au niveau du couvert et regarder si la variation que l'on trouve au niveau de la feuille est la même que celle observée au niveau du couvert. Les valeurs des rapports de fluorescence sont données dans la *Figure IV.22.* Le champ de maïs étudié est le second dans la ligne de vol (NDVI ~ 0.74). La *Figure IV.22* permet d'observer plusieurs choses : on remarque tout d'abord que le rapport des fluorescences est moins élevé au niveau du couvert qu'au niveau de la feuille pour les deux cultures. On remarque aussi que le rapport au niveau du couvert pour le champ de maïs a diminué entre la mesure faite le matin et la mesure faite au midi solaire.

Pour ce qui concerne la variation du rapport, au niveau de la feuille le rapport des fluorescences du maïs est supérieur d'un facteur 1.34 à celui du haricot. Au niveau du couvert il est supérieur d'un facteur 2.75. La variation est donc plus importante au niveau du couvert et ne peut s'expliquer uniquement par la différence de spectre d'émission de fluorescence entre les deux espèces.

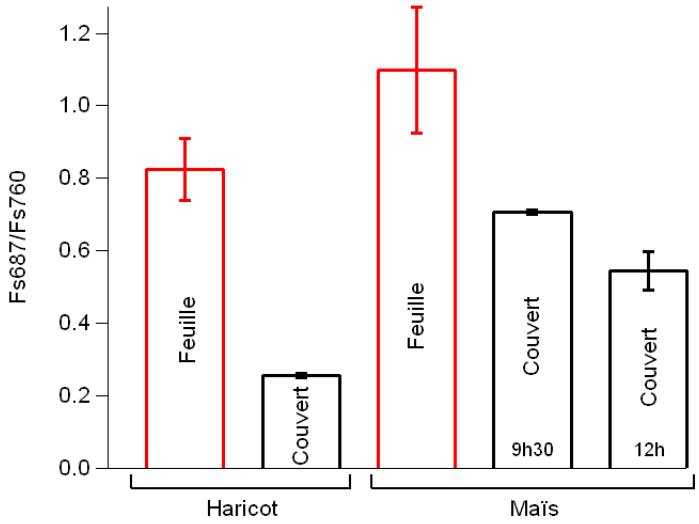


Figure IV.22 *Valeur du rapport Fs687/Fs760 aux deux échelles de mesure : au niveau de la feuille et au niveau du couvert (mesure AirFLEX). Les mesures sont données pour deux types de végétation : un couvert de haricot et un couvert de maïs. Les barres d'erreur (déviation standard) tiennent compte des différentes mesures faites (différentes feuilles pour la mesure au sol et plusieurs survols pour la mesure au niveau du couvert). L'heure donnée pour la mesure sur le maïs par AirFLEX est l'heure solaire (UTC).*

La différence entre feuille et couvert et la différence d'une culture à l'autre peuvent s'expliquer en considérant le transfert radiatif de la fluorescence à l'intérieur du couvert. La fluorescence émise par chaque feuille interagit avec le couvert avant de parvenir au capteur: dans le proche infrarouge elle est principalement transmise et réfléchie alors que, dans le rouge (bande O_2-B), elle est principalement absorbée. Cela explique donc que le rapport des fluorescences au niveau du couvert soit plus faible qu'au niveau de la feuille : la fluorescence émise dans le rouge est réabsorbée au cours du transfert radiatif dans le couvert avant d'atteindre le capteur. Cette réabsorption au sein du couvert va dépendre principalement de trois facteurs : la structure du couvert, sa densité et la concentration en chlorophylle.

Les couverts de haricot et de maïs sont particulièrement différents comme l'illustre la *Figure IV.23*. Le couvert de haricot est planophile alors que le couvert de maïs a une structure plus marquée et érectophile. D'autre part, le champ de haricot est bien plus dense que le champ de maïs. Dans les faits on observe une diminution d'un facteur 3.2 lors du passage de la feuille au couvert pour le haricot et d'un facteur 1.5-2 dans le cas du maïs.

Figure IV.23 *Photos du champ de maïs (à gauche) et du champ de haricots (à droite) dans lesquelles les mesures au sol étaient faites durant la campagne CEFLES2.*

Les deux survols de la culture de maïs permettent par ailleurs de remarquer que le rapport des fluorescences a varié entre la mesure faite le matin et la mesure faite au midi solaire. Cette variation est probablement un effet de structure : entre le matin et le midi solaire, l'angle solaire n'étant pas le même, l'éclairement du couvert change. Les zones éclairées ne sont pas les mêmes, le couvert n'intercepte donc pas la même lumière et les zones de végétation contribuant à l'émission de fluorescence changent. Le fait que le maïs soit planté en rangs accentue encore la différenciation.

Cette portion de vol et les mesures faites au sol ont permis de mettre en évidence les effets de changement d'échelle lorsque l'on passe à une mesure avionnée. On voit ici que le fait de mesurer la fluorescence dans les deux bandes de l'oxygène donne une information sur la structure du couvert. Pour pouvoir interpréter correctement des données, il faut être capable de quantifier les effets de chacun des paramètres sur les signaux de fluorescence. Nous reviendrons sur les effets dus au couvert dans le CHAPITRE V.

La quantité de données récoltées durant la campagne et la variabilité des types de végétation survolés empêche l'analyse vol par vol des variations de fluorescence au long du vol. Par contre, la campagne s'étant déroulée sur plusieurs mois et sur la même zone, on peut utiliser ces données pour observer l'évolution des signaux d'une période de l'année à l'autre.

4.6.3 Echelle globale

La *Figure IV.24* permet de comparer la distribution des valeurs du NDVI pour les trois mois de mesures. Elle montre l'évolution de la végétation sur la zone de mesure. Le mois d'avril est caractérisé par une distribution assez homogène pour les valeurs de NDVI supérieures à 0.2 et une forte proportion de valeurs en dessous de 0.1 montrant une grande proportion de champs nus dans la zone survolée. En juin et en septembre la part de champs nus diminue fortement tandis que la proportion de valeurs hautes du NDVI est bien plus importante qu'en avril. On remarque également que le pic le plus important du NDVI est proche de 1 en juin alors que ce pic recule en septembre autour d'un NDVI de 0.8. Cette évolution traduit le développement de la végétation jusqu'à un maximum en juin, le recul de la distribution en septembre est le résultat des pratiques culturales (moissonnage) et probablement du début de la sénescence de la végétation.

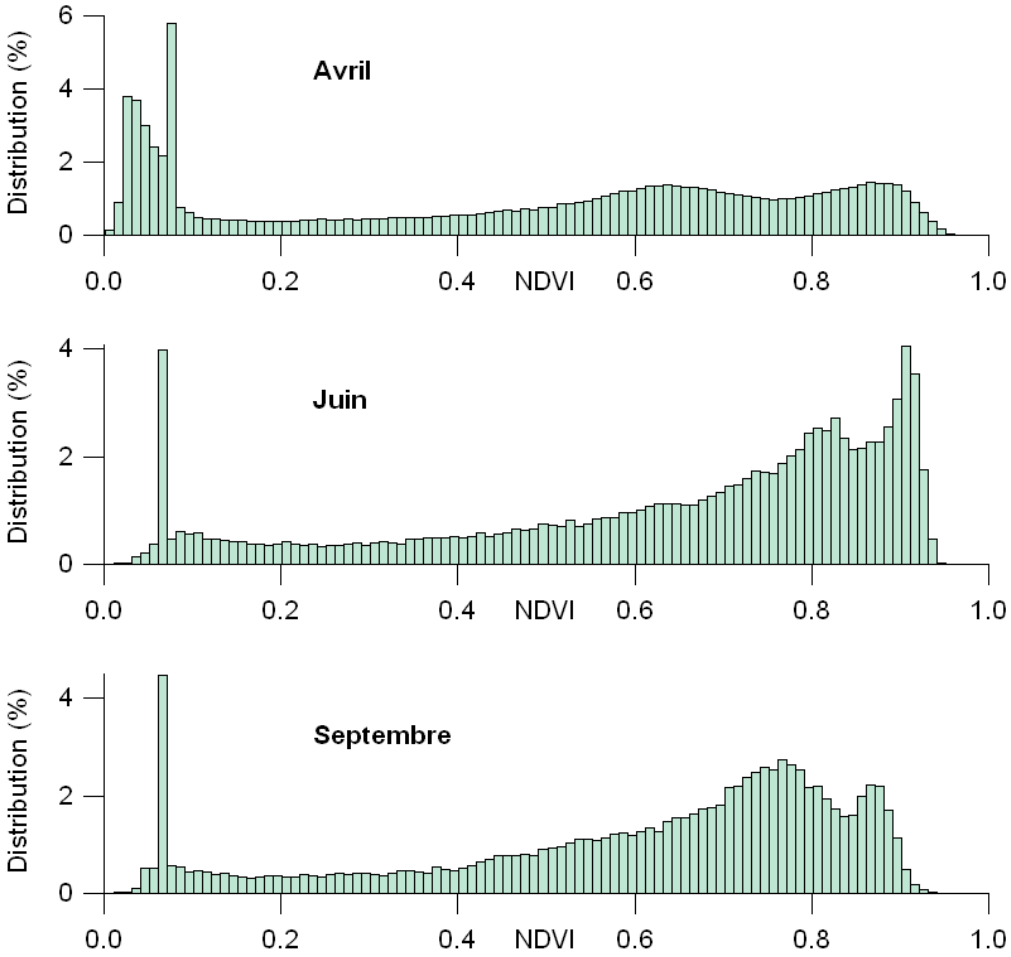


Figure IV.24 *Evolution de la distribution du NDVI au cours des trois mois de mesure. Les distributions sont déduites de l'ensemble des mesures faites durant les vols.*

Nous pouvons également étudier la distribution des valeurs de fluorescence sur la zone survolée. Cependant, la fluorescence dépendant de l'éclairement, il n'est pas facile de comparer les données acquises à des moments différents, avec des éclairements différents. Généralement on utilise plutôt le rendement de fluorescence mais ce rendement n'est pas accessible depuis les mesures faites par AirFLEX. Pour approcher le rendement de fluorescence, il a été proposé de diviser le flux de fluorescence par la radiance mesurée au bord de la bande d'absorption O_2-B sur la végétation (685 nm). Cette longueur d'onde est bien absorbée par la végétation, ainsi elle peut être vue comme un indicateur de l'énergie excitant la fluorescence. Puisqu'elle est bien absorbée, elle devrait permettre de tenir compte à la fois de l'interception de la lumière par le couvert et de l'intensité de l'éclairement (Moya et al., 1999, Moya et al., 2003, Louis et al., 2005). Dans la suite nous utiliserons donc ce que l'on appellera les fractions de fluorescence (FF : Fluorescence Fraction). Elles s'obtiennent en divisant le flux de fluorescence par la radiance de la végétation à 685 nm. On écrit :

$$FF687 = \frac{Fs687}{L(685)} \qquad (IV.24)$$

Et

$$FF760 = \frac{Fs760}{L(685)} \qquad (IV.25)$$

Les fractions de fluorescence sont appelées ainsi car elles représentent la quantité de fluorescence dans les bande O_2-A ou O_2-B par rapport au flux lumineux réfléchi par la végétation à 685 nm. Cet indice de fluorescence sera discuté plus en détail dans le chapitre suivant.

La *Figure IV.25* donne donc l'évolution des fractions de fluorescence pour les trois mois de mesures dans les deux bandes de l'oxygène.

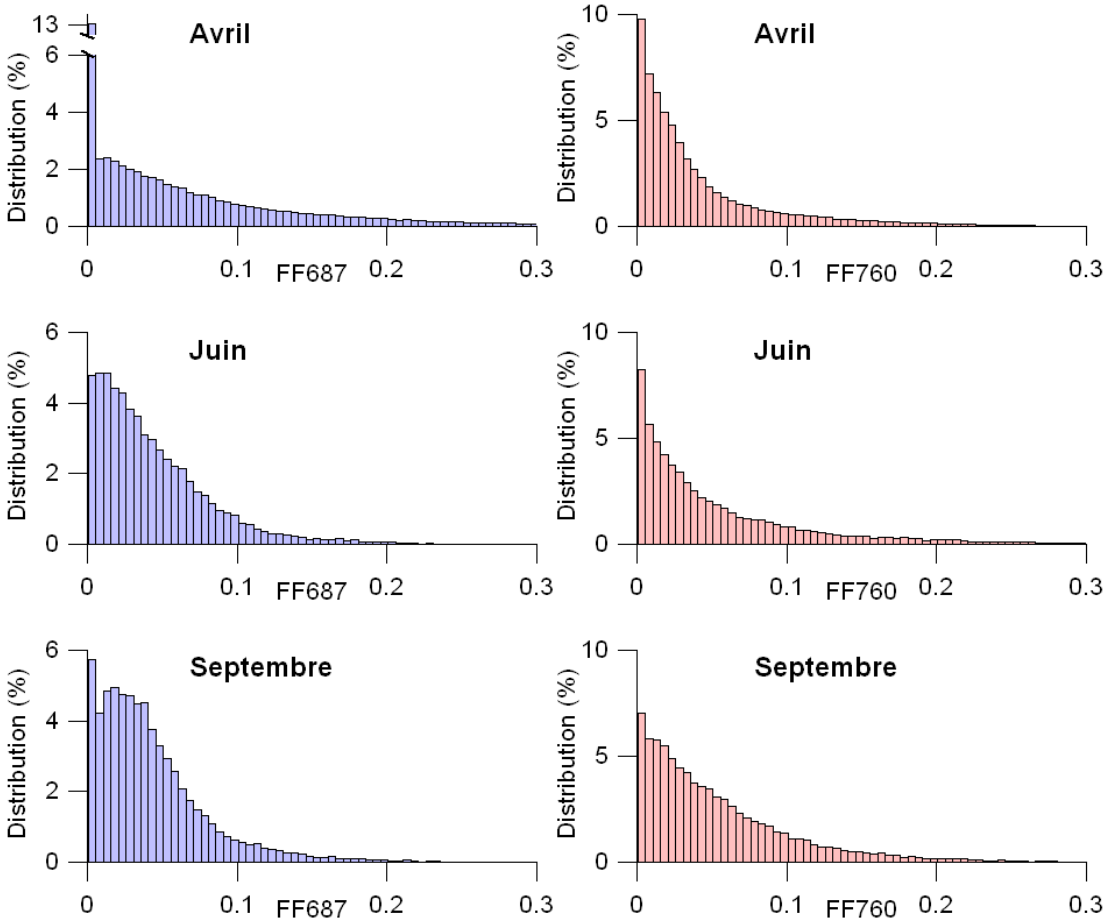


Figure IV.25 *Evolution de la distribution des fractions de fluorescence dans les deux bandes de l'oxygène pour les trois mois de mesures.*

En avril, la distribution de FF687 indique une forte proportion de sol nu. La distribution des valeurs diminue très lentement pour les valeurs plus grandes de FF687. En juin et septembre la proportion de faibles valeurs (inférieure à 0.1) augmente fortement, alors que l'on n'observe quasiment plus de valeurs de FF687 au delà de 0.2. On peut interpréter cette évolution comme traduisant l'augmentation de la couverture de la végétation, diminuant ainsi la valeur de la fluorescence mesurée dans la bande O_2-B par absorption au sein du couvert. On remarquera également que la fraction de fluorescence moyenne augmente légèrement pour le de mois de septembre par rapport au mois de juin. Pour ce qui concerne l'évolution de la fraction de fluorescence FF760, on note que la variation avec le temps est plus continue : la distribution s'élargit avec le temps. La fluorescence à 760 nm semble donc pouvoir traduire le développement de la végétation. La fluorescence à 760 nm sort plus facilement du couvert

puisqu'elle est faiblement absorbée : on s'attend à ce que son évolution soit alors davantage corrélée à la quantité de biomasse. Nous reviendrons sur ces considérations dans le CHAPITRE V.

La *Figure IV.26* montre l'évolution des rapports de fluorescence pour les trois mois de mesure. Cette figure illustre encore une fois l'évolution de la couverture végétale. Pour le mois d'avril, la distribution des rapports de fluorescence est très homogène, les valeurs sont bien réparties entre les faibles valeurs et jusqu'à un rapport de 4. Les fortes valeurs autour de 1 soulignent la présence des champs nus. En juin, nous sommes proches du développement maximum de la végétation comme en témoigne la distribution du NDVI. La distribution des rapports de fluorescence s'est fortement resserrée autour des faibles valeurs. Cela traduit le développement du couvert et l'augmentation de sa densité qui a tendance à empêcher la fluorescence à 687 nm de ressortir. Pour le mois de septembre cette distribution se décale légèrement vers des valeurs supérieures, comportement qui peut s'expliquer par le début de sénescence de la végétation, ou la disparition des champs très développés en juin au profit de champs nus par exemple après la moisson des champs de blé.

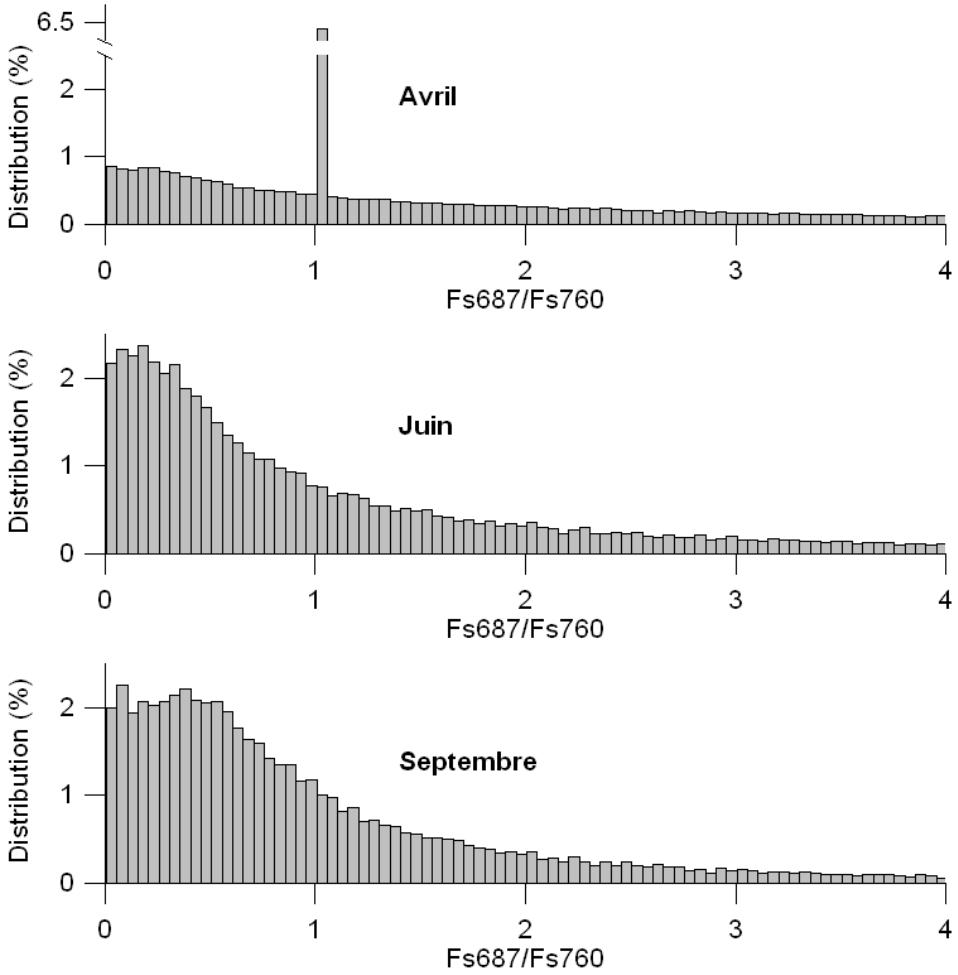


Figure IV.26 *Evolution de la distribution des rapports de fluorescence pour les trois mois de mesures.*

4.6.4 Classification des espèces, extraction des données

Nous avons vu ce que les données obtenues durant la campagne pouvaient nous indiquer sur l'évolution de la végétation à l'échelle globale. Cette manière d'utiliser les données renseigne sur l'état moyen de la végétation mais ne permet pas d'étudier précisément le signal de fluorescence. Nous avons vu également en analysant des portions de vol, que l'interprétation des signaux de fluorescence dépendait de nombreux paramètres : le type de végétation, la structure de végétation et l'état physiologique de la végétation. La quantité de données peut nous permettre d'étudier la variabilité des signaux pour différents types de végétation et la variabilité intrinsèque à un type de végétation. Nous avons donc décidé de classer les données en fonction du type de végétation survolée. Pour cela nous avons choisi de repérer un certain nombre de champs intéressants (c'est-à-dire des champs dont nous pouvons déterminer facilement le type et qui sont survolés plusieurs fois sur les différentes campagnes de mesures).

La procédure d'identification des champs est simple. Les champs intéressants sont repérés par la visualisation des vidéos de vol (voir *Figure IV.27*). L'image étant synchronisée avec les données, la position de l'avion est connue et est utilisée pour retrouver le champ sous GoogleEarth. Une fois le champ retrouvé, les coordonnées des sommets sont extraites et définissent un polygone qui sera utilisé pour retrouver les mesures faites dans ce champ pour les différents vols. La routine permettant de retrouver les points de mesures correspondant au survol d'un champ donné est décrite dans l'Annexe G.

Figure IV.27 *Illustration de la procédure de classification : un champ est repéré grâce à la vidéo prise depuis l'avion (à gauche). Il est ensuite retrouvé sous GoogleEarth grâce aux données GPS. On retrouve ensuite sous GoogleEarth les coordonnées des sommets qui le définissent.*

La *Table IV.5* donne le nombre de champs identifiés et le nombre de survols de ces champs pour les principales espèces identifiées. Au total nous avons identifié et caractérisé 190 champs. Une fois les points de mesures correspondant au survol des champs connus, chaque portion de vol est vérifiée afin d'éliminer les effets de bords dus au passage d'un champ à l'autre. 850 passages au dessus de champs intéressants ont ainsi été analysés « manuellement ».

Statistiques de classification de la végétation, CEFLES2		
Type de champs	*Nombre de champs*	*Nombre de survol*
Blé	37	99
Maïs	34	301
Haricot	2	23
Vigne	6	16
Pin	58	242
Prairie	4	23
Forêt (feuillue)	13	36

Table IV.5 *Statistiques pour les principales espèces classifiées durant la campagne CEFLES2, sur un total de 190 champs.*

4.6.5 Variations des paramètres de fluorescence par espèce

Les résultats que nous présentons dans cette section ont été obtenus sur les trois espèces principales identifiées : le blé, le maïs et le pin. Par pin, nous entendons un couvert naturel de pin. Les données des trois campagnes ont été cumulées pour avoir le maximum d'informations possible. Le fait de mesurer à trois périodes de l'année a permis d'avoir les mêmes végétations dans des états de développement très différents.

Les trois espèces identifiées ont des structures relativement différentes : le blé est très érectophile, constitué de feuilles fines et généralement très dense, le maïs, un peu moins érectophile, est constitué de larges feuilles ; les champs de maïs sont généralement moins denses que les champs de blé. Les forêts de pin peuvent être plus ou moins clairsemées et la tache au sol vue par AirFLEX sur une portion de forêt est constituée de pins mais aussi de la végétation naturelle présente sous les pins. La *Figure IV.28* donne un aperçu des différentes espèces telles qu'elles sont vues depuis l'avion.

Figure IV.28 *Les trois principales espèces identifiées pendant la campagne vues depuis l'avion. A : Blé, B : Maïs, C : Pin*

Nous avons beaucoup parlé jusqu'ici du rapport de fluorescence et de la manière de l'interpréter. La *Figure IV.29* donne la distribution du NDVI ainsi que la distribution des rapports de fluorescence pour les trois types de végétation. La distribution de NDVI sur les champs de blé est très resserrée

autour d'une valeur de 0.9. En fait, le blé était très développé en avril et les moissons étaient quasiment terminées au mois de septembre si bien que la majorité des mesures ont été faites au même stade de développement. On voit également que la distribution des rapports de fluorescence donne le rapport moyen autour de 0.25, similaire à ce que nous avions trouvé sur un champ de haricots plus haut. Il n'y a quasiment pas de rapport de fluorescence au delà de 0.5.

Pour ce qui concerne le maïs nous avons pu observer les champs à différents stades de développement comme en témoigne la plus grande dispersion de la distribution du NDVI. La majeure partie des données se situe pourtant pour des NDVI compris entre 0.7 et 0.9. La distribution des rapports de fluorescence, elle aussi plus large que celle du blé, indique des valeurs plus importantes que pour le blé. La valeur moyenne se situe autour de 0.5 mais on trouve des valeurs au dessus, et même au delà de 1.

La différence avec le blé peut certainement s'expliquer par la différence de densité entre les cultures de blé et les cultures de maïs. Ces deux cultures sont érectophiles et on s'attend à une faible interaction entre la fluorescence émise par les feuilles et le couvert, donc à un rapport de fluorescence relativement élevé. Mais la densité particulièrement forte des cultures de blé par rapport au maïs peut augmenter significativement les interactions et donc augmenter l'absorption de la fluorescence à 687 nm. Cela explique que l'on ait des valeurs du rapport de fluorescence aussi basses, proches de ce que l'on trouve pour un couvert de haricots. La distribution des rapports de fluorescence traduit à la fois le développement de la culture mais aussi les méthodes de cultures.

En ce qui concerne le pin on voit que la distribution du NDVI est très large. On a des valeurs comprises entre 0.6 et 0.85. Cela témoigne de la grande variabilité des couverts de pin : on aura sur certains « champs » des pins sur un terrain sans végétation et sur d'autres une végétation très dense ou bien une forêt de pins très dense. La distribution des rapports de fluorescence témoigne également de cette variabilité. La distribution est très large : bien que la moyenne se situe autour de 0.6, on trouve des champs avec des rapports de fluorescence allant jusqu'à 2.5.

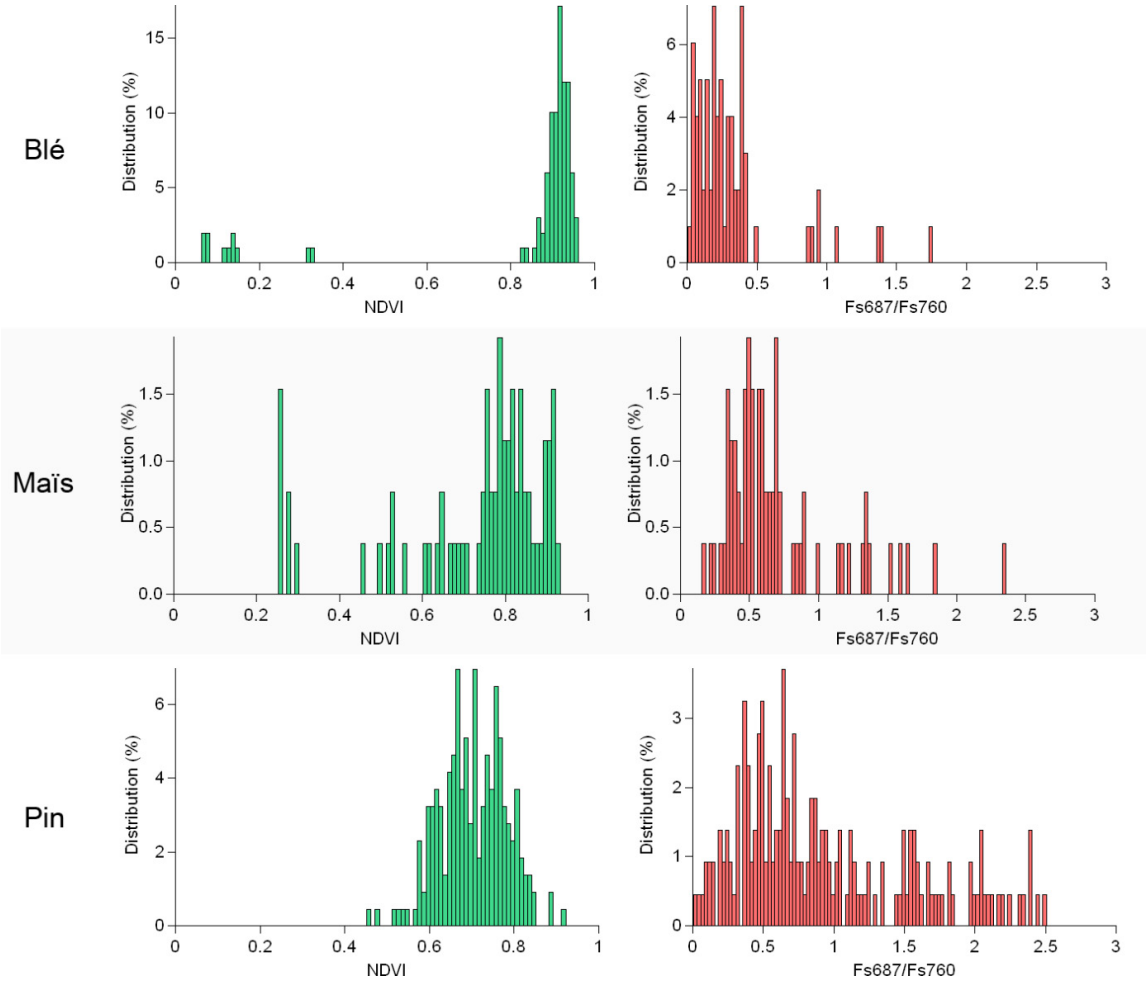


Figure IV.29 *Distribution du NDVI et des rapports de fluorescence Fs687/Fs760 pour les trois espèces principales identifiées pendant la campagne CEFLES2. Les graphiques cumulent les données de tous les vols effectués.*

Malgré le fait que les spectres d'émission au niveau de la feuille soient très similaires entre le maïs et le blé (voir *Figure IV.21*), les rapports des fluorescences au niveau du couvert sont très différents. Ces résultats montrent que le rapport des fluorescences au niveau du couvert est plus probablement lié à la structure de la végétation et à sa densité, plutôt qu'au type de végétation. La variabilité des rapports de fluorescence pour le pin montre également que l'analyse des signaux de fluorescence sur une végétation hétérogène ne sera pas facile.

- **NDVI et fractions de fluorescence**

Le NDVI est un indice largement utilisé pour détecter la présence de végétation. Le NDVI augmente avec l'importance du couvert de la végétation jusqu'à atteindre un point de saturation lorsque le spectre ne varie plus. A cause de cette saturation, des couverts très différents peuvent avoir un même NDVI, par exemple une prairie fournie ou un couvert forestier très dense. On peut donc se demander si la fluorescence serait capable de nous donner des informations supplémentaires sur le couvert, sa structure, la quantité de biomasse. Il semblerait que le rapport des fluorescences puisse donner une indication sur la structure de la végétation. On peut maintenant se poser la question de savoir ce que chacun des signaux de fluorescence pourrait apporter par rapport au NDVI. L'analyse des portions de vols a montré que les variations du NDVI sont très corrélées aux variations de

fluorescence. La *Figure IV.30* donne les relations entre fractions de fluorescences et NDVI pour les trois espèces étudiées.

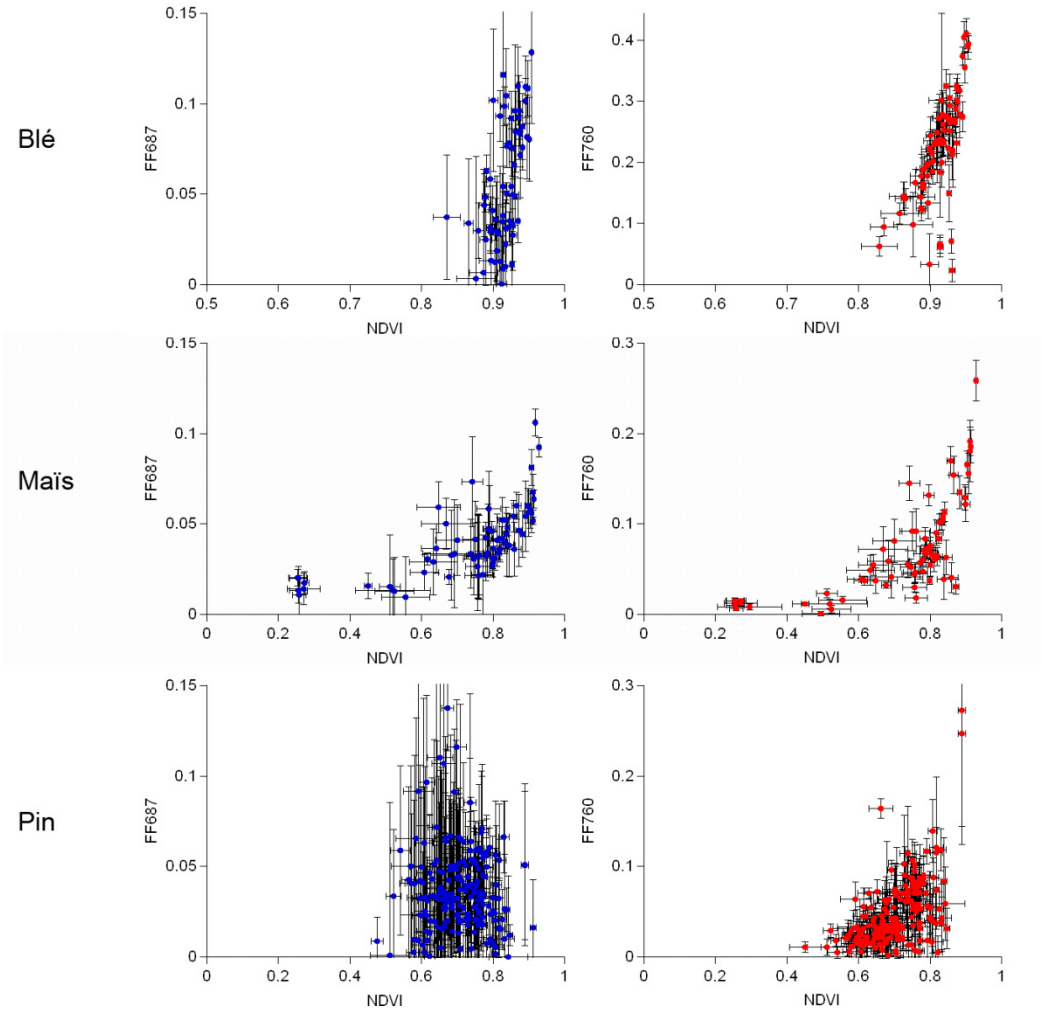


Figure IV.30 *Fraction de fluorescence en fonction du NDVI, pour les principaux types de végétations identifiés durant la campagne CEFLES2 : blé, maïs et pin. Les graphiques cumulent les données de tous les vols effectués.*

On voit sur cette figure que les relations entre NDVI et fractions de fluorescence sont assez similaires dans les deux bandes de l'oxygène. Pour le blé, comme nous l'avons vu précédemment, on a une faible dispersion des valeurs de NDVI mais une grande variabilité sur les signaux de fluorescence. Le NDVI sature mais la fluorescence continue de varier : on a des fractions de fluorescence allant jusqu'à 0.15 dans la bande O_2-B et jusqu'à 0.3 dans la bande O_2-A pour une valeur de NDVI quasi constante de 0.9. Pour le maïs, le fait d'avoir un plus grand échantillonnage des valeurs de NDVI permet de mieux décrire la relation entre le NDVI et les fractions de fluorescence. Là encore, la relation semble saturer pour les hautes valeurs de NDVI. Il semble par ailleurs que FF687 sature plus rapidement que FF760 qui semble avoir une dynamique plus importante si on en juge par la différence de dispersion des deux graphiques. Pour le pin on ne distingue aucune réelle relation entre NDVI et fractions de fluorescences, ce qui traduit probablement la grande hétérogénéité des couverts de pin observés.

Cette étude par espèce laisse penser que les signaux de fluorescence apportent une information supplémentaire par rapport au NDVI : les signaux de fluorescence montrent une dynamique plus

importante que celle du NDVI. Cette dynamique, comme nous le verrons plus en détail dans le chapitre suivant est liée à la quantité de végétation : le NDVI sature rapidement au delà d'une certaine densité de végétation alors que la fluorescence continue à augmenter. Cette dynamique indique qu'il serait possible d'utiliser les signaux de fluorescence pour avoir une estimation de la quantité de végétation, ce que ne peut pas faire le NDVI. Ces points seront abordés dans le chapitre suivant. De plus, en raison des différences de transport de la fluorescence au sein du couvert à 687 nm et 760 nm, le rapport des fluorescences pourrait donner une indication sur la structure du couvert observé ; nous y reviendrons également dans le chapitre suivant.

4.7 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons tout d'abord présenté l'instrument de mesure avionné AirFLEX, instrument basé sur un système de filtres capable de mesurer dans les deux bandes de l'oxygène avec trois canaux par bande. Les premiers vols d'AirFLEX se sont faits pendant la campagne SEN2FLEX.

Nous avons ensuite introduit la seconde campagne de mesure avionnée à laquelle a participé AirFLEX, la campagne CEFLES2. Le système mis en place pour les mesures avionnées a été décrit. Il a permis d'acquérir plusieurs paramètres permettant de décrire la végétation : le NDVI et les fluorescences dans les deux bandes de l'oxygène. Nous avons vu que ces données pouvaient être reliées aux images de la cible survolée grâce à une caméra vidéo embarquée.

La manière de traiter les données de vol pour obtenir la fluorescence a été décrite, le problème de la profondeur de référence a été abordé et il a été choisi de prendre comme profondeur de référence les profondeurs mesurées par AirFLEX au dessus des champs nus.

Un nouveau calcul de fluorescence a été introduit permettant de tenir compte de la nature parabolique de la réflectance de la végétation dans la bande O_2-B en utilisant seulement trois canaux. Les résultats obtenus montrent une diminution de l'ordre de 50% de la fluorescence dans la bande O_2-B par rapport au calcul standard à deux canaux, diminution en accord avec ce que l'on obtient en utilisant quatre canaux.

Cette campagne de mesure a été l'occasion de présenter une implémentation opérationnelle des corrections atmosphériques. Il a été montré que les différentes corrections à appliquer pour tenir compte des différents paramètres de vols peuvent être exprimées simplement en réduisant le nombre de calculs nécessaire au minimum.

Dans la dernière partie, les résultats de la campagne CEFLES2 concernant les mesures avionnées de fluorescence ont été présentés. La variation des profondeurs des bandes de l'oxygène avec le type de cible survolée a été illustrée, de même que la variation des signaux de fluorescence. L'excellente reproductibilité des mesures a été illustrée.

A l'échelle globale, les mesures de NDVI et de fluorescence ont montré des variations traduisant le cycle végétatif et les pratiques agriculturales.

A l'échelle du champ, les mesures ont permis de mettre en avant la grande sensibilité des signaux de fluorescence à la structure de la végétation :

- La comparaison des mesures avionnées avec des mesures au sol faites simultanément ont montré que le rapport des fluorescences est différent au niveau du couvert et au niveau de la feuille. Les deux survols du même champ ont permis de montrer une variation de ce rapport de fluorescences avec l'éclairement.

- Cette variation ne peut s'expliquer uniquement par une différence dans le spectre d'émission de fluorescence. On l'impute donc à un effet de structure : une différence de transport de la fluorescence entre les longueurs d'onde 687 nm (bien absorbée par la végétation) et 760 nm.

- L'étude des rapports de fluorescences en fonction de l'espèce laisse penser que plus que le caractère planophile ou érectophile d'une culture, c'est sa densité qui va influencer le plus ce rapport.

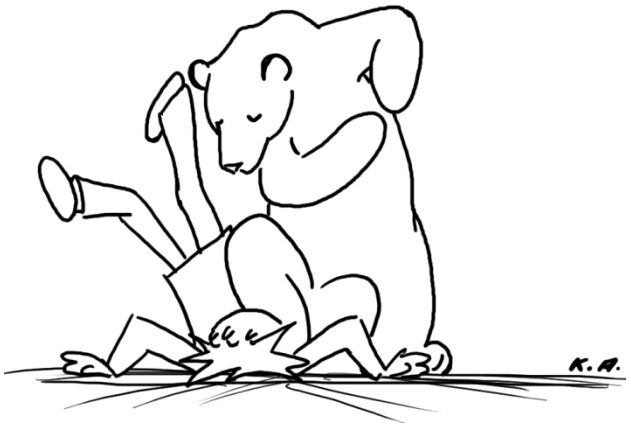
La comparaison de la dynamique des fractions de fluorescences par rapport à celle du NDVI laisse penser que les fractions de fluorescences portent une information plus discriminante que le NDVI sur la quantité de végétation présente dans le pixel observé.

Les mesures avionnées, si elles sont nécessaires pour identifier les problèmes et étudier la faisabilité de la mesure de fluorescence depuis un avion ou un satellite, ne permettent pas l'étude détaillée du signal de fluorescence lui-même. Les mesures de la campagne CEFLES2 ont montré qu'il fait preuve d'une grande variabilité : variabilité temporelle avec le développement de la végétation et variabilité en fonction de l'espèce observée et de son état. Ce signal de fluorescence mesuré au niveau du couvert va dépendre, toutes choses égales par ailleurs, de l'état physiologique de la végétation, de son état de développement, de l'heure de mesure (au travers des effets d'éclairement) et de la direction de visée de la mesure. Il dépendra également du type de végétation présent dans le pixel observé. Pour bien interpréter le signal de fluorescence il est donc nécessaire de quantifier tous ces effets et les mesures avionnées ne permettent pas une étude précise. Il faudrait pour cela pouvoir caractériser chacun des champs survolés en effectuant des mesures au sol, ce qui n'est pas envisageable. De plus le coût des campagnes avionnées ne permet pas d'accumuler les mesures.

Pour toutes ces raisons notre équipe s'est orientée, tout en continuant le développement des techniques avionnées, vers la mesure au niveau du couvert depuis le sol. Ce sera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre V

Mesures au sol



Chapitre V : Mesures au sol

5.1 **Plateforme de mesure G-FLEX, Avignon** ... 231
5.2 **Instruments de mesures passives au sol** ... 233
5.2.1 Instruments ... 233
5.2.2 Le LSF (Leaf Spectro Fluorimeter) ... 234
5.2.3 SpectroFLEX ... 235
5.3 **TriFLEX** ... 241
5.3.1 Instrument ... 242
5.3.2 Calibration ... 245
5.3.3 Fonctionnement général, software ... 246
5.3.4 Algorithme de mesure ... 248
5.3.5 Traitement des données ... 251
5.4 **Campagne de mesure, été 2008** ... 258
5.5 **Sorgho grain : Stress hydrique** ... 258
5.5.1 Le matériel végétal ... 258
5.5.2 Les mesures journalières ... 260
5.5.3 Séries temporelles ... 263
5.5.4 Fluorescence en fonction de l'éclairement ... 265
5.5.5 Discussion ... 265
5.6 **Sorgho fourrager : Croissance** ... 268
5.6.1 Le matériel végétal ... 268
5.6.2 Mesure complémentaires ... 270
5.6.3 Résultats – Au niveau du couvert ... 270
5.6.4 De la feuille au couvert ... 278
5.6.5 Conclusion sur le suivi de la croissance par fluorescence ... 279
5.7 **Quelques réflexions sur le signal** ... 280
5.7.1 Quel indice à partir des mesures passives de fluorescence ? ... 280
5.7.2 Une remarque sur les fractions de fluorescence ... 286
5.7.3 Le problème de la structure de la végétation ... 286
5.8 **Conclusions** ... 292

Mesures au sol

Si les mesures avionnées permettent de faire des mesures à grande échelle et de caractériser un champ ou une région, l'interprétation du signal est encore un sujet d'étude. Comme nous l'avons vu, le signal présente une forte variabilité spatiale et temporelle. Les mesures avionnées permettent de se rendre compte immédiatement de cette variabilité mais n'offrent pas la possibilité d'en étudier les causes de manière précise. L'une d'entre elle est le changement d'échelle : la plupart des mesures au sol ont été faites au niveau de la feuille et, pour analyser les données avionnées qui se font au niveau du couvert, il faut tenir compte du changement dans l'objet de la mesure. A cette première source de variabilité s'ajoute celle induite par les caractéristiques propres des différents champs survolés : les différences d'état physiologique et les différences dues au type de végétation. Afin d'interpréter le signal de fluorescence il nous a semblé nécessaire d'effectuer des mesures au sol, à l'échelle du couvert, de manière à reproduire des conditions de vol tout en ayant un contrôle sur la végétation observée. Ce type de mesure doit permettre de quantifier les effets des différents paramètres sur les signaux de fluorescence. En mesurant simultanément les signaux au niveau de la feuille et au niveau de la canopée on peut également étudier les effets induits par le changement d'échelle.

5.1 Plateforme de mesure G-FLEX, Avignon

La plateforme G-Flex a été développée grâce au financement du PNTS (Programme National de Télédétection Spatiale), en collaboration avec l'équipe « Eau et Paysages Méditerranéens » de l'INRA d'Avignon (Institut National de Recherche en Agronomie) et avec l'aide du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) au travers du programme TOSCA (Terre, Océan, Surface Continentale, Atmosphère). Il s'agit d'une plateforme permettant de reproduire des conditions similaires à un vol : une grue permet de mesurer à 21 m de hauteur et sur différents types de cultures grâce aux déplacements qu'elle autorise. Cette grue appartient à l'INRA d'Avignon (Montfavet, 43°55'3.24''N, 4°52'46.60''E). La *Figure V.1* est une vue aérienne du site.

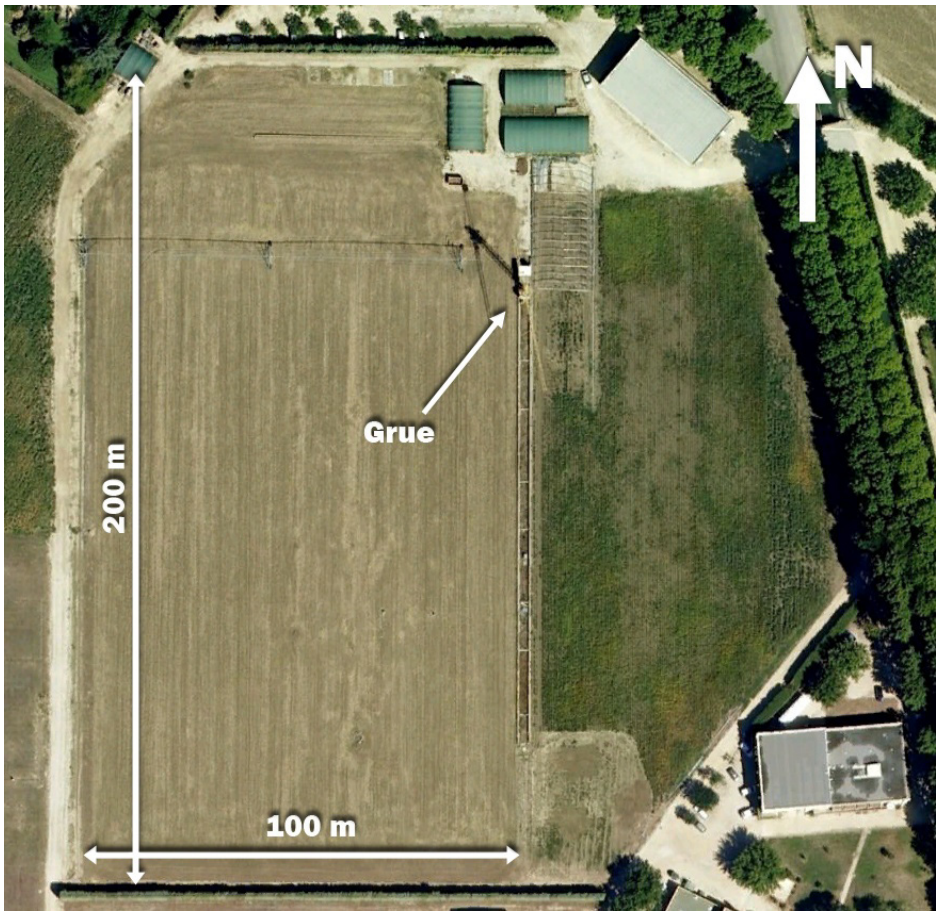


Figure V.1 *Site de l'INRA d'Avignon (43°55'3.24''N, 4°52'46.60''E). On peut y voir les deux parcelles (Est et Ouest) autour du rail sur lequel se déplace la grue. (vue GoogleEarth)*

L'INRA possède plusieurs champs destinés à la recherche (voir *Figure V.1*). La parcelle Ouest fait environ 100 m sur 200 m et la parcelle Est, 150 m sur 60 m. Une équipe technique est en charge de l'entretien des cultures sur ces deux parcelles, du semis à la récolte. Les champs sont traversés par un rail de 100 m de long orienté selon un axe Nord-Sud sur lequel se déplace la grue. La grue a une hauteur de 21 m. La longueur de sa flèche est de 24 m et celle-ci peut pivoter à 360° en environ une minute. La rotation de la grue et son déplacement le long du rail sont commandés par un boîtier au bas de la grue. Il faut noter que les spécifications de la grue limitent son utilisation lorsque le vent est trop important : au delà de 50 km/h la grue ne peut plus être utilisée et doit être placée en drapeau. Au bas de la grue une cabine permet d'abriter du matériel. Un pont radio entre la grue et le bâtiment le plus proche permet d'accéder à internet depuis la grue.

Cette grue a déjà été utilisée pour des études de télédétection micro-ondes (Prévot et al., 1993, Gu et al., 2003, Yu et al., 2004). Depuis 2004, le site de l'INRA à Avignon est intégré au réseau de sites de mesures du programme européen CarboEurope-IP (http://www.carboeurope.org/). Plusieurs paramètres sont suivis en continu. Parmi ceux-ci notons le bilan d'énergie de surface, l'évapotranspiration, les échanges de CO_2 avec l'atmosphère, la croissance de la végétation (en biomasse et en terme de structure), l'état hydrique du sol et les variables météorologiques.

Ce contexte et ces infrastructures en font un site idéal pour les mesures sur la végétation. Les possibilités de déplacement offertes par la grue permettent d'étudier plusieurs cultures simultanément tout en s'assurant que les conditions environnementales sont les mêmes. Le contrôle exercé sur les

cultures permet de choisir quelles cultures étudier et dans quelles conditions physiologiques. Cette plateforme est également idéale pour le développement et le test de nouveaux capteurs destinés à l'observation de la végétation.

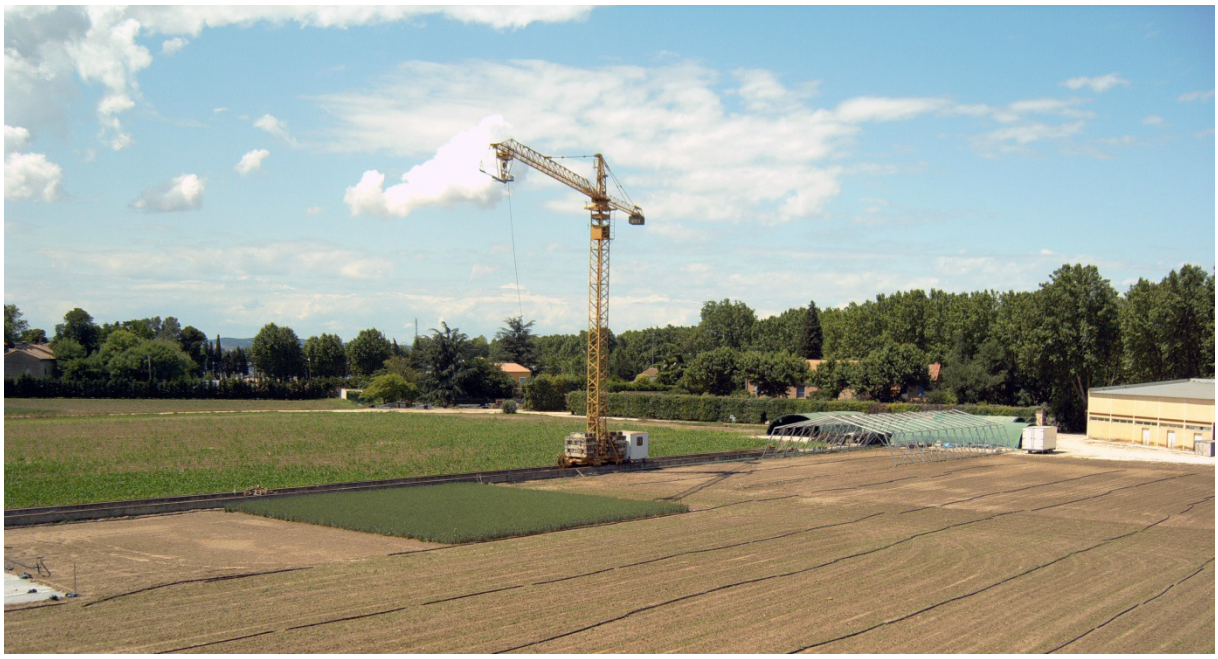


Figure V.2 *Le site de l'INRA. Vue de la grue avec l'instrument TriFLEX (voir sections suivantes). Le faisceau de câbles reliant TriFLEX à la base de la grue permet d'amener le courant et le réseau jusqu'à l'instrument.*

5.2 Instruments de mesures passives au sol

5.2.1 Instruments

Le premier instrument pour la mesure au champ de la fluorescence dans les bandes de l'oxygène était un instrument basé sur des filtres (Latouche, 1995). Par la suite comme nous l'avons écrit dans le CHAPITRE II plusieurs instruments, toujours basés sur des systèmes à filtres, sont proposés et utilisés (Moya et al., 1999, Evain et al., 2001, Evain et al., 2002, Moya et al., 2004) à la fois au niveau de la feuille et au niveau du couvert (Louis, 2004).

Ce n'est qu'avec l'avènement des spectromètres commerciaux portables que les mesures en champ avec spectromètre se sont développées. En 2006 Meroni et Colombo, 2006, ont été les premiers à utiliser un spectromètre pour faire des mesures au niveau de la feuille dans les deux bandes de l'oxygène. Différentes études ont suivi, utilisant des spectromètres à la fois au niveau de la feuille et au niveau du couvert (Corp et al., 2006, Middleton et al., 2006, Meroni et al., 2008a, Meroni et al., 2008b). A l'heure actuelle de nombreuses équipes utilisent ces spectromètres comme capteurs pour la mesure passive de la fluorescence.

Les spectromètres offrent une souplesse d'utilisation que n'offrent pas les systèmes à filtres : il est facile de définir des canaux de mesure et d'en changer les caractéristiques (position, largeur) ou d'en ajouter de nouveau. Le montage optique/électronique nécessaire à la réalisation d'un capteur est réduit au minimum. Leur utilisation est simple : les drivers fournis permettent de les piloter depuis un programme informatique.

Mon arrivée dans l'équipe Fluorescence et Télédétection a coïncidé avec la sortie de ces nouveaux spectromètres commerciaux, portables et peu coûteux. Ainsi notre équipe avait déjà réalisé un instrument basé sur un de ces spectromètres, le LSF (Leaf SpectroFluorimeter) présenté dans la section 5.2.2 et il a été décidé de poursuivre l'exploration des possibilités offertes par ces spectromètres. J'ai donc travaillé à l'élaboration d'instruments de mesure basés sur ces spectromètres avec l'aide de M. Sébastien Champagne, Ingénieur de recherche dans notre équipe, financé par le CNES (CDD) grâce au programme TOSCA (Terre, Océan, Surface Continentale, Atmosphère). Notre objectif a été de réaliser un instrument permettant la mesure de la fluorescence autonome capable de fonctionner en continu sur de longues périodes. Cette collaboration a permis la réalisation de deux instruments : SpectroFLEX et sa version améliorée TriFLEX. Après avoir fait la description du premier instrument développé par l'équipe utilisant l'un de ces spectromètres, nous nous pencherons plus en détails sur les deux autres instruments et sur leur utilisation. Nous décrirons succinctement le fonctionnement de SpectroFLEX dans un premier temps pour introduire la problématique de la mesure, puis nous nous attarderons plus en détail sur le second instrument : TriFLEX.

5.2.2 Le LSF (Leaf Spectro Fluorimeter)

Le LSF (Leaf Spectro Fluorimeter) est un instrument développé par l'équipe permettant d'obtenir une mesure du spectre d'émission de fluorescence d'une feuille dans les conditions de lumière prévalant au champ. Le principe de mesure est simple : la feuille est éclairée par la lumière solaire filtrée de manière à couper les longueurs d'onde correspondant à l'émission de fluorescence. En détection un filtre permet de ne sélectionner que les longueurs d'onde d'émission de fluorescence.

Comme le montre la *Figure V.3*, la feuille est placée dans une chambre, de laquelle partent deux tubes. Lors de la mesure le tube permettant l'éclairement de la feuille est pointé vers le soleil. A l'entrée de ce tube est placé un filtre bleu (Corning 4.96, 5 mm) ne laissant passer que les longueurs d'onde inférieures à 600 nm. Une lentille a été placée derrière le filtre de manière à compenser la perte d'intensité induite par le filtrage des longueurs d'onde comprises entre 600 nm et 700 nm. La détection est constituée d'un filtre rouge (RG665, Schott, France) et d'un spectromètre. L'éclairement ne laissant passer que le bleu et la détection ne voyant que le rouge, le spectre mesuré est le spectre d'émission de fluorescence sans contamination de l'excitation. Le LSF est prévu pour être facilement transportable dans le champ (voir *Figure V.3*). Il est associé à un spectromètre de petite dimension (Ocean Optics) et un ordinateur portable permet d'acquérir les données. L'acquisition est pilotée par un logiciel développé en Visual Basic 6.

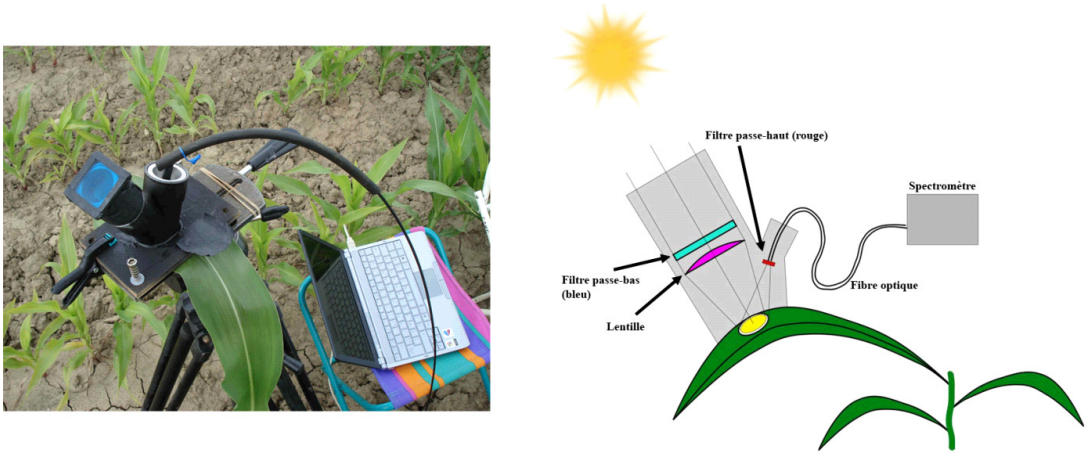


Figure V.3 *Photo et schéma du LSF (Leaf Spectro Fluorimeter). Le LSF permet d'obtenir la fluorescence d'une feuille sous éclairement.*

La mesure se fait après un temps d'adaptation d'environ 15 minutes pour éviter les variations de fluorescence après l'introduction de la feuille dans la chambre de mesure. Du point de vue de la feuille, l'intensité lumineuse est similaire à l'intensité lumineuse naturelle grâce à la lentille qui compense les pertes du filtre bleu. Cependant la distribution spectrale de l'éclairement n'est pas la même qu'en condition naturelle, puisqu'une partie du rayonnement est coupée. Les spectres obtenus de cette manière sont donc légèrement différents du spectre obtenu en lumière naturelle. On pourra corriger cet effet, par exemple lorsqu'on calcule le rapport d'émission de fluorescence Fs687/Fs760. En connaissant les spectres d'excitation de fluorescence à 687 nm et 760 nm (Louis, 2004) et en les convoluant avec un spectre solaire, on peut quantifier la perte de fluorescence induite par la limitation de l'excitation à la zone bleue à 687 nm et à 760 nm. Il suffira ensuite de corriger les rapports de fluorescence Fs687/Fs760 grâce à cette estimation (Moya et Flexas, 2010)

5.2.3 SpectroFLEX

SpectroFLEX est le premier instrument de mesure passive de fluorescence à base de spectromètre développé par l'équipe. Il a été développé en 2007 et utilisé pour la première fois lors de la campagne CEFLES2, en avril 2007 dans les landes, pour des mesures de fluorescence sur de l'herbe. Les composants les plus importants sont un spectromètre Ocean Optics (617 nm - 890 nm, FWHM ~ 0.2 nm, fente d'entrée : 5 µm) et un ordinateur permettant son contrôle. Pour obtenir la fluorescence il faut au minimum deux mesures : une mesure de référence, faite sur une cible non fluorescente donnant la profondeur sans fluorescence et une mesure sur la végétation permettant de mesurer la profondeur de la bande avec la contribution de la fluorescence. SpectroFLEX (voir *Figure V.***4**) effectue donc alternativement des mesures sur la végétation et sur une référence non fluorescente. La mesure de référence se fait en venant placer dans le champ de vue de la fibre un panneau en PVC blanc dépoli dont la réflectance est connue. Ce déplacement est effectué grâce à un électro-aimant rotatif (GDAX035X20E06, Magnet-Schultz) commandé par le port série de l'ordinateur (voir l'insert de la *Figure V.4*).

