



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par **l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace**
Spécialité : Télédétection

Présentée et soutenue par **Audrey LESAIGNOUX**
le 16 décembre 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 – 14 μm**

JURY

M. Stéphane Jacquemoud, président, rapporteur
M. Xavier Briottet, directeur de thèse
Mme Sophie Fabre, co-directrice de thèse
M. Frédéric Jacob
M. Jean-Pierre Lagouarde, rapporteur
M. Albert Olios

École doctorale : **Génie électrique, électronique, télécommunications**

Unité de recherche : **Équipe d'accueil ISAE-ONERA OLIMPES**

Directeur de thèse : **M. Xavier Briottet**
Co-directrice de thèse : **Mme Sophie Fabre**

“That's one small step for a man, one giant leap for mankind.”
“C'est un petit pas pour l'homme, mais un bond de géant pour l'humanité.”
- Neil Armstrong -

Remerciements

Je tiens à remercier ici les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail de thèse durant ces trois années.

En premier lieu, je tiens à remercier Xavier Briottet d'avoir dirigé cette thèse. Son aide précieuse m'a été indispensable sur le plan scientifique et je lui suis reconnaissante de la confiance et sympathie qu'il m'a témoignées.

Je tiens également à remercier Sophie Fabre, dont l'aide sur le plan technique et les grandes qualités humaines ont permis de mener à bout cette thèse. Son soutien s'est avéré déterminant pour mener ce travail à terme.

Merci à Albert Oliso pour son implication, malgré la distance géographique, et pour ses nombreuses idées.

Je tiens à exprimer à présent mes remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer mon travail de thèse. Un grand merci à Stéphane Jacquemoud et à Jean-Pierre Lagouarde d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce manuscrit. Leurs remarques et suggestions lors de la lecture de mon rapport m'ont permis d'apporter des améliorations à la qualité de ce dernier. Merci également à Frédéric Jacob pour avoir accepté de faire partie du jury et pour son enthousiasme.

J'aimerais également remercier les personnes de l'équipe ENVIRO avec qui j'ai collaboré durant ces travaux, et notamment au moment de la campagne aéroporté. Je tenais à remercier particulièrement Pascale Dubois-Fernandez pour son accueil chaleureux au sein de l'équipe.

Je souhaite également remercier certaines personnes du DOTA qui m'ont aidé lors des campagnes de mesures en laboratoire et sur le terrain. Un grand merci à Philippe Rolland pour ses précieux conseils, sa disponibilité, son prêt de matériels et surtout sa bonne humeur. Merci également à Bernard Tanguy pour son aide très utile pour le fonctionnement du Bruker. Merci à Nicolas Rivière et à Guillaume Fontanilles pour les échantillons de sols qu'ils ont pris le temps de prélever pendant leurs loisirs... Un grand merci à Guillaume Roussel pour son aide précieuse et sa bonne volonté lors de l'expérimentation terrain.

Je tiens à remercier l'ensemble de l'équipe du DOTA et plus particulièrement Geneviève Corrège pour sa gentillesse et son aide au quotidien.

Plus personnellement, je tiens enfin à remercier les collègues et amis qui m'ont encouragé, soutenu mais surtout supporté pendant ces trois années... Tout d'abord, merci à Colin qui m'a permis de me lancer dans la musique grâce au kazoo, et à Guillaume pour leur bonne humeur dans le bureau du fond du couloir... Merci à ma co-thésarde Stéphanie pour sa joie et pour nos bons souvenirs de notre voyage scientifique à Hawaï... Steph et Colin, je tenais

également à vous remercier pour tous les autres bons moments que nous avons partagés en dehors du labo et qui j'espère continuerons...

Merci à Romain qui est venu plus récemment remplacer mes compères du bureau du fond, et avec qui j'ai pris plaisir à discuter et surtout à commérer avec notre cher Nicolas. Merci à tous les deux pour votre soutien et votre bonne humeur qui m'ont accompagné durant les derniers mois de thèse...

Un grand merci également à tous les autres doctorants que j'ai croisés au cours de ces trois années pour ces moments de partages...

Je tiens aussi à remercier ma famille pour son soutien, Vava d'avoir supporté cette fin de thèse, Mag et Aurore d'avoir toujours cru en moi et bien évidemment mon Ninou de m'avoir porté jusqu'au bout...

Table des matières

Liste des figures	v
Liste des tableaux	xi
Glossaire	xiii
Introduction	1
ETAT DE L'ART : L'HUMIDITE DE SURFACE DES SOLS NUS ET LEURS PROPRIETES OPTIQUES	5
CHAPITRE 1 BASES ET INTERETS DE L'EVALUATION DE L'HUMIDITE DES SOLS A PARTIR DE LEURS PROPRIETES OPTIQUES	7
I.1.1. Caractérisation de l'état hydrique des sols	8
I.1.1.1. Principaux constituants des sols	8
I.1.1.1.1. Fraction minérale	8
I.1.1.1.2. Fraction organique	9
I.1.1.2. L'eau et le sol	9
I.1.1.2.1. Bilan hydrique	9
I.1.1.2.2. Contenu en eau des sols (Soil Moisture Content)	10
I.1.2. Principales techniques de mesures du contenu en eau des sols	12
I.1.2.1. Techniques de mesures in-situ	12
I.1.2.1.1. Sonde nucléaire	12
I.1.2.1.2. Sonde diélectrique	13
I.1.2.2. Techniques de mesures par télédétection hyperspectrale à haute résolution spatiale	13
I.1.2.2.1. Description de l'imagerie hyperspectrale	14
I.1.2.2.2. Apport de l'imagerie hyperspectrale pour la caractérisation des sols nus	15
I.1.2.2.3. Extraction de l'information de contenu en eau à partir de l'imagerie hyperspectrale	15
I.1.3. Conclusions	16
CHAPITRE 2 TRAVAUX EXISTANTS SUR L'EVALUATION DE L'HUMIDITE DES SOLS A PARTIR DE LEURS PROPRIETES OPTIQUES	17
I.2.1. Influence du contenu en eau des sols sur les propriétés optiques	18
I.2.1.1. Comportement spectral de l'eau liquide	18
I.2.1.2. Propriétés optiques des sols et contenu en eau	19
I.2.1.2.1. Absorptions spécifiques des minéraux	19
I.2.1.2.2. Comportement spectral des sols	21
I.2.1.2.3. Effet de l'eau sur les signatures spectrales des sols	23
I.2.2. Méthodes d'estimation du contenu en eau des sols basées sur les propriétés optiques	26
I.2.2.1. Méthodes localisées	26
I.2.2.1.1. Domaine réflectif	26
I.2.2.1.2. Domaine IRT	29
I.2.2.2. Méthodes globales	30
I.2.2.3. Synthèse	32
I.2.2.3.1. Domaine réflectif	32
I.2.2.3.2. Domaine IRT	33
I.2.3. Conclusions	34

CARACTERISATION DU CONTENU EN EAU DES SOLS A PARTIR DE PROPRIETES OPTIQUES DE REFERENCE **35**

CHAPITRE 1 DETERMINATION DES PROPRIETES OPTIQUES DE REFERENCE	37
II.1.1. Mesures en laboratoire	38
II.1.1.1. Protocole de mesures	38
II.1.1.1.1. Description des instruments	38
II.1.1.1.2. Description des échantillons	42
II.1.1.1.3. Description du protocole de mesures	43
II.1.1.2. Analyse des signatures spectrales mesurées	46
II.1.1.2.1. Description des mesures effectuées	46
II.1.1.2.2. Classification des échantillons de sols	47
II.1.1.2.3. Influence du contenu en eau sur les spectres mesurés	53
II.1.2. Modèle Empirique de Sols (MES)	57
II.1.2.1. Principe du modèle	57
II.1.2.1.1. Bases de définition	57
II.1.2.1.2. Démarche	58
II.1.2.2. Description du MES à partir des mesures en laboratoire	59
II.1.2.2.1. Définition des lois empiriques du MES	59
II.1.2.2.2. Description des modélisations du MES	60
II.1.2.2.3. Validation du modèle	62
II.1.2.3. Evaluation des performances du MES	66
II.1.2.3.1. Mesures en laboratoire de Mourin (2006)	66
II.1.2.3.2. Mesures en laboratoire de Liu et al. (2002)	69
II.1.3. Conclusions	70
CHAPITRE 2 ESTIMATION DU CONTENU EN EAU DES SOLS A PARTIR DES PROPRIETES OPTIQUES DE REFERENCE	71
II.2.1. Méthodes d'estimation du contenu en eau des sols	72
II.2.1.1. Méthodes localisées	72
II.2.1.1.1. Indices spectraux de la littérature	72
II.2.1.1.2. Nouveaux indices spectraux	72
II.2.1.2. Méthodes globales	74
II.2.1.2.1. Le modèle d'enveloppe convexe	74
II.2.1.2.2. Inversion du MES	75
II.2.2. Evaluation des critères d'estimation du contenu en eau des sols	77
II.2.2.1. Etude préliminaire	77
II.2.2.1.1. Méthodes localisées	77
II.2.2.1.2. Méthodes globales	84
II.2.2.2. Evaluation des critères dans le domaine réflectif	85
II.2.2.2.1. Méthodes localisées	85
II.2.2.2.2. Méthodes globales	89
II.2.2.2.3. Synthèse dans le domaine réflectif	93
II.2.2.3. Evaluation des critères dans le domaine IRT	93
II.2.2.3.1. Méthodes localisées	93
II.2.2.3.2. Méthodes globales	96
II.2.2.3.3. Synthèse dans le domaine IRT	99
II.2.3. Synthèse : ALOHA (criteria for soil moisture estimation from Hyperspectral data)	100

VALIDATION D'ALOHA SUR DES DONNEES HYPERSPECTRALES SIMULEES ET ACQUISES

101

CHAPITRE 1 ETUDE DE SENSIBILITE D'ALOHA DANS LE DOMAINE OPTIQUE	103
III.1.1. Description du simulateur end-to-end	104
III.1.1.1. Simulation du signal au niveau du capteur	104
III.1.1.1.1. Modélisation de la luminance spectrale au niveau de l'instrument	105
III.1.1.1.2. Modélisation de la luminance spectrale en sortie d'instrument d'acquisition	106
III.1.1.2. Estimation des propriétés optiques de surface	108
III.1.1.2.1. Correction atmosphérique dans le réflectif	108
III.1.1.2.2. Correction atmosphérique dans l'IRT	109
III.1.2. Estimation du contenu en eau des sols à partir de données hyperspectrales simulées	111
III.1.2.1. Présentation des cas de simulation	111
III.1.2.1.1. Cas nominal : prise en compte de l'instrument et de l'atmosphère	111
III.1.2.1.2. Cas particuliers : prise en compte de sources d'erreur au niveau de l'instrument et de l'atmosphère	113
III.1.2.2. Analyse des résultats d'ALOHA	115
III.1.2.2.1. Domaine spectral réflectif	115
III.1.2.2.2. Domaine spectral IRT	122
III.1.3. Synthèse	125
CHAPITRE 2 EVALUATION DES PERFORMANCES D'ALOHA SUR DES DONNEES ACQUISES DANS LE DOMAINE REFLECTIF	127
III.2.1. Description des campagnes aéroportée et terrain	128
III.2.1.1. Campagne aéroportée avec l'instrument HyMap	128
III.2.1.1.1. Secteurs couverts par HyEurope 2009	128
III.2.1.1.2. L'instrument HyMap et les données hyperspectrales	129
III.2.1.2. Campagne de mesures terrain	129
III.2.1.2.1. Description des zones de mesures	129
III.2.1.2.2. Acquisition des mesures terrain	130
III.2.1.2.3. Analyse des mesures terrain	131
III.2.2. Estimation du contenu en eau des sols à partir des données hyperspectrales acquises	135
III.2.2.1. Prétraitement des données hyperspectrales	135
III.2.2.1.1. Extraction des zones d'intérêt	136
III.2.2.1.2. Comparaison des réflectances terrain et estimées à partir des images hyperspectrales	136
III.2.2.2. Analyse des contenus en eau des sols estimés	138
III.2.2.2.1. Cartes de contenus en eau des sols gravimétriques	138
III.2.2.2.2. Conversion des cartes de contenu en eau des sols	140
III.2.2.2.3. Cartes de contenus en eau des sols volumiques	140
III.2.2.3. Analyse de l'impact des sources d'erreur identifiées	142
III.2.2.3.1. Erreur liée à l'étalonnage de la sonde	143
III.2.2.3.2. Erreur liée à un décalage géométrique des ROI	143
III.2.2.3.3. Erreur liée aux défauts d'étalonnage et à la correction atmosphérique des données hyperspectrales	144
III.2.2.3.4. Erreur liée à la densité de sol	146
III.2.2.3.5. Erreur liée à la variabilité du SMC sur la profondeur	147
III.2.2.3.6. Synthèse	148
III.2.3. Conclusions	149
Conclusions	151

Perspectives	155
Bibliographie	159
Annexe I Généralités pédologiques	169
Annexe II Grandeurs mathématiques	173
Annexe III Grandeurs radiométriques	175
Annexe IV Indices spectraux	179
Annexe V Mesures de laboratoire	181
Annexe VI Matrices de corrélation	193
Annexe VII Mesures de terrain	195
Annexe VIII Travaux sur les feuilles	197

Liste des figures

Figure 1 – Rôle de l'eau du sol dans le bilan hydrique d'après Beauchamp (2006). _____	9
Figure 2 – Illustration d'une mesure de contenu en eau des sols avec la sonde à neutrons (<i>medbycos.mpl.ird.fr</i>). _____	12
Figure 3 – Sondes diélectriques TDR (à gauche, www.eijkelkamp.nl) et FDR (à droite, www.candh.co.kr). _____	13
Figure 4 – Représentation d'une image hyperspectrale. _____	14
Figure 5 – Transmission atmosphérique sur le domaine 0,3 – 14 μm . _____	14
Figure 6 – Vibrations fondamentales de la molécule d'eau : étirement symétrique à $\nu_1 = 3652 \text{ cm}^{-1}$ (a), étirement asymétrique à $\nu_3 = 3756 \text{ cm}^{-1}$ (b) et flexion $\nu_2 = 1595 \text{ cm}^{-1}$ (c) (www.btinternet.com/~martin.chaplin/vibrat.html). _____	18
Figure 7 – Coefficient d'absorption de l'eau sur le domaine 0,4 – 7 μm . _____	19
Figure 8 – Localisations des principales bandes d'absorption des minéraux dans le domaine réflectif. _	20
Figure 9 – Localisations des principales bandes d'absorption des minéraux dans le domaine IRT. ____	21
Figure 10 – Comportements spectraux du sol dans le VIS (à gauche) : type 1 (a), type 2 (b) et type 3 (c) ; et exemples de comportements dans le proche infrarouge (à droite), d'après Escadafal (1990). _	22
Figure 11 – Comportements spectraux de sols sur le MWIR, sans carbonates (à gauche) et avec carbonates (au centre) ; sur le LWIR (à droite, échelle variant de 0 à 2 % pour chaque spectre), d'après Salisbury et al. (1992, 1994). _____	22
Figure 12 – Réflectances spectrales d'un sol acquises pour des humidités volumiques ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) de niveaux bas (à gauche, A : 0,32 ; B : 0,25 ; C : 0,14 ; D : 0,07) et élevés (à droite, A : 0,58 ; B : 0,56 ; C : 0,52 ; D : 0,5 ; E : 0,48), d'après Liu et al. (2002). _____	24
Figure 13 – Réflectance relative en fonction de l'humidité volumique ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) pour sept longueurs d'onde, d'après Liu et al. (2002). _____	25
Figure 14 – Coefficients de détermination de la régression linéaire entre le SMC_g et NSMI, pour deux types de sols (partie supérieure et inférieure de la première bissectrice de la matrice), d'après Haubrock et al. (2008a). _____	29
Figure 15 – Modèle d'enveloppe convexe appliqué sur un spectre de réflectance (à gauche), et modèle SMGM (à droite), d'après Whiting et al. (2004). _____	32
Figure 16 – Le spectroradiomètre ASD. _____	39
Figure 17 – Spectromètre Bruker, d'après Tanguy (2008). _____	41
Figure 18 – Mesures en faisceau direct (à gauche) et indirect (à droite), d'après Tanguy (2008). ____	41
Figure 19 – Four de laboratoire Sapratin. _____	42
Figure 20 – Exemples d'échantillons de sols nus prélevés pour les mesures en laboratoire. _____	42
Figure 21 – Illustration des positions prises par l'échantillon pour une mesure de signature spectrale dans le domaine spectral réflectif. _____	44
Figure 22 – Illustration des bancs expérimentaux utilisés pour les mesures en laboratoire, dans les domaines spectraux réflectif (à gauche) et IRT (à droite). _____	45
Figure 23 – Signatures spectrales acquises dans les domaines spectraux réflectif (à gauche) et IRT (à droite), du sol 84Avignon pour différentes valeurs de SMC_g , d'après les mesures en laboratoire (cf. Annexe V). _____	47
Figure 24 – Comportements spectraux observés sur les mesures dans le domaine du VIS (en haut, à gauche), NSWIR (en haut, à droite), MWIR (en bas, à gauche) et LWIR (en bas, à droite). _____	48
Figure 25 – Représentation des spectres de la classe5 dans le réflectif (à gauche) et l'IRT (à droite). _	50

