

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES DE LA TERRE

THESE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS
dans la spécialité des
SCIENCES DE LA TERRE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PLANETES

Soutenue le 28 juin 2011 par
M^{elle} Fanny GERBER

**Estimation du Contenu en Eau de la Végétation par
Télédétection Hyperspectrale dans le Moyen Infrarouge**

Laboratoire de Géophysique Spatiale et Planétaire
Institut de Physique du Globe de Paris
et
Laboratoire Télédétection, Surveillance, Environnement
Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives

JURY

M. Xavier Briottet	Président, rapporteur
M. Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry	Rapporteur
M. Albert Oliosio	Examineur
M. Daniel Richard	Examineur
M. Rodolphe Marion	Co-encadrant
M. Stéphane Jacquemoud	Directeur de thèse
Mme Véronique Serfaty	Invitée

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer ici toute ma gratitude à celles et ceux qui, de près ou de loin, auront contribué à l'aboutissement de ce travail.

J'adresse tout d'abord mes remerciements à M^{me} Véronique Serfaty, MM. Xavier Briottet, Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Albert Oliosio et Daniel Richard qui me font l'honneur de participer au jury de thèse. Je remercie également la DGA et le CNRS pour m'avoir financé trois années durant et avoir permis une certaine souplesse dans l'organisation de mon travail ces derniers mois.

Bien sûr, sans eux, rien ne se serait fait : je remercie mes directeurs de thèse, Stéphane Jacquemoud - ces années à tes côtés furent très formatrices - et Rodolphe Marion. En acceptant cette thèse que tu m'as proposée Rodolphe, j'étais confiante car je savais que tu saurais être intéressé, positif et de bon conseil. J'avais raison ! Mille mercis.

Je remercie aussi très sincèrement Philippe Carrié et Michel Diament, responsables respectifs de mes laboratoires d'accueil au CEA et à l'IPGP. Pour m'avoir accueillie dans vos forts sympathiques équipes mais aussi et surtout pour vos encouragements et la confiance que vous m'avez accordée. Merci aussi à Laure Meynadier, directrice de l'école doctorale, pour sa disponibilité et ses conseils lorsque ce fut bien nécessaire.

Je ne sais pas comment remercier tous les membres du labo GSP... c'est beaucoup grâce à vous que cette thèse restera un beau (et bon !) souvenir. Associé à un brin de nostalgie. Alors un grand merci à vous tous pour ces trois années. Merci aussi à toute la tribu TSE, notamment au futur Dr Deschamps, c'est un plaisir de te léguer mon papyrus ! J'ai été heureuse de tous vous retrouver après ces quelques mois de pause.

Merci à toutes celles et ceux avec qui j'ai travaillé quelques instants, ou ai croisé en congrès ou ailleurs et qui se seront intéressés à mon travail, vous m'avez beaucoup apporté. Je pense entre autres aux membres de l'ONERA-DOTA, de l'INRA d'Avignon et bien sûr à Beatriz Ribiero da Luz, spécialiste mondiale de la spectroscopie infrarouge de la végétation ! Merci aussi à Bruce Hapke pour sa *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*.

Je n'oublie pas mes amis, mes copines, merci pour vos encouragements, votre compréhension, et votre bonne humeur. Avec une petite mention spéciale pour Nathalie et Claire ! Et merci à Jussieu, sa Tour 46 et ses énergumènes qui rôdent dans les amphis, je vous adore !

Je remercie enfin très chaleureusement ma famille, en particulier mes parents, Jean-Marc et Isabelle, pour m'avoir encouragée et écoutée pendant ces 23 années d'études. Un grand merci aussi à mes sœurs, Anaïs et Louise, vous êtes de merveilleuses sœurette et tatas ! Merci aussi à ma grande famille d'adoption, pour votre soutien et les bons moments de détente, surtout pendant cette longue période de rédaction... et tout simplement merci à tous pour le quotidien.

Un merci tout particulier à ma petite Margot qui, en adorable filloute, aura su si gentiment et patiemment partager sa maman. Grâce à toi, je fais partie des (très ?) rares thésardes qui se seront offert de nombreuses promenades au soleil en pleine rédaction! Il me reste à remercier mon Guillaume, mais j'aurais tellement à dire que ça n'aurait plus sa place ici... merci d'être là, merci pour tout, pour les très nombreuses discussions et relectures, tes conseils, ta patience, ta confiance, ton amour... C'est tout grâce à toi, pour toi, alors encore merci du fond du cœur et vivement la suite !

RESUME

La connaissance des caractéristiques de la végétation (composition biochimique des feuilles, structure de la canopée, etc.) par télédétection est nécessaire dans de nombreux domaines comme l'étude de l'environnement ou du climat, l'agriculture de précision ou encore la géophysique. Cette thèse a pour but d'estimer le contenu en eau de la végétation en s'appuyant sur des données de télédétection hyperspectrale acquises dans le domaine spectral 3 - 5 μm (MWIR), où l'on trouve les principales bandes d'absorption de l'eau. Ce domaine, maintenant couvert par la dernière génération de capteurs aéroportés (e.g. AHS, SEBASS), n'a été que très peu exploité en raison de la complexité du signal enregistré (combinaison de la réflexion solaire et des émissions terrestre et atmosphérique thermique). Les couverts végétaux étant principalement constitués de feuilles, nous avons tout d'abord étudié les propriétés optiques des feuilles. Deux jeux de données, acquis en 2008 en collaboration avec l'USGS (Etats-Unis) et l'ONERA (France), nous ont permis de développer un modèle de propriétés optiques des feuilles de 0,4 à 5,7 μm , appelé PROSPECT-VISIR. Dans un second temps, les propriétés optiques des feuilles ont été traduites au niveau du sommet de la canopée et en entrée du capteur grâce à l'utilisation du modèle de canopée 4SAIL et du code de transfert radiatif atmosphérique MODTRAN. Une saturation de la réflectance des canopées pour des contenus en eau supérieurs à 0,01 g/cm^2 a ainsi été mise en évidence. L'exploitation de ce travail pour des applications en télédétection, a ensuite nécessité d'inverser la luminance MWIR. Les premières étapes d'une méthode de séparation de la température et de la réflectance (TRS-MWIR) sont présentées, en supposant l'atmosphère connue. L'algorithme TRS-MWIR offre des résultats très prometteurs en termes de RMSEP sur les réflectances et températures. Enfin, nous avons déterminé deux indices spectraux en vue d'estimer les contenus en eau foliaire et de la canopée, valables pour des contenus en eau foliaires inférieurs à 0,01 g/cm^2 . Ces résultats orientent les applications de ce travail vers la surveillance des végétations sèches, comme par exemple l'évaluation des risques de feux.

ABSTRACT

The knowledge of vegetation characteristics (leaf biochemical content, canopy structure, etc.) is required by many applications, like environmental and climate studies, precision agriculture or geophysics. This thesis aims at estimating vegetation water content using hyperspectral data remotely sensed in the 3 - 5 μm spectral domain (MWIR), where the main water absorption bands are located. This domain, now covered by the last generation of airborne sensors (e.g. AHS, SEBASS), received very little attention because of the complexity of the recorded signal (combination of reflection of solar radiation and emission of thermal radiation by the Earth and the atmosphere). Since plant canopies are mostly made of plant leaves, we first investigated leaf optical properties. Two dataset acquired in 2008 in collaboration with USGS (USA) and ONERA (France) allowed us to develop a leaf optical properties model from 0.4 μm to 5.7 μm , called PROSPECT-VISIR. In a second step, leaf optical properties have been scaled up using the optical-thermal canopy radiance model 4SAIL and the atmospheric radiative transfer code MODTRAN to simulate top-of-canopy and at-sensor radiances. It emphasizes the saturation of canopy reflectance for leaf water content greater than 0.01 g/cm^2 . The exploitation of this work for remote-sensing applications has needed to invert the MWIR radiance. The first steps of a temperature reflectance separation (TRS-MWIR) method are presented, with the hypothesis of a known atmosphere. The TRS-MWIR algorithm gives very promising results in term of reflectance and temperature RMSEP. At last, we designed two spectral indices to retrieve leaf and canopy water content from a reflectance canopy, valid for leaf water content lower than to 0.01 g/cm^2 . These results turn the applications of this work towards dry canopy survey, like fire risk assessment.

A ma famille

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
1. CARACTERISATION DU CONTENU EN EAU DE LA VEGETATION PAR TELEDETECTION : PRINCIPE ET ETAT DE L'ART	5
1.1. BASES DE TELEDETECTION	5
1.1.1. Grandeurs étudiées	5
1.1.2. Echelles physiques	6
1.1.3. Domaines spectraux	6
1.1.4. Sources du rayonnement.....	7
1.1.5. Transmittance atmosphérique.....	7
1.1.6. Exploitation des données	8
1.2. AU NIVEAU DE LA FEUILLE	9
1.2.1. Structure anatomique et composition biochimique.....	9
1.2.2. Physique de l'interaction du rayonnement avec la feuille	10
1.2.3. Propriétés optiques	17
1.2.4. Modèles de propriétés optiques des feuilles	20
1.3. AU NIVEAU DE LA CANOPEE	21
1.3.1. Eléments de structure et température d'une canopée	21
1.3.2. Réflectance du sol.....	21
1.3.3. Réflectance de la canopée	22
1.3.4. Modèles de propriétés optiques des canopées	23
1.4. AU NIVEAU DU CAPTEUR	24
1.4.1. Equation de la luminance en entrée du capteur par domaine spectral	24
1.4.2. Capteurs et effets sur le signal	26
1.5. EXPLOITATION DES MESURES DE TELEDETECTION POUR L'ESTIMATION DU CONTENU EN EAU DE LA VEGETATION : ETAT DE L'ART	27
1.5.1. Large exploitation du domaine VNIR-SWIR	27
1.5.2. Fort potentiel mais faible exploitation du domaine MWIR	29
1.6. ORIENTATION DE LA THESE	30
2. MESURE DES PROPRIETES OPTIQUES DES FEUILLES DE 0,4 A 14 μM	33
2.1. CAMPAGNES DE MESURES.....	33

2.2.	MESURES BIOCHIMIQUES.....	34
2.3.	MESURES RADIOMETRIQUES	34
2.3.1.	Instrumentation à l'USGS	36
2.3.2.	Instrumentation à l'ONERA	37
2.4.	PROTOCOLE DE MESURES	37
2.5.	CORRECTION DES MESURES RADIOMETRIQUES	39
2.5.1.	Correction du fond noir en réflectance.....	39
2.5.2.	Problème d'absorption par les gaz atmosphériques	40
2.5.3.	Raccordement des spectres VNIR-SWIR et MWIR-TIR.....	41
2.6.	PRESENTATION DES DONNEES COLLECTEES	48
2.7.	INTERPRETATION PHYSIQUE DES MESURES RADIOMETRIQUES	50
2.8.	REPRESENTATION DES DONNEES EN TERME D'EMISSIVITE	53
2.9.	BILAN	54
3.	MODELISATION DES PROPRIETES OPTIQUES DE LA VEGETATION	57
3.1.	MODELISATION DES PROPRIETES OPTIQUES DES FEUILLES.....	57
3.1.1.	Modèle PROSPECT original (0,4 - 2,5 μm)	57
3.1.2.	Mise en défaut de PROSPECT au-delà de 2,5 μm	58
3.1.3.	Description du modèle développé PROSPECT-VISIR (0,4 - 5,7 μm)	59
3.1.4.	Calibrage et validation de PROSPECT-VISIR	62
3.1.5.	Résultats	64
3.1.6.	Discussion	68
3.2.	MODELISATION DES PROPRIETES OPTIQUES DES CANOPEES.....	69
3.2.1.	Modèle de canopées 4SAIL (0,4 - 14 μm)	69
3.2.2.	Modèle d'atmosphère MODTRAN (0,4 - 14 μm)	71
3.2.3.	Couplage des modèles PROSPECT-VISIR, 4SAIL et MODTRAN	72
3.2.4.	Illustration du couplage : impact du contenu en eau foliaire sur la luminance en entrée du capteur	73
3.3.	ETUDE DE SENSIBILITE DES PROPRIETES OPTIQUES MWIR DES CANOPEES	75
3.3.1.	Objectif et démarche	75
3.3.2.	Définition de trois canopées types.....	75
3.3.3.	Sensibilité de la réflectance aux variables de PROSPECT-VISIR et 4SAIL	77

3.3.4.	Sensibilité de la luminance en entrée du capteur à la température de la scène et à l'atmosphère	81
3.4.	CONCLUSION	83
4.	INVERSION DU SIGNAL CAPTEUR MWIR POUR L'ESTIMATION DU CONTENU EN EAU DE LA VEGETATION : PREMIERE APPROCHE	85
4.1.	INTRODUCTION	85
4.1.1.	Hypothèses de travail.....	85
4.1.2.	Démarche	85
4.2.	ESTIMATION CONJOINTE DE LA TEMPERATURE ET DE LA REFLECTANCE : LA METHODE TRS-MWIR	86
4.2.1.	Principe.....	86
4.2.2.	Algorithme et illustration de la méthode TRS-MWIR.....	89
4.2.3.	Données et méthode pour l'étude des erreurs sur données simulées.....	92
4.2.4.	Erreur algorithmique	95
4.2.5.	Erreur due au bruit radiométrique	95
4.2.6.	Autres sources d'erreurs.....	99
4.2.7.	Synthèse : limites et perspectives.....	100
4.3.	DEFINITION D'INDICES SPECTRAUX POUR L'ESTIMATION DU CONTENU EN EAU DE LA VEGETATION A PARTIR DE LA REFLECTANCE DE LA CANOPEE	101
4.3.1.	Données et méthode.....	101
4.3.2.	Indice sur le contenu en eau foliaire	103
4.3.3.	Indice sur le contenu en eau de la canopée.....	107
4.3.4.	Discussion	109
4.4.	CHAINE GLOBALE D'INVERSION	110
4.4.1.	Données et méthode.....	110
4.4.2.	Erreur algorithmique	111
4.4.3.	Erreur due au bruit radiométrique	112
4.4.4.	Discussion	113
4.5.	CONCLUSION	113
	CONCLUSION GENERALE.....	115
	ANNEXE 1	119
	ANNEXE 2	121

REFERENCES..... 123

INTRODUCTION

L'eau est omniprésente sur Terre à différents états (gazeux, liquide ou solide), dans l'atmosphère, les océans, les lacs et rivières, les glaces, mais aussi dans les sols et la végétation. Elle interagit avec les écosystèmes de manière biologique (photosynthèse, Farineau & Morot-Gaudry, 2011), mécanique (érosion, infiltration, Bear, 2007), énergétique (évapotranspiration, échange de chaleur, Foken, 2008) ou optique (interaction avec le rayonnement solaire ou émission propre, Gates, 2003). L'eau peut caractériser la vitalité d'une plante ou d'un couvert végétal, et par delà un état de santé général de l'environnement. Elle représente en effet environ 90% de la masse totale des feuilles fraîches mais, lorsque la plante est stressée ou sénescence, elle s'évapore jusqu'à disparition partielle ou totale. La détection d'un stress hydrique peut alors révéler une contamination environnementale (stockage de produits chimiques ou radioactifs, pollution des nappes phréatiques, Fried, 1975), un risque de feux de forêts (Ustin et al., 1998) ou un besoin d'irrigation en agriculture de précision (Peñuelas et al., 1994). L'estimation du contenu en eau de la végétation (g/cm^2) par télédétection a par conséquent suscité bon nombre de travaux. Cette méthode de mesure à distance, non destructrice, exploite les interactions optiques entre les différents éléments d'une scène visée (sol, végétation, bâtiments, etc.) pour la caractériser (Warner et al., 2009). Par ailleurs, la végétation recouvrant 65% des surfaces continentales, l'interprétation des mesures de rayonnement électromagnétique de la plupart des scènes passe par une bonne compréhension des interactions entre ce rayonnement et la végétation. L'étude de la végétation ne se limite donc pas aux domaines de l'agronomie (Hadria et al., 2010) ou de l'environnement (cycle du carbone, Boyd & Curran, 1998) mais concerne aussi la géophysique ou la climatologie (Stephenson-Hawk et al., 1997). Les applications sont en effet nombreuses là où il est nécessaire de connaître les propriétés optiques de la végétation (réflectance, émissivité) pour s'en affranchir et accéder aux données d'intérêt (contenu gazeux, nature des sols), ou encore pour la surveillance des activités humaines (infrastructures militaires, état des voies de communication).

Jusqu'à présent, l'estimation du contenu en eau de la végétation par télédétection est basée sur des mesures à des longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 2,5 μm (domaines du visible et du proche-infrarouge) et, dans une moindre mesure entre 8 et 14 μm (infrarouge thermique) (Chapitre 1). Mais ces données ne suffisent pas à expliquer à elles seules toutes les caractéristiques biochimiques et structurelles d'une canopée. Par exemple, il est encore difficile de différencier un couvert dense et sec d'un couvert éparse et frais dont les contenus en eau intégrés (produit du contenu en eau foliaire par la surface de feuilles par m^2 de sol) peuvent être proches. Le domaine spectral 3 - 5 μm (moyen infrarouge) offre de nombreuses fenêtres atmosphériques mais n'est presque pas exploité, compte tenu de la complexité du signal à ces longueurs d'onde (Chapitre 1). Quelques travaux ont néanmoins mis en lumière le potentiel de ce domaine pour l'étude de la végétation (Boyd & Petitcolin, 2004), notamment pour la

discrimination de différents types de végétation grâce à la sensibilité du MWIR aux petites variations de températures (Laporte et al., 1995), pour l'estimation de la biomasse des écosystèmes de forêts (Boyd et al., 2000) ou encore pour l'étude des variations intra- et inter-annuelles de la végétation dues au climat (Boyd et al., 2002). Aussi, les radiations MWIR pénètrent plus largement le brouillard ou les fumées que dans le VNIR-SWIR (Wooster et al., 1994), ce qui représente un grand avantage pour l'étude des environnements tropicaux. Mais le développement de ces études dépend de la maturation des méthodes d'estimation de la réflectance depuis des mesures MWIR.

Le travail de cette thèse a pour but d'améliorer la compréhension de l'impact de la végétation et plus particulièrement de son contenu en eau sur le signal enregistré à partir d'un capteur de télédétection, appelé luminance (en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$, Chapitre 1). Pour ce faire et compte tenu de l'état de l'art et des propriétés optiques de l'eau, nous avons choisi d'axer notre travail sur le domaine spectral encore peu utilisé qu'est le moyen infrarouge (MWIR, 3 - 5 μm). Ceci tant pour améliorer l'estimation du contenu en eau de la végétation que pour fournir à l'ensemble de la communauté scientifique des informations sur les propriétés optiques de la végétation, qui pourront être utilisées à différentes fins. L'état de l'art de l'estimation du contenu en eau par télédétection (Chapitre 1) met en évidence un manque crucial de données expérimentales et de modèles physiques de transfert radiatif pour des longueurs d'onde supérieures à 2,5 μm (moyen infrarouge et infrarouge thermique).

Pour pallier ce manque, le travail présenté dans ce manuscrit se subdivise en deux grandes étapes. D'une part l'étude de la relation entre les propriétés optiques de la végétation et son contenu en eau, et d'autre part l'étude de la relation entre la luminance enregistrée par le capteur et les propriétés optiques de la végétation, c'est-à-dire de la détermination de la part de signal attribuable à la végétation dans la luminance enregistrée par un capteur de télédétection.

Après un premier chapitre introductif, le deuxième chapitre présente les campagnes de mesures qui ont permis d'acquérir des spectres de réflectance et de transmittance de feuilles entre 0,4 μm et 14 μm et les contenus en eau et en matière sèche associés. Ces mesures mettent notamment en évidence une saturation rapide de ces grandeurs radiométriques avec le contenu en eau foliaire.

Le troisième chapitre s'attache à modéliser les propriétés optiques de la végétation en fonction du contenu en eau, dans un premier temps au niveau de la feuille puis au niveau de la canopée. Les modèles utilisés jusqu'à 2,5 μm trouvent leurs limites dans le moyen infrarouge et au delà. Le modèle PROSPECT-VISIR développé au cours de cette thèse (Gerber et al., 2011), extension jusqu'à 5,7 μm du modèle PROSPECT, est présenté. Le couplage de PROSPECT-VISIR avec 4SAIL, modèle de propriétés optiques des couverts végétaux, permet une analyse à cette échelle. Les simulations confirment que les propriétés optiques de la végétation présentent une saturation rapide avec le contenu en eau, dès que celui-ci atteint 0,01 g/cm^2 environ. Les applications de ce travail s'orienteront donc plus vers l'étude de canopées sénescentes, du risque

de feu, etc. La connaissance du contenu en eau de la végétation pourrait en effet offrir une cartographie des risques de feux, ce qui orienterait la surveillance des points chauds sur les zones particulièrement à risque. Ceci serait un intéressant complément aux outils de détection précoce de points chauds développés pour le capteur satellitaire BIRD (Moreno et al., 2006), qui possède une bande spectrale de 3,4 à 4,2 μm .

Dans le moyen infrarouge, le rayonnement solaire réfléchi et le rayonnement émis par la Terre se combinent dans des proportions variables selon la longueur d'onde, ce qui rend l'exploitation de ce domaine particulièrement complexe. Outre les propriétés optiques de la cible, sa température de surface joue un rôle prépondérant sur le signal et il est difficile de s'en affranchir. Le Chapitre 4 propose des pistes de réflexion pour l'exploitation pratique des données de télédétection dans le MWIR (en particulier des images hyperspectrales), et notamment une première approche pour la séparation température-réfléctance (méthode TRS-MWIR) et des indices spectraux pour le contenu en eau.

1. CARACTERISATION DU CONTENU EN EAU DE LA VEGETATION PAR TELEDETECTION : PRINCIPE ET ETAT DE L'ART

Dans ce premier chapitre, nous présentons la télédétection dans ses grandes lignes puis nous détaillons les différents éléments entrant en jeu dans la caractérisation de la végétation par cet outil. Selon une échelle croissante, les propriétés biophysiques des feuilles d'angiospermes, plantes à fleurs qui couvrent les terres émergées, sont d'abord présentées. Nous détaillons leurs propriétés biochimiques ainsi que les lois physiques reliant propriétés biochimiques et propriétés optiques. Ceci permet de comprendre le déterminisme de la réflectance et de la transmittance des feuilles et, plus généralement, les lois d'interaction entre les ondes électromagnétiques et la matière, utiles à toute échelle spatiale. Nous recensons brièvement les modèles de propriétés optiques des feuilles puis nous faisons l'état de l'art de la compréhension des propriétés optiques des feuilles en fonction de leur contenu biochimique. Sont ensuite introduites les caractéristiques architecturales des couverts végétaux et l'influence de la réflectance du sol sous-jacent, qui conditionnent la réflectance au sommet d'une canopée. La compréhension et la modélisation de cette réflectance sont aussi présentées. Enfin, nous nous plaçons au niveau du capteur et nous décrivons les derniers éléments qui déterminent la luminance à cette échelle : l'atmosphère et les caractéristiques du capteur lui-même. L'ensemble des éléments (feuille, canopée et atmosphère) intervenant dans la construction de la luminance en entrée du capteur permettent ainsi d'exprimer l'équation du transfert radiatif, finalement détaillée pour trois domaines spectraux (VNIR-SWIR, MWIR et TIR). Cette équation, couplée au modèle direct développé au Chapitre 3, sera à la base de la méthode inverse présentée au Chapitre 4.

1.1. BASES DE TELEDETECTION

1.1.1. GRANDEURS ETUDIEES

L'objet d'étude de cette thèse est l'eau de la feuille, principal constituant biochimique foliaire. Les méthodes d'estimation du contenu en eau de la végétation par télédétection exploitent le lien entre les propriétés biochimiques et les propriétés optiques de la végétation (Baranoski & Rokne, 2001). Les trois grandeurs physiques étudiées sont la réflectance ρ , l'absorptance a et la transmittance τ , qui sont respectivement la fraction de rayonnement incident réfléchi, absorbé et transmis par la végétation. Le capteur de télédétection enregistre un flux énergétique de rayonnement électromagnétique (en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$, si la longueur d'onde est en μm), appelé luminance $L(\lambda)$ (Meyzonnette et Lépine, 2003). La luminance est, entre autre, fonction de la réflectance de la végétation (Section 1.4.1) et sera détaillée par la suite. La mesure simultanée de la luminance sur une matrice de pixels constitue une image.

1.1.2. ECHELLES PHYSIQUES

La luminance peut être enregistrée à différentes échelles physiques, au niveau de la feuille, de la canopée, plus haut dans l'atmosphère ou encore depuis l'espace. Ces échelles sont illustrées par la Figure 1.1.



Figure 1.1 : Echelles physiques, de la feuille au satellite. De gauche à droite : feuilles, canopée, canopée vue par un capteur aéroporté, scène vue par le satellite SPOT.

Plus on s'éloigne de la feuille et plus la luminance de la cible résulte de nombreuses interactions. L'estimation du contenu en eau foliaire est donc d'autant plus complexe que l'image intègre d'autres paramètres que la feuille. Ainsi, alors qu'au niveau de la feuille la luminance est simplement égale au produit de l'éclairement incident $E(\lambda)$ par la réflectance ($L(\lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{\pi} E(\lambda)$, si la surface est parfaitement diffusante), celle enregistrée au sommet d'un couvert végétal résulte de très nombreuses interactions (Section 1.4.1). Le travail de cette thèse visant des applications en télédétection aéroportée ou satellitaire, nous décrivons par la suite les propriétés optiques de la végétation à différentes échelles. Le terme de « luminance en entrée du capteur » employé par la suite désignera donc un rayonnement qui a traversé une certaine épaisseur d'atmosphère, allant de quelques mètres pour un capteur installé sur une grue, à plusieurs centaines de mètres pour un capteur aéroporté par exemple.

1.1.3. DOMAINES SPECTRAUX

L'enregistrement et l'exploitation d'une mesure optique peut se faire à plusieurs longueurs d'onde. Pour une cible donnée, on n'utilise pas une valeur de réflectance ou de luminance intégrée sur un domaine de longueurs d'onde mais un spectre complet. Les propriétés optiques de la végétation varient spectralement (Sections 1.2.3 et 1.3.3), il est intéressant d'enregistrer la luminance dans plusieurs longueurs d'onde pour mieux caractériser la végétation. Le Tableau 1.1 définit les sous-domaines du domaine optique (0,4 - 14 μm) qui seront mentionnés dans la suite du manuscrit (Warner et al., 2009).

Tableau 1.1 : Domaines spectraux du visible et à l'infrarouge.

0,4 - 1,1 μm	Visible - proche-infrarouge (<i>Visible - Near InfraRed</i>)	VNIR
1,1 - 2,5 μm	Infrarouge ondes courtes (<i>ShortWave InfraRed</i>)	SWIR
2,5 - 7,5 μm	Moyen infrarouge (<i>MidWave InfraRed</i>)	MWIR
7,5 - 14 μm	Infrarouge thermique (<i>Thermal InfraRed</i>)	TIR

1.1.4. SOURCES DU RAYONNEMENT

La Terre et le Soleil émettent un rayonnement électromagnétique fonction de leur température de surface, selon la loi de Planck (Equation 1.3, Section 1.4.1). Selon la longueur d'onde, l'un domine l'autre. Par exemple, un signal enregistré dans le VNIR-SWIR a une origine solaire alors qu'un signal enregistré dans le TIR a une origine terrestre. La Figure 1.2 représente, en fonction de la longueur d'onde, les luminances émises par des corps noirs à des températures proches de celle du Soleil (~ 5800 K) et de la Terre (~ 300 K). Au niveau du sol, ces deux luminances ont des valeurs proches dans le MWIR. Les rayonnements solaire et terrestre se combinent alors, rendant l'exploitation des signaux dans ce domaine spectral délicate (Boyd & Petitcolin, 2004).

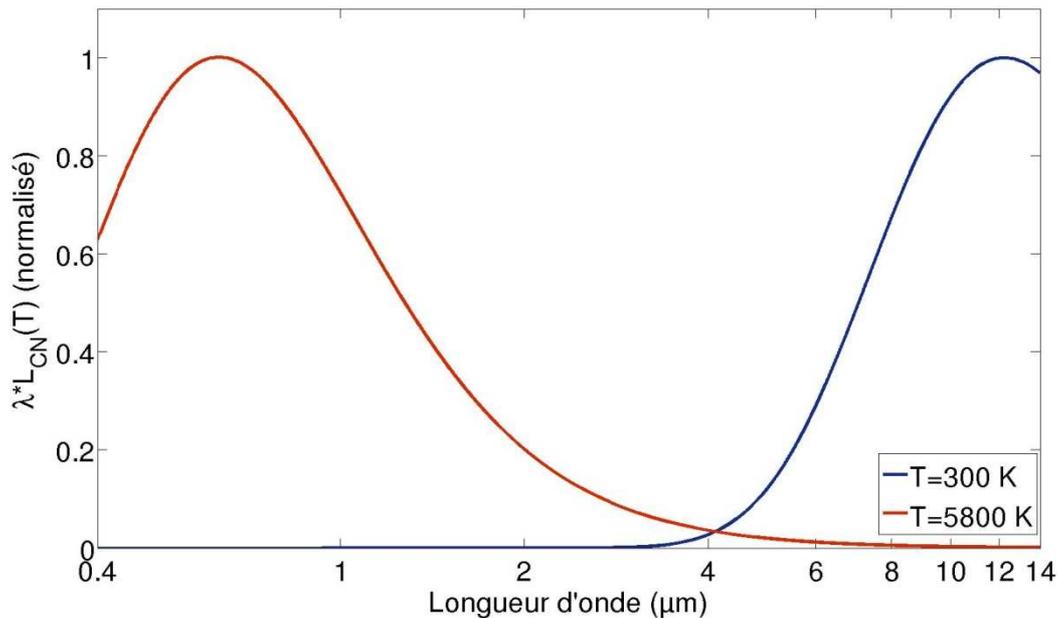


Figure 1.2 : Emittance de corps noirs (loi de Planck) aux températures moyennes respectives du Soleil (rouge) et de la Terre (bleu). La représentation adoptée assure que des aires égales correspondent à des emittances égales. Adapté de Goody et Yung (1989).

1.1.5. TRANSMITTANCE ATMOSPHERIQUE

Avant d'atteindre le capteur (aéroporté ou satellitaire par exemple), le rayonnement réfléchi ou émis par la surface interagit avec une couche atmosphérique d'épaisseur variable. L'absorption et la diffusion par les gaz et les aérosols sont les deux principaux mécanismes mis en jeu (Zdunkowski et al., 2007). L'atmosphère se comporte donc comme un filtre et

l'enregistrement du signal n'est possible que si elle absorbe peu ou pas le rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire qu'elle le transmet de la source au capteur. La Figure 1.3 présente la transmittance d'une atmosphère standard (US1976) entre 0 et 1 km d'altitude, pour des longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 14 μm . Cette grandeur varie entre 0 et 1 et est fonction de la longueur d'onde. Les domaines de longueurs d'onde où la transmittance est proche de 1 sont appelés « fenêtres atmosphériques » et sont particulièrement étudiés en télédétection.

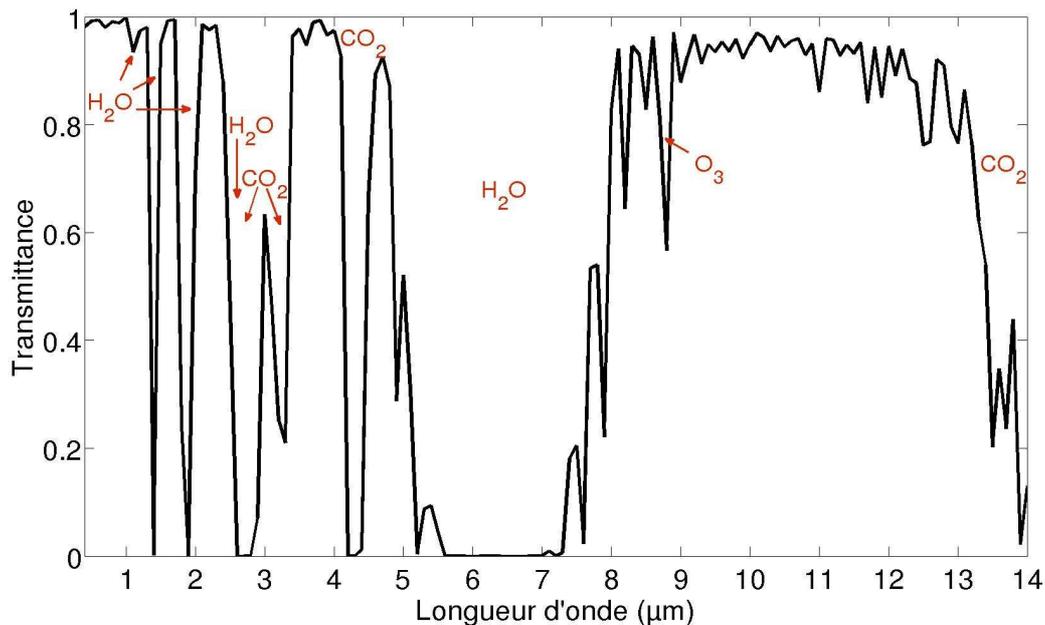


Figure 1.3 : Transmittance d'une atmosphère standard US1976 entre 0 et 1 km d'altitude. Les gaz qui engendrent les principales bandes d'absorption sont indiqués en rouge.

1.1.6. EXPLOITATION DES DONNEES

L'estimation du contenu biochimique des feuilles par télédétection, comme leur teneur en eau, requiert la compréhension de la luminance à toutes les échelles physiques, de la feuille à celle du capteur. En revanche, selon l'information recherchée, on exploitera un domaine spectral plutôt qu'un autre. On trouve dans la littérature trois principales approches pour estimer des variables biochimiques à partir de données radiométriques (luminance ou réflectance) (Bacour, 2001). La première approche, semi-empirique, est basée sur la mise en relation simple, par corrélation, de la réflectance à la variable d'intérêt. Il s'agit par exemple des indices de végétation. Ces relations sont rapides à mettre en œuvre mais sont limitées car elles associent un signal complexe à une seule variable alors que le problème est multivarié. La seconde approche, statistique, consiste à établir une relation fonctionnelle entre les mesures de luminance et la variable d'intérêt, comme dans le cas des modèles de mélanges linéaires spectraux. Mais la diffusion de la lumière entre les différents éléments constituant un couvert (sol, feuilles) est un phénomène non linéaire (Myneni et al., 1995) et cette approche trouve là sa limite. Enfin, la dernière approche est basée sur la

modélisation des propriétés optiques de la végétation grâce à des lois physiques. Elle implique de bien comprendre les phénomènes régissant les interactions (absorption, diffusion) entre le rayonnement électromagnétique et l'ensemble des éléments de la scène visée (sol, végétation, atmosphère). Contrairement aux deux précédentes, cette approche permet d'estimer plusieurs variables biochimiques ou structurelles simultanément. Dans le cadre de cette thèse, nous avons opté pour l'approche par modélisation physique, plus lourde à mettre en place mais qui peut permettre une analyse plus fine du signal de part sa nature multivariée.

1.2. AU NIVEAU DE LA FEUILLE

1.2.1. STRUCTURE ANATOMIQUE ET COMPOSITION BIOCHIMIQUE

Structure anatomique - Les feuilles des angiospermes (plantes à fleurs) sont constituées d'une ou plusieurs couches de mésophylle, prises en sandwich entre les épidermes supérieur et inférieur. Ceux-ci sont recouverts d'une fine couche de cuticule et de cire épicuticulaire, d'épaisseur variable, dont dépend la rugosité de la surface (Riederer & Müller, 2006 ; Ribeiro da Luz & Crowley, 2007). La Figure 1.4 montre une coupe de feuille de hêtre.

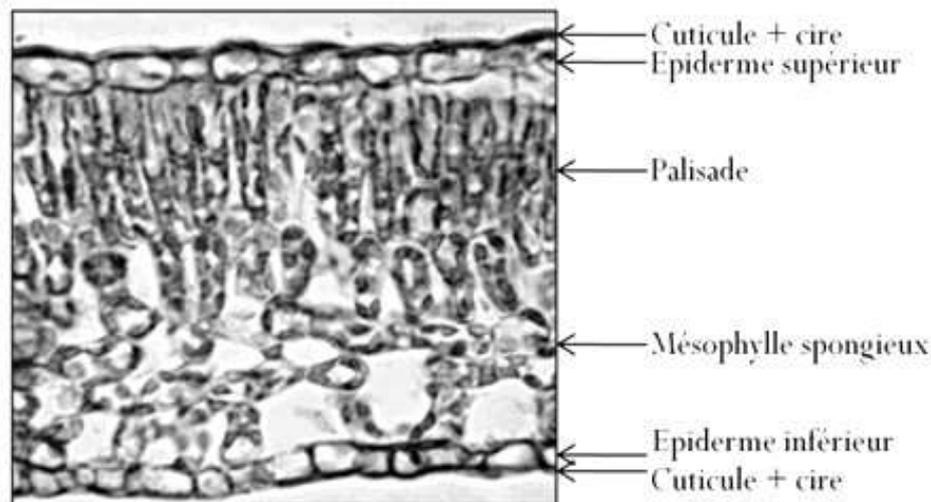


Figure 1.4 : Coupe transversale d'une feuille de hêtre (*Fagus sylvatica* L.), observée au microscope (d'après Bousquet, 2007).

Les cellules du mésophylle et de l'épiderme ont un diamètre d'environ 20 μm alors que la taille des particules de cire est beaucoup plus petite, de l'ordre du micron. En fonction de leur structure anatomique, les angiospermes se subdivisent en deux classes, les monocotylédones et les dicotylédones. Les premières ont un mésophylle uniforme et compact quand les secondes sont constituées de deux tissus, le parenchyme palissadique et le mésophylle spongieux (Figure 1.4). La plupart des feuillus sont des angiospermes dicotylédones. Comme nous le montrerons par la suite, la structure anatomique de la feuille, caractérisée par la variable N , joue un rôle majeur dans ses propriétés optiques.

Composition biochimique - Les feuilles sont majoritairement constituées d'eau (50 à 90 % de la masse totale d'une feuille fraîche) qui est stockée dans la vacuole des cellules végétales. C'est pourquoi la mesure du contenu en eau caractérise bien l'état physiologique de la feuille. Les autres constituants foliaires sont les pigments photosynthétiques (chlorophylle, caroténoïdes, etc.) et un ensemble de composés regroupés sous le nom de « matière sèche » dans la suite du document. La matière sèche inclut notamment la cellulose, l'hémicellulose, la lignine et la cutine. Dans la suite du document, on appellera C_w et C_m les contenus en eau et en matière sèche des feuilles, exprimés en g/cm^2 .

La détermination du contenu biochimique des feuilles fournit de précieuses informations environnementales. La cartographie du contenu en eau de la végétation par télédétection est par exemple un indicateur du stress environnemental (impact d'un site sur l'environnement, risque de feu), alors que le contenu en chlorophylle permet plutôt de différencier les populations d'un écosystème et de déterminer leur stade phénologique (ou de croissance).

1.2.2. PHYSIQUE DE L'INTERACTION DU RAYONNEMENT AVEC LA FEUILLE

Les feuilles sont constituées de matériaux caractérisés par un indice de réfraction complexe, propriété optique intrinsèque liée à leur nature chimique. Cette dernière, associée à des paramètres structuraux (comme la taille et l'arrangement des cellules) permet de calculer leur réflectance et leur transmittance. Nous présentons dans cette section les caractéristiques optiques intrinsèques d'une feuille et les lois physiques qui caractérisent les interactions entre les ondes électromagnétiques et la matière. L'établissement du lien entre les propriétés biochimiques et les propriétés optiques permettra de modéliser le flux de rayonnement électromagnétique enregistré par le capteur (Chapitre 3) et d'en déduire les propriétés biochimiques qui nous intéressent (Chapitre 4).

Caractéristiques optiques intrinsèques d'une feuille

Indice de réfraction complexe - Il est défini par $\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$, où $n(\lambda)$ est simplement appelé indice de réfraction (ou indice optique) et $k(\lambda)$ est le coefficient d'absorption à la longueur d'onde λ . n et k sont liés par les lois de Kramers-Kronig (Berthier, 1993). La Figure 1.5 illustre cette relation par la représentation des parties réelle et imaginaire de l'indice de réfraction complexe du quartz. A un maximum d'absorption est associée une variation brusque de l'indice de réfraction. Outre ces variations locales, la partie réelle de l'indice de réfraction réel décroît avec la longueur d'onde. Dans un milieu composite comme la feuille, on suppose que l'indice de réfraction du matériau est une combinaison linéaire des indices de réfraction de chacun des composants.

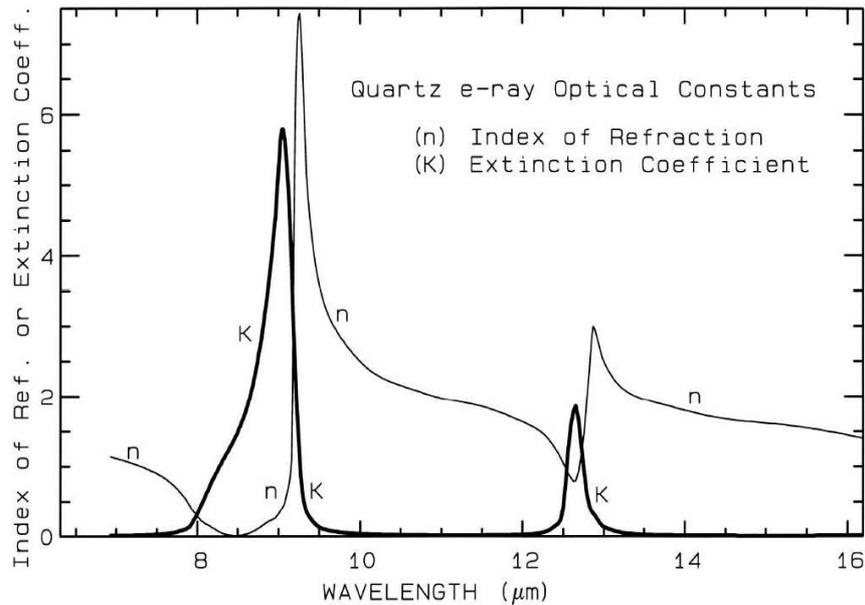


Figure 1.5 : Indice de réfraction complexe du quartz (SiO_2). La partie réelle est notée n et la partie imaginaire K (appelée aussi coefficient d'extinction) (Spitzer & Klienman, 1961).

Paramètre de taille et régimes de diffusion de la lumière - Le paramètre de taille X est défini par $X = \pi D/\lambda$, où D est le diamètre des particules. Il permet d'établir les différents régimes que peuvent suivre les lois de la spectroscopie de réflectance (c'est-à-dire les lois physiques qui caractérisent les valeurs et les variations spectrales de la réflectance). La théorie de Mie qui donne la solution exacte de la diffusion de la lumière par des particules sphériques en fonction de X (Mie, 1908) peut être simplifiée (Akkermans & Montambaux, 2004). $X \ll 1$ correspond à la région de Rayleigh (cas des molécules gazeuses dans le VIS) où l'efficacité de diffusion (section efficace - i.e. probabilité d'interaction entre le rayonnement et la particule - divisée par la section géométrique) est proportionnelle à X^4 . $X \sim 1$ est la région de résonance pour laquelle il n'existe pas de simplification de la théorie de Mie. La section efficace y est très supérieure à la section géométrique et la diffusion est beaucoup plus importante que dans le régime de Rayleigh. Enfin, $X \gg 1$ suit les lois de l'optique dite géométrique et l'efficacité de diffusion tend vers 2. Si on considère maintenant une surface constituée d'un ensemble de particules accolées et non plus une particule isolée, la diffusion de la lumière selon les lois de l'optique géométrique n'est pas due à la diffraction mais correspond à des réflexions de surface (ou spéculaires) auxquelles s'ajoutent les rayons réfractés qui sont retransmis à l'extérieur des particules (réflexion volumique). Revenons au cas de la feuille : dans le domaine 0,4 - 14 μm, X varie de 150 à 4,5 pour les cellules du mésophylle et de 7,9 à 0,2 pour les particules de cire. Selon Hapke (1993), les lois de l'optique géométrique s'appliquent pour des valeurs de X aussi petites que 6. On peut donc considérer que nous sommes dans ce cas de figure sachant que, pour certaines feuilles très cireuses, cela pourrait conduire à des erreurs d'interprétation ou de modélisation des propriétés optiques.

Interactions entre les ondes électromagnétiques et la matière

Absorption de la lumière - Les mécanismes par lesquels le rayonnement électromagnétique est absorbé par une molécule peuvent être classés en quatre catégories, fonction du niveau énergétique (et donc de la longueur d'onde). On définit les transitions rotationnelle, vibrationnelle, électronique et de dissociation moléculaire. Dans l'UV (UltraViolet, de 0,1 à 0,4 μm), l'absorption se fait principalement par dissociation moléculaire et transition électronique, dans le VNIR-SWIR, ce sont les transitions électroniques et vibrationnelles qui dominent et, dans l'infrarouge lointain (TIR et au-delà) et les micro-ondes, les photons sont majoritairement absorbés par transitions rotationnelles. Dans le MWIR, en fonction de la valeur du coefficient d'absorption, la lumière peut être absorbée par vibration ou rotation. Le coefficient spécifique d'absorption α d'un matériau défini par $\alpha(\lambda) = \frac{4\pi}{\lambda} k(\lambda)$ caractérise sa capacité à absorber la lumière à une longueur d'onde donnée. La Figure 1.6 présente le coefficient spécifique d'absorption de l'eau pure. Attention à ne pas confondre coefficient spécifique d'absorption α (exprimé en cm^{-1}) et absorptance a (sans unité) d'un matériau. Le premier est une quantité intensive, directement reliée à l'indice de réfraction du matériau alors que le second est une quantité extensive qui dépend du premier et de la quantité de matière.

Exemple de la molécule d'eau - L'eau à l'état liquide peut absorber la lumière par vibration d'élongation symétrique (3,05 μm), d'élongation asymétrique (2,87 μm) ou par rotation (6,08 μm). La combinaison de ces modes d'absorption engendre les bandes d'absorption que l'on observe sur la Figure 1.6 (maxima locaux) : bandes fondamentales (absorption forte) à 2,9 μm et 6,08 μm et harmoniques (absorption faible) à 0,97 μm , 1,2 μm , 1,47 μm , 1,94 μm et 4,8 μm (<http://www.lsbu.ac.uk/water/vibrat.html>).

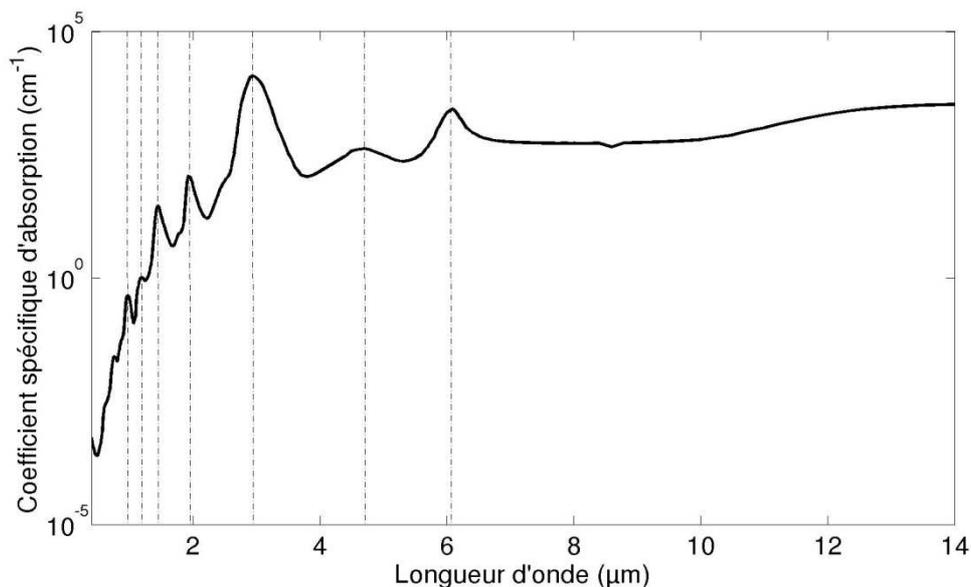


Figure 1.6 : Spectre du coefficient spécifique d'absorption de l'eau pure (échelle log.) d'après les mesures de Hale & Kerry (1973), Segelstein (1981), et Wieliczka et al. (1989). Les traits pointillés indiquent la position des principales bandes d'absorption.

Réflexion spéculaire et volumique, réfraction - A l'interface entre deux milieux, le rayonnement incident est en partie réfléchi et en partie réfracté (transmis). Les coefficients de Fresnel r et t définissent la part de rayonnement respectivement réfléchi et transmis en fonction de l'angle d'incidence et des indices de réfraction des milieux. On a $r + t = 1$. Ces coefficients sont définis dans la Section 3.1.3. La Figure 1.7 illustre les interactions entre la lumière incidente et des particules sphériques situées à la surface d'un matériau. Elles se traduisent par des réflexions spéculaires et/ou volumiques : les chemins ①, ② et ③ correspondent aux rayons lumineux qui ont seulement été réfléchis en surface, c'est-à-dire qui n'ont jamais pénétré dans la particule et qui sont décrits par le coefficient de réflexion de Fresnel. Par réflexions multiples, ils peuvent être renvoyés dans n'importe quelle direction de l'espace, indépendamment de la direction d'incidence du rayonnement. Ces rayons contribuent à la réflexion spéculaire, par opposition aux rayons issus de la réflexion volumique, c'est-à-dire qui ont été transmis une ou plusieurs fois à travers une ou plusieurs particules. Les chemins ④ et ⑤ montrent des rayonnements volumiques qui sortent de la surface avec un angle indépendant de l'angle d'incidence.

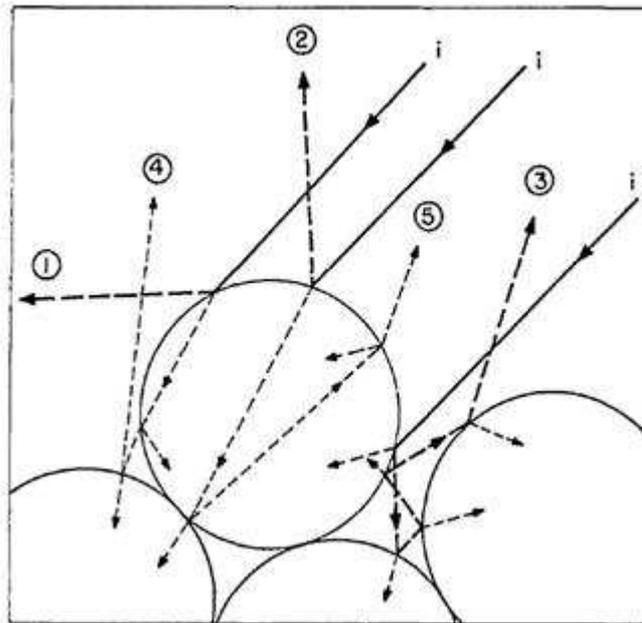


Figure 1.7 : Interactions entre le rayonnement électromagnétique et les particules d'une surface rugueuse. Les lignes en trait plein (i) représentent les rayons incidents, les lignes (1) à (3) la réflexion spéculaire et les tirets (4) et (5) la réflexion de volume. Les lignes pointillées correspondent au rayonnement absorbé par les particules (Vincent & Hunt, 1968).

La réflectance totale montre une prédominance du comportement spéculaire ou volumique selon les propriétés d'absorption du milieu. Ces deux types de réflexions produisent des variations spectrales opposées : comme l'expliquent Vincent & Hunt (1968), une forte absorption produit un maximum de réflexion spéculaire et un minimum de réflexion de volume. Les deux sous-sections suivantes détaillent ce dernier point.

Réflexion spéculaire - La réflexion spéculaire est caractérisée par les deux coefficients de Fresnel, qui tiennent compte de l'angle d'incidence et des indices de réfraction complexes des milieux (Section 3.1.3). Ces coefficients montrent que plus le coefficient d'absorption est élevé, plus la réflexion spéculaire est importante. La Figure 1.8 illustre ce phénomène. Il peut sembler contradictoire qu'une augmentation d'absorption engendre une augmentation de réflexion. On peut l'expliquer par les phénomènes mis en jeu à l'échelle microscopique, quand une onde électromagnétique interagit à l'interface entre deux milieux : le champ incident qui induit des dipôles et des courants à la surface génère un rayonnement qui se propage dans deux directions depuis la surface (directions incidente et opposée). L'onde induite se propage dans la direction de la source (direction opposée à la direction d'incidence) et constitue la lumière réfléchie. Celle qui se propage dans la direction d'incidence se combine de façon cohérente avec le champ incident et réduit l'intensité du champ transmis. Si l'absorption est faible, les moments des dipôles induits sont relativement petits : l'intensité du rayonnement généré est donc faible, si bien que la réflectance est faible et la transmittance élevée. Au contraire, si l'absorption est forte, les dipôles et l'intensité du rayonnement généré sont élevés, ce qui conduit à une forte valeur de réflectance. La plupart du rayonnement est réfléchi plutôt qu'absorbé, conséquence de la capacité des charges de surface à se réarranger de façon à empêcher le champ incident de pénétrer dans le second milieu (Hapke, 1993).

On dira d'un matériau qu'il est purement spéculaire s'il a une surface lisse qui renvoie tout le rayonnement dans une direction définie par les coefficients de Fresnel. C'est typiquement le cas d'un matériau lisse et opaque (transmission nulle, coefficient d'absorption très élevé). On considère qu'un matériau est très fortement absorbant lorsque $k \geq 0,1$. Plus le coefficient d'absorption k est élevé, plus le champ induit est important. Ainsi à un coefficient d'absorption élevé est associé un champ réfléchi E_r important et un champ transmis E_t faible (on rappelle que $r + t = 1$). La réflexion est ici un phénomène de surface uniquement.