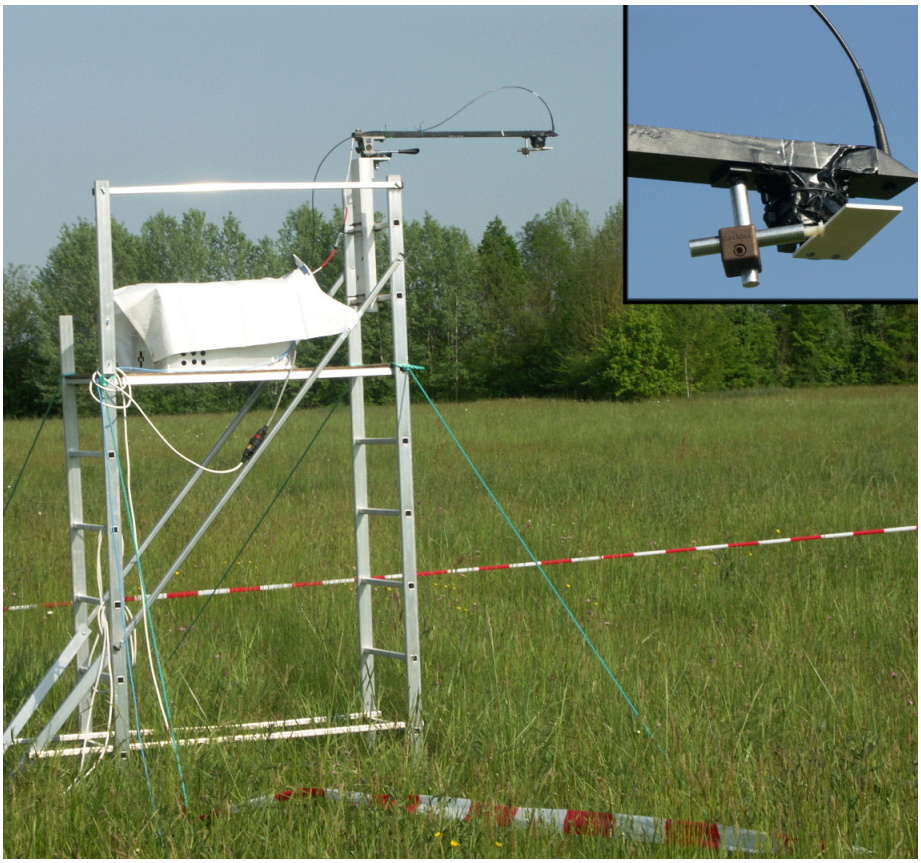


Figure V.4 *L'instrument SpectroFLEX pendant la campagne CEFLES2 en avril 2007. On voit sur ces photos la boîte contenant l'électronique, protégée du rayonnement solaire par une toile blanche, sur un échafaudage. On peut également voir la fibre optique et le bras supportant la référence. L'insert est un zoom sur la tête optique : entrée de fibre et référence (référence hors du champ de vue de la fibre : position de mesure sur la végétation).*

Si les spectromètres offrent une plus grande souplesse quand à la définition des canaux de mesure, ils présentent cependant un inconvénient majeur : la détection se fait avec un seul et même capteur. Or la mesure passive de la fluorescence implique de travailler avec des signaux ayant une forte dynamique spectrale. Cette dynamique a deux origines :

- l'absorption de l'oxygène : les signaux au fond de la bande seront bien plus faibles que les signaux aux bords (et plus la différence sera forte, meilleure sera la mesure. On est donc à la recherche de cette forte dynamique). L'ordre de grandeurs des profondeurs maximales dans la bande O_2-A est de 15-20 en fonction des conditions atmosphériques et de l'instrument.

- le spectre de réflectance de la végétation : il présente une forte variation dans la zone rouge-proche-infrarouge appelée le red-edge. Cette variation a lieu exactement entre les deux bandes d'absorption de l'oxygène qui nous intéressent. L'intensité des signaux mesurés au voisinage de la bande O_2-A (réflectance ~ 0.5) sera donc bien plus importante qu'au voisinage de la bande O_2-B (réflectance ~ 0.04). On aura un facteur de l'ordre de 20 entre ces deux signaux

Pour un système à filtre, utilisant un capteur par canal, cette dynamique n'est pas un problème puisque chaque détecteur peut être adapté indépendamment des autres de manière à optimiser sa capacité de mesure. A l'inverse, un instrument utilisant un seul capteur pour la mesure simultanée dans les deux bandes de l'oxygène devra être capable de travailler avec cette forte dynamique. La *Figure V.5* montre un spectre acquis par SpectroFLEX lors de la campagne CEFLES2 sur de l'herbe.

Ce spectre a été acquis en utilisant toute la dynamique du spectromètre et n'est pas corrigé de la fonction de transfert du spectromètre : c'est le spectre tel que le « voit » la CCD du spectromètre.

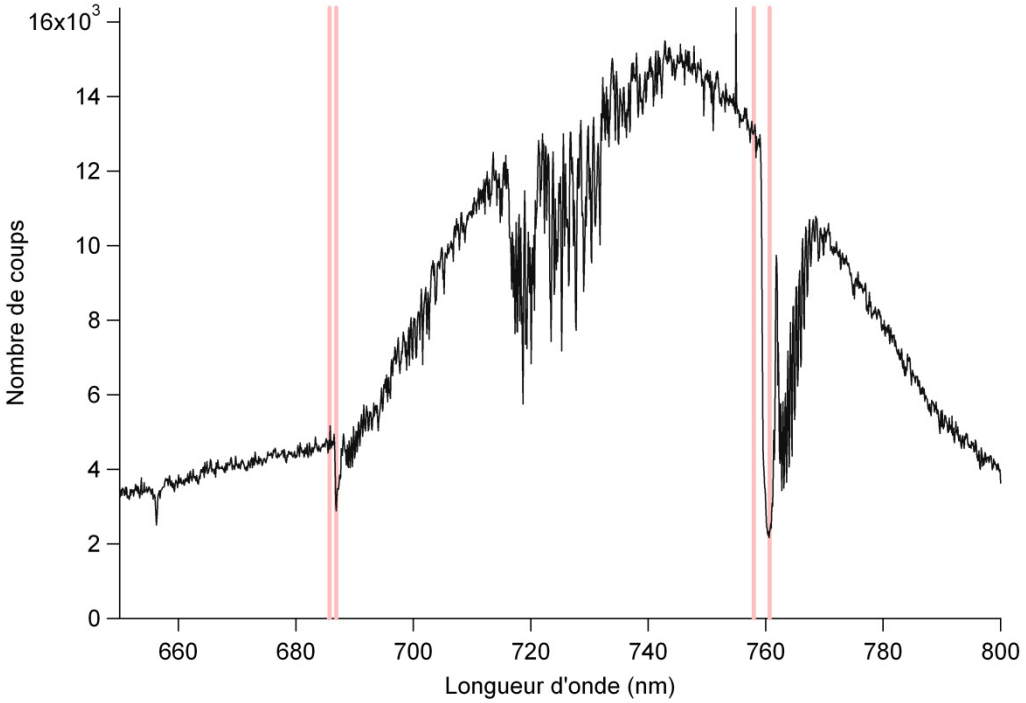


Figure V.5 *Radiance vue par le spectromètre. Acquisition sur de l'herbe à 12 h, heure locale (UTC + 2 h). Cette radiance n'a pas été corrigée de la fonction de transfert du spectromètre. Elle a été acquise en utilisant toute la dynamique offerte par le codeur. Les barres correspondent aux principaux canaux de mesures utilisés par SpectroFLEX.*

Ce spectre montre la dynamique du signal vue par le spectromètre, la dynamique la plus importante est celle induite par la bande d'absorption O_2-A. Sa profondeur, mesurée par SpectroFLEX, varie généralement entre 5 au midi solaire et 17 à 9 h du matin (UTC + 2 h).

Nous avons observé que le bruit le plus important du spectromètre était un bruit indépendant du pixel (indépendant de la longueur d'onde) ne variant pas avec le niveau de radiance mesuré. Le rapport signal sur bruit varie donc linéairement avec l'intensité du flux mesuré. Ainsi, lorsqu'on acquiert un spectre, le rapport signal sur bruit varie spectralement, en fonction de l'intensité du flux mesuré. La *Figure V.6* donne le spectre du SNR obtenu dans le cas présenté à la *Figure V.5*. On peut y voir que le rapport signal sur bruit maximum est situé aux alentours de 300. On y voit également que le rapport signal sur bruit au fond des bandes d'absorption est faible (inférieur à 50), en particulier pour la bande O_2-A. Si on acquiert tous les canaux nécessaires à la mesure de la fluorescence en une seule mesure, on s'aperçoit que le SNR au fond des bandes d'absorption sera très faible. En fait le bruit sur les bandes au fond est, dans ce cas là, supérieur ou égal à la variation de radiance induite par la fluorescence. Il n'est donc pas possible de faire une mesure de fluorescence correcte.

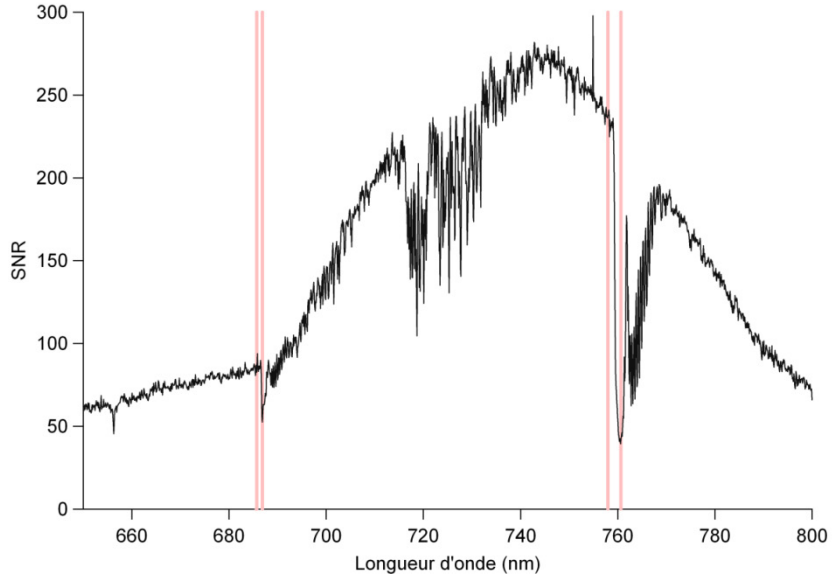


Figure V.6 *Rapport signal sur bruit (SNR) pour une mesure utilisant toute la dynamique du spectromètre. Mesures faites sur de l'herbe à 12h, heure locale (UTC + 2 h).Les barres verticales symbolisent l'emplacement des principaux canaux de SpectroFLEX.*

SpectroFLEX résout ce problème en faisant deux mesures : une première mesure utilisant toute la dynamique du spectromètre permet d'acquérir les canaux dont la radiance est la plus élevée et une seconde mesure, avec un temps d'intégration plus long, permet d'améliorer la mesure au fond des bandes de l'oxygène. La *Figure V.7* présente ces deux mesures sur la référence telles qu'elles sont faites par SpectroFLEX. On remarque que pour améliorer le SNR pour le canal du fond de bande O_2-A il est nécessaire de saturer en partie la CCD. Afin de ne pas endommager la CCD on limitera cette sursaturation à une valeur comprise entre une et deux fois la capacité maximale de la CCD.

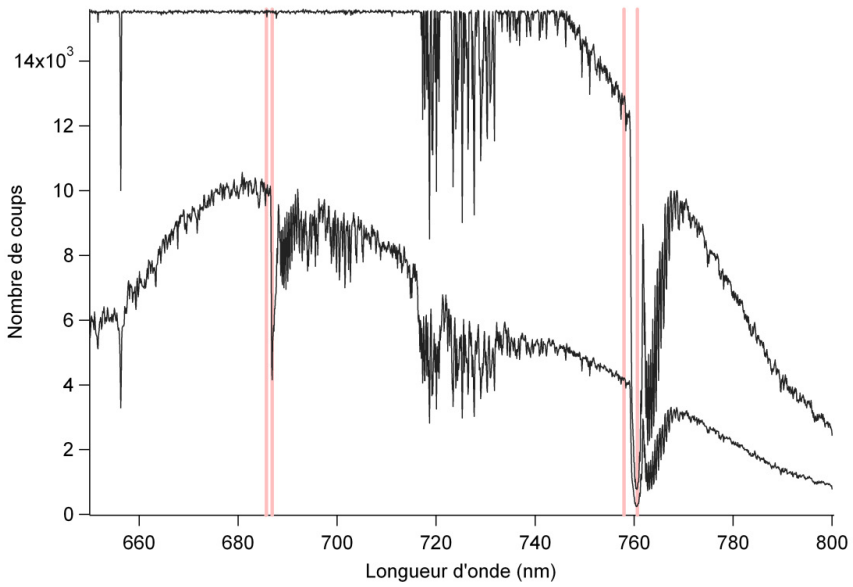


Figure V.7 *Spectres acquis sur la référence à 9h (UTC + 2 h) par SpectroFLEX en avril 2007 durant la campagne CEFLES2 après soustraction du courant à l'obscurité. Ces deux spectres sont utilisés pour retrouver la valeur de la profondeur des bandes de l'oxygène pour une cible non fluorescente.*

Dans SpectroFLEX, les canaux sont donc divisés en deux classes : la classe « temps court » contient les canaux qui peuvent être acquis avec un temps d'intégration court et un SNR suffisant et la

classe « temps long » contenant les canaux nécessitant un temps d'intégration plus long pour avoir un SNR suffisant.

SpectroFLEX est piloté par un programme écrit en Java. Le programme commande l'acquisition des spectres, la commutation de la référence et la fermeture/ouverture de l'obturateur (grâce au port série) pour la mesure du courant à l'obscurité. La *Figure V.8* représente le fonctionnement du programme de SpectroFLEX : au premier lancement une série d'acquisitions sur la référence est faite en faisant varier le temps d'intégration de manière à trouver un spectre non saturé. Le temps d'intégration court est calculé de manière à ce que la radiance du canal de la classe « temps court » recevant le plus de flux ait une valeur proche de l'optimum défini par l'utilisateur. Le temps d'intégration long est déterminé de manière à ce que le canal de la classe « temps long » recevant le moins de flux ait une valeur de flux supérieure au minimum défini par l'utilisateur. Quelques raffinements viennent ensuite s'ajouter pour s'assurer qu'aucun canal ne soit saturé, nous n'en parlerons pas pour SpectroFLEX mais nous y reviendrons dans la description de TriFLEX.

L'étape suivante est la mesure des courants à l'obscurité correspondant aux temps d'intégration déterminés. Puis, après cette étape commence le cycle de mesures proprement dit : une série de quatre mesures sont faites alternativement sur la cible et sur la référence en utilisant les différents temps d'intégration trouvés. A la fin de ces mesures un algorithme réorganise les deux classes de canaux si nécessaire, en utilisant les mesures qui viennent d'être faites. Cette réorganisation permet d'optimiser le SNR final de la mesure. et de s'adapter à un changement de réflectance (changement de cible) qui modifierait fortement la forme du spectre mesuré. Après cette étape, le cycle reprend en déterminant des nouveaux temps d'intégration à partir des spectres qui viennent d'être acquis. De cette manière l'algorithme s'adapte automatiquement aux changements lents de luminosité et assure une optimisation des signaux. L'adaptation aux changements rapides de luminosité se fait lorsqu'il y a dépassement des critères de qualité entrés par l'utilisateur : après chaque mesure sur la cible et la référence les valeurs obtenues sont vérifiées ; si le niveau de radiance est trop bas ou au contraire que la CCD est saturée, le cycle est interrompu et redémarre à l'initialisation.

Au final SpectroFLEX permet des mesures à la fréquence maximale de 0.4 Hz lorsque l'illumination est de 2000 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$. A titre d'illustration des mesures effectuées par SpectroFLEX, la *Figure V.9* présente des cycles diurnes des profondeurs des bandes de l'oxygène mesurées sur de l'herbe haute le 23 mai 2007 pendant une étude destinée à la mise en évidence des effets de structure de la végétation sur le signal de fluorescence (Fournier et al., 2011).

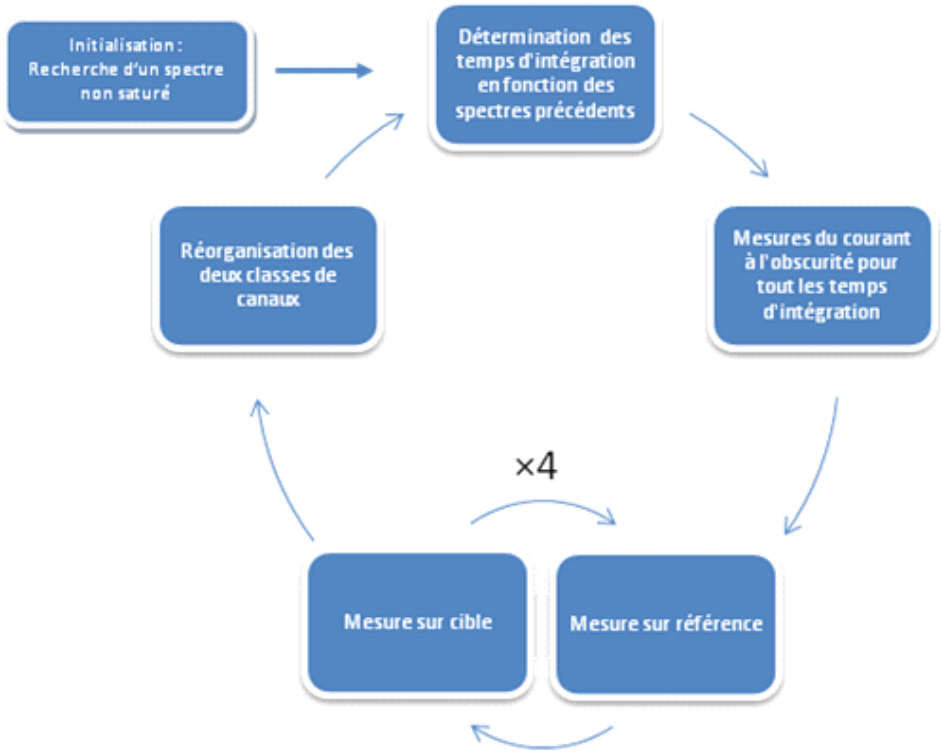


Figure V.8 *Schéma représentant le fonctionnement du programme de mesure de SpectroFLEX.*

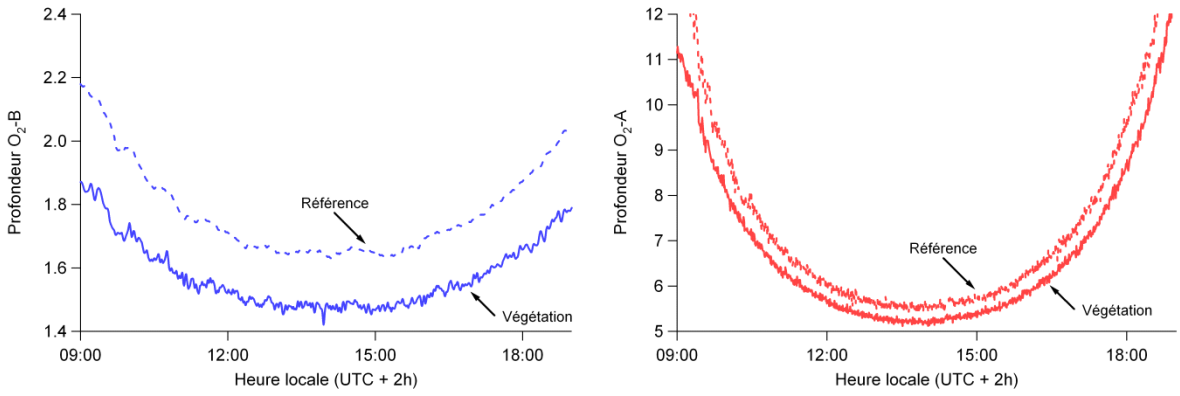


Figure V.9 *Cycle diurne des profondeurs des bande de l'oxygène mesurées le 23 mai 2007 sur de l'herbe longue et sur la référence en PVC.*

5.3 TriFLEX

SpectroFLEX nous a permis de cerner les différents problèmes qui se présentent lors de l'utilisation d'un spectromètre pour la mesure de la fluorescence. Cette expérience nous a poussés à la réalisation d'un second instrument : TriFLEX.

Avec TriFLEX, l'objectif était de réaliser un instrument permettant la mesure en continu de la fluorescence, basé sur des composants simples, peu coûteux et entièrement autonomes. Un second objectif était d'obtenir une fréquence d'acquisition supérieure à celle de SpectroFLEX. En effet, le principal inconvénient de SpectroFLEX est sa faible fréquence d'acquisition (0.4 Hz lorsque l'illumination est maximale). Pour SpectroFLEX, deux facteurs limitent la fréquence d'acquisition. Le premier est le temps de commutation de la référence : lorsqu'on déplace la référence, un temps d'attente de 500 ms est nécessaire pour s'assurer qu'elle est bien en place. Le second facteur limitant est la nécessité, après chaque changement de temps d'intégration de mesurer le courant à l'obscurité correspondant, que l'on appellera désormais « dark ». Cette faible fréquence d'acquisition ne permet pas de suivre les changements lumineux rapides. Lors de tels changements l'algorithme chargé de définir les temps d'intégration optimisant le SNR est pénalisé par la commutation de la référence et par la mesure des darks : pendant une forte transition lumineuse les temps d'intégration définis à un instant t ne sont en général plus valables 500 ms plus tard et il faut alors défausser toutes les données et rechercher de nouveaux temps d'intégration. Le système se stabilise généralement après la transition lumineuse.

La faible fréquence d'acquisition pose aussi le problème de la corrélation temporelle des données : la mesure sur la référence et sur la végétation n'est pas simultanée mais séparée au minimum de 500 ms (sans compter les temps d'intégration). Les données sont ensuite interpolées sur la même base de temps mais cette décorrélation est source de bruit. Il suffit d'un changement atmosphérique (nuages, aérosols, etc…) entre deux mesures pour que la comparaison entre profondeur de référence et profondeur après interaction avec la végétation soit faussée.

Pour répondre à ce problème, TriFLEX a été conçu autour de trois spectromètres : le premier est dédié à la mesure sur la végétation au voisinage des bandes d'absorption de l'oxygène tandis que le second (identique) est dédié à la mesure sur une référence. Le dernier est utilisé pour acquérir la réflectance sur l'ensemble du spectre, ce qui permet de mesurer différents indices de végétation. Avec ces trois spectromètres, il n'y a plus besoin d'alterner en permanence les mesures sur la référence puis sur la végétation : les mesures se font de manière continue en parallèle. De cette manière, on améliore la fréquence d'acquisition et la corrélation temporelle entre les signaux provenant de la cible et les signaux provenant de la référence.

La seconde amélioration majeure par rapport à SpectroFLEX est l'estimation des darks. Les mesures de courant à l'obscurité ne sont plus faites dans la journée pour chaque nouveau temps d'intégration. Les darks sont estimés à partir de mesures faites chaque nuit par TriFLEX.

5.3.1 Instrument

Figure V.10 *Instrument TriFLEX. A droite la boîte en aluminium contenant l'électronique, peinte en blanc afin de limiter l'influence du rayonnement solaire sur la température à l'intérieur de la boîte. A gauche la tête optique, déportée d'environ 5 mètres par rapport à l'électronique afin d'éviter de perturber l'environnement lumineux de la mesure sur la référence.*

La *Figure V.10* montre l'instrument TriFLEX. Il est composé d'une tête optique, à gauche sur la figure, et d'une partie acquisition, contenue dans la boite en aluminium à droite. Des fibres optiques longues de 5 mètres font la liaison entre ces deux éléments. Cette séparation permet d'éviter la perturbation de la mesure par des réflexions parasites sur la boîte contenant l'électronique. Pour cette même raison la tête optique est peinte en noir. La *Figure V.11* présente une vue schématique de TriFLEX. Elle détaille les différents éléments composant la partie acquisition et la partie détection de l'instrument. La partie acquisition est constituée principalement par les trois spectromètres Ocean Optics (Dudenin, FL, USA) et une unité d'acquisition Agilent (Agilent 34970A) ; cette dernière permet l'acquisition de différents paramètres environnementaux (éclairement (PAR), température de la boîte et des spectromètres. Elle dispose également de sorties logiques permettant le contrôle des obturateurs et de la position de la référence mobile. Les spectromètres et l'unité d'acquisition sont pilotés par un ordinateur portable (DELL Latitude 630). Tous ces éléments sont embarqués dans un caisson aluminium Zarges (600×400×340 mm) ventilé.

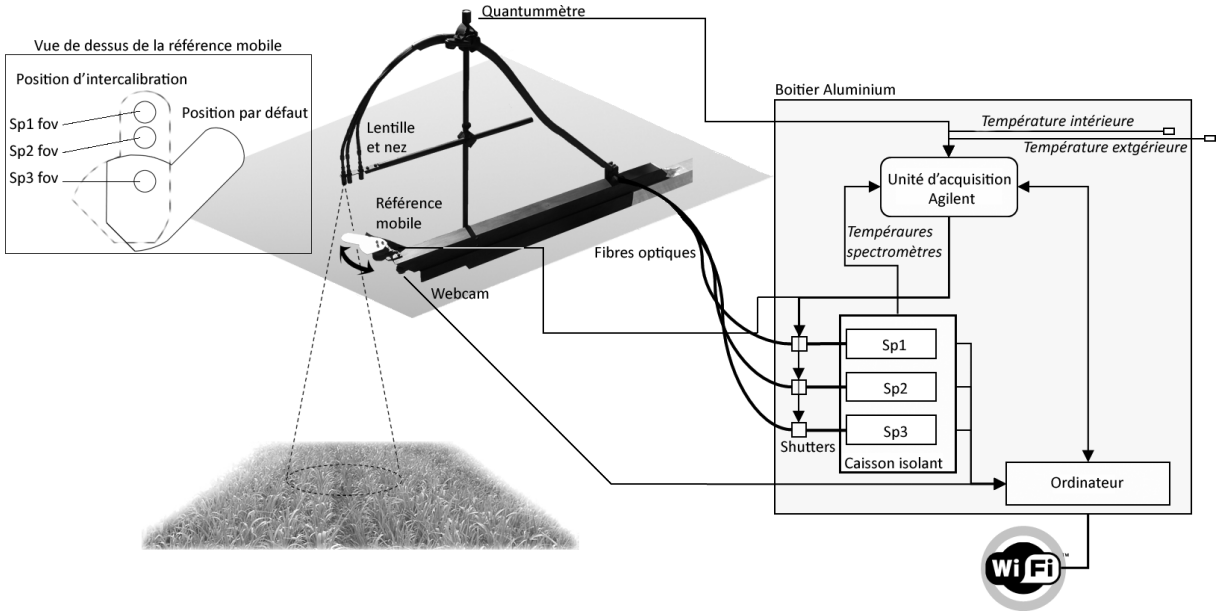


Figure V.11 *Vue schématique de l'instrument TriFLEX. Sp1 est un spectromètre large bande (300 nm - 900 nm, FWHM ~ 2nm). Sp2 and Sp3 sont les deux autres spectromètres identiques (630 nm - 815 nm, FWHM ~ 0.5nm). Sp2 est utilisé pour acquérir la radiance de la végétation et Sp3 pour estimer l'irradiance en mesurant continuellement sur la référence (voir Sp3 fov (Field Of View, champ de vue) sur l'insert en haut à gauche). Les trois spectromètres sont contrôlés par un ordinateur. Ce dernier contrôle également les obturateurs, la position de la référence et l'acquisition des différents paramètres d'environnement grâce à l'unité d'acquisition Agilent (Agilent 34970A). La référence peut être déplacée de sa position par défaut à une position de calibration permettant ainsi aux trois spectromètres de faire des mesures sur une même cible (voir insert).*

TriFLEX utilise deux spectromètres identiques pour mesurer la radiance de la végétation et la radiance de la référence : ce sont des spectromètres HR2000+ (Ocean Optics, Dudenin, FL, USA). Ces spectromètres couvrent une gamme spectrale allant de 630 nm à 815 nm avec une résolution de 0.5 nm (FWHM) et un encodage spectral de 0.09 nm par pixel (la CCD compte 2048 pixels). Le troisième spectromètre est également un HR2000+ d'Ocean Optics mais cette fois avec un réseau permettant une mesure entre 300 nm et 900 nm, avec une résolution de 2 nm (FWHM). Les trois spectromètres ont une fente d'entrée de 50 µm. A chaque spectromètre est associé un obturateur (Micropack, DE), permettant la mesure du courant à l'obscurité de la CCD (voir *Figure V.12*).

Afin d'éviter un décalage en longueur d'onde dû à une dilatation du banc optique des spectromètres avec les variations de température, les trois spectromètres sont enfermés dans un caisson régulé en température (voir *Figure V.12*). La régulation se fait à l'aide d'un module Peltier contrôlé par un régulateur PID (MPT5000, Wavelength Electronics). De cette manière les spectromètres sont maintenus à une température constante de 22°C. Au cours des campagnes de mesures, des variations de l'ordre de ±0.02°C ont été constatées pour des amplitudes de variation de températures extérieures supérieures à 10 °C.

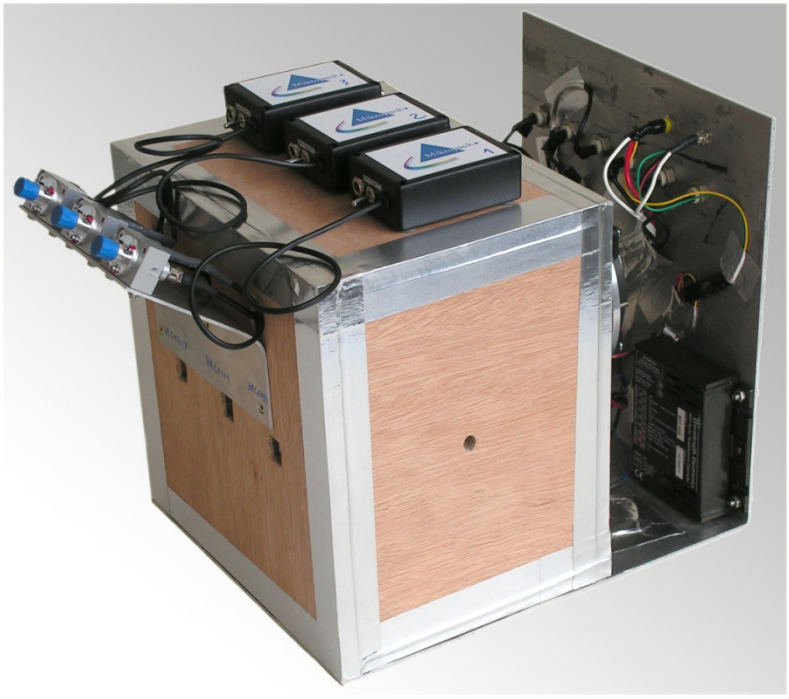


Figure V.12 *Caisson contenant les spectromètres formant la partie « capteur » de TriFLEX. Ce caisson est régulé en température à l'aide d'un régulateur PID. On peut voir, à gauche, connectés aux fibres optiques, les obturateurs permettant la mesure du dark, ainsi que leurs boîtiers de commande posés sur le caisson.*

La tête de TriFLEX supporte les trois fibres optiques associées aux spectromètres. Elles ont un cœur de 940 µm et une ouverture numérique de 0.22 (SEDI, Courcouronnes, France). Les extrémités de ces fibres sont alignées dans l'axe principal de la tête de manière à faciliter l'intercalibration des spectromètres (voir l'insert en haut à gauche de la *Figure V.11*). La référence mobile peut se déplacer de sa position de mesure (position par défaut) à sa position d'intercalibration, venant ainsi intercepter le champ de vue de tous les spectromètres. C'est dans cette position que sont faites les mesures permettant l'intercalibration des spectromètres.

La référence a été découpée dans une plaque de PVC expansé de 3 mm d'épaisseur (SIGNALPROD, France), de manière à ce que le champ de vue du spectromètre Sp3 (destiné à la mesure de l'irradiance solaire) soit en permanence sur la référence. Le champ de vue des spectromètres est défini par l'association d'une lentille (74-UV, Ocean Optics, Dudenin, FL, USA) et d'un piège à lumière en bout de fibre.

La tête optique supporte également un quantum-mètre donnant le PAR (JYP 1000, SDEC France), et deux webcams. La première sert à surveiller la position de la référence et la seconde permet de surveiller la cible. TriFLEX utilise le programme Dorgem (http://dorgem.sourceforge.net/) pour sauvegarder toutes les cinq minutes une image de la cible. La *Figure V.13* montre les images obtenues à partir de ces deux webcams.

Figure V.13 *Vue des deux webcams utilisées par TriFLEX. A gauche webcam de suivi de la cible, à droite webcam de contrôle de la référence. La cible est une parcelle de sorgho fourrager.*

Spectromètre	Canal			Nom, Description
	Longueur d'onde (nm)	FWHM (nm)	Nombre de pixels	
Sp2 (végétation) & Sp3 (référence)	λ_1 = 683.14	0.49	6	Bg687, O_2B off-band
	λ_2 = 685.00	0.69	8	B687, O_2B off-band
	λ_3 = 686.97	0.1	2	F687, O_2B in-band
	λ_4 = 697.06	0.9	11	Bd687, O_2B off-band
	λ_5 = 757.86	0.54	7	B760, O_2A off-band
	λ_6 = 760.51	0.8	10	F760, O_2A in-band
	λ_7 = 770.46	0.89	11	Bd760, O_2A off-band
Sp1	530.63	5.85	14	PRI
	569.02	6.27	15	Longueur d'onde de référence pour le PRI

Table V.1 *Configuration des canaux de mesure de TriFLEX*

5.3.2 Calibration

Chaque spectromètre a été calibré à la fois en longueur d'onde, en utilisant une lampe de calibration Mercure-Argon (Cal-2000-Bulb, Micropack, DE), et en unités radiométriques, à l'aide d'un corps noir (LI-COR 1800-02, Li-Cor inc., Lincoln, NE, USA). Cette calibration a permis d'obtenir une fonction de transfert pour chaque spectromètre faisant passer les données brutes en unités radiométriques ($W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$). On peut noter également que les mesures faites avec le corps noir ont

été utilisées pour corriger la non-linéarité[5] des spectromètres. Une description de la méthode de calibration en linéarité se trouve dans l'Annexe I.

TriFLEX utilise trois spectromètres ; la condition sine qua non de son fonctionnement est la possibilité d'utiliser les données venant des deux principaux spectromètres comme si elles provenaient d'un seul. On peut penser en premier lieu qu'une fois la calibration des spectromètres faite, le problème est réglé. Ce n'est pourtant pas le cas : à cause des différences entre les fonctions instrumentales des spectromètres il est impossible de s'assurer que les canaux des deux spectromètres principaux soient identiques en termes de longueur d'onde centrale et de largeur. Il est donc nécessaire d'inter-calibrer les spectromètres. Cette intercalibration se fait automatiquement chaque jour en utilisant les données obtenues durant la journée. Nous décrirons en détail ce processus dans la section 5.3.5.

5.3.3 Fonctionnement général, software

TriFLEX est piloté par deux programmes écrits en VB.net (Microsoft, USA). Le premier programme, nommé WatchCat est un programme de surveillance/gestion de l'instrument dont la première fonction est de vérifier le bon fonctionnement du second programme. Le second programme, nommé TriFLEX, est le programme d'acquisition proprement dit : c'est lui qui pilote les spectromètres et toutes les mesures d'environnement. Nous décrirons dans un premier temps le programme TriFLEX.

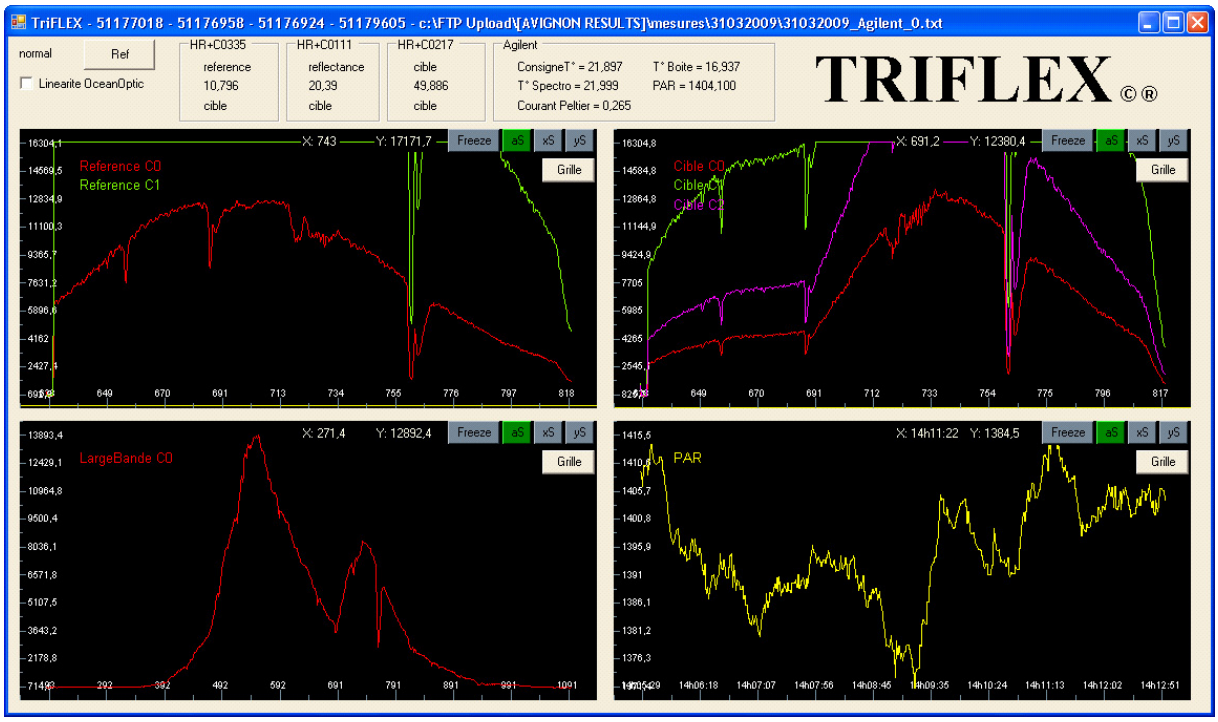


Figure V.14 *Aperçu de l'interface de TriFLEX. Le statut des spectromètres est affiché ainsi que les spectres qu'ils acquièrent, un graphe donnant l'évolution du PAR est également affiché.*

TriFLEX est le programme s'occupant de la gestion de la mesure. Son activité est divisée en plusieurs processus qui s'exécutent en parallèle : TriFLEX est multithread[6]. La routine la plus

[5] La non-linéarité d'un spectromètre est la différence obtenue en comparant une mesure faite avec un temps d'intégration *2t* ramenée au temps d'intégration *t* (en la divisant par deux) et la même mesure faite directement avec le temps d'intégration *t*.

importante est la routine de gestion des mesures. Cette routine permet la gestion d'un spectromètre et l'optimisation des mesures. Au lancement de TriFLEX, le processus principal, le *main*, lance une instance de cette routine dans son propre thread[6] pour chaque spectromètre. La routine s'occupant de l'acquisition des paramètres d'environnement grâce à l'unité Agilent est également lancée au démarrage sur son propre thread. De cette manière, le fonctionnement de chaque spectromètre est indépendant des autres instruments : les routines gérant les instruments renvoient simplement leurs données valides au *main* qui s'occupe de leur stockage. Le *main* s'occupe également de la commutation de la référence pour les mesures d'intercalibration ainsi que de la synchronisation des spectromètres lors de cette commutation.

Lors de la conception de l'instrument nous avons constaté une forte instabilité des drivers des spectromètres fournis par le constructeur. Certaines de ces instabilités peuvent être contrôlées et gérées par le programme TriFLEX : il arrive que le spectromètre renvoie un spectre plus rapidement que le temps nécessaire ; il arrive également que le spectre renvoyé soit corrompu (valeur constante sur une moitié de spectre par exemple). Cependant les drivers sont source de désagréments plus difficiles à gérer : ils peuvent provoquer à tout moment un crash de l'application les utilisant, il arrive également qu'ils ne répondent pas correctement (ou plus du tout) laissant les spectromètres dans un état aléatoire. Il peut arriver également qu'à la suite d'un crash de ces drivers, les spectromètres ne soient plus reconnus par le système d'exploitation. Devant la multiplicité des causes pouvant empêcher le bon fonctionnement du programme de mesure, il a été décidé que la gestion des erreurs au sein du programme TriFLEX soit réduite au minimum et que le problème soit déporté sur un second programme, WatchCat.

WatchCat a donc pour objectif de faire en sorte que le programme de mesure fonctionne correctement. Pour cela il le surveille en permanence. En cas de crash du programme de mesure, WatchCat le relance. Si les spectromètres ne répondent plus ou ne sont plus reconnus par le système d'exploitation WatchCat a la possibilité de : désinstaller/réinstaller les spectromètres, relancer l'ordinateur ou débrancher/rebrancher les spectromètres (à l'aide d'un boîtier permettant de couper l'alimentation des ports USB (voir l'Annexe H)). L'action choisie dépend du contexte et des actions effectuées précédemment.

Au fur et à mesure de son développement WatchCat a également pris le rôle de gestionnaire de l'instrument au sens large. Ainsi, c'est WatchCat qui lance le programme la nuit pour qu'il effectue les mesures de darks puis qui l'interrompt une fois les mesures terminées. Il redémarre le programme le matin, à l'heure choisie par l'utilisateur et l'arrête le soir, à l'heure définie par l'utilisateur. Après l'arrêt du programme de mesure il s'occupe du traitement des données et de l'envoi des données traitées sur un serveur ftp choisi par l'utilisateur. WatchCat communique de deux manières avec l'utilisateur :

- L'utilisateur est prévenu par mail dès qu'un événement se produit (coupure de courant, fin de traitement des données, etc…)

- WatchCat envoie régulièrement le statut de l'instrument ainsi qu'une photo de la cible sur un site internet (*TriFLEX logger,* voir *Figure V.15*) accessible depuis n'importe quel ordinateur

[6] Un thread (littéralement, « fil d'exécution ») est une séquence d'instructions à laquelle le système d'exploitation alloue du temps processeur. Une application qui tourne sur une machine possède au moins un thread. On peut être amené dans une application à créer plus d'un thread afin de faire exécuter plusieurs tâches en parallèle. On parle alors de multithreading. Dans un processus, tous les threads partagent le même espace mémoire.

connecté à internet. A partir de ce site il est possible de piloter partiellement l'instrument : redémarrage, lancement du traitement des données, débranchement des spectromètres.

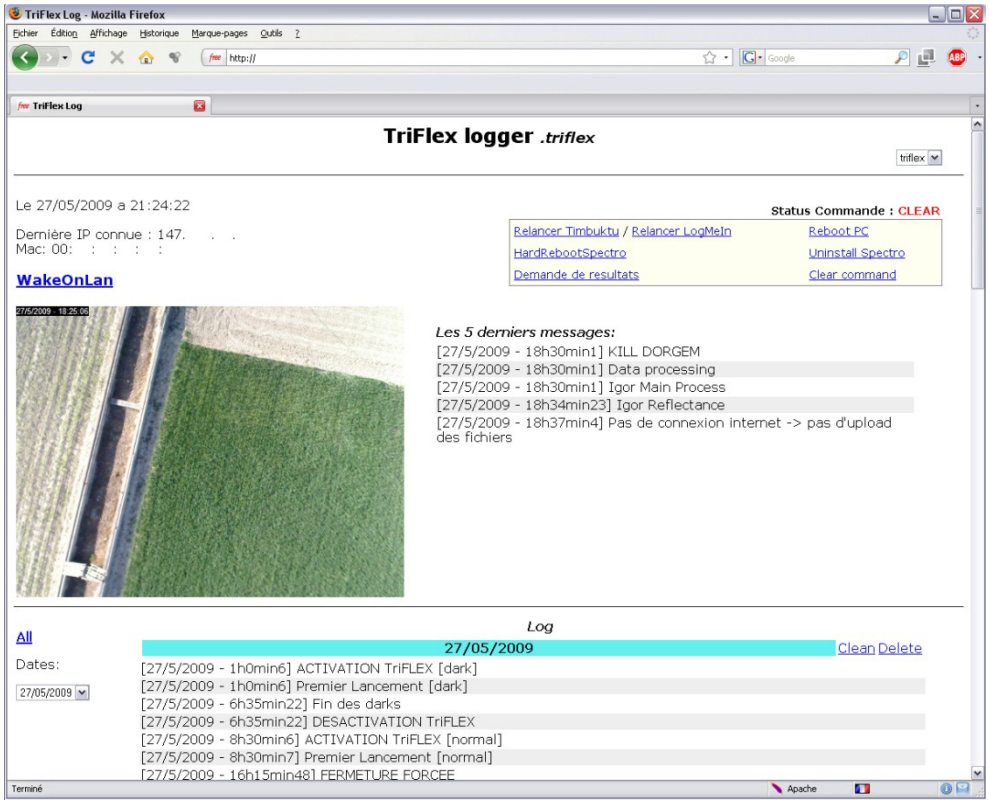


Figure V.15 *Interface du site TriFLEX logger. Ce site permet de connaître le statut de l'instrument TriFLEX et de le commander partiellement.*

Le contrôle à distance de l'ordinateur commandant TriFLEX est également possible soit au grâce au logiciel Timbuktu (Netopia, http://www.netopia.com/software/products/tb2/), soit grâce aux services offerts par LogMeIn (LogMeIn, Inc., https://secure.logmein.com). Ce dernier ayant le double avantage de passer bien plus facilement les différents proxys et firewalls constituant le réseau à partir duquel TriFLEX assure sa connexion à internet et de proposer une interface web accessible à partir de n'importe quel navigateur. WatchCat et *TriFLEX logger* offrent également la possibilité de réinitialiser ces deux logiciels en cas de problème.

5.3.4 Algorithme de mesure

Comme nous l'avons vu précédemment, la mesure du comblement de la bande d'absorption pour la mesure de la fluorescence nécessite d'avoir un SNR suffisant (voir CHAPITRE II). L'acquisition d'un seul spectre pour obtenir les flux au bord et au fond des bandes d'absorption ne permet pas d'avoir une précision suffisante dans les canaux de fond de bande pour retrouver la fluorescence. SpectroFLEX résolvait ce problème en utilisant deux spectres obtenus avec des temps d'intégration différents. Dans TriFLEX, cette approche est généralisée de manière à optimiser à la fois un SNR optimal et une bonne corrélation temporelle. Pour un canal donné, on peut améliorer le SNR en augmentant le temps d'intégration de manière à approcher la valeur maximale mesurable avant saturation (16384 coups pour un codage sur 14 bits). Pour mesurer la fluorescence avec le meilleur SNR possible il faudrait donc idéalement acquérir chaque canal séparément en calculant le temps d'intégration de telle manière que la valeur mesurée soit proche de la saturation. Cette méthode maximise le SNR mais induit une très mauvaise corrélation temporelle : entre la mesure du premier canal et la mesure du dernier canal

plusieurs secondes pourraient s'être écoulées, en fonction du nombre de canaux à acquérir. Si la cible change légèrement par exemple sous l'effet du vent ou que la luminosité change, la mesure sera faussée. L'algorithme de TriFLEX permet de trouver un juste milieu entre l'acquisition d'un seul spectre pour obtenir l'ensemble des canaux et l'acquisition d'un spectre par canal.

L'algorithme d'optimisation est dirigé par plusieurs paramètres d'entrée définis par l'utilisateur. Les deux paramètres principaux sont des critères de qualité: le nombre de coups optimal et le nombre de coups minimum. Le nombre de coups optimal est le nombre de coups représentant une mesure optimale en termes de SNR. En pratique l'algorithme essaiera de définir les temps d'intégration de manière à ce que la valeur de chaque canal s'approche le plus possible de cette valeur. Il est généralement défini aux alentours de 12000 (le nombre de coup maximum est 16384). Le nombre de coups minimum est le nombre de coups en dessous duquel une mesure n'est plus considérée comme valide.

L'initialisation de l'algorithme se fait par la recherche d'un spectre non saturé. Une fois ce spectre obtenu, l'algorithme l'utilise pour répartir en « classes de temps d'intégration » la collection des canaux de mesure. La notion de classe de « temps court » et classe de « temps long » utilisée dans SpectroFLEX n'existe plus. Le nombre de classes n'est pas fixe : il varie en fonction de la forme du spectre vu par le spectromètre. Si l'algorithme arrive à trouver une configuration permettant la mesure de tous les canaux en utilisant deux temps d'intégration il y aura deux classes. Si ce n'est pas possible il crée une nouvelle classe. Le nombre de classes n'est pas limité mais les critères de qualité sont fixés de telle manière que l'algorithme utilise généralement deux ou trois classes.

L'algorithme autorise les temps d'intégration entraînant la saturation d'une partie de la CCD, ce qui est nécessaire pour la mesure du fond de la bande O_2-A. Cependant, afin de ne pas endommager la CCD on limite la saturation à deux fois sa capacité maximale. C'est une contrainte dont notre algorithme tient compte *a priori*.

Après chaque acquisition les mesures sont vérifiées. La vérification consiste à s'assurer que les critères de qualité sont remplis (le nombre de coups se situe entre le nombre de coups minimum et le nombre de coups optimal). Il faut également s'assurer, dans le cas où des canaux sont obtenus avec un spectre saturé, que les pixels aux bords de ces canaux ne soient pas saturés. En effet s'ils sont trop saturés il peut y avoir un phénomène de débordement de ces pixels vers les pixels sur lesquels sont définis nos canaux entraînant une surestimation du flux. Cette contrainte est elle aussi prise en compte *a priori* par notre algorithme, ce qui permet d'éviter de faire plusieurs itérations pour trouver un spectre valide.

Après vérification, l'algorithme choisit pour chaque canal le spectre donnant le meilleur SNR pour ce canal et les données sont sauvegardées. Les données ainsi obtenues sont utilisées pour optimiser la mesure suivante. Cela nous permet de nous adapter immédiatement aux changements lumineux.

La *Figure V.16* compare le SNR sans optimisation (en utilisant un seul spectre) et le SNR résultant de l'utilisation de notre algorithme pour les canaux servant à la mesure de la fluorescence. On voit que le SNR est augmenté :

- d'un facteur 4 pour le canal au fond de la bande O_2-B
- d'un facteur 12 pour le fond de la bande O_2-A.

L'amélioration est plus faible pour les autres canaux.

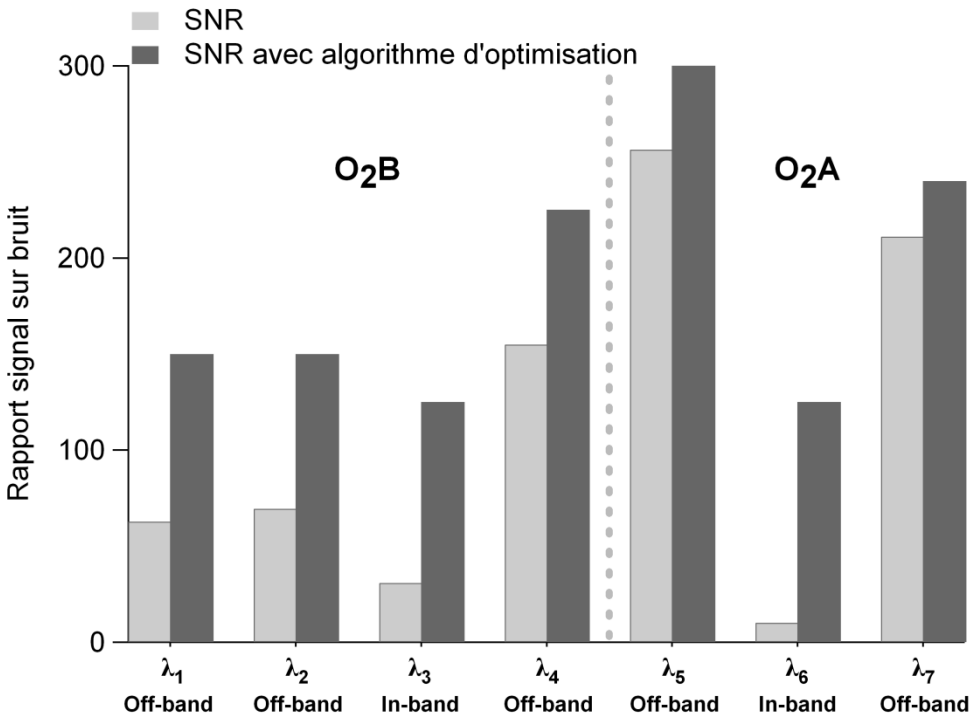


Figure V.16 *Comparaison du rapport signal sur bruit (SNR) sans et avec l'algorithme d'optimisation. Les SNR sont données pour les canaux de mesures utilisés pour la mesure de la fluorescence (voir Table V.1).*

L'algorithme de TriFLEX cherche à optimiser les flux mesurés, la fréquence d'acquisition de TriFLEX dépend donc en premier lieu de l'éclairement et de la réflectance de la cible. La *Figure V.17* donne cette fréquence d'acquisition en fonction de l'éclairement (PAR) pour trois types de cibles : un couvert de sorgho (NDVI : 0.8), un couvert de soja (NDVI : 0.91) et du sol nu (NDVI : 0.02). On voit que TriFLEX effectue entre une et deux mesures par seconde dès que le PAR est supérieur à 500 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$. On voit également que la relation fréquence d'acquisition vs PAR est différente pour le sorgho et le soja. Cela est dû à la différence de réflectance entre le sorgho et le soja (forme et valeur).

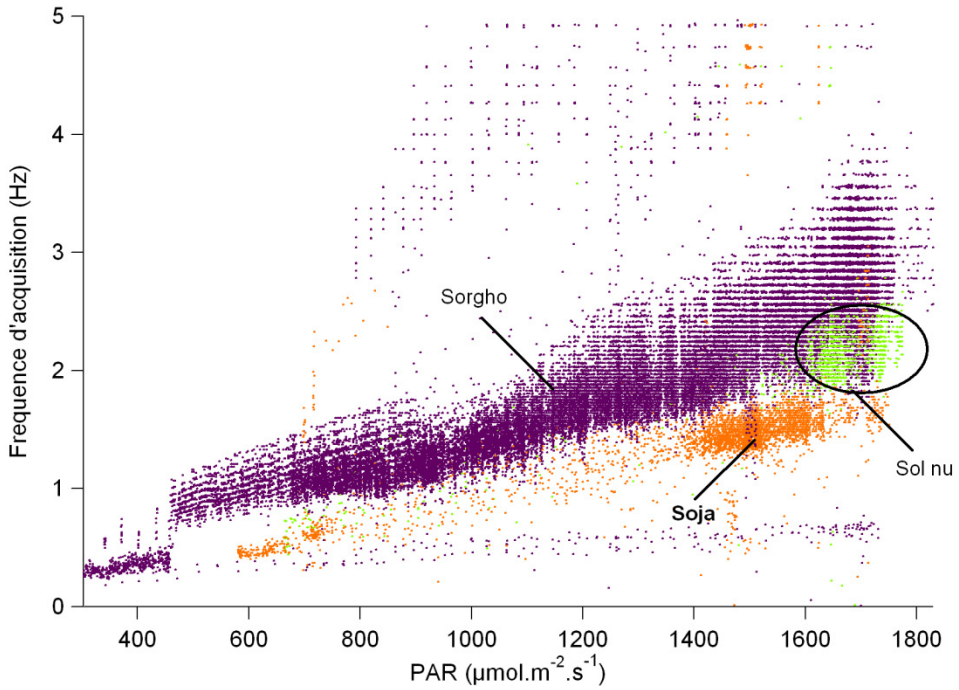


Figure V.17 *Fréquence d'acquisition de TriFLEX en fonction du PAR pour différents types de cibles. Mesures faites le 28 août 2009 à Avignon.*

5.3.5 Traitement des données

A la fin de chaque journée les données sont automatiquement traitées grâce à une routine de dépouillement écrite en script IGOR (WaveMetrics, http://www.wavemetrics.com). Les données générées pour une journée sont constituées des mesures de darks faites la nuit et des mesures sur la végétation faites dans la journée. Dans la journée, les données en sortie du programme TriFLEX pour chaque spectromètre et pour chaque canal sont : l'heure de mesure, le temps d'intégration utilisé, le nombre de coups, le type de mesure (intercalibration ou mesure).

- **Soustraction des darks**

Le dark est le courant à l'obscurité de la CCD. C'est un signal additionnel (un offset), mesurable lorsque la CCD n'est pas éclairée, qui s'ajoute au signal mesuré lorsque la CCD est éclairée. Ce signal ne contient pas d'information sur ce que l'on observe et doit être retiré.

La valeur du dark dépend du temps d'intégration utilisé. Après une étude sur ces darks nous avons observé que leur dépendance avec le temps d'intégration peut être définie comme une relation linéaire. Comme nous avons vu plus haut, TriFLEX effectue pendant la nuit une série de mesures de dark en faisant varier le temps d'intégration du minimum au maximum des spécifications des spectromètres (de 0.001 s à 7.8 s). TriFLEX effectue des cycles de mesure jusqu'au matin, lorsque les mesures sur la végétation doivent commencer. La première action de la routine de dépouillement sera de charger ces données et d'établir, pour chaque canal de mesure, la relation linéaire donnant le dark en fonction du temps d'intégration. La *Figure V.18* présente les données collectées pendant la nuit pour un canal et le fit utilisé pour établir la relation entre valeur de dark et temps d'intégration. Pour chaque valeur de temps d'intégration, la dispersion des darks obtenus est d'environ ± 4 coups. On remarquera sur la figure que le nombre de mesures est plus important pour les temps court (1.5 s). Cela permet de donner plus de poids dans la régression à la gamme de temps d'intégration les plus fréquents.

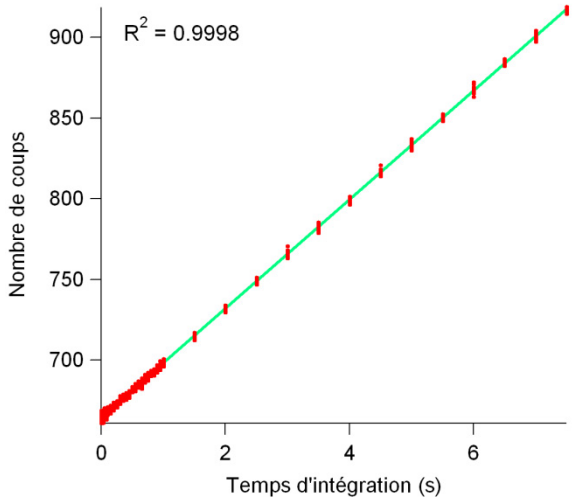


Figure V.18 *Mesure de courant à l'obscurité (dark) en fonction du temps d'intégration pour le canal au bord dans la bande O_2-B (en rouge). En vert, le fit des données.*

Une fois ces relations établies, elles sont utilisées pour soustraire le dark de chaque mesure effectuée dans la journée.

- **Calibration**

La seconde étape consiste à calibrer les données, c'est-à-dire à transformer le nombre de coups en unités radiométriques. La calibration de l'instrument se fait avant la campagne de mesure, elle se fait au moyen d'un corps noir : pour chaque spectromètre, une série de spectres du corps noir est acquis en faisant varier le temps d'intégration. La variation du temps d'intégration permet d'estimer la non-linéarité du spectromètre et de la corriger (voir Annexe I). La série de mesures est ensuite utilisée pour générer un fichier de calibration. Le fichier de calibration contient, pour chaque bande de mesure, un polynôme permettant de passer du nombre de coups obtenu à une grandeur radiométrique en $W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$. Ce polynôme permet de tenir compte de la fonction de transfert du spectromètre et de corriger sa non-linéarité.

