Simulation de la fluorescence de la végétation mesurée depuis une orbite géostationnaire

Camill Rhoul

▶ **To cite this version:**

Camill Rhoul. Simulation de la fluorescence de la végétation mesurée depuis une orbite géostationnaire. Interfaces continentales, environnement. Université Paris-Saclay, 2016. Français. NNT : 2016SACLX097 . tel-01488881v1

HAL Id: tel-01488881

https://theses.hal.science/tel-01488881v1

Submitted on 14 Mar 2017 (v1), last revised 11 Apr 2017 (v2)

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.

NNT : 2016SACLX097

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay préparée à l'École polytechnique

École doctorale n° 129
Sciences de l'environnement d'Île-de-France
Spécialité de doctorat : physique

par

Camill Rhoul

Simulation de la fluorescence de la végétation mesurée depuis une orbite géostationnaire

Thèse présentée et soutenue à l'École polytechnique, le 13 décembre 2016.

Composition du Jury :

Président :	Stéphane Jacquemoud, professeur à l'IPGP (Paris)
Rapporteurs :	Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, professeur au Cesbio (Toulouse)
	Stéphane Jacquemoud
Examinatrice·eur :	Fabienne Maignan, ingénieure de recherche au LSCE (Gif-sur-Yvette)
	Albert Olioso, ingénieur de recherche à l'Inra (Avignon)
Directeurs :	Ismael Moya, directeur de recherche au LMD (Palaiseau)
	Pierre Coste, ingénieur système à ADS (Toulouse)
	représenté par Frédérick Pasternak
Codirecteurs :	Yves Goulas, ingénieur de recherche au LMD (Palaiseau)

Remerciements

Je remercie Ismael Moya, mon directeur de thèse, pour la place qu'il m'a faite dans le groupe Fluo au LMD ainsi que le temps qu'il m'a consacré durant mon doctorat. Merci aussi à Yves Goulas pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée pendant ces années.

Je remercie également Pierre Coste et Dominique Dubet d'Airbus Defense and Space pour les nombreuses heures qu'ils m'ont données et qui m'ont permis d'avancer.

Je remercie très sincèrement les membres du jury : Fabienne Maignan, Albert Olioso, Frédérick Pasternak et en particulier les rapporteurs Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry et Stéphane Jacquemoud qui ont œuvré à la lourde tâche d'apporter leurs corrections à mon manuscrit.

Je remercie aussi mes collègues direct·e·s avec qui j'ai eu plaisir à travailler pendant mon doctorat, qui m'ont beaucoup aidé et permis aussi de m'échapper parfois, Abderrahmane, Fabrice, Hildo, Jordi et Maria-Llanos. Je remercie encore Fabrice, sans qui le chapitre introductif de ma thèse serait bien moins épais.

Merci aux collègues du LMD, à ses directeurs Vincent Cassé et Philippe Drobinski, à Olivier Bousquet pour le noble travail qu'il a réalisé sur mon instrument, à Patricia Delville pour son aide apportée sur la mise en plan, à Isabelle Ricordel qui m'a beaucoup soutenu et à tou·te·s les autres.

Merci à Brahim et Monique, Mathis et Samia.

Merci à mes ami·e·s qui m'ont encouragé et surtout récréé, en particulier à Julien pour le partage de son XP et à Arthur pour ses corections.

Merci à Siham qui m'a permis de découvrir Simone, Mona, Christine, Virginie et Paul B, que je remercie aussi, pour m'avoir fait paraître le temps moins long sur le RER.

Enfin, merci à ma boulangère, Tulip.

Notice

Sauf indication contraire, les traductions de termes mises entre parenthèses et en italique sont faites vers l'anglais.

Les figures 2.4 et 4.2 sont des autostéréogrammes qui peuvent être perçus en trois dimensions. Ils sont composés chacun de deux vues en deux dimensions légèrement décalées d'un même objet tridimensionnel. Afin de les percevoir en trois dimensions, il s'agit de faire converger les yeux de manière à faire correspondre la vue de gauche vue par l'œil droit avec la vue de droite vue par l'œil gauche.

Lorsque une grandeur est sans unités, cela est indiqué par un tiret demi-cadratin (–).

Résumé

Simulation de la fluorescence de la végétation mesurée depuis une orbite géostationnaire

Chez les végétaux, l'énergie lumineuse absorbée par la chlorophylle n'est pas utilisée dans sa totalité pour la photosynthèse. Des mécanismes de régulation permettent de dissiper l'excès d'énergie absorbée lorsque cette dernière dépasse les capacités photosynthétiques des plantes. La lumière absorbée mais non convertie en énergie métabolique est principalement dissipée sous forme de chaleur ; une petite fraction est également réémise sous forme de fluorescence. Ces voies de désexcitation sont en compétition, c'est cette propriété qui permet indirectement de connaître l'activité photosynthétique des plantes en en mesurant la fluorescence. On la mesure depuis plusieurs décennies au laboratoire à l'échelle de la feuille et plus récemment à l'échelle du couvert.

Mon doctorat à porté sur l'évaluation de la possibilité de mesurer la fluorescence depuis une orbite géostationnaire pour détecter un stress de la végétation.

Télédétection de la fluorescence

Les techniques actives de mesure de la fluorescence permettent d'accéder aux variations des rendements de fluorescence stationnaire et maximal, obtenu par saturation des centres réactionnels photosynthétiques. Ainsi, les variations du rendement photosynthétique sont accessibles. Dès lors que l'on cherche à mesurer l'activité photosynthétique à des distances dépassant la dizaine de mètres, il est malaisé d'utiliser la technique de saturation qui demande alors une source actinique très puissante. Néanmoins, il est possible de mesurer activement la composante stationnaire de la fluorescence et d'obtenir tout de même une information sur l'état physiologique de la végétation.

C'est ce que montrent notamment López González (2014b) et Moya et coll. (2016) (figure 1.7) en détectant un stress hydrique subi par la végétation grâce au suivi des variations du rendement de fluorescence au cours de la journée avec un instrument actif. Cette expérience a été réalisée pour différentes espèces ; leur cycles diurnes du rendement de fluorescence présentent une dépression centrée au midi solaire en cas de stress de la végétation. Une information sur l'état physiologique de la végétation est donc contenue dans la forme du cycle diurne du rendement de fluorescence.

À l'échelle globale, on mesure depuis quelques années les flux de fluorescence de la végétation depuis l'espace avec des instruments passifs non destinés à l'orgine pour la mesure de la fluorescence tels que Tanso-FTS (Gosat) (Joiner et coll., 2011; Frankenberg et coll., 2011) ou Gome-2 (Metop) (Joiner et coll., 2013). Les mesures de ces instruments ont montré une bonne corrélation avec l'assimilation brute du CO_2 par la végétation mesurée par des stations au sol. Cependant, ces mesures sont intégrées sur plusieurs semaines, elles ne résolvent donc pas les cycles diurnes de fluorescence et ne permettent pas d'observer l'existence d'un stress.

Le satellite héliosynchrone Flex (Drush et FLEX Science Team, 2008) prévu pour 2022 et dédié à la fluorescence, permettra quant à lui de mesurer la fluorescence de la végétation dans les bandes O_2-A et O_2-B avec une meilleure résolution spatiale. Ses mesures seront ponctuelles (passage vers 11 h heure locale) avec une répétabilité de l'ordre de quelques semaines. Si celles-ci permettront d'évaluer l'activité photosynthétique ponctuellement, comme un seul point des cycles diurnes sera acquis, sa forme ne sera donc pas accessible de même que l'apparition d'un stress.

Dans ce contexte, en réponse à l'appel à idées du Cnes, le Laboratoire de météorologie dynamique

(LMD) à proposé un projet de satellite géostationnaire pour le suivi des cycles diurnes de la fluorescence de la végétation mesurés avec un instrument passif : GFlex (*geostationnary fluorescence explorer*) (Daumard et coll., 2014). Un tel satellite, de par son immobilité relative à la surface de la Terre, permettrait en effet d'échantillonner les flux de fluorescence de la végétation durant toute la journée. Cependant, on peut se demander si l'altitude d'un satellite situé à une telle orbite (36 000 km ; contre 800 km pour Flex) — du fait de la faible quantité de lumière y arrivant — ne rend pas impossible la mesure de la fluorescence à une précision suffisante pour en tirer une information.

On aura noté que les satellites actuels mesurant la fluorescence ainsi que les projets Flex et GFlex utilisent des instruments passifs, ils ne donnent donc pas accès au rendement de fluorescence qui est la variable reliée à la physiologie. Pour calculer ce dernier, il faut rapporter les flux de fluorescence au rayonnement solaire photosynthétiquement actif absorbé par la végétation. À distance, cette mesure est difficilement accessible, elle exige d'utiliser des modèles utilisant la réflectance de la végétation. À la place, on propose ici d'utiliser des « indices de rendement de fluorescence » calculés directement à partir des flux de fluorescence et de la luminance de la cible. On peut se demander à quel point ces indicateurs représentent fidèlement le rendement de fluorescence et comment la structure de la végétation va influencer leur variations.

Dans ce contexte, les objectifs de mon doctorat sont

— d'explorer l'imagerie passive de fluorescence en réalisant un prototype d'instrument (chapitre 2) ;
— d'étudier les cycles diurnes des indices de rendement de fluorescence par la simulation numérique du transfert radiatif de la fluorescence et de la lumière solaire incidente dans le couvert végétal (chapitre 3) ;
— de simuler la fluorescence de la végétation observable depuis une orbite géostationnaire en fonction des caractères biophysiques de la végétation (chapitres 4 et 5).

Étude de l'imagerie de fluorescence

J'ai développé un instrument imageur passif, Fluocam, mesurant dans la bande d'absorption atmosphérique O_2-A. Pour cela, je suis parti d'un instrument monopixel développé au LMD, Airflex (Moya et coll., 2006). Ce dernier n'étant pas imageur, j'ai dû étudier les spécificités qu'apporte l'usage d'une caméra, notamment en terme d'incertitude sur la mesure, pour ainsi optimiser les spécifications de mon instrument.

Fluocam est composé d'une caméra et d'une roue à filtres interférentiels qui permettent de mesurer dans la bande O_2-A. Ces filtres ont une transmittance spectrale qui est fonction de l'angle d'incidence des rayons en provenance de la cible. La mesure de la fluorescence dans les bandes d'absorption atmosphérique demande une grande précision de positionnement spectral des filtres. La dépendance de la fonction spectrale des filtres aux angles d'incidence a donc pour effet de diminuer l'efficacité de l'instrument avec l'augmentation de l'incidence. Une partie de mon travail, exposé dans le deuxième chapitre de ma thèse, a été d'étudier la fonction spectrale de l'instrument. Cela m'a permis de spécifier les caractéristiques de l'instrument pour minimiser ces effets d'angle et maximiser le rapport signal sur bruit.

Ce chapitre expose également les résultats de la comparaison de mesures de Fluocam avec celles d'Airflex d'un même couvert végétal. Cette comparaison a permis de valider Fluocam et de montrer, grâce à la segmentation des images, l'hétérogénéité spatiale du signal de fluorescence dans le couvert.

Rappelons que les instruments passifs de mesure de fluorescence mesurent des flux [1] mais que ce sont les variations du rendement de fluorescence qui permettent de statuer sur l'état physiologique de la végétation ; les instruments actifs de mesure de fluorescence donnant quant à eux quasi directement une mesure du rendement de fluorescence. Nous avons comparé les cycles diurnes du rendement mesuré en actif avec un indice de rendement calculé à partir des flux mesurés en passif. Nous avons observé un désaccord entre les cycles diurnes passifs et actifs. Cela a confirmé la nécessité d'étudier l'influence de la structure de la végétation sur les cycles diurnes des indices de rendement de fluorescence.

1. Les radiomètres utilisés par de tels instruments mesurent une luminance énergétique spectrale (en $\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}}$) intégrée sur la largeur des filtres utilisés, le mesurande est donc une luminance énergétique (en $\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}}$).

Influence de la structure du couvert sur les cycles diurnes des indices de rendement de fluorescence

Pour calculer des indices de rendement, on propose d'employer deux méthodes déjà utilisées dans la littérature mais aux propriétés mal connues, en particulier leurs variations au cours du cycle diurne selon le type de couvert. La première divise les flux de fluorescence par le rayonnement solaire incident, cet indice est nommé *apparent spectral fluorescence yield* (ASFY). Une seconde méthode divise les flux de fluorescence par la luminance de la végétation à une longueur d'onde bien absorbée, on nomme cet indice une *fluorescence fraction* (FF).

Afin d'étudier l'influence de la structure de la végétation sur les cycles diurnes de ces indices, j'ai développé un modèle de la fluorescence mesurée au sol avec un instrument passif dans les bandes O_2-A et O_2-B. J'ai ainsi pu créer une base de donnée de cycles diurnes de fluorescence et de réflectance simulés pour différents types de couverts. Les paramètres de structure du couvert variant dans les simulations sont la densité de feuille (LAI, pour *leaf area index*) et un paramètre représentant la distribution angulaire des feuilles (χ, paramètre d'une distribution ellipsoïdale).

Ce modèle est composé de différents sous-modèles : Modtran pour simuler un cycle diurne du rayonnement solaire incident, Fluormodleaf pour simuler les propriétés optiques des feuilles : leur réflectance, transmittance, absorptance et leur rendement quantique de fluorescence, Sail pour calculer la réflectance des couverts en fonction de leur structure et enfin Fluorsail pour simuler les flux de fluorescence des différents couverts. J'ai alors calculé pour les différentes structures du couvert végétal les cycles diurnes des deux classes d'indices de rendement. Afin de pouvoir observer les variations dues uniquement aux effets de structure du couvert, j'ai maintenu constant le rendement de fluorescence effectif du couvert. J'ai alors observé des variations des indices au cours des cycles diurnes pour des couverts à faible densité de feuilles ou à port des feuilles vertical. Ces variations peuvent être de l'ordre de grandeur de celles que l'on observe dans la figure 1.7. Au contraire, les cycles diurnes des indices de rendements présentent peu de variations pour des couverts à feuilles orientées horizontalement ou à forte densité de feuilles.

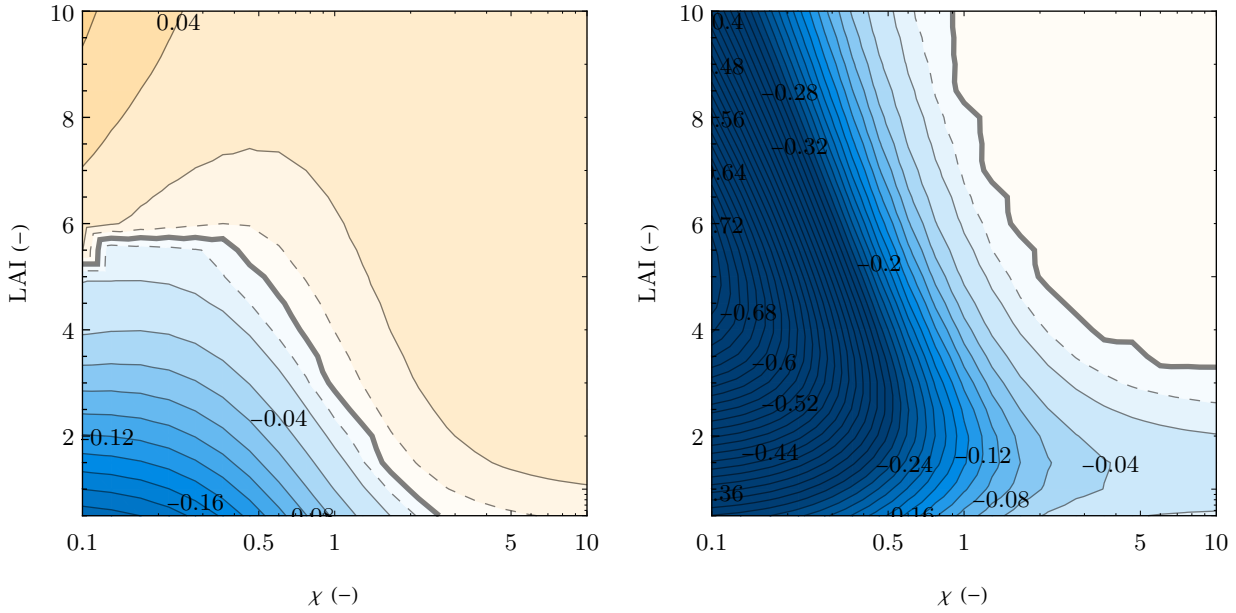
L'étude des différentes composantes du rayonnement au cours du cycle diurne m'a permis de caractériser précisément les causes des variations des indices. C'est notamment la fraction de rayonnement absorbé et la réflectance du couvert qui chutent autour du midi solaire pour les couverts à port de feuilles vertical, qui peut causer ces variations.

Au contraire, un port de feuilles vertical ou une faible densité foliaire induisent une variation significative des indices de rendement (figure 1). Ces résultats peuvent servir de recommandation pour les utilisateurs de ces indices de rendement : dans certains cas, les variations du rendement de fluorescence dues à l'état physiologique de la végétation peuvent être masquées par celles des indices de rendement dues à des effets de structure.

Simulation des observations en orbite géostationnaire

Afin d'évaluer la possibilité de mesurer la fluorescence de la végétation depuis une orbite géostationnaire, j'ai développé un modèle de la fluorescence visible depuis une telle altitude en ajoutant au modèle de la fluorescence d'un couvert végétal au niveau du sol le transfert radiatif dans l'atmosphère (en utilisant Modtran). Cela m'a permis de simuler les différentes contributions de la luminance mesurée par un satellite (fluorescence, luminance du couvert et contributions de l'atmosphère et de l'environnement de la cible) dans des zones spectrales d'une vingtaine de nanomètres autour des bandes O_2-A et O_2-B. Afin de couvrir le champ des possibles, j'ai simulé les cycles diurnes de cette luminance pour différentes structures de couvert (pour différents LAI, χ et contenu en chlorophylles), différents jours de l'année et différents angles de visée du satellite (ou coordonnées sur le globe).

Je présente dans le quatrième chapitre de ma thèse les résultats de ces simulations. Ceux-ci vont dans le même sens que ceux montrés au niveau du sol, sur l'influence de la structure de la végétation sur les variations diurnes des indices de rendement de fluorescence. De plus ils montrent l'incidence de l'angle de visée sur la bonne représentation des cycles diurnes du rendement de fluorescence par les indices de rendement. Pour des angles de visés éloignés du nadir du satellite, la forme des cycles diurnes des indices de rendement diffèrent de celles du véritable rendement de fluorescence. En revanche, le contenu en chlorophylle des feuilles agit assez peu sur les indices de rendement, dans les deux bandes d'absorption.



(a) $\Delta\mathrm{ASFY}_{760}$. **(b)** $\Delta\mathrm{FF}_{687}$.

Figure 1 – Écart type relatif entre 8 h et 12 h de ASFY_{760} et FF_{687} en fonction du LAI et de χ, calculé comme suit : $\mathrm{sgn}\left(Q\left(12\,\mathrm{h}\right) - Q\left(8\,\mathrm{h}\right)\right) \times \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}}$, avec $Q(t)$ valant ASFY_{760} ou FF_{687} au temps t, $\mathrm{sgn}(x)$ le signe de x, σ_Q l'écart type de la grandeur Q et $\bar{Q}$ la valeur moyenne de la grandeur Q. Les lignes en trait plein (— et ▬) sont tracées tous les 0,02, les lignes épaisses (▬) correspondent au zéro et les lignes interrompues (- -) correspondent à ±0,01. $\chi \ll 1$ correspond à une distribution plutôt verticale des feuilles et $\chi \gg 1$ plutôt horizontale.

Ces résultats mettent en garde contre la mauvaise interprétation qui peut être faite de la forme des cycles diurnes des indices de rendement. La structure de la végétation peut induire des variations identiques à celles observables lors d'un stress, de même qu'elle peut compenser des variations dues à la présence d'un stress.

Spécification d'un imageur de fluorescence géostationnaire

Les simulations des cycles diurnes du rayonnement total en provenance de la végétation et de sa fluorescence m'ont également permis de spécifier certaines caractéristiques d'un instrument imageur en orbite géostationnaire ; je les présente dans le chapitre 5. Afin de spécifier de manière réaliste cet instrument, j'ai utilisé les spécifications de l'instrument géostationnaire Goci-II conçu par Airbus Defense and Space, cofinanceur de mon doctorat. Les caractéristiques que j'ai déterminées ont été contraintes par le besoin de pouvoir échantillonner temporellement les cycles diurnes de fluorescence suffisamment finement pour tirer de leur forme une information sur l'état physiologique de la végétation, ainsi que de mesurer la fluorescence avec une précision suffisamment grande pour que les variations journalières de l'ordre de grandeur de celles que l'on observe dans le cas de stress (20 à 30 %) ne soient pas noyées dans le bruit.

À partir de la relation entre le LAI et les flux de fluorescence, j'ai calculé ceux-ci par interpolation sur une carte réelle de LAI résolue à 1°. J'ai alors calculé pour trois positions (au-dessus de l'Amérique, de l'Afrique et de l'Asie) du satellite les temps d'acquisition nécessaires pour mesurer sur les terres émergées visibles avec une incertitude sur la fluorescence inférieure à 10 %. Les résultats de ces simulations montrent qu'il est envisageable de mesurer des cycles diurnes de fluorescence résolus à moins d'une heure pour les trois positions du satellite dans la bande O_2-A (figure 2). La mesure dans la bande O_2-B demande quant à elle des temps d'acquisition nettement plus grands pour satisfaire les conditions de précision sur la fluorescence. Il reste cependant envisageable de mesurer dans cette bande sur des zones géographiques moins étendues, comme au-dessus de la forêt amazonienne.

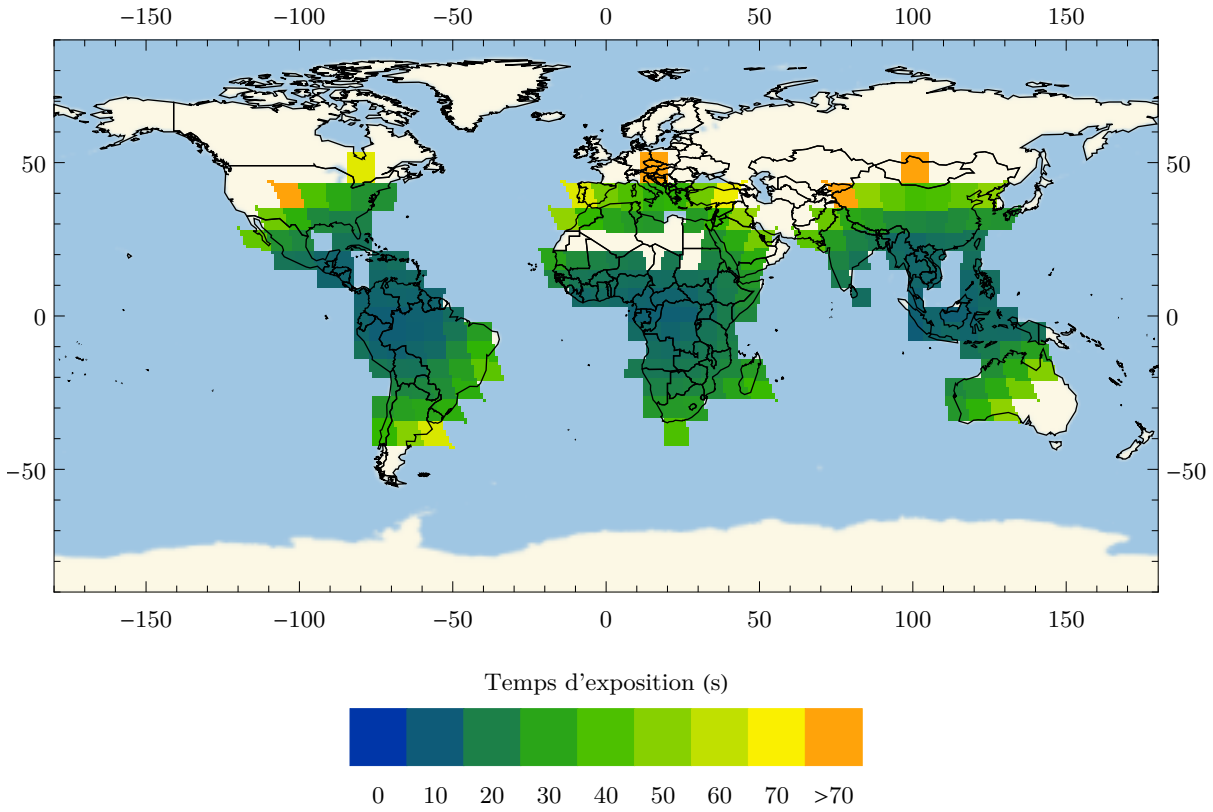


Figure 2 – Carte du temps d'exposition en seconde dans la bande O_2-A à midi (heure locale) pour chaque vignette acquise par le satellite, pour un contenu en chlorophylle de 20 µg · cm^{-2} et un couvert sphéroïdal ($\chi = 1$), pour les trois longitudes du satellite.

Conclusions

La télédétection de la végétation a vu arriver il y a plus de trente ans la mesure de la fluorescence chlorophyllienne comme sonde du fonctionnement interne des plantes, par opposition aux mesures de réflectance donnant des informations structurelles (NDVI, EVI…). Il a été montré plus récemment que la fluorescence peut être mesurée depuis l'espace avec des techniques passives (Gosat, Metop). Aussi, la sélection de Flex par l'Esa révèle l'engagement de la communauté scientifique pour la mesure de la fluorescence chlorophyllienne. Hormis le suivi de l'activité photosynthétique pour mesurer l'assimilation brute du CO_2, qu'effectuent ou proposent ces missions, la mesure de fluorescence permet aussi de détecter des stress de la végétation. Pour cela, le suivi de la dynamique diurne du rendement de fluorescence représente une voie prometteuse que nous avons exploré dans ce travail. Nous montrons qu'il est possible, pour certains types de couvert, de définir des indices de fluorescence représentatifs de la cinétique diurne du rendement de fluorescence. Les simulations numériques réalisées dans ce travail permettent de caractériser les variations d'indices liées à la géométrie en fonction des paramètres de structure du couvert (LAI, χ). Enfin, nous montrons qu'avec des technologies conventionnelles et déjà éprouvées dans l'espace, on peut envisager le suivi du cycle diurne de la fluorescence depuis une orbite géostationnaire, en vue d'une détection de stress (par exemple hydrique) sur une large zone de la surface vue par le satellite.

Table des matières

1 Introduction **15**
- 1.1 Photosynthèse . . . 15
- 1.2 Fluorescence . . . 17
  - 1.2.1 Fluorescence chlorophyllienne . . . 18
  - 1.2.2 Mécanismes de régulation . . . 20
  - 1.2.3 La fluorescence comme indicateur de la photosynthèse . . . 20
- 1.3 Suivi de la photosynthèse à l'échelle du couvert . . . 23
  - 1.3.1 De la feuille au couvert . . . 23
  - 1.3.2 Télédétection . . . 24
- 1.4 Objectifs du doctorat . . . 29

2 Étude de l'imagerie de fluorescence **31**
- 2.1 Principe de mesure . . . 33
  - 2.1.1 Principe instrumental . . . 33
  - 2.1.2 Filtres interférentiels . . . 33
  - 2.1.3 Distributions angulaires du flux . . . 34
- 2.2 Réalisation de l'instrument . . . 39
  - 2.2.1 Caméra . . . 39
  - 2.2.2 Système optique . . . 41
  - 2.2.3 Filtres interférentiels . . . 42
  - 2.2.4 Baffles . . . 42
  - 2.2.5 Référence . . . 43
  - 2.2.6 Logiciel d'acquisition . . . 45
- 2.3 Caractérisation de l'instrument . . . 48
  - 2.3.1 Calibration radiométrique . . . 48
  - 2.3.2 Tests sur la caméra . . . 49
  - 2.3.3 Mesure de fluorescence . . . 49
- 2.4 Campagne de mesure en champ . . . 52
  - 2.4.1 Objectifs de la campagne . . . 52
  - 2.4.2 Description de la campagne . . . 52
- 2.5 Procédures de correction . . . 54
  - 2.5.1 Correction de la lumière parasite . . . 54
  - 2.5.2 Mesure de champ plat . . . 54
- 2.6 Comparaison avec les autres instruments . . . 56
- 2.7 Analyse des images . . . 57
  - 2.7.1 Images de fluorescence . . . 61
  - 2.7.2 Segmentation par seuillage . . . 61
- 2.8 Conclusion . . . 66

3 Indicateurs du rendement de fluorescence au niveau du couvert **67**
- 3.1 Modélisation de la végétation . . . 68
  - 3.1.1 Rendement de fluorescence du couvert . . . 68
  - 3.1.2 Indices de rendement de fluorescence du couvert . . . 69

3.1.3 Comparaison entre rendement de fluorescence et indices . . . 69
3.1.4 Modélisation des cycles diurnes de fluorescence . . . 70
3.1.5 Étude de la variabilité des indices de rendement et d'autres grandeurs physiques . 74
3.2 Résultats et discussion . . . 75
3.2.1 Cycles diurnes . . . 75
3.2.2 Graphes des variations diurnes . . . 83
3.2.3 Exemple d'application . . . 87
3.3 Conclusion . . . 89

4 Simulation des observations en orbite géostationnaire 91
4.1 Modélisation de la fluorescence mesurée depuis l'espace . . . 93
4.1.1 Luminance totale de la cible . . . 93
4.1.2 Description de la base de données . . . 96
4.2 Variabilité de la fluorescence . . . 99
4.2.1 Magnitude de fluorescence . . . 102
4.2.2 Forme des cycles diurnes . . . 107
4.3 Variabilité des indices de rendement de fluorescence . . . 112
4.3.1 Comparaison des cycles diurnes des indices de rendement . . . 112
4.3.2 Forme des cycles diurnes des FF . . . 114
4.4 Conclusion . . . 118

5 Spécification d'un imageur de fluorescence géostationnaire 119
5.1 Spécifications de l'instrument . . . 119
5.1.1 Rapport signal sur bruit . . . 119
5.1.2 Temps d'exposition élémentaire et total . . . 122
5.2 Application à des cas concrets . . . 125
5.2.1 Carte de LAI et vignettes . . . 125
5.2.2 Interpolation des simulations . . . 127
5.2.3 Temps d'acquisition . . . 132
5.3 Conclusion . . . 134

6 Conclusions générales 137

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1 Photosynthèse 15
1.2 Fluorescence 17
1.2.1 Fluorescence chlorophyllienne 18
1.2.2 Mécanismes de régulation 20
1.2.3 La fluorescence comme indicateur de la photosynthèse 20
1.3 Suivi de la photosynthèse à l'échelle du couvert 23
1.3.1 De la feuille au couvert 23
1.3.2 Télédétection 24
1.3.2.1 Mesures spatiales 28
1.4 Objectifs du doctorat 29

Dans le contexte du réchauffement climatique terrestre, l'étude des flux de gaz carbonique et en particulier de la place qu'occupe la végétation dans les cycles du carbone est d'une grande importance. La connaissance des échanges de CO_2 entre l'atmosphère et la végétation souffre d'une grande incertitude quant à l'assimilation brute de carbone par la végétation [1]. La télédétection de la fluorescence chlorophyllienne propose d'apporter une réponse à cette incertitude grâce au lien qu'elle a avec l'activité photosynthétique des végétaux.

1.1 Photosynthèse

La photosynthèse est le processus photochimique qui permet aux organismes chlorophylliens de synthétiser de la matière organique à partir de dioxyde de carbone, d'eau et d'énergie lumineuse. Le bilan global de la photosynthèse dioxygénique est décrit par l'équation suivante :

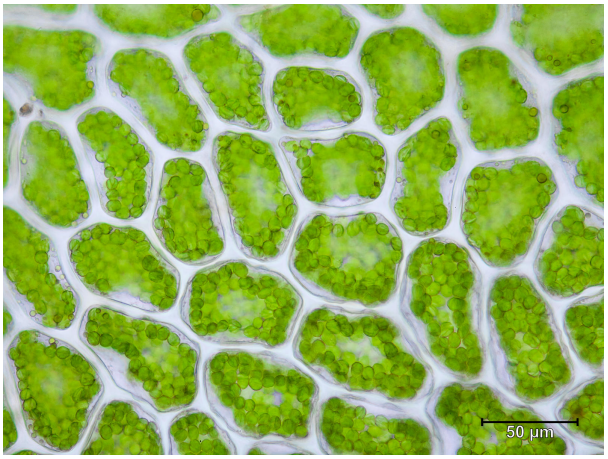
$$6\ CO_2 + 12\ H_2O \xrightarrow{h\nu} C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 + 6\ H_2O \tag{1.1}$$

La photosynthèse utilise l'énergie lumineuse ($h\nu$) du Soleil pour extraire l'hydrogène de l'eau qui, associé au CO_2, forme des produits carbonés ($C_6H_{12}O_6$) nécessaires au développement et au fonctionnement des organismes chlorophylliens tels que les plantes. Cette synthèse produit également du dioxygène. C'est la réaction inverse de la respiration cellulaire qui, à partir de sucres, permet d'obtenir de l'énergie tout en rejetant du dioxyde de carbone.

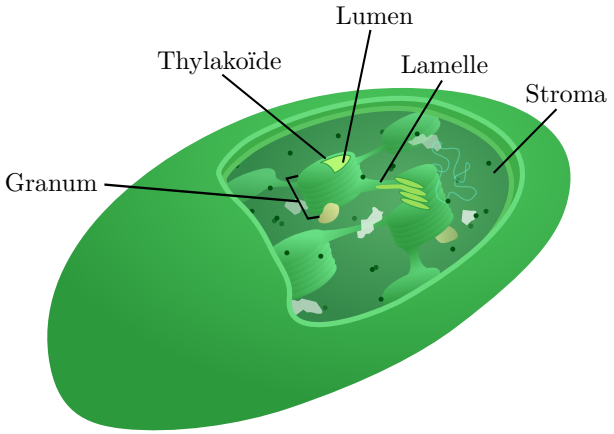
Chez les plantes, la photosynthèse se déroule dans un organite spécialisé des cellules des feuilles : le chloroplaste (figure 1.1a). Ils sont lenticulés, d'un diamètre allant de 3 à 10 µm et d'une épaisseur de 1 à 2 µm (Lawlor, 1993). Ils contiennent des bicouches lipidiques qui forment un réseau de vésicules fermées,

1. L'échange net de CO_2 entre l'atmosphère et la biosphère est de $-1{,}6 \pm 1{,}0$ GtC $\cdot$ a^{-1} entre 2002 et 2011 (1 GtC équivaut à 3,6 Gt de CO_2) (Stocker et coll., 2014). L'incertitude de 1,0 GtC $\cdot$ a^{-1} est relativement conséquente par rapport à la valeur du bilan net de $-1{,}6$ GtC $\cdot$ a^{-1}.

les thylakoïdes. Ces derniers définissent l'espace intrathylakoïdal (ou lumen) et l'espace stromatique (figure 1.1b). Les thylakoïdes forment par endroits des empilements, les *grana*, en lien avec le reste du réseau de thylakoïdes (figure 1.1b). Au sein de ces membranes se trouvent des complexes constitués de molécules de chlorophylle (du grec ancien *khlôrós* « vert » et *phýllon* « feuille »), un pigment photosynthétique, reliés à des protéines. Ces complexes absorbent l'énergie lumineuse et la convertissent en énergie chimique.



(a) Chloroplastes dans des cellules végétales de *Plagiomnium medium* (Peters). On peut distinguer les cellules végétales ceintes de leur membrane qui apparaît grise et les chloropastes, les disques verts à l'intérieur des cellules.



(b) Schéma d'un chloroplaste (d'après Kelvinsong).

Figure 1.1 – Chloroplastes.

Phase claire, phase sombre

Les nombreuses réactions qui constituent la photosynthèse sont divisées en deux phases : une phase *claire* ou *lumineuse* durant laquelle les réactions de transfert et de conversion d'énergie se déroulent et une phase *sombre* au cours de laquelle se produisent les réactions de fixation du carbone. Durant la phase claire, l'énergie électromagnétique des photons est absorbée par différents pigments assimilateurs : principalement les chlorophylles *a* et *b* et les caroténoïdes [2]. Parmi ceux-ci, seule la chlorophylle *a* peut effectivement convertir cette énergie en énergie chimique suite à un transfert d'électron. L'énergie est stockée provisoirement sous la forme de NADPH (nicotinamide adénine dinucléotide phosphate) et d'ATP (adénosine-5′-triphosphate). Durant la phase sombre, cette énergie est utilisée afin de synthétiser les principaux constituants du monde végétal : l'ATP sert à unir le CO_2 à une molécule organique et le NADPH permet de réduire les atomes de carbone en sucre simple dès leur fixation. Il est à noter que la qualification de *sombre* pour la phase ne faisant pas intervenir directement de lumière est ambiguë. En effet, la phase sombre suit directement la phase claire et se déroule elle aussi le jour (du moins chez les plantes n'ayant pas un métabolisme acide crassulacéen (CAM, *crassulacean acid metabolism*) comme les plantes grasses).

Sous-unités de l'appareil photosynthétique.

Les réactions de photosynthèse ont lieu dans les chloroplastes, des deux côtés des membranes des thylakoïdes. Les réactions photochimiques se déroulent dans le lumen et les réactions biochimiques au sein du stroma. L'appareil photosynthétique est composé de plusieurs sous-unités situées à la surface des membranes du thylakoïde et reliées par des transporteurs : les photosystèmes (I et II), le complexe de cytochromes b_6f et l'ATP synthase (figure 1.2). Un photosystème comprend 250 à 400 molécules de pigment. Il est composé d'un centre réactionnel et d'antennes collectrices (LHC pour *light harvesting complex*). Les antennes sont constituées de complexes protéines – pigments, les pigments étant des chlorophylles *a* et *b*

2. Il existe également d'autres pigments situés dans le cytoplasme (comme les anthocyanes) mais ne jouant pas de rôle direct dans la photosynthèse.

et des caroténoïdes (carotènes et xantophylles), qui permettent de collecter l'énergie lumineuse et de la canaliser vers le centre réactionnel.

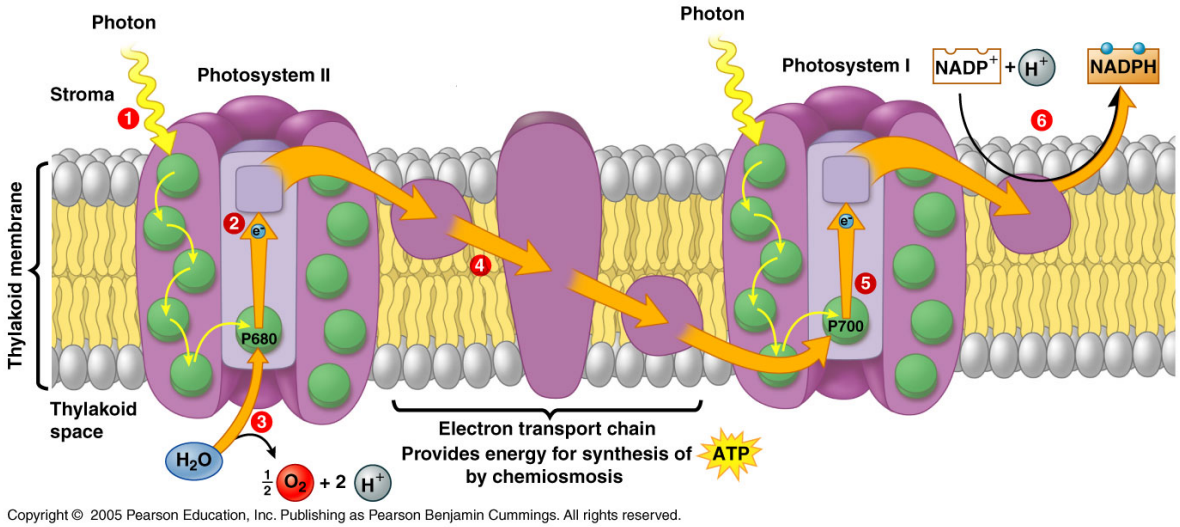


Figure 1.2 – Appareil photosynthétique et ses sous-unités : photosystème II, complexe de cytochromes b_6f et photosystème I.

Le centre réactionnel est formé d'un complexe de protéines et de dimères de chlorophylle qui permet la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique au niveau des antennes. L'énergie lumineuse absorbée par une molécule de pigment est transportée de proche en proche par résonance jusqu'à une paire de chlorophylles spéciales du centre réactionnel. Lorsque cette paire absorbe l'énergie, un électron est excité et transféré à une molécule acceptrice, ce qui déclenche un flux d'électrons à l'origine de la réduction du $NADP^+$ en NADPH. La molécule de chlorophylle est alors oxydée et chargée positivement.

Photosystèmes

Les mécanismes de la photosynthèse font intervenir des photosystèmes, chargés d'absorber les photons et d'effectuer la conversion photochimique. Les photosystèmes I (PS I) et II (PS II) sont localisés à deux endroits différents des membranes des thylakoïdes. La plupart des PS II se situent dans les empilements granaires et les PS I principalement dans les lamelles, là où les thylakoïdes ne sont pas empilés. En général, les deux photosystèmes fonctionnent simultanément et en continu. D'un point de vue fonctionnel, les photosystèmes sont en série, les premières étapes de la photosynthèse ont lieu au niveau du photosystème II. L'énergie lumineuse absorbée par les molécules de chlorophylle a est transférée jusqu'au centre réactionnel. Une chaîne de transporteurs membranaires permet le transfert d'électrons jusqu'au complexe cytochrome b_6f puis jusqu'au photosystème I. Le transfert d'électron dans le complexe cytochrome b_6f participe à la formation d'un gradient protonique transmembranaire du stroma vers le lumen utilisé pour la production d'ATP à partir d'ADP et de phosphate inorganique par l'ATP synthase. L'énergie absorbée par les antennes du PS I et transférée jusqu'au centre réactionnel permet de réaliser une séparation de charges. L'électron est transféré à une protéine fer-soufre qui permet la réduction de $NADPH^+$ en NADPH. L'énergie chimique produite par le transfert photosynthétique d'électrons permet ensuite la synthèse de carbohydrates à partir du CO_2. La transformation du dioxyde de carbone en composés organiques se fait au cours d'un processus nommé cycle de Calvin-Benson.

1.2 Fluorescence

La fluorescence est une émission lumineuse spontanée provoquée par une excitation. Elle est l'une des transitions radiatives possibles après l'absorption d'un photon. Elle se produit en général de l'état vibrationnel excité de plus bas niveau vers le niveau fondamental. Cela induit un décalage du spectre de fluorescence vers les grandes longueurs d'onde par rapport au spectre d'absorption et une symétrisation

du spectre de fluorescence. Selon le type de molécule et le milieu, le temps de désexcitation varie entre quelques dizaines de picosecondes et quelques centaines de nanosecondes.

1.2.1 Fluorescence chlorophyllienne

La chlorophylle fluoresce dans le rouge et le proche infrarouge, entre 650 et 800 nm (Emerson et coll., 1957) (figures 1.3 et 1.4). Il s'agit uniquement de la chlorophylle *a*. En effet, les autres pigments (chlorophylle *b* et caroténoïdes), présents dans les antennes des photosystèmes, transfèrent directement l'énergie qu'ils absorbent à celle-ci et n'ont pas de fluorescence propre. La figure 1.3 montre un spectre du rendement quantique de fluorescence de chlorophylle *a* en solution (en **orange**).

Le rendement *quantique* est le nombre de photons émis par rapport au nombre de photons absorbés. La définition d'un tel rendement s'oppose à celle d'un rendement *énergétique* calculé en divisant l'énergie photonique émise à celle absorbée. L'intérêt d'utiliser un rendement en nombre de photons pour la fluorescence est qu'il correspond aux aspects quantiques de la réaction photosynthétique et de la fluorescence.

Dans le spectre de fluorescence *in vitro*, on distingue nettement un pic d'émission autour de 670 nm et un second plus faible vers 720 nm (figure 1.3, courbe en **orange**). Le spectre d'absorptance de la chlorophylle — que l'on peut voir sur la figure 1.3 (en **bleu**) — présente un pic autour de 660 nm. Le flux de fluorescence du premier pic de fluorescence est donc très réabsorbé lorsque la chlorophylle est en grande concentration comme c'est le cas dans les feuilles. Le spectre de fluorescence que l'on reçoit d'une feuille (en **vert**) montre que le premier pic de fluorescence est très diminué par rapport au second pic. On observe également un décalage du spectre d'émission de fluorescence vers les grandes longueurs d'onde, le premier pic se situe autour de 685 nm et le second entre 735 et 740 nm. (Franck et coll., 2002).

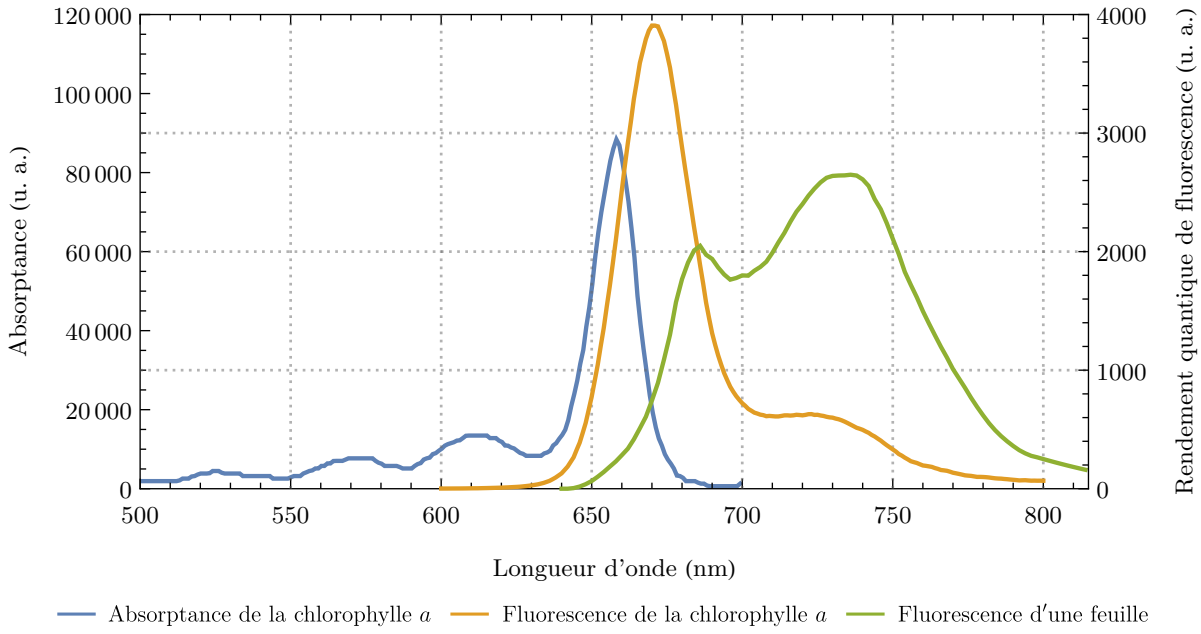


Figure 1.3 – Spectres du rendement quantique de fluorescence (en **orange**) de chlorophylle *a* en solution et de son absorptance (en **bleu**), spectre du rendement quantique de fluorescence d'une feuille (en **vert**) (Yves Goulas). Les rendements quantiques de fluorescence sont en unité arbitraire et le rapport de proportion entre ceux de la chlorophylle et de la feuille est arbitraire également.

Fluorescence variable

Si l'on éclaire une plante adaptée à l'obscurité, la fluorescence augmente d'environ un facteur cinq jusqu'à un maximum, puis finit par diminuer jusqu'à une valeur stationnaire. Le rendement quantique de fluorescence est variable. Ces variations ont été observées pour la première fois par Kautsky et Hirsch (1931). Le changement brutal du niveau d'illumination induit une augmentation rapide du rendement quantique de fluorescence qui atteint un maximum en un temps de l'ordre de la seconde avant de relaxer rapidement. L'augmentation du rendement de fluorescence est due à la diminution rapide des accepteurs

Figure 1.4 – Montage photographique d'une solution de chlorophylle extraite d'une feuille de *Perilla frutescens* diluée dans de l'isopropanol, à gauche éclairée en lumière blanche, à droite éclairée en lumière ultraviolette. En lumière blanche, la solution de chlorophylle apparaît verte en raison de sa moindre absorption du vert, en lumière ultraviolette — qui ne contient pas de lumière visible — la fluorescence rouge devient distinguable. Le temps d'exposition de la photographie de droite est environ vingt fois plus long que celui de celle de gauche.

d'électrons dans la chaîne d'oxydoréduction du PS II. Après que le PS II a absorbé et converti la lumière, il n'est plus capable d'en convertir davantage tant que l'accepteur d'électron suivant n'a pas transféré son électron, on dit que le centre réactionnel est fermé. La fermeture des centres réactionnels diminue l'efficacité photosynthétique de la plante ce qui induit à court terme une augmentation du rendement de fluorescence qui est une voie de dissipation de l'excès d'énergie absorbée. Suite à cette forte augmentation, le rendement de fluorescence diminue lentement jusqu'à atteindre un niveau stationnaire (F_s). Deux phénomènes sont à l'origine de cette extinction (*quenching*) de la fluorescence : la réouverture des centres réactionnel suite à la photoactivation d'enzymes impliquées dans le métabolisme du carbone et dans l'ouverture des stomates [3], c'est le *quenching* photochimique ; l'augmentation de l'efficacité de la dissipation thermique, c'est le *quenching* non photochimique. 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'orde de 15 à 20 minutes (Maxwell et Johnson, 2000). Le rendement quantique de fluorescence *in vivo* est donc variable et c'est en mesurant ses variations que l'on peut extraire une information sur la capacité du système photosynthétique à convertir l'énergie lumineuse (Papageorgiou et Govindjee, 2004).

La fluorescence de la chlorophylle *a* provient majoritairement du photosystème II (Butler, 1978; Krause et Weis, 1984, 1991) malgré l'existence d'une hétérogénéité de l'émission due à l'existence des deux photosystèmes. Seule une petite partie de la fluorescence dans le proche infrarouge provient du photosystème I. Le rendement quantique de fluorescence du PS I est constant quelle que soit l'activité photosynthétique (Krause et Weis, 1991), il ne participe pas à la variabilité de la fluorescence. Lorsque le rendement de fluorescence est faible en raison d'un *quenching*, comme le rendement du PS I ne varie pas, sa contribution à la fluorescence totale est alors maximale, de l'ordre de 30 %. Lorsque la fluorescence est maximale, sa contribution est minimale, de l'ordre de 6 % (Agati et coll., 2000; Pfündel, 1998; Moise et Moya, 2004a,b).

3. Les stomates sont des pores présents sur les feuilles par lesquels la plante absorbe le CO_2 et rejette l'eau par évapotranspiration (figure 1.8).

1.2.2 Mécanismes de régulation

Les plantes ont peu de moyens pour adapter les voies d'utilisation de l'énergie absorbée à leurs besoin : la photosynthèse, on parle d'extinction (ou *quenching*) photochimique, l'extinction non photochimique qui se traduit par l'augmentation de la dissipation thermique et la fluorescence [4]. Il leur faut donc disposer de mécanismes de régulation permettant de dissiper l'excès d'énergie absorbée. La végétation est régulièrement soumise à d'importantes intensités lumineuses en conditions naturelles et une absorption d'énergie lumineuse supérieure à leurs capacités photosynthétiques se produit régulièrement. C'est par exemple le cas par beau temps en été autour du midi solaire ou au début du printemps lorsque le froid ralentit leur activité photosynthétique. Les mécanismes de régulation sont le seul moyen dont les plantes disposent pour se protéger, ils sont 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. Après excitation de la chlorophylle, la répartion de l'énergie lumineuse absorbée dans les trois voies de désexcitation est variable. Lorsque le fonctionnement de la photosynthèse est maximal, Rosema et coll. (1991) mesurent une répartition de 84 % pour la photosynthèse, 14 % pour la dissipation thermique et 2 % pour la fluorescence. Lorsque la photosynthèse est bloquée, leurs mesures donne une répartition de 88 % pour la dissipation thermique et 12 % pour la fluorescence.

1.2.3 La fluorescence comme indicateur de la photosynthèse

Lorsqu'un ensemble de centres PS II sont éclairés et susceptibles de convertir l'énergie excitonique circulant dans leurs antennes en énergie chimique, plusieurs processus entrent en jeu dans la désactivation des états excités. On caractérise ces processus par leur constante de vitesse, calculée comme la fraction d'états excités transformés par unité de temps. On appelle k_{F} la constante de vitesse de la fluorescence, k_{D} celle de la dissipation thermique et k_{P} celle de la conversion photochimique. Le flux de fluorescence vaut alors (simplification de l'équation de Kitajima et Butler (1975)) :

$$F = I_{\mathrm{a}} \frac{k_{\mathrm{F}}}{k_{\mathrm{F}} + k_{\mathrm{D}} + k_{\mathrm{P}}[Q]} \ , \tag{1.2}$$

avec I_{a} le rayonnement absorbé, $[Q]$ la concentration en plastoquinones oxydées (un accepteur d'électron dans la chaîne de transporteurs entre la paire de chlorophylle du PS II et le complexe cytochrome b_6f), c'est-à-dire la concentration en centres réactionnels ouverts. L'émission de fluorescence est affectée par trois types de processus : les processus non photochimiques, responsables de l'extinction non photochimique, représentés par k_{D}, la fluorescence et la photochimie.

Le rendement quantique de fluorescence, défini comme le rapport entre le flux de fluorescence et celui du rayonnement absorbé, vaut ainsi :

$$\varphi_{\mathrm{F}} = \frac{k_{\mathrm{F}}}{k_{\mathrm{F}} + k_{\mathrm{D}} + k_{\mathrm{P}}[Q]} \tag{1.3}$$

et le rendement photochimique

$$\varphi_{\mathrm{P}} = \frac{k_{\mathrm{P}}[Q]}{k_{\mathrm{F}} + k_{\mathrm{D}} + k_{\mathrm{P}}[Q]} \ . \tag{1.4}$$

Lorsque tous les centres réactionnels sont ouverts, c'est-à-dire que la concentration en plastoquinones oxydées — donc disponibles pour accepter des électrons — est maximale, on a $k_{\mathrm{P}}[Q] \gg k_{\mathrm{F}} + k_{\mathrm{D}}$ et le rendement quantique de fluorescence est donc minimal. On note φ_{F_0} ce rendement minimal. Il peut être mesuré lorsque des plantes sont adaptées à l'obscurité. Au contraire, lorsque tous les centres réactionnels sont fermés, que $[Q]$ vaut zéro, le rendement de fluorescence est maximal ; on le note $\varphi_{\mathrm{F}_{\mathrm{m}}}$. Il peut être mesuré lorsque l'éclairement est suffisamment intense pour saturer la photosynthèse.

4. Dans les deux cas de *quenching* (photochimique et non photochimique), l'idée d'extinction est relative au fait que ces deux phénomènes diminuent la fluorescence.

En reprenant l'équation du rendement photochimique (équation (1.4)), on peut écrire

$$\varphi_{\mathrm{P}} = \frac{k_{\mathrm{P}}[Q]}{k_{\mathrm{F}} + k_{\mathrm{D}} + k_{\mathrm{P}}[Q]} = 1 - \frac{k_{\mathrm{F}} + k_{\mathrm{D}}}{k_{\mathrm{F}} + k_{\mathrm{D}} + k_{\mathrm{P}}[Q]} = 1 - \frac{k_{\mathrm{F}}}{k_{\mathrm{F}} + k_{\mathrm{D}} + k_{\mathrm{P}}[Q]} \times \frac{1}{\frac{k_{\mathrm{F}}}{k_{\mathrm{F}}+k_{\mathrm{D}}}} \tag{1.5}$$

$$= 1 - \frac{\varphi_{F_0}}{\varphi_{F_{\mathrm{m}}}} \ . \tag{1.6}$$

Le rendement photosynthétique est donc accessible connaissant ceux des fluorescences à l'obscurité et maximale. Cette relation a été confirmée expérimentalement par Genty et coll. (1989).

Afin de mesurer ces paramètres *in vivo* pour comprendre les liens entre photochimie et fluorescence, on utilise les méthodes du *light-doubling* et de l'impulsion saturante (figure 1.5). Le principe est d'imposer des éclairements d'intensités différentes à une plante et de mesurer les flux de fluorescence qu'elle émet en retour. Le principe du *light-doubling* est d'ajouter à un éclairement actinique [5] déjà présent (la lumière du Soleil par exemple) un éclairement analytique de faible intensité et modulé, de façon à pouvoir extraire la fluorescence qu'il induit. Le principe de l'impulsion saturante est d'éclairer brièvement la plante avec une lumière de très forte intensité. La méthode PAM (pour *pulse-amplitude modulation* ; Schreiber (1986)) est la technique de référence pour la mesure du rendement photochimique des plantes dans leurs milieux naturels par ces deux méthodes.

Étant donné que l'éclairement imposé à la plante est constant, de même que son absorptance, il est possible d'utiliser des intensités de fluorescence à la place des rendements (F_0 et F_{m} pour φ_{F_0} et $\varphi_{F_{\mathrm{m}}}$ respectivement). En effet, le rapport des intensité est alors égal au rapport des rendements. On utilisera donc dans la suite des intensités de fluorescence.

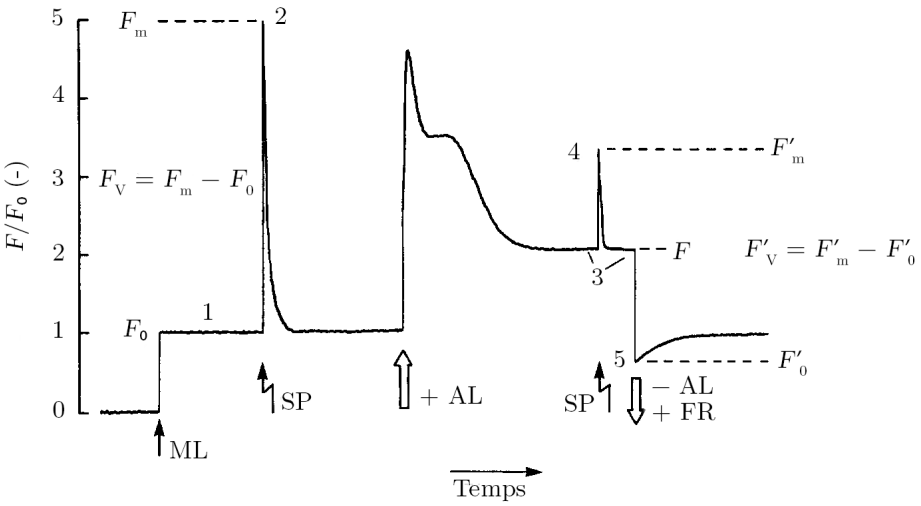


Figure 1.5 – Cinétique typique d'induction de fluorescence (d'après Kooten et Snel (1990)). En ordonnée, est représenté le rendement quantique de fluorescence relatif au niveau F_0, en abscisse le temps. Sans lumière, la fluorescence relative de la plante adaptée à l'obscurité vaut zéro, et cela jusqu'à l'application d'une lumière non actinique (ML pour *measuring light*) durant la phase 1. Le rendement relatif de fluorescence vaut alors F_0. En phase 2, une lumière saturante (SP pour *saturing light pulse*) éclaire ponctuellement la plante pour induire la fluorescence maximale F_{m}. Ensuite, une lumière actinique continue (AL pour *continuous actinic light*) éclaire la plante. Le rendement de fluorescence augmente puis se stabilise jusqu'à F_{s}, la fluorescence stationnaire. En phase 4, une impulsion saturante permet de mesurer F'_{m}, la fluorescence maximale à la lumière.

Pour commencer, la plante est à l'obscurité et adaptée à celle-ci. On l'éclaire alors avec une lumière analytique : une lumière périodique [6] de faible intensité moyenne en raison d'un faible rapport cyclique, qui ne provoque pas de changement d'activité photosynthétique afin d'analyser sans être actinique. Cela

5. En biologie végétale, une lumière actinique est un rayonnement suffisamment puissant pour entraîner des effets biophysiques ou biochimiques.

6. L'intérêt d'éclairer la végétation avec une lumière périodique — d'une fréquence plus élevée que celle des changements lumineux de l'environnement naturel de la plante — est que la fluorescence induite par cet éclairement exclusivement peut être extraite par des filtres électroniques en fréquence. Cela rend alors possible la mesure de la fluorescence uniquement induite par la source lumineuse périodique.

permet de mesurer F_0, la fluorescence à l'obscurité (figure 1.5, phase 1). Une fois cette mesure effectuée, une impulsion lumineuse saturante est envoyée pendant une à deux secondes. Celle-ci a généralement une intensité deux à trois fois celle du Soleil. Cette impulsion sature la photosynthèse, $[Q]$ vaut donc approximativement zéro. Cela permet alors de mesurer le niveau maximum de fluorescence F_m (figure 1.5, phase 2). La désactivation par dissipation thermique est ici minimale car elle ne se met en place qu'après un certain temps d'exposition. Grâce à ces deux mesures, on peut calculer l'efficacité de capture des excitons par les centres réactionnels ouverts du PS II, c'est-à-dire le rendement photochimique optimal (Schreiber et coll., 1986) :

$$\varphi_\mathrm{P} = 1 - \frac{F_0}{F_\mathrm{m}} = \frac{F_\mathrm{m} - F_0}{F_\mathrm{m}} \ . \tag{1.7}$$

Le numérateur $F_\mathrm{m} - F_0$ est la dynamique maximale de fluorescence pouvant se produire, c'est la fluorescence variable, notée F_v.

Le rendement photochimique est généralement compris entre 0,80 et 0,86 pour une plante adaptée à l'oscurité (Björkman et Demmig, 1987; Genty et coll., 1989; Pfündel, 1998; Agati et coll., 2000). Cependant, φ_P est mesuré lorsque la plante est à l'obscurité, c'est-à-dire lorsque la photosynthèse est inactive. Lorsque la plante est à la lumière l'ouverture des centres photochimiques et la mise en place des processus de désactivation font que le rendement photochimique est inférieur à φ_P. Pour caractériser la plante en fonctionnement, d'autres mesures sont faites en pleine lumière.

Genty et coll. (1989) ont montré que le rendement photochimique effectif, c'est-à-dire en pleine lumière, peut être mesuré à partir de la fluorescence stationnaire et de la fluorescence maximale à la lumière. Pour mesurer cette dernière, notée F'_m, une impulsion saturante est envoyée lorsque la plante est déjà à la lumière (figure 1.5, phase 4). Le rendement effectif s'écrit

$$\varphi_{\mathrm{P_eff}} = \frac{F'_\mathrm{m} - F_\mathrm{s}}{F'_\mathrm{m}} = \frac{\Delta F}{F'_\mathrm{m}} \ , \tag{1.8}$$

où F_s est la fluorescence stationnaire.

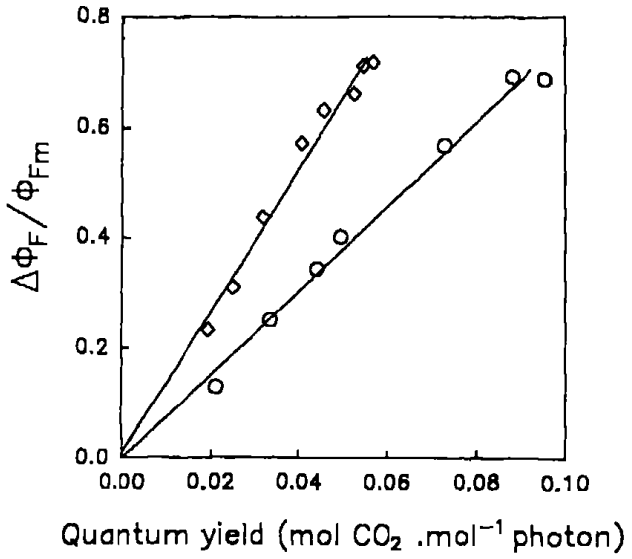


Figure 1.6 – Rendement photochimique du PS II ($\Delta F/F'_\mathrm{m}$) en fonction du rendement quantique d'assimilation du CO_2, pour une feuille d'orge naturel ($\circ$) et mutant déficitaire en chlorophylle b ($\diamond$) à l'équilibre, mesuré sur une plage d'intensités lumineuses (Genty et coll., 1989).

L'augmentation de fluorescence ΔF induite par l'impulsion saturante est due à la fermeture des centres réactionnels encore ouverts dans l'état stationnaire. La mesure de $\varphi_{\mathrm{P_eff}}$ est une mesure du rendement de la photosynthèse (Schreiber et Bilger, 1993). En toute rigueur, il s'agit d'une mesure du rendement quantique du flux d'électrons photosynthétiques du PS II.

1.3 Suivi de la photosynthèse à l'échelle du couvert

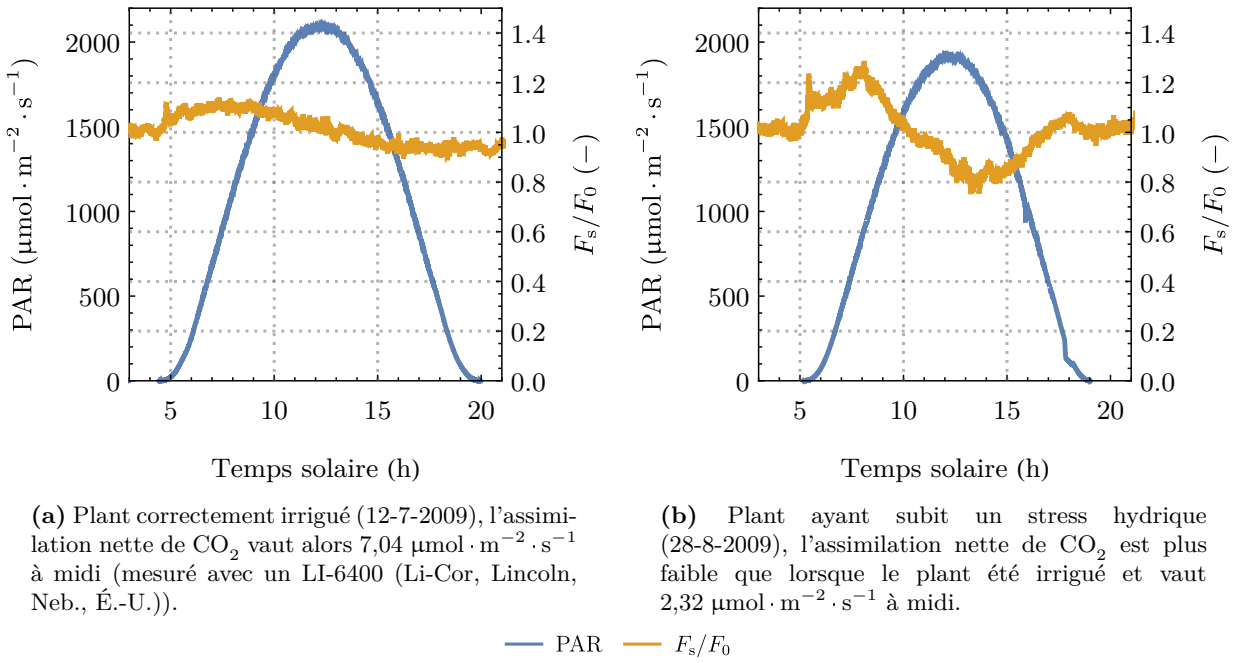
Ainsi, l'émission de fluorescence est en compétition avec la conversion photochimique de l'énergie absorbée par la chlorophylle, le rendement quantique de fluorescence de la chlorophylle est variable. La photosynthèse des plantes est sujette à variation selon les contraintes qu'elles subissent. Ces contraintes peuvent concerner la lumière qu'elles reçoivent, leur température, la disponibilité en eau ou en substances nutritives. Ainsi, la mesure des variations du rendement quantique de fluorescence permet d'obtenir une information sur l'activité photochimique des plantes et par conséquent sur leur état physiologique. La technique PAM a fait ses preuves à l'échelle de la feuille avec des mesures par contact. Afin de mesurer à des échelles plus grandes, ce principe instrumental a été utilisé par la suite pour des instruments actifs de mesure à distance qui peuvent induire la saturation jusqu'à des distances de l'ordre de quelques mètres. Pour des mesures à de plus grandes distances, l'induction de fluorescence par une source lumineuse artificielle étant impossible, les instruments actifs n'ont gardé que la possibilité de mesurer la fluorescence stationnaire F_s. Pour des mesures encore plus distantes, la mesure du rendement de fluorescence par une lumière analytique devient également impossible. En pratique, on utilise alors des instruments passifs ne mesurant que la fluorescence induite par le Soleil. L'expérimentateur ne contrôlant pas la quantité de lumière absorbée par la végétation, la difficulté dans ce cas est d'évaluer le rendement de fluorescence à partir des flux de fluorescence (chapitre 3).

1.3.1 De la feuille au couvert

Comme nous l'avons vu, les instruments actifs de mesure de la fluorescence chlorophyllienne utilisent la technique PAM pour mesurer la fluorescence à l'obscurité F_0, la fluorescence maximale F_m et la fluorescence maximale à la lumière F'_m. La lumière artificielle induisant ces niveaux de fluorescence étant maîtrisée, ces flux de fluorescence peuvent être considérés comme des rendements relatifs.

Pour mesurer le rendement photochimique à l'échelle du couvert, plusieurs instruments ont été développés utilisant la technique PAM. Développé par Ismael Moya et Abderrahmane Ounis, le Fipam (pour *frequency induced pulse amplitude modulation* ; Cavender-Bares et coll. (2000); Flexas et coll. (2000); Ounis et coll. (2001); Apostol et coll. (2001)) est un instrument capable de saturer les centres réactionnels jusqu'à une distance de quelques mètres (dépendante de la puissance de la source utilisée) afin de mesurer F_m ou F'_m. Pour cela, l'instrument envoie une émission lumineuse à haute fréquence (100 kHz) avec une diode laser et focalise à distance sur une très petite surface la lumière d'une intensité jusqu'à cinq fois plus grande que celle du rayonnement solaire. Pour mesurer F_s et F_0, la fréquence d'émission de la diode laser est abaissée (1 Hz) pour devenir inactinique. Pour des distances plus grandes, le Laser-PAM (Ounis et coll., 2001) par exemple permet également la mesure de F_s et F_0, mais la mesure actinique de F_m ou F'_m est abandonnée dans ce cas à cause de la difficulté de saturer les centres réactionnels à de grandes distances. Se pose alors le problème d'extraire une information sur la photosynthèse à partir du niveau stationnaire seulement.

Dans son travail sur la caractérisation de l'état physiologique de la végétation, López González (2014b) présente des mesures de la fluorescence stationnaire durant la journée d'un plant de vigne subissant un stress hydrique avec un Laser-PAM. Ces mesures montrent la clarté de la signature du stress dans la forme des cycles diurnes. La figure 1.7a montre les cycles diurnes du PAR (le rayonnement solaire photosynthétiquement actif) et de F_s/F_0 (la fluorescence stationnaire rapportée à la fluorescence à l'obscurité) pour un plant de vigne convenablement irrigué, n'étant donc pas en situation de stress. On peut voir une variation faible au cours de la journée de F_s/F_0, partant de un, une légère augmentation lorsque le Soleil point, vers 5 heures, suivie d'une diminution avant le midi solaire. La figure 1.7b montre les mêmes cycles diurnes plus d'un mois plus tard pour ce plant, cette fois-ci en état de stress hydrique suite à une absence d'irrigation prolongée. On note la même augmentation de F_s/F_0 à partir de 5 heures, puis une brutale diminution jusqu'à 13 heures suivie d'une remontée jusqu'au crépuscule. Cette forme du cycle diurne de F_s/F_0 présentant une dépression autour du midi solaire est une signature caractéristique de l'existence d'un stress. En effet, elle a été également observée par Cerovic et coll. (1996) (par une mesure directe du rendement quantique en mesurant la durée de vie de la fluorescence), Rosema et coll. (1998), Flexas et coll. (2000) ou encore Evain et coll. (2004).



(a) Plant correctement irrigué (12-7-2009), l'assimilation nette de CO_2 vaut alors 7,04 µmol · m^{-2} · s^{-1} à midi (mesuré avec un LI-6400 (Li-Cor, Lincoln, Neb., É.-U.)).

(b) Plant ayant subit un stress hydrique (28-8-2009), l'assimilation nette de CO_2 est plus faible que lorsque le plant été irrigué et vaut 2,32 µmol · m^{-2} · s^{-1} à midi.

Figure 1.7 – Cycles diurnes du PAR (en bleu) et rendement de fluorescence intégrée dans le rouge (rapporté au rendement de fluorescence à l'obscurité) mesuré avec un Laser-PAM (en orange) d'un plant de vigne correctement irrigué et ayant subi un stress hydrique (López González, 2014b).

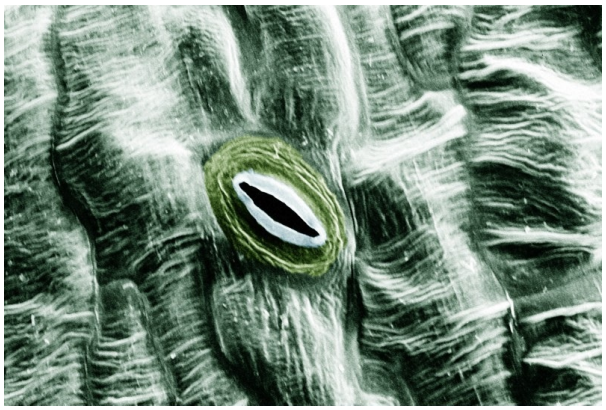
La plante en stress hydrique est contrainte de fermer ses stomates (figure 1.8) pour éviter de perdre par évapotranspiration le peu d'eau qu'elle contient. Les stomates sont aussi la porte d'entrée du CO_2, indispensable à la photosynthèse, cette dernière est bloquée. La mise en place de mécanismes non photochimiques d'extinction de la fluorescence lorsque l'intensité lumineuse augmente au cours de la journée fait apparaître une dépression dans le cycle diurne de rendement de fluorescence. On peut noter que cette dépression est antagoniste de la variation du PAR.

1.3.2 Télédétection

Les progrès qu'ont apporté les mesures à courte distance dans la compréhension du lien entre la fluorescence chlorophyllienne et l'activité photosynthétique justifient aujourd'hui l'intérêt porté par la communauté scientifique à étendre ces mesures à des échelles plus grandes. Les mesures actives, de par leur principe d'excitation de la fluorescence, ont cependant une distance d'utilisation limitée. Il paraît inconcevable aujourd'hui, pour des raisons de puissance d'émission et de sécurité, d'utiliser un instrument actif depuis l'espace afin de mesurer le rendement de fluorescence à l'échelle de la planète. C'est pourquoi la mesure passive de la fluorescence, c'est-à-dire de la fluorescence induite par le Soleil, paraît plus appropriée.

Les instruments de mesure passive de la fluorescence par opposition aux instruments actifs ne mesurent que le flux de fluorescence induit par le Soleil. Afin de connaître le rendement de fluorescence, il faut diviser les flux de fluorescence par le rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par la végétation. S'il n'est pas accessible, il est possible d'utiliser des indices de rendement, calculés en divisant les flux de fluorescence par la luminance de la cible à certaines longueurs d'onde ou par le rayonnement photosynthétiquement actif incident.

La fluorescence étant un signal très faible (autour d'un pourcent du rayonnement réfléchi par la végétation), le signal de fluorescence est noyé dans le rayonnement solaire réfléchi par la végétation. Cependant, il existe des bandes du spectre du rayonnement solaire arrivant au niveau du sol où le flux est très faible en raison de son absorption par les atmosphères de la Terre ou du Soleil. Afin d'obtenir une bonne précision sur la mesure de fluorescence, Plascyk et Gabriel (1975) proposent de la mesurer dans ces bandes d'absorptions, découvertes par Fraunhofer (1817).



(a) Stomate ouvert de feuille de laitue (*Lactuca sativa*) (Debbie Marshall).

(b) Stomate fermé de feuille de frêne commun (*Fraxinus excelsior*) (sciencephoto.com).

Figure 1.8 – Stomates vus au microscope électronique à balayage en fausse couleurs.

Profondeur de bande

Afin de distinguer la fluorescence du flux réfléchi par la végétation, le principe de mesure est de comparer les profondeurs des bandes d'absorption de la lumière en provenance de la végétation et de celle incidente sur le couvert végétal. La profondeur d'une bande d'absorption est calculée comme le rapport entre le flux au bord et le flux au fond de la bande (figure 2.9 en ne considérant qu'un filtre du bord et le filtre du fond). La profondeur d'une bande dans le rayonnement solaire incident sur la végétation vaut

$$P' = \frac{I(\lambda_{\text{out}})}{I(\lambda_{\text{in}})} \ , \tag{1.9}$$

avec $I(\lambda)$ l'éclairement à la longueur d'onde λ, et λ_{in} et λ_{out} les longueurs d'onde dans le continuum et dans la bande respectivement. On notera par la suite en indice *in* ou *out* pour signifier que la grandeur à laquelle est apposé l'indice est à la longueur d'onde λ_{in} ou λ_{out} respectivement. On a donc plus concisément

$$P' = \frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} \ . \tag{1.10}$$

Concernant le rayonnement en provenance de la végétation, une fraction du rayonnement incident valant la réflectance de la végétation est réfléchie. La profondeur de la bande d'absorption dans le rayonnement en provenance de la végétation vaut quant à elle

$$P = \frac{\rho_{\text{out}} \times I_{\text{out}} + F_{\text{out}}}{\rho_{\text{in}} \times I_{\text{in}} + F_{\text{in}}} \ , \tag{1.11}$$

avec ρ la réflectance de la végétation et F le flux de fluorescence qu'elle émet. La fluorescence s'ajoutant au bord (*out*) et au fond (*in*), elle modifie la valeur de la profondeur mesurée sur la végétation par rapport à celle du rayonnement incident.