Notons que ceci ne s'observe que localement, autour de la longueur d'onde de résonance λ_0 (maximum d'absorption). En effet, la bande d'absorption est large et, sur cette largeur spectrale, l'absorption n'est pas suffisamment importante pour créer un pic de réflexion. En réflectance, on observe donc deux minima autour d'un maximum (au centre de la bande), ce qui caractérise le passage d'une réflexion volumique à une réflexion spéculaire forte en passant par une réflexion spéculaire faible (au niveau des minima) (Figure 1.8).

Réflexion de volume - Lorsque le coefficient d'absorption est faible ou négligeable devant la partie réelle de l'indice de réfraction, le rayonnement transmis à l'interface est important. Ce rayonnement est ensuite en partie absorbé par la particule et en partie transmis. Le champ transmis par la particule est d'autant plus faible que l'absorption est forte (loi de Beer-Lambert). Par des jeux de réflexion sur d'autres particules, il peut être réfléchi dans la direction du milieu d'incidence. Il s'agit d'un champ réfléchi volumiquement qui est inversement proportionnel au coefficient d'absorption, contrairement au champ réfléchi spéculairement. Ce type de réflexion

qui dépend de nombreux paramètres (taille des particules, rugosité de surface, densité des particules à l'intérieur du matériau, etc.) est un phénomène de volume où l'épaisseur du matériau entre en ligne de compte.

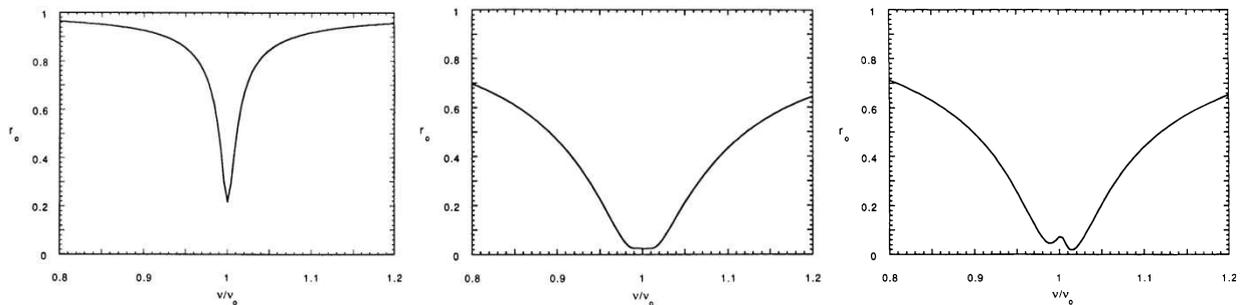


Figure 1.8 : Formes typiques de la réflectance d'un matériau autour d'une bande d'absorption de plus en plus forte (de gauche à droite). Le centre de la bande est en ν_0 . Le maximum local observé dans la figure la plus à droite est un pic de réflexion spéculaire (Hapke, 1993).

Prédominance de la réflexion spéculaire ou volumique - La prédominance d'un comportement sur l'autre (surfactive ou volumique) dépend non seulement du niveau d'absorption mais aussi de la taille et de l'arrangement des particules. Un exemple est donné par un phénomène nommé « effet cavité » qui résulte de réflexions multiples en surface, réduisant ainsi la fraction de réflexion spéculaire au profit de la réflexion de volume. La Figure 1.9 illustre la variation de la réflexion spéculaire en fonction de la taille de grains de calcite, dans une bande d'absorption forte autour de $7 \mu\text{m}$ (le minimum de transmission 'in KBr disc' correspond au maximum d'absorbance).

Bien que les lois de l'optique géométrique soient continues sur tout le domaine optique, les phénomènes décrits varient du VNIR-SWIR au MWIR et du MWIR au TIR, à cause des fluctuations du coefficient d'absorption et du paramètre de taille X . Certains de ces effets qui sont négligeables dans le VNIR-SWIR, comme la réflexion spéculaire, ne le sont plus dans le MWIR ou le TIR. Ceci est illustré dans la Section 2.7.

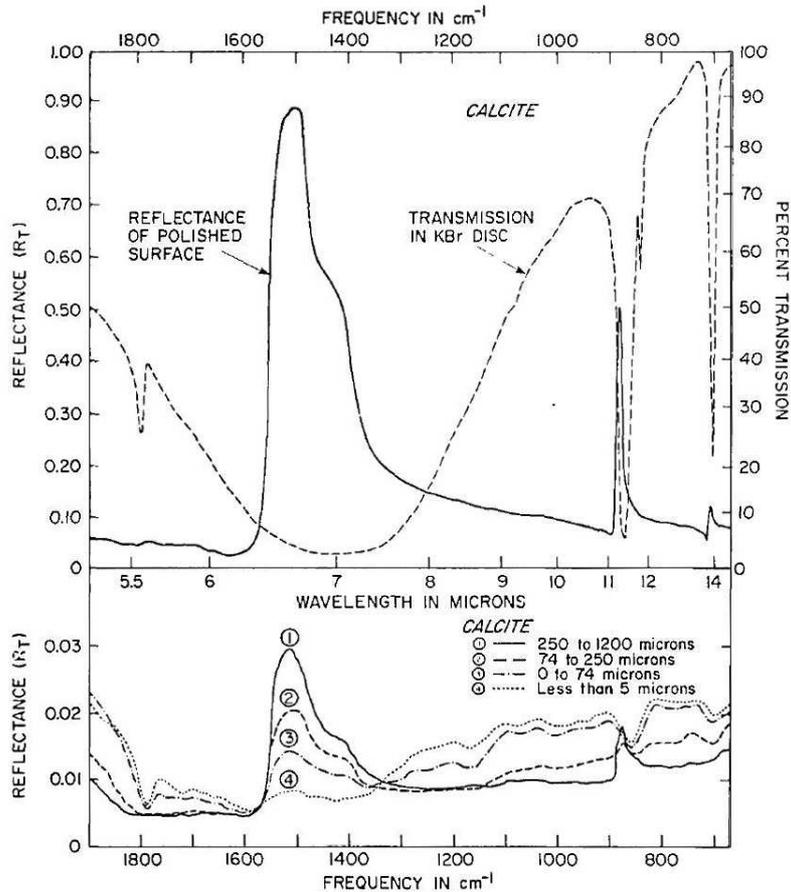


Figure 1.9 : Prédominance de la réflexion spéculaire ou volumique sur de la calcite. Haut : spectres de réflectance et de transmission d'un échantillon poli. Bas : spectres de réflectance de surfaces mates constituées de poudres de différentes granulométries (Vincent & Hunt, 1968).

Grandeurs mesurables

Réflectance, transmittance et absorptance - Tout objet semi-transparent a une réflectance ρ , une transmittance τ et une absorptance a , liées par $\rho + \tau + a = 1$ en raison de la loi de conservation de l'énergie. Ces trois grandeurs sont définies comme étant les fractions respectives de rayonnement réfléchi, transmis et absorbé par le matériau et sont comprises entre 0 et 1. La réflectance globale d'une feuille résulte de l'ensemble des réflexions volumique et spéculaire du flux incident sur chacune des particules constituant la feuille. Elle est détaillée et modélisée dans le Chapitre 3. La transmittance d'un matériau semi-transparent d'épaisseur E est donnée par la loi de Beer-Lambert $\tau(\theta, E) = \exp\left(-\frac{aE}{\cos\theta}\right)$ où θ est l'angle d'incidence sur le matériau et l'absorptance a est fonction des coefficients spécifiques d'absorption et de la concentration de chaque composant biochimique du matériau (combinaison linéaire, voir Section 3.1.3).

Emissivité

L'émissivité ε est une grandeur comprise entre 0 et 1 qui caractérise la capacité d'un corps à émettre un rayonnement électromagnétique. Selon la loi de Kirchhoff, un corps en équilibre thermodynamique émet autant qu'il absorbe, soit $\varepsilon = a$, ou $\varepsilon = 1 - \rho - \tau$ pour un objet semi-transparent. Salisbury et al. (1994) montrent que cette loi s'applique à la quasi-totalité des matériaux à la surface de la Terre, elle est donc valable pour les feuilles de plantes. Pour des corps opaques, $\tau = 0$ et on retrouve bien que $\varepsilon = 1 - \rho$. Ainsi on trouve dans la littérature aussi bien des représentations de propriétés optiques en terme de réflectance que d'émissivité (plus fréquemment utilisée pour l'infrarouge).

1.2.3. PROPRIETES OPTIQUES

Domaine VNIR-SWIR

Les propriétés optiques des feuilles, qui dépendent à la fois de phénomènes d'absorption et de diffusion, sont bien connues dans le domaine VNIR-SWIR. La Figure 1.10 présente les spectres de réflectance et de transmittance d'une feuille de hêtre entre 0,4 et 2,5 μm .

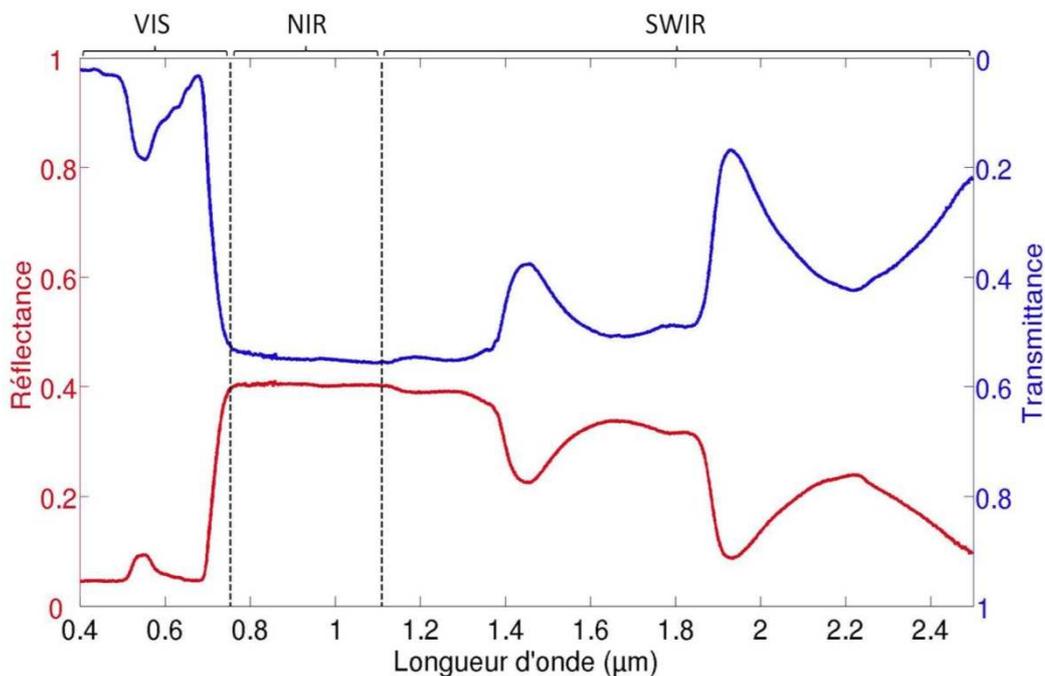


Figure 1.10 : Spectres de réflectance et transmittance d'une feuille de hêtre.

Dans le visible (VIS), jusqu'à 0,8 μm , l'absorption des pigments photosynthétiques domine. La brusque augmentation de réflectance observée autour de 0,7 μm dans une zone communément appelée « red edge » est typique d'une feuille verte et fraîche. Dans le proche-infrarouge (NIR) où l'absorption des composants foliaires est plus faible, les propriétés optiques des feuilles sont principalement influencées par leur structure anatomique. En effet, une forte absorption tend à favoriser la réflexion de surface alors qu'une faible absorption génère plutôt une réflexion de

volume. Ceci s'explique par le fait que, dans les régions de forte absorption, le rayonnement est rapidement absorbé au niveau du parenchyme palissadique alors que dans les régions de faible absorption, il pénètre jusqu'au mésophylle spongieux où il est alors réfléchi de multiples fois (Terashima et al., 2009). Les réflexions multiples tendent à augmenter la réflectance et à diminuer la transmittance, car elles favorisent la diffusion dans la direction arrière par rapport à la direction du rayonnement incident. Ceci est très marqué quand la feuille se dessèche car on observe des changements significatifs dans la compacité des cellules, en particulier la fraction d'espaces intercellulaires (Gausman et al., 1970). Les deux effets, absorption et diffusion, doivent être pris en compte dans la modélisation des propriétés optiques des feuilles. Dans le SWIR, celle-ci dépendent de l'absorption du rayonnement par l'eau et la matière sèche (Jacquemoud, 1992). Par exemple, des minima de réflexion observés sur la Figure 1.10 autour de 1,4 et 1,9 μm sont caractéristiques d'une végétation fraîche, le rayonnement électromagnétique étant absorbé par les molécules d'eau (Figure 1.6, représentation du coefficient spécifique d'absorption de l'eau pure).

Domaine MWIR-TIR

Plus loin dans l'infrarouge, notre connaissance des propriétés optiques de la végétation est beaucoup plus réduite. Les premières valeurs de réflectance des feuilles dans le domaine TIR, à sept longueurs d'onde seulement, ont été publiées en 1952 par Gates & Tantraporn (1952). Cette étude montre que les feuilles âgées réfléchissent plus la lumière entre 3 et 5 μm que les feuilles jeunes. Trente-quatre ans après, Salisbury (1986) offre à la communauté les premiers spectres de réflectance foliaire entre 8 et 14 μm et constate une faible variation avec la sénescence (Figure 1.11). S'ensuivirent en 1988 les mesures de réflectance directionnelle-hémisphérique de Salisbury & Milton (1988) et Elvidge (1988), qui s'intéressent respectivement aux domaines 2,5 - 13,5 μm et 2,5 - 20 μm . En étudiant qualitativement la variabilité des spectres avec le dessèchement des feuilles, ils confirment les premières mesures de Salisbury (1986) pour le domaine 8 - 14 μm et mettent en lumière le fait qu'à des longueurs d'onde inférieures à 6 μm , l'état hydrique de la feuille a une influence sur son spectre de réflectance. Au-delà de 6 μm , il semble que les propriétés optiques dépendent principalement des spécificités de composition de chaque espèce. Narayanan et al. (1991) confirment que la réflectance des feuilles ne varie pas significativement avec leur contenu en eau dans le domaine 9 - 11 μm et que la réflectance d'une feuille sèche est potentiellement plus élevée que la moyenne, mais pour des contenus en eau bien inférieurs au seuil qui caractérise une feuille sèche. Un rapport technique de l'US Navy (Gruninger et al., 1992) fait état des premières mesures conjointes de réflectance et de transmittance de feuilles sèches et fraîches entre 0,3 et 25 μm . On apprend que, contrairement à ce qui était admis, la transmittance des feuilles n'est pas nulle dans le MWIR-TIR et que le statut hydrique dans le MWIR a aussi un impact sur la transmittance et la réflectance. Cette étude n'a malheureusement pas été publiée dans une revue scientifique si bien que la communauté continue de considérer que la transmittance des feuilles est nulle dans ce domaine, aucune autre mesure n'ayant été effectuée depuis.

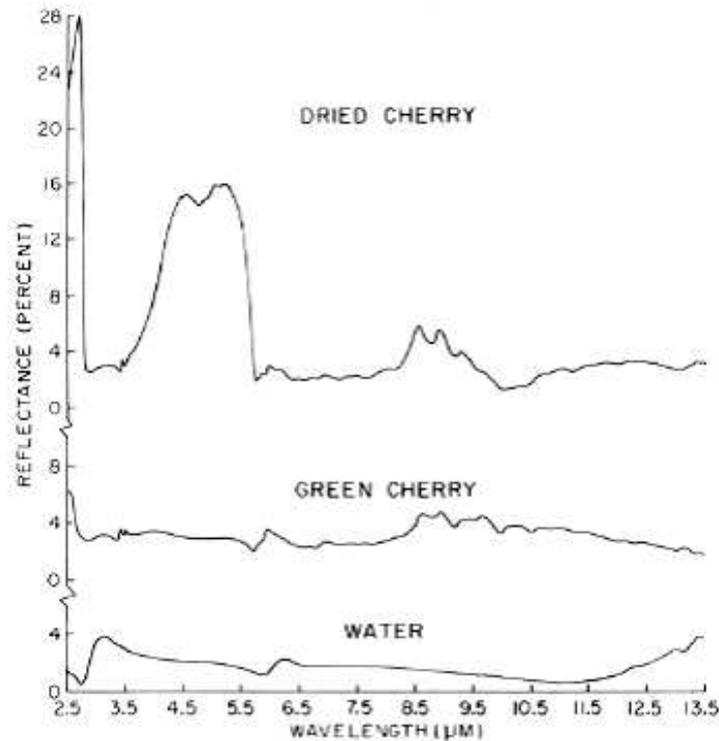


Figure 1.11 : Premiers spectres de réflectance directionnelle-hémisphérique de feuilles de cerisier dans le domaine MWIR - TIR. De haut en bas : réflectance d'une feuille séchée pendant 48h sous un flux d'air chaud (60°C) - réflectance d'une feuille fraîche - réflectance d'une lame d'eau (Salisbury, 1988).

En 2006, l'Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques (ONERA) réalise la première étude reliant quantitativement la réflectance MWIR-TIR et le contenu en eau des feuilles (Fabre et al., 2010). Pour trois types de feuilles (cerisier, sorgho et tournesol), l'enregistrement des spectres de réflectance directionnelle-hémisphérique entre 2,5 et 14 µm a été réalisé à plusieurs stades hydriques, constituant une base d'une vingtaine de spectres. Le lien entre contenu en eau foliaire et amplitude de la réflectance MWIR est confirmé. Par ailleurs, Ribeiro da Luz (2006) et Ribeiro da Luz & Crowley (2007, 2010) ont récemment étudié la réflectance des feuilles dans le MWIR-TIR. Ils confirment qu'elle dépend étroitement de l'espèce et émettent l'idée que le TIR pourrait être exploité en télédétection pour identifier les espèces végétales.

Les propriétés optiques des constituants foliaires sont peu diffusées dans la littérature. La Figure 1.12 présente des spectres d'absorption de la lignine et de la cellulose entre 2,5 et 20 µm (Reeves et al., 2008). On constate des niveaux d'absorption relativement élevés dans le MWIR, avec des pics d'absorption à 2,9, 3,4 et 3,5 µm pour la lignine et 2,9 et 3,4 µm pour la cellulose.

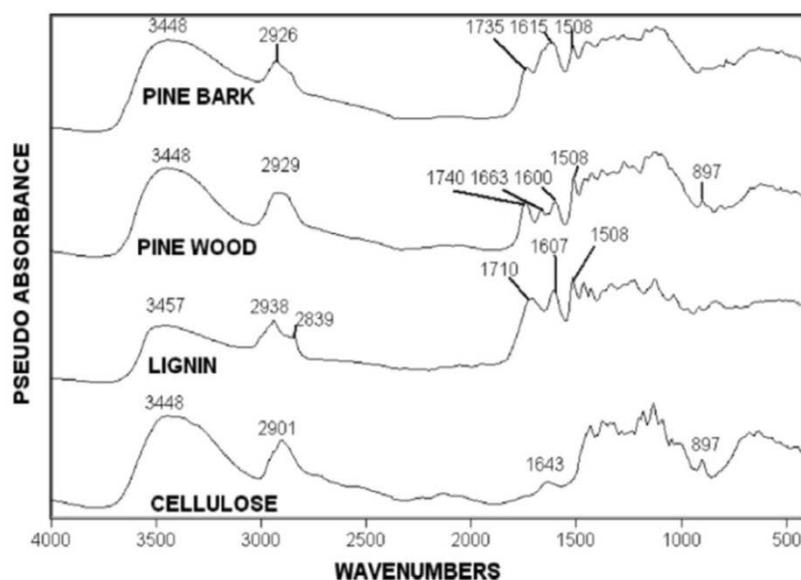


Figure 1.12 : Spectres infrarouges de matériaux de base utilisés pour la production de charbon. Equivalence nombre d'onde/longueur d'onde : $4000 \text{ cm}^{-1} / 2,5 \mu\text{m} - 500 \text{ cm}^{-1} / 20 \mu\text{m}$ (Reeves et al., 2008).

Ces travaux montrent le fort potentiel des fenêtres atmosphériques 3 - 5 μm (MWIR) et 8 - 14 μm (TIR) pour, respectivement, l'étude du contenu en eau de la végétation et la différenciation des espèces végétales. La connaissance réduite des propriétés optiques des feuilles dans le MWIR-TIR ainsi que l'intérêt marqué de la communauté pour la mise en relation du contenu hydrique des feuilles avec leurs propriétés optiques nous incitent à mener une étude prospective et quantitative dans ce sens.

1.2.4. MODELES DE PROPRIETES OPTIQUES DES FEUILLES

Nous décrivons succinctement dans cette partie les principaux modèles de propriétés optiques des feuilles. On se référera à Jacquemoud & Ustin (2009) pour plus de détails. La modélisation des propriétés optiques des feuilles revient à modéliser le transfert radiatif au sein de la feuille. Certains modèles comme LEAFMOD (*Leaf Experimental Absorptivity Feasibility MODeL*, Ganapol, 1998) résolvent directement l'équation de transfert radiatif, mais la plupart des modèles sont des simplifications de cette équation. On citera le modèle PROSPECT (*Leaf Optical Properties Spectra*, Jacquemoud & Baret, 1990) dans lequel la feuille est assimilée à un empilement de couches homogènes qui réfléchit, transmet et absorbe la lumière, ou encore le modèle stochastique SLOP (*Stochastic model for Leaf Optical Properties*, Maier, 1999) dans lequel le transfert radiatif est simulé par une chaîne de Markov. Les propriétés optiques des feuilles peuvent aussi être modélisées par des modèles à N-flux (théorie de Kubelka-Munk), ou par des modèles de lancer de rayons comme Raytran (Govaerts et al., 1996), ce qui nécessite une description détaillée de la feuille telle qu'on l'observe au microscope. Ces modèles sont valables dans le domaine VNIR-SWIR, aucun n'a été développé pour le MWIR et/ou le TIR. Enfin, peu d'entre eux ont été comparés à des données expérimentales ou utilisés de manière

opérationnelle. PROSPECT est à ce jour le modèle le plus largement diffusé dans la communauté scientifique (Jacquemoud et al., 2010) et il a été testé sur un grand nombre de bases de données (Féret et al., 2008). C'est donc sur ce modèle que se basera le travail présenté dans ce manuscrit.

1.3. AU NIVEAU DE LA CANOPEE

1.3.1. ELEMENTS DE STRUCTURE ET TEMPERATURE D'UNE CANOPEE

La feuille, dont le contenu en eau est l'objet de cette étude, est l'élément principal d'un couvert végétal (ou canopée). La réflectance d'une canopée dépend donc non seulement des propriétés optiques des feuilles telles qu'elles ont été décrites dans la section précédente mais aussi de l'architecture de la canopée et de la réflectance du sol. En effet, tout comme l'anatomie de la feuille influence sa réflectance et sa transmittance, l'architecture de la canopée, c'est-à-dire la quantité d'éléments absorbants et diffusants et leur disposition dans l'espace, joue un rôle fondamental sur sa réflectance. Pour caractériser la structure d'un couvert végétal, on définit l'indice foliaire LAI (*Leaf Area Index*) exprimé en m^2/m^2 (ou sans unité) qui correspond à la surface cumulée de feuilles par surface de sol, le paramètre de « hot spot » (rapport entre la hauteur du couvert et la taille des feuilles) qui contrôle la réflectance dans la direction rétro-solaire où les feuilles masquent leur propre ombre, et l'inclinaison des feuilles par rapport à la normale au sol. L'orientation des feuilles varie en fonction du type de végétation et du stade de croissance, elle est décrite par une fonction de distribution des angles foliaires. L'angle foliaire moyen est noté θ_l par la suite. Six distributions types ont été définies par de Wit (1965) et Bunnik (1981) : planophile (feuilles horizontales majoritaires), érectophile (feuilles verticales majoritaires), plagiophile (feuilles inclinées à 45° majoritaires), extrémophile (deux inclinaisons possibles, horizontale et verticale), uniforme (la probabilité d'inclinaison des feuilles est la même quel que soit l'angle d'inclinaison considéré) et sphérique (la fréquence d'occurrence des angles foliaires est égale à celle qu'auraient des feuilles placées à la surface d'une sphère). En fonction du LAI et de l'orientation foliaire, le rayonnement incident est plus ou moins réfléchi par le sol situé sous la canopée. Notons que la température d'une canopée est liée au LAI et à l'orientation foliaire. Une augmentation de la surface de feuilles engendrera une diminution de la surface de résistance à l'évaporation et par conséquent une plus importante transpiration. La température et l'émission du couvert seront donc moindres (Boyd & Curran, 1998). Aussi, une augmentation de la rugosité de la canopée (orientation des feuilles non uniforme) augmente les échanges turbulents d'eau entre les feuilles et l'air, diminuant ainsi la température de surface de la canopée et son émission (Mc Guire et al., 1986).

1.3.2. REFLECTANCE DU SOL

Les propriétés optiques des sols varient en fonction de leur composition minéralogique, de leur humidité de surface et de leur structure. La Figure 1.13 représente des spectres de réflectance directionnelle-hémisphérique de sols tirés de la *Johns Hopkins University (JHU) Spectral Library*

(<http://speclib.jpl.nasa.gov>). On se référera à Lesaignoux (2010) pour une analyse poussée des propriétés optiques des sols en fonction de leur teneur en eau entre 0,4 et 14 μm .

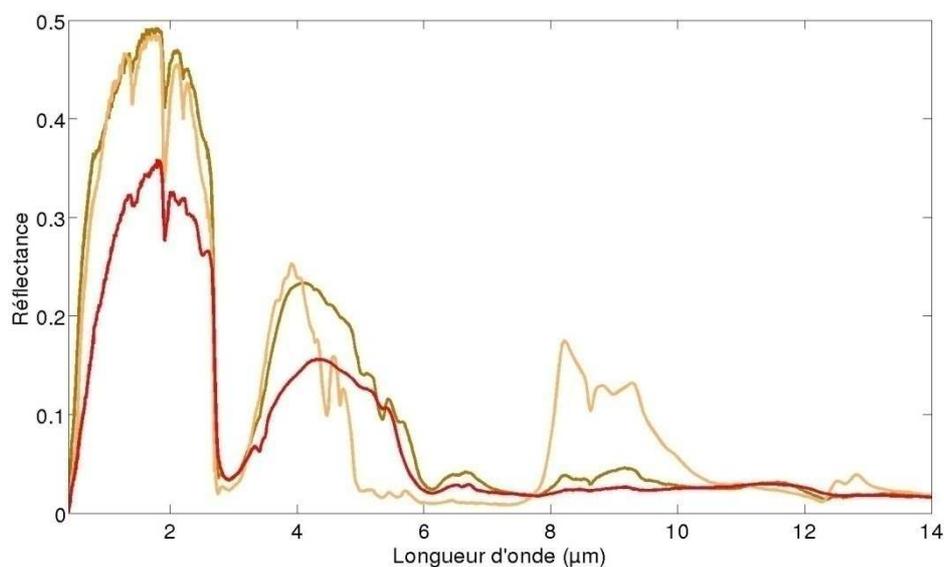


Figure 1.13 : Spectres de réflectance de trois sols de 0,4 à 14 μm . Marron foncé : terreau vaseux brun pale - Marron clair : terreau sableux brun-rouge – Rouge : terreau pierreux marron-noir. Source : JHU spectral library.

Les sols dont les réflectances sont représentées ci-dessus seront utilisés pour les simulations présentées dans la suite du manuscrit.

1.3.3. REFLECTANCE DE LA CANOPEE

Domaine VNIR-SWIR

On retrouve dans ce domaine l'influence des paramètres foliaires, auxquels s'ajoute la signature des variables de la canopée. Outre la biochimie de la feuille, le LAI est le paramètre dont l'effet sur la réflectance des couverts végétaux est le plus important. La Figure 1.14 représente la réflectance de canopées pour différents LAI et contenus en eau foliaire.

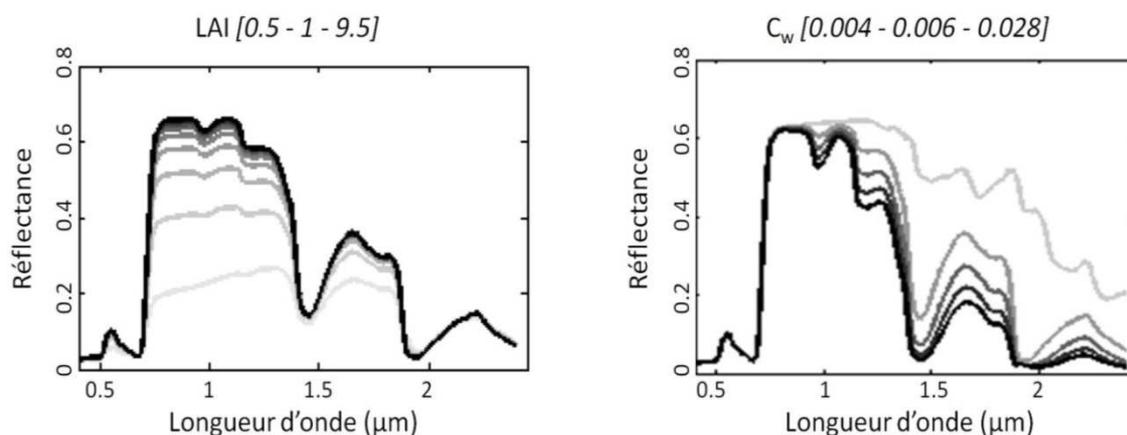


Figure 1.14 : Influence du LAI (gauche) et du contenu en eau foliaire (droite) sur la réflectance d'une canopée. Entre crochets sont indiqués la valeur minimum, le pas et la valeur maximum. Les valeurs les plus élevées correspondent aux courbes les plus foncées. D'après Féret (2009).

On constate que ces deux paramètres influencent la réflectance dans le SWIR alors que seul le LAI modifie la réflectance dans le NIR. Par ailleurs, moins la canopée est dense (plus le LAI est faible), plus l'influence du sol est grande. La géométrie de mesure (positions du soleil et du capteur) et les autres paramètres structuraux de la canopée (orientation foliaire) peuvent aussi modifier l'interprétation de la réflectance du couvert en terme de biochimie foliaire (Féret, 2009).

Domaine MWIR-TIR

On dispose de très peu de spectres de réflectance de canopée dans le MWIR. Les bibliothèques spectrales de la JHU, de l'USGS (United States Geological Survey) et de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) en contiennent quelques exemples (Figure 1.15).

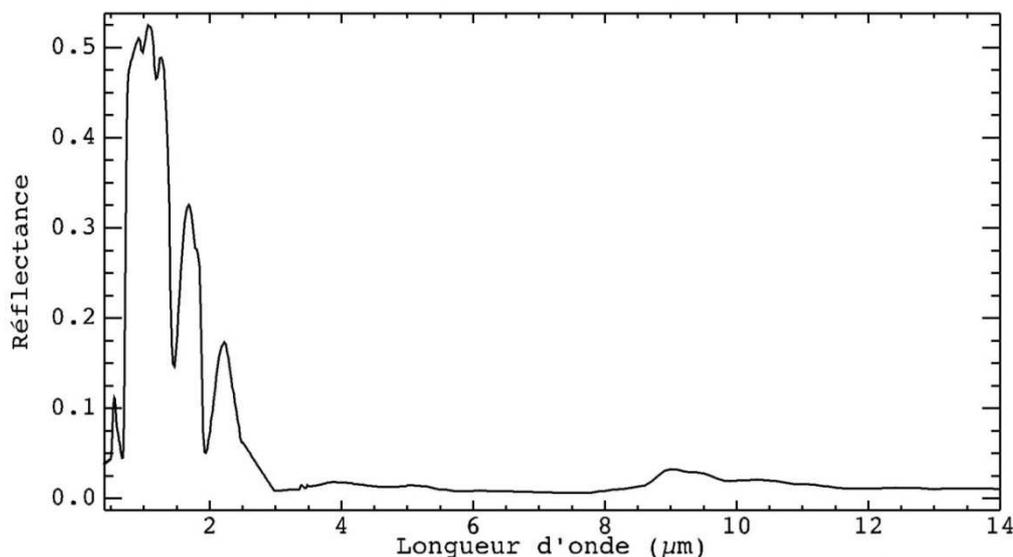


Figure 1.15 : Spectre de réflectance d'herbe fraîche (JHU spectral library).

Les spectres d'émissivité de canopée dans le TIR sont un peu mieux connus. Ribiero da Luz & Crowley (2010) ont mis en évidence le potentiel de la télédétection aéroportée dans le MWIR pour déterminer les espèces végétales. La dépendance des propriétés optiques des feuilles dans le TIR à l'espèce se traduit donc au niveau de la canopée. Par ailleurs, Olioso et al. (2007) notent un manque de connaissance de l'émissivité des végétaux dans le MWIR lors d'une étude sur les caractéristiques spectrales et thermiques d'une canopée en cours de dessèchement.

1.3.4. MODELES DE PROPRIETES OPTIQUES DES CANOPEES

Tout comme à l'échelle de la feuille, le transfert radiatif peut être simulé à l'échelle de la canopée par plusieurs types de modèles pour calculer des réflectances ou des luminances. Les modèles à N-flux, qui découlent de la théorie de Kubelka-Munk, assimilent le couvert végétal à des couches horizontales parallèles et homogènes d'éléments (les feuilles) absorbants et diffusants. C'est le cas du modèle SAIL (Verhoef, 1984), valable dans le VNIR-SWIR, et

récemment étendu à tout le domaine optique du VNIR au TIR dans sa version 4SAIL (Verhoef et al., 2007). D'autres modèles dits hybrides sont basés à la fois sur les équations de transfert radiatif et sur une description géométrique de la scène en éléments simples, eux-mêmes absorbants et homogènes. Le modèle hybride 3D-DART (Gastellu-Etchegorry et al., 1996) permet ainsi de simuler les propriétés optiques de couverts hétérogènes sur l'ensemble du domaine optique. D'autres modèles sont purement géométriques (Otterman & Weiss, 1984) ou utilisent des techniques de lancer de rayons (Govaerts, 1996) pour simuler la propagation du rayonnement électromagnétique dans un couvert végétal. Parmi tous ces modèles, SAIL se distingue par sa simplicité, sa précision et son nombre limité de variables d'entrée. Aussi est-il très largement utilisé dans le domaine VNIR-SWIR et est particulièrement efficace pour la simulation des propriétés optiques des couverts homogènes, en couplage avec le modèle de feuilles PROSPECT. C'est ce modèle que nous utiliserons par la suite.

1.4. AU NIVEAU DU CAPTEUR

1.4.1. EQUATION DE LA LUMINANCE EN ENTREE DU CAPTEUR PAR DOMAINE SPECTRAL

Comme schématisé sur la Figure 1.17, la luminance enregistrée par un capteur dépend des propriétés de la scène visée mais aussi de l'éclairement et des propriétés physico-chimiques de la couche atmosphérique traversée par le rayonnement électromagnétique (Chapitre 3). L'équation du transfert radiatif, ou équation de la luminance en entrée du capteur, exprime la luminance en fonction des propriétés optiques de ces trois éléments : scène, éclairement et atmosphère. Elle s'écrit pour chaque longueur d'onde et des simplifications apparaissent selon le domaine spectral considéré. La Figure 1.16 montre les rayonnements dont la somme constitue la luminance enregistrée dans le VNIR-SWIR et dans le TIR. Comme nous l'avons mentionné en 1.1.2, la source d'éclairement est le Soleil dans le domaine VNIR-SWIR alors que dans le TIR, les sources sont les émissions terrestre et atmosphérique. La luminance est fonction de la réflectance de la canopée, elle-même dépendante du contenu en eau de la végétation.

Nous détaillons ci-dessous les équations du transfert radiatif des domaines VNIR-SWIR, MWIR et TIR pour comprendre l'intérêt et les limites de chacun de ces domaines pour retrouver la réflectance. On définit tout d'abord les équations du VNIR-SWIR et TIR, puis ensuite celle du MWIR, combinaison des deux premières. Ces équations sont valables pour des surfaces planes, homogènes et lambertiennes (Chandrasekhar, 1960).

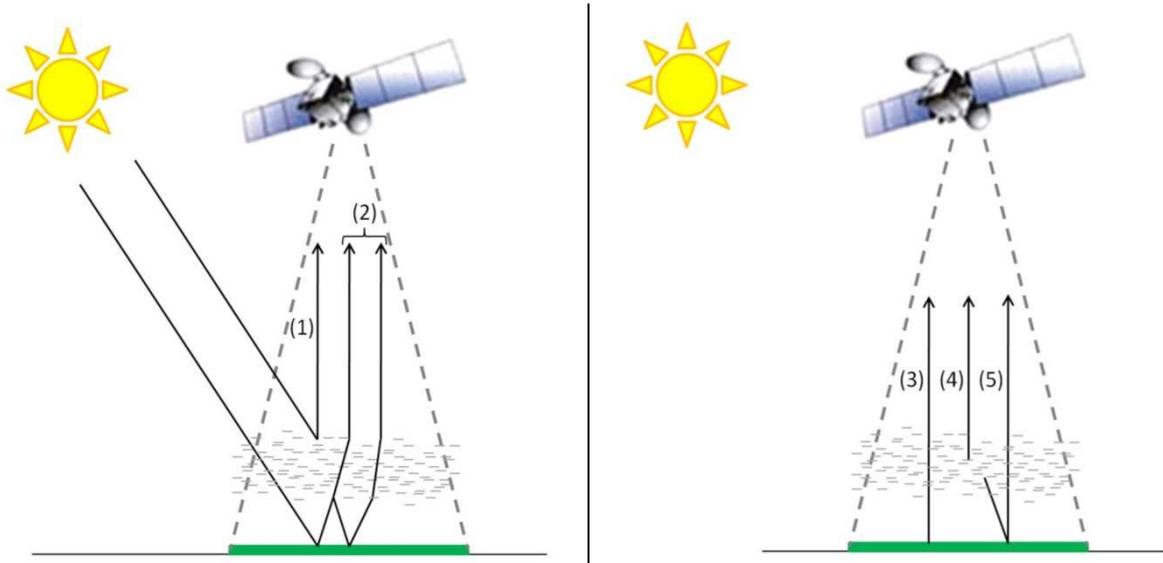


Figure 1.16 : Signal en entrée du capteur : à gauche dans le VNIR- SWIR, à droite dans le TIR. Les termes sont décrits plus bas. Le nuage de pointillés symbolise l'atmosphère.

VNIR-SWIR (émission solaire)

La luminance en entrée du capteur $L^{Capteur}$ dans le domaine VNIR-SWIR est définie par

$$L^{Capteur}(\lambda) = L_{Sc}^{\uparrow}(\lambda) + \frac{E_{Sc}^{Sfc}(\lambda)}{\pi} \frac{\rho(\lambda)}{1 - \rho(\lambda)S^{Atm}(\lambda)} T^{\uparrow}(\lambda) \quad (1.1)$$

où λ la longueur d'onde, $\rho(\lambda)$ la réflectance de la surface que l'on cherche à déterminer, $T^{\uparrow}(\lambda)$ la transmittance atmosphérique totale vers le haut (directe et diffuse), $E_{Sc}^{Sfc}(\lambda)$ l'éclairement descendant total, $L_{Sc}^{\uparrow}(\lambda)$ la luminance atmosphérique en diffusion multiple (luminance des photons rétrodiffusés par l'atmosphère et non réfléchis par le sol) et $S^{Atm}(\lambda)$ l'albédo atmosphérique qui engendre des réflexions multiples entre le sol et l'atmosphère. On retrouve sur la Figure 1.16 le terme $L_{Sc}^{\uparrow}(\lambda)$, symbolisé par la trajectoire (1) et le terme $\frac{E_{Sc}^{Sfc}(\lambda)}{\pi} \frac{\rho(\lambda)}{1 - \rho(\lambda)S^{Atm}(\lambda)} T^{\uparrow}(\lambda)$, symbolisé par les flèches (2) (avec ou sans réflexions multiples entre le sol et l'atmosphère).

TIR (émission terrestre)

La luminance dans le domaine TIR est définie par

$$L^{Capteur}(\lambda, \theta) = L_{Th}^{\uparrow}(\lambda) + \frac{E_{Th}^{Sfc}(\lambda)}{\pi} \rho(\lambda) T^{\uparrow}(\lambda) + (1 - \rho(\lambda)) L_{CN}(\lambda, \theta) T^{\uparrow}(\lambda) \quad (1.2)$$

où θ est la température de surface du sol, $L_{Th}^{\uparrow}(\lambda)$ et E_{Th}^{Sfc} sont respectivement la luminance atmosphérique montante (flèche (4) sur la Figure 1.16) et l'éclairement descendant au sol

(flèche (5)), dus à l'émission thermique uniquement. $L_{CN}(\lambda, \theta)$ est la luminance émise par un corps noir à la température θ . $L_{CN}(\lambda, \theta)$ est définie par la loi de Planck (Warner et al., 2009)

$$L_{CN}(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda\theta}\right) - 1} \quad (1.3)$$

où $c \approx 3.10^8 m.s^{-1}$ (vitesse de la lumière dans le vide), $h = 6,62617.10^{-34} J.s$ (constante de Planck) et $k = 1,38066.10^{-23} J/K$ (constante de Boltzmann). Le dernier terme $(1 - \rho(\lambda))L_{CN}(\lambda, \theta)T^\uparrow(\lambda)$ correspond donc au flux provenant de l'émission terrestre (flèche (3)).

MWIR (émissions solaire et terrestre)

Dans le MWIR, les rayonnements émis par la Terre et l'atmosphère et le rayonnement solaire réfléchi par la Terre se combinent rendant l'équation de transfert radiatif plus complexe :

$$\begin{aligned} L^{Capteur}(\lambda, \theta) &= L^{Atm}(\lambda) + L^{Sfc}(\lambda) \\ &= L_{Sc}^{Atm}(\lambda) + L_{Th}^{Atm}(\lambda) + L_{Sc}^{Sfc}(\lambda) + L_{Th}^{Sfc}(\lambda, \theta) \\ &= L_{Sc}^\uparrow(\lambda) + L_{Th}^\uparrow(\lambda) + \frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}(\lambda)}{\pi} \frac{\rho(\lambda)}{1 - \rho(\lambda)S^{Atm}(\lambda)} T^\uparrow(\lambda) \\ &\quad + (1 - \rho(\lambda))L_{CN}(\lambda, \theta)T^\uparrow(\lambda) \end{aligned} \quad (1.4)$$

Nous avons bien sûr

$$E_{Sc,Th}^{Sfc} = E_{Sc}^{Sfc} + E_{Th}^{Sfc}. \quad (1.5)$$

On retrouve l'ensemble des contributions apparaissant dans la Figure 1.16. Cette équation servira au Chapitre 4 à retrouver la réflectance à partir de la luminance mesurée par le capteur. Ceci constituera la première étape d'inversion conduisant à l'estimation du contenu en eau de la végétation.

1.4.2. CAPTEURS ET EFFETS SUR LE SIGNAL

Le capteur échantillonne un spectre de luminance sur un grand nombre de canaux spectraux et transforme ainsi le rayonnement reçu en données numériques exploitables. La mesure au canal i est obtenue par filtrage de la luminance monochromatique incidente selon

$$L_i^{Capteur} = \int_0^\infty L^{Capteur}(\lambda) H_i(\lambda) d\lambda + b_i, \quad (1.6)$$

où $L_i^{Capteur}$ est la luminance mesurée au canal i , $H_i(\lambda)$ est la réponse instrumentale normalisée au canal i , et b_i représente le bruit de mesure au canal i (en $W/(m^2.sr.\mu m)$). Le signal en entrée du capteur est donc plus ou moins dégradé en fonction de sa résolution radiométrique et spectrale. La résolution spectrale est la largeur spectrale sur laquelle le rayonnement est intégré.

Selon le nombre, la position et la largeur des bandes spectrales, on parle de capteur multispectral ou hyperspectral. Un capteur hyperspectral comportera typiquement une centaine de bandes spectrales étroites et contiguës. Il existe très peu de caméras multi ou hyperspectrales MWIR sur le marché. On retiendra la caméra Hyper-Cam de la société Telops (<http://www.telops.com>), le capteur aéroporté AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*) de Argon St (<http://argonst.com>) et le capteur aéroporté SEBASS (*Spatially Enhanced Broad-band Array Spectrograph System*) du Lunar and Planetary Institute (Kirkland et al., 2002). Hyper-Cam a une résolution de 40 nm et un bruit de l'ordre de 0,0016 W/(m².sr.µm). Le capteur AHS, principalement développé pour l'INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial), possède 7 bandes larges dans le MWIR et a un bruit de l'ordre de 0,02 W/(m².sr.µm). Il a servi lors de plusieurs campagnes aéroportées organisées par l'ESA pour étudier la végétation (AGRISAR, SEN2FLEX) et de nombreuses données sont disponibles. SEBASS est un spectro-imageur qui possède 256 bandes spectrales réparties dans deux domaines, le MWIR et le TIR, avec une résolution spectrale de 0,088 µm et un rapport signal sur bruit de 3098 à 11 µm. Les caractéristiques techniques de ces capteurs sont détaillées en Annexe 1.

1.5. EXPLOITATION DES MESURES DE TELEDETECTION POUR L'ESTIMATION DU CONTENU EN EAU DE LA VEGETATION : ETAT DE L'ART

1.5.1. LARGE EXPLOITATION DU DOMAINE VNIR-SWIR

Les propriétés optiques de la végétation dans le domaine VNIR-SWIR ont été beaucoup étudiées au cours des dernières décennies et de nombreuses méthodes ont été développées pour estimer le contenu en eau de la végétation à partir de mesures de réflectance à différentes échelles. Compte tenu de l'orientation choisie pour cette thèse, nous faisons dans cette section un état de l'art des méthodes basées sur l'utilisation d'indices spectraux ou l'inversion de modèle de propriétés optiques de la végétation. Notons que d'autres études basées par exemple sur des analyses statistiques ont été menées (Gao & Goetz, 1995 ; Roberts et al., 1998 ; Pinzon et al., 1998 ; Sanderson et al., 1998 ; Ustin et al., 1998 ; Champagne et al., 2003).

Nous avons montré qu'au niveau de la feuille et a fortiori au niveau du couvert végétal, un nombre important de facteurs participent à l'élaboration de la réflectance : structure interne de la feuille, angle de visée, etc. et, *last but not least*, le LAI. Ces facteurs rendent plus ardu l'interprétation de l'information biochimique véhiculée par la réflectance du couvert. Il a cependant été montré qu'un choix judicieux des domaines spectraux pouvait aider à différencier les contributions de chacun. Gao & Goetz (1990), Fourty & Baret (1998) et Sims & Gamon (2003) ont en effet mis en évidence que le contenu en eau des feuilles influençait fortement la réflectance de la canopée dans le SWIR à 1,72 µm, 1,15 - 1,26 µm et 1,52 - 1,54 µm. Cependant, le LAI qui a une influence non négligeable dans ces domaines spectraux masque la contribution de l'eau (Cohen, 1991; Riggs & Running, 1991). L'utilisation conjointe des propriétés optiques du domaine NIR, peu dépendante de la présence d'eau mais très sensible au LAI permet de mieux contraindre la détermination du contenu en eau. Ainsi, la détermination

du contenu en eau de la végétation à partir d'un spectre de réflectance se fait principalement par l'exploitation des domaines NIR et SWIR.

Plusieurs indices spectraux sensibles au contenu en eau global de la canopée, produit du LAI par le contenu en eau d'une feuille (g/cm^2), ont été publiés (Ceccato et al., 2002 ; Strachan et al., 2002). Dawson et al. (1999) et Serrano et al. (2000) ont montré l'efficacité d'indices basés sur les bandes d'absorption de l'eau à 0,97 et 1,24 μm . Le Tableau 1.2 présente les principaux indices spectraux utilisés pour déterminer le contenu en eau des feuilles à partir de mesures effectuées à l'échelle de la canopée. Pour chacun de ces indices, on retrouve l'utilisation d'une valeur de réflectance à une longueur d'onde où elle est sensible à la présence d'eau (SWIR) et à une longueur d'onde où elle ne l'est pas (NIR).

Tableau 1.2 : Principaux indices spectraux utilisés pour estimer le contenu en eau de la végétation. D'après Colombo et al. (2008).

Indice	Formule	Référence
WI	$\frac{\rho_{900}}{\rho_{970}}$	Peñuelas et al. (1993)
NDWI	$\frac{\rho_{860} - \rho_{1240}}{\rho_{860} + \rho_{1240}}$	Gao (1996)
SRWI	$\frac{\rho_{860}}{\rho_{1240}}$	Zarco-Tejada et al. (2003)
NDII	$\frac{\rho_{819} - \rho_{1600}}{\rho_{819} + \rho_{1600}}$	Hardinsky et al. (1983)
MSI	$\frac{\rho_{1600}}{\rho_{819}}$	Hunt & Rock (1989)
NDVI	$\frac{\rho_{895} - \rho_{675}}{\rho_{895} + \rho_{675}}$	Serrano et al. (2000)

La modélisation de la réflectance spectrale des couverts végétaux grâce à des modèles de transfert radiatif a donné lieu à de nombreux travaux. Dans le sens direct, ils permettent d'étudier la sensibilité de la réflectance à leurs variables d'entrée. L'utilisation de ces modèles en mode inverse (Sections 1.2.4 et 1.3.4) permet de déterminer quantitativement des informations sur la biochimie de la végétation, en particulier le contenu en eau de la canopée (Jacquemoud et al., 1995 ; Fourty & Baret, 1998 ; Ustin et al., 1998 ; Ceccato et al., 2002 ; Zarco-Tejada et al., 2003 ; Kötz et al., 2004 ; Toomey & Vierling, 2006). On retiendra le modèle PROSAIL issu du couplage entre les modèles PROSPECT et SAIL (Jacquemoud et al., 2010). Néanmoins, malgré le fait que ces modèles soient multivariés, il est difficile de dissocier le LAI du contenu en eau des feuilles et c'est donc le contenu en eau global de la canopée qui est préférentiellement estimé (Fourty & Baret, 1998).

Colombo et al. (2008) comparent les approches physique (modélisation) et semi-empirique (indices spectraux) pour déterminer le contenu en eau de la végétation, à l'échelle de la feuille

et de du couvert végétal, par télédétection multi et hyperspectrale dans le VNIR-SWIR. Plusieurs indices spectraux sont comparés au modèle PROSAIL : il ressort que les deux méthodes offrent des résultats assez proches pour la détermination du contenu en eau de la canopée. Mais, pour un même contenu en eau de la canopée, il reste difficile de différencier une canopée éparsée et fraîche d'une canopée dense et plutôt sèche. La détermination du contenu en eau des feuilles, bien que plus précise par la méthode empirique, peut être encore grandement améliorée, et une trop forte sensibilité au LAI persiste.

Ainsi, bien que largement exploité, pour l'étude de la végétation par télédétection, le domaine VNIR-SWIR ne permet pas à lui seul d'expliquer toute la biochimie de la végétation et d'estimer notamment le contenu en eau des feuilles.

1.5.2. FORT POTENTIEL MAIS FAIBLE EXPLOITATION DU DOMAINE MWIR

Bien que les premières données sur les propriétés optiques de la végétation dans le MWIR mettent clairement en évidence le potentiel de ce domaine spectral pour l'estimation du contenu en eau de la végétation, celui-ci n'a jusqu'à présent pas ou peu été exploité (Boyd & Petitcolin, 2004). Ceci est probablement lié à la complexité du signal enregistré, comme le montre l'Equation 1.4 de transfert radiatif. L'éclairement solaire et thermique, phénomènes de réflexion et d'émission s'y combinent et le système est sous-déterminé (il y a plus d'inconnues que d'équations). En supposant que l'éclairement et les conditions atmosphériques sont connus, par exemple via des données météorologiques, il reste toujours deux inconnues dans l'équation de la luminance en entrée du capteur : la réflectance et la température de la surface. Compte tenu de la composante due à la réflexion de l'éclairement solaire dans l'Equation 1.4, la plupart des méthodes de séparation de l'émissivité et de la température (TES, *Temperature Emissivity Separation*, Borel, 2003) ne peut être utilisée dans le MWIR. Une méthode de séparation de la température et de la réflectance de la scène a été proposée par Muschkin et al. (2005) pour le capteur MTI (*Multispectral Thermal Imager*) qui dispose de deux bandes spectrales larges dans le MWIR (autour de 3,81 μm et de 4,97 μm), mais cet algorithme n'est valable que pour des mesures nocturnes, lorsqu'on s'affranchit de l'éclairement solaire. D'autres méthodes, établies pour le capteur AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) ne possédant qu'une bande dans le MWIR permettent une séparation de la réflectance et de la température en utilisant plusieurs mesures, de jour et de nuit (Li & Becker (1993), Nerry et al. (1998)) ou en utilisant des données du TIR pour déterminer la température (Kaufman & Remer (1994), Roger & Vermote (1998)). Petitcolin & Vermote (2002) ont développé une méthode permettant de retrouver la réflectance d'une scène vue par le capteur multispectral MODIS (Annexe 1), basée sur plusieurs mesures de jour et de nuit. La plupart de ces méthodes présupposent une connaissance des contributions atmosphériques. Kanani (2005) et Cheng et al. (2011) proposent des extensions dans le MWIR d'algorithmes TES initialement développés pour le TIR. Ces algorithmes (Borel, 2008 et Cheng, 2010) se basent sur un critère de douceur spectrale pour estimer l'émissivité et la température d'une surface. Borel (2008) a en effet constaté que les spectres d'émissivité estimés avec une mauvaise température de surface présentent des artefacts

dus à l'absorption des gaz atmosphériques. Lorsque la température est correcte, il n'y a pas de signature atmosphérique dans le spectre d'émissivité et il est donc plus lisse. Cheng et al. (2011) se basent sur le domaine spectral 4,7 - 5 μm pour estimer la température de surface, ensuite utilisée pour retrouver le spectre de réflectance sur le domaine 3,3 - 5 μm . Les résultats présentés sont encourageants mais ne seront pas exploités dans cette thèse compte tenu de la date de publication de ces travaux. Nous fournissons dans le Chapitre 4 les premiers éléments d'une méthode d'inversion du signal adaptée aux capteurs hyperspectraux qui permet, l'atmosphère étant supposée connue, de retrouver conjointement la réflectance et la température depuis une unique mesure de luminance dans le MWIR, en exploitant la combinaison des deux types de signaux, réfléchis et émis. Ceci apporte en fait une contrainte supplémentaire au problème et ouvre des possibilités quant à l'exploitation des données de ce domaine spectral, notamment pour l'estimation du contenu en eau de la végétation.