Figure 26 – Extrait de quatre nuanciers (2,5 YR – 10 YR – 2,5 Y – 5 Y) du code de Munsell. Les valeurs de luminosité (Value) sont indiquées à l'horizontale, et les valeurs de pureté (Chroma) à la verticale.	52
Figure 27 – Impact du SMC analysé à partir des mesures, sur les domaines du VIS (en haut, à gauche), NSWIR (en haut, à droite), MWIR (en bas, à gauche) et LWIR (en bas, à droite). Les flèches montantes et descendantes décrivent respectivement les augmentations et les diminutions des bandes lorsque le SMC augmente.	53
Figure 28 – Valeurs de réflectances en fonction du SMC_g pour trois classes de sol, dans le domaine réflectif à la longueur d'onde de $1,4 \mu\text{m}$ (à gauche) et dans le domaine IRT à la longueur d'onde de $4 \mu\text{m}$ (à droite).	58
Figure 29 – Valeurs de réflectances à $1,4 \mu\text{m}$ (à gauche) et du logarithme de la réflectance à $4 \mu\text{m}$ (à droite) en fonction du SMC_g , pour trois classes de sols. Régressions polynomiales quadratiques (traits).	59
Figure 30 – Coefficients spectraux polynomiaux obtenus sur le domaine réflectif.	60
Figure 31 – Spectres mesurés (à gauche) et modélisés par le MES (à droite) pour la classe 1 sur les domaines réflectif (en haut) et IRT (en bas) pour les différentes valeurs de SMC_g correspondant aux mesures.	61
Figure 32 – Valeurs de réflectances mesurées en fonction de celles modélisées dans le domaine réflectif, pour un sol saturé (à gauche) et un sol sec (à droite) de la classe1 . La bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 10 % et 20 %.	63
Figure 33 – Valeurs de réflectances mesurées en fonction de celles modélisées dans le domaine IRT, pour un sol saturé (à gauche) et un sol sec (à droite) de la classe1 . La bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 10 % et 20 %.	64
Figure 34 – Spectres mesurés (à gauche), modélisés par Lobell (au milieu) et par MES (à droite), de la classe1 dans le domaine réflectif, pour différentes valeurs de SMC_g .	65
Figure 35 – Spectres mesurés (à gauche) et modélisés par le MES (à droite), pour l'échantillon de craie (mesures 2006) dans les domaines réflectif (en haut), et IRT (en bas), pour différentes valeurs de SMC.	68
Figure 36 – Spectres mesurés du 'Soil16' issues des mesures de Liu et al. (2002) (à gauche) et spectres obtenus par MES (à droite).	69
Figure 37 – Illustration des variations de pente (traits gris en pointillés) entre deux valeurs de réflectances spectrales prises à $1,3 \mu\text{m}$ et $1,7 \mu\text{m}$ pour différentes valeurs de SMC_g . Spectres de référence mesurés dans le réflectif sur l'échantillon 11Malves .	73
Figure 38 – Illustration du modèle d'EC dans le domaine réflectif (à gauche) et IRT (à droite) appliqué sur un spectre de référence mesuré.	74
Figure 39 – Représentation de l'aire sous la courbe, entre l'EC et le spectre, pour différents niveaux de SMC_g dans les domaines réflectif (à gauche) et IRT (à droite).	75
Figure 40 – SMC_g en fonction des indices NSMI (à gauche) et WISOIL (à droite) pour les classe5 , classe7 et classe8 ; les régressions linéaires sont représentées par les lignes en pointillés.	78
Figure 41 – Matrices de corrélation linéaire (à gauche) et non linéaire (à droite) de $X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j)$ (en haut) et de $X_{pente}(\lambda_i, \lambda_j)$ (en bas) calculées pour les classes regroupées dans le NSWIR.	81
Figure 42 – Matrices de corrélation linéaire (à gauche) et non linéaire (à droite) de $X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j)$ (en haut) et de $X_{pente}(\lambda_i, \lambda_j)$ (en bas) calculées pour les classes regroupées dans le MWIR.	82

- Figure 43** – Indices évalués sur les spectres de référence mesurés : SMC_g en fonction des indices NSMI (en haut, à gauche) et WISOIL (en bas, à gauche) pour toutes les classes regroupées ; les régressions sont représentées par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de ces indices en fonction des SMC_g mesurés (à droite); la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %. _____ 85
- Figure 44** – Indices évalués sur les spectres de référence mesurés et simulés : SMC_g en fonction des indices NSMI (en haut, à gauche) et WISOIL (en bas, à gauche) pour toutes les classes regroupées ; les régressions sont représentées par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de ces indices en fonction des SMC_g mesurés et simulés (à droite) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %. _____ 86
- Figure 45** – Indices évalués sur les spectres de référence mesurés dans le domaine réflectif : SMC_g en fonction des indices NINSOL (en haut, à gauche), NINSON (au milieu, à gauche) et SINSON (en bas, à gauche) pour toutes les classes regroupées ; les régressions sont représentées par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de ces indices en fonction des SMC_g mesurés (à droite); la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %. _____ 88
- Figure 46** – Indices évalués sur les spectres de référence mesurés et simulés dans le domaine réflectif : SMC_g en fonction des indices NINSOL (en haut, à gauche) et NINSON (en bas, à gauche) pour toutes les classes regroupées ; les régressions sont représentées par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de ces indices en fonction des SMC_g mesurés et simulés (à droite) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %. _____ 89
- Figure 47** – Aire sous l'EC appliquée sur le logarithme des spectres de référence mesurés dans le domaine NSWIR : SMC_g en fonction de l'aire (à gauche) pour toutes les classes regroupées; la régression est représentée par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de l'aire en fonction des SMC_g mesurés (à droite) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %. _____ 90
- Figure 48** – Modèle d'EC appliqué sur les logarithmes des spectres de réflectances du sol **84Avignon** pour trois valeurs de SMC_g dans les domaines réflectif (à gauche) et NSWIR (à droite). _____ 90
- Figure 49** – Aire sous l'EC appliquée sur le logarithme des spectres de référence mesurés et simulés dans le domaine NSWIR : SMC_g en fonction de l'aire (à gauche) pour toutes les classes regroupées; la régression est représentée par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de l'aire en fonction des SMC_g mesurés et simulés (à droite) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %. _____ 91
- Figure 50** – MES inverse appliqué sur les spectres de référence mesurés dans le domaine réflectif : SMC_g estimés en fonction des SMC_g mesurés pour toutes les classes de sols ; la bissectrice est représentée sur les graphiques par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 10 % et 20 %. _____ 92
- Figure 51** – Indices évalués sur les spectres de référence mesurés dans le domaine IRT : SMC_g en fonction des indices NIMSOL (en haut, à gauche), NIMSON (au milieu, à gauche) et SIMSON (en bas, à gauche) pour toutes les classes regroupées ; les régressions sont représentées par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de ces indices en fonction des SMC_g mesurés (à droite); la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %. _____ 94
- Figure 52** – Indices évalués sur les spectres de référence mesurés et simulés dans le domaine IRT : SMC_g en fonction des indices NIMSOL (en haut, à gauche) et NIMSON (en bas, à gauche) pour toutes les classes regroupées ; les régressions sont représentées par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à

- partir de ces indices en fonction des SMC_g mesurés (à droite); la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %. _____ 95
- Figure 53** – Aire sous l'EC appliquée sur les spectres de référence mesurés dans le domaine MWIR : SMC_g en fonction de l'aire (à gauche) pour toutes les classes regroupées; la régression est représentée par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de l'aire en fonction des SMC_g mesurés (à droite) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %. _____ 96
- Figure 54** – Modèle d'EC appliqué sur les spectres de réflectances du sol **84Avignon**, pour trois valeurs de SMC dans les domaines IRT (à gauche) et MWIR (à droite). _____ 97
- Figure 55** – Aire sous l'EC appliquée sur les spectres de référence mesurés et simulés dans le domaine IRT : SMC_g en fonction de l'aire (à gauche) pour toutes les classes regroupées; la régression est représentée par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de l'aire en fonction des SMC_g mesurés (à droite) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %. _____ 97
- Figure 56** – MES inverse appliqué sur les spectres de référence mesurés dans le domaine IRT : SMC_g estimés en fonction des SMC_g mesurés pour toutes les classes de sols ; la bissectrice est représentée sur les graphiques par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 10 % et 20 %. _____ 98
- Figure 57** – Représentation schématique du simulateur end-to-end. _____ 104
- Figure 58** – Représentation schématique du module 1 de simulation du signal au niveau du capteur. _ 104
- Figure 59** – Termes contribuant au signal en entrée de capteur visant une surface plane et homogène. 105
- Figure 60** – Luminances spectrales en entrée de capteur simulées par MODTRAN4 (en noir), et luminances spectrales simulées en sortie du capteur (en rouge) dans les domaines spectraux réflectif (à gauche) et IRT (à droite). Le symbole "+" représente la longueur centrale de chaque bande. _ 106
- Figure 61** – Luminances spectrales simulées en sortie du capteur (en rouge) et dégradées par les incertitudes (en vert) composé de B_{SNR} , $B_{\Delta\lambda}$ et $B_{E_{tal}}$, dans les domaines spectraux réflectif (à gauche) et IRT (à droite). Les paramètres utilisés sont pour le domaine réflectif : $C_{\Delta\lambda} = 2\%$ et $C_{E_{tal}} = 2\%$; et pour le domaine IRT : $C_{\Delta\lambda} = 2\%$ et $C_{E_{tal}} = 2\%$. Le symbole "+" représente la longueur centrale de chaque bande. _____ 107
- Figure 62** – Représentation schématique du module 2 d'estimation des propriétés optiques de surface. 108
- Figure 63** – Réflectances spectrales mesurées et estimées avec COCHISE dans le domaine réflectif pour un sol (**classe1**) saturé (à gauche) et sec (à droite). Le symbole "+" représente la longueur centrale de chaque bande. _____ 109
- Figure 64** – Transmission atmosphérique pour le domaine réflectif (à gauche) et IRT (à droite) du profil US standard pour des contenus intégrés en vapeur d'eau de 0,5 à 2,5 g.cm⁻². _____ 113
- Figure 65** – Luminances spectrales simulées en sortie de capteur (en noir) dégradées par une erreur d'étalonnage inter-bande (cas **s5**, en rouge) et par une erreur d'étalonnage absolu (cas **s6**, en vert), dans les domaines spectraux réflectif (à droite) et IRT (à gauche). Le symbole "+" représente la longueur centrale de chaque bande. _____ 114
- Figure 66** – Méthodes localisées du domaine réflectif : SMC_g estimés par ALOHA sur spectres simulés (cas nominal) en fonction des SMC_g estimés par ALOHA sur spectres de référence mesurés ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %. _____ 116
- Figure 67** – Méthodes globales du domaine réflectif : SMC_g estimés par ALOHA sur spectres simulés (cas nominal) en fonction des SMC_g estimés par ALOHA sur spectres de référence mesurés ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %. _____ 116

- Figure 68** – Méthodes localisées du domaine réflectif : SMC_g estimés pour les cas **s1** à **s4** en fonction des SMC_g estimés pour le cas nominal (cas **s0**) dans le domaine spectral réflectif ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %. _____ 118
- Figure 69** – Réflectances simulés par les simulations **s0**, **s1**, **s2**, **s3** et **s4** et spectre de référence mesuré associé, sur les domaines spectraux 1,28 – 1,46 μm (à gauche) et 1,75 – 2,25 μm (à droite). Longueurs d'onde exploitées par WISOIL (à gauche, cercles rouges), NSMI (à droite, cercles vert et rouge), NINSOL et NINSON (à droite, cercles rouges). _____ 118
- Figure 70** – Méthodes globales : SMC_g estimés pour les cas **s1** à **s4** en fonction des SMC_g estimés pour le cas nominal (cas **s0**) dans le domaine spectral réflectif ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %. _____ 119
- Figure 71** – Méthodes localisées : SMC_g estimés pour les cas **s5** et **s6** en fonction des SMC_g estimés pour le cas nominal (cas **s0**) dans le domaine spectral réflectif ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %. _____ 120
- Figure 72** – Méthodes globales : SMC_g estimés pour les cas **s5** et **s6** en fonction des SMC_g estimés pour le cas nominal (cas **s0**) dans le domaine spectral réflectif ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %. _____ 121
- Figure 73** – SMC_g estimés par le MES inverse sur les spectres simulés (cas nominal) en fonction des SMC_g mesurés (méthode gravimétrique) dans les domaines spectraux MWIR et LWIR ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %. _____ 123
- Figure 74** – MES inverse dans le MWIR : SMC_g estimés pour les cas **s1** à **s4** en fonction des SMC_g estimés pour le cas nominal (cas **s0**) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %. _____ 124
- Figure 75** – MES inverse dans le MWIR : SMC_g estimés pour les cas **s5** et **s6** en fonction des SMC_g estimés pour le cas nominal (cas **s0**) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %. _____ 124
- Figure 76** – Secteur de Garons où se situe la zone de collecte d'informations terrain. _____ 128
- Figure 77** – Zones de la campagne de mesures terrain sur le secteur de Garons, parcelle n°1 non irriguée (à gauche) et parcelle n°2 irriguée (à droite). _____ 130
- Figure 78** – Description du protocole de mesures pour chaque parcelle (le schéma n'est pas à l'échelle). Notation introduite : Transect_j_pk = Transect n°j pour la Parcelle n°k. _____ 130
- Figure 79** – SMC_v (%_v) mesurés et interpolés sur les parcelles n°1 (à gauche) et n°2 (à droite). Les abscisses et ordonnées représentent les dimensions spatiales des parcelles (en mètres) et les tracés en pointillés représentent les limites des transects. _____ 131
- Figure 80** – Réflectances spectrales acquises sur la parcelle n°1 (à gauche) et la parcelle n°2 (à droite). 133
- Figure 81** – Localisation des parcelles n°1 et n°2 (représentation faite avec le logiciel ENVI, www.itvvis.com). Les directions x et y représentent respectivement le sens d'acquisition des transects et le sens du labour. _____ 135
- Figure 82** – ROI associées aux transects de la parcelle n°1 (jaune à bleu-vert) et de la parcelle n°2 (rouge à vert). _____ 136

Figure 83 – Valeurs spectrales minimales, maximales, moyennes et moyennes plus ou moins l'écart-types, évaluées à partir des mesures terrain (à gauche) et de l'hypercube (à droite) pour deux transects de la parcelle n°1 et un transect de la parcelle n°2. _____	137
Figure 84 – Cartes de contenus en eau de sols (gravimétriques) obtenues avec ALOHA, sur les parcelles n°1 (parcelle de gauche) et n°2 (parcelle de droite). _____	139
Figure 85 – SMC_v moyen estimé (% _v) par ALOHA (méthodes localisées) en fonction de SMC_v moyen (% _v) déduit des mesures terrain. La bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en grands et petits pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 20 % et 40 %. _____	141
Figure 86 – SMC_v moyen estimé (% _v) par ALOHA (méthodes globales) en fonction de SMC_v moyen (% _v) déduit des mesures terrain. La bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en grands et petits pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 20 % et 40 %. _____	142
Figure 87 - Critères NSMI et aire sous l'EC : Impact d'une variation du contenu intégré en vapeur d'eau atmosphérique de -1 g.cm ⁻² (à gauche) et de 1 g.cm ⁻² (à droite) sur les SMC_v moyens estimés. La bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en grands et petits pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 20 % et 40 %. _____	145
Figure 88 – Impact d'une erreur d'étalonnage inter-bande de 3 % (à gauche) et d'une erreur d'étalonnage absolu de 5 % (à droite) sur les SMC_v moyens estimés. La bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en grands et petits pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 20 % et 40 %. _____	146
Figure 89 – (1) Profil hydrique sitôt l'arrêt de la pluie ou de l'arrosage ; (2) Profil hydrique après redistribution de l'eau dans un sol argilo-limoneux ; (3) Profil hydrique après redistribution de l'eau dans un sol sablo-limoneux ; H=profondeur du front d'humectation (2 à 5 fois la hauteur d'eau tombée en mm) selon la texture et la structure, d'après Soltner (2000). _____	147
Figure 90 – Variations de l'humidité volumique (% _v) d'échantillons de sols (60% limon, 30% argile, 10% sable) en fonction de la profondeur, d'après Le Morvan (2008). _____	147
Figure 91 - Principaux horizons d'un profil de sol (à gauche) et illustration de l'évolution des sols avec apparition des différents horizons (à droite), d'après Galvez (2009). _____	169
Figure 92 – La structure d'un sol au niveau macroscopique (a) et microscopique (b), d'après Duchaufour (2001). _____	170
Figure 93 – Illustration d'un triangle des textures de sols (www.designvegetal.com). _____	171
Figure 94 – Trois formes d'eau dans le sol (www.planete-tp.com). _____	171
Figure 95 – Taux d'humidité dans le sol en fonction de la texture (www.afidol.org). _____	172
Figure 96 – Etats de l'eau dans le sol, d'après Beauchamp (2006). _____	172
Figure 97 – Repérage de l'angle zénithal θ et azimutal φ . _____	175
Figure 98 – Angle solide : rapport entre la surface (en rose) de la projection d'un objet (en bleu) sur une sphère et le carré du rayon de celle-ci. _____	176
Figure 99 – Définition de la BRDF. _____	177
Figure 100 – Loi de Planck. _____	178
Figure 101 – Illustration d'une matrice de corrélation calculée sur un échantillon de sol nu dans le réflectif. _____	193