La profondeur du rayonnement solaire incident P' (équation (1.10)) est mesurée comme la profondeur sur la végétation P (équation (1.11)) en utilisant une surface de référence de réflectance égale à un (ou pour le moins de réflectances égales au bord et au fond) et non fluorescente.

Si l'on considère que la fluorescence ne varie pas entre le bord et le fond, en comparant P' et P, il est alors possible de calculer la fluorescence en première approximation :

$$F = \frac{L_{\text{out}}\,(P' + P)}{P(P' - 1)} \ , \tag{1.12}$$

avec L_{out} la mesure de la luminance du couvert au bord (valant $L_{\text{out}} = \rho_{\text{out}} \times I_{\text{out}} + F_{\text{out}}$).

Cette méthode a été proposée pour la première fois par Link (1951) appliquée à l'extraction d'une composante propre au sol lunaire dans le flux en provenance de la Lune. Ce principe est connu dans la

littérature sous le nom de *Fraunhofer line principle* (FLP).

En pratique, pour des mesures à des distances ne dépassant pas quelques mètres, la lumière incidente sur la végétation est mesurée en présentant devant l'instrument une surface de référence, horizontale, blanche et non fluorescente. Afin de calculer la profondeur des bandes, on mesure dans et hors de la bande d'absorption en mesurant le flux lumineux à travers des filtres à bande étroite ; en effet, les bandes d'absorption situées dans la zone spectrale de la fluorescence chlorophyllienne sont constituées de séries de bandes très fines (figure 1.9).

Bandes de mesure

Dans la zone spectrale où est émise la fluorescence de la chlorophylle, à une résolution de l'ordre de 0,1 nm, plusieurs bandes d'absorption sont visibles dans la lumière incidente à la surface de la Terre : les bandes Hα-C à 656,281 nm, O_2-B à 686,719 nm et O_2-A à 759,37 nm, la bande K-I vers 770 nm et les bandes de l'eau autour 720 nm, trop variables pour être utilisées dans la mesure de fluorescence. La bande Hα-C est une bande d'absorption de l'hydrogène atomique dans la couronne solaire, elle fut la première être utilisée pour mesurer la fluorescence de la végétation (McFarlane et coll., 1980). L'inconvénient de mesurer dans cette bande, malgré une plus grande stabilité que les bandes atmosphériques terrestres, est qu'elle est située dans une zone spectrale où le flux de fluorescence est faible (il vaut 9 % de la valeur du pic situé à 685 nm sur la figure 1.9).

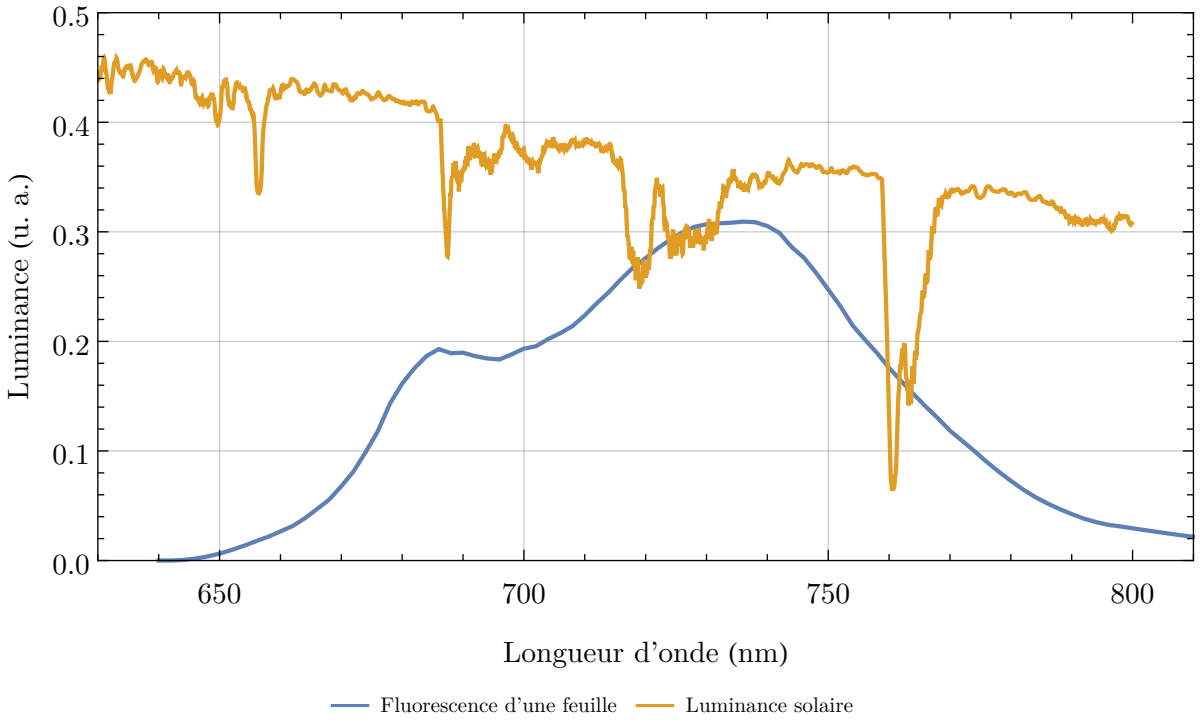


Figure 1.9 – Spectre de la fluorescence d'une feuille simulée avec le modèle Fluormodleaf (en **bleu**) et spectre de la luminance solaire arrivant au niveau du sol simulée avec le modèle Modtran et résolue au dixième de nanomètre (en **orange**). On peut voir dans l'ordre croissant des longueurs d'ondes les bandes Hα-C (656 nm), O_2-B (687 nm), de l'eau (720 nm) et O_2-A (759 nm). La fluorescence que l'on mesurerait dans la bande Hα-C représente avec les données de ce graphique 9 % du premier pic de fluorescence à 685 nm, 98 % de ce même pic si l'on mesurait dans la bande O_2-B et 53 % du second pic de fluorescence à 740 nm mesuré dans la bande O_2-A.

Les bandes O_2-A et O_2-B sont des bandes d'absorption du dioxygène atmosphérique relativement bien placées par rapport au spectre de fluorescence (elles permettent de mesurer une fluorescence valant respectivement 53 % et 98 % du pic de fluorescence le plus proche, pour les données de la figure 1.9). De plus, ces bandes sont relativement larges (0,7 nm pour la B et 1 nm pour la A) ce qui permet, dans le cas de mesures de flux avec des filtres, d'obtenir des résultats précis. La bande O_2-A notamment peut présenter une absorption très importante (jusqu'à 95 %). Ainsi, la fluorescence représente une part importante du

rayonnement en provenance de la végétation dans la bande, mais à l'inverse la fluorescence émise par la végétation est plus absorbée par l'atmosphère lorsque la distance de mesure est grande.

Instruments

Le premier instrument passif conçu pour la mesure de la fluorescence de la végétation a été développé en 1976 par la société PerkinElmer, c'est le *Fraunhofer line discriminator* (FLD ; Watson et coll. (1974); Plascyk et Gabriel (1975); Plascyk (1975)). Cet instrument mesure à l'aide d'un interféromètre de type Fabry-Pérot. Les premières mesures ont été faites dans la bande Hβ-F à 486 nm, puis plus tard dans la bande Hα-C pour caractériser l'effet d'un stress hydrique (McFarlane et coll., 1980). Ces mesures ont permis de montrer la possibilité d'utiliser la mesure de la fluorescence chlorophyllienne pour identifier l'existence d'un stress en observant la forme de son cycle diurne.

En 1994, Buschmann et coll. (1994) utilisent un spectromètre pour montrer que la contribution de la fluorescence à la réflectance apparente de la végétation, malgré son faible niveau, peut être discriminée pour l'étude de la cinétique des inductions de fluorescence.

Avec les nouvelles avancées en électronique, Carter et coll. (1996) présentent un nouvel instrument pour la mesure dans la bande O_2-B. Il utilise deux canaux, l'un mesurant le flux au fond de la bande et l'autre dans le continuum. Les mesures qu'ils présentent consistent à observer l'effet de l'administration d'un herbicide (DCMU) qui bloque la photosynthèse. Ils observent une augmentation de la fluorescence en présence de l'herbicide sans variation de la réflectance, indiquant un contenu en chlorophylle stable. L'augmentation de la fluorescence est interprétée comme une variation correspondant à la baisse de capacité photosynthétique causée par l'herbicide. Ces mesures de fluorescence restent néanmoins qualitatives, l'enjeu est alors d'améliorer la précision des instruments pour arriver à des mesures quantitatives.

En 1999, Moya et coll. (1998) (Moya et coll., 2004) présentent un instrument basé sur des filtres interférentiels et sur des photodiodes, conçu pour la mesure dans la bande O_2-A. Pour tester les capacités de l'instrument passif, des mesures actives à l'aide du Fipam sont 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 O_2-B avec le même instrument a également été testée avec succès. Cet instrument a été utilisé également au niveau du couvert pour mesurer l'effet du traitement au DCMU sur un plant de maïs (Evain et coll., 2002).

Airflex, le premier capteur aéroporté de mesure passive de fluorescence dans les bandes d'absorption de l'oxygène, est conçu en 2004 (Moya et coll., 2006). Il utilise également des photodiodes et des filtres interférentiels qui permettent de mesurer dans les deux bandes O_2-A et O_2-B. Cet instrument a participé à plusieurs campagnes de mesures : Sen2Flex (Moya et coll., 2006) et Cefles-2 (Rascher et coll., 2009). Les résultats ont permis de montrer la reproductibilité des mesures de fluorescence ainsi que la possibilité de mesurer en altitude (jusqu'à 3 000 m). Plus récemment, le spectro-imageur Hyplant (Rascher et coll., 2015) a permis d'observer depuis une plateforme aéroportée le lien entre la fluorescence et le transport d'électrons photosynthétiques.

Calcul de la fluorescence

La méthode de calcul de la fluorescence à partir des profondeurs, le FLP, repose sur deux approximations. La fluorescence et la réflectance de la végétation sont considérées comme constantes aux longueurs d'ondes de mesure, dans le continuum et au fond de la bande. Daumard et coll. (2010) ont développé un instrument possédant des canaux supplémentaires afin d'ôter ces approximations. Cet instrument, Triflex, a permis lors d'une campagne de mesure en 2008 de mettre en évidence l'existence d'un stress hydrique subi par la végétation. Ils ajoutent dans la bande O_2-A un canal de mesure aux deux existants et font l'hypothèse que la réflectance de la végétation est une fonction affine de la longueur d'onde dans la zone spectrale concernée et que la variation relative de fluorescence entre les trois canaux est connue. Dans la bande O_2-B, la réflectance de la végétation est considérée comme une fonction parabolique ce qui nécessite l'ajout d'un quatrième canal de mesure.

1.3.2.1 Mesures spatiales

Depuis le début des années 2010, les premières cartes mondiales de la fluorescence chlorophyllienne ont été présentées (Joiner et coll., 2011; Frankenberg et coll., 2011; Joiner et coll., 2013). Ces cartes ont été extraites des mesures d'instruments satellitaires dont les missions n'étaient pas destinées à la mesure de la fluorescence. C'est le cas notamment du spectromètre à transformée de Fourier Tanso-FTS du satellite Gosat (*greenhouse gases observing satellite*), dont Joiner et coll. (2011) extraient des données de fluorescence à partir des spectres de radiance, destiné à l'observation des gaz à effet de serre de l'atmosphère. Ils utilisent la bande solaire K-I proche de 770 nm qui permet de mesurer la fluorescence au bord du second pic de fluorescence, où son intensité est d'environ 30 % celle du maximum. Le satellite est héliosynchrone et passe vers 13 h 15 heure locale, avec un temps de revisite de trois jours. Initialement non destinées à mesurer la fluorescence, ces mesures ont donc donné des cartes assez peu résolues (environ 200 km au nadir), aussi bien spatialement que temporellement. Cependant, les mesures à l'échelle globale des flux de fluorescence montrent une très bonne corrélation avec les estimations de la production primaire brute (PPB ; GPP, pour *gross primary production*) de CO_2 et de ses variations saisonnières (figure 1.10).

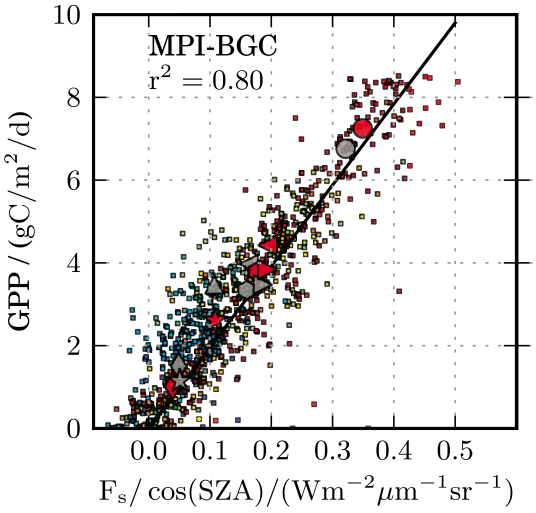


Figure 1.10 – GPP estimé par un modèle (en $\mathrm{GtC} \cdot \mathrm{m}^{-2} \cdot \mathrm{d}^{-1}$) en fonction de la fluorescence mesurée par Gosat (Frankenberg et coll., 2011).

En novembre 2015, l'agence spatiale européenne (ESA) sélectionne le projet de satellite Flex (pour *fluorescence explorer* ; Drush et FLEX Science Team (2008)) prévu pour voler en 2022 ESA (2015). Il s'agit d'un satellite héliosynchrone (dont l'heure de passage est vaut environ 10 h heure locale selon la latitude) prévu pour mesurer la photosynthèse sur toute la planète grâce à la mesure de la fluorescence dans les deux bandes de l'oxygène par un spectromètre imageur. Il volera en tandem avec un satellite Sentinel-3 pour obtenir des données atmosphériques colocalisées. Le temps de revisite sera de presque quatre semaines et la résolution spatiale de l'ordre de 300 m. Flex sera la première mission spatiale dédiée à la mesure de fluorescence, elle permettra de mesurer plus finement la PPB que les mesures extraites de Gosat, avec une meilleure résolution spatiale et temporelle.

Comme on l'a vu dans la partie 2.3.3, la forme du cycle diurne du rendement de fluorescence permet de qualifier l'état physiologique de la végétation. La mesure ponctuelle (à 10 h) qu'effectuera Flex ne pourra permettre de statuer sur l'existence d'un stress subit par la végétation qu'avec l'utilisation de modèles qui apporteront inévitablement une incertitude à cette mesure. Le suivi comparatif de la fluorescence à une heure donnée sur plusieurs jours peut être un moyen de pallier l'absence de suivi du cycle diurne, mais le temps de revisite de Flex est trop important pour espérer utiliser ce moyen.

Afin de suivre l'état physiologique de la végétation à l'échelle globale par la mesure de fluorescence, convenant que cela passe par la mesure de ses cycles diurnes, la solution est de mesurer depuis une plateforme géostationnaire. En effet, un satellite géostationnaire, contrairement à un satellite défilant, ne se déplace pas par rapport à la surface de la Terre et permet donc de mesurer en continu. Un autre avantage du satellite géostationnaire est la couverture spatiale qu'il offre ; en théorie, trois satellites géostationnaires

permettent l'observation de la totalité du globe. En contrepartie, ce type de satellite étant très éloigné de la Terre (environ 36 000 km d'altitude) la résolution spatiale ou le flux perçu est faible.

Les instruments non imageurs utilisés au sol ou aéroportés, bien qu'ils ne fassent pas d'images, ont tout de même une grande résolution spatiale du fait de leur proximité à la cible végétale. Le fait d'imager la fluorescence apporte une information supplémentaire à la mesure de fluorescence et peut permettre de résoudre la complexité de l'interaction des flux de fluorescence avec la structure du couvert. Cependant, d'un point de vue instrumental c'est également un défi. L'imagerie de fluorescence a fait ses début à l'échelle de la feuille par des méthodes actives (Edner et coll., 1994; Genty et Meyer, 1995; Lichtenthaler et coll., 1996; Lichtenthaler et Miehé, 1997) pour obtenir des informations sur le contenu en chlorophylle, caractériser l'hétérogénéité de l'émission de fluorescence ou détecter un stress. Plus récemment, Zarco-Tejada et coll. (2009) et Rascher et coll. (2015) ont effectué des images de fluorescence avec des instruments passifs, mesurant dans les bandes de l'oxygène, depuis des plateformes aéroportées, et montrant ainsi la possibilité de mettre en évidence l'existence d'un stress hydrique à l'échelle du couvert par l'imagerie.

Un autre grand intérêt de l'imagerie de fluorescence en détection rapprochée est de pouvoir décrire précisément la cible mesurée (pour une scène hétérogène comme par exemple un verger ou un vignoble) et de pouvoir interpréter les mesures en fonction des caractéristiques tridimensionnelles de la scène, grâce à des modèles comme Dart (Gastellu-Etchegorry et coll., 1996) par exemple.

1.4 Objectifs du doctorat

Le but de mon doctorat est d'étudier un concept de télédétection : le suivi du cycle diurne de fluorescence pour détecter un stress de la végétation. Ce travail est décomposé en trois parties :

- étudier l'imagerie passive de fluorescence en réalisant un prototype d'instrument (chapitre 2) ;
- étudier les cycles diurnes des indices de rendement de fluorescence par la simulation numérique du transfert radiatif de la fluorescence et de la lumière solaire incidente dans le couvert végétal (chapitre 3) ;
- simuler la fluorescence de la végétation observable depuis une orbite géostationnaire en fonction des caractères biophysiques de la végétation (chapitres 4 et 5).

L'instrument imageur conçu durant mon doctorat est fondé sur le même principe que les instruments passifs développés par le groupe Fluo du LMD. Ces derniers sont monopixels : ils concentrent les rayons lumineux en provenance de la cible végétale sur un capteur unique, une photodiode. Mon travail de développement de l'instrument imageur a donc porté sur l'adaptation du concept instrumental passif utilisé au laboratoire à un instrument comportant un capteur matriciel CCD (dispositif à transfert de charge, *charge coupled device*). J'ai mené une étude théorique afin de dimensionner le capteur pour optimiser la précision de mesure de l'instrument. Cette étude a consisté en le calcul du transfert radiatif spectral de la cible végétale au capteur en passant par le système optique, le choix d'une caméra, de son objectif et des filtres interférentiels. J'ai également participé à la réalisation de l'instrument : la conception et la réalisation des pièces mécaniques et le développement de la chaîne d'acquisition. Afin de rendre l'instrument opérationnel, j'ai procédé à sa calibration radiométrique et à des tests d'évaluation. L'instrument m'a permis ensuite de réaliser une campagne de mesures en champ afin de le valider par comparaison avec d'autres instruments et d'étudier la fluorescence d'un couvert végétal grâce à l'imagerie. L'étude théorique, les étapes de réalisation, la calibration de l'instrument et les résultats de la campagne sont présentés dans le chapitre 2.

Les instruments de mesure passifs de la fluorescence de la végétation permettent de suivre les cycles diurnes des flux de fluorescence, or l'information portée par ces cycles diurnes permet de statuer sur l'état physiologique de la végétation lorsque les flux de fluorescence sont rapportés aux flux de lumière absorbée. C'est le cas dans la mesure active où les instruments mesurent quasi directement un *rendement* de fluorescence. Afin de calculer un rendement à partir des mesures passives, nous proposons d'utiliser des indices de rendement calculés à partir des flux de fluorescence et de mesures complémentaires. J'étudie l'influence de la structure du couvert sur les variations de ces indices. La modélisation de la mesure de fluorescence au niveau du sol et l'étude des variations de ces indices en fonction de la structure du couvert sont présentés dans le chapitre 3. Dans le but de montrer la mesurabilité de la fluorescence depuis une orbite géostationnaire, j'ai développé à partir du modèle sus-cité un modèle de la fluorescence visible

depuis l'espace. Cela m'a permis d'étudier en fonction de paramètres de structure du couvert végétal et de conditions spatio-temporelles (coordonnées du point de mesure à la surface de la Terre et jour de l'année) la variabilité de la fluorescence mesurable depuis l'espace et son influence sur la dynamique diurne des indices de fluorescence. Des simulations générées grâce à ce modèle et appliquées à une carte mondiale de LAI (*leaf area index* ; ou indice foliaire) m'ont permis de spécifier certaines caractéristiques d'un instrument imageur situé en orbite géostationnaire afin de mesurer la fluorescence avec une précision suffisante. Les résultats de l'étude de la fluorescence visible depuis l'espace et la spécification de l'imageur de fluorescence géostationnaire sont présentés respectivement dans les chapitres 4 et 5.

Chapitre 2

Étude de l'imagerie de fluorescence

Sommaire

2.1 Principe de mesure . . . 33
2.1.1 Principe instrumental . . . 33
2.1.2 Filtres interférentiels . . . 33
2.1.3 Distributions angulaires du flux . . . 34
2.2 Réalisation de l'instrument . . . 39
2.2.1 Caméra . . . 39
2.2.2 Système optique . . . 41
2.2.3 Filtres interférentiels . . . 42
2.2.4 Baffles . . . 42
2.2.5 Référence . . . 43
2.2.6 Logiciel d'acquisition . . . 45
2.3 Caractérisation de l'instrument . . . 48
2.3.1 Calibration radiométrique . . . 48
2.3.2 Tests sur la caméra . . . 49
2.3.3 Mesure de fluorescence . . . 49
2.4 Campagne de mesure en champ . . . 52
2.4.1 Objectifs de la campagne . . . 52
2.4.2 Description de la campagne . . . 52
2.4.2.1 Instruments présents lors de la campagne . . . 52
2.4.2.2 Configuration de mesure . . . 53
2.5 Procédures de correction . . . 54
2.5.1 Correction de la lumière parasite . . . 54
2.5.2 Mesure de champ plat . . . 54
2.6 Comparaison avec les autres instruments . . . 56
2.7 Analyse des images . . . 57
2.7.1 Images de fluorescence . . . 61
2.7.2 Segmentation par seuillage . . . 61
2.8 Conclusion . . . 66

Nous avons vu dans le chapitre introductif l'intérêt de la mesure de cycles diurnes de fluorescence afin de tirer des informations sur l'état physiologique de la végétation (partie 2.3.3). L'équipe Fluo du LMD développe depuis plusieurs décennies des instruments monopixels de mesure active ou passive de la fluorescence chlorophyllienne (Moya et coll., 1991; Ounis et coll., 2001; Goulas et coll., 2004; Daumard et coll., 2010), aux échelles de la feuille et du couvert, cette dernière depuis quelques mètres ou depuis un avion. Les instruments monopixels permettent d'obtenir une information sur une zone du couvert végétal, zone dont la taille dépend de leur angle de champ, mais ils ne permettent pas de résoudre spatialement le couvert dont les propriétés sont hétérogènes. Celles-ci dépendent entre autres des espèces présentes, des conditions lumineuses qui varient selon la position des feuilles dans le couvert, de leur

orientations... Grâce au fait qu'il résout spatialement le couvert végétal, un instrument imageur peut permettre quant à lui de mieux comprendre l'influence de la structure complexe de la végétation sur les signaux de fluorescence mesurés, dans le but de suivre la dynamique de la fluorescence détachée d'influences autres que physiologiques. Un des intérêts de placer un instrument sur un satellite est de pouvoir observer une grande partie de la surface de la Terre, ce qui généralement se fait en l'imageant. L'objectif de réaliser un instrument imageur au sol est donc double : il permet de valider un concept instrumental avant d'étudier dans les derniers chapitres la possibilité de son application à une mesure depuis l'espace, et de mieux comprendre les interactions complexes entre la lumière solaire, la fluorescence et le couvert végétal par l'étude des images de fluorescence.

L'imagerie active de fluorescence a fait ses débuts bien avant l'imagerie passive de fluorescence, de même que l'utilisation des instruments passifs en général s'est développée après celle des instruments actifs avec les besoins grandissants d'étudier le couvert à de plus grandes distances. Dans les travaux d'imagerie passive de fluorescence, les chercheurs utilisent généralement des spectro-imageurs ou des caméras multispectrales [1] (Zarco-Tejada et coll., 2009; Rascher et coll., 2015; Pinto et coll., 2016; Zarco-Tejada et coll., 2016) qui leur permettent d'étudier la variabilité de la fluorescence dans un couvert. L'usage du spectro-imageur permet d'obtenir une image spectrale de la cible que Rascher et coll. (2015) ou Pinto et coll. (2016) dégradent en appliquant des filtres gaussiens pour simuler un instrument multispectral afin d'appliquer le FLD (*Fraunhofer line discriminator* ; qui permet de calculer la fluorescence à partir de la mesure de la profondeur d'une bande d'absorption dans les rayonnements incident et en provenance de la végétation ; partie *Instruments* dans 1.3.2) et retrouver la fluorescence. Le rapport signal sur bruit sur les mesures de fluorescence est de l'ordre de cent. Certaines zones spectrales sont acquises sans que les données ne soient utilisées pour le calcul de la fluorescence. Zarco-Tejada et coll. (2009) utilisent une caméra hyperspectrale à six bandes et également le FLD pour retrouver la fluorescence. Cette caméra est composée de six capteurs indépendants qui permettent d'acquérir la luminance de la végétation dans les six bandes de manière simultanée. Ceci est un avantage en terme de temps d'acquisition et de cohérence temporelle des signaux. En effet, pour ce dernier point, des mesures en série dans différents canaux d'une même cible posent un problème de décorrélation temporelle de la cible végétale. En revanche, l'utilisation de six caméras induit une décorrélation spatiale des mesures de différents canaux. Le calcul de la fluorescence nécessite alors une coregistration des images afin de les faire coïncider qui est source de dégradation du rapport signal sur bruit final. Les réponses des capteurs diffèrent et cela demande une calibration plus compliquée que dans le cas de l'utilisation d'un seul capteur.

Dans mon cas, j'ai cherché à reproduire l'usage d'une roue à filtres jusque là utilisée au LMD seulement pour des instruments non imageurs afin de maximiser le rapport signal sur bruit. Ce choix augmente les temps d'acquisition car les images des différents canaux sont acquises en série, pose un problème de décorrélation temporelle si la végétation bouge ou que les conditions lumineuses changent entre les acquisitions des canaux, mais permet d'utiliser pleinement les capacités du capteur. En effet, quand dans le cas d'un spectro-imageur, le capteur est utilisé pour acquérir dans des zones spectrales dont il n'est pas fait usage, un instrument à roue à filtres, lui, utilise pleinement son capteur.

C'est en s'appuyant sur le savoir-faire et les connaissances de mes collègues du LMD que j'ai développé un instrument imageur passif mesurant dans la bande O_2-A d'absorption de l'oxygène atmosphérique. Cet instrument, fortement inspiré de l'instrument multispectral monopixel Airflex (Moya et coll., 2006), a été nommé Fluocam. Afin de développer un instrument imageur performant, j'ai spécifié ses exigences en maximisant sa sensibilité. Pour cela, je me suis intéressé à ses spécifications optiques (angle de champ, focale, ouverture), spectrales (position des filtres, bande passante) et aux caractéristiques de son capteur. Ces spécifications sont présentées dans ce chapitre, à la suite de la description du principe de mesure, puis suivies de la caractérisation de l'instrument. Les apports de l'imagerie de fluorescence dans l'étude du transfert radiatif de la fluorescence au sein du couvert végétal sont présentés dans la deuxième moitié de ce chapitre avec les résultats d'une campagne de mesure effectuée avec l'instrument réalisé.

1. Les canaux sont moins nombreux dans la mesure multispectrale et peuvent ne pas être contigus, tandis qu'en spectro-imagerie, le but étant d'acquérir un spectre pour chaque pixel, les canaux sont en général spectralement assez étroits, contigus et nombreux.

2.1 Principe de mesure

On rappelle que le flux de fluorescence d'un couvert végétal induit par le rayonnement solaire est noyé dans la lumière réfléchie par la végétation, plus ou moins en fonction de sa réflectance apparente. En dehors des zones spectrales où le rayonnement solaire est localement faible, en raison notamment de l'absorption par les composants de l'atmosphère, la luminance spectrale de fluorescence peut valoir jusqu'à 2 % du rayonnement réfléchi par la végétation mais guère plus. En revanche, là où l'absorption atmosphérique est grande, le flux de fluorescence peut composer 10 % du rayonnement total en provenance de la végétation. Afin de mesurer la fluorescence avec une précision suffisante, l'idée est venue à Plascyk et Gabriel (1975) de mesurer dans les bandes d'absorptions de l'atmosphère découvertes par Fraunhofer (1817). Afin de distinguer la fluorescence du flux réfléchi par la végétation, le principe est de comparer les profondeurs des bandes d'absorption de la lumière en provenance de la végétation et de celle incidente sur le couvert végétal. La profondeur d'une bande d'absorption est calculée comme le rapport entre le flux au bord et le flux au fond de la bande. En pratique, pour des mesures à des distances allant jusqu'à quelques mètres, la lumière incidente sur la végétation est mesurée en présentant devant l'instrument une surface de référence, horizontale, blanche et non fluorescente. Afin de calculer la profondeur des bandes, on mesure dans et hors la bande d'absorption en mesurant le flux lumineux à travers des filtres à bande étroite ; en effet, les bandes d'absorption situées dans la zone spectrale de la fluorescence chlorophyllienne ont une largeur de l'ordre du nanomètre.

2.1.1 Principe instrumental

Fluocam, l'instrument imageur développé au sein du LMD est composé d'une caméra, d'un objectif, d'une roue à filtres, d'une série de baffles, d'une référence commutable et d'un système d'acquisition (figure 2.1). La caméra et l'objectif permettent l'acquisition d'images de la cible végétale. La roue à filtres présente devant l'objectif en fonction de sa position un des trois canaux afin de restreindre spectralement le flux de photons en provenance de la cible. Le dispositif de baffles permet d'absorber le rayonnement en provenance de l'environnement de la cible afin de l'empêcher d'être diffusé par les parties mécaniques et optiques vers le capteur, de plus il contient un filtre passe-bande permettant d'améliorer le pouvoir sélectif du rayonnement en longueur d'onde de l'instrument. Le système de référence commutable permet d'obtenir une mesure de la composition du rayonnement incident en présentant une référence blanche devant l'entrée de l'instrument. Enfin, le système d'acquisition automatise l'acquisition des images de la caméra et le choix de son temps d'intégration, la rotation de la roue à filtres et le déplacement de la référence devant le champ de vue de l'instrument.

2.1.2 Filtres interférentiels

Afin d'optimiser le positionnement spectral des filtres, il est indispensable de caractériser spectralement la fonction instrumentale de Fluocam. Afin de mesurer précisément au fond de la bande, on utilise des filtres interférentiels, appelés aussi dichroïques (du grec ancien *dikhroos* : « bicolore ») car ils séparent spectralement la lumière en en réfléchissant une partie et transmettant l'autre. Ils sont composés de plusieurs dizaines de couches minces dont les indices optiques sont précisément choisis. Le principe d'interférence entre les rayons interagissant entre eux au sein du filtre permet de laisser sélectionner certaines longueurs d'onde qui sont transmises et de rejeter les autres qui sont alors réfléchies. Cette technique permet d'obtenir des filtre à bande étroite bien localisés spectralement (figure 2.9). L'inconvénient de ces filtres est que leur fonction de transmittance spectrale dépend de l'angle d'incidence des rayons lumineux à leur surface (équation (2.1)). Il faut donc caractériser le flux lumineux entrant dans l'instrument pour connaître sa distribution angulaire pour savoir comment il sera filtré avant d'atteindre le capteur.

Lorsque les rayons lumineux interceptent le filtre avec un angle d'incidence α non nul, leur fonction

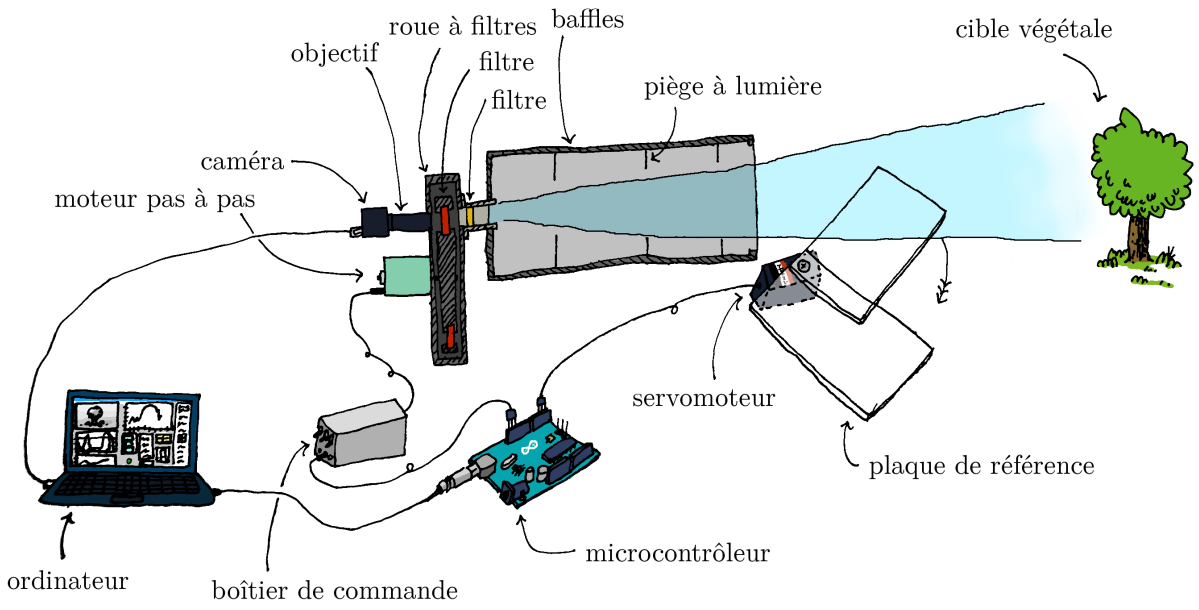


Figure 2.1 – Schéma de Fluocam et de ses différents composants. L'instrument en lui-même est composé d'une caméra, d'un objectif, d'une roue à filtres, d'un filtre passe-bande, de baffles et d'une référence. La position de la référence est asservie par un servomoteur lui-même contrôlé par un microcontrôleur. Ce dernier contrôle également un boîtier d'alimentation et d'asservissement d'un moteur pas à permettant la rotation de la roue à filtres. Le microcontrôleur et la caméra sont reliés commandés par un programme fonctionnant sur un ordinateur.

spectrale est modifiée. La transmittance T à la longueur d'onde λ vaut alors (Baillard et coll., 2006)

$$T(\lambda, \alpha) = T\left(\frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin\alpha}{n}\right)^2}}, \alpha = 0°\right) \quad , \tag{2.1}$$

où $T(\lambda, \alpha)$ est la transmittance du filtre à la longueur d'onde λ et à l'angle d'incidence α, et n l'indice optique équivalent des couches minces formant le filtre interférentiel. La transmittance à la longueur d'onde λ et pour une incidence non nulle α vaut donc la transmittance à une longueur d'onde λ_0 différente pour l'angle d'incidence nul. Les termes sous la racine sont plus petits que un, la fonction de transmittance à un angle non nul est donc écrasée (et décalée) vers les courtes longueurs d'onde. La figure 2.2 montre le décalage $\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda$ pour $T(\lambda, \alpha) = T(\lambda_0, \alpha_0 = 0°)$ en fonction de l'angle d'incidence. On a vu dans le chapitre 1 que les filtres habituellement utilisés pour mesurer dans les bandes d'absorption de l'oxygène ont usuellement une largeur proche de celle de la bande, à savoir de l'ordre du nanomètre. À 760 nm, une incidence des rayons de 5° décale la fonction de transmittance vers les courtes longueurs d'ondes de plus d'un nanomètre. Dans un cas pareil, la mesure au fond de la bande est décalée en dehors de celle-ci provoquant une perte de précision sur la mesure de fluorescence. Prendre en compte les effets d'angle est donc primordial dans la conception de l'instrument.

2.1.3 Distributions angulaires du flux

Afin d'optimiser le placement des filtres, il est nécessaire de caractériser la distribution des angles d'incidence sur le filtre des rayons étant interceptés par le capteur de la caméra. Pour cela, il faut étudier le transfert radiatif dans le système optique de l'instrument.

Pour commencer, nous définissons les grandeurs et points d'intérêt du problème (se reporter aux figures 2.3 et 2.4 pour leur représentation visuelle). À chaque point image de coordonnées $(x_i\,;y_i)$ du capteur de l'instrument correspond un point objet de coordonnées $A_i(X_i\,;Y_i)$. Cette correspondance théorique [2] est

2. Par théorique, on entend pour un instrument parfait, pour lequel la diffraction liée à sa pupille d'entrée est inexistante, de même que les aberrations provoquées par les imperfections des lentilles.

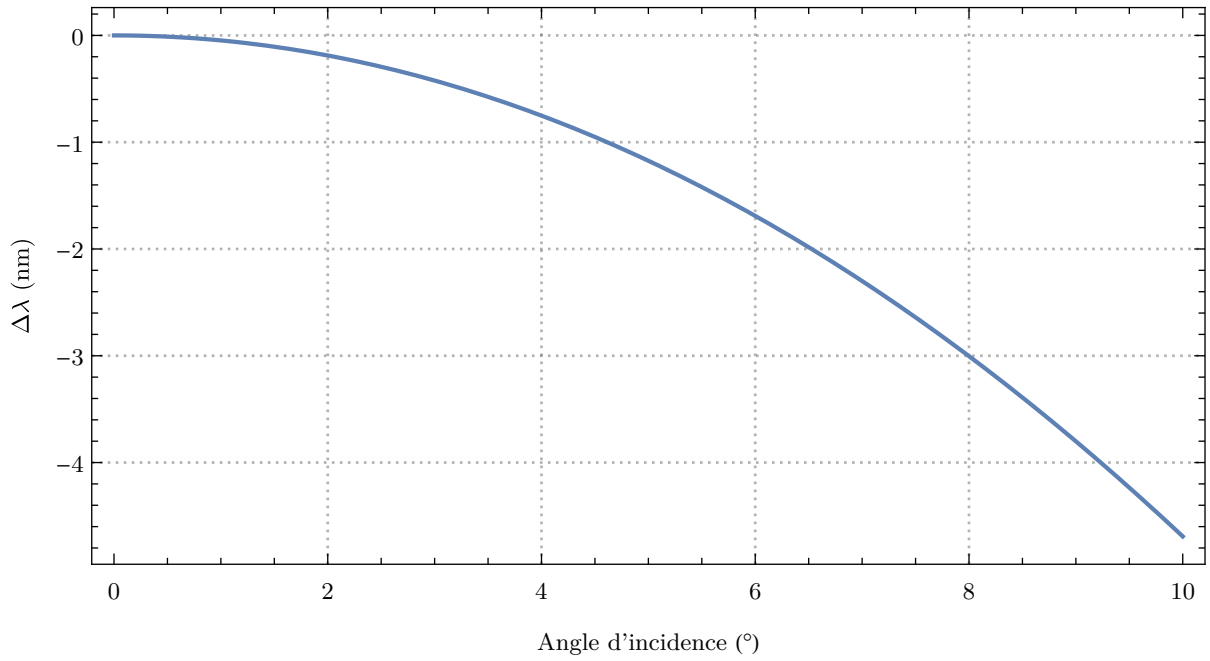


Figure 2.2 – Décalage en longueur d'onde de la fonction de transmittance d'un filtre dichroïche en fonction de l'angle d'incidence des rayons lumineux pour un indice optique équivalent valant 1,57 et à longueur d'onde de 760 nm. La transmittance à la longueur d'onde λ du filtre pour des rayons inclinés vaut sa transmittance pour des rayons normaux à la longueur d'onde $\lambda - \Delta\lambda$.

bijective si tant est que la mise au point de l'instrument est parfaite ; en effet, si ce n'est pas le cas, à un point A_i correspondra une tâche sur le capteur et non un point. Le flux $\Phi_i(\lambda)$ en provenance du point objet A_i éclaire entièrement la surface du filtre interférentiel de l'instrument. Ce flux intercepte le filtre interférentiel avec différents angles d'incidence si le plan objet n'est pas situé à l'infini (au sens optique du terme [3]). Afin d'estimer la distribution des angles d'incidence sur le filtre, il convient donc de considérer séparément chaque flux $\Phi_{i,j}(\lambda)$ passant par chaque point $A_j(x_j\,;y_j)$ du filtre interférentiel avec un angle d'incidence différent.

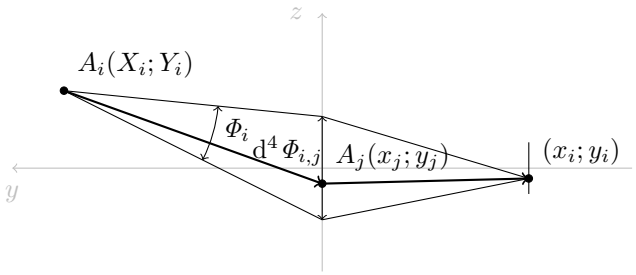


Figure 2.3 – Schéma en coupe représentant le point objet A_i, le flux total Φ_i en provenance de ce dernier et interceptant le filtre, le système optique équivalent (comprenant l'objectif et le filtre interférentiel) représenté par la double flèche verticale, le flux $\mathrm{d}^4\Phi_{i,j}$ provenant de A_i et passant par le point A_j du filtre interférentiel, le point $(x_i\,;y_i)$ du capteur et ce dernier représenté par un trait vertical.

Les coordonnées d'un point objet $A_i(X_i\,;Y_i)$ et de celles du point image $(x_i\,;y_i)$ qui lui correspond sont reliées par le facteur de grandissement γ du système optique tel que

$$(X_i\,;Y_i) = \left(\frac{x_i}{\gamma}\,;\frac{y_i}{\gamma}\right)\ . \tag{2.2}$$

Le flux énergétique élémentaire $\mathrm{d}^4\Phi_{i,j}(\lambda)$ transmis du point $A_i(X_i\,;Y_i)$ de luminance énergétique $L_i(\lambda)$

3. L'infini au sens optique est pour un système une distance pour laquelle les rayons en provenance d'un point situé à cette distance sont considérés comme parallèles entre eux par le système optique.

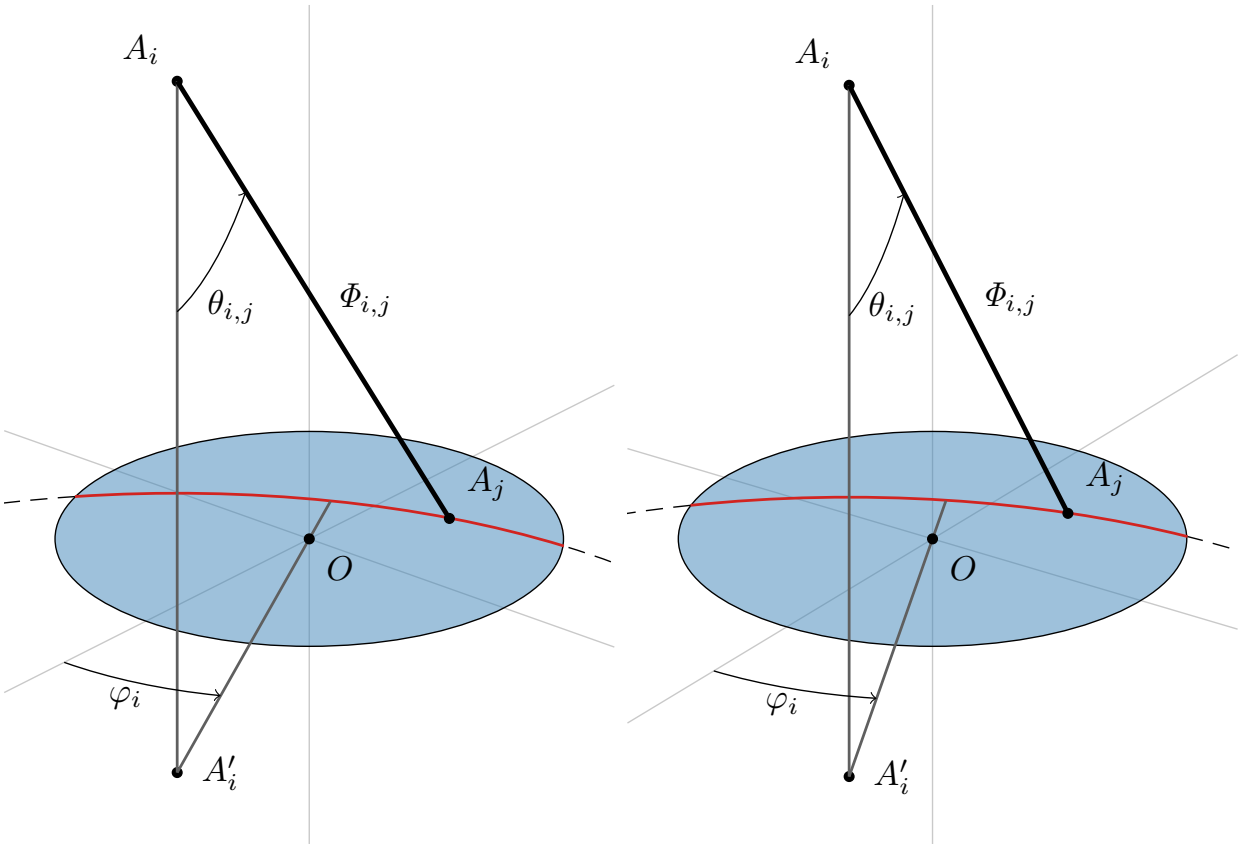


Figure 2.4 – Figure stéréoscopique en vision croisée représentant le filtre et la pupille d'entrée (en **bleu**), le point objet A_i, le flux $\Phi_{i,j}$ en provenance de ce dernier et interceptant le filtre en le point A_j, l'angle $\theta_{i,j}$. En **rouge** est tracée la courbe isogone d'angle $\theta_{i,j}$.

au pixel $(x_i\,;y_i)$ en passant par le point $A_j(x_j\,;y_j)$ du filtre interférentiel vaut

$$\mathrm{d}^4\Phi_{i,j}(\lambda) = T(\lambda)L_i(\lambda)\,\mathrm{d}^4U_{i,j}\ , \tag{2.3}$$

avec $T(\lambda)$ la transmittance du filtre à la longueur d'onde λ dans la direction A_iA_j et $\mathrm{d}^4U_{i,j}$ l'étendue géométrique du faisceau reliant $A_i(X_i\,;Y_i)$ à $(x_i\,;y_i)$ en passant par $A_j(x_j\,;y_j)$.

L'expression de l'étendue géométrique de ce faisceau vaut

$$\mathrm{d}^4U_{i,j} = \frac{\mathrm{d}^2S_i\ \cos(\theta_{i,j})\ \mathrm{d}^2S_j\ \cos(\theta_{i,j})}{d_{i,j}^2}\ , \tag{2.4}$$

avec d^2S_i la surface élémentaire du plan objet d'où le flux $\mathrm{d}^4\Phi_{i,j}$ est émis, d^2S_j la surface élémentaire sur le filtre interférentiel par laquelle le flux $\mathrm{d}^4\Phi_{i,j}$ passe, $\theta_{i,j}$ l'angle formé entre la normale à d^2S_i et la direction de propagation (figure 2.4), égal à l'angle formé entre la normale à d^2S_j et la direction de propagation, et enfin $d_{i,j}^2$ la distance séparant d^2S_i de d^2S_j.

La surface élémentaire d^2S_i peut s'écrire

$$\mathrm{d}^2S_i = \mathrm{d}X\ \mathrm{d}Y \tag{2.5}$$

et la surface élémentaire d^2S_j

$$\mathrm{d}^2S_j = d_{i,j}^2\sin(\theta_{i,j})\ \mathrm{d}\theta\ \mathrm{d}\varphi\ , \tag{2.6}$$

avec φ_i l'angle formé entre Ox et OA'_i — avec A'_i la projection orthogonale de A_i sur le plan du filtre et O le centre du filtre — et $\mathrm{d}\varphi$ la variation élémentaire de cet angle (figure 2.4).

Le flux énergétique élémentaire $\mathrm{d}^4\Phi_{i,j}(\lambda)$ s'écrit alors

$$\mathrm{d}^4\Phi_{i,j}(\lambda) = T(\lambda)L_i(\lambda)\cos^2(\theta_{i,j})\sin(\theta_{i,j})\,\mathrm{d}X\,\mathrm{d}Y\,\mathrm{d}\theta\,\mathrm{d}\varphi\ . \tag{2.7}$$

Le flux total reçu par un pixel vaut ainsi

$$\begin{aligned}\Phi_{i,j}(\lambda) &= \int_{X_{\min}}^{X_{\max}}\mathrm{d}X\int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}}\mathrm{d}Y\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}}\mathrm{d}\theta\int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}}\mathrm{d}^4\Phi_{i,j}(\lambda)\,\mathrm{d}\varphi \\ &= \int_{X_{\min}}^{X_{\max}}\mathrm{d}X\int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}}\mathrm{d}Y\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}}\mathrm{d}\theta\int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}}T(\lambda)L_i(\lambda)\cos^2(\theta_{i,j})\sin(\theta_{i,j})\,\mathrm{d}\varphi\ .\end{aligned} \tag{2.8}$$

Les bornes d'intégrations $\{X_{\min}\,;X_{\max}\}$ et $\{Y_{\min}\,;Y_{\max}\}$ correspondent aux limites spatiales $\{x_{\min}\,;x_{\max}\}$ et $\{y_{\min}\,;y_{\max}\}$ d'un pixel et sont reliées entre elles par le grandissement γ (équation (2.2)).

Les bornes d'intégration $\{\theta_{\min}\,;\theta_{\max}\}$ sont fonction de la configuration géométrique du problème et valent

$$\theta_{\min} = \arctan\left(\frac{r_0 - l/2}{d_0}\right)\ \text{et}\ \theta_{\max} = \arctan\left(\frac{r_0 + l/2}{d_0}\right) \tag{2.9}$$

où

$$r_0 = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}\ , \tag{2.10}$$

avec r_0 la distance entre le centre du filtre interférentiel et la projection orthogonale du point objet $A_i(X_i\,;Y_i)$ sur le plan du filtre interférentiel (OA_i'), l le diamètre de la pupille d'entrée (c'est-à-dire le diamètre du filtre) et d_0 la distance du plan objet au filtre interférentiel.

Les bornes d'intégration $\{\varphi_{\min}\,;\varphi_{\max}\}$ dépendent également des paramètres géométriques du problème ainsi que de l'angle θ :

$$\varphi_{\min} = \varphi_0 - \varphi_1\ \text{et}\ \varphi_{\max} = \varphi_0 + \varphi_1\ , \tag{2.11}$$

où

$$\varphi_0 = \arccos\left(X_i/r_0\right)\mathrm{sgn}\left(Y_i\right)\ \text{et}\ \varphi_1 = \arccos\left(\frac{r^2 + r_0^2 - (l/2)^2}{2rr_0}\right) \tag{2.12}$$

et

$$r = \tan\left(\theta_{i,j}\right)d_0\ , \tag{2.13}$$

avec r la distance entre la projection orthogonale du point objet $A_i(X_i\,;Y_i)$ sur le plan du filtre interférentiel (A_i') et le point de passage des rayons à travers le filtre $A_j(X_j\,;Y_j)$.

La quadruple intégrale de l'équation (2.8) n'a pas de solution analytique. Il convient donc de calculer sa valeur numérique pour un pixel et un angle d'incidence des rayons donnés en fixant les paramètres du problème. La figure 2.5 montre pour différentes positions du pixel sur le capteur la distribution de flux — supposant la transmittance égale à un — en fonction de l'angle d'incidence. Cette simulation ayant servi à déterminer les caractéristiques optiques de l'instrument, les paramètres optiques utilisés dans le calcul numérique de cette figure sont néanmoins ceux de l'instrument (tableau 2.1) pour une distance de mise au point de 10 m. Les pixels dont les distributions de flux sont tracées sur la figure 2.5 sont sur une demie largeur du capteur à une distance du centre valant $\{0\,;0{,}8\,;1{,}6\,;3{,}3\,;6{,}6\,;13{,}2\}$ % de la distance centre – bord du capteur.

On remarque sur la figure 2.5 que plus l'on s'éloigne du centre du capteur plus les distributions de flux se décalent vers des grands angles d'incidence. Cela signifie que pour les pixels éloignés du centre la fonction de transmittance des filtres interférentiels est décalée vers les courtes longueurs d'onde.

Pour une distance infinie de mise au point, la figure 2.5 aurait une allure différente. Les distributions de flux seraient centrées aux même angles mais seraient plus fines puisque en un point du capteur ne correspondrait qu'un seul angle d'incidence sur le filtre. En revanche, les distributions ne seraient pas

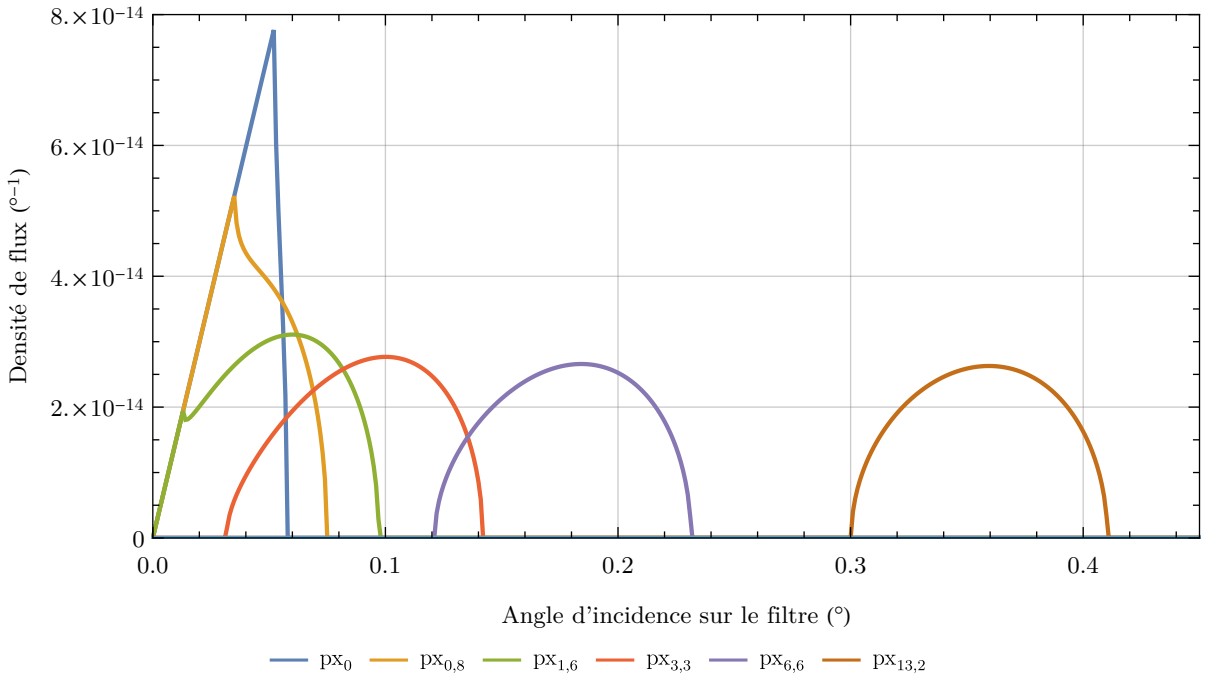


Figure 2.5 – Distribution du flux en fonction de l'angle d'incidence sur le filtre pour les pixel éloignés du centre du capteur sur la largeur à 0 % (en **bleu**), 0,8 % (en **orange**), 1,6 % (en **vert**), 3,3 % (en **rouge**), 6,6 % (en **violet**) et 13,2 % (en **marron**) de la distance centre – bord du capteur. Par exemple, le pixel au centre du capteur reçoit des rayons lumineux dont la distribution des angles d'incidence sur le filtre est tracée en **bleu**.

infiniment fines puisque les pixels ne sont pas ponctuels.

De ces calculs numériques, on peut calculer le décalage et la déformation du spectre de transmittance des filtres interférentiels en fonction du pixel considéré. Ces calculs étant assez long, j'ai choisi — après vérification de la non significativité des simplifications — de simplifier les calculs en assimilant les distributions de flux à des diracs (distributions de Dirac) centrés sur les barycentres des distributions de flux et de calculer le décalage et la déformation des spectres de transmittance avec ces nouvelles distributions. La symétrie du problème m'a permis également de ne calculer ces distributions que pour un quadrant du capteur.

La figure 2.6 montre la profondeur théorique de la bande d'absorption de l'oxygène calculée pour chaque pixel du capteur. Le spectre solaire utilisé est un spectre mesuré au laboratoire et les filtres sont ceux utilisés dans mon instrument.

On peut voir la profondeur aller de 5,5 à à peu près 8. À mesure que l'on s'éloigne du capteur, la profondeur diminue avec le décalage de la fonction de transmittance du filtre mesurant le fond de la bande. En sortant de la bande d'absorption, le filtre induit une profondeur plus faible. On peut noter que le centre du capteur présente une profondeur plus faible que juste autour. Cela est dû au fait que pour maximiser la profondeur moyenne sur le capteur, la longueur d'onde du maximum de transmittance du filtre du fond est un peu plus grande que celle du fond de la bande d'absorption (d'environ 0,2 nm). Un plus grand nombre de pixels voit alors exactement le fond de la bande plutôt que seulement le pixel central.

Ce résultat est encore plus visible sur la figure 2.7 qui montre l'incertitude relative sur la mesure de fluorescence résultant de cette variation de profondeur en fonction de la distance au centre du capteur suivant la largeur du capteur. On peut voir que globalement, plus on s'éloigne du centre du capteur, plus l'incertitude sur la mesure de fluorescence augmente ; avec cependant une petite remontée de l'incertitude au centre du capteur. L'incertitude sur la fluorescence est ainsi minimisée.

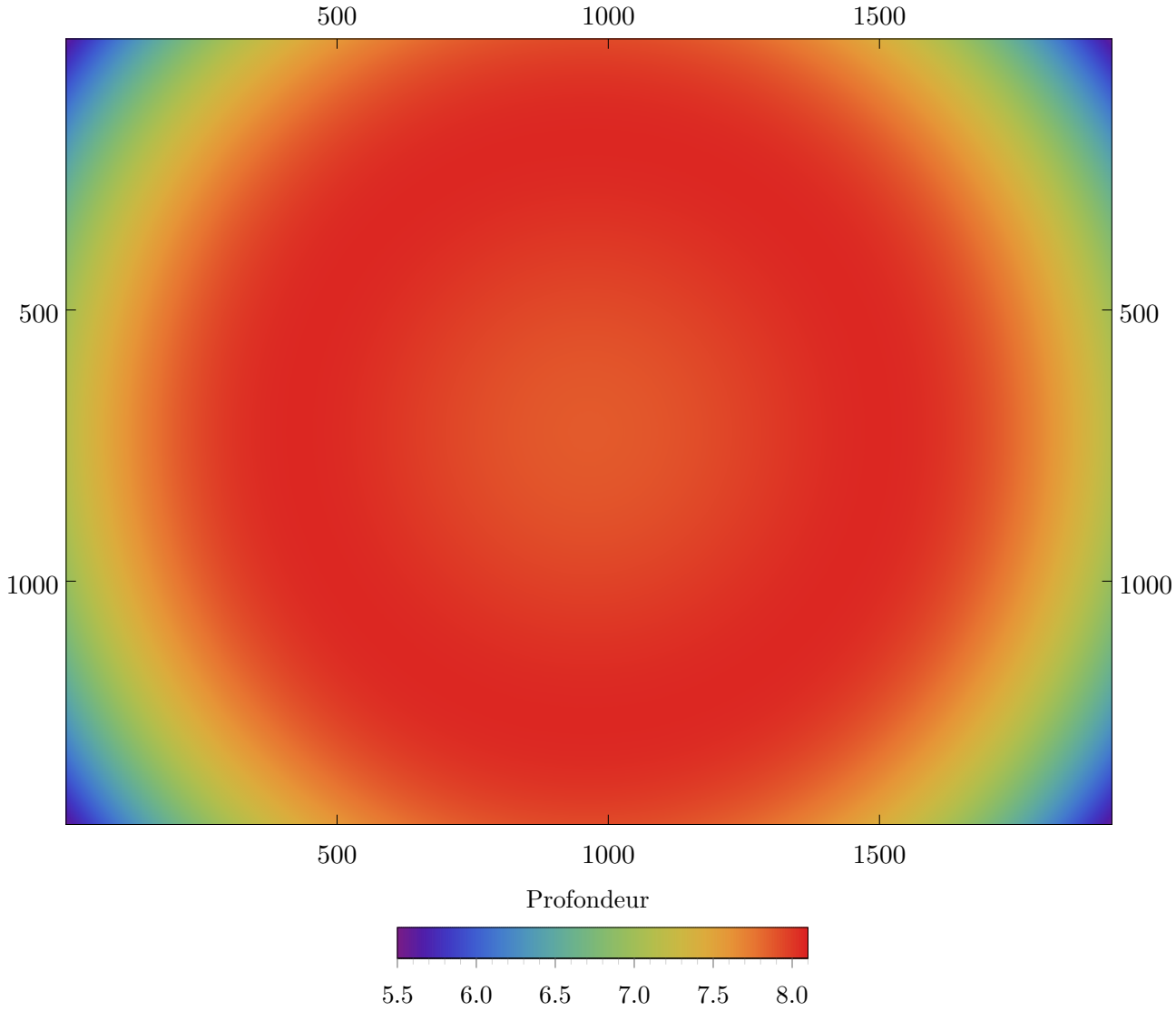


Figure 2.6 – Profondeur de la bande O_2-A calculée avec deux filtre simulée suivant la position sur le capteur.

2.2 Réalisation de l'instrument

Nous allons voir plus en détail dans cette section comment ont été déterminées les spécifications optiques (objectif de la caméra et baffles), spectrales (filtres) et comment a été choisie la caméra. Ces différents champ ont été séparés artificiellement à des fins descriptives, bien que leurs déterminations s'influent mutuellement.

Le choix du système optique dépend en grande partie de celui de la caméra (partie 2.2.1). En effet, l'optique de l'instrument n'étant pas réalisée au labo, les objectifs disponibles sur le marché ont contraint ses spécifications. De plus, la focale et l'ouverture de l'objectif jouent sur la fonction spectrale de l'instrument (2.1.3) en lien avec la taille du capteur notamment. Seule la conception des baffles découle directement de celle du système optique et de la caméra sans imposer de contraintes de conception à d'autres organes de l'instrument.

2.2.1 Caméra

Le choix de la caméra a été une étape critique dans la spécification des performances de l'instrument. Une multitude de critères entrent en jeu dans l'optimisation de ses performances, tous n'étant pas univoques. Par exemple, l'augmentation du nombre de pixels, à taille de capteur constante, diminue la sensibilité de la caméra tout en augmentant la résolution spatiale. Fixer une valeur pour des paramètres de ce genre ne relève pas forcément d'arguments quantitatifs, il s'agit d'équilibrer les performances tout

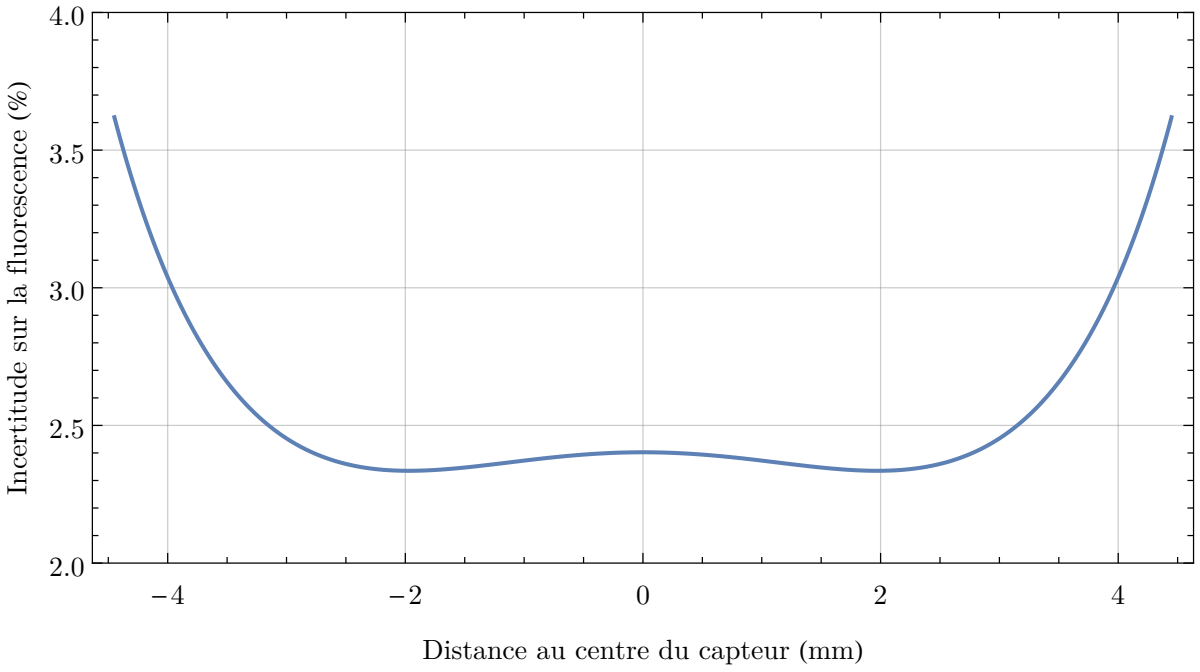


Figure 2.7 – Incertitude relative sur la mesure de fluorescence calculée avec trois canaux dans la bande O_2-A en fonction de la distance au centre du capteur suivant la largeur de celui-ci.

en se conformant à des impératifs financiers.

Caractéristique	Symbole	Valeur	Unité
Pixels dans la largeur	$N_{\mathrm{px_L}}$	1928	- (pixel)
Pixels dans la hauteur	$N_{\mathrm{px_H}}$	1448	- (pixel)
Pixels	N_{px}	$2{,}9 \times 10^6$	- (pixel)
Largeur / hauteur d'un pixel	Δl / Δh	3,69	µm
Largeur du capteur	ΔL	7,11	mm
Hauteur du capteur	ΔH	5,34	mm
Angle d'incidence maximal	$\theta_{\max}$	3,41	°
Profondeur des puits quantiques	P_{e}	11 586	- (électron)
SNR maximal	$\sqrt{P_{\mathrm{e}}}$	108	-
Bruit efficace (RMS)	σ_{e}	9,68	- (électron)
Contraste	$P_{\mathrm{e}}/\sigma_{\mathrm{e}}$	1200	-
Efficacité quantique (760 nm)	E_{q}	35	%
Type de capteur		CCD	s/o
Niveaux du convertisseur analogique-numérique		12	- (bit)

Tableau 2.1 – Caractéristiques de la caméra (Point Grey, FL3-GE-28S4M-C).

Le tableau 2.1 donne les spécifications techniques de la caméra choisie (Point Grey, FL3-GE-28S4M-C).

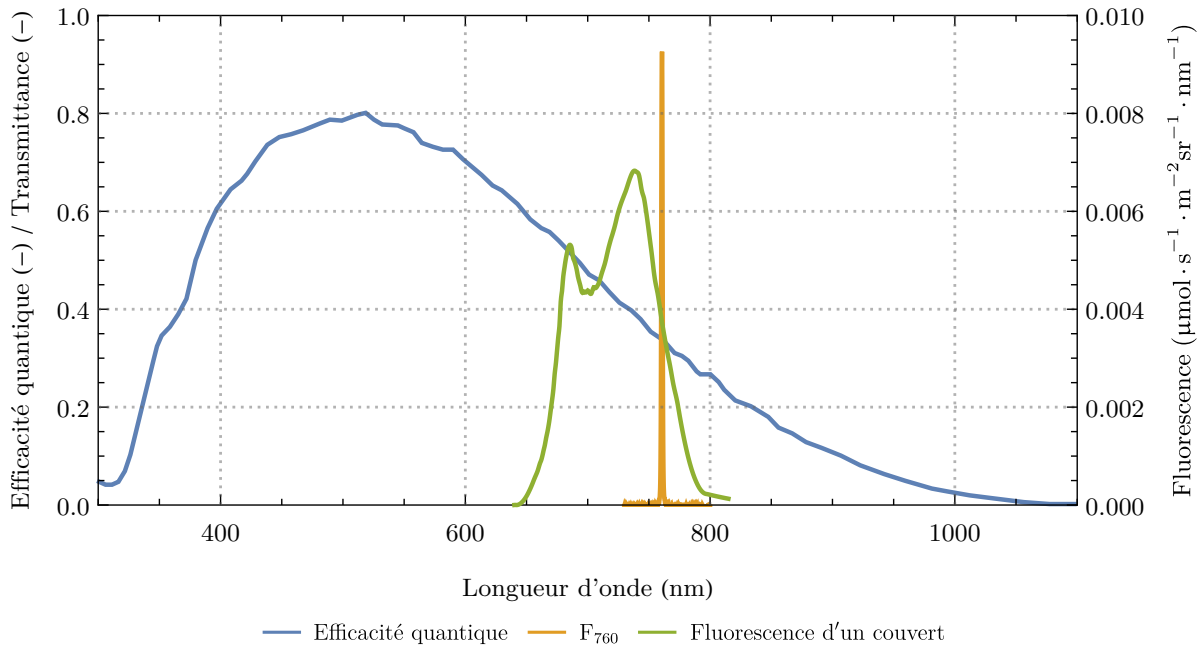


Figure 2.8 – Spectre d'efficacité quantique de la caméra (en **bleu**) en regard du filtre du fond (en **orange**) et du spectre de fluorescence d'un couvert végétal (en **vert**).

2.2.2 Système optique

Le choix de la focale de l'objectif contraint principalement l'angle de champ de l'instrument et donc, pour un nombre de pixels fixé, également la résolution spatiale. La focale de l'objectif et la distance de l'instrument à la cible déterminent l'angle maximal d'incidence des rayons en provenance de la cible (interceptant le capteur) sur le filtre placé devant l'objectif. Par exemple, pour une cible située à l'infini et un angle de champ de demi-angle valant un degré, quelle que soit la taille (finie) de l'ouverture de l'objectif, l'angle maximal d'incidence des rayons (interceptant le capteur) sur la pupille d'entrée ou d'un filtre placé devant vaut un degré. La distribution des angles d'incidence dépend quant à elle de la forme du capteur — chaque point du capteur recevant pour une cible située à l'infini des rayons d'une seule incidence sur le filtre donnée.

Du décalage de la fonction de transmittance du filtre mesurant au fond de la bande d'absorption vers les courtes longueurs d'onde résulte une mesure de fluorescence moins précise ; en effet, la mesure différentielle hors / dans la bande tient son efficacité du placement précis du filtre mesurant au fond de la bande au fond de la bande. Il convient donc de limiter l'angle de champ — et donc l'angle maximal d'incidence des rayons sur le filtre.

Ces considérations m'ont fait opter pour un objectif de focale de 75 mm afin de ne pas observer d'angles incidents sur le filtre trop importants. Celle-ci définissant avec le choix du capteur de la caméra un angle de champ de 5,4° en largeur et 4,1° en hauteur. L'équation suivante donne la relation entre l'angle de champ, la focale et une dimension du capteur :

$$\alpha = 2 \arctan\left(\frac{d}{2f}\right) \ , \tag{2.14}$$

où α est l'angle de champ, d une dimension du capteur suivant laquelle l'angle de champ est calculé (largeur, hauteur, diagonale du capteur…) et f la focale de l'objectif. Dans notre cas, f vaut 75 mm et d 7,11 mm ou 5,34 mm selon la largeur ou la hauteur du capteur respectivement (tableau 2.1).

Le tableau 2.2 donne les caractéristiques de l'objectif choisi qui nous intéressent ici. On y voit une plage de valeurs pour le nombre d'ouverture réglable de l'objectif. Il s'agit du rapport entre la focale et le diamètre de la pupille d'entrée. Plus ce nombre est petit, plus le diaphragme réglant la taille de la pupille d'entrée de l'objectif est ouvert, laissant plus de flux en provenance de la cible illuminer le capteur de la caméra. Pour minimiser les temps d'exposition du capteur et ainsi augmenter la fréquence d'acquisition

de l'instrument, j'ai choisi de régler définitivement le nombre d'ouverture à 3,9, ce qui correspond à un diamètre de pupille d'entrée d'environ 19 mm.

Caractéristique	Valeur	Unité
Longueur de la focale	75	mm
Plage du nombre d'ouverture	$\{3{,}9\,;\ldots;32\}$	-
Angle de champ (largeur ; hauteur)	(5,43 ; 4,08)	°
Plage de mise au point	$[0{,}5\,;\infty[$	m

Tableau 2.2 – Caractéristiques de l'objectif (Tamron, 23FM75L).

Il est à noter qu'une augmentation du diamètre de la pupille d'entrée d'un objectif provoque une diminution de la profondeur de champ. Cela a une incidence sur les images obtenues si la résolution du capteur est suffisamment fine. Intervient également la distance à laquelle est faite la mesure. Dans le cas de la campagne de mesure détaillée dans la section 2.4, la distance à la cible est suffisamment grande et équivalente pour ne pas provoquer de flou sur une partie de l'image.

2.2.3 Filtres interférentiels

Les calculs exposés dans la partie 2.1.3 m'ont permis de calculer le placement optimal des filtres afin de minimiser l'incertitude relative sur la fluorescence. À partir de ces calculs, j'ai simulé la profondeur mesurée par chaque pixel du capteur (figure 2.6), et ait cherché la position des filtres maximisant la moyenne des profondeurs des pixels. Le placement spectral des filtres que nous avons achetés est indiqué dans le tableau 2.3 ainsi que sur la figure 2.9 en regard d'un spectre de luminance solaire dans la bande O_2-A. On remarque que le filtre du fond n'est pas exactement centré au fond de la bande mais légèrement décalé vers les grandes longueurs d'onde pour la raison expliquée plus haut (figures 2.6 et 2.7).

Canal	Symbole	Longueur d'onde centrale (nm)	FWHM (nm)	Transmittance maximale (-)	Transmittance intégrée (nm)
Bord gauche	B_{758}	757,740	1,21	0,906	1,23
Fond	F_{760}	760,734	1,27	0,927	1,30
Bord droit	B_{770}	770,518	1,23	0,884	1,23

Tableau 2.3 – Positionnement spectral, largeur à mi-hauteur (FWHM), transmittances maximale et intégrée des filtres de Fluocam.

Les largeurs à mi-hauteur des filtres sont en moyenne de 1,24 nm (tableau 2.3). Cette largeur est critique surtout pour le filtre mesurant au fond de la bande. Plus celle-ci est petite, plus la mesure de fluorescence aura une part importante dans le rayonnement total en provenance de la végétation. Cependant, le flux mesuré diminue avec la largeur du filtre imposant un temps d'exposition plus long. Il n'est donc pas souhaitable d'avoir un filtre trop fin. Concernant les filtres de Fluocam, ce sont les limites technologiques qui ont imposé la largeur à mi-hauteur. C'est également la précision du procédé de fabrication qui a imposé le positionnement spectral, à 0,05 nm près.

2.2.4 Baffles

La diffusion de rayons lumineux par les surfaces mécaniques et optiques de l'instrument jusqu'au capteur oblige à utiliser un piège à lumière afin d'absorber ce rayonnement. Ce piège est constitué d'enceintes (ou baffles) absorbant chacune les rayons provenant de l'environnement lumineux de l'instrument (l'environnement de la cible, la cible elle-même ou encore le ciel) directement ou après diffusion par les enceintes précédentes. Ces enceintes sont ajourées en leur centre et matérialisent par leur ajour la forme conique de l'angle de champ.