1.6. ORIENTATION DE LA THESE

Ce premier chapitre a présenté les éléments permettant de retrouver le contenu en eau de la végétation à partir de mesures de luminance de canopée. La Figure 1.17 propose une synthèse de cette chaîne. La lecture du diagramme en mode direct (de gauche à droite, flèches oranges) permet la modélisation de la luminance à partir des propriétés biochimiques des feuilles. Une utilisation en mode inverse, c'est-à-dire l'inversion de l'équation de la luminance, permet de retrouver les propriétés optiques puis les propriétés biochimiques de la végétation. Compte tenu du potentiel du MWIR pour l'estimation du contenu en eau de la végétation par télédétection, nous nous attacherons à développer la chaîne de modélisation dans ce domaine spectral, tout d'abord en mode direct (Chapitre 3), puis en mode inverse (Chapitre 4).

Afin de pouvoir relier la biochimie et les propriétés optiques des feuilles dans le MWIR, la première partie du travail de thèse est consacrée à l'acquisition et la compréhension de mesures de propriétés optiques des feuilles. Deux campagnes de mesures indépendantes sont présentées dans le Chapitre 2. Ces mesures permettent le développement d'un modèle, PROSPECT-VISIR, décrit dans le Chapitre 3. Couplé aux modèles existants de transfert radiatif au sein de la canopée et de l'atmosphère, ce modèle permet de simuler, à partir des propriétés biochimiques des feuilles, la luminance enregistrée par un capteur aéroporté ou satellitaire. A l'issue de ce travail, la chaîne décrite dans la Figure 1.17 est complète dans le MWIR et peut être exploitée en mode direct.

Une utilisation pratique de ce travail en télédétection (prévention des feux de forêts, surveillance de l'environnement) passe par l'inversion de la chaîne de modélisation, de la luminance au contenu en eau de la végétation. Nous avons subdivisé cette inversion en deux grandes étapes : détermination de la réflectance de la canopée depuis la luminance enregistrée, dans un premier temps, puis estimation du contenu en eau de la végétation à partir de la réflectance grâce à des indices spectraux. Les premiers éléments de ces études sont présentés dans le Chapitre 4, l'atmosphère étant supposée connue.

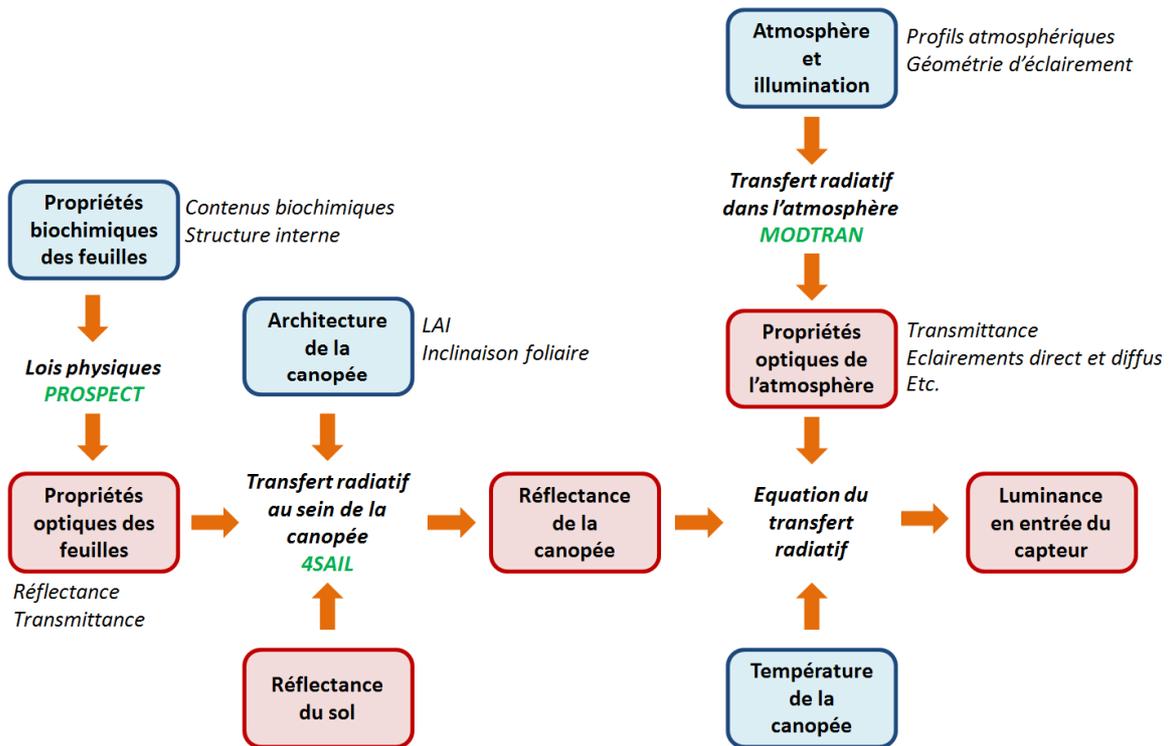


Figure 1.17 : Des propriétés biochimiques des feuilles au signal au niveau d'un capteur situé au-dessus d'une canopée. Les flèches oranges symbolisent le mode direct. En mode inverse, on retrouve les propriétés biochimiques des feuilles à partir de la luminance. En bleu : propriétés biochimiques, structurelles ou physiques de la scène visée par le capteur. En rouge : propriétés optiques. En italique gras : lois physiques permettant de modéliser les propriétés optiques. En vert : modèles décrits et utilisés.

2. MESURE DES PROPRIETES OPTIQUES DES FEUILLES DE 0,4 A 14 μM

Le chapitre précédent a mis en évidence un manque d'information sur les propriétés optiques des feuilles aux longueurs d'onde supérieures à 2,5 μm . Pour pallier ce manque, deux campagnes de mesures en laboratoire ont été organisées, dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA), l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), l'Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques (ONERA) et l'United States Geological Survey (USGS). Ces campagnes visaient à acquérir des spectres continus de réflectance et de transmittance directionnelles-hémisphériques de feuilles entre 0,4 et 14 μm , ainsi que les contenus en eau et en matière sèche associés.

2.1. CAMPAGNES DE MESURES

La première campagne a eu lieu du 2 au 6 juin 2008 au centre de recherche de l'USGS situé près de Reston (Etats-Unis), dans le laboratoire de télédétection et de spectroscopie dirigé par James Crowley (<http://minerals.usgs.gov/east/>). Beatriz Ribeiro da Luz, volontaire au sein de cette équipe et spécialiste des propriétés optiques des feuilles dans l'infrarouge thermique, nous a gracieusement reçus et aidés à acquérir des spectres continus de feuilles entre 0,4 et 14 μm , grâce à deux spectromètres permettant un recouvrement spectral entre 2 et 2,5 μm .

Lors d'une seconde campagne de mesures qui s'est déroulée du 21 au 25 juillet 2008, nous avons été accueillis à l'ONERA de Toulouse (France) par l'équipe de Xavier Briottet du Département d'Optique Théorique et Appliquée (DOTA, <http://www.onera.fr/dota/>). Ce département, spécialisé dans le développement de chaînes optiques, de la source jusqu'au post-traitement, est l'un des plus grands centres européens de recherche en optronique. Deux spectromètres (dont un prêté par l'INRA d'Avignon) ayant une zone de recouvrement spectral entre 2 et 2,5 μm ont été mis à notre disposition pendant une semaine.

Deux bases de données indépendantes ont ainsi été constituées, chacune contenant les spectres de 32 échantillons de feuilles collectées au voisinage des laboratoires. Au total nous disposons donc de 64 spectres de réflectance et de transmittance. Les feuilles proviennent de vingt-huit espèces d'angiospermes, dont deux céréales : *Acer negundo* L., *Acer platanoides* L., *Acer rubrum* L., *Betula* sp., *Catalpa* sp., *Cercis canadensis* L., *Citrus* sp., *Cornus* sp., *Fagus* sp., *Ficus carica* L., *Helianthus tuberosus* L., *Juncus* sp., *Liquidambar styraciflua* L., *Liriodendron tulipifera* L., *Morus bombycis* Koidz., *Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch, *Prunus cerasus* L., *Prunus laurocerasus* L., *Pyrus* sp., *Quercus* sp., *Quercus alba* L., *Sassafras albidum* (Nutt.) Nees, *Sorghum bicolor* (L.) Moench, *Tilia* sp., *Syringa vulgaris* L., *Urtica dioica* L., *Vitis vinifera* L. et *Zea mays* L. Avec 16 feuilles fraîches, 19 feuilles totalement sèches et 29 feuilles à des états d'humidité intermédiaires, la variabilité naturelle du contenu en eau des plantes est bien échantillonnée.

2.2. MESURES BIOCHIMIQUES

Outre l'aspect prospectif, ces campagnes de mesures avaient pour objectif d'établir une relation quantitative entre la signature spectrale des feuilles dans l'infrarouge et leur contenu biochimique. Les teneurs en eau et en matière sèche ont donc été déterminées pour chaque feuille parallèlement aux mesures de spectres (Turner, 1981). Pour ce faire, quatre étapes ont été nécessaires :

- Prélèvement d'une pastille de limbe foliaire à l'aide d'un emporte-pièce de diamètre connu ($\varnothing = 3,1$ cm à l'USGS et $\varnothing = 3$ cm à l'ONERA).
- Pesée de la pastille fraîche avec une balance de précision.
- Mise à l'étuve de la pastille pendant 24 heures à 60°C. La pastille est placée dans une boîte de Pétri ou dans une papillote d'aluminium numérotée.
- Pesée de la pastille sèche.

Les contenus en eau C_w et en matière sèche C_m de la feuille, exprimés en g/cm^2 , sont alors calculés par $C_w = \frac{PF-PS}{S}$ et $C_m = \frac{PS}{S}$ avec PF le poids frais, PS le poids sec et S la surface de la pastille.

2.3. MESURES RADIOMETRIQUES

Les spectres de réflectance et de transmittance directionnelles-hémisphériques de la face adaxiale (supérieure) des feuilles sont mesurés grâce à des spectromètres couplés à des sphères intégrantes. Nous n'avons pas étudié les propriétés optiques de la face abaxiale (inférieure) des feuilles bien qu'un certain nombre de travaux dans le VNIR-SWIR montrent des différences de comportement. Ne disposant pas d'instrument couvrant l'ensemble du domaine spectral compris entre 0,4 à 14 μm , nous avons utilisé, à l'USGS comme à l'ONERA, des spectromètres différents pour les domaines VNIR-SWIR (0,4 - 2,5 μm) et MWIR-TIR (2 - 14 μm), assurant ainsi une large zone de recouvrement spectral entre 2 et 2,5 μm (Tableau 2.1). Cette zone permettra de raccorder les deux spectres et d'obtenir ainsi un spectre continu sur tout le domaine optique. Les sphères intégrantes doivent être particulièrement réfléchissantes (95 à 98%) dans les domaines spectraux pour lesquelles elles sont utilisées. Pour le VNIR-SWIR, elles sont usinées dans des blocs de Spectralon® (polytétrafluoroéthylène), pour le MWIR-TIR, elles sont recouvertes d'Infragold® (or). La réflectance de ces matériaux est présentée en Figure 2.1.

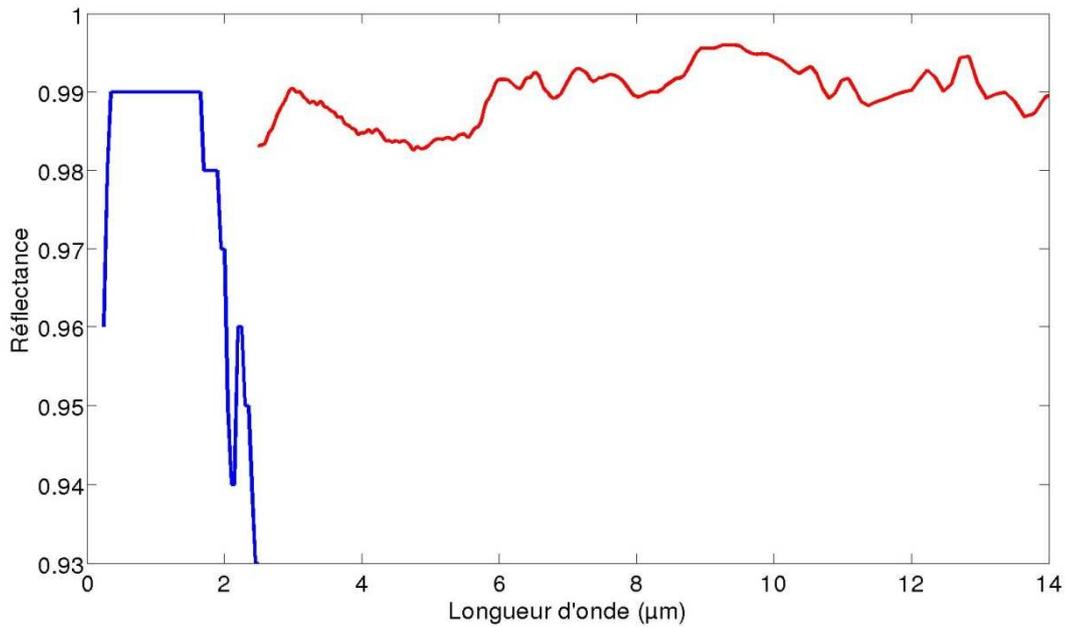


Figure 2.1 : Réflectances du Spectralon® (bleu) et de l’Infragold® (rouge), fournies par l’ONERA.

Selon qu’on mesure une transmittance ou une réflectance, l’échantillon est disposé devant des ouvertures différentes de la sphère intégrante (Figure 2.2). En réflectance, un fond noir (presque totalement absorbant) est placé sous l’échantillon ; en transmittance, un « bouchon » de la même matière que la sphère intégrante est placé au niveau de l’ouverture utilisée pour les mesures de réflectance.

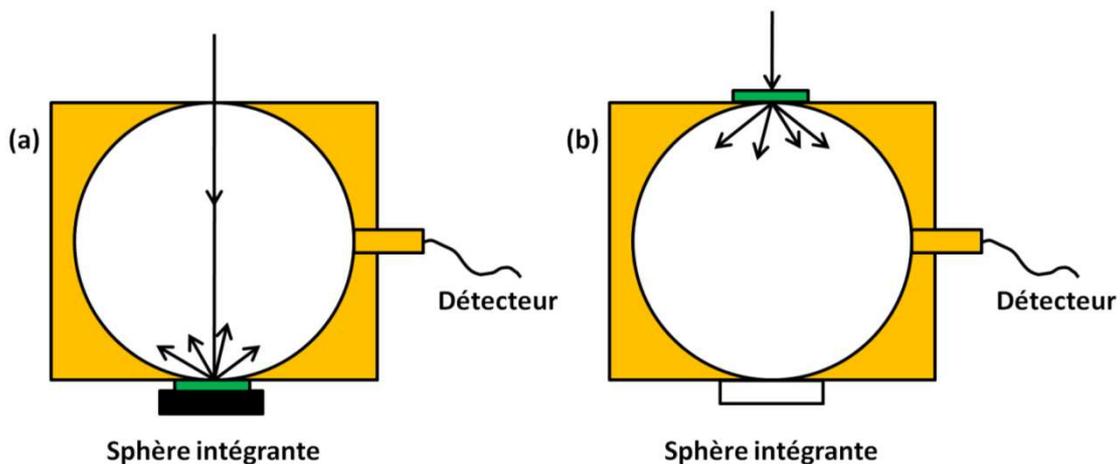


Figure 2.2 : Mesure de la réflectance (a) et de la transmittance (b) directionnelles-hémisphériques – en vert : échantillon de feuille.

Le faisceau lumineux unidirectionnel émis par la lampe du spectromètre pénètre dans la sphère intégrante grâce à des jeux de miroirs, en traversant l’échantillon si celui-ci est placé en transmittance. Il est réfléchi plusieurs fois par les parois de la sphère et le rayonnement enregistré

par le détecteur correspond à la réponse (réflectance ou transmittance) hémisphérique de l'échantillon. On parle de mesure « directionnelle-hémisphérique », qualificatif que nous omettrons par la suite pour alléger le texte. Enfin des spectres de référence (sphères vides, fond noir) ont été enregistrés en vue de corriger les mesures (Section 2.5).

2.3.1. INSTRUMENTATION A L'USGS

Les spectres VNIR-SWIR ont été mesurés grâce au spectromètre Perkin Elmer Lambda 900 UV/VIS/NIR. Il s'agit d'un instrument à double faisceau ayant pour sources deux lampes, l'une au tungstène-halogène, l'autre au deutérium. Il acquiert des spectres de 0,25 à 2,5 μm avec une résolution maximale de 0,08 nm dans la partie UV-visible du spectre électromagnétique et de 0,3 nm dans le proche-infrarouge. Une résolution de 1 nm a été choisie. Les valeurs de réflectance ou de transmittance sont acquises longueur d'onde par longueur d'onde grâce à trois capteurs différents. Ce spectromètre est couplé à une sphère intégrante en Spectralon®.

Dans le MWIR-TIR nous avons utilisé le spectromètre Nicolet Nexus 670 à transformée de Fourier qui fournit des spectres de 2 à 15 μm . Sa résolution spectrale est d'environ 0,1 nm (soit un nombre d'onde de 0,09 cm^{-1}) et il peut effectuer jusqu'à 65 scans par seconde. Sur les conseils de B. Ribeiro da Luz et afin d'obtenir un bon rapport temps/qualité de mesure, nous avons choisi de moyenner 1000 scans par spectre. Le spectromètre est équipé d'un détecteur MCT (Mercure Cadmium Telluride) dans le proche et moyen infrarouge, et d'un détecteur InSb dans l'infrarouge thermique. Comme le montre la Figure 2.3, il est couplé à une sphère intégrante constituée d'un revêtement en Infragold®. L'ensemble du système est refroidi à l'azote liquide.



Figure 2.3 : Nicolet Nexus 670 couplé à une sphère intégrante Labsphere - USGS Spec Lab. La sphère intégrante et les miroirs sont placés dans une enceinte de mesure en atmosphère neutre.

2.3.2. INSTRUMENTATION A L'ONERA

Le spectroradiomètre ASD FR et la sphère intégrante en Spectralon® qui lui est associée (LICOR) nous ont été gracieusement prêtés par l'INRA d'Avignon (équipe de Frédéric Baret). Ce matériel permet l'acquisition de spectres de réflectance et de transmittance directionnelles-hémisphériques de 0,35 à 2,5 μm . Trois capteurs mesurent la luminance vue par la fibre optique sur tout le spectre après diffraction par un réseau. La résolution spectrale est de 3 nm dans le visible et de 10 nm dans le proche et moyen infrarouge. Un spectre, acquis en quelques secondes, résulte du calcul de la moyenne de trente spectres puis d'une correction par rapport au spectre d'un étalon (sphère vide pour la réflectance, échantillon semi-transparent de Téflon pour la transmittance) dont la mesure est effectuée avant chaque acquisition de spectre de réflectance ou de transmittance de feuille. Le courant d'obscurité, signal interne de l'appareil fonction de sa température, est automatiquement retranché.

Le spectrophotomètre à transformée de Fourier Bruker Equinox 55 a permis l'acquisition des spectres entre 2 μm et 14 μm . Il est couplé à une sphère intégrante constituée d'un revêtement en Infragold®. Sa résolution spectrale est donnée par l'utilisateur (nous avons choisi 16 cm^{-1} soit 6,25 nm). Le Bruker est refroidi à l'azote liquide et relié à une pompe qui purge en permanence le CO_2 et l'humidité de l'air afin de réaliser des mesures en atmosphère neutre. L'obtention d'un spectre requiert l'acquisition d'un certain nombre d'interférogrammes (1000 dans le cadre de cette campagne de mesures) qui sont moyennés avant d'appliquer une transformée de Fourier. Pour chaque échantillon, on doit effectuer deux mesures, une de référence (sphère intégrante sans échantillon) et une de l'échantillon. Le logiciel associé au Bruker calcule et fournit alors automatiquement un spectre de réflectance (ou de transmittance) qui résulte de la division du signal enregistré sur l'échantillon par la mesure de référence.

2.4. PROTOCOLE DE MESURES

Mises à part les spécificités liées au matériel utilisé, comme la position des ouvertures sur les sphères intégrantes, les protocoles de mesures des deux campagnes sont identiques. Un grand nombre de feuilles ont été prélevées en début et milieu de campagne. Elles étaient donc soit fraîches (cueillies le jour même), soit naturellement desséchées dans le laboratoire pendant quelques jours, soit artificiellement séchées dans une étuve, ceci assurant une bonne variabilité du contenu en eau des échantillons. Pour chacun des échantillons, un protocole de mesures en trois étapes a été suivi.

1- Préparation de l'échantillon

- Sélection d'une feuille plane (sans nervures proéminentes ni gondolement), large, sans taches ni trous.
- Découpage d'un, voire de deux échantillons de feuille si celle-ci est suffisamment grande (Figure 2.4.A). On choisit une zone présentant un minimum de nervures et on découpe un échantillon plus large que l'ouverture de la sphère intégrante (généralement un

rectangle d'environ 25 cm²). En supposant des contenus en eau et en matière sèche homogènes dans la feuille, l'intérêt de prélever deux échantillons sur la même feuille est double : on peut effectuer des mesures en parallèle sur les deux spectromètres, et ainsi optimiser le temps de manipulation, mais aussi faire sécher un des deux échantillons à l'étuve.

- Placement de l'échantillon de feuille dans un porte-échantillon confectionné par nos soins, afin de maintenir le limbe bien tendu. Ceci facilite son placement face aux ouvertures des sphères intégrantes et assure une bonne qualité de mesure. Le porte-échantillon (Figure 2.4.B) consiste en deux plaques d'aluminium carrées de 6 cm de côté et 1 mm d'épaisseur, percées en leur centre d'un disque de 4 cm de diamètre et scotchés selon leurs arrêtes.

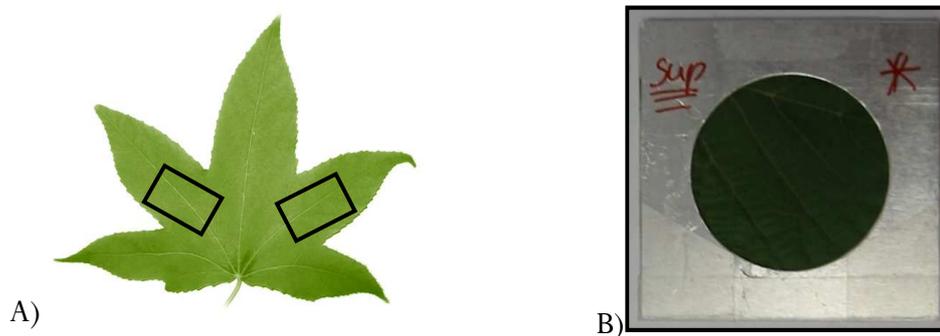


Figure 2.4 : A) Zones de prélèvement des échantillons sur la feuille, B) Porte-échantillon.

- 2- Mesures radiométriques : enregistrement des spectres de réflectance et de transmittance des faces adaxiales (supérieures) des échantillons sur chacun des spectromètres.
- 3- Mesures biochimiques : première pesée (pastille fraîche), dessèchement et seconde pesée (pastille sèche).

Mesure des feuilles sèches

Pour effectuer des mesures sur feuilles sèches, on utilise idéalement deux échantillons d'une même feuille, l'un servant pour les mesures biochimiques (étape 2), l'autre pour les mesures radiométriques (étape 3). Un des échantillons sert effectivement à déterminer le contenu en eau et en matière sèche supposé homogène sur toute la surface de la feuille et ce sont les spectres du second échantillon, intact, qui sont enregistrés. Les étapes 2 et 3 sont répétées autant de fois que voulu. Pour obtenir des stades hydriques intermédiaires, on laissera par exemple l'échantillon 20 minutes dans une étuve à 60°C. Pour sécher totalement un échantillon, il suffit de le laisser 24 heures à la même température. En se desséchant, les feuilles ont tendance à se gondoler si elles ne sont pas maintenues à plat, ce qui gêne considérablement la mesure des spectres. Pour remédier à ce problème, nous les avons prises en sandwich entre deux assiettes en carton maintenues plaquées l'une sur l'autre grâce à un poids. Une fois sèches, les feuilles deviennent friables et doivent être manipulées avec beaucoup de soin pour limiter le risque d'effritement et de pollution des sphères intégrantes. Lors d'un dessèchement continu d'une même feuille, avec 5 ou 6 états

hydriques intermédiaires par exemple, il est important de connaître la surface de l'échantillon à chaque mesure. Pour cela, on découpe un échantillon de surface connue et facilement mesurable (rectangle de 6×6 cm) dont on enregistre les spectres, puis à chaque étape de dessèchement, on enregistre de nouveaux spectres et on mesure ses dimensions à l'aide d'une règle. On peut alors calculer correctement les contenus en eau C_w et en matière sèche C_m correspondant à chaque stade hydrique.

2.5. CORRECTION DES MESURES RADIOMETRIQUES

Les quatre spectromètres fournissent directement des mesures de réflectance et de transmittance directionnelles-hémisphériques. Cependant, ces données doivent être corrigées pour assurer une cohérence à l'ensemble du jeu de données. Les spectres ont d'abord tous été interpolés à 1 nm de résolution spectrale. Trois types de corrections ont ensuite été appliquées selon le spectromètre et la mesure effectuée. La première correction concerne uniquement les spectres de réflectance, la deuxième uniquement les spectres MWIR-TIR acquis à l'ONERA, et la troisième consiste à raccorder correctement les spectres VNIR-SWIR et MWIR-TIR d'un même échantillon de feuille, ce pour l'ensemble du jeu de données.

2.5.1. CORRECTION DU FOND NOIR EN REFLECTANCE

Pour les mesures de réflectance directionnelle-hémisphérique, les échantillons de feuilles sont placés sur un support noir (Figure 2.2) dont la réflectance ρ_{noir} est idéalement nulle. En pratique, il réfléchit toujours quelques pourcents du rayonnement incident si bien que le rayonnement incident subit des réflexions multiples entre la face inférieure de la feuille et le fond noir (Figure 2.5).

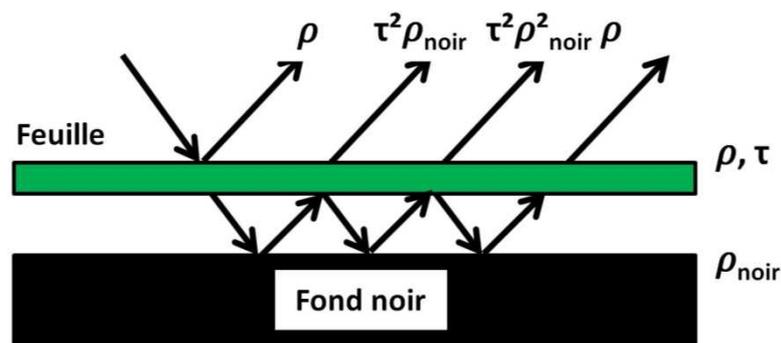


Figure 2.5 : Interaction du rayonnement avec la feuille et le fond noir (d'après Miller et al., 1992).

La réflectance ρ_{noir} des fonds noirs utilisés lors des campagnes a été mesurée et l'ensemble des réflectances directionnelles-hémisphériques a ainsi pu être corrigé par la relation (Miller et al., 1992)

$$\rho_{mes} = \frac{\rho + \rho_{noir}(\tau_{mes}^2 - \rho^2)}{1 - \rho\rho_{noir}}, \text{ soit} \quad (2.1)$$

$$\rho_{mes} = \rho + \frac{\tau_{mes}^2 \rho_{noir}}{1 - \rho\rho_{noir}}, \quad (2.2)$$

où ρ_{mes} et τ_{mes} sont la réflectance et la transmittance mesurées, ρ_{noir} est la réflectance du fond noir, et ρ est la réflectance corrigée.

2.5.2. PROBLEME D'ABSORPTION PAR LES GAZ ATMOSPHERIQUES

Compte tenu des fortes bandes d'absorption de certains gaz atmosphériques dans le domaine MWIR-TIR, les mesures radiométriques doivent s'effectuer dans une atmosphère neutre, c'est-à-dire dans une enceinte exempte de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone. En effet, l'eau absorbe fortement le rayonnement autour de 2,9 μm et à partir de 5,5 μm et le CO_2 autour de 4,2 μm (Figure 1.3), faussant les mesures radiométriques. A chaque changement d'échantillon cette enceinte doit cependant être ouverte, laissant pénétrer l'air ambiant. Le gaz carbonique et la vapeur d'eau sont évacués grâce à des systèmes de purge utilisant de l'azote liquide. Mais ils ne le sont pas totalement, comme on le remarque sur les spectres du Bruker Equinox 55 entre 4,16 et 4,47 μm , où une forte bande d'absorption du CO_2 est visible ; dans la Figure 2.6 présentant un spectre brut de réflectance de feuille de mûrier-platane apparaît clairement un pic autour de 4,28 μm . Le rayonnement étant absorbé par le CO_2 , les signaux enregistrés autour de 4,28 μm sont quasi nuls, ce qui conduit à une valeur aberrante lors de la division de la réponse de l'échantillon par la réponse de la référence (Section 2.3.2). Les longueurs d'onde comprises entre 4,16 et 4,47 μm ne seront donc pas exploitées par la suite.

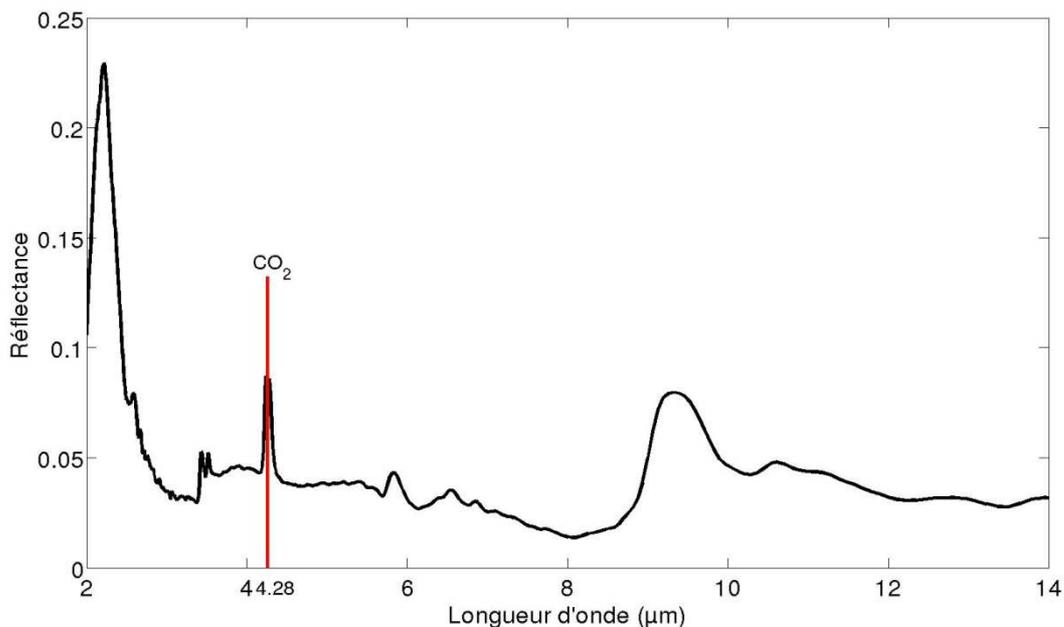


Figure 2.6 : Réflectance d'une feuille de mûrier-platane mesurée par le Bruker Equinox 55 (ONERA). L'artefact dû à l'absorption du CO_2 est bien visible autour de 4,28 μm (ligne rouge).

2.5.3. RACCORDEMENT DES SPECTRES VNIR-SWIR ET MWIR-TIR

Pour une même feuille, les spectres mesurés dans le VNIR-SWIR et dans le MWIR-TIR ne sont généralement pas en accord parfait dans la zone de chevauchement entre 2 et 2,5 μm . La variabilité naturelle de structure anatomique et de contenu biochimique au sein de la feuille explique en partie cet écart, surtout lorsque les deux spectromètres n'ont pas mesuré la même portion de feuille (Section 2.4), ce qui est le cas pour la plupart des espèces. Une grande partie de cet écart est aussi due aux spectromètres. Afin d'assurer un bon étalonnage des spectromètres et de faciliter le raccordement des spectres VNIR-SWIR et MWIR-TIR, nous avons mesuré, sur chaque appareil, des spectres de réflectance et de transmittance d'échantillons de référence, qui nous permettront d'établir une méthode de raccordement des deux domaines spectraux.

Mesures de références : Zenith® de SphereOptics

Les références sont quatre diffuseurs Zenith® de différentes épaisseurs (100 μm , 250 μm , 500 μm et 1 mm), usinés dans la même matière que le Spectralon® (polytétrafluoroéthylène, PTFE), commercialisés et calibrés par la société SphereOptics. Tout comme le Spectralon® utilisé dans les sphères intégrantantes pour les mesures VNIR-SWIR, le Zenith® a une absorptance nulle dans ce domaine de longueurs d'onde. On a donc en théorie $\rho_Z + \tau_Z = 1$ dans le VNIR-SWIR, où ρ_Z et τ_Z sont la réflectance et la transmittance directionnelles-hémisphériques respectives d'une feuille de Zenith®. Pour chaque feuille, ρ_Z et τ_Z ont été mesurées par SphereOptics entre 300 et 2500 nm grâce à un Perkin Elmer Lambda 19 (associé à une sphère PTFE 150 mm pour la réflectance), avec une résolution spectrale de 1 nm. Une référence de l'U.S. National Institute of Standards and Technology (NIST) et l'air ont respectivement servi de référence pour le calibrage des spectres de ρ_Z et τ_Z par SphereOptics. La comparaison des spectres de Zenith® mesurés par SphereOptics, à l'USGS et à l'ONERA, nous informe sur la fiabilité des instruments de mesures.

Mesures SphereOptics - A certaines longueurs d'onde la somme $\rho_Z + \tau_Z$ de la réflectance et de la transmittance est supérieure à 1 (Figure 2.7), ce qui n'a pas de sens physique. Les spectres fournis par SphereOptics ne peuvent donc malheureusement pas servir de référence en toute certitude.

Mesures USGS - La somme $\rho_Z + \tau_Z$ de la réflectance et de la transmittance n'est quasiment jamais égale à 1 avec le Perkin Elmer dans le VNIR-SWIR (Figure 2.8), ces mesures sont moins fiables que celles de SphereOptics. On observe la même chose entre 2 et 2,5 μm avec les mesures effectuées par le Nexus 670 dans le MWIR-TIR. Plus la feuille de Zenith® est fine, moins la continuité entre les deux instruments se fait correctement, surtout au niveau de la transmittance.

Mesures ONERA - Les spectres ASD sont assez bons dans le VNIR-SWIR, du même ordre de grandeur que ceux fournis par le constructeur, excepté à partir de 2 μm où le signal est très bruité (Figure 2.9). Dans le MWIR-TIR, le Bruker Equinox 55 est moins fiable mais la continuité entre

les deux domaines est meilleure que pour les mesures USGS, en réflectance comme en transmittance.

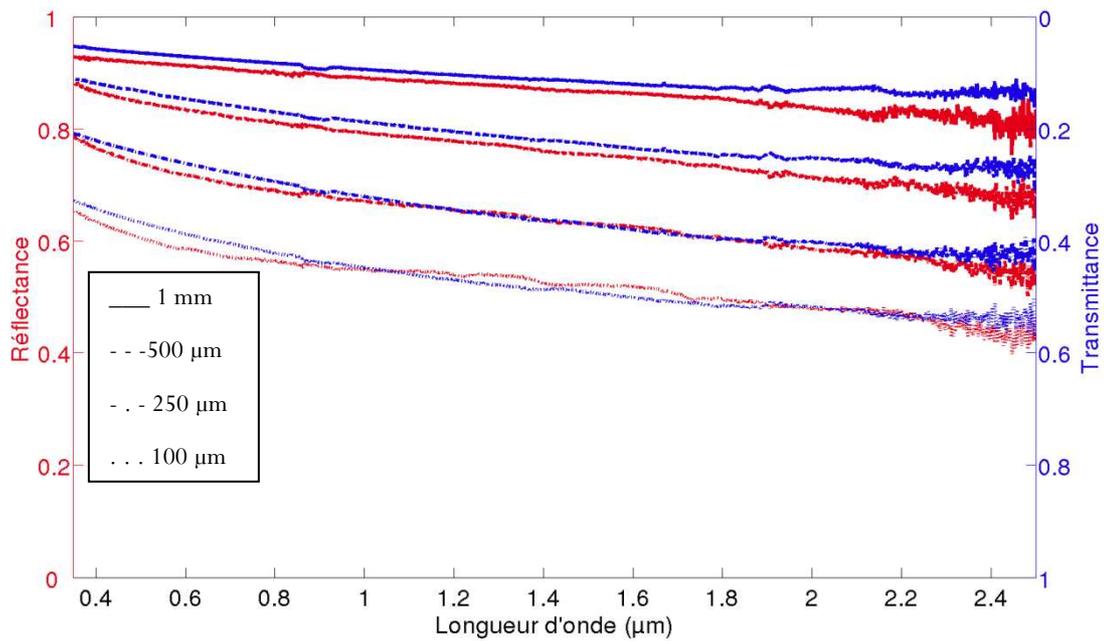


Figure 2.7 : Spectres de réflectance et de transmittance des quatre feuilles de Zenith® fournies par SphereOptics.

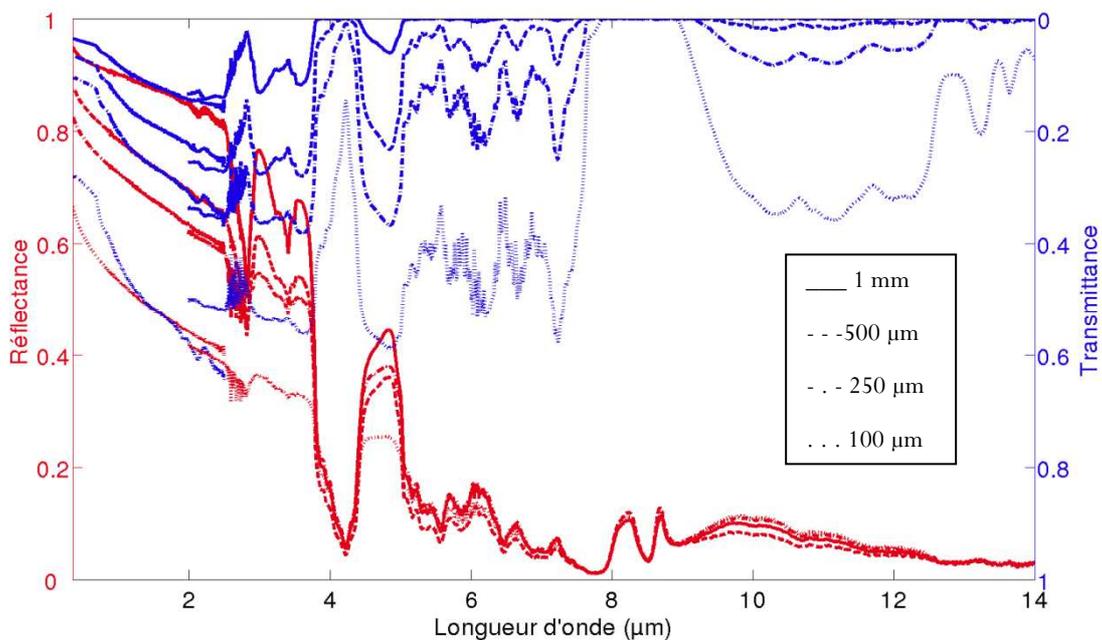


Figure 2.8 : Spectres de réflectance et de transmittance des quatre feuilles de Zenith® mesurées à l'USGS.

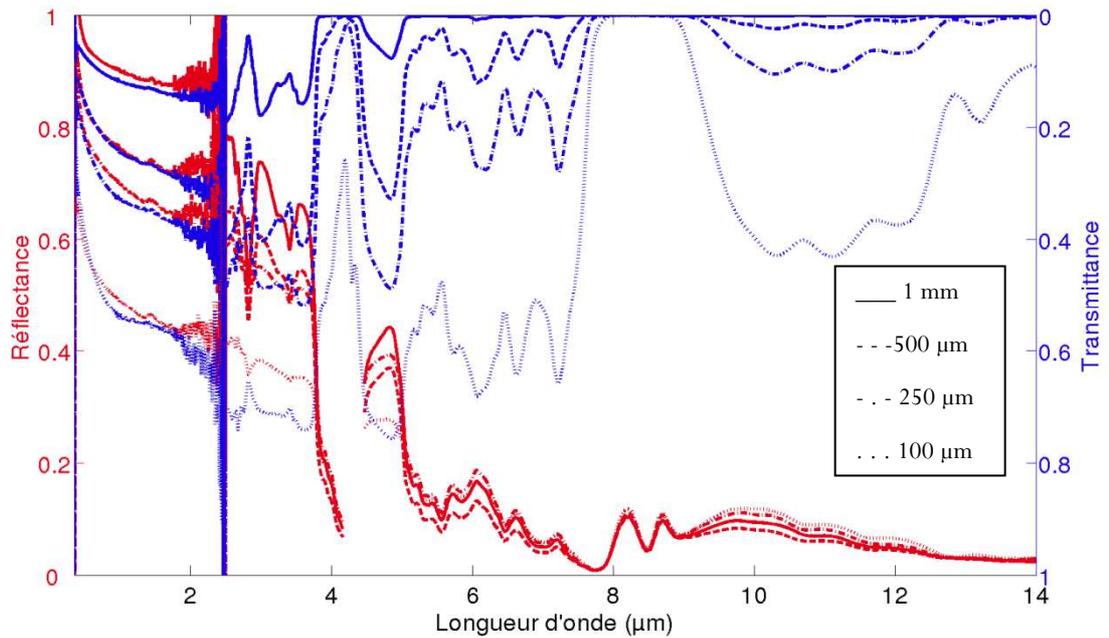


Figure 2.9 : Spectres de réflectance et de transmittance des quatre feuilles de Zenith® mesurées à l'ONERA.

Comparaison entre les mesures SphereOptics/USGS/ONERA - Pour chaque feuille, les mesures effectuées par les différents instruments ont été comparées. Les Figures 2.10 et 2.11 présentent les spectres de réflectance et de transmittances de la feuille de Zenith® de 500 µm d'épaisseur, mesurées par SphereOptics et par les quatre instruments utilisés lors des campagnes de mesures.

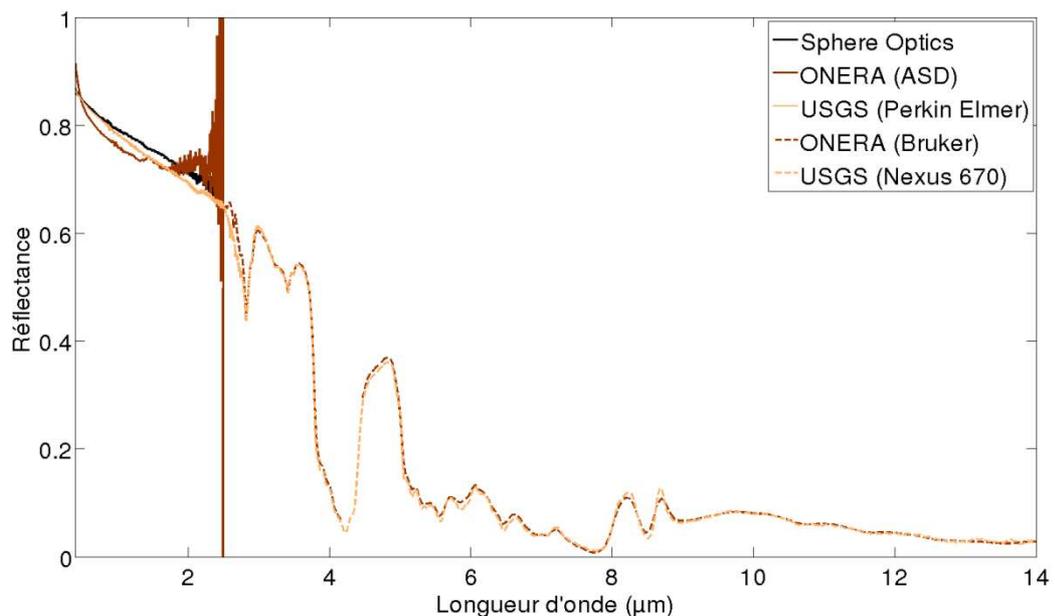


Figure 2.10 : Réflectances de la feuille de Zenith® de 500 µm d'épaisseur, mesurées par les différents spectromètres.

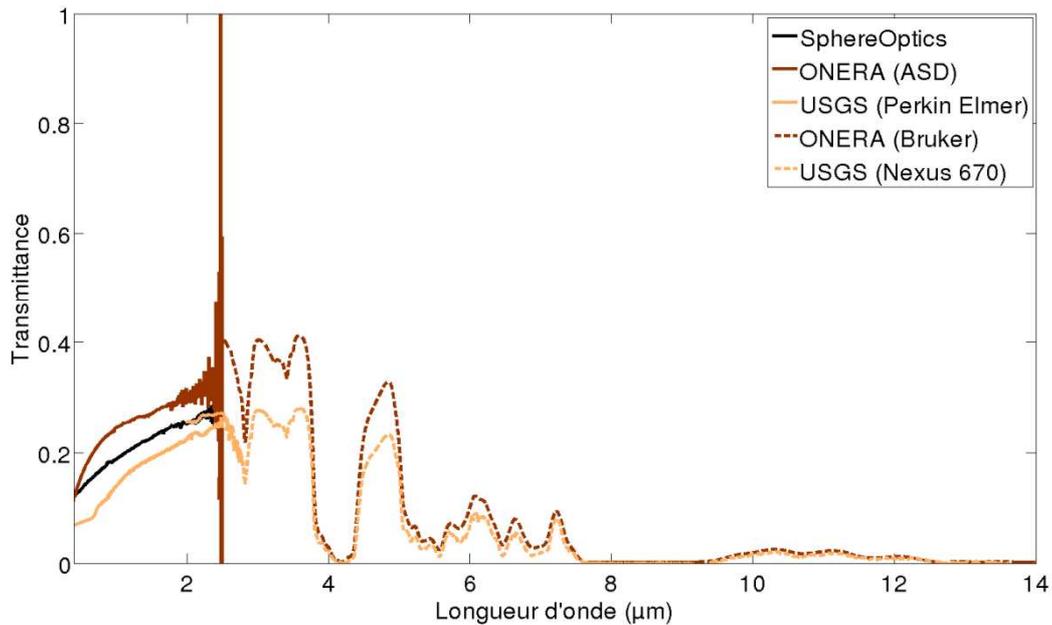


Figure 2.11 : Transmittances de la feuille de Zenith® de 500 μm d'épaisseur, mesurées par les différents spectromètres.

On constate ainsi que les réflectances mesurées dans le VNIR-SWIR par les trois instruments sont assez proches alors que les transmittances divergent davantage. Dans le MWIR-TIR, les réflectances mesurées par le Nexus 670 et le Bruker sont très proches, on peut donc considérer que ces mesures sont fiables. Les spectres de transmittance mesurés par le Bruker sont plus élevés que ceux mesurés par le Nexus 670.

Raccordement des domaines spectraux

Les spectres des diffuseurs Zenith® enregistrés nous renseignent sur la fiabilité des instruments pour la mesure de réflectance et/ou de transmittance. Par exemple, si une plus grande confiance est accordée à une mesure de réflectance VNIR-SWIR (1) qu'à une mesure de réflectance MWIR-TIR (2), alors on corrigera cette dernière. On cherche pour cela un facteur indépendant de la longueur d'onde entre les valeurs mesurées de (1) et (2) entre 2 et 2,5 μm , par régression linéaire entre l'ensemble des valeurs de (1) et de (2). L'ordonnée à l'origine de la droite de régression est imposée à 0, pour s'assurer qu'une valeur initialement nulle le reste après correction. Le coefficient directeur de la droite de régression est le facteur ensuite appliqué à l'ensemble de (2), permettant ainsi un raccord parfait de (1) et (2). Ce même type de correction a été appliqué à tous les spectres des deux jeux de données.

USGS

Transmittance - L'analyse des spectres de Zenith® nous apprend que la transmittance mesurée par le Nexus 670 (MWIR - TIR) est trop élevée, il a donc été décidé de corriger ces spectres pour avoir des transmittances continues de 0,4 à 14 μm . Pour chacun des spectres, on ajuste alors par

régression linéaire le coefficient qui existe entre les valeurs de transmittances mesurées dans l'intervalle 2 - 2,5 μm , d'une part, par le Nexus 670 et d'autre part, par le Perkin Elmer. Par exemple, la Figure 2.12 montre qu'il existe un facteur indépendant de la longueur d'onde entre les valeurs VNIR-SWIR et MWIR-TIR dans le domaine 2 - 2,5 μm pour la feuille de poirier.

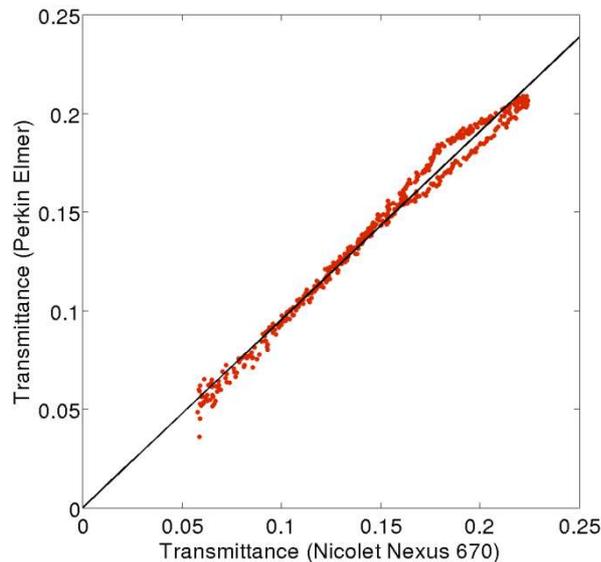


Figure 2.12 : Détermination du facteur de proportionnalité entre les transmittances d'une feuille de poirier, mesurées par le Perkin Elmer et le Nicolet Nexus 670, entre 2 et 2,5 μm . Rouge : valeurs de transmittance à chaque longueur d'onde. Noir : droite d'équation $Y = 0,95 X$.

Pour chaque spectre de transmittance mesuré sur les 64 échantillons de feuilles, on calcule la pente de la droite passant par l'origine. Ce coefficient, dont la valeur varie de 0,57 à 0,98 sur l'ensemble du jeu de données, est ensuite appliqué sur tout le spectre infrarouge, ce qui diminue légèrement la transmittance.

Réflectance - Pour la correction de la réflectance, il n'a pas été possible de tirer des informations pertinentes des feuilles de Zenith®. On suppose donc que l'écart entre les deux domaines spectraux est principalement lié à la variabilité naturelle des feuilles, sachant qu'on n'a pas utilisé le même échantillon pour les deux spectromètres. Compte tenu de la correction de la transmittance MWIR-TIR et par souci de cohérence, nous avons décidé de modifier la réflectance de ce domaine spectral en déterminant un facteur de proportionnalité, comme expliqué précédemment. En effet, on peut supposer que, outre un biais systématique dû aux appareils de mesure entre le VNIR-SWIR et le MWIR-TIR, le facteur correctif intègre une correction de la variabilité naturelle de la feuille. La Figure 2.13 illustre le raccord des spectres de la feuille de poirier.

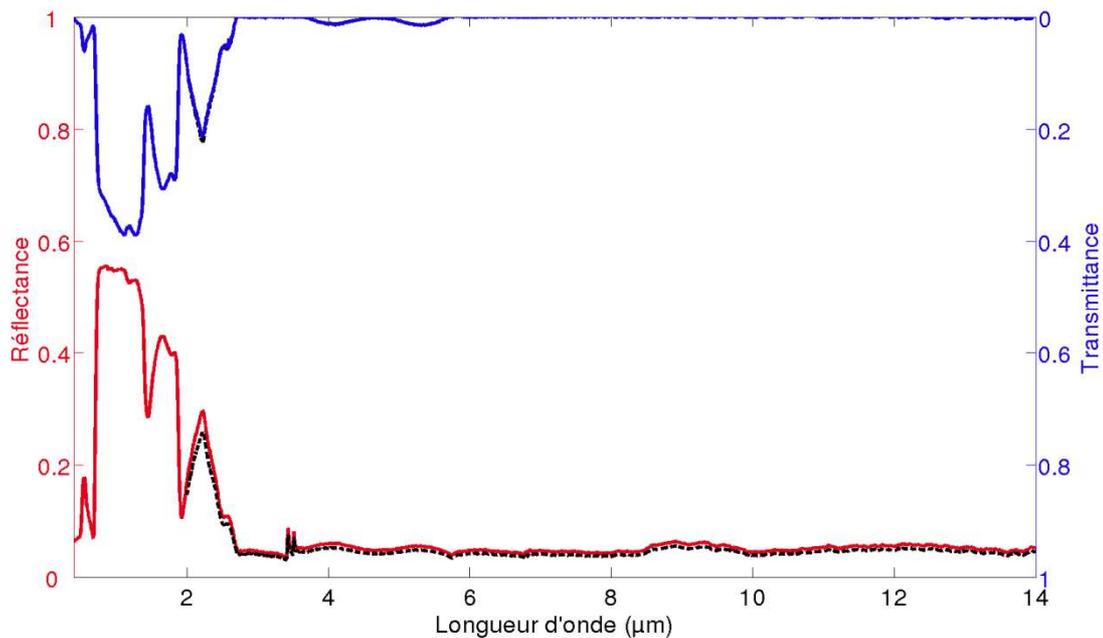


Figure 2.13 : Continuité des spectres de réflectance et de transmittance d'une feuille de poirier. Noir pointillés : données brutes. Couleur : spectres corrigés.