- **Correction en temps**

Chaque canal est pris avec un temps d'intégration qui peut lui être propre et qui change au cours de la journée. La troisième étape consiste donc à ramener les mesures au même temps d'intégration. La *Figure V.19* présente les données qui sont obtenues par TriFLEX après les deux premières étapes. Elle illustre le fonctionnement de TriFLEX : le canal B760 (pour bord de la bande O_2-A) est maintenu tout au long de la journée à une valeur optimale en jouant sur la valeur du temps d'intégration. On voit un peu avant 15 h un changement de valeur optimale correspondant a un passage sur un champ nu : la forme de la réflectance étant fortement différente, l'algorithme d'optimisation s'adapte. Les variations de temps d'intégration pendant le passage des nuages autour de 15 h illustre également la capacité de TriFLEX à s'adapter aux conditions atmosphériques changeantes : on voit que le temps d'intégration s'adapte en permanence de manière à maintenir une valeur optimale du flux. Les pics réguliers correspondent aux mesures d'intercalibration effectuées sur le panneau de référence en PVC.

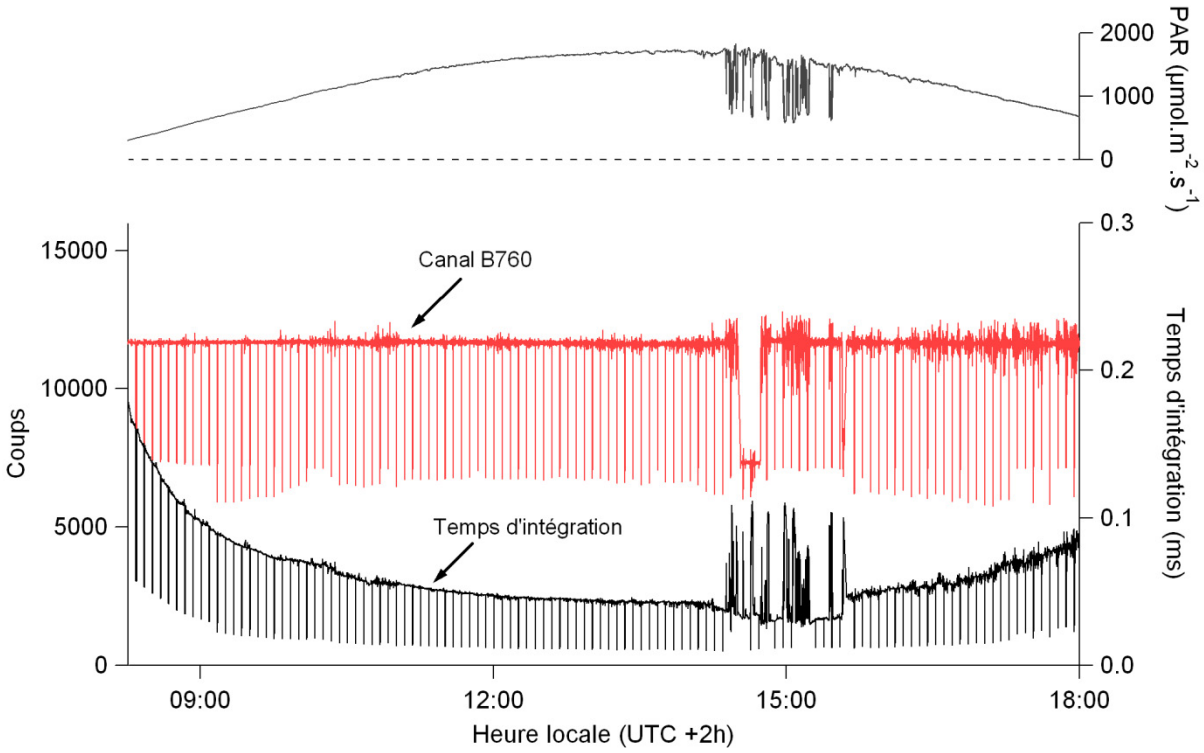


Figure V.19 *Exemple de données brutes fournies par TriFLEX. Il s'agit du nombre de coups mesuré pour le canal B760 (au bord de la bande d'absorption O_2-A), du temps d'intégration correspondant et du PAR. On voit l'effet de l'algorithme d'optimisation du SNR : le temps d'intégration est défini de manière à ce que le nombre de coups obtenu soit constant. Au cours de cette journée plusieurs cibles ont été observées, ce qui explique les variations du nombre de coups optimal (qui dépend de la réflectance de la cible). Le 28 août 2009 à l'INRA d'Avignon.*

Les données sont corrigées du temps d'intégration, c'est-à-dire qu'on ramène tous les canaux au même temps d'intégration : 1 s. Après cette étape on obtient, pour chaque canal la valeur de la radiance, calibrée en $W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$. Cependant les données provenant des mesures d'intercalibration et des mesures sur la cible sont mélangées : il faut les séparer.

- **Extraction des références**

Pour chaque acquisition, une valeur indicatrice permet de savoir si la mesure est une mesure faite sur le panneau de référence (mesure d'intercalibration) ou sur la cible. Cette indication est utilisée pour extraire les données d'intercalibration de chaque canal. Ce travail est effectué à la fois pour les données venant du spectromètre assigné à la référence et pour celles venant du spectromètre assigné à la cible. On se retrouve alors avec, pour chaque spectromètre, deux collections de données : la première rassemble les données acquises sur leur cible respective et la seconde les données acquises simultanément sur le panneau de référence.

- **Synchronisation**

A cause de l'algorithme d'optimisation du SNR, les canaux ne sont pas acquis au même moment. Pour synchroniser les canaux, leurs cycles diurnes sont interpolés sur une base de temps commune. C'est cette étape qui va définir la fréquence d'acquisition finale de TriFLEX. Après cette synchronisation tous les signaux sont considérés comme ayant été acquis en même temps. La *Figure V.20* présente les données obtenues après cette étape, pour deux canaux dans la bande O_2-A, par le

spectromètre dédié aux mesures sur la végétation. Les courbes notées « référence » sont les mesures d'intercalibration.

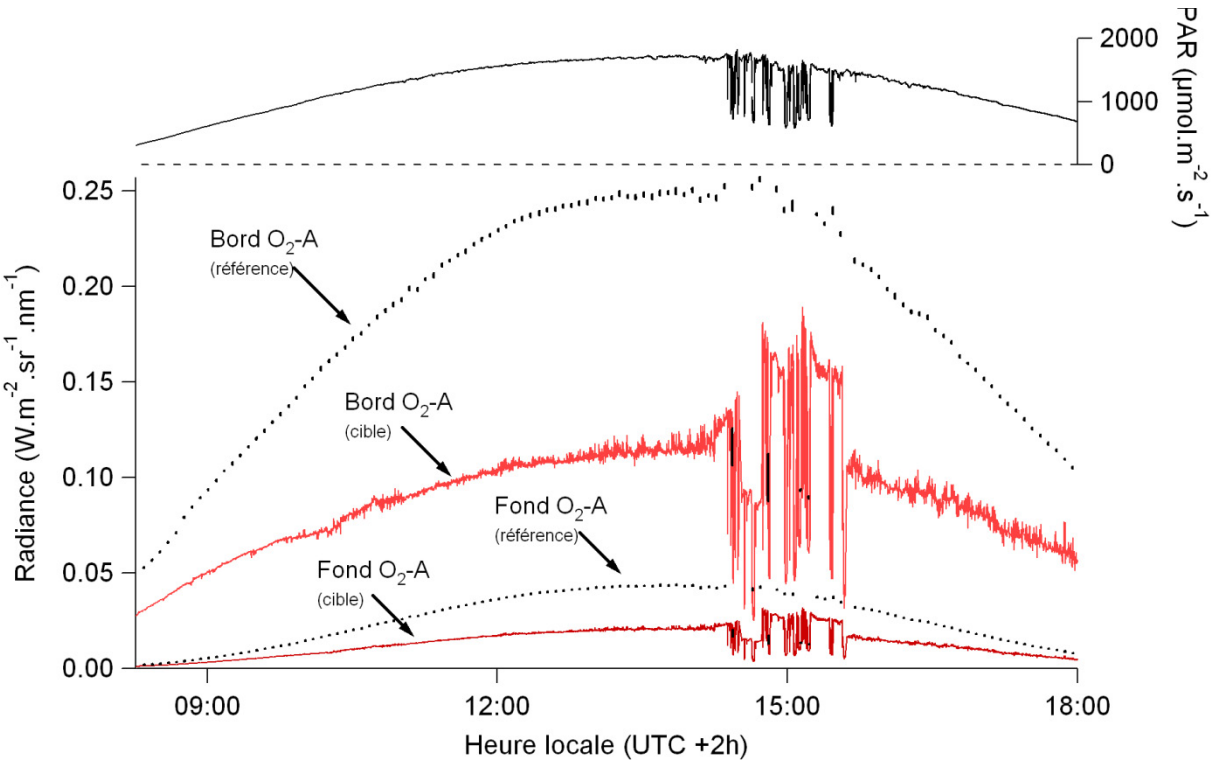


Figure V.20 *Cycles diurnes obtenus dans la bande O_2-A après l'étape de synchronisation : les données d'intercalibration acquises sur le panneau de référence sont séparées des données acquises sur la cible. Les données ont été interpolées sur la même base de temps. Données acquises le 28 août 2009 à l'INRA d'Avignon sur différentes cibles : sorgho, soja, sol nu.*

- **Intercalibration**

L'intercalibration consiste à déterminer une relation permettant de ramener les valeurs mesurées par le spectromètre dédié à la mesure de la référence (Sp3) dans la base du spectromètre dédié aux mesures sur la végétation (Sp2). Bien que les spectromètres aient été préalablement calibrés au moyen d'un corps noir, cette étape est nécessaire pour tenir compte des différences de fonctions instrumentales d'un spectromètre à l'autre. En effet, considérons un même canal de mesure défini pour les deux spectromètres principaux. Ils sont définis de manière à avoir la même longueur d'onde centrale et la même largeur théorique. Le premier spectromètre mesure :

$$\int_{\lambda} S_1(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda \qquad (V.1)$$

Avec $S_1(\lambda)$ la fonction instrumentale du canal considéré et $\varphi(\lambda)$ le flux réel fonction de la longueur d'onde, λ. Le second spectromètre mesure :

$$\int_{\lambda} S_2(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda \qquad (V.2)$$

Bien sûr, même si on cherche à ce que les canaux de mesure soient le plus proches possible sur les deux spectromètres les fonctions instrumentales ne sont pas les mêmes : $S_1(\lambda) \neq S_2(\lambda)$ .La calibration de chaque spectromètre nous permet d'écrire :

$$C_1 \int_\lambda S_1(\lambda)\varphi_{cal}(\lambda)d\lambda = C_2 \int_\lambda S_2(\lambda)\varphi_{cal}(\lambda)d\lambda \qquad (V.3)$$

Avec C_1 et C_2 les coefficients de calibration des spectromètres et φ_{cal} le flux (connu) de notre source de calibration. Il faut cependant noter que cette égalité n'est vraie que pour le flux φ_{cal} : pour un flux quelconque, $\varphi(\lambda)$, cette égalité n'est plus valide puisque $S_1(\lambda) \neq S_2(\lambda)$. Il faut noter que les deux fonctions instrumentales n'ont pas les mêmes valeurs en intensité mais également qu'elles ne sont pas définies strictement sur la même gamme spectrale. Ainsi le canal du spectromètre Sp2 ne « voit » pas exactement la même zone spectrale que le même canal sur le spectromètre Sp3. Les coefficients de calibration C_1 et C_2 ne permettent donc pas d'intercalibrer les spectromètres pour toutes les conditions lumineuses : le coefficient d'intercalibration permettant de relier les mesures du premier spectromètre à celles du second dépend de la forme du spectre lumineux. Pour plus de détails on pourra consulter l'Annexe J.

La forme des bandes d'absorption changeant tout au long de la journée, le coefficient d'intercalibration doit être évalué tout au long de la journée. Pour cela on utilise les données acquises simultanément par les deux spectromètres sur la référence. Les *Figure V.21* et *Figure V.22* présentent les relations entre les mesures faites par les deux spectromètres pour deux canaux, dans chacune des bandes d'absorption de l'oxygène. On peut voir sur ces figures que la relation qui lie les canaux des deux spectromètres est une relation quasi linéaire mais non proportionnelle : il y a un offset. Cet offset n'est pas négligeable puisque lors du passage d'un spectromètre à l'autre il peut apporter une correction plus importante que la contribution de la fluorescence. Cela est particulièrement sensible dans la bande O_2-B : une régression linéaire sur la *Figure V.21* donne un offset de l'ordre de 1.5 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$. Bien sûr, ces relations ne sont pas linéaires, en particulier pour les très faibles flux (les spectromètres mesurent bien tous les deux un flux nul lorsqu'ils ne sont pas éclairés !), mais elles sont quasi linéaires dans la gamme de radiance qui nous intéresse.

De plus, si l'on regarde de plus près ces relations on s'aperçoit qu'elles dépendent de l'heure : les valeurs acquises l'après-midi ne se superposent pas aux mesures faites dans la matinée. Nous avons toujours observé, à la fois dans les mesures et la modélisation, que les cycles diurnes des profondeurs des bandes de l'oxygène n'étaient pas symétriques autour du midi solaire. La forme spectrale du rayonnement incident ne varie donc pas de la même manière dans la matinée et dans l'après-midi. C'est ce qui explique que la relation liant les deux spectromètres soit différente le matin et l'après-midi.

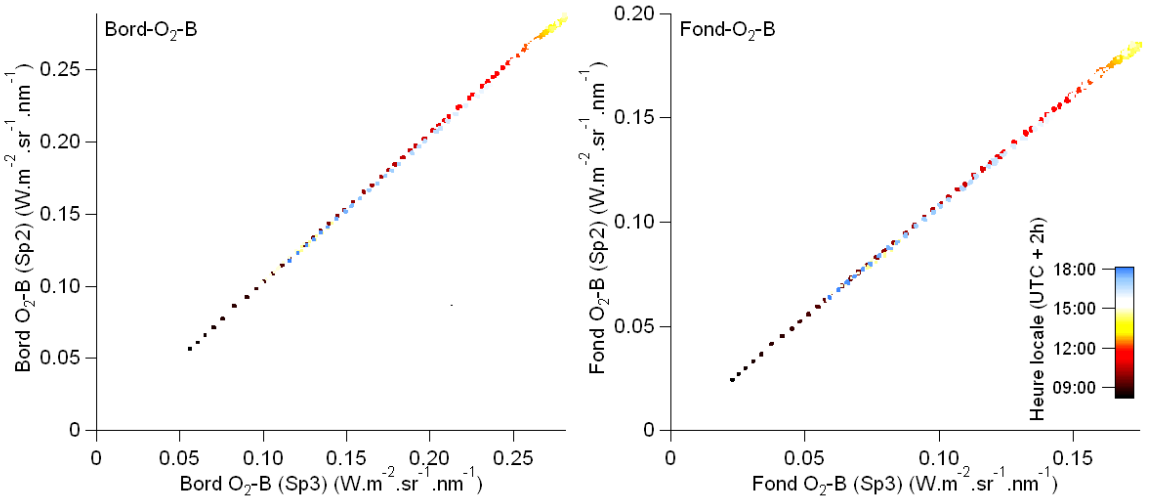


Figure V.21 *Intercalibration des spectromètres Sp2 et Sp3 : mesures faites sur la référence simultanément tout au long de la journée du 28 août 2009. A gauche : Canal au bord de la bande d'absorption O_2-B, à droite : canal au fond de la bande d'absorption O_2-B. La couleur correspond à l'heure de mesure.*

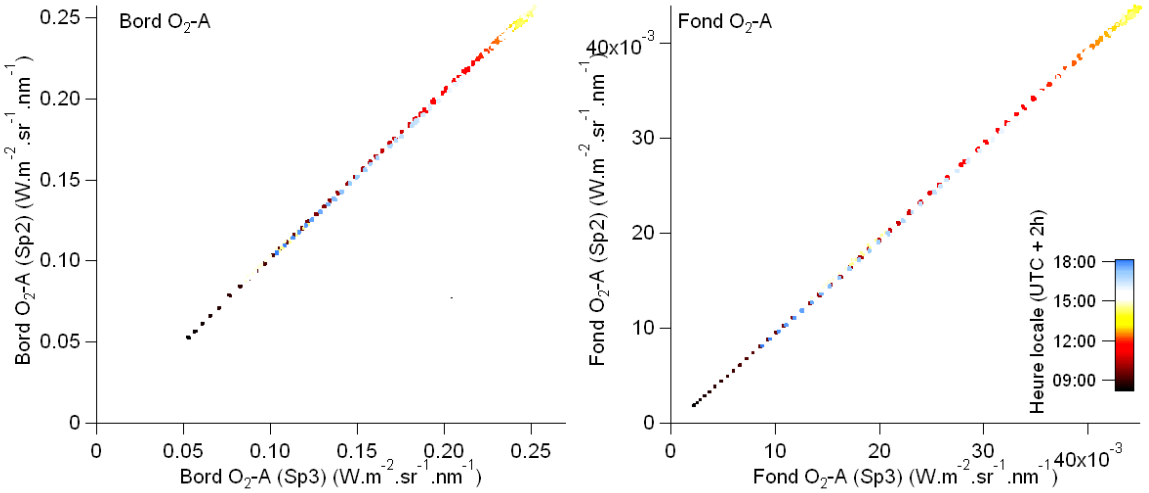


Figure V.22 *Intercalibration des spectromètres Sp2 et Sp3 : mesures faites sur la référence simultanément tout au long de la journée du 28 août 2009. A gauche : Canal au bord de la bande d'absorption O_2-A, à droite : canal au fond de la bande d'absorption O_2-A. La couleur correspond à l'heure de mesure.*

Nous avons donc choisi, pour tenir compte de ces changements en fonction de l'heure et de l'orientation, de calculer une fonction d'intercalibration propre à chaque position. Dans un premier temps, pour tenir compte de la dissymétrie entre les mesures du matin et de l'après midi l'algorithme commence par séparer les données en deux : d'un côté les mesures faites avant 14h (midi solaire en été) et de l'autre les mesures faites après 14 h. Ensuite notre algorithme détecte tous les changements de position de TriFLEX : lors d'un changement de position le programme est momentanément en pause. Notre algorithme de traitement des données détecte cette pause et partitionne les données en conséquence. Lors de ce partitionnement nous tenons compte du fait qu'il faut accumuler un minimum de données pour que l'intercalibration soit de bonne qualité : si pour une position donnée on n'obtient

pas assez de données pour une bonne intercalibration, on utilisera par défaut l'intercalibration de la position la plus proche dans le temps.

Une fois ce partitionnement dans le temps effectué, on calcule, pour chaque jeu de données, une fonction d'intercalibration qui s'appliquera à toutes les données obtenues durant l'intervalle de temps correspondant à la partition. La fonction fittant le mieux les données est un polynôme du second degré. Le fit est calculé par minimisation des moindres carrés : on considère qu'un fit est bon si χ^2 est supérieur ou égal à 0.99 (paramétrable). Si ce n'est pas le cas on recalcule le fit en éliminant le point des données le plus éloignés du fit. Ce processus est itéré jusqu'à trouver un fit satisfaisant. Bien entendu, si le nombre de points éliminés est trop important (paramétrable), l'algorithme prévient l'utilisateur qu'il y a un problème. Ce cas de figure arrive très rarement et survient généralement lorsque l'instrument n'a pas fonctionné assez longtemps pour accumuler suffisamment de données.

- **Correction des effets de l'orientation de la référence**

Lors des mesures d'intercalibration, le panneau de référence est déplacé de manière à intercepter le champ de vue des trois spectromètres. Lors de ce déplacement, l'orientation du panneau de référence change légèrement, ce qui entraîne une modification de la valeur de flux mesuré par le spectromètre Sp3. On voit très bien cet effet en observant la différence entre le cycle diurne obtenu en position de mesure sur la référence et le cycle diurne obtenu en position d'intercalibration. Ces cycles diurnes sont présentés sur la *Figure V.23.A*. Pour que l'intercalibration effectuée précédemment soit valide, il faut que les mesures sur la référence soient équivalentes aux mesures d'intercalibration. Il faut donc ramener les mesures de référence sur les mesures d'intercalibration.

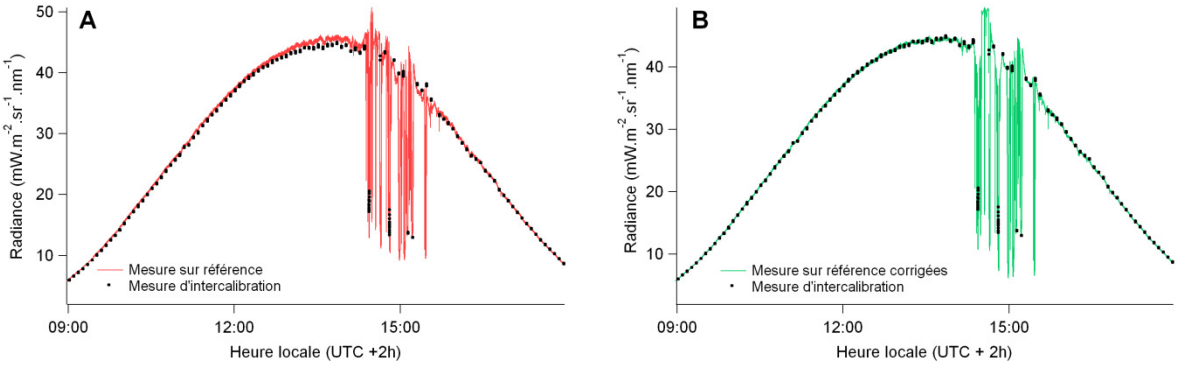


Figure V.23 *Correction des effets de l'orientation de la référence lors des mesures d'intercalibration. A : Cycles diurnes obtenus en position de mesure par défaut (en rouge) et en position d'intercalibration (en noir). B : En vert cycle diurne en position de mesure par défaut après correction des effets d'orientation.*

La correction de cet effet se fait grâce au même processus que l'intercalibration des spectromètres: on détermine, pour chaque orientation de l'instrument, la relation liant les mesures faites dans la position par défaut aux mesures faites en position d'intercalibration. Puis applique cette correction aux mesures sur la référence.

- **Correction des effets atmosphériques**

Nous avons discuté dans le CHAPITRE III des effets atmosphériques sur la mesure de la fluorescence. TriFLEX est destiné à l'observation de couverts, il sera donc utilisé à une hauteur permettant d'avoir une tache au sol suffisante.

TriFLEX a été utilisé sur la grue d'Avignon à une hauteur d'environ 20 m. L'altitude étant très faible nous n'avons tenu compte, pour la correction des effets atmosphériques, que des effets d'absorption. La référence est à l'altitude du capteur et la cible est au niveau du sol, il y a donc deux effets à compenser. Il faut d'une part compenser la réabsorption sur le trajet végétation-capteur et d'autre part compenser le manque d'absorption puisque la référence est au niveau du capteur et non au sol. Les deux termes sont calculés grâce à MODTRAN 4 comme indiqué au CHAPITRE III. In fine, pour un capteur placé à 20 m de haut, la correction des effets atmosphériques induit une modification de la fluorescence de l'ordre de 5% dans la bande O_2-A et de 1% dans la bande O_2-B pour une fluorescence de l'ordre de 0.5 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$.

- **Calcul de la fluorescence**

Le calcul de la fluorescence se fait en utilisant les algorithmes décrits dans le CHAPITRE II. On utilise quatre canaux de mesure pour calculer la fluorescence à 687 nm et trois canaux de mesure pour calculer la fluorescence à 760 nm. A 687 nm le modèle de réflectance utilisé est un polynôme du second ordre et à 760 nm on utilise le modèle linéaire.

5.4 Campagne de mesure, été 2008

La campagne de mesure de 2008 a été la première campagne de mesure que nous avons menée sur la plateforme d'Avignon avec l'instrument TriFLEX. Elle a été pensée en premier lieu comme une campagne de test pour TriFLEX et la plateforme de mesure. Elle nous a d'ailleurs permis de faire évoluer de manière significative l'instrument. Elle a également été pensée comme une campagne exploratoire sur la problématique du passage de la feuille au couvert.

L'un des objectifs étant d'étudier les effets de la structure de la végétation apparaissant lors de la mesure au niveau du couvert, les mesures ont été faites sur trois types de cultures : du sorgho grain (*sorghum solarius*), du sorgho fourrager et du soja. Ces cultures ont des structures relativement différentes : le sorgho est plutôt érectophile alors que le soja est plutôt planophile. Le sorgho grain est quant à lui moins dense que le sorgho fourrager.

La campagne de 2008 s'est étalée du 31 juillet au 16 septembre 2008 ce qui représente 48 jours de mesures en continu. La continuité des mesures nous a permis de mettre en place deux expérimentations sur les cultures de sorgho. Le sorgho grain étant arrivé à maturité au début de la campagne nous avons décidé d'induire un stress hydrique en coupant l'arrosage et d'en observer les effets sur les signaux de fluorescence.

Le sorgho fourrager lui, a été planté en début de campagne, nous avons donc pu suivre l'évolution des signaux au cours de sa croissance.

5.5 Sorgho grain : Stress hydrique

5.5.1 Le matériel végétal

La première culture étudiée a été la parcelle de sorgho grain. Le sorgho grain a été planté le 16 mai 2008 (doy 137 (Day Of Year : jour de l'année)) dans la parcelle Est (voir *Figure V.24*). Les rangs ont été orientés selon un axe Nord-Sud avec une distance inter-rangs de 0.45 m. La densité résultante est de 22.5 $plants.m^{-2}$. Au début de la campagne de mesure le sorgho grain avait atteint sa hauteur maximale (hauteur moyenne : 1.20 m). Afin de déclencher un stress hydrique l'arrosage,

régulier jusque là, a été totalement interrompu à partir du 18 juillet (doy 200). Les premières mesures ont eu lieu à partir du 31 juillet (doy 213).

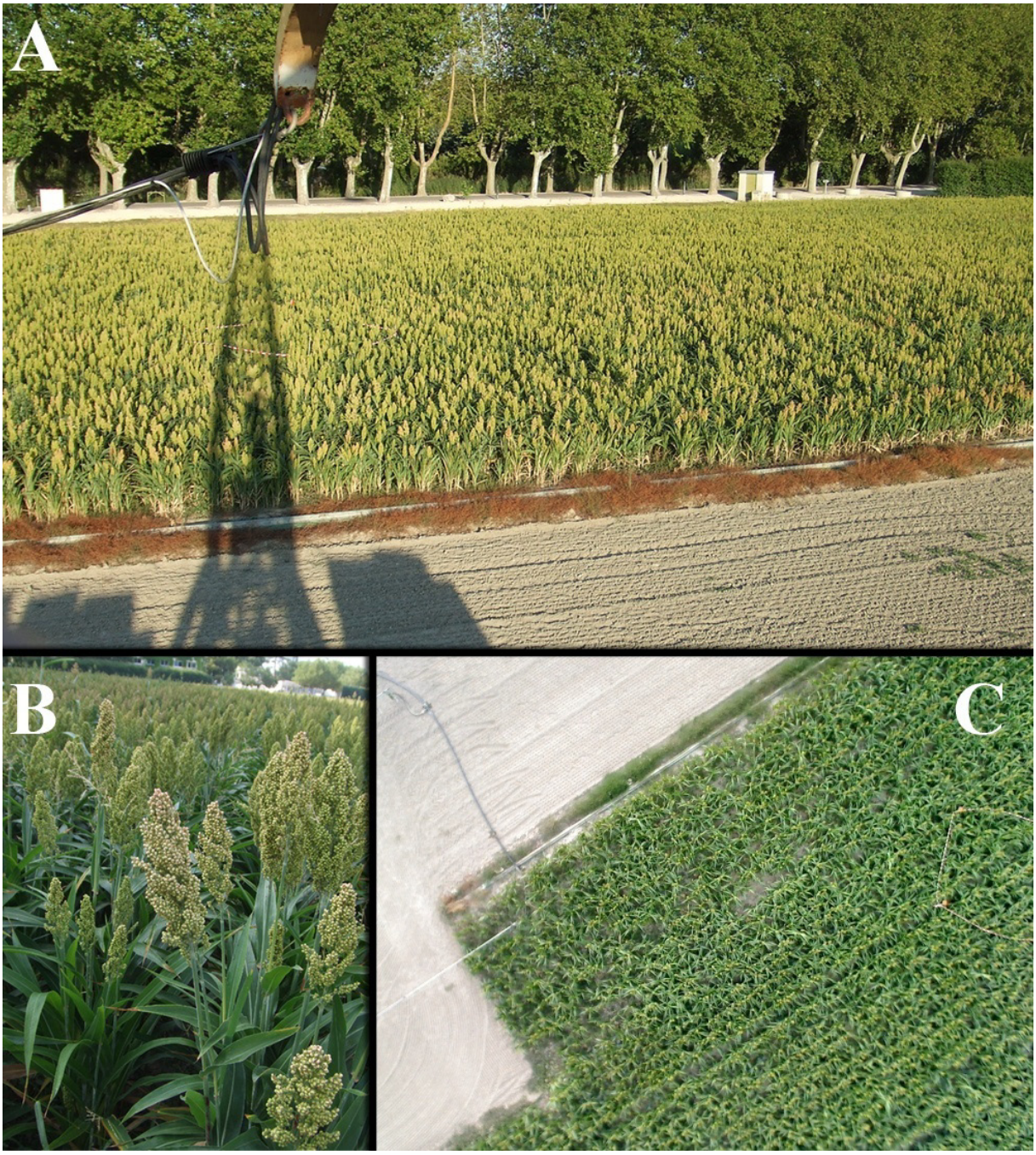


Figure V.24 *Parcelle de sorgho grain. A : vue depuis le pied de la grue. B : détail d'un plant de sorgho grain. C : vue depuis TriFLEX, au sommet de la grue.*

5.5.2 Les mesures journalières

TriFLEX mesure chaque jour les flux dans les différents canaux. A titre d'illustration, nous présentons dans la *Figure V.25* les radiances telles qu'elles ont été mesurées par TriFLEX le 1er aout 2008 sur la parcelle de sorgho grain. Comme le montre la figure, cette journée est caractérisée par une forte présence de nuages. On voit clairement sur ces flux que la profondeur obtenue à 760 nm est bien plus importante que la profondeur mesurée à 687 nm ; les profondeurs sont données dans la *Figure V.26*. On voit sur la *Figure V.26*, les variations de profondeurs avec la luminosité (PAR). Le cycle diurne classique d'une journée au ciel dégagé est ici fortement modifié par la présence des nuages. Les profondeurs et le PAR sont en anticorrélation traduisant l'augmentation du chemin optique moyen lors de la présence de nuages (PAR faible) et sa diminution lorsqu'ils disparaissent (PAR plus élevé).

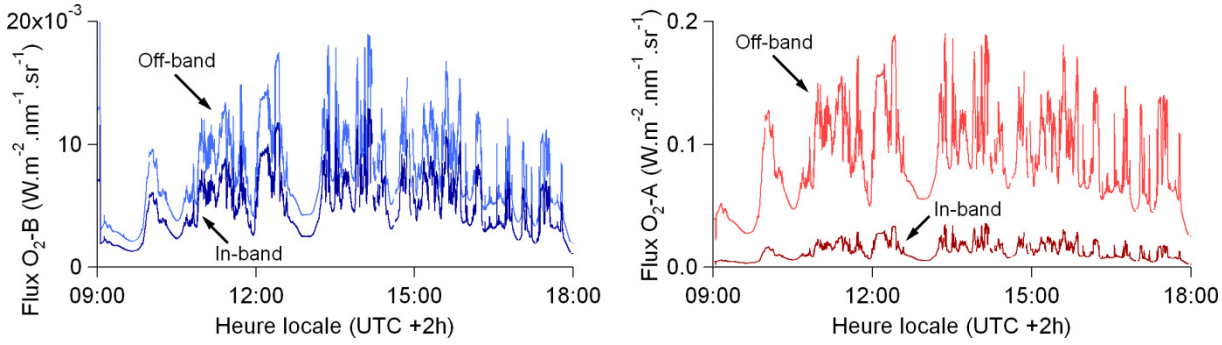


Figure V.25 *Radiances mesurées par TriFLEX sur la parcelle de sorgho grain le 1er août 2008 (Doy 214) dans les deux bandes de l'oxygène. Canaux au bord droit et au fond.*

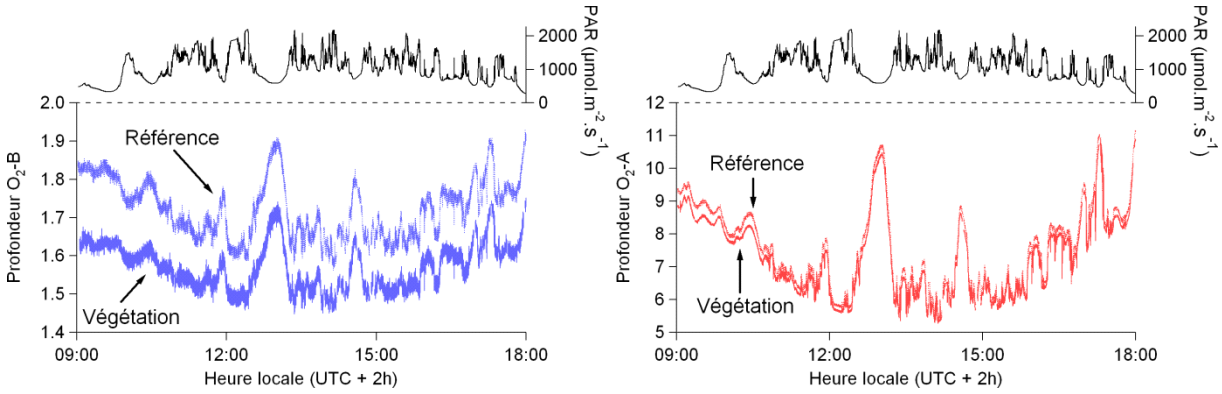


Figure V.26 *Profondeur des bandes de l'oxygène mesurées sur la référence et sur la parcelle de sorgho grain par TriFLEX le 1er août 2008 (Doy 214). Le PAR est également indiqué en noir.*

Un des produits de TriFLEX sont les flux de fluorescence. Les flux obtenus pour cette journée du 1er aout 2008 sont donnés dans la *Figure V.27*. Le flux de fluorescence mesuré dans la bande O_2-B est noté Fs687 et le flux de fluorescence mesuré dans la bande O_2-A est noté Fs760. Dans la bande O_2-B le flux de fluorescence varie entre 0.13 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ pour un PAR de 350 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$ et 1.4 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ pour un PAR de 2200 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$. Dans la bande O_2-A le flux de fluorescence varie de 0.2 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ pour un PAR de 360 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$ à 2 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ pour un PAR de 2200 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$.

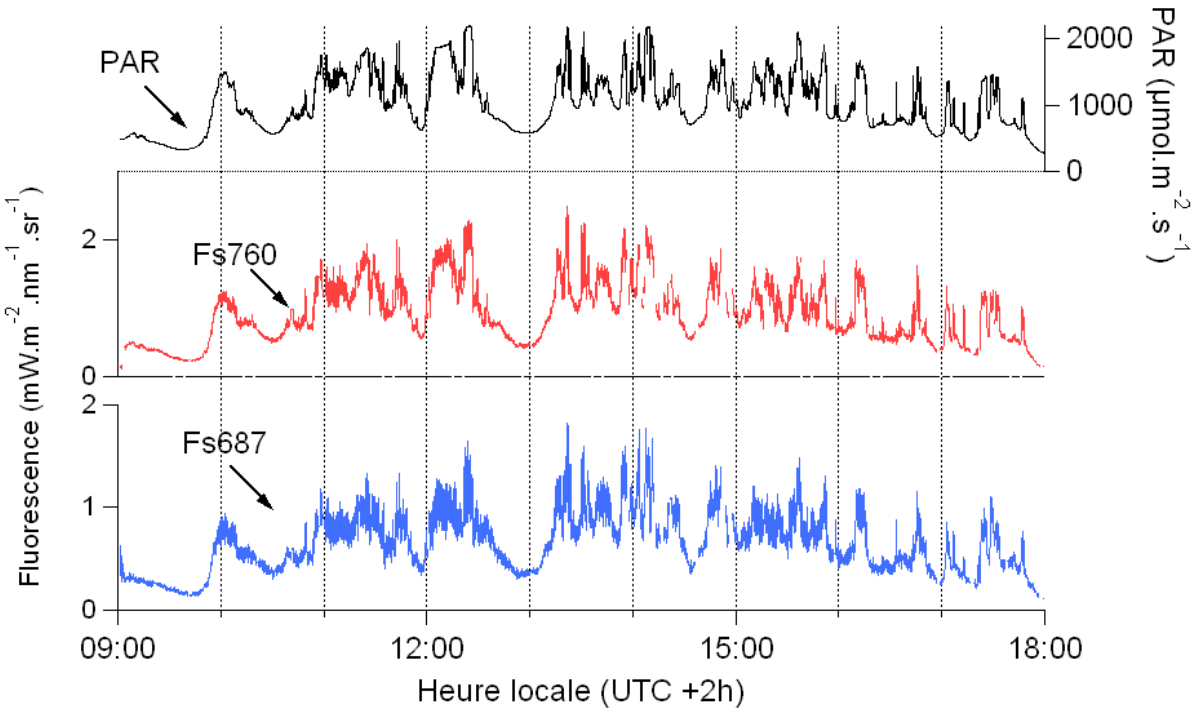


Figure V.27 *Flux de fluorescence mesuré par TriFLEX le 1er août 2008 (Doy 214) sur la parcelle de sorgho grain. Les flux de fluorescence sont notés Fs687 pour le flux de fluorescence mesurée dans la bande O_2-B et Fs760 pour le flux de fluorescence mesuré dans la bande O_2-A.*

TriFLEX nous donne le flux de fluorescence. Le flux de fluorescence dépend de l'éclairement, de la fraction de cet éclairement qui est absorbé et du rendement de fluorescence. Ce qui s'exprime sous la forme suivante :

$$F_s = \Phi_f \times fAPAR \times PAR \qquad (V.4)$$

Avec F_s, flux de fluorescence, Φ_f rendement de fluorescence et $fAPAR$ coefficient représentant la fraction de PAR absorbée (valeur comprise entre 0 et 1). Le $fAPAR$, lien entre l'éclairement (PAR) et la quantité de lumière absorbée (le APAR), traduit la capacité de la végétation à absorber la lumière. Cette capacité d'absorption dépend essentiellement de la manière dont la végétation intercepte le rayonnement : de sa structure.

Dans la littérature, on se réfère le plus souvent au rendement de fluorescence qui tient directement compte de la quantité de lumière absorbée. Cependant, en mesure passive, il n'est pas possible d'avoir accès à ce rendement. La grandeur mesurée est le flux de fluorescence et pour en faire un rendement il faudrait connaître la part de rayonnement absorbée : pouvoir mesurer le APAR ; ce qui n'est pas directement possible à distance. Pour faire une telle mesure il est nécessaire d'avoir des instruments au sol permettant d'estimer la part de rayonnement absorbée par la végétation.

Pour estimer le rendement de fluorescence il a été proposé de diviser le flux de fluorescence par la radiance mesurée au bord de la bande d'absorption O_2-B sur la végétation. Cette longueur d'onde étant une longueur d'onde bien absorbée par la végétation elle devrait donc permettre de tenir compte à la fois de l'interception de la lumière et de l'intensité de l'éclairement (de manière inverse puisqu'il s'agit d'un flux réfléchi et non réellement absorbé) (Moya et al., 1999, Moya et al., 2003, Louis et al., 2005). Dans la suite nous utiliserons donc ce que l'on appellera les fractions de fluorescence

(FF : Fluorescence Fraction). Les fractions de fluorescence s'obtiennent en divisant le flux de fluorescence par la radiance de la végétation à 685 nm. On écrit :

$$FF687 = \frac{Fs687}{L(685)} \qquad (V.5)$$

et

$$FF760 = \frac{Fs760}{L(685)} \qquad (V.6)$$

Les fractions de fluorescence sont appelées ainsi car elles représentent la quantité de fluorescence par rapport au flux lumineux réfléchi par la végétation à 685 nm.

Les fractions de fluorescence obtenues le 1er aout 2008 sur la parcelle de sorgho grain sont présentées dans la *Figure V.28*. La fluorescence mesurée dans la bande O_2-B représente en moyenne 7 % du flux réfléchi par la végétation. On observe une très bonne corrélation des deux fractions de fluorescence dans les changements lumineux. On observe également que les fractions de fluorescence sont majoritairement en corrélation négative avec le PAR contrairement au flux de fluorescence.

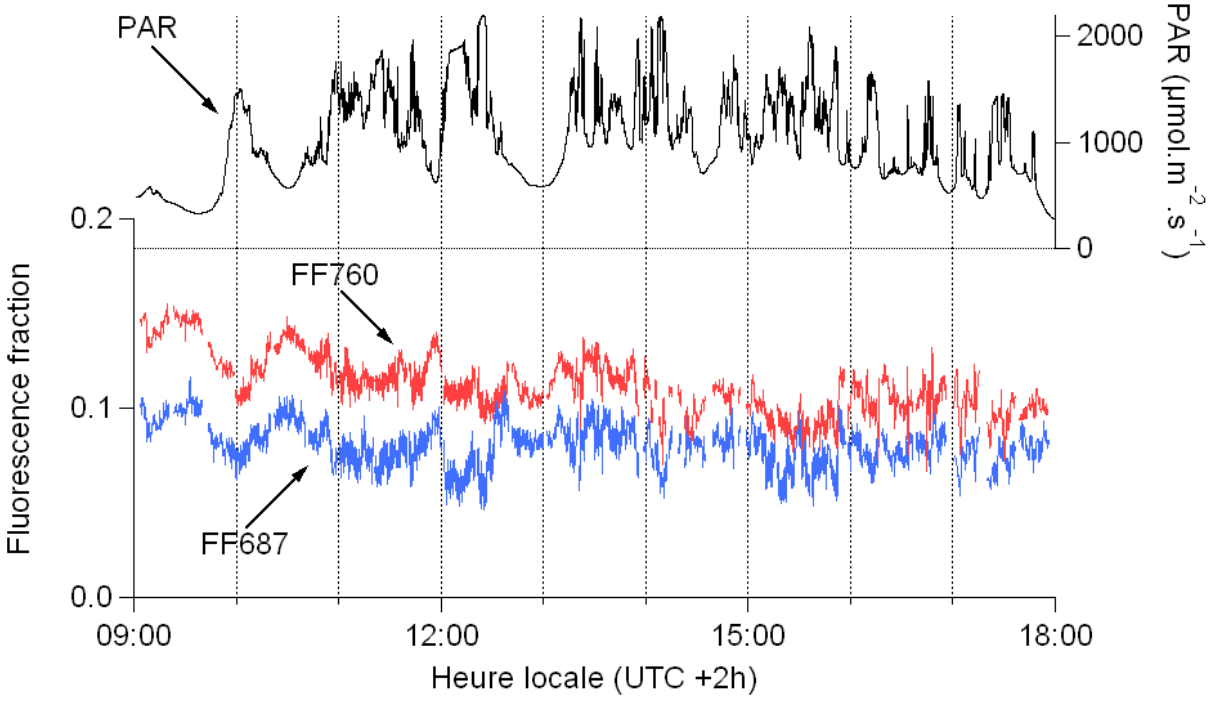


Figure V.28 *Fractions de fluorescence obtenue par TriFLEX le 1er aout 2008 (Doy 214) sur la parcelle de sorgho grain.*

Dans la suite nous utiliserons donc les fractions de fluorescence pour rendre compte de l'évolution des signaux de fluorescence sur la culture de sorgho.

5.5.3 Séries temporelles

Pour suivre l'évolution des signaux optiques mesurés par TriFLEX, nous avons généré des séries temporelles constituées d'une valeur par jour. Afin de rester dans des conditions similaires d'un jour à l'autre certaines précautions sont prises : il faut s'assurer que les conditions d'illumination d'un jour à l'autre sont similaires. Pour cela on utilisera uniquement les mesures effectuées par TriFLEX autour du midi solaire (pour cette étude entre 13h20 et 14h05, heure locale). Dans cet intervalle temporel on va choisir une fenêtre d'une minute durant laquelle les données seront moyennées. Cette fenêtre est choisie de manière à ce que le PAR moyen soit de 1900 ± 100 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$. De cette manière on s'assure que les conditions d'illumination sont similaires. La restriction sur l'heure permet de s'assurer que l'angle d'éclairement est le même. La contrainte sur le PAR permet de s'assurer que l'intensité de l'éclairement est comparable d'un jour à l'autre. La *Figure V.29* présente l'évolution des signaux temporels mesurés par TriFLEX : les fractions de fluorescence mais également le NDVI et le PRI. Le NDVI est obtenu à partir des mesures de TriFLEX en posant :

$$NDVI = \frac{\rho(758) - \rho(685)}{\rho(758) + \rho(685)} \qquad (V.7)$$

Avec $\rho(\lambda)$ la réflectance à la longueur d'onde λ.

Le PRI est quant à lui obtenu en écrivant :

$$PRI = \frac{\rho(531) - \rho(570)}{\rho(531) + \rho(570)} \qquad (V.8)$$

Le PAR reporté sur la *Figure V.29* est le PAR moyen de la journée de mesure (commençant à 9h et se terminant à18h). Le contenu en chlorophylle indiqué a été obtenu à l'aide d'un SPAD 502 (Minolta, Ramsey, NJ). La mesure donnée est une moyenne effectuée sur une série de feuilles représentative de l'état général de la parcelle.

On voit sur la *Figure V.29* que les fractions de fluorescence dans les deux bandes de l'oxygène restent très corrélées tout au long de la campagne. Elles tendent à décroître jusqu'au jour 243. Ensuite, sur les deux derniers jours de mesures, on observe une forte croissance : les fractions de fluorescence retrouvent une valeur proche de leur valeur en début de campagne. Le PRI suit la même dynamique. Le NDVI de son côté ne montre que de très faibles variations, il reste situé à une valeur d'environ 0.8. Ce comportement est cohérent avec les mesures de concentration en chlorophylle qui n'indiquent aucun changement significatif du contenu en chlorophylle au niveau des feuilles. Le contenu en chlorophylle moyen est de 48 $\mu g.cm^{-2}$.

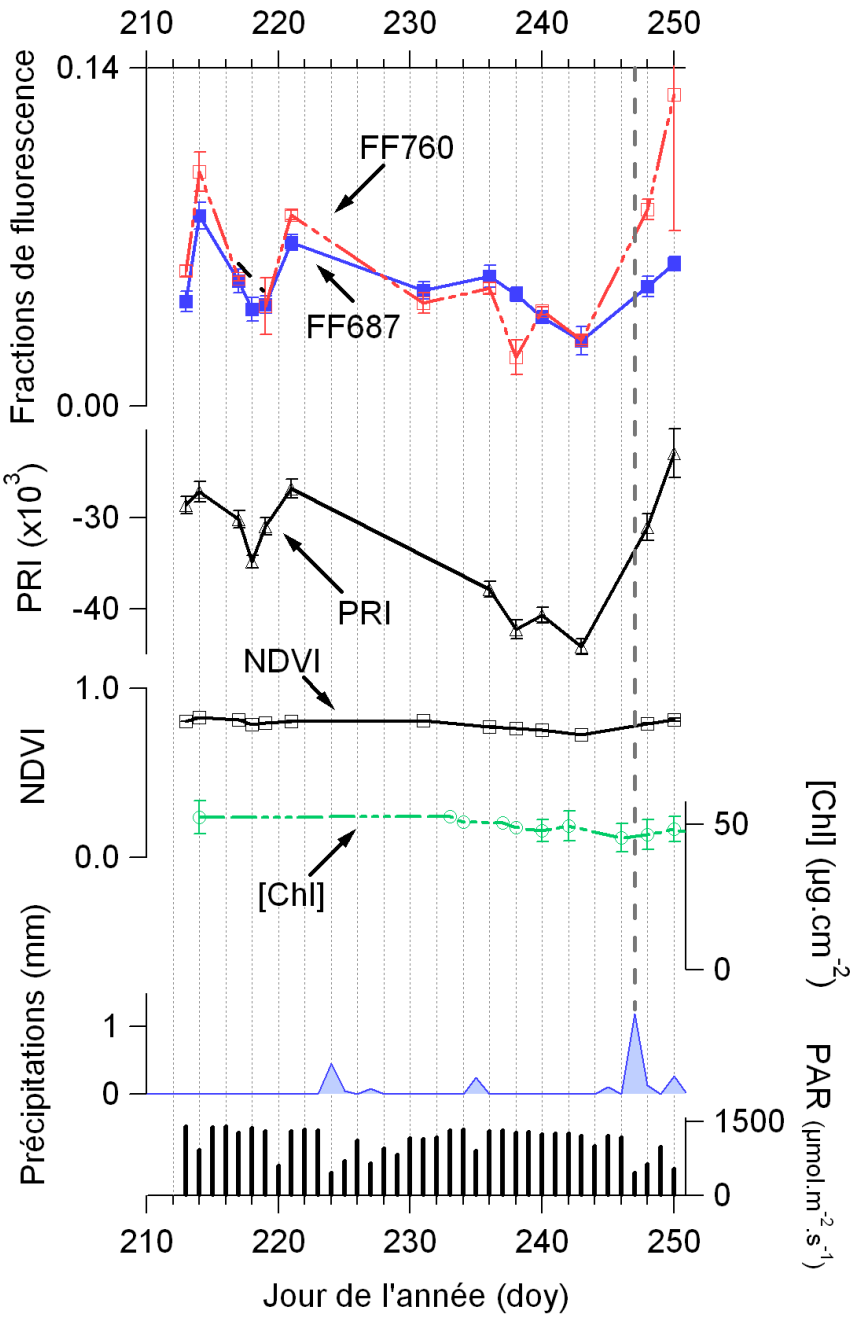


Figure V.29 *Evolution des signaux mesurés par TriFLEX lors de la campagne de mesures de l'été 2008 sur une parcelle de sorgho grain (sorghum solarius). Fractions de fluorescence mesurées dans les deux bandes de l'oxygène, PRI, NDVI, concentration en chlorophylle mesurée à l'aide d'un SPAD 502 (Minolta, Ramsey, NJ), précipitations de la journée et PAR moyen. Les valeurs des signaux optiques sont des moyennes sur une minute et les barres d'erreur sont les déviations standard.*

5.5.4 Fluorescence en fonction de l'éclairement

Les séries temporelles permettent de voir l'évolution du signal de fluorescence d'un jour à l'autre dans des conditions similaires. Cependant, TriFLEX effectuant des mesures tout au long de la journée, on peut également exploiter ces données journalières pour essayer de détecter un stress. Nous avons donc choisi trois jours de mesures représentant trois états caractéristiques des séries temporelles. Le jour 214 représentant le début des mesures, le jour 243 pour lequel les valeurs de fractions de fluorescence et de PRI sont minimales. Le jour 248 correspond à la fin de campagne, lorsque les signaux semblent retrouver leur valeur initiale. Pour ces trois jours nous avons étudié l'évolution du flux de fluorescence en fonction du PAR. La *Figure V.30* présente cette évolution pour les données acquises l'après midi entre 14 h et 17 h.

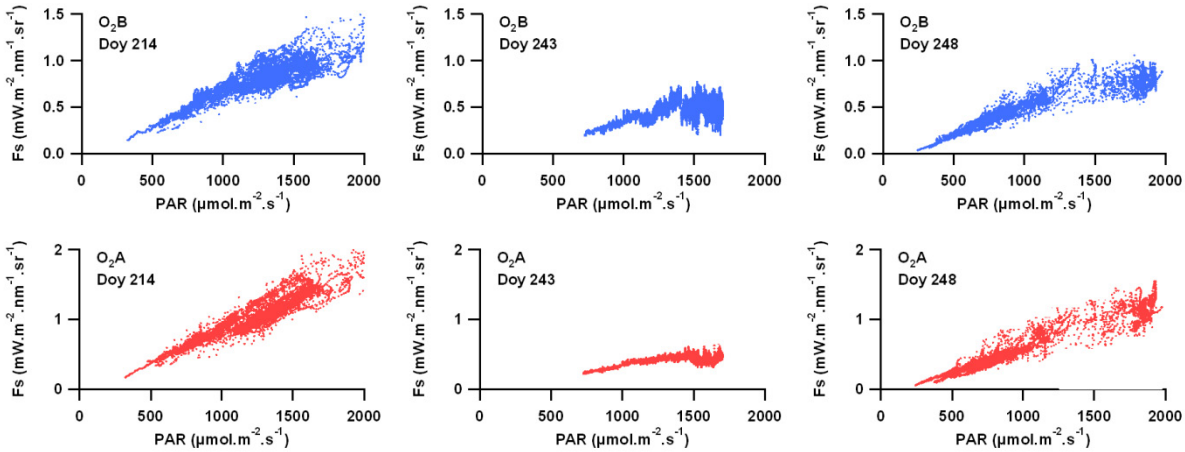


Figure V.30 *Flux de fluorescence en fonction du PAR pour trois jour de mesures. Le jour 214, début des mesures, le jour 243 au maximum du stress hydrique et au jour 248 après un épisode pluvieux.*

On voit sur cette figure que le flux de fluorescence est positivement corrélé au PAR : il augmente dans les deux bandes quand le PAR augmente. Cependant ces trois jours présentent des caractéristiques très différentes. Si malgré la dispersion des mesures pour des PAR supérieurs à 1000 µmol.m^{-2}.s^{-1} la relation est quasi linéaire le jour 214, elle ne l'est plus du tout pour le jour 243 au cours duquel on observe une saturation du flux de fluorescence pour les PAR supérieurs à 1300 µmol.m^{-2}.s^{-1}. Cette relation redevient plutôt linéaire au dernier jour.

5.5.5 Discussion

Le PRI (Gamon et al., 1992) est un indice basé sur les changements de réflectance de la partie verte du spectre : on mesure la variation de la réflectance autour de 531 nm en fonction de la réflectance à 570 nm, utilisée comme référence. Gamon et al., 1990 ont été les premiers à montrer que ces variations rapides de la réflectance en réponse à des variations de lumière incidente pouvaient être détectées à distance de manière passive. Les causes physiologiques de ce changement de réflectance ont commencé à être étudiées dans les années 1990. Ce changement de réflectance a été associé à deux mécanismes impliqués dans la dissipation d'énergie par voie thermique. L'apparition d'un gradient de pH au niveau de la membrane des thylakoïdes induit des changements rapides dans l'état d'agrégation des complexes chlorophylle-protéine des antennes qui provoquent une variation de l'absorbance centrée sur la plage 531-535 nm. Un deuxième phénomène, le changement de l'état d'époxidation des xanthophylles et leur accumulation, est accompagné de variations de l'absorbance centrées sur la plage 505-515 nm (Morales et al., 1990, Ruban et al., 1993). Ces variations d'absorbance induisent une variation de la réflectance dans une large bande autour de 531 nm.

Au niveau du couvert, des changements rapides de réflectance à 531 nm en réponse à des variations rapides du flux lumineux ont été observés par des mesures passives en utilisant des instruments dédiés (Evain et al., 2004, Louis, 2004, Peguero-Pina et al., 2008). Evain et al., 2004, a montré l'existence de deux phases de variation en réponse à une variation rapide de la lumière incidente : une phase rapide durant moins de deux secondes et une phase lente durant plusieurs minutes. La phase rapide est attribuée en grande partie à une contraction des chloroplastes en réponse à une augmentation du gradient de pH. La phase lente est attribuée au changement d'état d'époxidation des xanthophylles. Il faut également signaler qu'au niveau du couvert, la mesure du PRI est fortement influencée par la structure de la végétation. La séparation des effets dus à la modification de la structure de la végétation et ceux induits par la physiologie est un sujet d'étude actuel (Hilker et al., 2008, Suarez et al., 2008).

La composante principale du PRI est reliée à la composante du quenching non-photochimique (NPQ, Non-Photochemical Quenching) liée au cycle des xanthophylles, ce qui en fait un outil intéressant pour la détection des variations dynamiques du système de photo-protection. Evain et al., 2004, ont également montré que le PRI était un bon indicateur de la fermeture des stomates, mécanisme de protection de la plante déclenché en cas de stress hydrique permettant de limiter la déperdition en eau.

Entre le premier jour de mesure et le jour 243, TriFLEX détecte une baisse significative du PRI. Dans le même temps, la structure du couvert n'a que très peu changé. Cette forte décroissance peut donc être interprétée comme la conséquence de l'augmentation de l'activité des mécanismes de dissipation d'énergie. Augmentation causée par la fermeture des stomates due au stress hydrique (fermeture entraînant ainsi l'arrêt de l'assimilation de CO_2). Cette interprétation est renforcée par le fait qu'après l'épisode pluvieux, le PRI retrouve rapidement une valeur proche de sa valeur initiale, ce qui indiquerait une réversion du stress hydrique.

Au niveau de la feuille, divers travaux ont montré une décroissance de la fluorescence stationnaire aux alentours du midi solaire dans des cas de stress hydrique (Flexas et al., 2000, Flexas et al., 2002). Cette décroissance, corrélée à une décroissance du PRI, est attribuée à l'augmentation du NPQ résultant de la fermeture des stomates (Evain et al., 2004). C'est ce que l'on observe sur la *Figure V.29* : les fractions de fluorescence diminuent en corrélation avec le PRI. En fait, il a été montré (Cerovic et al., 1996, Flexas et al., 2000, Flexas et al., 2002) qu'en l'absence de stress hydrique, les variations de fluorescence suivent les variations de la lumière incidente : il y a une corrélation positive entre PAR et fluorescence. C'est ce que l'on voit sur la *Figure V.30* pour le jour 214. En cas de stress hydrique il a été montré que la fluorescence n'était plus constamment corrélée avec la luminosité mais avait tendance à saturer. Au fur et à mesure que le stress hydrique se fait plus fort, le maximum atteint par la fluorescence et la valeur de PAR pour laquelle il est atteint diminuent. C'est ce que l'on observe sur la *Figure V.30* : pour le jour 243, la fluorescence maximale atteinte, autour de 0.5 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ pour la bande O_2-B, est plus faible que pour le jour 214 (~1 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ dans la bande O_2-B) et la saturation commence autour de 1300 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$. Pour le jour 248, la réversion n'est pas totale, on a encore une légère saturation de la fluorescence, en particulier dans la bande O_2-B et les valeurs maximales atteintes, 0.7 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ pour la bande O_2-B, sont un peu en dessous des valeurs atteintes durant le jour 214.

Intéressons-nous à présent à l'évolution des fractions de fluorescence. Les données présentées sont prises pour un PAR constant et dans des conditions d'éclairement équivalentes d'un jour à l'autre. Nous avons de plus observé que la structure de la parcelle de sorgho grain n'a pas changé de manière significative tout au long de l'expérimentation. Tout au plus a-t-il été observé un léger enroulement des feuilles de sorgho au plus fort du stress. Dans de telles conditions les variations de fluorescence

(ou de fractions de fluorescence) traduisent un changement du rendement de fluorescence. La *Figure V.29* montre une décroissance des fractions de fluorescence corrélée au PRI ainsi qu'une augmentation après l'épisode pluvieux. Cela indique que ce nouvel indice rend compte du stress hydrique.

Au cours de la première campagne de mesures utilisant la plateforme d'Avignon et TriFLEX, nous avons donc observé l'évolution des signaux de fluorescence durant un stress hydrique suivi d'une réversion après un épisode pluvieux. Les résultats indiquent clairement que les fractions de fluorescence sont capables de rendre compte de ce stress hydrique.

La corrélation observée entre le PRI et les fractions de fluorescence peut poser la question de l'utilité de faire des mesures de fluorescence en plus des mesures de PRI. En effet le PRI est un indice beaucoup plus facile à obtenir car directement issu de la réflectance de la végétation. De plus il semble donner les mêmes indications que la fluorescence. En effet, il a été montré que le PRI corrèle avec différents paramètres de fluorescence, par exemple $\Delta F/Fm'$ mais également avec le quenching non-photochimique, l'activité de photosynthèse ou la conductance stomatique (Moya et Flexas, 2010). Cependant le PRI ne peut être associé directement à la photosynthèse. Les valeurs trouvées dans la littérature font état de variations de PRI comprises entre -0.04 et 0.2 pour des variations d'état de dépoxidation des xanthophylles similaires. Les origines de ces variations ne sont pas encore bien comprises, bien qu'il soit établi que l'une d'elles vienne de la différence de structure d'un couvert à un autre (Suarez et al., 2008).