La figure 2.10 est une vue en coupe longitudinale montrant comment construire une série de baffles dans un tube avant le détecteur. Dans le cas de notre instrument, la lentille ne se trouve pas au niveau de la pupille d'entrée mais à la place du détecteur (*detector*) de la figure ; ce dernier est situé dans notre instrument plus à droite, après l'objectif (cela ne modifie en rien le principe de construction). En pointillés

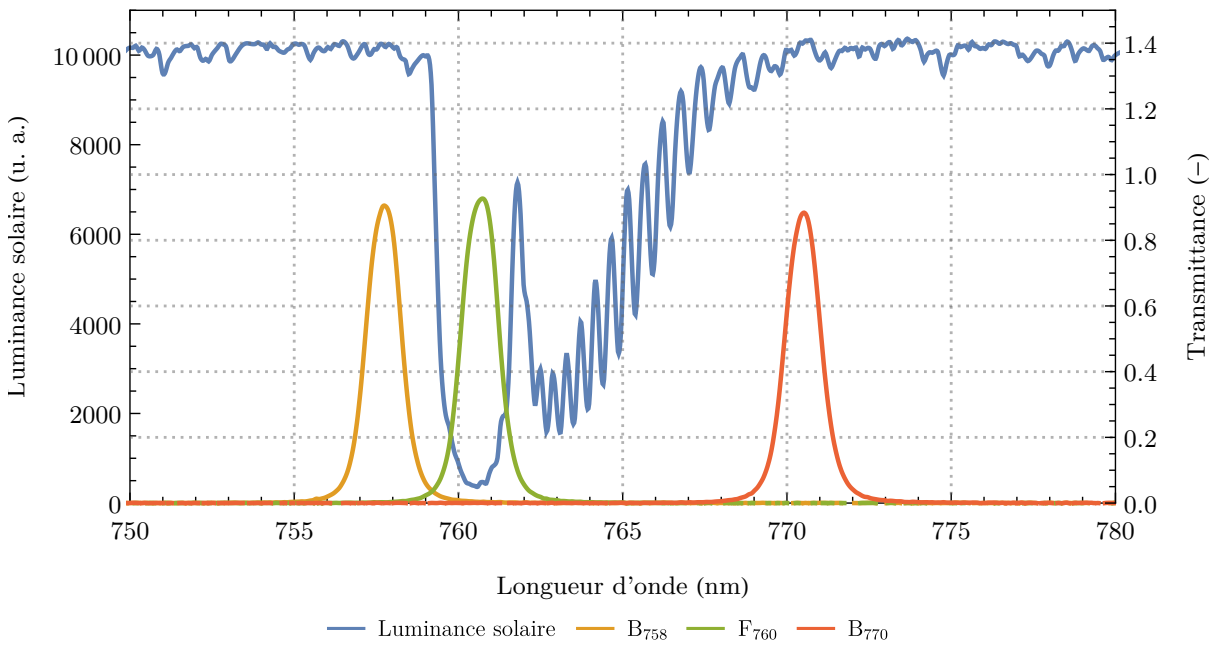


Figure 2.9 – Spectres des filtres interférentiels de Fluocam des bords gauche (en **orange**) et droit (en **rouge**) et du fond de la bande (en **vert**) en regard du spectre solaire (en **bleu**).

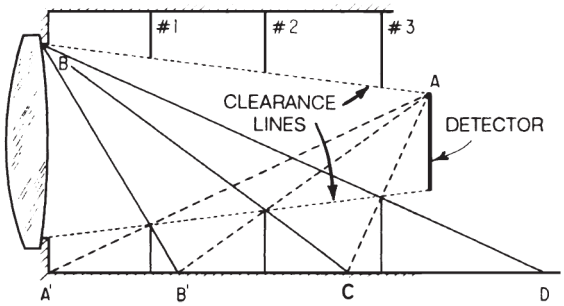


Figure 2.10 – Schéma représentant la construction de baffles optiques.

(--- ; *clearance lines*) sont représentés les limites de l'angle de champ. À l'intérieur de ces lignes, aucune pièce mécanique ne doit passer afin de ne pas obstruer le champ de vue de l'instrument. Afin d'empêcher un rayon lumineux parasite extrême passant par le point B (en haut à gauche) et réfléchi en A′ d'atteindre le détecteur, un premier baffle est construit à gauche (#1 sur le schéma). Il part de l'intersection entre le rayon extrême A′A (**--**) et la limite de l'angle de champ (---) jusqu'à la paroi intérieure du tube. Ainsi tous les rayons arrivant entre l'entrée du tube et le premier baffle ne peuvent pas arriver au détecteur. Pour dimensionner le second baffle (#2), un rayon extrême passant par B et passant tout juste après le premier baffle est tracé, c'est le segment BB′. Le rayon extrême partant de B′ et arrivant sur le bord du capteur est tracé (B′A′). C'est l'intersection de ce dernier avec la limite de l'angle de champ qui détermine la dimension et la position de ce second baffle. Le dernier baffle est construit de la même façon.

En appliquant ce procédé de construction des baffles à l'ensemble composé de la caméra, de l'objectif, du filtre passe-bande et de la roue à filtres, j'ai dessiné le modèle virtuel des baffles (figure 2.11) avant d'en commander la réalisation à l'atelier du LMD. Les baffles ont ensuite été recouverts d'une peinture très absorbante dans la zone spectrale de mesure.

2.2.5 Référence

Le principe théorique de l'utilisation d'une surface de référence pour caractériser le rayonnement solaire incident est décrit dans la partie *Profondeur de bande* de la section 1.3.2. Ce qu'il faut en retenir est que pour mesurer la fluorescence de la végétation, il est nécessaire de comparer les profondeurs de la

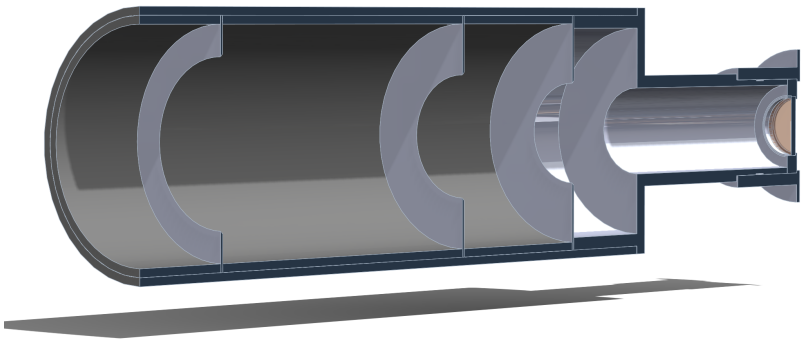


Figure 2.11 – Vue en coupe du modèle virtuel des baffles (réalisé avec SolidWorks). On voit trois enceintes délimitées par des disques ajourés dont les ajours correspondent avec l'angle de champ conique. À droite on distingue un filtre dichroïque permettant de réfléchir le rayonnement situé spectralement en dehors des zones utiles des filtres des canaux de l'instrument.

bande d'absorption dans laquelle la mesure est prise dans la lumière provenant de la végétation et dans le rayonnement solaire incident ; c'est cette mesure différentielle de profondeur de bande qui va permettre d'extraire la mesure de fluorescence. Afin de mesurer la profondeur de bande du rayonnement solaire incident, en pratique on utilise une plaque faite d'un matériau étalonné et non fluorescent (Spectralon, PVC) que l'on place horizontalement devant le champ de vue de l'instrument par intermittence (Moya et coll., 2004; Rascher et coll., 2009; Daumard, 2010) à quelques décimètres de celui-ci. Les mesures dans les différents canaux de l'instrument du rayonnement en provenance de la cible végétale (lumière réfléchie par la végétation et fluorescence) sont alternées avec les mesures du rayonnement en provenance de la référence (lumière solaire réfléchie par la référence) placée juste devant l'instrument.

Le rayonnement solaire incident sur la référence peut différer de celui incident sur le couvert. Trois principales différences entre le couvert et la référence entraînent cette inégalité : leur environnement direct, leur altitude à l'instrument et leur structure.

L'environnement direct de la référence est différent de celui du couvert. En effet, celle-ci est à proximité de l'instrument qui, s'il ne lui cache pas du rayonnement solaire direct (par projection de son ombre), lui cache du rayonnement diffus en provenance du ciel. Les rayons diffusés par l'atmosphère interagissent plus avec les molécules de l'atmosphère que les rayons en provenance directe du Soleil. La profondeur de bande de ce rayonnement diffus est donc plus importante car il est plus absorbé. À cause de ce phénomène, la référence reçoit donc théoriquement un rayonnement dont la bande d'absorption est moins profonde car contenant moins de rayonnement en provenance du ciel.

L'instrument est en général situé en hauteur par rapport au couvert. Pour cette raison, le rayonnement solaire incident traverse moins d'atmosphère avant d'arriver sur la référence que sur le couvert. La profondeur de bande du rayonnement incident est donc plus faible sur la référence que sur le couvert.

La structure de la végétation est beaucoup plus complexe que celle d'une référence plane horizontale. Selon leur orientation les surfaces des feuilles reçoivent plus ou moins de rayonnement direct ou diffus. Par exemple, une feuille à l'ombre d'une autre feuille ne reçoit pas de lumière directe du Soleil et une feuille orientée quasiment parallèlement aux rayons du Soleil en reçoit très peu. Comparer la profondeur de la bande d'absorption dans le rayonnement réfléchi par ces feuilles avec celle du rayonnement réfléchi par une référence plane et horizontale est une grande approximation.

L'idéal pour comparer des profondeurs de bande comparables serait de le faire entre la végétation et une surface de référence non fluorescente placée par alternance à la place du couvert et ayant exactement la même forme. Cela pourrait être envisageable en mesurant la profondeur d'une autre bande d'absorption (du même composé, dans notre cas le dioxygène) qui serait corrélée à la bande de mesure mais où il n'y

aurait pas de fluorescence. Développer une telle stratégie de mesure nécessiterait en soi une étude et ce n'est pas le sujet ici. J'ai donc choisi d'utiliser une solution intermédiaire, l'emploi de deux références : l'une située au niveau de l'instrument et couvrant tout son champ (comme on en fait l'usage habituellement) et l'autre située au niveau du couvert et couvrant une petite partie du champ de vue (de l'ordre du pourcent). La référence placée dans le champ permet une mesure de la profondeur de la bande d'absorption du rayonnement arrivant au niveau du couvert quant celle située devant l'instrument permet d'extrapoler par règle de proportionnalité cette profondeur à celle des autres pixels de l'instrument (ceux qui n'ont pas la référence du couvert dans leur champ de vue). La mesure sur la référence couvrant tout le champ de vue de l'instrument devient alors en quelque sorte une mesure de champ plat (*flat-field*) qui permet de connaître la loi de variation de profondeur selon la position sur le capteur afin d'extrapoler la profondeur mesurée au niveau du couvert à tout le capteur.

Concernant la réalisation, en général, on utilise un électroaimant pour faire passer la plaque de référence devant le champ de vue de l'instrument (par exemple Rascher et coll. (2009)). L'inconvénient de ce système est le temps mis par la référence pour se stabiliser après chaque commutation. J'ai donc opté pour un asservissement du positionnement de la référence par un servomoteur. Cela permet un positionnement de la référence rapide et sans rebonds ainsi que son immobilité lors de coups de vent (contrairement à l'électroaimant qui ne retient pas la référence lorsqu'il est relâché). Le servomoteur est en effet capable de maintenir une opposition à un effort grâce à la vérification et à la correction de sa position en continu.

2.2.6 Logiciel d'acquisition

Le logiciel d'acquisition a été développé principalement en Labview pour le contrôle de la caméra, l'acquisition et l'enregistrement des images ainsi que l'interface de l'utilisateur, et en C pour le contrôle bas niveau de la roue à filtres et du servomoteur déplaçant la référence (figure 2.13).

Le logiciel développé en Labview contrôle notamment le déclenchement de la caméra et ses temps d'exposition. Ce dernier est déterminé en fonction du niveau de saturation de l'image. L'algorithme de contrôle du temps d'exposition autorise la saturation d'un certain nombre de pixels (au maximum 5 %) en ajustant le temps d'exposition de telle façon que le pixel délimitant le 95^{e} centile (c'est-à-dire en classant les pixels par ordre de niveau croissant, le 2 652 157^{e} pixel (soit le nombre de pixels multiplié par 95 % : $1928 \times 1448 \times 0{,}95$)) soit situé entre 80 % et 90 % du niveau maximal d'illumination (soit $2^{12} - 1 = 4095$). Ainsi, si le pixel suivant celui-ci dans l'ordre croissant de niveau est saturé, au maximum 5 % des pixels de l'image seront saturés. Cet algorithme permet d'avoir une bonne dynamique de signaux (c'est-à-dire un bon contraste) sur l'image tout en ne saturant pas trop de pixels.

Il est primordial de contrôler que les pixels de la référence située au niveau du couvert ne sont pas saturés. En effet, on a vu plus haut que j'utilise une référence qui représente dans l'image 1 % du nombre total de pixels, il est donc tout à fait possible que tous ces pixels fassent partie des 5 % de pixels les plus illuminés et soient donc saturés.

Le logiciel Labview permet également le contrôle par un port USB d'un microcontrôleur (monté sur une plateforme Arduino) qui contrôle directement la roue à filtres et le servomoteur pour le déplacement de la plaque de référence. Le protocole de mesure alterne la référence et la végétation ainsi que les trois canaux de mesures de telle façon à minimiser le temps d'acquisition. Le tableau 2.4 montre l'alternance entre les mesures de chaque canal et de la référence ou végétation.

La roue à filtres contient les filtres des trois canaux positionnés côte à côte ainsi que des obturateurs de chaque côté du groupe de canaux (obturateur, C_1, C_2, C_3, obturateur) rendant possible la mesure du courant d'obscurité (*dark current*). Ce courant dépend directement du temps d'exposition et peut varier dans le temps, notamment à cause de la température de la caméra. Il est donc mesuré chaque fois que les six mesures dans les trois canaux ont été prises à condition qu'un *dark* du même temps d'exposition n'ait pas déjà été pris dans l'heure qui précède et que la température de la caméra n'a pas varié de plus de un degré Celsius.

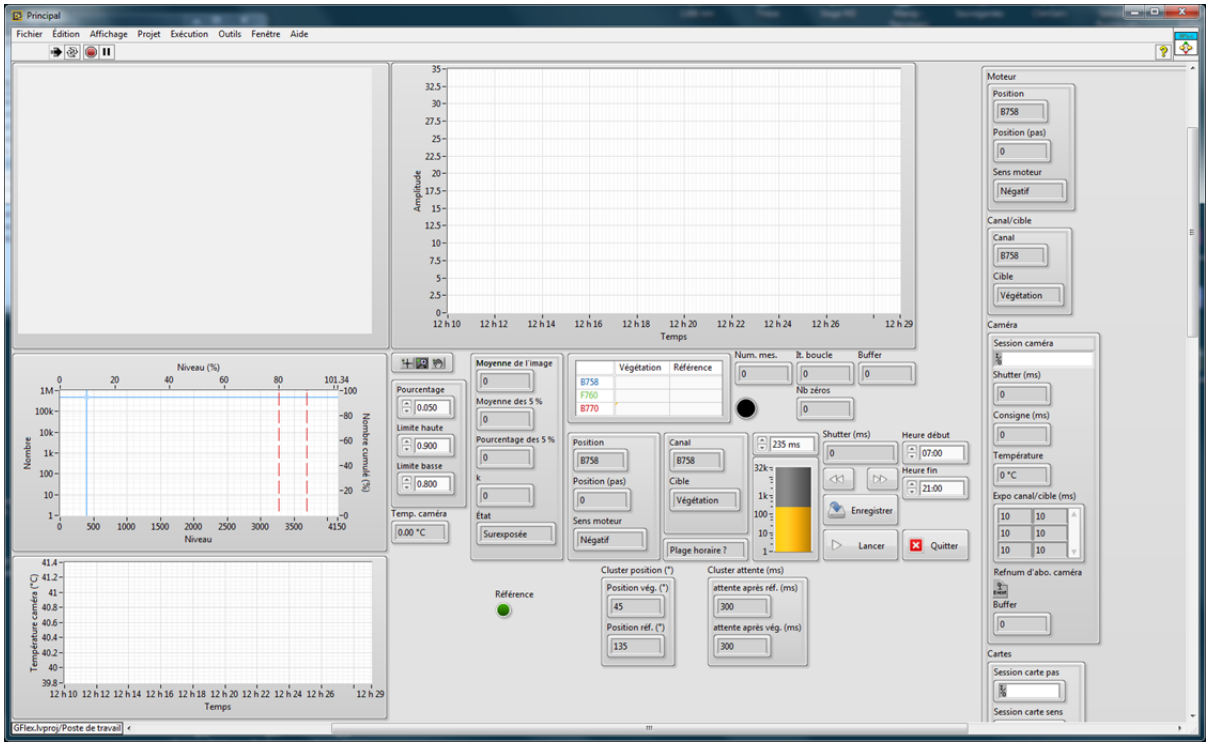


Figure 2.12 – Panneau principal du logiciel d'acquisition développé en Labview. On peut voir en haut à gauche l'image courante de la cible prise dans un des canaux, à droite l'évolution du niveau moyen des images rapporté au temps d'exposition dans les trois canaux sur la cible (□) et sur la référence (×), au milieu à gauche l'histogramme de niveau des pixels dans l'image du canal actuel avec les limites haute et basse (– –) entre lesquelles doit se situer le 95^{e} centile et la position de ce centile (—), et partout ailleurs des informations sur la caméra, le canal actuel et la cible visée (référence ou végétation) et des renseignements divers.

	C_1		C_2		C_3		C_3		C_2		C_1	
	V	R	R	V	V	R	R	V	V	R	R	V
$i_{\text{img}} \equiv ?$ (2)	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
$i_{\text{img}} \equiv ?$ (6)	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	0

Tableau 2.4 – Boucle de mesure pour l'obtention de deux images de fluorescence. Les C_i correspondent aux positions de la roue à filtres sélectionnant les canaux i (pour $i \in \{1\,;2\,;3\}$), V correspond à une position de la référence hors du champ de vue de l'instrument qui voit alors la végétation, et R à une position de la référence dans le champ de vue de l'instrument. Cette enchaînement minimise le nombre de changements de canal et de commutations de la référence. Les deux dernières lignes indiquent la congruence modulo deux et six du numéro de l'image (figure 2.13). On voit que lorsque i_{img} est congru à zéro modulo deux, le canal doit être changé (sauf lorsque le canal doit être répété) ; lorsque i_{img} est congru à un modulo deux, c'est la référence qui doit être commutée. Quand i_{img} est congru à zéro modulo six, les images de la végétation et de la référence ont été acquises dans les trois canaux, il est alors temps de mesurer les *darks*.

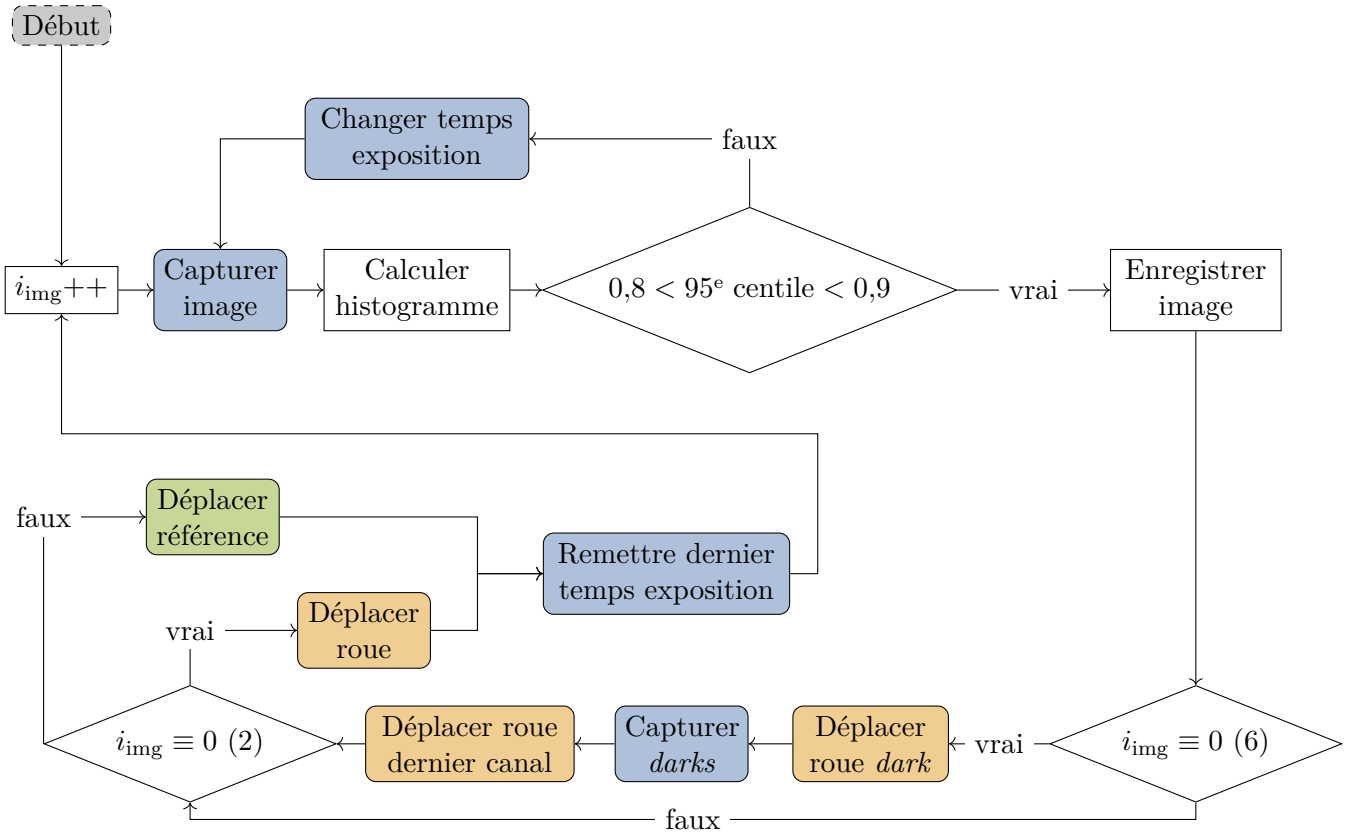


Figure 2.13 – Organigramme de programmation de l'acquisition. L'indice i_{img} correspond au numéro de l'image, les cadres au bords arrondis correspondent aux interactions avec l'instrument : avec la caméra (en **bleu**), avec le microcontrôleur contrôlant la roue à filtres (en **orange**) et le servomoteur asservissant la référence en position (en **vert**), les cadres en losange correspondent à des tests conditionnels sur le numéro de l'image et l'histogramme des pixels. Ce dernier est calculé en niveau d'illumination et le test vérifie si le niveau du pixel du 95e centile est situé entre 80 % et 90 % du maximum possible (4 095).

2.3 Caractérisation de l'instrument

Une fois réalisé, l'instrument doit être calibré et testé afin de pouvoir faire des mesures en unités radiométriques. De nombreux tests ont porté sur la caméra notamment, j'ai testé de nombreux paramètres pouvant influencer le rapport signal sur bruit comme le *binning* matériel (il s'agit du regroupement de puits quantiques du capteur avant leur lecture pour accélérer celle-ci), le gain, le temps d'exposition ou encore la température de la caméra.

2.3.1 Calibration radiométrique

La calibration radiométrique s'effectue séparément pour chaque canal afin de pouvoir convertir les images prises dans chaque canal en mesure radiométrique (en $\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}}$). Pour cela, on utilise une source lumineuse calibrée radiométriquement qui émet comme un corps noir. Celle-ci nous garantit un éclairement donné dans un cône de lumière à sa sortie. On utilise cette source pour éclairer une surface de fluoropolymère (Spectralon, Labsphere Inc.) à très forte réflectivité (supérieure à 99 % aux longueurs d'onde des canaux de l'instrument) et lambertienne. Cette surface calibrée est placée perpendiculaire au faisceau de la source afin de l'éclairer quasi uniformément. L'instrument capture alors dans chaque canal une image de la surface calibrée. Afin d'annuler les fluctuations statistiques, cette mesure est répétée plusieurs fois pour calculer une image moyenne.

Pour effectuer ces mesures, l'instrument est placé sur le côté. Il mesure donc la surface de calibration avec un angle d'observation non nul par rapport à sa normale. La surface de calibration étant lambertienne dans la zone spectrale de mesure, sa luminance est indépendante de l'angle d'observation.

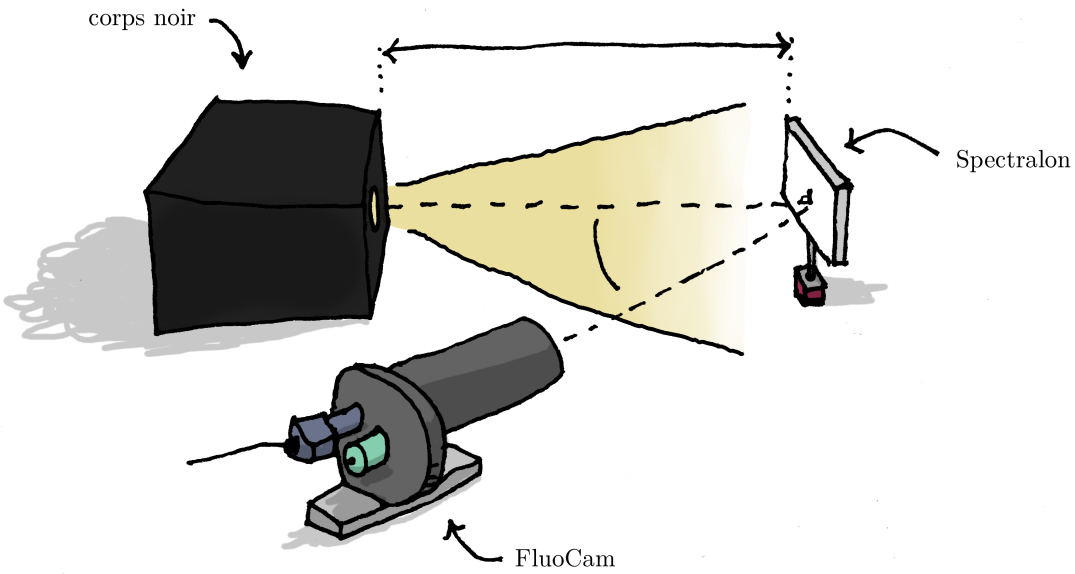


Figure 2.14 – Configuration de calibration de l'instrument (Fluocam) par rapport à la source de lumière (corps noir) et à la surface calibrée (Spectralon).

Connaissant la forme du spectre d'émission de la lampe et les spectres de transmittance des filtres, il est alors possible d'associer à chaque pixel de tous les canaux un rapport de conversion radiométrique donnant la luminance mesurée en fonction du temps d'exposition et du niveau d'illumination du pixel. Ce coefficient, par lequel il faut multiplier le niveau d'illumination d'un pixel i pour obtenir la luminance qu'il mesure dans le canal j, vaut

$$\alpha_{i,j} = \frac{\int_0^{+\infty} L_\mathrm{S}(\lambda) T(\lambda)\, \mathrm{d}\lambda}{\int_0^{+\infty} T(\lambda)\, \mathrm{d}\lambda} \times \frac{t_{\mathrm{exp}_j}}{N_{i,j}}\ , \tag{2.15}$$

avec $\alpha_{i,j}$ le coefficient de conversion radiométrique en $(\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1} \cdot s})$, $L_\mathrm{S}(\lambda)$ la luminance de

la surface de calibration à la longueur d'onde λ (en $\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}}$), T la transmittance du canal j prenant en compte le filtre passe-bande additionnel [4], t_{exp_j} le temps d'intégration appliqué lors de la mesure de calibration pour le canal j (en s) et $N_{i,j}$ le niveau d'illumination mesuré par la caméra pour le pixel i et le canal j.

2.3.2 Tests sur la caméra

Les principaux tests que j'ai effectué sur l'instrument s'intéressaient à la caméra et plus précisément à son rapport signal sur bruit (ou SNR pour *signal-to-noise ratio*). J'ai optimisé les réglages afin de maximiser ce dernier.

Le SNR théorique est limité par le bruit quantique (ou bruit de grenaille, *shot noise* ; dénommé ainsi en raison de son apparence — dans les images où il est visible — d'impact d'arme utilisant la grenaille comme munition). Ce bruit est dû à la fluctuation quantique (en loi de Poisson) des porteurs de charges élémentaires dans le capteur. Il est directement fonction du nombre de charges accumulées dans les puits quantiques du capteur et vaut sa racine carrée. Dans le cas de la caméra de Fluocam ce bruit théorique vaut environ 108 ($\sqrt{11\,586}$; tableau 2.1). Le SNR maximal d'une image est limité par ce bruit et peut donc valoir au maximum 108 également ($x/\sqrt{x} = \sqrt{x}$).

Après optimisation des réglages de la caméra (de gain et d'encodage des niveaux de signal notamment), j'ai mesuré le rapport signal sur bruit en acquérant des images d'une surface blanche éclairée uniformément avec une source de calibration particulièrement stable en intensité. Le bruit d'un pixel peut être assimilé à la déviation standard dès lors que le nombre de mesures est assez grand, j'ai donc acquis une cinquantaine d'images. Le SNR se calcule alors comme le rapport entre le niveau moyen de chaque pixel et sa déviation standard. Après optimisation de la caméra, je trouve un rapport signal sur bruit d'environ 98. Cette valeur est inférieure à la valeur théorique de 108 ce qui signifie que d'autres bruits peuvent intervenir. J'ai testé de nombreux réglages de la caméra pouvant influer sur le rapport signal sur bruit comme le *binning* matériel (il s'agit du regroupement de puits quantiques du capteur avant leur lecture pour accélérer celle-ci), le gain, le temps d'exposition ou encore la température de la caméra.

2.3.3 Mesure de fluorescence

Afin de calculer la fluorescence dans la bande O_2-A à partir des mesures dans les trois canaux sur la référence et sur la végétation, on utilise le FLD (*Fraunhofer line discriminator* ; qui permet de calculer la fluorescence à partir de la mesure de la profondeur d'une bande d'absorption dans les rayonnements incident et en provenance de la végétation ; partie *Profondeur de bande* dans 1.3.2 ; Plascyk (1975)) à trois canaux (3-FLD ; Meroni et Colombo (2006); Daumard (2010)) au lieu de deux, de façon à réduire la puissance des hypothèses faites sur la forme du spectre de réflectance du couvert. La mesure dans un canal supplémentaire permet de considérer la réflectance du couvert comme une fonction affine de la longueur d'onde plutôt que comme constante.

Afin de retrouver la fluorescence, il convient d'expliciter les composantes lumineuses des différentes mesures de la référence et du couvert.

Au niveau du sol, la luminance de la végétation (L_i) à une longueur d'onde donnée λ_i vaut

$$L_i = \frac{\rho_i \times I_i}{\pi} + F_i \ , \tag{2.16}$$

avec ρ_i la réflectance de la cible à la longueur d'onde λ_i, I_i l'éclairement solaire à λ_i et F_i la fluorescence induite par le rayonnement solaire à λ_i.

Une première hypothèse forte est faite en décrivant avec cette équation la luminance de la végétation quant au caractère lambertien de celle-ci. En effet, pour calculer la luminance L_i de la végétation à partir de son éclairement (ou irradiance) I_i, il convient de connaître sa loi angulaire de diffusion de la lumière ; ici cette dernière est considéré comme uniforme. En réalité, dépendante de la structure du couvert, la

4. Ne pas connaître la transmittance spectrale des autres organes optiques de l'instrument ne pose pas de problème si celle-ci est constante dans la zone spectrale d'intégration. C'est l'hypothèse que l'on fait ici.

distribution angulaire de la luminance de la végétation n'est le plus souvent pas orthotrope. Le cas théorique représenté par cette équation est celui d'une feuille géante, horizontale et lambertienne [5].

De la même façon, la luminance de la référence s'écrit

$$L'_i = \frac{\rho'_i \times I_i}{\pi} \ . \tag{2.17}$$

La réflectance de la référence (ρ'_i) est connue et proche de un. En combinant les équations 2.16 et 2.17, pour chaque longueur d'onde λ_i, on obtient

$$L_i = \rho_i \times \frac{L'_i}{\rho'_i} + F_i \ , \tag{2.18}$$

où L_i et L'_i sont mesurés et ρ_i et F_i sont inconnus.

Dans le cas de la mesure de la fluorescence dans la bande O_2-A, i va de 1 à n, n valant 3 puisqu'il y a trois canaux de mesure. Il y a donc n équations, soit 3 équations et $2n$ inconnues, soit 6 inconnues. Il faut donc ajouter des hypothèses afin d'augmenter le nombre d'équation pour résoudre ce système incomplet.

La première hypothèse est de considérer que les termes F_i ont une forme connue et que l'on peut les écrire comme

$$F_i = K_i \times F_{\text{in}} \ , \tag{2.19}$$

où les K_i sont des coefficients donnant la fluorescence F_i à partir de la fluorescence f_{in} au fond de la bande d'absorption pour un spectre de fluorescence de feuille mesuré en laboratoire. Cette hypothèse gage sur la proportionnalité de la fluorescence entre les trois canaux, autrement dit, que la forme du spectre de fluorescence ne varie pas.

Ce modèle de fluorescence apporte $n-1$ équations (puisque l'équation pour la longueur d'onde du fond de la bande d'absorption n'en est pas une) et aucune nouvelle inconnue.

Ainsi, on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} L_i = \rho_i \times \frac{L'_i}{\rho'_i} + F_i, & i \in \{1,...n\} \\ F_i = K_i \times F_{\text{in}}, & i \in \{1,...n, i \neq \text{in}\} \ . \end{cases} \tag{2.20}$$

Ce système d'équations est toujours sous-déterminé car il comporte $2n-1$ équations et $2n$ inconnues.

Pour le compléter, on ajoute un modèle de réflectance du couvert tel que

$$\rho(\lambda) = a + b \times \lambda \ . \tag{2.21}$$

Cela apporte n équations et deux inconnues que sont a et b. La réflectance du couvert est considérée comme linéaire, ce qui est une hypothèse très réaliste (Daumard, 2010).

Le système d'équations devient alors

$$\begin{cases} L_i = \rho_i \times \frac{L'_i}{\rho'_i} + F_i, & i \in \{1,...n\} \\ F_i = K_i \times F_{\text{in}}, & i \in \{1,...n, i \neq \text{in}\} \\ \rho_i(\lambda_i) = a + b \times \lambda_i, & i \in \{1,...n\} \ . \end{cases} \tag{2.22}$$

Ce nouveau système a $3n-1$ équations et $2n+2$ inconnues, soit 8 dans notre cas ($n=3$), et peut donc être résolu.

La résolution analytique de ce système pour F_2 vaut

$$F_2 = \frac{L_1 L'_2 L'_3 \rho'_1(\lambda_2 - \lambda_3) + L_2 L'_1 L'_3 \rho'_2(\lambda_3 - \lambda_1) + L_3 L'_1 L'_2 \rho'_3(\lambda_1 - \lambda_2)}{K_1 L'_2 L'_3 \rho'_1(\lambda_2 - \lambda_3) + L'_1 L'_3 \rho'_2(\lambda_3 - \lambda_1) + K_3 L'_1 L'_2 \rho'_3(\lambda_1 - \lambda_2)} \ . \tag{2.23}$$

Dans le cas de Fluocam, j'ai utilisé $\lambda_1 = 758$, $\lambda_2 = 760$ et $\lambda_3 = 770$ (tableau 2.3).

Cette équation est appliquée indépendamment pour les pixels des images des canaux de l'instru-

5. Un couvert végétal, en raison de la présence d'éléments suivant des directions privilégiées (les feuilles), présente une réflectance directionnelle, il n'est donc pas lambertien.

ment afin d'obtenir une image de fluorescence. La figure 2.15 en est un exemple mesuré au laboratoire. On peut voir la fluorescence à 760 nm en fausses couleurs. Le blanc indique une fluorescence proche de 3 $\mathrm{mW \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}}$, le rouge de 1 $\mathrm{mW \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}}$, le noir de 0 et le vert de $-0{,}5$ $\mathrm{mW \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}}$.

La zone bruitée de vert, noir et rouge en haut de l'image correspond à la surface de référence (ici du PVC blanc dépoli). La fluorescence qui y est mesurée est centrée sur zéro avec un certain écart-type dû aux différents bruits de mesure.

Les flux de fluorescence mesurés pour les différents pixels sont à peu près proportionnels à la lumière réfléchie, on voit donc apparaître les ombres des feuilles sur d'autres feuilles ainsi que les nervures qui étant en relief présentent une partie plus éclairée et une partie plus sombre.

Certains artefacts apparaissent sur l'image en bordure des feuilles, des pétioles ou des tiges. Les contours de ces éléments de l'image montrent une fluorescence négative (en vert sur l'image) d'un côté et positive très grande de l'autre (en blanc). Cela est dû à un décalage spatial de ces éléments entre les images des différents canaux ainsi qu'à une différence de fluorescence entre ces éléments et le fond qui les entoure. Cette acquisition a été faite dans des conditions assez faibles de luminosité imposant des temps d'exposition suffisamment longs pour qu'entre deux canaux la plante ait eu le temps de bouger (par circumnutation), ceci explique le décalage spatial des éléments de la plante entre les images. La fluorescence apparente est donc calculée pour chaque pixel concerné avec des éléments différents, faisant apparaître des valeurs extrêmes de fluorescence n'ayant aucune réalité.

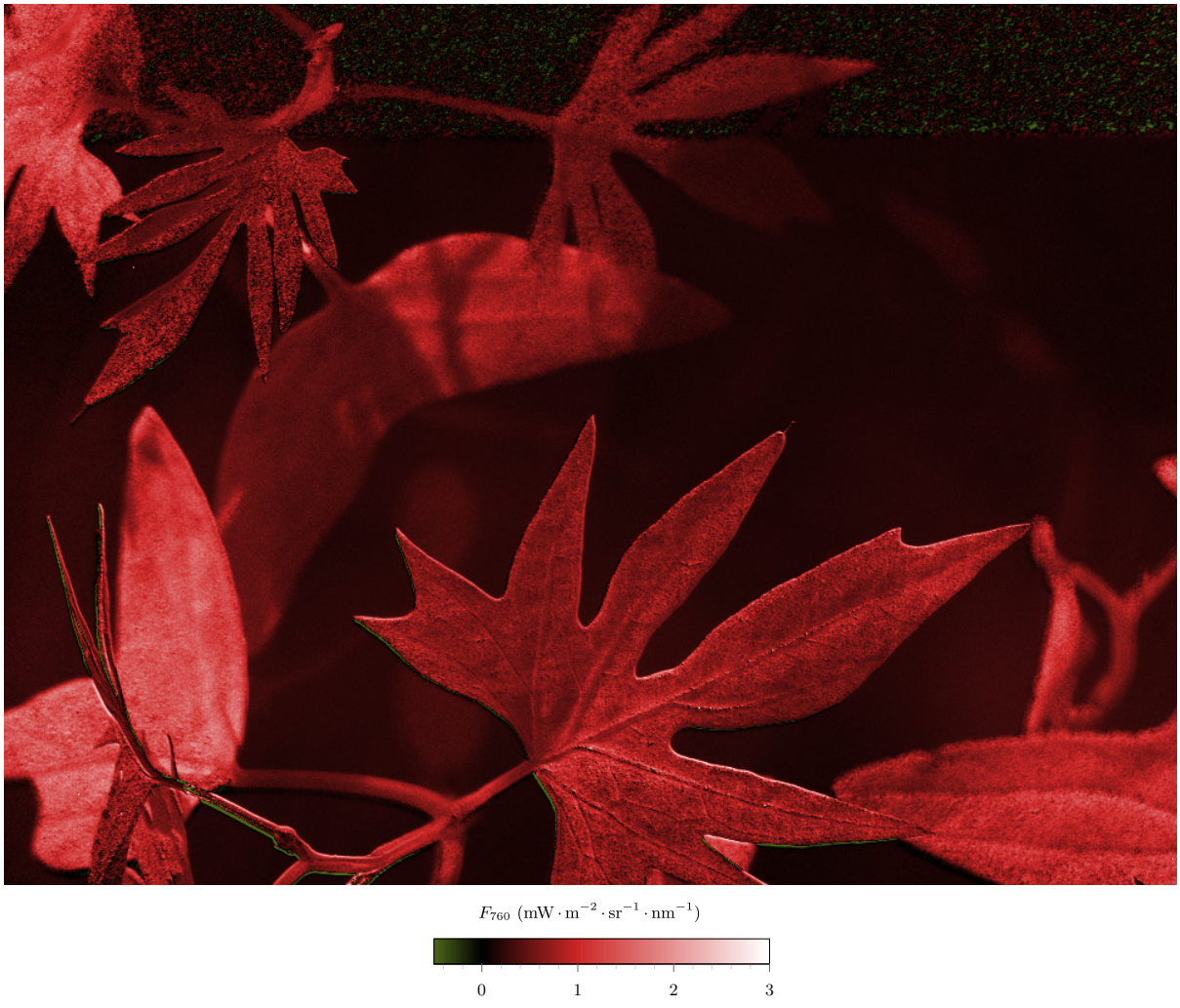


Figure 2.15 – Image de fluorescence d'un plant d'ipomée (*Ipomea* × *sloteri*) à 760 nm obtenue avec Fluocam. On voit la référence située dans l'image en haut qui présente une fluorescence centrée sur zéro.

2.4 Campagne de mesure en champ

Une campagne de mesure a été organisée en octobre 2014 durant deux semaines à Avignon, sur la plateforme de l'Inra. Fluocam a mesuré plusieurs jours durant des images de la fluorescence d'un champ de sorgho. Cette campagne de mesures à laquelle s'est greffé Fluocam était prévue dans le cadre du projet Calsif qui a pour but de développer des outils expérimentaux et théoriques afin de clarifier les liens entre fluorescence à l'échelle du couvert et état écophysiologique de la végétation. Durant cette campagne, en plus de Fluocam, plusieurs instruments de mesure — passif et actif — de la fluorescence de la végétation ont mesuré sur la même cible.

Cette campagne de mesure a été une opportunité dans le développement de Fluocam et au projet Calsif. En effet, elle a permis d'offrir un cadre expérimental aux mesures de Fluocam : champ de sorgho, présence d'autres instruments à des fins de comparaison des mesures ; ainsi que d'apporter par l'imagerie des informations complémentaires aux mesures effectuées par les instruments initialement prévus, notamment sur l'influence de la structure du couvert sur les mesures de fluorescence.

Le développement de Fluocam n'était pas encore complètement abouti au moment des mesures mais la participation de cet instrument à la campagne a néanmoins été positif. En effet, malgré un problème de contamination lumineuse qui a pu être corrigé en post-traitement, la présence de Fluocam à la campagne a permis d'obtenir un jeu de mesures de cycles diurnes de la fluorescence du couvert qui a pu être étudié. Ce dernier a permis d'apporter des informations sur l'influence de la structure de la végétation sur le signal de fluorescence mesuré grâce aux images résolues à l'échelle de la feuille.

2.4.1 Objectifs de la campagne

La validation des données mesurées par Fluocam consiste à vérifier leur vraisemblance ainsi qu'à les comparer avec celles d'autres instruments. L'instrument présent lors de la campagne et s'approchant le plus de Fluocam par son concept instrumental est Airflex que l'on a alors choisi comme instrument de référence. En effet, bien qu'il n'utilise pas de roue à filtres mais effectue des mesures en parallèle, comme Fluocam il utilise des filtres interférentiels placés notamment dans la zone spectrale de la bande d'absorption O_2-A et est pourvu d'une référence commutable. Afin de comparer les données d'Airflex et de Fluocam, il a été prévu de moyenner les pixels des images des différents canaux de la caméra avant de calculer la fluorescence. Les mesures de Fluocam deviennent alors des mesures monopixels ce qui permet de s'approcher plus encore de la configuration instrumentale d'Airflex afin de comparer leurs mesures.

Une fois les mesures de Fluocam validées, le but a été d'apprécier l'apport de l'imagerie pour l'interprétation du signal de fluorescence du couvert. La résolution du pixel de l'ordre du millimètre (2 mm avec un *binning* de 4×4 pixels à la distance de mesure de la campagne) permet de résoudre spatialement le couvert dans sa complexité. D'autres mesures imagées de la fluorescence d'un couvert sont présentes dans la littérature, mais à des résolutions plus grandes (Zarco-Tejada et coll., 2009; Rascher et coll., 2015). À partir des mesures de Fluocam, des analyses des images de fluorescence ont été effectuées en segmentant les images par zones distinctes et par segmentation automatique afin d'extraire des informations synthétiques relatives à la structure (comme les niveaux de fluorescence ou le rendement de fluorescence des parties du couvert à l'ombre ou au soleil).

Grâce aux images de fluorescence mesurées par Fluocam, il a été possible d'interpréter les variations diurnes des signaux monopixels mesurés par les autres instruments, notamment par Airflex. Cette interprétation vise à relier les variations diurnes du signal de fluorescence des différentes zones de l'image au signal global mesuré par les instruments monopixels.

2.4.2 Description de la campagne

2.4.2.1 Instruments présents lors de la campagne

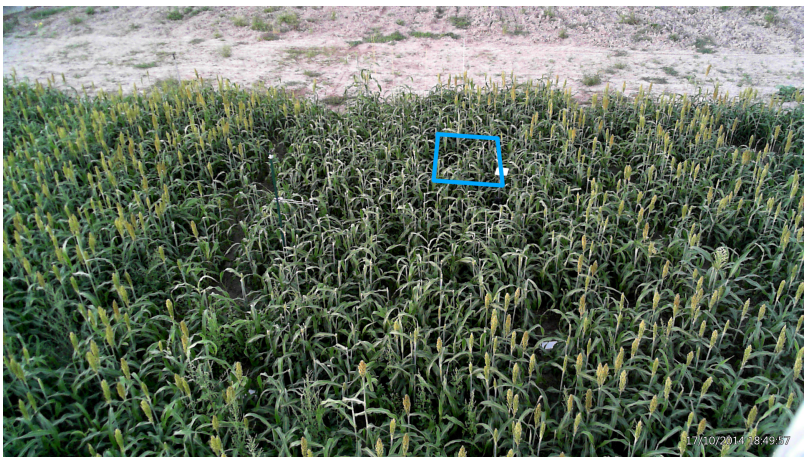
Lors de la campagne de mesure, différents instruments ont été utilisés pour mesurer la fluorescence de la cible végétale, des grandeurs la caractérisant ou les données environnementales. En plus de Fluocam, Airflex a mesuré les cycles diurnes de fluorescence induite par le Soleil. Un instrument similaire au Laser-PAM (Ounis et coll., 2001), le Blue-Lidar, a mesuré les variations du rendement de fluorescence au

cours des différents jours de mesure. Les spectres de radiance de la végétation et de la lumière solaire incidente ont également été acquis avec l'instrument Spectro-Flex. Des mesures sur feuilles ont permis de déterminer la distribution du contenu en chlorophylle des feuilles dans le couvert (contenu surfacique en chlorophylle de 54 ± 9 µg $\cdot$ cm^{-2} avec un Dualex (Force-A)), ainsi que la réflectance et la transmittance des feuilles (avec un spectromètre). En plus d'un instrument mesurant le PAR ainsi que la fraction diffuse du rayonnement solaire, des données météorologiques ont été acquises par divers instruments de la plateforme expérimentale de l'Inra.

Figure 2.16 – Photographie de Fluocam, de Blue-Lidar et des fibres optiques d'entrée d'Airflex et de Spectro-Flex. On peut voir les références commutables de Fluocam, d'Airflex et de Spectro-Flex.

2.4.2.2 Configuration de mesure

Les instruments de mesure de la fluorescence (Airflex, Blue-Lidar et Fluocam) ainsi que Spectro-Flex ont mesuré à distance (10 m) depuis un échafaudage situé à environ 4 m du sol le champ de sorgho (figure 2.16). L'angle zénithal de visée était d'environ 65°.



(a) Champ de sorgho et cible de Fluocam (bleu).

(b) Cible vue par Fluocam à 758 nm.

Figure 2.17 – Champ de sorgho et cible de Fluocam avec la référence en PVC blanc (dans le quart inférieur droit du champ de vue).

2.5 Procédures de correction

Cette section décrit la correction qui a été appliquée aux mesures de Fluocam pour corriger leur contamination par de la lumière parasite et la correction appliquée aux mesures sur la référence non fluorescente.

2.5.1 Correction de la lumière parasite

Des mesures sur des cibles caractérisées non fluorescentes ont mis en évidence une contamination des mesures de Fluocam par une lumière parasite. Une modélisation de cette contamination a permis de déterminer l'existence d'une contamination à composante « spectrale » et « non spectrale » ; la contamination *spectrale* étant due à une lumière correspondant à la zone spectrale mesurée mais ne provenant pas de la cible, la composante *non spectrale* à une lumière provenant de la cible mais ne correspondant pas à la zone spectrale que l'on veut mesurer. Ces effets peuvent être corrigés respectivement par l'ajout de baffles coupant le rayonnement ne provenant pas de la cible mais arrivant tout de même au capteur et par l'ajout d'un filtre passe-bande devant les optiques afin de réduire la transmittance de l'instrument dans les zones spectrales hors de la bande utile des filtres.

A été faite l'hypothèse que la contamination était homogène sur toute l'image et qu'elle correspondait au niveau moyen des pixels les moins lumineux respectivement pour chaque canal. Afin d'annuler ces effets de lumière parasite, les images de luminance mesurées par Fluocam dans chaque canal ont donc été corrigées en retranchant le niveau de luminance des 500 pixels (0,018 %) les moins éclairés. Cette correction est appliquée à toutes les mesures présentées dans la suite de ce chapitre ; cette correction invalide l'usage des unités radiométriques des mesures de l'instrument, mais l'on choisit de présenter tout de même les luminances issues des mesures de Fluocam avec des unités de luminance ($\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}}$) que l'on doit donc considérer comme relatives.

2.5.2 Mesure de champ plat

Habituellement, la mesure de la forme de la bande d'absorption est effectuée en prenant des mesures dans chaque canal de l'instrument sur une référence commutable passant dans le champ de vue de l'instrument à quelques décimètres de ce dernier. On a choisi ici d'améliorer cette mesure en plaçant une référence horizontale (en PVC blanc) captant le rayonnement solaire incident au niveau de la végétation (figure 2.17b). L'environnement de la référence placée juste au-dessus de la végétation est alors très proche de celui de la végétation, contrairement à celui d'une référence placée proche de l'instrument. La mesure de la forme de la bande d'absorption est alors représentative du rayonnement incident sur la végétation.

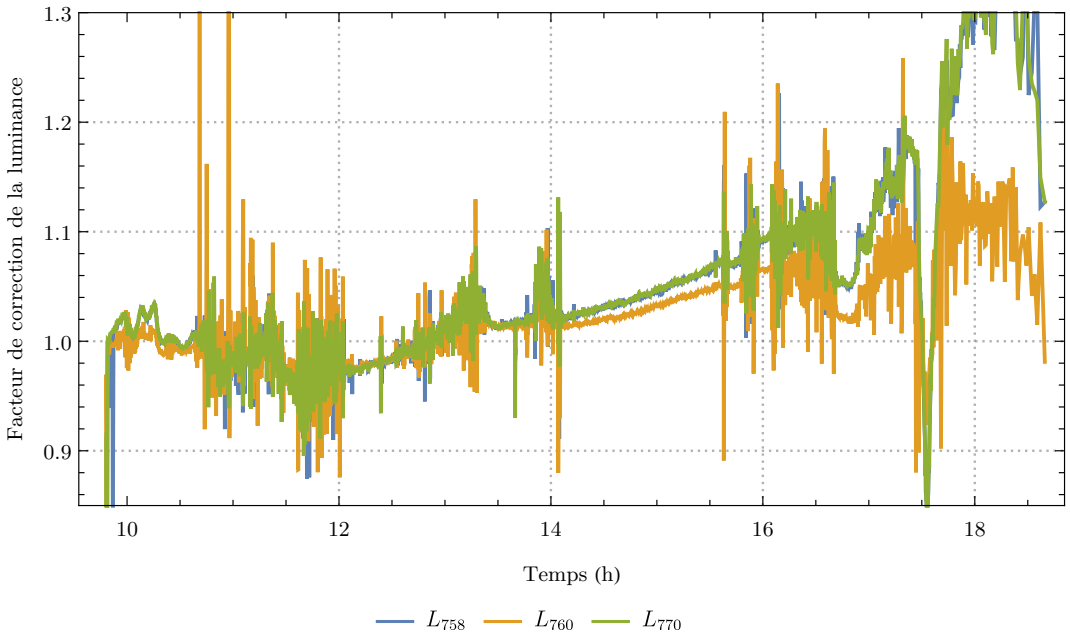


Figure 2.18 – Facteur de correction en fonction du temps pour les trois canaux L_{758} (**bleu**), L_{760} (**orange**) et L_{770} (**vert**).

La mesure dans chaque canal de la luminance de la référence placée dans le champ ne concerne cependant que quelques pixels de l'image mesurée. Pour déduire de cette mesure la luminance qu'aurait une référence placée au niveau du champ et qui couvrirait tout le champ de vue de l'instrument, on utilise une correction de champ plat (*flat field correction*, FFC). La mesure de FFC est une mesure de la luminance d'une surface homogène de réflectance élevée qui permet de connaître le lien de proportionnalité entre les niveaux des pixels de l'image. Dans le cas de Fluocam, cette relation dépend de la sensibilité des pixels ainsi que de la forme du spectre de la lumière mesurée. En effet, la fonction instrumentale de chacun des pixels est spectralement différente (2.1.3), ainsi une variation de la forme du spectre de la lumière mesurée ne va pas être mesurée de la même façon par tous les pixels. Une simple calibration radiométrique sur un spectre localement plat (tel celui d'un corps noir) ne suffit donc pas à connaître la relation entre les niveaux mesurés par les pixels.

Afin d'extrapoler la mesure effectuée sur les pixels voyant la référence dans le champ aux autres pixels, on utilise une seconde référence située au niveau de l'instrument qui couvre tout le champ de vue de ce dernier. Cette mesure de FFC permet de connaître la relation reliant chacun des pixels dans ces conditions de mesure.

Le niveau de gris I_{p_i} qu'un pixel p_i mesurerait dans un canal de l'instrument si une référence de luminance $L_{\text{réf}}$ couvrant tout le champ de vue de l'instrument était placée au niveau du champ vaut alors

$$I_{p_i}(L_{\text{réf}}) = I_{p_j}(L_{\text{réf}}) \times \frac{I_{p_i}(L_{\text{FFC}})}{I_{p_j}(L_{\text{FFC}})} \tag{2.24}$$

avec $I_{p_i}(L_{\text{réf}})$ le niveau de gris mesuré par le pixel p_i regardant une référence homogène hypothétique de luminance $L_{\text{réf}}$ placée au niveau de la végétation, $I_{p_j}(L_{\text{réf}})$ le niveau de gris mesuré par le pixel p_j regardant la référence placée au niveau de la végétation (ne couvrant pas tout le champ de vue de l'instrument), $I_{p_i}(L_{\text{FFC}})$ le niveau de gris mesuré par le pixel p_i regardant la référence homogène couvrant tout le champ de vue de l'instrument et placée au niveau de l'instrument, $I_{p_j}(L_{\text{FFC}})$ le niveau de gris mesuré par le pixel p_j regardant cette même référence.

La figure 2.18 montre les cycles diurnes des facteurs de correction (rapport entre la luminance mesurée sur la référence dans le champ et la luminance mesurée sur la référence commutable) pour les trois canaux de Fluocam. On peut voir que ce facteur peut être différent de 1 et qu'il varie au cours de la journée, ce qui montre respectivement que les références dans le champ et devant l'instrument ne reçoivent pas le même rayonnement et que celui-ci varie différemment sur ces deux références (cela peut être dû à une différence

d'orientation ou a une différence de fraction directe (et diffuse) reçue par les références). De plus, on aurait pu penser que les facteurs de corrections seraient différents pour les trois canaux, mais on observe qu'ils sont identiques pour les deux bords. Cela est dû à la différence entre la fraction directe (et diffuse) reçue par la référence dans le champ et par la référence juste devant l'instrument. Les changements brutaux et importants que l'on observe dans ces facteurs de corrections sont dus aux changements lumineux rapides apparus au cours de la journée. L'instrument mesurant en série, ces changements ne sont pas forcément mesurés par deux images successives de la référence proche de l'instrument et de celle au niveau du champ, engendrant des facteurs de correction erronés car mesurés pour des conditions lumineuses différentes.

2.6 Comparaison avec les autres instruments

Il s'agit ici de comparer les mesures obtenues par Fluocam avec celles des autres instruments, notamment avec celles d'Airflex. On ne s'intéresse dans cette étude comparative qu'à la journée du 16 octobre 2014. Les mesures de luminance des canaux de Fluocam ont été moyennées sur toute l'image afin de se rapporter à un instrument monopixel et pouvoir comparer les mesures avec celles d'Airflex.

Pour comparer la forme des cycles diurnes des luminances des canaux d'Airflex et de Fluocam sur la cible (L) et sur la référence (L'), on a normalisé les cycles diurnes de Fluocam par la valeur de la luminance maximale d'Airflex dans chaque canal. La figure 2.19 montre ces cycles diurnes. On peut voir une très bonne corrélation relative (sur la *forme* des cycles diurnes) de ces canaux (RMS $\geq$ 88 %). Cela indique que les formes des fonctions spectrales des filtres des deux instruments sont relativement proches puisque dans le cas contraire, les variations de la forme du spectre solaire au cours de la journée auraient fait varier différemment les cycles diurnes des luminances. Cependant les différences de profondeur mesurées par Airflex et Fluocam (visibles sur la figure 2.20) montrent que les filtres du fond ne sont pas placées exactement au même endroit.

La figure 2.20 montre pour Airflex et Fluocam les cycles diurnes de la profondeur calculée comme le rapport L_{758}/L_{760} mesurée sur la cible (P) et sur la référence (P'). On voit que les profondeurs mesurées par Fluocam sont plus grandes que celles d'Airflex. Cela est probablement dû à un positionnement spectral plus précis des filtres dans le fond de la bande. De plus, la courbure des profondeurs calculées à partir des mesures de Fluocam est plus importante (c'est-à-dire que les profondeurs sont plus grandes le soir et le matin par rapport au midi solaire) que pour Airflex. Cette différence de courbure peut se voir si l'on réduit l'échelle des profondeurs de Fluocam pour que les courbes se superpose au midi solaire (cette figure n'est pas présentée). Cette différence de courbure s'explique par la légère différence que l'on peut observer sur les cycles diurnes des figures 2.19c et 2.19f. En effet, on y voit la luminance mesurée par Fluocam dans la bande d'absorption plus petite que celle d'Airflex lorsque l'on s'éloigne du midi solaire, ce qui a pour effet d'augmenter plus la profondeur.

En calculant la différence relative entre les profondeur de la référence (P') et de la cible (P) comme $(P' - P)/P$ pour Airflex et Fluocam, on peut observer une assez bonne corrélation entre le midi solaire et le 16 h 30 (figure 2.21). Ce calcul basé sur la différence relative de profondeur donne une bonne estimation de la fluorescence même si il s'affranchit des problèmes de variation de la réflectance de la cible. Ce résultat rappelle que malgré des fonctions spectrales quelque peu différentes, deux instruments vont mesurer une fluorescence équivalente du fait du principe de mesure relatif cible — référence.

Si l'on calcule F_{760} à partir des trois canaux de mesure (section 2.3.3) pour Airflex et Fluocam, on obtient la figure 2.22. On retrouve les mêmes divergences entre les cycles diurnes que pour la figure 2.21 avant le midi solaire et une bonne corrélation entre le midi solaire et 16 h 30.

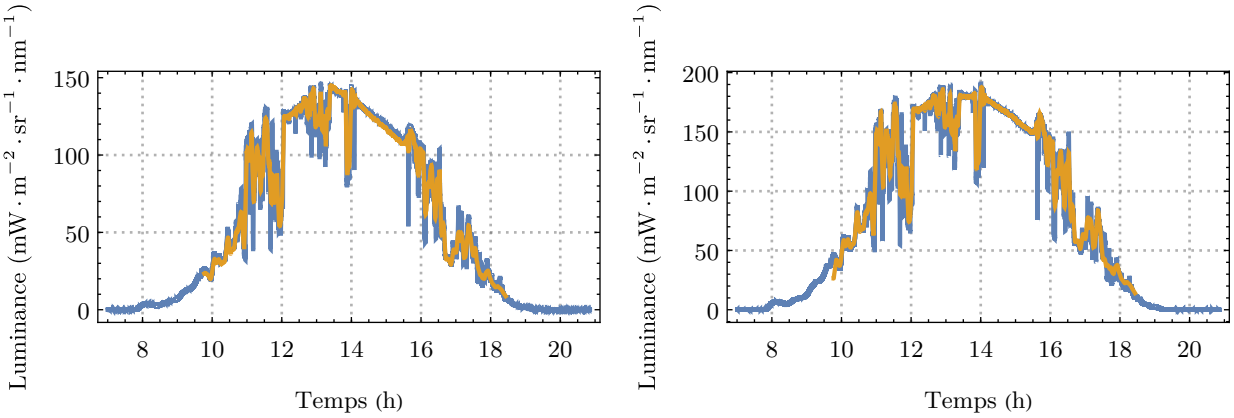
Ces résultats montrent un assez bon accord entre les mesures d'Airflex et de Fluocam d'un point de vue de la forme du cycle diurne (c'est-à-dire pas en valeur absolue). Les mesures de Fluocam ayant subi une correction rendant caduque la calibration radiométrique, il n'est pas possible d'aller plus loin dans la comparaison. Ces résultats sur les cycles diurnes de fluorescence relative intégrée sur toute l'image permettent de valider les mesures non radiométriques et monopixels de Fluocam.

On peut également comparer les mesures de Fluocam avec celles du Blue-Lidar qui mesure les flux de fluorescence de la végétation induits par un laser. Dans ce cas, le flux de lumière excitatrice de la fluorescence étant constant, les flux de fluorescence mesurés sont assimilables à un rendement de fluorescence. La figure 2.23 montre un indice de rendement calculé comme le rapport entre F_{760} et L_{758} pour Fluocam

et Airflex, ainsi que le rendement mesuré avec le Blue-Lidar (F_S). On peut voir que le rendement mesuré par le Blue-Lidar varie peu au cours de la journée. Les indices de rendement d'Airflex et de Fluocam sont normalisés par le maximum pour pouvoir être comparés au rendement du Blue-Lidar. On voit que la forme de l'indice d'Airflex est assez différente, ce dernier augmente le matin et se stabilise de 13 h à 15 h 30, pour diminuer ensuite jusqu'au soir. Concernant l'indice calculé avec les images moyennées de Fluocam, on observe également une augmentation le matin jusqu'à environ 13 h puis un plateau jusqu'à 15 h 30 et enfin une diminution jusqu'au soir. Dans le cas de Fluocam les variations sont plus grandes mais la forme générale est très similaire à celle d'Airflex. Les différences entre les cycles diurnes des instruments passifs avec le Blue-Lidar peuvent être imputées à des effets de structures auxquels sont plus sensibles les instruments passifs (notamment à cause des variations diurnes de rayonnement absorbé). Concernant les différences entre Fluocam et Airflex, il est difficile de statuer, il est possible que les différences soient dues à la différence entre les cibles (50 % de recouvrement entre les cibles des deux instruments) mais également pendant les changements brutaux des conditions d'illumination à la lenteur relative de Fluocam qui entraîne une décorrélation des images des différents canaux que ne subit pas (ou dans une moindre mesure) Airflex.

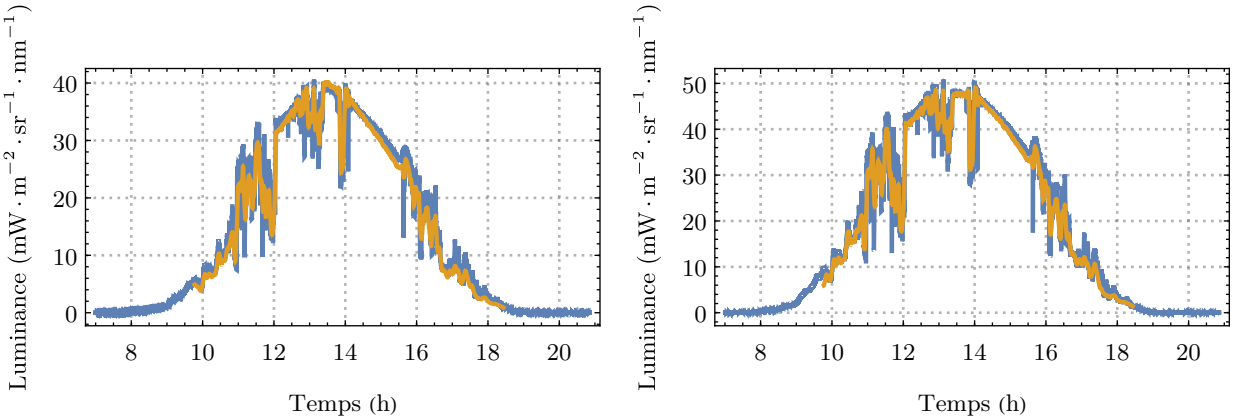
2.7 Analyse des images

Il s'agit dans cette section d'analyser plus en détail les images. L'analyse la plus poussée consisterait en l'étude de chacun des pixels de l'image. Une telle analyse donnerait cependant des résultats qui n'auraient rien de synthétique. La cible de la mesure, malgré sa complexité, contient des points qui se comportent de manière similaire, une façon synthétique d'étudier les images est de grouper ces zones et de les étudier séparément. La segmentation automatique est un moyen de former ces groupes. À partir d'ici, les images de fluorescence ne sont plus moyennées dans leur ensemble et les résultats présentés sous forme d'image correspondent au même instant de la journée du 16 octobre (à 14 h 19 (élévation solaire de 35,8° et midi solaire à 13 h 28)).



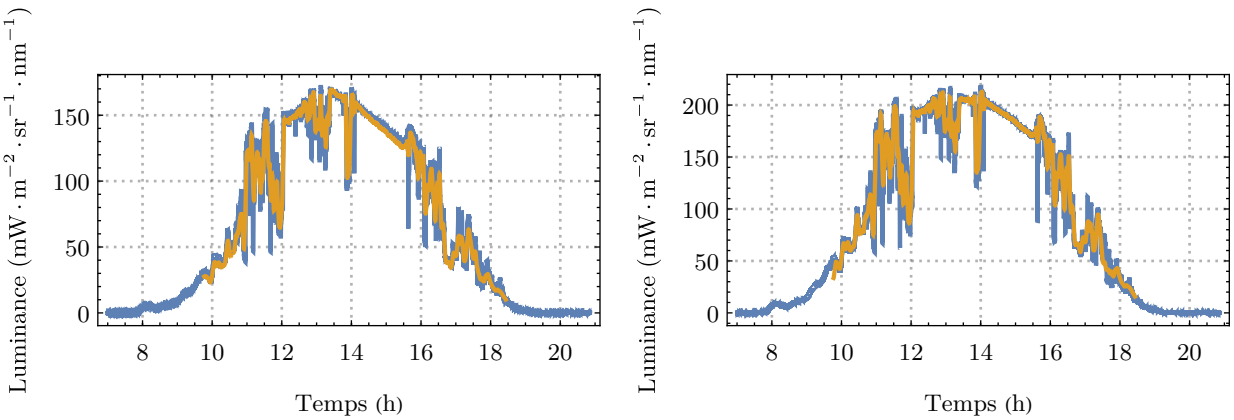
(a) L_{758} en fonction du temps (RMS = 90 %).

(b) L'_{758} en fonction du temps (RMS = 88 %).



(c) L_{760} en fonction du temps (RMS = 90 %).

(d) L'_{760} en fonction du temps (RMS = 90 %).



(e) L_{770} en fonction du temps (RMS = 89 %).

(f) L'_{770} en fonction du temps (RMS = 90 %).

Figure 2.19 – Luminances (respectivement en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$ et en unité arbitraire) des canaux d'Airflex (en **bleu**) et de Fluocam (en **orange**) en fonction du temps sur la cible et sur la référence. La luminance de chaque canal de Fluocam a ici été normalisée par rapport au maximum de la luminance de chaque canal d'Airflex.

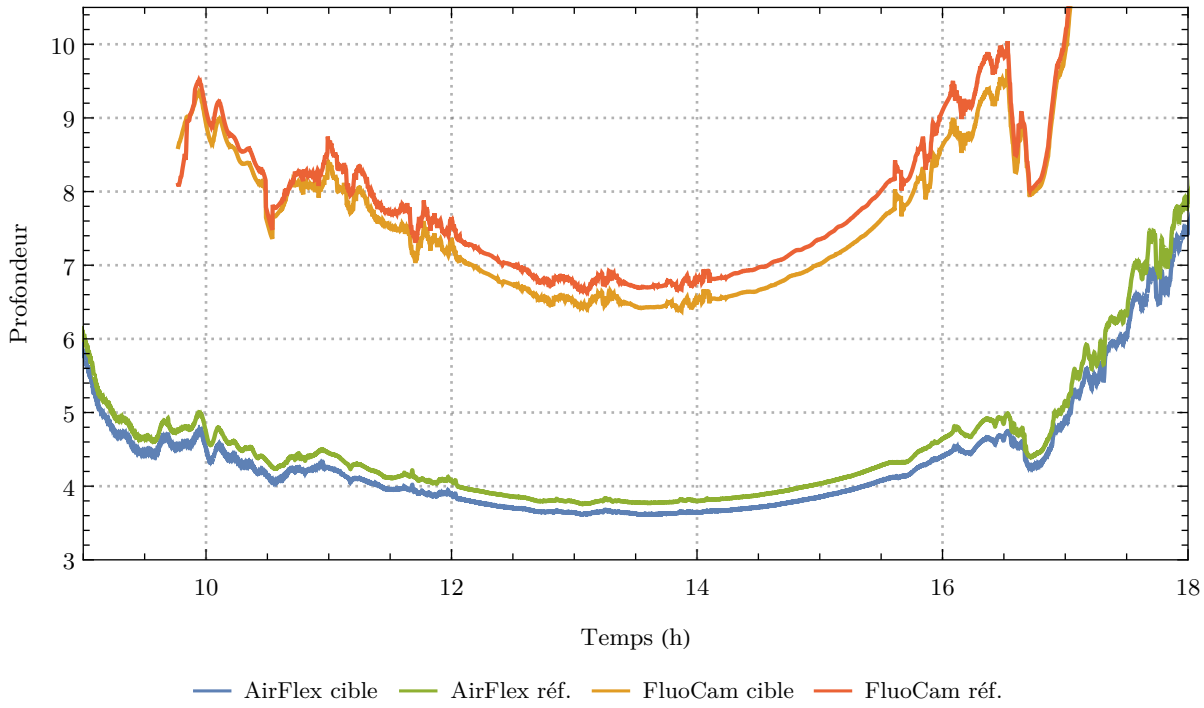


Figure 2.20 – Cycles diurnes de la profondeur calculée comme L_{758}/L_{760} pour Airflex et Fluocam sur la cible (Airflex en **bleu** et Fluocam en **orange**) et sur la référence (Airflex en **vert** et Fluocam en **rouge**).

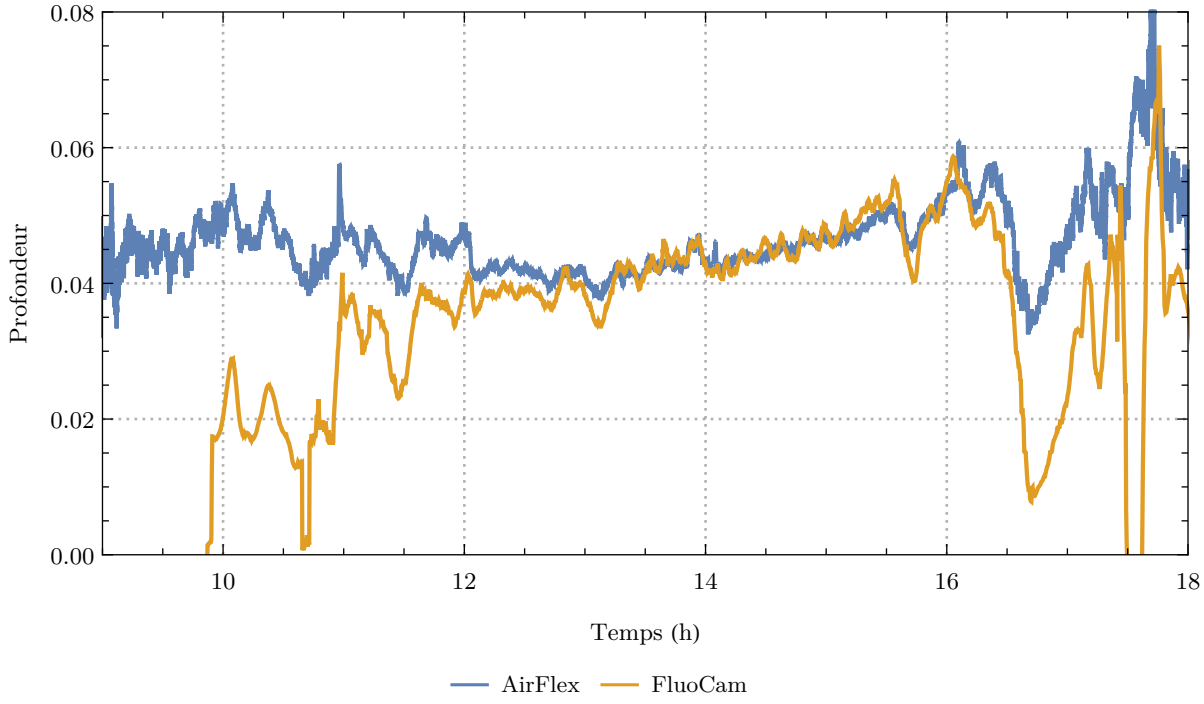


Figure 2.21 – Cycles diurnes de la différence relative des profondeurs de la référence et de la cible pour Airflex (**bleu**) et Fluocam (**orange**).

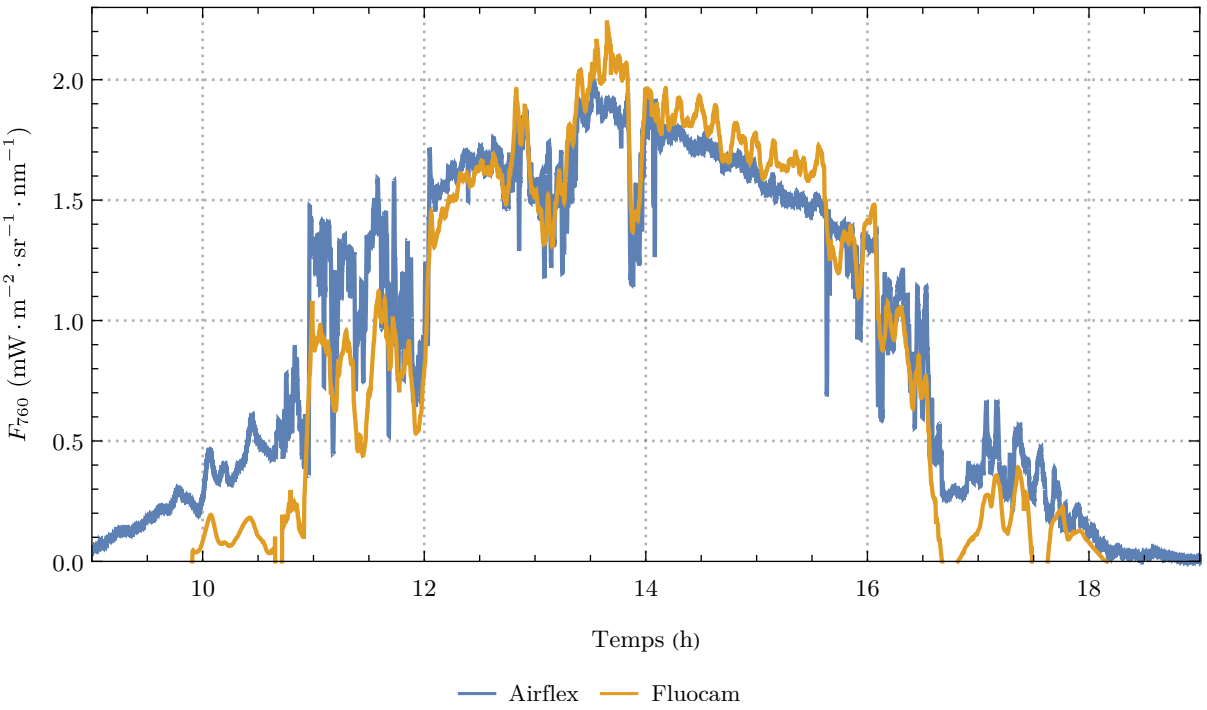


Figure 2.22 – Cycles diurnes de F_{760} d'Airflex (**bleu**) et de Fluocam (**orange**). L'échelle de fluorescence de Fluocam est corrigée de façon à faire correspondre les maximums des deux cycles diurnes.

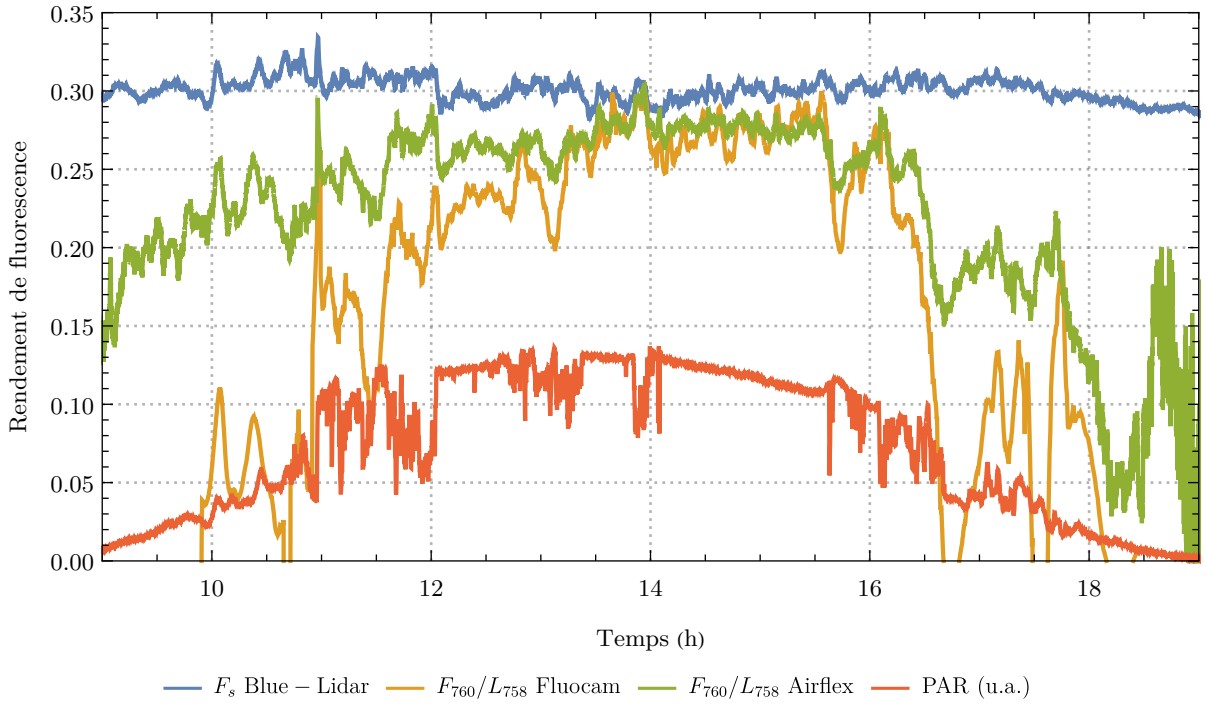


Figure 2.23 – Cycles diurnes de F_s (en **bleu**), F_{760}/L_{758} normalisés pour Airflex (en **orange**) et Fluocam (en **vert**) et PAR (en **rouge** ; unité arbitraire).