ONERA

Le décalage de quelques pourcents observé entre les spectres mesurés dans le VNIR-SWIR et dans le MWIR-TIR est moins important qu'à l'USGS, probablement parce que nous n'avons que rarement mesuré deux échantillons distincts de la même feuille. Il faut néanmoins corriger ces spectres pour obtenir un bon raccord. Aussi bien pour la réflectance que pour la transmittance, on considère que les mesures de l'ASD sont plutôt fiables car on obtient $\rho + \tau \sim 1$ pour les spectres de feuilles de Zenith®.

Transmittance - La transmittance MWIR-TIR (Bruker Equinox 55) a été corrigée en fonction de la transmittance VNIR-SWIR (ASD) d'un facteur indépendant de la longueur d'onde, comme expliqué précédemment. Pour l'ensemble du jeu de données, le coefficient varie de 0,76 à 1,02. La Figure 2.14 illustre la détermination du facteur de proportionnalité pour une feuille de mûrier-platane sèche.

Réflectance - D'après les mesures de spectres de Zenith®, on peut considérer que la réflectance mesurée par le Bruker Equinox 55 est fiable car ce dernier fournit les mêmes valeurs que celles enregistrées, indépendamment, à l'USGS sur le Nexus 670. Par ailleurs, les valeurs mesurées par l'ASD semblent surévaluées entre 2 et 2,5 μm mais si l'on fait abstraction de ce décalage, le raccord se fait correctement à 2 μm entre le VNIR-SWIR et le MWIR-TIR. La réflectance MWIR-TIR a donc été simplement corrigée du fond noir placé derrière l'échantillon (Equation 2.2) en utilisant la transmittance corrigée (et non la transmittance mesurée). La jonction entre les

spectres VNIR-SWIR et MWIR-TIR a ensuite été faite à $2 \mu\text{m}$. La Figure 2.13 illustre le raccord des spectres d'une feuille de mûrier-platane sèche.

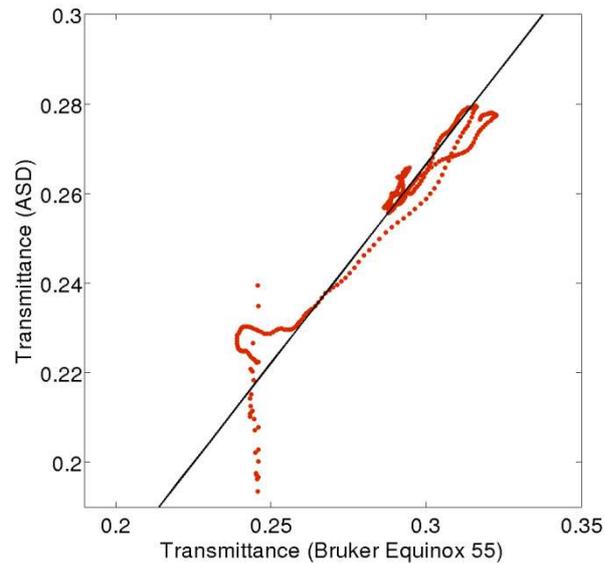


Figure 2.14 : Détermination du facteur de proportionnalité entre les transmittances d'une feuille de mûrier-platane, mesurées par le Bruker et l'ASD entre 2 et $2,5 \mu\text{m}$. Rouge : valeurs de transmittance à chaque longueur d'onde. Noir : droite d'équation $Y = 0,89 X$, passant par l'origine du repère.

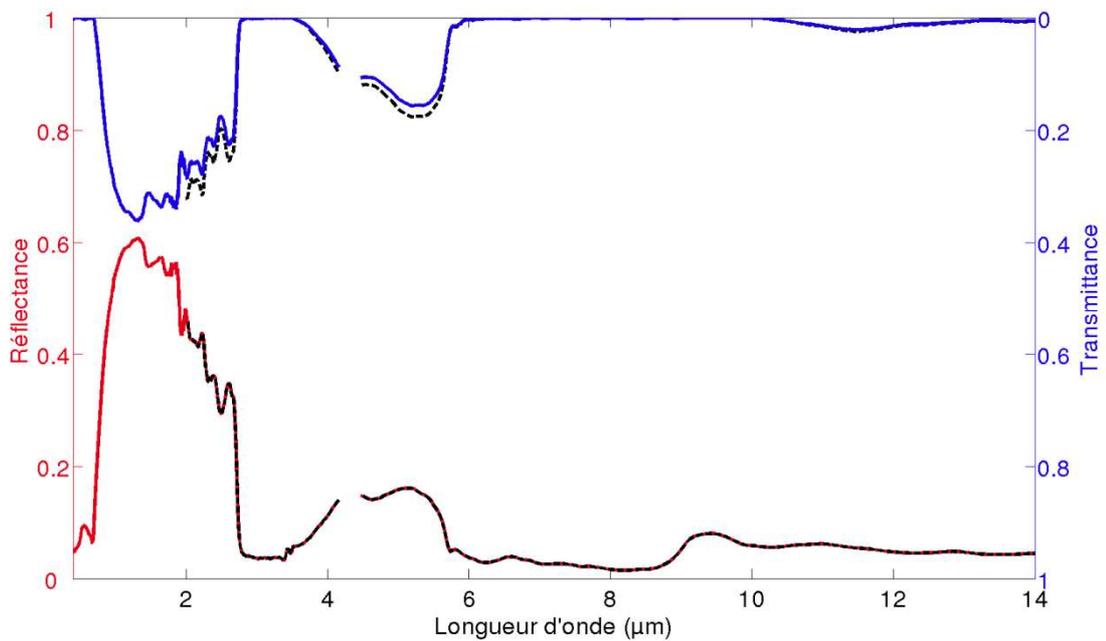


Figure 2.15 : Continuité des spectres de réflectance et de transmittance d'une feuille de mûrier-platane sèche. Noir pointillés : données brutes. Couleur : spectres corrigés.

2.6. PRESENTATION DES DONNEES COLLECTEES

Grâce à ces deux campagnes de mesures, un jeu de données de soixante-quatre spectres continus de 0,4 à 14 μm avec un pas de 1 nm a été constitué. Vingt-huit espèces sont représentées et une grande variabilité de l'état hydrique des feuilles a été assurée. Le Tableau 2.1 résume les principales caractéristiques instrumentales des jeux de données.

Tableau 2.1 : Caractéristiques principales des jeux de données.

	USGS	ONERA
Laboratoire	USGS Spectroscopy Lab	ONERA DOTA
Date	Juin 2008	Juillet 2008
Nombre d'échantillons	32	32
Nombre d'espèces	17	14
Mesures VNIR-SWIR		
Spectromètre	Perkin Elmer Lambda 900	ASD FieldSpec
Domaine spectral	0,4 - 2,5 μm	0,4 - 2,5 μm
Résolution spectrale	1 nm	1 nm
Mesures MWIR-TIR		
FTIR spectromètre	Nicolet Nexus 670	Bruker Optics Equinox 55
Domaine spectral	2 - 14 μm	2 - 14 μm
Résolution spectrale	\sim 0,1 nm	\sim 6,25 nm

Le Tableau 2.2 résume les caractéristiques biochimiques des jeux de données et le Tableau 2.3 détaille pour chaque échantillon le nom de l'espèce ainsi que le contenu en eau et en matière sèche, en g/cm^2 .

Tableau 2.2 : Résumé des caractéristiques des jeux de données d'un point de vue biochimique.

	USGS	ONERA
Contenu en eau (g/cm^2)		
Minimum	0,0001	0,0001
Maximum	0,0201	0,0154
Moyenne	0,0060	0,0061
Contenu en matière sèche (g/cm^2)		
Minimum	0,0039	0,0038
Maximum	0,0119	0,0188
Moyenne	0,0064	0,0073

Tableau 2.3 : Echantillons mesurés et contenus en matière sèche (C_m) et en eau (C_w) associés (en g/cm²).

USGS			ONERA		
Nom Latin	C_m	C_w	Nom Latin	C_m	C_w
<i>Acer platanoides</i> L.	0,0057	0,0077	<i>Betula</i> sp.	0,0066	0,0101
	0,0062	0,0002		0,0065	0,0001
<i>Acer rubrum</i> L.	0,0069	0,0065		0,0052	0,0100
	0,0050	0,0120		0,0052	0,0069
<i>Catalpa</i> sp.	0,0065	0,0003	<i>Acer negundo</i> L.	0,0053	0,0040
	0,0053	0,0083		0,0056	0,0005
	0,0055	0,0044		0,0057	0,0002
<i>Cercis canadensis</i> L.	0,0042	0,0066		0,0057	0,0001
	0,0045	0,0001	<i>Ficus carica</i> L.	0,0064	0,0113
	0,0043	0,0034	<i>Juncus</i> sp.	0,0183	0,0139
	0,0119	0,0136	<i>Prunus laurocerasus</i> L.	0,0103	0,0154
<i>Prunus cerasus</i> L.	0,0099	0,0001		0,0130	0,0113
	0,0041	0,0065	<i>Syringa vulgaris</i> L.	0,0145	0,0001
<i>Cornus</i> sp.	0,0041	0,0001	<i>Zea mays</i> L.	0,0044	0,0066
	0,0062	0,0063		0,0050	0,0001
<i>Helianthus tuberosus</i> L.	0,0042	0,0134		0,0061	0,0106
<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	0,0070	0,0117		0,0069	0,0125
	0,0070	0,0001		0,0060	0,0069
<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	0,0061	0,0115	<i>Morus bombycis</i> Koidz.	0,0057	0,0074
	0,0061	0,0001		0,0069	0,0074
	0,0068	0,0133		0,0076	0,0051
<i>Prunus laurocerasus</i> L.	0,0082	0,0201		0,0074	0,0020
<i>Pyrus</i> sp.	0,0085	0,0080		0,0074	0,0001
<i>Quercus alba</i> L.	0,0084	0,0118	<i>Urtica dioica</i> L.	0,0038	0,0093
	0,0084	0,0001		0,0072	0,0068
<i>Quercus</i> sp.	0,0069	0,0003	<i>Citrus</i> sp.	0,0081	0,0003
	0,0089	0,0096	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	0,0055	0,0091
	0,0094	0,0001		0,0073	0,0082
<i>Sassafras albidum</i> (Nutt.) Nees	0,0046	0,0063	<i>Tilia</i> sp.	0,0087	0,0002
	0,0052	0,0025		0,0050	0,0139
<i>Tilia</i> sp.	0,0053	0,0001	<i>Vitis vinifera</i> L.	0,0074	0,0053
	0,0039	0,0057	<i>Parthenocissus quinquefolia</i> (L.) Planch.	0,0085	0,0001

La Figure 2.16 montre les spectres collectés. La réflectance et la transmittance de chaque échantillon sont tracées avec une couleur fonction du contenu en eau de l'échantillon. Un spectre de feuille sèche apparaît en rouge et un spectre de feuille fraîche en bleu foncé.

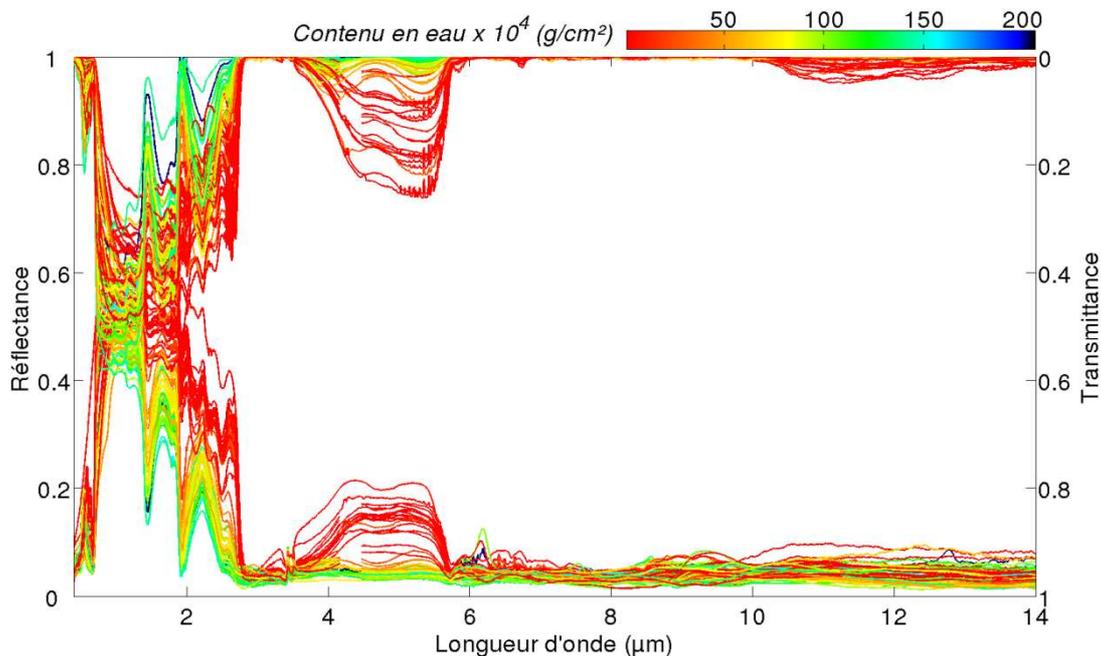


Figure 2.16 : Spectres de réflectance et de transmittance de la base de données USGS/ONERA en fonction du contenu en eau des feuilles. Les spectres de maïs sec et de cornouiller sec ont été retirés de la base de données car on doute de la fiabilité de leur mesure.

Grâce à cette représentation, il apparaît en première approche que les propriétés optiques des feuilles dépendent de leur contenu en eau pour des longueurs d'onde inférieures ou égales à 5,7 μm (domaines VNIR-SWIR et MWIR) : la réflectance et la transmittance varient fortement avec C_w , contrairement à leur comportement dans le TIR. La Figure 2.15 montre aussi que la transmittance des feuilles sèches n'est pas systématiquement négligeable après 10 μm , contrairement à ce qui était présumé, avec un maximum de transmission d'environ 0,05 autour de 11 μm . Une analyse plus poussée des spectres est effectuée dans le paragraphe suivant.

2.7. INTERPRÉTATION PHYSIQUE DES MESURES RADIOMÉTRIQUES

Comme cela a été expliqué au chapitre précédent, les propriétés optiques des feuilles varient en fonction de leur structure anatomique et du contenu en pigments photosynthétiques (chlorophylle et caroténoïdes), eau et matière sèche. L'absorption des pigments domine dans le VIS alors que c'est la structure anatomique de la feuille qui influence principalement le signal dans le NIR. Dans le SWIR et le MWIR, les propriétés optiques sont influencées par le contenu en eau et en matière sèche, ce qui n'est plus le cas dans le TIR. Les feuilles de notre jeu de données confirment ces observations entre 0,4 et 14 μm . En guise d'exemple, les spectres de réflectance et de transmittance d'une feuille de *Catalpa*, fraîche et sèche, sont tracés en Figure 2.17. La Figure 2.18 illustre l'effet du contenu en eau et de l'espèce sur la réflectance MWIR-TIR, avec des feuilles de *Sassafras* et *Cercis* caractérisées par trois contenus en eau différents.

Les feuilles fraîches présentent une signature spectrale de l'eau très claire, avec des bandes d'absorption fondamentales à 2,9 μm et 6,08 μm et leurs harmoniques à 0,97 μm , 1,2 μm , 1,47 μm , 1,94 μm et 4,8 μm (Figure 1.6). Le coefficient spécifique d'absorption de l'eau varie de 0,45 cm^{-1} à 0,97 μm à 12000 cm^{-1} à 2,95 μm , c'est-à-dire d'un facteur d'environ 27 000 (Segelstein, 1981).

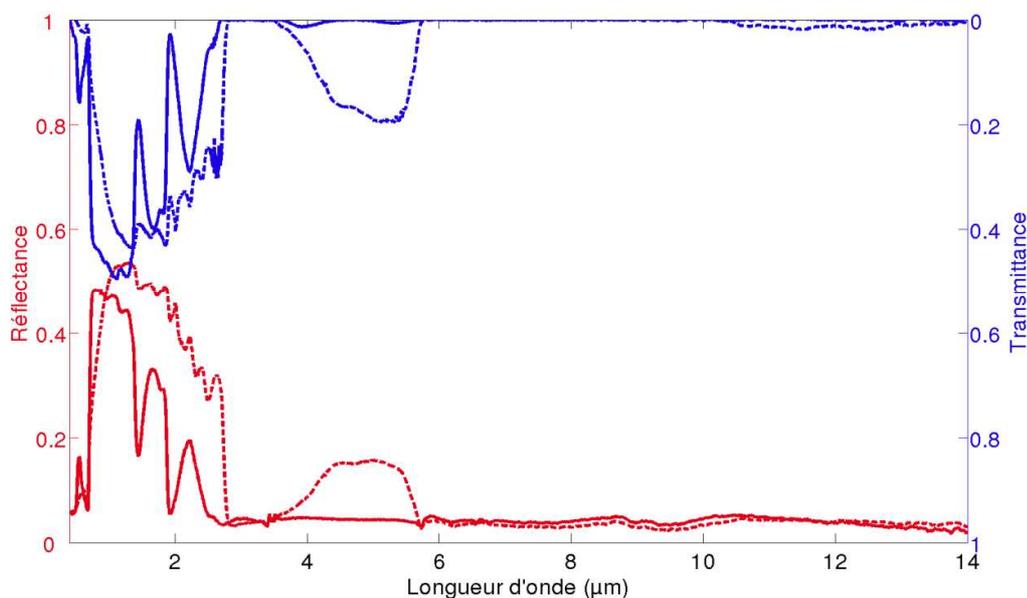


Figure 2.17 : Spectres de réflectance (rouge) et de transmittance (bleu) d'une feuille fraîche (trait plein) et d'une feuille sèche (pointillés) de *Catalpa* appartenant au jeu de données de l'USGS.

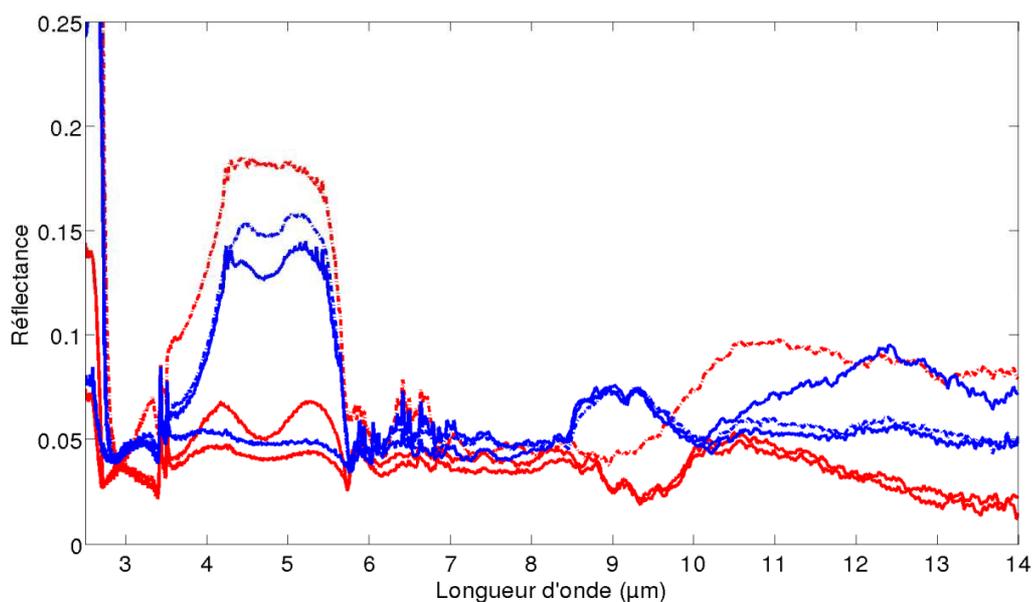


Figure 2.18 : Spectres de réflectance de feuilles d'arbre de judée (*cercis canadensis L.*) (rouge) et de feuilles de saffras (bleu), chaque espèce étant représentée pour trois contenus en eau. La feuille la plus sèche de chaque espèce est en pointillés.

Dans le SWIR-MWIR, plus la feuille est sèche, plus la réflectance et la transmittance sont élevées, et vice-versa. On notera cependant que la réflectance MWIR sature plus vite avec C_w que la réflectance SWIR. Ceci est illustré par la Figure 2.19 sur laquelle sont représentées, pour l'ensemble des spectres, les valeurs de réflectance à 1,9 μm et à 5 μm . La décroissance est plus rapide à 5 μm et on atteint plus rapidement un plateau, dès 0,005 g/cm^2 .

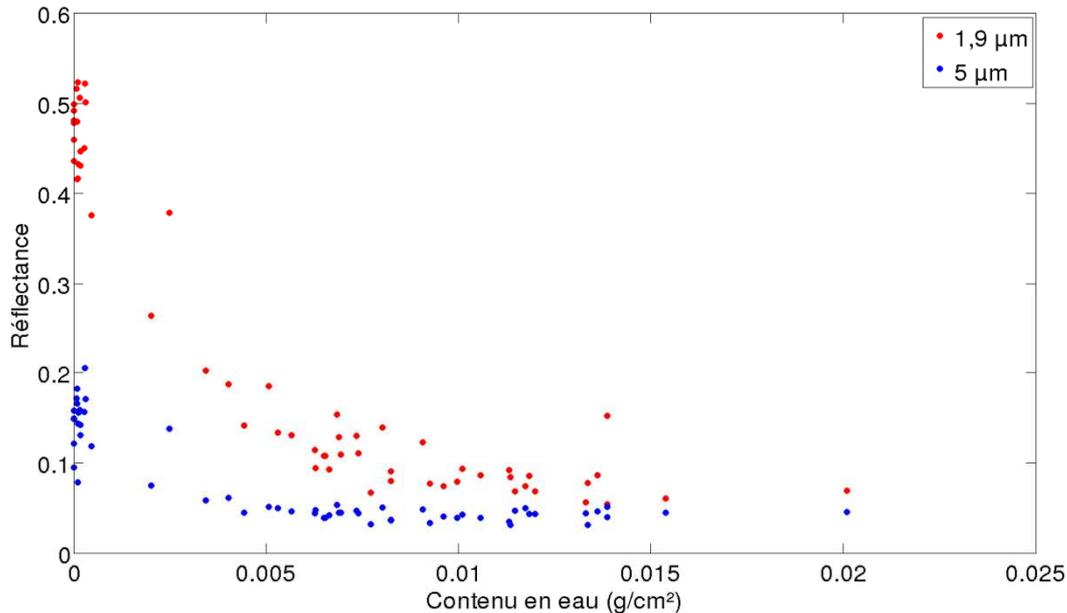


Figure 2.19 : Décroissance de la réflectance avec le contenu en eau foliaire pour deux longueurs d'onde représentatives du SWIR (1,9 μm , en rouge) et du MWIR (5 μm , en bleu).

On remarque sur la Figure 2.18 que la variabilité de la réflectance SWIR-MWIR avec C_w n'est plus vraie autour de 2,9 μm . La réflectance est quasi-saturée quel que soit le contenu en eau de la feuille, à cause de l'absorption fondamentale due à la vibration de la molécule O–H que l'on retrouve aussi bien dans l'eau que dans les autres constituants foliaires (cellulose, lignine, pigments, etc.). A cette longueur d'onde, la transition entre réflexion spéculaire et réflexion volumique due à une décroissance de l'absorption est bien illustrée (Figure 2.18). Le spectre de réflectance de la feuille fraîche de *Sassafras* montre un maximum local (réflexion spéculaire) contrairement au spectre de réflectance de la feuille la plus sèche qui montre un minimum local (réflexion volumique). L'importance de la réflexion spéculaire dans le MWIR est confirmée par la présence de deux pics proches de 3,4 μm , dus aux vibrations fondamentales de la liaison carbone-hydrogène (Salisbury & Milton, 1988). Les effets de surface ne sont pas observables dans le VNIR-SWIR car seules les bandes d'absorption fondamentales observées dans l'infrarouge lointain peuvent engendrer une telle réflexion spéculaire.

L'influence de l'eau sur les propriétés optiques des feuilles est plus difficilement interprétable après 5,7 μm . Bien que la réflectance et la transmittance des feuilles les plus sèches puissent être élevées, ce n'est pas toujours le cas et en général, les spectres ne montrent pas de lien quantitatif

avec le contenu en eau dans ce domaine spectral. Par exemple dans la Figure 2.18, la feuille de *Sassafras* correspondant à la réflectance la plus élevée dans le TIR est la feuille la plus fraîche de cette espèce ! De plus, la différence de forme dans les spectres des deux espèces représentées dans la Figure 2.18 montre que les propriétés optiques dans ce domaine de longueurs d'onde dépendent de l'espèce foliaire. Elles semblent en effet plus liées à la surface des feuilles (présence de cires ou de poils), caractéristique de l'espèce (Ribeiro da Luz & Crowley, 2007), qu'à la feuille dans toute son épaisseur. Les poils ou cires limitent la pénétration de la lumière à l'intérieur de la feuille. Par exemple, la cutine, qui est le composant principal de la cuticule, absorbe très fortement le rayonnement incident autour de 8,5 μm . L'absence de pic de réflexion spéculaire à cette longueur d'onde peut être expliquée par la présence d'une épaisse couche de cire sur la surface de la feuille, qui la cache par effet cavité (Ribeiro da Luz & Crowley, 2007).

Ces nouvelles données concordent avec les premières études (Eldvige, 1988 ; Salisbury & Milton, 1988 ; Narayanan et al., 1991) : le principal effet du dessèchement des feuilles a lieu à des longueurs d'onde inférieures à 6 μm et il n'y a pas d'influence significative de l'eau dans le TIR, où la réflectance dépend plutôt de l'espèce.

2.8. REPRESENTATION DES DONNEES EN TERME D'EMISSIVITE

L'émissivité spectrale d'une feuille est définie par $\varepsilon(\lambda) = 1 - \rho(\lambda) - \tau(\lambda)$ (Chapitre 1), où $\rho(\lambda)$ et $\tau(\lambda)$ sont respectivement la réflectance et la transmittance directionnelles-hémisphériques. Cette grandeur est utilisée par de nombreux modèles de transfert radiatif (pour des études atmosphériques notamment) ou pour des études sur la température des surfaces. Nous souhaitons ici fournir à la communauté scientifique quelques valeurs représentatives d'émissivité de feuilles dans le MWIR et le TIR (Figure 2.20).

Le Tableau 2.4 donne les valeurs moyennes d'émissivité de l'ensemble du jeu de données dans deux fenêtres atmosphériques (3 - 5 μm et 8 - 14 μm) et dans le domaine 3,5 - 5,7 μm , où la signature spectrale de l'eau atteint son maximum. Les statistiques sont données pour les feuilles fraîches (contenu en eau supérieur à 0,003 g/cm², 40 échantillons) et sèches (contenu en eau inférieur à 0,003 g/cm², 18 échantillons). On note que l'émissivité des feuilles sèches peut être inférieure à 0,89 dans la fenêtre 8-14 μm . Une valeur si faible est assez différente de la valeur $\varepsilon = 0,95$ communément utilisée mais confirme l'article d'Oliosio et al. (2007) quant à l'émissivité de champs d'orge secs. Pour des mesures par capteur infrarouge, une erreur de 0,06 sur l'émissivité peut engendrer une erreur dans l'estimation de la température radiative allant jusqu'à 5 K, en fonction des caractéristiques atmosphériques (Oliosio, 1995). Dans la fenêtre 3 - 5 μm , l'émissivité des feuilles varie de 0,75 à 0,97.

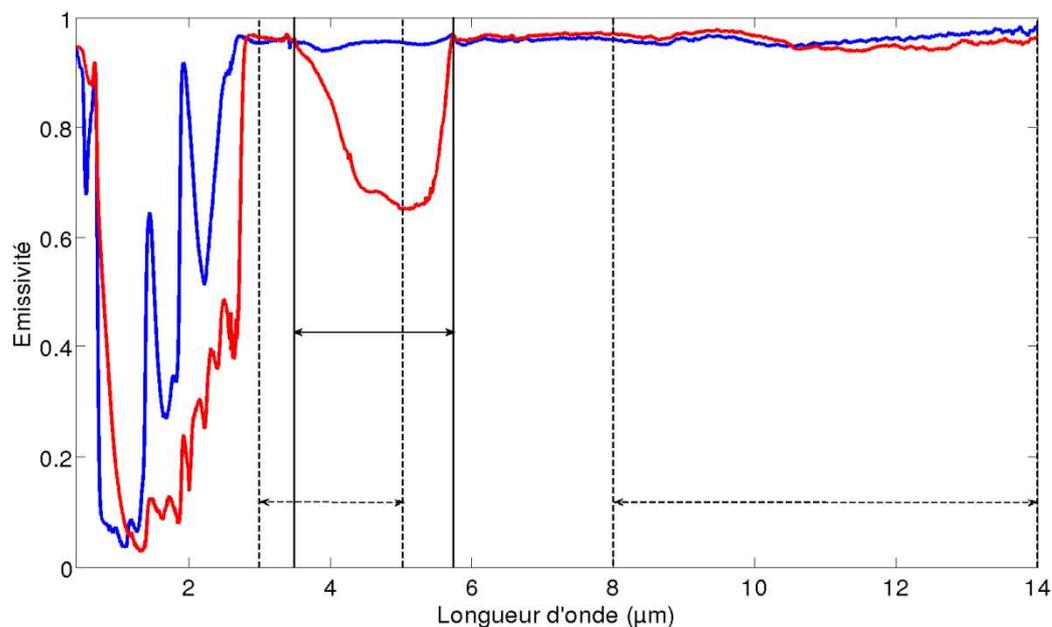


Figure 2.20 : Emissivité de feuilles fraîche (bleu) et sèche (rouge) de *Catalpa* appartenant au jeu de données de l'USGS. Les domaines spectraux d'intérêt sont marqués par des lignes (3,5 - 5,7 μm , où la signature de l'eau est maximum, et deux fenêtres atmosphériques 3 - 5 μm et 8 - 14 μm).

Tableau 2.4 : Statistiques sur l'émissivité des feuilles dans trois domaines d'intérêt.

Domaine spectral	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
Feuilles fraîches				
3,5 - 5,7 μm	0,89	0,97	0,95	0,02
3 - 5 μm	0,92	0,97	0,95	0,01
8 - 14 μm	0,93	0,98	0,96	0,01
Feuilles sèches				
3,5 - 5,7 μm	0,67	0,90	0,79	0,06
3 - 5 μm	0,75	0,97	0,90	0,06
8 - 14 μm	0,89	0,96	0,94	0,02

2.9. BILAN

Ces nouvelles données fournissent des informations importantes sur la variabilité de l'émissivité (ou de la réflectance ou de la transmittance) dans le MWIR-TIR. Elles confirment les études précédentes (Eldvige, 1988 ; Salisbury & Milton, 1988) et montrent le potentiel du MWIR pour l'étude du contenu en eau de la végétation. L'émissivité des feuilles peut en effet varier fortement en fonction du contenu en eau dans la fenêtre atmosphérique 3 - 5 μm , et jusqu'à 5,7 μm . Plus loin dans le spectre, les variations spectrales ne sont plus clairement liées au contenu en eau de la plante et présentent donc moins d'intérêt pour notre étude. Il a aussi été montré que la

réflectance des feuilles saturait plus rapidement avec le contenu en eau que dans le VNIR-SWIR. Ceci laisse déjà présager que les applications de ce travail viseraient plutôt des canopées sèches que fraîches. On pense par exemple à la surveillance des feux de forêts : le capteur satellitaire BIRD peut être utilisé pour la détection précoce des feux, grâce à des données du domaine MWIR. Il serait intéressant de développer un outil avec ce même capteur qui fournirait des informations sur les risques de feux de forêts, après estimation de la teneur en eau de la végétation.

Cette nouvelle connaissance des propriétés optiques des feuilles dans le MWIR en fonction de leur contenu en eau va permettre leur modélisation en vue d'une exploitation de mesures de télédétection. Ces prochaines étapes sont présentées dans les Chapitres 3 et 4.

3. MODELISATION DES PROPRIETES OPTIQUES DE LA VEGETATION

Nous avons vu précédemment que, malgré la signature marquée de l'eau sur les propriétés optiques de la végétation dans le domaine MWIR, il n'existe pas de modèle de transfert radiatif opérant dans ce domaine. Or la modélisation pourrait permettre de déterminer le contenu en eau d'un couvert végétal à partir de mesures de télédétection. Nous avons donc tout d'abord décidé d'étendre le modèle de réflectance et transmittance des feuilles PROSPECT au domaine MWIR, en nous basant sur les spectres présentés dans le Chapitre 2. Nous appellerons PROSPECT-VISIR le nouveau modèle. Sont ensuite présentés le modèle de réflectance de canopée 4SAIL et le code de transfert radiatif atmosphérique MODTRAN, auxquels PROSPECT-VISIR est couplé pour simuler les propriétés optiques du couvert en entrée d'un capteur aéroporté. Pour illustrer ce couplage et nous assurer que le signal de l'eau de la végétation est potentiellement détectable par télédétection aéroportée dans le MWIR, nous présentons ensuite une étude comparant la signature spectrale de l'eau dans la luminance de la canopée en entrée du capteur au bruit radiométrique de ce capteur. Ceci permet de s'assurer que le signal de l'eau est bien supérieur au niveau de bruit des capteurs existants et peut ainsi être détecté par télédétection aéroportée dans le MWIR. Une étude de sensibilité des réflectances et luminances simulées par cette chaîne de modèles à l'ensemble de leurs variables d'entrée est finalement présentée.

3.1. MODELISATION DES PROPRIETES OPTIQUES DES FEUILLES

Ce travail a donné lieu à une publication dans la revue Remote Sensing of Environment (Gerber et al., 2011).

3.1.1. MODELE PROSPECT ORIGINAL (0,4 - 2,5 μM)

Parmi les modèles de propriétés optiques des feuilles présentés dans le Chapitre 1, nous avons fait le choix d'étendre le modèle de transfert radiatif PROSPECT en raison de sa simplicité d'utilisation et parce qu'il est aujourd'hui le plus utilisé par la communauté. Il calcule la réflectance et la transmittance directionnelles-hémisphériques des feuilles en fonction de leur contenu biochimique et de leur structure anatomique (Jacquemoud & Baret, 1990). Le Tableau 3.1 rappelle les variables d'entrée du modèle. PROSPECT est basé sur le « plate model » généralisé d'Allen et al. (1969, 1970) qui assimile la feuille à un empilement de N couches élémentaires (milieu 2) séparées par $N - 1$ espaces remplis d'air (milieu 1). Cette représentation multicouches, dont la solution est donnée pour la première fois par Stokes (1862), est équivalente à une couche simple diffusant et absorbant la lumière incidente suivant la théorie de Kubelka-Munk (Kubelka & Munk, 1931). N caractérise la structure interne de la feuille. La réflectance R_L et la transmittance T_L totales d'une couche élémentaire à une longueur d'onde donnée sont définies par

$$R_L = r_{12} + \frac{t_{12}t_{21}r_{21}\tau^2}{1 - r_{21}^2\tau^2} \quad (3.1)$$

$$T_L = \frac{t_{12}t_{21}}{1-r_{21}^2\tau^2} \quad (3.2)$$

où r_{ij} et t_{ij} sont la réflectivité et la transmissivité à l'interface entre les milieux i et j , et τ est la fraction de lumière transmise à travers la couche. r_{ij} est obtenue en moyennant les équations de Fresnel (Equation 3.11) autour d'un angle solide et t_{ij} est tout simplement calculé par la relation $t_{ij} = 1 - r_{ij}$. τ est lié au coefficient d'absorption A de la couche (quantité extensive) par la loi de Beer-Lambert. A est la somme des absorptions élémentaires des différents constituants foliaires

$$A(\lambda) = \sum_i \frac{C_i}{N} \alpha_i(\lambda) \quad (3.3)$$

où C_i est le contenu du constituant i (en g/cm²) et $\alpha_i(\lambda)$ son coefficient spécifique d'absorption (quantité intensive en cm⁻¹) à la longueur d'onde λ . Le paramètre de structure N , nombre réel de couches élémentaires compris entre 1 et 3, représente la structure anatomique de la feuille et contrôle les réflexions de volume dans le mésophylle. Par exemple, une feuille sèche a une valeur plus élevée qu'une feuille fraîche car, comme mentionné précédemment, sa réflectance est plus élevée dans le NIR. L'orientation des facettes de l'épiderme supérieur est caractérisée par un angle θ , indépendant de la longueur d'onde, qui correspond à l'angle d'incidence de la lumière équivalent sur la surface de la feuille pour une rugosité donnée. Bousquet et al. (2005) ont montré que $\theta = 40^\circ$ était une valeur réaliste pour la plupart des feuilles dans le domaine VNIR-SWIR. Entre deux couches, la lumière est supposée être isotrope, donc $\theta = 90^\circ$.

Tableau 3.1 : Variables d'entrée de PROSPECT.

Constantes	
Coefficient spécifique d'absorption du constituant foliaire i	$\alpha_i(\lambda)$
Indice de réfraction réel	$n(\lambda)$
Angle d'incidence	θ
Variables	
Contenu en pigments, eau et matière sèche	C_i
Paramètre de structure de la feuille	N

3.1.2. MISE EN DEFAUT DE PROSPECT AU-DELA DE 2,5 μM

L'extension de PROSPECT jusqu'à 5,7 μm consiste à déterminer les paramètres du modèle (coefficient spécifique d'absorption et indice de réfraction) à chaque longueur d'onde du nouveau domaine spectral (la procédure d'étalonnage du modèle est détaillée par Féret et al. (2008) et dans la Section 3.1.4). Ces paramètres sont ensuite utilisés pour modéliser des spectres de réflectance et transmittance de feuilles, auxquels sont comparés les spectres que nous avons mesurés. La Figure 3.1 qui montre des spectres de réflectance modélisé par PROSPECT et

mesuré, pour une feuille fraîche, met en évidence un mauvais ajustement des spectres modélisés. La réflectance modélisée décroît fortement et on constate un minimum local autour de 5,5 μm , au lieu du maximum observé. Sur la même figure, est tracé le spectre de réflectance simulé par la nouvelle version du modèle, PROSPECT-VISIR (VISible-InfraRouge), qui sera présentée dans la section suivante.

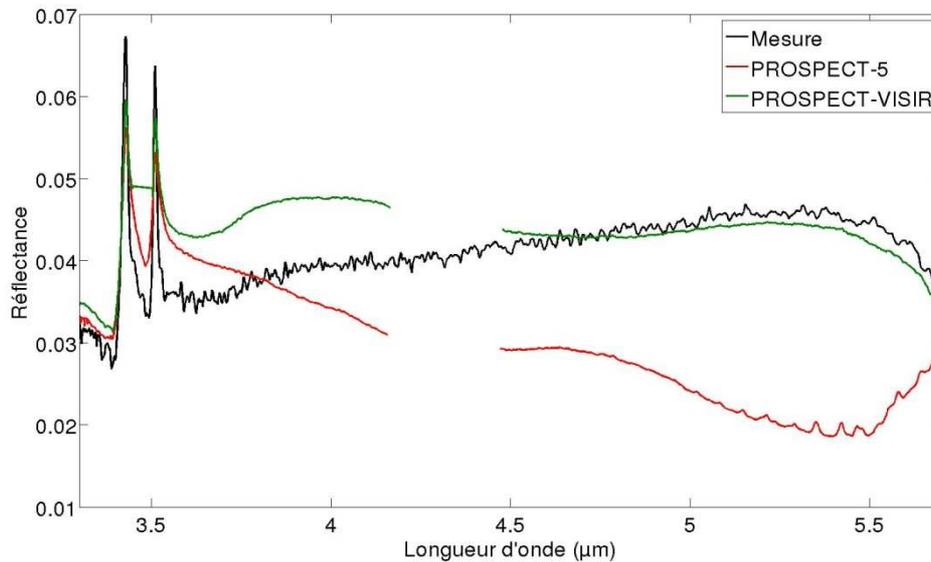


Figure 3.1 : Mise en défaut de PROSPECT-5 pour des longueurs d'onde supérieures à 2,5 μm . Feuille de *Prunus Laurocerasus* (base de données USGS).

La configuration présente de PROSPECT pour simuler les propriétés optiques des feuilles entre 2,5 et 5,7 μm n'est donc pas concluante et nous avons dû modifier le modèle selon deux axes qui seront détaillés dans la section suivante.

3.1.3. DESCRIPTION DU MODELE DEVELOPPE PROSPECT-VISIR (0,4 - 5,7 μm)

Comme mentionné dans le Chapitre 1, le domaine infrarouge est caractérisé par des niveaux très élevés d'absorption du rayonnement électromagnétique par les composés foliaires contrairement au domaine VNIR-SWIR. Par ailleurs, Kortüm & Vogel (1958) démontrent que la réflectance des matériaux qui ont un très fort coefficient d'absorption s'écarte de la théorie de Kubelka-Munk et que cette déviation est entièrement imputable à une augmentation de la réflexion spéculaire. De plus, la surface cireuse des feuilles peut affecter le contraste spectral par effet cavité (augmentation de la réflexion volumique). Toutes ces raisons expliquent la nécessité de modifier le modèle PROSPECT en tenant compte des coefficients de Fresnel complexes ainsi qu'en ajoutant une couche de surface. L'hypothèse selon laquelle le nombre de couches N (caractéristique de la réflexion de volume) est constant avec la longueur d'onde est acceptable jusqu'à 5,7 μm . En effet, Kortüm & Oelkrug (1964) affirment que le coefficient de diffusion dans les équations de Kubelka-Munk ($\sim N$ pour PROSPECT) ne dépend que faiblement de la longueur d'onde (λ^{-1} à λ) quand la

taille des particules est égale ou supérieure à la longueur d'onde ($X \geq 1$), ce qui est le cas des structures à l'intérieur de la feuille (cellules, chloroplastes, etc.) dans le domaine 0,4 - 5,7 μm . L'influence des petites particules de surface ($X \leq 1$) sera prise en compte dans la nouvelle couche. L'absorption des pigments étant négligeable dans le domaine 0,8 - 5,7 μm (Gates & Tantraporn, 1952 ; Holt & Jacobs, 1955 ; Schlücker et al., 2003), les seuls constituants foliaires considérés sont l'eau et la matière sèche, qui inclut la cellulose, la cutine, la lignine, etc.

Utilisation des coefficients de Fresnel complexes

Considérons la réflexion et la transmission d'une onde plane à l'interface entre un milieu d'indice de réfraction $\tilde{n}_1(\lambda) = n_1(\lambda) + i\kappa_1(\lambda)$ et un milieu d'indice de réfraction $n_2(\lambda) + i\kappa_2(\lambda)$. La partie réelle $n_i(\lambda)$ est appelée indice de réfraction (ou indice optique), et la partie imaginaire $\kappa_i(\lambda)$ est appelée coefficient d'absorption. L'indice de réfraction relatif de l'interface est donné par

$$\tilde{n}(\lambda) = \frac{\tilde{n}_2(\lambda)}{\tilde{n}_1(\lambda)} = n(\lambda) + i\kappa(\lambda) \quad (3.5)$$

d'où

$$n = \frac{n_1 n_2 + \kappa_1 \kappa_2}{n_1^2 + \kappa_1^2}, \quad (3.6)$$

$$\kappa = \frac{n_1 \kappa_2 - n_2 \kappa_1}{n_1^2 + \kappa_1^2}. \quad (3.7)$$

La partie imaginaire de l'indice de réfraction $\kappa(\lambda)$ s'exprime en fonction du coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$ selon

$$\kappa(\lambda) = \alpha(\lambda) \frac{\lambda}{4\pi}. \quad (3.8)$$

Dans le VNIR-SWIR, $\kappa(\lambda)$ est généralement ignoré dans les équations de Fresnel car sa valeur est très inférieure à celle de $n(\lambda)$. Ce n'est plus le cas dans le MWIR pour de nombreux matériaux. La feuille étant un mélange de plusieurs constituants, on admet généralement que l'indice de réfraction global \tilde{n} est une combinaison linéaire des indices de réfraction de chaque constituant. Le lien entre κ et les coefficients spécifiques d'absorption α_i est donc la somme pondérée des κ_i de chaque constituant. Ainsi, pour une feuille composée de N_c constituants, l'Equation 3.8 devient

$$\kappa(\lambda) = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\sum_{i=1}^{N_c} C_i \alpha_i(\lambda)}{\sum_{i=1}^{N_c} C_i}, \text{ soit} \quad (3.9)$$

$$\kappa(\lambda) = \sum_i \left(\frac{C_i}{\sum_i C_i} \left(\alpha_i(\lambda) \frac{\lambda}{4\pi} \right) \right) \quad (3.10)$$

donc κ dépend de la feuille considérée. La variabilité de n en fonction de C_i est supposée plus faible et, parce que déterminer la partie réelle de l'indice de réfraction de chaque composant n'est pas réalisable en l'état actuel de nos connaissances, il a été décidé d'utiliser un spectre moyen de

n , unique et identique pour toutes les feuilles. Si la lumière n'est pas polarisée, le coefficient de réflexion de Fresnel à une interface est défini par

$$r = \frac{1}{2}(r_{\perp} + r_{//}) \quad (3.11)$$

où r_{\perp} et $r_{//}$ sont les coefficients de réflexion pour une polarisation perpendiculaire et parallèle. Le coefficient de transmission correspondant se déduit simplement par $t = 1 - r$. Dans le cas d'un indice de réfraction \tilde{n} complexe, pour un angle d'incidence θ et un indice de réfraction n donnés, ils peuvent être réécrits selon

$$r_{//} = \frac{((n^2 - \kappa^2)\cos\theta - \psi_1)^2 + (2n\kappa\cos\theta - \psi_2)^2}{((n^2 - \kappa^2)\cos\theta + \psi_1)^2 + (2n\kappa\cos\theta + \psi_2)^2} \text{ et} \quad (3.12)$$

$$r_{\perp} = \frac{(\cos\theta - \psi_1)^2 + \psi_2^2}{(\cos\theta + \psi_1)^2 + \psi_2^2} \quad (3.13)$$

avec

$$\psi_1^2 = \frac{1}{2} \left((n^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta) + ((n^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2\kappa^2)^{1/2} \right) \text{ et} \quad (3.14)$$

$$\psi_2^2 = \frac{1}{2} \left(-(n^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta) + ((n^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2\kappa^2)^{1/2} \right). \quad (3.15)$$

Le détail de ces équations peut être trouvé dans Hapke (1993). Pour une incidence normale et $n > 1$, le coefficient de réflexion de Fresnel devient

$$r = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2}. \quad (3.16)$$

Ces relations sont valides dans tout le domaine VNIR-TIR et, a fortiori, entre 0,4 et 5,7 μm car les Equations 3.12 et 3.13 se simplifient lorsque $\kappa(\lambda)$ devient négligeable, ce qui est le cas dans le VNIR-SWIR. Les expressions de la version originale de PROSPECT sont alors restaurées. Par la suite, les coefficients de Fresnel complexes sont utilisés sur tout le domaine spectral 0,4 - 5,7 μm .

Ajout d'une couche de surface

La surface de la feuille joue un rôle important dans la répartition entre la réflexion spéculaire et la réflexion de volume (Chapitre 1). Elle peut augmenter la réflexion volumique et/ou l'effet cavité en fonction de sa structure anatomique et de sa composition biochimique. Une façon simple d'introduire cet effet dans PROSPECT est d'ajouter une couche non-absorbante au sommet des N couches, caractérisée par son propre indice de réfraction réel $n_{surf}(\lambda)$. Comme les coefficients de Fresnel dépendent de l'indice de réfraction relatif de l'interface \tilde{n} , plus petite est la différence entre les deux indices de réfraction, plus petit est \tilde{n} , et plus faible est la réflexion spéculaire. De plus, la différence entre $n_{surf}(\lambda)$ et $n(\lambda)$ induit des réflexions multiples entre l'air et la première couche élémentaire de feuille qui absorbe la lumière. Cette couche de surface ne doit pas

être considérée comme une représentation réaliste de la cuticule, par exemple, mais comme une couche équivalente qui compense les effets de surface. Elle est accolée à la première couche de feuille, sans interstices (Figure 3.2).

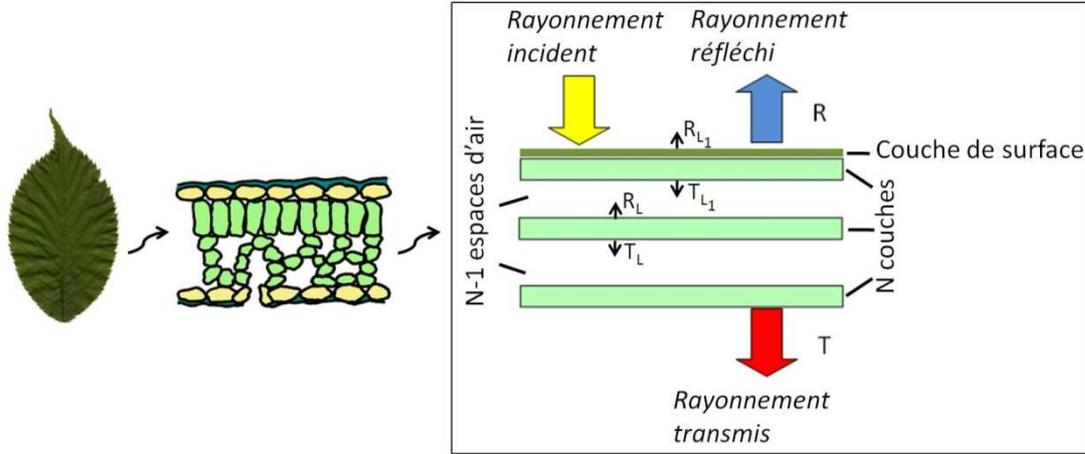


Figure 3.2 : Structure du modèle PROSPECT-VISIR.

La lumière incidente sur cette couche de surface non-absorbante est supposée inscrite dans un cône de demi-angle d'ouverture $\theta = 40^\circ$, comme dans PROSPECT (Féret et al., 2008). Elle est aussi supposée devenir isotrope une fois transmise à travers cette couche ($\theta = 90^\circ$). La réflectance R_{L1} et la transmittance T_{L1} du premier groupe de couches (couche de surface + première couche de feuille) sont maintenant définies par

$$R_{L1} = r_{10} + \frac{t_{10}t_{01}r_{021}}{1-r_{01}r_{021}} \quad (3.17)$$

et

$$T_{L1} = \frac{t_{10}t_{021}}{1-r_{01}r_{021}} \quad (3.18)$$

avec $r_{021} = r_{02} + \frac{t_{02}t_{20}r_{21}\tau^2}{1-r_{20}r_{21}\tau^2}$ et $t_{120} = \frac{t_{02}r_{21}\tau^2}{1-r_{20}r_{21}\tau^2}$ (Hagmann & Hummel, 1996 ; Windt, 1998). L'indice 0 correspond à la couche de surface, 1 à l'air, et 2 à l'intérieur de la feuille. La réflectance R_L et la transmittance T_L des autres couches suivent toujours les Equations 3.1 et 3.2.

3.1.4. CALIBRAGE ET VALIDATION DE PROSPECT-VISIR

Calibrage

Le calibrage du modèle a pour but de déterminer les coefficients spécifiques d'absorption $\alpha_i(\lambda)$ de l'eau et de la matière sèche, ainsi que les indices de réfraction de l'intérieur de la feuille $n(\lambda)$ et de la couche de surface $n_{surf}(\lambda)$. Ces paramètres doivent être déterminés à chaque longueur d'onde. Le nombre de couches compactes empilées qui définit le paramètre de structure N a aussi besoin d'être connu. Il varie d'une feuille à l'autre et est supposé indépendant de la longueur

d'onde, mais ne peut pas être mesuré expérimentalement. Idéalement, il faudrait le déterminer pour chaque feuille en même temps que l'estimation des coefficients spécifiques d'absorption et des indices de réfraction. Mais sachant que les mesures radiométriques ont été effectuées à N_λ longueurs d'onde, une telle méthode requerrait $2N_\lambda + 1$ paramètres d'ajustement. La gestion d'un si grand nombre d'inconnues est difficile donc le calibrage a été séparé en deux étapes. Tout d'abord, N est estimé pour chaque feuille en utilisant la réflectance et la transmittance du plateau NIR où son effet est maximum car l'absorption est très faible. A cette étape, l'indice de réfraction est supposé constant et égal à 1,45 (Féret et al., 2008). Ensuite, les deux indices de réfraction $n(\lambda)$ et $n_{surf}(\lambda)$, ainsi que le coefficient spécifique d'absorption de la matière sèche $\alpha_m(\lambda)$, sont déterminés conjointement en utilisant l'ensemble du jeu de données (le contenu en eau et en matière sèche sont connus grâce aux mesures effectuées sur chaque feuille). Les pigments n'étant pas étudiés dans ce travail, nous négligerons le domaine 0,4 - 1,2 μm . Le calibrage est donc fait à chaque longueur d'onde du domaine 1,2 - 5,7 μm , sauf entre 4,16 et 4,47 μm (absorption du CO_2 , Chapitre 2). Le coefficient spécifique d'absorption de l'eau $\alpha_w(\lambda)$ est pris dans la littérature, les précédents calibrages de PROSPECT (Jacquemoud et al., 1996 ; Féret et al., 2008) ayant montré que celui calé sur les feuilles était très proche de celui de l'eau pure (Figure 1.6). Les trois paramètres inconnus $\Theta = (n(\lambda), n_{surf}(\lambda), \alpha_m(\lambda))$ sont déterminés par inversion de PROSPECT-VISIR à chaque longueur d'onde, en minimisant la fonction de mérite

$$J(\Theta) = \sum_{\lambda} (R_{mes}(\lambda) - R_{mod}(\lambda, \Theta))^2 + (T_{mes}(\lambda) - T_{mod}(\lambda, \Theta))^2, \quad (3.19)$$

où $R_{mes}(\lambda)$ et $T_{mes}(\lambda)$ sont la réflectance et la transmittance mesurées à la longueur d'onde λ , et $R_{mod}(\lambda, \Theta)$ et $T_{mod}(\lambda, \Theta)$ sont la réflectance et la transmittance modélisées.