Liste des tableaux

Tableau 1 – Principales caractéristiques des jeux de mesures en laboratoire de propriétés optiques dépendantes du SMC dans les domaines spectraux réflectif et IRT (le symbole "-" indique une absence d'information).	23
Tableau 2 – Synthèse des principales méthodes du domaine réflectif trouvées dans la littérature.	33
Tableau 3 – Principales caractéristiques de spectroradiomètre de marque ASD.	38
Tableau 4 – Principales caractéristiques du spectroradiomètre de marque Bruker, d'après Tanguy (2008).	40
Tableau 5 – Caractéristiques principales des échantillons. *Par personne extérieure, nous entendons une personne hors du projet sollicitée pour effectuer un prélèvement dans une zone donnée.	43
Tableau 6 – Etapes du protocole de mesures en laboratoire.	46
Tableau 7 – Comportements spectraux issus de l'analyse des mesures.	49
Tableau 8 – Classification informelle des échantillons de sols mesurés.	49
Tableau 9 – Code de Munsell des échantillons de sols des mesures.	52
Tableau 10 – Valeurs critiques de SMC_g moyen et domaines spectraux sur lesquels ces valeurs impactent (représentés par le symbole X).	54
Tableau 11 – Ecarts significatifs moyens entre spectres secs et saturés, pour les classes de sols, dans le VIS, NSWIR, MWIR et LWIR.	56
Tableau 12 – Performances du MES sur les spectres mesurés en laboratoire et utilisés pour l'étalonnage, dans les domaines spectraux réflectif et IRT.	62
Tableau 13 – Performances du MES sur les spectres mesurés en laboratoire et non utilisés pour l'étalonnage, dans les domaines spectraux réflectif et IRT.	64
Tableau 14 – Comparaison des performances du Modèle de Lobell et du MES sur les mesures en laboratoire, pour quatre classes de sols dans le domaine spectral réflectif.	66
Tableau 15 – Performances du MES sur les mesures de Mourin (2006), sans réétalonnage, dans les domaines spectraux réflectif et IRT.	67
Tableau 16 – Performances du MES sur les mesures de Mourin (2006), avec réétalonnage, dans les domaines spectraux réflectif et IRT.	68
Tableau 17 – Résultats des performances du MES sur les mesures de Liu et al. (2002), dans le domaine réflectif.	69
Tableau 18 – Bandes spectrales exploitées par les indices spectraux issus de la littérature dans le domaine réflectif (cf. Annexe IV).	72
Tableau 19 – R^2 (valeurs arrondies au % supérieur) obtenus par régression des indices de la littérature avec le SMC_g sur les classes regroupées des spectres de référence mesurés dans le domaine réflectif.	77
Tableau 20 – R^2 (valeurs arrondies au % supérieur) obtenus par corrélation de NSMI et WISOIL avec le SMC_g , sur chaque classe de sol.	78
Tableau 21 – Moyenne du nombre de couples de longueurs d'onde corrélés à plus de 90 % au SMC_g sur les intervalles spectraux Int1 ($\lambda_i \in$ VIS et $\lambda_j \in$ NSWIR), Int2 ($\lambda_i \in$ VIS et $\lambda_j \in$ VIS), Int3 ($\lambda_i \in$ NSWIR et $\lambda_j \in$ NSWIR), pour les grandeurs X_{nom} et X_{pente} , corrélées linéairement (Lin) et non linéairement (NLin). Les nombres en gras correspondent à l'intervalle spectral où se situe la corrélation la plus élevée.	79
Tableau 22 – Moyenne du nombre de couples de longueurs d'onde corrélés à plus de 90 % au SMC_g sur les intervalles spectraux Int1 ($\lambda_i \in$ MWIR et $\lambda_j \in$ LWIR), Int2 ($\lambda_i \in$ MWIR et $\lambda_j \in$ MWIR), Int3 ($\lambda_i \in$	

LWIR et $\lambda_j \in \text{LWIR}$), pour les grandeurs X_{norm} et X_{pente} , corrélées linéairement (Lin) et non linéairement (NLin). Les nombres en gras correspondent à l'intervalle spectral où se situe la corrélation la plus élevée. _____ 80

Tableau 23 – R^2 (valeurs arrondies au % supérieur) obtenus par régression du SMC à l'aire sous l'EC appliquée sur le spectre et son logarithme dans les domaines réflectif et IRT pour les spectres de référence mesurés. _____ 84

Tableau 24 – Valeurs RMSE (%_g) associées au MES inverse, par classe de sol, dans le domaine réflectif. _____ 91

Tableau 25 – Valeurs RMSE (%_g) associées au MES inverse, par classe de sol, dans le domaine IRT. _____ 98

Tableau 26 – Principales caractéristiques des instrument HyMap et AHS-160 utilisés pour les simulations. _____ 112

Tableau 27 – Longueurs d'onde centrales des bandes spectrales de l'instrument AHS-160 pour le domaine IRT. _____ 112

Tableau 28 – Paramètres du cas de simulation nominal *s0*. _____ 112

Tableau 29 – Paramètres définissant les incertitudes liées aux coefficients d'étalonnage. _____ 114

Tableau 30 – Caractéristiques de l'imageur hyperspectral HyMap, d'après Cocks (1998) et Weide (2010). _____ 129

Tableau 31 – Valeurs moyennes, minimales et maximales, et écart-types des SMC_v (%_v) mesurés sur les transects des parcelles n°1 et n°2. _____ 132

Tableau 32 – Impact des sources d'erreur identifiées : ΔROI (décalages des ROI) – $\Delta\text{H}_2\text{O}$ (variations du contenu intégré en vapeur d'eau) – $\Delta\lambda$ (erreur d'étalonnage inter-bande) – ΔL (erreur d'étalonnage absolu) – Δd_{sol} (erreur sur la valeur de densité de sol apparente) – $\Delta\alpha$ (erreur sur le facteur de correction pour la variabilité du profil hydrique). _____ 148

Tableau 33 – Performances des critères des domaines spectraux réflectif et IRT associées à l'évaluation du SMC à partir des propriétés optiques de référence. _____ 152

Glossaire

AHS	Airborne Hyperspectral Scanner
ALOHA	criteria for soil moisture estimation from Hyperspectral data
ASD	Analytical Spectral Device
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer
AVIRIS	Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
COCHISE	COde de Correction atmosphérique Hyperspectrale d'Images de Senseurs Embarqués
DAIS	Digital Airborne Imaging Spectrometer
DLR	Agence Aérospatiale Allemande
DOTA	Département d'Optique Théorique et Appliquée
EC	Enveloppe Convexe
ENVI	Environment for Visualizing Images
FDR	Frequency Domain Reflectometry
FOV	Field Of View
GPS	Global Positioning System
HYMAP	Hyperspectral MAPping
IDL	Interactive Data Language
IFOV	Instantaneous Field Of View
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
IRT	Domaine spectral "InfraRouge Thermique" [3 – 14 μm]
LAI	Leaf Area Index
LWIR	Domaine spectral "Long Wavelength InfraRed" [8 – 14 μm]
MCT	Mercure Cadmium Tellure
MES	Modèle Empirique de Sols
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MODTRAN	MODerate resolution atmospheric TRANsmission
MWIR	Domaine spectral "Medium Wavelength Infrared" [3 – 5,5 μm]
NINSOL	Normalized Index of Nswir domain for Smc estimatiOn from Linear correlation
NINSON	Normalized Index of Nswir domain for Smc estimatiOn from Non linear correlation
NIMSOL	Normalized Index of Mwir domain for Smc estimatiOn from Linear correlation
NIMSON	Normalized Index of Mwir domain for Smc estimatiOn from Non linear correlation
NIR	Domaine spectral "Near InfraRed" [0,8 – 1,4 μm]
NSWIR	Domaine spectral "Near and Short Wavelength InfraRed" [0,8 – 2,5 μm]
ONERA	Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
PRF	Projet Fédérateur de l'Onera

RMSE	Root Mean Square Error
ROI	Region of Interest
RU	Réserve d'eau Utile
SINSON	Slope Index of Nswir domain for Smc estimatiOn from Non linear correlation
SIMSON	Slope Index of Mwir domain for Smc estimatiOn from Non linear correlation
SMC	Soil Moisture Content
SMGM	Soil Moisture Gaussian Model
SNR	Signal to Noise Ratio
SWIR	Domaine spectral "Short Wavelength InfraRed" [1,4 – 3 μm]
TDR	Time Domain Reflectometer
VIS	Domaine spectral "VISible" [0,4 – 0,8 μm]
VNIR	Domaine spectral "VISible and Near InfraRed " [0,4 – 1,4 μm]

PARAMETRES PEDOLOGIQUES

SMC_g	Humidité pondérale ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ou $\%$)
SMC_v	Humidité volumique ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ou $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ou $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ ou $\%$)
M_{eau}	Masse de l'eau (g)
M_{ech}	Masse de l'échantillon (g)
M_{sec}	Masse de l'échantillon sec (g)
V_{eau}	Volume d'eau (cm^3)
V_{ech}	Volume de l'échantillon (cm^3)
d_{eau}	Masse volumique de l'eau ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
d_{ech}	Densité apparente de l'échantillon ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
d_{sol}	Densité apparente du sol ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
α	Facteur de correction lié au profil vertical de l'humidité

PARAMETRES RADIOMETRIQUES

λ	Longueur d'onde (μm ou nm)
ν	Fréquence (cm^{-1})
ρ	Réflectance lambertienne
ε	Emissivité lambertienne
ρ_{ech}^{dd}	Réflectance bidirectionnelle de l'échantillon
ρ_{ech}^{dh}	Réflectance directionnelle-hémisphérique de l'échantillon
ρ_{etal}	Réflectance de l'étalon
ρ_{ech}^{dir}	Réflectance de l'échantillon acquise en mesure directe
ρ_{ech}^{ind}	Réflectance de l'échantillon acquise en mesure indirecte

ρ_{etal}^{dir}	Réflectance de l'étalon acquise en mesure directe
ρ_{etal}^{ind}	Réflectance de l'étalon acquise en mesure indirecte
ρ_{sat}	Réflectance d'un échantillon de sol saturé
ρ_{sec}	Réflectance d'un échantillon de sol sec
L_{ech}	Luminance de l'échantillon ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)
L_{etal}	Luminance de l'étalon ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)
L_{EC}	Luminance totale entrée de capteur ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)
$L_{reflech}$	Luminance réfléchie par la surface ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)
L_{atm}^{\downarrow}	Luminance atmosphérique descendante ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)
L_{atm}^{\uparrow}	Luminance atmosphérique montante ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)
L_{emise}	Luminance émise par la surface ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)
$L_{surface}$	Luminance issue de la surface ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)
$B(T_S)$	Luminance du corps noir ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)
T_S	Température de surface (K)
$E_{solaire}$	Eclairement solaire ($W.m^{-2}.\mu m^{-1}$)
τ	Transmission atmosphérique
L_{SC}	Luminance sortie de capteur ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)
S_K	Sensibilité spectrale de l'instrument
L_{SCB}	Luminance sortie de capteur avec incertitudes d'étalonnage ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)
$B_{\Delta\lambda}$	Incertitude sur la luminance liée à l'étalonnage inter-bande ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)
B_{Etal}	Incertitude sur la luminance liée à l'étalonnage absolu ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)
$C_{\Delta\lambda}$	Coefficient d'étalonnage inter-bande (%)
C_{Etal}	Coefficient d'étalonnage radiométrique absolu (%)

PARAMETRES MATHÉMATIQUES

R^2	Coefficient de détermination
σ	Ecart type
$X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j)$	Grandeur normalisé dépendante de deux longueurs d'onde
$X_{pente}(\lambda_i, \lambda_j)$	Grandeur de pente dépendante de deux longueurs d'onde
LN	Logarithme
E_{REFL}	Erreur quadratique définie dans le domaine réflectif
E_{IRT}	Erreur quadratique définie dans le domaine IRT

Introduction

L'humidité des sols constitue une variable fondamentale dans diverses sciences de l'environnement telle que l'agronomie, l'hydrologie, l'hydrogéologie ou encore la météorologie. Cette variable est évaluée depuis plusieurs années pour répondre à des problématiques d'ordre environnemental : la gestion des ressources en eau ; le changement climatique ; le suivi de la végétation (croissance, état de santé, etc.) ; ou encore l'évaluation des dégâts liés aux inondations après une catastrophe naturelle.

En agronomie, la prédiction de la production agricole et l'optimisation des irrigations, nécessitent des informations sur l'état hydrique du sol et sur ses variations. L'humidité des sols est donc un facteur important dans l'analyse et la mise en place de cartographies des propriétés du sol (Ben Dor, 2002). Elle intervient aussi bien au niveau de la biochimie du sol qu'au niveau du développement de la végétation (Lobell, 2002) avec par exemple l'étude du phénomène de désertification (Chabrillat, 2007).

En hydrologie, l'humidité des sols antérieure à une précipitation conditionne très fortement le ruissellement et l'infiltration efficace de la pluie. Sa connaissance est donc utile pour l'analyse des propriétés telles que la quantité de matière organique ou minérale qui compose le sol (Whiting, 2005), et permet ainsi d'effectuer des prévisions de glissement de terrain, d'érosion ou encore d'inondation (Haubrock, 2008a). En effet, pour évaluer la traficabilité d'une zone lors d'inondations, des informations sur la situation (identification des zones touchées et accessibilité pour les secours) doivent être apportées et ceux grâce à des propriétés relatives au terrain comme l'humidité.

Enfin, l'humidité des sols est également un élément clé de la surface des continents pour les modèles de circulation générale de l'atmosphère. Elle est étroitement liée à l'évaporation et donc à la distribution des flux de chaleur sensible et de chaleur latente. Elle est donc étudiée pour ses répercussions dans les échanges d'énergie entre la surface et l'atmosphère (Liu, 2003) et plus précisément en météorologie et climatologie (Khanna, 2007).

Notre travail est réalisé dans le cadre d'un projet fédérateur (PRF) de l'ONERA (ENVIRO ; *enviro.onera.fr* ; Barat, 2008), dont l'objectif principal est de configurer et de dimensionner un système de surveillance optimal adapté à deux thématiques : gestion de crises et cycle du carbone. Ce système regroupe des instruments et des chaînes de traitement de données optique et radar à très hautes résolutions spatiales (résolutions métriques).

Nos travaux portent sur la caractérisation biophysique des sols nus par télédétection optique à haute résolution spatiale et plus précisément sur l'estimation de l'un de ces paramètres clés : l'humidité de surface des sols nus.

Pour estimer le contenu en eau des sols, c'est-à-dire quantifier son humidité, les techniques de télédétection (du domaine spectral optique au radar) présentent de multiples avantages par rapport à celles effectuées de manière in situ (gravimétrie, électromagnétique, etc.). En effet, ces dernières sont ponctuelles et souvent localisées au niveau parcellaire, car les

instrumentations associées sont fastidieuses à mettre en place. Grâce aux techniques de télédétection (satellitaire ou aéroportée), des données sont disponibles à différentes échelles et résolutions pour fournir des informations locales ou régionales. Pour les données aéroportées à hautes résolutions spatiales (de l'ordre du mètre), la zone analysée se situe à l'échelle du petit bassin versant (de quelques kilomètres carrés). L'information à haute résolution spatiale présente ainsi l'avantage d'être adaptée à l'hétérogénéité des zones observées et son exploitation conduit alors à une caractérisation fine des sols.

Dans le domaine optique, l'imagerie hyperspectrale présente l'intérêt de fournir une information détaillée d'une scène à une haute résolution spatiale avec une résolution radiométrique fine dans un grand nombre de bandes spectrales contiguës (ou non). A haute résolution spatiale, ces données fournissent, pour une même zone, une description pixellaire fine de la scène et pour chaque pixel (élément de paysage) un spectre composé d'une centaine (ou plus) de longueurs d'onde. Ainsi, chaque pixel de la scène observée possède une signature spectrale caractéristique (appelée aussi propriété optique). L'analyse des signatures spectrales des sols nus permet de définir la présence et/ou l'abondance de certains paramètres physico chimiques (Ben Dor, 2009).

Les instruments hyperspectraux à haute résolution spatiale sont capables de mesurer le signal issu d'une surface sur les domaines spectraux réflectif (0,4 – 2,5 μm) et infrarouge thermique (3 – 14 μm) (HyMap – Hyperspectral Mapping couvrant le domaine réflectif ; Cocks, 1998) (AHS – Airborne Hyperspectral Scanner couvrant les deux domaines spectraux ; Fernandez, 2005) (Telops ; couvrant l'infrarouge thermique ; Puckrin, 2009).

Dans le domaine spectral réflectif (0,4 – 2,5 μm), Liu *et al.* (2003), Haubrock *et al.* (2008a), Whiting *et al.* (2004) ont mis en évidence le potentiel d'utilisation de ces données pour extraire l'information d'humidité de surface des sols. En revanche, dans le domaine spectral infrarouge thermique (3 – 14 μm), le nombre d'étude est limité et ne concerne que le domaine 8 – 14 μm . Dans ce dernier domaine spectral, Mira *et al.* (2007a) a montré la corrélation entre le contenu en eau des sols et les propriétés optiques.

Toutes ces études mettent en évidence l'intérêt d'exploiter les propriétés optiques des sols pour en extraire l'information de contenu en eau. Toutefois, les méthodes existantes présentent un certain nombre d'inconvénients :

- le domaine optique complet n'est pas exploité ;
- elles sont généralement évaluées à partir de données acquises en laboratoire, mais ne sont pas toujours validées sur des données réelles ;
- lors de validation sur des données hyperspectrales, elles sont étalonnées au préalable à partir d'échantillons de sol acquis sur le terrain ;
- elles sont définies pour des types de sols particuliers et ne sont pas généralisées à tout type de sols ;
- elles fonctionnent pour une gamme d'humidité inférieure à une valeur seuil qui dépend du type de sol étudié.