2.7.1 Images de fluorescence

La figure 2.24 montre en fausses couleurs F_{760}. L'échelle de couleur représente du noir au blanc en passant par le rouge des valeurs positives de F_{760} et du noir au vert des valeurs négatives de celle-là. On peut voir que les zones à l'ombre donnent une fluorescence faible voire négative et les zones bien éclairées une fluorescence positive. On peut voir plusieurs endroits où des zones spatialement proches présentent une fluorescence négative et positive. Cela est dû à une décorrélation de la cible dans les mesures prises dans les différents canaux à cause du vent.

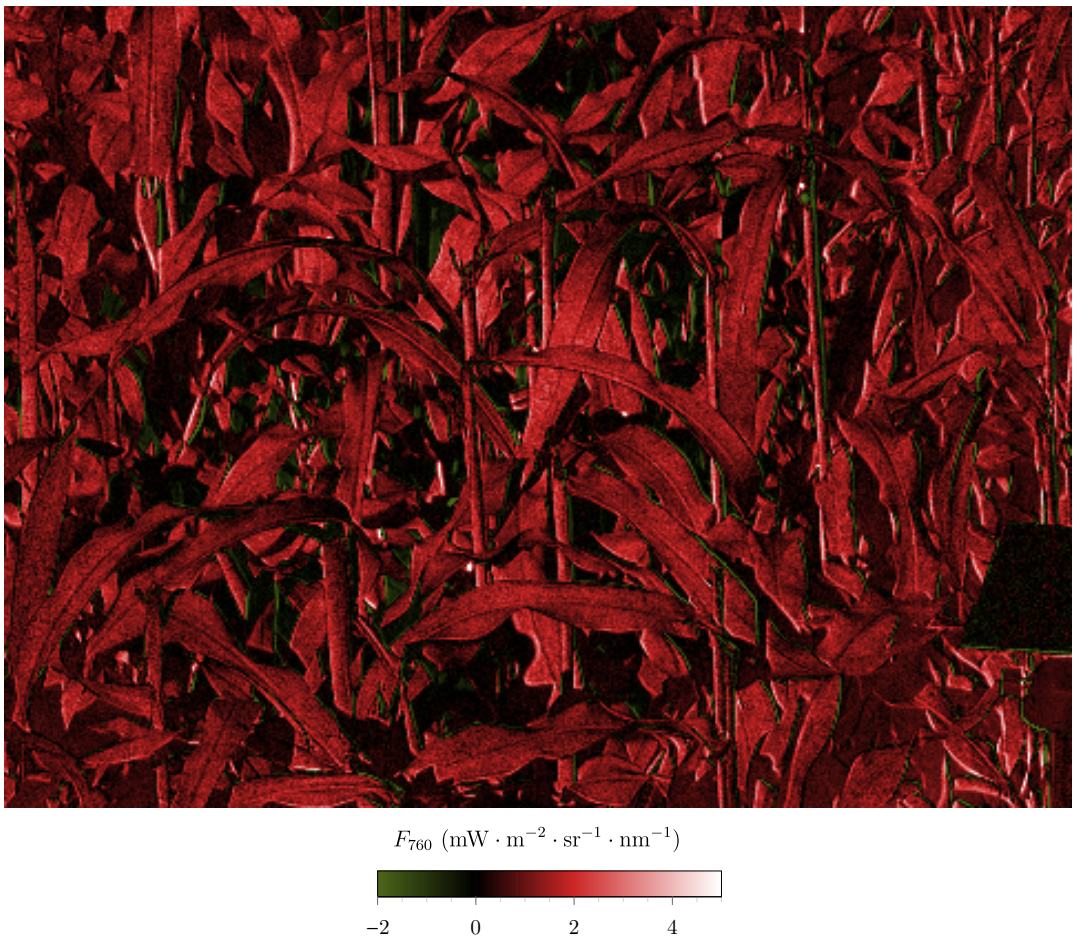


Figure 2.24 – Image de F_{760}.

La figure 2.25 montre en fausses couleurs une image du rapport F_{760}/L_{758}. On peut voir que ce rapport diminue le contraste de l'image, cela signifie que malgré des niveaux de fluorescence différents, l'indice de rendement de fluorescence qu'est ce rapport est plutôt constant sur la cible, avec néanmoins des valeurs négatives là où la fluorescence l'est.

2.7.2 Segmentation par seuillage

Afin d'interpréter les images de fluorescence, notamment en caractérisant les zones éclairées différemment (à l'ombre ou au soleil), il est possible d'effectuer une segmentation automatique. Une façon rudimentaire de le faire est de séparer les pixels en deux populations : pixels au-dessus d'un seuil (px_H) et pixels au-dessous du même seuil (px_B), à partir d'une des images de luminance (on choisit ici L_{758}).

La figure 2.26 montre l'histogramme de luminance d'une image de L_{758}. On voit clairement deux modes qui se superposent. Ceux-là correspondent grossièrement aux pixels éclairés directement par le soleil (mode au-dessus du seuil) et aux pixels à l'ombre (mode au-dessous du seuil). On note que ces deux modes se recouvrent, ils ne sont donc pas distincts. Afin de trouver une valeur de coupure pour séparer les modes, on utilise la méthode d'Otsu (1975) qui consiste à déterminer un seuil optimal en minimisant la variance intra-classe. Le seuil défini par la méthode d'Otsu dans le cas de l'histogramme de la figure 2.26

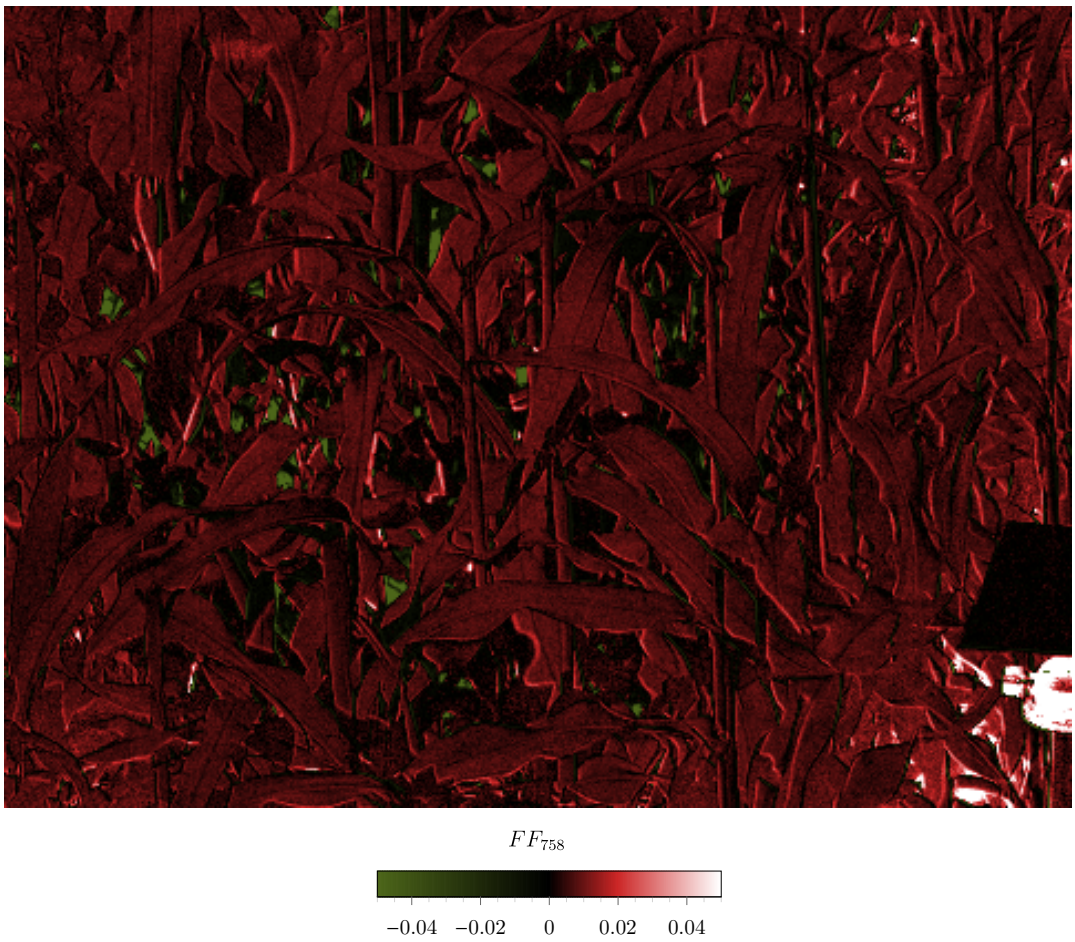


Figure 2.25 – Image du rapport F_{760}/L_{758}.

est indiqué par un trait noir vertical près de 150 $\mathrm{mW \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}}$.

La figure 2.27 montre le cycle diurne de F_{760} mesuré par Fluocam pour les pixels px_H, px_B et sur toute l'image, ainsi que L'_{758}. On voit que F_{760} pour les pixels px_H est plus grand que pour les pixels px_B et que sur toute l'image. F_{760} suit grossièrement les variations du PAR pour les pixels px_H, quand pour les pixels px_B on le voit augmenter au cours de la journée pour diminuer après 15 h 30. Ces dynamiques différentes montrent un comportement différents des parties de feuilles capturées par les pixels des deux classes.

Afin d'étudier le lien entre la quantité de fluorescence émise et le flux incident reçu pour les deux classes de pixels, on effectue pour chaque classe de pixels une régression linéaire entre F_{760} et L_{758}. Le modèle de régression est une simple relation de proportionnalité (il s'agit donc d'une droite passant par zéro). La figure 2.28 montre les cycles diurnes de la valeur moyenne du coefficient directeur de la relation affine reliant F_{760} à L_{758} pour l'image entière, pour les pixels px_H et px_B. Ce coefficient est un indicateur du rendement de fluorescence, en effet, il est le facteur par lequel multiplier L_{758} pour obtenir F_{760}. La définition du rendement de fluorescence exacte est le facteur par lequel multiplier la lumière absorbée (le APAR) pour obtenir F_{760} (chapitre 3). La figure montre que ce coefficient varie assez peu au cours du cycle diurne pour les pixels px_H. On voit qu'il est légèrement plus faible pour les pixels px_B que pour les pixels px_H le matin jusqu'au midi solaire et qu'ensuite ce rapport est inversé jusqu'au soir. Cela peut correspondre, le matin, à un rendement de fluorescence légèrement plus faible pour les pixels de la cible moins éclairés et l'après-midi solaire à un rendement de fluorescence plus fort pour ces pixels. La figure 2.29 montre que le coefficient de détermination de cette relation affine est autour de 0,4 toute la journée pour les pixels px_H et plus faible pour les pixels les moins éclairés : autour de 0,2. Cela montre que la dispersion est plus grande pour ceux-là et que la relation entre F_{760} et L_{758} est plus variable entre les pixels dans le cas des pixels px_B voire qu'il n'existe pas de telle relation.

La figure 2.30 montre le coefficient directeur de la relation affine en fonction de la valeur de L_{758}

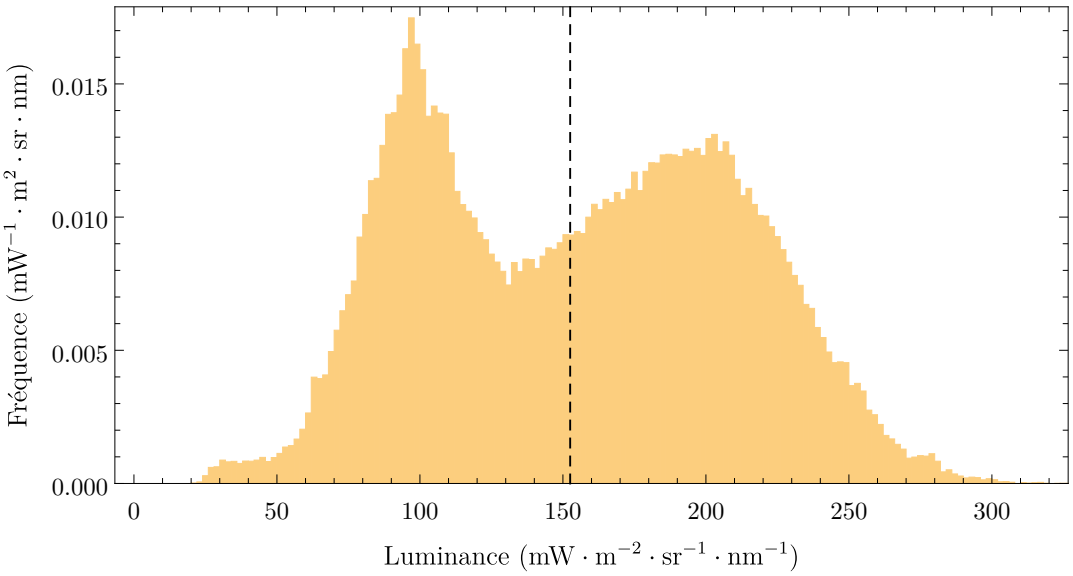


Figure 2.26 – Histogramme d'une image de la cible à 14 h 19 dans le premier canal (L_{758}) en luminance avec la coupure entre les deux modes (trait vertical noir).

dans la zone concernée et en fonction de R^2 pour toute l'image, les pixels au-dessus et au-dessous du seuil. Ainsi les points fortement visibles (ayant peu de transparence) sont des points dont le coefficient de détermination R^2 est plus élevé. On voit apparaître une constante dans les coefficients reliant F_{760} à L_{758}, autour de 0,005 pour les pixels px_H et px_B. On voit mieux avec cette figure que ce indice de rendement de fluorescence dépend assez peu des variations lumineuses au cours de la journée mais qu'il est plus dispersé pour les pixels px_B si l'on ne prend pas en compte les points où le coefficient est négatif.

Malgré une indépendance de l'indice de rendement à la luminance à 758 nm commune aux deux groupes de pixels, on observe une dispersion plus grande des valeurs prises par cet indice pour les pixels px_B. Cela peut s'expliquer par le fait que ces derniers, recevant de l'éclairement diffus, ont des conditions d'éclairement plus variables que celles des pixels recevant de l'éclairement direct.

Séparer les éléments du couverts en deux classes a permis ici d'obtenir une classe — celle des pixels les plus éclairés — avec une dispersion plus faible de l'indice de rendement de fluorescence, mettant en valeur un fonctionnement semblable de ses éléments.

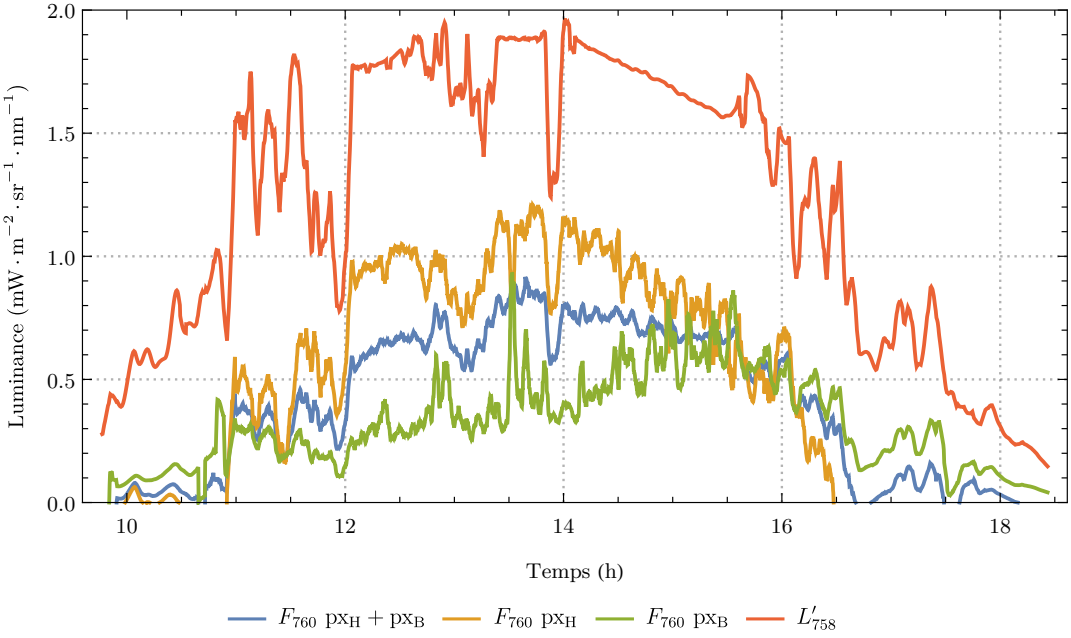


Figure 2.27 – Cycles diurnes lissés (sur 20 points glissants) de F_{760} corrigé, moyenné sur toute l'image (**bleu**), moyenné sur les pixels éclairés par du soleil direct (**orange** ; $\mathrm{px_H}$), moyenné sur les pixels éclairés seulement par du rayonnement diffus (**vert** ; $\mathrm{px_B}$) et L'_{758} sur toute l'image divisé par un facteur d'échelle de 85 (**rouge**).

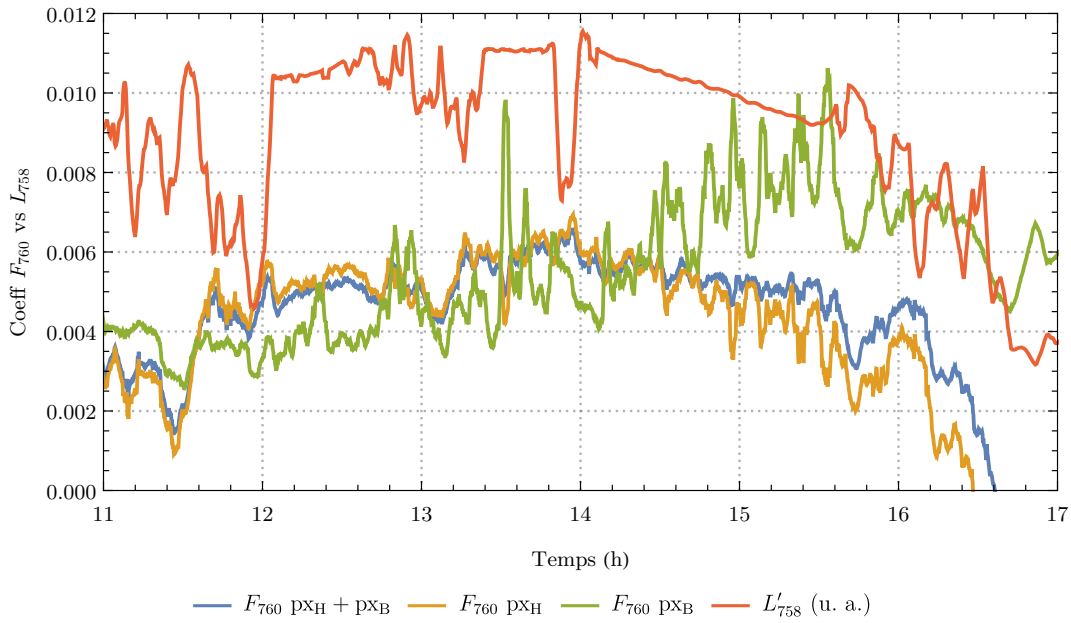


Figure 2.28 – Cycles diurnes du coefficient reliant F_{760} à L_{758} pour les pixels de toute l'image (en **bleu**), pour les pixels au-dessus du seuil (**orange**) et pour les pixels au-dessous du seuil (**vert**).

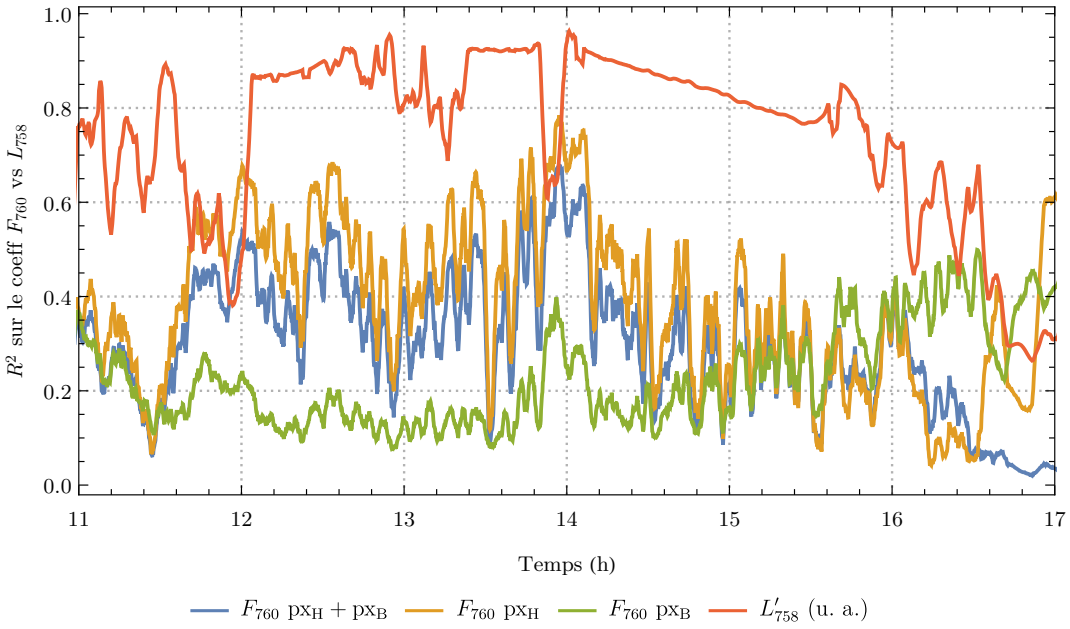


Figure 2.29 – Cycles diurnes du coefficient de détermination (R^2) de la relation affine reliant F_{760} à L_{758} pour les pixels de toute l'image (en **bleu**), pour les pixels au-dessus du seuil (**orange**) et pour les pixels au-dessous du seuil (**vert**).

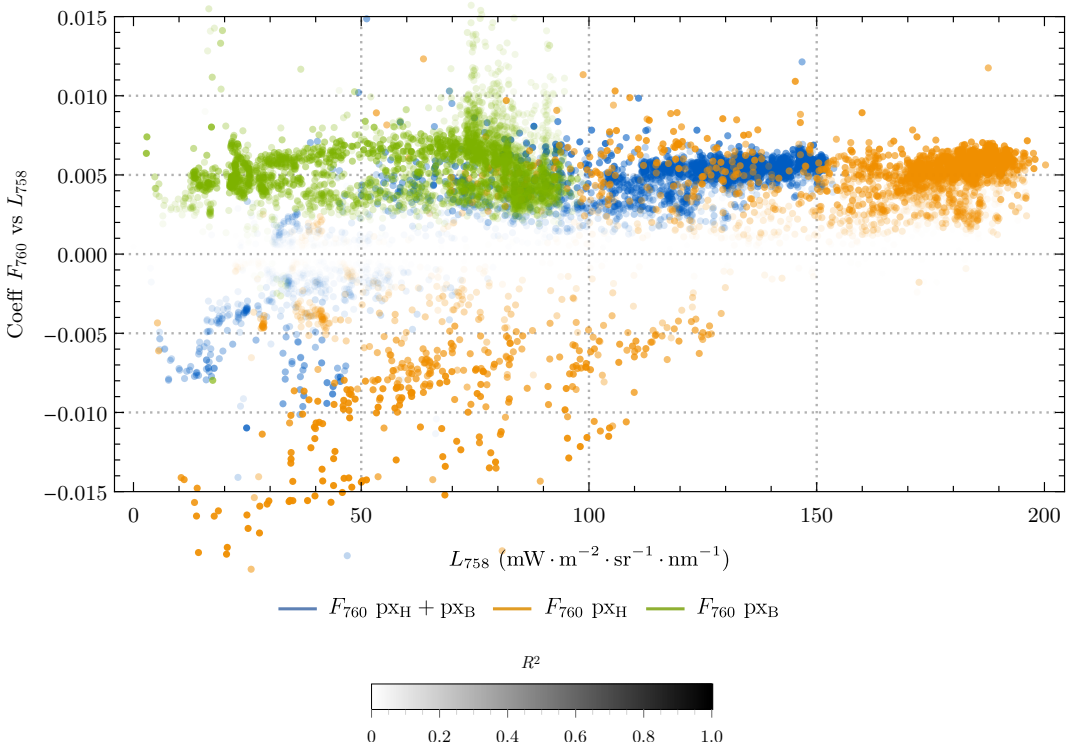


Figure 2.30 – Coefficient reliant F_{760} à L_{758} en fonction de L_{758} et du coefficient de détermination R^2 (niveau de transparence) pour les pixels de toute l'image (en **bleu**), pour les pixels au-dessus du seuil (**orange**) et pour les pixels au-dessous du seuil (**vert**)).

2.8 Conclusion

Les objectifs de cette partie de mon travail étaient de réaliser un instrument imageur passif de fluorescence chlorophyllienne en partant du concept instrumental des instruments passifs développés au LMD. Une étude théorique m'a permis de définir les spécifications de l'instrument, notamment celles concernant le système imageur, s'agissant de l'évolution apportée aux instruments non imageurs par ce nouvel instrument.

Partant du principe instrumental de mesure passive de la fluorescence avec des filtres interférentiels, l'étude a consisté à théoriser les conséquences de la modification de la transmittance spectrale des filtres avec les angles d'incidence de la lumière en provenance de la végétation, afin de calculer la fonction instrumentale de chaque pixel du capteur. Cela a permis de modéliser les incertitudes relatives de mesure de la fluorescence des pixels en fonction de la position spectrale des filtres. Ce travail a permis d'optimiser le dimensionnement des parties optiques et du capteur de l'instrument ainsi que le positionnement spectral des filtres. Le protocole de mesure a également été optimisé pour minimiser les temps d'acquisition

Concernant les mesures de Fluocam, on a vu que malgré une procédure de correction de ses mesures enlevant la qualité d'absolue à leur calibration radiométrique, la comparaison des cycles diurnes de F_{760} de Fluocam moyennées sur toute l'image avec Airflex donne de bons résultats.

La comparaison des cycles diurnes de l'indice de rendement calculé avec les mesures de Fluocam et d'Airflex avec les mesures du Blue-Lidar montrent une grande différence. Cependant, il s'agit ici de différences dues au principe même de mesure, à savoir actif ou passif ; les indices de Fluocam et d'Airflex étant plus proches.

Les analyses des images ont été effectuées en synthétisant l'information grâce à une segmentation automatique. Elle a été effectuée de façon rudimentaire en posant automatiquement un seuil de luminance sur L_{758} pour séparer deux modes dans l'histogramme de l'image de la cible dans ce canal. Ces deux modes correspondent grossièrement aux pixels de feuilles éclairées directement par le Soleil ou non, cependant il y a un recouvrement des deux modes. On a vu que l'indice de rendement de fluorescence (F_{760}/L_{758}) varie assez peu en milieu de journée pour les pixels les plus éclairés. Pour les pixels les moins éclairés on note une augmentation de cet indice au cours de la journée.

En conclusion, on a vu que Fluocam donne des mesures moyennées (monopixel) comparables (en relatif) à celles d'un instrument ayant déjà été validé ce qui permet de valider (non radiométriquement) Fluocam. De plus, on a vu que l'imagerie permet d'obtenir des informations plus fines sur le couvert, notamment sur le rendement de fluorescence, en mettant en valeur des différences entre des zones à l'ombre et des zones au soleil, quant à leur dispersion.

Chapitre 3

Recherche d'indicateurs du rendement de fluorescence au niveau du couvert

Sommaire

3.1 Modélisation de la végétation 68
3.1.1 Rendement de fluorescence du couvert 68
3.1.2 Indices de rendement de fluorescence du couvert 69
3.1.3 Comparaison entre rendement de fluorescence et indices 69
3.1.4 Modélisation des cycles diurnes de fluorescence 70
3.1.5 Étude de la variabilité des indices de rendement et d'autres grandeurs physiques . . . 74
3.2 Résultats et discussion 75
3.2.1 Cycles diurnes 75
3.2.1.1 Cycles diurnes de fluorescence 75
3.2.1.2 Interception de la lumière solaire par le couvert 75
3.2.1.3 Cycles diurnes du fAPAR, de τ_c et de $\tilde{\rho}$ 76
3.2.1.4 Cycles diurnes de l'ASFY 78
3.2.1.5 Cycles diurnes des FF 79
3.2.2 Graphes des variations diurnes 83
3.2.2.1 Variations de l'ASFY 83
3.2.2.2 Variations des FF 84
3.2.2.3 Variations du fAPAR, de $\Delta\tau_c$ et de $\Delta\tilde{\rho}_{685}$ 84
3.2.3 Exemple d'application 87
3.3 Conclusion 89

À l'échelle de la feuille, on sait mesurer un rendement de fluorescence défini comme le rapport entre la fluorescence émise par les feuilles et la lumière incidente absorbée (Papageorgiou et Govindjee, 2004; Flexas et coll., 2002). Ce rendement est différent du rendement quantique de fluorescence en raison de la réabsorption d'une partie du flux de fluorescence par la chlorophylle notamment [1]. Cependant, à l'échelle du cycle diurne, le contenu en chlorophylle ne variant pas, les variations de ce rendement sont les mêmes que celles du rendement quantique de fluorescence. Lors de la mesure active de ce rendement, la lumière absorbée n'est pas forcément connue, mais la source lumineuse induisant les flux de fluorescence est invariable [2]. Les variations de la fluorescence induite par la source sont donc les mêmes que celles du rendement de fluorescence. La mesure active de la dynamique de ses variations — qui sont les mêmes que celles du rendement quantique — apporte des informations sur l'état physiologique de la plante (Cerovic et coll., 1996; Flexas et coll., 2000; Evain et coll., 2004; López González, 2014a; Moya et coll., 2004).

1. De plus, la fluorescence réabsorbée peut également induire de la fluorescence si elle est dans la zone spectrale photosynthétiquement active.

2. On rappelle que la mesure active de la fluorescence se fait en général avec une lumière modulée, ce qui n'empêche pas sa valeur moyenne d'être constante.

On aimerait pouvoir utiliser la relation entre le rendement de fluorescence et l'état physiologique de la plante à l'échelle du couvert afin d'obtenir des informations sur cet état physiologique à l'échelle régionale, voire de la planète. Cependant, mesurer le rendement de fluorescence de la végétation depuis l'espace avec des techniques actives apparaît aujourd'hui comme impossible. Il faudrait en effet une source d'excitation d'une puissance déraisonnablement grande, ce qui poserait en plus du problème d'infaisabilité technique celui de la sécurité oculaire. Pour mesurer sur des grandes échelles, on utilise donc aujourd'hui des techniques instrumentales passives où la fluorescence mesurée est induite par le Soleil (section 1.3.2).

Dans le cas des mesures passives, on ne connaît pas exactement les flux de fluorescence totaux émis par la végétation (F_{tot}) ni le flux solaire absorbé pour calculer un rendement quantique de fluorescence, ces flux ne sont pas facilement mesurables. En revanche, on peut mesurer plus facilement les flux de fluorescence émis par la végétation (*top of canopy flurescence*, F_{TOC}) après réabsorption de la fluorescence dans le couvert, ainsi que le rayonnement solaire incident.[3] C'est donc notamment à partir de ces dernières grandeurs que certains auteurs calculent des indicateurs de ce rendement de fluorescence du couvert végétal. Un indicateur utilisé par certains (Louis et coll., 2006; Rossini et coll., 2010; Cheng et coll., 2013; Goulas et coll., 2014) est le « rendement de fluorescence spectral apparent », *apparent spectral fluorescence yield*, abrégé ASFY. Dans ce cas, le flux de fluorescence émergeant du couvert végétal (F_{TOC}) est normalisé par le PAR (qui peut être calculé par temps clair grâce à des modèles ou mesuré directement dans le cas de mesures au sol). Il ne s'agit donc pas exactement du flux de fluorescence total émis par les feuilles du couvert (F_{tot}), ni exactement du rayonnement solaire absorbé par les feuilles (APAR). Ces différences avec la définition exacte du rendement de fluorescence qui a été défini au niveau de la feuille seront discutées dans la suite. D'autres auteurs (Daumard et coll., 2010, 2012) préfèrent normaliser les flux de fluorescence par le flux réfléchi par la végétation à une certaine longueur d'onde, par exemple une bien absorbée par la chlorophylle, c'est le cas des *fluorescence fractions* (FF).

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la cinétique du rendement de fluorescence apparent mesuré par une méthode active (BlueLED) diffère fortement de celle du FF_{758} mesuré par des méthodes passives (Fluocam, Airflex) (figure 2.23). On peut postuler que la luminance du couvert à 758 nm, qui sert à normaliser la fluorescence dans le calcul de FF_{758}, ne représente pas bien le rayonnement absorbé dans toutes les conditions d'éclairement (à cause des variations de l'angle d'incidence et du rapport entre les rayonnements direct et diffus). De plus, la géométrie d'éclairement peut modifier la distribution de l'absorption dans le couvert et par là influer sur le transfert radiatif de l'émission de fluorescence. On peut alors se demander quels sont les effets de la géométrie d'éclairement sur les indices de rendement du couvert, en fonction de la structure de celui-ci ; quelle influence ont-ils sur le cycle diurne de fluorescence mesuré par les techniques passives ; et enfin si l'on peut normaliser le flux de fluorescence induit par le Soleil pour définir un indice de rendement représentatif du rendement quantique dans toutes les conditions expérimentales.

Le but de ce chapitre est d'étudier les variations des cycles diurnes de différents indices de rendement de fluorescence qui ne sont pas dues à des variations de l'état physiologique de la végétation. À cette fin, on utilise dans cette étude un modèle de la fluorescence de la végétation visible juste au dessus d'elle. Le modèle de transfert radiatif Fluorsail (Verhoef, 1984, 2004) permet de simuler pour différentes structures de végétation les cycles diurnes du rendement quantique de fluorescence et de certains indices de rendement de fluorescence. On utilise également ce modèle afin de simuler des grandeurs physiques comme le PAR ou le APAR pour comprendre comment la structure de la végétation peut influencer la forme des cycles diurnes de ces indices.

3.1 Modélisation de la végétation

3.1.1 Rendement de fluorescence du couvert

À l'échelle de la feuille, le rendement quantique de fluorescence est facilement définissable, il est le rapport entre la fluorescence émise et le rayonnement photosynthétiquement actif absorbé. Par analogie, à l'échelle du couvert végétal, le rendement de fluorescence peut être défini comme la fluorescence totale

3. On remarque que F_{TOC} est à F_{tot} ce que la fluorescence d'une feuille après réabsorption par la chlorophylle est à celle avant réabsorption.

émise par les feuilles (avant la réabsorption au sein du couvert) divisée par la lumière incidente photosynthétiquement active absorbée par les feuilles. Ce rendement de fluorescence du couvert vaut pour une longueur d'onde d'émission de fluorescence

$$\varphi_{\mathrm{c}}(\lambda_{\mathrm{e}}) = \frac{F_{\mathrm{tot}}(\lambda_{\mathrm{e}})}{\mathrm{APAR}} \tag{3.1}$$

avec $\varphi_{\mathrm{c}}(\lambda_{\mathrm{e}})$ le rendement de fluorescence du couvert à la longueur d'onde d'émission de fluorescence λ_{e}, $F_{\mathrm{tot}}(\lambda_{\mathrm{e}})$ le flux total de fluorescence émis à λ_{e} (sans prendre en compte sa réabsorption) et APAR le PAR absorbé par les pigments photosynthétiques.

3.1.2 Indices de rendement de fluorescence du couvert

En pratique, les mesures passives de fluorescence à l'échelle du couvert sont faites au dessus de la canopée (*top of canopy*, abrégé en TOC). Dans ce cas, c'est la fluorescence émergent du couvert — que l'on nommera fluorescence TOC et notera F_{TOC} dans la suite — dans la direction de visée de l'instrument qui est mesurée. Cette mesure est différente du flux total de fluorescence émise par les feuilles, F_{tot}, dont il était question en 3.1.1. Cela à cause de la réabsorption de la fluorescence au sein du couvert et de l'anisotropie du couvert.

Pour approcher la valeur du rendement de fluorescence du couvert, certains auteurs ont introduit le rendement de fluorescence spectral apparent (ASFY) (Louis et coll., 2006) en divisant le flux de fluorescence mesuré dans la direction d'observation par le PAR mesuré au dessus de la canopée (équation (3.2)).

$$\mathrm{ASFY}(\lambda_{\mathrm{e}}) = \frac{\pi F_{\mathrm{TOC}}(\lambda_{\mathrm{e}})}{\mathrm{PAR}} \tag{3.2}$$

On ne s'intéressera dans la suite pour l'ASFY qu'à deux longueurs d'émission de fluorescence 687 nm et 760 nm qui correspondent aux bandes d'absorption O_2-A et O_2-B. On les nommera respectivement ASFY_{687} et ASFY_{760}. Il est intéressant d'étudier ces deux longueurs d'onde car elles correspondent grossièrement aux deux pics du spectre de fluorescence chlorophyllienne (figure 1.9) et que le transfert radiatif au sein du couvert à ces deux longueurs d'onde donne des résultats totalement différents. À 687 nm les feuilles absorbent beaucoup tandis que c'est l'inverse à 760 nm. Cela permet d'étudier deux résultats différents du même transfert radiatif au sein du couvert végétal.

D'autres auteurs ont créé des indices de rendement qui normalisent les flux de fluorescence par une grandeur physique mesurée qui rend compte de l'absorption solaire incidente au lieu du PAR (équation (3.2)) et ce afin de se rapprocher de la définition du rendement du couvert (équation (3.1)). Une longueur d'onde bien absorbée par le couvert est *a priori* plus représentative du APAR que du PAR. Ce genre d'indice de rendement de fluorescence du couvert, appelé fraction de fluorescence (*fluorescence fraction*, abrégé FF) (Daumard et coll., 2010) est défini ainsi :

$$\mathrm{FF}_{\lambda_0}(\lambda_{\mathrm{e}}) = \frac{\pi F_{\mathrm{TOC}}(\lambda_{\mathrm{e}})}{L_{\mathrm{c}}(\lambda_0)} \tag{3.3}$$

avec $L_{\mathrm{c}}(\lambda_0)$ la luminance de la végétation à λ_0, une longueur d'onde pour laquelle l'absorption des feuilles est élevée.

Pour les mêmes raisons motivant le choix de 687 nm et 760 nm pour l'ASFY, on choisit dans la suite de n'étudier que $\mathrm{FF}_{\lambda_0}(678)$ et $\mathrm{FF}_{\lambda_0}(760)$. On verra par la suite quel choix a été fait pour la longueur d'onde de normalisation λ_0.

3.1.3 Comparaison entre rendement de fluorescence et indices

Comme le montrent les définitions de φ_{c} et des indices de rendement ASFY et FF (équations (3.1), (3.2) et (3.3)), le rendement de fluorescence du couvert et les indices de rendements ne sont pas exactement égaux. En effet, trivialement, le PAR ne représente pas précisément le APAR ni ses variations au cours d'une journée (pour qu'il y ait égalité, il faudrait fAPAR = 1, pour qu'il y ait les mêmes variations, il faudrait que fAPAR soit constant), de même que F_{TOC} ne représente pas précisément F_{tot}.

Le APAR est relié au PAR par la relation suivante :

$$\text{fAPAR} = \frac{\text{APAR}}{\text{PAR}} \tag{3.4}$$

avec fAPAR la fraction de PAR absorbée, pouvant valoir entre 0 et 1.

On définit τ_c comme le rapport entre le flux total de fluorescence émise par le couvert et le flux de fluorescence TOC mesuré dans la direction d'observation sont reliés par la relation suivante :

$$\tau_c(\lambda_e) = \frac{F_{TOC}(\lambda_e)}{F_{tot}(\lambda_e)} \tag{3.5}$$

où $\tau_c(\lambda_e)$ est la proportion de fluorescence émise à λ_e s'échappant du couvert dans la direction d'observation.

En combinant l'équation du rendement quantique de fluorescence (équation (3.1)), celle de τ_c (équation (3.5)) et la définition du fAPAR (équation (3.4)), on obtient le développement suivant de la fluorescence mesurée TOC :

$$F_{TOC}(\lambda_e) = \text{PAR} \times \text{fAPAR} \times \varphi_c(\lambda_e) \times \tau_c(\lambda_e) \tag{3.6}$$

Le flux de fluorescence mesuré est relié au rendement de fluorescence du couvert par trois facteurs qui dépendent de la structure de la végétation (fAPAR et τ_c) et des conditions d'illumination (fAPAR, PAR et τ_c). De plus, contrairement au fAPAR, τ_c dépend également de la direction d'observation.

Avec la précédente équation ((3.6)), l'ASFY (équation (3.2)) devient :

$$\text{ASFY}(\lambda_e) = \text{fAPAR} \times \tau_c(\lambda_e) \times \varphi_c(\lambda_e) \times \pi \tag{3.7}$$

De même, l'équation définissant le FF ((3.3)) devient

$$\text{FF}_{\lambda_0}(\lambda_e) = \frac{\text{ASFY}(\lambda_e)}{\pi} \times \frac{\text{PAR}}{L(\lambda_0)} = \frac{\text{ASFY}(\lambda_e)}{\pi} \times \frac{1}{\tilde{\rho}_{\lambda_0}} \tag{3.8}$$

$$\text{FF}_{\lambda_0}(\lambda_e) = \text{fAPAR} \times \tau_c(\lambda_e) \times \frac{1}{\tilde{\rho}_{\lambda_0}} \times \varphi_c(\lambda_e) \tag{3.9}$$

avec $\tilde{\rho}_{\lambda_0}$ défini comme le rapport entre $L(\lambda_0)$ et le PAR que nous appelleront la pseudoréflectance [4] du couvert végétal dans la direction d'observation à λ_0. FF est ainsi relié à φ_c avec les deux mêmes facteurs que pour l'ASFY mais également avec un autre facteur dépendant de la structure de la végétation et de la direction d'observation : $1/\tilde{\rho}_{\lambda_0}$. L'intérêt de diviser par $L(\lambda_0)$ dans la définition de FF est de compenser les variations diurnes du fAPAR.

3.1.4 Modélisation des cycles diurnes de fluorescence

Grâce à plusieurs modèles, on simule la fluorescence au cours d'une journée depuis un mètre au dessus de couverts de différentes structures, en visant au nadir. Le modèle Modtran 4 (Anderson et coll., 2000) simule un cycle diurne du rayonnement direct et diffus incident sur le couvert. Ces grandeurs servent de paramètres d'entrée au modèle de transfert radiatif de la fluorescence au sein du couvert végétal Fluorsail (Verhoef, 2004) dérivé du modèle de transfert radiatif Sail (Verhoef, 1984) et incluant le modèle Prospect (Jacquemoud et Baret, 1990) simulant la réflectance et la transmittance spectrales des feuilles. Ce modèle nécessite également des spectres de rendement de fluorescence apparent des feuilles que l'on simule avec le modèle Fluormodleaf (Miller et coll., 2003; Pedrós et coll., 2010). Fluorsail utilise également en entrée un spectre de réflectance du sol.

Cycle diurne du rayonnement incident

4. La pseudoréflectance est différente de la réflectance apparente car elle n'est pas totalement spectrale, dans sa définition, le dénominateur est l'intégration du rayonnement solaire incident entre 400 et 700 nm.

Paramètre	Valeur
Calculation Option	MODTRAN correlation-k
Correlation-K speed	Slow
Model Atmosphere	MidLatitude Summer
Type of Atmospheric Path	Slant Path to Space or Ground
Mode of Execution	Radiance w/ Scattering
Execute With Multiple Scattering	MS on Flux at Observer
CO2 Mixing Ratio	390 ppmv
Scattering Algorithm	Disort
Number of DISORT Streams	16 Streams
Surface Albedo Flag	Use Surface Albedo value
Surface Albedo (.000 - Blackbody)	1
Solar Irradiance Source	File Sun 2
Triangular Filter Width	(2 cm^-1 wavenumber)
Aerosol Model Used	Aerosol Free Clouds
Use Cloud / Rain Aerosol Extension	No Clouds or Rain
Ground Altitude Above Sea Level	0.155 km
Path Type	Observer Height, Zenith Angle
Observer Height (Km)	0.156
Zenith Angle (deg)	180.00
FWHM of Slit Function	1 (1/cm)
Slit Function Type	GAUSSIAN
Day of Year (1-365)	167
Observer Latitude	48.718
Observer Longitude	2.208

Tableau 3.1 – Paramètres d'entrée de Modtran 4.0. Le modèle d'aérosol est un modèle standard d'atmosphère sans nuages d'eau mais contenant des aérosols.

On utilise Modtran 4 pour simuler un spectre du rayonnement solaire arrivant au niveau du sol pour chaque heure de la journée. Les rayonnements photosynthétiquement actifs direct et diffus, entre 400 et 700 nm, sont simulées à une résolution en nombre d'onde de 1 cm^{-1}, puis dégradés à 10 nm afin de diminuer les temps de calcul. Ils permettent de simuler la fluorescence induite par le Soleil grâce au modèle Fluorsail. Les spectres du rayonnement solaire incident permettent également de simuler les cycles diurnes de la luminance de la végétation dans les bandes O_2-A et O_2-B.

Modtran utilise le modèle Disort (Stamnes et coll., 1988) qui approxime l'atmosphère par des plans parallèles. Les données d'entrée sont la composition atmosphérique ainsi que son profil de température. Le choix d'utiliser ce modèle tient à la bonne connaissance qu'en ont mes collègues.

Le tableau 3.1 consigne les paramètres utilisés dans la simulation. Le cycle diurne de rayonnement solaire est simulé pour le 167^{e} jour de l'année (une vingtaine de jours avant le solstice d'été ; l'angle zénithal solaire vaut à midi 25°) aux coordonnées de la plateforme expérimentale du site de l'École polytechnique (Sirta). Afin de connaître l'éclairement solaire, on simule la luminance mesurée par un observateur situé à un mètre au dessus du sol (*observer height − ground altitude above sea level*) et observant au nadir (*zenith angle*) une surface lambertienne de réflectance valant un (*surface albedo*).

Propriétés optiques des feuilles

Le modèle Prospect modélise les propriétés optiques des feuilles, il permet de simuler la transmittance et la réflectance spectrales des feuilles à partir de leurs propriétés chimiques et d'un paramètre de structure. La réflectance des feuilles ρ_{f} et leur transmittance τ_{f} valent

$$\rho_{\mathrm{f}}(\lambda) = f_{\rho_{\mathrm{f}}}\left(N, C_{\mathrm{ab}}, C_{\mathrm{w}}, C_{\mathrm{m}}, C_{\mathrm{bp}}, \lambda\right) \tag{3.10}$$

$$\tau_{\mathrm{f}}(\lambda) = f_{\tau_{\mathrm{f}}}\left(N, C_{\mathrm{ab}}, C_{\mathrm{w}}, C_{\mathrm{m}}, C_{\mathrm{cx}}, \lambda\right) \tag{3.11}$$

avec $f_{\rho_{\mathrm{f}}}$ la fonction du modèle Prospect donnant la réflectance d'une feuille, $f_{\tau_{\mathrm{f}}}$ la transmittance, N un

Paramètre	Valeur	Unité
N	1,5	–
C_{ab}	33	$\mu\mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}^{-2}$
C_{w}	0,01	cm
C_{m}	0,005	$\mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}^{-2}$
C_{cx}	8	$\mu\mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}^{-2}$

Tableau 3.2 – Valeurs des paramètres des modèles Prospect et Fluormodleaf.

Paramètre	Valeur	Unité
$\sigma_{\mathrm{II}}/\sigma_{\mathrm{I}}$	1	–
τ_{I}	0,1	ns
τ_{II}	0,5	ns

Tableau 3.3 – Valeurs des paramètres propres au modèle Fluormodleaf.

paramètre de structure de la feuille, C_{ab} le contenu en chlorophylles *a* et *b* (en $\mu\mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}^{-2}$), C_{w} l'épaisseur d'eau équivalente (w pour *water* ; en cm), C_{m} le contenu en matière sèche (m pour *dry matter* ; en $\mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}^{-2}$), C_{cx} le contenu en caroténoïdes et λ la longueur d'onde (en nm). Le tableau 3.2 donne les paramètres d'entrée utilisés dans la simulation.

Prospect modélise le transfert radiatif au sein de la feuille qui est considérée comme un empilement de N couches fines séparées par des lames d'air. L'absorption et la diffusion de ces couches, dont le contenu en pigments, eau et matière sèche sont définis en entrée, sont calculées afin de déterminer la réflectance et l'absorptance des feuilles. L'utilisation de ce modèle est très répandue et il a été validé sur de nombreux jeux de données (notamment Jacquemoud et coll. (1996)).

Rendement de fluorescence apparent des feuilles

Le modèle Fluormodleaf modélise le transfert radiatif de la fluorescence au sein d'une feuille afin de calculer le rendement de fluorescence apparent des deux faces des feuilles. Le rendement de la face avant η_{FS} vaut (FS pour *front side*)

$$\eta_{\mathrm{FS}}(\lambda_{\mathrm{x}},\lambda_{\mathrm{m}}) = f_{\eta_{\mathrm{FS}}}\left(N, C_{\mathrm{ab}}, C_{\mathrm{w}}, C_{\mathrm{m}}, C_{\mathrm{cx}}, \sigma_{\mathrm{II}}/\sigma_{\mathrm{I}}, \tau_{\mathrm{I}}, \tau_{\mathrm{II}}, \lambda_{\mathrm{x}}, \lambda_{\mathrm{m}}\right) \tag{3.12}$$

avec $f_{\eta_{\mathrm{FS}}}$ la fonction du modèle Fluormodleaf donnant le rendement de fluorescence apparent de la face avant d'une feuille, $\sigma_{\mathrm{II}}/\sigma_{\mathrm{I}}$ le rapport des sections efficaces d'absorption du PS II et du PS I, τ_{I} la durée de vie de la fluorescence du PS I, τ_{II} la durée de vie de la fluorescence du PS II (c'est cette durée qui module le rendement quantique de fluorescence du PS II, ce dernier étant lié à la physiologie), λ_{x} la longueur d'onde d'excitation de la fluorescence (en nm) et λ_{m} la longueur d'onde d'émission de la fluorescence (en nm). De même, on a pour le rendement de la face arrière η_{BS} (BS pour *back side*)

$$\eta_{\mathrm{BS}}(\lambda_{\mathrm{x}},\lambda_{\mathrm{m}}) = f_{\eta_{\mathrm{BS}}}\left(N, C_{\mathrm{ab}}, C_{\mathrm{w}}, C_{\mathrm{m}}, C_{\mathrm{cx}}, \sigma_{\mathrm{II}}/\sigma_{\mathrm{I}}, \tau_{\mathrm{I}}, \tau_{\mathrm{II}}, \lambda_{\mathrm{x}}, \lambda_{\mathrm{m}}\right) \tag{3.13}$$

avec $f_{\eta_{\mathrm{BS}}}$ la fonction du modèle Fluormodleaf donnant le rendement de fluorescence apparent de la face arrière d'une feuille.

Le tableau 3.3 donne les valeurs des paramètres utilisés en entrée du modèle Fluormodleaf qui ne sont pas présents dans le modèle Prospect.

Ce modèle est une extension de Prospect. Il ajoute l'émission de fluorescence générée par les couches modélisant la feuille, à partir de la section efficace relative du PS I et du PS II ($\sigma_{\mathrm{II}}/\sigma_{\mathrm{I}}$), ainsi que des durées de vie moyennes de leur fluorescence (τ_{I} et τ_{II}). Le calcul du transfert radiatif de la fluorescence dans la feuille permet de simuler l'émission de fluorescence des deux faces de la feuille.

Le choix d'utiliser ce modèle tient seulement à l'usage dans notre laboratoire. Il existe en effet un autre modèle Fluspect-B (Verhoef, 2011; Vilfan et coll., 2016), également basé sur Prospect auquel il ajoute le transfert radiatif de la fluorescence.

Réflectance du sol

Dans la zone spectrale qui nous intéresse, la réflectance du sol peut être considérée comme une fonction linéaire de son humidité ou de sa longueur d'onde, à longueur d'onde fixée ou à humidité fixée respectivement (Bowers et Hanks, 1965; Guyot, 1992). On a

$$\rho_{\mathrm{s}}(\lambda, h) = -0{,}2287 + 0{,}5154h + 0{,}0007487\lambda - 0{,}001933h \times \lambda, \tag{3.14}$$

avec $\rho_{\mathrm{s}}(\lambda, h)$ la réflectance du sol à la longueur d'onde λ (en nm) et à l'humidité h (entre 0 et 1).

Dans les simulations, on fixe l'humidité à 10 % ; dans la bande O_2-A, la réflectance vaut alors environ 0,24, dans la bande O_2-B 0,20. Quant à la transmittance du sol, elle est nulle.

Fluorescence du couvert

Le modèle Fluorsail modélise le transfert radiatif de la lumière et en particulier de la fluorescence au sein d'un couvert végétal caractérisé par des paramètres de structure en fonction des conditions d'observation et d'éclairement du couvert. Fluorsail calcule le flux de fluorescence du couvert au niveau du couvert F^{c} à la longueur d'onde λ_{m} générée par le rayonnement incident à la longueur d'onde λ_{x} qui vaut

$$F^{\mathrm{c}}(\lambda_{\mathrm{x}}, \lambda_{\mathrm{m}}) = f_{F^{\mathrm{c}}}\big(\mathrm{LAI}, \chi, \rho_{\mathrm{s}}(\lambda_{\mathrm{x}}), \rho_{\mathrm{s}}(\lambda_{\mathrm{m}}), \rho_{\mathrm{f}}(\lambda_{\mathrm{x}}), \tau_{\mathrm{f}}(\lambda_{\mathrm{x}})\rho_{\mathrm{f}}(\lambda_{\mathrm{m}}), \tau_{\mathrm{f}}(\lambda m), \eta_{\mathrm{FS}}(\lambda_{\mathrm{x}},\lambda_{\mathrm{m}}), \eta_{\mathrm{BS}}(\lambda_{\mathrm{x}},\lambda_{\mathrm{m}}), \theta_{\odot}, \theta_{\mathrm{o}}, \psi_{\odot\mathrm{o}}, L^{\mathrm{c}}_{\odot,\mathrm{dir}}(\lambda_{\mathrm{x}}), L^{\mathrm{c}}_{\odot,\mathrm{dif}}(\lambda_{\mathrm{x}})\big) \tag{3.15}$$

avec $f_{F^{\mathrm{c}}}$ la fonction du modèle Fluorsail donnant le flux de fluorescence du couvert dans la direction d'observation, LAI (pour *leaf area index* ; ou indice foliaire, défini comme l'aire des faces supérieures des feuilles par mètre carré), χ le paramètre de la fonction de distribution angulaire des feuilles [5] (LIDF, pour *leaf inclination distribution function* ; figure 3.1 ; Campbell (1990); Wang et coll. (2007)), $\theta_{\odot}$ l'angle zénithal solaire, θ_{o} l'angle zénithal de l'observateur, $\psi_{\odot\mathrm{o}}$ angle azimutal entre le soleil et l'observateur, $L^{\mathrm{c}}_{\odot,\mathrm{dir}}$ la composante directe de la luminance solaire au niveau du couvert et $L^{\mathrm{c}}_{\odot,\mathrm{dif}}$ la composante diffuse de ce même rayonnement.

La fluorescence totale du couvert à la longueur d'onde λ_{m} vaut alors

$$F^{\mathrm{c}}(\lambda_{\mathrm{m}}) = \int F^{\mathrm{c}}(\lambda_{\mathrm{m}},\lambda_{\mathrm{x}})\, \mathrm{d}\lambda_{\mathrm{x}} \tag{3.16}$$

Fluorsail est un modèle à quatre flux, il considère le flux solaire direct, un flux descendant diffus, un flux montant diffus, ainsi que le flux en direction de l'observateur. La végétation est considérée comme un milieu turbide d'éléments diffusants infinitésimaux que sont les feuilles. Les angles d'orientation de celles-ci sont distribués selon une distribution ellipsoïdale, définie par un unique paramètre : χ (figure 3.1).

Ce modèle, bien que turbide, prend en compte l'effet de *hotspot*. Mais contrairement aux modèles tridimensionnels (Dart par exemple (Gastellu-Etchegorry et coll., 1996)), il ne modélise pas la géométrie des feuilles et simplifie grandement celle du couvert. Il ne modélise par exemple pas les rangs que l'on peut observer dans certaines cultures, l'agrégation des feuilles qui forme des touffes ou encore la présence d'élément de réflectance différente comme les tronc ou les branches. Ces simplifications permettent toutefois de réduire fortement les temps de calcul.

5. Ce paramètre peut valoir par exemple 1 pour le blé, 3 pour la fraise et 0,8 pour le soja (Campbell et Van Evert, 1994).

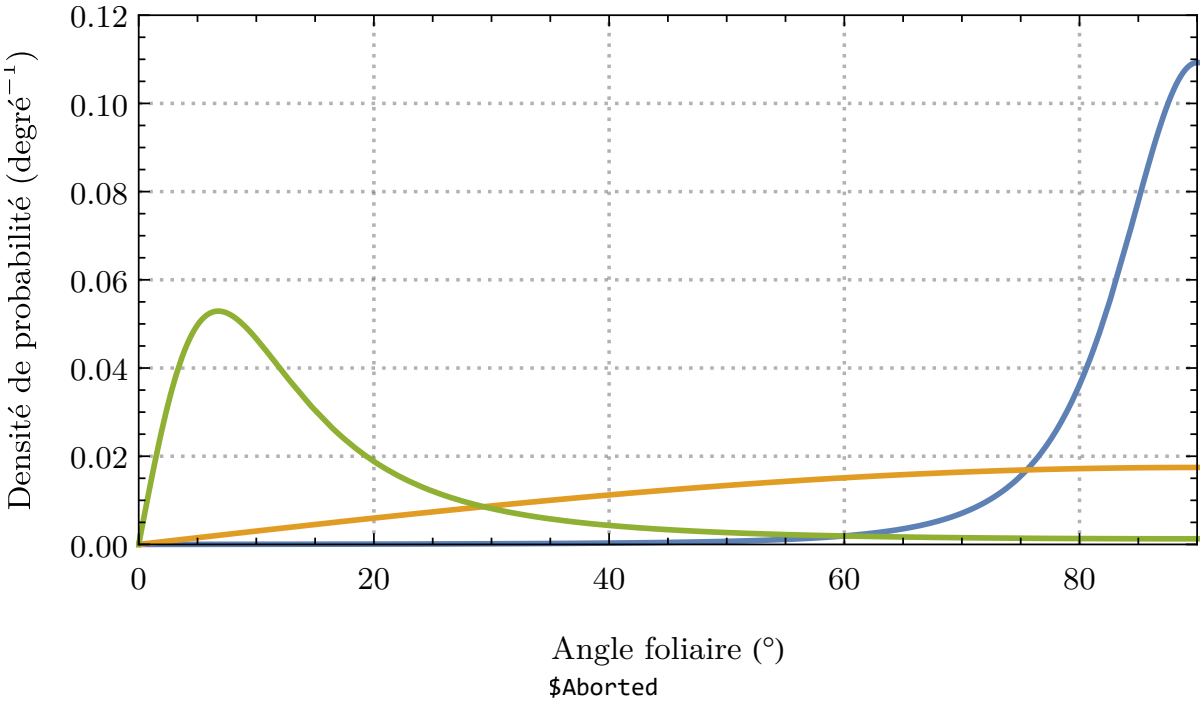


Figure 3.1 – Distributions des angles entre la normale à la surface des feuilles et la verticale dans le modèle ellipsoïdal de distribution des angles foliaires (LIDF), pour $\chi = 0{,}2$ (en **bleu** ; couvert érectophile), $\chi = 1$ (en **orange** ; couvert sphéroïdal) et $\chi = 5$ (en **vert** ; couvert planophile). On note que dans ce modèle, la probabilité d'existence d'une feuille horizontale est nulle quelle que soit la valeur de χ.

3.1.5 Étude de la variabilité des indices de rendement et d'autres grandeurs physiques

Le rendement quantique de fluorescence de la chlorophylle contenue dans les feuilles a été maintenu constant dans les cycles diurnes simulés. Le spectre d'excitation de la fluorescence chlorophyllienne dépendant de la longueur d'onde, les variations de la forme du spectre solaire au cours de la journée (à cause des variations des proportions de rayonnement direct et diffus) entraînent des variations du rendement de fluorescence du couvert (Fournier et coll., 2012). Ces variations sont très faibles durant la journée (moins de 0,3 %), ainsi afin de comparer la forme du cycle diurne des indicateurs de rendement de fluorescence de la végétation aux cycles diurnes du rendement de fluorescence, on s'intéressera à regarder leur constance au cours du cycle diurne.

On s'intéresse ici uniquement à l'influence du LAI et du paramètre de structure de la végétation (χ) sur la forme des cycles diurnes des indicateurs de rendement et d'autres grandeurs physiques, on tracera par rapport au LAI et à χ l'écart type des valeurs prises par la grandeur Q entre 8 h et 16 h (ΔQ) calculé comme suit :

$$\Delta Q = \operatorname{sgn}\left(Q\left(12\text{ h}\right) - Q\left(8\text{ h}\right)\right) \times \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}} \tag{3.17}$$

$$= \operatorname{sgn}\left(Q\left(12\text{ h}\right) - Q\left(8\text{ h}\right)\right) \times \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i - \bar{Q}\right)^2} \Big/ \bar{Q} \tag{3.18}$$

où Q peut être ASFY_{687}, ASFY_{760}, FF_{685} ou FF_{758} à 687 ou 760 nm, fAPAR, $\tau_c\,(687\text{ nm})$ (noté $\tau_{c\ 687}$), $\tau_c\,(760\text{ nm})$ (noté τ_{c760}) et $\tilde{\rho}\,(685\text{ nm})$ (noté $\tilde{\rho}_{685}$), $\operatorname{sgn}(x)$ est la fonction donnant le signe de x, σ_Q l'écart type de la grandeur Q entre 8 h et 16 h, $\bar{Q}$ la moyenne de Q entre 8 h et 16 h, Q_i la valeur de Q au temps t_i, avec $t_1 = 8$ h et $t_n = 16$ h (n valant 9).

La variation journalière de la grandeur Q, ΔQ, est donc l'écart type de Q sur la portion de cycle diurne allant de 8 h à 16 h (centrée sur midi), auquel on ajoute le signe de la différence entre ses valeurs à 12 h et à 8 h. Ainsi, si le cycle diurne de Q est creusée à midi, ΔQ prend une valeur négative, s'il est convexe, ΔQ est positif. En outre, si Q ne varie pas au cours de la journée, ΔQ vaut zéro.

3.2 Résultats et discussion

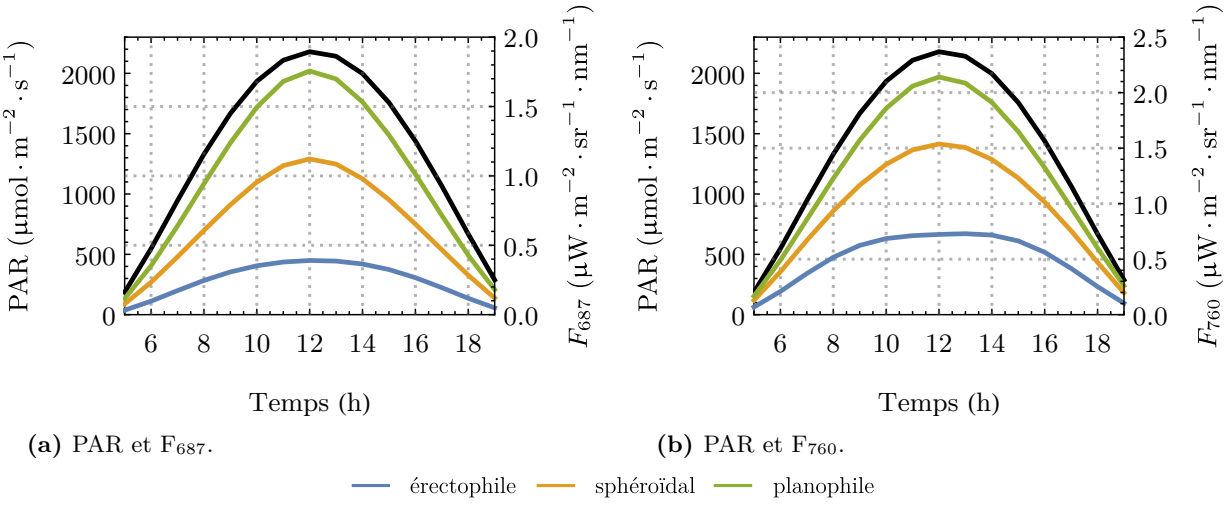
Afin d'étudier et interpréter les variations des grandeurs simulées grâce au modèle, on choisit de montrer en premier lieu les cycles diurnes de quelques couverts caractéristiques (érectophile, sphéroïdal ou planophile) parmis les 380 simulés afin d'observer concrètement les effets de la structure du couvert sur ces variations. On montre ensuite des graphes à courbe de niveau synthétisant les variations journalières des grandeurs simulées pour tous les couverts, de façon à dégager les tendances générales et les limites de ces variations.

3.2.1 Cycles diurnes

Les cycles diurnes présentés ici correspondent tous à des couverts de LAI = 3 et sont érectophile ($\chi = 0{,}3$), sphéroïdal ($\chi = 1$) ou planophile ($\chi = 3{,}6$).

3.2.1.1 Cycles diurnes de fluorescence

La figure 3.2 montre le PAR et les flux de fluorescence à 687 nm et à 760 nm vus au nadir pour les trois couverts végétaux de structures différentes. Les flux de fluorescence augmentent avant midi et diminuent après en suivant grossièrement les variations du PAR. Les taux d'accroissement et de décroissement de la fluorescence dépendent de la structure de la végétation : ils diminuent avec l'érectophilie et inversement augmentent avec la planophilie. Autour du midi solaire les cycles diurnes peuvent avoir différentes formes, ils peuvent être concaves, plats ou convexes. Il s'agit de l'influence de l'érectophilie qui diminue le flux de fluorescence à midi avec l'augmentation de l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur les feuilles.



(a) PAR et F_{687}. **(b)** PAR et F_{760}.

Figure 3.2 – Cycles diurnes du PAR (en **noir**) et de F_{687} et F_{760} vus au nadir pour des couverts végétaux érectophile (en **bleu**), sphéroïdal (en **orange**) et planophile (en **vert**) de LAI = 3.

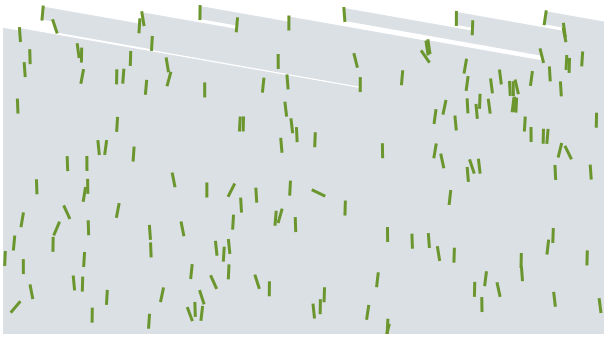
3.2.1.2 Interception de la lumière solaire par le couvert

Une représentation idéalisée de l'interception du rayonnement solaire par le couvert en fonction de l'angle zénithal solaire et de la distribution angulaire des feuilles peut aider à l'interprétation des résultats des simulations. Fluorsail modélise l'absorption de la lumière dans un milieu turbide, soit par une loi de Beer-Lambert. Néanmoins, une visualisation de l'interception de la lumière dans un milieu composé d'éléments géométriques discrets peut rendre compte des différences d'interception selon les conditions d'éclairement et la géométrie du couvert.

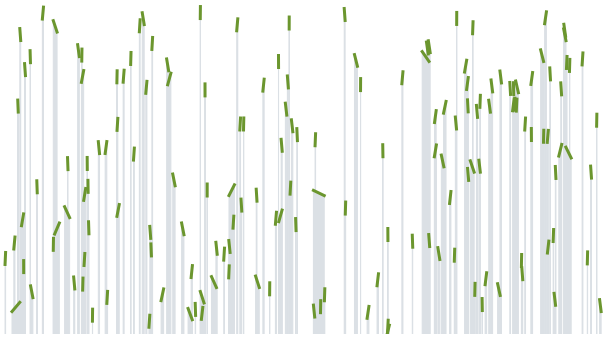
La figure 3.3 présente les simulations numériques de l'interception de la lumière par des feuilles pour différents angles de feuilles et du rayonnement incident [6].

6. On notera que ces schémas ne correspondent pas rigoureusement à ce que l'on observerait d'une coupe en deux dimen-

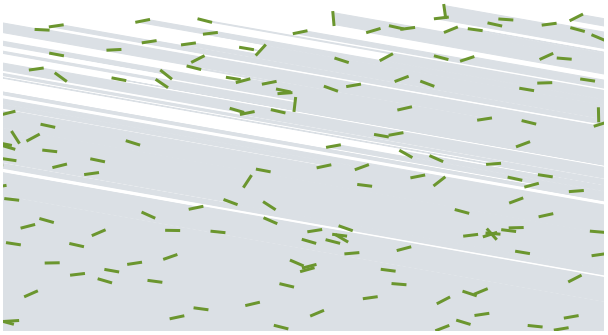
Afin de synthétiser l'information visuelle de la figure figure 3.3, la figure 3.4 présente la fraction de lumière qui n'a pas encore été interceptée par des feuilles en fonction de la profondeur dans le couvert. On remarque que pour un angle rasant ($\theta_\odot = 80°$), correspondant au matin ou au soir, la lumière pénètre moins profondément dans un couvert érectophile que planophile. Pour un angle zénithal minimal ($\theta_\odot = 0°$), correspondant au midi solaire, on observe l'inverse : la lumière pénètre à des profondeurs plus grandes pour un couvert érectophile que pour un planophile. Concernant l'émission de la fluorescence vers le zénith (dans le cas d'une mesure au nadir), celle-ci émerge moins facilement du couvert si elle a été émise profondément en son sein.



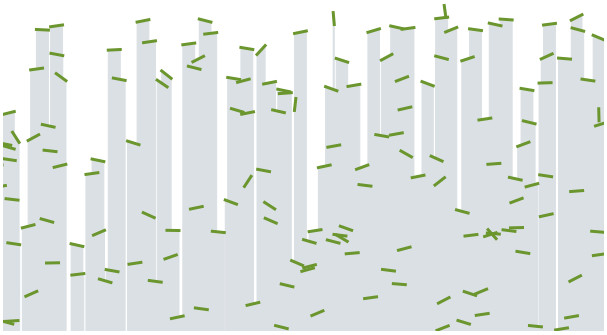
(a) $\theta_\odot = 80°$, $\chi = 0{,}2$ et LAI $= 3$.



(b) $\theta_\odot = 0°$, $\chi = 0{,}2$ et LAI $= 3$.



(c) $\theta_\odot = 80°$, $\chi = 5$ et LAI $= 3$.



(d) $\theta_\odot = 0°$, $\chi = 5$ et LAI $= 3$.

Figure 3.3 – Ces quatre figures représentent en deux dimensions la pénétration du rayonnement solaire dans le couvert en fonction de l'angle zénithal solaire ($\theta_\odot$) et du paramètre χ de la distribution des angles foliaires. Les feuilles sont représentées par des segments (en **vert**) et le rayonnement solaire par les zones où il ne parvient pas (en **gris**).

3.2.1.3 Cycles diurnes du fAPAR, de τ_c et de $\tilde{\rho}$

Afin de comprendre comment la structure influe sur la forme des cycles diurnes de l'ASFY et des FF, nous allons étudier les grandeurs qui les composent. L'équation 3.7 montre que l'ASFY est le produit du rendement φ_c par le fAPAR et τ_c et l'équation 3.9 que les FF_{λ_0} sont le produit du rendement par le fAPAR, τ_c et l'inverse de la pseudoréflectance à la longueur d'onde λ_0.

La figure 3.5 nous montre que durant la journée, pour un LAI de 3, le fAPAR est concave pour les couverts érectophiles, constant pour les couverts planophiles et présente une forme intermédiaire — légèrement concave — pour les couverts sphéroïdaux. Le fAPAR peut atteindre jusqu'à 0,96 pour un couvert planophile à fort LAI ($\chi = 10$ et LAI $= 10$) et peut descendre jusqu'à 0,2 à midi pour un couvert érectophile avec un très faible LAI ($\chi = 0{,}1$ et LAI $= 0{,}5$) (non montré sur la figure).

À midi, à cause de de la faible surface des feuilles présentée au Soleil, les couverts érectophiles absorbent une fraction de rayonnement solaire moins importante que le matin ou le soir. En revanche, les couverts

sions d'un couvert tridimensionnel. En effet, la distribution ellipsoïdale a été utilisée pour générer aléatoirement des angles de feuilles dans le plan, cela n'est pas équivalent à générer des angles de feuilles dans l'espace pour ensuite les couper par en plan vertical. Dans ce deuxième cas, on observerait pour un couvert érectophile plus de sections horizontales que ce n'est le cas ici, celles-ci résultant du sectionnement de feuilles quasi verticales mais aussi quasi parallèles au plan de coupe.

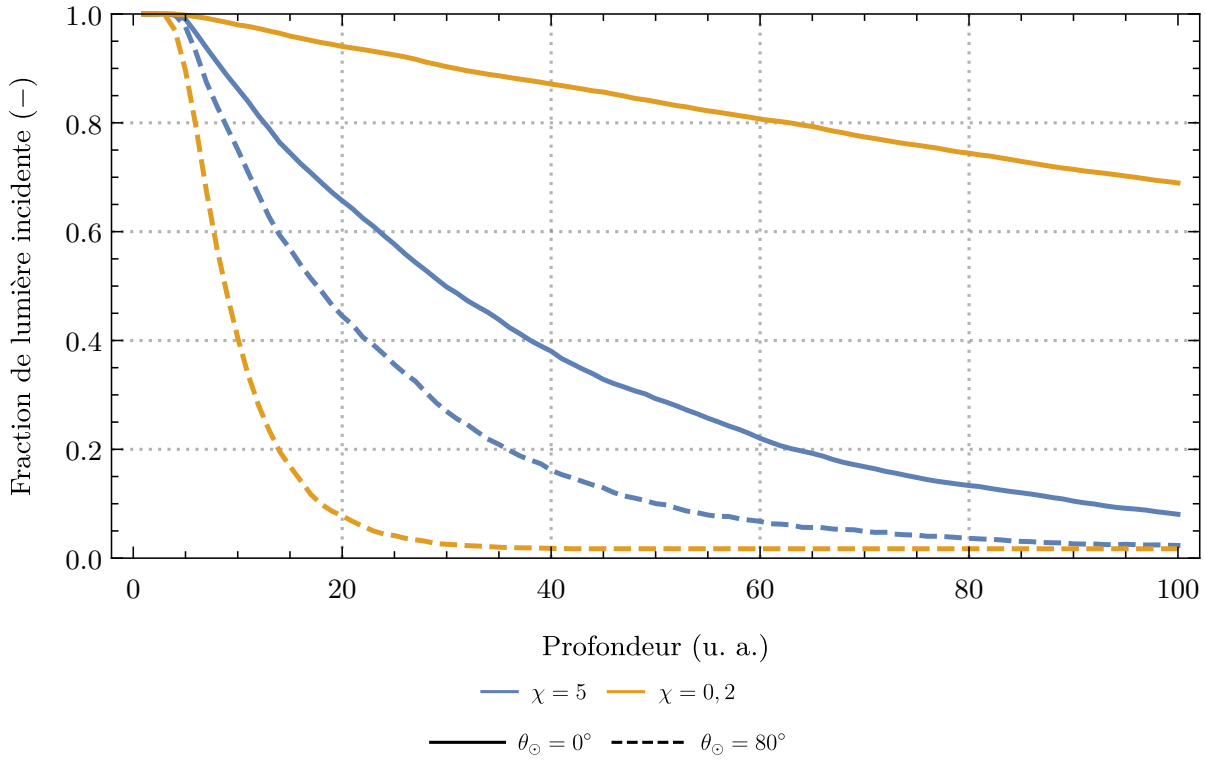


Figure 3.4 – Profil de la fraction de lumière incidente présente dans la végétation en fonction de la profondeur dans le couvert pour différents types de structure et angles d'incidence du rayonnement solaire. Les couverts représentés sont les mêmes que ceux de la figure 3.3 : érectophile ($\chi = 5$ et LAI = 3 ; en **bleu**) et planophile ($\chi = 0{,}2$ et LAI = 3 ; en **orange**), ainsi que les angles zénithaux solaires : $\theta_\odot = 0°$ (—) et $\theta_\odot = 80°$ (- -).

planophiles absorbent quasiment la même fraction de rayonnement solaire au cours de la journée du fait de l'horizontalité de leurs feuilles.