Test du modèle

Deux tests sont menés dans les domaines spectraux 1,2 - 5,7 μm et 3 - 5 μm , pour vérifier que les prédictions du modèle sont cohérentes avec les données observées. Un premier test, en mode direct, consiste en la simulation de spectres de réflectance et de transmittance de feuilles en utilisant les valeurs expérimentales de C_w et C_m . Ces spectres simulés sont ensuite comparés aux spectres mesurés. Cette étape requiert un ajustement préliminaire de N en utilisant les coefficients spécifiques d'absorption et indices de réfraction précédemment calibrés, selon la méthode détaillée par Féret et al. (2008). Le second test, en mode inverse, consiste à retrouver les contenus en eau et en matière sèche par inversion numérique du modèle. Pour chaque feuille, le jeu de paramètres (paramètre de structure et contenus en eau et matière sèche), symbolisé par le vecteur Θ , qui minimise la fonction de mérite (3.19) est déterminé. Notons que le nombre limité de données expérimentales nous a conduit à mener le calibrage et le test du modèle sur le même jeu de données. Pour conforter la robustesse du modèle un troisième test a donc été effectué, via l'utilisation d'une méthode "leave-one-out cross-validation" (Stone, 1974 ; Geisser,

1975). Dans cette procédure, le modèle est calibré n fois sur $n - 1$ données et validé n fois sur la $n^{\text{ième}}$ donnée restante (qui change donc à chaque itération).

3.1.5. RESULTATS

Calibrage

La Figure 3.3 montre que le coefficient spécifique d'absorption de la matière sèche est cohérent avec notre connaissance des propriétés optiques des constituants foliaires (cellulose, lignine, cires, etc.) illustrées dans la Figure 1.12.

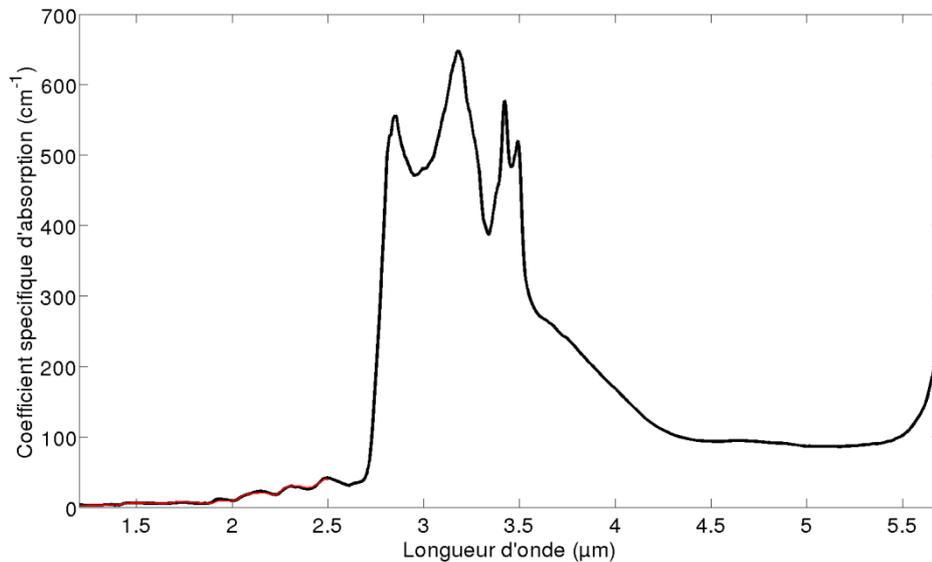


Figure 3.3 : Coefficient spécifique d'absorption de la matière sèche (noir). Le spectre a été interpolé entre 4,16 et 4,47 μm . En rouge : valeurs tirées de PROSPECT-5.

En deçà de 2,5 μm , le spectre s'ajuste avec celui de PROSPECT-5 (Féret et al., 2008). Les pics à 3,4 et 3,5 μm , mentionnés par Salisbury & Milton (1988), sont identifiés par Ribeiro da Luz (2006) comme étant une signature du méthylène typique des composants à longue chaîne aliphatique. Autour de 2,94 μm , on observe un minimum bien que les spectres d'absorption de la lignine et de la cellulose montrent un maximum à cette longueur d'onde dû à un étirement de la liaison O–H (Kondo, 1997 ; Dalimova & Kristallovich, 1999). La sous-estimation du coefficient d'absorption de la matière sèche peut s'expliquer par les très faibles valeurs de réflectance et de transmittance autour de 2,94 μm , ainsi que par les fortes valeurs du coefficient spécifique d'absorption de l'eau à ces mêmes longueurs d'onde. Les indices de réfraction estimés présentés dans la Figure 3.4 sont plus difficiles à interpréter car il n'existe malheureusement aucun élément de comparaison dans la littérature.

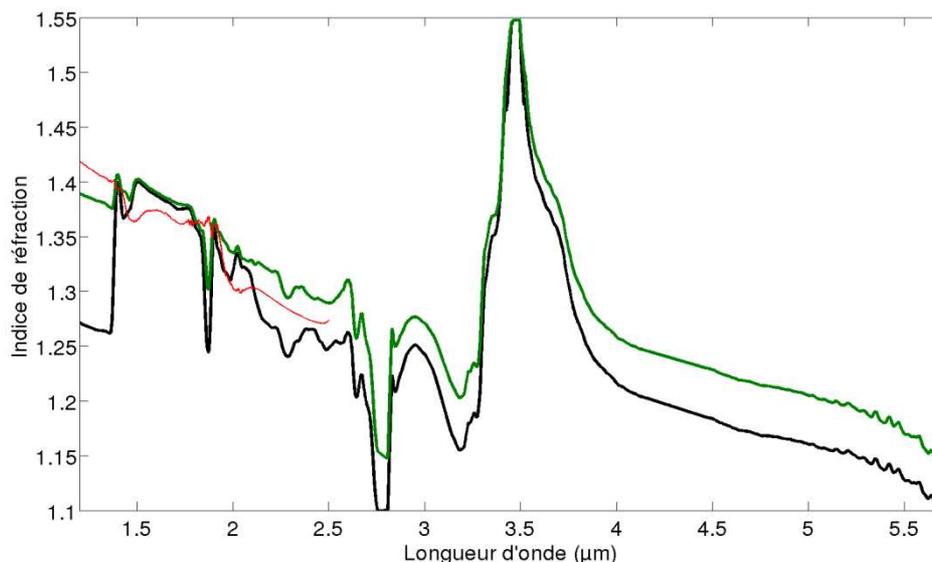


Figure 3.4 : Partie réelle des indices de réfraction estimés. Le spectre a été interpolé entre 4,16 et 4,47 μm . En noir : intérieur de la feuille. En vert : couche supérieure. En rouge : valeurs tirées de PROSPECT-5.

La décroissance des indices de réfraction avec la longueur d'onde est cohérente avec la connaissance globale que nous en avons. La variation majeure autour de 3,5 μm correspond aussi au maximum d'absorption du méthylène, d'après les relations de Kramers-Kronig. On pourrait supposer un comportement similaire à 2,9 μm , longueur d'onde correspondant à l'absorption fondamentale de la liaison O–H. Mais comme nous l'avons vu plus haut, le calibrage du coefficient spécifique d'absorption de la matière sèche est incertain à ces longueurs d'onde et a pu conduire à une mauvaise estimation des indices de réfraction. La Figure 3.4 montre que $n(\lambda)$ et $n_{surf}(\lambda)$ divergent dans le MWIR à partir de 2 μm , ce qui justifie a posteriori l'ajout de la couche supérieure permettant un meilleur ajustement des données. Le calibrage des paramètres de PROSPECT-VISIR serait très certainement amélioré par l'utilisation d'un jeu de données plus conséquent.

Evaluation du modèle

La Figure 3.5 compare la réflectance et la transmittance mesurées et modélisées de deux feuilles fraîches (*Catalpa* et *Tillia*) et deux feuilles sèches (*Catalpa* et *Acer platanoides*). Leur forme et leur amplitude sont bien reproduites dans chaque cas.

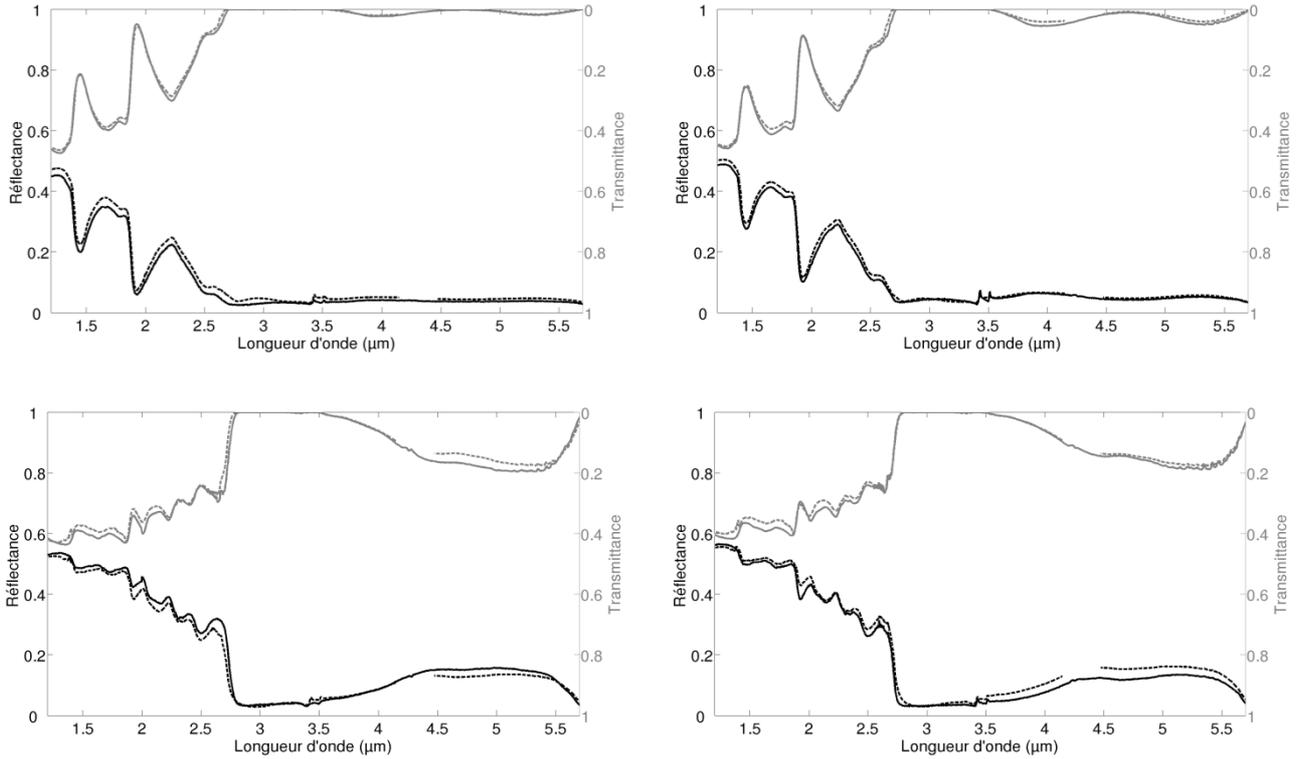


Figure 3.5 : Réflectance et transmittance simulées (pointillés) et mesurées (trait plein) de feuilles fraîches (en haut à gauche : catalpa - en haut à droite : tillia) et sèches (en bas à gauche : catalpa - en bas à droite : acer platanoides).

Les résultats du test du modèle en mode direct sont résumés dans le Tableau 3.2, en terme d'erreur quadratique moyenne de prédiction (RMSEP), de biais (BIAS) et d'erreur standard de prédiction corrigée du biais (SEPC). Ces grandeurs sont définies par

$$RMSEP = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y'_j - y_j)^2 / n}, \quad (3.20)$$

$$BIAS = \sum_{j=1}^n (y'_j - y_j) / n \text{ et} \quad (3.21)$$

$$SEPC = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y'_j - y_j - BIAS)^2 / n}, \quad (3.22)$$

où y_j correspond aux mesures et y'_j aux valeurs modélisées, n étant le nombre d'échantillons. Les résultats sont très satisfaisants quel que soit le contenu en eau, avec des erreurs et un biais faibles. Les statistiques sont comparables à celles obtenues par Féret et al. (2008) pour le calibrage de PROSPECT-5, soit un RMSEP moyen de 0,025 et 0,021 pour, respectivement, la réflectance et la transmittance dans le domaine 0,4 - 2,5 μm .

Tableau 3.2 : Comparaison entre les réflectances et transmittances mesurées et simulées sur différents domaines de longueurs d'onde.

	1,2 - 5,7 μm	3 - 5 μm
Réflectance		
RMSEP	0,0168	0,0134
BIAS	0,0008	- 0,0010
SEPC	0,0167	0,0133
Transmittance		
RMSEP	0,0180	0,0132
BIAS	- 0,0019	- 0,0015
SEPC	0,0178	0,0130

La Figure 3.6 et le Tableau 3.3 résument les résultats de l'inversion obtenus pour les contenus en eau et en matière sèche.

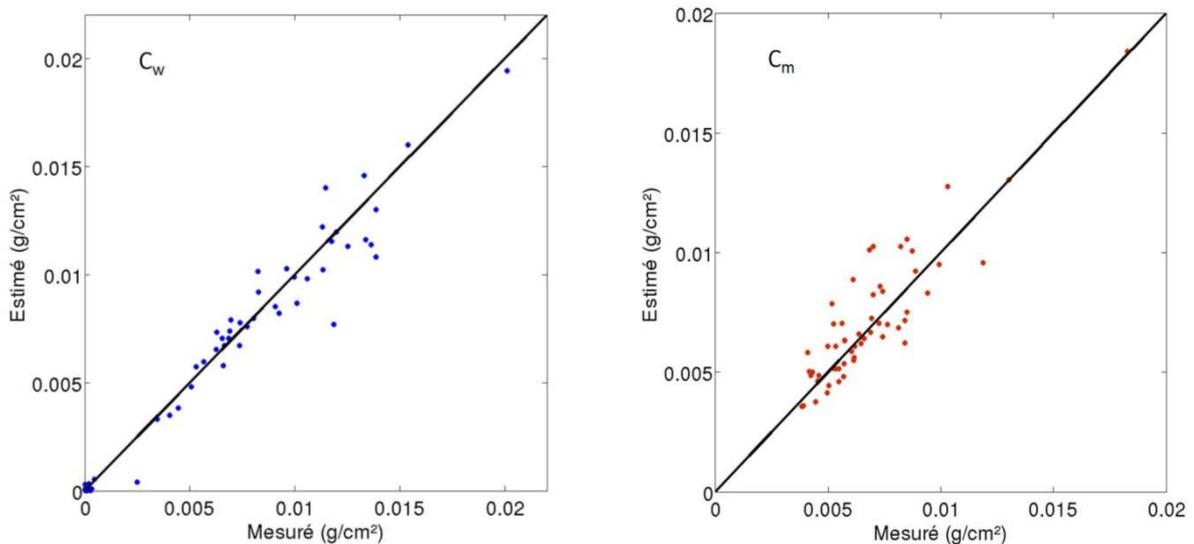


Figure 3.6 : Contenus en eau (gauche) et matière sèche (droite) de l'ensemble des jeux de données, mesurés et estimés à partir de spectres de réflectance et de transmittance de feuilles entre 1,2 et 5,7 μm .

Ces résultats montrent la capacité du modèle à estimer précisément le contenu en eau et en matière sèche. Comme l'absorption de l'eau est l'effet dominant dans le MWIR, les propriétés optiques des feuilles sont principalement influencées par C_w , ce qui explique la moins bonne performance de l'estimation de C_m par rapport à C_w . L'inversion du modèle exclusivement sur le MWIR donne aussi de bons résultats, bien que moins précis que sur l'ensemble du domaine VNIR-MWIR. En inversant PROSPECT uniquement dans le domaine VNIR-SWIR, Jacquemoud & Baret (1990) obtiennent pour C_w un RMSEP de 0,0029 g/cm^2 , Baret & Fourty (1997) un

RMSEP de 0,0025 g/cm², et Jacquemoud et al. (2000) un RMSEP de 0,0018 g/cm². Les valeurs de RMSEP sont aussi plus élevées pour C_m dans les trois publications. Ces résultats mettent en évidence le potentiel du domaine MWIR pour améliorer l'estimation du contenu en eau et en matière sèche des feuilles.

Tableau 3.3 : Validation de l'estimation des contenus en eau et matière sèche par l'inversion de PROSPECT-VISIR.

	1,2 - 5,7 μm	3 - 5 μm
Contenu en eau C_w		
RMSEP (g/cm ²)	0,0011	0,0021
BIAS (g/cm ²)	- 0,0002	- 0,0007
SEPC (g/cm ²)	0,0011	0,0020
Contenu en matière sèche C_m		
RMSEP (g/cm ²)	0,0013	0,0025
BIAS (g/cm ²)	0,0003	- 0,0004
SEPC (g/cm ²)	0,0013	0,0024

Le Tableau 3.4 présente les résultats obtenus par la méthode « leave-one-out » où chacun des spectres a été simulé en utilisant un jeu de paramètres calibré sur un jeu de données excluant ce spectre.

Tableau 3.4 : Comparaison entre les réflectances et les transmittances simulées et mesurées dans deux domaines spectraux.

	1,2 - 5,7 μm	3 - 5 μm
Réflectance		
RMSEP	0,0181	0,0170
BIAS	0,0022	- 0,0002
SEPC	0,0176	0,0164
Transmittance		
RMSEP	0,0190	0,0182
BIAS	- 0,0022	- 0,0021
SEPC	0,0187	0,0179

Là encore ces résultats confirment la robustesse du modèle dans le sens où les statistiques des Tableau 3.2 et Tableau 3.4 sont proches.

Pour l'ensemble des simulations présentées par la suite, nous utiliserons les spectres d'indices de réfraction et de coefficient d'absorption interpolés entre 4,16 et 4,47 μm (Figures 3.3 et 3.4).

3.1.6. DISCUSSION

PROSPECT-VISIR est le premier modèle simulant les propriétés optiques des feuilles entre 1,2 et 5,7 μm . Il permet aussi de retrouver leur contenu en eau et matière sèche par inversion dans ce

domaine spectral. Deux modifications majeures ont été apportées par rapport au modèle original : l'utilisation des coefficients de Fresnel complexes permettant de prendre en compte les hauts niveaux d'absorption, et l'ajout d'une couche de surface permettant de reproduire les effets de surface. Ces changements ne représentent cependant pas toute la complexité des phénomènes mis en jeu dans le MWIR, entre le VNIR-SWIR où la physique est bien modélisée (théorie de Kubelka-Munk) et le TIR où la complexité des phénomènes mis en jeu est telle qu'ils ne sont actuellement pas modélisés. Malgré cela PROSPECT-VISIR donne des résultats satisfaisants dans la mesure où les RMSEP sont faibles aussi bien en mode direct qu'en mode inverse.

Cette étude a néanmoins montré certaines limites des modèles dits "physiques". Durant la phase de calibrage, une forte sensibilité à l'initiation des variables a été rencontrée. Par exemple, comme mentionné par Allen et al. (1970), l'indice de réfraction $n(\lambda)$ et le paramètre de structure N des feuilles sont en partie liés ce qui complique la détermination du premier indépendamment du second et vice-versa : une valeur initiale de $n(\lambda)$ est nécessaire pour estimer N , qui en retour, est utilisé pour déterminer la "vraie" valeur de $n(\lambda)$. Le calibrage est donc assez sensible à la valeur initiale de $n(\lambda)$. De plus, dans la théorie de Kubelka-Munk, l'indice de réfraction est lié au coefficient de diffusion dont Hapke (1993) a démontré qu'il dépendait aussi de l'absorption. Ainsi n , N et k ne sont pas indépendants ce qui peut induire des erreurs par effet de compensation. Ce type d'erreur est typiquement suspecté dans le calibrage de l'indice de réfraction de la feuille à cause de son lien étroit avec le coefficient d'absorption. Ceci est vrai aussi bien dans le VNIR-SWIR que dans le MWIR. Malgré cette faiblesse structurelle du modèle, PROSPECT fournit depuis 20 ans à la communauté scientifique des informations quantitatives très utiles sur les propriétés optiques des feuilles (Jacquemoud et al., 2009). Les limites majeures concernent en fait le domaine infrarouge au-delà de 2,5 μm : comme dans la théorie de Kubelka-Munk, le modèle de couches d'Allen et al. (1969) est valide pour de faibles absorptions. Pour des conditions de forte absorption, Hapke (1993) et Kortüm & Vogel (1958) ont observé des divergences par rapport à la théorie de Kubelka-Munk, qui peuvent être théoriquement prévues.

3.2. MODELISATION DES PROPRIETES OPTIQUES DES CANOPEES

Le passage de l'échelle de la feuille à l'échelle de la canopée, puis au niveau de l'entrée du capteur est assuré par le couplage du modèle PROSPECT-VISIR à un modèle de réflectance de canopée, 4SAIL, et à un code de transfert radiatif à travers l'atmosphère, MODTRAN (Figure 1.17). Avant d'étudier la sensibilité des propriétés optiques des canopées aux variables d'entrée de ces modèles, ceux-ci sont détaillés dans les sections suivantes.

3.2.1. MODELE DE CANOPEES 4SAIL (0,4 - 14 μm)

SAIL est un modèle à quatre flux qui calcule la réflectance directionnelle et la luminance de couverts végétaux supposés homogènes (Verhoef, 1984). Il découle de la théorie de Kubelka-Munk et est valable dans le domaine réflectif (VNIR-SWIR). La dernière version de SAIL, appelée 4SAIL (Verhoef et al., 2007), étend ces calculs à l'infrarouge thermique. Outre les variables

d'entrée des versions précédentes, 4SAIL utilise quatre températures (feuilles au soleil et à l'ombre, sol au soleil et à l'ombre) et un « hot spot » thermique particulièrement utile pour des études directionnelles. Le modèle SAIL et ses versions successives ont été couplés avec succès aux différentes versions de PROSPECT depuis une vingtaine d'années (Jacquemoud et al., 2010), aussi nous avons choisi 4SAIL pour cette première étude de la réflectance des canopées dans le domaine MWIR. Nous gardons cependant à l'esprit qu'un modèle plus complexe comme DART 3D (Gastellu-Etchegorry, 1996) serait nécessaire pour représenter pleinement l'hétérogénéité de la structure et de la température d'une canopée.

Le modèle 4SAIL considère que l'émissivité des feuilles est égale à $\varepsilon = 1 - \rho$ et utilise cette expression pour le calcul des propriétés optiques des canopées dans le domaine MWIR-TIR. Or nous avons montré dans le Chapitre 2 que la transmittance des feuilles n'était pas forcément nulle dans ce domaine. Nous avons donc modifié le modèle en conséquence, le calcul de l'émissivité par la loi de Kirchhoff se fait désormais selon $\varepsilon = 1 - \rho - \tau$ (Chapitre 1). Le Tableau 3.5 présente les variables d'entrée du modèle en mode direct. En sortie de modèle, 4SAIL fournit une réflectance et une luminance au sommet de canopée. Pour notre étude, nous n'utiliserons que la réflectance, la luminance étant calculée selon l'équation du transfert radiatif (Section 1.4.1) où les termes atmosphériques proviennent du code MODTRAN (Section 3.2.2).

Tableau 3.5 : Variables d'entrée de 4SAIL.

<i>Eclairement de la scène</i>	
Angle zénithal solaire	Ψ
Angle azimutal solaire	Φ
Eclairement direct (W/(m ² .sr.μm))	E_{sun}
Eclairement diffus (W/(m ² .sr.μm))	E_{sky}
<i>Architecture de la canopée</i>	
LAI	LAI
Angle moyen d'inclinaison des feuilles	θ_l
Paramètre de « hot spot »	h
<i>Propriétés optiques</i>	
Réflectance et transmittance des feuilles	$\rho(\lambda), \tau(\lambda)$
Réflectance du sol	$\rho_{sol}(\lambda)$
<i>Température moyenne de la scène</i>	
	T_c

Orientation des feuilles - La fonction de distribution de l'orientation foliaire est décrite par deux paramètres a et b qui vérifient $|a| + |b| < 1$ (Verhoef, 1998). Les distributions foliaires décrites dans le Chapitre 1 peuvent être représentées ou approximées par ces deux paramètres. Le paramètre a est lié à l'angle moyen d'inclinaison des feuilles θ_l par la relation $\theta_l = 45^\circ - \frac{360}{\pi^2} a$.

Les valeurs extrêmes de θ_l sont, pour $a = 1$, $\theta_l = 8,52^\circ$, et pour $a = -1$, $\theta_l = 81,48^\circ$. La distribution n'est donc jamais parfaitement planophile ni erectophile, ce qui est en accord avec les observations que l'on peut faire dans la nature (Ross, 1981). Le paramètre b influence la forme bimodale de la distribution. Alors que $b = 0$ correspond à une forme en cloche, $b < 0$ favorise les angles supérieurs à θ_l et $b > 0$ favorise les angles inférieurs à θ_l . Compte tenu du fait que notre étude ne porte pas sur la variabilité angulaire fine de la réflectance, il a été choisi de fixer $b = 0$ dans la suite de l'étude. Nous n'étudierons donc que l'influence de a et, pour plus de clarté, nous donnerons la variabilité en terme de θ_l .

Températures - Quatre températures sont requises par 4SAIL, celles des feuilles et du sol prises à l'ombre et à la lumière. Dans la réalité il existe une infinité de températures au sein d'une canopée, selon la vitesse du vent, l'orientation des feuilles, etc. Ces quatre températures ne sont donc pas évidentes à appréhender. Compte tenu de la nature exploratoire de ce travail, nous avons choisi de n'utiliser, en première approche, qu'une seule température moyenne représentative du système sol-couvert. De plus, comme nous le verrons plus loin dans les simulations, cette température moyenne n'a pas d'influence sur la réflectance du couvert mais uniquement sur sa luminance.

3.2.2. MODELE D'ATMOSPHERE MODTRAN (0,4 - 14 μM)

MODTRAN (*MODerate resolution TRANsmittance*, Kneizys et al., 1996) est un code de transfert radiatif atmosphérique à modèle de bandes développé par l'Air Force Research Laboratory (<http://www.arfl.af.mil/>) depuis les années 90. MODTRAN simule des luminances et des transmittances atmosphériques pour des nombres d'onde compris entre 0 cm^{-1} et 50000 cm^{-1} , avec une résolution maximale de 2 cm^{-1} . Ceci correspond à un domaine spectral allant de 0 à 20 μm , et une résolution spectrale variable avec la longueur d'onde et inférieure au nanomètre dans le domaine optique. MODTRAN tient compte des profils verticaux de température, de la concentration en une douzaine de molécules gazeuses (O_2 , O_3 , H_2O , CO_2 , CO , CH_4 , SO_2 , NO , N_2O , NO_2 , NH_3 , et HNO_3), de la géométrie de l'atmosphère et, si cela est spécifié par l'utilisateur, de la diffusion par les aérosols et les effets d'environnement. Les raies d'absorption des molécules gazeuses sont modélisées à partir de la base de données spectroscopiques HITRAN (*High-resolution TRANsmission molecular absorption database*, Rothman et al., 1998). Selon la localisation et la saison, plusieurs modèles d'atmosphères sont disponibles : nous utiliserons les modèles US 1976, *Mid Latitude Summer* et *Mid Latitude Winter* correspondant à une atmosphère sous des latitudes moyennes. Il existe d'autres codes de transfert radiatif comme 6S mais leur résolution spectrale est moindre. Pour des applications en imagerie hyperspectrale, l'utilisation de MODTRAN a été préférée en raison de sa très fine résolution spectrale.

Les Figures 3.7 et 3.8 présentent des simulations de transmittance atmosphérique et d'éclairement total descendant pour une atmosphère US1976 et un capteur situé à 1 km d'altitude, sur

l'ensemble du domaine optique et dans le domaine MWIR uniquement. Les simulations ont été effectuées pour différents profils atmosphériques de contenu en vapeur d'eau et de température.

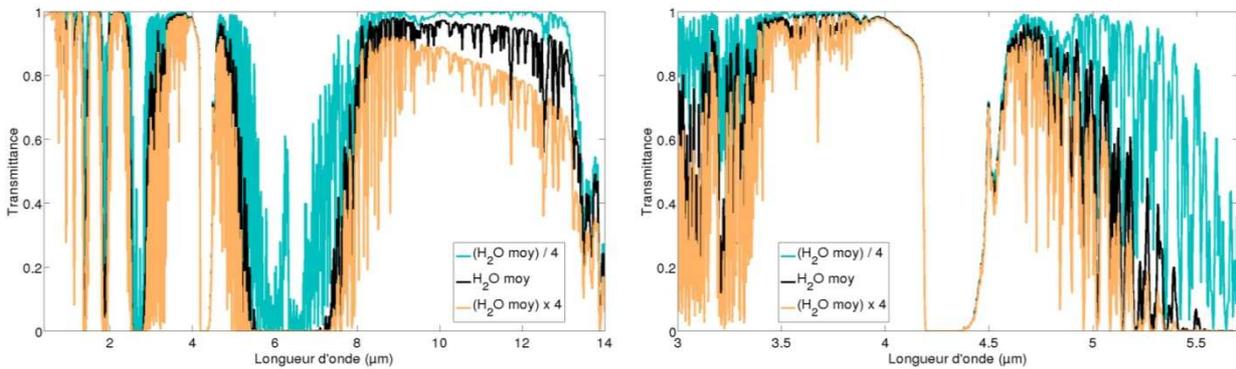


Figure 3.7 : Transmittance atmosphérique entre le sol et un capteur situé à 1 km d'altitude pour trois contenus en vapeur d'eau ($H_2O_{moy} = 1,42 \text{ g/cm}^2$).

On note une forte dépendance de la transmittance atmosphérique au contenu en vapeur d'eau dans le MWIR avant $3,5 \mu\text{m}$ et après $5 \mu\text{m}$ environ.

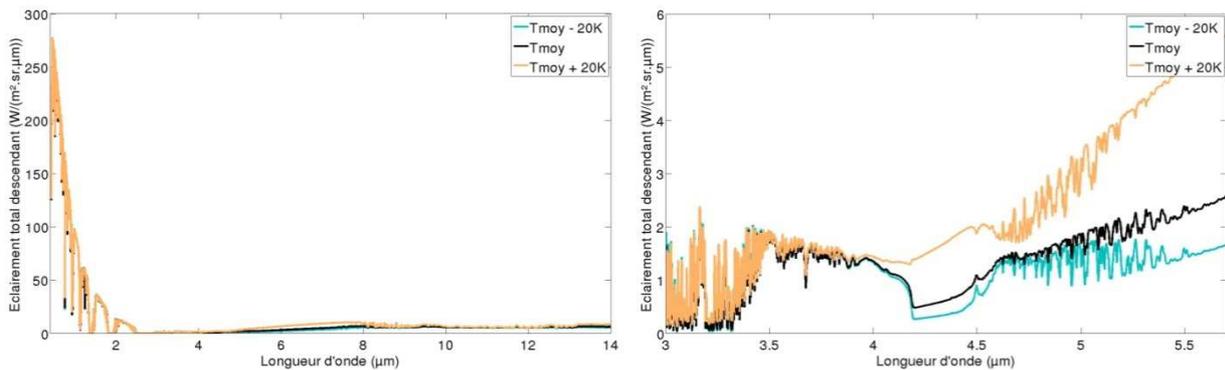


Figure 3.8 : Eclairement total descendant sur une scène, pour trois profils de températures atmosphériques ($T_{moy} = 300K$).

L'éclairement de la scène est fortement lié à la température atmosphérique à partir de $4 \mu\text{m}$. En effet, l'éclairement solaire devient négligeable et la surface reçoit uniquement la luminance émise par l'atmosphère.

3.2.3. COUPLAGE DES MODELES PROSPECT-VISIR, 4SAIL ET MODTRAN

Le couplage des modèles s'effectue selon la Figure 1.17. Le contenu biochimique des feuilles est donné en entrée de PROSPECT-VISIR qui calcule les spectres de réflectance et de transmittance associés. Ces spectres, qui peuvent aussi provenir de mesures, sont ensuite utilisés en entrée de 4SAIL, conjointement avec les autres caractéristiques de la scène (LAI, orientation foliaire, géométrie d'éclairement, etc.). On obtient ainsi en sortie de 4SAIL un spectre de réflectance de la canopée. La dernière étape de la simulation consiste alors à calculer la luminance en entrée du capteur selon l'équation du transfert radiatif (Equation 1.4, Section 1.4.1), en introduisant un

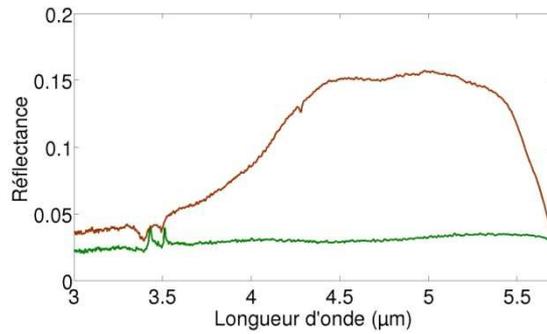
certain nombre de paramètres atmosphériques (géométrie et température) et la température de la scène. Une illustration des différentes étapes de ce couplage est donnée dans la section suivante.

3.2.4. ILLUSTRATION DU COUPLAGE : IMPACT DU CONTENU EN EAU FOLIAIRE SUR LA LUMINANCE EN ENTREE DU CAPTEUR

Cette section va permettre de s'assurer que, compte tenu des niveaux de bruit des capteurs existants (AHS, Hyper-Cam par exemple), la signature du contenu en eau foliaire dans un couvert est détectable par télédétection aéroportée dans le MWIR. Des spectres de luminance en entrée du capteur de deux canopées, l'une sèche et l'autre fraîche, ont été simulés en utilisant deux couples de spectres de réflectance et de transmittance de feuilles mesurés ainsi que les modèles 4SAIL et MODTRAN, à la résolution spectrale de 1 nm. La différence de luminance entre ces deux canopées a été comparée au bruit des capteurs. A partir des deux couples de réflectance et de transmittance de feuilles, quatre luminances sont modélisées pour deux valeurs de LAI et deux altitudes du capteur. Les valeurs de LAI choisies représentent des canopées éparse (LAI = 1,5) et dense (LAI = 4,5). Les altitudes du capteur trouvent leur justification dans les applications potentielles de ce travail : télédétection de proximité avec une caméra de terrain (50 m, Vigneau, 2010) ou télédétection aéroportée (1000 m). Les autres paramètres de 4SAIL sont ceux spécifiés dans le Tableau 3.6. La Figure 3.9 illustre le passage de la réflectance de la feuille à la luminance de la canopée simulée en entrée du capteur.

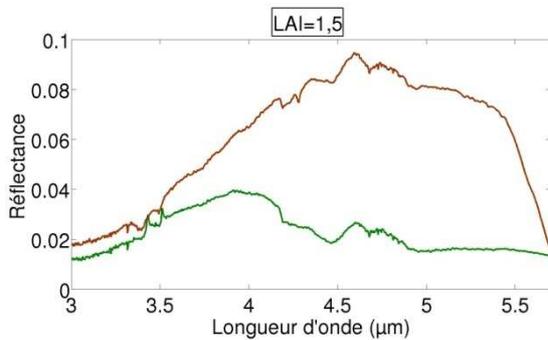
Les différences maximales Δ de réflectance de feuilles ou de canopées entre une végétation fraîche et sèche sont données dans la Figure 3.9, avec λ_{Δ} la longueur d'onde correspondant au maximum. Δ indique la variabilité maximale du signal obtenu pour des contenus en eau extrêmes. Un LAI de 4,5 engendre une différence de réflectance légèrement plus élevée qu'un LAI de 1,5, l'impact du sol étant moindre. Ce sont donc les simulations de canopées ayant un LAI = 4,5 qui sont utilisées par la suite pour visualiser l'impact maximal du contenu en eau de la végétation sur la luminance en entrée du capteur. On constate ainsi qu'à 50 m d'altitude, une différence de réflectance de feuille de 0,12 à 4,9 μm se traduit par un écart de luminance de l'ordre de 0,07 $\text{W}/(\text{m}^2.\text{sr}.\mu\text{m})$ à 4,92 μm . Pour un capteur situé à 1000 m d'altitude, cette différence se traduit par un écart de luminance de l'ordre de 0,06 $\text{W}/(\text{m}^2.\text{sr}.\mu\text{m})$ à 4,72 μm . Sur l'ensemble des spectres de luminance, le minimum local autour de 4,2 μm correspond à l'absorption du rayonnement par le CO_2 atmosphérique.

Réflectance de feuilles fraîche (vert) et sèche (marron).

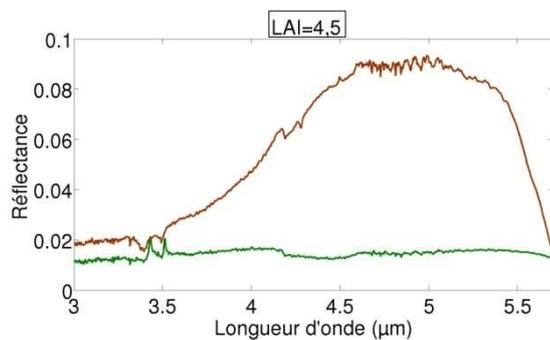


→ $\Delta = 0,12$ à $4,97$ μm .

Réflectance de canopées fraîche (vert) et sèche (marron).

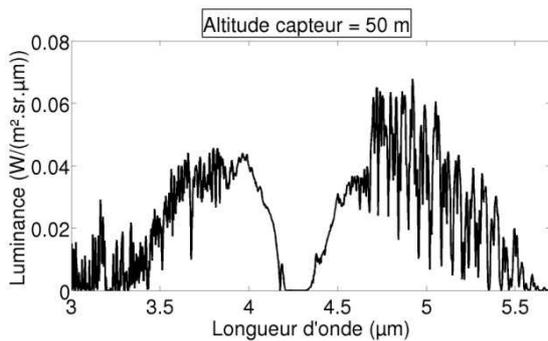


→ $\Delta = 0,07$ à $4,59$ μm .

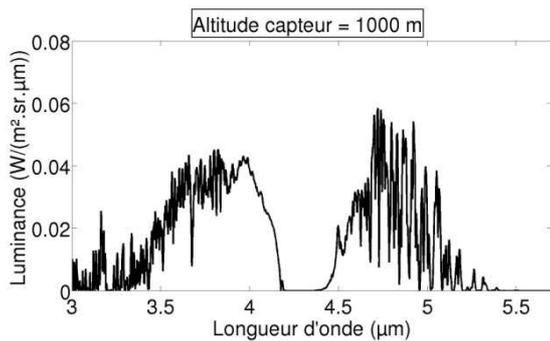


→ $\Delta = 0,08$ à $4,99$ μm .

Différence (valeur absolue) entre les luminances de canopées fraîche et sèche en entrée du capteur. LAI=4,5.



→ $\Delta = 0,07$ $\text{W}/(\text{m}^2.\text{sr}.\mu\text{m})$ à $4,92$ μm .



→ $\Delta = 0,06$ $\text{W}/(\text{m}^2.\text{sr}.\mu\text{m})$ à $4,72$ μm .

Figure 3.9: Impact du contenu en eau de la feuille sur les propriétés optiques MWIR de la végétation à différentes échelles. En vert : feuille ou canopée d'érable (*Acer platanoides* L.) frais. En marron : feuille ou canopée de *Catalpa* sec.

Sachant qu'une caméra de type Hyper-Cam a un niveau de bruit de l'ordre de $0,002 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, un signal dû à l'eau ($\sim 0,06 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$) est a priori détectable car il est plus de trente fois supérieur. En revanche, il ne serait qu'environ trois fois plus élevé pour un capteur type AHS. Il est cependant généralement possible de retirer une partie du bruit des images par des méthodes statistiques, améliorant ainsi le rapport signal sur bruit. Nous retiendrons donc que, compte tenu des caractéristiques des capteurs actuels, il est théoriquement possible de détecter un signal dû à l'eau dans des luminances MWIR et on peut espérer que les futurs capteurs auront un meilleur rapport signal sur bruit. L'intérêt d'une étude théorique sur l'estimation du contenu en eau de la végétation par télédétection dans le MWIR est ainsi confirmé.

3.3. ETUDE DE SENSIBILITE DES PROPRIETES OPTIQUES MWIR DES CANOPEES

3.3.1. OBJECTIF ET DEMARCHE

Cette thèse a pour objectif la mise en lumière du potentiel du MWIR pour l'estimation du contenu en eau de la végétation ainsi que le développement de méthodes d'exploitation de ce domaine spectral. Dans cette partie, nous cherchons à étudier la sensibilité de la réflectance d'une canopée, et de la luminance en entrée du capteur correspondante, à son contenu en eau. Or comme cela a été précisé dans le Chapitre 1, de nombreux autres paramètres biochimiques ou structuraux influencent ses propriétés optiques et compliquent la détermination du contenu en eau. Afin de déterminer une méthode indépendante d'estimation du contenu en eau, nous visualisons donc aussi la sensibilité à ces variables.

3.3.2. DEFINITION DE TROIS CANOPEES TYPES

Trois configurations moyennes de canopées sont d'abord définies pour étudier la sensibilité des propriétés optiques de la végétation aux variables d'entrée des modèles, puis nous faisons varier chacune des variables séquentiellement. Ces configurations correspondent à des canopées types : la première représente une culture aux premiers stades de développement (feuilles fraîches et faible LAI), la deuxième une culture en pleine croissance (feuilles fraîches et fort LAI) et la troisième une culture sénescence (feuilles sèches et LAI moyen). Le Tableau 3.6 donne les valeurs de chaque variable pour les trois configurations. Les spectres de sols utilisés sont présentés en Figure 1.13. La Figure 3.10 montre la réflectance des canopées correspondant aux trois configurations moyennes.

Tableau 3.6 : Paramètres décrivant les canopées types.

Variable	Canopée 1	Canopée 2	Canopée 3
Type	Jeune	Mature	Sénescente
C_w (g/cm ²)	0,01	0,015	0,001
C_m (g/cm ²)	0,006	0,006	0,006
N	1,5	2	2,5
LAI	1	4	3
θ_l (°)	30	30	30
h	0,05	0,05	0,05
Type de sol	Terreau sableux rouge-brun	Terreau sableux rouge-brun	Terreau sableux rouge-brun
Angle zénithal solaire (°)	30	30	30
Angle azimutal solaire (°)	90	90	90
Modèle d'atmosphère	US 1976	US 1976	US 1976

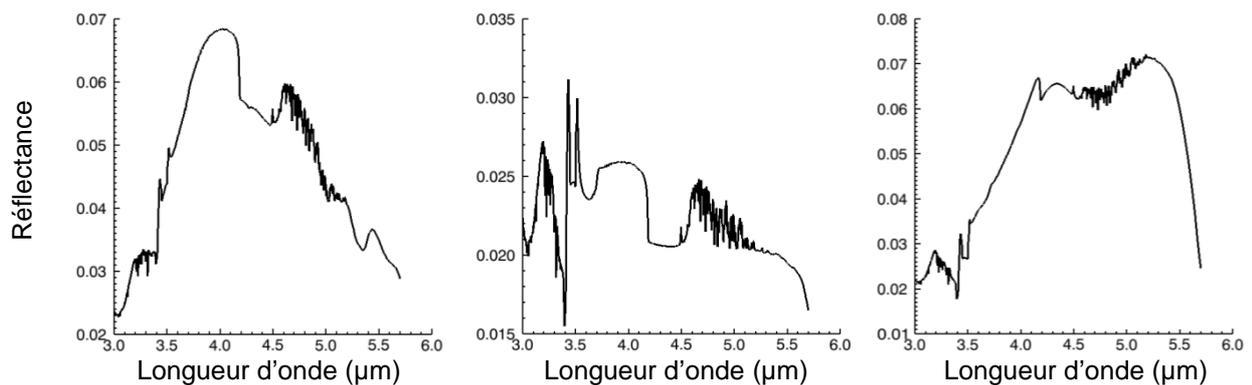


Figure 3.10 : Réflectances des configurations moyennes 1, 2 et 3 (de gauche à droite).

La réflectance de la canopée 3 est plus élevée que celle des canopées 1 et 2, ce qui est en accord avec les propriétés optiques des feuilles. La canopée 1 réfléchit plus que la canopée 2 et la forme globale de son spectre de réflectance se rapproche de celle du sol. La réflectance de la canopée 2 est très faible sur tout le spectre MWIR. Les trois spectres de réflectance présentés à la Figure 3.10 décroissent brusquement entre 4 et 4,6 μm . Cette décroissance est due à la diminution de la proportion de rayonnement incident direct/diffus. Comme le montre la Figure 3.11, l'éclairement solaire direct domine pour des longueurs d'onde inférieures à 4 μm , alors qu'entre 4 et 4,6 μm , puis après 4,8 μm , l'éclairement est uniquement de nature thermique, atmosphérique et diffus. Lorsque l'éclairement direct domine, les réflectances simulées par 4SAIL sont de type directionnelles-hémisphériques. A l'opposé, lorsque l'éclairement diffus domine, elles correspondent à des réflectances hémisphériques-hémisphériques, grandeur radiométrique

différente. Les décalages en amplitude s'expliquent par cette transition. Entre 4,6 et 4,8 μm environ, les proportions de signaux émis et diffus oscillent rapidement ce qui provoque le « bruit » observé sur les spectres de réflectance. Autour de 4,3 μm , l'absorption du CO_2 est telle que les éclairagements simulés par MODTRAN sont quasi nuls mais l'éclairagement diffus reste supérieur à l'éclairagement direct, d'où la brusque décroissance de réflectance observée. Le spectre d'éclairagement diffus après 5,3 μm présente des artefacts dus à son calcul par MODTRAN qui force l'éclairagement à zéro pour certaines longueurs d'onde où la transmittance est particulièrement faible. Ceci n'est pas physique et nous négligerons ces valeurs par la suite.

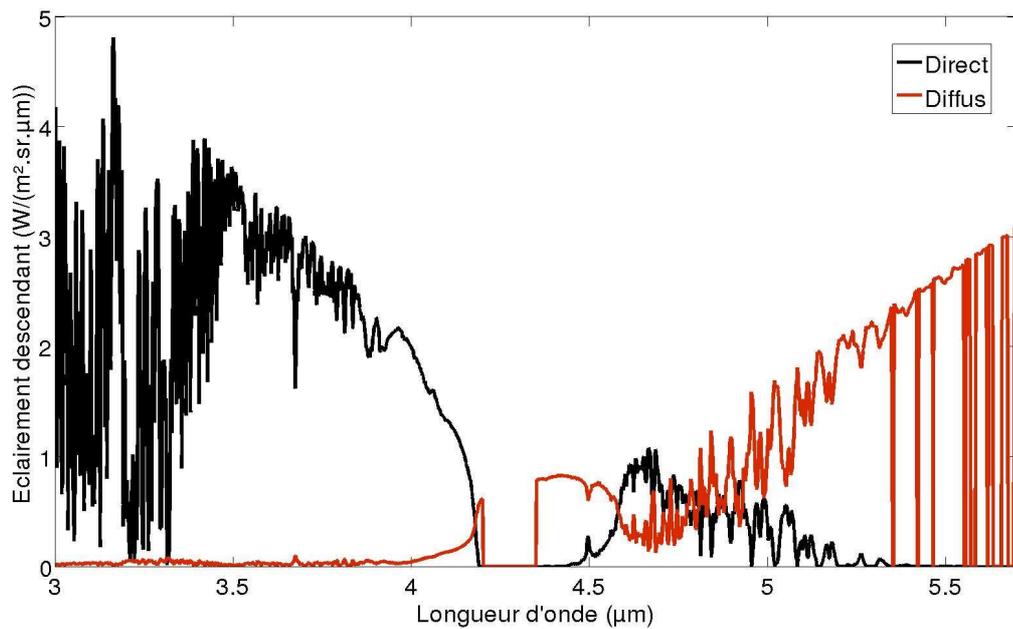


Figure 3.11 : Eclairagements direct et diffus dans le domaine MWIR au niveau du sol. L'éclairagement d'origine atmosphérique thermique est uniquement diffus.

3.3.3. SENSIBILITE DE LA REFLECTANCE AUX VARIABLES DE PROSPECT-VISIR ET 4SAIL

Les Figures 3.12, 3.13 et 3.14 présentent la sensibilité de la réflectance des canopées à chacune des variables d'entrée des modèles pour les trois configurations moyennes décrites dans le Tableau 3.6. Les variables sont modifiées séquentiellement. Les courbes les plus foncées correspondent aux valeurs les plus faibles et, pour chaque variable, les valeurs minimales m , maximales M , et le pas p sont indiqués entre crochets selon $[m - M ; p]$.

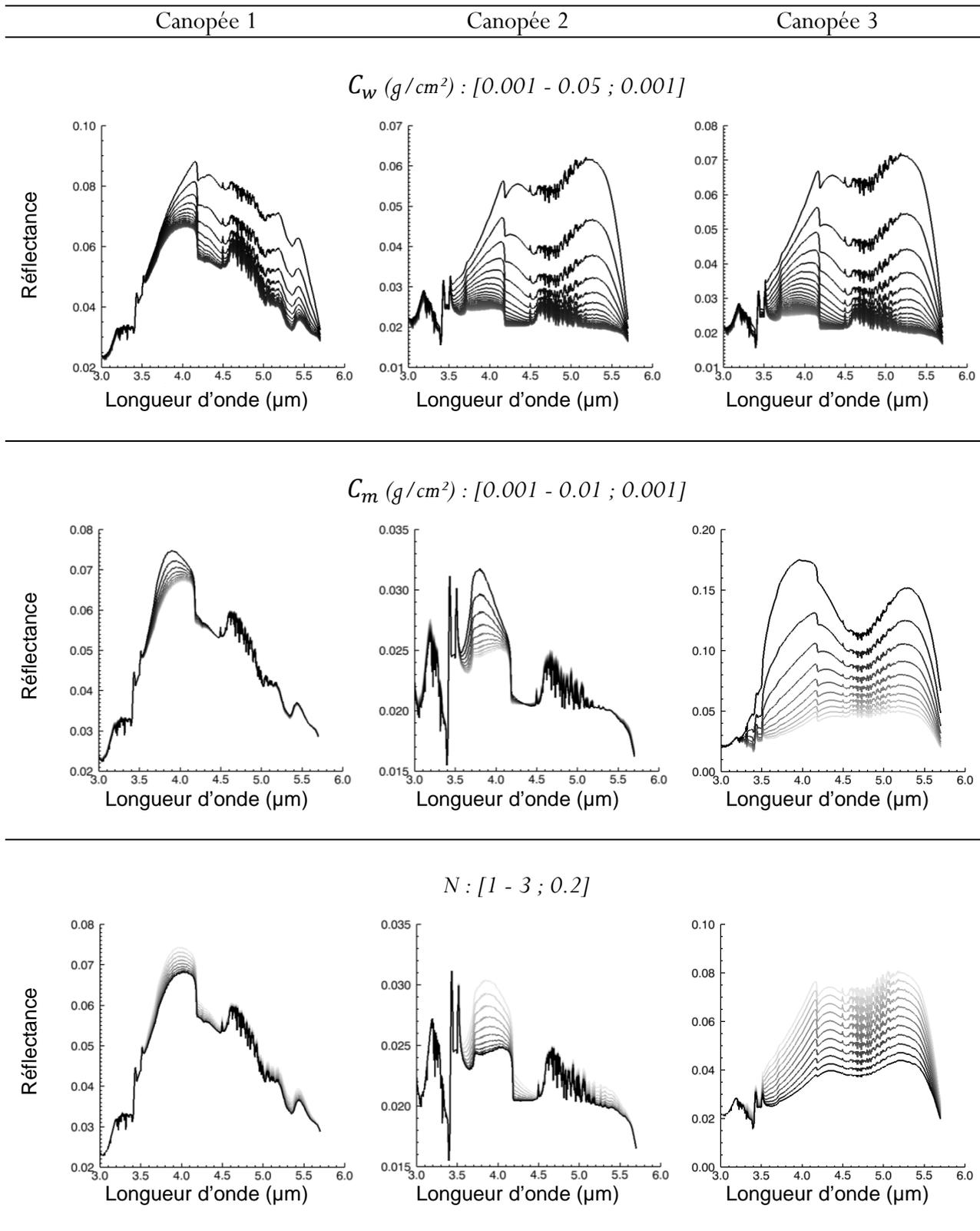


Figure 3.12 : Sensibilité de la réflectance de la canopée aux variables d'entrée du Tableau 3.8 caractérisant la feuille.