La fluorescence de son côté, est un paramètre plus difficile à obtenir : il requiert une meilleure résolution spectrale et un meilleur SNR. La fluorescence étant un phénomène de désexcitation ayant lieu après absorption de la lumière par la plante, elle peut sembler plus liée à la photosynthèse. Ceci est certainement le cas pour la fluorescence variable. Cependant, la mesure passive ne donne accès qu'à la fluorescence stationnaire qui dépend à la fois du rendement de fluorescence et de la lumière absorbée. La fluorescence a cependant quelques avantages : tout d'abord la fluorescence à 760 nm n'est pas réabsorbée au sein de la végétation et pourrait être utilisée pour estimer le rayonnement absorbé par la végétation. C'est ce que nous verrons dans la section suivante. En mesurant la fluorescence à deux longueurs d'onde, 687 nm et 760 nm, on peut calculer le rapport des fluorescences qui donne, au niveau de la feuille, une information sur le contenu en chlorophylle (Lichtenthaler et Rinderle, 1988). Ces deux longueurs d'onde n'étant pas équivalentes d'un point de vue de l'interaction lumière-végétation, la mesure des deux fluorescences est susceptible de nous donner des informations sur la structure du couvert ; informations qui peuvent être complémentaires à celles portées par le PRI ou pouvant servir à son interprétation.

Notre avis est qu'il est important de mesurer à la fois le PRI et la fluorescence puisque ces paramètres représentent différents aspects d'un même sujet d'étude. Les informations peuvent être complémentaires et permettre une meilleure interprétation de l'un ou l'autre des paramètres.

5.6 Sorgho fourrager : Croissance

La plupart des études utilisant la fluorescence utilisent en fait le rendement de fluorescence : le fait que le rendement de fluorescence stationnaire reste pratiquement constant sous des éclairements variables est caractéristique d'un système végétal en bonne santé (Havaux et al., 1991). Flexas et al., 2000, ont effectivement observé que les variations du rendement de fluorescence au niveau de la feuille étaient faibles. Au contraire, un rendement de fluorescence diminuant avec les forts éclairements pourra être utilisé comme indicateur de stress.

Les systèmes de mesures passifs ne sont pas capables de mesurer un rendement de fluorescence. Ils ne peuvent qu'estimer le flux de fluorescence. Pour un système sans contrainte, cette mesure du flux de fluorescence pourrait apporter une information supplémentaire. Moya et al., 2003, Moya et al., 2004 ont suggéré que la fluorescence pourrait être utilisée comme un indicateur de la biomasse : le rendement de fluorescence étant quasi constant, le flux de fluorescence porte une information directe sur le flux lumineux absorbé. La relation liant le flux de fluorescence au rendement de fluorescence et au flux lumineux absorbé s'écrit :

$$F_s = \Phi_f \, \mathrm{APAR} \qquad (V.9)$$

En connaissant Φ_f et en mesurant F_s on peut ainsi accéder au PAR absorbé, le APAR. Si l'on observe un couvert ne subissant pas de contraintes (hydriques, minérales,…) on peut également simplement supposer que Φ_f est constant sans le connaître explicitement, auquel cas les variations de F_s traduisent directement une variation du APAR.

Ce sont ces réflexions qui ont motivé la conduite de cette expérimentation : le suivi de la croissance du sorgho fourrager devait permettre d'évaluer les variations des signaux de fluorescence lors d'un changement important de biomasse.

5.6.1 Le matériel végétal

Le suivi de croissance s'est fait sur une culture de sorgho fourrager (*S. vulgare*, *S. bicolor* (L.)). Le sorgho a été planté le 31 juillet 2008 (jour 213) sur une surface de 20 m × 20 m dans la parcelle Est (voir *Figure V.31*), avec une densité de 800 plants.m^{-2}. Afin d'assurer des conditions de croissance optimales, le sorgho a été régulièrement arrosé tout au long de la campagne.

Les mesures ont eu lieu du 31 juillet au 7 septembre 2008. Elles se sont interrompues à cause des mauvaises conditions météorologiques : de fortes précipitations conjuguées à un vent important ont empêché les mesures pendant plusieurs jours et ont considérablement endommagé la structure du couvert de sorgho. Les mesures faites après le retour du beau temps auraient été difficilement interprétables pour l'objectif de ces mesures. Nous avons donc choisi d'interrompre la campagne à ce moment là.

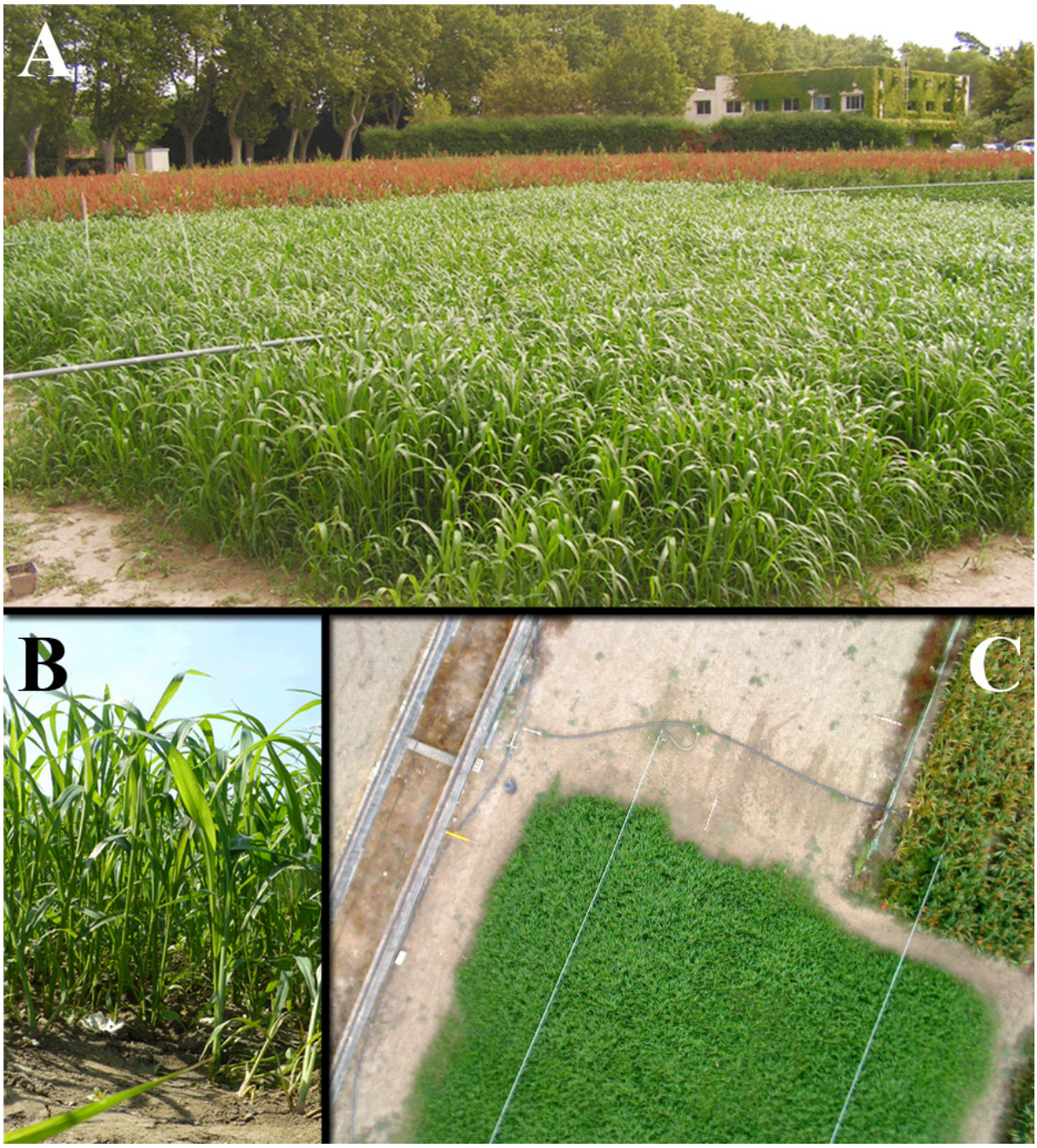


Figure V.31 *Parcelle de sorgho fourrager. A : vue depuis le pied de la grue. B : détail d'un plant de sorgho fourrager. C : vue depuis TriFLEX, au sommet de la grue.*

5.6.2 Mesure complémentaires

Les principales mesures faites sur le sorgho fourrager sont les mesures faites par TriFLEX. Plusieurs mesures complémentaires ont également été faites tout au long de la croissance du sorgho.

Le rendement photochimique du PSII a été mesuré chaque jour avec un PAM (Pulse Amplitude Modulation) (PAM-2000, Walz, Effeltrich, Germany). L'estimation du rendement photochimique du PSII, Φ , s'obtient en écrivant (Genty et al., 1989) :

$$\Phi = \frac{(F'_m - F_t)}{F'_m} = \frac{\Delta F}{F'_m} \qquad (V.10)$$

Ou F_t est la fluorescence stationnaire (une feuille adaptée à la lumière) et F'_m est la fluorescence maximale obtenue en superposant à la lumière naturelle une impulsion lumineuse saturante. Afin que les mesures soient représentatives de l'état de la végétation, elles ont été faites dans le champ, en lumière naturelle, en prenant soin de ne changer ni la position ni l'orientation des feuilles choisies. Trois séries de mesures sont faites chaque jour, à différents moments de la journée. La mesure se fait sur une série de feuilles représentatives de l'éclairement du couvert : différentes inclinaisons et différentes hauteurs dans le couvert. Ces feuilles sont choisies à proximité du champ de vue de TriFLEX. Le PAR vu par les feuilles choisies était mesuré simultanément à l'aide d'un quantum-mètre.

Le contenu en chlorophylle de feuilles représentatives de la parcelle est régulièrement mesuré en utilisant un SPAD ; nous mesurons également la hauteur moyenne du couvert.

Le LSF est utilisé pour suivre l'évolution du spectre d'émission de fluorescence au niveau de la feuille durant la croissance du sorgho.

5.6.3 Résultats – Au niveau du couvert

Le suivi de la croissance du sorgho fourrager a duré une quarantaine de jour. TriFLEX n'a cependant pas mesuré chaque jour sur le sorgho fourrager puisque c'est durant la même période qu'a été effectué le suivi du sorgho grain. Nous reportons sur la *Figure V.32* une série de photos prises par TriFLEX illustrant le développement du couvert depuis la date de plantation. On voit que la couverture complète de la parcelle est atteinte entre le 28ème jour et le 31ème jour.

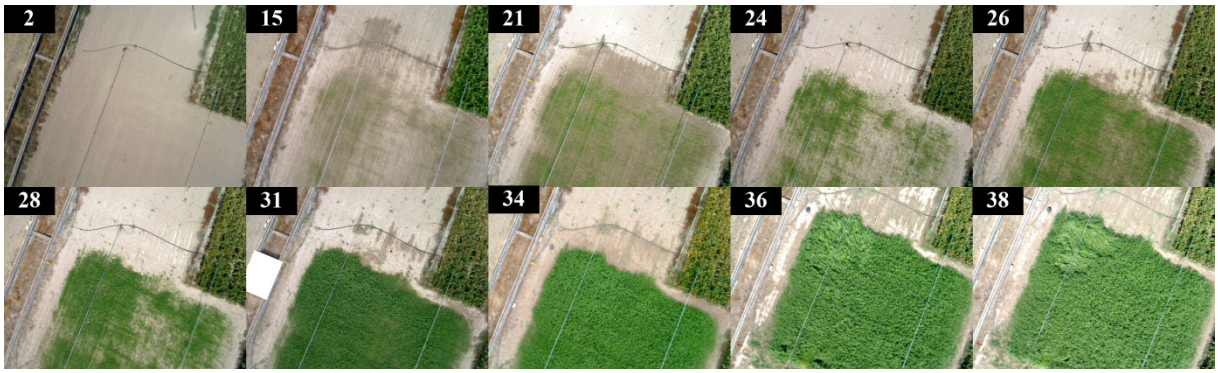


Figure V.32 *Evolution de la parcelle de sorgho fourrager durant la campagne de mesure. Photos prises par la Webcam intégrée à TriFLEX. Le numéro correspond au nombre de jours depuis la date à laquelle a été planté le sorgho fourrager.*

L'objectif de cette série de mesures est de suivre l'évolution de la fluorescence en fonction du développement du couvert du sorgho. Toutes choses égales par ailleurs, l'évolution de la fluorescence devrait traduire l'évolution de la quantité de lumière absorbée au sein du couvert, le APAR. «Toutes chose égales par ailleurs » signifie dans ce cas précis qu'il faut s'assurer que la végétation soit dans des conditions de croissance sans contrainte : qu'elle ne subisse aucun stress. Dans cet objectif, le sorgho a été arrosé régulièrement. Les jours d'arrosage sont donnés en bas de la *Figure V.35*. Dans de telles conditions, pour un éclairement donné, le rendement de fluorescence au niveau du couvert ne doit pas varier. C'est pour s'assurer que ces conditions étaient remplies que la fluorescence stationnaire et le rendement photochimique ont été mesurés tout au long de la campagne avec le PAM. Ainsi, pour chaque jour nous pouvons tracé une relation entre la fluorescence stationnaire et le PAR. La *Figure V.33* donne ces relations pour deux jours de la campagne de mesure : le 28ème jour, pendant le développement du sorgho, et le 38ème, proche de la fin des mesures. Ces deux jours sont représentatifs de ce qui a été observé pour les autres jours de mesure et témoignent de la stabilité des relations établies.

Les fluorescences stationnaires étant obtenues en appliquant la même excitation et dans les mêmes conditions expérimentales, leur valeur est proportionnelle au rendement de fluorescence et leur variation est équivalente aux variations du rendement de fluorescence. On voit donc sur cette figure que le rendement de fluorescence est constant avec le PAR, ce qui est caractéristique d'une végétation sans contrainte (Havaux et al., 1991). La comparaison entre les deux jours de mesures montre que ce rendement est resté le même tout au long de la campagne de mesure.

Le rendement photochimique ($\frac{\Delta F}{F'_m}$) traduit le fonctionnement photosynthétique de la plante. La décroissance du rendement avec l'éclairement est classiquement interprétée comme la conséquence de l'apparition d'un quenching non-photochimique au fur et à mesure que l'intensité lumineuse augmente. La stabilité à la fois dans la journée – on retrouve le soir la même valeur que le matin pour un PAR équivalent – et au cours de la campagne indique que le sorgho ne subit pas de stress sur le long terme et se trouve dans des conditions de croissance sans contrainte.

Il est intéressant de noter que ces résultats traduisent une caractéristique au niveau du couvert : les mesures ont été faites sur de nombreuses feuilles dans différentes conditions d'interception de la lumière. On trouve un résultat similaire à ce qui à été obtenu sur une seule feuille non stressée dans Flexas et al., 2000.

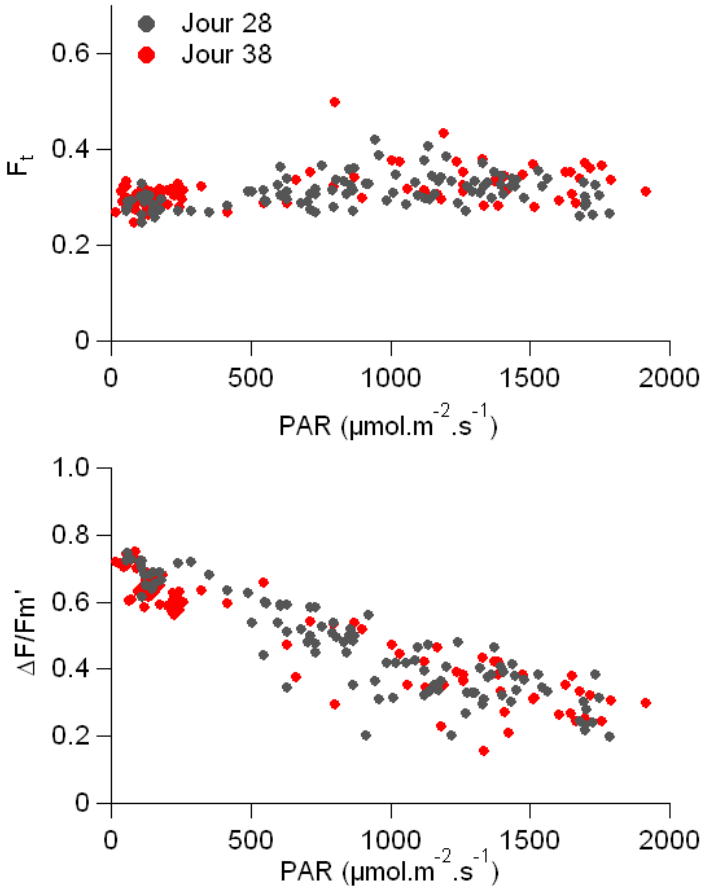


Figure V.33 *Valeur des fluorescences stationnaires et du rendement photochimique ($\Delta F/F'_m$) en fonction de l'éclairement, obtenue avec le PAM pour deux jour de la campagne de mesures.*

Les résultats présentés sur la *Figure V.33* indiquent que la culture ne subit pas de contrainte et que le rendement de fluorescence n'a pas varié au cours de la campagne. La campagne s'est donc déroulée dans les conditions attendues permettant d'écrire:

$$F_S \propto \text{APAR} \qquad (V.11)$$

Cette relation n'est vraie que pour un même éclairement, il faut donc prendre les données à la même heure d'un jour à l'autre (même angle solaire) et pour un même éclairement (PAR). Ainsi les valeurs données dans les série temporelle sont des moyennes sur une période d'une minute, située entre 13h40 et 14h20 heure locale (UTC +2h). L'heure exacte est choisie de manière à ce que la moyenne du PAR correspondant soit de 1800 ± 100 µmol.m^{-2}.s^{-1}. Nous avons choisi un niveau de PAR relativement élevé pour s'assurer de l'absence de nuage au moment de la mesure.

La *Figure V.34* montre l'évolution des flux de fluorescence dans les deux bandes de l'oxygène ainsi que le PAR moyen correspondant aux mesures. Malgré un fort bruit de mesure au début de la campagne dû à l'absence de végétation, on voit une forte augmentation des flux de fluorescence à partir du jour 20, augmentation que l'on peut relier à l'augmentation du APAR au fur et à mesure du développement du couvert. Les flux de fluorescence atteignent un maximum de 1 mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1} dans la bande O_2-B et 1.7 mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1} dans la bande O_2-A. Le dernier point de mesure semble indiquer une diminution du flux de fluorescence ; on remarquera cependant que le PAR moyen de ce point de mesure est significativement inférieur aux autres points de mesure (1650 µmol.m^{-2}.s^{-1} au lieu

de 1800 µmol.m^{-2}.s^{-1}) : ce jour là, le temps était couvert et il n'a pas été possible de trouver une zone de mesure avec un PAR suffisant. Les conditions d'éclairement étant différentes de celles des autres jours, on ne peut pas directement comparer les flux de ce jour là aux flux des autres jours.

Ce problème illustre parfaitement la difficulté de l'utilisation du flux de fluorescence comme indice permettant de donner une information directe sur la végétation observée. Pour la détection depuis une plateforme avionnée ou satellitale il est même difficilement envisageable de pouvoir sortir une information des flux de fluorescence seuls. Nous reviendrons sur ce point dans la section 5.7.1.

Pour diminuer en partie cette dépendance à l'éclairement, notre équipe a proposé l'utilisation des fractions de fluorescence (Moya et al., 1999, Moya et al., 2003, Louis et al., 2005). En divisant la fluorescence par le flux réfléchi par la végétation on lève en partie la dépendance à l'éclairement. C'est pourquoi TriFLEX calcule les fractions de fluorescence à partir des mesures de flux.

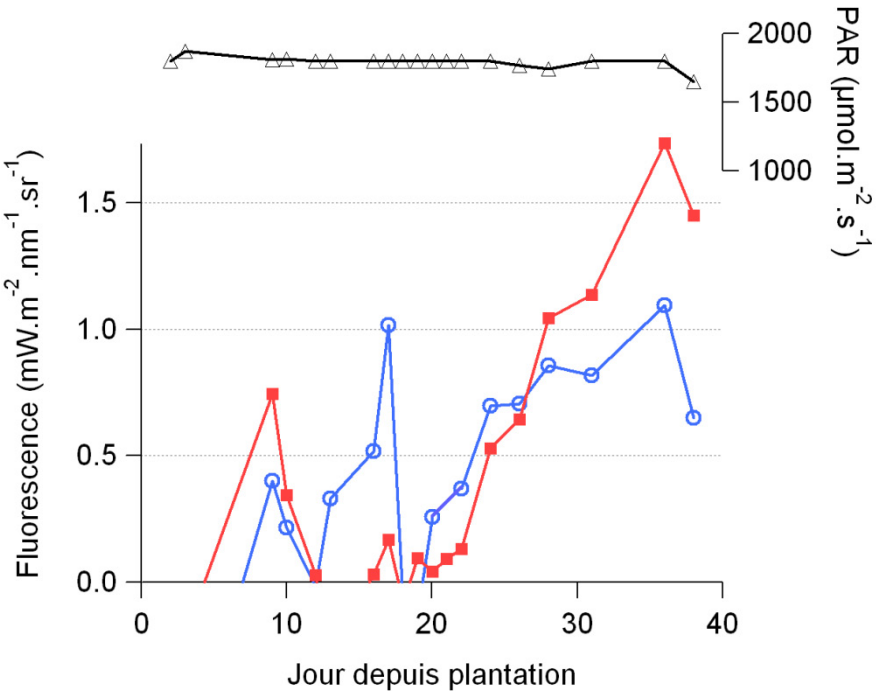


Figure V.34 *Evolution des flux de fluorescence mesurés sur le couvert de sorgho fourrager dans les deux bandes de l'oxygène. Le PAR donné est le PAR moyen durant la mesure de fluorescence.*

Penchons nous à présent sur les différents indices mesurés par TriFLEX et sur leur comportement durant la croissance. Les séries temporelles des différentes mesures effectuées par TriFLEX et des mesures faites au sol sont présentées dans la *Figure V.35*.

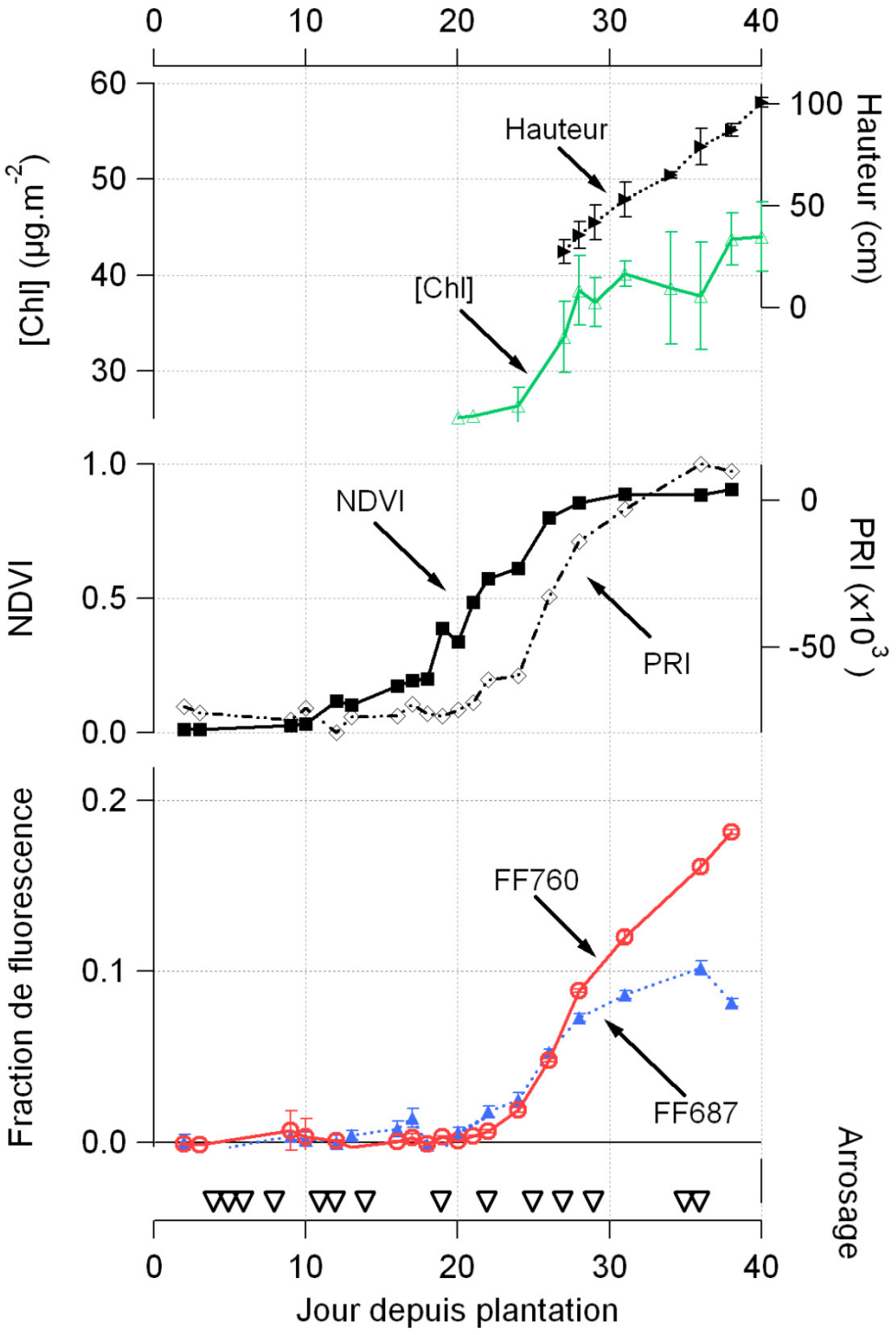


Figure V.35 *Evolution des signaux mesurés par TriFLEX lors de la campagne de mesures de l'été 2008 sur une parcelle de sorgho fourrager depuis la date de plantation. Fractions de fluorescence mesurées dans les deux bandes de l'oxygène, PRI, NDVI, concentration en chlorophylle mesurée à l'aide d'un SPAD 502 (Minolta, Ramsey, NJ). Les valeurs des signaux optiques sont des moyennes sur une minute et les barres d'erreur sont les déviations standard.*

Les mesures de hauteur de couvert montrent une augmentation quasi linéaire entre les jours 27 et 40, on passe d'une hauteur de 28 cm à environ 100 cm soit un accroissement de 5.5 cm par jour. Le contenu en chlorophylle augmente lui aussi de manière très rapide : il passe de 26.4 µg.cm^{-2} au jour 24

à 40.1 µg.cm^{-2} au jour 31 puis reste stable jusqu'à la fin des mesures alors que le couvert continue de se développer.

Le NDVI traduit lui aussi le développement du couvert. C'est même l'indice détectant le plus tôt le passage du sol nu à un champ contenant de la végétation. Sa valeur est modifiée dès que les premières feuilles se développent. En effet, dès le 10ème jour le NDVI passe d'une valeur proche de zéro à une valeur de 0.11 alors que le PRI et les fractions de fluorescence restent à leur niveau de départ. Il commence à augmenter de manière significative autour du 10ème jour jusqu'à atteindre une valeur haute de 0.9. La transition entre le niveau bas du NDVI et la valeur haute se fait entre les jours 12 et 26. On peut noter que le NDVI commence à saturer avant que la végétation n'atteigne la moitié de sa hauteur finale. Ces variations du NDVI s'expliquent par les variations de réflectance lors du passage du sol nu à la végétation. Avec le développement de la végétation, la réflectance à 760 nm augmente alors que la réflectance à 687 nm diminue. Les mesures faites par TriFLEX permettent de retrouver la réflectance dans les deux bandes de l'oxygène. Les mesures sont présentées sur la *Figure V.36*. L'évolution des réflectances montre le passage du champ nu (réflectances autour de 0.28) à un couvert de sorgho. A la fin des mesures la réflectance à 687 nm est de l'ordre de 0.03 et de 0.6 à 760 nm.

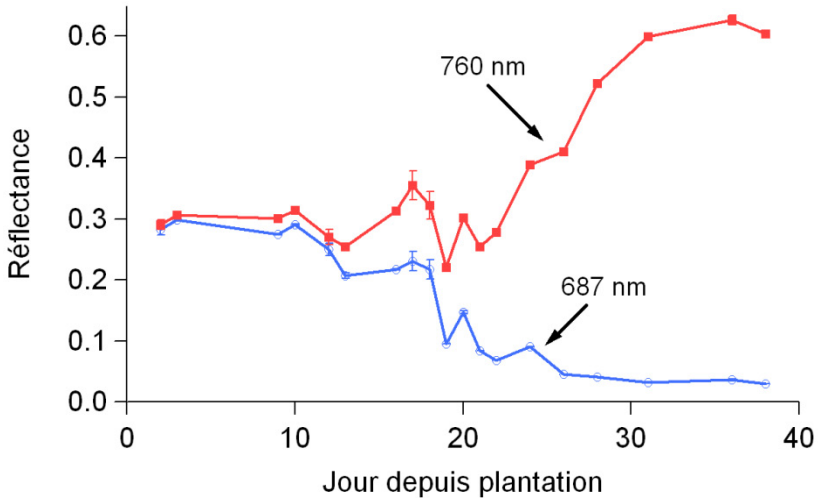


Figure V.36 *Evolution des signaux de la réflectance du couvert mesuré par TriFLEX à 687 nm et à 760 nm.*

Les fractions de fluorescence ne rapportent l'apparition de végétation qu'autour du 22ème jour, après le PRI. Cette forte sensibilité du NDVI est due au fort contraste entre la végétation et le sol nu aux deux longueurs d'onde : dans la partie rouge du spectre on a une décroissance rapide due à l'absorption de la chlorophylle alors que dans le proche infrarouge la réflectance augmente (voir *Figure V.36)*. Les modifications de réflectances se poursuivent au fur et à mesure que la densité du couvert augmente jusqu'à atteindre une valeur stable. A cause de sa formulation mathématique basée sur la différence de réflectance entre le rouge et le proche infrarouge, le NDVI à tendance à saturer rapidement dès lors que le champ de vue de l'instrument est couvert par la végétation. Il a donc une dynamique limitée. Cette variation/saturation de la réflectance avec la quantité de biomasse est bien connue (Tucker, 1977). Par ailleurs, il a été établi que la stabilisation de la réflectance dans la partie rouge du spectre intervient pour des quantités de biomasse bien inférieures à celles nécessaire pour la stabilisation de la réflectance dans le proche-infrarouge (on peut d'ailleurs l'observer sur la *Figure V.36*). Ainsi pour les fortes densités de végétation l'information portée par le NDVI (ou de tout autre

indice basé sur la différence de réflectance rouge/proche-infrarouge) repose essentiellement sur les variations de réflectance dans une zone spectrale pour laquelle la chlorophylle n'absorbe pas. Il semblerait donc souhaitable, pour une caractérisation plus précise de la végétation, d'utiliser un indice plus proche des propriétés photosynthétiques de la végétation.

Penchons-nous à présent sur l'évolution du PRI. Le PRI à un comportement semblable à celui du NDVI, il part d'une valeur basse qui augmente avec le développement de la végétation. La transition dure une quinzaine de jours. On remarque cependant que la période de transition ne démarre pas en même temps que celle du NDVI : elle est décalée de 4 à 5 jours tant pour le démarrage que pour la saturation. Dans la plupart des études le PRI est considéré comme un indicateur de stress. Dans notre cas le sorgho ayant été placé dans des conditions de développement idéales, on ne peut pas interpréter les changements de PRI comme résultant d'un stress. Le changement du PRI au long de la croissance indique donc qu'il est sensible aux changements d'état qu'induit cette croissance, en particulier à la très forte modification de la structure de la végétation au cours de son développement. A l'instar du NDVI, les variations de PRI indique une variation de réflectance. La forte variation de réflectance induite par l'apparition d'un couvert végétal et son développement explique l'évolution du PRI : la réflectance dans le vert diminue (par rapport au niveau que l'on avait sur le sol nu) au fur et à mesure du développement du couvert. La réflectance à 570 nm (jaune) diminue également mais plus vite, ce qui explique l'augmentation du PRI. On remarque que la transition entre le niveau bas et le niveau haut du PRI se fait après celle du NDVI. On peut l'expliquer en remarquant que la lumière verte est moins absorbée par les plantes que la lumière rouge : il faut donc une plus grande quantité de végétation pour produire un changement dans le PRI (changement de réflectance) comparable à ce que l'on voit avec le NDVI.

L'évolution des fractions de fluorescence est également présentée dans la *Figure V.35*. Les fractions de fluorescence présentent un accroissement rapide à partir du 22ème jour. Cependant on voit immédiatement que le comportement des fractions de fluorescence n'est pas le même à 687 nm et à 760 nm. Elles augmentent parallèlement jusqu'au 28ème jour puis, à partir de ce jour, la fraction de fluorescence dans la bande O_2-B commence à saturer alors que dans la bande O_2-A la fraction de fluorescence continue d'augmenter jusqu'à la fin des mesures. A 687 nm la végétation est principalement un absorbant. Au fur et à mesure du développement du couvert, la fluorescence émise dans les basses couches est de plus en plus réabsorbée. Comme la densité augmente, on passe d'un état où toutes les parties de la végétation contribuent au signal de fluorescence lorsque la densité est faible (transfert radiatif dans le couvert minimal) à un état où seules les parties supérieures du couvert contribuent de manière significative (couvert développé et dense), l'émission de fluorescence venant des couches inférieures étant majoritairement réabsorbée. On atteint donc un maximum pour le flux de fluorescence d'où la saturation de la fraction de fluorescence dans la bande O_2-B. A 760 nm la végétation absorbe peu, elle réfléchit et transmet. Par conséquent la fluorescence est très peu réabsorbée au sein du couvert et les processus de transfert radiatifs favorisent sa « sortie » du couvert. De fait, elle est reliée de manière plus directe à la quantité de biomasse. C'est d'ailleurs ce que montre l'évolution de la fraction de fluorescence dans la bande O_2-A : elle ne sature pas et suit le développement du couvert jusqu'à la fin de la campagne de mesure.

Les résultats présentés dans la *Figure V.35* montrent que chacun des indices obtenus peut être considéré comme des indicateurs de la croissance du champ de sorgho. Comme nous l'avons vu pour le NDVI et les fractions de fluorescence : ils ne sont pas tous équivalents en termes de dynamique et de sensibilité. La *Figure V.37* permet de comparer la dynamique des différents signaux pendant le développement de la parcelle de sorgho. Pour pouvoir les comparer, tous les signaux ont été normalisés par leur valeur au 22ème jour. Le 22ème jour a été choisi car il correspond au premier jour

pour lequel tous les signaux rapportent le début de la croissance. On voit sur cette figure que les différents signaux ont des dynamiques très différentes. Le NDVI, bien qu'étant le premier signal à détecter la présence de la végétation au 12ème jour (voir *Figure V.35*), est le signal ayant la plus faible dynamique (1.6). Cela est dû à sa formulation mathématique qui induit un comportement asymptotique autour de 1. Le flux de fluorescence à 760 nm a une dynamique plus importante, mais c'est la fraction de fluorescence à 760 nm qui a la plus forte dynamique (29). Son évolution est continue jusqu'à la fin de la période de mesure. Cette forte dynamique s'explique par l'association de la fluorescence dans la bande O_2-A, corrélée positivement au développement du couvert, à une radiance fortement anti-corrélée avec ce développement. Puisque la végétation absorbe à 687 nm, la part de rayonnement réfléchi à cette longueur d'onde diminue avec le développement du couvert alors que dans le même temps la fluorescence à 760 nm augmente. La division de la fluorescence 760 nm par la radiance à 687 nm permet donc d'exacerber son comportement naturel. La comparaison avec le NDVI peut sembler incongrue puisque celui-ci a une dynamique limitée mathématiquement. Cependant, si les résultats présentés ici ne permettent pas de dire que les variations de NDVI ne contiennent pas les mêmes informations sur l'état de végétation que le signal de fluorescence, il semble que la fraction de fluorescence à 760 nm aura un plus grand pouvoir discriminant pour ce qui concerne le suivi de croissance. Ce qui fait de la fraction de fluorescence à 760 nm un candidat idéal pour le suivi du développement de la végétation et peut-être pour l'estimation de la quantité de biomasse. Nous parlons ici de « candidat » seulement puisque d'une part le lien direct est entre le flux de fluorescence et le APAR et que d'autre part les mesures n'ont été faites que sur un type de culture. Une étude portant sur le flux de fluorescence et la fraction de fluorescence à 760 nm sur différents types de culture ayant des structures différentes et marquées, associée à des mesures au sol de APAR, est nécessaire pour établir les conditions d'utilisation de ces indices comme estimateurs opérationnels de la biomasse.

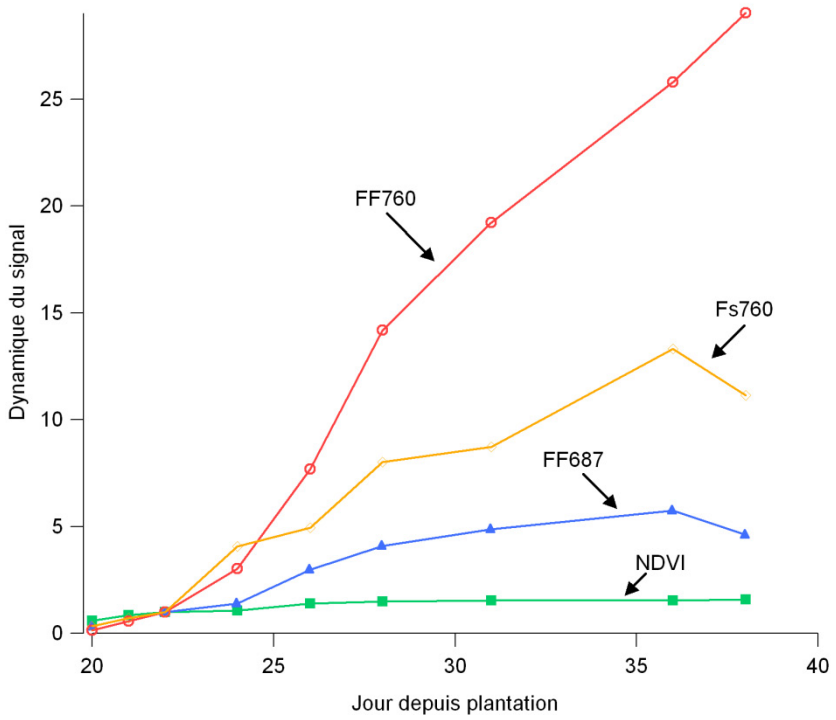


Figure V.37 *Dynamique des différents signaux issus des mesures de TriFLEX. Pour pouvoir comparer leurs dynamiques, les signaux ont tous été normalisés par la valeur qu'ils avaient le 22ème jour, jour pour lequel tous les signaux rendaient compte de la croissance du sorgho.*

5.6.4 De la feuille au couvert

La fluorescence au niveau du couvert est le résultat de la combinaison entre l'émission de fluorescence de chaque partie du couvert et les processus de transfert radiatif à l'intérieur de ce couvert. Lors du développement du couvert les propriétés optiques des feuilles changent, en particulier comme le montre la *Figure V.35*, le contenu en chlorophylle des feuilles augmente. Une des conséquences est le changement du spectre d'émission de fluorescence. Des mesures de spectres d'émission au niveau de la feuille ont été faites chaque jour en utilisant le LSF, présenté dans la section 5.2.2. La *Figure V.38* montre cette évolution du spectre d'émission au niveau de la feuille. Elle présente deux spectres d'émission acquis deux jours différents. Le premier spectre a été acquis le jour 24 sur une feuille ayant une concentration en chlorophylle de 26.5 µg.cm^{-2} et le second le 32ème jour sur une feuille ayant une concentration en chlorophylle de 43.5 µg.cm^{-2}. On voit très clairement la baisse de l'émission de fluorescence dans la zone rouge. Cette baisse relative est due à la l'absorption de la chlorophylle dans le rouge : l'émission de fluorescence dans cette gamme de longueur d'onde est réabsorbée au sein de la feuille par la chlorophylle alors que dans le proche infrarouge l'émission de fluorescence n'est pas réabsorbée (Gitelson et al., 1998, Lichtenthaler et Rinderle, 1988). Cette réabsorption est d'autant plus marquée que le contenu en chlorophylle est important. Cette réabsorption permet d'établir un indice sensible au contenu en chlorophylle de la feuille : le rapport des fluorescences Fs687/Fs760 (Gitelson et al., 1998, Rinderle et Lichtenthaler, 1988, Stober et Lichtenthaler, 1992). Ce rapport diminue lorsque le contenu en chlorophylle augmente. C'est bien ce que l'on observe sur la *Figure V.38*.

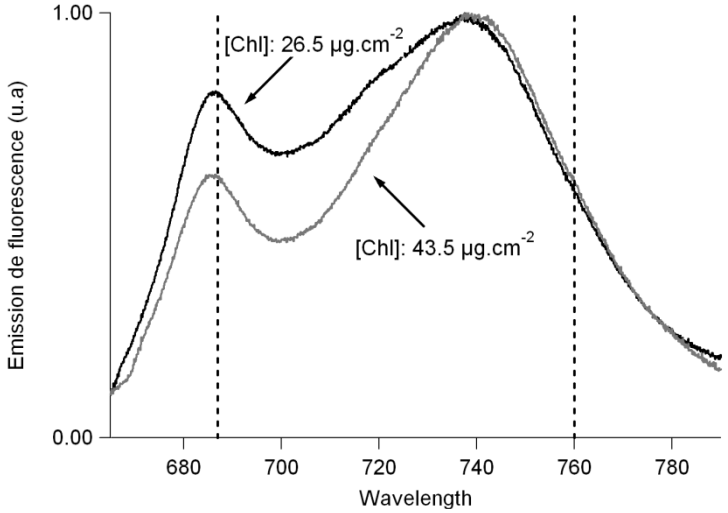


Figure V.38 *Spectre d'émission de fluorescence de feuille de sorgho fourrager prise à deux moments de sa croissance. Le premier spectre a été pris le 24ème jour ([Chl]=26.5 µg.cm^{-2}) et le second a été pris le 32ème jour ([Chl]=43.5 µg.cm^{-2}).Les deux spectres ont été normalisés par leur maximum.*

Comme la fluorescence est réabsorbée au sein même de la feuille, on s'attend à observer un phénomène similaire au niveau du couvert : la partie rouge de la fluorescence émise par les feuilles est réabsorbée au sein du couvert alors que la partie infrarouge ressort plus facilement. Lors du développement du couvert, les effets au niveau de la feuille et au niveau du couvert se superposent.

La *Figure V.39.A* permet de comparer l'évolution des rapports de fluorescence (Fs687/Fs760) au niveau de la feuille (mesures LSF) et au niveau du couvert (mesuré par TriFLEX). Pour les mesures au niveau de la feuille nous avons choisi des feuilles dont le contenu en chlorophylle est représentatif

de l'ensemble du champ. On voit, comme attendu, que le rapport décroît au fur et à mesure que le sorgho se développe. Au niveau du couvert le rapport est globalement plus faible : c'est l'effet de structure qui s'ajoute. L'évolution au niveau de couvert semble se faire en deux étapes : une étape rapide jusqu'au jour 28 durant laquelle le rapport passe en quatre jours d'une valeur proche de celle de la feuille (1.31 au niveau du couvert, 1.38 au niveau de la feuille) à une valeur inferieure de 30 % à celle du niveau de la feuille (0.82 au niveau du couvert, 1.2 au niveau de la feuille). Cette évolution rapide correspond à la période d'augmentation rapide du contenu en chlorophylle (augmentation de 45 %, voir *Figure V.35*). Par la suite, au-delà du 28ème jour, l'évolution se fait plus lentement, quasiment au même rythme que l'évolution du rapport au niveau de la feuille.

La *Figure V.39.B* donne l'évolution du rapport des fluorescences en fonction du contenu en chlorophylle et non plus en fonction du temps. On voit sur cette figure que tant au niveau du couvert qu'au niveau de la feuille, la valeur du rapport des fluorescences décroît lorsque le contenu foliaire en chlorophylle augmente. La décroissance du rapport est cependant beaucoup plus forte au niveau du couvert qu'au niveau de la feuille (pente de -0.05 au niveau du couvert pour -0.007 au niveau de la feuille).

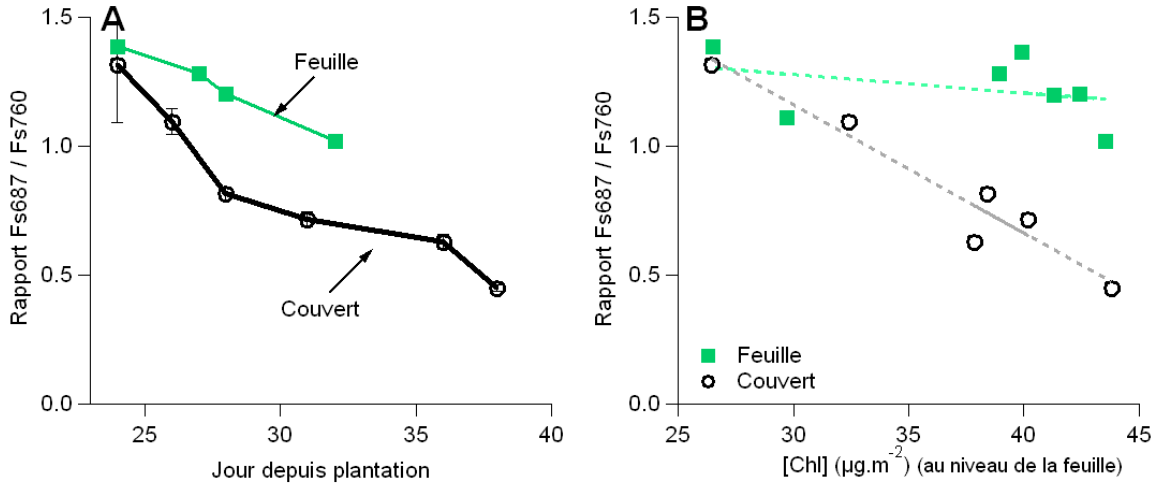


Figure V.39 *Comparaison entre le rapport de fluorescence F_s687/F_s760 mesuré au niveau de la feuille (mesures LSF) et au niveau du couvert (mesures TriFLEX).En vert l'évolution du contenu en chlorophylle au niveau de la feuille.*

5.6.5 Conclusion sur le suivi de la croissance par fluorescence

A l'observation des résultats du suivi de la croissance du sorgho fourrager, il apparaît que les indices basés sur la fluorescence permettent de suivre le développement du couvert avec une détectabilité accrue par rapport aux indices basés sur la réflectance: la dynamique de la fraction de fluorescence dans la bande O_2-A est bien meilleure que la dynamique des autres indices étudiés (voir *Figure V.37*).

La mesure de la fluorescence dans les deux bandes de l'oxygène donne une information sur l'état du couvert : contenu en chlorophylle et développement (voir *Figure V.39*).

Comme dans le cas du stress hydrique sur le sorgho grain, la mesure de la fluorescence en plus des différents indices optiques utilisés régulièrement nous semble profitable à la caractérisation de la végétation. Les résultats obtenus sur la croissance du sorgho indiquent cependant que la mesure de la fluorescence doit s'accompagner d'une solide connaissance des effets de structure. En effet si la

mesure des différents indices de réflectance et des fractions de fluorescence peut sembler suffisante pour suivre l'évolution d'une même végétation, dès lors que l'on voudra comparer un champ à un autre, il faudra tenir compte de leur différence de structure pour interpréter les signaux de fluorescence.

5.7 Quelques réflexions sur le signal

Le signal de fluorescence est complexe. Les informations qu'il contient sont nombreuses et il est nécessaire de conduire des études afin de mieux comprendre ce qui influence le signal et de quelle manière.

5.7.1 Quel indice à partir des mesures passives de fluorescence ?

Nous l'avons vu au travers des deux expérimentations présentés plus haut et aux travers des résultats présentés dans le chapitre précédent : le signal de fluorescence est très variable et très dépendant de l'éclairement. Pour l'étude de la végétation l'idéal est de réaliser des cycles diurnes permettant d'analyser la réponse de la végétation en fonction de l'éclairement. Ce n'est cependant pas envisageable depuis un avion ou même une plateforme satellite. De tels moyens ont pour principal intérêt de pouvoir couvrir de larges espaces et donc de pouvoir faire des mesures à l'échelle régionale au minimum. Par exemple le projet satellite FLEX, prévoyait une répétition tout les 7 jours (rapport FLEX : Drusch et al., 2008).

Pour pouvoir suivre une évolution, pour pouvoir comparer une végétation à une autre il faut donc définir un indice qui soit peu sensible à l'éclairement (intensité, direction), principal facteur de variation. Dans la littérature, au niveau de la feuille, la grande majorité des études utilisent le rendement de fluorescence (c'est-à-dire le rapport entre le nombre de photons émis par fluorescence et le nombre de photons absorbés) ou le rendement photochimique déterminé à partir des rendements de fluorescence. Au niveau du couvert le rendement de fluorescence peut être obtenu avec des instruments actifs. Avec une mesure passive nous n'avons accès qu'aux flux de fluorescence et l'interprétation de cette donnée est bien plus complexe que l'interprétation du rendement de fluorescence. Le flux de fluorescence dépend du rendement de fluorescence – qui dépend principalement de l'état physiologique de la végétation – et de la quantité de lumière absorbée qui, pour un couvert, dépend essentiellement de sa capacité à intercepter la lumière (structure). Il se pose donc la question de définir un rendement de fluorescence que l'on pourrait obtenir avec une mesure passive. Ce rendement doit être un indice permettant de simplifier l'interprétation du signal de fluorescence issu des mesures passives. Le débat porte donc sur la normalisation du flux de fluorescence.

Le PAR étant une indication de l'éclairement auquel est soumis la végétation, on peut l'utiliser pour définir un « rendement apparent » de fluorescence en divisant le flux de fluorescence par le PAR. Le ASFY (Apparent Spectral Fluorescence Yield) s'exprime ainsi:

$$ASFY(\lambda) = \frac{\pi F_s(\lambda)}{PAR} \qquad (V.12)$$

Pour obtenir le ASFY il faut préalablement convertir la fluorescence dans les unités du PAR. La formule de conversion est :

$$F_s[\mu mol.m^{-2}.s^{-1}.sr^{-1}.nm^{-1}] = \frac{\lambda 10^6}{hc\mathcal{N}_\mathcal{A}} F_s[W.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}] \quad (V.13)$$

On peut cependant arguer du fait que le PAR n'est pas une mesure nécessaire à la mesure passive de la fluorescence et qu'il n'est pas accessible directement pour des mesures spatiales. On peut alors préférer utiliser comme proxy du PAR un signal réfléchi par la végétation. Les canaux aux bords des bandes d'absorption sont de bons candidats puisqu'ils contiennent peu de fluorescence. On peut les utiliser pour définir un nouveau rendement. C'est ce qu'a proposé l'équipe (Moya et al., 1999, Moya et al, 2003 Moya et al., 2003, Louis et al., 2005) au travers des fractions de fluorescence. Jusqu'à présent les fractions de fluorescence que nous avons utilisées sont obtenues en divisant le flux de fluorescence par la radiance de la végétation au bord de la bande O_2-B car c'est un signal bien absorbé et donc proche du signal excitant réellement la fluorescence. Cependant, de manière plus générale on peut définir deux types de fraction de fluorescence selon que l'on divise la fluorescence par le bord de la bande O_2-B ou le bord de la bande O_2-A. :

$$FF_{687}(\lambda) = \frac{F_S(\lambda)}{L(685)} \quad (V.14)$$

et

$$FF_{760}(\lambda) = \frac{F_S(\lambda)}{L(758)} \quad (V.15)$$

Regardons à présent comment varient ces signaux au cours d'un cycle diurne. La *Figure V.40* présente l'évolution diurne des différents indices sur le couvert de sorgho fourrager. Les mesures ont été faites le 7 septembre 2008, l'absence de mesure autour de 14 h est dû au fait que les mesures se sont faites sur une autre culture pendant ce laps de temps. Du point de vue météo, le ciel a été dégagé jusque vers 14 h puis quelques nuages sont apparus comme en témoigne la courbe de PAR (*Figure V.40.A*). Vers 17 h des nuages plus importants font chuter fortement la luminosité (on passe de 1000 µmol.m^{-2}.s^{-1} à 300 µmol.m^{-2}.s^{-1}).

Les flux de fluorescence (*Figure V.40.B*) sont en corrélation avec le PAR toute la journée, en particulier la fluorescence baisse lors du passage des nuages en fin d'après midi. Il n'y a pas de corrélation entre ASFY et le PAR pour la majorité du cycle diurne, on constate cependant une baisse sensible des ASFY lors du passage nuageux vers 17 h, en particulier dans la bande O_2-A. Les fractions de fluorescence (*Figure V.40.D-E*) présentent un cycle diurne quasiment constant et ne varient quasiment pas pendant le passage nuageux.

- **Comportement des différents indices pendant un changement de luminosité**

Les mesures PAM (voir *Figure V.33*) ont montré que le rendement réel de fluorescence varie peu à la fois pendant le cycle diurne mais également au cours de sa croissance, ce qui indique que le sorgho fourrager n'a pas subi de contrainte pendant sa croissance. On attend donc des nouveaux indices définis qu'ils rendent compte cette stabilité du rendement, en particulier dans les changements de lumière. Le passage de nuages et la forte variation de PAR qui en résulte (baisse d'un facteur 3) indique qu'on change de régime lumineux: on passe d'un éclairement majoritairement direct à un éclairement majoritairement diffus. La quantité de lumière absorbée par la plante va se trouver modifiée par la baisse de l'intensité de l'éclairement mais aussi par son changement de nature : le couvert n'intercepte pas de la même manière le rayonnement direct et le rayonnement diffus.

On souhaiterait obtenir un indice, indicateur du rendement de fluorescence, qui soit le moins sensible possible à ces changements lumineux

On constate une baisse sensible des ASFY vers 17 h lors du passage des nuages, en particulier dans la bande O_2-A. Les ASFY utilisent le PAR pour normaliser la fluorescence or, pendant un changement lumineux, le PAR n'est pas capable de traduire le changement d'interception de lumière du couvert végétal, il traduit simplement la baisse d'intensité générale. Ainsi les ASFY sont assez sensibles au régime lumineux, ce qui peut être utile dans certains cas de figure, mais qui ne correspond pas vraiment à nos attentes.

Cet effet est moins important pour les fractions de fluorescence (*Figure V.40.D-E*) : lors du changement de régime lumineux les variations de fractions de fluorescence sont faibles dans la bande O_2-A et quasiment inexistantes dans la bande O_2-B. L'utilisation d'un signal provenant de la plante pour normaliser la fluorescence permet de conserver une corrélation avec l'éclairement réellement intercepté par la plante. Ainsi on rend compte de la modification de la lumière interceptée pendant les changements de régimes lumineux. On aura donc plutôt tendance à préférer ces indices comme estimateur du rendement de fluorescence.

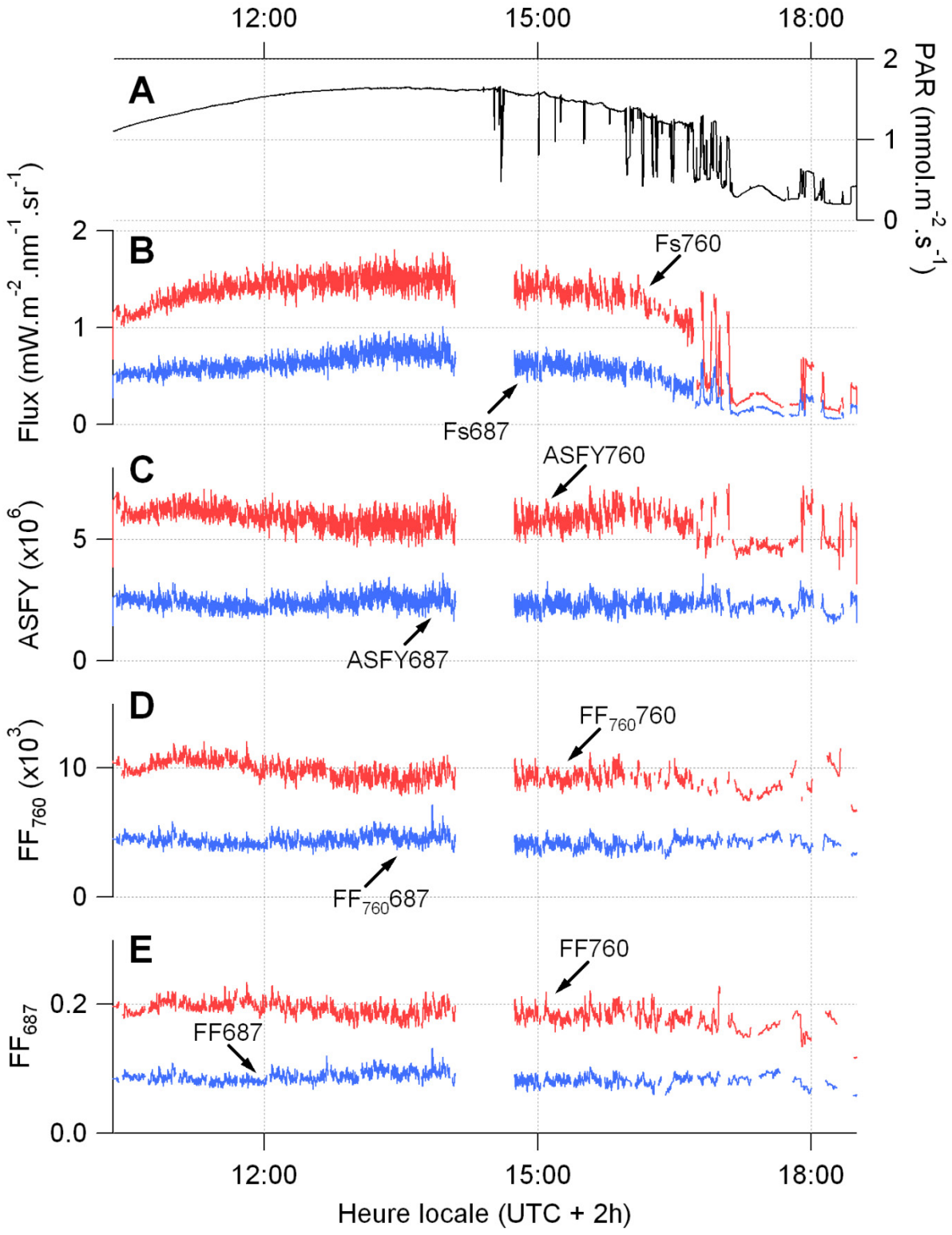


Figure V.40 *Cycles diurnes acquis par TriFLEX le 7 septembre 2008 sur du sorgho fourrager. A : Eclairement (PAR). B : Flux de fluorescence. C : Rendement apparent (ASFY). D : Fraction de fluorescence (Fs/L(758). E : Fraction de fluorescence (Fs/L(685)).*

- **Comportement des différents indices au cours de la croissance**

Regardons à présent l'utilisation de ces indices pour le suivi de la végétation. Les données acquises sur le sorgho fourrager durant sa croissance permettent de calculer les différents indices et d'en étudier le comportement. Nous avions déjà vu que les fractions de fluorescences obtenues en divisant la fluorescence par la radiance au bord de la bande O_2-B donnaient de bons résultats pour la caractérisation du développement du couvert. Dans la *Figure V.41* nous reportons les flux de fluorescence ainsi que les différents indices définis précédemment. Les indices ont globalement la même dynamique : ils augmentent tous avec l'augmentation du flux de fluorescence et les indices basés sur la fluorescence dans la bande O_2-B ont tendance à saturer contrairement à ceux basés sur la fluorescence dans la bande O_2-A. Un constat immédiat est la grande différence de bruit entre les différents indices : les fractions de fluorescence construites en divisant le flux de fluorescence par la radiance à 685 nm présentent un bruit significativement réduit par rapport aux autres indices : l'évolution des signaux est plus douce et les niveaux bas sont beaucoup moins bruités.