Ces considérations concernent seulement l'absorption du rayonnement induisant la fluorescence, pour comprendre la forme des cycles diurnes des indices de rendement, il convient d'étudier la fraction de fluorescence émergeant du couvert dans la direction d'observation.

En regardant les variations de τ_c (figure 3.6), on peut voir que pour un LAI donné, la forme du cycle diurne est convexe à la fois pour les couverts érectophiles et planophiles. La valeur moyenne de τ_c quant à elle diminue avec l'érectophilie et est plus grande à 760 nm qu'à 687 nm.

Cette observation nous renseigne sur le fait que la fluorescence émerge plus du couvert à midi que le matin ou le soir. Un retour à la figure 3.4 peut nous aider à trouver une explication à ce phénomène. On remarque que le midi ($\theta_\odot = 0°$) pour les deux couverts ($\chi = 0{,}2$ et $\chi = 5$) la lumière pénètre à une plus grande profondeur dans le couvert que le matin ou le soir ($\theta_\odot = 80°$). Cela peut paraître contradictoire avec une faible valeur de τ_c le matin et une forte le midi, mais il s'agit de se représenter sur les schémas de la figure 3.3 ce que verrait un observateur placé au zénith du couvert. Celui-ci verrait le midi — lorsque le Soleil est proche du zénith — une grande quantité de feuilles éclairées par le Soleil. Voyant ces feuilles éclairées, il verrait une bonne partie de la fluorescence émise par ces feuilles. Ce phénomène est comparable à celui de *hotspot*, où la réflectance du couvert est ici comparable à l'émission de fluorescence.

Quant à la valeur moyenne des cycles diurnes de τ_c, la raison pour laquelle la fluorescence émerge moins pour les couverts érectophiles est que l'émission de fluorescence, que l'on considère lambertienne, est renvoyée dans le couvert pour y être préférentiellement réabsorbée dans le cas de $\tau_{c\ 687}$ ou diffusée dans celui de $\tau_{c\ 760}$.

Les variations diurnes de la pseudoréflectance du couvert à 685 nm dans la direction d'observation, $\tilde{\rho}_{685}$, présentent une forme particulière (figure 3.7a). La courbe est convexe pour un couvert planophile, pour un couvert sphéroïdal elle est plus basse et plus convexe encore, tandis que pour un couvert érectophile elle est en forme de cloche centrée sur le midi solaire et dépasse les courbes des couvert planophile et sphéroïdal. De plus, le matin, $\tilde{\rho}_{685}$ diminue avec l'érectophilie.

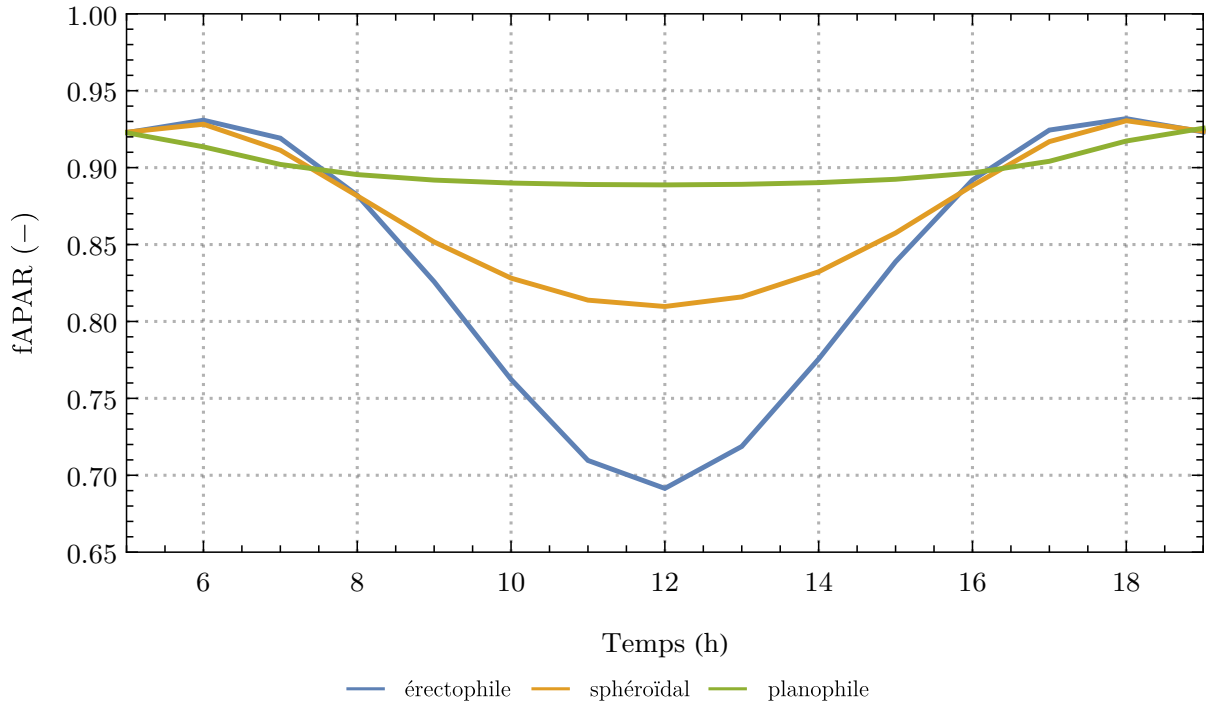


Figure 3.5 – Cycles diurnes du fAPAR pour des couverts végétaux érectophile (en **bleu**), sphéroïdal (en **orange**) et planophile (en **vert**) de LAI = 3.

Si $\tilde{\rho}_{685}$ diminue avec l'érectophilie, c'est que la direction d'observation étant dirigée vers le nadir, l'observateur ne voit pas la partie illuminée des feuilles le matin si le couvert est érectophile. Pour les couverts planophiles, les feuilles sont horizontales, et même si le rayonnement solaire arrive de façon oblique, l'observateur voit des feuilles illuminées.

Au contraire, à midi, $\tilde{\rho}_{685}$ augmente avec l'érectophilie car à ce moment plus de sol est illuminé et vu depuis le nadir que pour un couvert planophile. La réflectance du sol simulée est d'environ 20 % à 685 nm, ce qui est très supérieur à la réflectance des feuilles à cette longueur d'onde. Cela augmente donc la pseudoréflectance à 685 nm pour les couverts érectophiles à midi.

À 758 nm (figure 3.7b), l'érectophilie diminue la valeur moyenne de $\tilde{\rho}_{758}$. De plus, les cycles diurnes sont légèrement convexes.

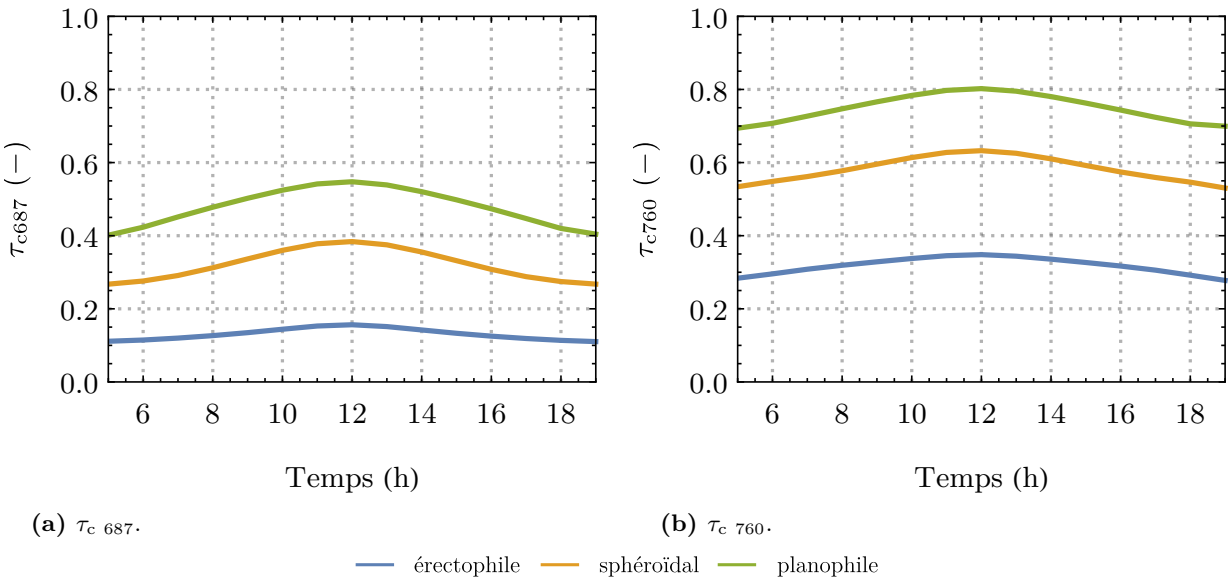
On ne note pas de grande différence entre les formes des cycles diurnes de la pseudoréflectance à 758 nm. À cause de la faible absorptance des feuilles à cette longueur d'onde, et donc des multiples réflexions et transmissions que subissent les photons, la variation de lumière renvoyée vers l'observateur au cours du cycle diurne est assez peu dépendante de l'orientation des feuilles.

3.2.1.4 Cycles diurnes de l'ASFY

La figure 3.8 montre les cycles diurnes de l'ASFY calculés à 687 nm et 760 nm pour les trois types de couverts végétaux précédents ($\chi = 0{,}3$, $\chi = 1$ et $\chi = 3{,}6$ avec LAI = 3). En calculant l'ASFY, par la division des flux de fluorescence par le PAR, la forme en cloche du cycle diurne de fluorescence est approximativement annulée car le cycle diurne du PAR est également en cloche.

On remarque que les cycles diurnes de l'ASFY_{687} (figure 3.8a) sont convexes pour les couverts planophile et sphéroïdal. On observe la même forme pour l'ASFY_{760} calculé sur le couvert planophile (figure 3.8b).

Une interprétation à cette forme est que dans le cas d'un couvert planophile, le matin et le soir la lumière solaire pénètre plus le couvert. En effet, à ces moments, l'angle zénithal solaire est élevé, les angles foliaires quant à eux étant plutôt faibles (feuilles horizontales), les rayons solaires entrent plus profondément dans le couvert avant d'être interceptés par les feuilles. Cela rend la fluorescence moins visible depuis le nadir (figure 3.3c), tandis qu'à midi, les feuilles sont à la fois bien vues depuis le nadir et bien éclairées par le Soleil (figure 3.3d), l'ASFY est alors maximal.



(a) $\tau_{c\ 687}$. **(b)** $\tau_{c\ 760}$.

FIGURE 3.6 – Cycles diurnes des $\tau_{c\ 687}$ et $\tau_{c\ 760}$ vus au nadir pour des couverts végétaux érectophile (en **bleu**), sphéroïdal (en **orange**) et planophile (en **vert**) de LAI = 3.

Si l'on s'intéresse maintenant au couvert érectophile, on remarque que les cycles diurnes des ASFY calculés dans les deux bandes sont légèrement concaves.

Cela s'explique *a contrario* par le fait que la fluorescence est plus importante proportionnellement au PAR le matin que le midi ; en effet, l'angle d'incidence des rayons solaires est minimal le matin et le soir, générant plus de fluorescence relativement à l'intensité du rayonnement solaire qu'un couvert planophile (figure 3.3a). À l'inverse, le midi, le rayonnement solaire pénètre profondément dans le couvert où la fluorescence est en grande partie bloquée lors de sa réémission qui est lambertienne.

Ce phénomène a un effet direct sur la forme du cycle diurne de l'ASFY. Un couvert érectophile émet relativement au PAR plus de fluorescence le matin et le soir que le midi, le cycle diurne de l'ASFY est alors concave ; on observe l'inverse pour un couvert planophile, le cycle diurne de l'ASFY est alors convexe.

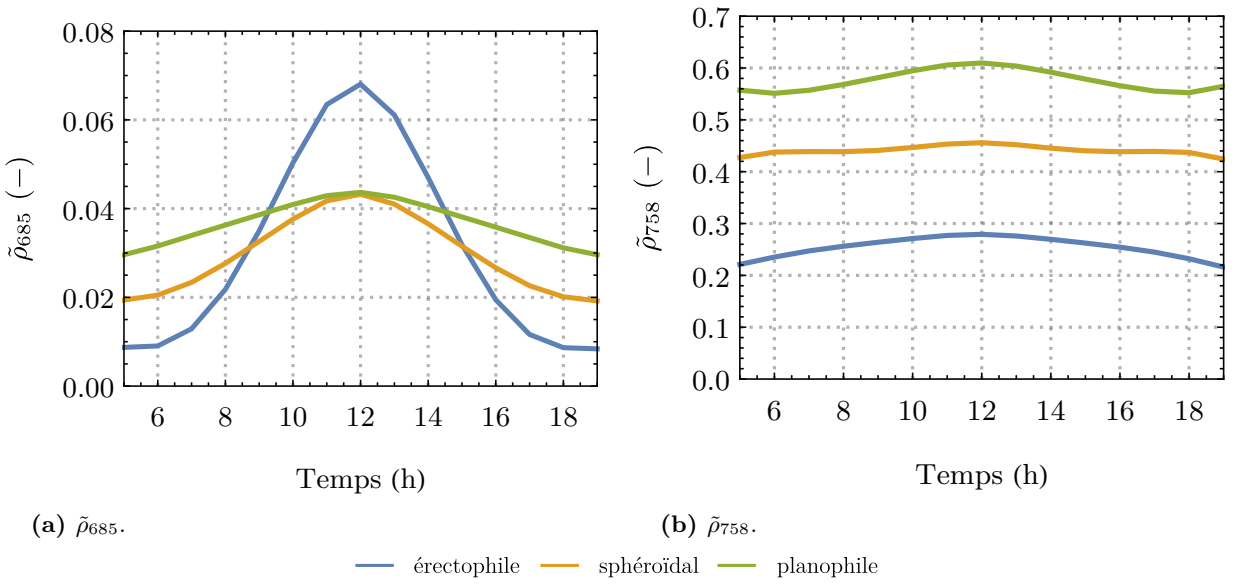
En comparaison aux cycles diurnes des flux de fluorescence, ceux des ASFY montrent moins de variations, et celles-ci dépendent de la structure de la végétation. On peut voir également que la valeur moyenne des cycles diurnes dépend également de la structure de la végétation. Plus le couvert est érectophile, plus faible est cette valeur moyenne. De plus, ASFY_{760} est plus grand que ASFY_{687} à couvert identique.

3.2.1.5 Cycles diurnes des FF

Pour le calcul des FF, j'ai choisi d'utiliser deux valeurs différentes de λ_0 dans la définition de FF_{λ_0} (équation (3.3)). Lorsque l'on mesure dans les bandes d'absorption (dans notre cas les bandes O_2-A à 760 nm et O_2-B à 687 nm), au moins un canal donne la radiance de la végétation hors-bande (dans notre cas à 758 nm et 685 nm). Daumard et coll. (2010, 2012) choisissent d'utiliser $\lambda_0 = 685$ nm pour le normaliser la fluorescence à 687 nm et à 760 nm dans le calcul de FF. L'hypothèse faite par ces auteurs qui justifie le choix d'utiliser $\lambda_0 = 685$ nm est qu'à cette longueur d'onde l'absorptance des feuilles étant élevée (de l'ordre de 0,9), la luminance du couvert porte une information sur l'absorption de la végétation.

On fait le choix ici d'étudier les variations journalières des FF calculés avec $\lambda_0 = 685$ nm, mais aussi avec $\lambda_0 = 758$ nm. La lumière se comporte très différemment à ces deux longueurs d'onde au sein du couvert. En effet, à la seconde longueur d'onde, la lumière est très peu absorbée par la végétation (l'absorptance des feuilles est de l'ordre de 0,05).

La figure 3.9 présente les cycles diurnes de FF_{685}, calculé pour la fluorescence à 687 nm ($\mathrm{FF}_{685}(687)$) et celle à 760 nm ($\mathrm{FF}_{685}(760)$) pour les trois couverts aux différents χ. On peut observer que les cycles diurnes des FF ont tous une forme concave qui s'affaiblit avec la planophilie jusqu'à devenir un plateau pour les couverts planophiles. Comme pour les cycles diurnes d'ASFY, la valeur moyenne des FF diminue avec l'érectophilie. De plus, la valeur moyenne de $\mathrm{FF}_{685}(687)$ et plus faible que celle de $\mathrm{FF}_{685}(760)$.

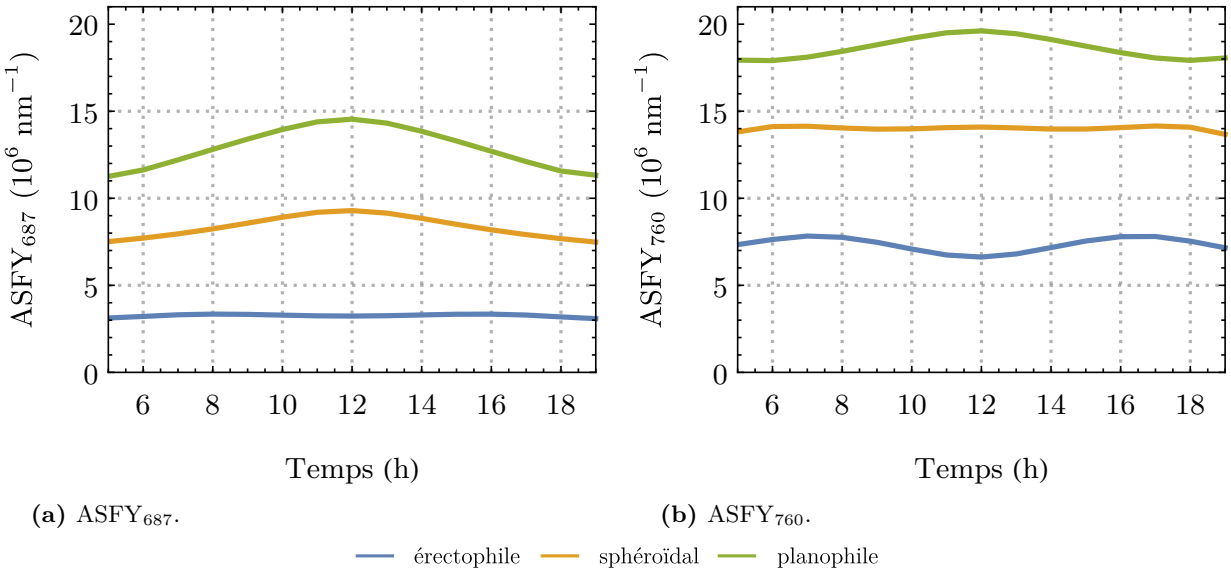


(a) $\tilde{\rho}_{685}$. **(b)** $\tilde{\rho}_{758}$.

Figure 3.7 – Cycles diurnes des pseudoréflectances du couvert à 687 nm ($\tilde{\rho}_{685}$) et à 758 nm ($\tilde{\rho}_{758}$) vues au nadir pour des couverts végétaux érectophile (en **bleu**), sphéroïdal (en **orange**) et planophile (en **vert**) de LAI = 3.

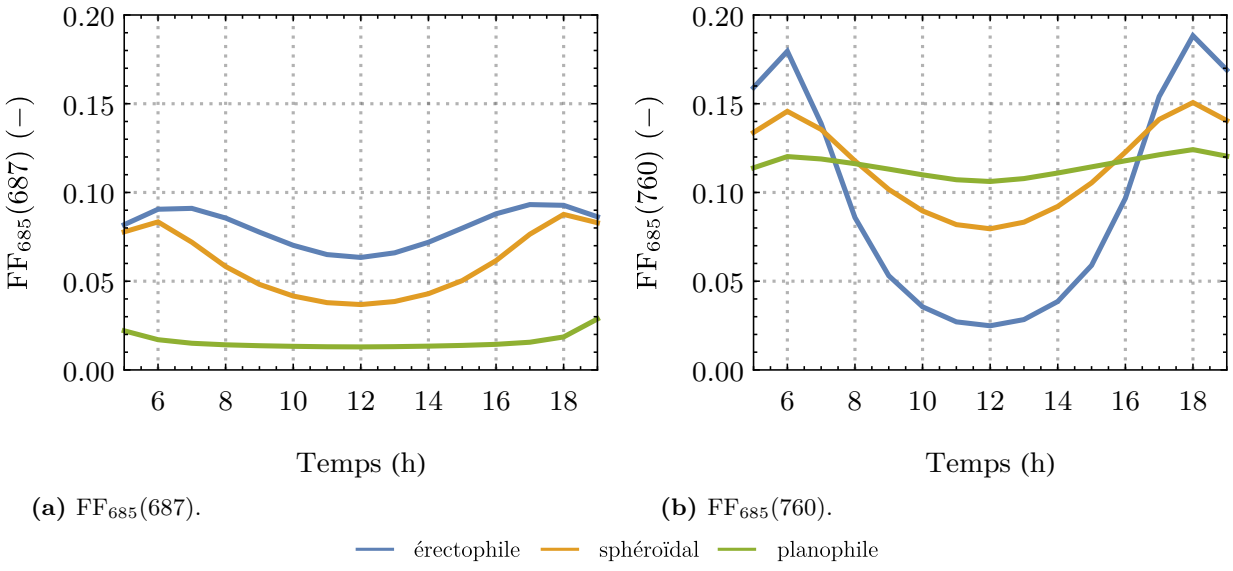
Si l'on s'intéresse aux cycles diurnes de FF_{758} (figure 3.10), on observe des formes assez différentes de celles de FF_{685}. Cependant, on remarque les mêmes tendances : la concavité diminue avec la planophilie. À 687 nm (figure 3.10a), les cycles diurnes des couverts sphéroïdal et planophile sont convexes, à 760 nm, les cycles diurnes sont plats autour de midi.

On a vu ici l'influence de χ sur les cycles diurnes des indices de rendement, ainsi que sur ceux des grandeurs qui témoignent du transfert radiatif dans le couvert pour LAI = 3. Une première conclusion est qu'aucun indice de rendement ne présente une forme de cycle diurne identique à celle du rendement de fluorescence — c'est-à-dire constante — pour tout type de couvert.



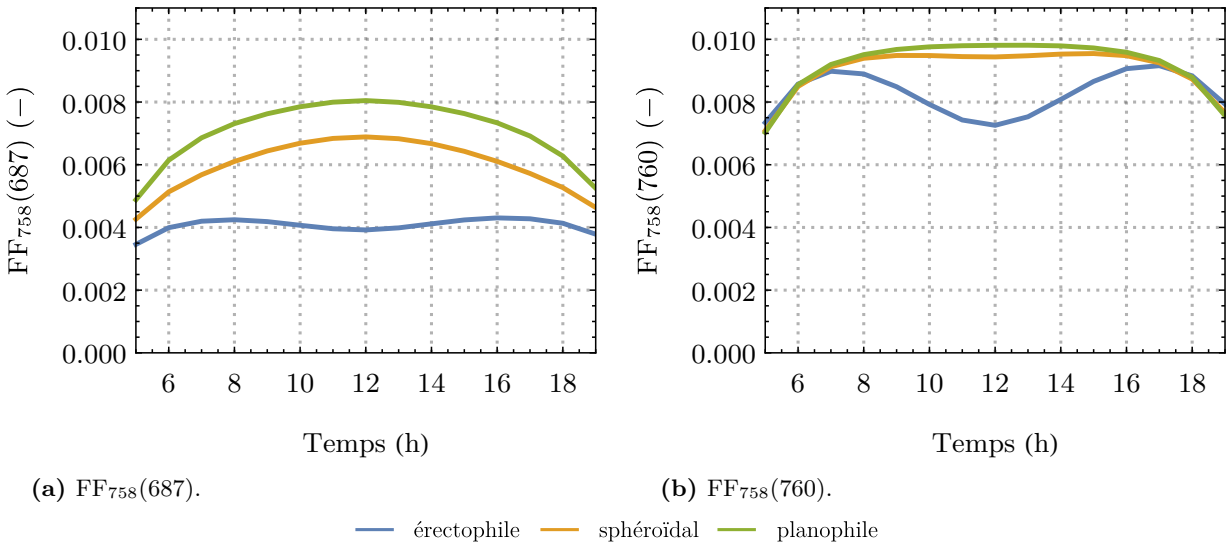
(a) ASFY$_{687}$. **(b)** ASFY$_{760}$.

FIGURE 3.8 – Cycles diurnes des ASFY$_{687}$ et ASFY$_{760}$ vus au nadir pour des couverts végétaux érectophile (en **bleu**), sphéroïdal (en **orange**) et planophile (en **vert**) de LAI = 3.



(a) FF$_{685}$(687). **(b)** FF$_{685}$(760).

FIGURE 3.9 – Cycles diurnes des FF$_{685}$(687) et FF$_{685}$(760) vus au nadir pour des couverts végétaux érectophile (en **bleu**), sphéroïdal (en **orange**) et planophile (en **vert**) de LAI = 3.



(a) $FF_{758}(687)$. **(b)** $FF_{758}(760)$.

Figure 3.10 – Cycles diurnes des $FF_{758}(687)$ et $FF_{758}(760)$ vus au nadir pour des couverts végétaux érectophile (en **bleu**), sphéroïdal (en **orange**) et planophile (en **vert**) de LAI = 3.

3.2.2 Graphes des variations diurnes

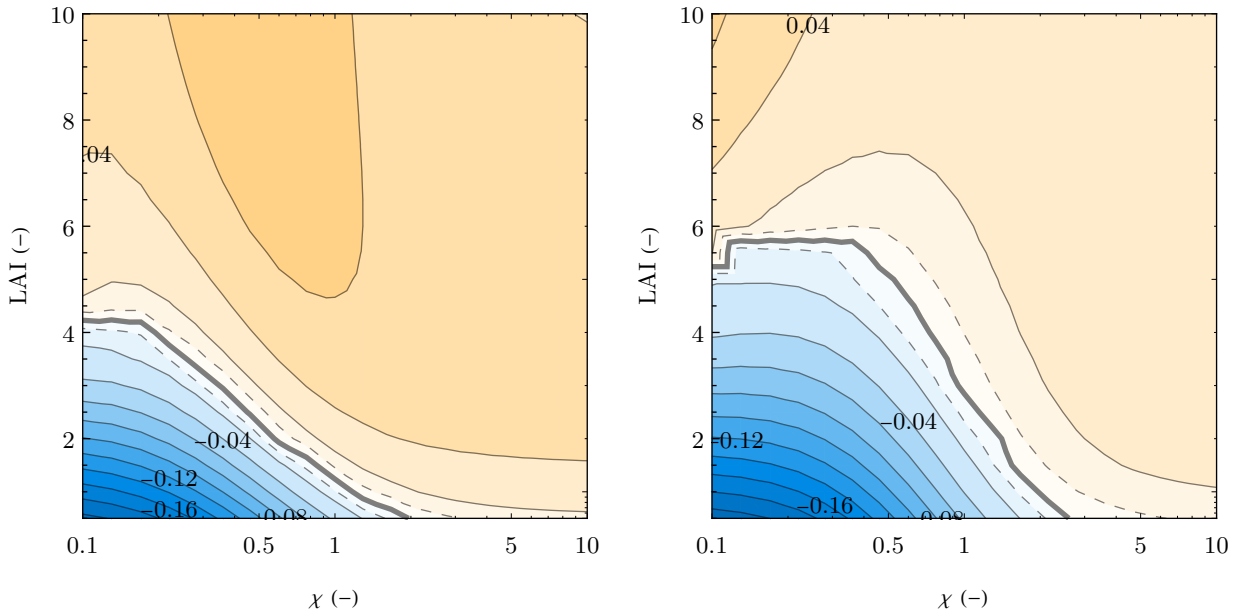
On a vu pour trois couverts caractéristiques les variations au cours de la journée de la fluorescence, des indices de rendements et des différentes contributions aux indices de rendement que sont le fAPAR, τ_c et $\tilde{\rho}$. Afin de poursuivre cette étude pour la totalité des couverts simulés, on propose de tracer la variation relative journalière en fonction du LAI et de χ. On rappelle que ΔQ (équation (3.18)), cet indicateur de variation de la grandeur Q, est calculé comme l'écart type des valeurs prise par Q entre 8 h et 16 h, rapporté à la valeur moyenne que prend Q dans cet intervalle, et signé positivement ou négativement selon que la forme de ses variation est convexe ou concave.

3.2.2.1 Variations de l'ASFY

Les figures 3.11a et 3.11b montrent les variations diurnes de $ASFY_{687}$ et $ASFY_{760}$ vus depuis le nadir. On rappelle que la variation du rendement de fluorescence du couvert végétal est de l'ordre de 0,3 % dans les simulations. Une valeur de ΔASFY proche de zéro, indique une variation de l'indice de rendement proche de celle du rendement de fluorescence du couvert végétal.

Sur la figure 3.11a, pour des couverts érectophiles ($\chi < 1$) avec un LAI inférieur à 4, les variations diurnes de $ASFY_{687}$ sont négatives et l'on peut voir que plus le couvert est érectophile ou plus le LAI est petit, plus la valeur absolue de $\Delta ASFY_{687}$ est grande dans cette région.

Pour les couverts planophiles ($\chi > 1$) avec un LAI supérieur à 4, $\Delta ASFY_{687}$ est positif jusqu'à 6 %. Entre les deux zones qui viennent d'être décrites, on peut en observer une où $\Delta ASFY_{687}$ est proche de zéro (cette zone est délimitée par deux lignes interrompues (- -) et correspond à l'inéquation $-1\ \% \leq \Delta ASFY_{687} \leq 1\ \%$).



(a) $\Delta ASFY_{687}$. **(b)** $\Delta ASFY_{760}$.

Figure 3.11 – ΔASFY en fonction du LAI et de χ. Les lignes en trait plein (— et ▬) sont tracées tous les 2 %, les lignes épaisses (▬) correspondent au zéro et les lignes interrompues (- -) correspondent à ±1 %.

Sur la figure 3.11b on peut observer à peu près les mêmes tendances. Pour les couverts érectophiles avec un LAI inférieur à 6, les variations de $ASFY_{760}$ sont négatives et $\Delta ASFY_{760}$ est positif jusqu'à 4 % pour des couverts planophiles avec un LAI supérieur à 6. On observe une zone similaire avec des variations contenues entre -1 % et 1 % séparant les deux zones.

Rappelons que la variation diurne du rendement de fluorescence induite par un stress que l'on souhaite déceler peut être de l'ordre de 10 % à 20 %. L'ASFY paraît donc être un bon indicateur de rendement pour des couverts à fort LAI (LAI > 4 dans la bande O_2-B, LAI > 6 pour O_2-A) ou planophile ($\chi > 1$) où ses variations induites par des effets de structure ne dépassent pas 6 %.

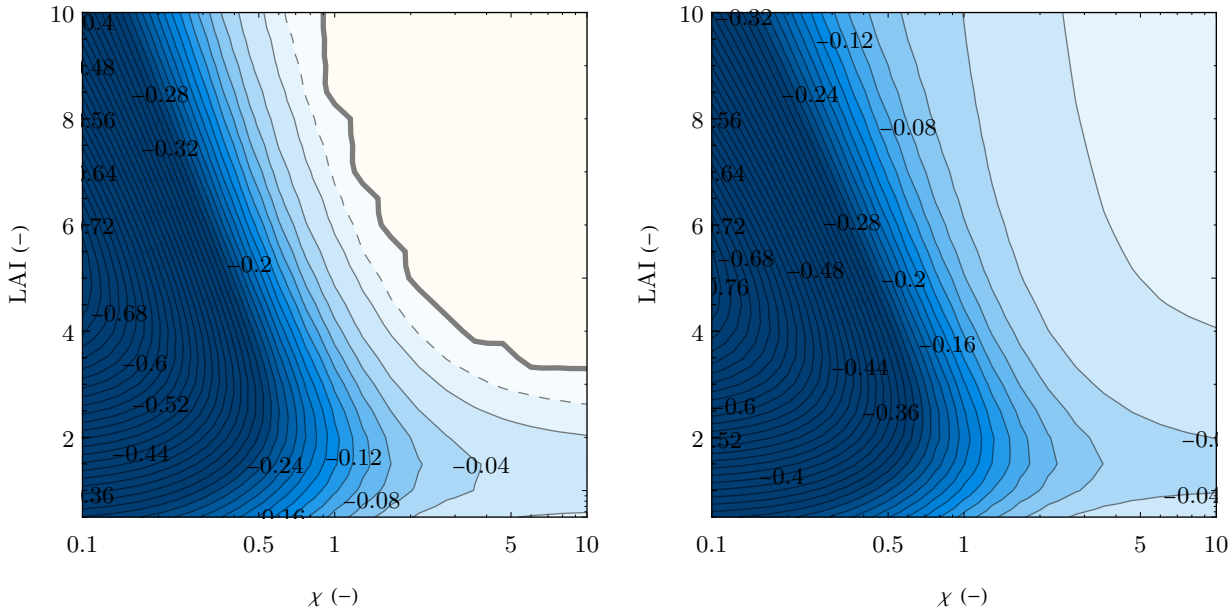
3.2.2.2 Variations des FF

Les figures 3.12a et 3.12b montrent $\Delta FF_{685}(687)$ et $\Delta FF_{685}(760)$ respectivement en fonction du LAI et de χ. Elles montrent une grande gamme de variations en comparaison de celles des ASFY.

À 687 nm, on peut voir une très grande variation journalière de $FF_{685}(687)$: il descend jusqu'à -76 % pour des couverts érectophiles. Pour des couverts dont le LAI est supérieur à 3 et le port de feuille planophile, $\Delta FF_{685}(687)$ reste entre -1 % et 1 %.

Une zone où les variations de $FF_{685}(687)$ sont inférieures à 5 % comprend les couverts avec une valeur de χ supérieure à 2. En dehors de cette zone, le cycle diurne de $FF_{685}(687)$ apparaîtrait concave, comme peut l'être le cycle diurne d'un couvert subissant un stress. Les résultats de cette simulation nous indiquent que l'usage de cet indice de rendement pour des couverts érectophiles ou sphéroïdaux peut être équivoque.

Pour $FF_{685}(760)$, les tendances sont similaires mais décalées vers des χ plus grands. Pour des couverts érectophiles, $\Delta FF_{685}(760)$ descend jusqu'à -78 % et pour des couverts planophiles avec un LAI supérieur à 3 reste entre -4 % et -1 %. La limite d'usage de cet indicateur pour qu'il n'ait pas de variations qui lui sont propres supérieures à 5 % serait les couverts avec un χ supérieur à 3.



(a) $\Delta FF_{685}(687)$. **(b)** $\Delta FF_{685}(760)$.

Figure 3.12 – ΔFF_{685} en fonction du LAI et de χ. Les lignes en trait plein (— et ▬) sont tracées tous les 2 %, les lignes épaisses (▬) correspondent au zéro et les lignes interrompues (- -) correspondent à ±1 %.

Les figures 3.13a et 3.13b montrent les variations de FF calculé cette fois avec $\lambda_0 = 758$ nm ; à une longueur d'onde peu absorbée donc.

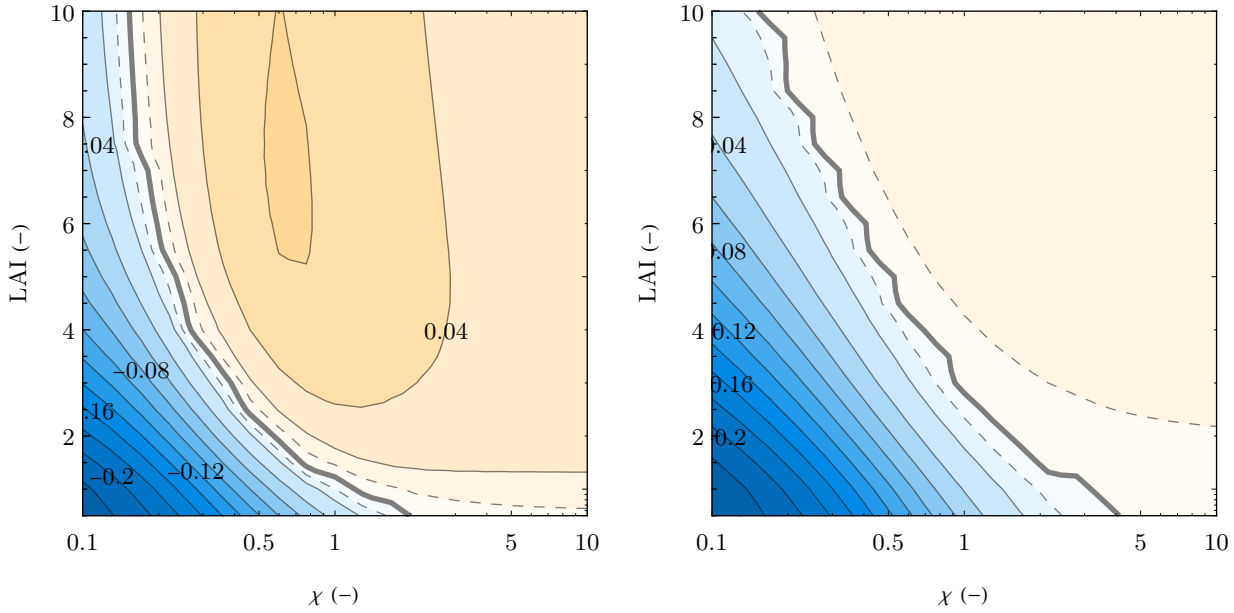
À 687 nm, les variations sont plus faibles que pour $FF_{685}(687)$ et vont d'environ -23 % à 6 %. Une grande zone de couverts a des variations comprises entre ±6 %. Il s'agit des couverts avec un LAI supérieur à 3 et un χ supérieur à 0,2.

FF_{758} est donc un indicateur de rendement assez bon, puisqu'il représente bien le rendement pour un grand nombre de couverts. Pour les couverts à faible LAI et érectophiles, $\Delta FF_{758}(687)$ descend jusqu'à -23 %. Cette variation est de l'ordre de celles que l'on observe dans les cycles diurnes du rendement de fluorescence de plants stressés.

À 760 nm, on observe une zone plus faiblement étendue où les variations de FF_{758} sont faibles. Il s'agit des couverts dont le LAI est supérieur à 4 et χ supérieur à 0,5 ; $\Delta FF_{758}(760)$ y est confiné entre ±2 %.

3.2.2.3 Variations du fAPAR, de $\Delta\tau_c$ et de $\Delta\tilde{\rho}_{685}$

On cherche ici à étudier l'origine des variations des indices de rendement en détaillant les variations des grandeurs physiques reliées au transfert radiatif dans le couvert. On cherche à savoir comment varie



(a) $\Delta FF_{758}(687)$. **(b)** $\Delta FF_{758}(760)$.

Figure 3.13 – ΔFF_{758} en fonction du LAI et de χ. Les lignes en trait plein (— et ▬) sont tracées tous les 2 %, les lignes épaisses (▬) correspondent au zéro et les lignes interrompues (- -) correspondent à ±1 %.

en fonction du LAI et de χ l'absorption de la lumière photosynthétiquement active (fAPAR), la fraction de fluorescence émergeant du couvert (τ_c), ainsi que la pseudoréflectance du couvert aux longueurs d'onde de calcul des indices ($\tilde{\rho}_{685}$ et $\tilde{\rho}_{758}$).

La figure 3.14 montre ΔfAPAR en fonction du LAI et de χ. Le fAPAR est plutôt constant durant le cycle diurne pour des couverts à grands LAI et χ. Le fAPAR ne varie pas non plus lorsque le LAI est grand et χ faible et le LAI faible et χ grand. Les cycles diurnes du fAPAR présentent une dépression autour de midi lorsque le LAI et χ diminuent, cela est représenté par des valeurs négatives sur la figure qui décroissent avec la décroissance du LAI et de χ.

La constance du fAPAR pour des couverts à grands LAI et χ signifie que dans ce cas le couvert végétal absorbe la même fraction de PAR quel que soit l'angle zénithal solaire. En effet, à midi, les feuilles présentent une surface maximale au Soleil à cause de la planophilie du couvert ; le fAPAR est alors maximal. Lorsque le Soleil est bas dans le ciel, le fAPAR est également maximal, bien que la surface projetée des feuille au Soleil est faible, la hauteur projetée du couvert — due au grand LAI — compense la faible surface projetée des feuilles.

Lorsque le LAI est très faible et que χ est très grand ou l'inverse, le fAPAR ne varie pas non plus beaucoup au cours de la journée. Cela est dû dans le cas d'un faible LAI à la compensation de ce fait par un très fort χ et dans l'autre cas la compensation du faible χ par le fort LAI. Ainsi, l'interception du rayonnement solaire par la végétation ne réduit pas lorsque l'angle zénithal solaire grandit. À noter que le fAPAR est structurel au couvert, il est invariable avec l'angle de visée.

Pour des couverts érectophiles, lorsque l'angle zénithal solaire diminue, la fraction de lumière solaire interceptée par le couvert diminue car une plus grande fraction de celle-ci est interceptée par le sol. Cela explique la dépression autour de midi lorsque χ diminue ainsi que les valeurs négatives de ΔfAPAR sur la figure 3.14.

La diminution du LAI donne des tendances similaires aux variations journalières du fAPAR car plus le LAI diminue, moins la fraction de rayons solaires interceptés autour de midi est importante.

La figure 3.15a montre la variation journalière de l'inverse de la pseudoréflectance du couvert à 685 nm, $1/\Delta\tilde{\rho}_{685}$ en fonction du LAI et de χ. Ses valeurs sont seulement négatives, cela signifie que la pseudoréflectance est toujours plus grande à midi qu'à huit heures. On peut voir également que pour les couverts érectophiles, $1/\Delta\tilde{\rho}_{685}$ diminue fortement avec l'érectophilie : jusqu'à −78 %. Pour les couverts planophiles, $1/\Delta\tilde{\rho}_{685}$ monte jusqu'à −4 %. Pour les couverts érectophiles, lorsque le LAI augmente, $1/\Delta\tilde{\rho}_{685}$ diminue

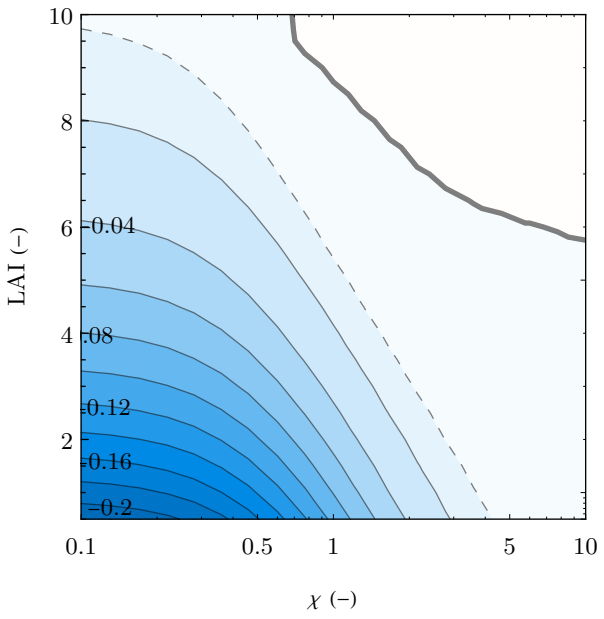


Figure 3.14 – ΔfAPAR en fonction du LAI et de χ. Les lignes en trait plein (— et ▬) sont tracées tous les 2 %, les lignes épaisses (▬) correspondent au zéro et les lignes interrompues (- -) correspondent à ±1 %.

(jusqu'à LAI = 5 lorsque $\chi = 0{,}1$ ou jusqu'à LAI = 2 lorsque $\chi = 1$). Lorsque le LAI augmente encore, $1/\Delta\tilde{\rho}_{685}$ diminue alors.

La figure 3.15b montre les variations de $1/\Delta\tilde{\rho}_{758}$. On voit qu'elles sont toujours négatives, mais contrairement à 685 nm, elles ne varient que très peu en fonction des paramètres du couvert. Elles descendent jusqu'à −10 % pour des couverts très érectophiles. Cela est dû à la faible absorption de la lumière à 758 nm qui fait voir le couvert quasi identiquement le matin et le midi.

Les figures 3.16a et 3.16b montrent $\Delta\tau_c$ en fonction du LAI et de χ pour les tous les couverts simulés à 687 nm et 760 nm respectivement. $\Delta\tau_{c\ 687}$ est positif entre 1 % et 9 %, $\Delta\tau_{c\ 760}$ également, entre 0,5 % et 7 %.

Le fait que $\Delta\tau_c$ est positif à la fois pour 687 nm et 760 nm signifie qu'autour de midi la fluorescence émise émerge plus facilement du couvert que le matin. Cela est dû au fait que les feuilles que voit l'observateur sont plus éclairées lorsque le Soleil est au dessus de l'observateur.

À 760 nm, $\Delta\tau_c$ dépend très peu de l'angle foliaire ni du LAI. Cela peut s'expliquer par le fait qu'à cette longueur d'onde — moins absorbée — la fluorescence « voyage » plus qu'à 687 nm, le couvert apparaît alors plus homogène.

Les variations diurnes de l'ASFY et des FF peuvent être expliquées par les variations que l'on observe du fAPAR, des τ_c et des $1/\tilde{\rho}$.

Pour rappel, les équations 3.7 et 3.9 donnent (sans apposition de (λ_e))

$$\mathrm{ASFY} = \mathrm{fAPAR} \times \tau_c \times \varphi_c \times \pi \tag{3.19}$$

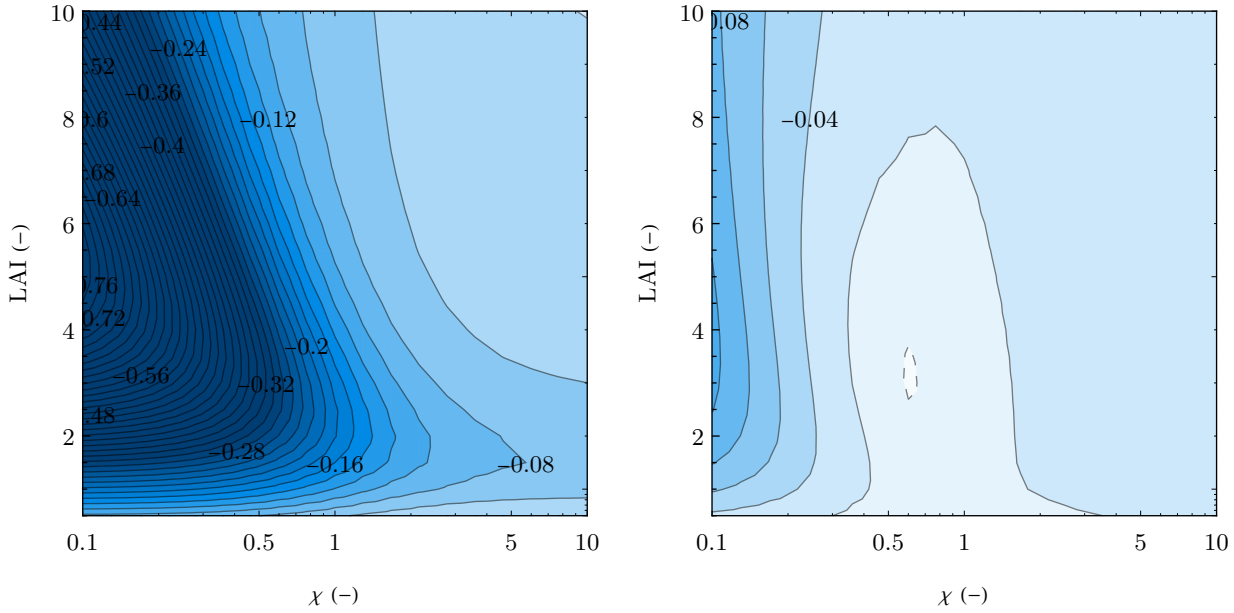
$$\mathrm{FF} = \mathrm{fAPAR} \times \tau_c \times \frac{1}{\tilde{\rho}_{\lambda_0}} \times \varphi_c \tag{3.20}$$

On a donc

$$\Delta\mathrm{ASFY} \simeq \Delta\mathrm{fAPAR} + \Delta\tau_c + \Delta\varphi_c \tag{3.21}$$

$$\Delta\mathrm{FF} \simeq \Delta\mathrm{fAPAR} + \Delta\tau_c + \frac{1}{\Delta\tilde{\rho}_{\lambda_0}} + \Delta\varphi_c \tag{3.22}$$

Ainsi, par exemple l'équation (3.21) montre que si l'on additionne les figures 3.14 (ΔfAPAR) et 3.16a ($\Delta\tau_{c687}$), on obtient une figure très proche de la figure 3.11a ($\Delta\mathrm{ASFY}_{687}$). Cela signifie, dans cet exemple, que la bande fine où $\Delta\mathrm{ASFY}_{687}$ est entre −1 % et 1 % (figure 3.11a) est due à la compensation des valeurs positives de $\Delta\tau_{c687}$ et des valeurs négatives de ΔfAPAR qui sont opposées.



(a) $1/\Delta\tilde{\rho}_{685}$. **(b)** $1/\Delta\tilde{\rho}_{758}$.

Figure 3.15 – $1/\Delta\tilde{\rho}_{685}$ et $1/\Delta\tilde{\rho}_{758}$ en fonction du LAI et de χ. Les lignes en trait plein (— et ▬) sont tracées tous les 2 %, la ligne interrompue (- -) correspond à −1 %.

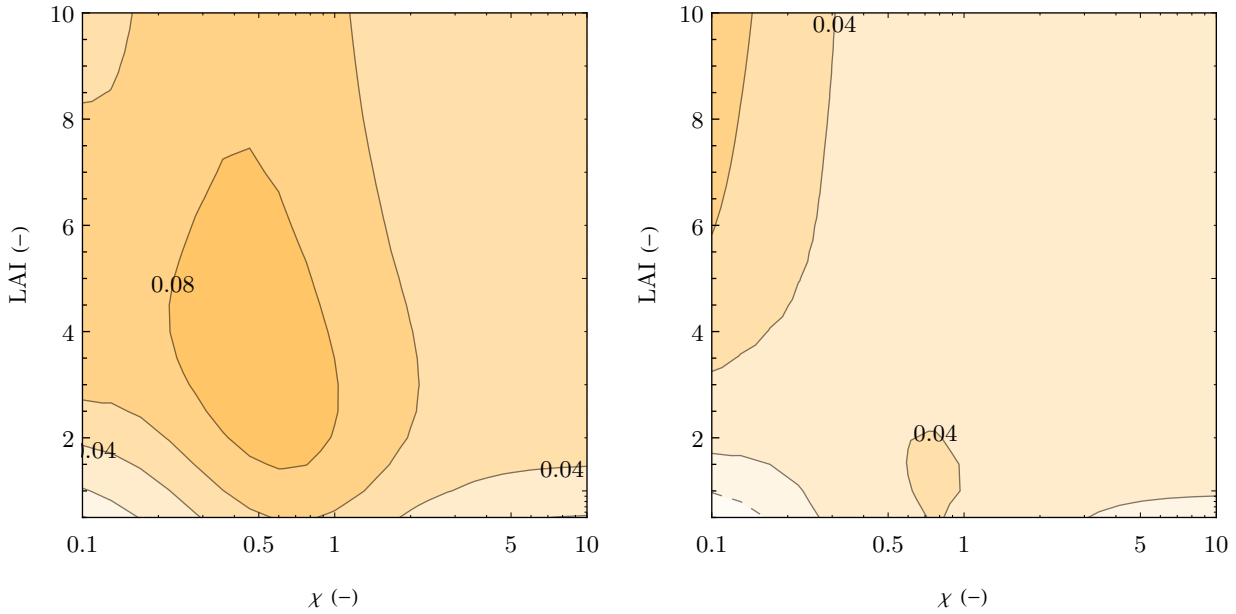
À titre d'exemple supplémentaire, si l'on regarde la figure 3.12a pour $\Delta FF_{685}(687)$, on peut observer le même effet. Les grandes valeurs négatives de $1/\Delta\tilde{\rho}_{685}$ pour les couverts érectophiles induisent de grandes valeurs négatives de $\Delta FF_{685}(687)$ pour ces couverts. Pour les couverts planophiles à LAI fort, les −6 % de $1/\Delta\tilde{\rho}_{685}$ sont compensés par les 6 % de $\Delta\tau_{c687}$, en résultent des valeurs proches de zéro ou nulles pour $\Delta FF_{685}(687)$ pour ce type de couvert.

3.2.3 Exemple d'application

Pour avoir une idée de ce que l'on observerait comme évolution de la forme du cycle diurne des indices de rendement due uniquement à des effets de structure, la figure 3.17 montre l'évolution de ΔQ calculé pour l'ASFY et les FF sur un couvert de blé dont le LAI augmente au cours du temps(Goulas et coll., 2017) et le χ vaut 1 (Campbell et Van Evert, 1994).

Les courbes en **vert** représentent ΔASFY à 687 nm (—) et 760 nm (- -), les courbes en **bleu** ΔFF_{758} (elles sont quasiment confondues avec celles de ΔASFY) et les courbes en **orange** ΔFF_{685}.

On peut voir que pour ce couvert sphéroïdal, les variations de ΔASFY suivent celles de ΔFF_{758} et restent entre −5 % et 5 %. On rappelle que dans les simulations, φ_c est maintenu constant. Dans cet exemple, il est donc possible de suivre les variations du rendement de fluorescence au cours de la journée avec ASFY et FF_{758}, et donc de détecter un stress modifiant la forme du cycle diurne du rendement de fluorescence.



(a) $\Delta\tau_c(687)$. **(b)** $\Delta\tau_c(760)$.

Figure 3.16 – $\Delta\tau_c$ en fonction du LAI et de χ. Les lignes en trait plein (— et ▬) sont tracées tous les 2 %, les lignes épaisses (▬) correspondent au zéro et les lignes interrompues (- -) correspondent à ±1 %.

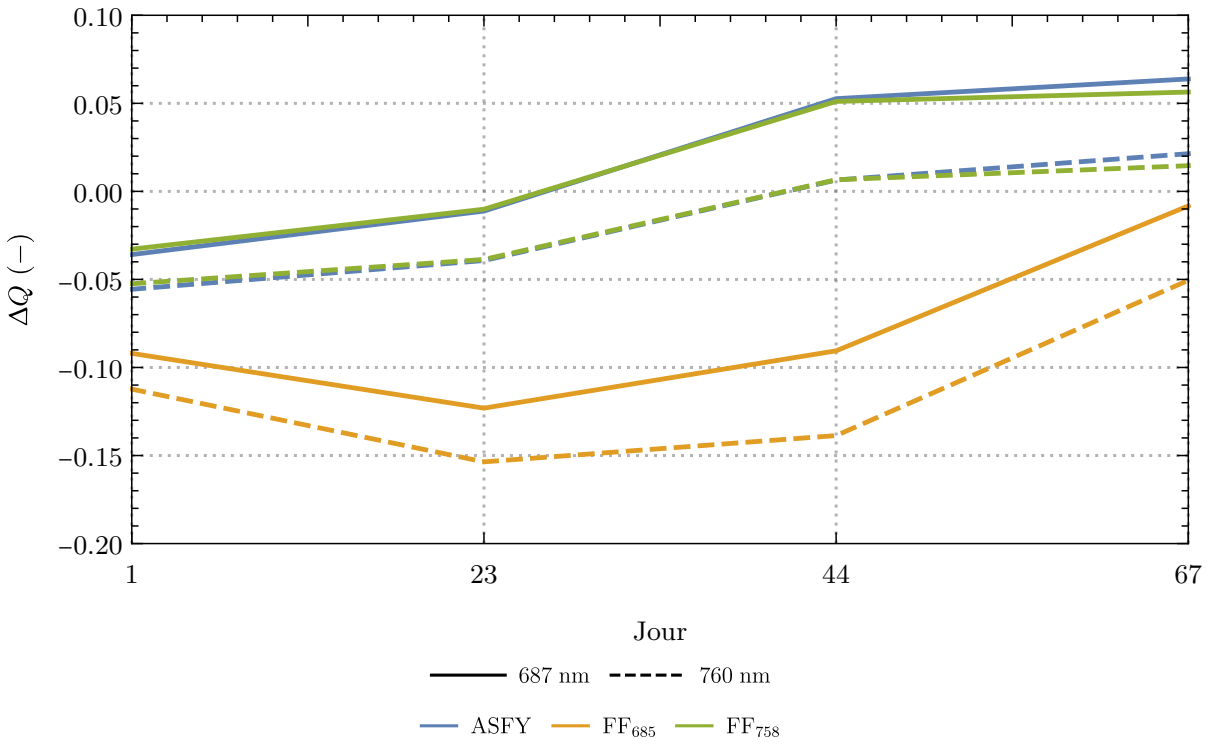


Figure 3.17 – Simulation de l'évolution de ΔASFY (en **bleu**), ΔFF_{685} (en **orange**) et ΔFF_{758} (en **vert**) à 687 nm (—) et 760 nm (- -) pour un couvert de blé dont le LAI prend les valeurs successives de 0,5, 1, 3,5 et 7, avec un χ de 1.

3.3 Conclusion

Les effets de structure sont très importants dans le transfert radiatif de la fluorescence et de la lumière solaire incidente au sein du couvert, et ce spécialement pour les couvert érectophiles, tandis que l'augmentation du LAI a tendance à diminuer ces effets. Ainsi, les variations des indices de rendement représentent correctement celles du rendement de fluorescence lorsque les couverts sont planophiles avec une densité de feuilles élevée.

Dans les définitions des indices de rendement interviennent le fAPAR, τ_c et pour les FF la pseudoréflectance. Le fAPAR contribue à des variations négatives des indices de rendement autour de midi pour les couverts à faible LAI ou χ (figure 3.14). Le facteur d'émergence de la fluorescence (τ_c) est assez peu dépendant des paramètres de structure du couvert et contribue à une variation positive des indices de rendement autour de midi (figure 3.16).

Les variations de l'ASFY au cours de la journée dépendent de celles du fAPAR et de τ_c. Comme celles de τ_c sont positives et dépendent peu de la structure, on observe des variations quasi identiques à celles du fAPAR et un peu plus faibles (voir la ressemblance entre figure 3.11 et figure 3.14).

En résulte que les couverts érectophiles avec un LAI inférieur à 6 présentent un cycle diurne de cet indice de rendement de fluorescence dont la forme est éloignée de celle du cycle diurne du rendement de fluorescence du couvert. Pour d'autres type de couverts, les variations diurnes de l'ASFY sont proches de celles du rendement effectif du couvert (à 6 % près au maximum).

Concernant les variations des FF, entre en jeu l'influence de la pseudoréflectance $\tilde{\rho}$ et de ses variations. Pour $\lambda_0 = 685$ nm, celles-ci sont très fortes pour des couverts érectophiles ce qui provoque des variations de FF_{685} très importantes pour ce type de couvert.

Cependant, pour des couvert à LAI et χ élevés, les variations de $FF_{685}(687)$ au cours de la journée sont proches de celles du rendement de fluorescence du couvert (à 1 % près). Pour $FF_{685}(760)$, le rendement de fluorescence est bien représenté également pour des couverts planophiles à fort LAI (à 4 % près).

Pour $\lambda_0 = 758$ nm, la pseudoréflectance est peu variable en fonction des paramètres du couvert, son inverse diminue légèrement pour des couverts très érectophiles. On s'attend donc à retrouver des variations de FF_{758} assez proches de celles de l'ASFY.

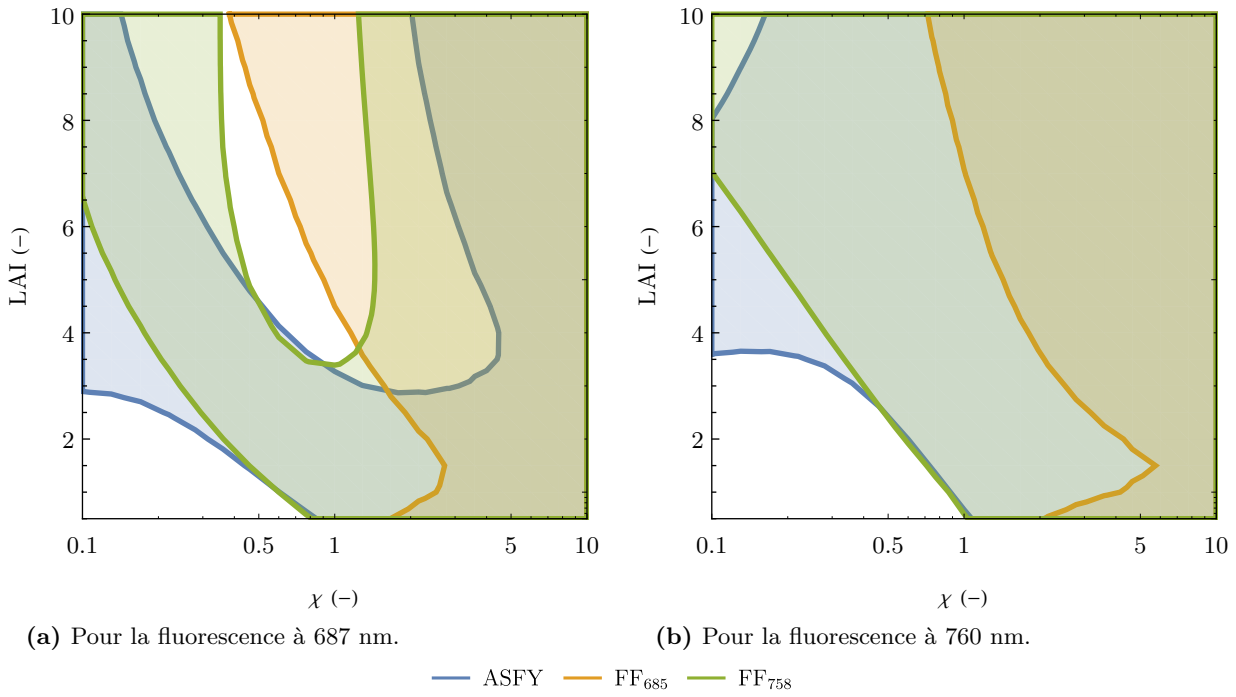
C'est effectivement ce que l'on observe, pour les couverts dont le LAI est supérieur à 3 et χ à 0,2, les variations de $FF_{758}(687)$ sont assez proches de celles du rendement de fluorescence (à 6 % près au maximum). Pour $FF_{758}(760)$, le rendement de fluorescence est bien représenté également pour des couverts avec un χ supérieur à 0,5 et un LAI supérieur à 4 (à 4 % près au maximum).

La figure 3.18 résume quels indices peuvent être utilisés selon la structure du couvert. Les zones de couleurs différentes délimitent les couverts pour lesquels chaque indice présente des variations au cours du cycle diurne contenues entre -5 % et 5 %. Dans la bande O_2-B (figure 3.18a), FF_{758} couvre la plus grande zone et permet donc de mesurer à 5 % près les variations du rendement de fluorescence pour le plus grand nombre de structures différentes, excluant les couverts érectophiles à faible LAI. Cependant, seul FF_{685} permet de mesurer correctement les variations du rendement de fluorescence pour des couverts sphéroïdaux à LAI élevé.

Dans la bande O_2-A (figure 3.18b), c'est l'ASFY qui permet de mesurer les variations de φ_c pour le plus grand nombre de structures, à l'exception d'une zone correspondant à des couverts érectophiles à faible LAI et une autre à des couverts très érectophiles et à très fort LAI. Les variations de rendement de cette dernière zone peuvent en revanche être suivies grâce à FF_{758}.

Pour mesurer les variations du rendement de fluorescence, on peut choisir de mesurer dans la bande O_2-A ou O_2-B. Cette dernière présente l'intérêt de permettre de ne mesurer que les variations du rendement de fluorescence du PS II, contrairement à la bande O_2-A où le rendement fluorescence est relié aux deux photosystèmes. Cependant, la bande O_2-B est plus étroite, l'extraction de la fluorescence est plus difficile en raison des formes des spectres de réflectance et de la fluorescence de la végétation. À choisir entre les deux bandes, la figure 3.18 montre en outre qu'il est plus avantageux de mesurer dans la bande O_2-A car la zone couverte par les indices de rendement est plus étendue.

Il est important de relativiser ces résultats par rapport aux conditions de mesures. Dans la simulation, le jour de mesure est proche du solstice d'été pour des coordonnées situées en région parisienne, le Soleil passe donc proche du zénith à midi. Dans d'autres conditions les effets de l'angle d'incidence des rayons



(a) Pour la fluorescence à 687 nm.

(b) Pour la fluorescence à 760 nm.

Figure 3.18 – Zones où les indices ont des variations (ΔQ) inférieures à 5 % en valeur absolue en fonction du LAI et de χ. Les zones blanches correspondent à des zones où aucun ΔQ n'est inférieur à 5 % en valeur absolue.

solaires auraient un effet différent. Aussi, la mesure est dirigée vers le nadir, l'émergence de la fluorescence du couvert vers l'observateur serait différente pour d'autres angles de visée.

Dans le cas des couverts planophiles avec un fort LAI, le transfert radiatif est proche du modèle *big leaf* (grande feuille ; il s'agit d'un modèle où le couvert est considéré comme une feuille horizontale de taille équivalente), ainsi les indices de rendement n'induisent pas de variations diurnes à cause de la structure. Ils représentent bien le rendement de fluorescence du couvert.

Ainsi, pour interpréter les cycles diurnes des indices de rendement, il est important de bien caractériser la structure du couvert afin d'éviter d'interpréter des effets de structure sur la forme du cycle diurne comme des variations de l'état physiologique de la végétation.

Chapitre 4

Simulation des observations en orbite géostationnaire

Sommaire

4.1 Modélisation de la fluorescence mesurée depuis l'espace 93
4.1.1 Luminance totale de la cible 93
4.1.2 Description de la base de données 96
4.2 Variabilité de la fluorescence 99
4.2.1 Magnitude de fluorescence 102
4.2.2 Forme des cycles diurnes 107
4.3 Variabilité des indices de rendement de fluorescence 112
4.3.1 Comparaison des cycles diurnes des indices de rendement 112
4.3.2 Forme des cycles diurnes des FF 114
4.4 Conclusion 118

De récentes publications (Frankenberg et coll., 2011; Joiner et coll., 2011) ont montré pour la première fois des cartes à l'échelle planétaire de la fluorescence chlorophyllienne induite par le Soleil (figure 4.1). Les flux de fluorescence ont été retrouvés à partir de mesures de spectres de radiance intégrées sur plusieurs mois mesurés depuis une orbite héliosynchrone. Dans le cas des travaux de Frankenberg et coll. (2011), ces flux de fluorescence présentent une très bonne corrélation linéaire ($r^2 = 0{,}8$; figure 1.10) avec la production primaire brute (*gross primary production*, abrégé GPP (chapitre 1)) mesurée *in situ* extrapolées à l'échelle globale. En plus de renseigner sur l'activité photosynthétique, on a vu que la fluorescence pouvait apporter une information sur l'existence d'un stress, en particulier par le suivi des cycles diurnes du rendement de fluorescence et la caractérisation de leur forme (section 2.3.3). Or les mesures actuelles effectuées depuis des orbites héliosynchrones dans le cadre de missions non dédiées à la mesure de la fluorescence chlorophyllienne donnent des résultats intégrés sur plusieurs mois. L'intégration des mesures sur une telle échelle de temps est rendue obligatoire par le besoin d'une significativité suffisante des mesures et car la conception de l'instrument n'a pas été dirigée pour la mesure de la fluorescence mais pour d'autres applications (la mesure des gaz à effet de serre dans le cas de Gosat). Le suivi des cycles diurnes de la fluorescence de la végétation à une échelle temporelle fine est donc — pour le moment — totalement exclu dans le cas de la réutilisation de données issues d'un instrument non *ad hoc*.

Une mission dédiée à la mesure de fluorescence depuis l'espace prévue pour un lancement en 2022 est actuellement en développement. Il s'agit de la mission Flex (pour *fluorescence explorer*) prévue pour la 8^{e} mission Earth Explorer de l'ESA (Drush et FLEX Science Team, 2008). Elle doit fournir une carte globale de la végétation permettant de quantifier la photosynthèse par la mesure de la fluorescence qui sera mesurée avec une précision d'environ 10 %. Le satellite sera en orbite basse héliosynchrone (quasi polaire) afin de mesurer la fluorescence à heure fixe (11 h) dans les bandes A et B d'absorption de l'oxygène. Il s'agit donc d'une mesure temporellement ponctuelle, mais celle-ci réduit le cycle diurne à un point unique. Il faudrait au moins deux points de mesure (non symétriques par rapport au midi solaire) au cours de

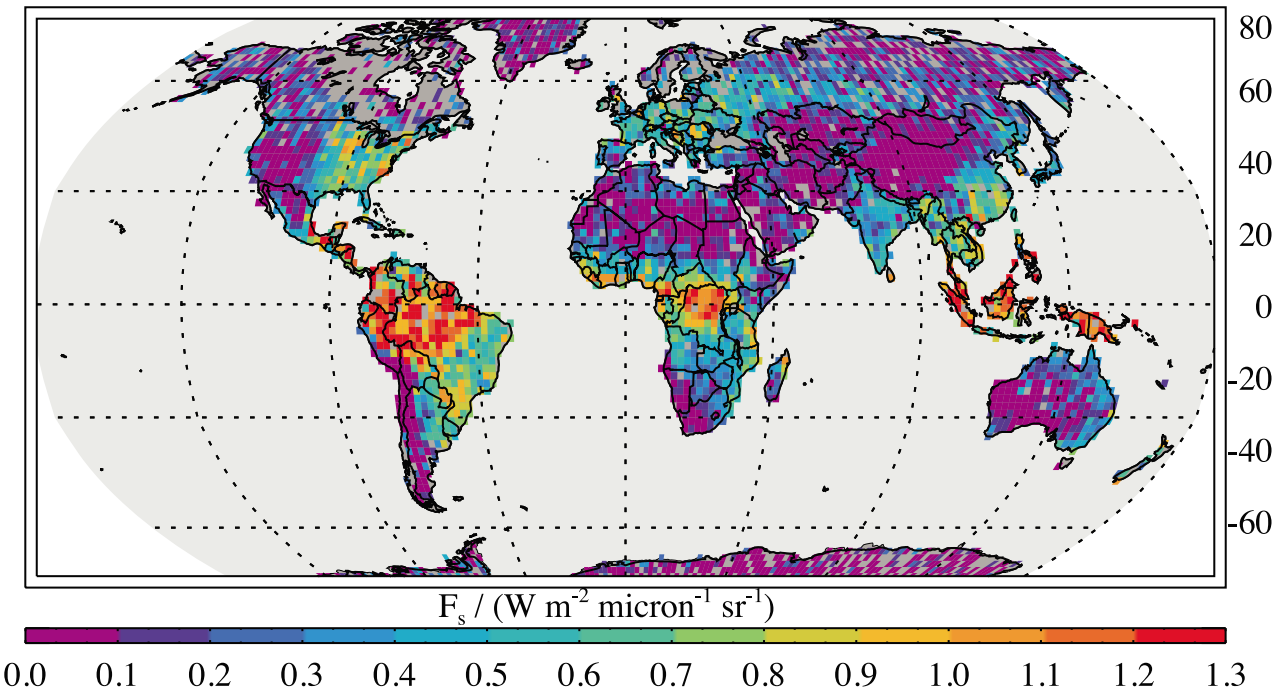


Figure 4.1 – Moyenne annuelle (de juin 2009 à mai 2010) de la fluorescence chlorophyllienne à 755 nm (en $\mathrm{mW \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}}$) sur une grille carrée de 2° de côté. Seuls les mesures des carrés de la grilles présentant plus de 15 sondages sont montrés (Frankenberg et coll. (2011)).

la journée pour avoir une information sur la forme du cycle diurne. De plus un satellite placé en orbite géostationnaire, du fait de son immobilité par rapport à la surface de la Terre, permettrait d'effectuer plusieurs mesures des cibles qu'il observe au cours de la journée.

Une solution pour mesurer depuis l'espace les cycles diurnes de la fluorescence chlorophyllienne avec une précision suffisante serait de concevoir une mission dédiée en orbite géostationnaire. Dans ce cas, la mission étant dédiée à la mesure de fluorescence, la sensibilité au mesurande permettrait d'intégrer les mesures sur des temps suffisamment courts pour obtenir plusieurs points au cours du cycle diurne.

L'orbite géostationnaire est un cas particulier d'orbite géosynchrone. Cette dernière est une orbite géocentrique dont le sens de rotation est le même que celui de la Terre et la période orbitale la même que la période de rotation sidérale de la Terre. Pour satisfaire cette seconde condition le satellite doit se situer à une altitude d'environ 36 000 km au-dessus de l'ellipsoïde de référence. La spécificité de l'orbite géostationnaire est qu'elle est circulaire (son excentricité est nulle) et contenue dans le plan équatorial. Ces caractéristiques orbitales induisent l'immobilité du satellite par rapport à la surface de la Terre : la trace au sol du satellite est un point. Dans le cas général de l'orbite géosynchrone, la trace au sol du satellite décrit un analemme. Ce dernier est symétrique et centré sur l'équateur dans le cas d'une orbite circulaire. Ce type d'orbite permet d'augmenter la visibilité des hautes latitudes au cours d'une période de révolution.

Un satellite géostationnaire — ayant une trace au sol ponctuelle — voit chaque point de son champ de vue avec un angle de visée invariable qui dépend de sa latitude et de la différence entre sa longitude et celle du satellite. Le satellite géostationnaire, comme il suit la rotation de la Terre, voit un cycle diurne complet pour chacun des points de son champ de vue ; ainsi l'angle d'incidence du Soleil varie au cours de la journée pour chacun des points visés. C'est le contraire de ce qui se passe pour un satellite héliosynchrone (comme Flex) qui balaye la Terre avec un angle de visée fixe et une heure de passage fixe.

Pour suivre les cycles diurnes de la fluorescence depuis l'espace, l'orbite géostationnaire semble plus indiquée qu'une simple orbite géosynchrone qui verrait varier l'angle de visée du satellite au cours de la journée, avec l'accroissement des effets de structure que l'on peut imaginer. La grande distance du satellite géostationnaire à la Terre impose une diminution de la résolution au sol afin de compenser une diminution des flux lumineux. Deux questions peuvent alors se poser : qu'en est-il de la détectabilité de la fluorescence à des échelles de temps permettant d'échantillonner le cycle diurne de fluorescence ? et le cas échéant, quelles sont les modifications que la mesure depuis l'espace va engendrer sur la forme du

cycle diurne de fluorescence (et en particulier sur celles des cycles diurnes des indices de rendement de fluorescence) en plus de celles qui ont été étudiées dans le chapitre précédent au niveau du sol ?

Ce chapitre tente de répondre à ces questions, son sujet est donc de caractériser la détectabilité de la fluorescence chlorophyllienne depuis une orbite géostationnaire et d'étudier l'influence de la structure de la végétation sur la forme des cycles diurnes de fluorescence et des indices de rendement pour un grand nombre de cas courants représentatifs des scènes pouvant être mesurées par un satellite géostationnaire. Cette étude est menée pour différentes configurations de mesures (spatiales et temporelles) et pour différents types de couvert.

Afin d'étudier ces deux points, une base de données de cycles diurnes de fluorescence a été simulée. Pour connaître la détectabilité de la fluorescence, la magnitude de celle-ci a été simulée dans différentes configurations de mesures : pour différents jours de l'année, à différentes heures et pour différentes positions du point observé à la surface de la Terre ; et pour différents types de couvert : pour différents contenus en chlorophylle, différentes densités de feuilles et pour différentes distributions angulaires des feuilles au sein du couvert. Afin d'étudier l'influence de la structure du couvert sur la forme des cycles diurnes de fluorescence et des indices de rendement, les flux de fluorescence ont été simulés pour différentes heures de la journée.

Le modèle utilisé pour simuler ces cycles diurnes de fluorescence depuis une orbite géostationnaire est composé du modèle de fluorescence du couvert végétal utilisé dans le chapitre 3 auquel s'ajoute une modélisation du transfert radiatif dans l'atmosphère de la fluorescence et du rayonnement solaire réfléchi par la végétation jusqu'à un satellite situé en orbite géostationnaire.

On se référera au chapitre précédent pour des informations sur le modèle de fluorescence du couvert. Dans le présent chapitre, la section 4.1 détaille le fonctionnement du modèle de transfert radiatif appliqué aux calculs ayant permis de simuler les flux mesurés par le satellite situé en orbite géostationnaire à partir des flux simulés au niveau de la canopée. La section 4.2 expose les résultats des simulations et la caractérisation de la détectabilité de la fluorescence et de l'influence de la structure de la végétation sur la forme des cycles diurnes du couvert végétal.