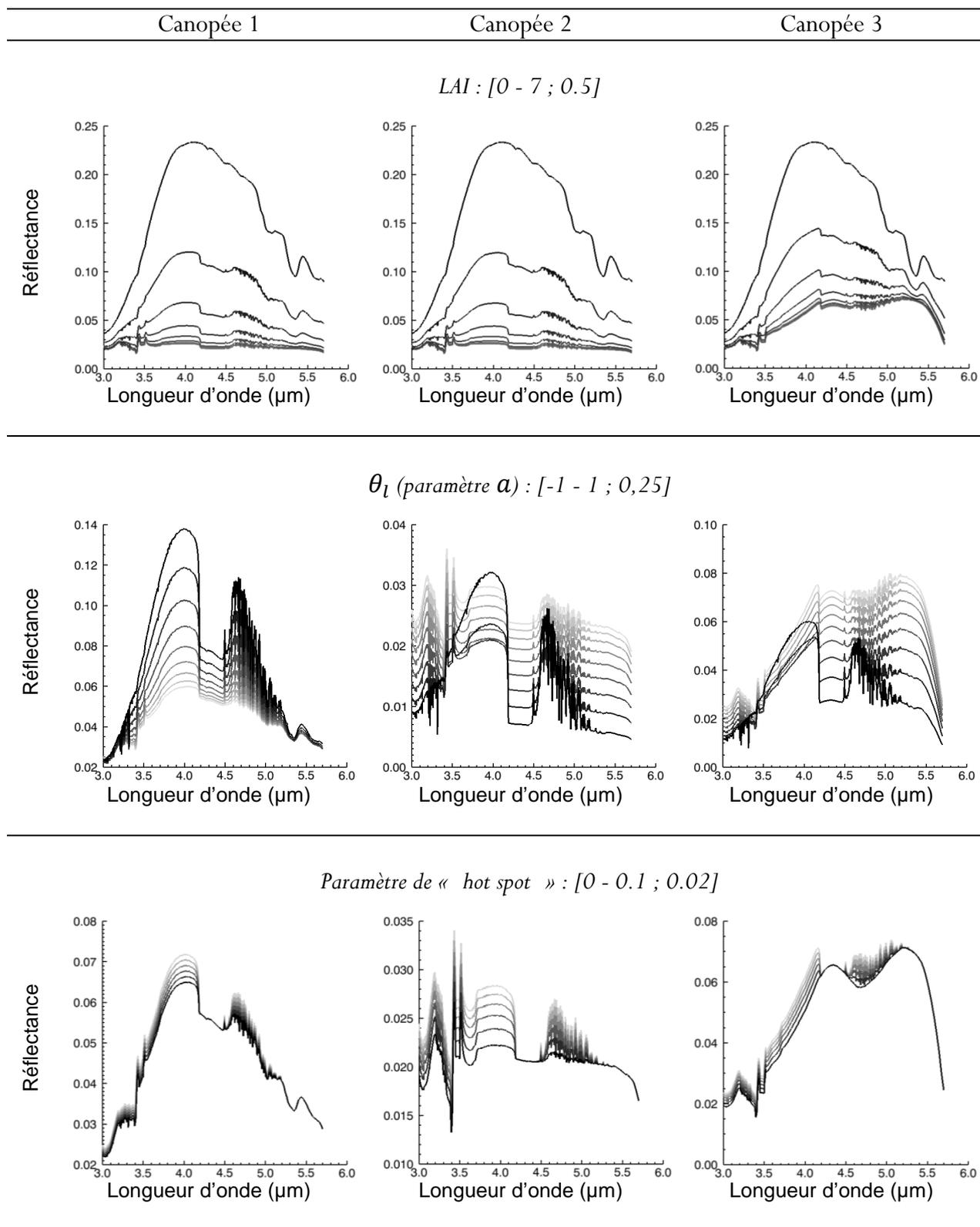


Figure 3.13 : Sensibilité de la réflectance de la canopée aux variables d'entrée du Tableau 3.8 caractérisant l'architecture du couvert.

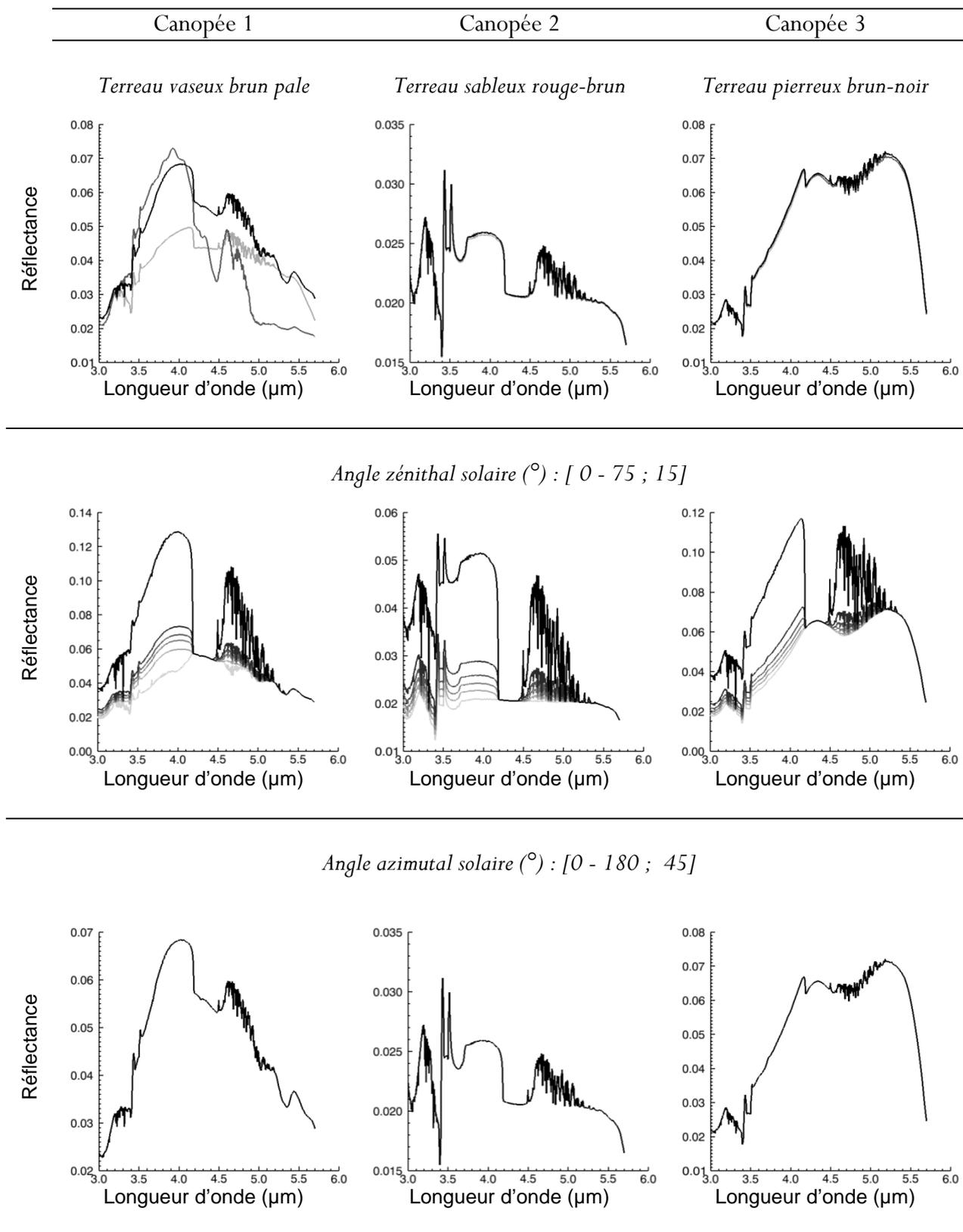


Figure 3.14 : Sensibilité de la réflectance de la canopée aux variables d'entrée du Tableau 3.8 caractérisant les facteurs externes.

Quel que soit le paramètre étudié, les plus fortes variations d'amplitude sont majoritairement observées sur la réflectance de la canopée 3 la plus sèche. En effet, comme au niveau de la feuille, le contenu en eau foliaire sature la réflectance de la canopée lorsqu'il est supérieur ou égal à environ $0,01 \text{ g/cm}^2$. Ceci est particulièrement visible sur l'étude de sensibilité à C_w . L'exploitation du domaine MWIR devra donc être plutôt orientée vers la surveillance de canopées sèches (risques de feux de forêts, de sécheresse). Aussi, la réflectance des canopées 1 et 2 est peu sensible aux variations de C_m et N . On notera que, pour des contenus en eau qui ne sont pas saturants, C_w , C_m , N et LAI sont les variables qui influencent le plus la réflectance. Pour des contenus en eau proches, la canopée 1, peu dense, est logiquement plus sensible au sol que la canopée 2, plus dense et moins sensible aux paramètres du couvert. On note une dépendance non négligeable de la réflectance à l'angle zénithal solaire mais cette information est normalement connue lors de l'inversion de la chaîne. Ces simulations mettent en évidence que le contenu en eau est le paramètre le plus influent sur la réflectance MWIR mais que, tout comme dans le domaine VNIR-SWIR, on ne peut négliger l'impact du LAI, du contenu en matière sèche et de l'anatomie foliaire.

3.3.4. SENSIBILITE DE LA LUMINANCE EN ENTREE DU CAPTEUR A LA TEMPERATURE DE LA SCENE ET A L'ATMOSPHERE

L'équation de la luminance (Equation 1.4) a mis en évidence sa dépendance à la température de la scène et à l'atmosphère. Les sections suivantes sont deux études de sensibilité de la luminance à ces variables. Toutes deux ont été réalisées à partir de spectres mesurés de réflectance et de transmittance de feuilles fraîche et sèche présentés dans la Section 3.3. Les canopées simulées ont un LAI de 4,5 et sont observées par un capteur situé à 1000 m d'altitude. L'ensemble des autres paramètres (mis à part ceux testés) est identique à ceux de l'étude présentée en Section 3.3.

Sensibilité à la température de la scène

La Figure 3.15 représente les différences de luminance entre une scène de référence à 300 K et deux scènes à 300,5 K et 302 K. On constate qu'une différence de 2 K engendre un écart de luminance maximal de $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ à $4,92 \mu\text{m}$ alors qu'une différence de 0,5 K engendre un écart maximal d'environ $0,03 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$. Cet écart est de l'ordre de celui qui permet de différencier une canopée fraîche d'une canopée sèche (Section 3.3). La connaissance de la température est donc primordiale pour estimer correctement le contenu en eau de la végétation par télédétection dans le MWIR. Ceci sera confirmé et étudié dans le Chapitre 4 qui présente les premiers éléments d'une méthode inversion de la luminance.

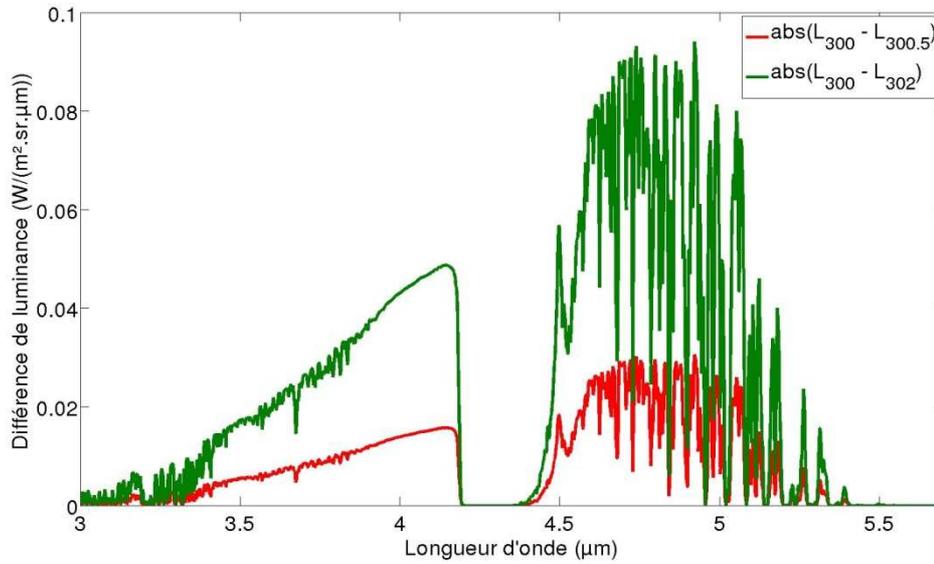


Figure 3.15 : Différence de luminance entre des scènes à 300K et, respectivement, à 300,5 K et à 302 K.

Sensibilité aux paramètres atmosphériques

Les spectres de transmittance et d'éclairement total présentés dans la Section 3.2.2 mettent en évidence que les paramètres atmosphériques qui ont la plus grande influence sur le signal MWIR sont le contenu en vapeur d'eau et le profil de température. La Figure 3.16 gauche montre qu'un contenu en vapeur quatre fois supérieur ou inférieur au contenu de l'atmosphère standard US1876 engendre une différence de luminance de l'ordre de $1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{sr}.\mu\text{m})$. Un écart du même ordre de grandeur est enregistré pour un décalage du profil de température de $\pm 20 \text{ K}$ (Figure 3.16 droite). Une erreur sur les paramètres atmosphériques peut donc rapidement masquer le signal de l'eau de la végétation, c'est pourquoi ils seront supposés parfaitement connus dans l'ébauche de méthode inverse présentée au chapitre suivant.

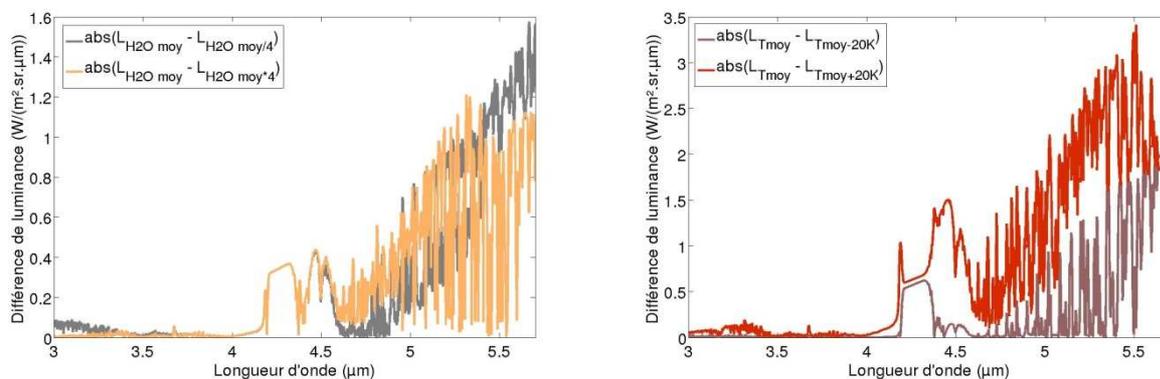


Figure 3.16 : Différences de luminance d'une canopée sèche plongée dans deux atmosphères. A gauche, les deux atmosphères ont un contenu en vapeur d'eau divisé par 4 et multiplié par 4. A droite, les deux atmosphères ont un profil atmosphérique décalé de -20K et $+20\text{K}$.

La luminance en entrée du capteur est aussi largement dépendante de la transmittance atmosphérique (Equation 1.4). Ainsi dans les zones de faible transmittance, la luminance pourra être nulle, comme autour de la bande d'absorption CO_2 à environ $4,3 \mu\text{m}$. Ces zones spectrales où les gaz atmosphériques absorbent tout le signal seront exclues des longueurs d'onde de travail lors de l'inversion de l'équation de la luminance (Chapitre 4).

3.4. CONCLUSION

Les simulations présentées dans ce chapitre montrent que le signal de l'eau dans le MWIR est détectable à l'échelle de la canopée : la réflectance et la luminance en entrée du capteur d'une canopée sont sensibles au contenu en eau des feuilles. Le potentiel du MWIR pour estimer le contenu en eau de la végétation par télédétection est conforté car les variations observées sont supérieures au bruit des capteurs actuels. On note aussi que les propriétés optiques des végétaux (feuille et canopée) saturent vite avec le contenu en eau et que l'exploitation du domaine MWIR trouvera son intérêt dans la surveillance de végétation plutôt sèche (contenu en eau foliaire inférieur à $0,01 \text{ g/cm}^2$), comme l'étude des risques de feux. Cependant, les variations de réflectance et de luminance entre une canopée très sèche et une canopée très fraîche sont faibles. Par exemple, la différence de luminance est de l'ordre de celle entre deux luminances correspondant à des surfaces ayant une différence de température de seulement $0,5 \text{ K}$. De plus de nombreux autres paramètres, comme le LAI ou le contenu en vapeur d'eau atmosphérique, ont une forte influence sur les propriétés optiques des canopées, dans les mêmes gammes de longueurs d'onde. Pour retrouver le contenu en eau foliaire à partir d'une luminance de canopée en entrée du capteur, il faut donc développer une méthode qui soit la plus indépendante possible de la température de surface, des paramètres atmosphériques (température et contenu en vapeur d'eau) et du LAI. Les premières étapes d'un travail en ce sens sont présentées dans le chapitre suivant.

4. INVERSION DU SIGNAL CAPTEUR MWIR POUR L'ESTIMATION DU CONTENU EN EAU DE LA VEGETATION : PREMIERE APPROCHE

4.1. INTRODUCTION

Ce chapitre présente les pistes envisagées pour l'estimation du contenu en eau de la végétation depuis une luminance enregistrée dans le MWIR. Il s'agit tout d'abord de séparer la température et la réflectance du signal de luminance, puis de déterminer le contenu en eau depuis la réflectance. L'étude est uniquement réalisée ici sur des données simulées.

4.1.1. HYPOTHESES DE TRAVAIL

L'étude présentée dans ce chapitre suppose une parfaite connaissance de la géométrie de la scène observée, de l'éclairement solaire et des caractéristiques physico-chimiques de l'atmosphère (profils de température, de pression et de concentrations gazeuses). Les termes atmosphériques (luminance atmosphérique, éclairement de la surface, transmittance) sont ensuite déterminés grâce au code de transfert radiatif MODTRAN. Les réflexions multiples entre le sol et l'atmosphère ($1 - \rho(\lambda)S^{Atm}(\lambda)$, Equation 1.4) peuvent être négligées car l'albédo sphérique de l'atmosphère S^{Atm} est quasi nul dans le MWIR (données MODTRAN). Les effets directionnels, fonctions de la géométrie d'acquisition de l'image, seront ignorés. Du fait de ces contraintes, les méthode et indices présentés par la suite ne sont qu'une première réflexion en vue de l'établissement d'une chaîne d'inversion complète et moins contrainte. Notons cependant que la connaissance des caractéristiques atmosphériques est une hypothèse fréquemment posée avant le développement ou l'utilisation de méthodes de type séparation émissivité-température mettant en jeu le MWIR (Boyd & Petitcolin, 2004) ou le TIR (Lesaignoux, 2010).

4.1.2. DEMARCHE

Nous cherchons à déterminer le contenu en eau d'un couvert végétal (ou d'une feuille au sein de ce couvert) à partir de valeurs de luminance enregistrées par un capteur multispectral ou hyperspectral. Pour cela nous nous basons sur la chaîne d'inversion présentée à la Figure 1.17, de la luminance du capteur au contenu en eau de la feuille ou de la canopée. Notre démarche s'articule en deux grandes étapes (Figure 4.1) : l'inversion de la luminance pour séparer la réflectance et la température puis l'établissement d'une relation semi-empirique entre des valeurs de réflectance au sommet de la canopée et le contenu en eau de la végétation.

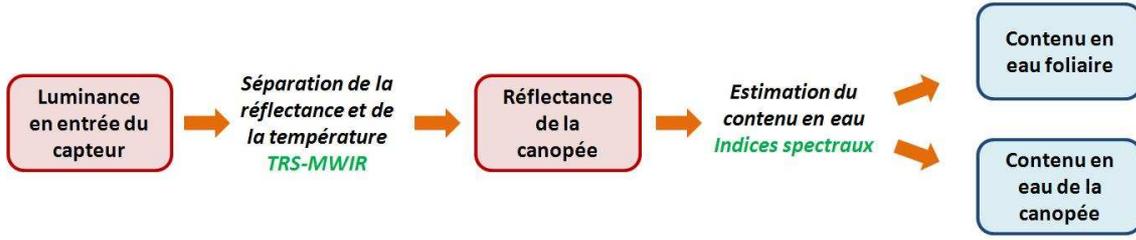


Figure 4.1 : Chaîne d'inversion de la luminance en entrée du capteur jusqu'au contenu en eau de la végétation.

La Section 4.2. présente la méthode TRS-MWIR (*Temperature Reflectance Separation*), appelée ainsi par analogie aux méthodes TES (*Temperature Emissivity Separation*) développées dans le TIR (Borel, 2003). Compte tenu des hypothèses de travail, elle permet d'estimer conjointement les deux inconnues de l'équation de la luminance que sont la réflectance et la température de la scène. Dans la Section 4.3 nous déterminons ensuite des indices spectraux définis à partir de valeurs de réflectance de la canopée. Ils permettent de relier la réflectance de la canopée avec, d'une part, le contenu en eau foliaire, et d'autre part, le contenu en eau de la canopée.

4.2. ESTIMATION CONJOINTE DE LA TEMPERATURE ET DE LA REFLECTANCE : LA METHODE TRS-MWIR

4.2.1. PRINCIPE

Nous cherchons à estimer la réflectance d'une canopée depuis sa luminance en entrée du capteur. Rappelons l'équation de la luminance dans le domaine MWIR (Section 1.4.1), définie par

$$L^{Capteur}(\lambda) = L^\uparrow(\lambda) + \frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}(\lambda)}{\pi} \rho(\lambda) T^\uparrow(\lambda) + (1 - \rho(\lambda)) L_{CN}(\lambda, \theta) T^\uparrow(\lambda) \quad (4.1)$$

où $L^\uparrow(\lambda) = L_{Sc}^\uparrow(\lambda) + L_{Th}^\uparrow(\lambda)$ est la luminance atmosphérique totale (diffusion et émission propre) vers le haut en direction du capteur et qui n'interagit pas avec le sol. De cette équation, la réflectance s'écrit

$$\rho(\lambda) = \left[\frac{L^{Capteur}(\lambda) - L^\uparrow(\lambda)}{T^\uparrow(\lambda)} - L_{CN}(\lambda, \theta) \right] / \left[\frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}(\lambda)}{\pi} - L_{CN}(\lambda, \theta) \right]. \quad (4.2)$$

La réflectance à estimer dépend ainsi de la luminance enregistrée par le capteur $L^{Capteur}(\lambda)$, de trois paramètres supposés connus (calculés avec MODTRAN) – la luminance atmosphérique dirigée vers le haut $L^\uparrow(\lambda)$, la transmittance atmosphérique vers le haut $T^\uparrow(\lambda)$ et l'éclairement incident sur la surface $\frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}(\lambda)}{\pi}$ – et de la température de la scène θ qui est inconnue. Il est donc nécessaire de connaître la température de la scène pour estimer la réflectance et c'est pourquoi la méthode TRS-MWIR vise à les estimer conjointement à partir d'une mesure de luminance. Notons que la luminance est spectrale (n équations) et que l'on souhaite estimer à la fois la réflectance spectrale (n inconnues) et la température de la scène ; nous disposons ainsi de n

équations pour $n+1$ inconnues, le problème est mal posé. L'importance de la connaissance de la température pour estimer la réflectance est illustrée par la Figure 4.2. Cette figure permet la comparaison de spectres de réflectance de canopée théorique ρ_{th} et estimés ρ_{est} : une luminance de canopée $L^{Capteur}$ ayant une température $\theta_{th} = 310$ K, plongée dans une atmosphère de type US1976, vue par un capteur fictif ayant une résolution spectrale de 40 nm - par analogie à la caméra Hyper-Cam - sans bruit radiométrique, et situé à 1000 m d'altitude est simulée. L'intégration à 40 nm se fait indépendamment pour chaque terme constituant $L^{Capteur}$, qui est ensuite calculée. On suppose pour cela que l'intégrale d'un produit $a \cdot b$ est égale au produit des intégrales de a et de b . Ce procédé sera identique pour toutes les dégradations spectrales qui suivront. Les angles solaires zénithal et azimutal sont respectivement de 30° et 90° , et le capteur acquiert l'image en visée verticale. Des réflectances ρ_{est} sont ensuite estimées depuis $L^{Capteur}$ pour trois températures de surface θ_{est} , selon l'Equation 4.2. La réflectance des surfaces étant plus lisse que les termes atmosphériques (Figures 1.3, 1.13, 1.15), si θ_{est} est fautive, alors le spectre de réflectance estimé contient des résidus atmosphériques hautes fréquences (Cheng et al., 2011), comme les oscillations (lissées par la dégradation spectrale) observées entre 3 et 4 μm et 4,5 et 5,5 μm . On constate de plus trois types d'effets sur les réflectances estimées :

- une divergence autour de 4,1 μm , observée sur les deux réflectances calculées avec une température « très » différente de la température théorique,
- une zone de valeurs non définies autour de 4,3 μm , sur les trois réflectances simulées,
- une surestimation ou sous-estimation de la réflectance de part et d'autre de 4,1 μm , sur les deux réflectances calculées avec une température « très » différente de la température théorique.

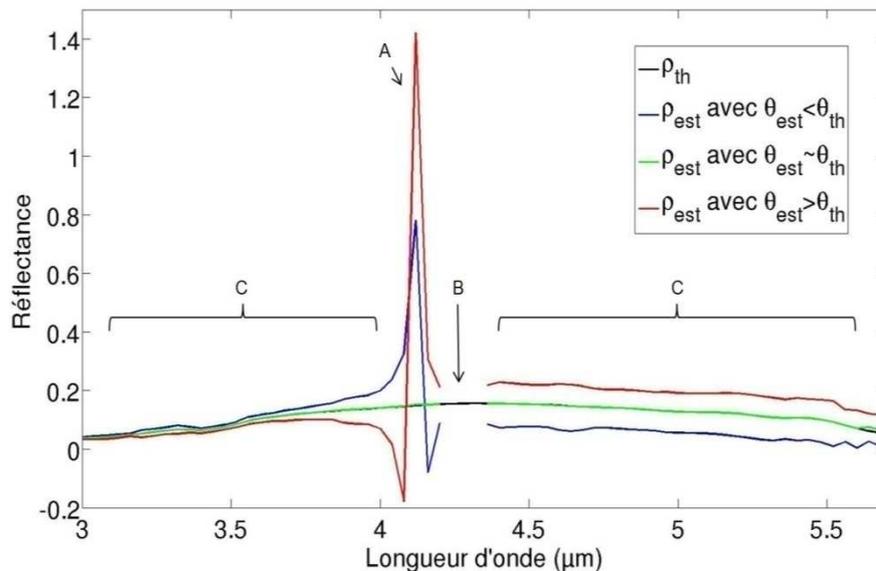


Figure 4.2 : Impact de la température de surface sur l'estimation de la réflectance. Noir : réflectance ρ_{th} d'une canopée sèche de type 3 (Chapitre 3). Rouge et bleu : réflectances estimées avec des températures égales à $\theta_{th} \pm 4$ K. Vert : réflectance estimée avec $\theta_{est} = \theta_{th} + 0,007$ K. Les effets de types A, B et C sont indiqués aux longueurs d'onde où ils sont effectifs.

Une analyse précise de l'équation de la réflectance et de ces effets est donnée en Annexe 2. Nous retiendrons ici que la zone B) est due à des valeurs nulles de transmittance atmosphérique, ce qui engendre des divisions par zéro lors du calcul de l'Equation 4.2, le numérateur et le dénominateur du membre $\frac{L^{Capteur}(\lambda) - L^{\uparrow}(\lambda)}{T^{\uparrow}(\lambda)}$ sont nuls. Notons d'ores et déjà que si la luminance est bruitée, alors seul le dénominateur est nul, ce qui conduit non plus à des valeurs non définies de la réflectance mais à une divergence et des valeurs qui tendent vers $\mp\infty$. On peut aussi associer à cet effet les oscillations observées vers $5,5 \mu\text{m}$, où la transmittance, bien que non nulle, est suffisamment faible pour engendrer des erreurs numériques lors du calcul de la réflectance. Les effets de type A) et C) sont quant à eux dus à une mauvaise valeur de la température de surface θ_{est} . Plus précisément, elles sont fonction de la différence entre l'éclairement total de la scène (au facteur π près) et le rayonnement émis par la surface à la température θ_{est} (c'est-à-dire du dénominateur de l'Equation 4.2). La Figure 4.3 illustre les rayonnements réfléchis et émis par la surface et l'on retrouve l'inversion de proportions mentionnée dans le Chapitre 1, ici autour de $\lambda_d \sim 4,1 \mu\text{m}$, longueur d'onde dépendante de la température estimée. En deçà de λ_d la part de signal réfléchi est plus importante que celle de signal émis, alors qu'au delà c'est l'inverse. L'inversion des proportions en λ_d fait passer le dénominateur de l'Equation 4.2 par zéro, ce qui entraîne une divergence. Suivant la température, il y aura une surestimation ou une sous-estimation de la réflectance de part et d'autre de λ_d (Annexe 2).

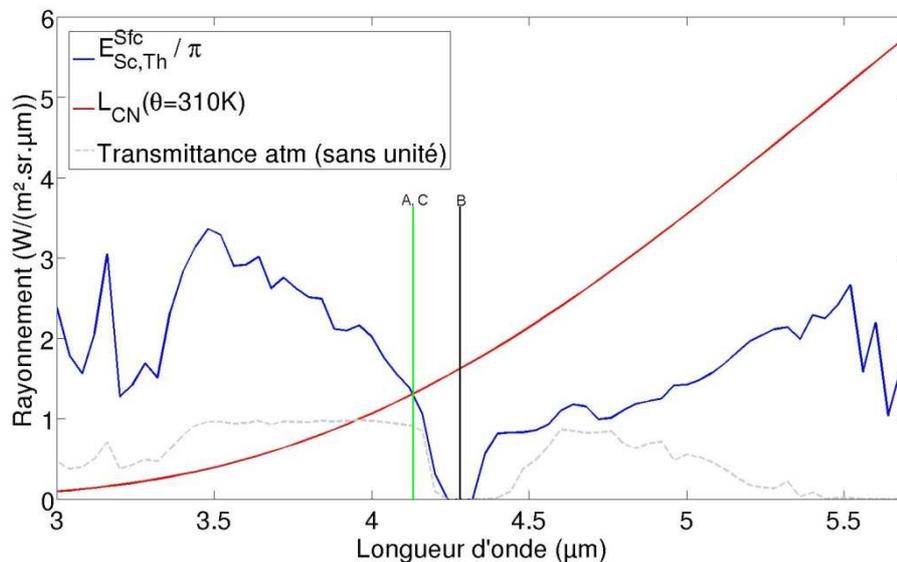


Figure 4.3 : Bleu : éclairement total de la scène (au facteur π près), d'origine solaire et thermique atmosphérique. Ce rayonnement est réfléchi par la surface. Rouge : rayonnement émis par la surface considérée comme un corps noir à 310 K. Gris clair : transmittance atmosphérique. Noir : zones de très faible transmittance qui engendrent les effets de type B). Vert : intersection des courbes bleue et rouge, qui engendre les effets de types A) et C).

La méthode TRS-MWIR exploite les effets B) en déterminant des intervalles de longueurs d'onde à considérer, et la douceur spectrale et les effets A), via un critère qui quantifie les oscillations et

les divergences observées. En effet, l'inversion des proportions des signaux réfléchi et émis par la Terre à la longueur d'onde λ_d engendre une divergence de ρ . Cet effet s'ajoute aux oscillations provenant des termes atmosphériques, donc si la courbe de réflectance n'est pas « lisse » sur le domaine spectral considéré, alors la température θ_{est} et la réflectance ρ_{est} estimées sont fausses. Une minimisation de l'intégrale de la dérivée seconde du spectre de réflectance permet de retrouver θ_{th} et ρ_{th} (critère de « smoothness » ou douceur spectrale). Les effets C) ne sont pas pris en compte dans cette première approche et laissent ouvertes de nombreuses voies d'améliorations. L'algorithme appliqué est détaillé dans la section suivante et ces éléments sont également discutés.

4.2.2. ALGORITHME ET ILLUSTRATION DE LA METHODE TRS-MWIR

Pour illustrer l'algorithme, nous simulons la luminance d'une végétation sèche (canopée 3, Chapitre 3) dont la température est égale à 308,3 K. L'atmosphère est de type US 1976 et le capteur est situé à 1000 m d'altitude. Les angles solaires zénithal et azimutal sont respectivement de 30° et 90°, et le capteur acquiert l'image en visée verticale. La réflectance et la température de cette scène sont ensuite déterminées par la méthode TRS-MWIR à partir de la luminance simulée (Figure 4.5.a). L'algorithme procède en deux étapes (Figure 4.4) : création d'un tableau de correspondances ou LUT (*Look Up Table*) de spectres de réflectance en fonction de la température, puis calcul d'un critère de douceur spectrale (Borel, 2003). Ceci nécessite la détermination des intervalles de longueurs d'onde et de températures à considérer. Nous détaillons ci-dessous l'ensemble de ces éléments.

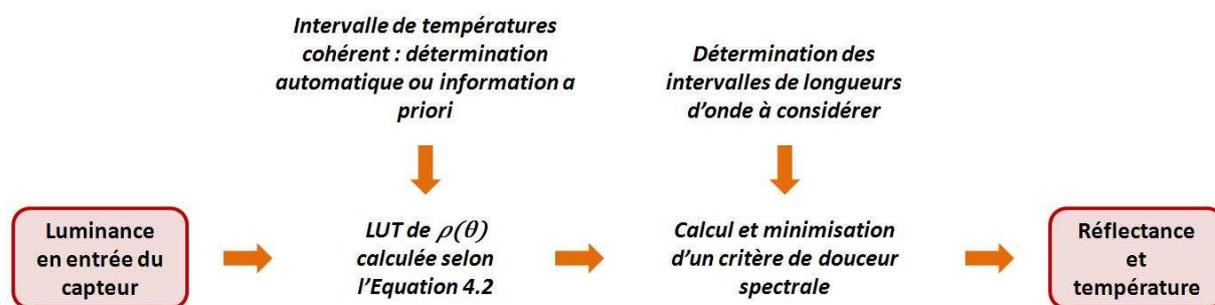


Figure 4.4 : Algorithme TRS-MWIR.

Création d'une LUT de réflectances en fonction de la température

Pour différentes valeurs de températures θ_{est} , nous calculons la réflectance à chaque longueur d'onde selon l'Equation 4.2. Un ensemble de spectres de réflectance associé à un ensemble de valeurs de températures est ainsi obtenu (Figure 4.5.b).

Intervalle de températures : la LUT est calculée pour des températures de surface « crédibles ». Cet intervalle de température peut être fourni par l'utilisateur s'il dispose d'informations a priori. Si ce n'est pas le cas, nous faisons appel à la notion de température de brillance θ_B (Foody et al., 2009) d'un corps non noir définie par

$$\theta_B = \frac{c_2/\lambda}{\log(1 + \frac{c_1}{L(\lambda)\lambda^5})} \quad (4.3)$$

où $c_1 = 1,190956 \cdot 10^{-16} W/(m^2 \cdot sr \cdot m^{-4})$ et $c_2 = 1,43679 \cdot 10^{-2} m \cdot K$, si la longueur d'onde est en mètre (m). L'intervalle de confiance choisi est centré autour de la température de brillance moyenne $\overline{\theta_B}$ du terme $\frac{L^{Capteur-L^\uparrow}}{T^\uparrow}$, grandeur fonction de l'émission de la surface (voir Equation 4.1). Cette moyenne est calculée sur l'intervalle 4,7 - 5,7 μm , domaine spectral où l'éclairement solaire est négligeable. $\overline{\theta_B}$ offre ainsi une valeur de la température apparente de la surface qui, pour des émissivités suffisamment proches de 1, est proche de la vraie température. Les températures θ_{est} sont choisies ici dans l'intervalle $\overline{\theta_B} \pm 10 K$, avec un pas de 0,004 K. Une LUT de 5000 réflectances est donc créée.

Dans le cas de la luminance présentée à la Figure 4.5.a, on obtient $\overline{\theta_B} = 305,7 K$. La Figure 4.5.b montre les réflectances calculées et extraites de la LUT pour des températures estimées allant de $-4 K$ à $4 K$ autour de $\overline{\theta_B}$ avec un pas de 0,4 K.

Critère de douceur spectrale

Le critère de douceur spectrale (*smoothness criterion* en anglais), qui permet d'identifier le bon couple de $(\theta_{est}, \rho_{est})$, se calcule en trois étapes :

Calcul de la dérivée seconde des spectres de réflectance $\frac{d^2\rho}{d\lambda^2}$: le spectre de la dérivée seconde met en évidence les résidus atmosphériques et la divergence autour de λ_d . La Figure 4.5.c présente les spectres des dérivées secondes des réflectances de la Figure 4.5.b.

Calcul du critère de douceur spectrale : les spectres de dérivées secondes sont intégrés sur l'ensemble du domaine spectral choisi (voir ci-dessous), ce qui permet de calculer le critère

$$Crit = \sum_{\lambda} \left(\frac{d^2\rho}{d\lambda^2} \right)^2. \quad (4.4)$$

La Figure 4.5.d représente la valeur de ce critère en fonction de θ_{est} , en échelle semi-logarithmique, pour la luminance utilisée en exemple. Les oscillations du critère s'expliquent par le fait que, selon la température estimée, la 'vitesse' à laquelle les deux courbes se croisent varie. La largeur de la divergence de la réflectance n'est donc pas constante et les maxima locaux du critère correspondent à des températures qui engendrent des divergences plutôt étroites et qui se situent alors totalement en dehors des zones de faible transmittance. Elles sont donc pleinement

prises en compte dans le calcul du critère, dont la valeur est ainsi plus élevée que lorsqu'une partie de la divergence n'est pas prise en compte car elle se situe dans un domaine de longueurs d'onde exclu de l'algorithme.

Minimisation : la plus faible valeur du critère permet d'identifier le meilleur couple $(\rho_{est}, \theta_{est})$. Dans l'exemple présenté, le minimum est obtenu pour une température estimée de égale à la température théorique à 0,001 K près. La réflectance estimée ρ_{est} est présentée à la Figure 4.5.e. Le RMSEP sur l'ensemble du spectre est de 0,0003.

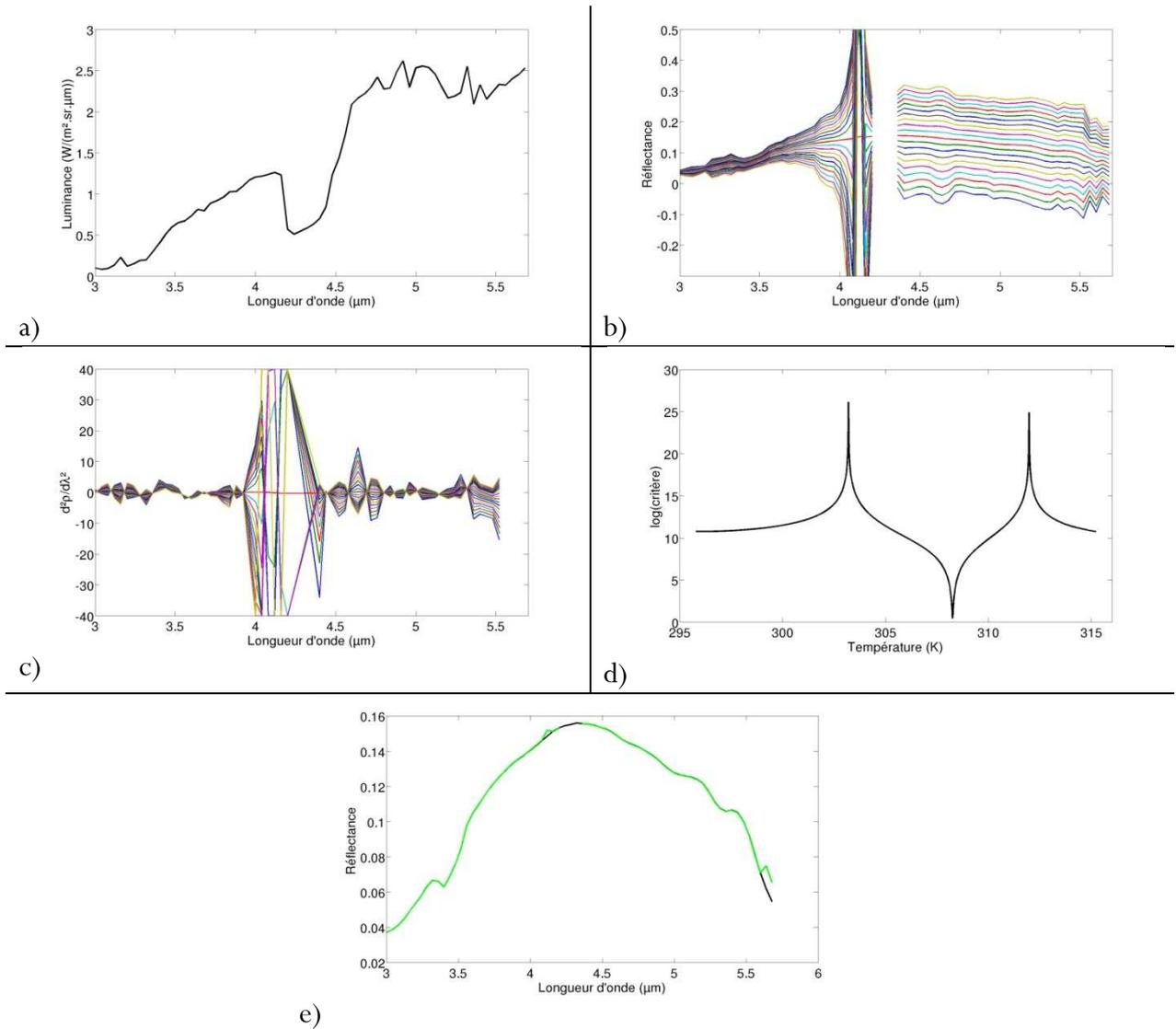


Figure 4.5 : Illustration de TRS-MWIR. a) Luminance en entrée du capteur d'une canopée sèche. b) LUT de 20 réflectances correspondant à des températures autour de $\overline{\theta_B} \pm 4$ K avec un pas de 0,4 K. c) Dérivées secondes des réflectances. d) Critère de douceur spectrale. e) Réflectances théorique (noir) et estimée (vert). La température estimée est égale à la température théorique à 0,001 K près.

Intervalles spectraux : nous avons mentionné qu'aux longueurs d'onde correspondant à une faible transmittance atmosphérique (inférieure à 0,005, absorption CO₂ et H₂O), la réflectance calculée divergeait à cause de divisions par zéro (dues à des erreurs d'arrondis ou au bruit radiométrique du capteur simulé). Ces longueurs d'onde sont donc exclues du calcul du critère de douceur spectrale (c'est-à-dire pour l'ensemble des moyennes et intégrations effectuées par la suite). Ainsi, lorsque nous mentionnerons « l'ensemble du domaine spectral », cela sous-entendra « l'ensemble du domaine spectral, à l'exception des longueurs d'onde où la transmittance est inférieure à 0,005 ». Cette valeur de 0,005 a été fixée de manière empirique, après observation du comportement de l'algorithme. La sensibilité de TRS-MWIR à ce seuil est discutée plus loin. Les intervalles de longueurs d'onde sélectionnés varient donc selon la transmittance atmosphérique mais on note que les longueurs d'onde fréquemment exclues sont situées autour de 4,3 μm (absorption CO₂) et après 5,4 μm (absorption H₂O).

Dans la version actuelle de l'algorithme, les erreurs de type C) (surestimation ou sous-estimation de ρ_{est} de part et d'autres de λ_d) ne sont pas prises en compte et laissent donc ouvertes de nombreuses pistes d'amélioration de ce premier algorithme. Deux principales faiblesses de la méthode, mises en lumière sur données bruitées, peuvent d'ores et déjà être signalées : TRS-MWIR peut être mis en échec par la sélection de gammes de longueurs d'onde trop larges ou lorsqu'il existe plusieurs points d'intersections entre les courbes d'émission et d'éclairement. La section suivante présente l'évaluation des performances de la méthode TRS-MWIR sur données simulées.

4.2.3. DONNEES ET METHODE POUR L'ETUDE DES ERREURS SUR DONNEES SIMULEES

Cinq études de sensibilité de la méthode sont menées sur des données simulées. Nous quantifions l'erreur algorithmique, l'erreur due au bruit, l'erreur due à une mauvaise connaissance des paramètres atmosphériques, puis l'erreur engendrée par une dégradation de la résolution spectrale.

Données

Nous générons un total de 21 images résultant de la combinaison de trois atmosphères standards avec sept niveaux de températures de surface. Le Tableau 4.1 résume leurs caractéristiques. Les simulations ont donc été effectuées pour $21 \times 10 \times 10 = 2100$ spectres de luminance (un spectre par pixel). Nous utilisons 10 spectres de surfaces différentes (Figure 4.6), chaque ligne de l'image correspondant à un même type de surface. La résolution spectrale n'est pas de 1 nm mais de 40 nm, comme celle de la caméra Hyper-Cam, ce qui réduit les temps de calcul tout en conservant une bonne précision. La dégradation des termes de l'équation de la luminance à une résolution spectrale de 40 nm se fait par intégration de chacun de ces termes, initialement simulés à 1 nm de résolution, par des fonctions créneaux sur des fenêtres de 40 nm, successivement centrées autour de longueurs d'onde espacées de 40 nm. La résolution spectrale doit être suffisamment fine pour

pouvoir appliquer un critère de douceur spectrale, tout en étant compatible avec les capteurs actuels, une résolution de 40 nm correspond à ces critères.

Tableau 4.1: Caractéristiques communes aux 21 images simulées.

Nombre de pixels	10 x 10 = 100
Domaine spectral	3 - 5,7 μm
Résolution spectrale	40 nm
Nombre de bandes	68
Nombre de types de surfaces	10 (3 sols nus (Chapitre 1) et 7 canopées (Chapitre 3))

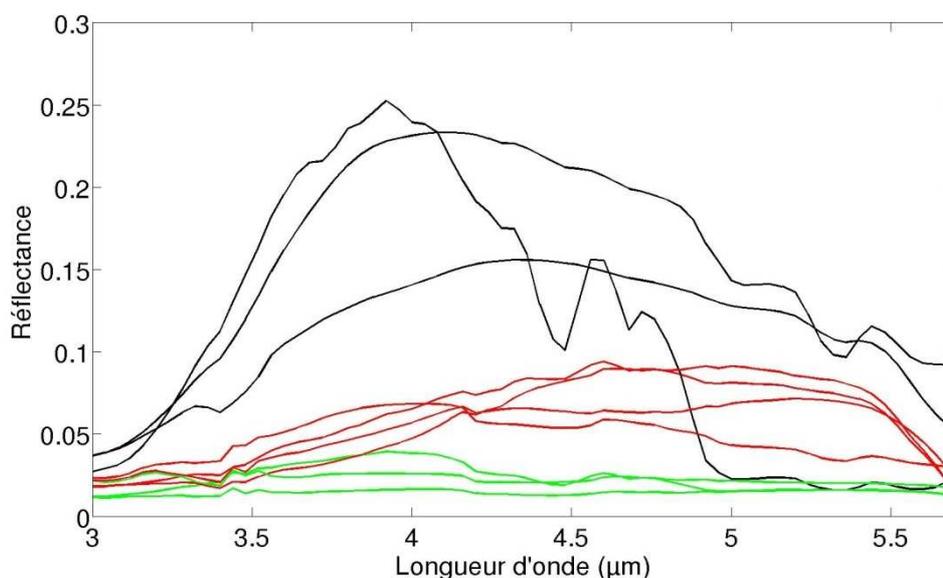


Figure 4.6 : Spectres de réflectance des surfaces simulées. Noir : sols nus. Rouge, canopées sèches. Vert : canopées fraîches. Les spectres des sols sont présentés dans le Chapitre 1 et ceux des canopées issus des simulations présentés dans le Chapitre 3.

Caractéristiques des trois atmosphères : les trois atmosphères standards utilisées sont *Mid Latitude Summer* (MLS), *Mid Latitude Winter* (MLW) et US1976, toutes trois proposées par MODTRAN, sans aérosol. Les températures de brillance de ces atmosphères vues au niveau du sol à 5 μm et calculées selon l'Equation 4.3 sur le terme $E_{Sc,Th}^{Sfc}(\lambda)/\pi$ sont respectivement d'environ 292 K, 273 K et 285 K. Ces valeurs, bien que grossièrement calculées, sont représentatives des profils de température des atmosphères et permettent de se représenter leurs différences. Leurs contenus en eau intégrés respectifs sont de 2,92 g/cm², 0,85 g/cm² et 1,42 g/cm². La Figure 4.7 représente les transmittances de ces atmosphères. Pour toutes ces atmosphères, la transmittance est nulle autour de 4,3 μm (CO₂) et 5,5 μm (H₂O).

Températures de surface : pour chacune de ces atmosphères, sept scènes ont été simulées, correspondant à sept valeurs moyennes de températures de surface $\bar{\theta}$ (de 280 à 340 K, avec un pas de 10K). A chaque pixel est associée une température de surface aléatoire, centrée autour de la valeur moyenne $\bar{\theta}$, $\pm 5\text{K}$, avec une répartition gaussienne. On suppose donc que chaque

température comprise entre 280 et 340 K est également représentée, en considérant l'ensemble des sept images.

Géométrie d'acquisition : toutes les scènes sont simulées pour un angle zénithal solaire de 30° (ce qui correspond à un milieu de matinée) et un angle azimutal de 90° (soleil à l'Est dans l'hémisphère nord), au jour julien 180 (milieu d'année). Ces valeurs moyennes permettent la représentation d'une scène d'acquisition standard. Le capteur fictif est situé à 1 km d'altitude, ce qui est représentatif de la hauteur de vol d'un capteur aéroporté. Aucune simulation à l'échelle satellitaire n'est effectuée dans le cadre de cette thèse. Sachant que la transmittance atmosphérique et l'impact du contenu en eau de la réflectance sur la luminance décroissent avec l'altitude de l'instrument de mesure (Section 3.2.4), des tests de sensibilité approfondis devront être effectués pour le cas satellitaire.

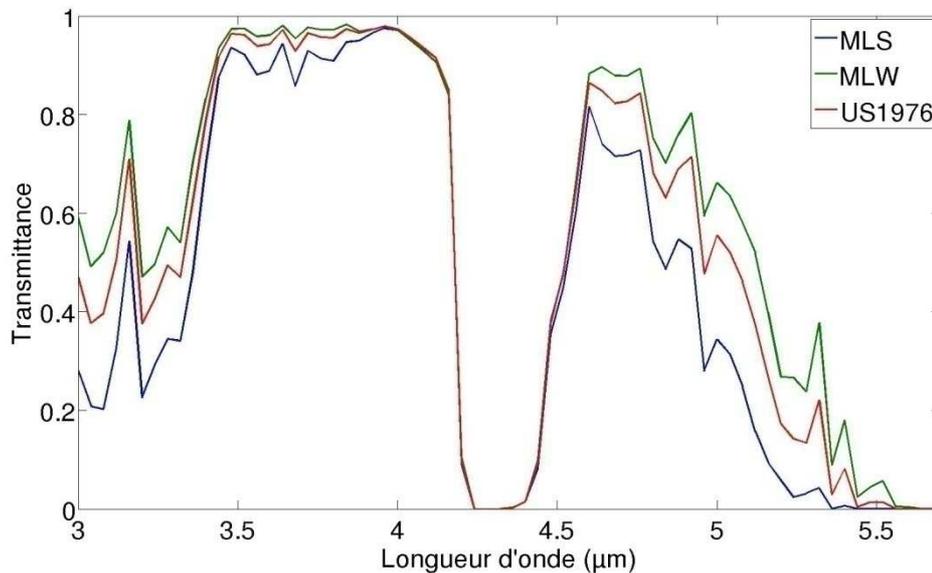


Figure 4.7 : Spectres de transmittance des trois atmosphères, entre 0 et 1 km d'altitude.

Critère de validité et calcul des erreurs

Pour l'ensemble des études présentées ci-dessous, on considèrera comme valide une inversion qui donne une erreur de température inférieure à 1,5 K et un RMSEP sur la réflectance inférieur à la valeur moyenne de la réflectance théorique. Le pourcentage d'inversions valides pour chacune des 21 images simulées sera indiqué dans un tableau qui recensera aussi, en terme de RMSEP, les erreurs moyennes d'estimation de ρ et θ , sur les pixels où l'on considère l'inversion réussie. Le RMSEP sur la réflectance estimée est calculé en intégrant les différences entre spectres simulé et théorique, sur toutes les longueurs d'onde exceptées celles où la transmittance est inférieure à 0,005 (voir plus haut).

4.2.4. ERREUR ALGORITHMIQUE

Le taux de réussite obtenus sur les 2100 spectres simulés selon le Tableau 4.1 est excellent et avoisine les 100 %. Les RMSEP moyens sur la température et la réflectance sont respectivement de 0,007 K et 0,001. Nous montrons dans la section suivante que l'introduction d'un bruit radiométrique dans les luminances simulées diminue les capacités de TRS-MWIR et met en évidence deux faiblesses de l'algorithme.

4.2.5. ERREUR DUE AU BRUIT RADIOMETRIQUE

Le Tableau 4.2 présente les résultats obtenus lorsqu'on ajoute à l'image de luminance simulée un bruit gaussien centré d'écart type 0,002 W/(m².sr.μm). La résolution spectrale étant de 40 nm, l'ajout de ce bruit revient à simuler un capteur de type Hyper-Cam (Annexe 1).

Tableau 4.2 : Sensibilité de TRS-MWIR à un bruit radiométrique de 0,002 W/(m².sr.μm).

		$\bar{\theta}$ (K)						
		280	290	300	310	320	330	340
MLS ($\theta_B \sim 292K$)	Atmo.							
	% réussite	20	5	30	74	93	93	73
	RMSEP θ	0,744	0,063	0,486	0,045	0,037	0,032	0,103
	RMSEP ρ	0,070	0,097	0,055	0,026	0,016	0,014	0,028
MLW ($\theta_B \sim 273K$)	% réussite	31	59	78	89	92	100	100
	RMSEP θ	0,126	0,309	0,12	0,048	0,036	0,029	0,023
	RMSEP ρ	0,066	0,045	0,028	0,016	0,011	0,009	0,007
US1976 ($\theta_B \sim 285K$)	% réussite	8	9	68	89	94	99	100
	RMSEP θ	0,476	0,466	0,202	0,048	0,054	0,029	0,023
	RMSEP ρ	0,073	0,069	0,033	0,018	0,013	0,010	0,007

Le bruit appliqué sur l'image de luminance diminue l'efficacité de TRS-MWIR. En moyenne, le taux de réussite est de 67% et les RMSEP sur la température et la réflectance sont respectivement de 0,166 K et 0,034. La variabilité des résultats obtenus avec un bruit de 0,01 W/(m².sr.μm) est similaire mais avec un taux de réussite moyen bien inférieur, de 30%, avec des valeurs allant de 0 à 71% selon les configurations. Les RMSEP sur la température et la réflectance sont alors respectivement de 0,312 K et 0,065.