Une première cause de réduction de bruit a été donnée : l'utilisation de deux signaux provenant du même instrument pour construire les fractions de fluorescence. La différence de bruit entre les fractions de fluorescence obtenues en divisant par la radiance à 685 nm et celle obtenues en divisant par la radiance à 758 nm peut s'expliquer par la corrélation plus forte entre la radiance à 685 nm et la fluorescence. La radiance à 685 nm est plus proche du flux absorbé par la végétation que le flux à 760 nm : 685 nm est une longueur d'onde bien absorbée alors qu'à 758 nm le rayonnement circule bien dans le couvert. En conséquence la radiance à 685 nm sera intimement liée aux variations de l'éclairement vu par la végétation dans le champ de vue de l'instrument alors que la radiance à 760 nm contiendra une contribution due au transport au sein du couvert qui ne porte pas d'information sur l'objet de mesure. Toutes choses égales par ailleurs, la fluorescence et la radiance à 685 nm sont donc très corrélées dans les changements d'éclairement (variation de l'éclairement, changement de structure du au vent, etc…) ce qui explique en partie la réduction de bruit observée.

A cela s'ajoute le fait que la fluorescence et la radiance dans la bande O_2-B sont deux signaux anti-corrélés vis-à-vis de la quantité de biomasse : la fluorescence augmente avec la quantité de végétation et la réflectance à 687 nm diminue. Cette forte anticorrélation augmente le pouvoir discriminant des fractions de fluorescence dans le cadre de l'estimation de la biomasse.

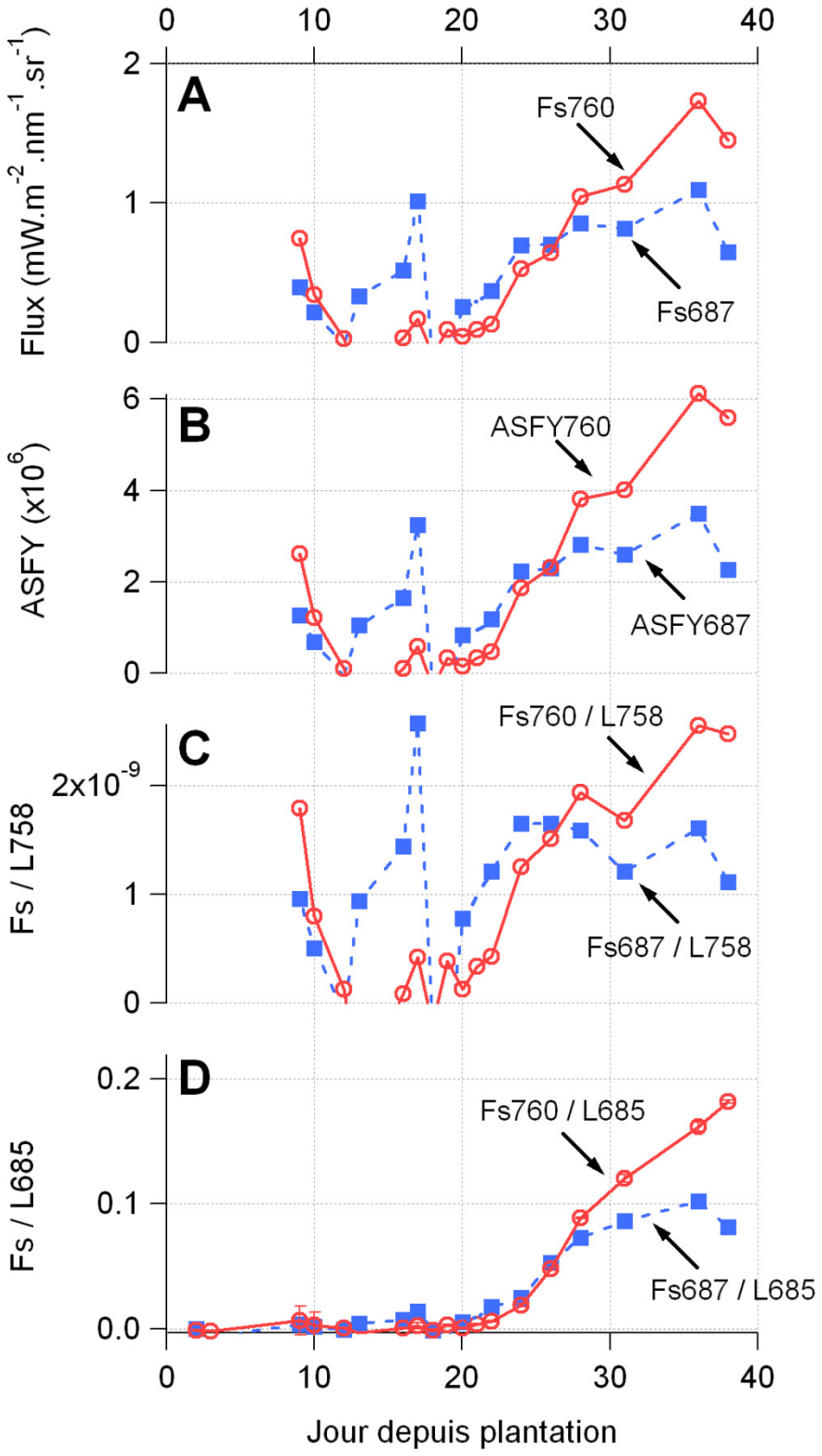


Figure V.41 *Evolution de la fluorescence et des différents indices basés sur la fluorescence durant la campagne de suivi de croissance du sorgho fourrager en été 2008. Mesures effectuées par TriFLEX, les données ont été acquises autour du midi solaire en s'assurant que le PAR varie peu d'un jour à l'autre.*

5.7.2 Une remarque sur les fractions de fluorescence

Telles que nous les avons définies les fractions de fluorescence sont divisées par un signal contenant de la fluorescence : la radiance de la végétation au bord de la bande O_2-B contient typiquement 10 % de fluorescence d'après les mesures de TriFLEX. Cette dépendance induisant un effet non linéaire, fonction de la fluorescence il peut être souhaitable d'avoir une normalisation ne dépendant pas de la fluorescence. On peut, à partir des mêmes grandeurs, définir un nouvel indice, la fraction de fluorescence dans le signal réfléchi (FFR), en remarquant que :

$$FFR(\lambda) = \frac{F_s(\lambda)}{I(685) \times \rho(685)} = \frac{FF(\lambda)}{1 - FF687} \qquad (V.16)$$

Il est également possible de choisir une radiance à une autre longueur d'onde ne contenant pas de contribution de fluorescence pour définir une nouvelle fraction de fluorescence. Ce qui compte c'est de choisir une longueur d'onde bien absorbée par la végétation de manière à garder la corrélation avec la lumière absorbée et l'anticorrélation avec la fluorescence.

5.7.3 Le problème de la structure de la végétation

Nous en avons beaucoup parlé : la structure de la végétation joue un rôle très important dans le signal de fluorescence mesuré au niveau du couvert. La structure de la végétation a différent effets sur la mesure de la fluorescence.

- **Réflectance**

La réflectance du couvert, en plus de dépendre de l'état physiologique de la végétation, dépend de la structure du couvert, de l'éclairement et de la direction d'observation. L'hypothèse du couvert lambertien n'est qu'une approximation permettant de simplifier les calculs.

Pour discuter des effets de couvert sur la réflectance nous allons utiliser des mesures faites sur différents types de couvert. Ils sont présentés sur la *Figure V.42*, il s'agit de :

- Sorgho grain : plutôt érectophile, planté en rang et le couvert est peu dense.
- Soja : planté en rang également, il est plutôt planophile et le couvert est plus dense.
- Sorgho fourrager : il est plutôt érectophile et sa densité varie avec son développement.

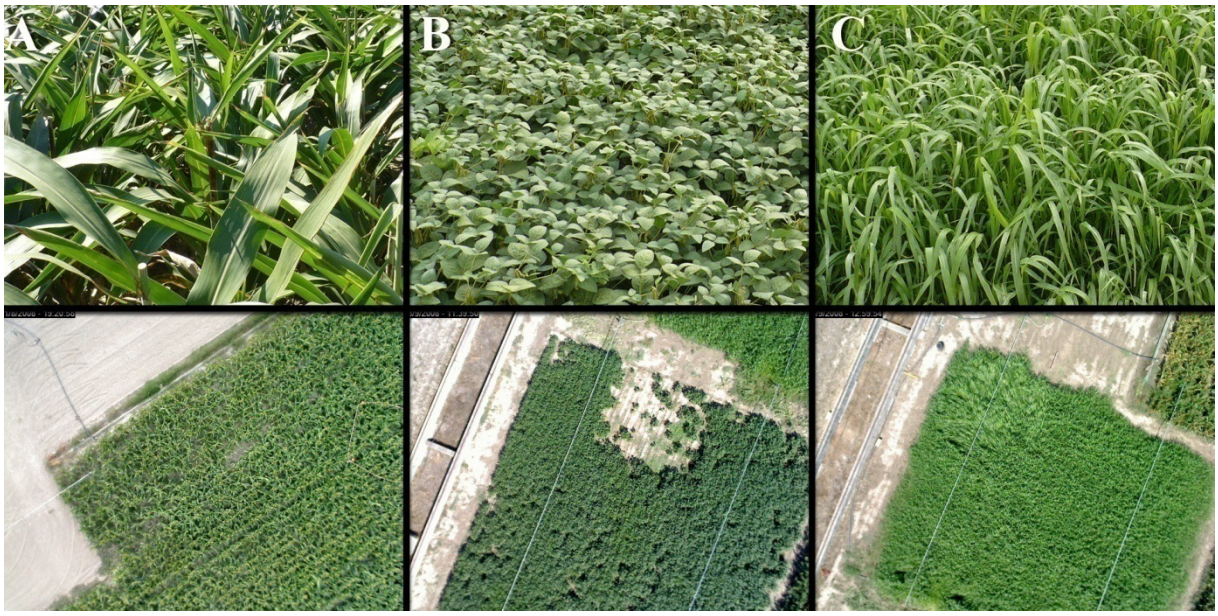


Figure V.42 *Les trois couverts observés durant la campagne de 2008. A : Sorgho grain. B : Soja. C : Sorgho fourrager.*

Puisque nous mesurons en visée au nadir, on peut simplifier le problème en disant que pour un couvert donné, la réflectance ne dépend que de l'éclairement, donc de l'heure. En temps normal, TriFLEX mesure régulièrement la réflectance du couvert. Malheureusement durant la campagne de 2008 les routines chargées d'effectuer les mesures de réflectances n'ont pas fonctionné correctement et les données obtenues sont trop instables pour être exploitables. Cependant, à partir des mesures effectuées pour la mesure de la fluorescence il est possible d'obtenir la réflectance aux deux longueurs d'onde des bandes de l'oxygène. Nous avons donc pu observer les variations diurnes de ces réflectances sur les différents types de couverts ainsi que les variations du NDVI.

Les résultats sont présentés sur la *Figure V.43*, ils consistent en une série de cycles diurnes acquis sur :

- un couvert développé de sorgho grain (NDVI~0.8)

- un couvert de soja développé (NDVI~0.9)

- le sorgho fourrager à deux stades de son développement : le 26ème jour (NDVI~0.8) et le 37ème jour (NDVI~0.9)

Il faut noter, comme l'indiquent les photos de la *Figure V.42* que les cycles ont été acquis avec deux orientations de grue différentes : l'orientation était sensiblement la même pour les mesures sur le sorgho fourrager et le soja (sud-sud-est) mais différente pour le sorgho grain (est-sud-est).

On voit sur la *Figure V.43* que les différents cycles diurnes présentés sont similaires du point de vue de l'éclairement : ciel dégagé pour tous les jours de mesures présentés. On remarque sur ces cycles diurnes que le NDVI n'est pas constant mais subit une variation tout au long de la journée, variation dont l'extremum est situé aux alentours du midi solaire pour les cas présentés ici. Le décalage en temps visible sur le cycle diurne sur le sorgho grain peut s'expliquer par l'orientation plus au sud de la grue pendant les mesures. Dans les cycles présentés, le NDVI atteint soit un maximum (soja et sorgho fourrager développé) au midi solaire, soit un minimum (soja et sorgho en début de développement).

- *Sorgho grain*

Sur le sorgho grain on observe une diminution du NDVI jusqu'aux alentour de 15 h puis une augmentation. Une dépression du NDVI au cours du cycle diurne a déjà été observée par exemple par Sticksel et al., 2004 sur un couvert de blé (donc plutôt érectophile).

Les variations du NDVI résultent de celles des réflectances : la réflectance à 687 nm augmente jusque vers 15 h puis diminue, la réflectance à 760 nm a le comportement inverse.

Les variations observées sur le sorgho grain peuvent s'expliquer en supposant qu'elles sont dues majoritairement à des effets de structure : le sorgho grain est une culture plutôt érectophile et le couvert n'est pas particulièrement dense : on voit le sol à travers des trous dans le couverts. Au cours de la journée, selon l'angle solaire, on va éclairer plus ou moins de végétation, plus ou moins de sol. Lorsqu'on éclaire plus de sol la réflectance totale à 760 nm diminue puisque le sol à une réflectance inférieure à celle de la végétation, au contraire, à 687 nm elle aura tendance à augmenter.

- *Soja*

Pour le soja, le NDVI augmente jusqu'au midi solaire puis diminue. Un comportement similaire à été rapporté par Louis, 2004 sur un couvert de haricot (plutôt planophile).

Les deux réflectances diminuent au cours de la journée jusqu'à leur minimum autour du midi solaire puis augmentent jusqu'à la fin des mesures. Dans la bande O_2-B on peut expliquer ce comportement en notant que comme le soja est un couvert planophile c'est au midi solaire qu'on éclairera le moins le sol, c'est à ce moment que la végétation absorbera le maximum de rayonnement d'où une faible réflectance. Pour la bande O_2-A il n'y a pas d'explication directe, peut-être que l'augmentation de la réflectance le matin et le soir est due au transport du rayonnement à l'intérieur du couvert, transport qui est minimal lorsque l'éclairement pénètre le moins dans le couvert (donc au midi solaire).

Intéressons-nous maintenant à la modification du cycle diurne des réflectances du sorgho fourrager au cours de sa croissance.

- *Sorgho fourrager*

Au début et au cours du développement du sorgho fourrager (voir *Figure V.43*, 26ème jour), le comportement du NDVI est proche de celui que l'on peut observer sur le sorgho grain alors qu'à la fin de la période de mesure (voir *Figure V.43*, 37ème jour), après que la couverture ait fortement augmenté, on trouve un comportement similaire à celui du soja. On peut expliquer ce comportement en faisant les mêmes raisonnements que sur le sorgho grain et sur le soja : on passe d'une culture peu dense avec une forte proportion de trou dans le couvert (comme le sorgho grain) à une culture très dense recouvrant quasiment entièrement le sol (comme le soja).

On a donc une inversion du cycle diurne du NDVI au cours du développement du sorgho fourrager. Un tel changement est facilement mesurable et pourrait porter une indication sur le type de structure ou l'état de développement de la végétation. Nous avons tracé sur la *Figure V.44* l'évolution de la pente du cycle diurne du NDVI tout au long de la croissance du sorgho. Elle est obtenue en prenant une mesure à 14 h et une mesure à 17 h. Une pente positive signifie que le cycle diurne du NDVI est concave. On voit clairement sur cette figure que la pente du NDVI est positive pendant la majeure partie de la croissance du sorgho. Elle augmente rapidement jusqu'au jour 17 puis semble saturer alors qu'on est dans la période durant laquelle la valeur du NDVI augmente le plus rapidement. Puis au

moment ou le NDVI commence à saturer on observe une diminution de la pente du NDVI qui finit par s'inverser et devenir négative à la fin de la période de mesure.

Les variations de réflectances sont complexes et sont un sujet d'étude en soi. La réflectance d'un couvert va changer en fonction de l'angle d'observation, de l'angle d'éclairement, de l'état physiologique de la végétation, de ses paramètres de structure (géométrie, densité, type, etc…), du sol sur lequel pousse la végétation (type, humidité). Dans ces conditions, il serait très prématuré de faire une conclusion sur l'intérêt de la mesure de la pente du cycle diurne du NDVI pour caractériser le couvert. Cependant, au vu de la simplicité de cette mesure, il pourrait être intéressant d'effectuer un travail de modélisation/mesure sur ces variations de NDVI.

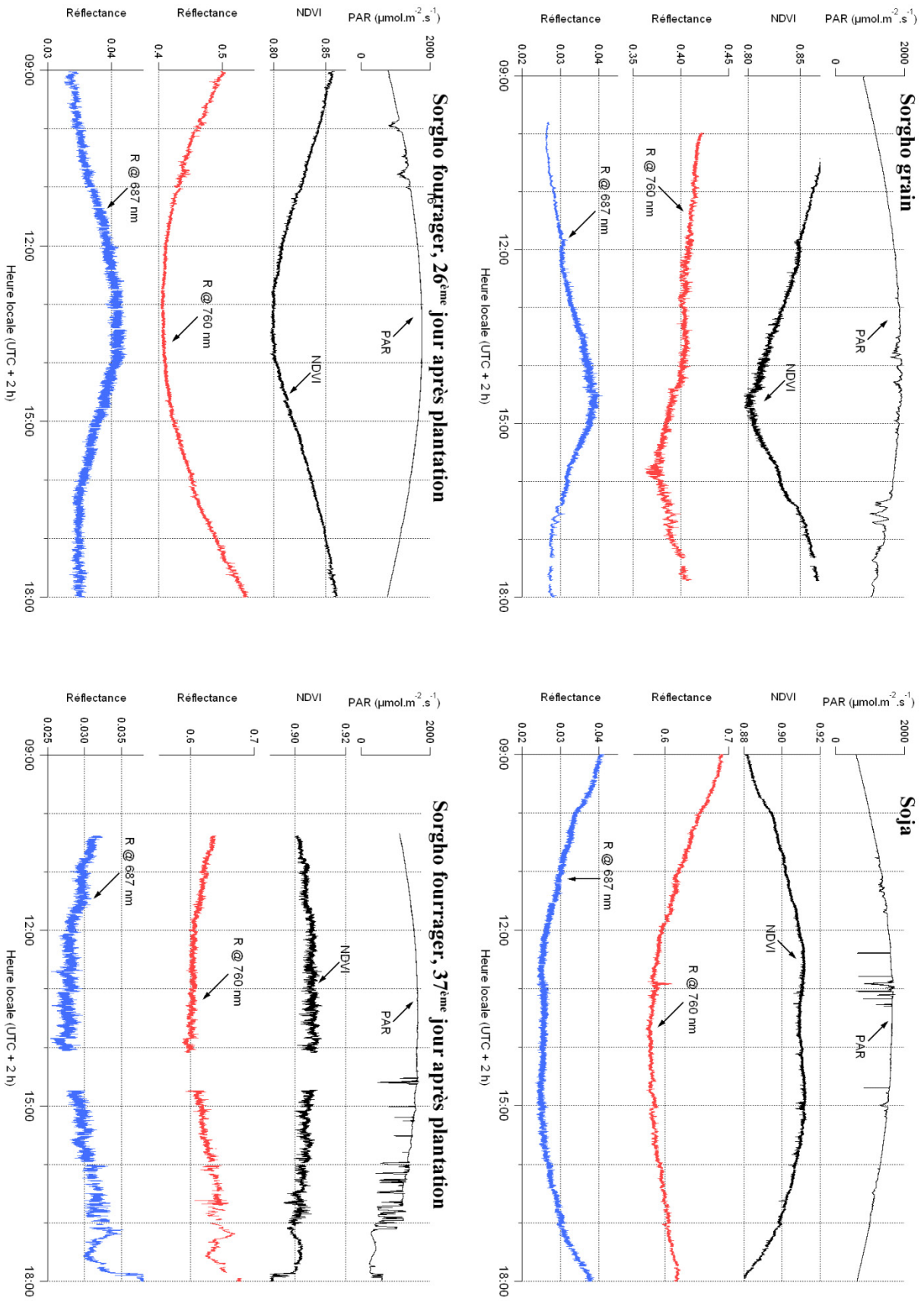


Figure V.43 *Variations diurnes de réflectance à 687 nm et 760 nm et de NDVI sur différents types de couvert : sorgho grain, soja et sorgho fourrager à deux stades de sa croissance.*

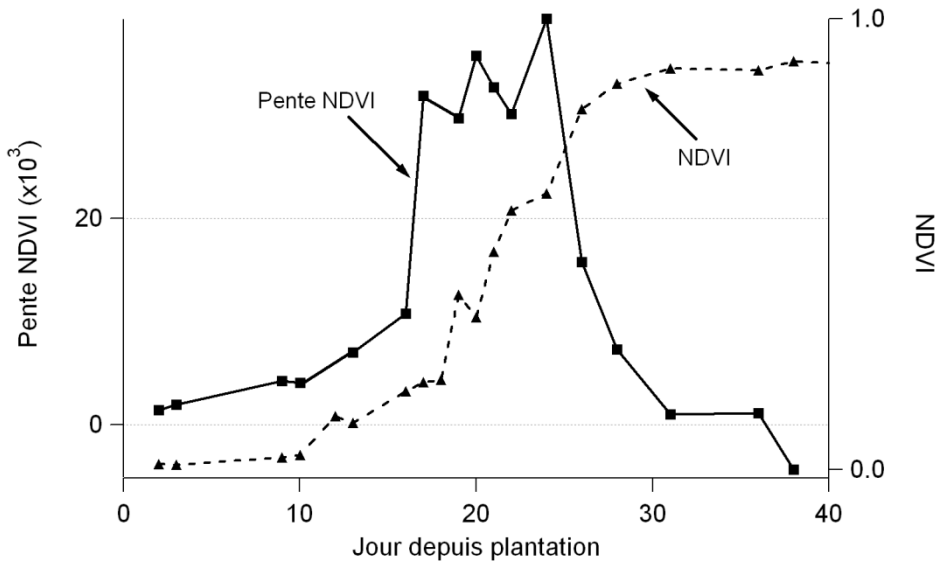


Figure V.44 *Evolution de la pente du cycle diurne du NDVI et du NDVI pendant la croissance du sorgho fourrager. Campagne de mesure de 2008. La pente du NDVI est obtenue en effectuant une mesure à 17h et une mesure à 14h (midi solaire).*

La réflectance de la végétation est donc une grandeur qui varie avec l'état de la végétation, son développement mais également avec l'éclairement. Les courbes présentées précédemment permettent de se faire une idée de l'ordre de grandeur de cette variation pour les canaux au fond des bandes d'absorption.

Nous l'avons vu au CHAPITRE II, les variations de réflectance d'un canal à l'autre sont prises en compte à l'aide d'un modèle de réflectance. Pour le calcul de la fluorescence ce n'est pas tellement la valeur de la réflectance qui est importante mais la variation de la *forme* du spectre de réflectance. Il est donc très important de choisir un modèle qui puisse s'adapter aux variations de forme du spectre au cours du temps. Les modèles choisis jusqu'ici (parabolique pour la bande O_2-B et linéaire pour la bande O_2-A) devrait pouvoir s'adapter mais aucune étude rigoureuse n'a été faite. Il pourrait être judicieux de mener une telle étude afin de définir le cadre de validité de ces modèles.

- **Fluorescence**

Au delà du problème de calcul de la fluorescence dans lequel il faut faire attention aux effets de structure de la végétation, cette structure a également un effet sur l'émission de fluorescence au niveau du couvert. La fluorescence est émise au sein du couvert et les processus de transferts radiatifs la modifient au cours de son transport jusqu'à la mesure par le capteur. Même si d'une mesure à l'autre la fluorescence ne varie pas au niveau de la feuille un changement dans l'organisation du couvert (développement, adaptation à un stress/contrainte, vent, …) peut induire un changement du spectre de fluorescence qui peut être mal interprété.

Cette variation de fluorescence n'est pas forcément un problème en soi puisqu'elle peut contenir l'information qui justement nous intéresse si on utilise la fluorescence comme estimateur de changements structurels de la végétation comme nous l'avons vu sur la croissance du sorgho fourrager. Il serait cependant intéressant une fois encore d'effectuer un travail de mesure/modélisation afin de quantifier et lier les effets de structure sur la fluorescence à des paramètres géométriques et biologiques.

- **Méthode de mesure**

La mesure passive de la fluorescence se base sur la comparaison d'une radiance sans fluorescence acquise sur une référence plane et de la radiance contenant la fluorescence issue de la végétation. Pour retrouver la fluorescence, nous utilisons la mesure sur la référence (dont la réflectance est connue) pour quantifier le flux incident. On écrit sur la référence selon la notation adoptée au CHAPITRE II:

$$L_i^r = \frac{\rho_i^r I_i}{\pi} \qquad (V.17)$$

Et comme la réflectance de la référence est connue nous écrivons que l'éclairement vaut:

$$I_i = \frac{\pi L_i^r}{\rho_i^r} \qquad (V.18)$$

Sur la végétation on écrit :

$$L_i = \frac{\rho_i I_i}{\pi} + f_i \qquad (V.19)$$

Et nous remplaçons l'éclairement de la végétation par $\frac{\pi L_i^r}{\rho_i^r}$ dans l'équation *(V.19)*. Ce faisant, nous considérons que l'éclairement pour la végétation est le même que l'éclairement de notre surface plane de référence. En fait, cela n'est vrai qu'à condition de considérer que le couvert observé est plan ! Or la végétation a une structure marquée et n'intercepte pas le rayonnement de la même manière que notre surface plane de référence. Bien que le vrai problème vienne du choix d'une référence plane pour estimer l'éclairement, on peut estimer que cet effet est induit par la structure du couvert.

On peut également voir cet effet sous un autre angle : en considérant que l'éclairement estimé à partir de notre référence plane est celui de la plante, cela revient à déplacer le problème sur l'estimation de la réflectance de la végétation qui, dans ce cas là, va dépendre des conditions d'éclairement. Il faudra alors s'assurer que notre modèle de réflectance soit capable de rendre compte des variations de réflectance de la végétation en fonction de l'éclairement.

On le voit, pour un couvert donné, cet effet dépend uniquement de l'éclairement : de sa direction et de la proportion de rayonnement direct et diffus. L'erreur éventuelle variera donc tout au long de la journée et de manière plus importante lors de changement de régime lumineux, par exemple lors de l'apparition de nuage qui favorise la lumière diffuse au détriment de l'éclairement direct.

Là encore un travail de mesure/modélisation est nécessaire pour quantifier cet effet et pouvoir en tenir compte pour l'interprétation des signaux de fluorescence.

5.8 Conclusions

Ce chapitre a été l'occasion de présenter la plateforme de mesure d'Avignon. Cette plateforme, basée sur une grue mobile permet de faire des mesures à l'échelle du couvert depuis une hauteur de 21 m. Cette mesure se fait sur des champs qui sont contrôlés par les équipes de l'INRA. Il est possible grâce aux déplacements de la grue de suivre l'évolution de plusieurs cultures en même temps.

Cette plateforme est un endroit idéal pour les mesures de longues durées sur un couvert végétal. C'est aussi un endroit privilégié pour le test d'instrument en particulier les instruments destinés à la

mesure avionnée. Il est d'ailleurs possible d'installer plusieurs instruments simultanément en haut de la grue.

Pour ces raisons cette plateforme devrait continuer à être utilisée par l'équipe (des campagnes de mesure ont d'ailleurs eu lieu en 2009 et 2010). Et elle pourrait jouer un rôle important dans les futures études du signal qui seront nécessaires à l'interprétation des données acquises depuis un avion ou un satellite.

Dans ce chapitre nous avons présenté plusieurs instruments de mesure de la fluorescence basés sur des spectromètres commerciaux. L'instrument SpectroFLEX nous a permis de proposer une méthode de mesure passive simple utilisant un seul capteur. Puis nous avons présenté l'instrument TriFLEX, une amélioration de SpectroFLEX, qui utilise trois spectromètres pour améliorer la rapidité des mesures. TriFLEX mesure la fluorescence en continu à une fréquence de 1 Hz. Nous avons d'ailleurs vu l'intérêt d'acquérir des cycles diurnes entiers pour l'étude du signal en fonction de l'éclairement. Et grâce à son autonomie, il permet des mesures sur de longues périodes sans être trop coûteux en termes de maintenance et de traitement des données.

Nous avons présenté un algorithme de gestion de mesure permettant d'améliorer significativement le rapport signal sur bruit des mesures. La méthode utilisée pour traiter les mesures faites par TriFLEX a été détaillée. TriFLEX a été utilisé pour la première fois lors d'une campagne de mesure en été 2008. Deux expérimentations ont été conduites : un suivi de stress hydrique et un suivi de croissance du sorgho fourrager.

Nous avons vu au cours du suivi du sorgho fourrager que la fluorescence pourrait être utilisée comme estimateur du flux lumineux absorbé par la végétation, en particulier la fluorescence à 760 nm qui ne subit pas de réabsorption lors de son transport dans le couvert. En effet, les résultats ont également montré une forte différence de l'évolution des signaux de fluorescence à 687 nm et à 760 nm. Cette différence a été attribuée aux effets de structure induits par le transport de la fluorescence à l'intérieur du couvert ; effets variant avec la densité du couvert. Il a d'ailleurs été établi que le rapport des fluorescences était fortement différent au niveau de la feuille.

Nous avons discuté du choix d'un indice basé sur la fluorescence permettant de s'affranchir des problèmes d'éclairement et permettant de rendre compte des variations de fluorescence à la fois au cours du cycle diurne et d'un jour à l'autre. Les fractions de fluorescence obtenues en divisant le flux de fluorescence par la radiance de la végétation à 685 nm semblent être les indices permettant de rendre le mieux compte des variations de fluorescence. Bénéficiant des variations opposées des deux grandeurs les définissant (la fluorescence augmente avec le développement du couvert alors que le flux réfléchi diminue), elles ont montrée un bruit fortement réduit par rapport aux autres mesures/indices. Nous avons établi que la fraction de fluorescence à 760 nm était l'indice permettant le mieux de suivre cette croissance : sa dynamique est particulièrement importante. Le suivi du stress hydrique a par ailleurs montré que les fractions de fluorescence rendaient compte du stress hydrique de la végétation en excellente corrélation avec les indications du PRI.

Si les mesures de flux de fluorescence devraient permettre de quantifier le flux absorbé par la végétation, les fractions de fluorescence, plus proches d'un rendement de fluorescence seront plus discriminantes et plus faciles à interpréter lorsqu'on comparera deux mesures faites dans des conditions (végétation, éclairement) différentes.

Nous avons par la suite discuté des différents effets de structure pouvant intervenir et fausser le calcul de la fluorescence. Les mesures de TriFLEX ont permis de montrer la variation de la réflectance

à 687 nm et à 760 nm au cours du cycle diurne et le changement de comportement du cycle diurne avec la structure de la végétation. C'est la première source d'erreur : il faut s'assurer que le modèle de réflectance reste valide au cours de ces modifications. Les deux autres sources d'erreur sont la modification du spectre d'émission du couvert à la suite d'un changement dans le couvert et l'erreur d'estimation de l'éclairement de la plante à cause de l'utilisation d'une référence plane. Ces différents effets doivent être étudiés pour quantifier leurs effets sur la mesure de la fluorescence.

Conclusion

Conclusion générale

Les travaux entrepris au cours de cette thèse ont porté sur trois principaux thèmes qui sont :

- la méthode permettant de retrouver la fluorescence par des mesures passives
- la correction des effets atmosphériques pour la mesure passive à distance
- l'interprétation du signal de fluorescence mesuré au niveau du couvert

- ***Comment optimiser la méthode de calcul de fluorescence ?***

On a vu que la mesure de la fluorescence repose sur la quantification du comblement des bandes d'absorption de l'oxygène atmosphérique après interaction avec la végétation. Nous avons vu au CHAPITRE I que la modification de la profondeur de ces bandes après réflexion par la végétation était due à la fois aux petites variations de réflectance au voisinage de la bande d'absorption et à la fluorescence. On pourra retenir que la végétation induira au maximum une modification de la profondeur de l'ordre de 10 à 15 %. Prendre en compte les petites variations de réflectance s'avère indispensable pour quantifier correctement la fluorescence. Dans cet objectif nous avons mis au point un nouvel algorithme qui tient compte de la réflectance de manière implicite grâce à un modèle simple. Ce modèle ne tient compte que de la *forme* du spectre de réflectance et s'adapte ainsi facilement à la variabilité des spectres de la végétation. Il permet ainsi de retrouver la fluorescence sans avoir à évaluer la réflectance. Il a également pour avantage de ne pas nécessiter une grande résolution spectrale : il fonctionne avec des canaux de mesure, à partir de 3 ou 4 canaux par bande d'absorption.

- ***Comment optimiser la mesure ?***

L'évaluation de la méthode de calcul a montré que pour avoir une incertitude inférieure à 5 % sur la mesure de la fluorescence il était nécessaire d'avoir un rapport signal sur bruit de l'ordre de 1800. La capacité à collecter la lumière (étendue) d'un système sera donc le critère principal et il paraît préférable d'utiliser un nombre réduit de filtres étroits plutôt qu'un système dispersif. Nous avons étudié la configuration d'un tel système pour l'optimisation de la détection de la fluorescence. Nous avons donc déterminé les largeurs des filtres nécessaires et leur position offrant la meilleure détectabilité.

- ***Quels sont les effets de l'atmosphère sur le signal de fluorescence ?***

L'étude des effets atmosphériques a débuté lors de la campagne SEN2FLEX. Des mesures avionnées ont été faites à différentes altitudes sur une même cible pour étudier la variation des flux mesurés. Ces mesures ont été présentées dans le chapitre III. La variation du flux avec l'altitude montre que les effets atmosphériques dominent le signal de fluorescence.

Les effets de l'atmosphère sur les flux sont de trois sortes :

- absorption du signal réfléchi/émis par la plante sur le trajet plante-détecteur
- contribution de l'environnement de la plante par diffusion vers le capteur

- contribution de l'atmosphère par rétrodiffusion de l'éclairement solaire vers le capteur (pas d'interaction avec le sol)

Ces effets ont des actions différentes sur le signal : l'absorption diminue le signal tandis que les contributions de l'environnement et de l'atmosphère viennent s'ajouter à la fluorescence. On voit donc qu'il est essentiel de tenir compte des effets atmosphériques pour pouvoir quantifier le signal de fluorescence.

Pour étudier, quantifier et corriger les mesures avionnées de ces effets, nous avons choisi d'utiliser le modèle MODTRAN. Nous avons utilisé la variation diurne des profondeurs pour valider MODTRAN. Nous avons montré que MODTRAN rendait compte du cycle diurne de la profondeur dans la bande O_2-A. Pour la bande O_2-B, une incertitude sur la calibration du capteur nous empêche de conclure de manière ferme mais nous montrons que MODTRAN rend compte de la forme du cycle diurne avec une corrélation de l'ordre de 0.99, ce qui laisse penser que la modélisation MODTRAN dans la bande O_2-B est aussi valide.

Ce travail de validation s'est accompagné d'une étude de sensibilité des profondeurs aux paramètres atmosphériques (contenu en eau, aérosol, température, pression) et aux incertitudes sur la calibration des canaux de mesures. Ce travail a permis de conclure que :

- les incertitudes sur la calibration sont de loin la plus grosse source d'erreur pour la modélisation des profondeurs
- la température et la pression ont une influence importante sur les profondeurs. La pression au sol variant principalement avec l'altitude, une bonne précision sur l'élévation du terrain est nécessaire.

- ***Application aux données avionnées***

Une méthode pour extraire les termes nécessaires aux corrections de MODTRAN a été donnée. L'analyse de la contribution de chacun de ces termes au signal mesuré en fonction de l'altitude a mis en évidence l'importance des contributions de l'atmosphère et de l'environnement vis-à-vis du signal de fluorescence.

Les mesures faites à différentes altitudes durant la campagne SEN2FLEX ont été utilisées pour évaluer la correction des profondeurs mesurées sur un champ de blé et sur un sol nu. Il ressort de ce travail que:

- La correction permet de retrouver les profondeurs au niveau du sol à partir des mesures faites jusqu'à 3 km d'altitude.
- La précision dépendra grandement de l'estimation de la réflectance moyenne de l'environnement.

L'information la plus importante ressortant de cette étude est que les contributions de l'atmosphère et de l'environnement ne peuvent être négligées devant le signal de fluorescence. Si la contribution de l'atmosphère ne dépend que des conditions atmosphériques, la contribution de l'environnement dépend en plus des caractéristiques du sol entourant la cible. De fait, lors de mesures avionnées, cette contribution est très variable d'une mesure à l'autre et nécessite une approche spécifique pour en tenir compte.

Une méthode opérationnelle pour la correction des effets atmosphérique dans le cadre de mesures avionnées a été présentée dans le CHAPITRE IV. Elle permet de réduire le temps de calcul au minimum en découplant les différents paramètres intervenant dans l'évaluation de chacun des termes de correction.

- ***Interprétation du signal de fluorescence mesuré au niveau du couvert***

Jusqu'à très récemment, la grande majorité des mesures de fluorescence se sont faites au niveau de la feuille. L'avènement des mesures passives avionnées et les projets spatiaux ont conduit à l'étude de l'émission de fluorescence au niveau du couvert végétal. Dans cette thèse, deux types de mesures à l'échelle du couvert ont été présentées : des mesures avionnées avec les campagnes SEN2FLEX et CEFLES2, et des mesures depuis le sol avec la plateforme d'Avignon.

Les mesures avionnées permettent de faire une mesure à l'échelle globale et de rendre compte des variations du cycle végétatif comme nous l'avons illustré dans le CHAPITRE IV. Elles ont mis en évidence l'influence du couvert végétal, de sa structure et de sa densité sur le signal de fluorescence émis. La fluorescence mesurée au niveau du couvert dépend, toutes choses égales par ailleurs, de :

- l'état physiologique de la végétation
- de son état de développement
- de sa structure
- de l'heure de mesure (au travers des effets d'éclairement)
- de la direction de visée de la mesure

C'est pourquoi il nous a paru nécessaire de pouvoir faire des mesures au niveau du couvert, depuis le sol, dans des conditions contrôlées afin de mener des études sur le signal. Cela nous a conduits au développement de la plateforme d'Avignon. Elle permet le test d'instrument en conditions de mesures sur le couvert avec visée au nadir et autorise les mesures depuis une hauteur d'une vingtaine de mètres sur des champs dédiés à la recherche agronomique.

A cette plateforme a été associé un nouvel instrument, TriFLEX. Cet instrument a été pensé de manière à être entièrement autonome pour pouvoir faire des mesures sur de longues périodes sans demander d'investissement humain trop important. Il s'agit également d'un instrument permettant l'étude de la méthode passive : basé sur des spectromètres, il permet de choisir facilement des canaux de mesures (position, largeur) et d'extraire le signal de fluorescence à partir de ces canaux.

Une première campagne de mesures a eu lieu en 2008. Deux types d'expérimentation ont été mis en place : un suivi de stress hydrique sur du sorgho à grain et un suivi de croissance sur du sorgho fourrager. L'induction d'un stress hydrique sur le sorgho à grain a montré que les signaux de fluorescence rendent compte de ce stress au même titre que le PRI.

La seconde expérimentation a permis de suivre l'évolution des signaux de fluorescence et du NDVI au cours de la croissance du sorgho fourrager. Cette expérimentation a montré que la fluorescence mesurée à 760 nm rend compte du développement de la végétation pendant toute la période de mesures, alors que le NDVI sature rapidement. Ce résultat indique que la fluorescence à 760 nm peut être utilisée comme un indicateur pertinent de biomasse, plus discriminant que le NDVI. D'autre part nous avons montré que la fraction de fluorescence à 760 nm était le signal ayant la plus forte dynamique.

Les mesures ont également montré une forte différence d'évolution des signaux de fluorescence à 687 nm et à 760 nm au cours du développement : il a été établi que le rapport des fluorescences était fortement différent au niveau de la feuille et du couvert, mettant ainsi en évidence les effets de transfert radiatifs à l'intérieur du couvert.

- ***Perspectives***

D'un point de vue instrumental, l'étude des effets atmosphériques a montré que la caractérisation de l'environnement au voisinage du spot au sol était indispensable pour l'évaluation de la fluorescence. Il faudra donc envisager les futurs capteurs sur la base d'un système imageur ou de tout autre système permettant de caractériser l'environnement. De plus, il sera nécessaire de porter un effort de recherche important sur la correction de ces effets d'environnement à partir des informations données par un tel système.

Les travaux effectués durant cette thèse montrent que la fluorescence peut être mesurée à grande distance grâce à la méthode passive. Comme l'ont montré les mesures avionnées et les mesures réalisées grâce à la plateforme d'Avignon, la question importante est l'interprétation du signal de fluorescence à l'échelle du couvert. En effet, lors du changement d'échelle, le signal de fluorescence s'enrichit d'une information sur le couvert. Si cette information est utile en elle-même elle apporte une variabilité de la fluorescence qu'il faut maîtriser pour pouvoir l'utiliser. Un effort de modélisation du transfert radiatif au sein du couvert devra être entrepris pour comprendre ces effets.

Très peu de mesures passives sont disponibles pour le moment à l'échelle du couvert. La plateforme d'Avignon mise en place et son association avec l'instrument TriFLEX permet des mesures de fluorescence dans des conditions privilégiées. La mesure en continu au cours de la journée permet d'estimer les comportements à court terme de la végétation ainsi que les problèmes d'éclairement tandis que l'autonomie de l'instrument autorise la mesure de cycles végétatifs entiers. Cette plateforme devrait permettre dans les prochaines années d'améliorer les connaissances sur le signal de fluorescence au niveau du couvert.

Signalons que la mesure passive a une limitation dont il faudra explorer les conséquences : elle donne accès à un flux de fluorescence mais pas au *rendement* de fluorescence. Or, dans le cadre de mesures avionnées ou satellitales, la mesure de flux est très difficile à interpréter : le flux dépend des conditions d'éclairement et de la capacité du couvert à absorber cet éclairement (effet de structure). La mesure active permet de s'affranchir en partie de ce problème puisqu'elle donne directement une mesure de rendement de fluorescence (l'excitation est connue). Il pourrait donc être intéressant de réaliser des mesures conjointes avec un système passif et un système actif, la combinaison de ces deux mesures devrait permettre de « calibrer » les mesures passives et d'en améliorer l'interprétation.

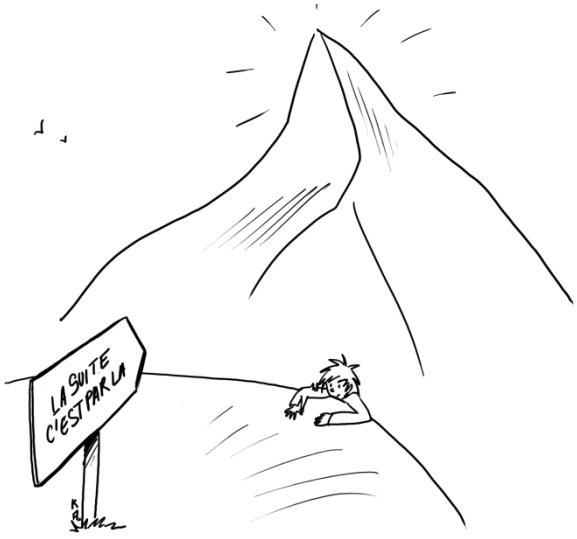
Les campagnes menées à Avignon ont mis en lumière l'intérêt du signal de fluorescence pour le suivi de la biomasse. Si la plateforme d'Avignon permet la mesure en continu, les mesures faites depuis un avion sont bien plus ponctuelles. De nouveaux indices combinant fluorescence et réflectance devront être définis pour les mesures avionnées. Ils devront être suffisamment discriminants et exploiter au mieux la répétitivité des mesures pour en extraire une information. A titre d'exemple, le projet FLEX prévoyait une répétition de 7 jours.

La fluorescence est souvent présentée comme une mesure de l'activité photosynthétique de la végétation. En mesure passive, l'information de fluorescence que l'on peut avoir porte sur le flux et non pas sur son rendement. Au niveau du couvert, le signal de fluorescence dépend de nombreux paramètres et le lien avec le fonctionnement de la plante ne sera pas facile à établir. D'autant plus pour

des mesures satellitales qui ont une faible résolution temporelle. Il serait donc préférable de voir la fluorescence comme un nouvel indice venant s'ajouter à l'ensemble des indices de végétation et enrichir les possibilités de caractérisation de la végétation.

Et pour le reste, *la réponse est « 42 »*

Douglas Adams



Annexes

ANNEXES

Annexe A Position des canaux de mesure, nouvel algorithme 307

Annexe B Evaluation des différentes contributions au signal mesuré en fonction de l'altitude 317

Annexe C Contribution de l'environnement en fonction de sa réflectance 333

Annexe D Evaluation de l'importance des corrections atmosphériques 335

Annexe E Evaluation de la précision nécessaire pour l'évaluation des corrections atmosphérique 341

Annexe F Récupérations des données d'élévation de terrain 345

Annexe G Algorithme de détection de survol 347

Annexe H Boîtier permettant de simuler le débranchement/branchement d'un périphérique USB 349

Annexe I Calibration des spectromètres 351

Annexe J Calibration – fonction instrumentale 355

Annexe A
Position des canaux de mesure, nouvel algorithme

Pour l'utilisation de l'algorithme présenté dans la section 2.4 du CHAPITRE II il nous faut choisir la position des canaux de mesure. Nous nous proposons donc de chercher la position des canaux minimisant l'erreur sur la fluorescence. Pour cela nous allons simuler la mesure avec un capteur parfait (sans bruit de mesure), appliquer notre algorithme et déterminer l'erreur sur la fluorescence et sur la réflectance retrouvée en fonction de la position des canaux. Les flux seront simulés à partir des éléments que nous avons déjà présentés dans la section 2.3.4 du CHAPITRE II (spectres solaires à 9 h, 12 h, 18 h, spectre de fluorescence. Les calculs seront faits avec trois types de réflectance qui sont présentés dans la figure suivante

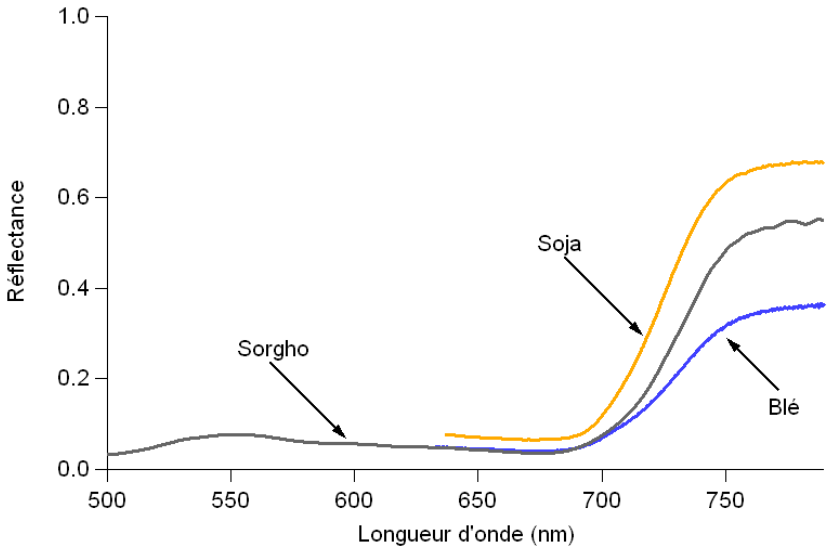


Figure VI.1 *Réflectances utilisées pour la modélisation. Ces réflectances ont été acquises au niveau du couvert. Sorgho : NDVI=0.87: Soja : NDVI=0.82, Blé : NDVI=0.79.*

Les réflectances sont des réflectances mesurées au niveau du couvert sous excitation solaire, par l'instrument TriFLEX (voir CHAPITRE V).

Les données sont simplement obtenues en multipliant le spectre d'irradiance par le spectre de réflectance puis en ajoutant le spectre de fluorescence. Il ne reste plus qu'à intégrer le spectre obtenu sur les transmissions des canaux avec la configuration voulue pour générer les signaux tels qu'ils pourraient être acquis. Bien sûr les signaux générés de cette manière ne contiennent pas de bruit, ils représentent un cas idéal.

Lorsque le modèle choisi pour faire le calcul de fluorescence nécessite des paramètres tels que les coefficients K_i, (voir CHAPITRE II), ces paramètres sont calculés directement sur le spectre concerné (ici la fluorescence). Tous ces paramètres sont donc exacts, nous sommes une fois encore dans un cas idéal, les erreurs obtenues sur la fluorescence et la réflectance ne seront donc pas dus à une

méconnaissance des paramètres nécessaires pour appliquer notre algorithme mais à l'algorithme lui même.

A.1 Bande O_2-A

Pour les calculs effectués dans la bande O_2-A le spectre de fluorescence est normalisé de telle manière que la fluorescence ait une valeur de 2 $mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ à 760 nm.

- ***Configuration des bandes de mesures***

L'équation *(II.32)* nous permet de retrouver la fluorescence avec trois canaux de mesures en faisant l'hypothèse que la variation de réflectance le long de la bande est linéaire. Les calculs effectués dans le paragraphe 2.3.5 nous donnent déjà la position de deux canaux (758.1 nm, 760.45 nm), ainsi que la largeur optimale (1 nm). Il ne reste plus qu'à placer le troisième canal.

Le calcul de fluorescence/réflectance est appliqué en faisant varier la position du troisième canal entre 750 nm et 780 nm par pas de 0.05 nm. Le résultat concernant la fluorescence est présenté sur la *Figure VI.2*.

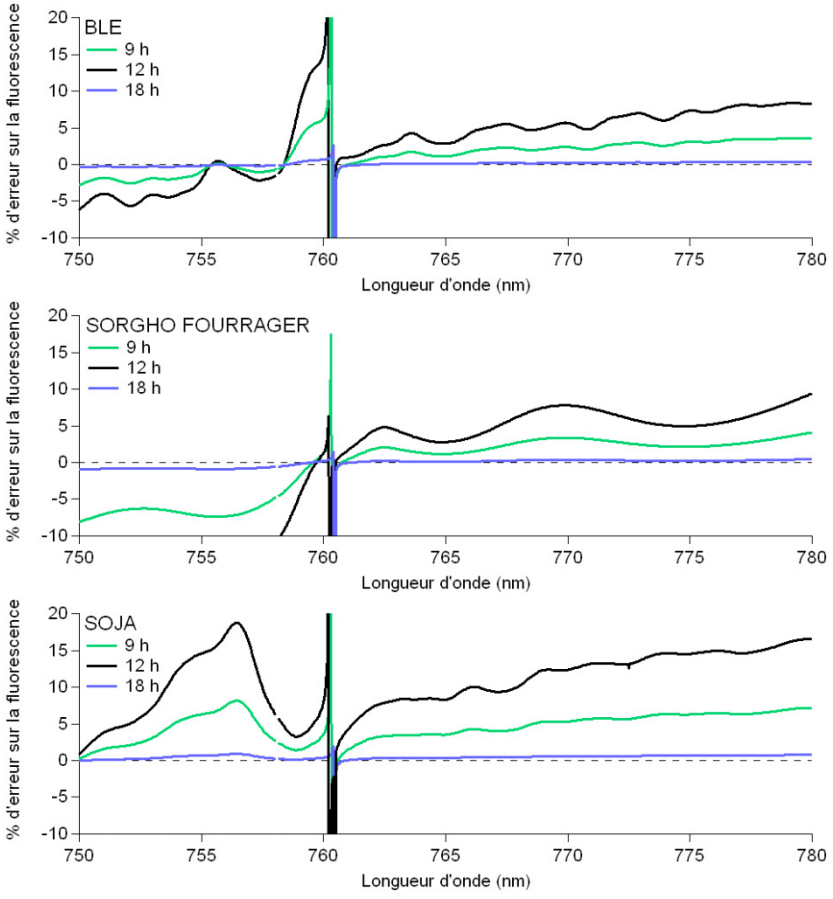


Figure VI.2 *Erreur sur la fluorescence en fonction de la position du troisième canal lors du l'application de l'équation (II.32) sur des données générées artificiellement.*

On voit sur cette figure que, quelle que soit le type de réflectance, l'erreur sur la mesure est plus importante lorsque la profondeur est la plus faible (à 12h). L'erreur sur la mesure est de l'ordre de 10 % au midi solaire et < 0.5 % à 18 h quelle que soit la longueur d'onde du troisième canal. Les grandes variations que l'on observe sur les résultats concernant le sorgho fourrager au delà de 760 nm

sont probablement dues aux variations similaires que l'on retrouve sur la réflectance. Sur cette figure une zone commune de moindre erreur semble se dégager aux alentour de 765 nm.

On peut maintenant regarder l'erreur sur la réflectance retrouvée. Comme elle est fortement similaire d'un type de réflectance à l'autre et d'une heure à l'autre nous ne présentons donc que l'erreur moyenne faite sur les différents types de réflectance et les différentes heures. Le résultat est présenté sur la *Figure VI.3* en même temps que la même moyenne sur l'erreur de fluorescence (moyenne des valeurs absolues).

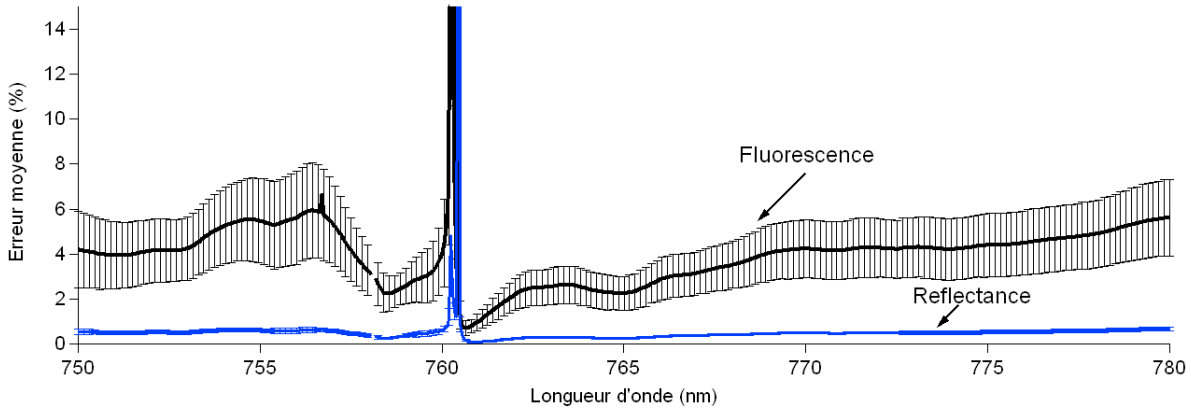


Figure VI.3 *Pourcentage d'erreur moyen et déviation standard pour la fluorescence et la réflectance retrouvée à l'aide de l'équation (II.32) sur l'ensemble des données générées artificiellement.*

On voit sur cette figure que l'erreur moyenne sur la réflectance est < 1 % et dépend peu de la longueur d'onde du troisième canal. Sur ces moyennes, deux zones semblent être favorables pour la position du troisième canal : une zone assez petite près du fond de la bande, autour de 761 nm et une zone aux alentours de 765 nm. La zone à 761 nm étant proche de la longueur d'onde du fond, un léger décalage vers la gauche peut rendre la mesure totalement inutilisable. La zone à 765 nm, bien que présentant une erreur moyenne un peu plus élevée semble être plus favorable. Cette longueur d'onde est toutefois encore dans la zone de la bande d'absorption. Celle-ci s'étend jusqu'à ~770 nm, et il peut être souhaitable de sortir de la bande d'absorption. Dans ce cas l'erreur sur la fluorescence sera plutôt de l'ordre de 4 %.

Un autre critère pouvant être utile pour faire un choix est la sensibilité de notre modèle à l'erreur sur les coefficients de fluorescence. On a vu que notre modèle nécessitait la connaissance de deux coefficients liant la fluorescence dans les canaux en dehors de la bande d'absorption à la fluorescence dans la bande d'absorption. L'erreur maximale sur la fluorescence s'exprime comme la somme quadratique des erreurs sur chacun des coefficients soit:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial K_1}\Delta K_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial K_2}\Delta K_2\right)^2} \qquad (VI.1)$$

En résolvant *(VI.1)* on trouve que l'erreur sur la fluorescence est proportionnelle à l'incertitude sur ces coefficients. Le coefficient de proportionnalité (K_{erreur}) est donné sur la *Figure VI.4* (si le coefficient vaut 0.5, une incertitude de 2 % sur les coefficients entraine une erreur de 1 % sur la fluorescence).

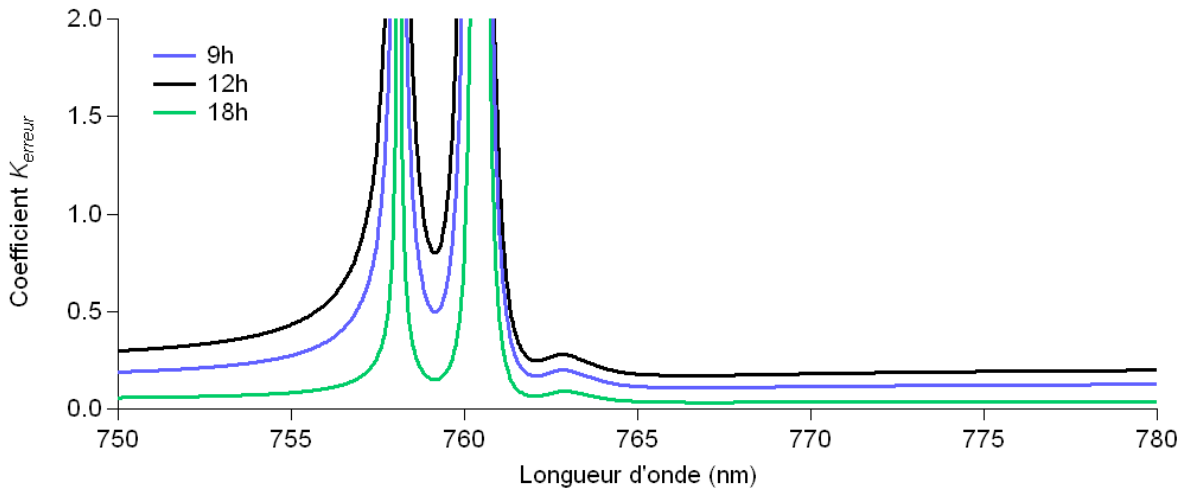


Figure VI.4 *Coefficient de proportionnalité entre l'incertitude sur les coefficients du modèle de fluorescence et l'erreur sur la fluorescence dans la bande O_2-A.*

La *Figure II.27* montre que la sensibilité aux erreurs sur le modèle de fluorescence sera assez faible du moment que la position du canal est situé sur la droite de la bande d'absorption. La zone à 761 nm dont on avait parlé précédemment est là aussi une zone sensible à laquelle il faudrait préférer une zone de longueur d'onde >765 nm.

- ***Comparaison avec le calcul au premier ordre***

On peut évaluer le nouvel algorithme de calcul en le comparant avec ce que donne le calcul simple présenté au paragraphe 2.1.1 du CHAPITRE II. Les *Figure VI.5* et *Figure VI.6* présentent les erreurs sur la fluorescence et la réflectance obtenue avec les deux algorithmes. Ce sont les moyennes des valeurs absolues des erreurs trouvées pour les différentes heures et les différentes réflectances. Etant donné que l'erreur pour le premier algorithme dépend fortement de la position en longueur d'onde du canal du bord, les résultats sont présentés en fonction de cette longueur d'onde.