4.1 Modélisation de la fluorescence mesurée depuis l'espace

La modélisation du rayonnement arrivant à un satellite géostationnaire observant la végétation nécessite la séparation des différents processus physiques en différents modules de modélisation. Il s'agit de séparer les phénomènes liés au rayonnement solaire et à la transmission dans l'atmosphère de ceux liés à la fluorescence et aux propriétés optiques de la végétation. Le rayonnement incident générant la fluorescence est simulé par le modèle de transfert radiatif atmosphérique Modtran (Berk et coll., 2006), de même que la transmittance de l'atmosphère, les contributions atmosphériques et environnementales au rayonnement total. Les flux de fluorescence émis par le couvert et émergeant de celui-ci dans la direction du satellite et la réflectance du couvert dans la direction du satellite sont quant à eux simulés par le modèle de fluorescence décrit dans le chapitre précédent.

Ce qui vient s'ajouter dans ce chapitre par rapport au précédent, c'est toute la partie transmission du flux de fluorescence, du flux réfléchi par la végétation et des contributions atmosphérique et de l'environnement de la cible vers le satellite. Le calcul de ces composantes est expliqué dans ce qui suit.

4.1.1 Luminance totale de la cible

Afin de calculer la luminance spectrale de la scène vue par le satellite géostationnaire ($L^{\mathrm{g}}(\lambda)$), il s'agit de détailler toutes les contributions à ce signal global. Il convient de préciser que ces contributions exprimées en luminances spectrales sont notées dans la suite sans apposition de (λ) par souci de concision. La principale contribution à L^{g} est le rayonnement solaire arrivant au sol, réfléchi par la végétation, traversant l'atmosphère et arrivant au satellite (L^{g}_{c}) [1]. À ce signal s'ajoute la fluorescence de la cible ayant

1. On indique dans ce chapitre le point d'où le rayonnement est considéré par l'adjonction en exposant de l'abréviation de ce point (X^{g} pour un rayonnement considéré depuis le satellite géostationnaire et X^{c} depuis la cible). L'apposition en indice montre quant à elle la provenance du rayonnement (X_{c}, X_{atm}, X_{env1}, X_{env2} et $X_{\odot}$ indiquent respectivement un rayonnement en provenance de la cible, de l'atmosphère, la première contribution de l'environnement, la deuxième et le rayonnement en provenance du Soleil).

traversé l'atmosphère (F^{g}). En plus de ces signaux utiles, trois composantes s'ajoutent aux deux déjà décrites : la contribution de l'atmosphère ($L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{atm}}$), le rayonnement réfléchi par l'environnement de la cible et diffusé en direction du satellite ($L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env_1}}$) et le rayonnement réfléchi par l'environnement de la cible, diffusé en direction de la cible et réfléchi par celle-ci vers le satellite ($L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env_2}}$) (Daumard et coll., 2015).

La modélisation du transfert radiatif des rayonnements traversant l'atmosphère est faite avec le modèle Modtran. Celui-ci modélise la transmission et la diffusion des rayonnements traversant l'atmosphère afin de simuler le rayonnement arrivant au capteur situé à une orbite géostationnaire. Ce rayonnement est la somme des rayonnements décrit plus haut, il vaut

$$L^{\mathrm{g}} = L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{c}} + F^{\mathrm{g}} + L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{atm}} + L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env_1}} + L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env_2}} \tag{4.1}$$

La contribution de la cible au signal mesuré ($L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{c}}$) est le produit de la luminance de la cible au niveau de la cible ($L^{\mathrm{c}}_{\mathrm{c}}$) par la transmittance atmosphérique sur le chemin optique de la cible au satellite (τ_{atm}), elle vaut

$$L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{c}} = L^{\mathrm{c}}_{\mathrm{c}} \times \tau_{\mathrm{atm}} \tag{4.2}$$

La luminance de la cible au niveau de la cible peut également être écrite comme le produit de l'éclairement solaire au niveau de la cible ($E^{\mathrm{c}}_{\odot}$) par la réflectance de la cible (ρ_{c}), on peut donc écrire

$$L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{c}} = E^{\mathrm{c}}_{\odot} \times \rho_{\mathrm{c}} \times \tau_{\mathrm{atm}} \tag{4.3}$$

La fluorescence de la cible au niveau du satellite vaut

$$F^{\mathrm{g}} = F^{\mathrm{c}} \times \tau_{\mathrm{atm}} \tag{4.4}$$

avec F^{c} la fluorescence de la cible au niveau de la cible.

$E^{\mathrm{c}}_{\odot}$ peut être calculé directement avec Modtran, cependant la transmittance atmosphérique τ_{atm} doit être calculée indirectement. Il en est de même pour $L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{atm}}$, $L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env_1}}$ et $L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env_2}}$. Dans Modtran, il est possible de configurer la scène en paramétrant les albédos de la cible et de son environnement. En simulant la luminance de la scène pour différentes combinaisons de ces albédos, il est possible de calculer les contributions qui ne sont pas directement accessibles avec Modtran. La suite d'équations qui suit détaille ces calculs.

En fixant la réflectance de la cible et de son environnement à un et en simulant les flux reçu depuis le satellite (cas 1), on obtient toutes les contributions. On a alors

$$\begin{aligned} L^{\mathrm{g}}_{1} &= L^{\mathrm{g}}|_{(\rho_{\mathrm{c}}=1,\rho_{\mathrm{e}}=1)} \\ &= L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{c}}|_{\rho_{\mathrm{c}}=1} + L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{atm}} + L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env_1}}|_{\rho_{\mathrm{e}}=1} + L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env_2}}|_{(\rho_{\mathrm{c}}=1,\rho_{\mathrm{e}}=1)} \end{aligned} \tag{4.5}$$

avec ρ_{c} l'albédo de la cible et ρ_{e} l'albédo de l'environnement. On peut noter que les liens entre les luminances calculées avec des réflectances caractéristiques (0 ou 1) et les luminances réelles de la scène avec une végétation de réflectance ρ_{c} et un environnement de réflectance $\rho_{\mathrm{e}} = \rho_{\mathrm{c}}$ (on rappelle qu'on simule une planète recouverte de végétation) sont les suivants :

$$L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{c}} = L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{c}}|_{\rho_{\mathrm{c}}=1} \times \rho_{\mathrm{c}} \tag{4.6}$$

$$L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env_1}} = L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env_1}}|_{\rho_{\mathrm{e}}=1} \times \rho_{\mathrm{e}} = L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env_1}}|_{\rho_{\mathrm{e}}=1} \times \rho_{\mathrm{c}} \tag{4.7}$$

$$L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env_2}} = L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env_2}}|_{(\rho_{\mathrm{c}}=1,\rho_{\mathrm{e}}=1)} \times \rho_{\mathrm{c}} \times \rho_{\mathrm{e}} = L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env_2}}|_{(\rho_{\mathrm{c}}=1,\rho_{\mathrm{e}}=1)} \times \rho^2_{\mathrm{c}} \tag{4.8}$$

En fixant la réflectance de la cible à un et celle de son environnement à zéro et en simulant les flux reçus depuis le satellite (cas 2), on fait disparaître les deux contributions dues à l'environnement. On obtient alors

$$\begin{aligned} L^{\mathrm{g}}_{2} &= L^{\mathrm{g}}|_{(\rho_{\mathrm{c}}=1,\rho_{\mathrm{e}}=0)} \\ &= L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{c}}|_{\rho_{\mathrm{c}}=1} + L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{atm}} \end{aligned} \tag{4.9}$$

Si l'on fixe la réflectance de la cible à zéro et celle de l'environnement à un et que l'on simule les flux mesurés depuis le satellite (cas 3), la contribution de la cible disparaît, mais également celle de l'environnement réfléchi par la cible ($L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env}_2}$), on obtient donc

$$\begin{aligned} L^{\mathrm{g}}_3 &= L^{\mathrm{g}}|_{(\rho_{\mathrm{c}}=0,\rho_{\mathrm{e}}=1)} \\ &= L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{atm}} + L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env}_1}|_{\rho_{\mathrm{e}}=1} \end{aligned} \tag{4.10}$$

Enfin, si toutes les réflectances sont mises à zéro et que l'on simule les luminances vues par le satellite (cas 4), ne reste que la contribution de l'atmosphère :

$$\begin{aligned} L^{\mathrm{g}}_4 &= L^{\mathrm{g}}|_{(\rho_{\mathrm{c}}=0,\rho_{\mathrm{e}}=0)} \\ &= L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{atm}} \end{aligned} \tag{4.11}$$

Les équations 4.5, 4.9, 4.10 et 4.11 permettent alors de calculer les différentes contributions au signal vu par le satellite. On a alors

$$L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{c}}|_{\rho_{\mathrm{c}}=1} = L^{\mathrm{g}}_2 - L^{\mathrm{g}}_4 \tag{4.12}$$
$$L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{atm}} = L^{\mathrm{g}}_4 \tag{4.13}$$
$$L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env}_1}|_{\rho_{\mathrm{e}}=1} = L^{\mathrm{g}}_3 - L^{\mathrm{g}}_4 \tag{4.14}$$
$$L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env}_2}|_{(\rho_{\mathrm{c}}=1,\rho_{\mathrm{e}}=1)} = L^{\mathrm{g}}_1 + L^{\mathrm{g}}_4 - L^{\mathrm{g}}_3 - L^{\mathrm{g}}_2 \tag{4.15}$$

avec, pour rappel, les L^{g}_i des résultats de simulation effectuées avec Modtran avec chacun une configuration particulière (i étant le numéro du cas) de réflectance de la cible et de l'environnement.

D'après les équations 4.12, 4.13, 4.14 et 4.15 et les équations 4.6, 4.7 et 4.8 on a

$$L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{c}} = \rho_{\mathrm{c}} \times (L^{\mathrm{g}}_2 - L^{\mathrm{g}}_4) \tag{4.16}$$
$$L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{atm}} = L^{\mathrm{g}}_4 \tag{4.17}$$
$$L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env}_1} = \rho_{\mathrm{c}} \times (L^{\mathrm{g}}_3 - L^{\mathrm{g}}_4) \tag{4.18}$$
$$L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env}_2} = \rho^2_{\mathrm{c}} \times (L^{\mathrm{g}}_1 + L^{\mathrm{g}}_4 - L^{\mathrm{g}}_3 - L^{\mathrm{g}}_2) \tag{4.19}$$

L'inconnue restante est la transmittance de l'atmosphère. Elle permet de calculer la fluorescence au niveau du satellite à partir de la fluorescence simulée au niveau de la végétation (équation (4.4)). Elle vaut

$$\tau_{\mathrm{atm}} = \frac{L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{c}}|_{\rho_{\mathrm{c}}=1}}{L^{\mathrm{c}}_{\mathrm{c}}|_{\rho_{\mathrm{c}}=1}} \tag{4.20}$$

avec $L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{c}}|_{\rho_{\mathrm{c}}=1}$ la luminance de la cible de réflectance égale à un (sans les autres contributions) vue depuis le satellite et $L^{\mathrm{c}}_{\mathrm{c}}|_{\rho_{\mathrm{c}}=1}$ la luminance de la cible de réflectance égale à un vue juste au-dessus de la cible.

En fixant la réflectance de la cible à un et celle de l'environnement à zéro et en simulant les flux reçus juste au-dessus de cette cible (à un mètre) avec Modtran (cas 5), on obtient

$$L^{\mathrm{c}}_5 = L^{\mathrm{c}}_{\mathrm{c}}|_{\rho_{\mathrm{c}}=1} = E^{\mathrm{c}}_{\odot} \tag{4.21}$$

On peut écrire également

$$L^{\mathrm{c}}_{\mathrm{c}} = \rho_{\mathrm{c}} \times L^{\mathrm{c}}_5 = \rho_{\mathrm{c}} \times E^{\mathrm{c}}_{\odot} \tag{4.22}$$

Les équations 4.12, 4.21 et 4.20 permettent d'écrire

$$\tau_{\mathrm{atm}} = \frac{L^{\mathrm{g}}_2 - L^{\mathrm{g}}_4}{L^{\mathrm{c}}_5} \tag{4.23}$$

Finalement, les équations reliant les différentes contributions et τ_{atm} avec les L^{g}_i et L^{c}_5 permettent de

calculer d'après les simulations Modtran le flux total reçu par le satellite comme

$$L^{\mathrm{g}} = E^{\mathrm{c}}_{\odot} \times \rho_{\mathrm{c}} \times \tau_{\mathrm{atm}} + F^{\mathrm{c}} \times \tau_{\mathrm{atm}} + L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{atm}} + L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env}_1} + L^{\mathrm{g}}_{\mathrm{env}_2} \tag{4.24}$$

ou encore

$$L^{\mathrm{g}} = L^{\mathrm{c}}_5 \times \rho_{\mathrm{c}} \times \tau_{\mathrm{atm}} + F^{\mathrm{c}} \times \tau_{\mathrm{atm}} + L^{\mathrm{g}}_4 + \rho_{\mathrm{c}} \times (L^{\mathrm{g}}_3 - L^{\mathrm{g}}_4) + \rho^2_{\mathrm{c}} \times (L^{\mathrm{g}}_1 + L^{\mathrm{g}}_4 - L^{\mathrm{g}}_3 - L^{\mathrm{g}}_2) \tag{4.25}$$

avec $\tau_{\mathrm{atm}} = (L^{\mathrm{g}}_2 - L^{\mathrm{g}}_4)/L^{\mathrm{c}}_5$

4.1.2 Description de la base de données

Afin de caractériser la magnitude de la fluorescence et la forme du cycle diurne de fluorescence pour des cas typiques qu'un satellite géostationnaire peut être amené à mesurer et afin d'étudier l'influence des paramètres définissant ces cas typiques sur les flux de fluorescence, une base de données de cycles diurnes de fluorescence a été produite pour différents types de couverts végétaux dans différentes configurations de mesures. Ce sont les différentes valeurs des paramètres définissant la structure du couvert végétal et la configuration de mesure qui sont exposées dans ce qui suit.

Paramètres du couvert

Les paramètres de la végétation qui ont été choisis de faire varier dans les simulations sont le contenu en chlorophylle *a* et *b* et les paramètres de structure que sont le LAI et χ. Faire varier ces paramètres entre les simulations permet à la fois d'étudier leur influence sur la magnitude et la forme des cycles diurnes de fluorescence et d'obtenir un jeu de simulation correspondant à des situations sinon courantes, permettant d'encadrer les situations courantes.

Il a été choisi pour le contenu en chlorophylle *a* et *b*, C_{ab}, de prendre deux valeurs assez extrêmes d'environ 17 $\mu\mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}^{-2}$ et 51 $\mu\mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}^{-2}$.

Concernant la densité de feuille, le LAI, deux valeurs extrêmes ont également été sélectionnées : 2 et 8 qui correspondent respectivement à des densités de feuille de 2 m^2 et 8 m^2 de feuilles par mètre carré de sol.

Trois valeurs du paramètre représentant l'excentricité de la distribution d'angles foliaires du couvert végétal ont été simulées qui valent environ 0,3, 1 et 3. Ces trois valeurs correspondent respectivement à des couvert érectophile, sphéroïdal et planophile.

Paramètre	Valeurs	Unité
C_{ab}	{17,4 ; 51,3}	$\mu\mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}^{-2}$
LAI	{2 ; 8}	-
χ	{0,32 ; 1 ; 3,16}	-

Tableau 4.1 – Valeurs des paramètres du couvert variant dans les simulations.

Toutes les combinaisons de ces paramètres ont été simulées offrant ainsi 12 couverts différents (2×2×3).

Configurations de mesure

Deux paramètres à faire varier ont été sélectionnés concernant la configuration de mesure. Il s'agit d'un paramètre temporel qu'est le jour de l'année et un spatial qu'est la position du point observé à la surface de la Terre.

Trois jours de l'année ont été choisis : le solstice d'été (172$^{\mathrm{e}}$ jour de l'année), l'équinoxe d'automne (266$^{\mathrm{e}}$) et le solstice d'hiver (356$^{\mathrm{e}}$). Il s'agit de deux valeurs extrêmes encadrant une valeur moyenne.

Concernant la position du point observé dans le champ de vue du satellite, sept points ont été simulés. Ils sont repérés à la surface de la Terre par des coordonnées de longitude (Λ) et latitude (Φ) relatives à la projection du satellite à la surface de la Terre (figure 4.2). Ainsi, le premier point, situé au nadir du satellite est de coordonnées terrestres ($0° - 0°$), correspond en système de coordonnées alt-azimutales (référencé par rapport au satellite) à une visée de $(A, h) = (0°, 0°)$, avec A l'azimut et h la hauteur (figure 4.2). Les deux points suivants correspondent a une visée le long de l'équateur écartée de 3,5° et 7°

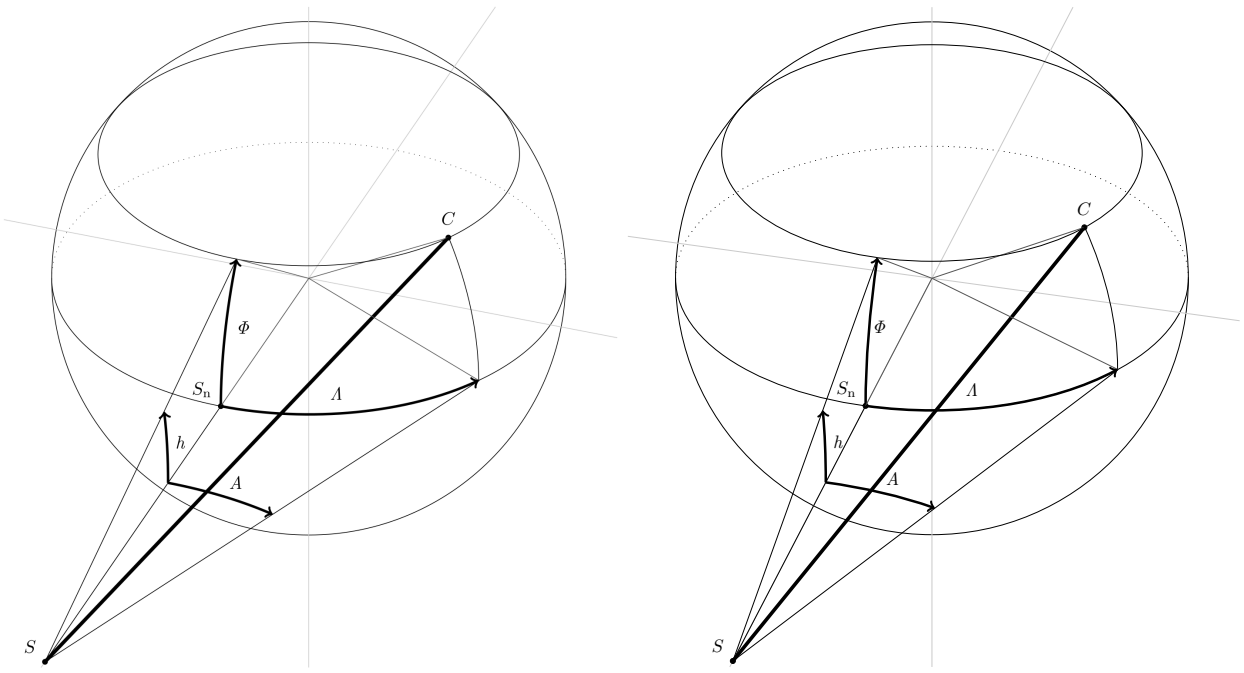


Figure 4.2 – Figure stéréoscopique en vision croisée représentant la configuration des angles de la scène. Le point S représente le satellite géostationnaire, le point C une cible donnée localisée sur la Terre relativement au projeté du satellite S_n par sa longitude Λ et sa latitude Φ. Les angles de visée du satellite par rapport au point à son nadir sont l'azimuth et la hauteur, notés respectivement A et h.

du nadir ((3,5°, 0°) et (7°, 0°) en coordonnées alt-azimutales) et sont de coordonnées terrestres ($0° - 23{,}5°$) et ($0° - 46{,}8°$). Les deux points suivants, de coordonnées ($23{,}5° - 0°$) et ($46{,}8° - 0°$), correspondent a une visée écartée de 3,5° et 7° du nadir suivant un méridien vers le pôle Nord ((0°, 3,5°) et (0°, 7°) en coordonnées alt-azimutales). Enfin, les deux derniers points sont des situations intermédiaires des deux couples de points précédents et équivalent à une visée écartée de 2,5° et 5° du nadir suivant l'équateur et de 2,5° et 5° de l'équateur en direction du pôle ((2,5°, 2,5°) et (5°, 5°) en coordonnées alt-azimutales), leurs coordonnées terrestres sont ($17{,}5° - 18{,}3°$) et ($31{,}5° - 37{,}6°$). Tous ces points, étant référencés par rapport au point projeté au nadir du satellite sur la surface de la Terre, leurs coordonnées ne font pas référence à des points précis de la Terre mais le pourraient si la longitude du satellite était définie (figure 4.3). Pour cette raison, l'environnement du point observé par le satellite dont il est question des contributions dans la partie 4.1.1 ($L^\mathrm{g}_{\mathrm{env}_1}$ et $L^\mathrm{g}_{\mathrm{env}_2}$) est considéré de même nature que la cible elle-même ; ainsi la Terre est considérée dans les simulations comme une « boule verte » entièrement recouverte de végétation d'une nature unique pour chaque simulation.

Les combinaisons des différentes valeurs de ces paramètres donnent 21 situations différentes (3×7).

Paramètre	Valeur	Nom	Unité
Latitude – longitude	$(0 - 0)$	Nadir (a)	°
	$(0 - 23{,}5)$	Équateur 1 (b)	
	$(0 - 46{,}8)$	Équateur 2 (c)	
	$(23{,}5 - 0)$	Méridien 1 (d)	
	$(46{,}8 - 0)$	Méridien 2 (e)	
	$(17{,}5 - 18{,}3)$	Diagonale 1 (f)	
	$(31{,}5 - 37{,}6)$	Diagonale 2 (g)	
Jour de l'année	172	Solstice d'été	d
	266	Équinoxe d'automne	
	356	Solstice d'hiver	

Tableau 4.2 – Coordonnées des points de mesure et jours de l'année des mesures simulées.

Cycles diurnes

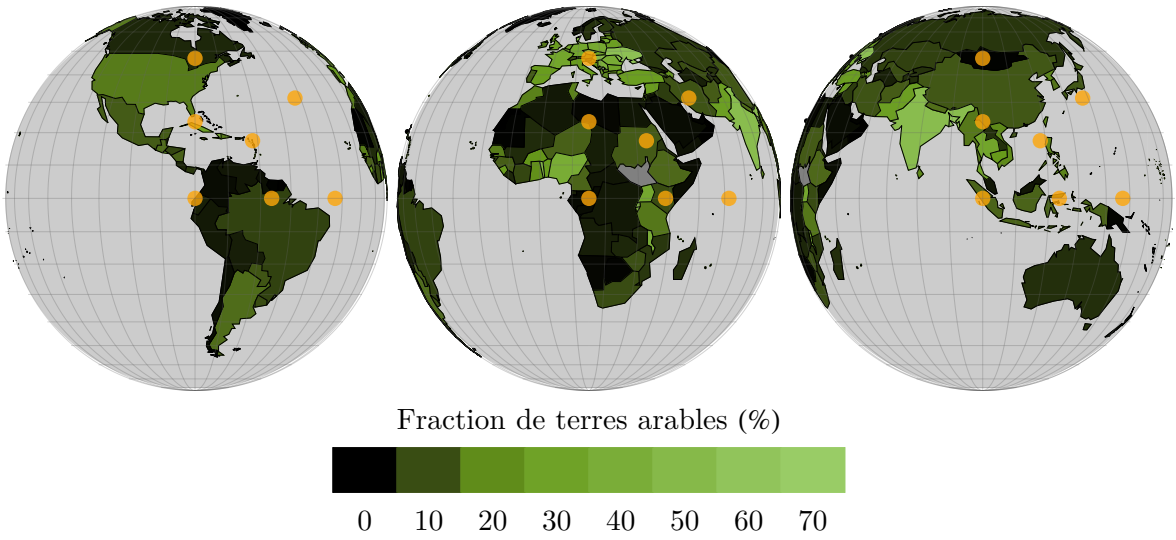


Figure 4.3 – Exemples de localisation à la surface de la Terre des points observés par le satellite dans les simulations (en **orange**). Trois longitudes du satellite (à gauche −80°, au milieu 15° et à droite 100°) ont été simulées dans cet exemple afin de visualiser la position qu'auraient à la surface de la Terre les points observés dans les simulations. La carte de la Terre présentée correspond à la fraction de terres arables par pays (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012) et donne une idée de la couverture végétale. Le disque gris correspond au champ de vue du satellite (il est plus petit que le disque terrestre (non montré sur la figure)).

Afin d'obtenir des cycles diurnes, les simulations ont été effectuées pour plusieurs heures de la journée. Le pas de temps séparant les simulations est d'une heure et les cycles diurnes sont centrés sur le midi solaire local. Les cycles diurnes ont été calculés pour les heures de la journée où le Soleil éclaire la cible. Ainsi donc, la durée des cycles diurnes dépend du jour de l'année et des coordonnées du point observé. Le nombre moyen de simulation par cycle diurne est d'environ 13.

Situations simulées

Les simulations qui ont été calculées parcourent entièrement l'espace des paramètres qui ont été choisis. Ainsi, le nombre de simulations est le produit des cardinaux des ensembles de valeurs prises pour chaque paramètre. On a donc

$$\begin{aligned} N_{\text{simu}} &= N_{C_{\text{ab}}} \times N_{\text{LAI}} \times N_{\chi} \times N_{\text{coord}} \times N_{\text{pos}} \times N_{\text{heure}} \\ &= 2 \times 2 \times 3 \times 7 \times 3 \times 12{,}95 \approx 3\,264 \end{aligned}$$

avec N_{simu} le nombre total de simulations et N_x le cardinal de l'ensemble contenant les différentes valeurs que peut prendre le paramètre x.

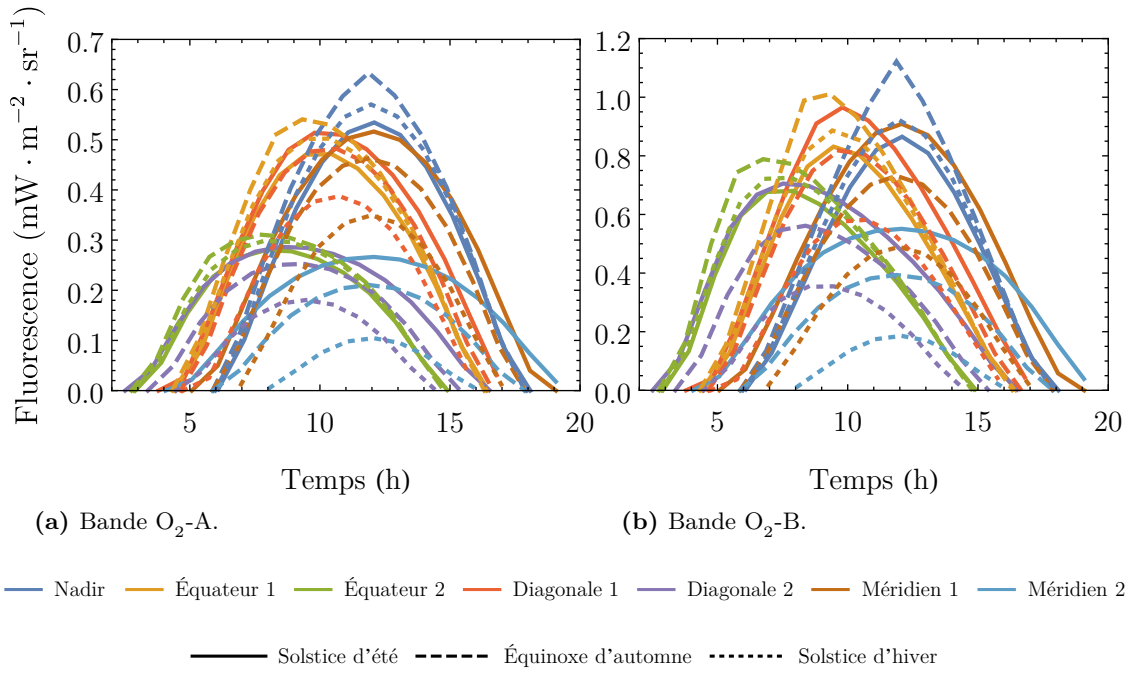
La base de données contient donc pour chaque heure 252 simulations, soit un total de 3 264 simulations qui consistent chacune en les spectres dans les bandes O_2-A et O_2-B du rayonnement total reçu par le satellite et des spectres des différentes contributions détaillées dans la sous-section 4.1.1.

Plages spectrales de simulation

Les spectres du rayonnement solaire et de la transmittance de l'atmosphère produits avec le modèle Modtran ont été calculés dans les intervalles [400 ; 700] nm (domaine du PAR) avec un pas de 1 nm, [750 ; 770] nm (bande O_2-A) et [677 ; 697] nm (bande O_2-B), ces deux derniers avec un pas de 0,01 nm. Ces spectres ont ensuite été dégradés par convolution avec un filtre gaussien afin de réduire les temps de calcul : de 1 nm à 50 nm pour le domaine du PAR et 0,01 nm à 0,1 nm pour les bandes O_2-A et O_2-B. Les propriétés des feuilles et du couvert ont ainsi été calculées aux longueurs d'onde d'excitation (λ_{x}) comprises dans l'intervalle [400 ; 700] nm avec un pas de 50 nm. Les longueurs d'ondes d'émission (λ_{m}) sont quant à elles comprises dans les intervalles [750 ; 770] nm et [677 ; 697] nm et calculées avec une résolution de 0,1 nm.

4.2 Variabilité de la fluorescence

Les cycles diurnes de fluorescence simulés grâce au modèle montrent une grande variabilité de forme et de magnitude. Les caractéristiques du couvert (contenu en chlorophylle, densité des feuilles et distribution angulaire des feuilles) et la configuration de mesure (coordonnées géographiques de la cible et jour de l'année) influent grandement sur les flux émis par le couvert dans la direction du satellite et par les flux que ce dernier mesure. Il s'agit dans la suite de caractériser la distribution des flux et l'influence des paramètres des simulations sur la magnitude des flux et sur la forme des cycles diurnes.



(a) Bande O_2-A. **(b)** Bande O_2-B.

Figure 4.4 – Cycles diurnes de la fluorescence à 760 nm et 687 nm simulés pour un couvert standard pour les trois jours de l'année et les sept positions du point observé. Le style de trait (plein, interrompu, pointillé) indique le jour de l'année et la couleur la position.

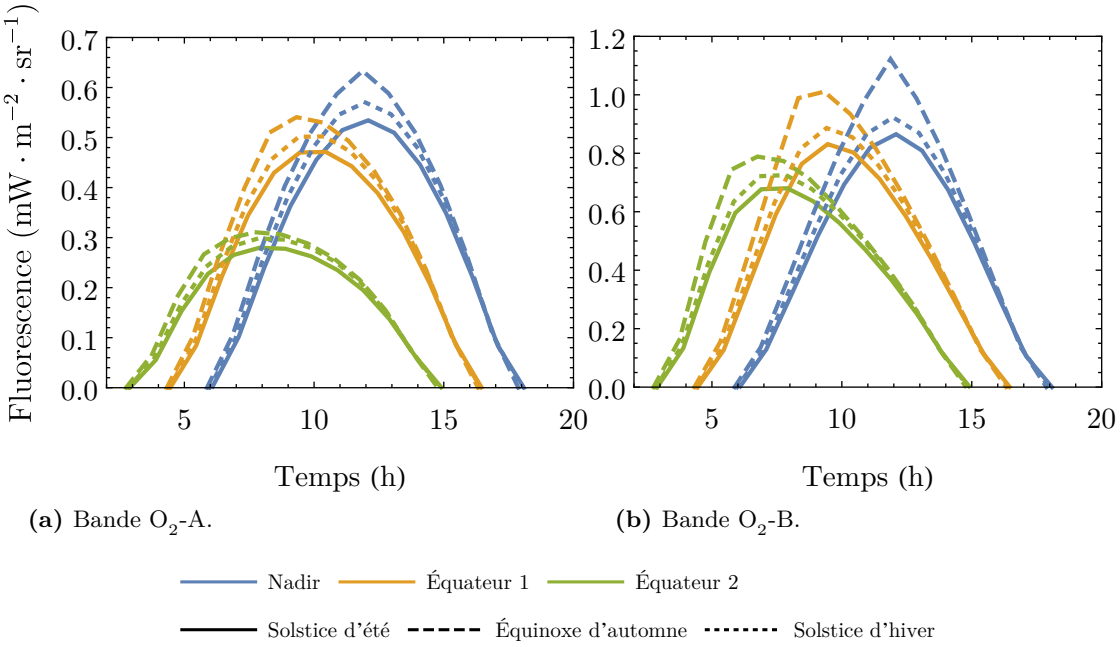
Avant d'étudier l'influence des paramètres de structure du couvert végétal sur la variabilité de la fluorescence, regardons pour un couvert standard quelle variabilité sur les cycles diurnes de fluorescence induisent les conditions de mesure : le jour de l'année et la position du point observé. On choisit pour le couvert standard un contenu en chlorophylle a et b (C_{ab}) de 35 $\mu g \cdot cm^{-2}$, un LAI de 4 et une valeur de χ de 1 (couvert sphéroïdal). Dans la suite, il s'agira d'un couvert ayant ces trois paramètres lorsque sera fait mention de *couvert standard*.

Les figures 4.4a et 4.4b montrent chacune les vingt-et-un cycles diurnes de fluorescence simulée au fond de la bande d'absorption (respectivement à 760,7 nm et à 687,3 nm) [2] pour les sept positions du point observé et les trois jours de l'année en temps universel coordonné (UTC). La première figure, pour la bande O_2-A montre pour ce seul couvert standard une grande variabilité dans la magnitude des cycles diurnes. Si l'on ne s'intéresse qu'au maximum de chaque cycle diurne, on voit que celui-ci varie entre 0,1 et 0,6 $mW \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$. On peut faire la même remarque pour la figure 4.4b dans la bande O_2-B où les variations de la fluorescence à midi se font entre 0,19 et 1,1 $mW \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$.

Afin de démêler l'influence de la position du point observé sur les cycles diurnes de fluorescence du couvert standard, les figures 4.5a à 4.7b séparent les cycles diurnes des figures 4.4a et 4.4b en fonction des trois directions : équateur, diagonale et méridien.

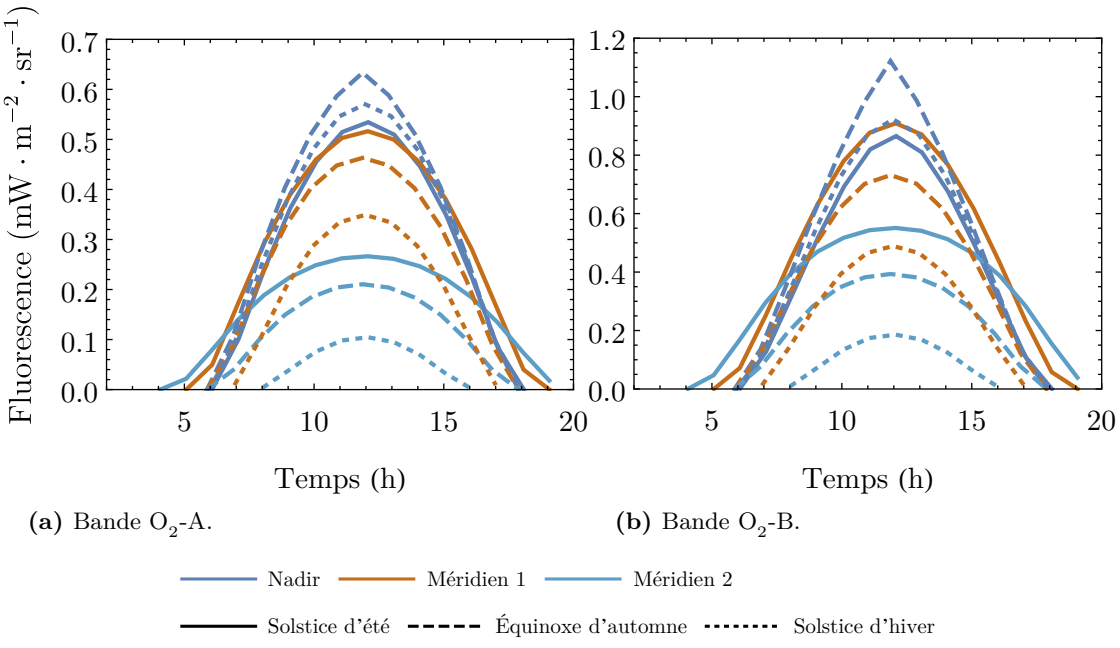
Les figures 4.5a et 4.5b montrent les cycles diurnes de fluorescence dans les bandes O_2-A et O_2-B pour les trois jours de l'année le long de l'équateur ; pour les points nommés nadir, équateur 1 et équateur

2. Les mesures d'un instrument hyperspectral ont été simulées aux longueurs d'onde d'intérêt (ici 760,7 nm et 687,3 nm) en calculant le produit du spectre de luminance avec un filtre gaussien de largeur à mi-hauteur d'un nanomètre et d'aire un. Dans ce cas, la luminance spectrale en $mW \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$ intégrée est équivalente à une luminance (non spectrale) en $mW \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$.



(a) Bande O_2-A. **(b)** Bande O_2-B.

Figure 4.5 – Cycles diurnes de la fluorescence à 760 nm et 687 nm simulés pour un couvert standard pour les trois jours de l'année et les trois points sur l'équateur.



(a) Bande O_2-A. **(b)** Bande O_2-B.

Figure 4.6 – Cycles diurnes de la fluorescence à 760 nm et 687 nm simulés pour un couvert standard pour les trois jours de l'année et les trois points sur le méridien.

2. Il s'agit donc d'étudier ici l'influence de la longitude sur les cycles diurnes de fluorescence du couvert standard. Dans la bande O_2-A (figure 4.5a), l'augmentation de la longitude (0°, 23,5° puis 46,8°) avance dans le temps les cycles diurnes. La Terre tournant d'ouest en est, les points de grande longitude sont éclairés plus tôt (en UTC) que les points de petite longitude. On note également une diminution des flux de fluorescence à mesure que la longitude augmente (augmentation qui correspond à un accroissement de l'angle de visée du satellite). Cela est dû à l'importante absorption de l'atmosphère à cette longueur d'onde (760,7 nm). Dans la bande O_2-B (figure 4.5b) on observe la même tendance bien que celle-ci soit plus faible ; l'absorption de l'atmosphère à 687,3 nm étant plus faible que dans la bande O_2-A. On peut noter également que l'augmentation de la longitude désymétrise les cycles diurnes spécialement dans la bande O_2-B où la réabsorption de la fluorescence est plus importante et l'anisotropie du couvert ainsi plus marquée. Il est remarquable sur ces deux figures que le jour de l'année influe relativement peu sur la magnitude de fluorescence et sur la forme des cycles diurnes dans les deux bandes. On peut noter cependant qu'à l'équinoxe pour le point situé au nadir du satellite le cycle diurne est « pointu » à midi. Il s'agit en fait d'un phénomène de *hotspot*. En effet, à l'équinoxe le Soleil traverse le ciel en suivant l'équateur céleste, il passe donc à midi au zénith d'un lieu situé sur l'équateur. Ce faisant, le Soleil, le satellite et le point au nadir du satellite sont alignés à midi à cette date particulière, provocant un phénomène de *hotspot* visible sur le cycle diurne de fluorescence par une forme piquée et non en cloche de celui-ci. Les variations que l'on observe le long de l'équateur, lorsque l'on fait varier la longitude du point observé, sont uniquement dûs à des effets d'angle d'observation et de structure du couvert végétal. En effet, les trois cibles, placées à des longitudes différentes, reçoivent à un jour de l'année donné le même rayonnement, seulement décalé dans le temps.

Si l'on fait maintenant varier la latitude, ce que montrent les figures 4.6a et 4.6b pour les deux bandes de l'oxygène, on observe — en plus des effets directionnels dus à l'angle d'observation — une déformation importante des cycles diurnes. Ici, les cibles ne reçoivent pas le même rayonnement en raison de leurs latitudes différentes. On peut noter dans les deux bandes un élargissement des cycles diurnes (une durée plus longue) à mesure que la latitude augmente, ainsi qu'une nette diminution du flux de fluorescence avec la latitude, imputable à l'augmentation de l'angle de visée du satellite mais également au fait que l'éclairement diminue avec l'augmentation de la latitude, plus encore à l'équinoxe et en hiver.

Les figures 4.7a et 4.7b montrent l'influence sur les cycles diurnes de fluorescence de l'augmentation combinée de la latitude et de la longitude des points observés. On remarque simplement une combinaison des variations observées lorsque l'on fait varier la latitude et la longitude, avec une constance : dans la bande O_2-A, en raison de l'absorption plus importante de l'atmosphère, la diminution des flux est plus importante à mesure que l'on s'éloigne du nadir que dans la bande O_2-B.

Ces différentes figures (4.5a à 4.7b) nous renseignent sur la variabilité des cycles diurnes induite par les conditions de mesure (jour de l'année et direction de visée du satellite) pour un couvert donné. On a vu que trivialement l'approche de l'hiver diminuait les flux de fluorescence à mesure que la latitude augmentait, mais aussi que l'augmentation de l'angle de visée du satellite (liée à l'augmentation de la latitude ou de la longitude du point observé), en augmentant l'épaisseur d'atmosphère traversée et en s'éloignant de la normale à la surface, diminuait également les flux. L'augmentation de la longitude du point observé a aussi une influence sur la forme des cycles diurnes à cause d'effets de structure du couvert faisant ressortir la dissymétrie du cycle diurne vu depuis le satellite. On verra plus encore l'importance de ces effets dans la suite en étudiant l'influence de la structure du couvert sur les flux mesurés par le satellite.

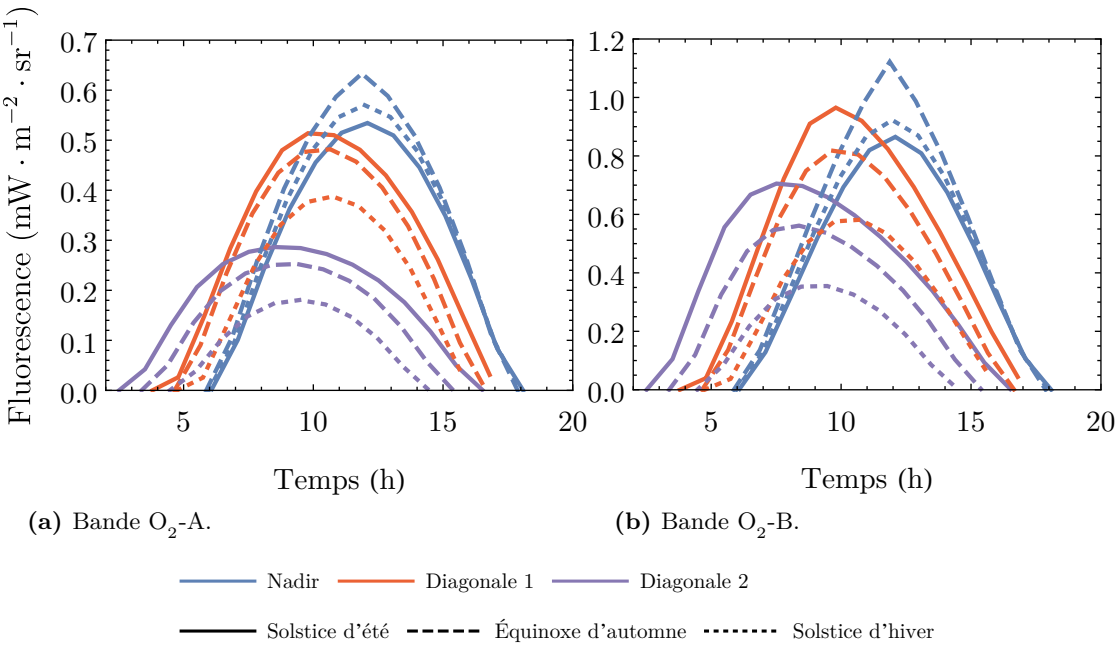
À la variation de la configuration spatio-temporelle de mesure (jour de l'année et position du point observé) étudiée avec un couvert standard, on ajoute ici les variations du type de couvert (contenu en chlorophylle, LAI et distribution angulaire des feuilles) afin d'étudier les effets de structure ; les résultats qui suivent concernent donc tous les couverts simulés. Les figures 4.8a et 4.8b représentent les distributions des flux de fluorescence dans le fond des bandes O_2-A et O_2-B, respectivement à 760,7 nm et 687,3 nm. On entend ici par *distribution* toutes les valeurs prises par les flux de fluorescence mesurés par le satellite dans toutes les simulations : pour différents angles de visée du satellites, jours de l'année, contenus en chlorophylle, LAI et valeurs du paramètre représentant la distribution angulaire des feuilles au sein du couvert (χ). Il est à noter qu'il n'y a pas de raison que les distributions de flux représentent celles qu'un satellite pourrait rencontrer, en effet ces distributions correspondent à un ensemble de couverts (défini

par toutes les combinaisons des valeurs choisies pour C_{ab}, le LAI et χ) dont la probabilité de présence (équiprobable dans les simulations) ne correspond pas à celle que l'on pourrait trouver dans la réalité. Les distributions sont synthétisées par des boîtes à moustaches qui indiquent le minimum et le maximum de chaque distribution par des tirets noirs horizontaux, les 1er et 3^{e} quartiles par les limites verticales d'un rectangle coloré et la médiane par une ligne blanche dans ce rectangle, chacun à son ordonnée respective. Dans la suite, ce genre de diagramme sera utilisé avec les mêmes conventions pour représenter synthétiquement des distributions. L'abscisse correspond à l'heure solaire locale et l'ordonnée en échelle logarithmique au flux de fluorescence collecté par le satellite (toujours avec un filtre gaussien de largeur à mi-hauteur d'un nanomètre).

On peut remarquer que la distribution des flux présente pour chaque heure une amplitude relativement importante qui augmente lorsque l'on s'éloigne du midi solaire. Dans les deux bandes, à cette heure elle est minimale et vaut environ 15 et peut monter jusqu'à 20 à 9 heures.

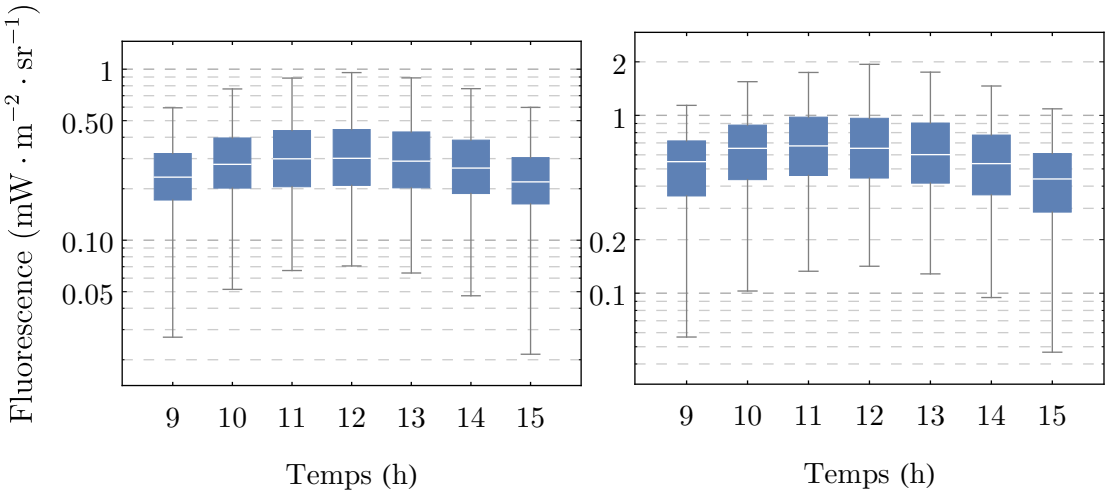
4.2.1 Magnitude de fluorescence

Pour étudier l'influence des différents paramètres structuraux de la végétation et des conditions d'observation sur la magnitude de la fluorescence, on choisit de s'intéresser aux flux de fluorescence au midi solaire local (pour les sept positions du point d'observation de coordonnées différentes). Il convient de remarquer que la fluorescence n'est pas forcément maximale à cette heure de la journée pour un couvert donné. C'est le cas notamment lorsque le couvert est très érectophile et que le Soleil est au zénith, il éclaire alors plus de sol que de végétation, ce qui a pour effet de diminuer la fluorescence mesurée par le satellite.



(a) Bande O_2-A. **(b)** Bande O_2-B.

Figure 4.7 – Cycles diurnes de la fluorescence à 760 nm et 687 nm simulés pour un couvert standard pour les trois jours de l'année et les trois points sur la diagonale.



(a) Bande O_2-A. **(b)** Bande O_2-B.

Figure 4.8 – Distributions de la fluorescence en fonction du temps local en échelle logarithmique pour les bandes O_2-A et O_2-B.

Influence du contenu en chlorophylle

La figure 4.9 montre les boîtes à moustaches associées aux distributions des flux de fluorescence mesurés par le satellite dans le fond des bandes O_2-A et O_2-B en fonction du contenu en chlorophylle des feuilles du couvert.

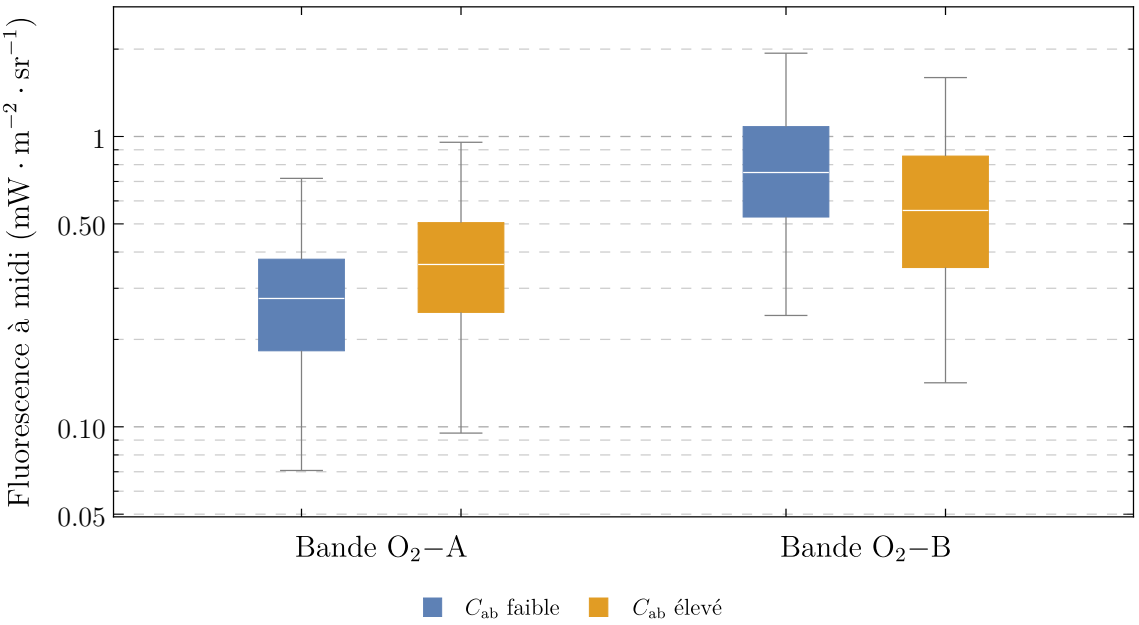


Figure 4.9 – Distributions de la fluorescence à midi en fonction du contenu en chlorophylle pour les bandes O_2-A et O_2-B.

On remarque que les flux de fluorescence augmentent globalement dans la bande O_2-A avec l'augmentation du contenu en chlorophylle quand cette tendance est inversée pour la bande O_2-B (voir les valeurs moyennes de chaque distribution dans le tableau 4.3). Ces tendances s'expliquent par l'augmentation des flux émis de fluorescence avec l'augmentation du contenu en chlorophylle. Dans le cas de la bande O_2-A où la réabsorption de la fluorescence est faible cette augmentation est effective, dans le cas de la bande O_2-B où la réabsorption de la fluorescence est élevée cette augmentation est compensée voire dépassée par la réabsorption.

C_{ab} ($\mu g \cdot cm^{-2}$)	17,4	51,3
O_2-A	0,30	0,39
O_2-B	0,83	0,63

Tableau 4.3 – Fluorescence moyenne à midi (en $mW \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$) en fonction du contenu en chlorophylle pour chacune des deux bandes.

Influence du LAI

La figure 4.10 montre comme pour la figure 4.9 l'influence des paramètres du couvert sur la fluorescence à midi, ici en fonction du LAI.

On remarque une augmentation de la fluorescence mesurée par le satellite avec l'augmentation du LAI dans les deux bandes. Cette augmentation s'explique par la moindre absorption de la fluorescence par le sol avec l'augmentation de la densité des feuilles. L'augmentation est néanmoins plus petite dans la bande O_2-B en raison d'un effet de saturation, comme l'absorbtance des feuilles est assez élevée dans cette zone spectrale, lorsque la fluorescence émise augmente avec l'augmentation du LAI, on n'observe pas beaucoup plus de fluorescence en provenance des couches profondes du couvert, car celle-ci est réabsorbée.

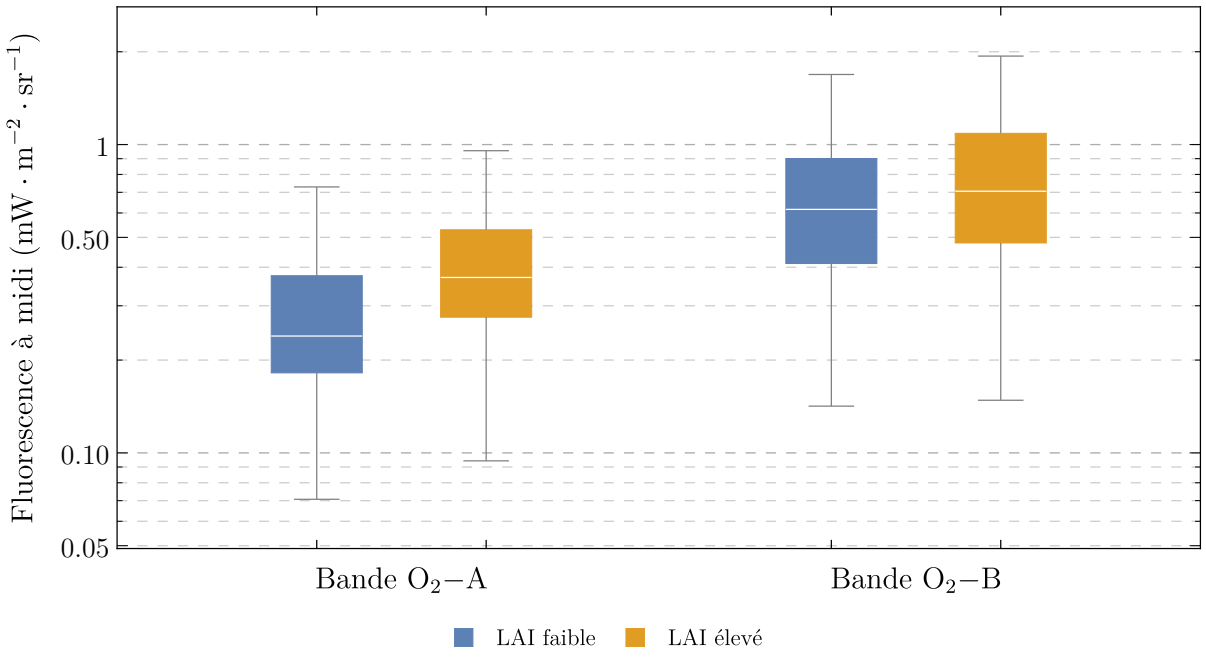


Figure 4.10 – Distributions de la fluorescence à midi en fonction du LAI pour les bandes O_2-A et O_2-B.

Influence de la distribution angulaire des feuilles

La figure 4.11 montre l'influence de la distribution angulaire des feuilles sur la fluorescence mesurée par le satellite à midi.

On voit une augmentation globale de la fluorescence à midi avec l'augmentation de χ, c'est-à-dire avec l'augmentation du caractère planophile du couvert végétal, et cela dans les deux bandes. On note que ce paramètre, contrairement au LAI et au contenu en chlorophylle est plus influent dans la bande O_2-B que O_2-A. Ceci s'explique par la plus grande réflectance des feuilles dans le proche infrarouge. Dans le visible, du fait de la plus grande absorptance des feuilles, un couvert érectophile piège plus la fluorescence qu'un couvert planophile.

Influence du jour de l'année

La figure 4.12 montre l'influence du jour de l'année sur les distributions des valeurs de fluorescence mesurées par le satellite à midi.

On note que la fluorescence est plus grande au solstice d'été (172^{e} jour) et à l'équinoxe d'automne (266^{e} jour) qu'au solstice d'hiver (356^{e}). De plus, la distribution des valeurs de fluorescence est plus étalée en hiver qu'en été pour les deux bandes. Ces deux faits s'expliquent par la variation des conditions d'éclairement au cours de l'année. La diminution entre les 172^{e} et 356^{e} jours est due à une diminution de l'éclairement pour les deux points situés dans l'hémisphère nord. Les points situés sur l'équateur voient également une variation annuelle mais plus faible car centrée sur le maximum à l'équinoxe. Ce second point explique l'étalement plus important des distributions en hiver puisque le flux diminue pour les points de l'hémisphère nord sans beaucoup varier pour les points situés sur l'équateur.

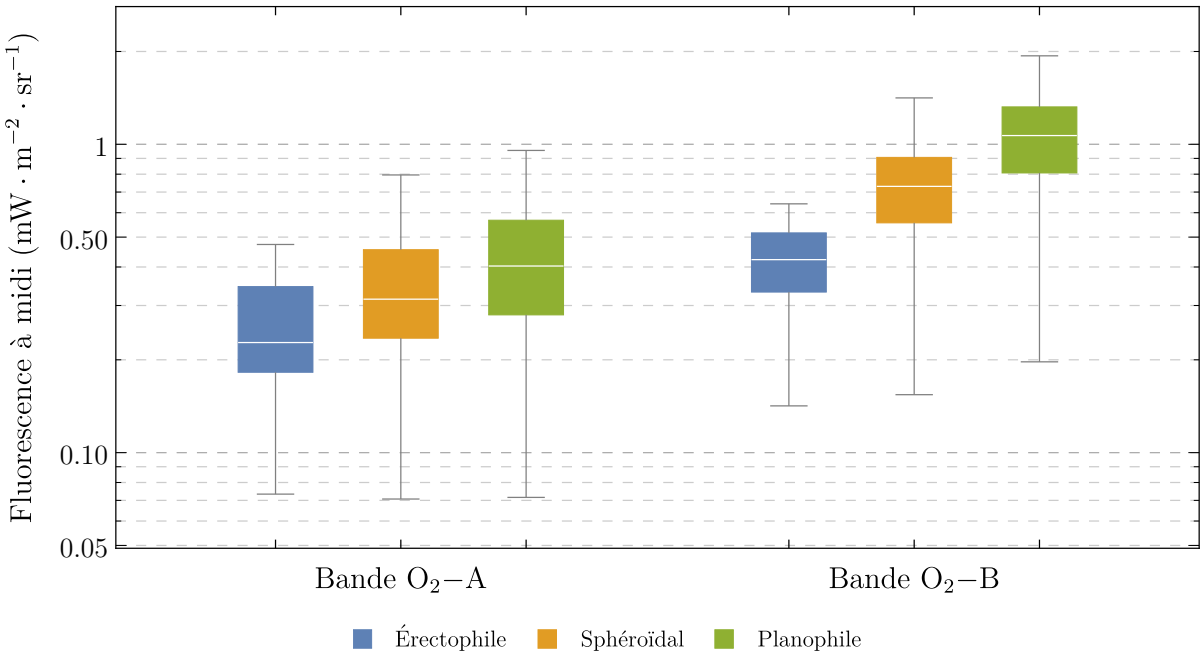


Figure 4.11 – Distributions de la fluorescence à midi en fonction du paramètre χ de la distribution angulaire des feuilles pour les bandes O_2-A et O_2-B.

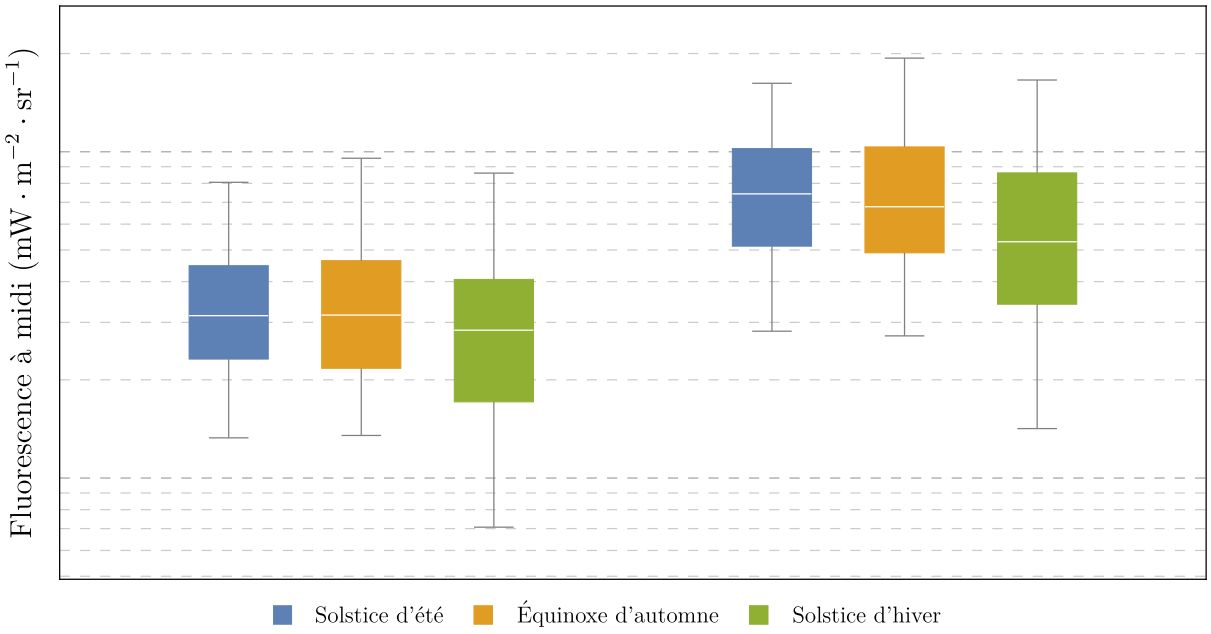


Figure 4.12 – Distributions de la fluorescence à midi en fonction du jour de l'année pour les bandes O_2-A et O_2-B.

Influence des coordonnées du point observé

La figure 4.13 montre les distributions des flux de fluorescence au midi solaire pour chaque position des points observés.

On voit que les flux sont plus importants pour le point situé au nadir du satellite dans les deux bandes. Cela est dû à l'éclairement plus important de cette zone au total sur les trois jours de l'année, à la plus faible épaisseur d'atmosphère traversée et au fait que la surface au sol est normale à la direction de visée du satellite dans ce cas, ces trois points maximisant le flux de fluorescence mesuré par le satellite. Les points équateur 1 et 2 ($(0° - 23{,}5°)$ et $(0° - 46{,}8°)$) reçoivent le même rayonnement solaire que le point situé au nadir du satellite ($(0° - 0°)$), mais le satellite les voit sous un angle différent avec une réabsorption plus grande de l'atmosphère (à cause d'un chemin optique plus long) et une absence de phénomène de *hotspot* lors de l'équinoxe. On note qu'à mesure que l'on s'éloigne du nadir, en suivant le chemin diagonale 1 puis 2 ou méridien 1 puis 2, le flux diminue.

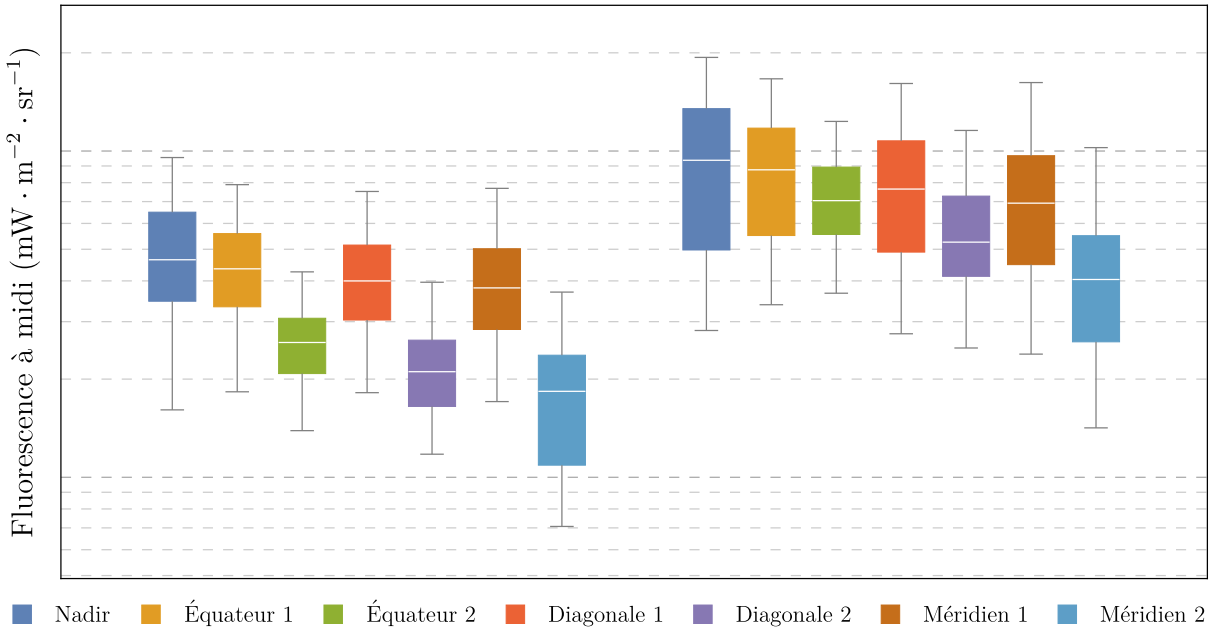


Figure 4.13 – Distributions de la fluorescence à midi en fonction des coordonnées de la cible pour les bandes O_2-A et O_2-B.

Pour résumer les variations induites par les caractéristiques des scènes vues par le satellite sur la magnitude de fluorescence mesurée à midi, on peut dire que concernant le couvert dans la bande O_2-A le contenu en chlorophylle, le LAI et le paramètre χ en augmentant font s'accroître en moyenne les flux de fluorescence à midi. Dans la bande O_2-B, on observe les mêmes tendances hormis pour le contenu en chlorophylle dont la diminution (de 51 à 17 $\mu g \cdot cm^{-2}$) fait au contraire augmenter les flux de fluorescence mesurés. Concernant la configuration de mesure, à mesure que l'on s'éloigne du nadir, les flux de fluorescence mesurés à midi diminuent, avec une diminution plus importante dans la bande O_2-A (où l'absorption atmosphérique est plus importante).

Afin d'étudier la possibilité de mesurer la fluorescence à partir de ces informations sur la magnitude de fluorescence vue depuis un satellite géostationnaire, il s'agit de relier ces simulations de flux à de la physique instrumentale. C'est le travail qui est fait dans le chapitre suivant.

4.2.2 Forme des cycles diurnes

La caractérisation de la forme du cycle diurne du rendement de fluorescence peut permettre de détecter un stress subit par la végétation. On cherche à savoir si les paramètres biophysiques de la végétation et les conditions d'observation ont un effet sur la forme des cycles diurnes des indicateurs de rendement qui pourrait occulter ou faire croire à des variations du rendement.

Afin de caractériser l'influence des paramètres de simulation sur la forme des cycles diurnes de fluorescence et des indices, il a été choisi de représenter cette forme par la variation relative de la grandeur

considérée entre 8 h et 16 h. Cette variation est normalisée par la valeur moyenne de la grandeur dans cette plage horaire et prend le signe de la différence entre sa valeur prise à 12 h et à 8 h (équation (4.27)). On choisit de calculer la différence de flux entre 8 h et 12 h car ce sont les heures entre lesquelles le subissement d'un stress par la végétation induit une grande dynamique dans le cycle diurne du rendement (Rosema et coll., 1998; Flexas et coll., 2000; Moya et coll., 2004; Evain et coll., 2004).

$$\Delta Q = \operatorname{sgn}\left(Q\left(12\text{ h}\right) - Q\left(8\text{ h}\right)\right) \times \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}} \tag{4.26}$$

$$= \operatorname{sgn}\left(Q\left(12\text{ h}\right) - Q\left(8\text{ h}\right)\right) \times \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i - \bar{Q}\right)^2} \Big/ \bar{Q} \tag{4.27}$$

où Q peut être un des indices de rendement ou les flux de fluorescence, $\operatorname{sgn}(x)$ est la fonction donnant le signe de x, σ_Q l'écart type de la grandeur Q entre 8 h et 16 h, $\bar{Q}$ la moyenne de Q entre 8 h et 16 h, Q_i la valeur de Q au temps t_i, avec $t_1 = 8$ h et $t_n = 16$ h (n valant 9).

Influence du contenu en chlorophylle et du LAI

Les figures 4.14 et 4.15 montrent la distribution de la variation relative en fonction respectivement du contenu en chlorophylle et du LAI pour les deux bandes d'absorption de l'oxygène.

On remarque une faible dépendance au contenu en chlorophylle et au LAI, en effet pour une même bande les distributions varient assez peu lorsque ces paramètres varient.

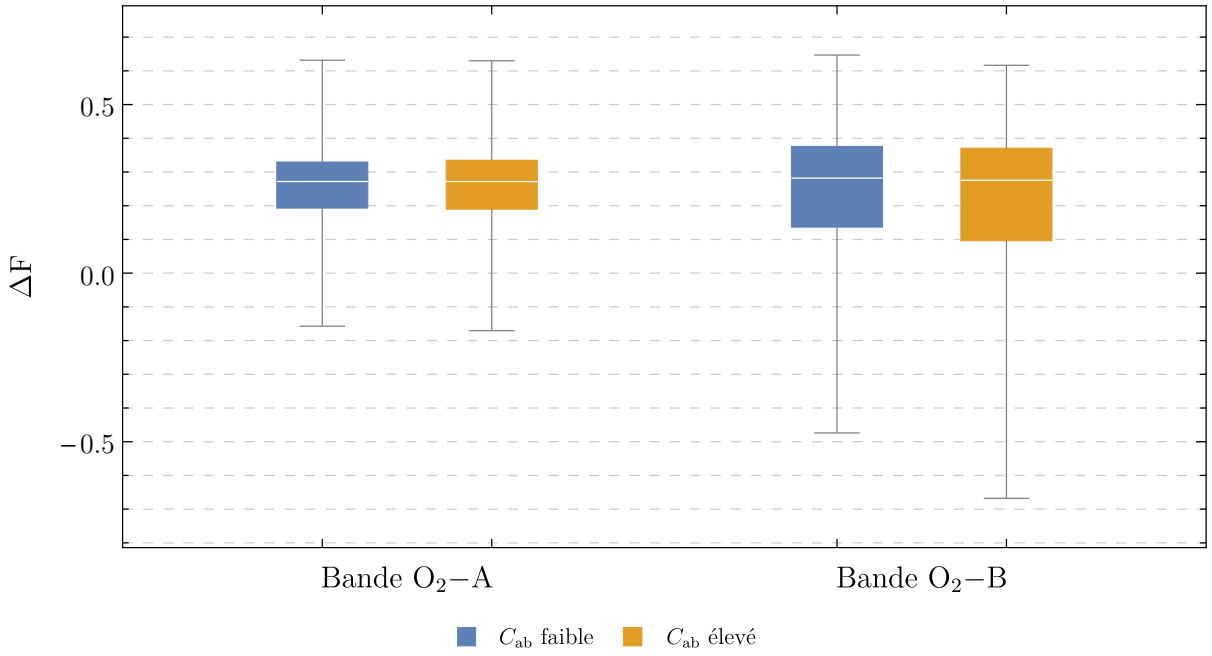


Figure 4.14 – Distributions de la différence relative de fluorescence entre midi et 9 h en fonction du contenu en chlorophylle pour les bandes O_2-A et O_2-B.

Influence de la distribution angulaire des feuilles

La figure 4.16 montre les distributions de la variation relative de la fluorescence dans les deux bandes en fonction de χ.

On peut remarquer dans les deux bandes que la variation relative augmente en moyenne avec l'augmentation de χ et que les distributions se tassent avec cette augmentation. L'augmentation moyenne de la variation relative signifie que la différence relative entre la fluorescence à midi et à neuf heures augmente avec l'augmentation de χ. Cela est dû au fait que les cycles diurnes de fluorescence de couverts érectophiles présentent majoritairement une dépression autour du midi solaire due à l'éclairement du sol par le Soleil induisant une fluorescence plus faible à ce moment. Le sol peut cependant n'être pas éclairé

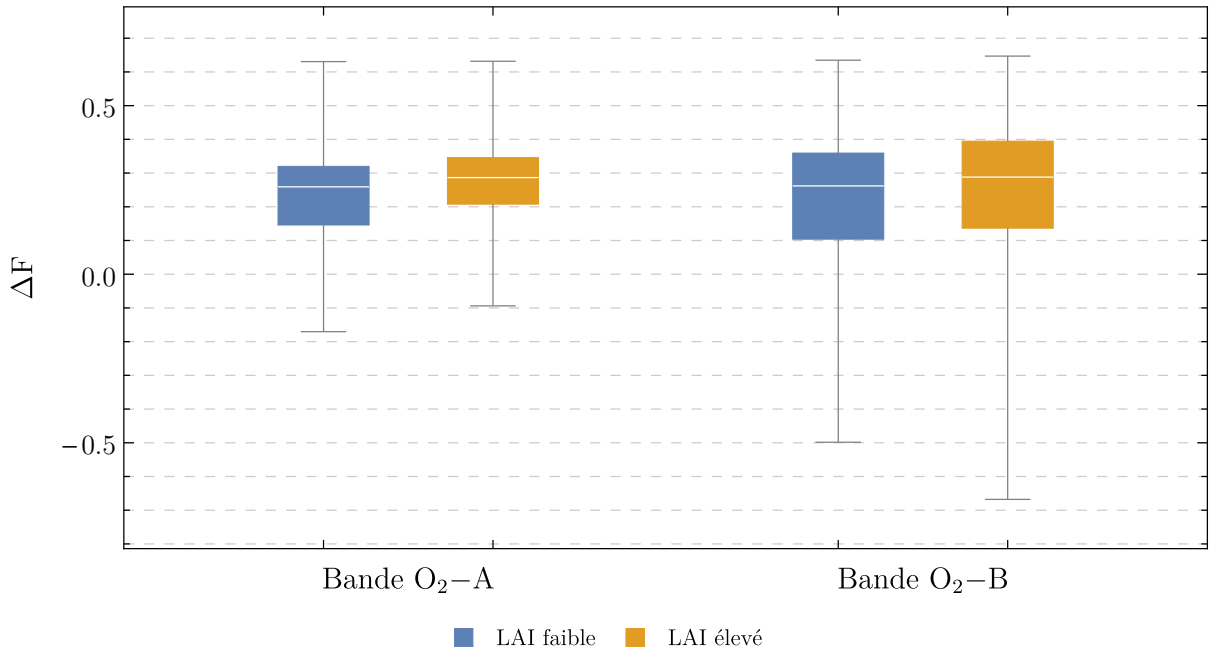


Figure 4.15 – Distributions de la différence relative de fluorescence entre midi et 9 h en fonction du LAI pour les bandes O_2-A et O_2-B.

dans un couvert érectophile si celui-ci à un LAI élevé. Ce dernier point explique que les distributions de variation relative sont très étalées pour les couverts érectophiles.

Influence du jour de l'année

La figure 4.17 montre l'influence du jour de l'année sur les distributions de la variation relative du cycle diurne de fluorescence.

On voit que la variation relative est en moyenne plus grande au solstice d'hiver dans les deux bandes, ce qui indique une fluorescence plus grande à midi qu'à neuf heures en relatif. Lorsque l'on s'éloigne de l'équateur, les cycles diurnes raccourcissent en automne et plus encore en hiver. La différence entre la fluorescence à midi et celle à neuf heures est donc amplifiée.

Influence des coordonnées du point observé

La figure 4.18 représente les distributions de la variation relative de la fluorescence en fonction des coordonnées du point observé. On remarque que les distributions sont très peu étalées pour le point situé au nadir du satellite dans les deux bandes. Cela peut s'expliquer par l'absence de saison, en effet la forme du cycle diurne ne change pas au cours de l'année et ne dépend donc que des paramètres du couvert. Les distributions de la variation relative pour des points situés sur l'équateur et éloignés du nadir (équateur 1 et 2) sont plus étalées. Sachant que les saisons sont identiques pour ces points et que la seule différence avec le point situé au nadir est l'angle de visée, cela montre que l'augmentation de ce dernier accentue l'incidence des effets de structure sur la forme des cycles diurnes, en résulte une distribution plus grande. Le fait que dans la bande O_2-B l'étalement de la distribution de la variation relative de la fluorescence est plus grand que dans la bande O_2-A abonde dans ce sens, en effet, les effets de structure sont plus importants dans la bande O_2-B ce qui exacerbe les différences de la variation relative due à la structure. Dans le cas des points situés le long du méridien passant au nadir (méridien 1 et 2), l'étalement de la distribution de la variation relative de la fluorescence est à la fois dû à l'angle de visée — bien que l'effet ne soit pas équivalent à celui des points situés sur l'équateur et éloignés du nadir — mais aussi aux variations saisonnières. Un grand étalement de la variation relative de fluorescence pour des points éloignés du nadir présage de la difficulté à retrouver les variations du rendement pour ces points.