On constate que le taux de réussite est d'autant meilleur que θ_B et $\bar{\theta}$ sont éloignées. Les configurations associant une atmosphère MLS et des températures de surface de 280K et 340 K ne suivent pas cette règle et ceci est justifié plus bas. Ces résultats montrent la robustesse de la méthode lorsque la température de surface est supérieure à la température de brillance de l'atmosphère, ce qui permet d'atteindre des taux de réussite de 100%, bien que les données soient bruitées. Cette étude fait ressortir deux faiblesses de la méthode. Celle-ci est mise en défaut lorsqu'il y a une multitude d'intersections dues à la proximité des courbes d'éclairement et d'émission : l'algorithme est d'autant plus performant que la température de brillance de l'atmosphère s'écarte de la température de la surface. Aussi, l'algorithme est mis en échec lorsque

les divergences dues à une trop faible transmittance sont prises en compte dans le calcul du critère, à cause d'une mauvaise sélection des longueurs d'onde de travail. Ces deux limites de la méthode sont détaillées dans les paragraphes suivants. Le bruit appliqué étant de l'ordre de celui de la caméra Hyper-Cam, les résultats présentés ci-dessus sont de bon augure quant à l'application de TRS-MWIR sur des images réelles.

Sensibilité au choix des longueurs d'onde

Une surface à 279,9 K associée à une atmosphère MLS illustre cette sensibilité. Pour cette configuration, l'intersection entre l'éclairement et l'émission de la surface a lieu dans une zone de faible transmittance (Figure 4.8). La Figure 4.9 montre que la réflectance choisie par l'algorithme, associée à une température de surface de 271,9 K, est très différente de la réflectance théorique.

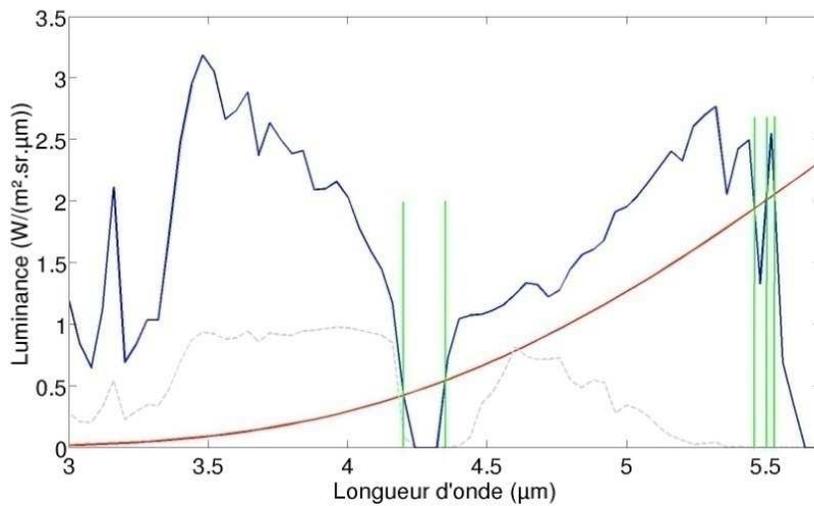


Figure 4.8 : Bleu : éclairement de la scène (au facteur π près) pour une atmosphère MLS. Rouge : rayonnement émis par un corps noir à 279,2 K. Gris clair : transmittance de l'atmosphère MLS entre 0 et 1 km. Vert : intersection des courbes bleue et rouge.

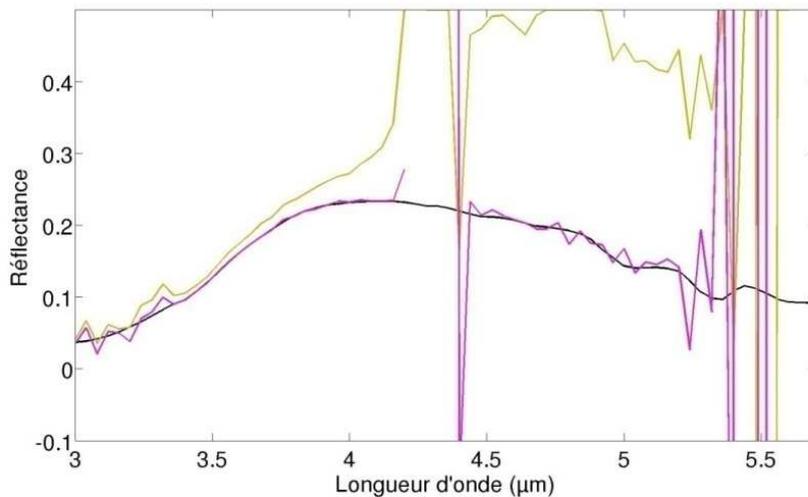


Figure 4.9 : Noir : réflectance théorique. Marron : réflectance estimée par TRS-MWIR. Rose : réflectance de la LUT correspondant à la température estimée la plus proche de la température théorique.

L'algorithme aurait dû sélectionner la réflectance correspondant à θ_{est} la plus proche 279,9 K. Mais pour nombre de températures θ_{est} proches de θ_{th} , la divergence due à l'intersection des courbes d'éclairement et d'émission est située dans cette zone de faible transmittance, exclue de l'algorithme. La différenciation des spectres estimés sur critère de douceur spectrale ne se base alors plus que sur les domaines situés de part et d'autres de la zone d'exclusion. Or bien que le critère de douceur spectrale reste valable sur les domaines spectraux situés de part et d'autres de λ_d , la divergence en λ_d amplifie nettement le critère, rendant l'algorithme moins sensible au bruit radiométrique. De plus, il nécessite une résolution spectrale assez fine afin que les résidus atmosphériques ne soient pas lissés. Dans la configuration ici présentée, la luminance étant bruitée, le seuil de transmittance choisi pour la sélection des longueurs d'onde s'avère être trop bas et certaines divergences dues à des petites valeurs de transmittance (ici vers 4,4 μm) ne sont pas exclues lors du calcul du critère de douceur spectrale. C'est ainsi que l'algorithme est mis en échec : alors qu'il n'est théoriquement plus basé que sur la présence de résidus atmosphériques dans le spectre de réflectance estimé, les divergences dues à une trop faible transmittance faussent le choix du couple $(\theta_{est}, \rho_{est})$, la sensibilité au choix des longueurs d'onde de travail est importante. Si un choix de l'algorithme peut être identifié comme aberrant, il faudrait alors pouvoir relancer la méthode en restreignant le domaine de longueur d'onde de travail. Cheng et al. (2011) ne se basent par exemple que sur le domaine 4,7 - 5 μm pour l'estimation de la température, sur des données hyperspectrales. Mais il faut garder à l'esprit que le choix d'un seuil de transmittance bas (0,005) permet de garder le maximum d'informations et que la probabilité que la divergence due à l'intersection des courbes d'éclairement et d'émission soit située dans une zone de travail est ainsi élevée, assurant les avantages mentionnés ci-dessus (moindre dépendance au bruit radiométrique et à la résolution spectrale que lors de l'utilisation d'un domaine spectral restreint). Le risque est alors, comme c'est le cas dans la configuration ici présentée, que certaines divergences dues à une trop faible transmittance ne soient pas exclues. Entre une perte d'informations et risque d'introduction d'erreurs, le choix du seuil est donc à affiner.

Proximité des courbes d'éclairement et d'émission - multitude d'intersections

Lorsque la température de la surface et la température de brillance de l'atmosphère sont très proches, les courbes d'éclairement et d'émission se croisent en de nombreuses longueurs d'onde. Cette configuration est par exemple obtenue pour une surface à 282,3 K, et une atmosphère de type US1976 ($\theta_B \sim 285\text{K}$), comme l'illustre la Figure 4.10. La Figure 4.11 met en évidence cette limite de l'algorithme lorsque la luminance est bruitée : alors que la réflectance estimée avec une température de 282,3 K est la plus proche de la réflectance théorique, c'est la réflectance estimée pour une température de 283,9 K qui est automatiquement sélectionnée. Le critère de minimisation de l'intégrale de la dérivée ne fonctionne plus. Le nombre élevé d'intersections entre l'éclairement et la courbe d'émission d'un corps à 282,3 K engendre des divergences multiples (effet A)), que l'on observe sur la Figure 4.11. Cette configuration peut aussi se produire lorsque la température de surface est particulièrement élevée : par exemple, pour

l'atmosphère MLS et une température de surface de 340 K, il y a plusieurs intersections aux environs de 3,2 μm . Cet effet est d'autant plus marqué que l'image est bruitée.

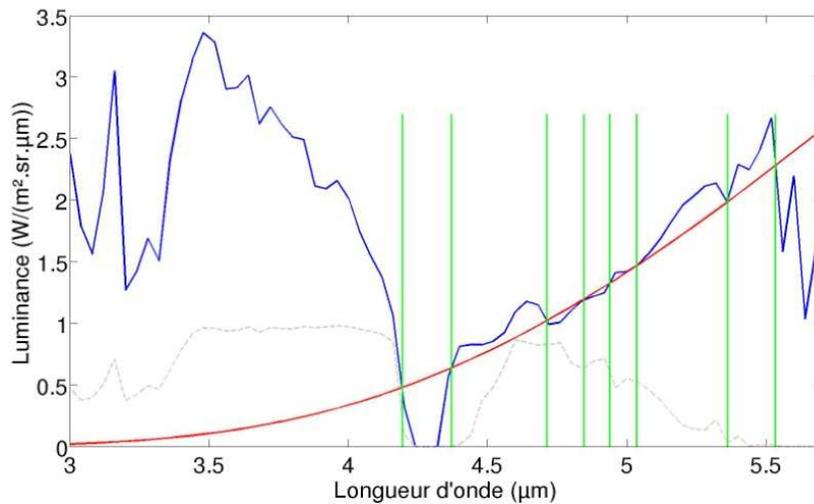


Figure 4.10 : Bleu : éclairage de la scène (au facteur π près) pour une atmosphère US1976. Rouge : rayonnement émis par un corps noir à 282,3 K. Gris clair : transmittance de l'atmosphère US1976 entre 0 et 1 km. Vert: intersection des courbes bleue et rouge.

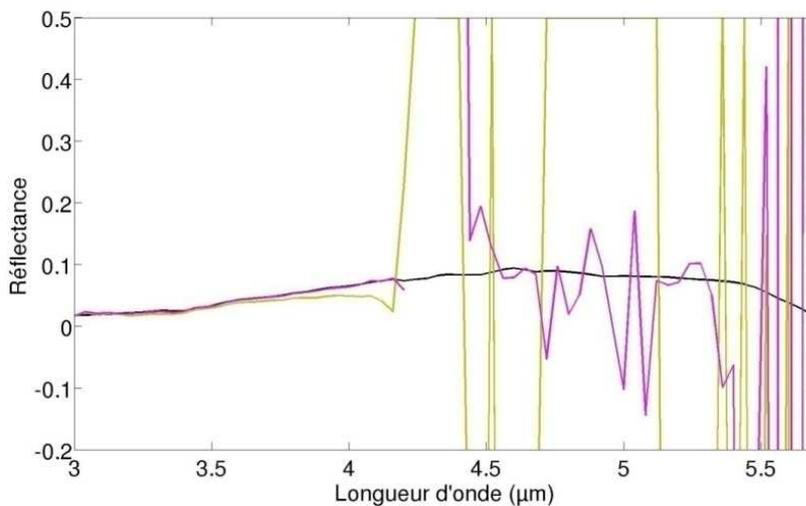


Figure 4.11 : Noir : réflectance théorique. Marron : réflectance estimée par TRS-MWIR. Rose : réflectance de la LUT correspondant à la température estimée la plus proche de la température théorique.

La méthode TRS-MWIR peut s'appliquer à tout type de surface, pourvu que celle-ci ait une température supérieure à celle de l'atmosphère. Sur données bruitées, elle est pour l'instant limitée par les trop faibles valeurs de transmittance et une sélection de longueurs d'onde de travail trop large. Les intersections multiples mettent aussi en échec cette première version de l'algorithme. Il serait intéressant par la suite d'assouplir le choix des longueurs d'onde de travail et de tenir compte des effets de type C) dans le critère à minimiser afin d'agrandir le domaine de fonctionnement de l'algorithme.

4.2.6. AUTRES SOURCES D'ERREURS

Résolution spectrale

Le Tableau 4.3 présente les résultats obtenus lorsqu'on dégrade l'image de luminance à une résolution spectrale de 80 nm et 160 nm (au lieu de 40 nm), par intégration par des fonctions créneaux (voir plus haut). Ce tableau rappelle aussi les résultats obtenus lors de l'étude de l'erreur algorithmique, à une résolution de 40 nm.

Tableau 4.3 : Sensibilité de TRS-MWIR à la résolution spectrale.

Résolution spectrale (nm)	Nombre de bandes	% réussite	RMSEP θ	RMSEP ρ
40	68	100	0,007	0,001
80	34	100	0,030	0,001
160	17	100	0,102	0,003

Sur ces images non bruitées, une plus faible résolution spectrale maintient un excellent taux de réussite de l'algorithme, mais les RMSEP croissent avec la diminution du nombre de bandes. L'erreur sur la température est plus importante que celle sur la réflectance. L'efficacité de l'algorithme étant quasiment équivalente à 80 nm et à 40 nm, une dégradation spectrale des données acquises avec un capteur type Hyper-Cam, qui lisserait les données et diminuerait donc aussi le bruit, augmenterait certainement les taux de réussite de l'algorithme. Pour des applications sur des images réelles, il s'agira donc de trouver le juste milieu entre une intégration qui enlève les variations hautes fréquences du signal, ce qui est positif, et une intégration qui engendre une trop forte perte d'information et augmente les RMSEP.

Notons qu'avec des données dégradées selon les caractéristiques du capteur AHS (7 bandes larges, bruit de $0,01 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, Annexe 1), le taux de réussite n'est que de 43 %, avec des RMSEP pour la température et la réflectance de respectivement 0,314K et 0,043. Ces résultats montrent qu'il n'est actuellement pas envisageable d'appliquer la méthode TRS-MWIR à des capteurs multi-spectraux de type AHS. En revanche, les résultats obtenus en simulant un capteur hyperspectral de type Hyper-Cam sont beaucoup plus encourageants. Ceci s'explique tant par la finesse de l'échantillonnage de ce dernier, nécessaire pour appliquer un critère de douceur spectrale, que par son faible bruit radiométrique.

Méconnaissance de l'atmosphère

Dans cette section, nous testons la sensibilité de l'algorithme à une mauvaise connaissance de l'atmosphère. Pour ce faire, nous simulons sept scènes composées d'une atmosphère de type US1976, pour sept températures de surface moyennes. Lors de l'inversion, soit le contenu en vapeur d'eau soit la température de l'atmosphère est faussé. Le profil de vapeur d'eau est multiplié par un facteur de 0,25 ou de 2. Le profil de température est quant à lui décalé de $\pm 3 \text{ K}$. Chacune de ces statistiques est donc calculée sur sept images, soit 700 pixels et présentée dans le Tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Impact de l'erreur sur la connaissance de l'atmosphère US1976 – Les valeurs des contenus intégrés de vapeur d'eau sont indiquées, ainsi que la température moyenne de brillance utilisée.

	H ₂ O 0,35 g/cm ²	H ₂ O 2,89 g/cm ²	Température ~285 – 3 K	Température ~285 + 3 K
% réussite	73	57	86	86
RMSEP θ	0,483	0,100	0,006	0,072
RMSEP ρ	0,021	0,008	0,001	0,001

Une erreur d'un facteur 2 (resp. 0,25) sur le profil de vapeur d'eau diminue le taux de réussite de l'inversion de 30 (resp. 10) points (on enregistrerait un taux de réussite de 88% pour les scènes simulées avec l'atmosphère US1976, sur les seules erreurs algorithmiques). Une sous-estimation du contenu en vapeur d'eau (simulation avec 2,89 g/cm²) induit plus d'erreurs qu'une surestimation (simulation avec 0,35 g/cm²) car la transmittance est alors surévaluée et des longueurs d'onde qui devraient être exclues du domaine spectral de travail ne le sont pas. Par comparaison avec une méthode de TES développée par Goïta & Royer (1997), une erreur de $\pm 0,5$ g/cm² sur l'estimation de la vapeur d'eau engendre une erreur de 2,5 K sur la température de surface. Des erreurs de l'ordre du kelvin sur la température de l'atmosphère n'ont que très peu d'influence sur l'algorithme, excepté pour les faibles températures de surface, autour de 280 K, où le taux de réussite est nul. Pour les autres températures de surface, le taux de réussite est de 100%. Ceci s'explique par le fait que l'intersection entre la courbe d'émission terrestre et la courbe d'éclairement se fait après 4,2 μ m, zone spectrale où l'éclairement est purement thermique atmosphérique (et non solaire). Dans ces conditions, la connaissance de la température atmosphérique est donc cruciale.

4.2.7. SYNTHÈSE : LIMITES ET PERSPECTIVES

Ces premiers résultats montrent que la méthode TRS-MWIR permet de retrouver, avec un bon taux de réussite, à la fois la température et la réflectance d'une scène à partir de sa luminance bruitée, pour les trois atmosphères standards présentées et un panel de températures de surface représentatives de scènes naturelles. Compte tenu des hypothèses de travail, cette méthode serait efficace pour des capteurs existants comme la caméra Hyper-Cam. Son efficacité dépend néanmoins des températures relatives de l'atmosphère et de la surface, la surface devant être plus chaude que l'atmosphère pour un fonctionnement optimal. Deux faiblesses de la méthode, mises en évidence par l'étude sur données bruitées, peuvent être retenues : la dépendance aux longueurs d'onde de travail sélectionnées et les intersections multiples entre les courbes d'éclairement et d'émission de la surface. La sensibilité au bruit radiométrique pourrait être améliorée par un prétraitement des images destiné à le diminuer. Nous avons aussi montré que la sensibilité aux paramètres atmosphériques est telle qu'il reste possible d'appliquer cette méthode, même si la température de l'atmosphère ou le profil de vapeur d'eau ne sont pas parfaitement connus. La méthode serait certainement améliorée par la prise en compte des effets C) dans l'algorithme. L'introduction d'un critère de corrélation sur la réflectance, si l'image est auparavant classifiée,

par exemple en utilisant le domaine VNIR-SWIR pourrait aussi être utile. Une amélioration globale de la chaîne d'inversion, depuis les sorties MODTRAN jusqu'au calcul de la réflectance, en terme de précision numérique permettrait de s'affranchir d'un certain nombre de divergences ou de zones de valeurs non définies. Enfin un post-traitement pour interpoler les réflectances dans les zones non définies dues à une transmittance atmosphérique nulle et pour lisser les spectres serait nécessaire pour exploiter pleinement les réflectances retrouvées. Une fois la réflectance du pixel obtenue, on cherche à estimer le contenu en eau de la végétation. Ceci est présenté à la section suivante.

4.3. DEFINITION D'INDICES SPECTRAUX POUR L'ESTIMATION DU CONTENU EN EAU DE LA VEGETATION A PARTIR DE LA REFLECTANCE DE LA CANOPEE

4.3.1. DONNEES ET METHODE

Dans cette section, nous cherchons à estimer le contenu en eau d'une canopée ($C_w \cdot LAI$). ou d'une simple feuille la composant (C_w), à partir de la réflectance de la canopée. Pour cela, nous recherchons des indices spectraux optimaux, combinaisons de valeurs de réflectances, sensibles au contenu en eau de la végétation. Les estimations doivent être les plus indépendantes possibles des autres paramètres de la canopée (orientation des feuilles, structure interne de la feuille, etc.).

Données

Une base de données de 267 spectres de réflectance de canopées, présentés en Section 3.3.3, est utilisée. On rappelle que ces spectres ont été simulés grâce à PROSPECT-VISIR + 4SAIL, pour trois configurations de base, en variant alternativement les variables d'entrée des modèles, à savoir : le contenu en eau foliaire, le contenu en matière sèche foliaire, le paramètre de structure interne foliaire, le LAI, l'inclinaison foliaire, la nature du sol, le paramètre de « hot spot », l'angle zénithal solaire et l'angle azimutal solaire. Les spectres associés à une variation de l'angle azimutal ne sont pas utilisés car elle n'entraîne aucune variation de réflectance. De plus, nous ne retenons que les spectres de réflectance associés à un LAI variant de 0,5 à 7 et à un contenu en eau compris entre 0,001 et 0,03 g/cm², ce qui correspond aux valeurs que l'on peut trouver dans la nature (Chapitre 2). Nous disposons ainsi de 267 spectres de réflectance de canopées (89 autour de chaque configuration moyenne), entre 3 et 5,7 μm, avec une résolution spectrale de 40 nm. Les réflectances sont bruitées par un bruit gaussien de moyenne nulle et d'écart type de 0,001. La dégradation de la résolution spectrale et l'ajout de bruit préviennent des comportements aberrants de l'algorithme, comme cela est expliqué dans le paragraphe suivant.

Méthode

Cinq formes d'indices, présentées dans le Tableau 4.5, sont testées sur les spectres de réflectance. Il s'agit d'indices de type R (valeur de réflectance simple), D (différence de réflectances), SR (rapport simple de réflectances), ND (différence normalisée de réflectances) et mSR (rapport simple de réflectances modifié). Ces indices sont basés sur une (R), deux (D, SR, ND) ou trois

(mSR) longueurs d'onde. On exclut les longueurs d'onde où la transmittance atmosphérique entre 0 et 1 km d'une atmosphère US1976 est inférieure à 0,005. On s'assure ainsi que les indices sont basés sur des longueurs d'onde où un capteur aéroporté est susceptible d'enregistrer un signal. La dégradation spectrale et radiométrique des réflectances permet d'éviter que l'algorithme ne sélectionne des longueurs d'onde trop proches, pour lesquelles les valeurs de réflectances seraient elles aussi très proches (Féret, 2009). La division ou la différence de ces valeurs proches est en effet susceptible d'entraîner des valeurs d'indices aberrantes, qui entraîneraient une sélection de longueurs d'onde incohérente.

Tableau 4.5 : Formes d'indices testées où R_λ est la valeur de la réflectance à la longueur d'onde λ .

Indice	R	D	SR	ND	mSR
Forme	R_λ	$R_{\lambda_2} - R_{\lambda_1}$	$\frac{R_{\lambda_2}}{R_{\lambda_1}}$	$\frac{R_{\lambda_2} - R_{\lambda_1}}{R_{\lambda_2} + R_{\lambda_1}}$	$\frac{R_{\lambda_3} - R_{\lambda_1}}{R_{\lambda_2} - R_{\lambda_1}}$

La valeur de ces indices est calculée sur chacun des spectres de réflectance, en testant tour à tour chaque longueur d'onde. Un ensemble de valeurs d'indices associé à un ensemble de contenus en eau de la feuille (resp. de la canopée) est ainsi établi. Nous cherchons ensuite à mettre en relation le contenu en eau C_w (resp. $C_w \cdot LAI$) et la valeur de l'indice Ind , pour l'ensemble des spectres. Pour chaque couple (C_w, Ind) (resp. ($C_w \cdot LAI, Ind$)), nous déterminons les coefficients (a, b, c) d'un polynôme de degré 2 qui ajuste au mieux le nuage de points représentant Ind en fonction de C_w (resp. $C_w \cdot LAI$) (Féret, 2009). Est ensuite sélectionnée, pour chaque forme d'indice, la longueur d'onde, ou combinaison de longueurs d'onde, pour laquelle la relation établie offre le meilleur RMSEP en terme d'estimation du contenu en eau. La loi polynômiale établie permet d'estimer le contenu en eau $C_{w_{est}}$ selon l'Equation 4.5.

$$C_{w_{est}} = a + b \cdot ind + c \cdot ind^2 . \quad (4.5)$$

Parmi les cinq indices testés, nous retenons finalement celui qui offre le plus faible RMSEP. Le biais (BIAS) et le SEPC (Equations 3.21 et 3.22) ne sont pas présentés car le biais est toujours nul du fait que les bases de données de calibrage et de test de l'indice sont les mêmes : l'ajustement du polynôme minimise les écarts entre les points expérimentaux et la courbe si bien qu'il y a autant de points au-dessus qu'en dessous du polynôme, assurant ainsi un biais nul.

La section suivante présente les résultats obtenus pour la détermination d'un indice sur le contenu en eau foliaire, ainsi que la sensibilité de cet indice aux paramètres des modèles PROSPECT-VISIR et 4SAIL. La même étude pour l'estimation d'un indice sur le contenu en eau de la canopée est ensuite présentée. La Figure 4.12 rappelle les variations de réflectance de la canopée 2 (Chapitre 3) avec le contenu en eau foliaire. On pourra s'y référer pour visualiser les longueurs d'onde sélectionnées pour chaque indice.

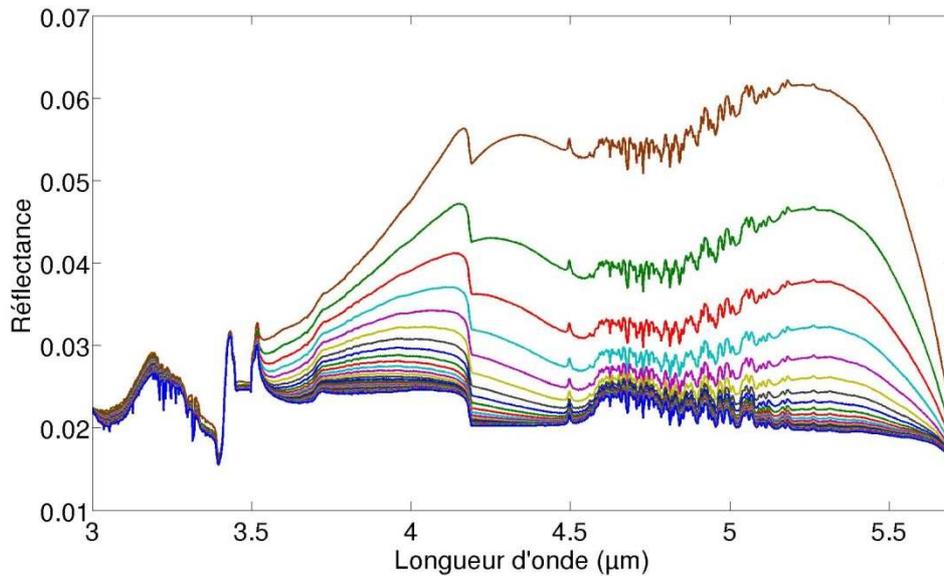


Figure 4.12 : Réflectances de la canopée 2 en fonction du contenu en eau foliaire (Section 3.3.3). La réflectance la plus élevée correspond au contenu en eau le plus faible. Valeurs du contenu en eau : minimum : 0,001 g/cm², maximum : 0,03 g/cm². Pas : 0,001 g/cm².

4.3.2. INDICE SUR LE CONTENU EN EAU FOLIAIRE

Le Tableau 4.6 indique les longueurs d'onde retenues pour chaque forme d'indice et les RMSEP obtenus sur l'estimation du contenu en eau. Pour les indices se basant sur plus d'une longueur d'onde, on constate qu'il y a toujours sélection d'une longueur d'onde où l'eau a un impact sur le signal et d'une autre où elle n'en a pas (Figure 4.12). Ceci est cohérent pour un indice cherchant à discriminer l'impact du contenu en eau. Les RMSEP sont très élevés et correspondent environ à 15% de la valeur maximale du contenu en eau théorique (0,03 g/cm²). Une analyse des Figures 4.13 et 4.14 explique ces mauvais résultats. Quelque soit la forme de l'indice, aucun polynôme du second degré n'arrive à ajuster le nuage de point représentant la valeur de l'indice en fonction du contenu en eau théorique. Pour les cinq indices, on observe, tant sur la Figure 4.13 que sur la Figure 4.14, un plateau pour des contenus en eau supérieurs à 0,01 g/cm², c'est-à-dire qu'après 0,01 g/cm², quelque soit la valeur du contenu en eau, la valeur de l'indice (et donc du contenu en eau estimé) est la même. Ceci est cohérent avec l'étude de sensibilité présentée dans la Section 3.3.3, où une saturation de la réflectance a été mise en évidence pour des contenus en eau supérieurs à 0,01 g/cm². Il apparaît donc qu'aucun de ces indices spectraux ne permet d'estimer correctement le contenu en eau d'une feuille si celui-ci est supérieur à 0,01 g/cm². S'il est inférieur, alors il est nécessaire de le savoir a priori pour espérer l'estimer plus précisément. Ceci oriente une fois de plus les applications possibles de ce travail vers des canopées plutôt sèches.

Tableau 4.6 : Longueurs d'onde optimales pour chaque forme d'indice et RMSEP associés.

Indice	R	D	SR	ND	mSR
$\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3$ (μm)	5,2	3,24 - 5,2	3,32 - 5,08	3,24 - 5,2	3,32 - 3,52 - 5,08
RMSEP (g/cm ²)	0,0046	0,0045	0,0044	0,0045	0,0044

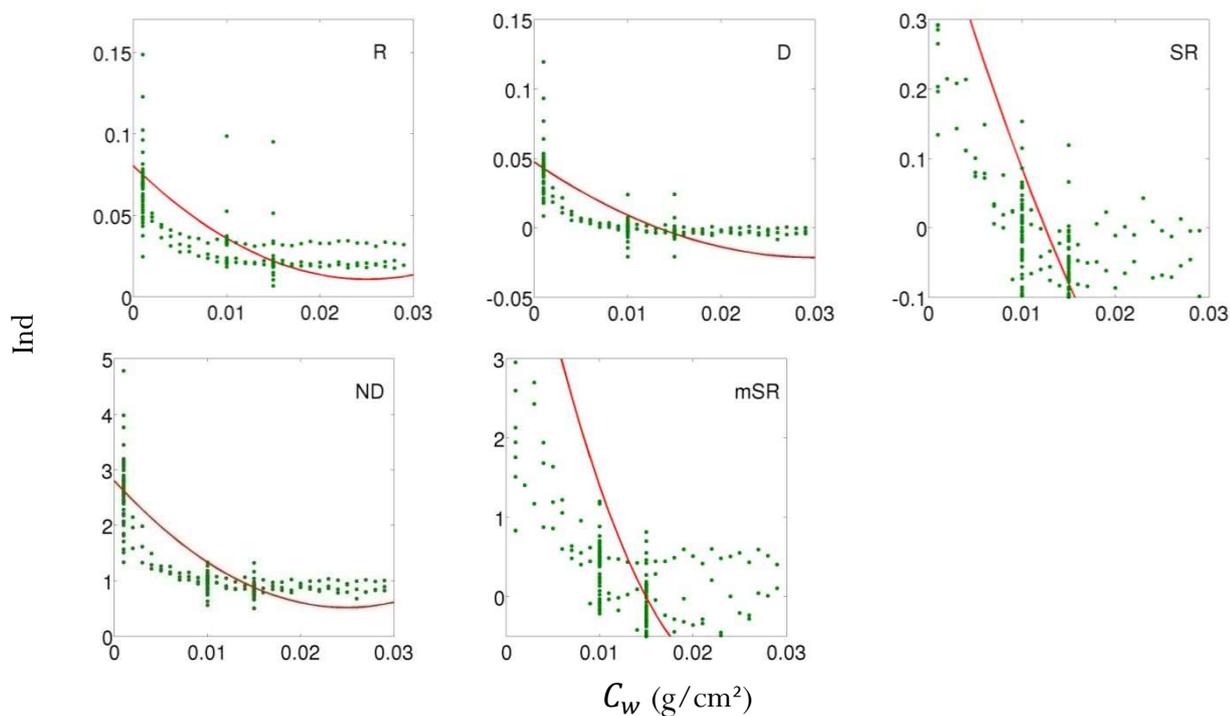


Figure 4.13 : Vert : indices en fonction du contenu en eau foliaire. Rouge : polynôme ajusté sur le nuage de points verts. Les zones de points les plus denses, à 0,001, 0,01 et 0,015 g/cm² correspondent au contenu en eau des canopées moyennes. Ils apparaissent donc plus fréquemment dans la base de données. Ce commentaire est valable pour l'ensemble des figures de cette Section 4.3.

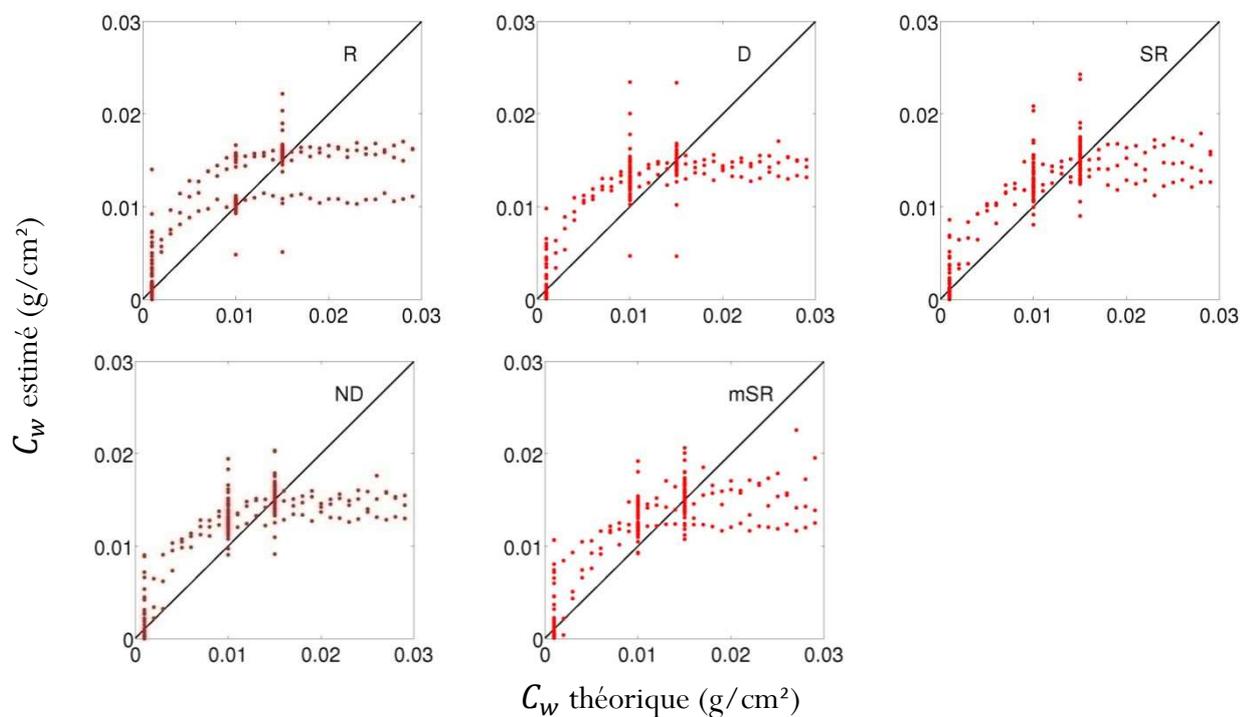


Figure 4.14 : Rouge : contenus en eau estimés par l'Equation 4.11 avec les coefficients de chacun des polynômes présentés dans la Figure 4.13 en fonction du contenu en eau théorique. Noir : droite d'équation $y=x$.

Pour un contenu en eau foliaire inférieur à 0,01 g/cm²

Au vu des résultats précédents et en supposant que l'on puisse avoir une information qualitative sur le statut hydrique de la végétation, il semble possible de déterminer un indice permettant une estimation quantitative du contenu en eau foliaire pour des canopées plutôt sèches ($C_w < 0,01$ g/cm²). Nous appliquons donc la même méthode de détermination d'indices sur une base de données réduite de 144 spectres de réflectance de feuilles ayant des contenus en eau inférieurs à 0,01 g/cm². Le Tableau 4.7 indique les longueurs d'onde retenues pour chaque forme d'indice et le RMSEP sur l'estimation du contenu en eau. La Figure 4.15 représente le contenu en eau estimé par chacun des cinq indices en fonction du contenu en eau théorique.

Tableau 4.7 : Longueurs d'onde optimales pour chaque forme d'indice et RMSEP associés - contenus en eau inférieurs ou égaux à 0,01 g/cm².

Indice	R	D	SR	ND	mSR
$\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3$ (µm)	5,2	3,32 - 5,2	3,32 - 5,16	3,52 - 5, 2	3,32 - 3,52 - 5,16
RMSEP (g/cm ²)	0,0022	0,0015	0,0013	0,0015	0,0014

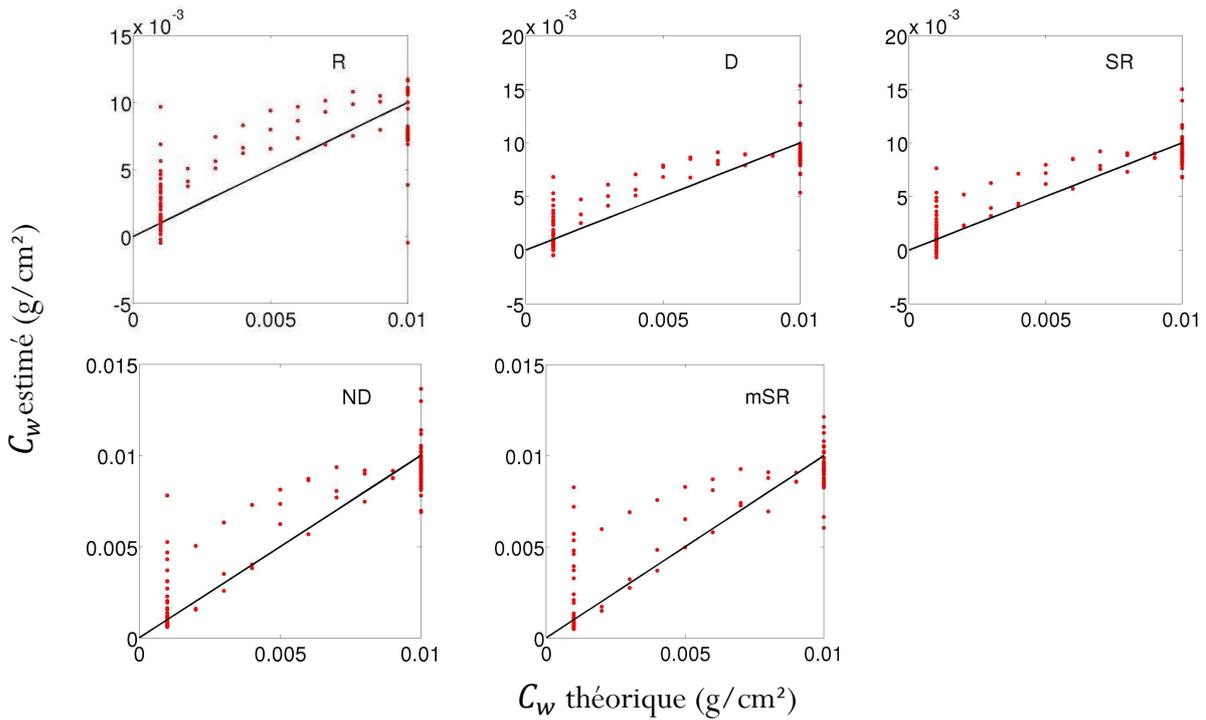


Figure 4.15 : Rouge : contenu en eau estimé en fonction du contenu en eau théorique. Noir : droite d'équation $y=x$.

Les longueurs d'onde sélectionnées sont très proches de celles déterminées pour des valeurs de contenus en eau allant jusqu'à 0,03 g/cm². Les RMSEP sont 2 à 3 fois plus faibles que dans l'étude précédente sur l'ensemble de la base de données et on observe une meilleure relation linéaire. Cependant, compte tenu de la valeur maximale du contenu en eau (0,01 g/cm²), le RMSEP est comme précédemment de l'ordre de 15-20% de cette valeur. Pour des contenus en eau inférieurs

à 0,01 g/cm², l'indice SR semble le plus pertinent. Il permet d'estimer cette variable avec un RMSEP de 0,0013 g/cm². Les coefficients (a, b, c) du polynôme à appliquer pour le calcul du contenu en eau estimé selon l'Equation 4.5 sont (0,0206, -0,0134, 0,0022). On note cependant que les indices D, ND et mSR offrent des RMSEP très proches. Une étude sur un plus grand nombre de données serait nécessaire pour mieux comparer les performances de ces indices, qui permettent en moyenne d'estimer le contenu en eau des feuilles à 15% près.

Sensibilité aux paramètres de PROSPECT-VISIR et 4SAIL

Nous présentons dans cette section la sensibilité de l'indice $SR = R_{3,32}/R_{5,16}$ aux principaux paramètres de modélisation de la canopée. L'indice est calculé pour chaque ensemble de spectres associés à la variation d'un paramètre des configurations moyennes. Les résultats sont présentés dans la Figure 4.16.

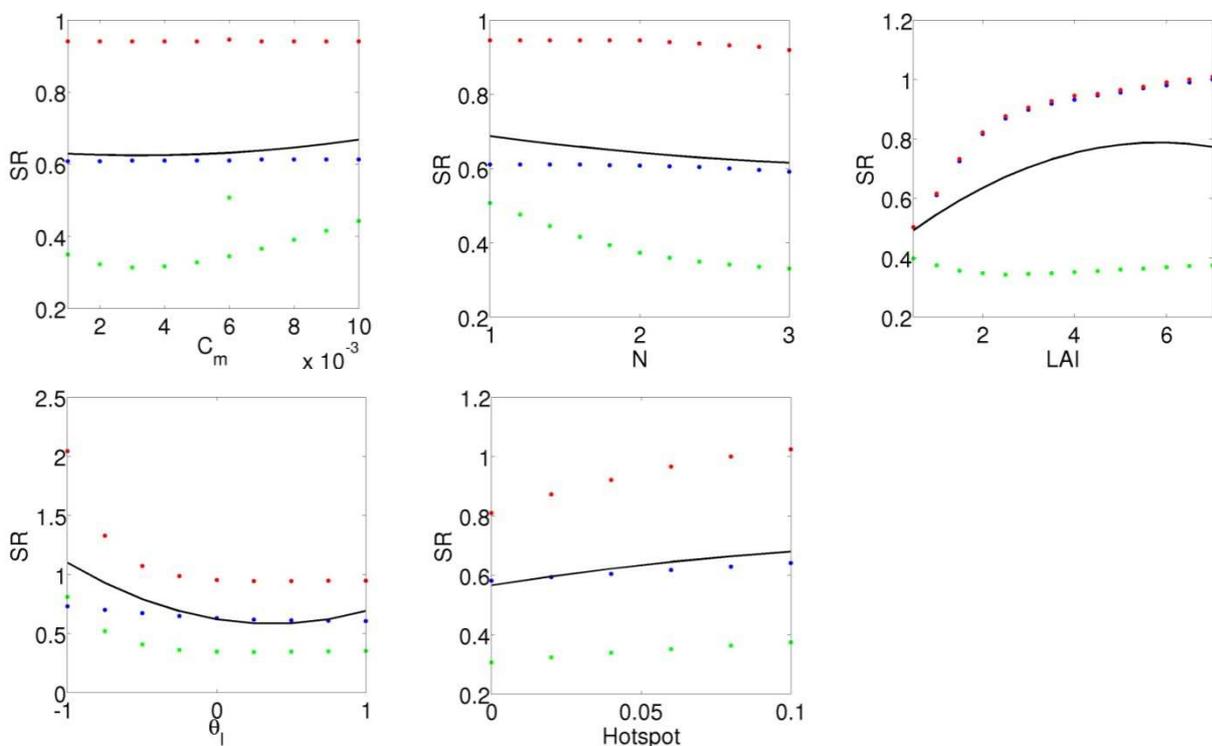


Figure 4.16 : Valeur de l'indice en fonction de la valeur du paramètre. De gauche à droite et de haut en bas : contenu en matière sèche foliaire, paramètre de structure foliaire, LAI, inclinaison foliaire, paramètre de « hot spot ». Bleu : canopée 1, rouge : canopée 2, vert : canopée 3, noir : polynôme du 2nd degré ajusté sur le nuage de points.

On note une assez forte dépendance au LAI, notamment pour des valeurs inférieures à 2, tout comme Colombo et al. (2008) dans le VNIR-SWIR. La canopée la plus sèche (points verts) montre une plus faible dépendance au LAI mais une plus forte dépendance au contenu en matière sèche et au paramètre de structure interne foliaire. Le paramètre de « hot spot » et l'inclinaison foliaire ont aussi une influence non négligeable sur la valeur de l'indice. La détermination d'un indice uniquement basé sur le MWIR pour l'estimation du contenu en eau foliaire depuis une

réflectance de canopée n'est donc pas complètement satisfaisante, ce qui nous conduit à chercher un indice sur le contenu en eau de la canopée, dans la section suivante.

4.3.3. INDICE SUR LE CONTENU EN EAU DE LA CANOPEE

Nous cherchons à estimer non plus le contenu en eau d'une feuille au sein de la canopée, mais le contenu en eau total de la canopée. Il s'agit donc d'établir un indice permettant de retrouver le produit $C_w \cdot LAI$. Le Tableau 4.8 présente les longueurs d'onde optimales pour chaque forme d'indice ainsi que les RMSEP obtenus sur l'estimation du contenu en eau. Dans tous les couples de longueurs d'onde sélectionnées, on trouve une longueur d'onde autour de 3,5 μm et une autre autour de 4,1 μm . Ceci est cohérent avec la zone d'influence du LAI sur les spectres de réflectance (Figure 3.12). Précédemment, pour l'estimation du contenu en eau foliaire, les longueurs d'onde étaient plutôt sélectionnées autour de 3,4 et 5,2 μm . Par ailleurs, ces longueurs d'onde sont bien situées en dehors des zones de fortes absorption atmosphériques et sont donc compatibles avec des applications en télédétection aéroportée ou satellitaire.

Tableau 4.8 : Longueurs d'onde optimales pour chaque forme d'indice et RMSEP associés.

Indice	R	D	SR	ND	mSR
$\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3$ (μm)	4,2	3,56 - 4, 16	3,52 - 4,16	3,44 - 4,16	3,4 - 3,52 - 4,08
RMSEP (g/cm^2)	0,0144	0,0125	0,0112	0,0110	0,0114

La Figure 4.17 présente les contenus en eau estimés en fonction des valeurs théoriques.

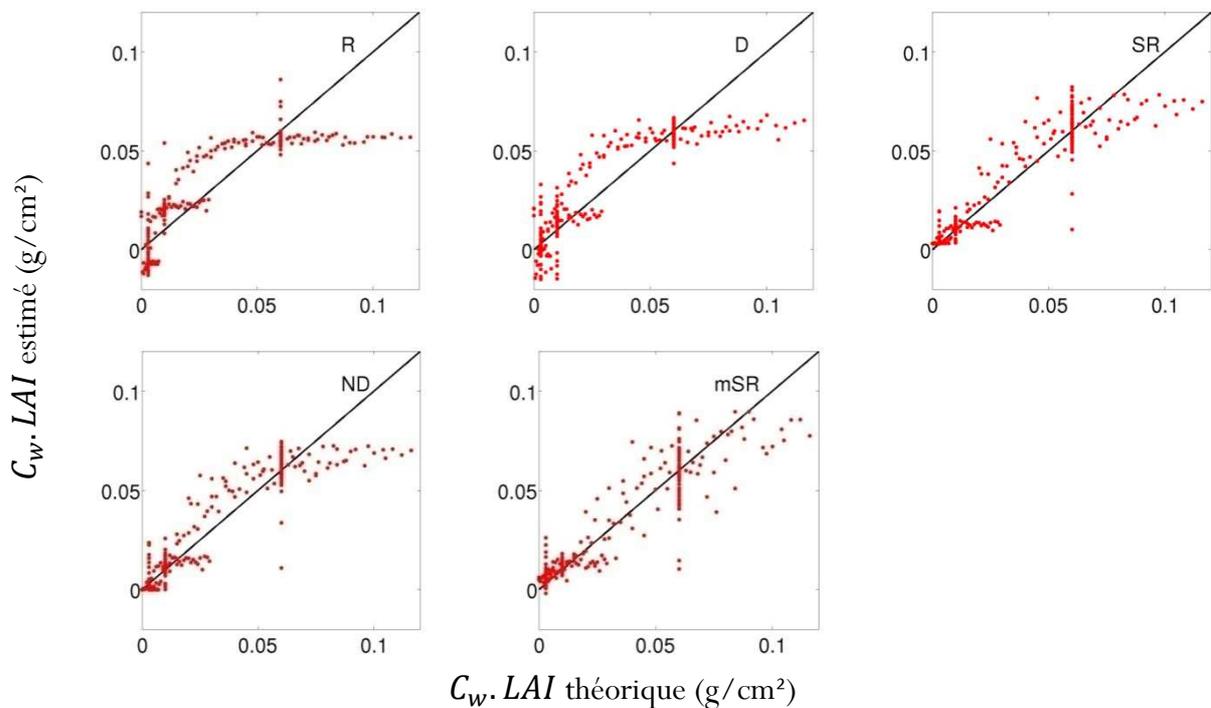


Figure 4.17 : Rouge : contenu en eau estimé en fonction du contenu en eau théorique. Noir : droite d'équation $y=x$.

L'indice mSR est le mieux adapté pour l'estimation du contenu en eau de la canopée. Mais comme à l'échelle de la feuille, la plupart des indices saturent rapidement avec le contenu en eau.

Pour un contenu en eau foliaire inférieur à 0,01 g/cm²

Le Tableau 4.9 et la Figure 4.18 présentent les indices obtenus sur des canopées ayant un contenu en eau foliaire inférieur à 0,01 g/cm².

Tableau 4.9 : Longueurs d'onde optimales pour chaque forme d'indice et RMSEP associés - contenus en eau inférieurs ou égaux à 0,01 g/cm².

Indice	R	D	SR	ND	mSR
$\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3$ (µm)	4,24	3,52 - 4,16	3,52 - 4,08	3,44 - 4,16	3 - 4,48 - 3,44
RMSEP (g/cm ²)	0,0071	0,0059	0,0044	0,0038	0,0029

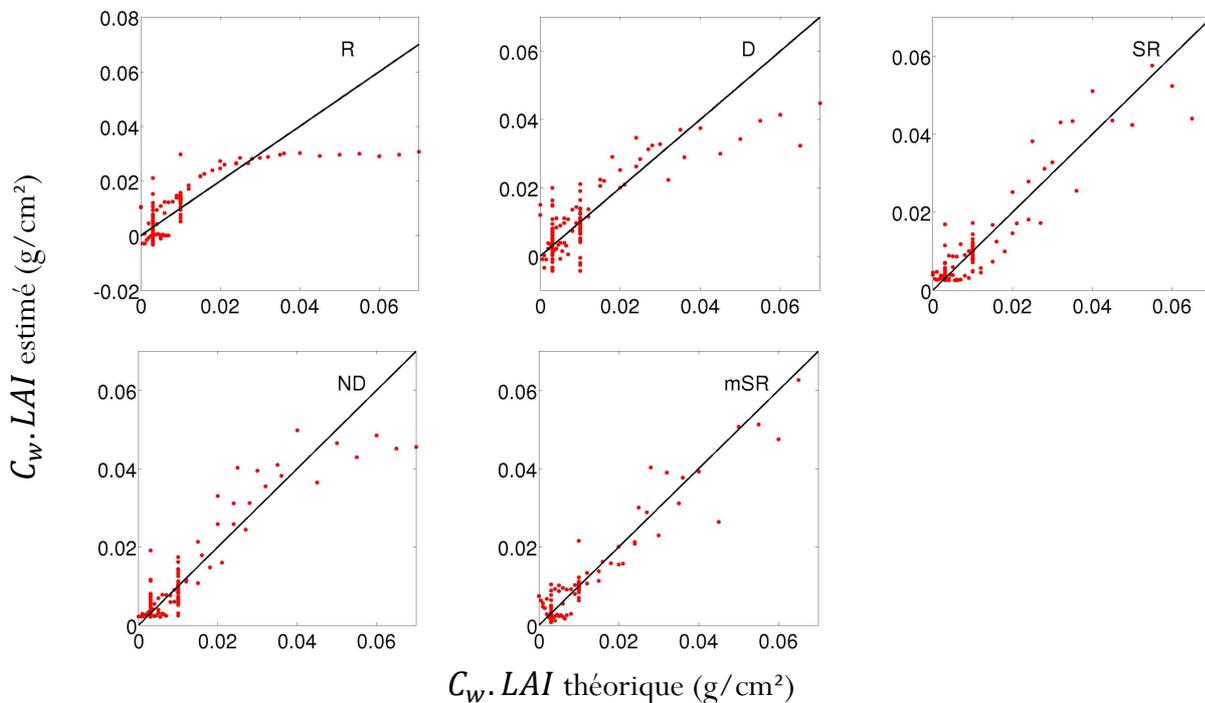


Figure 4.18 : Rouge : contenus en eau estimés en fonction du contenu en eau théorique. Noir : droite d'équation $y=x$.

L'indice mSR permet de retrouver le contenu en eau des canopées avec un RMSEP de 0,0029 g/cm². Ce résultat est légèrement inférieur à ceux obtenus par Colombo et al. (2008) grâce au VNIR-SWIR, qui présentent des RMSEP allant de 0,0033 à 0,0066 g/cm², pour des canopées avec des valeurs de LAI comprises entre 0,5 et 5 et des contenus en eau foliaire compris entre 0,001 et 0,03 g/cm². L'utilisation du domaine MWIR pour l'estimation du contenu en eau de la végétation plutôt sèche est donc réaliste. Les coefficients (a, b, c) du polynôme à appliquer pour le calcul du contenu en eau estimé selon l'Equation 4.5 sont $(-9,5 \cdot 10^{-5}, 0,0176, -0,0012)$.