L'objectif de nos travaux est de développer des méthodes d'estimation de l'humidité de surface des sols nus à partir de données hyperspectrales à haute résolution spatiale couvrant le domaine optique complet (0,4 – 14 μm), d'évaluer leur robustesse puis de les valider et de comparer leurs performances. Les exigences retenues pour spécifier de nouvelles méthodes sont définies à partir des inconvénients intrinsèques aux méthodes existantes :

- les méthodes proposées ne nécessitent pas un étalonnage au préalable en laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur la zone observée ;
- les sorties des méthodes proposées sont des cartes d'humidité des sols valables quels que soient le type de sol considéré et le niveau d'humidité.

Pour répondre à cet objectif, la démarche proposée est la suivante :

- constituer une base de référence de propriétés optiques d'échantillons de sols nus sur le domaine 0,4 – 14 μm pour différents niveaux d'humidité ;
- comparer, sur le jeu de référence, les performances de méthodes d'estimation de l'humidité des sols existantes dans la littérature avec de nouvelles ;
- valider les méthodes sur des données hyperspectrales simulées et réelles.

Ce travail est présenté en trois parties dans ce manuscrit.

La première partie (cf. Partie I) est un état de l'art des méthodes d'évaluation du contenu en eau des sols à partir de leurs propriétés optiques (cf. Partie I, Chapitre 1). Après un rappel de la définition de l'état hydrique des sols, les techniques instrumentales utilisées pour l'évaluation de l'humidité sont présentées. Ensuite, les avantages et limitations des principales méthodes existantes dans les domaines spectraux réflectif et infrarouge thermique (cf. Partie I, Chapitre 2) sont analysés pour la spécification de nouvelles méthodes.

Dans une seconde partie (cf. Partie II), un jeu de données de référence obtenu en laboratoire, et reliant le contenu en eau aux propriétés optiques des sols est élaboré (cf. Partie II, Chapitre 1). Ce jeu va servir de base pour développer un modèle empirique de sols permettant la simulation de propriétés optiques pour un contenu en eau d'un sol fixé a priori. L'estimation du contenu en eau à partir de ces propriétés optiques de référence (mesurés et/ou simulés) est ensuite abordée (cf. Partie II, Chapitre 2) au moyen de méthodes localisées (exploitant des bandes spectrales particulières) et globales (exploitant la forme générale du spectre), pour évaluer des critères d'estimation d'humidité par domaine spectral (ALOHA, criteria for soil moisture estimation from Hyperspectral data).

La dernière étape a pour objectif de valider ALOHA, c'est-à-dire les critères retenus à l'étape précédente, sur des données de télédétection simulées et réelles (cf. Partie III). Une étude de sensibilité, relative à l'atmosphère et à l'instrument, a tout d'abord été mise en place dans les domaines spectraux réflectif et infrarouge thermique (cf. Partie III, Chapitre 1) au moyen d'un simulateur complet du signal, dit simulateur end-to-end. Une étude de performance a ensuite été menée dans le domaine spectral réflectif à partir de données réelles obtenues lors d'une campagne sur le site de Garons (France) dans le cadre du projet ENVIRO. Au cours de cette

campagne, des images acquises par l'instrument aéroporté HyMap sur une zone agricole ont été traitées et comparées à des mesures terrain (cf. Partie III, Chapitre 2).

Les conclusions tirées de ces différentes parties sont ensuite abordées avant de présenter des perspectives à ces travaux.

Partie I

Etat de l'art : l'humidité de surface des sols nus et leurs propriétés optiques



Chapitre 1

Bases et intérêts de l'évaluation de l'humidité des sols à partir de leurs propriétés optiques

L'objet de ce premier chapitre est de définir le lien entre l'humidité de surface des sols nus, c'est-à-dire leur contenu en eau, et les propriétés optiques.

Dans une première partie, une description de l'état hydrique des sols est donnée pour définir la notion de contenu en eau du sol (**Soil Moisture Content**).

Pour cela, les principaux constituants des sols, sont présentés afin de définir un lien entre l'eau et le sol pour comprendre le rôle de l'humidité dans le bilan hydrique et caractériser son impact sur les sols.

Dans une deuxième partie, les principales techniques de mesures directes utilisées pour estimer le contenu en eau des sols sont présentées. Cette description permet de mettre en évidence l'intérêt de disposer de l'imagerie à hautes résolutions spatiale et spectrale pour évaluer ce paramètre.

Les principales techniques courantes utilisées sur le terrain sont tout d'abord présentées pour en dégager leurs limitations. Les techniques de télédétection hyperspectrale à hautes résolutions spatiale et spectrale sont ensuite abordées, afin de montrer l'intérêt d'évaluer des paramètres physico-chimiques des sols, comme le contenu en eau, à partir de leur signature spectrale.

I.1.1. Caractérisation de l'état hydrique des sols

L'eau dans le sol (Duchaufour, 2001) joue un rôle essentiel dans la nutrition des plantes et dans le processus d'évolution des sols (cf. Annexe I). Sous nos climats, la source principale d'eau dans le sol est due aux précipitations. Cependant, toute l'eau des précipitations n'atteint pas le sol, car une partie est directement évaporée. Celle qui atteint la surface, ruisselle, s'infiltré et humidifie le sol.

Afin de définir la notion de contenu en eau des sols et de comprendre la nécessité de sa connaissance, les principaux constituants des sols sont présentés.

I.1.1.1. Principaux constituants des sols

Au sens de la pédologie (Duchaufour, 2001), le sol, formé d'une fraction minérale et d'une fraction organique (humus), se définit comme une pellicule d'altération recouvrant une roche. Il représente la couche superficielle de la croûte terrestre (lithosphère), obtenue par transformation de la roche mère, au moyen de mécanismes physiques et chimiques, et par enrichissement de matières organiques issues d'êtres vivants végétaux, animaux et microbiens.

I.1.1.1.1. Fraction minérale

La fraction minérale du sol, représente l'ensemble des produits de la dégradation physique et chimique de la roche mère. On distingue les minéraux primaires, qui sont hérités de la roche mère, et les minéraux secondaires qui résultent de l'altération des minéraux primaires.

Les minéraux primaires sont les minéraux silicatés qui sont plus ou moins altérables. On trouve, le quartz (silice cristallisée) qui est souvent considéré comme inaltérable, et qui est l'élément le plus abondant dans la plupart des roches et des sols ; les silicates, composés d'un assemblage de tétraèdres (silice) et d'octaèdres (alumine), qui peuvent être peu ou très altérables suivant leur structure ; et enfin, éventuellement des minéraux des roches sédimentaires qui jouent un rôle important dans la fertilité du sol.

Parmi les minéraux secondaires, on trouve les argiles qui sont des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés, présentant une structure feuilletée ou fibreuse expliquant réciproquement leurs plasticités et leurs qualités d'absorption. On trouve également les oxyhydroxydes de fer, d'aluminium, de manganèse et de silice, qui restent libres et s'intègrent peu aux feuillets des argiles en assurant les liaisons entre argiles et humus.

La structure du sol est liée au mode d'assemblage des particules le constituant (cf. Annexe I). Les différents minéraux composant le sol sont alors classés suivant leur granulométrie qui permet d'étudier la répartition des minéraux par catégorie de taille (Duchaufour, 2001). On distingue :

- le sable : particule de 2 mm à 50 μm ;
- le limon : particule de 50 μm à 2 μm ;
- l'argile : fraction fine inférieure à 2 μm .

La majorité des minéraux primaires se trouvent donc dans la fraction des sables et des limons, et les minéraux secondaires représentent l'essentiel de la fraction fine. Ces différentes fractions permettent de déterminer la texture d'un sol (cf. Annexe I).

I.1.1.1.2. Fraction organique

La fraction organique du sol, se compose elle, de matière organique d'origines végétale et animale. La matière organique fraîche constitue la matière première de l'humus. Les molécules qui se décomposent, subissent soit un processus de minéralisation (c'est-à-dire se transforment en composés minéraux solubles ou gazeux) ; soit une humification (c'est-à-dire se renouvellent de façon complexe) pour former l'humus au sens strict (de couleur foncée).

I.1.1.2. L'eau et le sol

L'eau dans le sol ne représente qu'une infime part de l'eau douce (0,1 %), mais est indispensable à la continuité du cycle de l'eau ; à la fois par l'intermédiaire de l'évapotranspiration (au niveau des plantes et de la surface) et pour l'approvisionnement des nappes phréatiques.

I.1.1.2.1. Bilan hydrique

La réserve d'eau utile (cf. Annexe I) permet de déterminer les principaux termes du bilan hydrique du point de vue des sols. Sa variation est liée aux grandeurs mises en jeu dans ce bilan (cf. Figure 1). Le bilan hydrique consiste à comparer les apports et les pertes en eau, pour un lieu et une période donnés. Les apports d'eau sont obtenus par les précipitations, et les pertes sont essentiellement dues à la combinaison de l'évaporation et de la transpiration des plantes (évapotranspiration), au drainage (assèchement) et à l'infiltration.

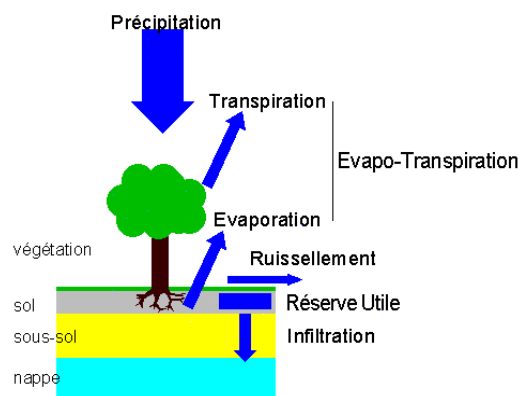


Figure 1 – Rôle de l'eau du sol dans le bilan hydrique d'après Beauchamp (2006).

Le suivi du bilan hydrique des sols est une opération complexe car l'évaluation de la teneur en eau du sol doit se faire de façon régulière. Pour cela, celle-ci est calculée le plus souvent à partir de données élémentaires du type pluviométrie, température, taux d'humidité de l'atmosphère, etc., fournies par les stations météorologiques.

L'évaluation du contenu en eau des sols est donc un élément important dans plusieurs domaines d'application et notamment pour la météorologie, l'hydrologie, et l'agronomie, afin de respectivement :

- améliorer l'estimation des bilans hydriques pour mieux quantifier les changements climatiques ;
- suivre et comprendre la croissance et la santé de la végétation, en déterminant la capacité au champ et le point de flétrissement du sol ;
- améliorer les modèles d'hydrologie afin de mieux définir par exemples la gestion des ressources en eau, ou les risques liés aux inondations.

I.1.1.2.2. Contenu en eau des sols (Soil Moisture Content)

La présence d'eau dans le sol se caractérise par l'humidité des sols, et sa teneur est évaluée par un rapport pondéral ou volumique. Pour la suite du document, nous définissons le terme **SMC** (**S**oil **M**oisture **C**ontent) pour remplacer le terme "contenu en eau des sols" défini par les deux grandeurs suivantes :

- la teneur en eau massique, ou humidité pondérale SMC_g exprimée en $g \cdot g^{-1}$, qui correspond au rapport de la masse d'eau sur la masse du sol (Haubrock, 2008a) :

$$SMC_g = \frac{M_{eau}}{M_{ech}} \quad (1)$$

- l'humidité volumique SMC_v , exprimée en $cm^3 \cdot cm^{-3}$, qui correspond au rapport du volume d'eau sur le volume de sol (Liu, 2002 ; Lobell, 2002) :

$$SMC_v = \frac{V_{eau}}{V_{ech}} \quad (2)$$

Dans la pratique, ces contenus en eau se déterminent en laboratoire par la pesée des échantillons de sols.

La masse de l'eau M_{eau} est obtenue au moyen de la masse M_{ech} de l'échantillon mesurée à un instant t et de la masse M_{sec} de l'échantillon sec obtenue généralement après 24h de séchage au four (Haubrock, 2008a). Ainsi, l'humidité pondérale SMC_g est déterminée par l'équation suivante :

$$SMC_g = \frac{M_{ech} - M_{sec}}{M_{ech}} \quad (3)$$

L'humidité volumique SMC_v se définit à partir de la masse et de la densité (masse volumique) de l'eau :

$$SMC_v = \frac{M_{ech} - M_{sec}}{d_{eau} V_{ech}} \quad (4)$$

En effet, le volume d'eau V_{eau} (cm^3) est défini par :

$$V_{eau} = \frac{M_{eau}}{d_{eau}} \quad (5)$$

où M_{eau} et d_{eau} représentent respectivement la masse (g) et la masse volumique ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) de l'eau.

En outre, le volume de l'échantillon de sol V_{ech} est également lié à sa masse M_{ech} et sa masse volumique d_{ech} (densité apparente) par la formule suivante :

$$V_{ech} = \frac{M_{ech}}{d_{ech}} \quad (6)$$

Ainsi, SMC_v est donc reliée à SMC_g (cf. équation 1) par la relation suivante :

$$SMC_v = \frac{M_{eau}}{M_{ech}} \times \frac{d_{ech}}{d_{eau}} = SMC_g \times \frac{d_{ech}}{d_{eau}} \quad (7)$$

Dans la littérature, le taux de teneur en eau des sols (SMC_g ou SMC_v) est souvent exprimé en pourcentage (%) de masse ou de volume suivant le cas considéré. La notation retenue pour la suite du document, afin de lever toute ambiguïté, est alors la suivante :

- "%_g" pour un pourcentage de SMC_g (en $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) ;
- "%_v" pour un pourcentage de SMC_v (en $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$).

I.1.2. Principales techniques de mesures du contenu en eau des sols

En prélevant des échantillons de sols sur le terrain, le SMC peut être déterminé à partir de deux méthodes indirectes (gravimétrique ou volumique, cf. §I.1.1.2.2). Ces méthodes sont très ponctuelles et longues à mettre en place mais se montrent utiles par exemples pour étalonner des méthodes d'estimation du SMC (Liu, 2003 ; Haubrock, 2008a), vérifier le comportement d'un sol d'intérêt à la variation du SMC, etc.

Des techniques de mesures directes (Douzals, 2000) ont également été mises en place et sont regroupées en deux catégories :

- des techniques géophysiques appelées in-situ ;
- des techniques de mesures par télédétection et plus précisément à partir de l'imagerie hyperspectrale à hautes résolutions spatiale et spectrale.

I.1.2.1. Techniques de mesures in-situ

Ces méthodes in-situ (Musy, 2005) utilisent des sondes de types nucléaire et diélectrique pour mesurer le SMC_v .

I.1.2.1.1. Sonde nucléaire

La mesure par sonde neutronique (Musy, 2005) (cf. Figure 2), repose sur les propriétés de réflexion que possèdent les molécules d'eau à l'égard d'un flux de neutrons, les masses de leurs noyaux étant très proches.

Une sonde à neutrons est composée principalement de deux parties : l'émetteur et le détecteur. Lorsque la sonde est positionnée dans le sol, jusqu'à 30 cm de profondeur, une émission de neutrons est effectuée par la source. Un compteur enregistre alors la quantité de neutrons réfléchiés par les atomes d'hydrogène. Ce nombre d'impulsions est converti en une teneur en eau par le biais d'une courbe d'étalonnage.

Cette technique a l'avantage de permettre des mesures rapides et répétées sur un site avec une bonne précision mais sont très ponctuelles et coûteuses à mettre en place. Ce caractère local rend difficile la prise en compte de la variabilité spatiale du SMC.

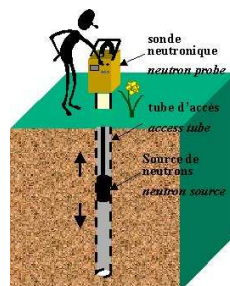


Figure 2 – Illustration d'une mesure de contenu en eau des sols avec la sonde à neutrons (*medhycos.mpl.ird.fr*).

I.1.2.1.2. Sonde diélectrique

La détermination de la teneur en eau par méthode diélectrique (Musy, 2005) s'effectue soit au moyen d'une sonde TDR (Time Domain Reflectometry) soit d'une sonde FDR (Frequency Domain Reflectometry) (cf. Figure 3), qui peuvent être installées jusqu'à une profondeur de l'ordre de 2 m. La mesure consiste, dans les deux cas, à déterminer la permittivité diélectrique du sol, qui dépend du SMC, en analysant le signal réfléchi par le sol.

La sonde TDR estime la permittivité par mesure du temps de retour d'une onde électromagnétique à très haute fréquence. C'est une méthode très précise, fiable, utilisable près de la surface d'un sol, et indépendante de la salinité. Cependant, elle est plus onéreuse que les méthodes directes, et des difficultés qui se répercutent sur la qualité des mesures peuvent survenir lors de l'insertion des tiges suivant la compacité du sol. Sa mesure locale est également une limite à son utilisation.

La sonde FDR estime la permittivité par la mesure de la fréquence de résonance d'une onde électromagnétique à haute fréquence. Cette mesure, est également précise et fiable mais moins onéreuse que celle effectuée avec la sonde TDR. Cependant, ce type d'acquisition est très sensible à l'espace entre le sol et la sonde ainsi qu'à la salinité, et nécessite un étalonnage par type de sol.