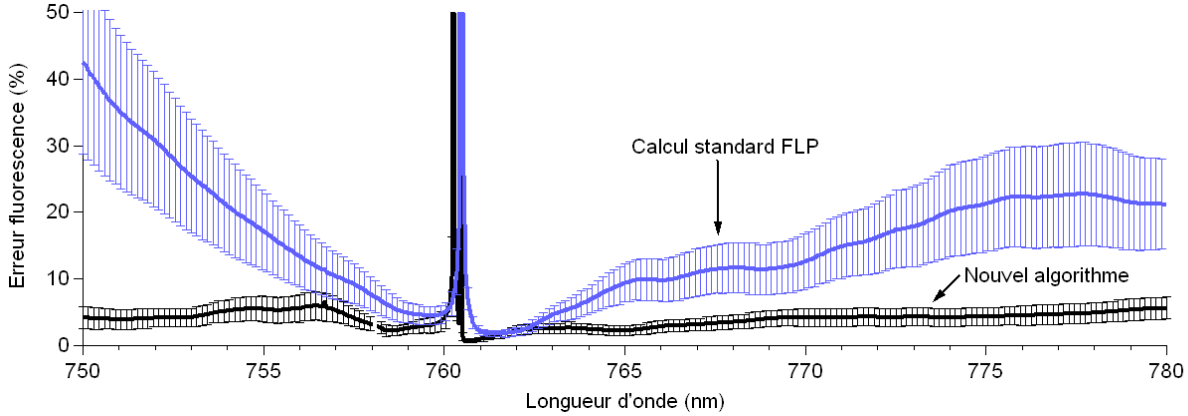


Figure VI.5 *Erreur sur la fluorescence obtenue en utilisant l'algorithme standard FLP (courbe bleue, position canal fond : 760.45, canal bord : abscisse, largeur : 1 nm) et en utilisant le nouvel algorithme présenté au paragraphe 2.4.1 (courbe noire, position canal fond : 760.45, 1er canal : 758.1 nm, 2nd canal : abscisse, largeur : 1 nm)*

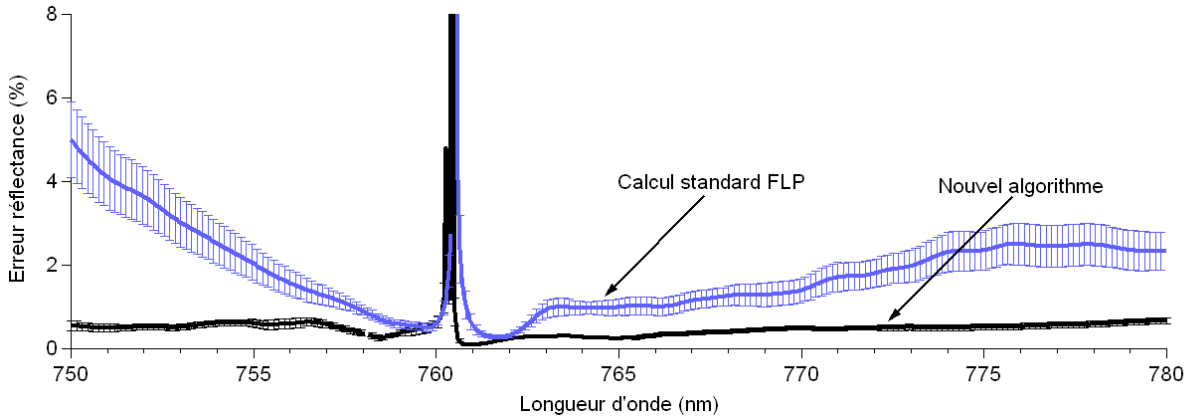


Figure VI.6 *Erreur sur la réflectance obtenue en utilisant l'algorithme standard FLP(courbe bleue, position canal fond : 760.45, canal bord : abscisse, largeur : 1 nm) et en utilisant le nouvel algorithme présenté au paragraphe 2.4.1 (courbe noire, position canal fond : 760.45, 1er canal : 758.1 nm, 2nd canal : abscisse, largeur : 1 nm)*

On voit dans les deux cas que l'erreur est plus faible pour notre algorithme. On peut voir également que la dispersion est plus faible. Dans le cas de l'algorithme simple, l'erreur devient très importante dès que l'on s'éloigne de la longueur d'onde du fond de la bande d'absorption. En comparaison l'erreur dans le cas de notre algorithme dépend moins de la longueur d'onde du troisième canal. On peut donc estimer que notre algorithme sera plus stable et permettra une meilleure estimation de la fluorescence et de la réflectance de la végétation. Pour les cas simulés ici, si on choisit une longueur d'onde >770 nm on pourra atteindre une erreur sur la fluorescence de l'ordre de 4 %, une erreur sur la réflectance inférieure à 0.5 %.

Notre algorithme est par ailleurs relativement peu sensible aux erreurs sur les coefficients du modèle de fluorescence. Ainsi si le troisième canal placé à une longueur d'onde > 765 nm on aura une erreur supplémentaire sur la fluorescence inférieure à 0.25 fois l'erreur faite sur ces coefficients en pourcents.

La *Figure VI.7* illustre la position des canaux de mesure optimaux que l'on vient de déterminer.

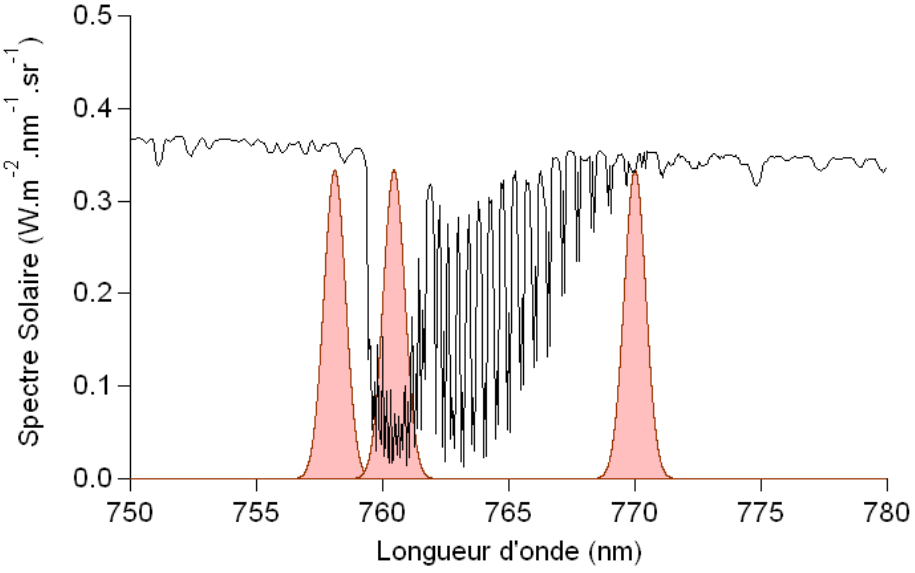


Figure VI.7 *Filtre de transmission des canaux selon la configuration optimale déterminée pour la bande O_2-A.*

A.2 Bande O_2-B

Nous allons maintenant nous intéresser à l'application de l'équation *(II.35)* pour la mesure de la fluorescence dans la bande O_2-B. Dans toute la suite le spectre de fluorescence utilisé pour les calculs sera donc normalisée de manière à avoir une valeur de 1.5 $mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ à 687 nm. Nous allons, de la même manière que précédemment, simuler la mesure pour différentes configurations de canaux en utilisant comme base de départ la configuration obtenue dans la section 2.3.5. Comme précédemment, les résultats en termes de position de canal sont similaires à 9 h, 12 h et 18 h. Seule change la valeur de l'erreur, nous n'utiliserons donc dans la suite que le spectre d'irradiance simulé à 12 h.

Pour le moment nous connaissons la largeur optimale : 0.7 nm et la longueur d'onde du canal du fond : 687.15 nm. Il faut encore placer trois canaux de manière optimale. Nous allons dans un premier temps chercher à fixer un canal, puis une fois ce canal fixé nous chercherons quelle est la position optimale pour les deux autres canaux. Pour commencer nous faisons donc varier la position de deux canaux de 680 nm à 715 nm par pas de 0.25 nm (on se limite à 715 nm pour ne pas empiéter sur la bande de l'eau). Pour chaque configuration nous cherchons la position du troisième canal qui minimise l'erreur sur la fluorescence. La *Figure VI.8* représente les distributions de la longueur d'onde du troisième canal minimisant l'erreur sur la fluorescence.

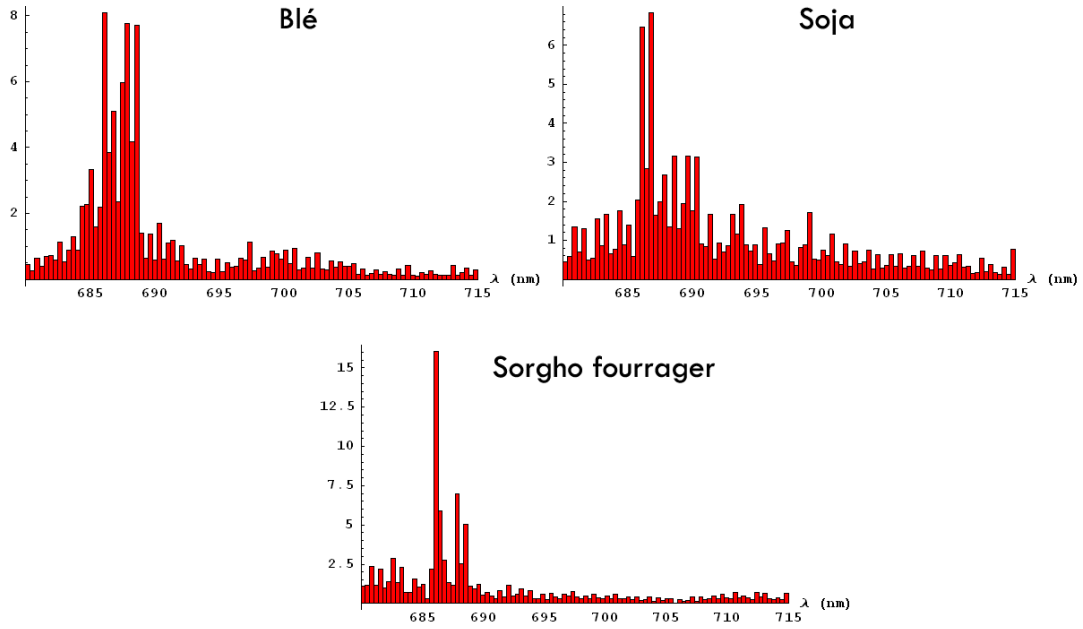


Figure VI.8 *Distribution de la longueur d'onde minimisant l'erreur sur la fluorescence pour les deux autres longueurs d'onde variant entre 680 et 715 nm. La longueur d'onde du canal du fond est fixée à 687.15 nm*

On voit clairement que dans tout les cas, une longueur d'onde autour de 686 nm semble être souvent celle qui minimise l'erreur sur la fluorescence. Une simulation plus précise donne cette longueur d'onde à : 686.3 nm.

Maintenant que nous avons fixé deux longueurs d'onde nous allons chercher à fixer les deux dernières. On fait donc varier les deux longueurs d'onde entre 680 nm et 715 nm par pas de 0.125 nm.

La *Figure VI.9* présente la moyenne des erreurs sur la fluorescence et sur la réflectance (en valeur absolue) pour les trois types de réflectance au midi solaire. Chaque graphique présente bien entendu une symétrie autour de la droite $y=x$, on peut donc raisonner sur une seule partie du graphique.

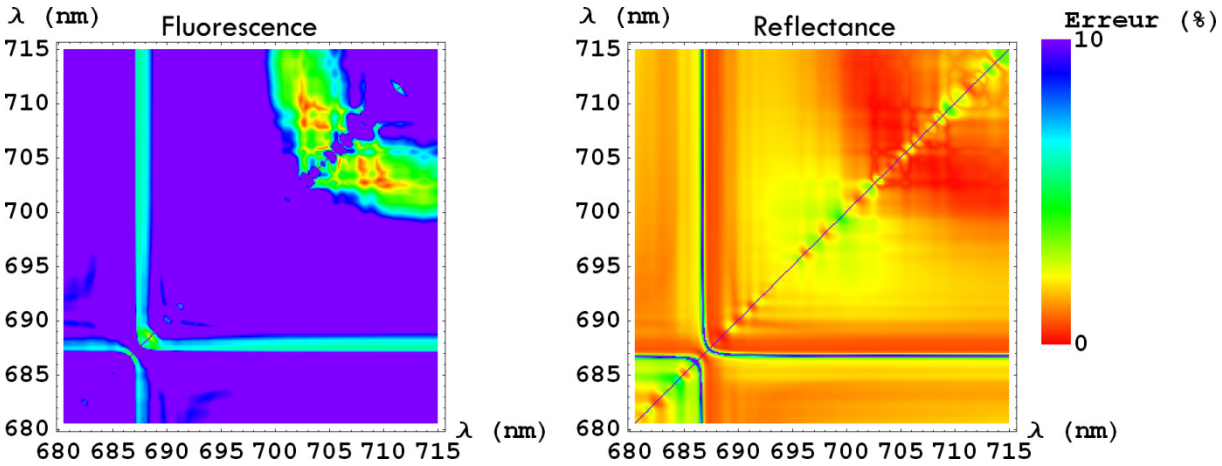


Figure VI.9 *Moyenne de l'erreur sur la fluorescence (à gauche) et sur la réflectance (à droite) (moyenne des valeurs absolues) sur trois types de réflectance à 12h.*

On voit sur cette figure que l'erreur minimale que l'on peut espérer atteindre se situe sous les 10 % pour la fluorescence et sous les 5 % pour la réflectance. D'autre part ces figures nous permettent de choisir une zone pour laquelle l'erreur moyenne sera minimale. Cette zone se situe environ entre 700 nm et 706 nm pour le premier canal et entre 705 nm et 715 nm pour le second (erreur inferieure à 5 %). On peut alors fixer un canal et regarder comment varie l'erreur en fonction de la longueur d'onde du second. La première longueur d'onde choisie est 702.6 nm. Le résultat est reporté sur la *Figure VI.10* ; on y voit qu'une zone favorable se dégage pour le dernier canal entre 708 et 711 nm. Dans cette zone, l'erreur moyenne est inférieure à 2 % pour la fluorescence et inferieure à 0.5 % pour la réflectance.

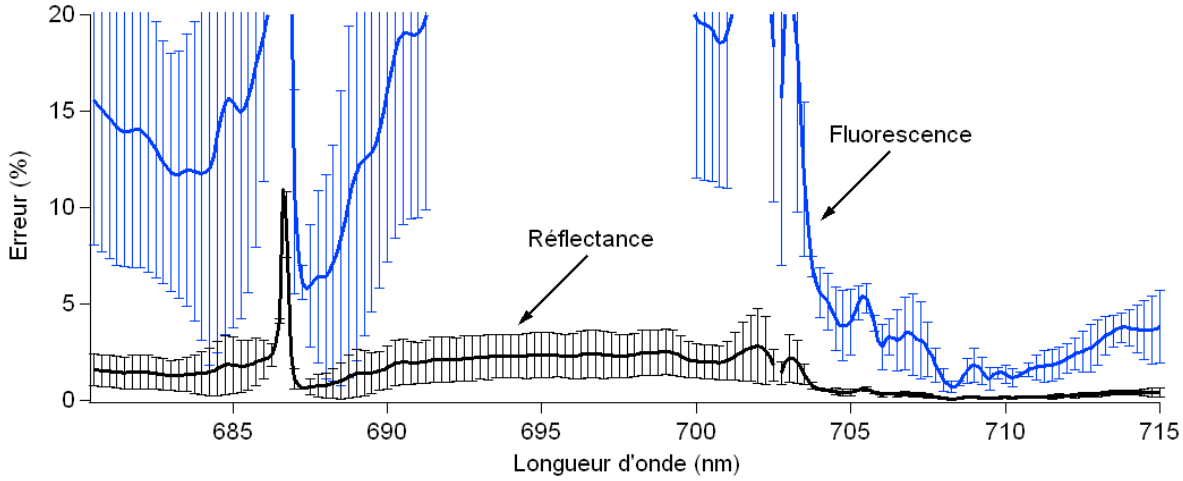


Figure VI.10 *Moyennes de l'erreur sur la fluorescence (courbe bleue) et sur la réflectance (courbe noire) pour les trois types de réflectance (moyenne des valeurs absolues) en fonction de la longueur d'onde du dernier canal. Largeur des canaux : 0.7 nm, position des trois premiers canaux : 686.3 nm, 687.15 nm, 702.6 nm.*

De même que dans la bande d'absorption O_2-A, on peut calculer l'erreur induite par une erreur sur les coefficients K_i. Les résultats ne dépendant pas du type de réflectance, les calculs sont faits sur la réflectance du blé. L'erreur sur la fluorescence est proportionnelle à l'incertitude sur ces coefficients. Le coefficient de proportionnalité (K_{erreur}) est donné sur la *Figure VI.11* (si le coefficient vaut 0.5, une incertitude de 2 % sur les coefficients entraîne une erreur de 1 % sur la fluorescence).L'erreur induite sur la fluorescence par une mauvaise connaissance de ces K_i est plus élevée dans la bande O_2-B que dans la bande O_2-A. Cela était attendu au vu des résultats présentés au paragraphe 2.3.3. Il n'y pas de zone minimisant particulièrement l'erreur, on peut donc s'attendre à une erreur supplémentaire sur la fluorescence à midi de l'ordre de 4 fois l'erreur en pourcents sur les K_i.

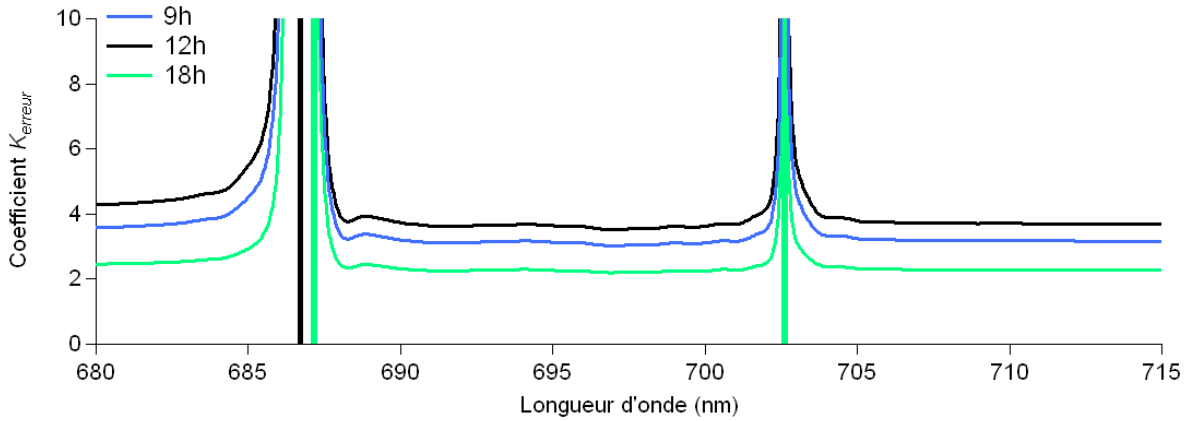


Figure VI.11 *Coefficient de proportionnalité entre l'incertitude sur les coefficients du modèle de fluorescence et l'erreur sur la fluorescence dans la bande O_2-B en fonction de la longueur d'onde du dernier canal. Largeur des canaux : 0.7 nm, position des trois premiers canaux : 686.3 nm, 687.15 nm, 702.6 nm.*

La *Figure VI.12* illustre la position des canaux de mesure optimaux que l'on vient de déterminer.

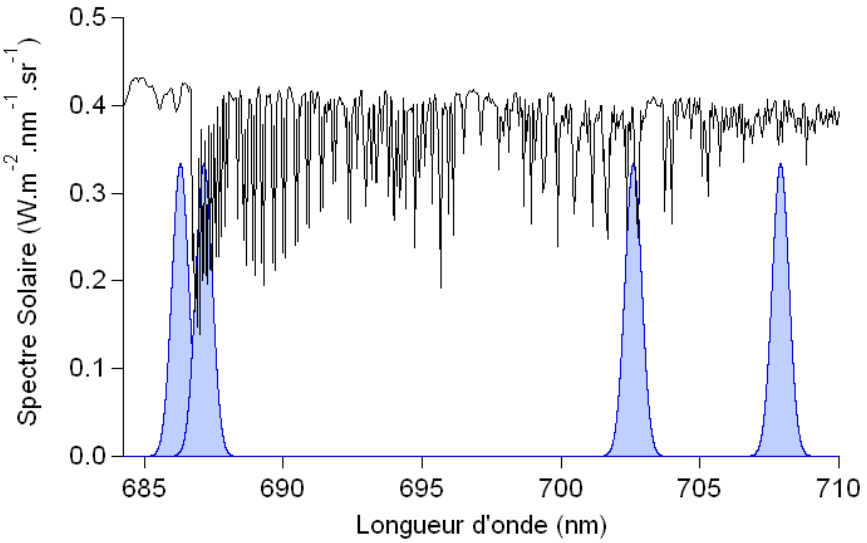


Figure VI.12 *Filtre de transmission des canaux selon la configuration optimale déterminée pour la bande O_2-B.*

Nous avons donc déterminé une configuration de mesure optimale pour chaque bande, qui permet de retrouver la fluorescence avec la meilleure précision possible. Ces configurations sont reportées dans la *Table II.7*.

	Configuration des canaux de mesure	
	Longueur d'onde (nm)	FWHM (nm)
Bande O_2-A	758.10	1
	760.45	1
	770.00	1
Bande O_2-B	686.30	0.7
	687.15	0.7
	702.60	0.7
	707.90	0.7

Table VI.1 *Configuration optimale pour la mesure de la fluorescence avec les algorithmes présentés dans la section 2.4.1.*

Annexe B
Evaluation des différentes contributions au signal mesuré en fonction de l'altitude

Les parts relatives des différentes contributions au signal mesuré dépendent fortement de la réflectance de la cible et de la réflectance de l'environnement. Afin de simplifier les écritures, nous adoptons la notation suivante : le signal mesuré au niveau du capteur sera écrit comme :

$$L = I_{sol} + ENV_2 + ATM + ENV + fluo \qquad (VI.2)$$

Avec I_{sol}, le flux solaire réfléchi par la cible, ENV_2 l'éclairement dû à l'environnement réfléchi par la cible, ATM la contribution de l'atmosphère, ENV la contribution de l'environnement et $fluo$, la contribution de la fluorescence s'il y a lieu. Toutes ces grandeurs s'entendent à l'altitude de mesure (elles tiendront donc compte de la transmission de l'atmosphère) et sont intégrées sur les transmissions des canaux du capteur.

Afin de simplifier la discussion nous nous intéresserons à deux types de couples cible/environnement : un champ vert et un champ nu. Nous définissons donc dans la *Table III.31* les valeurs que nous utiliserons alternativement pour la cible et pour l'environnement. Lorsque la cible est la végétation, la fluorescence utilisée au niveau du sol est de 2 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ pour la bande O_2-A et 1.5 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ dans la bande O_2-B.

Type d'objet	Réflectance O_2-B	Réflectance O_2-A
Végétation	0.04	0.5
Champ nu	0.25	0.28

Table VI.2 *Réflectances utilisées pour l'étude de l'importance des différentes contributions dans le signal mesuré par le capteur.*

Nous allons nous pencher sur quatre cas limites : deux cas idéaux dans lesquelles la surface est soit une surface de type champ nu uniforme (*Figure VI.13.A*), soit une surface végétale uniforme (*Figure VI.13.*). Nous traiterons également deux cas plus complexes dans lesquels on observera soit un champ nu entouré de végétation (*Figure VI.13.C*), soit de la végétation entourée de champ nu (*Figure VI.13.*).

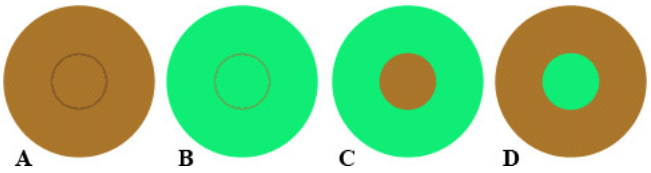


Figure VI.13*Les différentes configurations de mesures qui seront considérées dans la suite.* ***A*** *: surface uniforme de type champ nu.* ***B*** *: surface uniforme végétale.* ***C*** *: Champ nu entouré de végétation.* ***D*** *: Végétation entourée de champs nu.*

Les signaux ne présentant plus d'évolution au delà de 40 km, nous ne présentons les résultats que pour la tranche 0-40 km.

B.1 Cas idéal : cible = environnement

Dans le cas de mesure à distance, si la taille des champs est grande devant la tache au sol définie par le champ de vue du capteur et que l'altitude est faible, il devient raisonnable d'envisager de poser le problème des corrections atmosphériques en supposant que la réflectance de l'environnement est égale à celle de la cible.

- **Cible uniforme : champ nu (Cas A)**

Pour ce cas, les simulations MODTRAN sont faites en choisissant la même réflectance pour la cible et l'environnement : celle d'un champ nu (voir *Table III.31*, *Figure VI.13.A*). La *Figure VI.14* donne l'évolution des flux au niveau du capteur, de la profondeur, de la transmission et des différentes contributions au signal en fonction de l'altitude pour la bande O_2-B. Les différentes contributions sont à comparer à la valeur de la fluorescence au sol que l'on peut prendre autour de 2 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$. Comme nous l'avons vu précédemment la contribution de l'atmosphère et de l'environnement augmente avec l'altitude. Cela exprime l'augmentation de la diffusion au fur et à mesure que l'on s'élève. On voit une fois encore que la contribution de l'atmosphère sature après la contribution de l'environnement : la radiance propre de l'atmosphère est générée à toutes les altitudes sous le capteur alors que la contribution de l'environnement provient du sol, cette dernière est donc plus rapidement absorbée. La contribution ENV_2 diminue très rapidement avec l'altitude puisque directement soumise à l'absorption entre le sol et le capteur. La somme de ces différentes contributions est donnée par la courbe d'évolution des flux. On voit que le flux au bord de la bande commence par augmenter avec l'altitude : jusqu'aux alentour de 20 km les contributions de l'environnement de l'atmosphère sont supérieures aux pertes par diffusion. Au delà, elles ne suffisent plus à compenser les pertes et le flux diminue. Le flux au fond est quant à lui entièrement dominé par la forte absorption et diminue en fonction de l'altitude.

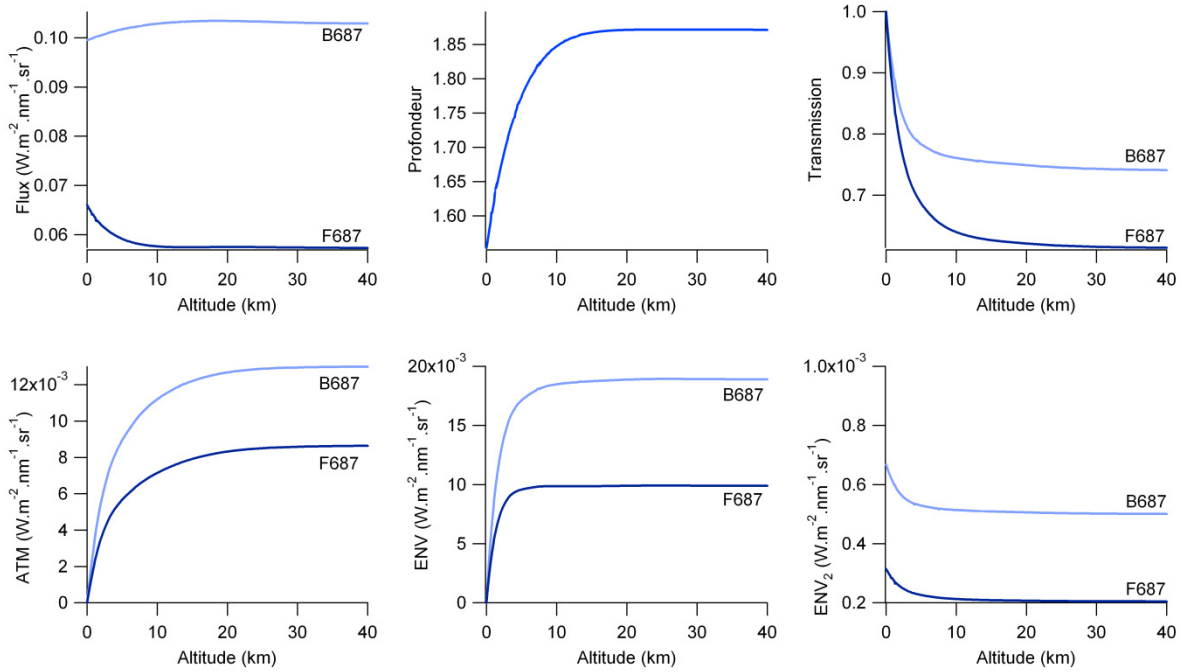


Figure VI.14 *Evolution des flux, des profondeurs, de la transmission effective et des différentes contributions au signal en fonction de l'altitude pour la bande O_2-B. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type champ nu (voir Table III.31, Figure VI.13.A).*

La *Figure VI.15* donne la part de chaque contribution dans le signal total. La courbe en pointillés donne la somme des contributions n'ayant pas interagi avec la cible (*ATM+ENV*). La courbe fluorescence ne figure qu'à titre indicatif : elle donne l'importance de la fluorescence vis-à-vis du signal total. Dans le cas que nous étudions, la contribution principale pour la bande O_2-B (bord et fond) est la contribution de la cible avec 70 % du signal, contre 30 % pour *ATM+ENV*. La *Table VI.3* donne les valeurs pour trois altitudes. Ces contributions, bien que faibles à basse altitude, ne sont pas négligeables devant le flux de fluorescence. Il faudra donc en tenir compte pour la correction des effets atmosphériques. On notera également que les termes *ATM* et *ENV* sont du même ordre de grandeur, il n'y aura donc aucun terme à négliger.

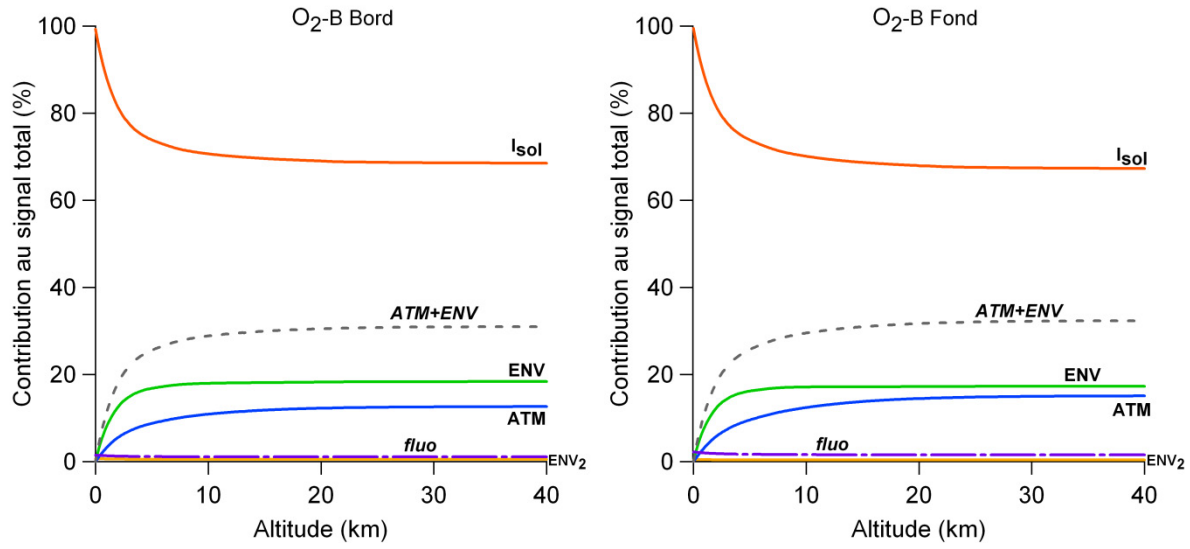


Figure VI.15 *Evolution de la part relative des différentes contributions dans le signal total en fonction de l'altitude pour la bande O_2-B. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type champ nu (voir Table III.31, Figure VI.13.A). La courbe en pointillés représente la somme des contributions ne contenant pas d'information sur la cible (ATM+ENV). La courbe fluorescence ne figure qu'à titre indicatif, elle donne la contribution au signal total s'il contenait de la fluorescence.*

Altitude	*Bord*		*Fond*	
	I_{sol}	*ATM+ENV*	I_{sol}	*ATM+ENV*
300 m	95 %	4 %	95.5 %	4 %
3000 m	77.5 %	22 %	78 %	22 %
> 40 km	68.5 %	31 %	67 %	32 %

Table VI.3 *Part des différentes contributions dans le signal total pour trois altitudes dans la bande O_2-B. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type champ nu (voir Table III.31, Figure VI.13.A).*

La *Figure VI.16* présente les évolutions des différents signaux dans la bande O_2-A. Bien que la transmission au fond de la bande O_2-A soit bien plus faible et la profondeur de cette bande bien plus forte, on retrouve des résultats très similaires à ce que l'on a dit pour la bande O_2-B.

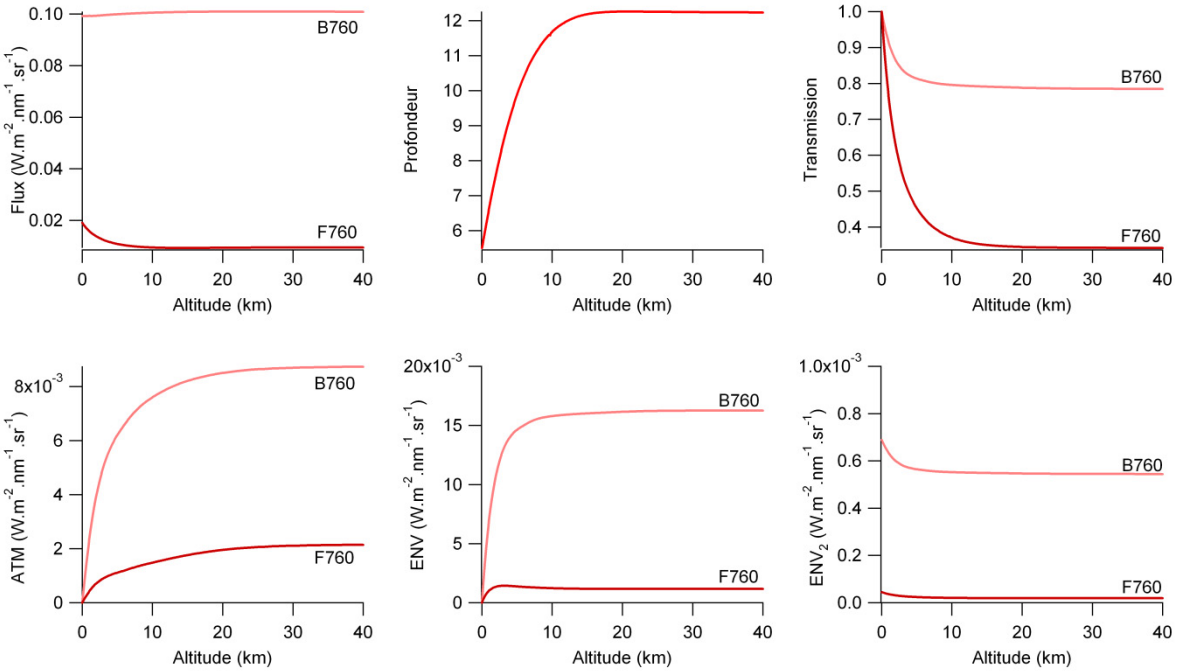


Figure VI.16 *Evolution des flux, des profondeurs, de la transmission effective et des différentes contributions au signal en fonction de l'altitude pour la bande O_2-A. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type champ nu (voir Table III.31, Figure VI.13.A).*

La *Figure VI.17* et la *Table VI.4* donnent la part de chaque contribution dans le signal total. On voit encore une fois que s'il n'est pas majoritaire, le signal ne contenant pas d'information sur la cible n'est pourtant pas négligeable devant la fluorescence.

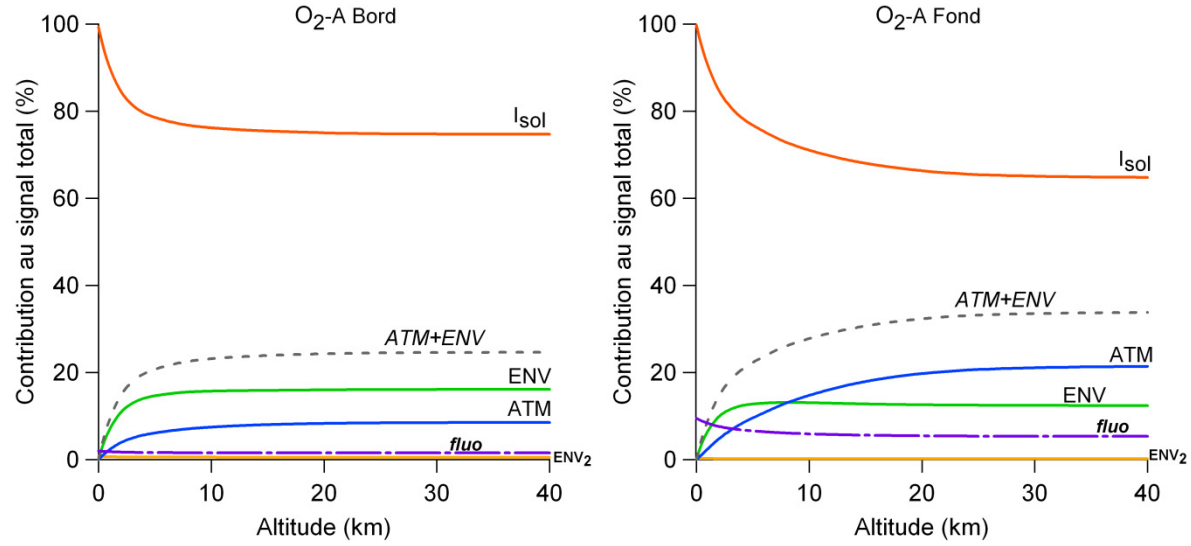


Figure VI.17 *Evolution de la part relative des différentes contributions dans le signal total en fonction de l'altitude pour la bande O_2-A. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type champ nu (voir Table III.31 Figure VI.13.A). La courbe en pointillés représente la somme des contributions ne contenant pas d'information sur la cible (ATM+ENV). La courbe fluorescence ne figure qu'à titre indicatif, elle donne la contribution au signal total s'il contenait de la fluorescence.*

Altitude	*Bord*		*Fond*	
	I_{sol}	*ATM+ENV*	I_{sol}	*ATM+ENV*
300 m	96 %	3 %	96.5 %	3 %
3000 m	81.5 %	18 %	81 %	19 %
> 40 km	75 %	25 %	65 %	35 %

Table VI.4 *Part des différentes contributions dans le signal total pour trois altitudes dans la bande O_2-A. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type champ nu (voir Table III.31, Figure VI.13.A).*

- **Cible uniforme végétale (Cas B)**

Pour ce cas, les simulations MODTRAN sont faites en choisissant la même réflectance pour la cible et l'environnement : celle de la végétation (voir *Table III.31*, *Figure VI.13.B*). La *Figure VI.18* donne l'évolution des différentes grandeurs qui nous intéressent dans la bande O_2-B tandis que la *Figure VI.15* donne la part des différentes contributions dans le signal total. Cette fois les flux dans les deux bandes de mesures sont croissants avec l'altitude avant de saturer aux alentours de 20 km pour le bord et entre 20 km et 30 km pour le fond. Ce comportement indique que les pertes par absorption et diffusion ont un effet moins fort que les contributions cumulées de l'environnement et de l'atmosphère. C'est d'ailleurs ce que montre la *Figure VI.15* : la contribution de l'atmosphère est très forte, elle devient plus importante que la part de flux solaire réfléchi à partir de 5 km d'altitude. Cela est dû à la faible réflectivité de la végétation dans cette gamme de longueurs d'onde. La *Table VI.5* indique que dès 300 m d'altitude la contribution de l'environnement et de l'atmosphère sont du même ordre de grandeur que la part de fluorescence dans le signal. Il faudra donc tenir compte de ces contributions dans la correction des effets atmosphériques même à très basse altitude.

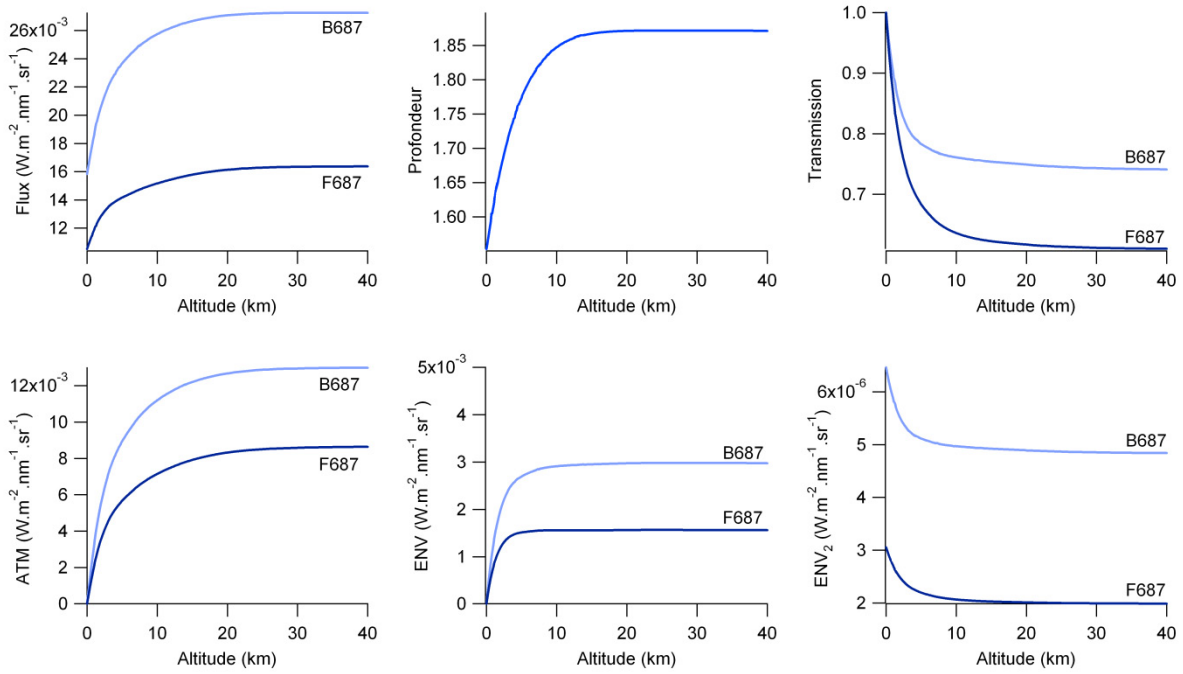


Figure VI.18 *Evolution des flux, des profondeurs, de la transmission effective et des différentes contributions au signal en fonction de l'altitude pour la bande O_2-B. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type végétation (voir Table III.31, Figure VI.13.B).*

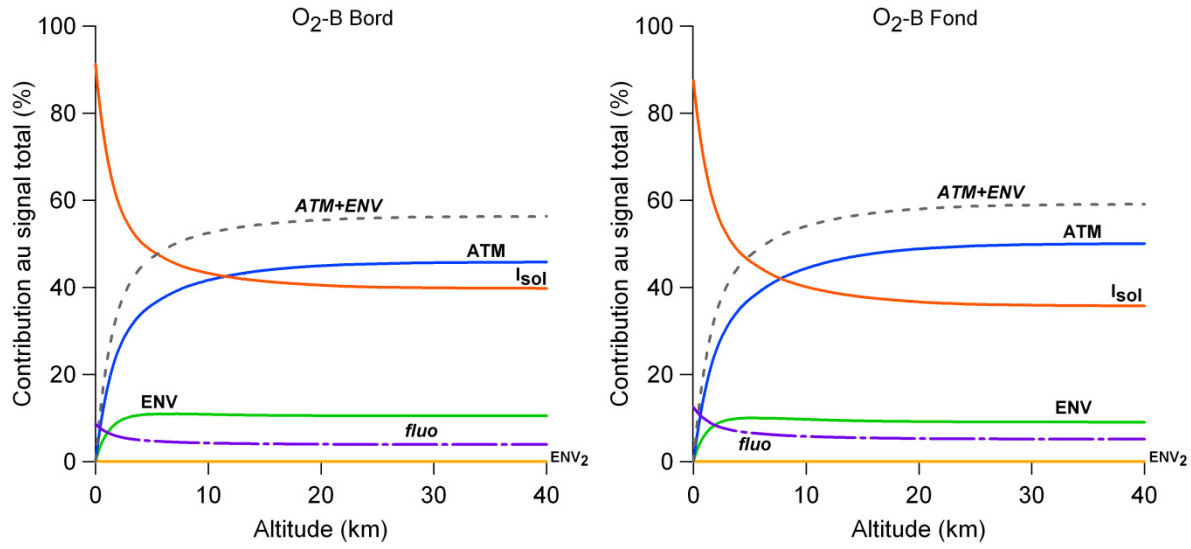


Figure VI.19 *Evolution de la part relative des différentes contributions dans le signal total en fonction de l'altitude pour la bande O_2-B. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type végétation (voir Table III.31, Figure VI.13.B). La courbe en pointillés représente la somme des contributions ne contenant pas d'information sur la cible (ATM+ENV).*

Altitude	*Bord*			*Fond*		
	I_{sol}	*ATM+ENV*	*f*	I_{sol}	*ATM+ENV*	*f*
300 m	83.5 %	8.5 %	8 %	80.5 %	8 %	11.5 %
3000 m	54 %	41 %	5 %	51 %	40.5 %	7.5 %
> 40 km	40 %	56 %	4 %	35.5 %	59 %	5 %

Table VI.5 *Part des différentes contributions dans le signal total pour trois altitudes dans la bande O_2-B. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type végétation (voir Table III.31, Figure VI.13.B).*

La réflectance de la végétation dans la bande O_2-A est largement supérieure à la réflectance de la végétation dans la bande O_2-B, le red-edge faisant passer la réflectance de 0.04 à 0.5. En conséquence le contenu du signal mesuré par un capteur est fortement différent dans cette bande par rapport à la bande O_2-B. C'est ce que montrent la *Figure VI.20* et la *Figure VI.21*. Dans cette bande, les contributions de l'atmosphère et de l'environnement ne sont pas majoritaires sur le signal réfléchi, même pour le fond de la bande. En conséquence l'effet dominant est la forte absorption de l'oxygène pour le canal du fond comme en témoigne la décroissance de la courbe de flux sur la *Figure VI.20* qui se stabilise entre 10 km et 20 km. Une fois encore on voit que les contributions de l'environnement et de l'atmosphère, bien que non majoritaires, ne sont pas négligeables devant les flux de fluorescence (voir *Table VI.6*).

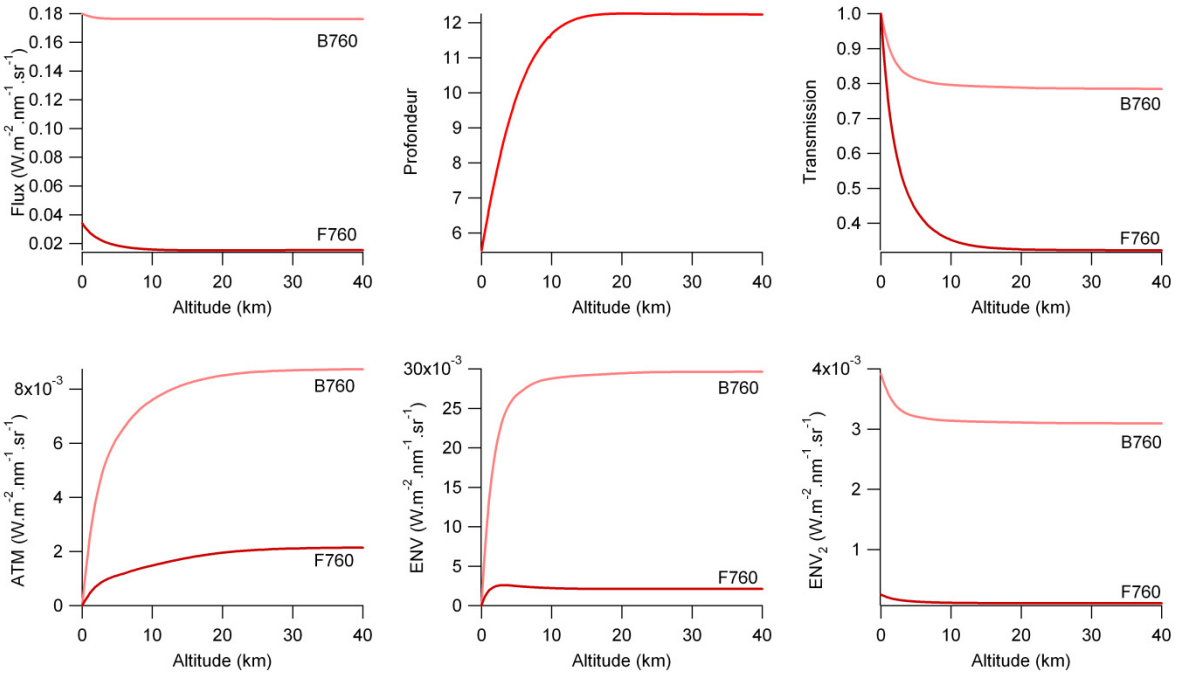


Figure VI.20 *Evolution des flux, des profondeurs, de la transmission effective et des différentes contributions au signal en fonction de l'altitude pour la bande O_2-A. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type végétation (voir Table III.31, Figure VI.13.B).*

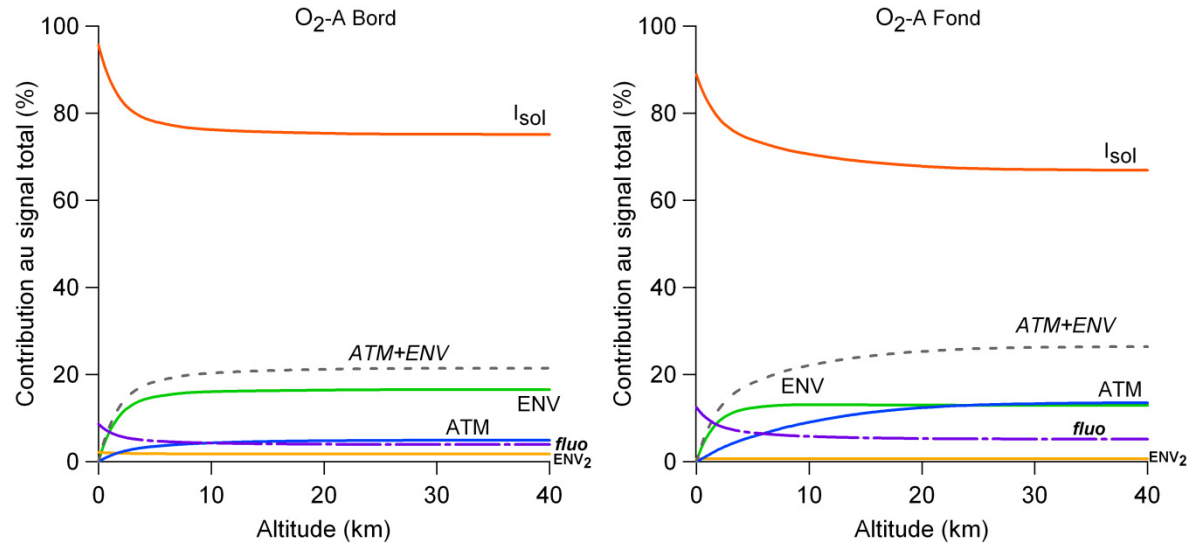


Figure VI.21 *Evolution de la part relative des différentes contributions dans le signal total en fonction de l'altitude pour la bande O_2-A. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type végétation (voir Table III.31, Figure VI.13.). La courbe en pointillés représente la somme des contributions ne contenant pas d'information sur la cible (ATM+ENV).*

Altitude	*Bord*			*Fond*		
	I_{sol}	*ATM+ENV*	*f*	I_{sol}	*ATM+ENV*	*f*
300 m	92 %	3 %	1 %	86.5 %	2.5 %	5 %
3000 m	80.5 %	16 %	1 %	76.5 %	15 %	4 %
> 40 km	74 %	21 %	0.9 %	67 %	26.5 %	3 %

Table VI.6 *Part des différentes contributions dans le signal total pour trois altitudes dans la bande O_2-A. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type végétation (voir Table III.31, Figure VI.13.B).*

B.2 Cas général : cible ≠ environnement

Nous allons à présent étudier les deux cas limites suivants (*Figure VI.13.C* et *Figure VI.13.D*) : un champ nu entouré de végétation et un champ de végétation entouré de champ nu. Si ces cas ne sont pas vraiment réalistes ils constituent néanmoins une base de réflexion. La réalité se situant entre les cas que nous avons étudiés et ceux que nous nous apprêtons à étudier.

- **Champ nu entouré de végétation (Cas C)**

Dans le cas d'un champ nu entouré de végétation, le contraste entre cible et environnement joue en faveur de la cible dans la bande O_2-B : la faible réflectance de la végétation limite la contribution de l'environnement. Dans la bande O_2-A, ce contraste jouera en faveur de l'environnement: la forte réflectance de la végétation dans cette bande devrait entraîner une forte contribution de l'environnement au signal total. La *Figure VI.22* et la *Figure VI.23* donnent l'évolution des différentes grandeurs et la part des différentes contributions dans le signal total pour la bande O_2-B. On voit que les flux dans les deux canaux diminuent avec l'altitude en suivant la courbe de la transmission : cette fois l'environnement, à cause de sa réflectance, ne peut pas compenser pas les pertes par diffusion/absorption. On le voit dans la *Figure VI.23* : la contribution de l'environnement est très faible dans les deux bandes et, en ajoutant à cette contribution la contribution de l'atmosphère, on atteint au maximum 20 % du signal total. Malgré cette faible valeur, la contribution est du même ordre de grandeur que la fluorescence à 300m d'altitude et supérieure au-delà ; il faudra donc en tenir compte.

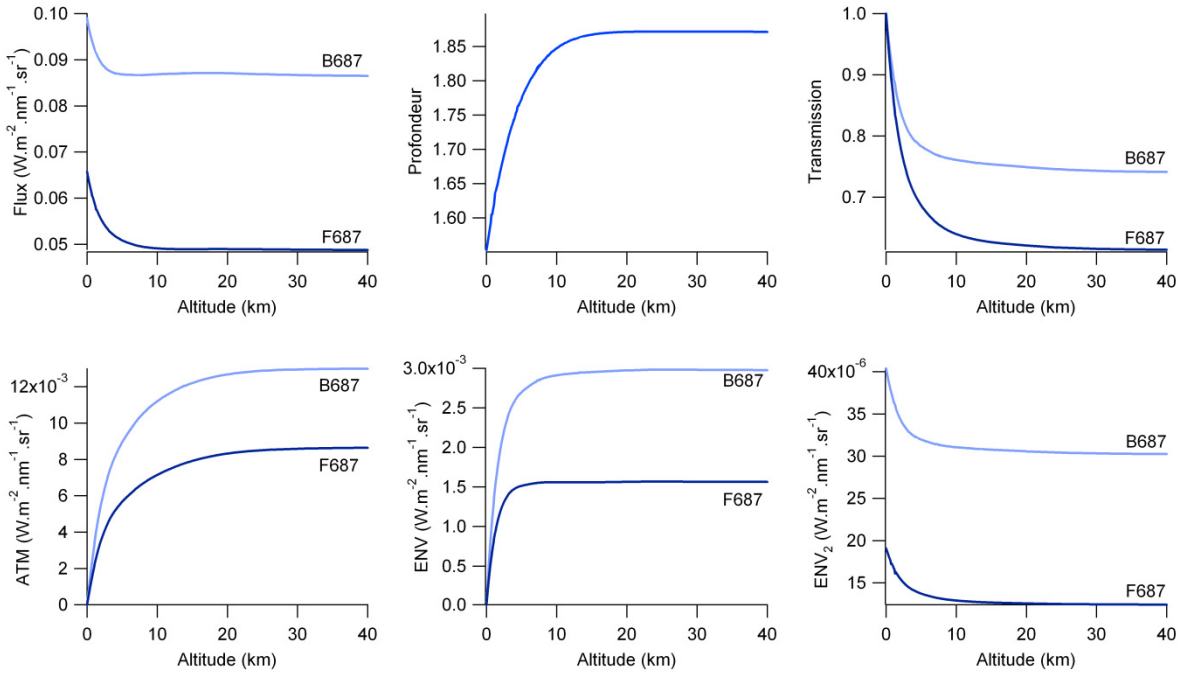


Figure VI.22 *Evolution des flux, des profondeurs, de la transmission effective et des différentes contributions au signal en fonction de l'altitude pour la bande O_2-B. La simulation a été faite pour une cible de type champ nu et un environnement de type végétation (voir Table III.31, Figure VI.13.C).*

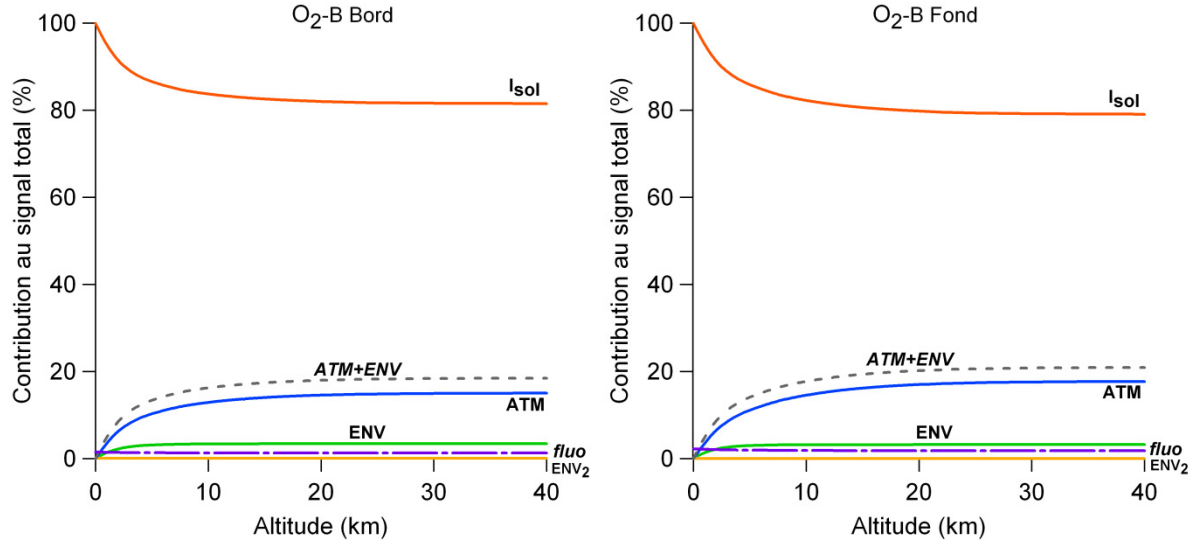


Figure VI.23 *Evolution de la part relative des différentes contributions dans le signal total en fonction de l'altitude pour la bande O_2-B. La simulation a été faite pour une cible de type champ nu et un environnement de type végétation (voir Table III.31, Figure VI.13.C). La courbe en pointillés représente la somme des contributions ne contenant pas d'information sur la cible (ATM+ENV). La courbe fluorescence ne figure qu'à titre indicatif, elle donne la contribution au signal total s'il contenait de la fluorescence.*

Altitude	*Bord*		*Fond*	
	I_{sol}	*ATM+ENV*	I_{sol}	*ATM+ENV*
300 m	98 %	1.5 %	98.5 %	1.5 %
3000 m	89 %	11 %	89 %	11 %
> 40 km	81.5 %	18.5 %	79 %	21 %

Table VI.7 *Part des différentes contributions dans le signal total pour trois altitudes dans la bande O_2-B. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type champ nu (voir* Table III.31, Figure VI.13.C).

Intéressons-nous à ce qu'il se passe pour la bande O_2-A. Comme nous l'avons dit plus haut, dans cette bande on a un fort contraste entre champ nu et végétation : la végétation a une réflectance deux fois plus élevée que celle du champ nu. On s'attend donc à une forte contribution de l'environnement. C'est ce que montrent la *Figure VI.24* et la *Figure VI.25* : le flux au bord de la bande augmente avec l'altitude et sature entre 5 km et 10 km sous l'effet de la forte contribution de l'environnement principalement. Pour le fond de la bande on voit que si pour les basses altitudes la contribution de l'environnement est plus forte que la contribution de l'atmosphère, elle est vite rattrapée par cette dernière à cause de la forte absorption dans la bande A de l'oxygène. On voit d'ailleurs sur l'évolution de la contribution de l'environnement au fond de la bande, *Figure VI.24,* un point d'inflexion autour de l'altitude 5 km, indiquant que la transmission diminue plus vite que la contribution de l'environnement n'augmente. Cette forte absorption se retrouve également sur le flux au fond puisqu'il décroît avec l'altitude et se stabilise autour de 10 km. On peut également noter que cette fois, contrairement aux autres cas que nous avons étudiés, la seconde contribution est du même ordre de grandeur que la fluorescence.