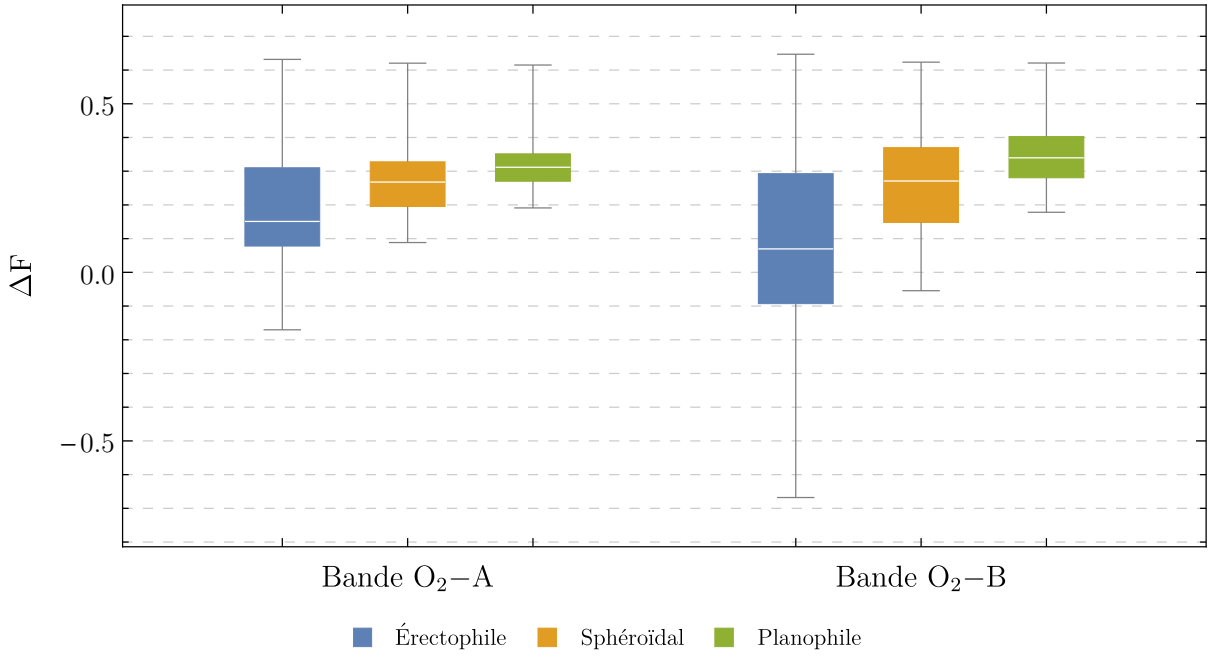


Figure 4.16 – Distributions de la différence relative de fluorescence entre midi et 9 h en fonction du paramètre χ de la distribution angulaire des feuilles pour les bandes O_2-A et O_2-B.

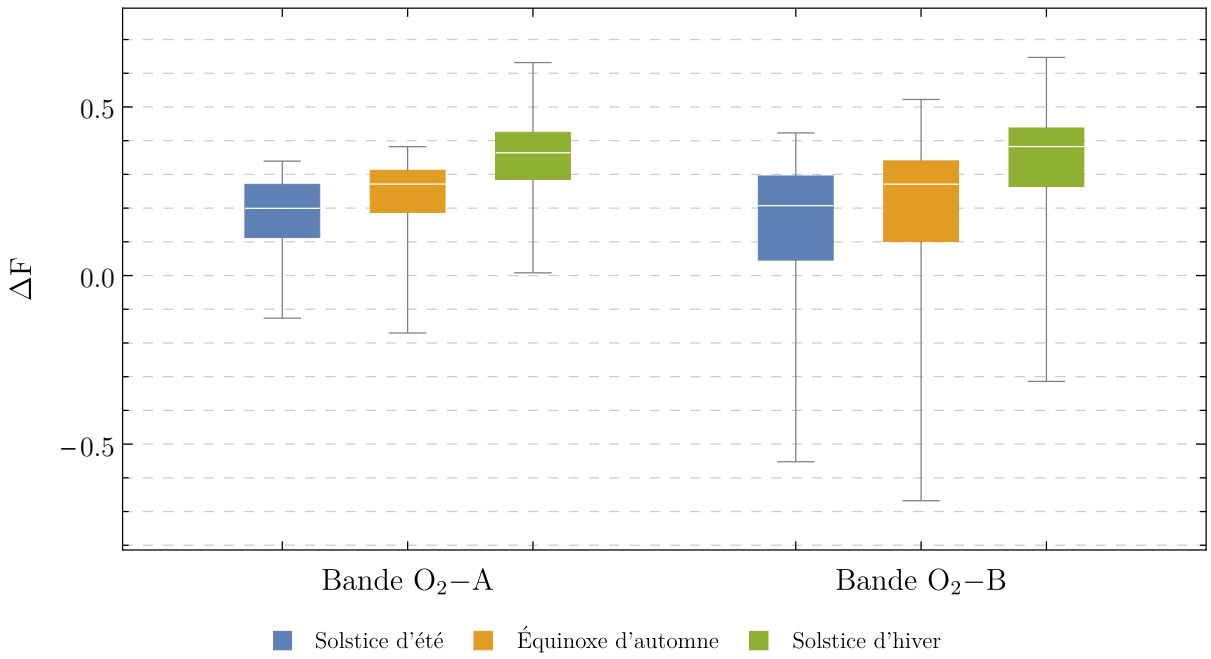


Figure 4.17 – Distributions de la différence relative de fluorescence entre midi et 9 h en fonction du jour de l'année pour les bandes O_2-A et O_2-B.

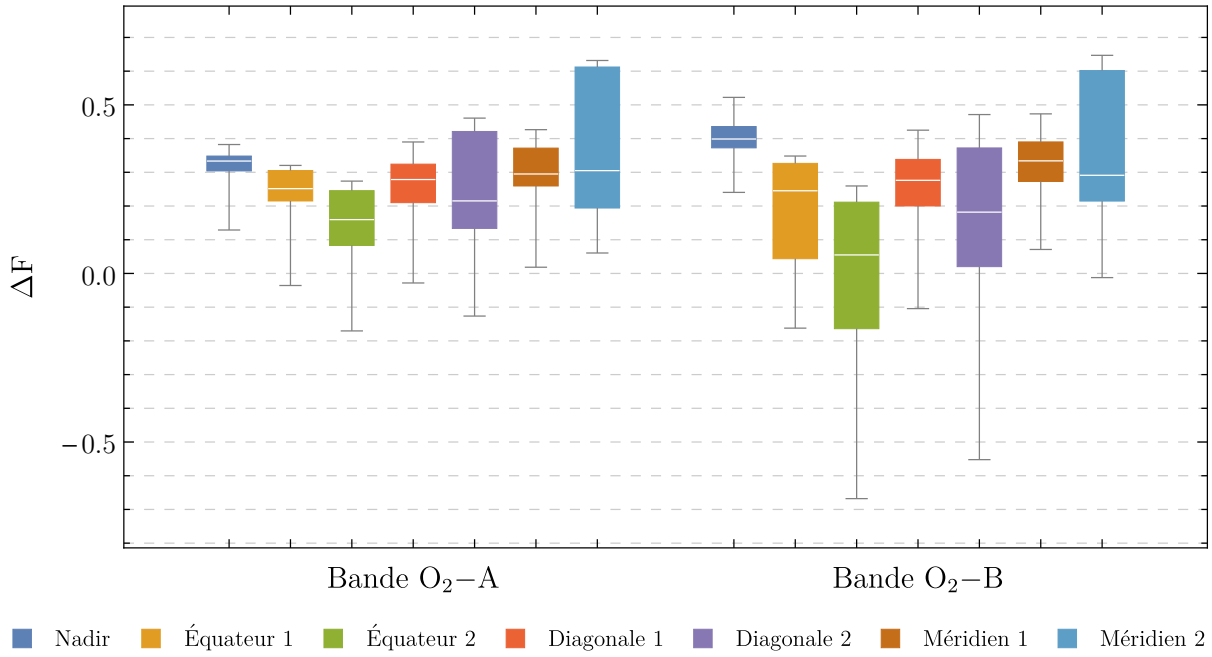


Figure 4.18 – Distributions de la différence relative de fluorescence entre midi et 9 h en fonction des coordonnées de la cible pour les bandes O_2-A et O_2-B.

4.3 Variabilité des indices de rendement de fluorescence

Jusqu'ici, on s'est intéressé aux cycles diurnes du flux de fluorescence. On a vu dans certains cas une grande dispersion de la variabilité relative de la fluorescence dans ses cycles diurnes, notamment pour les zones éloignées du nadir, pour la bande O_2-B et pour les structures de couvert érectophiles. Cela limite les possibilités de détection de stress. On s'intéresse donc ici à normaliser cet indicateur (comme on l'a vu au sol dans le chapitre 3) pour voir si dans le cas de l'observation géostationnaire on peut limiter cette variabilité et augmenter les possibilités de détection de stress.

Dans les simulations, le rendement de fluorescence est maintenu constant au cours du cycle diurne. Le calcul d'indices de rendement et l'étude de leurs cycles diurnes permet alors de mettre en avant les effets de structures du fait que ceux-ci représentent plus ou moins bien le rendement réel du couvert. Il s'agit donc dans cette partie d'étudier les cycles diurnes de ces indices et de comparer leur représentativité du rendement de fluorescence réel du couvert.

4.3.1 Comparaison des cycles diurnes des indices de rendement

Le rendement de fluorescence du couvert est défini comme le rapport entre la fluorescence émise par le couvert (F_e) et le rayonnement photosynthétiquement actif absorbé (APAR) (équation (3.1)). Ces deux grandeurs n'étant pas facilement mesurables au niveau du sol, *a fortiori* depuis un satellite géostationnaire, le rendement de fluorescence peut être approché par des indices de rendement comme l'ASFY ou les *fluorescence fractions* (FF) (partie 3.1.2). Afin d'étudier la représentativité du rendement de fluorescence par les indices, on choisit d'étudier la variabilité journalière de ces derniers par le calcul de leur variation entre neuf heures et midi (équation (4.28)). En effet le rendement de fluorescence étant constant lors des simulations, un indices de rendement de fluorescence bien représentatif du rendement de fluorescence du couvert devra avoir des variations journalières très faibles voire nulles en fonction des paramètres biophysiques et des conditions d'observation. La variation relative des indices a l'expression suivante :

$$\Delta\tilde{\varphi}_c = \frac{\tilde{\varphi}_c(12\text{ h}) - \tilde{\varphi}_c(9\text{ h})}{\tilde{\varphi}_c(12\text{ h})} \tag{4.28}$$

avec $\tilde{\varphi}_c$ un indice de rendement donné (ASFY, FF_{685} ou FF_{755}).

On choisit d'étudier ici l'ASFY, FF_{685} et FF_{758} calculés avec une longueur d'onde bien absorbée dans le couvert ($\lambda_0 = 685$ nm) et une autre bien moins absorbée ($\lambda_0 = 755$ nm). Ces deux derniers indices sont notés FF_{685} et FF_{755}. Ils rapportent les flux de fluorescence à la luminance réfléchie par la végétation à une certaine longueur d'onde comme indiquée dans l'équation (4.29) mais dans ce chapitre les flux de fluorescence sont ceux mesurés par le satellite ainsi que l'est la luminance réfléchie par la végétation. On a donc :

$$\mathrm{FF}_{\lambda_0}(\lambda_e) = \frac{\pi F^g(\lambda_e)}{L_c^g(\lambda_0)} \tag{4.29}$$

avec F^g les flux de fluorescence mesurés depuis le satellite et L_c^g la luminance de la cible mesurée depuis le satellite.

Le tableau 4.4 montre la médiane et l'écart type des distributions de ΔASFY, ΔFF_{685} et ΔFF_{755} pour toutes les simulations, dans les bandes O_2-A et O_2-B. On peut voir que pour les trois indices, la valeur médiane du $\Delta\tilde{\varphi}_c$ est plus proche de zéro dans la bande O_2-A que O_2-B et que la déviation standard y est plus faible (hormis pour FF_{685}). On peut noter que la valeur médiane de la variation relative entre neuf heures et midi des indices est relativement grande (en valeur absolue) pour l'ASFY et le FF_{685}. Un stress subit par la végétation peut engendrer une variation de son rendement de fluorescence à midi par rapport à neuf heures jusqu'à $-0{,}2$ (López González, 2014a). On voit qu'une mesure ponctuelle (sans lien avec les mesures des jours précédents) d'un cycle diurne d'ASFY dans la bande O_2-A ou O_2-B pourra dans beaucoup de cas laisser croire à la présence d'un stress. En effet, lorsque la valeur de ΔASFY est négative, elle peut être confondue avec un stress. Dans le cas de FF_{685}, la valeur médiane des variations entre neuf heures et midi étant positive et l'écart type grand, cette fois-ci la présence d'un stress peut

faire voir une variation nulle de l'indice de rendement qui peut être interprétée comme l'absence de stress. Les résultats pour FF_{755} sont en revanche bien différents de ceux des autres indices. La valeur médiane est quasiment centrée sur zéro dans les deux bandes et l'écart type est plus faible pour la bande O_2-A. Dans cette bande, les variations intrinsèques de cet indice de rendement étant plus faibles dans la plupart des simulations, il est plus à même de représenter le rendement réel du couvert.

	ΔASFY	ΔFF_{685}	ΔFF_{755}
O_2-A	$-0{,}11 \pm 0{,}15$	$0{,}11 \pm 0{,}24$	$0{,}0046 \pm 0{,}082$
O_2-B	$-0{,}12 \pm 0{,}29$	$0{,}12 \pm 0{,}22$	$0{,}015 \pm 0{,}15$

Tableau 4.4 – Médiane et écart type des distributions de différences relatives (entre neuf heures et midi) pour l'ASFY, le FF_{685} et le FF_{755} dans les bandes O_2-A et O_2-B calculés pour toutes les simulations.

On peut noter que les cycles diurnes des indices dont la valeur médiane n'est pas centrée sur zéro et l'écart type est grand peuvent tout de même donner une information sur les variations du rendement sur plusieurs jours. En effet, même si la variation diurne de l'indice est loin de celle du rendement de fluorescence du couvert, ses variations sur plusieurs jours — si tant est qu'elles ne soient pas dues à une évolution de la structure du couvert — peuvent informer sur celles du rendement. L'ASFY et le FF_{685}, même s'ils ne permettent pas d'être des bons estimateurs (*proxy*) de la variation diurne du rendement, peuvent donc tout de même avoir leur utilité dans la mesure relative (dans le temps) de la variation diurne du rendement de fluorescence.

On peut trouver l'explication de la bonne ou mauvaise représentativité des variations du rendement de fluorescence par les variations des indices dans la bonne ou mauvaise représentativité du APAR par le dénominateur dans les expressions des indices.

Dans le cas de l'ASFY, le PAR remplace le APAR dans la définition du rendement de fluorescence du couvert. Les variations du PAR entre neuf heures et midi représentent mal celles du APAR dans le cas de couverts érectophiles ce qui explique la médiane basse dans le tableau 4.4. La figure 4.19 montre l'influence du paramètre χ sur les distributions de ΔASFY dans les deux bandes. On voit que l'érectophilie diminue en moyenne la valeur de l'ASFY à midi et augmente la dispersion de sa distribution. L'ASFY pourrait être utilisé comme indicateur du rendement pour des couverts planophiles dans la bande O_2-A.

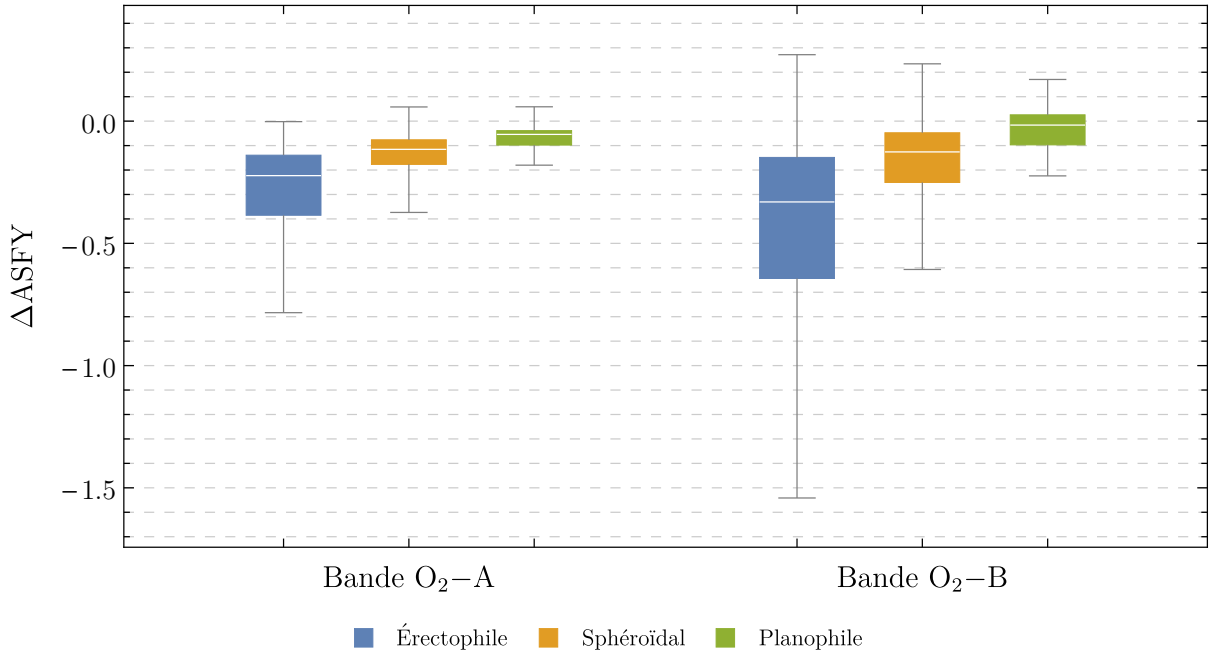


Figure 4.19 – Distributions de la différence relative de l'ASFY entre midi et 9 h en fonction du paramètre χ pour les bandes O_2-A et O_2-B.

Dans le cas de FF_{685} calculé dans la bande O_2-A, l'explication vient du fait que contrairement à la fluorescence à 760 nm, la lumière incidente à 685 nm est très bien absorbée par le couvert. Ce faisant la

configuration angulaire de mesure ou solaire peut causer une diminution de la luminance de la végétation à 685 nm qui ne sera pas effective dans les flux de fluorescence à 760 nm, causant une variation du rapport de ces deux grandeurs.

On peut noter que le calcul de l'ASFY à partir de mesures faites depuis une orbite géostationnaire nécessite de retrouver le PAR arrivant au sommet de la végétation à l'aide d'une caractérisation de l'atmosphère et de modèles de transfert radiatif. En revanche, les FF peuvent être calculés directement à partir des mesures des canaux permettant de retrouver la fluorescence.

On ne va donc se focaliser dans la suite que sur le FF_{755} dans la bande O_2-A qui a l'avantage de ne pas présenter beaucoup de variations intrinsèques pouvant occulter des variations du rendement de fluorescence au cours du cycle diurne et qui en fait donc un bon indice de rendement de fluorescence.

4.3.2 Forme des cycles diurnes des FF

La figure 4.20 montre pour un couvert standard les cycles diurnes de l'indice FF calculé avec $\lambda_0 = 755$ nm dans la bande O_2-A ($FF_{755}(760)$) pour le couvert standard seulement. Les cycles diurnes sont très peu variables entre neuf heures et midi, c'est ce que montre le calcul de $\Delta FF_{755}(760)$ qui donne en valeur médiane $0{,}0028 \pm 0{,}043$. Cela signifie que pour un couvert standard, la variation de $FF_{755}(760)$ entre neuf heures et midi est dans la plupart des cas comprise entre $-0{,}04$ et $0{,}05$. Dans le cas du couvert standard, $FF_{755}(760)$ permet de suivre l'état physiologique de la végétation, en effet ses variations diurnes en fonction des conditions d'observations n'occultent pas de possibles variations du rendement de fluorescence qui peuvent être de l'ordre de 10 à 20 %.

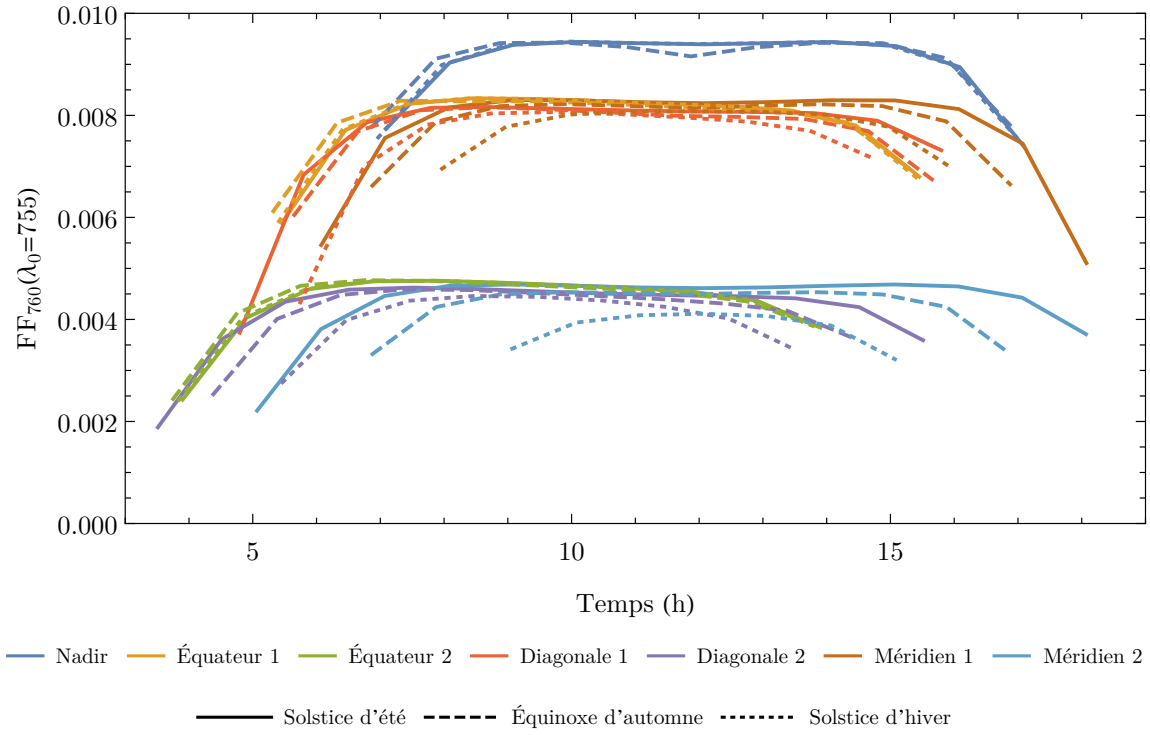


Figure 4.20 – Cycles diurnes du $FF(\lambda_0 = 755$ nm) à 760 nm simulés pour un couvert standard pour les trois jours de l'année et les sept positions du point observé.

Il s'agit d'étudier à présent l'influence des paramètres spatio-temporels et du couvert sur la variabilité intrinsèque de $FF_{755}(760)$ dans toutes les simulations, afin de déterminer dans quelles situations les variations diurnes de cet indice de rendement donneront une bonne information sur les variations du rendement et donc sur l'état physiologique de la végétation.

L'influence du contenu en chlorophylle sur la variation de l'indice de rendement entre neuf heures et midi est négligeable. En effet, les simulations montrent que passer le contenu en chlorophylle a et b de 17 à 50 $\mu g \cdot cm^{-2}$ fait varier en moyenne ΔFF_{755} de $0{,}0011 \pm 0{,}0068$.

L'influence du LAI sur ΔFF_{755} est plus importante. Faire varier le LAI de 2 à 8 accroît en moyenne ΔFF_{755} de $0{,}051 \pm 0{,}071$, en faisant passer la valeur moyenne de ΔFF_{755} de $-0{,}031$ à $0{,}019$.

La figure 4.21 nous montre l'influence du paramètre χ sur FF_{758} dans les deux bandes de l'oxygène. On voit que ce paramètre a également une grande influence sur la variabilité journalière de ΔFF_{755}. Dans la bande O_2-A, sa valeur moyenne est de $-0{,}055 \pm 0{,}11$, $0{,}0093 \pm 0.05$ et $0{,}028 \pm 0{,}043$ pour un χ valant respectivement 0,3, 1 et 3,2. On voit que l'écart type diminue avec la planophilie, cela signifie que plus elle augmente plus se ressert la distribution de ΔFF_{755}. Dans la bande O_2-B, les valeurs moyennes de ΔFF_{755} sont légèrement plus éloignées de zéro et les écarts types plus grands.

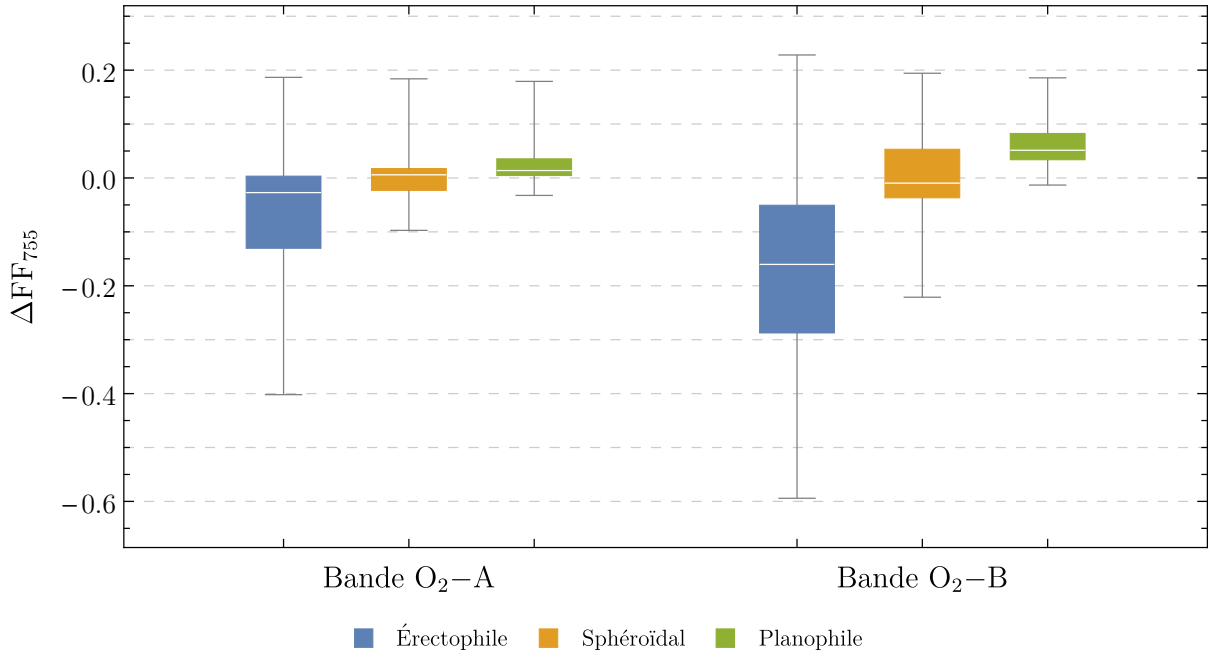


Figure 4.21 – Distributions de la différence relative de FF_{755} entre midi et 9 h en fonction du paramètre χ pour les bandes O_2-A et O_2-B.

Le jour de l'année fait également beaucoup varier les distributions de ΔFF_{755}. Dans la bande O_2-A, la moyenne de cet indice vaut $-0{,}025 \pm 0{,}064$, $-0{,}032 \pm 0{,}082$ et $0{,}039 \pm 0{,}08$ pour le solstice d'été, l'équinoxe et le solstice d'hiver respectivement. On peut noter que la dispersion des distributions de $\Delta FF_{755}(760)$ varie très peu en fonction du jour de l'année.

On vient de voir que pour les couverts sphéroïdaux et planophiles, les variations de FF_{758} dans la bande O_2-A sont très proches de zéro et assez peu dispersées. La figure 4.22 nous montre les distributions de FF_{758} pour ces deux types de couverts seulement en fonction de la direction de visée. Les variations induites par le changement de l'angle de visée du satellite peuvent s'étudier suivant les trois lignes : équateur, méridien et diagonale. La valeur moyenne de $\Delta FF_{755}(760)$ au nadir est de $-0{,}0011 \pm 0{,}031$. Si l'on suit l'équateur, en moyenne la valeur de $FF_{755}(760)$ à midi remonte par rapport à neuf heures à mesure que l'on s'éloigne du nadir, $\Delta FF_{755}(760)$ vaut en moyenne $-0{,}021 \pm 0{,}019$ puis $0{,}034 \pm 0{,}018$ respectivement pour le point équateur 1 puis le point équateur 2. On observe les mêmes tendances en suivant le méridien : $-0{,}0052 \pm 0{,}025$ et $0{,}055 \pm 0{,}085$ pour méridien 1 et méridien 2 ; de même qu'en suivant la diagonale : $-0{,}0038 \pm 0{,}022$ et $0{,}043 \pm 0{,}049$ pour diagonale 1 et diagonale 2.

Dans la bande O_2-A, FF_{758} paraît donc être un très bon indicateur du rendement de fluorescence pour les couverts sphéroïdaux et planophiles ($\chi \geq 1$), hormis pour les points très éloignés du nadir que sont diagonale 2 et méridien 2, dont les distributions sont très étalées.

Le tableau 4.5 montre la médiane et l'écart type des distributions de $\Delta FF_{755}(760)$ en fonction du paramètre χ et de la position du point observé, regroupés par distance au nadir : nadir ; équateur 1, méridien 1 et diagonale 1 ; et équateur 2, méridien 2 et diagonale 2. On peut remarquer plusieurs tendances générales, la planophilie augmente la valeur médiane de ΔFF_{755}, de même qu'elle diminue l'étalement de ses distributions (diminution de l'écart type) ; l'augmentation de la distance au nadir augmente la valeur médiane de l'indice. On peut noter également que le cycle diurne de l'indice d'un couvert érectophile

vu au nadir présente une forte dépression à midi ($Q_2(\Delta FF_{755}) = -0{,}14$) vraisemblablement à cause du phénomène de *hotspot*.

		χ		
		0,3	1	3,2
Position	Nadir	$-0{,}14 \pm 0{,}15$	$-0{,}019 \pm 0{,}039$	$0{,}0050 \pm 0{,}014$
	1	$-0{,}023 \pm 0{,}093$	$0{,}0046 \pm 0{,}026$	$0{,}0082 \pm 0{,}012$
	2	$-0{,}027 \pm 0{,}087$	$0{,}014 \pm 0{,}060$	$0{,}041 \pm 0{,}053$

Tableau 4.5 – Médiane et écart type des distributions de différences relatives (entre neuf heures et midi) pour le FF_{755} dans la bande O_2-A en fonction de la position (Nadir, 1 (équateur 1, méridien 1, diagonale 1) et 2 (équateur 2, méridien 2, diagonale 2)) et du paramètre χ calculés pour toutes les simulations.

Ce tableau confirme que FF_{755} est un indice de rendement dont les variations au cours du cycle diurne sont bien représentatives de celles du rendement du couvert, du moins lorsque celle-ci sont supérieures à 0,1 et hormis pour un couvert érectophile vu au nadir. On peut noter que les variations diurnes intrinsèques de l'indice (c'est-à-dire non dues à des variations réelles du rendement) sont d'autant plus faibles que le couvert est planophile.

		LAI	
		2	8
Position	Nadir	$-0{,}041 \pm 0{,}13$	$0{,}0081 \pm 0{,}030$
	1	$-0{,}025 \pm 0{,}082$	$0{,}0074 \pm 0{,}017$
	2	$0{,}0082 \pm 0{,}083$	$0{,}016 \pm 0{,}058$

Tableau 4.6 – Médiane et écart type des distributions de différences relatives (entre neuf heures et midi) pour le FF_{755} dans la bande O_2-A en fonction de la position (Nadir, 1 (équateur 1, méridien 1, diagonale 1) et 2 (équateur 2, méridien 2, diagonale 2)) et du LAI calculés pour toutes les simulations.

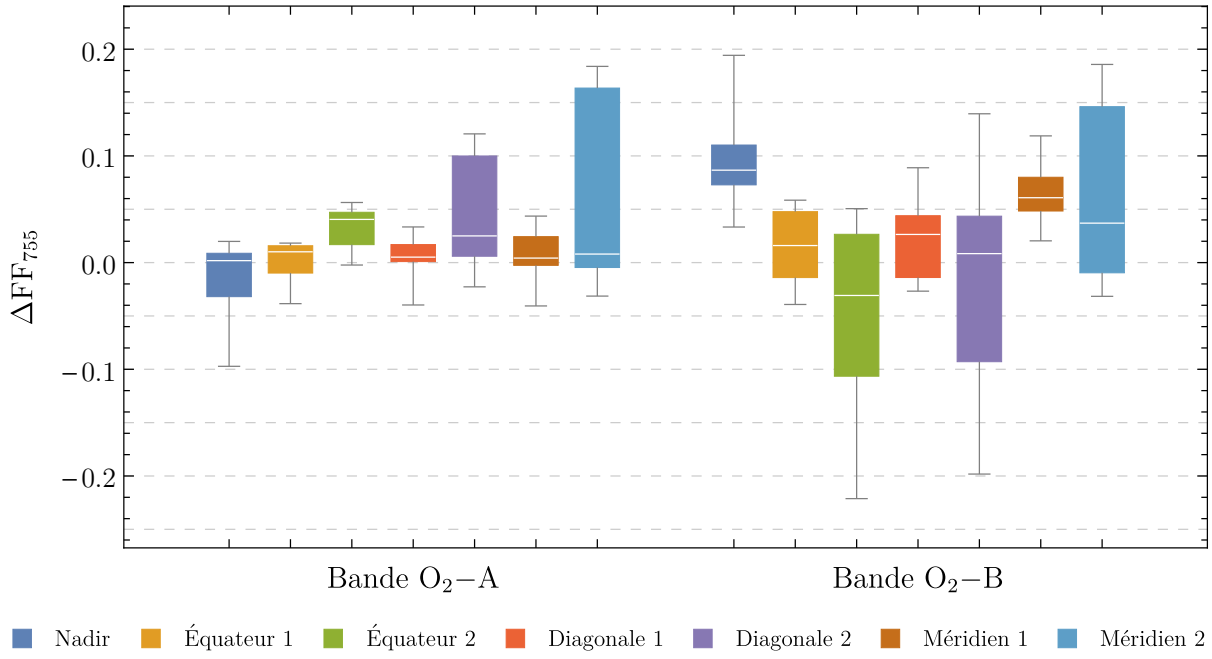


Figure 4.22 – Distributions de la différence relative de FF_{755} pour les couverts sphéroïdaux et planophiles entre midi et 9 h en fonction des coordonnées de la cible pour les bandes O_2-A et O_2-B.

4.4 Conclusion

On a vu dans ce chapitre à l'aide de simulations de cycles diurnes de la fluorescence chlorophyllienne vus depuis une orbite géostationnaire que la fluorescence présente une grande variabilité, tant du point de vue de sa magnitude que de la forme de ses cycles diurnes. Dans l'optique de tirer des mesures une information sur le rendement de fluorescence du couvert afin d'évaluer l'état physiologique de la végétation, la forme des cycles diurnes de trois indices de rendement ont été étudiés afin de déterminer s'ils représentaient bien les variations du rendement réel du couvert.

La configuration de mesure, c'est-à-dire le jour de l'année et l'angle de visée du satellite (que l'on peut traduire par la position en latitude et longitude du point observé), influe grandement sur la magnitude de fluorescence mesurée par le satellite : le jour de l'année pour la raison triviale que la cible est moins éclairée dans les latitudes élevées, et la position de la cible en raison de la diminution du flux reçu par le satellite lorsque latitude et longitude augmentent, augmentant l'épaisseur d'atmosphère traversée et l'écart entre l'angle d'observation et la normale à la surface de la cible.

Les paramètres du couvert végétal, le contenu en chlorophylle, le LAI et la distribution angulaire des feuilles du couvert, influent également sur la magnitude de fluorescence que mesure le satellite. Le contenu en chlorophylle dans deux sens différents selon la bande regardée. Le LAI et χ dans le même sens que la magnitude quelle que soit la bande.

L'amplitude des variations de magnitude induites par les paramètres biophysiques du couvert est assez élevée. Afin de déterminer dans quels cas la fluorescence est mesurable depuis une orbite géostationnaire, il convient de traduire les résultats de cette étude en terme de spécifications instrumentales. C'est ce point qui est développé dans le chapitre suivant.

Concernant la forme des cycles diurnes, on a vu que ceux-ci étaient très variables en fonction des paramètres du couvert et de la configuration de mesure. Le but de la mesure de fluorescence étant de quantifier les variations journalières du rendement de fluorescence, nous avons cherché à évaluer les indicateurs de rendement dans le cas d'une détection en géostationnaire. Nous avons montré que dans la bande O_2-A les variations de FF_{755} suivent bien les variations du rendement du couvert. Cette bonne représentation du rendement augmente avec le LAI et est valable pour des couverts plutôt planophiles, ainsi que pour des angles de visée du satellite pas trop élevés (jusqu'à 2,5°). FF_{685} et l'ASFY, quant à eux, ne représentent pas bien les variations du rendement de fluorescence dans la plupart des configurations de mesure et structures du couvert.

On a vu aussi qu'il peut rester néanmoins intéressant de suivre les variations relatives, au fil des jours, des variations diurnes des deux autres indices, ASFY et FF_{687}, dans l'hypothèse où la structure du couvert varie peu au fil des jours [3]. En effet, dans ce cas-là les variations relatives de $\Delta\tilde{\phi}_c$ peuvent représenter celles de $\Delta\phi_c$. De plus, on peut imaginer que la mesure d'indices de végétation permettant d'en caractériser la structure permettraient de corriger les variations diurnes intrinsèques des indices de rendement.

3. Ce qui est en général le cas, à l'exception de variations brutales dues à l'intervention humaine (fauchage, moisson, déforestation), à une catastrophe (incendie, inondation) ou, bien sûr, à un stress.

Chapitre 5

Spécification d'un imageur de fluorescence géostationnaire

Sommaire

5.1 Spécifications de l'instrument 119
5.1.1 Rapport signal sur bruit 119
5.1.1.1 Dérivation des équations de la fluorescence 120
5.1.2 Temps d'exposition élémentaire et total 122
5.2 Application à des cas concrets 125
5.2.1 Carte de LAI et vignettes 125
5.2.2 Interpolation des simulations 127
5.2.3 Temps d'acquisition 132
5.3 Conclusion 134

Ce chapitre vise à établir certaines des spécifications d'un instrument spatial situé en orbite géostationnaire pour mesurer des cycles diurnes de fluorescence de la végétation dans les deux bandes d'absorption du dioxygène atmosphérique A et B. Le chapitre précédent étudiait grâce à des simulations l'amplitude et la forme du signal de fluorescence mesurable dans différentes conditions depuis une orbite géostationnaire. C'est à partir des résultats de ces simulations que sont définies les exigences d'un instrument géostationnaire dans ce chapitre.

5.1 Spécifications de l'instrument

5.1.1 Rapport signal sur bruit

Les variations journalières du rendement de fluorescence induites par des variations de l'état physiologique (notamment dues à un stress hydrique ou thermique) peuvent être de l'ordre de 20 % entre neuf heures et midi (López González, 2014a). Afin de détecter de telles variations du rendement de fluorescence, il a été choisi de fixer à 10 % l'incertitude sur la mesure de fluorescence. Cette limite ayant été fixée, il est possible à partir des équations de calcul de la fluorescence de spécifier le rapport signal sur bruit de l'instrument nécessaire à remplir ces exigences. Pour cela, il convient de faire des hypothèses sur le modèle de bruit instrumental.

Nous faisons l'hypothèse que le bruit photonique est dominant dans chaque canal. Le capteur de l'instrument étant exposé suffisamment pour qu'il soit proche et en dessous de la saturation pour chacun des canaux, le niveau de signal y est approximativement le même. Le bruit photonique étant proportionnel à la racine carrée du niveau du signal, ce dernier étant peu variable entre les différents canaux, le rapport signal sur bruit est le même quel que soit le canal.

5.1.1.1 Dérivation des équations de la fluorescence

Le but de cette partie est de calculer le rapport signal sur bruit des différents canaux de l'instrument nécessaire à l'obtention d'une incertitude donnée sur la fluorescence. Pour cela, il convient de calculer la variation de la fluorescence induite par une variation du flux dans les canaux. Cela revient à dériver l'expression de la fluorescence en fonction des mesures des différents canaux.

La fluorescence à la longueur d'onde du canal central ($i = 2$) calculée à partir des mesures de luminance dans les trois canaux sur la cible (L_i pour $i \in \{1\,;2\,;3\}$) et sur la référence (L'_i pour $i \in \{1\,;2\,;3\}$) est notée $F_2\,(L_1,L_2,L_3,L'_1,L'_2,L'_3)$. Son incertitude absolue est la somme quadratique des incertitudes des trois canaux sur la cible et sur la référence et vaut

$$\Delta F_2 = \sqrt{\left(\Delta L_1 \frac{\partial F_2}{\partial L_1}\right)^2 + \left(\Delta L_2 \frac{\partial F_2}{\partial L_2}\right)^2 + \left(\Delta L_3 \frac{\partial F_2}{\partial L_3}\right)^2 + \left(\Delta L'_1 \frac{\partial F_2}{\partial L'_1}\right)^2 + \left(\Delta L'_2 \frac{\partial F_2}{\partial L'_2}\right)^2 + \left(\Delta L'_3 \frac{\partial F_2}{\partial L'_3}\right)^2} \tag{5.1}$$

où ΔL_i est l'incertitude absolue du canal i, $\partial F_2/\partial L_i$ la dérivée partielle de la fluorescence dans le canal central par rapport à la luminance dans le canal i et L_i et L'_i les luminances dans le canal i sur la cible et sur la référence respectivement. L'incertitude relative sur F_2 que l'on cherche vaut donc

$$\frac{\Delta F_2}{F_2} = \frac{\sqrt{\left(\Delta L_1 \frac{\partial F_2}{\partial L_1}\right)^2 + \left(\Delta L_2 \frac{\partial F_2}{\partial L_2}\right)^2 + \left(\Delta L_3 \frac{\partial F_2}{\partial L_3}\right)^2 + \left(\Delta L'_1 \frac{\partial F_2}{\partial L'_1}\right)^2 + \left(\Delta L'_2 \frac{\partial F_2}{\partial L'_2}\right)^2 + \left(\Delta L'_3 \frac{\partial F_2}{\partial L'_3}\right)^2}}{F_2} \tag{5.2}$$

L'hypothèse que le rapport signal sur bruit ($\mathrm{SNR} = L_i/\Delta L_i$) est constant dans chaque canal i amène $\Delta L_i = L_i/\mathrm{SNR}$ pour tout i. L'équation (5.2) donne donc

$$\frac{\Delta F_2}{F_2} = \frac{\sqrt{\left(L_1 \frac{\partial F_2}{\partial L_1}\right)^2 + \left(L_2 \frac{\partial F_2}{\partial L_2}\right)^2 + \left(L_3 \frac{\partial F_2}{\partial L_3}\right)^2 + \left(L'_1 \frac{\partial F_2}{\partial L'_1}\right)^2 + \left(L'_2 \frac{\partial F_2}{\partial L'_2}\right)^2 + \left(L'_3 \frac{\partial F_2}{\partial L'_3}\right)^2}}{F_2 \times \mathrm{SNR}} \tag{5.3}$$

La valeur du SNR pour une incertitude sur la fluorescence $\Delta F_2/F_2$ donnée vaut alors

$$\mathrm{SNR} = \frac{\sqrt{\left(L_1 \frac{\partial F_2}{\partial L_1}\right)^2 + \left(L_2 \frac{\partial F_2}{\partial L_2}\right)^2 + \left(L_3 \frac{\partial F_2}{\partial L_3}\right)^2 + \left(L'_1 \frac{\partial F_2}{\partial L'_1}\right)^2 + \left(L'_2 \frac{\partial F_2}{\partial L'_2}\right)^2 + \left(L'_3 \frac{\partial F_2}{\partial L'_3}\right)^2}}{F_2 \times \frac{\Delta F_2}{F_2}} \tag{5.4}$$

Afin de calculer les valeurs des $\frac{\partial F_2}{\partial L_i}$, il convient de dériver l'expression de F_2 par rapport aux variables correspondant à la luminance dans chaque canal. F_2 se calcule en résolvant le système d'équations qui

suit (équations (5.5) à (5.15)).

$$\begin{cases} L_1 = \rho_1 \times \dfrac{I_1}{\pi} + F_1 & (5.5) \\ L_2 = \rho_2 \times \dfrac{I_2}{\pi} + F_2 & (5.6) \\ L_3 = \rho_3 \times \dfrac{I_3}{\pi} + F_3 & (5.7) \\ L'_1 = \rho'_1 \times \dfrac{I_1}{\pi} & (5.8) \\ L'_2 = \rho'_2 \times \dfrac{I_2}{\pi} & (5.9) \\ L'_3 = \rho'_3 \times \dfrac{I_3}{\pi} & (5.10) \\ \rho_1 = a + b \times \lambda_1 & (5.11) \\ \rho_2 = a + b \times \lambda_2 & (5.12) \\ \rho_3 = a + b \times \lambda_3 & (5.13) \\ F_1 = \beta_1 \times F_2 & (5.14) \\ F_3 = \beta_3 \times F_2 & (5.15) \end{cases}$$

avec L_i et L'_i les luminances de la cible et de la référence dans le canal i, ρ_i et ρ'_i les réflectances de la cible et de la référence à la longueur d'onde du canal i, I_i l'éclairement à la longueur d'onde du canal i, F_i la fluorescence émise par le couvert à la longueur d'onde du canal i, a et b des constantes définissant la relation linéaire reliant la longueur d'onde λ_i à la réflectance de la cible à cette longueur d'onde et β_i le rapport théorique entre F_i et F_2. La résolution de ce système d'équation pour F_2 donne

$$F_2 = \frac{L_1 L'_2 L'_3 (\lambda_2 - \lambda_3) \rho'_1 + L'_1 (L_2 L'_3 (\lambda_3 - \lambda_1) \rho'_2 + L'_2 L_3 (\lambda_1 - \lambda_2) \rho'_3)}{L'_1 L'_3 (\lambda_3 - \lambda_1) \rho'_2 + L'_2 (L'_3 \beta_1 (\lambda_2 - \lambda_3) \rho'_1 + L'_1 \beta_3 (\lambda_1 - \lambda_2) \rho'_3)} \tag{5.16}$$

Les dérivées partielles $\partial F_2 / \partial L_i$ et $\partial F_2 / \partial L'_i$ valent alors

$$\frac{\partial F_2}{\partial L_i} = \frac{L'_j L'_k (\lambda_j - \lambda_k) \rho'_i}{L'_j L'_k \beta_i (\lambda_j - \lambda_k) \rho'_i + L'_i L'_k \beta_j (\lambda_k - \lambda_i) \rho'_j + L'_i L'_j \beta_k (\lambda_i - \lambda_j) \rho'_k} \tag{5.17}$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial L'_i} = \frac{L'_j L'_k (\lambda_j - \lambda_k) \rho'_i \left(L'_k (L_j \beta_i - L_i \beta_j) (\lambda_k - \lambda_i) \rho'_j + L'_j (L_k \beta_i - L_i \beta_k) (\lambda_i - \lambda_j) \rho'_k \right)}{\left(L'_j L'_k \beta_i (\lambda_j - \lambda_k) \rho'_i + L'_i L'_k \beta_j (\lambda_k - \lambda_i) \rho'_j + L'_i L'_j \beta_k (\lambda_i - \lambda_j) \rho'_k \right)^2} \tag{5.18}$$

avec $(j, k) = (2, 3)$ pour $i = 1$, $(j, k) = (3, 1)$ pour $i = 2$ et $(j, k) = (1, 2)$ pour $i = 3$. De plus, on a introduit β_2 qui vaut 1 par souci de commutabilité des expressions génériques en i, j et k.

À partir de l'équation (5.4) et des expressions des dérivées partielles de F_2 données par les équations (5.17) et (5.18), il est possible de calculer le SNR requis pour une incertitude voulue sur la mesure de fluorescence. La figure 5.1 montre les distributions du SNR requis pour obtenir 10 % d'incertitude sur la mesure de fluorescence pour les bandes O_2-A et O_2-B à 9 heures et midi pour l'ensemble des simulations.

Les SNR requis dans la bande O_2-B pour 50 % des simulations (on rappelle que les boîtes du diagramme à moustache représentent 50 % de la distribution) sont compris entre 1800 et 2600 à 9 heures et 1600 et 2700 à midi. Pour la bande O_2-A, les valeurs sont plus faibles et les distributions moins étalées, à 9 heures, 50 % des SNR requis sont entre 570 et 790 et à midi entre 700 et 950. Les flux de fluorescence en provenance du couvert et arrivant au satellite étant plus grands dans le fond de la bande O_2-B que dans celui de la bande O_2-A, il serait intuitif que le SNR requis pour mesurer dans la bande O_2-A soit plus important. Mais il n'en est rien, le SNR ne dépend pas seulement du flux de fluorescence absolu mais aussi du rapport de fluorescence entre le bord et le fond des bandes d'absorption, ce rapport est plus important dans la bande O_2-A ce qui induit un besoin de SNR plus petit pour atteindre les 10 % d'incertitude sur la fluorescence. On peut noter que les SNR requis sont plus faible à 9 heures qu'à midi dans la bande O_2-A, à 9 heures bien qu'il y ait moins de fluorescence, les rayons du Soleil éclairant la cible traversent

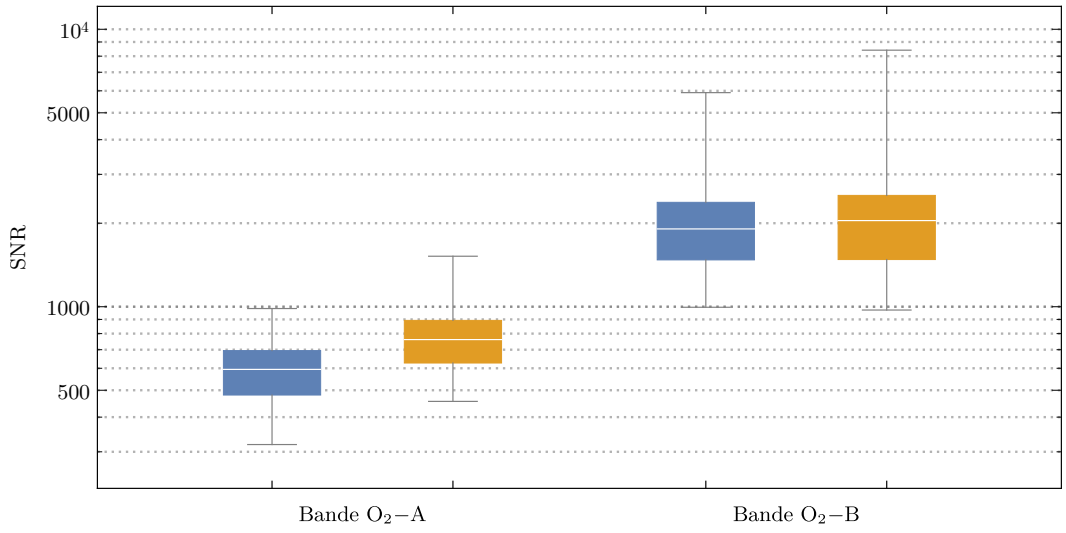


Figure 5.1 – Distributions des SNR requis à 9 h (en **bleu**) et 12 h (en **orange**) en fonction de la bande.

plus d'atmosphère qu'à midi engendrant une profondeur de bande plus grande et donc une plus grande visibilité de la fluorescence par rapport au rayonnement réfléchi par la végétation.

5.1.2 Temps d'exposition élémentaire et total

Afin de calculer le temps d'exposition nécessaire pour obtenir une incertitude donnée sur la mesure de fluorescence, il convient de calculer le temps d'exposition d'une image élémentaire, dont le rapport signal sur bruit est connu.

On considère qu'un pixel du capteur de l'instrument peut accumuler 100 000 charges. Cette grandeur est ce que l'on appelle la profondeur P_e des puits quantiques des pixels. Le bruit photonique associé vaut $B_\mathrm{e} = \sqrt{P_\mathrm{e}} \simeq 316$. C'est également la valeur du rapport signal sur bruit associé à ce signal ($N/\sqrt{N} = \sqrt{N}$). En pratique ce rapport signal sur bruit est un peu plus faible, on choisit ici de prendre une valeur de 250 (ce qui équivaut à un bruit de 450 pour un nombre de charges accumulées P_e inchangé).

Connaissant la luminance des différentes scènes simulées, on cherche à connaître le temps de remplissage des puits quantiques. Pour cela, il convient de convertir en unités quantiques les flux. On a

$$L\,[\mathrm{mol\cdot s^{-1}\cdot m^{-2}\cdot sr^{-1}}] = L\,[\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot nm^{-1}}] \times \lambda\,[\mathrm{nm}] \times 10^{-9} \times 8{,}35935\,[\mathrm{W^{-1}\cdot s^{-1}\cdot m^{-1}\cdot mol}] \tag{5.19}$$

où $8{,}35935\,[\mathrm{W^{-1}\cdot s^{-1}\cdot m^{-1}\cdot mol}]$ est l'inverse de l'énergie contenue dans une mole de photons par unité de longueur d'onde.

En fixant à présent la surface de collection de l'instrument du satellite et l'angle solide d'un pixel, il est possible de connaître le flux photonique en nombre de photons par seconde arrivant au capteur. La loi reliant la luminance en unités quantique à ce flux est la suivante :

$$F_\gamma\,[\mathrm{s^{-1}}] = L\,[\mathrm{mol\cdot s^{-1}\cdot m^{-2}\cdot sr^{-1}}] \times N_\mathrm{A}\,[\mathrm{mol^{-1}}] \times \Omega_\mathrm{px}\,[\mathrm{sr}] \times S_\mathrm{opt}\,[\mathrm{m^2}] \tag{5.20}$$

avec F_γ le flux photonique collecté par un pixel de l'instrument en photons par seconde, N_A le nombre d'Avogadro en photons par mole, Ω_px l'angle solide d'un pixel en stéradian et S_opt la surface collectrice du télescope de l'instrument.

En calant les spécifications de notre instrument sur celles de Goci-II, à savoir le diamètre de collection de l'instrument (D_opt) à 200 mm et le pas d'échantillonnage au sol (GSD pour *ground sample distance*) à 250 m, on peut calculer S_opt et Ω_px, on a en effet

$$S_\mathrm{opt} = \pi \times \left(\frac{D_\mathrm{opt}}{2}\right)^2 = 0{,}0314\ \mathrm{m^2} \tag{5.21}$$

et

$$\Omega_{\text{px}} = \left(\frac{\text{GSD}}{h_{\text{géo}}}\right)^2 = 48{,}8 \text{ psr} \tag{5.22}$$

avec $h_{\text{géo}}$ l'altitude du satellite.

Caractéristique	Symbole	Valeur	Unité
Diamètre de collection	D_{opt}	200	mm
Surface de collection	S_{opt}	0,0314	m^2
Résolution au sol	GSD	250	m
Taille d'une vignette au sol	S_{vig}	625×625	km^2
Angle solide d'un pixel	Ω_{px}	48,8	psr
Profondeur des pixels	P_{e}	100 000	-
SNR des pixels	SNR_{px}	250	-
Nombre de pixels	N_{px}	2500×2500	-

Tableau 5.1 – Caractéristiques du télescope et du capteur du satellite.

Il est alors possible de calculer le temps d'exposition élémentaire en fonction du flux photonique collecté, à supposer que l'on cherche à remplir complètement le puits quantique des pixels. Il vaut dans ce cas

$$t_{\text{élém}} = \frac{P_{\text{e}}}{F_\gamma} \tag{5.23}$$

La figure 5.2 synthétise en boîtes à moustaches les distributions des temps d'exposition pour toutes les simulations en fonction de la longueur d'onde à 9 heures ou midi. On peut remarquer que les temps d'exposition au fond des bandes d'absorption sont plus grands que pour les mesures dans le continuum en raison de flux plus faibles, de même qu'à 9 heures par rapport à midi.

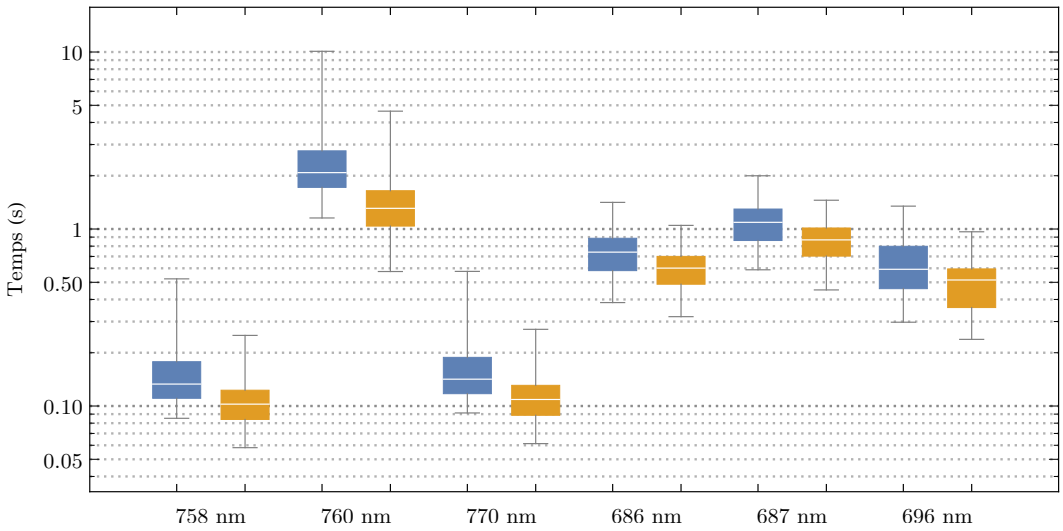


Figure 5.2 – Distributions des temps d'exposition élémentaires en seconde à 9 h (en bleu) et 12 h (en orange) en fonction du canal.

Connaissant à présent les temps d'exposition des images élémentaires, le rapport signal sur bruit associé à chacune d'elles ($\text{SNR}_{\text{img}} = 250$) et le rapport signal sur bruit nécessaire à l'obtention d'une incertitude donnée sur la mesure de fluorescence pour chaque simulation, il est possible de calculer combien d'images élémentaires sont à acquérir dans chaque canal afin d'obtenir ladite incertitude sur la mesure de

fluorescence. Le nombre d'images élémentaires à acquérir vaut

$$N_{\text{img}} = \left(\frac{\text{SNR}_{\text{req}}}{\text{SNR}_{\text{img}}} \right)^2 \tag{5.24}$$

avec N_{img} le nombre d'images à acquérir [1], SNR_{req} et SNR_{img} les SNR requis et d'une image élémentaire ($\text{SNR}_{\text{img}} = 250$). Le temps d'exposition total se calcule à partir du nombre d'images acquises dans chaque canal et des temps d'exposition dans chaque canal (dépendants de la scène mesurée) :

$$t_{\text{exp}} = N_{\text{img}} \times (t_{\text{exp}_1} + t_{\text{exp}_2} + t_{\text{exp}_3}) \tag{5.25}$$

avec t_{exp} le temps d'exposition total du capteur pour une mesure de fluorescence et t_{exp_i} le temps d'exposition nécessaire au canal i pour acquérir une image élémentaire. Il est important de noter que le temps nécessaire à l'acquisition d'une mesure est supérieur à la somme des temps d'exposition du capteur pour les trois canaux (t_{exp}), il convient en effet de comptabiliser les temps des changements des canaux et de la direction de visée. Nous reviendrons plus loin sur ce problème qui dépend du protocole instrumental.

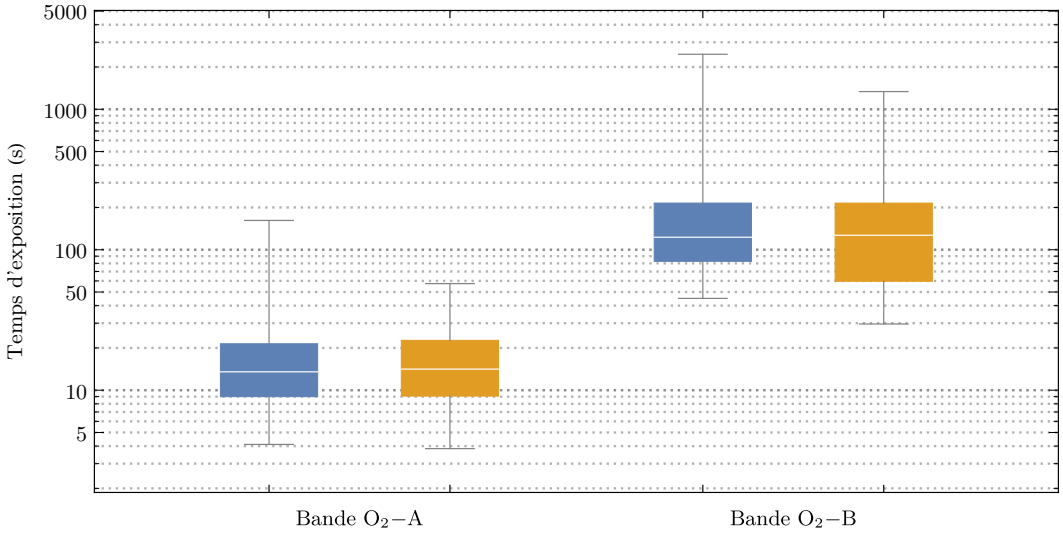


Figure 5.3 – Distributions des temps d'exposition nécessaires pour les trois canaux de chaque bande à 9 h (en **bleu**) et 12 h (en **orange**).

La figure 5.3 montre pour chaque bande la distribution selon toutes les simulations des temps d'exposition totaux (t_{exp}) à 9 heures et midi pour chacune des bandes.

On voit qu'à 9 h et 12 h, 50 % des mesures nécessitent entre 10 et 20 secondes d'exposition dans la bande O_2-A et entre 60 et 200 secondes dans la bande O_2-B. Cela s'explique en partie par le résultat montré dans la figure 5.1 qui indiquait une exigence élevée en SNR pour la bande O_2-B. Le temps d'exposition élémentaire dans les trois canaux ($t_{\text{exp}_1} + t_{\text{exp}_2} + t_{\text{exp}_3}$), nécessaire à l'obtention d'une image élémentaire, est en moyenne (sur toutes les simulations) équivalent pour les deux bandes (1,7 seconde et 2 secondes pour les bandes O_2-A et O_2-B respectivement, à midi). C'est surtout le nombre d'images à accumuler (N_{img}) qui varie entre les deux bandes.

Concernant le nombre d'images à acquérir pour obtenir une incertitude maximale de 10 % sur la mesure de fluorescence, à 9 h et 12 h, 50 % des mesures nécessitent l'acquisition de 4 à 13 mesures élémentaires dans la bande O_2-A, ces mesures demandent entre une et trois secondes d'exposition. Durant le temps que dure l'exposition du capteur de l'instrument, l'attitude du satellite peut être sujette à des variations de l'ordre de 10 $\mu\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$. L'attitude du satellite est très variable en fonction de la qualité du système de commande d'attitude et d'orbite (AOCS pour *attitude and orbit control system*), nous prenons ici une limite basse telle que celle que l'on peut trouver dans les spécifications de satellites de

1. Comme il s'agit d'une étude théorique, le nombre d'images à acquérir N_{img} est ici présenté comme un nombre réel et non comme un nombre entier (qui aurait valu sa partie entière par excès).

mesures (ici, celles de Géo-Ocapi), on trouve plutôt des variations de l'ordre de 100 $\mu\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ pour des satellites de télécommunication. Pour une mesure élémentaire durant trois secondes, un déplacement de 10 $\mu\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ équivaut au nadir à environ un kilomètre de bouger. Il ne semble pas que des procédures au sol de déconvolution du signal par les variations d'attitude du satellite ait déjà été effectuées afin de retrouver le signal original, cependant rien ne nous empêche d'imaginer qu'elles sont possibles, en effet, ce genre de traitement a déjà cours dans la photographie, grâce à des système mesurant le bougé de l'appareil photographique et à la déconvolution de l'image finale par la fonction d'étalement du point (PSF pour *point spread function*). On peut également envisager de limiter le temps d'acquisition d'une image élémentaire pour réduire le bouger pendant l'exposition et augmenter le nombre d'images acquises pour conserver le même SNR. Le second écueil est le bougé du satellite entre les différentes acquisitions. Cela impose de recaler entre elles les images élémentaires (qu'elles soient ou non issues du même canal). Ce recalage (*coregistration*) passe par une interpolation des pixels de l'image sur une nouvelle grille qui équivaut à un lissage et donc à une perte de résolution pixélaire.

5.2 Application à des cas concrets

À partir de la luminance et des flux de fluorescence de différentes scènes de végétation, définies par la structure de la végétation et des paramètres spatio-temporels (jour de la mesure et position de la cible par rapport au satellite), nous avons déterminé les temps d'exposition nécessaires d'un instrument situé en orbite géostationnaire afin d'obtenir une précision suffisante pour suivre la dynamique diurne de la fluorescence de la végétation. Afin de déterminer la faisabilité d'une telle mission géostationnaire, il convient d'appliquer ces calculs à la réalité de la surface terrestre. Pour cela, trois positions en longitude du satellite ont été proposées afin de calculer à partir d'une carte mondiale de LAI quels seraient les temps d'exposition auxquels ont pourrait s'attendre en fonction des paramètres du couvert non fixés (C_{ab} et χ).

5.2.1 Carte de LAI et vignettes

La carte de LAI utilisée est tirée des mesures de Modis (NASA's Earth Observatory Team, 2016) de septembre 2015. Les calculs n'ont été effectués que pour ce mois de l'année, les simulations aux deux solstices n'ont donc pas été utilisées dans ce qui suit. Ce choix de date permet d'évaluer le temps de mesure du satellite lorsqu'une grande partie du globe est recouverte de végétation. On peut voir sur cette carte (figure 5.4) la densité de végétation représentée par le LAI s'échelonner de 0 à 7.

Les calculs de temps d'exposition qui suivent ont été calculés à partir des flux simulés dont il est question dans le chapitre précédent. Ces flux ont été simulés à l'origine pour sept positions de la cible relatives au satellite (figure 4.3), toutes situées dans un quadrant de la sphère terrestre visible par le satellite (quadrant nord-est). Par symétries méridienne, équatoriale et centrale (ou méridieno-équatoriale), des simulations pour 21 autres positions ont été obtenues. Onze de ces positions étant redondantes (car sur les axes de symétrie), au final dix nouvelles simulations ont été obtenues, soit un total de 17 simulations.

Afin d'obtenir les simulations par symétrie méridienne, l'hypothèse a été faite que Modtran produit des cycles diurnes symétriques. Cette hypothèse est approximativement vraie, mais suffisamment pour que les valeurs de flux obtenues soient très peu différentes de celles que l'on aurait eu en lançant de nouvelles simulations. L'idée est que par symétrie suivant l'axe nord-sud, les cycles diurnes de luminance ou de fluorescence sont symétrique par rapport au midi solaire. En effet, seule la longitude changeant entre deux points symétriques par rapport à l'axe nord-sud, on retrouve au cours de la journée les mêmes configurations angulaires entre le satellite, la cible et le Soleil, mais symétrisées par rapport au midi solaire local. Les cycles diurnes des flux des points originaux sont donc inversés dans le temps et les longitudes des nouveaux points correspondent aux longitudes opposées des points originaux.

Afin d'obtenir les simulations par symétrie équatoriale cette fois-ci, il suffit de dupliquer les simulations et de faire correspondre les nouveaux points aux points originaux avec la latitude opposée. En effet, étant à l'équinoxe, les configurations angulaires entre la cible, le satellite et le Soleil sont identiques pour les points de même longitude et de latitude opposée.

Pour obtenir les simulations par symétrie centrale (par rapport au point situé au nadir du satellite), il suffit d'inverser dans le temps les cycles diurnes et de faire correspondre des points de latitude et longitude

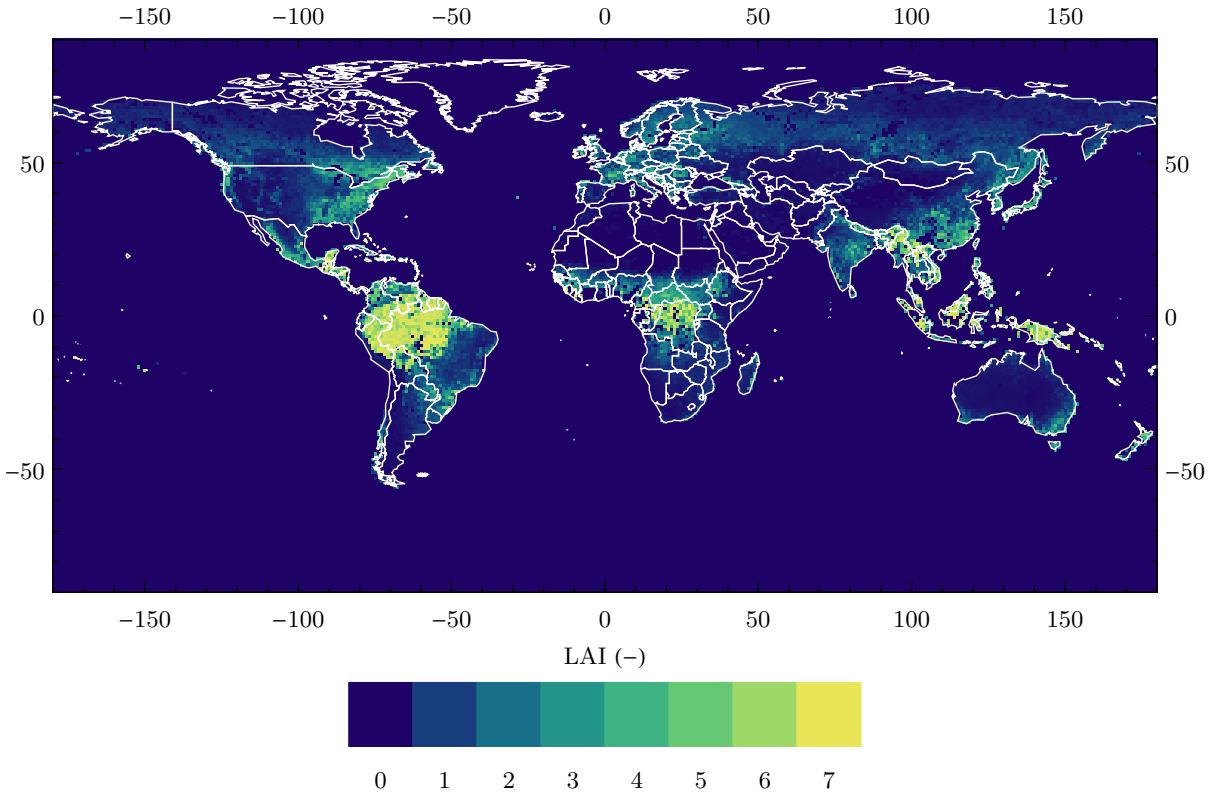


Figure 5.4 – Carte de LAI résolue au degré en septembre 2015 d'après des mesures de Modis. Les longitude et latitude sont indiquées en degré et les frontières nationales approximativement en traits fin blancs.

opposées.

Aux différentes coordonnées terrestres où les flux de fluorescence ont été simulés, l'image du capteur du satellite a été projetée (traits noirs sur la figure 5.5) afin d'y calculer le LAI moyen (voir plus loin la justification de ce choix). On appelle *vignette* (*slot*) cette projection, l'ensemble des vignettes obtenues par balayage du champ de vue de l'instrument permet d'obtenir une image du champ de vue de l'instrument. Ce dernier a été limité au cône de demi angle 7°. La figure 5.5 représente en différentes couleurs excluant le **orange** les vignettes des 17 simulations, originales (en **bleu**) et obtenues par symétrie (en **vert**, **rouge** et **violet**). Dans cette figure, la surface de la terre est représentée en projection cylindrique équidistante (les coordonnées de latitude et de longitude sont considérées comme des coordonnées cartésiennes) centrée au nadir du satellite. Le capteur du satellite est de forme carrée, on peut voir que les vignettes sont déformés avec la latitude et la longitude à l'exception du nadir. Cela est dû à la projection qui augmente les distances apparentes avec la longitude mais aussi à l'angle d'incidence de la direction de visée avec la surface de la Terre avec l'éloignement au nadir.

Afin de pouvoir calculer le temps que mettrait le satellite à acquérir tous les vignettes couvrant tout son champ de vue, les luminances et la fluorescence des cibles ont été interpolées entre les flux des simulations existantes. En **orange** dans la figure 5.5 sont représentées les vignettes qui ont été interpolées à partir des simulations représentées en **bleu**.

Le choix d'utiliser le LAI moyen dans chaque vignette sur la carte de Modis convient d'être argumenté. Chaque vignette contient entre 25 et 90 valeurs de LAI (cela est dû au fait que la surface des vignettes dans l'espace latitude–longitude est variable) et des distributions de LAI plus ou moins étalées. Le temps d'exposition du capteur dans chaque canal dépend en théorie du niveau maximal de luminance de la scène si l'on cherche à ne pas saturer le capteur ; et donc à priori de la valeur maximale de LAI présente dans la scène. Le nombre d'images à acquérir quant à lui dépend du nombre de pixels dont on veut voir l'incertitude sur la fluorescence passer sous les 10 %. En effet, le temps d'exposition étant fixé, l'augmentation du SNR ne peut se faire que par l'accumulation de mesures élémentaires de la même scène. Plutôt que de procéder ainsi, c'est-à-dire contraindre le temps d'exposition par le niveau de luminance du pixel le plus lumineux et fixer un nombre de pixel à voir l'incertitude passer sous 10 %, j'ai choisi de moyenner le LAI sur chaque

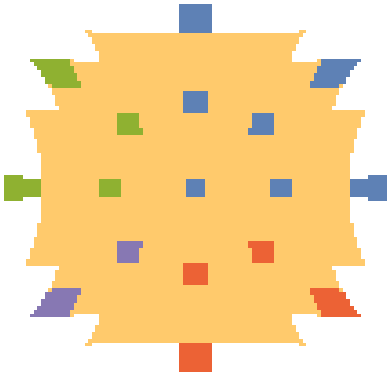


Figure 5.5 – Champ de vue de l'instrument (limité à un cône de 7° de demi angle) divisé en vignettes en projection cylindrique équidistante. Celles en **bleu** correspondent aux positions des simulations originales, en **rouge** aux positions obtenues par symétrie équatoriale, en **vert** par symétrie méridienne, en **violet** par symétrie centrale et les vignettes en **orange** aux positions des simulations interpolées entre toutes les vignettes précédemment décrites.

vignette et de calculer le temps d'exposition et le nombre d'images à acquérir comme si tous les pixels de la scène étaient égaux. L'inconvénient, même si utiliser le LAI moyen donne une bonne estimation du temps d'exposition total, c'est que dans ce cas certains pixels dont la luminance serait faible verraient leur incertitude sur la fluorescence dépasser 10 % et d'autres dont la luminance est élevée saturaient. Il aurait été préférable d'utiliser une carte de LAI ayant la même résolution que l'instrument simulé et calculer le temps d'exposition en fonction du LAI maximal et le nombre d'images à acquérir en fonction du LAI minimal. On a choisit cependant d'utiliser une carte de Modis résolue au degré afin de limiter les temps de calcul et car de toute façon il n'y existe pas de carte mondiale de LAI résolue au GSD de notre instrument.

5.2.2 Interpolation des simulations

Afin d'interpoler les flux aux coordonnées des vignettes situés entre les vignettes simulés, une régression polynomiale a été effectuée pour calculer les flux dans chaque canal ainsi que les flux de fluorescence en fonction des latitude, longitude et LAI. L'interpolation sur le LAI permettant de calculer des flux correspondant aux valeurs de LAI de la carte de LAI qui n'ont pas été simulées dans la base de données (pour rappel, les valeurs de LAI simulées étaient 2 et 8). Cette régression polynomiale a été calculée pour chaque valeur de C_{ab}, de χ et chaque heure de la base de donnée ; le jour a été fixé à l'équinoxe, comme indiqué précédemment. La régression polynomiale modélise les flux de la façon suivante :

$$L = a_1 + a_2 \times \text{LAI} + a_3 \times \Phi + a_4 \times \Lambda + a_5 \times \Phi^2 + a_6 \times \Lambda^2 + a_7 \times \Phi\Lambda \tag{5.26}$$

avec L la luminance de la cible dans un canal, la luminance d'une surface de référence dans un canal ou la fluorescence dans un canal, Φ la latitude et Λ la longitude, les coefficients a_i (i allant de 1 à 7) sont les coefficients déterminés par la régression polynomiale. La régression polynomiale comprend donc un terme constant (a_1), un coefficient linéaire pour le LAI, la longitude et la latitude (a_2, a_3 et a_4 respectivement), un coefficient quadratique pour la latitude et la longitude (a_5 et a_6 respectivement) et un coefficient d'interaction latitude – longitude (a_7). Le coefficient de détermination de la régression vaut en moyenne 0,96 dans la bande O_2-A et 0,92 dans la bande O_2-B.