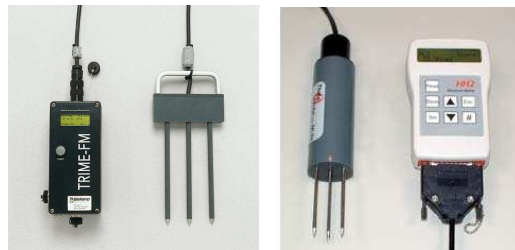


Figure 3 – Sondes diélectriques TDR (à gauche, www.eijkelkamp.nl) et FDR (à droite, www.candb.co.kr).

Finalement, les méthodes in-situ présentent comme principal avantage par rapport aux méthodes indirectes de pouvoir effectuer des acquisitions instantanées du SMC de façon continue, avec une précision de $\pm 2\%$. Cependant, elles sont limitées par une couverture spatiale réduite. Néanmoins, plusieurs sondes peuvent être réparties sur le terrain afin d'avoir une meilleure couverture spatiale, mais la zone couverte se limite à l'échelle du parcellaire.

I.1.2.2. Techniques de mesures par télédétection hyperspectrale à haute résolution spatiale

Les imageurs hyperspectraux existant réalisent le meilleur compromis entre haute résolution spectrale et haute résolution spatiale. Dans le cadre de nos travaux, les techniques hyperspectrales du domaine optique ($0,4 - 14 \mu\text{m}$) à haute résolution spatiale (résolutions métriques) sont abordées.

Dans cette partie, l'intérêt de l'imagerie hyperspectrale à haute résolution spatiale pour la caractérisation fine des sols et l'estimation de leur contenu en eau est présenté.

I.1.2.2.1. Description de l'imagerie hyperspectrale

Les images hyperspectrales délivrent donc à la fois une information spectrale et une information spatiale sous la forme d'un cube de données (cf. Figure 4), appelé hypercube, où les deux premières dimensions (x, y) de chaque pixel (élément de l'image) sont associées à l'information spatiale, et la troisième dimension représente la dépendance spectrale du pixel.

Les systèmes hyperspectraux qui produisent des images avec un grand nombre de bandes spectrales (100 à 200) étroites et contiguës ($\Delta\lambda/\lambda \sim 1\%$) permettent d'obtenir un spectre continu pour chaque pixel de l'image.

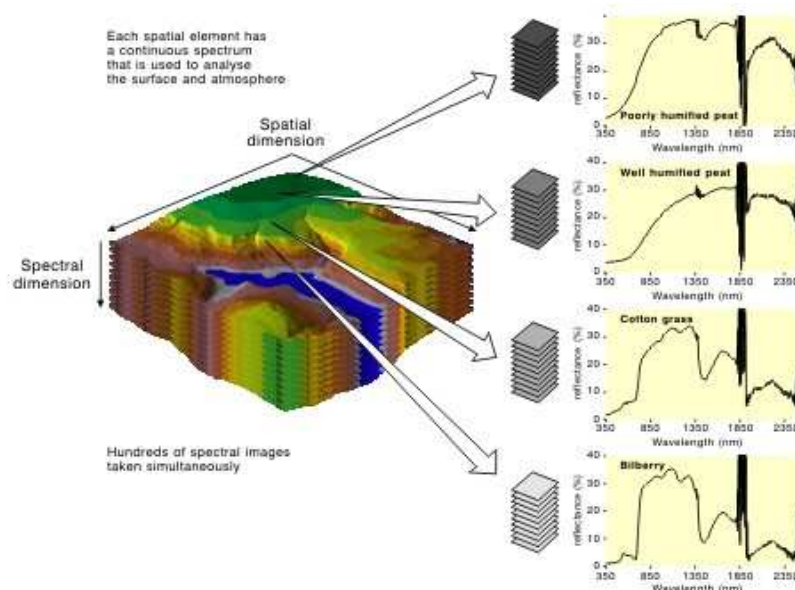


Figure 4 – Représentation d'une image hyperspectrale.

L'énergie reçue par le capteur est proportionnelle à la propriété optique du pixel observé qui a subi des perturbations spectrales dues à l'atmosphère.

Les principaux phénomènes atmosphériques perturbateurs sont l'absorption, l'émission et la diffusion dues à la présence de gaz et d'aérosols (cf. Figure 5). Les principaux gaz atmosphériques sont (Guyot, 1989) la vapeur d'eau (H_2O), l'ozone (O_3), l'oxygène (O_2), le gaz carbonique (CO_2) et le méthane (CH_4).

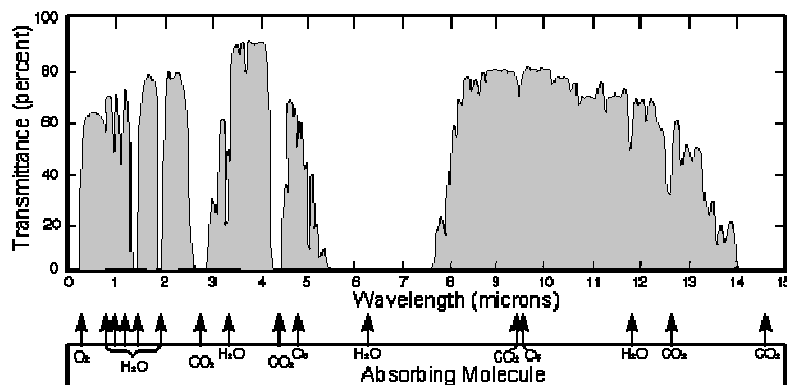


Figure 5 – Transmission atmosphérique sur le domaine 0,3 – 14 µm.

Afin de s'affranchir de ces effets, une correction atmosphérique est nécessaire au préalable afin d'extraire la propriété optique spectrale caractérisant le type et l'état du sol, et en particulier le contenu en eau.

I.1.2.2.2. Apport de l'imagerie hyperspectrale pour la caractérisation des sols nus

Le signal acquis par un instrument hyperspectral à haute résolution spatiale, corrigé des effets de l'atmosphère, correspond à une propriété optique caractéristique du type et de l'état de la surface visée (cf. Figure 4). Ainsi, pour les sols, l'analyse de ces signatures spectrales peut permettre de définir la présence et/ou l'abondance de certains paramètres physico chimiques (Ben Dor, 2009). Les raies d'absorption de ces paramètres étant très fines, la résolution des capteurs hyperspectraux est donc indispensable pour les séparer.

Des travaux ont montré l'intérêt de la technique hyperspectrale pour déterminer des propriétés intrinsèques aux sols comme la teneur en matière organique (Ben Dor, 2002, 2009) ou la teneur en argiles (Chabrilat, 2002, 2003). D'autres études ont également permis d'identifier certains minéraux présents dans les sols (Taylor, 2006 ; Whiting, 2005), de caractériser la salinité des sols pour étudier leur dégradation (Dehaan, 2003) ou encore de fournir des cartographies des propriétés physico chimiques des sols (Ben Dor, 2002). La plupart ont été réalisées à partir d'images provenant de capteurs hyperspectraux aéroportés, où la résolution spatiale est de l'ordre de 4 m, comme HyMap (Cocks, 1998), AVIRIS (Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer ; Green, 1998), ou DAIS (Digital Airborne Imaging Spectrometer, www.op.dlr.de/dais/).

I.1.2.2.3. Extraction de l'information de contenu en eau à partir de l'imagerie hyperspectrale

Des études ont été mises en place pour évaluer le contenu en eau des sols à partir de cette technologie (Whiting, 2005 ; Haubrock, 2008b). En effet, son évaluation permet notamment d'améliorer l'estimation des autres paramètres comme la teneur en argile par exemple (Whiting, 2005). La majorité de ces études se base sur la connaissance des propriétés optiques des sols acquises en laboratoire ou sur le terrain.

L'imagerie hyperspectrale fournit une information de contenu en eau au niveau de la couche superficielle des sols observés (le premier centimètre ; Haubrock, 2008b). Cette information est généralement comparée à des contenus en eau volumiques mesurés sur le terrain (par des sondes diélectriques) sur une profondeur de sol de 5 cm.

Haubrock *et al.* (2008b) ont mis en évidence que le SMC gravimétrique, évalué sur des échantillons de sols sableux en laboratoire, peut varier suivant la profondeur de sol (profondeur analysée jusqu'à 5 cm). Le SMC_g varie entre 0 et 5 %_g suivant la profondeur d'analyse et l'échantillon de sol considéré. Afin de prendre en compte cet écart entre les contenus en eau volumiques et les SMC gravimétriques, un coefficient de correction, pour ces types de sol, est appliqué aux valeurs de contenu en eau volumique.

I.1.3. Conclusions

Ce chapitre a permis de définir la notion d'humidité des sols et notamment celle de contenu en eau des sols (SMC).

Dans un deuxième temps, la description des principales techniques de mesures directes de l'humidité des sols, montre que :

- les techniques in-situ, offrant une bonne précision ($\pm 2\%$) sur la mesure de SMC, sont limitées en termes de couverture spatiale et de caractérisation de la variabilité ;
- l'imagerie hyperspectrale à haute résolution spatiale fournit une signature spectrale très détaillée dont le contenu en eau des sols peut être extrait (valeur associée au premier centimètre de profondeur). Les travaux existants dans la littérature ont prouvé l'intérêt de cette technique pour caractériser les propriétés physico-chimiques des sols.

Les principales méthodes existantes concernant l'estimation du contenu en eau des sols à partir de leurs signatures spectrales sont présentées dans le deuxième chapitre de cette partie.

Chapitre 2

Travaux existants sur l'évaluation de l'humidité des sols à partir de leurs propriétés optiques

Ce chapitre a pour objectif d'effectuer un bilan des principales méthodes existantes dans la littérature pour évaluer le SMC à partir des propriétés optiques des sols. L'utilisation de l'ensemble du domaine optique allant du domaine visible à l'infrarouge thermique sera analysée.

Dans un premier temps, l'influence du contenu en eau des sols sur la signature spectrale est abordée. Cette description permet d'introduire les méthodes existantes pour estimer le contenu en eau à partir des propriétés optiques.

Pour cela, le comportement spectral de l'eau liquide est rappelé afin d'identifier les principales bandes d'absorption de l'eau. Ensuite, les caractéristiques des propriétés optiques des sols sont décrites. Finalement, les études réalisées sur le comportement de la signature spectrale en réponse à l'humidité du sol, sont présentées.

Dans un second temps, les principales méthodes sur l'estimation du contenu en eau des sols à partir des propriétés optiques, sont exposées. Leurs performances et leurs limitations sont décrites sur le domaine optique (0,4 – 14 μm).

Enfin, un bilan de ces travaux est dressé afin de justifier la mise en place de notre étude.

I.2.1. Influence du contenu en eau des sols sur les propriétés optiques

Les signatures spectrales d'une surface sont décrites sur les domaines spectraux réflectif ($0,4 - 2,5 \mu\text{m}$) et IRT ($3 - 14 \mu\text{m}$).

I.2.1.1. Comportement spectral de l'eau liquide

L'eau liquide est constituée de plusieurs molécules d'eau, dont les liaisons interagissent avec la lumière, vibrent et produisent ainsi les bandes d'absorption spécifiques à la molécule d'eau. Les formes et les profondeurs des bandes d'absorption étant le résultat d'interactions intra et inter moléculaires.

Une vibration moléculaire se produit lorsque la molécule absorbe un quanta d'énergie de fréquence ν . Trois modes fondamentaux de vibration de la liaison hydroxyle (OH) sont présents dans la molécule d'eau H_2O (cf. Figure 6) :

- un mode de flexion (ou déformation) à $6,27 \mu\text{m}$ ($\nu_2 = 1595 \text{ cm}^{-1}$) ;
- un mode d'étirement symétrique à $2,73 \mu\text{m}$ ($\nu_1 = 3652 \text{ cm}^{-1}$) ;
- un mode d'étirement asymétrique à $2,66 \mu\text{m}$ ($\nu_3 = 3756 \text{ cm}^{-1}$).

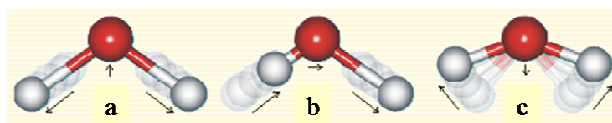


Figure 6 – Vibrations fondamentales de la molécule d'eau : étirement symétrique à $\nu_1 = 3652 \text{ cm}^{-1}$ (a), étirement asymétrique à $\nu_3 = 3756 \text{ cm}^{-1}$ (b) et flexion $\nu_2 = 1595 \text{ cm}^{-1}$ (c) (www.biinternet.com/~martin.chaplin/vibrat.htm).

Les processus d'absorption de la molécule d'eau sont basés sur les modes fondamentaux mais également sur des modes harmoniques (par exemple $2\nu_1$) et des combinaisons des modes fondamentaux (par exemple $\nu_1 + \nu_2$) et harmoniques (par exemple $2\nu_1 + \nu_2$).

Les harmoniques et les combinaisons de modes, sont en particulier observées dans le domaine spectral réflectif ($0,4 - 2,5 \mu\text{m}$; cf. Figure 7), où de fortes bandes d'absorption à $0,97 \mu\text{m}$, $1,2 \mu\text{m}$, $1,4 \mu\text{m}$ et $1,94 \mu\text{m}$ apparaissent comme le montre le coefficient d'absorption de l'eau liquide (cm^{-1}). La bande la plus intense se situe à $1,94 \mu\text{m}$ et indique la présence d'eau liquide dans un matériau, comme les minéraux et les sols. La bande à $1,4 \mu\text{m}$ correspond à une harmonique de la liaison hydroxyle (OH), et si elle apparaît seule sur la signature spectrale d'un matériau cela indique seulement la présence de liaisons hydroxyles causées par des molécules autres que celles de l'eau liquide. Enfin, les bandes à $1,2 \mu\text{m}$ et $0,97 \mu\text{m}$, plus faibles que les précédentes sont produites par d'autres combinaisons. Il existe également des bandes d'absorption plus faibles, situées à $0,74 \mu\text{m}$, $1,38 \mu\text{m}$ et $1,45 \mu\text{m}$. Les deux premières,

correspondent à la combinaison de modes fondamentaux. Pour la bande à 1,45 μm , l'absorption est causée par la combinaison de modes fondamentaux et d'une harmonique.

La connaissance de ces bandes d'absorption spécifiques de l'eau est donc utile pour étudier l'effet du contenu en eau sur la réponse spectrale des matériaux (minéraux et sols).

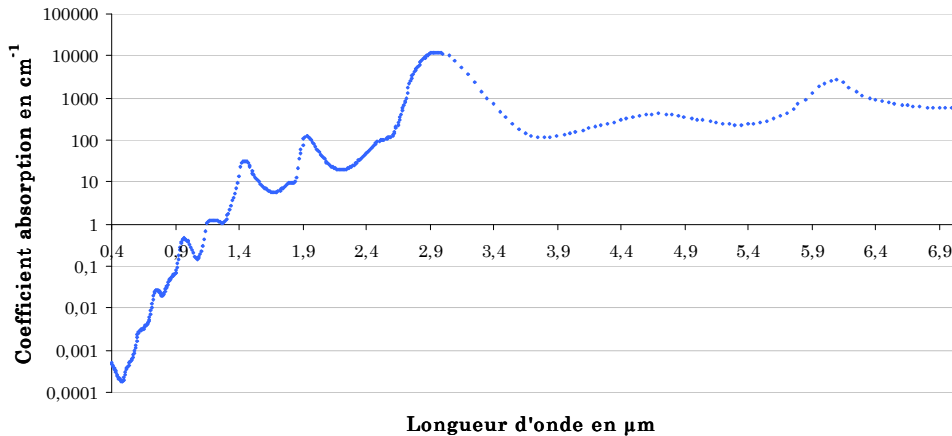


Figure 7 – Coefficient d'absorption de l'eau sur le domaine 0,4 – 7 μm .

I.2.1.2. Propriétés optiques des sols et contenu en eau

Le sol (cf. §I.1.1) est composé de minéraux. Le spectre du sol dépend donc des caractéristiques spectrales des différents minéraux qui le composent, ainsi que de certaines caractéristiques qui lui sont propres, comme la granulométrie, la rugosité, et le contenu en eau.

I.2.1.2.1. Absorptions spécifiques des minéraux

Les propriétés spectrales des minéraux constituant les sols, sont dues essentiellement à deux types de phénomènes physiques (Guyot, 1989 ; Clark, 1984) :

- des transitions électroniques : elles sont liées aux anions métalliques et produisent des bandes spectrales d'absorption larges et peu profondes, du domaine de l'ultraviolet (0,01 – 0,4 μm) au proche infrarouge (0,8 – 1,4 μm). Les bandes d'absorption associées sont alors décrites seulement dans le domaine réflectif ;
- des transitions vibratoires : elles sont dues aux modes de vibration des molécules donnant des bandes d'absorption très étroites mais souvent profondes. Les bandes d'absorption associées sont importantes dans le domaine réflectif pour les minéraux contenant de l'eau (H_2O), des ions hydroxyles (OH^-), des silicates (SiO_x) ou des carbonates (CO_3^{2-}), et dans le domaine IRT pour les minéraux possédant des silicates (SiO_x) ou des carbonates (CO_3^{2-}).