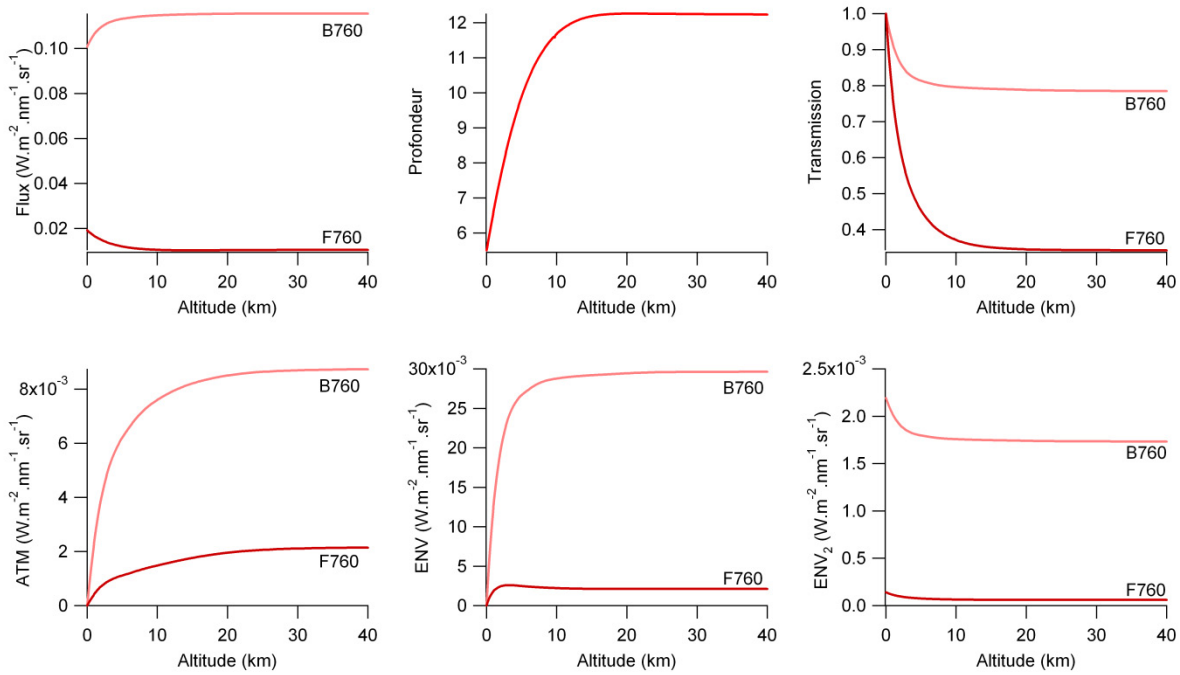


Figure VI.24 *Evolution des flux, des profondeurs, de la transmission effective et des différentes contributions au signal en fonction de l'altitude pour la bande O_2-A. La simulation a été faite pour une cible de type champ nu et un environnement de type végétation (voir Table III.31, Figure VI.13.C).*

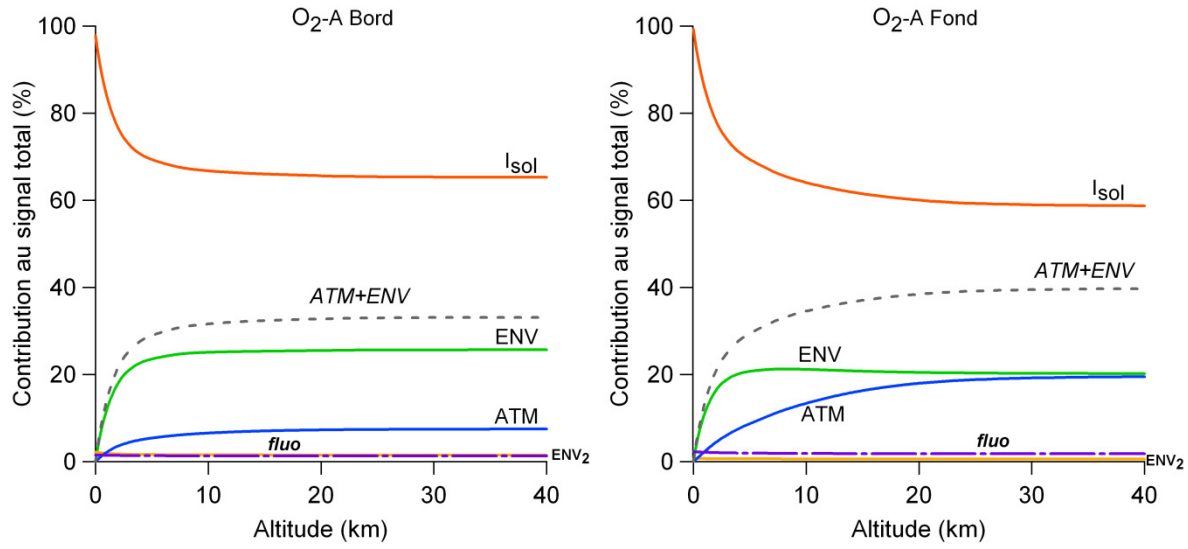


Figure VI.25 *Evolution de la part relative des différentes contributions dans le signal total en fonction de l'altitude pour la bande O_2-A. La simulation a été faite pour une cible de type champ nu et un environnement de type végétation (voir Table III.31, Figure VI.13.C). La courbe en pointillés représente la somme des contributions ne contenant pas d'information sur la cible (ATM+ENV). La courbe fluorescence ne figure qu'à titre indicatif, elle donne la contribution au signal total s'il contenait de la fluorescence.*

Altitude	*Bord*		*Fond*	
	I_{sol}	*ATM+ENV*	I_{sol}	*ATM+ENV*
300 m	92.5 %	5%	94 %	5 %
3000 m	73 %	25.5 %	74 %	25 %
> 40 km	65 %	33 %	58.5 %	40 %

Table VI.8 *Part des différentes contributions dans le signal total pour trois altitudes dans la bande O_2-A. La simulation a été faite pour une surface uniforme de type champ nu (voir Table III.31, Figure VI.13.C).*

- **Végétation entouré de sol nu (Cas D)**

Dans ce dernier cas, le fort contraste entre la cible et l'environnement se fera sentir principalement dans la bande O_2-B. La végétation a une très faible réflectance par rapport au sol nu, on s'attend donc à ce que la contribution de l'environnement soit très importante. C'est en effet ce que montre la simulation dans la *Figure VI.26* et la *Figure VI.27* : la contribution de l'environnement croît très rapidement avec l'altitude et devient supérieure au flux venant de la cible dès 2 km d'altitude. Cette contribution représente au maximum 40 % du signal total. En y ajoutant la contribution de l'atmosphère on atteint 70 % du signal. On voit bien que dans ce cas, le signal mesuré est totalement dominé par les effets atmosphériques et non plus par la contribution du signal qui nous intéresse. Dès 300 m la contribution des effets atmosphérique est supérieure à la contribution de la fluorescence (voir *Table VI.9*). Cette configuration est la « pire » configuration possible pour la mesure de la fluorescence. Une estimation très précise des contributions de l'environnement et de l'atmosphère sera nécessaire pour la retrouver.

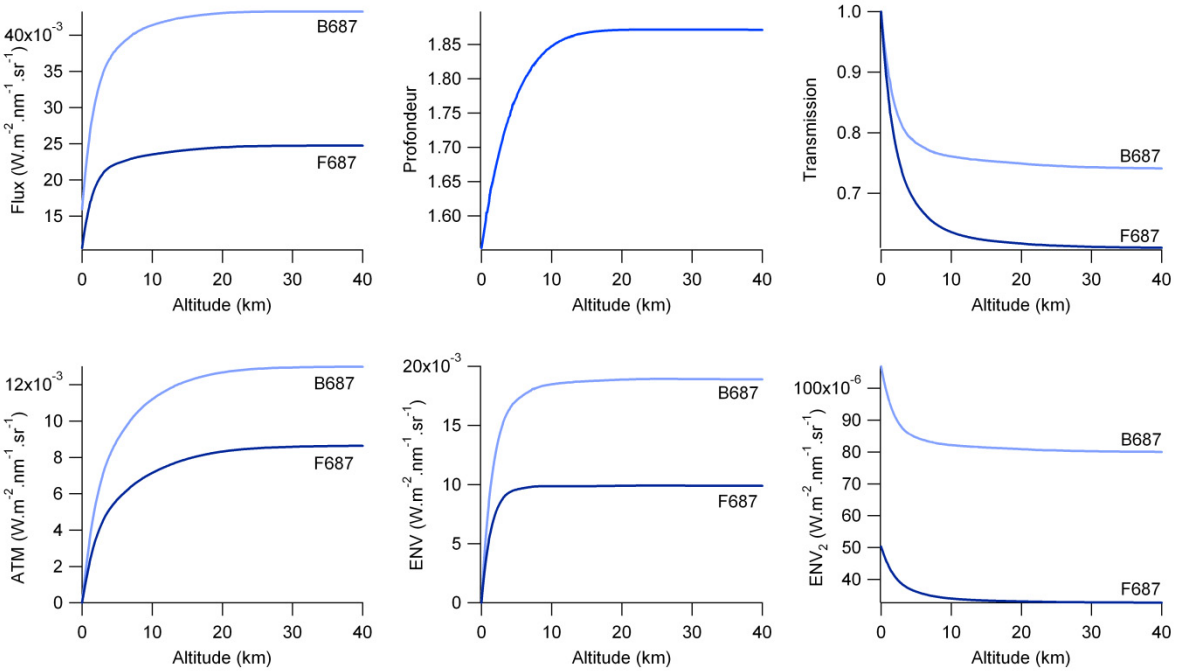


Figure VI.26 *Evolution des flux, des profondeurs, de la transmission effective et des différentes contributions au signal en fonction de l'altitude pour la bande O_2-B. La simulation a été faite pour une cible de type végétation et un environnement de type sol nu (voir Table III.31, Figure VI.13.D).*

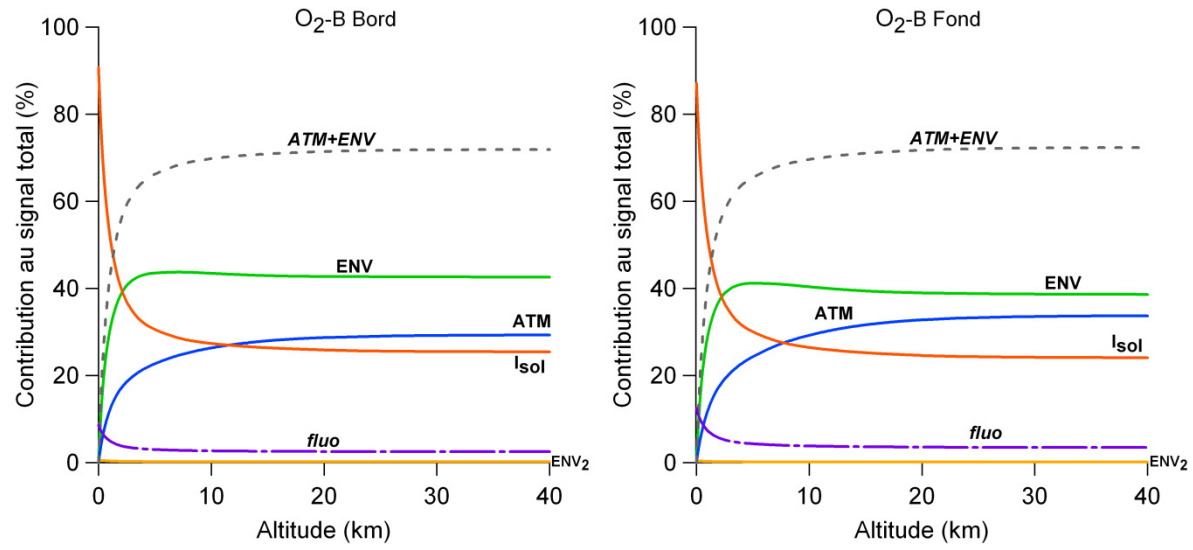


Figure VI.27 *Evolution de la part relative des différentes contributions dans le signal total en fonction de l'altitude pour la bande O_2-B. La simulation a été faite pour une cible de type végétation et un environnement de type sol nu (voir Table III.31, Figure VI.13.D). La courbe en pointillés représente la somme des contributions ne contenant pas d'information sur la cible (ATM+ENV).*

Altitude	*Bord*			*Fond*		
	I_{sol}	*ATM+ENV*	*f*	I_{sol}	*ATM+ENV*	*f*
300 m	73 %	19.5 %	7 %	71 %	19 %	10 %
3000 m	35 %	61.5 %	3 %	34 %	60.5 %	5 %
> 40 km	25.5 %	72 %	2.5 %	24 %	72 %	3.5 %

Table VI.9 *Part des différentes contributions dans le signal total pour trois altitudes dans la bande O_2-B. La simulation a été faite pour une cible de type végétation et un environnement de type sol nu (voir Table III.31, Figure VI.13.D).*

Pour la bande O_2-A on s'attend à ce que l'environnement perturbe beaucoup moins le signal provenant de la cible : le sol nu a une réflectance deux fois inférieure à celle de la végétation dans cette gamme de longueur d'onde. C'est effectivement ce que montrent la *Figure VI.28* et la *Figure VI.29* : la contribution de l'environnement est faible devant le flux solaire réfléchi par la cible, de l'ordre de 10 % au maximum. La somme des contributions de l'atmosphère et de l'environnement atteint 20 % pour le canal du fond de bande. La contribution de la fluorescence est entre 2 et 5 fois plus élevée que la perturbation de l'environnement et de l'atmosphère pour les altitudes inférieures à 300 m. De manière générale, les flux sont dominés par les pertes par absorption/diffusion.

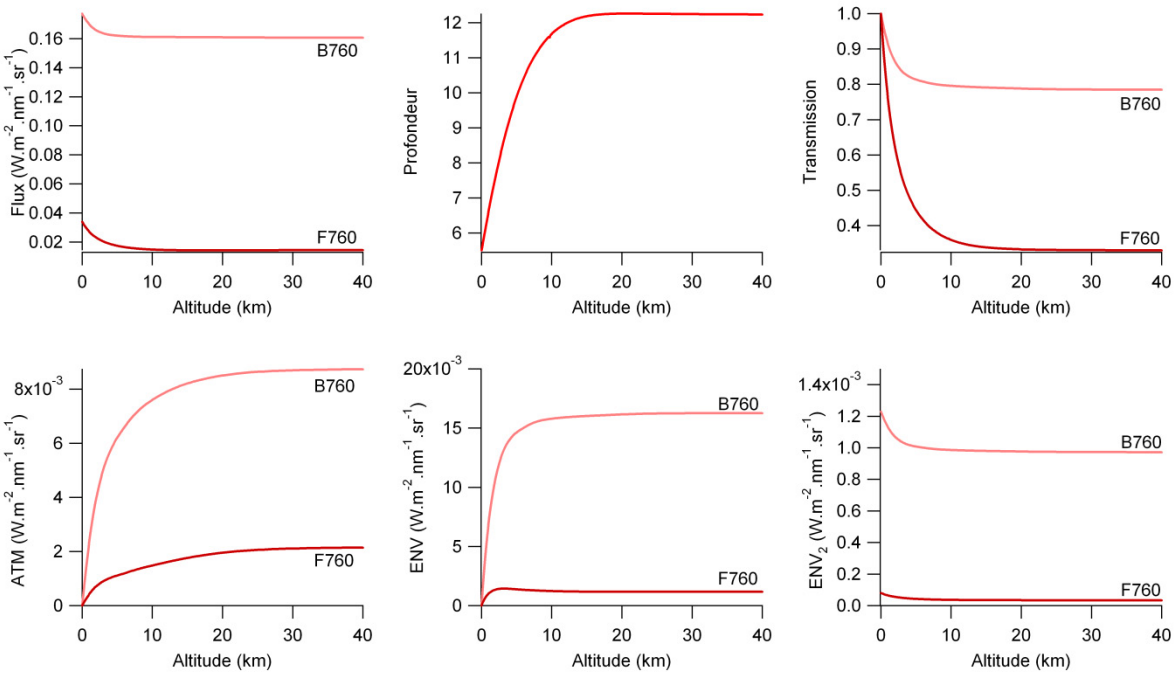


Figure VI.28 *Evolution des flux, des profondeurs, de la transmission effective et des différentes contributions au signal en fonction de l'altitude pour la bande O_2-A. La simulation a été faite pour une cible de type végétation et un environnement de type sol nu (voir Table III.31, Figure VI.13.D).*

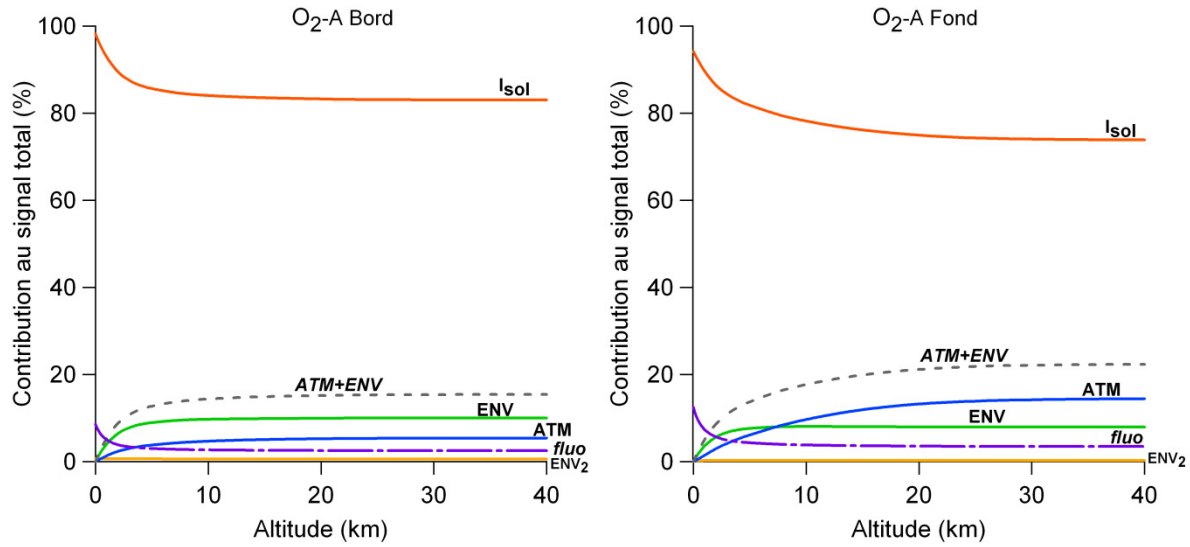


Figure VI.29 *Evolution de la part relative des différentes contributions dans le signal total en fonction de l'altitude pour la bande O_2-A. La simulation a été faite pour une cible de type végétation et un environnement de type sol nu (voir Table III.31, Figure VI.13.D). La courbe en pointillés représente la somme des contributions ne contenant pas d'information sur la cible (ATM+ENV).*

Altitude	*Bord*			*Fond*		
	I_{sol}	*ATM+ENV*	*f*	I_{sol}	*ATM+ENV*	*f*
300 m	96 %	2 %	7 %	92.5 %	2 %	10 %
3000 m	87.5 %	11 %	3 %	84 %	11 %	5 %
> 40 km	83 %	15.5 %	2.5 %	74 %	22 %	3.5 %

Table VI.10 *Part des différentes contributions dans le signal total pour trois altitudes dans la bande O_2-A. La simulation a été faite pour une cible de type végétation et un environnement de type sol nu (voir Table III.31, Figure VI.13.D).*

Annexe C
Contribution de l'environnement en fonction de sa réflectance

La contribution de l'environnement dépend de sa réflectance moyenne. MODTRAN permet de définir cette réflectance. Lors de l'utilisation opérationnelle de MODTRAN pour la correction de mesures acquises pendant un vol on cherche à minimiser les calculs. On cherchera donc à exprimer la contribution de l'environnement en fonction de sa réflectance de manière simple. La *Figure VI.30* et la *Figure VI.31* donnent la contribution de l'environnement à une altitude de 90 km en fonction de la réflectance. La simulation a été faite dans les conditions indiquées dans le CHAPITRE III (canaux de mesure d'AirFLEX).

On voit que l'évolution de la contribution n'est pas tout à fait linéaire avec la réflectance. On peut rendre compte de cette variation avec un polynôme du second ordre. Ce polynôme pourra être déterminé, par exemple, au niveau du sol. Soit $P(\rho)$ ce polynôme. On déduira la contribution de l'environnement à l'altitude z et pour une réflectance ρ grâce à l'équation suivante :

$$ENV(\rho, z) = ENV(\rho = 1, z)\frac{P(\rho)}{ENV(\rho = 1, z = 0)} \qquad (VI.3)$$

Le polynôme est normalisé par la valeur de la contribution de l'environnement pour une réflectance de 1($ENV(\rho = 1, z = 0)$) de manière à ne traduire que la *variation* de la contribution. Pour retrouver la variation de l'environnement à l'altitude z il suffira de multiplier ce polynôme normalisé par la valeur de la contribution de l'environnement à l'altitude z pour une réflectance de 1.

La variation de la contribution de l'environnement avec la réflectance retrouvée de cette manière est tracée sur les *Figure VI.30* et *Figure VI.31*. L'écart entre la valeur retrouvée et la valeur simulée est inférieur à 0.1 %.

On pourra noter par ailleurs que pour la gamme de réflectance qui nous intéresse pour l'étude de la végétation (jusqu'à 0.6), on peut faire l'approximation que la contribution de l'environnement varie linéairement avec la réflectance. Les erreurs faites ainsi seront inférieures à 1 %.

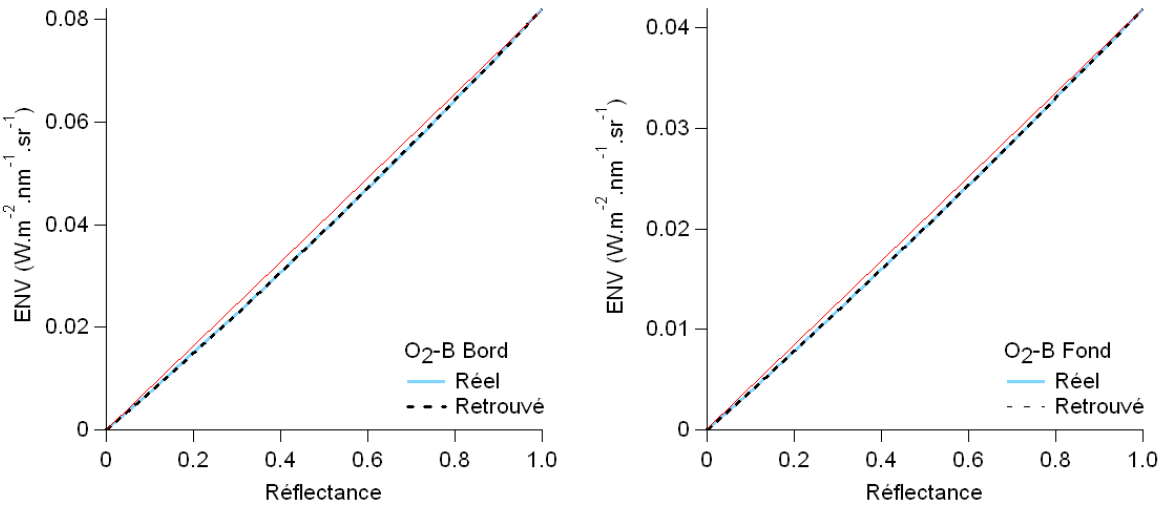


Figure VI.30 *Variation de la contribution de l'environnement dans la bande O_2-B en fonction de la réflectance. Simulations faites avec la configuration d'AirFLEX à 90 km d'altitude. La courbe « retrouvée » est la courbe obtenue au moyen des calculs présentés dans cette annexe.*

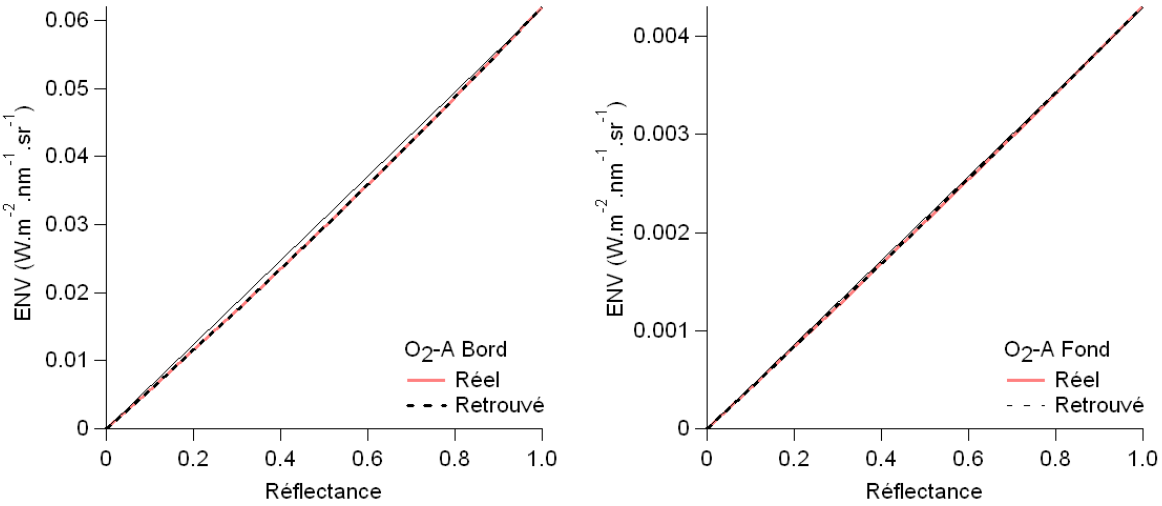


Figure VI.31 *Variation de la contribution de l'environnement dans la bande O_2-A en fonction de la réflectance. Simulations faites avec la configuration d'AirFLEX à 90 km d'altitude. La courbe « retrouvée » est la courbe obtenue au moyen des calculs présentés dans cette annexe.*

Annexe D
Evaluation de l'importance des corrections atmosphériques

Dans cette annexe nous nous proposons d'étudier l'impact des corrections atmosphériques sur le signal de fluorescence. Nous avons présenté dans le CHAPITRE III les effets induits par la présence de l'atmosphère. Nous avons exprimé la valeur des radiances mesurées en altitude comme :

$$L = T_r\left(\frac{\rho}{\pi}I + \frac{T_F}{T_r}f\right) + ATM + ENV \qquad (VI.4)$$

Avec T_r la transmission effective du rayonnement réfléchi par la cible, $T_F = T_{fluo}$ (selon la notation du CHAPITRE III) la transmission effective de la fluorescence, *ATM* la contribution de l'environnement et *ENV* la contribution de l'environnement.

Dans le CHAPITRE III nous avons présenté les différents paramètres atmosphériques intervenant dans l'équation *(VI.4)* et leur évolution avec l'altitude dans différentes configurations de mesure. Si nous avons donné l'importance relative des différentes composantes du signal total, nous n'avons pas évalué l'impact de la correction atmosphérique sur la fluorescence. Afin de mieux comprendre les effets de la correction atmosphériques, c'est ce que nous allons faire ici.

Dans la suite nous nous placerons dans le cas « idéal » où l'environnement et la cible ont les mêmes propriétés optiques, celles de la végétation (le cas B dans l'Annexe B). Nous aurons donc une réflectance de 0.04 pour la bande O_2-B et de 0.5 pour la bande O_2-A. Pour simplifier les calculs de fluorescence nous utilisons la formule standard à deux canaux. En supposant parfaitement connues les variations de réflectance et de fluorescence le long des bandes d'absorption de l'oxygène cela revient à faire un calcul exact. Nous supposons également que la mesure de référence se fait sur une référence placée dans le même climat lumineux que la végétation au niveau du sol et dont la réflectance vaut 1. Le système à résoudre s'écrit :

$$\begin{cases} L_1 = T_{r_1}\left(\dfrac{\alpha\rho I_1}{\pi} + \dfrac{T_{F_1}}{T_{r_1}}\beta f\right) + ENV_1 + ATM_1 \\ L_2 = T_{r_2}\left(\dfrac{\rho I_2}{\pi} + \dfrac{T_{F_2}}{T_{r_2}}f\right) + ENV_2 + ATM_2 \\ L_1^r = T_{r_1}\dfrac{I_1}{\pi} + ENV_1 + ATM_1 \\ L_2^r = T_{r_2}\dfrac{I_1}{\pi} + ENV_2 + ATM_2 \end{cases} \qquad (VI.5)$$

Avec L_1 le flux mesuré dans le canal 1, L_2, le flux mesuré dans le canal 2, etc… α est le coefficient liant les réflectances de la végétation dans les deux canaux et β le coefficient liant les fluorescences

dans les deux canaux. Le canal numéro 2 est le canal au fond de la bande d'absorption. La résolution de ce système donne :

$$f = \frac{N}{D} \tag{VI.6}$$

Avec :

$$\begin{aligned} N = (1-\alpha)ENV_1ENV_2 - ENV_2L_1 + \alpha ENV_1L_2 + \alpha ENV_2L_1^r - \alpha L_2L_1^r \\ + ATM_2((1-\alpha)ENV_1 - L_1 + \alpha L_1^r) \\ + ATM_1((1-\alpha)(ATM_2 + ENV_2) + \alpha L_2 - L_2^r) - L_2^r(ENV_1 - L_1) \end{aligned} \tag{VI.7}$$

$$D = -\beta(ENV_2 + ATM_2 - L_2^r)T_{F_1} + \alpha(ENV_1 + ATM_1 - L_1^r)T_{F_2} \tag{VI.8}$$

On remarquera que l'expression de la fluorescence est indépendante des transmissions T_r. Elle dépend par contre de tous les autres termes dus à l'atmosphère. Afin de simplifier la discussion nous allons nous placer dans le cas ou la réflectance et la fluorescence sont constantes le long des bandes d'absorption de l'oxygène, soit $\alpha = 1$ et $\beta = 1$. De cette manière la fluorescence s'écrit :

$$f = \frac{L_2^r(ENV_1 + ATM_1 - L_1) - L_2(ENV_1 + ATM_1 - L_1^r) + (ENV_2 + ATM_2)(L_1 - L_1^r)}{(ENV_2 + ATM_2 - L_2^r)T_{F_1} + (ENV_1 + ATM_1 - L_1^r)T_{F_2}} \tag{VI.9}$$

Nous allons à présent utiliser cette formule pour évaluer l'erreur faite si on calcule la fluorescence sans tenir compte des effets de l'atmosphère. Il est important de noter que l'expression utilisée pour retrouver la fluorescence est très faiblement dépendante des effets atmosphériques : les signaux modélisés étant sans bruit, les termes de type $(ENV_i + ATM_i - L_i^r)$ dans l'équation *(VI.9)* ne dépendent pas de la contribution de l'atmosphère et de l'environnement puisque L_i^r est calculée à partir de la valeur exacte de ENV_i et ATM_i. Cette faible dépendance est accentuée par la simplification de l'équation engendrée lorsque nous avons écrit $\alpha = 1$ et $\beta = 1$.

La *Figure VI.32* donne l'erreur sur la fluorescence retrouvée lorsqu'on ne tient pas compte des effets atmosphériques en fonction de l'altitude de mesure. Les données utilisées pour faire ces calculs sont les données générées lors du CHAPITRE III et dans l'Annexe A. Les calculs sont faits pour deux valeurs de fluorescence au niveau du sol : 1 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ et 2 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$.

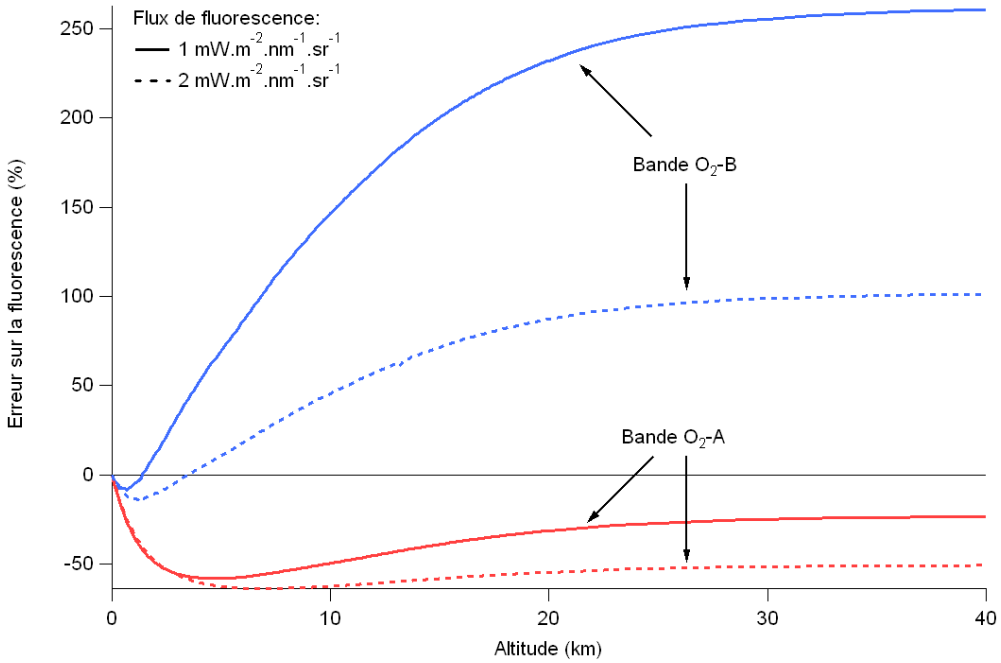


Figure VI.32 *Erreur sur la fluorescence lorsqu'on calcule la fluorescence sans corrections atmosphériques en fonction de l'altitude de mesure. Le calcul est fait pour deux valeurs du flux de fluorescence au niveau du sol. On utilise le calcul de la fluorescence à deux bandes en considérant la réflectance et la fluorescence constantes sur l'ensemble des bandes d'absorption. L'environnement et la cible ont les mêmes propriétés optiques.*

Analysons tout d'abord le comportement des courbes pour la bande O_2-B en fonction de l'altitude. On remarque que l'erreur est tout d'abord négative : on sous estime la fluorescence jusqu'à une certaine altitude. Puis l'erreur sur la fluorescence augmente rapidement (on surestime la fluorescence) jusqu'à saturer aux alentours de 30 km. On remarquera que l'erreur sur la fluorescence s'annule à une certaine altitude. On remarquera également que l'altitude pour laquelle l'erreur s'annule dépend de la valeur de la fluorescence. Ce comportement s'explique en se remémorant les résultats obtenus durant l'Annexe B: pour les faibles altitudes la part de fluorescence dans le signal est plus importante que la contribution de l'environnement et de l'atmosphère. L'erreur vient donc majoritairement de la non compensation de l'absorption de la fluorescence : on sous-estime la fluorescence. A partir d'une certaine altitude, la part des contributions de l'atmosphère et de l'environnement dans le signal augmentant, elles compensent exactement les pertes de fluorescence par absorption : on a donc une erreur nulle, la contribution de l'atmosphère et de l'environnement sont vues « par accident » comme de la fluorescence. Au-delà de cette altitude, les contributions de l'atmosphère et de l'environnement continuent à augmenter et sont vues comme de la fluorescence : on surestime la fluorescence.

Les mêmes phénomènes ont lieu dans la bande O_2-A mis à part le fait que les contributions de l'atmosphère et de l'environnement ne suffisent pas à compenser les pertes par absorption de la fluorescence : on aura donc toujours tendance à sous-estimer la fluorescence dans cette bande. L'erreur dans la bande O_2-A, bien que plus importante que dans la bande O_2-B aux faibles altitudes est moins importante pour les altitudes au delà de 5 km. On remarque que l'erreur est moins importante pour les flux de fluorescence plus faible. Cet effet est dû au fait que les contributions de l'environnement et de l'atmosphère compensent plus facilement les faibles flux de fluorescence.

On remarque également que l'erreur dépend du niveau de fluorescence : elle est globalement moins importante lorsque le flux de fluorescence augmente. Cette remarque est importante : l'erreur

sur la fluorescence dépend du niveau de fluorescence ; ainsi lors de mesures avionnées, si on ne corrige pas des effets atmosphériques, l'erreur sur la fluorescence n'est pas un offset mais dépend de la valeur de la fluorescence. La *Figure VI.33* donne l'erreur sur la fluorescence en fonction de la valeur réelle de la fluorescence pour trois altitudes de mesure.

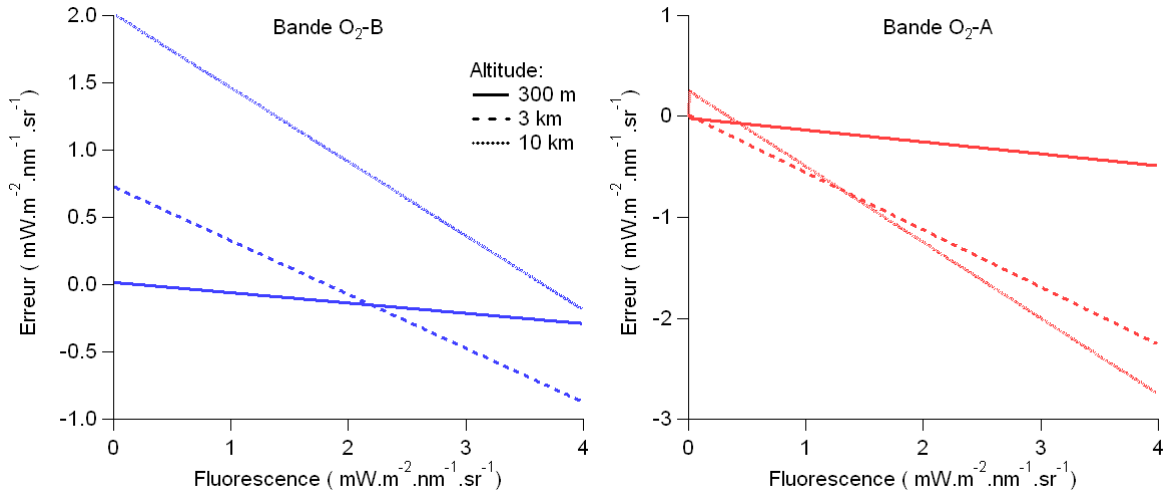


Figure VI.33 *Erreur sur la fluorescence retrouvée sans corrections atmosphériques en fonction de la valeur réelle de la fluorescence. L'erreur est donnée pour trois altitudes, dans les deux bandes d'absorption.*

- **Erreur sur les champs nus**

On peut également estimer la fluorescence que l'on obtient sur un sol nu lorsqu'on ne corrige pas des effets de l'atmosphère. On pourrait penser que l'on trouve de toute façon une fluorescence nulle puisque mesure de référence et mesure sur la cible sont faites dans les mêmes conditions mais ce n'est pas tout à fait exact. En fait, les contributions de l'atmosphère et de l'environnement, contributions additives par rapport au flux réfléchi, modifient la profondeur. Pour deux mesures faites dans les mêmes conditions sur deux cibles *A* et *B* différentes, non fluorescentes on a :

$$P_A = \frac{T_{r_1}\frac{I_1}{\pi}\rho_A + ENV_1 + ATM_1}{T_{r_2}\frac{I_2}{\pi}\rho_A + ENV_2 + ATM_2} \quad , \quad P_B = \frac{T_{r_1}\frac{I_1}{\pi}\rho_B + ENV_1 + ATM_1}{T_{r_2}\frac{I_2}{\pi}\rho_B + ENV_2 + ATM_2} \qquad (VI.10)$$

Et, bien sûr, ces profondeurs ne sont égales que si $\rho_A = \rho_B$. Ainsi, sans corrections atmosphériques, on trouvera une fluorescence sur des cibles non fluorescentes en fonction de la différence de réflectance entre la réflectance de la cible et la réflectance de la cible de référence. Cette fluorescence factice s'exprime en fonction de $\Delta\rho$:

$$f = \Delta\rho \frac{\left(T_{r_2}I_2(ENV_1 + ATM_1) - T_{r_1}I_1(ENV_2 + ATM_2)\right)}{ATM_1 - ATM_2 + ENV_1 - ENV_2 + T_{r_1}I_1 - T_{r_2}I_2} \qquad (VI.11)$$

La *Figure VI.34* présente les fluorescences obtenues pour plusieurs valeurs de $\Delta\rho$. Une valeur de 0.75 correspond à la différence de réflectance entre un champ nu et une référence parfaite. On voit que la fluorescence obtenue augmente avec l'altitude. Pour $\Delta\rho = 0.75$, la fluorescence trouvée est significative à partir de 5 km pour la bande O_2-B et 10 km pour la bande O_2-A.

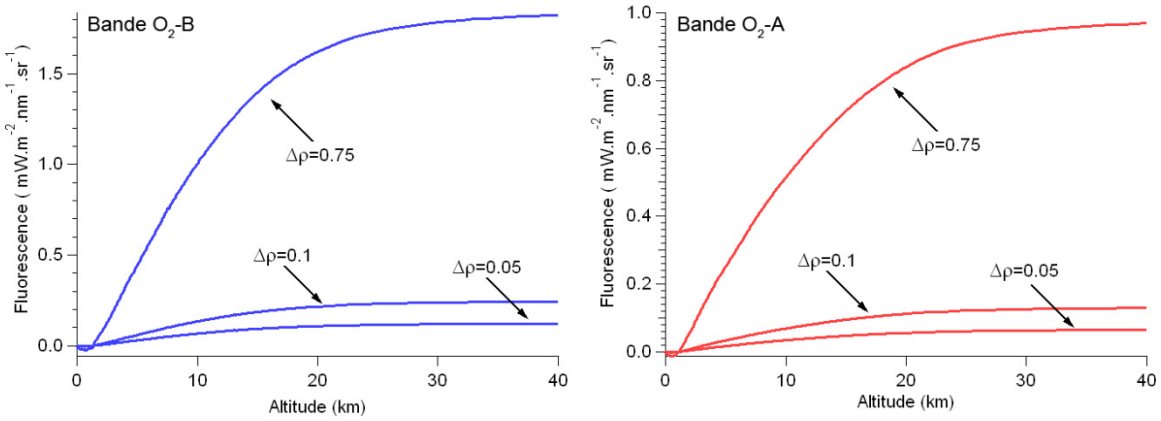


Figure VI.34 *Fluorescence obtenue pour un sol nu lorsqu'on ne tient pas compte des corrections atmosphériques dans le calcul de la fluorescence (réflectance du sol nu utilisé : 0.25 dans la bande O_2-B et 0.28 dans la bande O_2-A)*

Dans le cadre de mesures avionnées (et en particulier pour les mesures de CEFLES2), les valeurs de références sont prises sur les champs nus. Ainsi la différence de réflectance est quasi nulle entre un champ nu servant de référence et un autre champ nu et la « fluorescence résiduelle » est négligeable.

Annexe E
Evaluation de la précision nécessaire pour l'évaluation des corrections atmosphériques

Dans cette annexe nous nous proposons de donner un ordre de grandeur de la précision nécessaire aux corrections atmosphériques. Pour cela nous allons évaluer l'incertitude sur la fluorescence générée par les incertitudes sur les termes de corrections atmosphériques (contribution de l'environnement, de l'atmosphère et transmission). Généralement, on calcule un majorant de l'incertitude:

$$\Delta f \leq \sum_i \left|\frac{\partial f}{\partial x_i}\right| |\Delta x_i| \qquad (VI.12)$$

Avec Δf, l'incertitude sur la fluorescence f, x_i le paramètre i et Δx_i l'incertitude sur ce paramètre. Dans la suite les incertitudes relative sur les paramètres de correction atmosphériques (contribution de l'environnement, de l'atmosphère et transmission) seront les mêmes, ainsi 10% d'incertitude signifie une erreur relative de 10% sur chacun des paramètres. En calculant de cette manière, pour une mesure à 300 m d'altitude, on obtient les résultats montrés sur la *Figure VI.*35. On voit que l'incertitude dépend de la valeur de la fluorescence : l'incertitude augmente lorsque le flux de fluorescence diminue. Les incertitudes sont bien plus fortes dans la bande O_2-B.

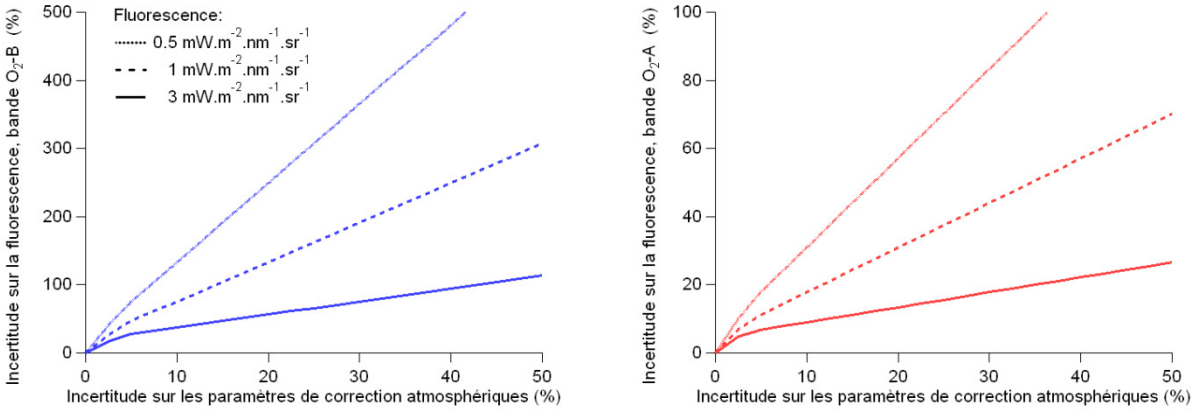


Figure VI.35 *Incertitude sur la fluorescence en fonction de l'incertitude sur les paramètres de corrections atmosphériques (contribution de l'atmosphère, de l'environnement et transmission). Calcul effectué pour une mesure à 300 m et pour 3 valeurs de fluorescence. L'incertitude est calculée selon la formule* (VI.12).

Cette manière de calculer l'incertitude sur la fluorescence ne tient cependant pas compte de l'origine des incertitudes sur les paramètres atmosphériques et de la manière dont ils sont obtenus. Le fait de faire la somme des valeurs absolues des incertitudes sous-entend qu'elles n'ont aucun lien entre elles, or ce n'est pas le cas. Les paramètres sont calculés à partir d'un modèle, MODTRAN, qui est cohérent. C'est-à-dire que les variations d'un paramètre sont liées d'une certaine manière aux variations des autres pour former un ensemble cohérent. Il y aura donc une corrélation entre les

paramètres. D'autre part, les incertitudes dont nous voulons étudier l'impact viennent de la mauvaise évaluation d'un ensemble de paramètres d'entrée du modèle : altitude, élévation, position, données atmosphériques, etc… et non pas de la qualité du modèle. Pour ces raisons nous préférerons utiliser un calcul des incertitudes à partir de l'expression suivante :

$$\Delta f \leq \sum_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \qquad (VI.13)$$

Cette expression tient compte du fait que les contributions des différents paramètres n'agissent pas de la même manière sur la fluorescence : si l'absorption augmentant avec l'altitude fait diminuer la fluorescence vue, la contribution de l'atmosphère à tendance à compenser cet effet etc… Les incertitudes calculées de cette manière seront probablement plus proches de la réalité.

La première observation faite en utilisant cette méthode de calcul est que l'incertitude sur la fluorescence dépend peu de la valeur de l'émission de fluorescence. Ainsi, dans la suite, les calculs sont faits pour une fluorescence au sol de 1 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$.

La *Figure VI.36* donne l'incertitude sur la fluorescence et la contribution des différents paramètres pour une mesure au sommet de l'atmosphère. Bien sûr, la transmission ne peut varier qu'entre 0 et 1, l'incertitude positive est donc limitée, ce qui explique la « cassure » des courbes d'incertitude totale et d'incertitude due à la transmission. Au delà de la valeur maximale de transmission, l'incertitude sur ce paramètre n'évolue plus.

On voit sur cette figure que, pour les deux bandes de l'oxygène, l'erreur viendra principalement de l'incertitude sur la contribution de l'atmosphère. Pour passer sous la barre des 100% d'incertitude il faudra une incertitude sur les paramètres atmosphériques inférieure à 13% dans la bande O_2-B et inférieure à 27 % dans la bande O_2-A.

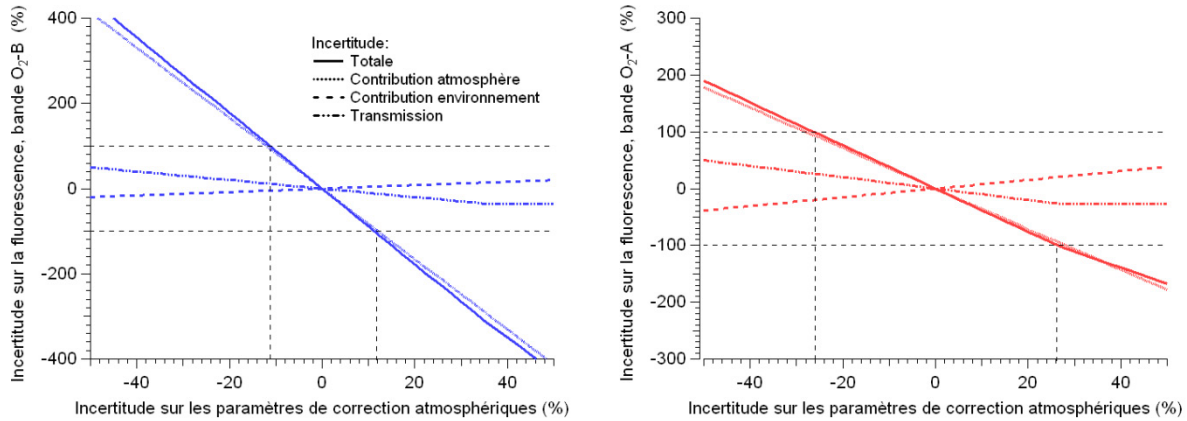


Figure VI.36 *Incertitude sur la fluorescence en fonction de l'incertitude sur les paramètres de corrections atmosphériques. L'incertitude liée à chaque contribution est donnée : contribution de l'atmosphère, de l'environnement et transmission. Les calculs sont faits au sommet de l'atmosphère pour une émission de fluorescence au sol de 1 $mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$. Les lignes horizontales délimitent la zone pour laquelle l'incertitude sur la fluorescence est inférieure à 100%.*

Les mêmes calculs ont été faits pour une altitude de 300 m (altitude moyenne durant la campagne CEFLES2). Les résultats sont présentés dans la *Figure VI.37*. Les incertitudes sont significativement réduites par rapport à ce qu'on avait au sommet de l'atmosphère. Cette fois l'incertitude majeure porte sur la transmission et non pas sur les contributions de l'environnement et de l'atmosphère, contributions qui restent modérées à basse altitude. On voit que pour passer en dessous des 10 %

d'incertitude sur la fluorescence il faudra avoir une incertitude sur les paramètres de correction inférieure à 10 % également ; en particulier en ce qui concerne l'évaluation de la transmission.

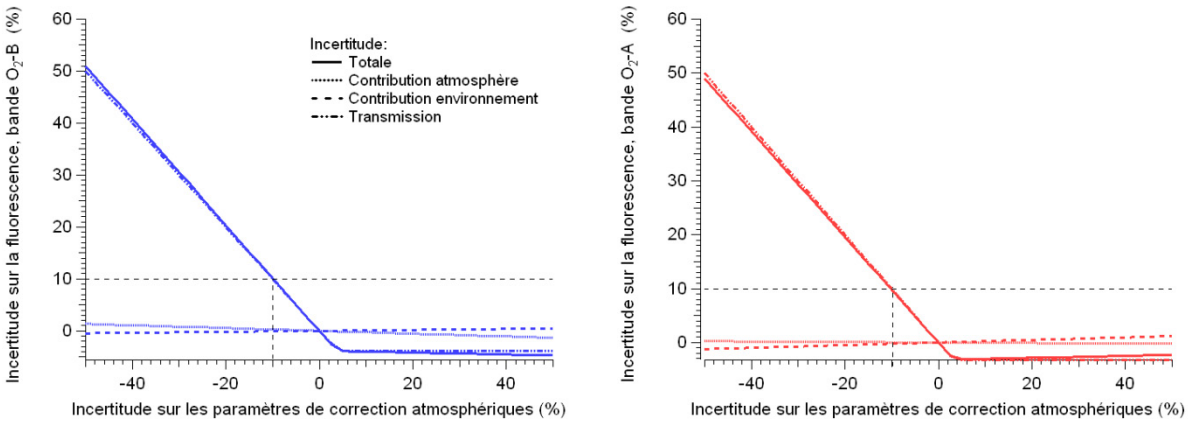


Figure VI.37 *Incertitude sur la fluorescence en fonction de l'incertitude sur les paramètres de corrections atmosphériques. L'incertitude liée à chaque contribution est donnée : contribution de l'atmosphère, de l'environnement et transmission. Les calculs sont faits à 300 m d'altitude, pour une émission de fluorescence au sol de 1 mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}. La ligne horizontale délimite la zone pour laquelle l'incertitude sur la fluorescence est inférieure à 10%.*

On peut se demander quels sont les paramètres atmosphériques (température, pression aérosols) sources d'incertitude. En fait, l'étude de sensibilité faite au CHAPITRE III permet d'estimer ces sources. Elle a été faite en étudiant les variations engendrées par les différents paramètres atmosphériques sur la profondeur. Le lien entre variations de profondeurs et fluorescence a été illustré dans la section 2.3.1. Par exemple, une variation de profondeur de 0.3 % dans la bande O_2-B et 0.2 % dans la bande O_2-A « génère » une fluorescence de 0.1 mW.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}. Ce qui correspond au 10 % de fluorescence que nous avons fixé sur la *Figure VI.37*. Ainsi, tous les paramètres d'atmosphère pouvant induire des variations de profondeur supérieure à 0.3% pourront générer une incertitude supérieure à 10 % sur les paramètres de corrections atmosphériques.