Sensibilité aux paramètres de PROSPECT-VISIR et 4SAIL

La sensibilité de l'indice mSR aux paramètres de la canopée est présentée à la Figure 4.19. Les valeurs d'indices calculés sur la canopée ayant le contenu en eau le plus élevé ($0,015 \text{ g/cm}^2$) présentent beaucoup plus de dispersion que ceux calculés sur les deux autres canopées, les valeurs de réflectances étant en moyenne plus faibles. Ceci est cohérent avec le fait que l'indice est calibré pour des contenus en eau inférieurs ou égaux à $0,01 \text{ g/cm}^2$. Les canopées les plus sèches ne montrent qu'une faible dépendance aux paramètres de modélisation de la canopée.

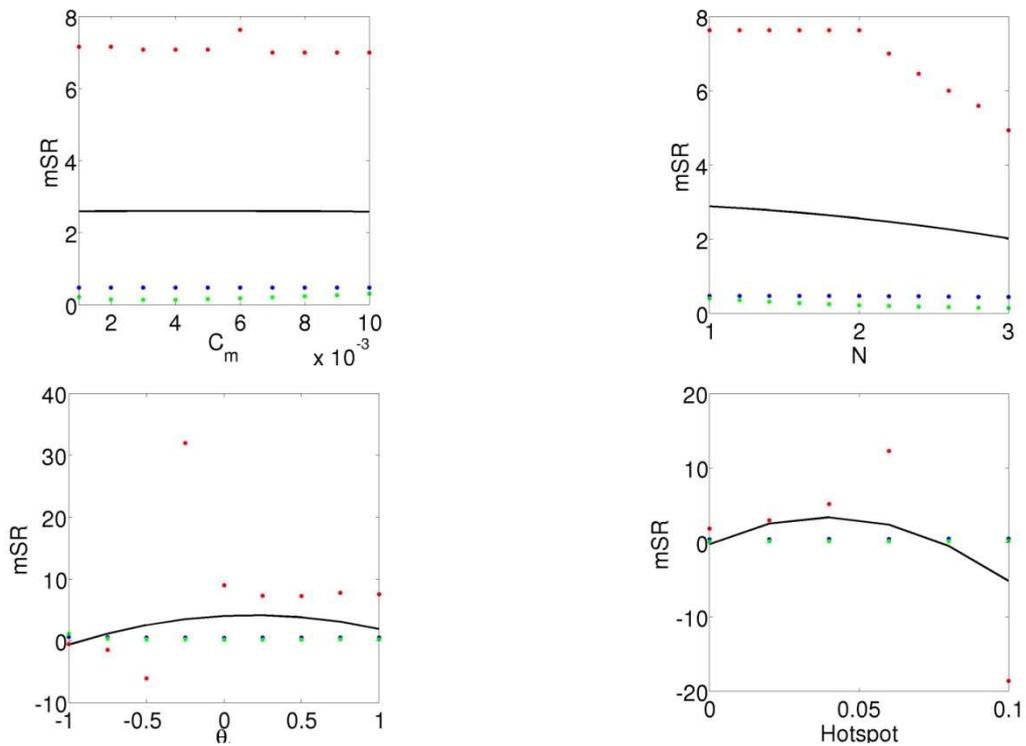


Figure 4.19 : Valeur de l'indice en fonction de la valeur du paramètre. De gauche à droite et de haut en bas : contenu en matière sèche foliaire, paramètre de structure foliaire, LAI, inclinaison foliaire, paramètre de « hotspot ». Bleu : canopée 1, rouge : canopée 2, vert : canopée 3, noir : polynôme du 2nd degré ajusté sur le nuage de points.

4.3.4. DISCUSSION

Les résultats présentés dans cette section montrent que le domaine MWIR seul est peu adapté à l'estimation du contenu en eau foliaire depuis une réflectance de canopée, la dépendance au LAI étant très forte. Par contre, ils sont encourageants pour le contenu en eau de la canopée, principalement pour des canopées plutôt sèches. Des évaluations de risques de feux (capteur BIRD) sont donc par exemple envisageables. Un couplage d'indices basés sur les deux domaines spectraux VNIR-SWIR et MWIR permettrait certainement une nette amélioration de l'estimation des contenus en eau de la végétation, tant à l'échelle de la feuille qu'à l'échelle de la canopée. Il

serait aussi intéressant de chercher un indice uniquement sensible au LAI bien que cela semble difficile contenu des zones d'influence du LAI, qui se combinent notamment à celle de l'eau.

4.4. CHAÎNE GLOBALE D'INVERSION

Après avoir détaillé les deux principales étapes nécessaires à l'estimation du contenu en eau de la végétation depuis une luminance, nous combinons dans cette section les méthode et indices précédemment développés pour disposer d'une chaîne globale d'inversion telle que présentée en Figure 4.1.

4.4.1. DONNEES ET METHODE

La chaîne d'inversion est testée sur données simulées uniquement. Cent luminances de scènes de végétation sont simulées, correspondant à la combinaison de cinq contenus en eau foliaire, cinq LAI et quatre températures de surface. Le Tableau 4.10 détaille l'ensemble des paramètres des simulations. Une première étude permet de quantifier l'erreur algorithmique. Une seconde s'intéresse à l'impact du bruit radiométrique sur la chaîne d'inversion globale.

Tableau 4.10 : Paramètres décrivant les scènes simulées.

Variable	Valeurs
C_w (g/cm ²)	0,002 - 0,004 - 0,006 - 0,008 - 0,01
C_m (g/cm ²)	0,006
N	2
Température de surface (K)	290 - 300 - 310 - 320
LAI	2 - 3 - 4 - 5 - 6
θ_l (°)	30
Paramètre de « hot spot » h	0,05
Type de sol	Terreau sableux rouge-brun
Angle zénithal solaire (°)	30
Angle azimutal solaire (°)	90
Modèle d'atmosphère	US1976
Altitude du capteur (m)	1000
Résolution spectrale (nm)	40 (68 bandes)
Bruit radiométrique (W/(m ² .sr.µm))	0 - 0,002

Tout d'abord la méthode TRS-MWIR est appliquée sur les luminances. Ensuite, les indices sur le contenu en eau foliaire et le contenu en eau de la canopée sont calculés sur les réflectances estimées. Nous utilisons les indices déterminés pour des contenus en eau foliaire inférieurs à 0,01 g/cm². Le contenu en eau est ensuite estimé selon l'Equation 4.5 avec les paramètres (a, b, c) précédemment indiqués (Section 4.3). Les erreurs sur le contenu en eau foliaire ou de la canopée seront quantifiés en terme de RMSEP, comme précédemment. Ces RMSEP seront systématiquement calculés pour l'ensemble des cent configurations. Un second calcul d'erreur pourra aussi être effectué sur un nuage des points restreints ; par exemple, on exclura les résultats

qui pourraient facilement être compris comme aberrants par un utilisateur de la chaîne globale disposant d'un minimum d'information a priori (e.g. $C_w est > 10 \cdot C_w th$).

4.4.2. ERREUR ALGORITHMIQUE

La Figure 4.20 représente les contenus en eau estimés grâce à la chaîne d'inversion. Dans un souci de lisibilité, plusieurs valeurs estimées de contenu en eau de la canopée, largement supérieures aux valeurs maximales ici représentées, n'apparaissent pas dans cette figure.

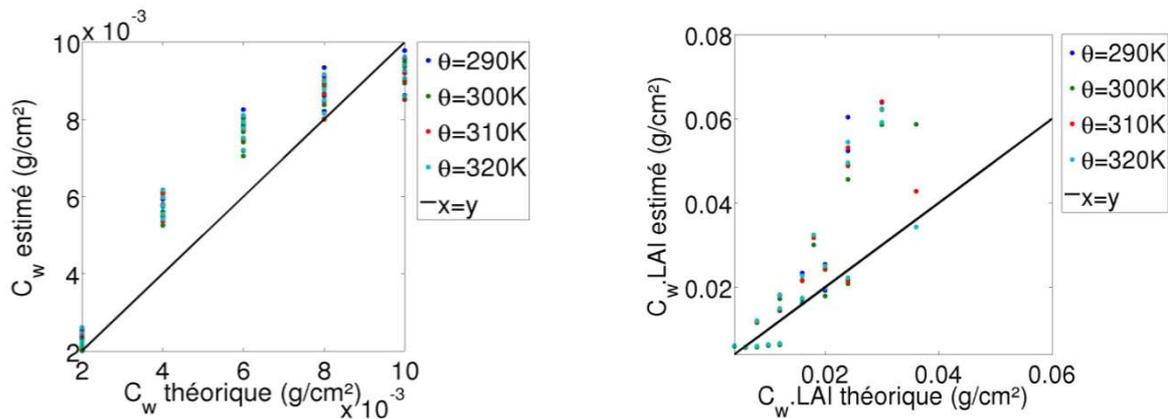


Figure 4.20 : Contenu en eau estimé en fonction du contenu en eau théorique, à l'échelle de la feuille (gauche) et de la canopée (droite).

Les résultats sur l'estimation du contenu en eau foliaire sont très satisfaisants. Le RMSEP de l'ensemble des points est de $0,0012 \text{ g/cm}^2$. Ce RMSEP est de l'ordre de celui obtenu en Section 4.3, sur la base de données d'étalonnage de l'indice, constituée de réflectances bruitées par un bruit gaussien centré d'écart type $0,001$. Compte tenu des résultats de la Section 4.3, la détermination de la réflectance par TRS-MWIR n'a pas introduit d'erreur par rapport à la connaissance d'une réflectance légèrement bruitée. Comme on peut le visualiser sur la Figure 4.20, l'erreur moyenne d'estimation de $0,0012 \text{ g/cm}^2$ est largement attribuable à la sensibilité de l'indice au LAI. Pour un même contenu en eau, une variation de LAI de 2 à 5 entraîne une différence d'estimation du contenu en eau allant de $0,001$ à $0,002 \text{ g/cm}^2$.

A l'échelle de la canopée, le RMSEP moyen est de $1,023 \text{ g/cm}^2$. En supposant une connaissance a priori du contenu en eau, à un ordre de grandeur près, on peut retirer les 28 points pour lesquels le contenu en eau estimé est soit au moins 10 fois supérieur, soit au moins 10 fois inférieur à la valeur théorique, on obtient alors un RMSEP de $0,0148 \text{ g/cm}^2$. Ce RMSEP reste 4 fois plus élevé que ceux obtenus en Section 4.3, à partir de réflectances connues. Ce mauvais résultat peut peut-être s'expliquer par le fait que l'indice a été calibré sur une base de données représentant des LAI variant de 0,5 à 7. Or on observe en Figure 3.13 qu'une variation de LAI de 0,5 à 2 influe très notablement sur la réflectance. Les petites valeurs de LAI (de 0,5 à 2) ont peut-être trop contraint le choix de l'indice spectral, qui est par conséquent moins favorable aux plus fortes valeurs de LAI, ce que l'on visualise sur la Figure 4.20.

La principale source d'erreur pour l'estimation du contenu en eau de la végétation à partir de luminances non bruitées par la chaîne globale réside dans l'indice spectral utilisé.

4.4.3. ERREUR DUE AU BRUIT RADIOMETRIQUE

Les luminances simulées sont dégradées par un bruit gaussien additif de moyenne nulle et d'écart type $0,002 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, ce qui correspond à un niveau de bruit réaliste pour le capteur Hyper-Cam. On obtient alors un RMSEP de $5,928 \text{ g}/\text{cm}^2$ sur le contenu en eau foliaire et un RMSEP de $0,115 \text{ g}/\text{cm}^2$ sur le contenu en eau de la canopée. La Figure 4.21 représente les contenus en eau estimés grâce à la chaîne d'inversion. Plusieurs valeurs, largement supérieures aux valeurs maximales ici représentées, n'apparaissent pas dans cette figure.

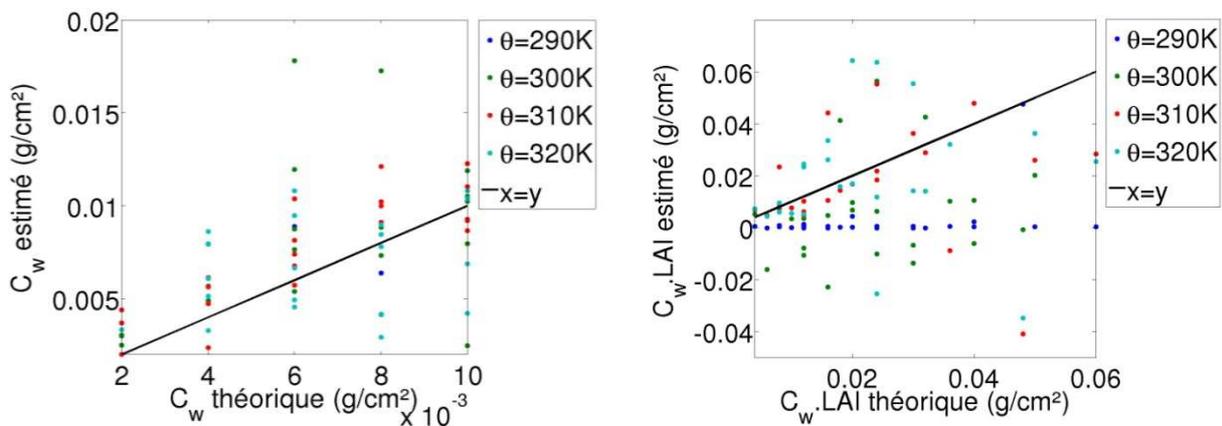


Figure 4.21 : Contenu en eau estimé en fonction du contenu en eau théorique, à l'échelle de la feuille (gauche) et de la canopée (droite).

Des résultats aberrants (contenus en eau supérieurs à 1) sont obtenus pour les scènes simulées avec une température de surface de 290 K. Ceci est en accord avec les observations de l'étude de l'erreur due au bruit dans l'estimation de la réflectance par la méthode TRS-MWIR : la proximité des courbes d'éclairément et d'émission de la surface pour une scène à 290 K dans une atmosphère US1976 est telle que l'algorithme échoue. On remarque aussi une plus forte dépendance de l'estimation du contenu en eau foliaire au LAI.

Pour le contenu en eau foliaire, si l'on retire les 21 points pour lesquels le contenu en eau estimé est soit au moins 10 fois supérieur, soit au moins 10 fois inférieur à la valeur théorique, on obtient alors un RMSEP de $0,0069 \text{ g}/\text{cm}^2$. Le même critère appliqué sur les contenus en eau de la canopée retire 39 points sur 100 et le RMSEP est alors de $0,0164 \text{ g}/\text{cm}^2$. Ces RMSEP sont 3 à 4 fois plus élevés que ceux obtenus en Section 4.3, sur la base de données d'étalonnage des indices, constituée de réflectances bruitées par un bruit gaussien centré d'écart type $0,001$.

En ne considérant que les valeurs estimées suffisamment près des valeurs théoriques (à un facteur 10 près), on constate que l'introduction d'un bruit de $0,002 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ sur une luminance simulée dans les conditions précédemment décrites multiplie par 5 le RMSEP sur l'estimation du contenu en eau foliaire. A l'échelle de la canopée, le RMSEP, déjà élevé, reste équivalent mais

seules 61 scènes sont considérées, contre 72 sans bruit. On retrouve ainsi l'erreur due au bruit radiométrique mentionnée dans l'étude de sensibilité de la méthode TRS-MWIR.

4.4.4. DISCUSSION

Les imprécisions des méthode et indices développés dans ce chapitre se cumulent lors de l'utilisation de la chaîne globale. La plus importante source d'erreur est due à une mauvaise estimation de la réflectance par cette première version de la méthode TRS-MWIR. Il serait intéressant d'évaluer la robustesse de la chaîne globale aux autres sources d'erreurs possibles (e.g. dégradation de la résolution spectrale, méconnaissance de l'atmosphère). On notera cependant qu'en condition optimale d'utilisation de TRS-MWIR, c'est-à-dire quand la température de surface est supérieure à la température de brillance à 5 μm de l'atmosphère, l'estimation du contenu en eau est plutôt encourageante. Sachant que les indices développés ici pour le MWIR visent plutôt à la surveillance de canopées sèches, cette condition sur la température de surface n'est en rien bloquante. On pense par exemple à des acquisitions d'images dans des régions méditerranéennes.

4.5. CONCLUSION

Ce chapitre a présenté des pistes pour l'estimation du contenu en eau de la végétation à partir de mesures de luminance. Les résultats obtenus, tant sur l'estimation de la réflectance que sur la détermination d'indices spectraux, sont très encourageants et ont montré qu'une exploitation de données du domaine MWIR pourrait permettre l'obtention d'informations qualitatives sur le contenu en eau de végétations plutôt sèches. Bien sûr, les nombreuses hypothèses de travail limitent encore à ce jour les applications pratiques de ce travail. Une utilisation conjointe des domaines VNIR-SWIR et MWIR, tant pour contraindre l'estimation de la réflectance que le contenu en eau serait certainement bénéfique. Ce travail n'a été effectué que sur données simulées et l'on note une assez forte dépendance de la chaîne d'inversion au bruit radiométrique. Il serait donc nécessaire de prévoir un pré-traitement des données réelles avec l'application des outils présentés ou de réduire la dépendance au bruit en exploitant par exemple les effets de type C).

CONCLUSION GENERALE

Nous avons étudié dans cette thèse le potentiel du moyen infrarouge (MWIR), de 3 à 5 μm , pour l'estimation du contenu en eau de la végétation par télédétection multi ou hyperspectrale. Nous avons cherché à mettre en relation le contenu en eau de la végétation à ses propriétés optiques, dans le MWIR à plusieurs échelles (feuille, sommet de la canopée, entrée du capteur). Après la collecte d'un jeu de données, un modèle de propriétés optiques des feuilles, PROSPECT-VISIR, a été développé, et des pistes d'inversion du signal ont été proposées : méthode TRS-MWIR pour la séparation température-réflectance et indices spectraux pour l'estimation du contenu en eau de la végétation depuis la réflectance.

Un état de l'art de la télédétection du contenu en eau de la végétation a montré l'existence d'une relation qualitative entre le contenu en eau et les propriétés optiques MWIR de la végétation. Par ailleurs, le domaine MWIR montre un grand potentiel pour la télédétection des couverts végétaux et les données du VNIR-SWIR actuellement utilisées ne permettent pas d'expliquer toutes les caractéristiques biochimiques et structurelles de la canopée. Cependant, dans le domaine MWIR, très peu de données (propriétés optiques et contenu en eau) sont disponibles et aucun modèle de propriété optiques des feuilles n'existait.

Nous avons donc collecté 64 spectres de réflectances et transmittances directionnelles-hémisphériques de feuilles, entre 0,4 et 14 μm , associés à leur contenu en eau et matière sèche. Les données collectées montrent une variation des réflectances et transmittances MWIR avec le contenu en eau foliaire, et une saturation de ces grandeurs pour des contenus en eau supérieurs à 0,01 g/cm² (canopées fraîches). On retient aussi que la transmittance des feuilles au delà de 2,5 μm n'est pas systématiquement nulle, ce qui peut entraîner des valeurs d'émissivité aussi faibles que 0,89 dans le TIR pour des feuilles sèches.

Grâce à ces données, le modèle de propriétés optiques de feuilles PROSPECT-VISIR, extension du modèle PROSPECT jusqu'à 5,7 μm , a été développé. Le modèle initial a été modifié par l'introduction d'une couche de surface et l'utilisation des coefficients de Fresnel complexes. En outre, ce travail a montré les limites des modèles physiques type « plate model » pour la simulation de propriétés optiques dans l'infrarouge, au-delà du MWIR.

Couplé au modèle de canopée 4SAIL et au code de transfert radiatif atmosphérique MODTRAN, PROSPECT-VISIR a permis la simulation de réflectances au sommet de la canopée et de luminances en entrée du capteur. Ainsi, les propriétés optiques de la végétation peuvent dorénavant être simulées dans le MWIR, à toute échelle, en fonction de la structure et la biochimie de la végétation. Les propriétés optiques de la végétation, à l'échelle de la canopée ou au niveau du capteur, saturent pour les contenus en eau foliaire élevés, tout comme les propriétés optiques des feuilles. Le domaine MWIR semble donc d'avantage adapté à l'étude des couverts plutôt secs, comme pour l'étude des risques de feux, de sécheresse, etc. Compte tenu des

caractéristiques des capteurs actuels, il semble possible de détecter le signal de l'eau dans la végétation depuis un capteur aéroporté (pour des altitudes de l'ordre du kilomètre). Mais les variations de signal entre une canopée fraîche et une canopée sèche restent très faibles, de l'ordre de celles induites par une variation de la température de surface de 0,5 K seulement.

L'utilisation en mode inverse de la chaîne de modèles, pour estimer le contenu en eau de la végétation depuis une luminance en entrée du capteur, et les hypothèses qui la conditionne, confirment que l'accès à la biochimie de la végétation depuis le MWIR dépend encore étroitement de la connaissance du reste de l'environnement. Cependant, l'étude de sensibilité des méthodes à ces paramètres montre que les pistes suggérées restent prometteuses. La méthode TRS-MWIR d'estimation conjointe des température et réflectance d'une scène dans le MWIR est en effet une voie originale qui ouvre des perspectives quant à l'exploitation des données MWIR multi ou hyperspectrales. On constate aussi que la détermination du contenu en eau d'une canopée (ou d'une feuille au sein de cette canopée) depuis sa réflectance par indices spectraux est gênée par d'autres paramètres biochimiques ou structuraux (LAI), tout comme lors de l'utilisation de données du VNIR-SWIR.

Plusieurs points doivent être améliorés, en mode direct comme en mode inverse. En mode direct, une base de données plus étendue pour le calibrage de PROSPECT-VISIR améliorerait ce dernier. Des mesures à l'échelle de la canopée seraient aussi souhaitables pour confronter les simulations issues de la chaîne de modèles à des données réelles. L'utilisation d'un modèle de canopée reflétant mieux l'hétérogénéité de celle-ci est à envisager.

En mode inverse, une étude doit être conduite pour l'utilisation conjointe des domaines VNIR-SWIR et MWIR, aussi bien pour l'estimation de la réflectance que pour l'estimation du contenu en eau de la végétation. Les fortes hypothèses (connaissances des profils atmosphériques) de travail doivent aussi être levées.

Aussi, les perspectives de développement sont nombreuses pour l'estimation conjointe des réflectance et température de surface dans le MWIR grâce à des capteurs multispectraux ou hyperspectraux. Plusieurs éléments devraient être pris en compte dans l'algorithme (sur ou sous-estimation de la réflectance autour de la zone de divergence, réflectances négatives) et une estimation des paramètres atmosphériques depuis l'image en luminance peut aussi être envisagée. Le choix des longueurs d'onde de travail devrait également être adaptable pour élargir le domaine d'application de la méthode. L'aboutissement du développement de cette méthode ouvrirait la voie à de nombreuses études, basées sur ces données MWIR, comme la gestion des risques et la détection précoce des feux, mais aussi pour d'autres domaines d'études que la végétation.

Enfin, les nouvelles connaissances apportées sur les propriétés optiques de la végétation dans le MWIR-TIR feront gagner en précision l'ensemble des études géophysiques et climatologiques qui ont besoin de s'affranchir de l'impact de la végétation sur le signal enregistré par un capteur de

téledétection. Une étude poussée des émissivités spectrales des canopées est pour cela encore nécessaire.

ANNEXE 1

CAPTEURS

Tableau A1.1 : Capteurs multi ou hyperspectraux ayant des bandes dans le MWIR. n.c. : non communiqué.

Capteur	Organisation	Date	Type (aéroporté ou satellitaire)	Couverture spectrale (μm)	Nombre de bandes			Caractéristiques MWIR	
					VNIR- SWIR	MWIR	TIR	Résolution spectrale	Résolution radiométrique ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu\text{m})$)
AHS	Argon St	2003	Aéro.	0,43 - 12,7	63	7	10	300 nm	$\sim 0,01$ à $5 \mu\text{m}$
Hyper- Cam	Telops	2005	Aéro.	3 - 5	-	Fonction de la rés. spectrale	-	De 0,6 à 300 nm. Notre choix : 40 nm.	$\sim 0,002$ à $5 \mu\text{m}$
SPIM	Atis	2001	Aéro.	3 - 5,3	-	Fonction de la rés. spectrale	-	De 12 à 50 nm	n.c.
SEBASS	The Aerospace Corporation	1993	Aéro.	3 - 5 7,5 - 13,5	-	128	128	n.c.	n.c.
AIRS	NASA	2002	Sat.	0,4 - 1 3,75 - 15,4	4	2378	2378	n.c.	n.c.
MODIS	NASA	1999	Sat.	0,4 - 14,4	20	6	10	n.c.	n.c.
MVIRS	China	2002	Sat.	0,47 - 12,5	20	20	20	n.c.	n.c.

ANNEXE 2

VARIATIONS DE LA REFLECTANCE ESTIMEE SELON LA TEMPERATURE DE LA SCENE ESTIMEE

Si la température d'une scène est mal estimée, la réflectance MWIR modélisée diverge autour de λ_d , longueur d'onde où s'inverse la proportion de signal réfléchi $\frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}(\lambda)}{\pi}$ par rapport au signal émis $L_{CN}(\lambda, \theta)$. Autour de λ_d la réflectance est sur ou sous estimée en fonction de la valeur de la température estimée θ_{est} et de la longueur d'onde.

Divergence en λ_d

On a

$$L^{Capteur}(\lambda) = L^\uparrow(\lambda) + \frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}(\lambda)}{\pi} \rho_{th}(\lambda) T^\uparrow(\lambda) + (1 - \rho_{th}(\lambda)) L_{CN}(\lambda, \theta_{th}) T^\uparrow(\lambda) \quad (A.1)$$

où ρ_{th} et θ_{th} sont respectivement la réflectance et la température théoriques. De la même façon,

$$L^{Capteur_est}(\lambda) = L^\uparrow(\lambda) + \frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}(\lambda)}{\pi} \rho_{est}(\lambda) T^\uparrow(\lambda) + (1 - \rho_{est}(\lambda)) L_{CN}(\lambda, \theta_{est}) T^\uparrow(\lambda) \quad (A.2)$$

où $L^{Capteur_est}$, ρ_{est} et θ_{est} sont respectivement la luminance, la réflectance et la température estimées. On cherche le couple $(\rho_{est}, \theta_{est})$ qui permet de reconstruire la luminance en entrée du capteur, soit $L^{Capteur_est} = L^{Capteur}$. En terme de réflectance, cette égalité se traduit par

$$\rho_{est}(\lambda) = \frac{\frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}(\lambda)}{\pi} - L_{CN}(\lambda, \theta_{th})}{\frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}(\lambda)}{\pi} - L_{CN}(\lambda, \theta_{est})} \rho_{th}(\lambda) + \frac{L_{CN}(\lambda, \theta_{th}) - L_{CN}(\lambda, \theta_{est})}{\frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}(\lambda)}{\pi} - L_{CN}(\lambda, \theta_{est})}. \quad (A.3)$$

Si $\theta_{est} = \theta_{th}$, c'est-à-dire si $L_{CN}(\lambda, \theta_{est}) = L_{CN}(\lambda, \theta_{th})$, on retrouve $\rho_{est}(\lambda) = \rho_{th}(\lambda)$. La loi de Planck $L_{CN}(\lambda, \theta)$ étant croissante et continue, cette solution est unique. Si $\theta_{est} \neq \theta_{th}$, alors le terme de droite ne s'annule pas et comme par définition à $\lambda = \lambda_d$, $L_{CN}(\lambda_d, \theta_{est}) = \frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}(\lambda_d)}{\pi}$, il y a une division par zéro et $\rho_{est}(\lambda_d)$ tend vers $\pm\infty$ à cette longueur d'onde, selon le signe de $L_{CN}(\lambda_d, \theta_{th}) - L_{CN}(\lambda_d, \theta_{est})$.

Sur ou sous-estimation de la réflectance autour de λ_d

Par la suite, dans un soucis de lisibilité, la dépendance à la longueur d'onde, bien qu'effective, n'est pas rappelée dans la notation. L'Equation 4.2 de la réflectance est de la forme

$$\rho = \frac{A-X}{B-X} \quad (\text{A.4})$$

où

$$X = L_{CN}(\theta_{est}),$$

$$A = \frac{L_{\text{Capteur}} - L^\uparrow}{T^\uparrow}, \text{ soit } A = \frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}}{\pi} \rho + (1 - \rho)L_{CN}(\theta_{th}), \text{ et}$$

$$B = \frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}}{\pi}.$$

Pour comprendre les variations de ρ avec θ_{est} , on calcule $\frac{d\rho}{dX}$:

$$\frac{d\rho}{dX} = \frac{A-B}{(B-X)^2}. \quad (\text{A.5})$$

L'Equation A.2 montre que la dérivée de la réflectance varie en fonction du signe de $A - B$, avec

$$A - B = \frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}}{\pi} \rho + (1 - \rho)L_{CN}(\theta_{th}) - \frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}}{\pi}, \text{ soit}$$

$$A - B = (1 - \rho) \left[L_{CN}(\theta_{th}) - \frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}}{\pi} \right].$$

Le Tableau A2.1 présente les variations de ρ en fonction du signe de $A - B$.

Tableau A2.1: étude des variations de ρ avec θ_{est} en fonction de la prédominance de $L_{CN}(\theta_{th})$ sur $\frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}}{\pi}$.

Signe de $A - B$	Variation de ρ	Exemple
$A - B < 0 \leftrightarrow L_{CN}(\theta_{th}) < \frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}}{\pi}$	$-\frac{1}{(B-X)^2}$	θ surestimée $\rightarrow \rho$ sous-estimée
$A - B = 0 \leftrightarrow L_{CN}(\theta_{th}) = \frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}}{\pi}$	—	—
$A - B > 0 \leftrightarrow L_{CN}(\theta_{th}) > \frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}}{\pi}$	$+\frac{1}{(B-X)^2}$	θ surestimée $\rightarrow \rho$ surestimée

Lorsque $B = X$, i.e. $\frac{E_{Sc,Th}^{Sfc}}{\pi} = L_{CN}(\theta_{est})$ à $\lambda = \lambda_d$, la dérivée $\frac{d\rho}{dX}$ tend vers l'infini.

REFERENCES

- Akkermans E. et Montambaux G. (2004). *Physique mésoscopique des photons et des électrons*. EDP sciences, CNRS éd., 628 pp.
- Allard J. P., Chamberland M., Farley V., Marcotte F., Rolland M., Vallières A. et al. (2008). Airborne measurements in the longwave infrared using an imaging hyperspectral sensor. In *Proc. SPIE Conference on Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*, Vol. 7014, 12 pp.
- Allen W. A., Gausman H. W., Richardsoon A. J. et Thomas J. R. (1969). Interaction of isotropic light with a compact plant leaf. *Journal of the Optical Society of America*, 59, 1376-1379.
- Allen W. A., Gausman H. W. et Richardsoon A. J. (1970). Mean effective optical constants of cotton leaves. *Journal of the Optical Society of America*, 60, 542-547.
- Bacour C. (2001). *Contribution à la détermination des paramètres biophysiques des couverts végétaux par inversion de modèles de réflectance : analyses de sensibilité comparatives et configurations optimales*. Thèse de doctorat, Spécialité Méthodes physiques en télédétection, Université Paris Diderot, 206 pp.
- Baranoski G.V.G. et Rokne J.G. (2001). Efficiently simulating scattering of light by leaves. *Visual Computer*, 17(8), 491-505.
- Bear J. (2007). *Hydraulics of Groundwater*. Dover Publications, 592 pp.
- Berthier S. (1993). *Optique des milieux composites*. Polytechnica, 300 pp.
- Borel C.C. (2003). ARTEMISS – an Algorithm to Retrieve Temperature and Emissivity from Hyper-Spectral Thermal Image Data. *28th Annual GOMACTech Conference*, 2003, Tampa, Florida.
- Borel C.C. (2008). Error analysis for a temperature and emissivity retrieval algorithm for hyperspectral imaging data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(17-18), 5029-5045.
- Bousquet L., Lachérade S., Jacquemoud S. et Moya I. (2005). Leaf BRDF measurements and model for specular and diffuse components differentiation. *Remote Sensing of Environment*, 98(2-3), 201-211.
- Bousquet L. (2007). *Mesure et modélisation des propriétés optiques spectrales et directionnelles des feuilles*. Thèse de doctorat, Spécialité Méthodes physiques en télédétection, Université Paris Diderot, 203 pp.

- Boyd D.S. et Curran P.J. (1998). Using remote sensing to reduce uncertainties in the global carbon budget : The potential of radiation acquired in middle infrared wavelengths. *Remote Sensing Reviews*, 16(4), 293-327.
- Boyd D.S., Wicks T.E. et Curran J.P. (2000). Use of middle infrared radiation to estimate leaf area index of a boreal forest. *Tree Physiology*, 20, 755-760.
- Boyd D.S., Philipps P.C., Foody G.M. et Walsh R.P.D. (2002). Exploring the utility of NOAA AVHRR middle infrared reflectance to monitor the impacts of ENSO-induced drought stress on Sabah rainforests. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 5141-5147.
- Boyd D. S. et Petitcolin F. (2004). Remote sensing of the terrestrial environment using middle infrared radiation (3.0-5.0 μm). *International Journal of Remote Sensing*, 25, 3343-3368.
- Brown H. T. et Escombe F. (1905). Researches on some of the physiological processes of green leaves, with special reference to the interchange of energy between the leaf and its surroundings. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, 76, 29-111.
- Bunnik N. J. J. (1981). *The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties*. H. Veenman et Zonen B. V., Wageningen, The Netherlands, 175 pp.
- Ceccato P., Gobron N., Flasse S., Pinty B. et Tarantola S. (2002). Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1, Theoretical approach. *Remote Sensing of Environment*, 82, 188-197.
- Chahine M. T., Pagano T. S., Aumann H. H., Atlas R., Barnett C., Blaisdell J. et al. (2006). AIRS: Improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87, 911-926.
- Champagne C. M., Staenz K., Bannari A., McNairn H. et Deguise J. C. (2003). Validation of a hyperspectral curve-fitting model for the estimation of plant water content of agricultural canopies. *Remote Sensing of Environment*, 87, 148-160.
- Chandrasekhar S. (1960). *Radiative transfer*. Dover Publications Inc., 393 pp.
- Cheng J., Liang S., Wang J. et Li X. (2010). A stepwise refining algorithm of temperature and emissivity separation for hyperspectral thermal infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(3), 1588-1597.
- Cheng J., Liang S., Liu Q. et Li X. (2011). Temperature and emissivity separation from ground-based MIR hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(4), 1473-1484.

- Cohen W. B. (1991). Temporal versus spatial variation in leaf reflectance under changing water-stress conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 1865-1876.
- Colombo R., Meroni M., Marchesi A., Busetto L., Rossini M. et al. (2008). Estimation of leaf and canopy water content in poplar plantations by means of hyperspectral indices and inverse modeling. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1820-1834.
- Dalimova G. N. et Kristallovich E. L. (1999). Functional composition and IR spectra of cottonseed husk hydrolysis lignin and its derivatives. *Chemistry of Natural Compounds*, 35, 353-357.
- Dawson T. P., Curran P. J., North P. R. J. et Plummer S. E. (1999). The propagation of foliar biochemical absorption features in forest canopy reflectance: a theoretical analysis. *Remote Sensing of Environment*, 67, 147-159.
- DeWitt D. P. et Nutter G. D. (1988). *Theory and practice of radiation thermometry*. John Wiley et Sons, Inc., 1138 pp.
- Elvidge C. D. (1988). Thermal infrared reflectance of dry plant materials: 2.5 - 20 μm . *Remote Sensing of Environment*, 26, 265-285.
- Fabre S., Lesaignoux A., Olioso A. et Briottet X. (2010). Influence of water content on spectral reflectance of leaves in the 3 - 15 μm domain. *Geophysical Research Letters*, in press.
- Farineau J. et Morot-Gaudry J.-F. (2011). *La photosynthèse : Processus physiques, moléculaires et physiologiques*. Editions Quae, Synthèses, 412 pp.
- Féret J. B., François C., Asner G. P., Gitelson A. A., Martin R. E., Bidet L. P. R. et al. (2008). PROSPECT-4 and 5: advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3030-3043.
- Féret J.B. (2009). *Apport de la modélisation pour l'estimation de la teneur en pigments foliaires par télédétection*. Thèse de doctorat, Spécialité Mesures physiques en télédétection, Université Pierre et Marie Curie, 214 pp.
- Foken T. (2008). *Micrometeorology*. Springer, 308 pp.
- Fourty T. et Baret F. (1998). On spectral estimates of fresh leaf biochemistry. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 1283-1297.
- Fried J.J. (1975). *Groundwater pollution : theory, methodology, modelling, and practical rules*. Developments in water science, Elsevier Scientific Pub. Co., 330 pp.
- Ganapol B.D., Johnson L.F., Hammer P.D., Hlavka C.A. et Peterson D.L. (1998). LEAFMOD: a new within-leaf radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment*, 63(2), 182-193.

- Gastellu-Etchegorry J.P., Demarez V., Pinel V. et Zagolski F. (1996). Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment*, 58, 131-156.
- Gates D. M. et Tantraporn W. (1952). The reflectivity of deciduous trees and herbaceous plants in the infrared to 25 microns. *Science*, 115, 613-616.
- Gates D.M. (2003). *Biophysical ecology*. Dover, 611 pp.
- Gao B. C. et Goetz A. F. H. (1990). Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging spectrometer data. *Journal of Geophysical Research*, 95, 3549-3564.
- Gao B. C. et Goetz A. F. H. (1995). Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 52, 155-162.
- Gao B. C. (1996). NDWI, a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266.
- Gausman H. W., Allen W. A., Cardenas R. et Richardson A. J. (1970). Relation of light reflectance to histological and physical evaluations of cotton leaf maturity. *Applied Optics*, 9, 545-552.
- Geisser S. (1975). The predictive sample reuse method with applications. *Journal of the American Statistical Association*, 70, 320-328.
- Gerber F., Marion R., Olioso A., Jacquemoud S., Ribeiro da Luz B. et al. (2011). Modeling directional-hemispherical reflectance and transmittance of fresh and dry leaves from 0.4 μm to 5.7 μm with the PROSPECT-VISIR model. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 401-414.
- Govaerts Y.M., Jacquemoud S., Verstraete M.M et Ustin S.L. (1996). Three-dimensional radiation transfer modeling in a dicotyledon leaf. *Applied Optics*, 35(33), 6585-6598.
- Gruninger J. H., Robertson D. C. et Pervaiz M. M. (1992). *Data analysis for bark and leaf reflectance measurements*. Smart Weapons Operability Enhancement, June 1992, SWOE Report 92-6, 52 pp.
- Hagmann D. R. et Hummel R. E. (1996). Characterization of multilayer thin film structures by differential reflection spectroscopy. *Materials Research Bulletin*, 31, 1449-1461.
- Hadria R., Olioso A., Duchemin B., Ruget F., Weiss M. et al. (2010). Utilisation conjointe du modèle STICS et de données de télédétection optique pour la détermination des pratiques culturales (semis, apports d'azote) en régions méditerranéennes. *Télédétection*, 9(2), 82-96.
- Hale G. M. et Kerry M. R. (1973). Optical constants of water in the 200-nm to 200- μm wavelength region. *Applied Optics*, 12, 555-562.

- Hapke B. (1993). *Theory of reflectance and emittance spectroscopy*. Cambridge University Press, 455 pp.
- Hardinsky M.A., Lemas V. et Smart R.M. (1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alternifolia* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 77-83.
- Holt A. S. et Jacobs E. E. (1955). Infra-red absorption spectra of chlorophylls and derivatives. *Plant Physiology*, 30, 553-559.
- Hunt E. R. et Rock B. N. (1989). Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 30, 43-54.
- Jacquemoud S. et Baret F. (1990). PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34, 75-91.
- Jacquemoud S. (1992). *Utilisation de la haute résolution spectrale pour l'étude des couverts végétaux: développement d'un modèle de réflectance spectrale*. Thèse de doctorat, Spécialité Méthodes physiques en télédétection, Université Paris VII, 93 pp.
- Jacquemoud S., Baret F., Andrieu B., Danson F.M. et Jaggard K. (1995). Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT+SAIL model on sugar beet canopy reflectance data - Application to TM and AVIRIS sensors. *Remote Sensing of Environment*, 52, 163-172.
- Jacquemoud S., Ustin S.L., Verdebout J., Schmuck G., Andreoli G. et Hosgood B. (1996). Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sensing of Environment*, 56, 194-202.
- Jacquemoud S. et Ustin S.L. (2009). Modeling leaf optical properties. *Photobiological Sciences Online*, Stanford University School of Medicine.
- Jacquemoud S., Verhoef W., Baret F., Bacour C., Zarco-Tejada P. J., Asner G. P. et al. (2009). PROSPECT + SAIL models: a review of use for vegetation characterization, *Remote Sensing of Environment*, 112, 56-66.
- Kanani K. (2005). *Utilisation de la très haute résolution spectrale pour la mesure en environnement extérieur de l'émissivité de surface dans la bande infrarouge 3-13 μm – Méthodes et validation expérimentale*. Thèse de doctorat, Spécialité Télédétection, Université Strasbourg I, 166 pp.
- Kaufman Y.J. et Remer L.A. (1994). Detection of forests using MID-IR reflectance : An application for aerosol studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32, 672-683.

- Kirkland L., Herr K., Keim E., Adams P., Salisbury J. W., Hackwell J. et al. (2002). First use of an airborne thermal infrared hyperspectral scanner for compositional mapping. *Remote Sensing of Environment*, 80, 447-459.
- Kneizys F. X., Abreu L. W., Anderson G. P., Chetwynd J. H., Shettle E. P. et al. (1996). *The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 MODEL*. Prepared by Ontar Corporation for PL/GPOS, Technical Report.
- Kondo T. (1997). The assignment of IR absorption bands due to free hydroxyl groups in cellulose. *Cellulose*, 4, 281-292.
- Kortüm G. et Vogel J. (1958). Über reguläre und diffuse Reflexion an Pulvern und ihre Abhängigkeit von der Korngrösse. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 18, 230-241.
- Kortüm G. et Oelkrug D. (1964). Über den Steuoeffizienten der Kubelka-Munk Theorie. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 19, 28-37.
- Kötz B., Schaepman M., Morsdorf F., Itten K. et Allgöwer B. (2004). Radiative transfer modeling within a heterogeneous canopy for estimation of forest fire fuel properties. *Remote Sensing of Environment*, 92, 332-344.
- Kubelka P. et Munk F. (1931). Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche. *Zeitschrift für Technische Physik*, 12, 593-601.
- Laporte N., Justice C. et Kendall J. (1995). Mapping the dense humid forest of Cameroon and Zaire using AVHRR satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 1127-1145.
- Lesaignoux A. (2010). *Estimation de l'humidité de surface des sols nus à partir de l'imagerie hyperspectrale à haute résolution spatiale sur le domaine optique 0,4 - 5,7 μ m*. Thèse de doctorat, Spécialité Génie Electrique, électronique et communication, Université de Toulouse.
- Li Z.L, et Becker F. (1993). Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from NOAA/AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 43, 1-20.
- Lucey P. G., Williams T. J., Mignard M., Julian J., Kobubun D., Allen G. et al. (1998). AHI: an airborne long-wave infrared hyperspectral imager. In *Proc. SPIE Conference on Airborne Reconnaissance*, San Diego (CA), 3431, 36-43.
- Mc Guire M.J., Smith J.A., Balick L.K. et Hutchinson B.A. (1986). Modelling directional thermal radiance from a forest canopy. *Remote Sensing of Environment*, 27, 169-186.
- Maier S.W., Lüdeker W. et Günther K.P. (1999). SLOP : a revised version of the Stochastic model for Leaf Optical Properties. *Remote Sensing of Environment*, 68, 273-280.
- Meyzonnette J.L. et Lépine T. (2003). *Bases de la radiométrie optique*. Cépaduès-Editions, 252 pp.

- Mie G. (1908). Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annals of Physics*, 25, 377-445.
- Miller J. R., Steven M. D. et Demetriades-shah T. H. (1992). Reflection of layered bean leaves over different soil backgrounds: measured and simulated spectra. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 3273-3286.
- Moreno O., Oertel D., Zhukov B., Conradt M. et Munoz A. (2006). BIRD flies over Colombia : A short mission of earth observation. *Aerospace Science and Technology*, 10(2), 144-148.
- Muschkin A., Balick L.K. et Gillespie A.R. (2005). Extending surface temperature and emissivity retrieval to the mid-infrared (3-5 μm) using the Multispectral Thermal Imager (MTI). *Remote Sensing of Environment*, 98, 141-151.
- Myneni R.B, Hall F.G, Sellers P.J et Marshak A.L. (1995). The meaning of spectral vegetation indices. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 33, 481-486.
- Narayanan R. M., Green S. E. et Alexander D. R. (1991). Mid-infrared backscatter spectra of selected agricultural crops. In *Proc. SPIE Conference on Optics in Agriculture*, Boston (MA), 1379, 116-122.
- Nerry F., Petitcolin F. et Stoll M.-P. (1998). Bidirectional reflectivity in AVHRR channel 3 : application to a region in northern Africa. *Remote Sensing of Environment*, 66, 298-316.
- Oliosio A. (1995). Estimating the difference between brightness and surface temperatures for a vegetal canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72, 237-242.
- Oliosio A., Sòria G., Sobrino J. et Duchemin B. (2007). Evidence of low land surface thermal infrared emissivity in the presence of dry vegetation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4, 112-116.
- Otterman J. et Weiss G.H. (1984). Reflection from a field of randomly located vertical protrusions. *Applied Optics*, 23, 1931-1936.
- Peñuelas J., Filella I., Biel C., Serranà L. et Save R. (1993). The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1887-1905.
- Peñuelas J., Gamon J. A., Fredeen A. L., Merino J. et Field C. B. (1994). Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 48, 135-146.
- Petitcolin F. et Vermote E. (2002). Land surface reflectance, emissivity and temperature from MODIS middle and thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 83, 112-134.

- Pinzon J. E., Ustin S. L., Canstenada C. M. et Smith M. O. (1998). Investigation of leaf biochemistry by hierarchical foreground/background analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1-15.
- Reeves III J. B., McCarty G., Rutherford D. W. et Wershaw R. L. (2008). Mid-infrared diffuse reflectance spectroscopic examination of charred pine wood, bark, cellulose, and lignin: implications for the quantitative determination of charcoal in soils. *Applied Spectroscopy*, 62, 182-189.
- Ribeiro da Luz B. (2005). *Propriedades espectrais das plantas no infravermelho termal (2,5 - 14 μm) da química ao dossel*. PhD dissertation. São Paulo: Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, 188 pp .
- Ribeiro da Luz B. (2006). Attenuated total reflectance spectroscopy of plant leaves: a tool for ecological and botanical studies. *New Phytologist*, 172, 305-318.
- Ribeiro da Luz B. et Crowley J. (2007). Spectral reflectance and emissivity features of broad leaf plants: prospects for remote sensing in the thermal infrared (8-14 μm). *Remote Sensing of Environment*, 109, 393-405.
- Ribeiro da Luz B. et Crowley J. (2010). Identification of plant species by using high spatial and spectral resolution thermal infrared (8.0-13.5 μm) imagery. *Remote Sensing of Environment*, 114, 404-413.
- Riederer M. et Müller C. (Eds) (2006). *Biology of the plant cuticle (Annual Plant Reviews)*. Wiley-Blackwell, 456 pp.
- Riggs G. A. et Running S. W. (1991). Detection of canopy water stress in conifers using the airborne imaging spectrometer. *Remote Sensing of Environment*, 35, 51-68.
- Roberts D. A., Brown K. J., Green R., Ustin S. L. et Hinckley T. (1998). Investigating the relationship between liquid water and leaf area in clonal populus. *Proc. 7th AVIRIS Earth Science Workshop JPL 97-21*, Pasadena, CA 91109, 10 pp.
- Roger J.C. et Vermote E.F. (1998). A method to retrieve the reflectivity signature at 3.75 μm from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 64, 103-114.
- Ross J. (1981). *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Kluwer Academic Publishers, 420 pp.
- Rothman L. S., Rinsland C. P., Goldman A., Massie S. T., Edwards D. P. et al. (1998). The HITRAN molecular spectroscopic database and hawks (HITRAN atmospheric workstation) : 1996 edition. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfert*, 60(5), 665-710.

- Salisbury J. W. (1986). Preliminary measurements of leaf spectral reflectance in the 8-14 μm region. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1879-1886.
- Salisbury J. W. et Milton N. M. (1988). Thermal infrared (2.5 to 13.5 μm) directional hemispherical reflectance of leaves. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1301-1304.
- Salisbury J. W., Wald A. et D'Aria D. M. (1994). Thermal infrared remote sensing and Kirchhoff's law - 1. Laboratory measurements. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 99, 11,897-11,911.
- Sanderson E. W., Zhang M., Ustin S. L. et Rejmankova E. (1998). Geostatistical scaling of canopy water content in a California salt marsh. *Landscape Ecology*, 13, 79-82.
- Schaepman-Strub G., Schaepman M. E., Painter T. H., Dangel S. et Martonchik J. V. (2006). Reflectance quantities in optical remote sensing - definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment*, 103, 27-42.
- Schlücker S., Szeghalmi A., Schmitt M., Popp J. et Kiefer W. (2003). Density functional and vibrational spectroscopic analysis of b-carotene. *Journal of Raman Spectroscopy*, 34, 413-419.
- Segelstein D.J. (1981). *The complex refractive index of water*. M.S. Thesis. University of Missouri, Kansas City, Missouri.
- Serrano L., Ustin S. L., Roberts D. A., Gamon J. A. et Peñuelas J. (2000). Deriving water content of chaparral vegetation from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 74, 570-581.
- Siméoni D., Singer C. et Chalon G. (1999). Infrared atmospheric sounding interferometer. *Acta Astronautica*, 40, 113-118.
- Sims D. A. et Gamon J. A. (2003). Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: A comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment*, 84, 526-537.
- Sobrino J. A., Jimenez-Munoz J. C., Zarco-Tejada P. J., Sepulcre-Canto G. et De Miguel E. (2006). Land surface temperature derived from airborne hyperspectral scanner thermal infrared data. *Remote sensing of environment*, 102, 99-115.
- Spitzer W.G. et Kleinman D.A. (1961). Infrared lattice bands of quartz. *Physical Review*, 121, 110-117.
- Stephenson-Hawk D., Stevens K. et Shah A. (1997). Determination of the Earth's emissivity for use in studies of global climate change. *Geoscience and Remote Sensing, IGARSS'97, Remote Sensing – A Scientific Vision for Sustainable Development, IEEE International*, 1, 180-183.

- Stokes G.G. (1862). On the intensity of the light reflected from or transmitted through a pile of plates. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, 11, 545-556.
- Stone M. (1974). Cross-validators choice and assessment of statistical predictions. *Journal of the Royal Statistical Society (Series B)*, 36, 111-147.
- Strachan I. B., Pattey E. et Boisvert J. B. (2002). Impact of nitrogen and environmental conditions on corn as detected by hyperspectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 80, 213-224.
- Terashima I., Fujita T., Inoue T., Chow W. S. et Oguchi R. (2009), Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green. *Plant et Cell Physiology*, 50, 684-697.
- Toomey M. P. et Vierling L. A. (2006). Estimating equivalent water thickness in a conifer forest using Landsat TM and ASTER data: A comparison study. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32, 288-299.
- Turner N.C. (1981). Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant and Soil*, 58(1-3),339-366.
- Ustin S.L., Roberts D.A., Pinzón J., Jacquemoud S., Gardner M., Scheer G. C. et al. (1998). Estimating canopy water content of chaparral shrubs using optical methods. *Remote Sensing of Environment*, 65, 280-291.
- Verhoef W. (1984). Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16, 125-141.
- Verhoef W. (1998). Theory of radiative transfer models applied in optical remote sensing of vegetation canopies. PhD Thesis, Wageningen Agricultural University, 310 pp.
- Verhoef W., Jia L., Xiao Q. et Su Z. (2007). Unified optical-thermal four-stream radiative transfer theory for homogeneous vegetation canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, 1808-1822.
- Vigneau N. (2010). *Potentiel de l'imagerie hyperspectrale de proximité comme outil de phénotypage : application à la concentration en azote du blé*. Thèse de doctorat, Spécialité Statistique et analyse de données, Agronomie, SupAgro Montpellier.
- Vincent K. V. et Hunt R. H. (1968). Infrared reflectance from mat surfaces. *Applied Optics*, 7, 53-59.
- Warner T.A., Nellis M.D. et Foody G.M. (2009). *The handbook of remote sensing*. SAGE publications Ltd. 568 pp.
- Wieliczka D. M., Weng S. et Querry M. R. (1989). Wedge shaped cell for highly absorbent liquids: Infrared optical constants of water. *Applied Optics*, 28, 1714-1719.

-
- Windt D. L. (1998). IMD-Software for modeling the optical properties of multilayer films. *Computers in Physics*, 12, 360-370.
- de Wit C.T. (1965). *Photosynthesis of leaf canopies*. Agr. Res. Report 663, Centre for Agricultural Publications and documentation (PUDOC), Wageningen.
- Wong C. L. et Blevin W. R. (1967). Infrared reflectances of plant leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 20, 501-508.
- Wooster M.J., Patterson G. et Haigh J. (1994). Tropical lake surface temperature from locally received NOAA-11 AVHRR data-comparison with *in-situ* measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 183-189.
- Zarco-Tejada P. J., Rueda C. A. et Ustin S. L. (2003). Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment*, 85, 109-124.
- Zdunkowski W., Trautmann T. et Bott A. (2007). *Radiation in the atmosphere. A course in theoretical meteorology*. Cambridge University Press. 498 pp.