Domaine spectral réfléchif

Bien que les minéraux soient de natures très diverses (cf. §I.1.1), les transitions électroniques sont produites le plus souvent par la présence de fer, dû à un mécanisme de transfert de charge entre les atomes de fer et d'oxygène. La signature spectrale, dans les domaines du VIS (VISible ; 0,4 – 0,8 μm) et du NIR (Near InfraRed ; 0,8 – 1,4 μm), dépend de la présence des ions Fe^{2+} et Fe^{3+} . Les ions ferreux Fe^{2+} produisent une forte bande d'absorption à 1,1 μm et des bandes beaucoup plus faibles qui se situent entre 0,4 μm et 0,5 μm , et entre 1,8 μm et 1,9 μm . Quand aux ions ferriques Fe^{3+} , ils produisent deux fortes bandes d'absorption à 0,4 μm et 0,7 μm , ainsi que trois bandes plus faibles à 0,45 μm , 0,49 μm et 0,89 μm .

Les bandes d'absorption les plus communes dans le domaine spectral du SWIR (Short Wave InfraRed ; 1,4 – 2,5 μm) proviennent de la vibration des ions hydroxyles OH^- , qui font partie de la structure cristalline de nombreux minéraux. Le mode fondamental de vibration de l'ion hydroxyle se trouve à 2,8 μm , mais sa position exacte dépend de la position de l'ion dans le réseau cristallin. Le second harmonique apparaît à 1,4 μm , et dans certains cas son mode de vibration peut se combiner à d'autres modes pour donner deux bandes centrées à 2,2 μm et à 2,3 μm . Les carbonates (CO_3^{2-}), les nitrates (NO_3^-) et les sulfates (SO_4^{2-}) ont également des bandes caractéristiques qui apparaissent dans le SWIR entre 1,8 μm et 2,5 μm .

Pour résumer, les principales bandes d'absorption des minéraux dans le domaine réfléchif sont indiquées sur la Figure 8.

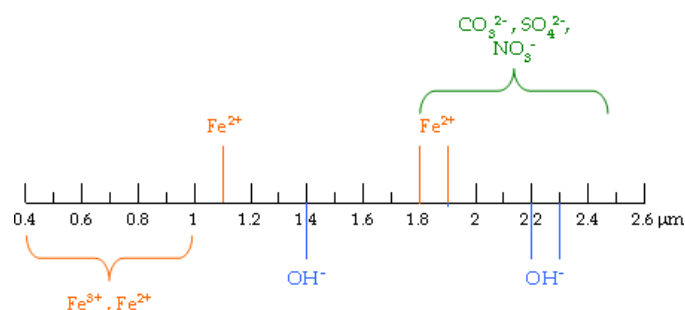


Figure 8 – Localisations des principales bandes d'absorption des minéraux dans le domaine réfléchif.

Domaine spectral IRT

Dans le domaine IRT (3 – 14 μm), Salisbury *et al.* (1992, 1994) ont effectué des mesures en laboratoire de signatures spectrales de minéraux afin de déterminer leurs principales bandes d'absorption (cf. Figure 9).

Dans le MWIR (Middle Wave InfraRed ; 3 – 5,5 μm ; Salisbury, 1994), ces bandes dues aux vibrations ioniques se trouvent à 3 μm , 3,5 μm , 4 μm , 4,5 μm et 4,7 μm , et sont respectivement dues aux liaisons hydrogène-carbone, aux carbonates (CO_3^{2-}) et à la silice (SiO_2).

Dans le LWIR (Long Wave InfraRed ; 8 – 14 μm ; Salisbury, 1992), la plupart des minéraux présente un minimum d'émissivité caractéristique, soit un maximum de réflectance. Ce minimum est connu sous le nom de phénomène Reststrahlen, et est dû aux transitions de

vibrations des principaux anions minéraux. Les silicates, les sulfates et les phosphates ont ce maximum de réflectance entre 9 μm et 10 μm , alors que les carbonates, les nitrites et les nitrates présentent généralement ce maximum à des longueurs d'onde plus courtes (entre 6 μm et 8,5 μm). Cependant des bandes secondaires peuvent exister, comme la bande associée aux carbonates à 11,3 μm . De plus, toutes les roches siliceuses présentent une large bande de Reststrahlen entre 8 μm et 14 μm dont la position exacte dépend de la teneur en silice (plus la teneur est grande, plus la bande se déplace vers les longueurs d'onde plus courtes).

Les principales bandes d'absorption des minéraux dans le domaine IRT sont indiquées sur la Figure 9.

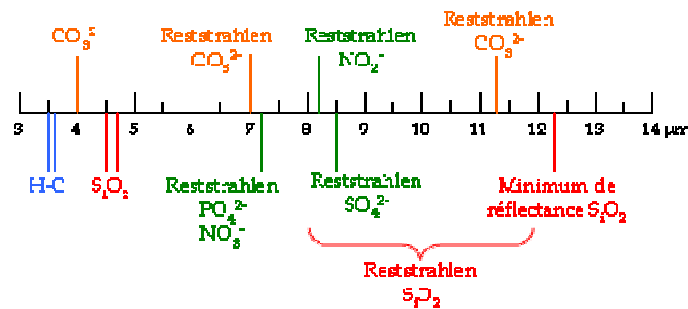


Figure 9 – Localisations des principales bandes d'absorption des minéraux dans le domaine IRT.

I.2.1.2.2. Comportement spectral des sols

Après avoir décrit les comportements spectraux des minéraux, on s'intéresse au comportement plus global de la signature spectrale au niveau du sol.

Domaine spectral réflectif

Dans le domaine du VIS, peu de bandes d'absorption sont présentes sur les spectres de sols nus. Ces bandes sont très larges et occasionnées notamment par les transitions électroniques du fer. Pour caractériser les principaux constituants des sols dans ce domaine spectral, une classification en fonction de la forme de la réflectance a été proposée par Courault *et al.* (1988) (cf. Figure 10, à gauche) :

- type 1 : courbe faiblement concave avec faible réflectance ;
- type 2 : courbe plus ou moins convexe avec une réflectance élevée ;
- type 3 : courbe concave puis convexe avec une réflectance plus ou moins élevée.

Le type 1 indique la présence de matières organiques en quantité non négligeable. En effet, la teneur en matière organique affecte énormément les propriétés optiques des sols lorsque celle-ci est supérieure à 2 %, et notamment dans le domaine 0,4 – 1,4 μm . Cette matière organique masque alors les bandes spectrales caractéristiques de minéraux comme le fer (Guyot, 1989). Le type 2 est caractéristique des sols riches en calcium mais pauvres en oxyde de fer. Le type 3 correspond aux sols riches en oxydes de fer.

Dans le proche infrarouge (0,8 – 2,5 μm), les bandes d'absorption (cf. §I.2.1.2.1) sont dues principalement à la présence de fer, d'eau, de groupement hydroxyle, de carbonates et de silicates. Une illustration de différents comportements spectraux rencontrés sur ce domaine est également représentée sur la Figure 10 (à droite).

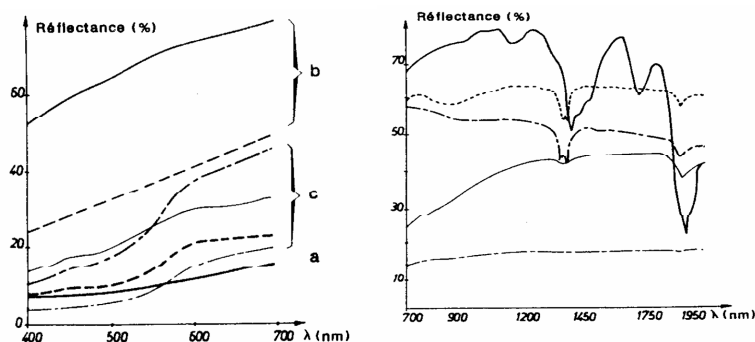


Figure 10 – Comportements spectraux du sol dans le VIS (à gauche) : type 1 (a), type 2 (b) et type 3 (c) ; et exemples de comportements dans le proche infrarouge (à droite), d'après Escadafal (1990).

Domaine spectral IRT

Dans le MWIR (Salisbury, 1994), le spectre de réflectance est caractérisé par une forme en "cloche" en l'absence de carbonates (cf. Figure 11, à gauche), et prend la forme de deux lobes dans le cas contraire (cf. Figure 11, au centre). De plus, les niveaux de réflectances sont les plus élevés du domaine IRT.

Dans le LWIR (Salisbury, 1992 ; Guyot, 1989) (cf. Figure 11, à droite), pour des sols riches en éléments sableux, les bandes Reststrahlen du quartz prédominent. A contrario, des sols très argileux ne présentent pas de minima d'émissivité.

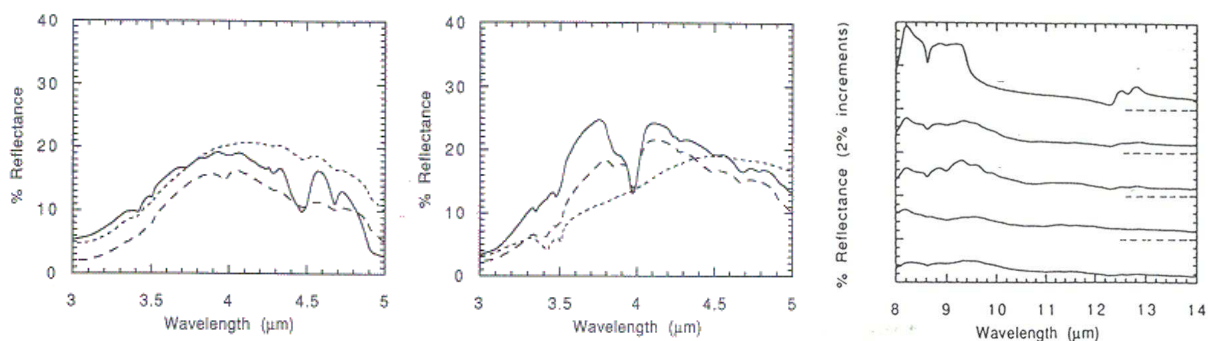


Figure 11 – Comportements spectraux de sols sur le MWIR, sans carbonates (à gauche) et avec carbonates (au centre) ; sur le LWIR (à droite, échelle variant de 0 à 2 % pour chaque spectre), d'après Salisbury *et al.* (1992, 1994).

Synthèse

La réflectance spectrale des sols résulte de la superposition des comportements spectraux de différents minéraux qui le composent du VIS au LWIR (cf. §I.2.1.2.2). Ils présentent également des caractéristiques spectrales propres aux phénomènes de diffusion et d'absorption des propriétés physiques intrinsèques au sol, comme la présence de matière organique, la

granulométrie, la rugosité et le contenu en eau. Dans le cadre de nos travaux, l'influence du contenu en eau du sol sur la signature spectrale est alors décrite.

I.2.1.2.3. Effet de l'eau sur les signatures spectrales des sols

L'influence du SMC sur l'évolution de la signature spectrale du sol (de la réflectance et de l'émissivité), a fait l'objet de diverses études en laboratoire. Une synthèse de ces mesures de propriétés optiques dépendantes du SMC est tout d'abord proposée. Ensuite, au moyen de ces jeux de mesures, le comportement global des propriétés optiques en fonction du SMC a été étudié, et est décrit par domaines spectraux.

Mesures de propriétés optiques de sols en fonction de l'humidité

Les principaux et les plus récents jeux de mesures effectués en laboratoire sont présentés de manière synthétique par ordre chronologique dans le Tableau 1. Cette description contient les informations concernant le nombre d'échantillons, le type de signature spectrale acquise, et le nombre de niveaux de contenu en eau atteint.

Référence	Nombre de sols	Nombre de SMC	Type de SMC	Propriétés optiques/Spectromètre
Liu (2002)	10	12 - 18	SMC_r en $g \cdot cm^{-3}$	Réflectance bidirectionnelle/ASD
Liu (2003)	18	-	SMC_r en $m^3 \cdot m^{-3}$	Réflectance bidirectionnelle/ASD
Lobell (2002)	4	7	SMC_r en $g \cdot cm^{-3}$	Réflectance bidirectionnelle/ASD
Bryant (2003)	3	9	SMC_r en $\%v$	Réflectance bidirectionnelle/ASD
Whiting (2004)	7	11	SMC_g en $g \cdot g^{-1}$	Réflectance directionnelle-hémisphérique/CARY5E
Haubrock (2008a)	11	< 20	SMC_g en $\%g$	Réflectance bidirectionnelle/ASD
Mira (2007a)	6	-	SMC_g en $\%g$	Emissivité/CIMEL

Tableau 1 – Principales caractéristiques des jeux de mesures en laboratoire de propriétés optiques dépendantes du SMC dans les domaines spectraux réflectif et IRT (le symbole "-" indique une absence d'information).

Dans le domaine réflectif, la majorité des réflectances spectrales sont acquises au moyen d'un spectroradiomètre portable de marque ASD (Analytical Spectral Device, www.asdi.com). Seuls les travaux de Whiting *et al.* (2004) présentent des réflectances spectrales directionnelles hémisphériques (cf. Annexe III) mesurées au moyen d'un spectrophotomètre de marque Varian Cary 5E (www.varianinc.com).

Dans le domaine spectral IRT, la propriété optique généralement étudiée est l'émissivité spectrale. Le principal jeu de mesures de ce domaine spectral a été établi par Mira *et al.* (2007a) sur six échantillons de sol. Ils ont effectué des mesures de spectres d'émissivité sur le domaine du LWIR (8 – 14 μm) avec un radiomètre infrarouge de marque CIMEL (www.cimel.fr).

Influence du contenu en eau des sols sur les mesures de propriétés optiques

L'influence de l'humidité sur les propriétés optiques des sols a été étudiée en se basant sur les jeux de mesures décrits précédemment. La plage de variation des niveaux de SMC dépend du type de sol. Les niveaux de SMC sont considérés faibles ou élevés lorsque leurs valeurs sont en moyenne respectivement inférieures ou supérieures à $0,4 \text{ g.cm}^{-3}$ (Liu, 2002), correspondant à $0,3 \text{ g.g}^{-1}$ si l'on considère une densité apparente de sol de $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$.

Domaine spectral réflectif

D'après Liu *et al.* (2002), les premiers travaux sur le sujet ont débutés dans les années 20 (Angstrom, 1925), et ont montré que le niveau de réflectance diminue lorsque l'échantillon de sol est humidifié, du fait du changement d'indice de réfraction. En effet, un sol se compose d'un ensemble de microparticules provenant de différents minéraux, et de cavités d'air qui se remplissent d'eau lorsque le SMC augmente (cf. Annexe I). Cette théorie a été confirmée par des travaux (Planet, 1970 ; Stoner, 1980 ; Bedidi, 1992) qui ont également mis en évidence la modification de la forme du spectre avec l'humidité, notamment dans les domaines spectraux du NIR ($0,8 - 1,4 \mu\text{m}$) et du SWIR ($1,4 - 2,5 \mu\text{m}$). Toutes ces analyses ont été réalisées pour des niveaux de SMC bas.

Des expérimentations ont ensuite été menées pour des niveaux de SMC élevés, et ont montré que la relation s'inverse, c'est-à-dire que la réflectance augmente lorsque le SMC augmente (Neema, 1987).

Un tel comportement (cf. Figure 12) a été confirmé par Liu *et al.* (2002). Ces derniers ont mis en évidence que la variation de la réflectance spectrale en fonction de l'humidité du sol (ici SMC_v en g.cm^{-3}) dépend bien du niveau de ce taux d'humidité (bas ou élevé), et que les variations les plus prononcées se situent notamment au niveau des pics d'absorption de l'eau à $1,45 \mu\text{m}$ et $1,94 \mu\text{m}$. Le point critique, c'est-à-dire la valeur de SMC où la relation s'inverse, dépend fortement du type de sol mais également de la longueur d'onde.

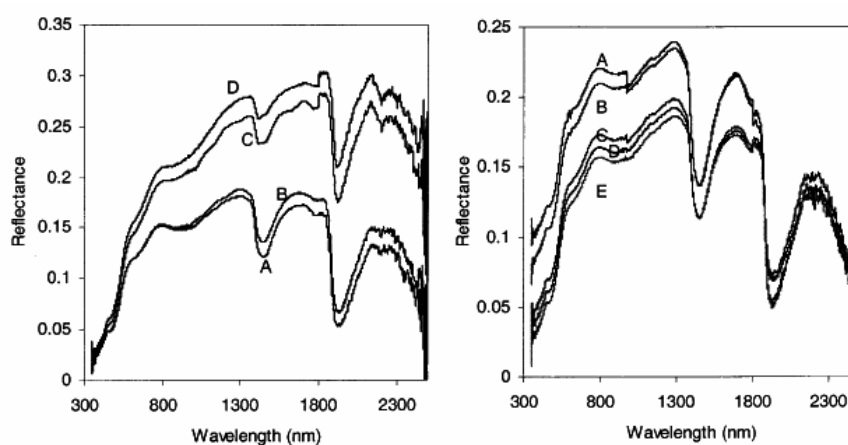


Figure 12 – Réflectances spectrales d'un sol acquises pour des humidités volumiques (g.cm^{-3}) de niveaux bas (à gauche, A : 0,32 ; B : 0,25 ; C : 0,14 ; D : 0,07) et élevés (à droite, A : 0,58 ; B : 0,56 ; C : 0,52 ; D : 0,5 ; E : 0,48), d'après Liu *et al.* (2002).

Aux courtes longueurs d'onde (inférieures à $1,4\ \mu\text{m}$), la variation de la valeur de réflectance avec l'humidité est beaucoup plus rapide que pour les longueurs d'onde situées dans le SWIR, où l'absorption de l'eau joue un rôle important (Liu, 2002). Plus précisément, à partir du point critique, le niveau de réflectance va augmenter fortement pour les courtes longueurs d'onde, et plus faiblement pour les plus grandes longueurs d'onde (cf. Figure 13).