Annexe F
Récupérations des données d'élévation de terrain

Le serveur utilisé est http://www.earthtools.org . Il permet de faire une requête de la forme http://www.earthtools.org/height/*latitude*/*longitude* avec latitude et longitude les valeurs qui nous intéressent et répond par des données au format XML contenant l'élévation :

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1" ?>
<height                xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://www.earthtools.org/height.xsd">
    <version>1.0</version>
    <location>
        <latitude>52.4822</latitude>
        <longitude>-1.8946</longitude>
    </location>
    <meters>141</meters>
    <feet>462.6</feet>
</height>
```

Il ne reste plus qu'à extraire l'information. L'élévation du terrain a été obtenue de cette manière pour chacun des vols effectués durant la campagne CEFLES2.

Annexe G
Algorithme de détection de survol

Pour extraire les données nous avons eu besoin de savoir si un point de mesure se trouve dans un des champs préalablement identifié. Chaque champ est défini comme un polygone dont les coordonnées des sommets sont connues. L'algorithme utilisé est simple et exploite l'observation suivante : si l'on se trouve à l'intérieur d'un polygone et que l'on pointe successivement chacun des sommets de ce polygone on aura fait un tour sur soi-même en revenant au sommet de départ. Si on se trouve à l'extérieur du polygone on peut pointer chaque sommet successivement sans faire de tour sur soi-même pour revenir au sommet de départ. La *Figure VI.38* représente les deux cas. Sur cette figure les u_i sont les vecteurs ayant pour origine le point de mesure (en bleu) et pointant chaque sommet. La somme des angles orientés définis par ces vecteurs vaudra 2π lorsque le point de mesure se trouve dans le polygone définissant le champ et 0 lorsque le point de mesure se trouvera à l'extérieur.

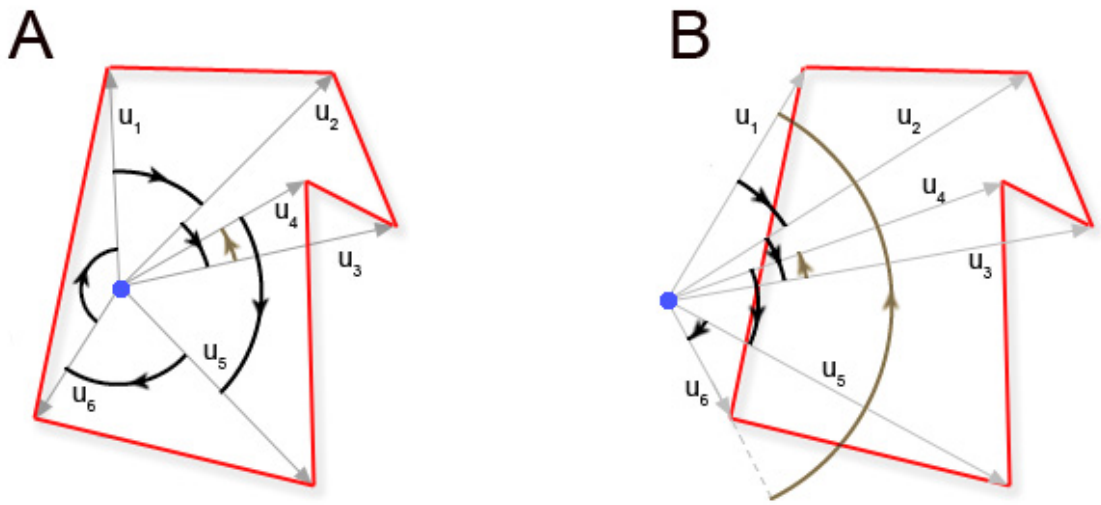


Figure VI.38 *Représentation des deux cas de figure possibles pour un point de mesure. A : le point de mesure est dans le champ. B : le point de mesure est en dehors du champ.*

La formule *(VI.14)* donne le calcul de l'angle total. Il se fait simplement en calculant le produit scalaire pour chaque paire de vecteurs successifs. Ce produit donne l'angle entre les deux vecteurs. Afin d'orienter cet angle on calcule le produit vectoriel des vecteurs dont le signe dépend de l'orientation. On multiplie donc l'angle obtenu par le signe du produit vectoriel pour obtenir l'angle orienté.

$$Angle_{tot} = \sum_i \text{sign}(u_i \wedge u_{i+1}) \times \cos^{-1}\left(\frac{u_i . u_{i+1}}{\|u_i . u_{i+1}\|}\right) \qquad (VI.14)$$

Il ne faut pas oublier que dans cette formule la somme sur *i* sous-entend un dernier terme entre le dernier vecteur et le premier !

Annexe H
Boîtier permettant de simuler le débranchement/branchement d'un périphérique USB

Il arrive qu'un périphérique USB ne soit plus reconnu par le système d'exploitation. En général un débranchement/branchement de ce périphérique suffit à rétablir les choses. Les ports USB d'un ordinateur portable sont alimentés en permanence et il n'y a actuellement sous Windows aucun moyen de couper cette alimentation par la programmation. Les spectromètres étant régulièrement « perdus » par le système d'exploitation, il nous a donc fallu construire un circuit permettant de simuler un débranchement des spectromètres à partir d'un ordre programmable. La *Figure VI.39* donne le schéma de ce circuit. Il faut pour l'utiliser couper un câble USB afin de brancher les câble assurant l'alimentation du périphérique sur les sorties de notre circuit. Par défaut le circuit alimente le périphérique. La commande de débranchement se fait au moyen de la sortie casque de l'ordinateur (prise jack standard). En pratique un son d'une durée de 1 ms est envoyé (volume maximum) sur cette sortie. Le front montant déclenche le dispositif qui coupe l'alimentation pendant environ 1.5 s.

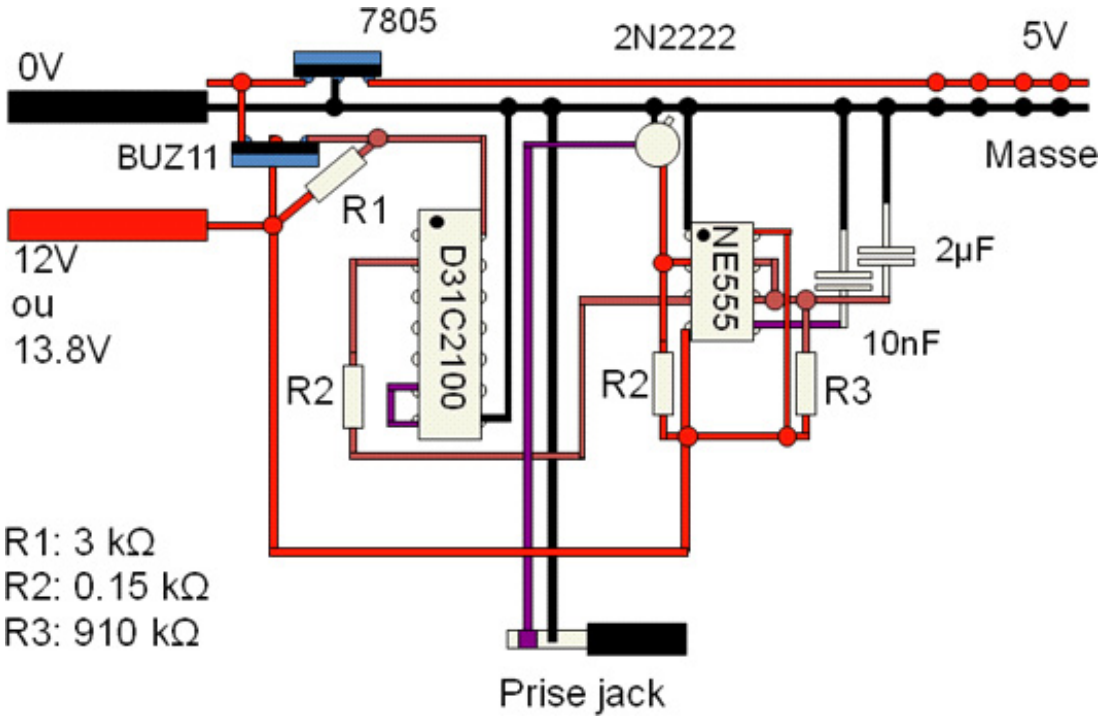


Figure VI.39 *Circuit du boîtier permettant de couper le courant d'un port USB. Il faut pour cela couper un câble USB et brancher les deux fils d'alimentation sur les sorties correspondantes. Par défaut le circuit alimente le périphérique USB. Le circuit détecte un front montant en provenance de la prise Jack (envoyé par la carte son de l'ordinateur) et coupe l'alimentation pendant 1.5 s environ avant de la réenclencher. Cela permet de simuler le débranchement du périphérique USB.*

Annexe I
Calibration des spectromètres

La calibration des spectromètres est nécessaire pour convertir les unités du spectromètre en unités radiométriques, pour compenser les perturbations induites par la chaîne de mesure et pour s'assurer que la longueur d'onde renvoyée par le spectromètre correspond effectivement à la réalité. Pour un spectromètre il y a donc trois points à prendre en compte pour leur calibration

- *La calibration en longueur d'onde* : Permet de s'assurer qu'il n'y a pas de décalage en longueur d'onde pour les spectres renvoyés par le spectromètre par rapport à la réalité. Elle est effectuée au moyen d'une lampe spectrale dont les longueurs d'onde des raies sont connues.

- *La mesure de la fonction de transfert* : Le spectre réel est modifié par tous les éléments de la chaine optique. On peut connaître ces modifications en comparant un spectre connu et sa mesure à l'aide du spectromètre. On calcule cette fonction de transfert en utilisant un corps noir. Elle s'écrit alors comme :

$$F(\lambda) = \frac{CN(\lambda)}{CN_{mesuré}(\lambda)} \qquad (VI.15)$$

Où $CN(\lambda)$ est le spectre d'émission du corps noir connue. Par la suite, la correction se fait en multipliant les spectres obtenus par cette fonction.

- *La calibration en linéarité* : un spectromètre est linéaire si pour chaque pixel de la CCD on peut écrire la relation :

$$\exists\, k \in \mathbb{R}^+ \quad tel\ que \quad S(k \times T_{int}) = k \times S(T_{int}) \qquad \forall\ T_{int} \in \mathbb{R}^+ \qquad (VI.16)$$

où *S* est le signal mesuré (nombre de coups), T_{int} est un temps d'intégration et *k* un coefficient. Autrement dit, deux mesures d'un même spectre obtenu avec des temps d'intégration différents doivent être égales une fois ramenées au même temps d'intégration. Ce n'est en général pas le cas. La non-linéarité provient de ce que la réponse des pixels de la CCD dépend du nombre de photons reçus. La non-linéarité n'est donc pas une fonction du temps d'intégration mais du nombre de coups mesurés. Le temps d'intégration n'est que l'intermédiaire permettant d'augmenter ou de diminuer le nombre de coup mesurés, toutes choses égales par ailleurs. Bien sûr la réponse en fonction du nombre de coups est propre à chaque pixel de la CCD.

Nous ne nous attarderons pas sur la calibration en longueur d'onde, dans la suite nous supposons qu'elle a été faite et nous nous concentrerons uniquement sur l'obtention de la fonction de transfert et la calibration en linéarité. Généralement les spectromètres sont fournis calibrés en linéarité. Cependant, pour certains spectromètres que nous avons dû utiliser, cette calibration n'avait pas été faite, c'est pour cela que nous avons développé notre propre méthode de calibration. Par la suite, l'utilisation de cette méthode a été étendue aux spectromètres ayant déjà été calibrés par le constructeur car elle permet une meilleure précision. Notre méthode combine la calibration de la

fonction de transfert (qui doit s'effectuer à chaque changement de la configuration de la chaîne optique de mesure) et la correction en linéarité. Elle permet d'obtenir, pour chaque pixel de la CCD ou chaque bande de mesure, une fonction de correction permettant de transformer les unités du spectromètre en unités radiométriques tout en s'assurant de la linéarité des mesures. L'amélioration constatée par rapport à la calibration faite par le constructeur tient dans le fait d'utiliser une fonction de correction par pixel et non pas une seule correction pour toute la CCD comme le fait le constructeur.

Le principe de la calibration est simple: nous mesurons l'émission d'un corps noir (LI-COR 1800-02, Li-Cor inc., Lincoln, NE, USA) dont le spectre est connu avec différents temps d'intégration de manière à balayer la plage de mesure de chaque pixel (pour les spectromètres que nous utilisons elle va de 0 à 16383 coups). L'hypothèse sous-entendue ici est que l'horloge des spectromètres est parfaite : le temps d'intégration demandé est le temps d'intégration effectif. Pour que ces mesures soient valides il faut également que la source soit parfaitement stable en intensité et spectralement. A cette fin, les mesures sont faites automatiquement par un programme écrit en VB.Net limitant la durée des mesures: le programme permet d'acquérir rapidement la série de spectres simultanément sur les trois spectromètres de TriFLEX. La stabilité du corps noir est également contrôlée grâce aux indications donnée par le corps noir.

Dans la suite, les résultats présentés ont été obtenus lors de la calibration d'un spectromètre avec la fonction de correction en linéarité constructeur activée. Un exemple du résultat des mesures sur le corps noir est donné dans la *Figure VI.40*. Il s'agit des mesures obtenues dans le canal B760 (destiné à la mesure au bord de la bande O_2-A) en fonction du temps d'intégration. La droite tracé en pointillé noir correspond au fit linéaire des mesures. On peut voir que l'on n'a pas une droite parfaite comme il le faudrait pour avoir une bonne linéarité. Les résidus, en haut de la figure, témoignent de la non-linéarité de la réponse du canal de mesure.

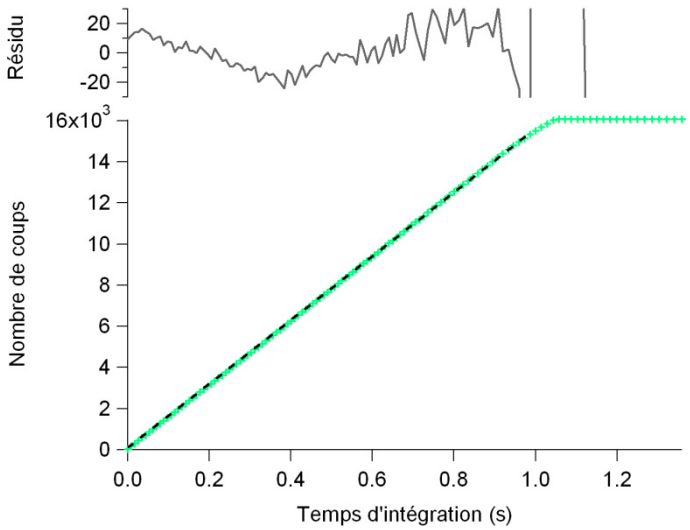


Figure VI.40 *Mesure dans le canal B760 (bord de la bande O_2-A) de l'émission d'un corps noir. Nombre de coups en fonction du temps d'intégration. Le nombre de coups est obtenu faisant la moyenne de 15 mesures. Le résidu entre le fit linéaire et les mesures est également indiqué. On observe la saturation du canal pour les temps d'intégration supérieur à 1s.*

C'est à partir de ces mesures que nous construisons la fonction de correction. Elle s'exprime ainsi :

$$F_i(n) = \frac{CN_i \times T_{int}}{n(T_{int})} \qquad (VI.17)$$

Où $n(T_{int})$ est le nombre de coups mesuré pour le temps d'intégration T_{int} , et CN_i est la valeur théorique de la radiance du corps noir au niveau du capteur pour le canal i. Cette fonction permet d'obtenir la correction à appliquer au signal en fonction du nombre de coups. La *Figure VI.41* présente cette fonction obtenue grâce aux données présentées plus précédemment. On pourrait utiliser cette fonction directement : il faudrait stocker l'intégralité des données et en faire une interpolation linéaire au moment où l'on a besoin de calculer une correction. Cette méthode présente plusieurs désavantages : la quantité d'information à stocker est importante et la manipulation de ces informations (interpolation) au moment de la correction est lente en termes de temps de calcul. De plus en gardant chaque valeur mesurée telle quelle on garde également une grande partie du bruit de la mesure. Afin de résoudre ces différents problèmes nous avons décidé de calculer un fit de la fonction mesuré. Ce fit est représenté en rouge sur la *Figure VI.41*. L'expression de la fonction utilisée pour le fit est :

$$F_i(n) = \sum_{k=0}^{k=N} c_k \times n^{k/3} \qquad (VI.18)$$

Avec c_k coefficients, n le nombre de coups. Le paramètre N est déterminé automatiquement par l'algorithme chargé de la calibration. Il est déterminé de manière à minimiser la différence entre fit et mesure par la méthode des moindres carrés. L'algorithme essaye également de minimiser les oscillations qui pourraient se produire lorsque N devient trop grand.

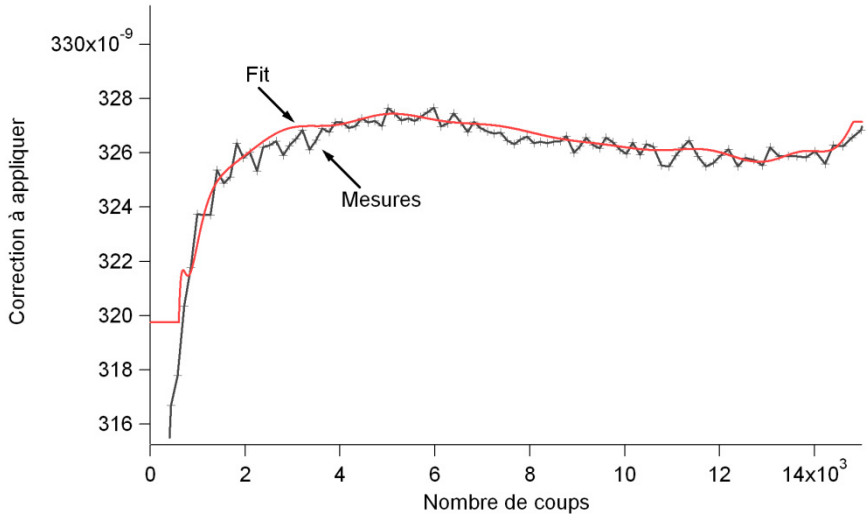


Figure VI.41 *Mesure de la correction à appliquer en fonction du nombre de coups (canal bord O2-A, spectromètre Ocean Optics) pour obtenir une mesure calibrée en linéarité et en unité radiométriques. Le fit de cette fonction est également représenté.*

Une fois le fit déterminé les coefficients des fonctions associées à chaque pixel sont stockés dans un fichier de calibration qui pourra être utilisé par toute les routines de traitement le nécessitant. La fonction définie de cette manière permet donc de corriger les mesures renvoyées par le spectromètre. Elle s'utilise de manière multiplicative :

$$M_i(n) = n \times F_i(n) \qquad (VI.19)$$

Avec $M_i(n)$ mesure en W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}, n nombre de coups et $F_i(n)$ fonction de correction.

La Figure VI.42 permet d'évaluer le gain apporté par cette méthode de calibration : la calibration obtenu avec un set de mesures a été appliquée à un autre set de mesures destiné à la calibration obtenue plus tard. Elle compare les données obtenues avec la linéarité par défaut du constructeur et les données obtenues avec notre méthode de calibration. La partie haute de la figure donne les valeurs de flux obtenues en fonction du nombre de coups (les mesures sont acquises à des temps d'intégration différents puis ramenées au même temps d'intégration) ; on y voit que les valeurs obtenues avec notre méthode sont plus stables. La partie basse de la mesure donne justement l'écart en pourcents entre la valeur théorique et la valeur mesurée. On voit que notre méthode permet de réduire cette erreur et de la maintenir stable, en particulier pour la zone ou le nombre de coups est supérieur à 8000 : c'est dans cette zone que la majorité des mesures TriFLEX sont faites. Si le gain peut paraître faible au premier abord il faut avoir en tête que l'écart à la linéarité est différents d'un pixel à l'autre, d'un canal de mesure à l'autre et sans bonne correction on peut arriver rapidement à des écarts différentiels significatifs pour la mesure de la fluorescence.

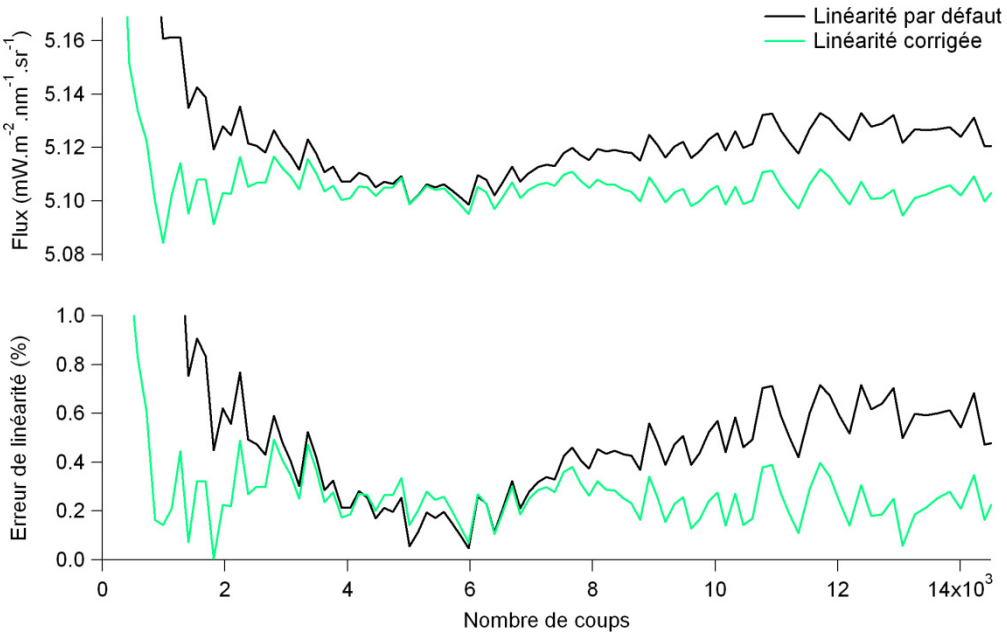


Figure VI.42 *Comparaison entre des mesures effectuées avec la correction en linéarité du constructeur et après application de notre correction en linéarité. En haut, flux mesuré en fonction du nombre de coups (les mesures sont faites avec des temps d'intégration différents puis ramenées au même temps). En bas écart entre valeur théorique et valeur mesurée.*

Annexe J
Calibration – fonction instrumentale

Dans cette annexe nous allons nous intéresser au problème de la calibration d'un capteur pour la mesure de la fluorescence. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux problèmes liés au fait que, généralement, la fonction instrumentale de l'instrument n'est pas une porte.

Soit $S(\lambda)$ la fonction instrumentale d'un des canaux de notre instrument avec λ la longueur d'onde. Dans le cas d'un système à filtre il s'agira de la fonction de transmission du filtre. Dans le cas d'un système dispersif il s'agira de la combinaison des réponses instrumentales de chacun des pixels formant le canal. Pour un flux quelconque $\varphi(\lambda)$ le flux mesuré au niveau du capteur vaut :

$$\phi_m = \int_{\Delta\lambda} S(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda \qquad (VI.20)$$

Le flux que l'on veut retrouver au moyen de cette mesure s'exprime de la manière suivante :

$$\phi_r = \int_{\Delta\lambda} \varphi(\lambda)d\lambda \qquad (VI.21)$$

Pour que ϕ_m soit égal à ϕ_r on calibre notre instrument. C'est-à-dire qu'on cherche un coefficient de calibration C_{cal} tel que :

$$C_{cal}\phi_m = \phi_r \qquad (VI.22)$$

Ce coefficient est généralement obtenu en utilisant une source de lumière dont les propriétés optiques sont connues. Le coefficient peut s'exprimer sous la forme :

$$C_{cal} = \frac{\int_{\Delta\lambda} \varphi_{cal}(\lambda)d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} S(\lambda)\varphi_{cal}(\lambda)d\lambda} \qquad (VI.23)$$

Et, si on connaît $\varphi_{cal}(\lambda)$, le flux de notre source, on peut facilement calculerC_{cal} en effectuant une mesure avec la source de calibration pour obtenir le dénominateur. Pour simplifier les écritures, posons, comme c'est souvent le cas, $\varphi_{cal}(\lambda) = cst$. On a alors simplement :

$$C_{cal} = \frac{\Delta\lambda}{\int_{\Delta\lambda} S(\lambda)d\lambda} \qquad (VI.24)$$

Une fois calibré on voudrait que, pour toute mesure, $C_{cal}\phi_m$ soit égal à ϕ_r, soit :

$$\frac{1}{\int_{\Delta\lambda} S(\lambda)d\lambda}\int_{\Delta\lambda} S(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda = \frac{1}{\Delta\lambda}\int_{\Delta\lambda} \varphi(\lambda)d\lambda \qquad (VI.25)$$

Cette égalité n'est vraie que si $S(\lambda) = cst$ ou $\varphi(\lambda) = cst$ (puisqu'on peut alors sortir cette constante de l'intégrale du membre de gauche de l'équation). Dans tous les autre cas cette égalité n'est pas vérifiée et il y aura une « erreur » sur la valeur mesurée. Cette erreur vient du fait que, dans l'intégrale $\int_{\Delta\lambda} S(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda$, on ne peut séparer $S(\lambda)$ et $\varphi(\lambda)$. Elle va donc dépendre entièrement des variations spectrales de $S(\lambda)$ et de $\varphi(\lambda)$. Dans la suite on ne s'intéressera qu'aux variations spectrales de $\varphi(\lambda)$.

Dans le cas de la mesure de fluorescence on est amené à faire des mesures dans des zones spectrales très marquées (la *Figure VI.43.A* présente les bandes d'absorption de l'oxygène d'après Delbouille et al., 1973). L'erreur sur l'estimation du flux dépendant de la forme du flux mesuré, elle va varier spectralement. Cette variation est donnée dans la *Figure VI.43.B* pour les deux bandes de l'oxygène. On voit que l'erreur est plus forte lorsqu'il y a une variation spectrale importante du flux, ce sera donc principalement les canaux au fond des bandes d'absorption qui seront sensibles à cette erreur.

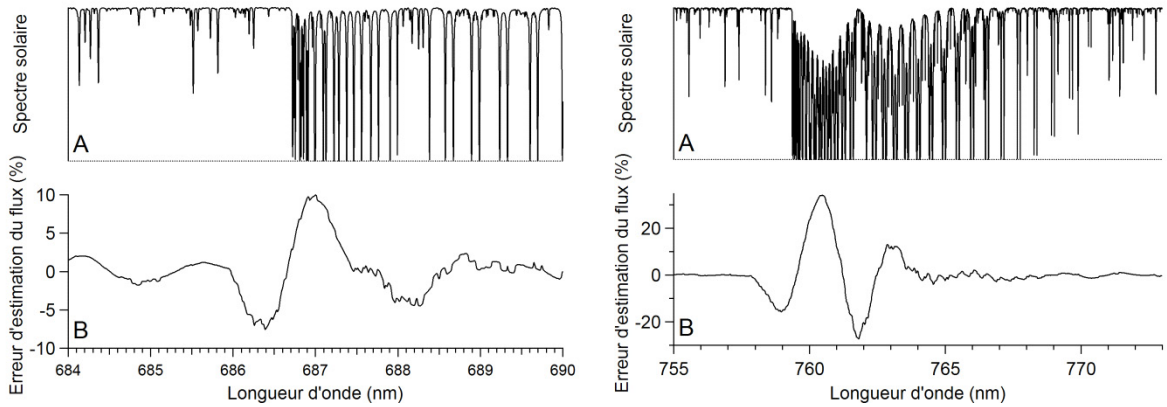


Figure VI.43 *Erreur d'estimation du flux en fonction de la longueur d'onde dans les deux bandes de l'oxygène. A gauche : bande O_2-B, à droite : bande O_2-A. Les calculs sont faits pour un filtre gaussien dont la FWHM vaut 0.5 nm dans la bande O_2-B et 1 nm dans la bande O_2-A.*

- ***Calibration adaptée :***

On peut compenser cette erreur en utilisant une calibration adéquate. La calibration avec un flux spectralement constant n'est pas adaptée à une mesure sur un flux dont la variation spectrale est importante. Reprenons le coefficient de calibration dans le cas général donné par *(VI.23)*. Le flux mesuré et calibré est donné par :

$$C_{cal}\phi_m = \frac{\int_{\Delta\lambda} \varphi_{cal}(\lambda)d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} S(\lambda)\varphi_{cal}(\lambda)d\lambda} \int_{\Delta\lambda} S(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda \qquad (VI.26)$$

Pour que $C_{cal}\phi_m$ soit égal à $\phi_r = \int_{\Delta\lambda} \varphi(\lambda)d\lambda$, il faut que $\varphi_{cal}(\lambda)$, le spectre de la source de calibration, ait la même forme que $\varphi(\lambda)$. En effet, si $\varphi_{cal}(\lambda) = \alpha\varphi(\lambda)$ (avec α un coefficient de proportionnalité) *(VI.26)* devient:

$$C_{cal}\phi_{mes} = \frac{\alpha \int_{\Delta\lambda} \varphi(\lambda)\, d\lambda}{\alpha} \frac{\int_{\Delta\lambda} S(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} S(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda} \qquad (VI.27)$$

Et donc :

$$C_{cal}\phi_m = \int_{\Delta\lambda} \varphi(\lambda) d\lambda \ = \phi_r \qquad (VI.28)$$

On peut donc calibre radiométriquement un instrument de manière idéale en utilisant une source de calibration dont la forme du spectre est similaire à la forme du spectre du flux que l'on souhaite mesurer. Bien sûr il est très difficile de reproduire exactement les variations spectrales fines des bandes d'absorption de l'oxygène pour obtenir une source de calibration idéale mais une variation spectrale moyenne similaire devrait suffire à améliorer significativement la mesure.

- ***Effet sur la fluorescence (calibration non adaptée)***

La *Figure VI.43.B* montre qu'avec une calibration « standard » il peut y avoir une mauvaise estimation du flux, en particulier pour les canaux dans les bandes d'absorption. Cela va induire une mauvaise estimation de la profondeur des bandes de l'oxygène. La quantification de la fluorescence est justement basée sur cette mesure de profondeur. On peut remarquer que le fait que notre instrument ne mesure pas la profondeur « réelle » n'est pas important, ce qui compte c'est que l'erreur sur cette profondeur soit toujours la même.

L'erreur dépendant de la forme du spectre de radiance mesuré, il faut idéalement que le spectre de radiance de la référence et le spectre de radiance de la cible végétale aient la même forme ou que celles-ci soient très faiblement différentes. Par rapport à la mesure sur la référence, la végétation modifie la forme des bandes de l'oxygène de deux manières : par sa réflectance et par la contribution additionnelle de la fluorescence. La question est de savoir si ces modifications spectrales sont significatives vis-à-vis de notre problème.

A titre indicatif, une simulation a été faite en utilisant le spectre haute résolution de Delbouille et al. 1973, un spectre de réflectance d'un couvert de blé et deux canaux de mesure pour chaque bande d'absorption. En utilisant l'agorithme simple tenant compte des variations de fluroescence et de réflectance (voir CHAPITRE II section 2.3) on trouve une erreur sur la fluorescence inférieure à 1.5% dans la bande O_2-B (surestimation) et une erreur inférieure à 0.7 % dans la bande O_2-A (sous-estimation). Les résultats de cette simulation montrent que les erreurs faites sur la fluroescence ne sont pas importantes et on pourra, dans ce cas la, négliger les erreurs dues à la calibration. Il ne faut cependant pas perdre de vue que cette erreur dépend de nombreux paramètres : la position et la largeur des canaux, le calcul utilisé pour retrouver la fluroescence ainsi que les propriétés optiques des cibles végétales/ de la référence. Il faut également garder en tête que si on utilise deux capteurs differents pour acquérir les differents signaux (par exemple un pour la mesure sur cible et un second pour la mesure sur la référence), les erreurs sur les profondeurs ne seront pas les mêmes et ne seront pas liées linéairement ce qui rendra plus difficile une bonne estimation de la fluroescence.

Références

REFERENCES

Acuña, A., & Amat-Guerri, F. (2008). Early History of Solution Fluorescence: The Lignum nephriticum of Nicolàs Monardes. (pp. 3-20)

Agati, G., Mazzinghi, P., Fusi, F., & Ambrosini, I. (1995). The F685/F730 chlorophyll fluorescence ratio as a tool in plant physiology : response to physiological and environmental factors. *Journal of Plant Physiology, 145*, 228-238

Agati, G., Cerovic, Z.G., & Moya, I.l. (2000). The effect of decreasing temperature up to chilling values on the in vivo F685/F735 chlorophyll fluorescence ratio in Phaseolus vulgaris and Pisum sativum: The role of the photosystem I contribution to the 735 nm fluorescence band. *Photochem Photobiol, 72*, 75-84

Allen, J.F. (1992). Protein phosphorylation in regulation of photosynthesis. *Biochimica et Biophysica Acta, 1098*, 275-335

Alonso, L., Gomez-Chova, L., Vila-Frances, J., Amoros-Lopez, J., Guanter, L., Calpe, J., & Moreno, J. (2008). Improved Fraunhofer Line Discrimination Method for Vegetation Fluorescence Quantification. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 5*, 620-624

Anderson, S.M., & Mauersberger, K. (1992). Laser measurements of ozone absorption cross sections in the Chappuis band. *Geophysical Research Letters, 19*, 933-936

Apostol, S., Briantais, J.M., Moise, N., Cerovic, Z.G., & Moya, I. (2001). Photoinactivation of the photosynthetic electron transport chain by accumulation of over-saturating light pulses given to dark adapted pea leaves. *Photosynthesis Research, 67*, 215-227

Aro, E.M., Virgin, I., & Andersson, B. (1993). Photoinhibition of Photosystem II. Inactivation, protein damage and turnover. *Biochimica et Biophysica Acta, 1143*, 113-134

Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment, 35*, 161-173

Baret, F.d.r., & Fourty, T. (1997). Estimation of leaf water content and specific leaf weight from reflectance and transmittance measurements. *AGRONOMIE, 17*, 455-464

Barton, I.J., & Scott, J.C. (1986). Remote measurement of surface pressure using absorption in the oxygen A-band. *Applied Optics, 25*

Bergh, J., McMurtrie, R.E., & Linder, S. (1998). Climatic factors controlling the productivity of Norway spruce : A model-based analysis. *Forest ecology and management, 110*, 127-139

Berk, A., Bernstein, L.S., & Robertson, D.C. (1987). MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN. In (pp. -)

Berk, A., Bernstein, L., Anderson, G., Acharya, P., Robertson, D., Chetwynd, J., & Adlergolden, S. (1998). MODTRAN Cloud and Multiple Scattering Upgrades with Application to AVIRIS. *Remote Sensing of Environment, 65*, 367-375

Berk, A., Anderson, G., Acharya, P., Hoke, M.L., Chetwynd, J., Bernstein, L.S., Shettle, E.P., Matthew, M.W., & Adlergolden, S. (2003). MODTRAN4 Version 3 Revision 1 User's Manual. In (pp. -)

Björkman, O., & Demmig, B. (1987). Photon yield of O-2 evolution and chlorophyll fluorescence charateristics at 77-K among vascular plants of diverse origins. *Planta, 170*, 489-504

Bodhaine, B.A., Wood, N.B., Dutton, E.G., & Slusser, J.R. (1999). On Rayleigh Optical Depth Calculations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 16*, 1854-1861

Bréon, F.M., & Bouffiès, S. (1996). Land surface pressure estimate from measurements in the oxygen A absorption band. *Journal of applied meteorology, 35*

Briantais, J.M., Vernotte, C., Krause, G.H., & Weis, E. (1986). Chlorophyll a fluorescence of higher plants: Chloroplasts and leaves. (pp. 539-583). Orlando: Academic Press

Briantais, J.M., Dacosta, J., Goulas, Y., Ducruet, J.-M., & Moya, I. (1996). Heat stress induces in leaves an increase of the minimum level of chlorophyll fluorescence, F0: A time-resolved analysis. *Photosynthesis Research, 48*, 189-196

Brinkman, R.T. (1968). Rotational Raman scattering in planetary atmopsheres. *Astrophysical Journal, 154*

Buschmann, C., Nagel, E., Szabo, K., & Kocsanyi, L. (1994). Spectrometer for fast measurements of in-vivo reflectance, absorptance and fluorescence in the visible and near-infrared. *Remote Sensing of Environment, 48*, 18-24

Buschmann, C., & Lichtenthaler, H.K. (1998). Principles and characteristics of multi-colour fluorescence imaging of plants. *Journal of Plant Physiology, 152*, 297-314

Butler, W.L. (1978). Energydistribution in photo-chemical apparatus of photosynthesis. *ANNUAL REVIEW OF PLANT PHYSIOLOGY AND PLANT MOLECULAR BIOLOGY, 29*, -

Carter, G.A., Jones, J.H., Mitchell, R.J., & Brewer, C.H. (1996). Detection of solar-excited chlorophyll a fluorescence and leaf photosynthetic capacity using a fraunhofer line radiometer. *Remote Sens. Environ., 55*, 89-92

Cavender-Bares, J., Apostol, S., Moya, I., Briantais, J.M., & Bazzaz, F.A. (1999). Chilling-Induced Photoinhibition in Two Oak Species: Are Evergreen Leaves Inherently Better Protected Than Deciduous Leaves? *Photosynthetica, 36*, 587-596

Cerovic, Z.G., Goulas, Y., Gorbunov, M., Briantais, J.M., Camenen, L., & Moya, I. (1996). Fluorosensing of water stress in plants: Diurnal changes of the mean lifetime and yield of chlorophyll fluorescence, measured simultaneously and at distance with a tau-LIDAR and a modified PAM-fluorimeter, in maize, sugar beet, and Kalanchoe. *Remote Sensing of Environment, 58*, 311-321

Cerovic, Z.G., Samson, G., Morales Iribas, FermÃ-n, Tremblay, N., & Moya, I.l. (1999). Ultraviolet-induced fluorescence for plant monitoring: present state and prospects. *AGRONOMIE, 19*, -

Chappelle, E.W., Wood, J., McMurtrey III, James E., & Newcomb, W.W. (1984). Laser-induced fluorescence of green plants 1: A technique for the remote detection of plant stress and species differentiation. *Applied Optics, 23*, 134-134

Clayton, R.K. (1969). Characteristics of prompt and delayzd fluroescence from sphinach chloroplasts. *Biophysical Journal, 9*

Corp, L.A., Middleton, E.M., Daughtry, C.S.T., & Campbell, P.K.E. (2006). Solar Induced Fluorescence and Reflectance Sensing Techniques for Monitoring Nitrogen Utilization in Corn. In, *Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. -)

Davidson, J.A., Cantrell, C.A., McDaniel, A.H., Shetter, R.E., Madronich, S., & Calvert, J.G. (1988). Visible-ultraviolet absorption cross sections for NO2 as a function of temperature*, 93*, 7105-7112

Delbouille, L., Roland, G., & Neven, L. (1973). *Atlas photometrique du spectre solaire de L 3000 a L 10000*

Dolman, A.J., Noilhan, J., Durand, P., Sarrat, C., Brut, A., Butet, A., Jarosz, N., Brunet, Y., Loustau, D., Lamaud, E., Tolk, L., Ronda, R., Miglietta, F., Gioli, B., Enzo, M., Esposito, M., Gerbig, C., Kärner, S., Galdemard, P., Ramonet, M., Ciais, P., Neininger, B., Hutjes, R.W.A., Elbers, J.A., Warnecke, T., Landa, G.P., Sanz, M., Scholz, Y., Facon, G., Ceschia, E., & Béziat, P. (2006). CERES, the CarboEurope Regional Experiment Strategy in Les Landes, South West France, May-June 2005. *Bulletin of the American Meteorological Society, 87*, 1367-1379

Drusch, M., Moreno, J., Goulas, Y., Miglietta, F., North, P., Rascher, U., Svanberg, S., & Verhoef, W. (2008). Candidate Earth Explorer Core Missions - Reports for Assessment: FLEX - FLuorescence EXplorer. In (pp. -). Noordwijk: European Space Agency

Dubuisson, P., Borde, R., Schmechtig, C., & Satner, R. (2001). Surface pressure estimates from satellite data in the oxygen A-band: Applications to the MOS sensor over land. *Journal of geophysical research atmospheres, 106*, 27277-27286

Dubuisson, P., Borde, R., Dessailly, D., & Santer (2003). *In-flight spectral calibration of the oxygen A-band channel of MERIS*. Abingdon, ROYAUME-UNI: Taylor and Francis

Evain, S., Camenen, L., & Moya, I. (2001). Three channels detector for remote sensing of chlorophyll fluorescence and reflectance from vegetation. In, *8 th International Symposium: Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing* (pp. 395-400). Aussois

Evain, S., Ounis, A., Baret, F., Goulas, Y., Louis, J., Ducruet, J.-M., Cerovic, Z.G., & Moya, I. (2002). Passive vegetation fluorosensing using atmospheric oxygen absorption band. In, *Recent Advances in Quantitative Remote Sensing* (pp. -). Valencia

Evain, S., Flexas, J., & Moya, I. (2004). A new instrument for passive remote sensing: 2. Measurement of leaf and canopy reflectance changes at 531 nm and their relationship with photosynthesis and chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment, 91*, 175-185

Farineau, J., Morot-Gaudry, J.-F.o., & Soussana, J.-F.o. (2006). *La photosynthèse: processus physiques, moléculaires et physiologiques*: Editions Quae

Flexas, J., Briantais, J.M., Cerovic, Z., Medrano, H., & Moya, I. (2000). Steady-state and maximum chlorophyll fluorescence responses to water stress in grapevine leaves: A new remote sensing system. *Remote Sensing of Environment, 73*, 283-297

Flexas, J., Escalona, J.M., Evain, S., Gulias, J., Moya, I., Osmond, C.B., & Medrano, H. (2002). Steady-state chlorophyll fluorescence (Fs) measurements as a tool to follow variations of net CO2 assimilation and stomatal conductance during water-stress in C-3 plants. *Physiologia Plantarum, 114*, 231-240

Fournier, A., Moya, I., Champagne, S., Daumard, F., Goulas, Y., & Ounis, A. (2011). Canopy structure affects sun-induced chlorophyll fluorescence. *Submitted*, -

Fourty, T., & Baret, F.d.r. (1998). On spectral estimates of fresh leaf biochemistry. *International Journal of Remote Sensing, 19*, 1283-1297

Funk, O. (2000). Photon pathlenghts distributions for cloudy skies. Oxygen A-band measurements and radiative transfer model calculations. In (pp. 171-171)

Gamon, J.A., Field, C.B., Bilger, W., Bjorkman, O., Fredeen, A.L., & Penuelas, J. (1990). Remote sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies. *Oecologia, 85*, -

Gamon, J.A., Penuelas, J., & Field, C.B. (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment, 41*, 35-44

Genty, B., Briantais, J.M., & Baker, N. (1989). The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron-transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta, 990*, 87-92

Gioli, B., Miglietta, F., Vaccari, F.P., Zaldei, A., & Martino, B.D. (2006). The Sky Arrow ERA, an innovative airborne platform to monitor mass, momentum and energy exchange of ecosystems. *Annals of Geophysics, 49*

Gitelson, A.A., Buschmann, C., & Lichtenthaler, H.K. (1998). Leaf chlorophyll fluorescence corrected for re-absorption by means of absorption and reflectance measurements. *Journal of Plant Physiology, 152*, 283-296

Grainger, J.F., & Ring, J. (1962). Anomalous fraunhofer line profiles. *Nature, 193*

Gu, X., Hanocq, J.-F., Tao, Y., Tian, G., Legrand, M., & Bosseno, R. (2003). Modeling field of view effect on the ground observations of directional brightness temperature over a maize canopy. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International, 7*, 4437-4439

Gueymard, C.A. (1995). SMARTS, a Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment. In (pp. -)

Guyot, G. (1989). *Signatures spectrales des surfaces naturelles*. Caen: Paradigme

Havaux, M., Strasser, R.J., & Greppin, H. (1991). Effects of incident light intensity on the yield of steady-state chlorophyll fluorescence in intact leaves, an example of bioenergetic homeostasis. *Environmental and experimental botany, 31*, 23-32

Hess, M., Koepke, P., & Schult, I. (1998). Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC. *Bulletin of the American Meteorological Society, 79*, 831-844

Hilker, T., Coops, N., Hall, F., Black, T., Wulder, M., Nesic, Z., & Krishnan, P. (2008). Separating physiologically and directionally induced changes in PRI using BRDF models. *Remote Sensing of Environment, 112*, 2777-2788

Holben, B. (1998). AERONET: A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment, 66*, 1-16

Holt, N.E., Fleming, G.R., & Niyogi, K.K. (2004). Toward an understanding of the mechanism of nonphotochemical quenching in green plants. *Biochemistry, 43*, 8281-8289

Horton, P., Ruban, A.V., & Walters, R.G. (1996). Regulation of light harvesting in green plants*, 47*, 655-684

Horton, P., Johnson, M.P., Perez-Bueno, M.L., Kiss, A.Z., & Ruban, A.V. (2008). Photosynthetic acclimation: does the dynamic structure and macro-organisation of photosystem II in higher plant grana membranes regulate light harvesting states? *The FEBS journal, 275*, 1069-1079

IGBP Terrestrial Carbon Working Group (1998). The terrestrial carbon cycle: implications for the Kyoto protocol. *Science, 280*, 1393-1394

Jacquemoud, S., Féret, J.B., & Ustin, S.L. (2009). Compréhension et modélisation de la couleur des feuilles. In, *Ecole thématique interdisciplinaire du CNRS* (pp. -). Roussillon en Provence

Janzen, H.H. (2004). Carbon cycling in earth systems - a soil science perspective. *Agriculture Ecosysetms Environments, 104*, 399-417

Kantor, A.J., & Cole, A.E. (1962). Mid-latitude atmospheres, winter and summer. *Pure and Applied Geophysics, 53*, 171-188

Kasten, F., & Young, A.T. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics, 28*, 4735-4735

Kautsky, H., & Hirsch, A. (1931). Neue Versuche zur Kohlensaureassimilation. *Die Naturwissenschaften, 19*, 964-964

Kneizys, F.X., Shettle, E.P., Abreu, L.W., Chetwynd, J.H., & Anderson, G.P. (1988). Users guide to LOWTRAN 7. In (pp. 146-146)

Koelemeijer, R.B.A., Stammes, P., Hovenier, J.W., & de Haan, J.F. (2002). Global distributions of effective cloud fraction and cloud top pressure derived from oxygen A band spectra measured by the Global Ozone Monitoring Experiment: Comparison to ISCCP data. *Journal of Geophysical Research, 107*, 4151-4151

Kolber, Z., Klimov, D., Ananyev, G., Rascher, U., Berry, J., & Osmond, B. (2005). Measuring photosynthetic parameters at a distance: laser induced fluorescence transient (LIFT) method for remote measurements of photosynthesis in terrestrial vegetation. *Photosynthesis Research, 84*, 121-129

Kooten, O., & Snel, J.F.H. (1990). The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology. *Photosynthesis Research, 25*, 147-150

Koschmieder, H. (1924). Theorie der horizontalen Sichtweite II : Kontrast und Sichtweite. *Beitr. Phys. Atmos, 12*, 171-181

Krause, G.H., & Weis, E. (1984). Chlorophyll fluorescence as a tool in plant physiology .2. Interpretation of fluorescence signals. *Photosynthesis Research, 5*, 139-157

Krause, G.H., & Weis, E. (1991). Chlorophyll flluroescence and photosynthesis - the basics. *ANNUAL REVIEW OF PLANT PHYSIOLOGY AND PLANT MOLECULAR BIOLOGY*, -

Latouche, G. (1995). Télédétection passive de la fluorescence des végétaux. In

Lavorel, J., & Joliot, P. (1972). Connected model of phoyosynthetic unit. *Biophysical Journal, 12*

Lawlor, D.W. (1993). *Photosynthesis: molecular, physiological, and environmental processes*

Lazar, D. (1999). Chlorophyll a fluorescence induction. *Biochimica Et Biophysica Acta-Bioenergetics, 1412*, 1-28

Le Naour, Isabelle (1996). Conception d'un logiciel de transmission atmosphérique pour les trajets horizontaux dans la basse atmosphère: HORTRAN, -

Lichtenthaler, H.K., Buschmann, C., Rinderle, U., & Schmuck, G. (1986). Application of chlorophyll fluorescence in ecophysiology. *Radiation and Environmental Biophysics, 25*, 297-308

Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods Enzymol, 148*, -

Lichtenthaler, H.K., & Rinderle, U. (1988). The role of chlorophyll fluorescence in the detection of stress conditions in plants. *Critical reviews in analytical chemistry, 19*, -

Link, F. (1951). Variations lumineuses de la Lune. *Bulletin of the Central Astronomical Institute of Czechoslovakia, 2*, 131-133

Lorenz, L. (1890). Lysbevaegelser i og uden for en af plane Lysbolger belyst Kugle. (pp. 262-262): Det Kongelig Danske Videnskabernes Selskabs Skrifter

Louis, J. (2004). Télédétection et modélisation des signaux de fluorescence et de réflectance (PRI) des couverts végétaux. In (pp. 201-201). Paris, (France)

Louis, J., Ounis, A., Ducruet, J.M., Evain, S., Laurila, T., Thum, T., Aurela, M., Wingsle, G., Alonso, L., Pedros, R., & Moya, I. (2005). Remote sensing of sunlight-induced chlorophyll fluorescence and reflectance of Scots pine in the boreal forest during spring recovery. *Remote Sensing of Environment, 96*, 37-48

Malkin, S., Armond, P.A., Mooney, H.A., & Fork, D.C. (1981). Photosystem II Photosynthetic Unit Sizes from Fluorescence Induction in Leaves : CORRELATION TO PHOTOSYNTHETIC CAPACITY. *Plant Physiology, 67*, 570-579

Marder, J.B., Caspi, V., & Raskin, V.I. (1995). Free chlorophyll effects on variable fluroescence. (pp. -). Dordrecht: Kluwer academic Publishing

Martinez-Lozano, J.A., Utrillas, M.P., Tena, F., Pedros, R., Canada, J., Bosca, J.V., & Lorente, J. (2001). Aerosol optical characteristics from a summer campaign in an urban coastal Mediterranean area. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39*, 1573-1585

Maxwell, K., & Johnson, G.N. (2000). Chlorophyll fluorescence - a practical guide. *Journal of Experimental Botany, 51*, 659-668

Mazzoni, M., Agati, G., Bianco, S.D., Cecchi, G., & Mazzinghi, P. (2006). High resolution measurements of solar induced chlorophyll fluroescence in the fraunhofer Ha and in the atmospheric oxygen lines. In, *Proceedings of the 6th International Conference on Space Optics* (pp. -). ESTEC Noordwijk, The Netherlands

McClatchey, R.A., Fenn, R.W., Selby, J.E.A., Volz, F.E., & Garing, J.S. (1972). Optical properties of the atmosphere. In (pp. 110-110). Bedford

McFarlane, J.C., Watson, R.D., Theisen, A.F., Jackson, R.D., Ehrler, W.L., Pinter, J., Idso, S.B., & Reginato, R.J. (1980). Plant stress detection by remote measurement of fluorescence. *Applied Optics, 19*, 3287-3287

Meroni, M., & Colombo, R. (2006). Leaf level detection of solar induced chlorophyll fluorescence by means of a subnanometer resolution spectroradiometer. *Remote Sensing of Environment, 103*, 438-448

Meroni, M., Panigada, C., Rossini, M., Picchi, V., Cogliati, S., & Colombo, R. (2008a). Using optical remote sensing techniques to track the development of ozone-induced stress. *Environmental Pollution*, -

Meroni, M., Rossini, M., Picchi, V., Panigada, C., Cogliati, S., Nali, C., & Colombo, R. (2008b). Assessing Steady-state Fluorescence and PRI from Hyperspectral Proximal Sensing as Early Indicators of Plant Stress: The Case of Ozone Exposure. *Sensors, 8*, 1740-1754

Middleton, E., Corp, L., Daughtry, C., & Campbell, P. (2006). Chlorophyll Fluorescence Emissions of Vegetation Canopies From High Resolution Field Reflectance Spectra. In, *Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. -): IGARSS 2006

Mie, G. (1908). Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annalen der Physik, 330*, 377-445

Moise, N., & Moya, I.l. (2004a). Correlation between lifetime heterogeneity and kinetics heterogeneity during chlorophyll fluorescence induction in leaves: 2. Multi-frequency phase and modulation analysis evidences a loosely connected PSII pigment-protein complex. *Biochimica Et Biophysica Acta-Bioenergetics, 1657*, 47-60

Moise, N., & Moya, I.l. (2004b). Correlation between lifetime heterogeneity and kinetics heterogeneity during chlorophyll fluorescence induction in leaves: 1. Mono-frequency phase and modulation analysis reveals a conformational change of a PSII pigment complex during the IP thermal phas. *Biochimica et Biophysica Acta, 1657*, 33-46

Monardes, N.B. (1565). *Dos Libros/El vno que trata de todas la cosas que traen de nuestras Indias Occidentales que siruen al vso de Medicina y como se ha de vsar de la rayz de Mechoacan, purga excelentissima. El otro libro trata de los medicinas marauillosas*. Seville

Morales, F., Abadia, A., & Abadia, J. (1990). Characterization of the Xanthophyll Cycle and Other Photosynthetic Pigment Changes Induced by Iron Deficiency in Sugar Beet (Beta vulgaris L.). *Plant Physiol., 94*, 607-613

Moya, I., Camenen, L., Latouche, G., Mauxion, C., Evain, S., & Cerovic, Z.G. (1999). An instrument for the measurement of sunlight excited plant fluorescence. In, *Proceedings of the XIth International Congress on Photosynthesis*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishing

Moya, I., Cerovic, Z.G., Evain, S., Goulas, Y., Ounis, A., & Stoll, M.P. (2001). Télédétection de l'activité photosynthétique: de la vérité terrain à la mesure satellitaire. In CNES (Ed.), *8th International Symposium: Physical measurements and signatures in remote sensing*. Aussois, France

Moya, I., Cartelat, A., Cerovic, Z.G., Ducruet, J.-M., Evain, S., Flexas, F., Goulas, Y., Louis, J., Meyer, S., Moise, N., & Ounis, A. (2003). Possible Approaches to Remote Sensing of Photosynthetic Activity. In (pp. 588-590). Toulouse France: IEEE

Moya, I., Camenen, L., Evain, S., Goulas, Y., Cerovic, Z.G., Latouche, G., Flexas, J., & Ounis, A. (2004). A new instrument for passive remote sensing 1. Measurements of sunlight-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment, 91*, 186-197

Moya, I., Daumard, F., Moise, N., Ounis, A., & Goulas, Y. (2006). First airborne multiwavelength passive chlorophyll fluorescence measurements over La Mancha (Spain) fields. In, *RAQRS* (pp. -). Torrent (Valencia), Spain

Moya, I., Daumard, F., Moise, N., Ounis, A., & Goulas, Y. (2010). Sun-induced chlorophyll fluorescence at 687 nm and 760 nm: comparison of airborne and ground measurements. *Remote Sensing of Environment*, -

Moya, I., & Flexas, J. (2010). Terrestrial photosynthesis in a changing environment. The molecular, physiological and ecological bases of photosynthesis driving its response to the environmental changes. (pp. -): Cambridge University

Müller, P., Li, X.P., & Niyogi, K.K. (2001). Non-photochemical quenching. A response to excess light energy. *PLlant Physiology, 125*, 1558-1566

Murata, N., Takahashi, S., Nishiyama, Y., & Allakhverdiev, S.I. (2007). Photoinhibition of photosystem II under environmental stress. *Biochimica et Biophysica Acta, 1767*, 414-421

Nelder, J.A., & Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *Computer Journal, 7*, 308-313

Ounis, A. (2001). Télédétection de la fluorescence des couverts végétaux induite par laser : application des techniques de corrélation temporelle microseconde et nanoseconde. In (pp. 229-229). Orsay

Ounis, A., Evain, S., Flexas, J., Tosti, S., & Moya, I. (2001). Adaptation of a PAM-fluorometer for remote sensing of chlorophyll fluorescence. *Photosynthesis Research, 68*, 113-120

Pancrati, O. (2003). Télédétéction de l'aérosol désertique depuis le sol par radiométrie infrarouge thermique multibande. In (pp. 181-181)

Papageorgiou, G.C., & Govindjee (2004). *Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis*: Springer Netherlands

Peguero-Pina, J., Morales, F., Flexas, J., Gil-Pelegrin, E., & Moya, I. (2008). Photochemistry, remotely sensed physiological reflectance index (PRI) and de_epoxidation state of the xanthophyll cycle in Quercus coccifera under intense drought. *Oecologia, 156*, 1-11

Perez-Priego, O., Zarco-Tejada, P.J., Miller, J.R., Sepulcre-Canto, G., & Fereres, E. (2005). Detection of water stress in orchard trees with a high-resolution spectrometer through chlorophyll fluorescence in-filling of the O-2-A band. *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing, 43*, 2860-2869

Pfundel, E. (1998). Estimating the contribution of Photosystem I to total leaf chlorophyll fluorescence. *Photosynthesis Research, 56*, 185-195

Plascyk, J.A. (1975). The MK II Fraunhofer Line Discriminator (FLD-II) for airborne and orbital remote sensing of solar-stimulated luminescence. *Optical Engineering, 14*, 339-346

Plascyk, J.A., & Gabriel, F.C. (1975). The Fraunhofer Line Discriminator MKII-An Airborne Instrument for Precise and Standardized Ecological Luminescence Measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 24*, 306-313

Pospisil, P. (1997). Mechanisms of non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching in higher plants. *Photosynthetica, 34*, 343-355

Prévot, L., Champion, I., & Guyot, G. (1993). Estimating surface soil moisture and leaf area index of a wheat canopy using a dual-frequency (C and X bands) scatterometer. *Remote Sensing of Environment, 46*, 331-339

Qu, J.J. (2007). *Earth Science Satellite Remote Sensing (Volume 1)*: Springer

Rabinowitch, E. (1945). *Photosynthesis and related processes*. New York: Interscience Publishers Inc.

Rascher, U., Agati, G., Alonso, L., Cecchi, G., Champagne, S., Colombo, R., Damm, A., Daumard, F., de Miguel, E., Fernandez, G., Franch, B., Franke, J., Gerbig, C., Gioli, B., Gomez, J.A., Goulas, Y., Guanter, L., Gutiérrez-de-la-Camara, O., Hamdi, K., Hostert, P., Jiménez, M., Kosvancova, M., Lognoli, D., Meroni, M., Miglietta, F., Moersch, A., Moreno, J., Moya, I., Neininger, B., Okujeni, A.,

Ounis, A., Palombi, L., Raimondi, V., Schickling, A., Sobrino, J.A., Stellmes, M., Toci, G., Toscano, P., Udelhoven, T., van der Linden, S., & Zaldei, A. (2009). CEFLES2: the remote sensing component to quantify photosynthetic efficiency from the leaf to the region by measuring sun-induced fluorescence in the oxygen absorption bands. *Biogeosciences Discuss., 6*, 2217-2266

Raven, P.H., Evert, R.F., Eichhorn, S.E., & Bouharmont, J. (2003). *Biologie végétale*: De Boeck Université

Rayleigh, L. (1871). On the scattering of light by small particles. *Philosophical Magazine, 41*, 447-451

Richardson, A., & Wiegand, C. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information(by gray mapping of Landsat MSS data). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 43*, 1541-1552

Rinderle, U., & Lichtenthaler, H.K. (1988). The chlorophyll fluorescence ratio F690/F735 as a possible stress indicator. (pp. -): Kluwer Academic Publishers

Rosema, A., Verhoef, W., Schroote, J., & Snel, J.F.H. (1991). Simulating fluorescence light-canopy interaction in support of laser-induced fluorescence measurements. *Remote Sens. Environ., 37*, 117-130

Rosenberg, N.J., Blad, B.L., & Verma, S.B. (1983). *Microclimate: The Biological Environment*: Wiley-Interscience

Rothman, L. (1998). The HITRAN molecular spectroscopic database and hawks (HITRAN atmospheric workstation): 1996 edition. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 60*, 665-710

Ruban, A.V., Young, A.J., & Horton, P. (1993). Induction of Nonphotochemical Energy Dissipation and Absorbance Changes in Leaves (Evidence for Changes in the State of the Light-Harvesting System of Photosystem II in Vivo). *Plant Physiol., 102*, 741-750

Schneider, W., Moortgart, G.K., & Tyndall, G.S. (1987). Absorption cross-sections of NO2 in the UV and visible region (200-700 nm) at 298 K. *Journal of photochemistry and photobiology. A, Chemistry, 40*, 195-217

Schreiber, U. (1986). Detection of rapid induction kinetics with a new type of high-frequency modulated chlorophyll fluorometer. *Photosynthesis Research, 9*, 261-272

Schreiber, U., Schliwa, U., & Bilger, W. (1986). Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer. *Photosynthesis Research, 10*, 51-62

Schreiber, U., & Bilger, W. (1993). Progress in Chlorophyll Fluorescence Research: Major Developments During the Past Years in Retrospect. (pp. -). Berlin, Heidelberg: SPRINGER VERLAG

Seidel, D.J. (2002). Water Vapor: Distribution and Trends. (pp. -). Chichester, UK.

Shettle, E.P., & Fenn, R.W. (1979). Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties. In

Sioris, C.E., & Evans, W.F.J. (2000). Impact of rotational Raman scattering in the O2 A band. *Geophysical Research Letters, 27*, 4085-4088

Sioris, C.E., Bazalgette Courrèges-Lacoste, Grégory, & Stoll, M.-P. (2003). Filling in of Fraunhofer lines by plant fluorescence: Simulations for a nadir-viewing satellite-borne instrument. *Journal of Geophysical Research, 108*, -

Stammes, K., Tsay, S.-C., Wiscombe, W., & Jayaweera, K. (1988). Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Applied Optics, 27*, 2502-2509

Sticksel, E., Schächtl, J., Huber, G., Liebler, J., & Maidl, F.-X. (2004). Diurnal Variation in Hyperspectral Vegetation Indices Related to Winter Wheat Biomass Formation. *Precision Agriculture, 5*, 509-520

Stober, F., & Lichtenthaler, H.K. (1992). Changes of the laser-induced blue, green and red fluorescence signatures during greening of etiolated leaves of wheat. *Journal of Plant Physiology, 140*, 673-680

Suarez, L., Sepulcre-Canto, G., Zarco-Tejada, P.J., Pérez-Priego, O., Jiménez-Muñoz, J.C., Miller, J.R., & Sobrino, J. (2008). Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery. *Remote Sensing of Environment, 112*, 560-575

Tanre, D., Herman, M., & Deschamps, P.Y. (1981). Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance. *Applied Optics, 20*, 3676-3676

Tucker, C.J. (1977). Asymptotic nature of grass canopy spectral reflectance. *Applied Optics, 16*, 1151-1151

Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment, 8*, 127-150

Tyystjärvi, E. (2008). Photoinhibition of Photosystem II and photodamage of the oxygen evolving manganese cluster. *Coordination Chemistry Reviews, 252*, 361-376

Valentini, R., Cecchi, G., Mazzinghi, P., Scarascia Mugnozza, G., Agati, G., Bazzani, M., De Angelis, P., Fusi, F., Matteucci, G., & Raimondi, V. (1994). Remote sensing of chlorophyll a fluorescence of vegetation canopies. II: Physiological significance of fluorescence signal in response to environmental stresses. *Remote Sensing of Environment, 47*, 29-35

Vallverdu, G. (2009). Etude théorique de Processus Photophysiques dans des Protéines Fluorescentes. In (pp. 211-211)

van Diedenhoven, B.V., Hasekamp, O.P., & Aben, I. (2005). Surface pressure retrieval from SCIAMACHY measurements in the O2A band: validation of the measurements and sensitivity on aerosols. *Atm Chem Phys, 5*, 2109-2120

Vanbauce, C., Buriez, J., Parol, F., Bonnel, B., Seze, G., & Couvert, P. (1998). Apparent pressure derived from ADEOS-POLDER observations in the oxygen A-band over ocean. *Geophysical Research Letters, 25*, 3159-3162

Vermote, E.F., Tanre, D., Deuze, J., Herman, M., & Morcette, J.-J. (1997). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35*, 675-686

Watson, D.J. (1947). Comparative physiological studies on the growth of field crops: 1. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *ANNALS OF BOTANY, 11*, 41-76

Watson, R.D., Hessin, T.D., Bigelow, R.C., & Hemphill, W.R. (1974). Prediction of the Fraunhofer line detectivity of luminescent materials (crude and refined oils, effluents and vegetation). In, *International Symposium on Remote Sensing of Environment* (pp. -). Ann Arbor

Wollman, F.A. (2001). State transitions reveal the dynamics and flexibility of the photosynthetic apparatus. *The EMBO journal, 20*, 3623-3630

Yu, T., Gu, X., Tian, G., Legrand, M., Baret, F., Hanocq, J.-F., Bosseno, R., & Zhang, Y. (2004). Modeling Directional Brightness Temperature Over a Maize Canopy in Row Structure. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42*, 2290-2304

Zarco-Tejada, P.J., Miller, J.R., Mohammed, G., & Noland, T.L. (2000). Chlorophyll Fluorescence Effects on Vegetation Apparent Reflectance: I. Leaf-Level Measurements and Model Simulation. *Remote Sens. Environ., 74*, 582-595

Zarco-Tejada, P.J., Pushnik, J.C., Dobrowski, S., & Ustin, S.L. (2003). Steady-state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double-peak red-edge effects. *Remote Sens. Environ., 84*, 283-294

Résumé

Les travaux effectués durant cette thèse portent sur l'étude et l'utilisation d'une méthode de mesure passive pour la télédétection de la fluorescence chlorophyllienne induite par le rayonnement solaire à l'échelle du couvert végétal. Cette méthode est basée sur la mesure de la déformation des bandes d'absorption du spectre solaire dans le spectre d'irradiance, après interaction avec la végétation.

Dans ce cadre, un nouvel algorithme permettant de mesurer la fluorescence a été élaboré. Il s'applique à des mesures faites dans quelques canaux autour des bandes d'absorption de l'oxygène atmosphérique. Son originalité est qu'il permet de tenir compte des variations de réflectance de la végétation qui perturbent l'estimation de la fluorescence.

Dans le cadre de mesures à grande distance, une modélisation à l'aide du code de transfert radiatif MODTRAN a permis l'étude des effets atmosphériques affectant la mesure de la fluorescence. Nous avons établi que MODTRAN pouvait être utilisé pour corriger ces effets. Il a par ailleurs été montré qu'en plus de la connaissance des conditions atmosphériques, il était essentiel de pouvoir caractériser l'environnement de la cible. En effet, sa contribution, qui peut être supérieure au signal de fluorescence, est fortement variable spatialement. Une méthode opérationnelle de corrections des effets atmosphériques a été définie à partir de cette étude et appliquée à des mesures avionnées effectuées pendant la campagne ESA-CEFLES2. Les résultats de cette campagne mettent en évidence la grande variabilité spatiale et temporelle du signal de fluorescence.

Une plateforme de mesure de la fluorescence à l'échelle du couvert a été mise en place et un nouveau capteur développé. Cette plateforme a permis de conduire des mesures établissant que la fluorescence mesurée dans le proche infrarouge pouvait être utilisée comme indicateur de biomasse, et que le rapport des fluorescences rouge/proche infrarouge, était porteur d'informations sur la structure de la végétation.