À partir de ces régressions polynomiales, les luminances et les flux de fluorescence des cibles ont pu être calculés pour des positions à la surface de la Terre et des LAI qui n'avaient pas été simulés. Il a ainsi été possible de calculer les temps d'exposition nécessaires pour chaque vignette à partir des flux et des équations présentées dans la partie précédente (équations 5.4, 5.18, 5.17, 5.24 et 5.25).

La figure 5.6 montre une carte de la Terre représentant les vignettes visibles par un satellite pour trois positions différentes : -80° (au dessus de l'Amérique), 15° (au dessus de l'Afrique) et 100° (au dessus de l'Asie). Les vignettes sont colorés en fonction du temps d'exposition cumulé dans les trois canaux

nécessaire à une mesure de fluorescence entachée d'une incertitude de 10 %. Les vignettes voyant moins de 10 % de terres émergées ou éloignées du nadir de plus de 7° n'ont pas été figurés. Les temps d'exposition de la figure 5.6 ont été calculés pour les LAI de la carte de la figure 5.4 à midi (heure locale de chaque vignette) dans la bande O_2-A pour un couvert érectophile ($\chi = 0{,}32$) et un contenu en chlorophylle élevé ($C_{ab} = 50\ \mu g \cdot cm^{-2}$).

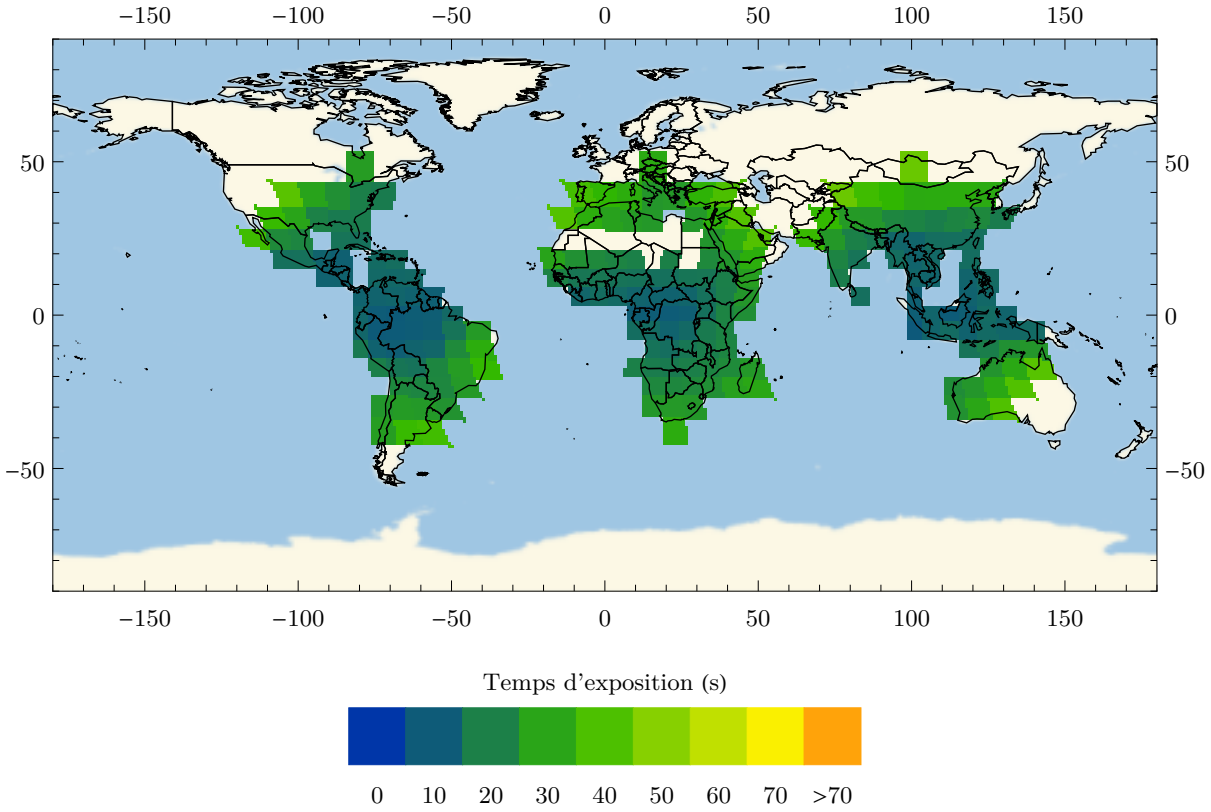


Figure 5.6 – Carte du temps d'exposition en seconde dans la bande O_2-A à midi (heure locale) pour chaque vignette pour un contenu en chlorophylle de 50 $\mu g \cdot cm^{-2}$ et un couvert érectophile ($\chi = 0{,}32$), pour les trois longitudes du satellite (-80°, 15° et 100°).

On voit que les temps d'exposition pour chaque vignette sont entre 10 et 30 secondes, l'éloignement au nadir augmentant ce temps.

La figure 5.7 est identique à la précédente mais pour un couvert sphéroïdal. On voit les mêmes tendances avec l'éloignement au nadir, mais il est net que les temps d'exposition sont plus faibles, il s'échelonnent entre 5 et 20 secondes par vignette. La planophilie diminue donc les temps d'exposition nécessaires à l'obtention d'une incertitude donnée sur la mesure de fluorescence. Cela est dû à l'augmentation des flux en direction du satellite car la normale à la surface des feuilles est perpendiculaire à la direction de visée dans le cas d'un couvert érectophile. On peut remarquer également que pour un couvert sphéroïdal la variation avec l'éloignement au nadir est plus importante que pour un couvert érectophile. Une explication à cela serait que lorsque l'on s'éloigne du nadir la normale aux feuilles dans un couvert érectophile s'approche de la direction de visée ce qui a tendance à augmenter les flux mesurés, ce qui ne se passe pas pour un couvert sphéroïdal. Il n'est pas montré de figure avec un couvert planophile car les résultats sont assez proches de ceux du couvert sphéroïdal.

La figure 5.8 montre la même chose que la figure 5.7 mais pour un contenu en chlorophylle plus faible ($C_{ab} = 20\ \mu g \cdot cm^{-2}$). On peut voir la grande influence qu'a le contenu en chlorophylle sur le temps d'exposition qui augmente et donne des valeurs plutôt situées entre 10 et 30 secondes. Cela est causé par la plus faible fluorescence émise par le couvert à 760 nm et donc le nombre d'images nécessaire à une faible incertitude plus grand.

Deux cartes sont présentées pour la bande O_2-B. Pour la première (figure 5.9), il s'agit d'un couvert sphéroïdal avec un faible contenu en chlorophylle. Les temps d'exposition sont incomparables à ceux de

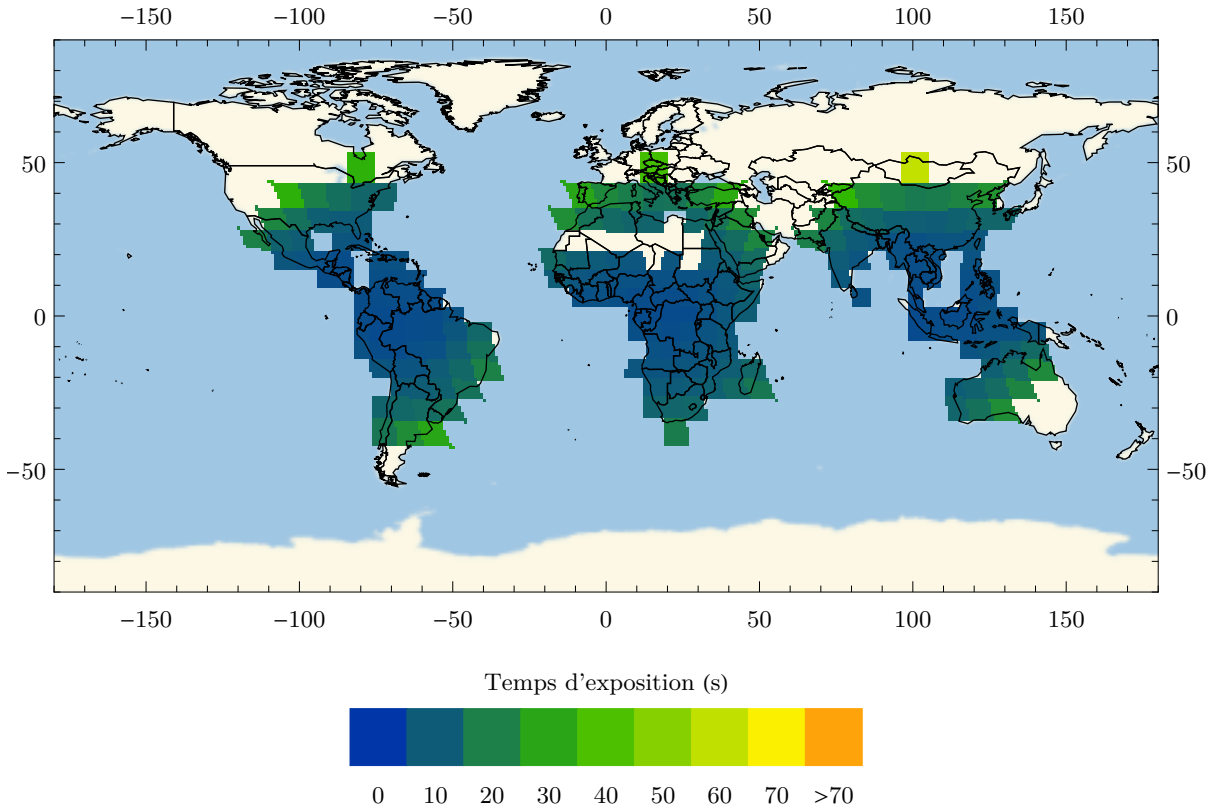


Figure 5.7 – Carte du temps d'exposition en seconde dans la bande O_2-A à midi (heure locale) pour chaque vignette pour un contenu en chlorophylle de 50 $\mu g \cdot cm^{-2}$ et un couvert sphéroïdal ($\chi = 1$), pour les trois longitudes du satellite.

la bande O_2-A puisque ils vont ici de 80 à 120 secondes.

Dans la seconde (figure 5.10), il s'agit d'un couvert sphéroïdal également mais avec un contenu en chlorophylle élevé. Les temps d'exposition sont alors beaucoup plus importants, ils s'échelonnent de 100 à 200 secondes. Cette différence est due à la réabsorption importante de la fluorescence chlorophyllienne dans le rouge plus faible alors par rapport à la luminance de la cible, qui impose de prendre plus d'images pour atteindre le SNR requis.

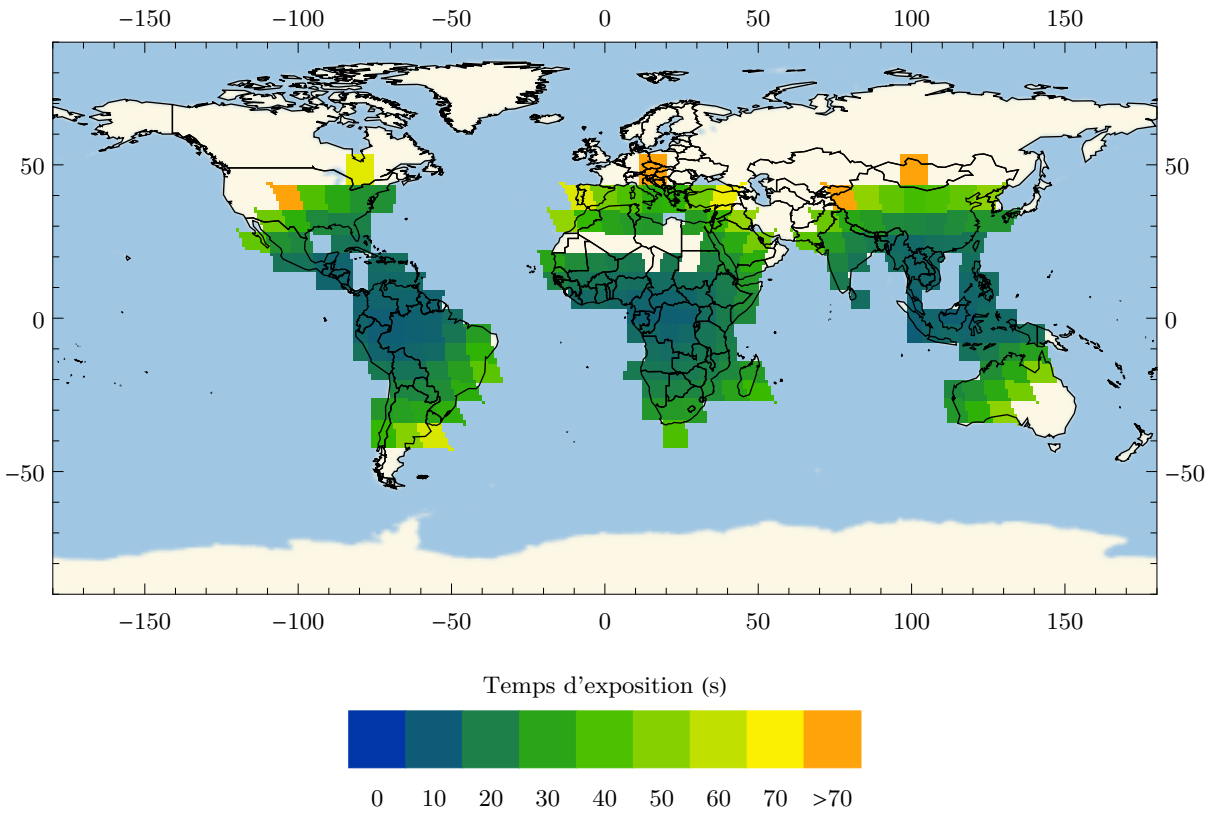


Figure 5.8 – Carte du temps d'exposition en seconde dans la bande O_2-A à midi (heure locale) pour chaque vignette pour un contenu en chlorophylle de 20 $\mu g \cdot cm^{-2}$ et un couvert sphéroïdal ($\chi = 1$), pour les trois longitudes du satellite.

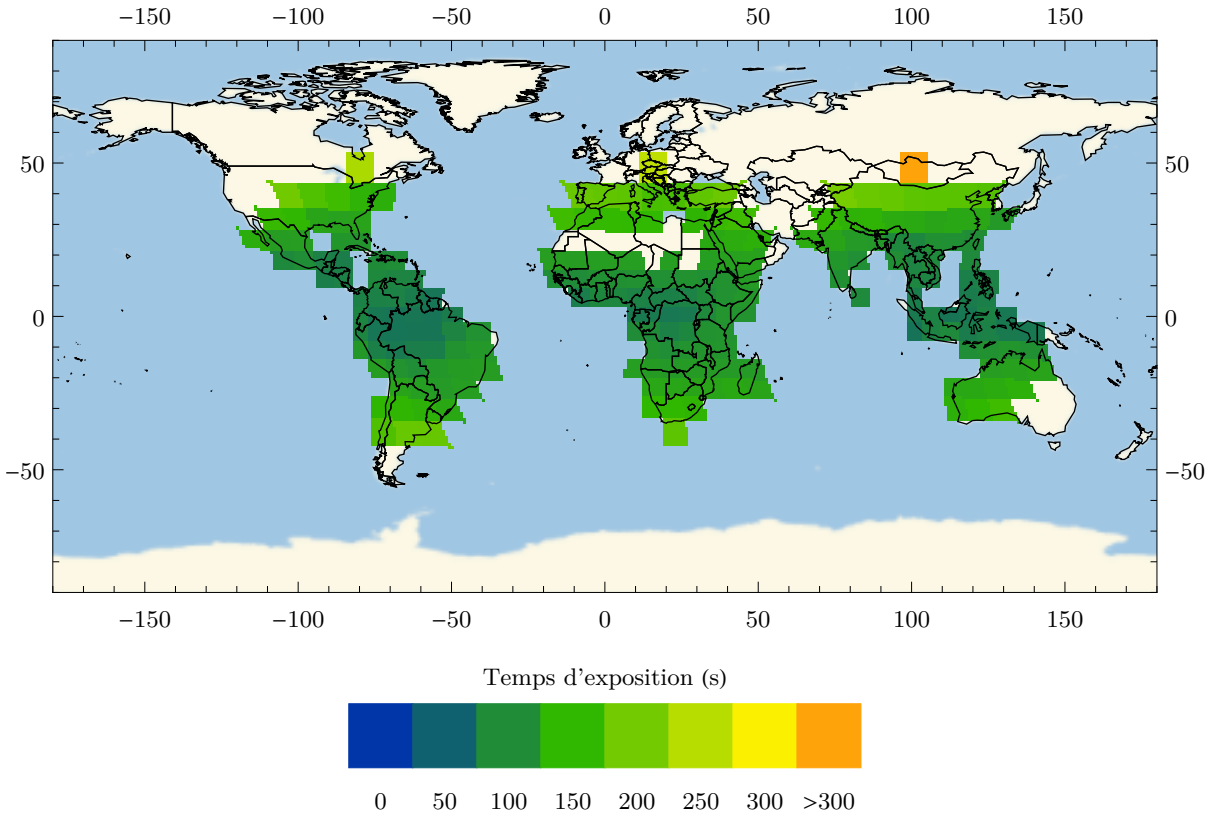


Figure 5.9 – Carte du temps d'exposition en seconde dans la bande O_2-B à midi (heure locale) pour chaque vignette pour un contenu en chlorophylle de 20 $\mu g \cdot cm^{-2}$ et un couvert sphéroïdal ($\chi = 1$), pour les trois longitudes du satellite.

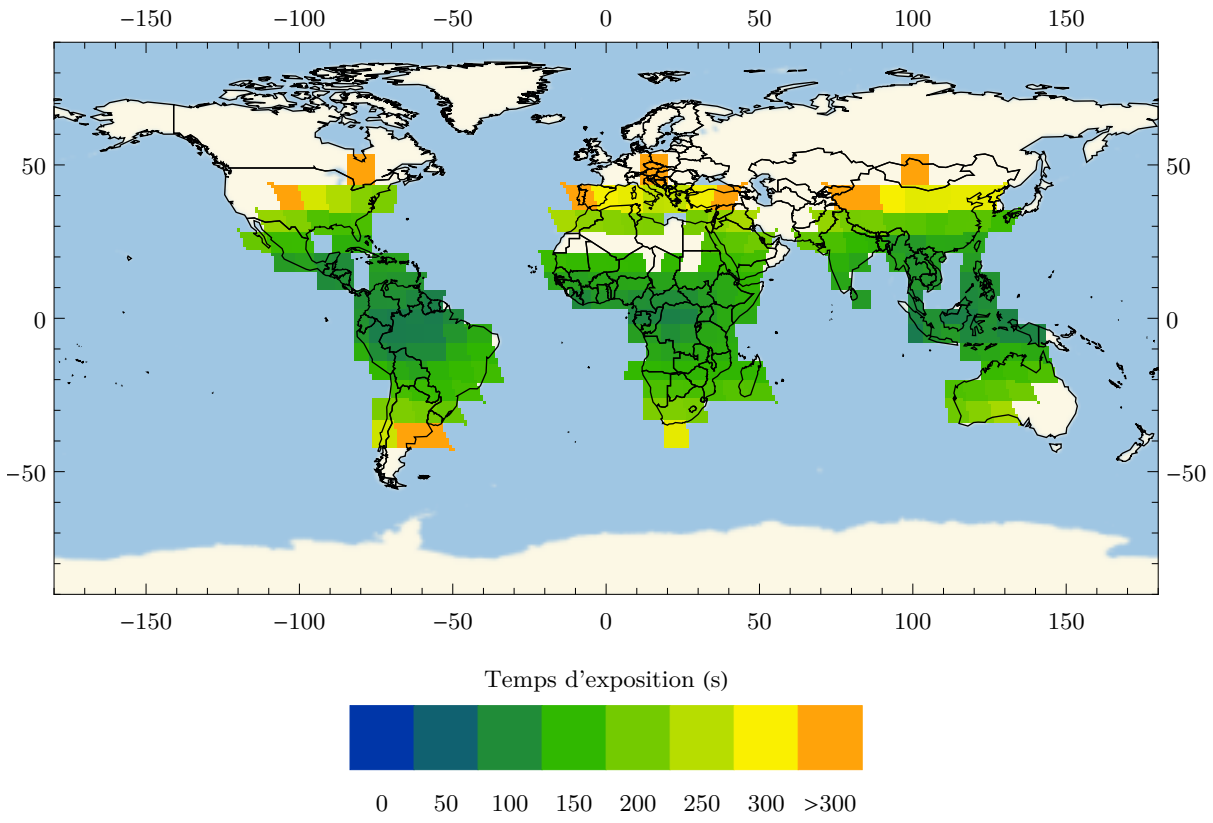


Figure 5.10 – Carte du temps d'exposition en seconde dans la bande O_2-B à midi (heure locale) pour chaque vignette pour un contenu en chlorophylle de 50 $\mu g \cdot cm^{-2}$ et un couvert sphéroïdal ($\chi = 1$), pour les trois longitudes du satellite.

Le tableau 5.2 présente les temps d'exposition totaux (pour les trois canaux) nécessaires à l'obtention d'une incertitude de 10 % sur la mesure de fluorescence en fonction des paramètres du couvert non fixés (χ et C_{ab}) pour les trois longitudes du satellite proposées et les deux bandes de l'oxygène. On voit nettement l'influence des paramètres du couvert sur le temps d'exposition total. La planophilie diminue dans les deux bandes le temps d'exposition nécessaire, de même que le contenu en chlorophylle dans la bande O_2-A. Dans la bande O_2-B, le temps d'exposition augmente avec le contenu en chlorophylle. Les temps d'exposition totaux sont inférieurs à l'heure dans le cas de la bande O_2-A, ce qui laisse envisager la possibilité d'échantillonner les cycles diurnes à la résolution de l'heure voir à une résolution inférieure. Pour la bande O_2-B, les temps d'exposition sont colossaux, de l'ordre de l'heure à la dizaine d'heures. On remarque que la mesure au dessus de l'Afrique requiert des temps d'exposition plus grand. Cela est dû au nombre de vignettes plus important.

		Λ_{sat}	Amérique		Afrique		Asie	
		N_{vig}	69		84		68	
			C_{ab}		C_{ab}		C_{ab}	
Bande			20	50	20	50	20	50
O_2-A	χ	0,32	43	23	63	32	48	25
		1	26	16	34	17	29	14
		3,16	18	9	22	11	19	9
O_2-B	χ	0,32	370	690	540	1000	370	700
		1	130	170	170	230	140	180
		3,16	70	70	80	90	70	80

Tableau 5.2 – Temps d'exposition total (en mesurant tous les vignettes) en minute à midi (heure locale) pour chaque longitude du satellite (Λ_{sat}) dans les bandes O_2-A et O_2-B en fonction du contenu en chlorophylle (en $\mu g \cdot cm^{-2}$) et de χ.

Le tableau 5.3 montre les temps d'exposition nécessaires à l'acquisition de toutes les vignettes pour chaque longitude du satellite (comme le tableau 5.2) mais rapportés au nombre de vignettes, cela afin de comparer les résultats entre chaque position du satellite.

		Λ_{sat}	Amérique		Afrique		Asie	
		N_{vig}	69		84		68	
			C_{ab}		C_{ab}		C_{ab}	
Bande			20	50	20	50	20	50
O_2-A	χ	0,32	0,74	0,38	0,95	0,47	0,87	0,44
		1	0,47	0,23	0,51	0,25	0,51	0,25
		3,16	0,30	0,15	0,32	0,16	0,33	0,16
O_2-B	χ	0,32	6,25	11,54	7,75	14,37	6,80	12,59
		1	2,17	2,96	2,49	3,34	2,36	3,19
		3,16	1,10	1,20	1,21	1,32	1,18	1,29

Tableau 5.3 – Temps d'exposition par vignette moyen à midi (heure locale) pour chaque longitude du satellite (Λ_{sat}) en minute dans les bandes O_2-A et O_2-B en fonction du contenu en chlorophylle et de χ.

5.2.3 Temps d'acquisition

Connaissant les temps d'exposition du capteur dans les différents canaux, on peut calculer le temps effectif que prendra la mesure en prenant en compte le temps que prennent les changements de canal et de direction de visée. En fonction du protocole de mesure, c'est-à-dire de l'ordre d'enchaînement des mesures élémentaires, le temps d'acquisition total peut varier.

Un premier protocole consiste à prendre les mesures dans les trois canaux les uns après les autres (figure 5.11) N_{img} fois, on nommera ce protocole *entrelacé*. Au temps d'exposition total ($t_{\text{exp}} = N_{\text{img}} \times (t_{\text{exp}_1} + t_{\text{exp}_2} + t_{\text{exp}_3})$) s'ajoute le temps de changement de canal ($t_{\overrightarrow{\text{can}}}$). Si l'on optimise le changement de canal comme dans la figure 5.11, c'est-à-dire en commençant chaque nouvelle mesure élémentaire par le dernier canal utilisé dans la mesure élémentaire précédente, le nombre de changements de canaux est le

nombre de canaux moins un. On a donc deux changements de canaux par mesure élémentaire et le temps d'acquisition d'une vignette (t_{vig}) vaut le temps indiqué dans l'équation de la figure 5.11.

$$(C_1 \xrightarrow{t_{\overrightarrow{\text{can}}}} C_2 \xrightarrow{t_{\overrightarrow{\text{can}}}} C_3\ )\ \text{------}\ (C_3 \xrightarrow{t_{\overrightarrow{\text{can}}}} C_2 \xrightarrow{t_{\overrightarrow{\text{can}}}} C_1\ )\ \text{------}\ (C_1 \xrightarrow{t_{\overrightarrow{\text{can}}}} \cdots$$

$$\begin{aligned} t_{\text{vig}} =& (t_{\text{exp}_1} + t_{\overrightarrow{\text{can}}} + t_{\text{exp}_2} + t_{\overrightarrow{\text{can}}} + t_{\text{exp}_3}) + (t_{\text{exp}_3} + t_{\overrightarrow{\text{can}}} + t_{\text{exp}_2} + t_{\overrightarrow{\text{can}}} + t_{\text{exp}_1}) + (t_{\text{exp}_1} \cdots \\ =& N_{\text{img}} \times (t_{\text{exp}_1} + t_{\text{exp}_2} + t_{\text{exp}_3} + 2 \times t_{\overrightarrow{\text{can}}}) \\ =& t_{\text{exp}} + N_{\text{img}} \times 2 \times t_{\overrightarrow{\text{can}}} \end{aligned}$$

Figure 5.11 – Protocole d'enchaînement des acquisitions entrelacées dans chaque canal et temps d'acquisition par vignette (t_{vig}) en fonction du nombre d'images requises (N_{img}), du temps d'exposition total (t_{exp}) et du temps de changement de canal ($t_{\overrightarrow{\text{can}}}$).

Un second protocole de mesure consiste à acquérir les N_{img} images d'un canal puis de passer au canal suivant (figure 5.12), on nommera ce protocole *groupé*. Dans ce cas, au temps d'exposition total s'ajoute $2 \times t_{\overrightarrow{\text{can}}}$. Dans le cas de la bande O_2-A, les temps d'exposition par vignette étant de l'ordre d'une vingtaine de secondes, il est réaliste de penser que la cible n'évolue pas suffisamment vite pour que mesurer N_{img} dans le canal 1, puis dans le canal 2, puis dans le canal 3 n'engendre pas de décorrélation de la cible entre les mesures dans chaque canal.

$$(C_1\ \text{------}\ C_1\ \text{------}\ \cdots\ ) \xrightarrow{t_{\overrightarrow{\text{can}}}} (C_2\ \text{------}\ C_2\ \text{------}\ \cdots\ ) \xrightarrow{t_{\overrightarrow{\text{can}}}} (C_3\ \text{------}\ C_3\ \text{------}\ \cdots\ )$$

$$\begin{aligned} t_{\text{vig}} =& N_{\text{img}} \times t_{\text{exp}_1} + t_{\text{canal}} + N_{\text{img}} \times t_{\text{exp}_2} + t_{\text{canal}} + N_{\text{img}} \times t_{\text{exp}_3} \\ =& N_{\text{img}} \times (t_{\text{exp}_1} + t_{\text{exp}_2} + t_{\text{exp}_3}) + 2 \times t_{\overrightarrow{\text{can}}} \\ =& t_{\text{exp}} + 2 \times t_{\overrightarrow{\text{can}}} \end{aligned}$$

Figure 5.12 – Protocole d'enchaînement des acquisitions groupées dans chaque canal et temps d'acquisition par vignette (t_{vig}) en fonction du nombre d'images (N_{img}), des temps d'exposition total (t_{exp}) et du temps de changement de canal ($t_{\overrightarrow{\text{can}}}$).

On choisit de fixer $t_{\overrightarrow{\text{can}}}$, le temps de changement de canal, à une seconde, de l'ordre du temps nécessaire à l'instrument de Goci-II qui utilise une roue à filtre. Il faut alors ajouter au temps d'exposition seulement deux secondes pour prendre en compte le temps de déplacement des filtres. Au temps d'exposition s'ajoute également $t_{\overrightarrow{\text{vis}}}$ le temps que prend le déplacement de la direction de visée du satellite. Ce temps s'ajoute au temps d'acquisition de toute la surface terrestre mesuré pour chaque vignette (t_{vig}). Ainsi, au temps d'exposition s'ajoute $N_{\text{vig}} \times t_{\overrightarrow{\text{vis}}}$. On considère que cinq secondes suffisent à déplacer la visée du télescope du satellite entre deux vignettes et à ce que l'instrument soit stabilisé (temps de l'ordre de celui nécessaire à Goci-II). Si l'on choisit le protocole groupé, on a ainsi un temps d'acquisition qui vaut

$$t_{\text{acq}} = \sum^{N_{\text{vig}}} t_{\text{exp}} + 2 \times t_{\overrightarrow{\text{can}}} + t_{\overrightarrow{\text{vis}}} \tag{5.27}$$

$$= N_{\text{vig}} \times (2 \times t_{\overrightarrow{\text{can}}} + t_{\overrightarrow{\text{vis}}}) + \sum^{N_{\text{vig}}} t_{\text{exp}} \tag{5.28}$$

soit en moyenne (pour les trois longitudes du satellite étudiées ; pour $\overline{N_{\text{vig}}} \approx 73{,}7$)

$$t_{\text{acq}}\,[\text{s}] = N_{\text{vig}} \times (2\ \text{s} + 5\ \text{s}) + \sum^{N_{\text{vig}}} t_{\text{exp}} \approx 516\ \text{s} + \sum^{N_{\text{vig}}} t_{\text{exp}} \tag{5.29}$$

Il faut donc ajouter en moyenne 516 secondes (8 min 40 s) aux temps du tableau 5.2 pour obtenir un temps d'acquisition prenant en compte les temps d'exposition, de déplacement des filtres et de déplacement de la direction de visée.

Sur les cartes des figures précédentes, on a vu les temps d'exposition nécessaires à l'obtention d'une incertitude maximale de 10 % sur la mesure de fluorescence à midi en heure locale. Les lignes isochrones à la surface de la Terre sont parallèles (en géométrie sphérique) aux méridiens et se déplacent pour une heure donnée d'est en ouest. Dans notre cas où le champ de vue du satellite est limité à un cône de demi-angle 7° et où une vignette est un carré de 1° de côté, il est possible que le satellite ait à balayer jusqu'à 15 vignettes (de -7° à 7° par pas de 1°) situées sur une isochrone. Ce faisant, les décalages temporels entre les horodatages en heure locale de chaque vignette peuvent devenir conséquents à cause du temps que met le balayage des isochrones. De même au sein d'une vignette, notamment sur les bords du champ de vue total du satellite (où la taille des vignettes au sol sont le plus important), il existe un décalage temporel entre les bords gauche et droit de l'image pouvant aller d'environ 20 minutes au nadir à 40 minutes pour les vignettes situées à ±7° du nadir. Ces deux problèmes sont à prendre en compte dans une stratégie d'optimisation de l'heure de mesure, afin d'effectuer les mesures à des heures locales où le cycle diurne de fluorescence porte le plus d'information.

5.3 Conclusion

Les simulations de flux de fluorescence observables depuis une orbite géostationnaire pour différents types de végétation appliquées à des spécifications réalistes d'un satellite géostationnaire (calées sur celles de Goci-II) montrent la faisabilité de la mesure de la fluorescence dans la bande O_2-A pour le suivi de cycles diurnes de fluorescence à grande échelle à une résolution de 250 mètres. En effet, ces résultats indiquent une possibilité de répéter les mesures de fluorescence à une période inférieure à l'heure permettant de résoudre temporellement le cycle diurne de manière suffisante au suivi de la dynamique induite par l'état physiologique de la végétation (figure 1.7).

Ces résultats relativisent l'intérêt que peut avoir la mesure de la fluorescence dans la bande O_2-B. On rappelle que la fluorescence dans cette région du spectre correspond au pic de fluorescence situé à 685 nm (Franck et coll., 2002). La fluorescence de ce pic est émise uniquement par le PS II dont la contribution à la fluorescence est variable contrairement à celle du PS I (Agati et coll., 2000; Krause et Weis, 1991). Or, ce sont les mesures de ces variations qui permettent d'obtenir une information sur les variations de l'état physiologique des plantes (Rosema et coll., 1998; Flexas et coll., 2000; Moya et coll., 2004; Evain et coll., 2004; López González, 2014b) ; la mesure dans la bande O_2-B est donc particulièrement indiquée pour suivre ces variations. Malgré cet intérêt de la mesure de la fluorescence dans la bande O_2-B, on a vu que les indices de rendements de fluorescence définis dans les chapitres 3 et 4 pour la bande O_2-B ne représentent pas bien les variations diurnes du rendement de fluorescence du couvert car leurs variations diurnes dépendent énormément de la géométrie du rayonnement incident à cause de la complexité de la structure du couvert ; à l'exception de l'ASFY et du FF_{685} pour un couvert planophile et à fort LAI, qui sont moins variables en fonction de la géométrie d'illumination. Les résultats du présent chapitre montrent en outre que les temps d'acquisition nécessaires à une mesure précise de la fluorescence rendent impossible le suivi d'une grande région spatiale avec une fréquence de mesure élevée. On peut néanmoins nuancer ces résultats peu optimistes par la proposition d'une solution intermédiaire. Il est en effet possible d'envisager de restreindre la mesure de la fluorescence dans la bande O_2-B à des zones géographiques plus petites afin de permettre une répétabilité des mesures plus élevée ; on s'intéresse dans ce chapitre à des zones d'environ 70 vignettes quand des missions comme Goci-I n'en observent que 16 d'une taille équivalente, il est donc tout à fait réaliste d'imaginer une mission géostationnaire dédiée à une zone bien ciblée.

Si l'on prend l'exemple d'une mission dont le but serait de s'intéresser au suivi des cycles diurnes de fluorescence restreint à la forêt amazonienne, le nombre de vignettes à acquérir serait de 23, le temps d'exposition total moyen (pour les deux valeurs de contenu en chlorophylle et les trois distributions angulaires des feuilles) serait de 9 minutes dans la bande O_2-A et 104 minutes dans la bande O_2-B. Additionnés à cela les temps de changement de canal ($2 \times N_{\text{vig}} \times t_{\overrightarrow{\text{can}}} = 46$ s) et de changement de direction de visée ($N_{\text{vig}} \times t_{\overrightarrow{\text{vig}}} = 115$ s), on obtient un temps total d'acquisition de la région amazonienne d'environ deux heures. Cette période d'acquisition est le double de celle que l'on cherche (de l'ordre de l'heure), mais cela permettrait au moins d'avoir une mesure à 9 h et une à 12 h pour caractériser la dépression du cycle diurne à midi afin de statuer sur un éventuel stress subit par la végétation.

Il faut également envisager une stratégie de mesure plus ou moins directe de la surface de référence non

fluorescente. On a vu dans le chapitre introductif et le chapitre 2 le caractère indispensable de la référence afin d'évaluer la magnitude de fluorescence. C'est la mesure de la composition du rayonnement incident, et plus précisément de la profondeur qu'y a la bande d'absorption dans laquelle la mesure est faite, qui permet de mesurer indirectement le flux de fluorescence venu modifier la profondeur de cette bande. Depuis l'espace — un pixel mesurant 250 m $\times$ 250 m (au nadir) — il est trivial d'énoncer l'impossibilité de placer une surface de référence juste au dessus de la végétation afin d'en mesurer le rayonnement incident. On pourrait imaginer mesurer ce rayonnement sur un sol nu (non fluorescent) avoisinant la cible, mais à cause de la grande taille que représente un pixel au sol, l'existence de tels pixels est exceptionnelle et les distances que peuvent séparer un pixel de référence d'un pixel de végétation font que les conditions atmosphériques et donc lumineuses y sont trop différentes. Une solution indirecte serait de modéliser le transfert radiatif atmosphérique à partir de mesures caractérisant l'atmosphère effectuées depuis le satellite. Ces mesures permettraient alors de reconstruire le flux lumineux incident et la profondeur de bande afin de calculer la fluorescence. Guanter et coll. (2010) montre l'efficacité de cette méthode dans une étude préliminaire à la mission Flex.

Chapitre 6

Conclusions générales

L'émission de fluorescence chlorophyllienne est reliée à l'activité photosynthétique des plantes. La mesure des flux de fluorescence permet alors de connaître indirectement cette activité et donc de quantifier l'absorption du CO_2 atmosphérique. Le suivi des cycles diurnes de fluorescence et en particulier de son rendement permet quant à lui de statuer sur l'état physiologique de la végétation, notamment sur l'existence de stress subit par celle-ci.

À courte distance, les mesures de la fluorescence chlorophyllienne se font en pratique à l'aide d'instrument actifs qui permettent d'obtenir quasi directement le rendement de fluorescence. Les instruments passifs de mesure de la fluorescence de la végétation quant à eux donnent accès aux flux de fluorescence. Afin d'obtenir le rendement, il est nécessaire de calculer des indices définis comme le rapport entre les flux de fluorescence et des grandeurs censées représenter le rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par la végétation. Selon la manière dont ils sont calculés, ils sont plus ou moins sensibles aux effets de la structure des couverts couplés à la direction de mesure sur le transfert radiatif de la fluorescence et du rayonnement solaire incident. Cela pose un problème notamment dans l'identification de stress subits par la végétation car ces effets peuvent masquer les variations de la fluorescence typiques d'un stress au cours du cycle diurne.

Cependant, c'est aux mesures passives que l'on s'intéresse dès lors que l'on cherche à mesurer à de grandes distances. C'est notamment le cas si l'on cherche à avoir une couverture de la fluorescence à l'échelle globale en utilisant un satellite géostationnaire.

Conclusions

Dans ce contexte, les objectifs de mon doctorat ont été de valider un concept d'instrument passif de mesure de la fluorescence chlorophyllienne en réalisant et testant un instrument fabriqué au laboratoire. Cet instrument est imageur, tout comme le serait un instrument spatial et c'est donc en particulier sur le principe d'imagerie que mon travail a porté. Le second objectif a été d'estimer la mesurabilité de la fluorescence des végétaux depuis une orbite géostationnaire au moyen de simulations et en se basant sur le même principe instrumental que l'instrument fabriqué pour des mesures au sol.

Le chapitre 2 détaille le fonctionnement de l'instrument imageur de fluorescence que j'ai conçu au laboratoire, Fluocam, et des différents organes qui le composent, on y voit également les aspects théoriques de l'imagerie basée sur l'utilisation de filtres interférentiels afin de minimiser l'incertitude sur la mesure de fluorescence. Le résultats de ces études est un instrument fonctionnel donnant les flux de fluorescence végétale dans la bande O_2-A.

Ce chapitre expose également les résultats obtenus lors d'une campagne de mesure sur champ avec Fluocam. Ces résultats permettent de valider l'instrument grâce à la comparaison de ses mesures avec celles d'un autre instrument passif mais non imageur effectuant des mesures sur la même cible. L'intérêt de l'imagerie dans la compréhension du signal de fluorescence a été exploré en exposant les différents flux de fluorescence visibles dans différentes parties du couvert (zones ombrées ou éclairées) que les instruments non imageurs ne distinguent pas. Les indices de rendement de fluorescence calculés à partir des flux de fluorescence et cherchant à valoir le rendement réel du couvert ne montrent pas les mêmes variations que le rendement mesuré par un instrument actif également présent lors de la campagne. Cela a montré

l'importance d'étudier la variabilité de ces indices de rendement due à la structure du couvert pour pouvoir éviter ou corriger ces variations qui peuvent cacher celles du véritable rendement.

L'étude théorique des effets de structure sur les cycles diurnes des indices de rendement de fluorescence est exposée dans le chapitre 3 pour des mesures au niveau du sol. Les simulations ayant permis de mettre en évidence la variabilité diurne des indices de rendement non attribuables aux variations physiologique de la végétation ont été calculées pour différents types de couverts. Ce chapitre conclue sur l'importance considérable des effets de la structure du couvert sur le transfert radiatif de la lumière solaire incidente et de la fluorescence. L'impact de ce dernier sur la forme des cycles diurnes des indices est manifeste pour des couverts à faible LAI ou à port de feuilles érectophile. La caractérisation de la structure des couvert peut être un moyen de corriger les cycles diurnes des indices de rendement de leurs variations dues à la structure et non à la modification de l'état physiologique.

Le chapitre 4 expose les résultats de la simulation de cycles diurnes de fluorescence mesurée depuis une orbite géostationnaire pour différents types de couverts et directions de visée. Ils montrent une grande variabilité de la magnitude de fluorescence et de la forme de ses cycles diurnes. Cette variabilité est due notamment à la structure de la végétation en corrélation avec la direction de visée et l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Confirmant les résultats de l'étude des indices de rendement de fluorescence au niveau du sol du chapitre 3, les indices ne représentent pas toujours bien le rendement de fluorescence du couvert. Leurs variations journalières n'étant pas dues seulement à celles de l'état physiologique de la végétation mais aussi à des effets de structure. Les résultats de ce chapitre dégagent un indice de rendement valable pour suivre l'état physiologique de la végétation pour des couverts planophiles.

Le chapitre 5 conclue sur la mesurabilité de la fluorescence depuis une orbite géostationnaire à partir du chapitre qui le précède. Il montre que la fluorescence peut être mesurée depuis l'espace avec un instrument géostationnaire passif à filtres dans la bande O_2-A avec un rapport signal sur bruit suffisant et la possibilité de faire des mesures avec une période inférieure à l'heure, et ce dans le but de bien caractériser la forme des cycles diurnes pour statuer sur l'état physiologique de la végétation. La mesure dans la bande O_2-B peut également être envisagée en réduisant l'étendue spatiale des mesures pour ne les limiter qu'à une petite zone géographique.

Perspectives

Plusieurs perspectives sont envisageables quant à la poursuite du travail que j'ai effectué durant mon doctorat. La première concerne la partie instrumentale à l'échelle du couvert, dans l'amélioration de l'instrument imageur et dans l'étude plus poussée de la fluorescence au niveau du sol grâce à l'imagerie et les informations que la résolution fine du couvert peut apporter dans la compréhension du transfert radiatif. La seconde se rapporte aux simulations de la mesure spatiale de la fluorescence des végétaux, dans le calcul de la mesurabilité de la fluorescence grâce à d'autres techniques de calcul de la fluorescence et dans la recherche d'autres indices de rendement de fluorescence dont les variations diurnes seraient moins entachées d'erreurs dues aux effets de structure.

Concernant les améliorations qui pourraient être apportées à Fluocam, il est évident qu'une première version d'un instrument n'est pas imperfectible. Le principal problème auquel j'ai été confronté est la décorrélation spatiale des images des différents canaux due à une décorrélation temporelle des mesures dans ces canaux entre lesquelles la cible peut avoir changé. La réduction du temps d'acquisition permettrait d'améliorer ce point. Il serait également possible de développer un algorithme de recalage des images ou de détection du bougé afin respectivement de corriger ou écarter les images concernées.

Je n'ai pas eu le temps durant mon doctorat d'explorer pleinement les images de fluorescence. Celles-ci ouvrent un champ immense dans la compréhension du transfert radiatif au sein des couverts et de son impact sur le signal de fluorescence. Une étude plus poussée des mesures imagées de la fluorescence à l'échelle du couvert pourrait permettre aussi de mieux comprendre ce qui est mesuré lorsqu'un pixel voit une cible hétérogène sans pouvoir en résoudre les différents composants afin de corriger par démélange (*unmixing*) les effets de cette hétérogénéité sur la mesure.

La technique de mesure à l'aide de filtres à bande étroite est celle que j'ai utilisée dans mes simulations de la fluorescence vue depuis une orbite géostationnaire. Il existe pourtant d'autres techniques comme la méthode d'ajustement spectral (en anglais SFM, pour *spectral fitting method*) qui utilise tout le spectre

mesuré en provenance de la cible pour en retrouver les composantes dont fait partie la fluorescence.

Les indices de rendement que j'ai étudiés sont utilisés en pratique dans les mesures de fluorescence passive. Les simulations que j'ai faites — sur des plages spectrales assez étendues — pourraient permettre de calculer d'autres indices et d'étudier comment ils réagissent aux effets de structure. De meilleurs indices permettraient de calculer un rendement de fluorescence à partir des flux mesurés sans qui n'auraient pas de variations propres pouvant masquer celles du rendement réel du couvert.

Bibliographie

Agati, G., Z. G. Cerovic et I. Moya. 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», *Photochemistry and Photobiology*, vol. 72, n° 1, doi:10.1562/0031-8655(2000)0720075TEODTU2.0.CO2, p. 75–84, ISSN 1751-1097. URL `http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1562/0031-8655(2000)0720075TEODTU2.0.CO2/abstract`. 19, 22, 134

Anderson, G., A. Berk, P. Acharya, M. Matthew, L. Bernstein, J. Chetwynd, H. Dothe, S. Adler-Golden, A. Ratkowski, G. Felde et coll.. 2000, «MODTRAN4: Radiative transfer modeling for remote sensing», dans *SPIE proceedings series*, p. 176–183. 70

Apostol, S., J.-M. Briantais, N. Moise, Z. G. Cerovic et I. Moya. 2001, «Photoinactivation of the photosynthetic electron transport chain by accumulation of over-saturating light pulses given to dark adapted pea leaves», *Photosynthesis Research*, vol. 67, n° 3, doi:10.1023/A:1010676618028, p. 215–227, ISSN 0166-8595, 1573-5079. URL `http://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1010676618028`. 23

Baillard, X., A. Gauguet, S. Bize, P. Lemonde, P. Laurent, A. Clairon et P. Rosenbusch. 2006, «Interference-filter-stabilized external-cavity diode lasers», *Optics Communications*, vol. 266, n° 2, doi:10.1016/j.optcom.2006.05.011, p. 609–613, ISSN 0030-4018. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401806004561`. 34

Berk, A., G. P. Anderson, P. K. Acharya, L. S. Bernstein, L. Muratov, J. Lee, M. Fox, S. M. Adler-Golden, J. Chetwynd, James H., M. L. Hoke, R. B. Lockwood, J. A. Gardner, T. W. Cooley, C. C. Borel, P. E. Lewis et E. P. Shettle. 2006, «MODTRAN5: 2006 update», p. 62 331F–62 331F–8, doi:10.1117/12.665077. URL `http://dx.doi.org/10.1117/12.665077`. 93

Björkman, O. et B. Demmig. 1987, «Photon yield of O2 evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins», *Planta*, vol. 170, n° 4, doi:10.1007/BF00402983, p. 489–504, ISSN 0032-0935, 1432-2048. URL `http://link.springer.com/article/10.1007/BF00402983`. 22

Bowers, S. et R. Hanks. 1965, «Reflection of radiant energy from soils.», *Soil Science*, vol. 100, n° 2, p. 130–138. 73

Buschmann, C., E. Nagel, K. Szabo et L. Kocsányi. 1994, «Spectrometer for fast measurements of in vivo reflectance, absorptance, and fluorescence in the visible and near-infrared», *Remote Sensing of Environment*, vol. 48, n° 1, p. 18–24. 27

Butler, W. L. 1978, «Energy Distribution in the Photochemical Apparatus of Photosynthesis», *Annual Review of Plant Physiology*, vol. 29, n° 1, doi:10.1146/annurev.pp.29.060178.002021, p. 345–378. URL `http://dx.doi.org/10.1146/annurev.pp.29.060178.002021`. 19

Campbell, G. 1990, «Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distributions», *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 49, n° 3, doi:10.1016/0168-1923(90)90030-A, p. 173–176, ISSN 0168-1923. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016819239090030A`. 73

Campbell, G. et F. Van Evert. 1994, «Light interception by plant canopies: efficiency and architecture», *Resource capture by crops. Nottingham University Press, Nottingham*, p. 35–52. 73, 87

Carter, G. A., J. H. Jones, R. J. Mitchell et C. H. Brewer. 1996, «Detection of solar-excited chlorophyll a fluorescence and leaf photosynthetic capacity using a Fraunhofer line radiometer», *Remote Sensing of Environment*, vol. 55, n° 1, p. 89–92. 27

Cavender-Bares, J., S. Apostol, I. Moya, J.-M. Briantais et F. A. Bazzaz. 2000, «Chilling-Induced Photoinhibition in Two Oak Species: Are Evergreen Leaves Inherently Better Protected Than Deciduous Leaves ?», *Photosynthetica*, vol. 36, n° 4, doi:10.1023/A:1007000406399, p. 587–596, ISSN 0300-3604, 1573-9058. URL `http://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1007000406399`. 23

Cerovic, Z. G., Y. Goulas, M. Gorbunov, J. M. Briantais, L. Camenen et I. Moya. 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 τ-LIDAR and a modified PAM-fluorimeter, in maize, sugar beet, and kalanchoë», *Remote Sensing of Environment*, vol. 58, n° 3, doi:10.1016/S0034-4257(96)00076-4, p. 311–321, ISSN 0034-4257. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425796000764`. 23, 67

Cheng, Y.-B., E. M. Middleton, Q. Zhang, K. F. Huemmrich, P. K. E. Campbell, L. A. Corp, B. D. Cook, W. P. Kustas et C. S. Daughtry. 2013, «Integrating Solar Induced Fluorescence and the Photochemical Reflectance Index for Estimating Gross Primary Production in a Cornfield», *Remote Sensing*, vol. 5, n° 12, doi:10.3390/rs5126857, p. 6857–6879. URL `http://www.mdpi.com/2072-4292/5/12/6857`. 68

Daumard, F. 2010, *Contribution à la télédétection passive de la fluorescence chlorophyllienne des végétaux*, phdthesis, Ecole Polytechnique X. URL `https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00563244/document`. 44, 49, 50

Daumard, F., S. Champagne, A. Fournier, Y. Goulas, A. Ounis, J. Hanocq et I. Moya. 2010, «A field platform for continuous measurement of canopy fluorescence», *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 48, n° 9, p. 3358–3368. 27, 31, 68, 69, 79

Daumard, F., Y. Goulas, S. Champagne, A. Fournier, A. Ounis, A. Olioso et I. Moya. 2012, «Continuous Monitoring of Canopy Level Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence During the Growth of a Sorghum Field», *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, n° 11, doi:10.1109/TGRS.2012.2193131, p. 4292–4300, ISSN 0196-2892. 68, 79

Daumard, F., Y. Goulas, A. Ounis, R. Pedrós et I. Moya. 2015, «Measurement and Correction of Atmospheric Effects at Different Altitudes for Remote Sensing of Sun-Induced Fluorescence in Oxygen Absorption Bands», *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, n° 9, doi:10.1109/TGRS.2015.2418992, p. 5180–5196, ISSN 0196-2892. 94

Daumard, F., I. Moya, Y. Goulas, A. Ounis et C. Rhoul. 2014, «GFLEX: Monitoring the Diurnal Time Course of Vegetation Dynamics with Geostationary Observations», . 8

Drush, M. et FLEX Science Team. 2008, «FLEX Report for Assessment», cahier de recherche SP-1313/4, ESA-ESTEC, Noordwijk, Netherlands. URL `http://esamultimedia.esa.int/docs/SP1313-4_FLEX.pdf`. 7, 28, 91

Edner, H., J. Johansson, S. Svanberg et E. Wallinder. 1994, «Fluorescence lidar multicolor imaging of vegetation», *Applied optics*, vol. 33, n° 13, p. 2471–2479. 29

Emerson, R., R. Chalmers et C. Cederstrand. 1957, «Some factors influencing the long-wave limit of photosynthesis», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 43, n° 1, p. 133. 18

ESA. 2015, «New satellite to measure plant health», URL `http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/New_satellite_to_measure_plant_health`. 28

Evain, S., J. Flexas et I. Moya. 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*, vol. 91, n° 2, doi:10.1016/j.rse.2004.03.012, p. 175–185, ISSN 0034-4257. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425704000744. 23, 67, 108, 134

Evain, S., A. Ounis, F. Baret, Y. Goulas, J. Louis, J. Ducruet, Z. Cerovic et I. Moya. 2002, «Passive vegetation fluorosensing using atmospheric oxygen absorption bands», *Recent advances in quantitative remote sensing*, p. 16–20. 27

Flexas, J., J.-M. Briantais, Z. Cerovic, H. Medrano et I. Moya. 2000, «Steady-State and Maximum Chlorophyll Fluorescence Responses to Water Stress in Grapevine Leaves: A New Remote Sensing System», *Remote Sensing of Environment*, vol. 73, n° 3, doi:10.1016/S0034-4257(00)00104-8, p. 283–297, ISSN 0034-4257. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425700001048. 23, 67, 108, 134

Flexas, J., J. Escalona, S. Evain, J. Gulías, I. Moya, C. Osmond et H. Medrano. 2002, «Steady-state chlorophyll fluorescence (Fs) measurements as a tool to follow variations of net CO2 assimilation and stomatal conductance during water-stress in C3 plants», *Physiologia Plantarum*, vol. 114, n° 2, p. 231–240. 67

Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2012, «Arable Land Fraction», URL http://faostat3.fao.org. 98

Fournier, A., F. Daumard, S. Champagne, A. Ounis, Y. Goulas et I. Moya. 2012, «Effect of canopy structure on sun-induced chlorophyll fluorescence», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 68, p. 112–120. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271612000305. 74

Franck, F., P. Juneau et R. Popovic. 2002, «Resolution of the photosystem I and photosystem II contributions to chlorophyll fluorescence of intact leaves at room temperature», *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, vol. 1556, n° 2-3, p. 239–246. 18, 134

Frankenberg, C., J. B. Fisher, J. Worden, G. Badgley, S. S. Saatchi, J.-E. Lee, G. C. Toon, A. Butz, M. Jung, A. Kuze et T. Yokota. 2011, «New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity», *Geophysical Research Letters*, vol. 38, n° 17, doi:10.1029/2011GL048738, p. L17 706, ISSN 1944-8007. URL http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011GL048738/abstract. 7, 28, 91, 92

Fraunhofer, J. 1817, «Bestimmung des Brechungs- und des Farbenzerstreungs-Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernröhre», *Annalen der Physik*, vol. 56, n° 7, doi:10.1002/andp.18170560706, p. 264–313, ISSN 1521-3889. URL http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.18170560706/abstract. 24, 33

Gastellu-Etchegorry, J. P., V. Demarez, V. Pinel et F. Zagolski. 1996, «Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies», *Remote Sensing of Environment*, vol. 58, n° 2, doi:10.1016/0034-4257(95)00253-7, p. 131–156, ISSN 0034-4257. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425795002537. 29, 73

Genty, B., J.-M. Briantais et N. R. Baker. 1989, «The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence», *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, vol. 990, n° 1, doi:10.1016/S0304-4165(89)80016-9, p. 87–92, ISSN 0304-4165. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304416589800169. 21, 22

Genty, B. et S. Meyer. 1995, «Quantitative Mapping of Leaf Photosynthesis Using Chlorophyll Fluorescence Imaging», *Functional Plant Biology*, vol. 22, n° 2, p. 277–284. URL http://www.publish.csiro.au/paper/PP9950277. 29

Goulas, Y., Z. G. Cerovic, A. Cartelat et I. Moya. 2004, «Dualex: a new instrument for field measurements of epidermal ultraviolet absorbance by chlorophyll fluorescence», *Applied Optics*, vol. 43, n° 23, p. 4488–4496. URL http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?id=80803. 31

Goulas, Y., A. Fournier, F. Daumard, S. Champagne, A. Ounis, O. Marloie et I. Moya. 2017, «Gross primary production of a wheat canopy correlates with far red sun-induced chlorophyll fluorescence but not with red fluorescence», . 87

Goulas, Y., A. Ounis, F. Daumard, F. Baret, M. Chelle et I. Moya. 2014, «Assessment of canopy fluorescence yield with airborne passive and active measurements: the CALSIF project», *5th International Workshop on Remote Sensing of Vegetation Fluorescence*, p. 22–24. URL http://congrexprojects.com/Custom/14C04/Papers/Oral%20Presentations/S3_1020_Goulas.pdf. 68

Guanter, L., L. Alonso, L. Gómez-Chova, M. Meroni, R. Preusker, J. Fischer et J. Moreno. 2010, «Developments for vegetation fluorescence retrieval from spaceborne high-resolution spectrometry in the O2-A and O2-B absorption bands», *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 115, n° D19, doi:10.1029/2009JD013716, p. D19 303, ISSN 2156-2202. URL http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009JD013716/abstract. 135

Guyot, G. 1992, *Signatures spectrales des surfaces naturelles*, Télédétection satellitaire, Paradigme, ISBN 978-2-86878-032-4. URL https://books.google.fr/books?id=DdPNAAAACAAJ. 73

Jacquemoud, S. et F. Baret. 1990, «PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra», *Remote sensing of environment*, vol. 34, n° 2, p. 75–91. 70

Jacquemoud, S., S. Ustin, J. Verdebout, G. Schmuck, G. Andreoli et B. Hosgood. 1996, «Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model», *Remote Sensing of Environment*, vol. 56, n° 3, doi:10.1016/0034-4257(95)00238-3, p. 194–202, ISSN 0034-4257. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425795002383. 72

Joiner, J., L. Guanter, R. Lindstrot, M. Voigt, A. P. Vasilkov, E. M. Middleton, K. F. Huemmrich, Y. Yoshida et C. Frankenberg. 2013, «Global Monitoring of Terrestrial Chlorophyll Fluorescence from Moderate-Spectral-Resolution Near-Infrared Satellite Measurements: Methodology, Simulations, and Application to GOME-2», *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 6, doi:10.5194/amt-6-2803-2013, p. 2803–2823. URL http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20140010879. 7, 28

Joiner, J., Y. Yoshida, A. P. Vasilkov, Y. Yoshida, L. A. Corp et E. M. Middleton. 2011, «First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space», *Biogeosciences*, vol. 8, n° 3, doi:10.5194/bg-8-637-2011, p. 637–651, ISSN 1726-4189. URL http://www.biogeosciences.net/8/637/2011/. 7, 28, 91

Kautsky, H. et A. Hirsch. 1931, «Neue versuche zur kohlensäureassimilation», *Naturwissenschaften*, vol. 19, n° 48, p. 964–964. 18

Kelvinsong. 2013, «Français : Schème d'un chloroplaste.», URL https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chloroplast_(standalone_version)-fr.svg. 16

Kitajima, M. et W. L. Butler. 1975, «Quenching of chlorophyll fluorescence and primary photochemistry in chloroplasts by dibromothymoquinone», *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, vol. 376, n° 1, doi:10.1016/0005-2728(75)90209-1, p. 105–115, ISSN 0005-2728. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005272875902091. 20

Kooten, O. v. et J. F. H. Snel. 1990, «The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology», *Photosynthesis Research*, vol. 25, n° 3, doi:10.1007/BF00033156, p. 147–150, ISSN 0166-8595, 1573-5079. URL http://link.springer.com/article/10.1007/BF00033156. 21

Krause, G. et E. Weis. 1991, «Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics», *Annual review of plant biology*, vol. 42, n° 1, p. 313–349. 19, 134

Krause, G. H. et E. Weis. 1984, «Chlorophyll fluorescence as a tool in plant physiology», *Photosynthesis Research*, vol. 5, n° 2, doi:10.1007/BF00028527, p. 139–157, ISSN 0166-8595, 1573-5079. URL http://link.springer.com/article/10.1007/BF00028527. 19

Lawlor, D. W. 1993, *Photosynthesis: molecular, physiological and environmental processes.*, Ed. 2, Longman scientific & technical. URL http://www.cabdirect.org/abstracts/19930766372.html. 15

Lichtenthaler, H. K., M. Lang, M. Sowinska, F. Heisel et J. A. Miehé. 1996, «Detection of Vegetation Stress Via a New High Resolution Fluorescence Imaging System», *Journal of Plant Physiology*, vol. 148, n° 5, doi:10.1016/S0176-1617(96)80081-2, p. 599–612, ISSN 0176-1617. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161796800812. 29

Lichtenthaler, H. K. et J. A. Miehé. 1997, «Fluorescence imaging as a diagnostic tool for plant stress», *Trends in Plant Science*, vol. 2, n° 8, doi:10.1016/S1360-1385(97)89954-2, p. 316–320, ISSN 1360-1385. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138597899542. 29

Link, F. 1951, «Variations lumineuses de la Lune», *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, vol. 2, p. 131. 25

Louis, J., Z. G. Cerovic et I. Moya. 2006, «Quantitative study of fluorescence excitation and emission spectra of bean leaves», *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 85, n° 1, doi:10.1016/j.jphotobiol.2006.03.009, p. 65–71, ISSN 1011-1344. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1011134406000996. 68, 69

López González, M. d. l. L. 2014a, «In-the-field water stress detection in a vineyard using active and passive optical measurements», URL https://colloque6.inra.fr/gv2m/. 67, 112, 119

López González, M. d. l. L. 2014b, «Seguimiento del estrés hídrico en la vid mediante técnicas de fluorescencia de la clorofila y otros métodos ópticos», URL https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/6019. 7, 23, 24, 134

Maxwell, K. et G. Johnson. 2000, «Chlorophyll fluorescence—a practical guide», *Journal of experimental botany*, vol. 51, n° 345, p. 659–668. 19

McFarlane, J. C., R. D. Watson, A. F. Theisen, R. D. Jackson, W. L. Ehrler, P. J. Pinter, S. B. Idso et R. J. Reginato. 1980, «Plant stress detection by remote measurement of fluorescence», *Applied Optics*, vol. 19, n° 19, doi:10.1364/AO.19.003287, p. 3287–3289, ISSN 1539-4522. URL http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=ao-19-19-3287. 26, 27

Meroni, M. et R. Colombo. 2006, «Leaf level detection of solar induced chlorophyll fluorescence by means of a subnanometer resolution spectroradiometer», *Remote Sensing of Environment*, vol. 103, n° 4, doi:10.1016/j.rse.2006.03.016, p. 438–448, ISSN 0034-4257. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425706001593. 49

Miller, J. R., M. Berger, L. Alonso, Z. Cerovic, Y. Goulas, S. Jacquemoud, J. Louis, G. Mohammed, I. Moya et R. Pedros. 2003, «Progress on the development of an integrated canopy fluorescence model», dans *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International*, vol. 1, p. 601–603. URL http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1293855. 70

Moise, N. et I. Moya. 2004a, «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 phase», *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, vol. 1657, n° 1, doi:10.1016/j.bbabio.2004.04.001, p. 33–46, ISSN 0005-2728. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005272804000799. 19

Moise, N. et I. Moya. 2004b, «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 (BBA) - Bioenergetics*, vol. 1657, n° 1, doi:10.1016/j.bbabio.2004.04.003, p. 47–60, ISSN 0005-2728. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005272804000805. 19

Moya, I., L. Camenen, S. Evain, Y. Goulas, Z. Cerovic, G. Latouche, J. Flexas et A. Ounis. 2004, «A new instrument for passive remote sensing: 1. Measurements of sunlight-induced chlorophyll fluorescence», *Remote Sensing of Environment*, vol. 91, n° 2, p. 186–197. 27, 44, 67, 108, 134

Moya, I., L. Camenen, G. Latouche, C. Mauxion, S. Evain et Z. Cerovic. 1998, «An instrument for the measurement of sunlight excited plant fluorescence», *Photosynthesis: mechanisms and effects*, vol. 5, p. 4265–4270. 27

Moya, I., Y. Goulas, G. Guyot, B. Bertolini et G. Schmuck. 1991, «Control of the physiological state of vegetation cover by remote sensing of fluorescent emission in the blue and red visible spectrum regions (contrôle de l'état physiologique des couverts végétaux par télédétection des émissions de fluorescence dans les régions bleue et rouge du spectre visible)», *ESA, Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing,*, vol. 2. URL http://www.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=TRD&recid=N9211532AH. 31

Moya, I., H. Loayza et M. d. l. L. López González. 2016, «A simple micro-lidar for vegetation monitoring», Maastricht, Netherlands. URL http://www.ps2016.com/. 7

Moya, I., A. Ounis, N. Moise et Y. Goulas. 2006, «First airborne multiwavelength passive chlorophyll fluorescence measurements over La Mancha (Spain) fields», *Second recent advances in quantitative remote sensing*, p. 820–825. 8, 27, 32

NASA's Earth Observatory Team. 2016, «Leaf Area Index (1 month - Terra/MODIS) |», URL http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MOD15A2_M_LAI. 125

Otsu, N. 1975, «A threshold selection method from gray-level histograms», *Automatica*, vol. 11, n° 285-296, p. 23–27. URL http://web-ext.u-aizu.ac.jp/course/bmclass/documents/otsu1979.pdf. 61

Ounis, A., S. Evain, J. Flexas, S. Tosti et I. Moya. 2001, «Adaptation of a PAM-fluorometer for remote sensing of chlorophyll fluorescence», *Photosynthesis Research*, vol. 68, n° 2, p. 113–120. 23, 31, 52

Papageorgiou, G. C. et Govindjee. 2004, *Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis*, Springer, ISBN 978-1-4020-3217-2. 19, 67

Pedrós, R., Y. Goulas, S. Jacquemoud, J. Louis et I. Moya. 2010, «FluorMODleaf: A new leaf fluorescence emission model based on the PROSPECT model», *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, n° 1, p. 155–167. 70

Peters, K. 2007, «Korseby Online - Mniaceae», URL http://www.korseby.net/outer/flora/bryophyta/mniaceae/. 16

Pfündel, E. 1998, «Estimating the contribution of Photosystem I to total leaf chlorophyll fluorescence», *Photosynthesis Research*, vol. 56, n° 2, doi:10.1023/A:1006032804606, p. 185–195, ISSN 0166-8595, 1573-5079. URL http://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1006032804606. 19, 22

Pinto, F., A. Damm, A. Schickling, C. Panigada, S. Cogliati, M. Müller-Linow, A. Balvora et U. Rascher. 2016, «Sun-induced chlorophyll fluorescence from high-resolution imaging spectroscopy data to quantify spatio-temporal patterns of photosynthetic function in crop canopies», *Plant, Cell & Environment*, vol. 39, n° 7, doi:10.1111/pce.12710, p. 1500–1512, ISSN 1365-3040. URL http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/pce.12710/abstract. 32

Plascyk, J. 1975, «The MK II Fraunhofer Line Discriminator/FLD-II/ for airborne and orbital remote sensing of solar-stimulated luminescence», *Optical Engineering*, vol. 14, p. 339–346. 27, 49

Plascyk, J. A. et F. C. Gabriel. 1975, «The Fraunhofer Line Discriminator MKII-An Airborne Instrument for Precise and Standardized Ecological Luminescence Measurement», *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 24, n° 4, doi:10.1109/TIM.1975.4314448, p. 306–313, ISSN 0018-9456. 24, 27, 33

Rascher, U., G. Agati, L. Alonso, G. Cecchi, S. Champagne, R. Colombo, A. Damm, F. Daumard et E. Miguel. 2009, «CEFLES 2: 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*, vol. 6, n° 7, p. 1181–1198. 27, 44, 45

Rascher, U., L. Alonso, A. Burkart, C. Cilia, S. Cogliati, R. Colombo, A. Damm, M. Drusch, L. Guanter, J. Hanus, T. Hyvärinen, T. Julitta, J. Jussila, K. Kataja, P. Kokkalis, S. Kraft, T. Kraska, M. Matveeva, J. Moreno, O. Muller, C. Panigada, M. Pikl, F. Pinto, L. Prey, R. Pude, M. Rossini, A. Schickling, U. Schurr, D. Schüttemeyer, J. Verrelst et F. Zemek. 2015, «Sun-induced fluorescence – a new probe of photosynthesis: First maps from the imaging spectrometer HyPlant», *Global Change Biology*, vol. 21, n° 12, doi:10.1111/gcb.13017, p. 4673–4684, ISSN 1365-2486. URL `http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.13017/abstract`. 27, 29, 32, 52

Rosema, A., J. F. H. Snel, H. Zahn, W. F. Buurmeijer et L. W. A. Van Hove. 1998, «The Relation between Laser-Induced Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis», *Remote Sensing of Environment*, vol. 65, n° 2, doi:10.1016/S0034-4257(98)00020-0, p. 143–154, ISSN 0034-4257. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425798000200`. 23, 108, 134

Rosema, A., W. Verhoef, J. Schroote et J. F. H. Snel. 1991, «Simulating fluorescence light-canopy interaction in support of laser-induced fluorescence measurements», *Remote Sensing of Environment*, vol. 37, n° 2, doi:10.1016/0034-4257(91)90023-Y, p. 117–130, ISSN 0034-4257. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003442579190023Y`. 20

Rossini, M., M. Meroni, M. Migliavacca, G. Manca, S. Cogliati, L. Busetto, V. Picchi, A. Cescatti, G. Seufert et R. Colombo. 2010, «High resolution field spectroscopy measurements for estimating gross ecosystem production in a rice field», *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 150, n° 9, doi:10.1016/j.agrformet.2010.05.011, p. 1283–1296, ISSN 0168-1923. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192310001656`. 68

Schreiber, D. U. et D. W. Bilger. 1993, «Progress in Chlorophyll Fluorescence Research: Major Developments During the Past Years in Retrospect», dans *Progress in Botany / Fortschritte der Botanik*, édité par P. D. H.-D. Behnke, P. D. U. Lüttge, P. D. h. c. K. Esser, P. D. J. W. Kadereit et P. D. M. Runge, n° 54 dans Progress in Botany/Fortschritte der Botanik, Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-78022-6 978-3-642-78020-2, p. 151–173. URL `http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-78020-2_8`, dOI: 10.1007/978-3-642-78020-2_8. 22

Schreiber, U. 1986, «Detection of rapid induction kinetics with a new type of high-frequency modulated chlorophyll fluorometer», dans *Current topics in photosynthesis*, édité par J. Amesz, A. J. Hoff et H. J. V. Gorkum, Springer Netherlands, ISBN 978-94-010-8463-5 978-94-009-4412-1, p. 259–270. URL `http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-4412-1_24`. 21

Schreiber, U., U. Schliwa et W. Bilger. 1986, «Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer», *Photosynthesis Research*, vol. 10, n° 1-2, doi:10.1007/BF00024185, p. 51–62, ISSN 0166-8595, 1573-5079. URL `http://link.springer.com/article/10.1007/BF00024185`. 22

Stamnes, K., S.-C. Tsay, W. Wiscombe et K. Jayaweera. 1988, «Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media», *Applied optics*, vol. 27, n° 12, p. 2502–2509. 71

Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P. M. Midgley. 2014, *Climate change 2013: The physical science basis*, Cambridge University Press Cambridge, UK, and New York. 15

Verhoef, W. 1984, «Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model», *Remote sensing of environment*, vol. 16, n° 2, p. 125–141. 68, 70

Verhoef, W. 2004, «Extension of SAIL to model solar-induced canopy fluorescence spectra», Canada: Montreal. 68, 70

Verhoef, W. 2011, «Modeling vegetation fluorescence observations», dans *Proceedings of the EARSel 7th SIG-Imaging Spectroscopy Workshop, Edinburgh, UK*, p. 11–13. 72

Vilfan, N., C. van der Tol, O. Muller, U. Rascher et W. Verhoef. 2016, «Fluspect-B: A model for leaf fluorescence, reflectance and transmittance spectra», *Remote Sensing of Environment*, vol. 186, doi:10.1016/j.rse.2016.09.017, p. 596–615, ISSN 0034-4257. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425716303601`. 72

Wang, W.-M., Z.-L. Li et H.-B. Su. 2007, «Comparison of leaf angle distribution functions: Effects on extinction coefficient and fraction of sunlit foliage», *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 143, n° 1–2, doi:10.1016/j.agrformet.2006.12.003, p. 106–122, ISSN 0168-1923. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016819230600390X`. 73

Watson, R., T. Hessin, R. Bigelow et W. Hemphill. 1974, «Prediction of the Fraunhofer line detectivity of luminescent materials(crude and refined oils, effluents and vegetation)», dans *International Symposium on Remote Sensing of Environment, 9 th, Ann Arbor, Mich*, p. 1959–1980. 27

Zarco-Tejada, P., J. Berni, L. Suárez, G. Sepulcre-Cantó, F. Morales et J. Miller. 2009, «Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection», *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, n° 6, doi:10.1016/j.rse.2009.02.016, p. 1262–1275, ISSN 0034-4257. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425709000613`. 29, 32, 52

Zarco-Tejada, P. J., M. V. González-Dugo et E. Fereres. 2016, «Seasonal stability of chlorophyll fluorescence quantified from airborne hyperspectral imagery as an indicator of net photosynthesis in the context of precision agriculture», *Remote Sensing of Environment*, vol. 179, doi:10.1016/j.rse.2016.03.024, p. 89–103, ISSN 0034-4257. URL `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425716301183`. 32

université PARIS-SACLAY
ÉCOLE DOCTORALE
Sciences de l'environnement d'île-de-France (SEIF)

Titre : Simulation de la fluorescence de la végétation mesurée depuis une orbite géostationnaire

Mots clefs : végétation, fluorescence, rendement, imageur, multispectral, télédétection

Résumé : Cette thèse porte sur l'étude de la télédétection de la fluorescence chlorophyllienne pour le suivi de la végétation depuis l'espace. Des travaux récents montrent que c'est la variation naturelle du cycle diurne de la fluorescence qui constitue le critère le plus discriminatif de l'état physiologique. En particulier, il est possible de détecter un stress hydrique réversible dans plusieurs espèces. Pour assurer une mesure plusieurs fois par jour, un satellite en orbite géostationnaire (36 000 km) est envisagé.
Nous avons réalisé un instrument imageur passif au sol pour la mesure des cycles diurnes de la fluorescence détectée dans la bande O_2-A d'absorption de l'O_2 atmosphérique. Il utilise une roue à filtres interférentiels comme dans le cas du satellite Goci, mais avec une résolution spectrale plus de dix fois meilleure (chap. 2).
Après validation du concept, nous avons été confrontés aux difficultés de la définition d'un rendement de fluorescence au niveau du couvert. En effet, la structure de la végétation intervient dans le transfert radiatif de la fluorescence et de la lumière solaire absorbée au sein du couvert végétal. Il n'est donc pas possible de définir dans tous les cas un rendement de fluorescence au sein du couvert par des mesures passives, néanmoins nous proposons des indices qui permettent d'approcher celui-ci dans certains cas (chap. 3).
Une étude a été menée sur le transfert radiatif de la fluorescence dans le couvert végétal jusqu'au capteur spatial, à l'aide de modèles connus. Les résultats ont montré l'accessibilité du rendement pour des couverts à forte densité de feuilles et lorsque la distribution de l'orientation des feuilles est centrée sur l'horizontale (chap. 4).
Cette modélisation a été étendue pour simuler des mesures spatiales de fluorescence depuis une orbite géostationnaire dans les bandes O_2-A et O_2-B. Ces simulations montrent la possibilité de mesure dans la bande O_2-A avec une incertitude inférieure à 10 % sur les flux de fluorescence et une répétabilité temporelle inférieure à l'heure pour le suivi des cycles diurnes de la fluorescence de la végétation, ce qui permet d'envisager la détection de stress. Dans les cas favorables la mesure dans la bande O_2-B serait aussi possible (chap. 5).

Title: Simulation of the measurement of vegetation fluorescence from a geostationnary orbit

Keywords: vegetation, fluorescence, yield, imager, multispectral, remote sensing

Abstract: This thesis is about remote sensing of the chlorophyll fluorescence to monitor the vegetation from space. Recent work shows that the diurnal variation of the chlorophyll fluorescence is the most discriminative criterion to assess vegetation physiological state, especially water stress. To ensure several measurements in a day, a geostationary orbit is considered.
We created a passive imager to assess the diurnal cycles of fluorescence in the O_2-A absorption band. It employs an interferential filter wheel as in the case of the Goci satellite, but providing higher resolution.
After proof of concept, we have been facing difficulties defining the fluorescence yield at canopy scale. Indeed, the complexity of vegetation structure takes part in the radiative transfer within the vegetation cover. It is therefore impossible to define in all cases a fluorescence yield working for passive measurement. Nevertheless, we propose proxies to approach it in some cases.
Modelling the radiative transfer of fluorescence enabled us to show the accessibility of the fluorescence yield for covers with high leaf density and horizontal leaf distribution.
This modelling has been extended in order to simulate geostationary measurements in O_2-A and O_2-B bands. The results show the possibility to measure in the O_2-A band with an uncertainty of less than 10 % on fluorescence fluxes and a temporal repeatability lower than one hour to monitor diurnal cycles of vegetation fluorescence, in order to detect a stress. In favourable cases, measurement in the O_2-B band could be envisaged.