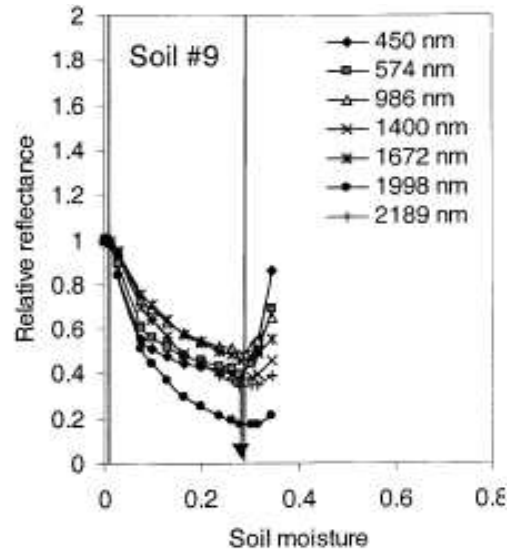


Figure 13 – Réflectance relative en fonction de l'humidité volumique ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) pour sept longueurs d'onde, d'après Liu *et al.* (2002).

D'après Liu *et al.* (2002, 2003), ce phénomène de point critique pourrait s'expliquer par la modification des phénomènes de diffusion à l'intérieur du sol, à cause de la distribution de l'eau entre les pores et autour des particules, lorsque ce niveau d'humidité est atteint. Ce point critique correspondrait à la capacité au champ du sol, c'est-à-dire à la teneur en eau maximale que le sol peut retenir (cf. Annexe I).

D'autres jeux de mesures confirment ces phénomènes (Lobell, 2002 ; Whiting, 2004 ; Haubrock, 2008a).

Domaine spectral IRT

Les études sur ce domaine spectral sont limitées au domaine du LWIR ($8 - 14\ \mu\text{m}$).

Van Bavel *et al.* (1976) ont montré que l'émissivité augmente avec le SMC. D'autres mesures ont montré que cette augmentation dépend de la structure du sol (Chen, 1989).

De plus, Mira *et al.* (2007a) ont montré que l'émissivité spectrale du sol peut augmenter de 1,7 % à 16 % lorsque le contenu en eau augmente, et notamment dans la région $8,2 - 9,2\ \mu\text{m}$ (bande 4 du radiomètre CIMEL).

I.2.2. Méthodes d'estimation du contenu en eau des sols basées sur les propriétés optiques

Dans cette partie, les principales approches développées pour estimer le contenu en eau des sols à partir de la signature spectrale dans le domaine optique (0,4 – 14 μm) sont décrites. Les avantages et les limitations de ces méthodes sont présentés. On distingue deux catégories d'approches :

- méthodes localisées : approches exploitant des bandes spectrales particulières ;
- méthodes globales : approches exploitant la forme et/ou le niveau des spectres ;

I.2.2.1. Méthodes localisées

Des méthodes localisées ont été mises en place à partir de la réflectance spectrale dans le domaine réflectif (0,4 – 2,5 μm), et de l'émissivité spectrale dans le domaine IRT (3 – 14 μm).

I.2.2.1.1. Domaine réflectif

Deux méthodes se dégagent de la littérature : les méthodes analytiques (Liu, 2003) et les indices spectraux définis pour les sols nus.

Méthodes analytiques de Liu et al. (2003)

Liu *et al.* (2003) ont mis en place deux méthodes analytiques :

- une approche dérivative, qui est une application de la méthode des différences finies sur la réflectance spectrale ;
- une approche par différence, qui s'appuie sur la différence de réflectance spectrale à deux longueurs d'onde données.

La moitié des échantillons de sols mesurés en laboratoire (cf. §I.2.1.2.3) a été utilisée pour étalonner les relations liant le SMC aux grandeurs introduites par les deux approches, et l'autre moitié pour évaluer les performances de la méthode proposée.

Approche dérivative

L'approche dérivative (Liu, 2003) a été développée pour minimiser les effets de certains paramètres notamment ceux de l'atmosphère. Ces paramètres pouvant impacter autant la réflectance que le SMC, ils sont par conséquent susceptibles d'induire un biais dans l'analyse du lien entre les deux. Cette approche consiste à résoudre l'équation suivante (cf. équation 8) :

$$\frac{d\rho(SMC_v, \lambda)}{d\lambda} \approx \frac{\rho(SMC_v, \lambda_{i+1}) - \rho(SMC_v, \lambda_i)}{\lambda_{i+1} - \lambda_i} = \frac{\Delta\rho(\lambda_i, \lambda_{i+1})}{\Delta\lambda} \quad (8)$$

où λ_i et λ_{i+1} sont deux longueurs d'onde consécutives.

La résolution de ces équations a ainsi permis de relier les dérivées des réflectances spectrales à l'humidité de surface (cf. équation 9) :

$$SMC_v = a(\lambda) + b(\lambda)\Delta\rho(\lambda_i, \lambda_{i+1}) \quad (9)$$

où $a(\lambda)$ et $b(\lambda)$ sont des paramètres à déterminer.

Cette équation permet d'estimer le SMC_v avec une valeur $RMSE$ (Root Mean Square Error, cf. Annexe II) de $0,04 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (à l'étalonnage) et $0,08 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (à l'évaluation) pour le couple de longueurs d'onde suivant : $1,834 \mu\text{m}$ et $1,836 \mu\text{m}$.

Les bandes spectrales conduisant aux meilleures performances sont en dehors des bandes d'absorption de la vapeur d'eau. Cette méthode peut être appliquée sur des données de télédétection.

Approche par différence

Une approche par différence a également été mise en place pour déterminer le couple de longueurs d'onde le plus adapté pour estimer le SMC (Liu, 2003). Son principe est basé sur la détermination de la différence des réflectances spectrales à deux longueurs d'onde données, consécutives ou non (cf. équation 10) :

$$\Delta\rho(\lambda_i, \lambda_j) = \rho(\lambda_j) - \rho(\lambda_i) \quad (10)$$

où λ_i et λ_j sont deux longueurs d'onde consécutives ou non.

Le contenu en eau volumique est alors estimé à partir de ces différences spectrales par l'équation suivante :

$$SMC_v = a(\lambda_i, \lambda_j) + b(\lambda_i, \lambda_j)\Delta\rho(\lambda_i, \lambda_j) \quad (11)$$

où $a(\lambda)$ et $b(\lambda)$ sont des paramètres à déterminer.

Les résultats obtenus par Liu *et al.* (2003), montrent que dans les domaines du VIS et du NIR, les performances d'estimation de l'humidité des sols sont faibles. La meilleure estimation du SMC par cette approche est obtenue pour le couple de longueurs d'onde suivant : $2,062 \mu\text{m}$ et $2,25 \mu\text{m}$. Les performances sont équivalentes à celles obtenues avec la méthode par différence.

Indices spectraux adaptés aux sols nus

L'indice spectral s'exprime selon un ou plusieurs intervalles de longueurs d'onde et est associée à une variable thématique (humidité, LAI, etc.). On définira comme indice idéal celui qui présente à la fois : une corrélation et une sensibilité élevées au phénomène que l'on souhaite décrire, et une faible dépendance aux autres facteurs qui peuvent être influents (atmosphère, éclairage, sol, etc.).

La majorité des indices spectraux développés à ce jour (cf. Annexe IV) a pour objectif de fournir des informations sur les propriétés biophysiques de la végétation (LAI, concentration de chlorophylle, masse des feuilles, contenues en eau, etc.) ou du sol. Pour une meilleure sensibilité à la propriété étudiée, certains indices sont développés de façon à réduire les effets :

- du sol nu pour minimiser sa contribution par rapport à la végétation ;
- et/ou de l'atmosphère pour minimiser les effets perturbateurs liés aux phénomènes d'absorption et de diffusion dans l'atmosphère, en exploitant les bandes spectrales associés à une fenêtre atmosphérique.

Certains de ces indices peuvent être utiles pour décrire le contenu en eau des sols. Les indices spectraux trouvés dans la littérature pour caractériser l'humidité des sols sont énoncés ci-après. Leurs formulations complètes sont disponibles en Annexe IV.

Bryant *et al.* (2003) ont étudié la détection de l'humidité de surface des sols au moyen de l'indice WISOIL (Whalley, 1991). WISOIL est un rapport spectral qui exploite les bandes 1,3 μm et 1,45 μm . Les performances de cet indice ont été évaluées sur des mesures en laboratoire (cf. §I.2.1.2.3), et pour les échantillons étudiés, l'indice WISOIL est sensible au SMC_g , avec un coefficient de détermination (cf. Annexe II) R^2 moyen de 87 %.

Par la suite, d'autres indices ont été développés (Palacios, 2005 ; Khanna, 2007) pour une application relative au sol nu et à la végétation. Ils exploitent la relation au niveau des longueurs d'onde des bandes 2 (0,841 – 0,876 μm), 5 (1,230 – 1,250 μm) et 6 (1,628 – 1,652 μm) du capteur MODIS. Ces indices basés sur des angles extraits des signatures spectrales sont les suivants : SANI (Shortwave Angle Normalized Index), SASI (Shortwave Angle Slope Index) et ANIR (Angle at NIR). Ces indices sont évalués sur des mesures en laboratoire (Whiting, 2004) et l'indice SASI (exprimé en radians), défini comme le produit d'un angle β situé à la longueur d'onde 1,24 μm et de la différence des réflectances sur les bandes 2 et 6 (Khanna, 2007), fournit la meilleure corrélation avec l'humidité du sol (R^2 de 85 %).

Récemment, l'indice NSMI (Normalized Soil Moisture Index ; Haubrock, 2008a) a été développé. Son objectif est d'utiliser des caractéristiques spectrales robustes à des phénomènes physiques connus comme l'absorption par l'atmosphère et d'être adapté à l'imagerie hyperspectrale. Il s'exprime comme la différence normalisée des réflectances associées à deux bandes spectrales (cf. équation 12) :

$$\frac{\rho[\lambda_i] - \rho[\lambda_j]}{\rho[\lambda_i] + \rho[\lambda_j]} \quad (12)$$

Le choix des longueurs d'onde pour la définition de cet indice est évalué à partir d'une méthode de corrélation. Cette méthode consiste tout d'abord à calculer la différence normalisée pour tous les couples de longueurs d'onde (λ_i, λ_j) sur le domaine 0,4 – 2,5 μm . Ensuite, une régression linéaire entre la valeur de l'indice et le SMC_g est établie. Le coefficient de

détermination est alors représenté sur un graphique en fonction de tous les couples de longueurs d'onde (λ_x, λ_y) de façon matricielle (cf. Figure 14).

Le couple de longueur d'onde qui définit finalement l'indice NSMI, est déduit de la représentation matricielle en tenant compte de trois bandes d'absorption de la vapeur d'eau atmosphérique (1,35 – 1,42 μm , 1,8 – 1,95 μm et 2,45 – 2,5 μm). Ainsi, les longueurs d'ondes retenues pour définir l'indice NSMI sont les suivantes : $\lambda_x = 1,8 \mu\text{m}$ et $\lambda_y = 2,119 \mu\text{m}$.

Les performances de NSMI ont été validées à partir de données acquises avec l'instrument hyperspectral aéroporté HyMap (Haubrock, 2008b). Une bonne corrélation (R^2 de 82 %) est établie entre le SMC estimé par NSMI, et le SMC mesuré sur le terrain au moment de l'acquisition des images. L'indice est étalonné au préalable en laboratoire sur des échantillons du sol prélevé sur le terrain. Néanmoins, il existe une limitation à cette approche (Ben-Dor, 2009) : l'apparition d'un seuil d'estimation du SMC_g , qui se situe à 32 %_g et qui correspond au point critique d'humidité (cf. §I.2.1.2.3). Au-delà de ce seuil, l'indice NSMI est moins bien corrélé au contenu en eau des sols, du fait de changement de comportement de la signature spectrale.

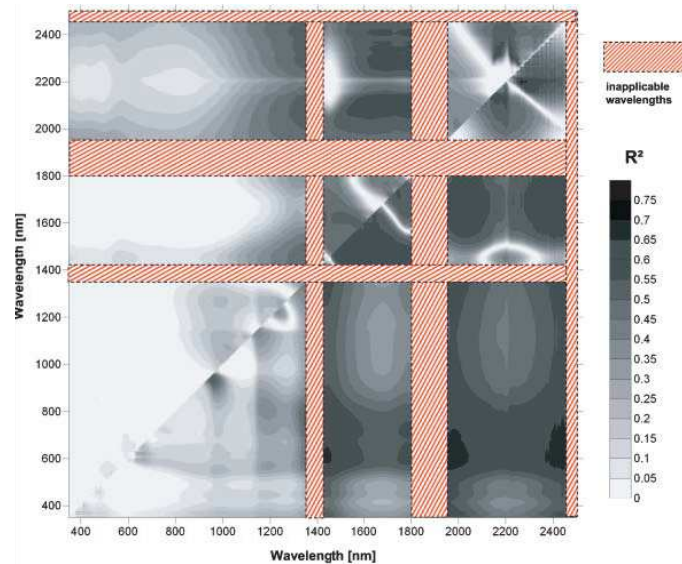


Figure 14 – Coefficients de détermination de la régression linéaire entre le SMC_g et NSMI, pour deux types de sols (partie supérieure et inférieure de la première bissectrice de la matrice), d'après Haubrock *et al.* (2008a).

I.2.2.1.2. Domaine IRT

Dans le domaine spectral du MWIR au LWIR, la plupart des approches d'estimation de l'humidité du sol est basée sur les températures de surface évaluées à partir des données de télédétection ou mesurées in-situ.

Il existe peu de travaux utilisant l'émissivité spectrale pour caractériser le SMC, et généralement ces travaux exploitent seulement le domaine spectral du LWIR (8 – 14 μm). En effet, plusieurs auteurs (Galantowicz, 2000 ; Burke, 2003 ; Salisbury, 1992) ont montré que les variations de l'émissivité avec le SMC sont les plus significatives sur ce domaine spectral.

Urai (1997) a analysé l'évolution des rapports d'émissivité spectrale dans les bandes IRT de l'instrument satellitaire multispectral ASTER (8,3 μm et 11,3 μm) et montre une augmentation d'environ 3 % lorsque le SMC_g passe de 0 à 2 %.

Mira *et al.* (2007a, 2007b) ont ensuite proposé, pour différents types de sols dont les signatures spectrales ont été mesurées en laboratoire (cf. §I.2.1.2.3), une analyse la dépendance de l'émissivité au SMC_g . Les canaux spectraux (dépendants de l'instrument de mesure) exploités sont les suivants :

- une large bande : 8 – 14 μm ;
- trois bandes étroites : 8,2 – 9,2 μm ; 10,5 – 11,5 μm et 11,5 – 12,5 μm .

En se basant sur les travaux de Urai *et al.* (1997), Mira *et al.* (2007b) ont analysé deux rapports spectraux, définis ci-après, utilisant deux canaux spectraux du CIMEL :

$$\frac{\varepsilon[8,2-9,2\mu\text{m}]}{\varepsilon[10,5-12,5\mu\text{m}]} \quad (13)$$

$$\frac{\varepsilon[10,5-11,5\mu\text{m}]}{\varepsilon[11,5-12,5\mu\text{m}]} \quad (14)$$

Cette étude montre que, de façon générale, les rapports spectraux d'émissivité diminuent lorsque l'humidité augmente. Le rapport spectral, représenté par l'équation 13, semble être un bon indicateur de ce comportement pour les sols de type sableux, et moins performant pour d'autres types de sols.

I.2.2.2. Méthodes globales

Initialement, les méthodes globales ont été mises en place pour étudier le comportement de la signature spectrale en fonction du SMC. Trois méthodes principales se distinguent dans le domaine réflectif : l'approche relative de Liu *et al.* (2002), l'approche au moyen d'une loi exponentielle de Lobell *et al.* (2002), et le modèle appelé "Soil Moisture Gaussian Model" de Whiting *et al.* (2004).

Méthode relative de Liu et al. (2002)

Liu *et al.* (2002) ont débuté l'analyse de la relation entre le SMC et la réflectance spectrale au moyen d'une approche dite relative appliquée sur les données acquises en laboratoire (cf. §I.2.1.2.3). Cette approche consiste à normaliser la réflectance spectrale du sol humide par celle du sol sec et à relier cette grandeur au contenu en eau du sol au moyen d'une loi empirique.

Liu *et al.* (2002) ont tout d'abord montré que la relation entre ces deux grandeurs dépend du type de sol et du niveau de SMC étudié. Ensuite, en se basant sur des relations linéaire et logarithmique, ils ont mis en évidence les résultats suivants :

- les longueurs d'onde du domaine spectral SWIR, où se situent les pics d'absorption de l'eau les plus importants, semblent les mieux adaptées pour estimer de faible SMC_v avec un $RMSE$ de l'ordre de $0,04 \text{ g.cm}^{-3}$;
- les longueurs d'onde du VIS au NIR, où la variation de la réflectance en fonction de l'humidité est très rapide, semblent les mieux adaptées à l'estimation de fort SMC_v où le $RMSE$ est de l'ordre de $0,08 \text{ g.cm}^{-3}$.

Finalement, cette approche relative est considérée comme difficile à mettre en œuvre car elle apparaît sensible au type de sol et nécessite la connaissance de la réflectance de l'échantillon sec qui n'est pas toujours disponible. La bande spectrale à $1,944 \mu\text{m}$ offre la meilleure performance d'estimation de l'humidité mais correspond à une bande d'absorption de la vapeur d'eau de l'atmosphère (cf. Figure 5, §I.1.2.2.1), qui ne peut donc être utilisée en télédétection ou qui nécessite la mesure précise du contenu en vapeur d'eau pour être exploitée.

Modèle de Lobell et al. (2002)

Muller *et al.* (2001) ont mis en évidence l'existence d'une relation empirique de forme exponentielle liant le SMC et la réflectance spectrale pour une longueur d'onde donnée. Ce modèle a ensuite été amélioré par Lobell *et al.* (2002) à partir de réflectances spectrales acquises en laboratoire. Son équation est la suivante :

$$\rho(\lambda) = \rho_{sat}(\lambda) + (\rho_{sec}(\lambda) - \rho_{sat}(\lambda)) \cdot \exp(-c(\lambda) \cdot SMC_v) \quad (15)$$

où ρ_{sat} et ρ_{sec} sont respectivement les réflectances spectrales du sol saturé en eau et sec ; c est un coefficient qui traduit le changement d'humidité et SMC_v est le contenu en eau volumique.

A partir de cette relation, ils ont montré que la région du SWIR est la mieux adaptée pour caractériser le contenu en eau à partir de la réflectance spectrale. En effet, la réflectance spectrale relative au domaine SWIR reste sensible à l'humidité pour des valeurs de SMC_v supérieure à 50 %, tandis que la réflectance du VIS sature pour des SMC_v proches de 20 %. En outre, l'utilisation du degré de saturation du sol (rapport du volume d'eau sur le volume total des pores du sol) permet de généraliser le modèle, c'est-à-dire de diminuer l'impact du type de sol.

Cependant, pour avoir accès à l'information de degré de saturation du sol, il est nécessaire d'effectuer des mesures de densité sur le terrain. Par conséquent, ce modèle exponentiel est limité car il n'est pas aisément généralisable à tout type de sol et nécessite la connaissance a priori des réflectances spectrales du sol sec et saturé.

Modèle appelé "Soil Moisture Gaussian Model"

Des travaux ont été effectués (Whiting, 2004, 2005) pour déterminer le SMC à partir d'un modèle utilisant une fonction de gaussienne inverse. Ce modèle, appelé SMGM (Soil Moisture Gaussian Model), a pour objectif d'évaluer le SMC à partir des paramètres d'une gaussienne inverse ajustée au spectre sur le domaine spectral $1,8 - 2,8 \mu\text{m}$.

La méthode consiste, dans un premier temps, à représenter la forme générale d'un spectre de réflectance sur tout le domaine réflectif. Pour cela, un modèle d'enveloppe convexe est appliqué sur le logarithme normalisé de la réflectance en utilisant une interpolation par triangulation de Delaunay (cf. Figure 15, à gauche). Ensuite, les points de l'enveloppe convexe sont utilisés pour ajuster au spectre une gaussienne inverse sur le domaine 1,8 – 2,8 μm (cf. Figure 15, à droite). Les paramètres de la gaussienne inverse (aire et distance à mi-hauteur) sont alors utilisés pour évaluer l'humidité. La courbe représentant le contenu en eau en fonction de l'un de ces paramètres (aire et distance à mi-hauteur) est ensuite analysée par régression linéaire.

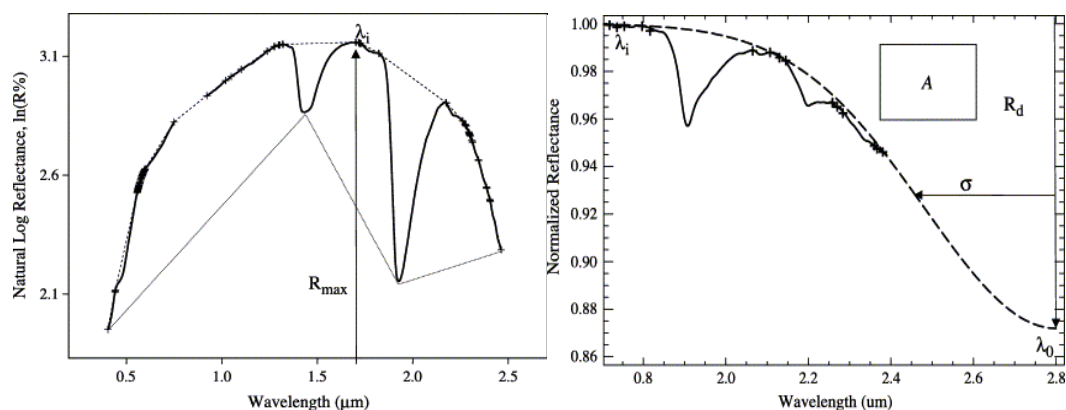


Figure 15 – Modèle d'enveloppe convexe appliqué sur un spectre de réflectance (à gauche), et modèle SMGM (à droite), d'après Whiting *et al.* (2004).

Ce modèle a été validé sur un jeu de mesure de laboratoire (Whiting, 2004), et le critère aire de la gaussienne inverse est le meilleur estimateur du SMC_g avec un R^2 de 94 % et une valeur de $RMSE$ moyenne de $0,027 \text{ g.g}^{-1}$ (Ben-Dor, 2009). Cependant, cette étude montre que cette approche est également applicable jusqu'à une certaine valeur seuil du contenu en eau (valeur du point critique) qui est de $0,32 \text{ g.g}^{-1}$.

Enfin, Whiting *et al.* (2005) ont appliqué le SMGM sur des données acquises avec les imageurs hyperspectraux aéroportés AVIRIS et HyMap. Ces travaux ont été mis en place afin d'améliorer la détection d'abondances de constituants dans les sols, comme l'argile ou les carbonates. Au préalable, des échantillons de sols prélevés sur le terrain sont utilisés en laboratoire pour définir la loi du SMGM avec le SMC, et les résultats montrent que la méthode SMGM permet bien l'amélioration de l'estimation du contenu en argile des sols (objectif initial).

I.2.2.3. Synthèse

A présent, afin de justifier l'existence de nos travaux, un bilan des performances et des limitations des méthodes existantes est proposé par domaine spectral.

I.2.2.3.1. Domaine réflectif

Le modèle exponentiel de Lobell *et al.* (2002) et les approches de Liu *et al.* (2002, 2003), montrent que l'estimation de l'humidité est la plus performante sur la bande spectrale du SWIR

(1,4 – 2,5 μm). Ces méthodes sont efficaces pour l'estimation du SMC dont la valeur est proche des conditions expérimentales de définition du modèle, mais présentent des difficultés lorsque ces modèles sont appliqués pour des conditions différentes. Ceci semble lié au fait que les caractéristiques spectrales du sol dépendent des propriétés spectrales de ses constituants individuels (matière organique, minéraux, contenu en eau, etc.).

La plupart des indices sont développés pour la végétation et actuellement peu d'indices existent pour les sols nus. Les indices qui semblent les mieux adaptés à la détermination du SMC sont WISOIL (Bryant, 2003), NSMI (Haubrock, 2008a) et SASI (Khanna, 2007). Cependant, ils exploitent des bandes spectrales très proches des bandes d'absorption de la vapeur d'eau atmosphérique (0,85 μm pour SASI, 1,45 μm pour WISOIL et 1,8 μm pour NSMI), ce qui peut être un facteur limitant pour la télédétection. Un avantage de l'utilisation des rapports spectraux (Liu, 2003) est la réduction de l'effet de variation de l'éclairement solaire causé par la topographie.

Whiting *et al.* (2004) montrent que l'aire de la gaussienne inverse déduite du modèle SMGM, appliqué au domaine du SWIR, est un bon indicateur de l'humidité de surface, mais pour des SMC gravimétriques inférieurs à 0,32 g.g^{-1} .

Méthodes	Longueurs d'onde en μm	R ² en %	RMSE
Approche relative (Liu, 2002)	1,944	84	0,08 g.cm^{-3}
Modèle exponentiel (Lobell, 2002)	1,0 – 2,5	-	0,1 g.cm^{-3}
Approche dérivative (Liu, 2003)	1,834	63	0,08 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$
Approche par différence (Liu, 2003)	2,062 – 2,25	69	0,08 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$
Indice WISOIL (Bryant, 2003)	1,3 – 1,45	87	-
Indice SASI (Khanna, 2007)	0,85/1,24/1,64	85	0,07 g.g^{-1}
Indice NSMI (Haubrock, 2008a)	1,8 – 2,119	61	-
Modèle SMGM (Whiting, 2004)	1,8 – 2,8	94	0,027 g.g^{-1}

Tableau 2 – Synthèse des principales méthodes du domaine réflectif trouvées dans la littérature.

I.2.2.3.2. Domaine IRT

Les études dans le domaine IRT sont en nombre réduit et sont limitées au domaine du LWIR. Le domaine MWIR n'est pas exploité certainement en raison du plus faible rapport signal sur bruit. Les méthodes basées sur les rapports d'émissivités sont adaptées pour des sols de type sableux essentiellement.

I.2.3. Conclusions

Les principaux jeux de mesures trouvés dans la littérature et associés à l'acquisition de la réflectance spectrale en fonction du SMC, ont été présentés dans ce chapitre pour les domaines spectraux réflectif et IRT (cf. Tableau 1). Très peu de travaux existent dans l'IRT et il n'existe pas à ce jour de jeux de mesures communs aux deux domaines spectraux.

Il paraît alors important de mettre en place en laboratoire un nouveau jeu de données de signatures spectrales dépendantes du SMC, afin d'étudier la caractérisation du SMC à partir des propriétés optiques sur le domaine spectral 0,4 – 14 μm .

Concernant les méthodes d'estimation du SMC, les plus performantes sont celles développées dans le domaine réflectif. Les indices spectraux (Bryant, 2003 ; Haubrock, 2008a) sont bien corrélés au SMC mais exploitent souvent des bandes spectrales qui se situent en limite des bandes d'absorption de vapeur d'eau atmosphérique. De plus, pour l'indice NSMI et le modèle SMGM (Whiting, 2004), les méthodes sont limitées par l'apparition d'un seuil de SMC à partir duquel les méthodes ne sont plus applicables.

A notre connaissance, aucune comparaison des performances de ces différents critères sur un même jeu de donnée n'a été effectuée.

Dans le domaine IRT, aucune étude n'a été réalisée sur le domaine du MWIR. Dans le LWIR, Mira *et al.* (2007b) exploitent seulement quatre bandes spectrales associées à l'instrument de mesure utilisé.

Au vue des avantages et des limitations de ces méthodes, il paraît nécessaire de développer de nouvelles approches pour définir des critères d'estimation du SMC, sur le domaine 0,4 – 14 μm . Pour cela, il convient de :

- comparer différents critères par domaine spectral ;
- évaluer les performances des critères pour différents types de sol et quel que soit le niveau de SMC considéré.

La détermination d'un nouveau jeu de mesures de référence, ainsi que de nouvelles approches, sont présentées dans la seconde partie de ce manuscrit. Cette dernière concerne la caractérisation du contenu en eau des sols sur le domaine 0,4 – 14 μm à partir de propriétés optiques de référence.

Partie II

Caractérisation du contenu en eau des sols à partir de propriétés optiques de référence



Chapitre 1

Détermination des propriétés optiques de référence

Les signatures spectrales, utilisées pour la détermination de critères d'estimation du contenu en eau des sols, sont présentées dans ce premier chapitre. Elles sont dénommées "propriétés optiques de référence" car elles sont obtenues dans un environnement maîtrisé (en laboratoire) et ainsi utilisées pour comparer les différents critères liant les réflectances spectrales au SMC.

Dans un premier temps, des mesures en laboratoire de réflectances spectrales de sols nus pour différents niveaux de SMC_g sont présentées. Après la description du protocole de mesure, une analyse des signatures spectrales est donnée à partir d'une classification subjective des échantillons de sols.

Ensuite, un modèle empirique de sols (MES), établi à partir des mesures et de leur classification, est introduit. Ce modèle permet de simuler des signatures spectrales quel que soit la valeur de SMC_g pour tout le domaine optique. Ensuite, une validation et une évaluation de ce modèle sont proposées sur d'autres jeux de mesures.

II.1.1. Mesures en laboratoire

Afin d'obtenir un jeu de données adapté à nos besoins, pour estimer le contenu en eau des sols à partir de la réflectance spectrale sur le domaine optique 0,4 – 14 μm , des mesures en laboratoire ont été réalisées (août 2008).

Les différentes étapes nécessaires à la réalisation de ces mesures sont tout d'abord exposées, avant de présenter une analyse des signatures spectrales mesurées.

II.1.1.1. Protocole de mesures

Avant de décrire le protocole de mesures, les instruments disponibles à l'ONERA et les échantillons de sols nus prélevés, sont présentés.

II.1.1.1.1. Description des instruments

Le département d'optique (DOTA) du centre de l'ONERA Toulouse, dispose de deux spectroradiomètres pour effectuer des mesures de signatures spectrales. Le spectroradiomètre utilisé dans le domaine réflectif (0,4 – 2,5 μm) est un ASD Fieldspec Pro ; et celui utilisé dans le domaine IRT (3 – 14 μm) est un Bruker Equinox 55 (Tanguy, 2008 ; www.bruker.com).

Le contrôle de l'humidité des échantillons de sols est obtenu par dessèchements successifs de chacun d'eux au moyen d'un four de laboratoire (étuve de marque Sapratin, www.sapratin.com) dont la température est contrôlée.

Le spectroradiomètre ASD Fieldspec Pro

Ce spectroradiomètre portable, permet une utilisation aussi bien en laboratoire que sur le terrain (cf. Figure 16). Il mesure la luminance spectrale d'une surface, et permet d'obtenir sa réflectance spectrale et sa transmittance spectrale par rapport à un échantillon de référence.

Les acquisitions sont collectées au moyen d'un ensemble de fibres optiques pour être projetées sur un réseau de diffraction, afin d'effectuer une analyse spectrale. Les principales caractéristiques de l'instrument sont résumées dans le Tableau 3. Notons que le pas d'échantillonnage spectral de l'appareil n'est pas constant, et que l'intervalle de mesure est de 1,4 nm sur 0,35 – 1,05 μm et de 2 nm sur 1,05 – 2,5 μm .

	ASD Fieldspec pro
Domaine spectral	0,35 – 2,5 μm
Echantillonnage spectral	1,4 nm sur 0,35 – 1,05 μm 2 nm sur 1,05 – 2 μm
Résolution spectrale	3 nm @ 0,7 μm 10 nm @ 1,4 μm 12 nm @ 2,1 μm

Tableau 3 – Principales caractéristiques de spectroradiomètre de marque ASD.

Deux types d'acquisitions sont possibles avec le spectroradiomètre ASD :

- la version *remote sensing* où la fibre optique s'utilise seule ou avec un embout optique, appelé *foreoptic*, qui ajuste le champ angulaire de visée de l'appareil ;
- la version *contact probe* où les angles d'illumination et de visée sont imposés.

Pour nos travaux, la version *remote sensing* est utilisée (Mourin, 2006) afin de pouvoir choisir une configuration de mesures proche de celle du spectroradiomètre Bruker. Les mesures effectuées avec le spectroradiomètre ASD sont alors des réflectances spectrales bidirectionnelles.



Figure 16 – Le spectroradiomètre ASD.

Le spectroradiomètre ASD mesure, en mode *remote sensing*, la réflectance spectrale bidirectionnelle d'une surface comparativement à un étalon. L'étalonnage de cet instrument se fait en mesurant la réflectance spectrale d'une plaque étalon (spectralon) caractérisé par une surface lambertienne et une réflectance spectrale proche de l'unité sur le domaine 0,4 – 2,5 μm .

Ainsi, la réflectance spectrale bidirectionnelle ρ_{ech}^{dd} de l'échantillon est déduite de l'équation :

$$\rho_{ech}^{dd} = \frac{L_{ech}}{L_{etal}} \cdot \rho_{etal} \quad (16)$$

où L_{ech} et L_{etal} sont respectivement les luminances spectrales mesurées sur l'échantillon et sur l'étalon, ρ_{etal} est la réflectance spectrale connue de l'étalon.

Une étape préliminaire est nécessaire afin de s'affranchir du courant d'obscurité (*dark current*) qui est estimé en absence de signal en entrée instrument. De plus, comme tout appareil de mesure, un spectroradiomètre comporte une incertitude liée au bruit. Son impact éventuel est alors réduit en moyennant plusieurs acquisitions.

Le spectroradiomètre Bruker Equinox 55

L'instrument utilisé dans le domaine IRT (3 – 14 μm) est le spectroradiomètre à transformée de Fourier de marque Bruker Equinox 55. Son principe repose sur l'utilisation d'un interféromètre de Michelson, produisant un interférogramme. Le spectre est alors obtenu par transformée de Fourier inverse.

Pour effectuer une mesure d'un échantillon, plusieurs acquisitions ou *scans* sont nécessaires. Le domaine d'utilisation du Bruker (cf. Tableau 4) dépend du détecteur utilisé, et sa plage de fréquence varie de 7000 à 370 cm^{-1} (soit de 1,4 μm à 27 μm). Il est également caractérisé par une résolution meilleure que 0,5 cm^{-1} , et par une vitesse d'acquisition de 20 *scans* par seconde (pour une résolution de 8 cm^{-1}) (Tanguy, 2008).

	Bruker Equinox 55
Domaine spectral	1,4 – 27 μm
Résolution spectrale	> 0,5 cm^{-1}
Vitesse d'acquisition	20 scans/seconde pour une résolution de 8 cm^{-1}

Tableau 4 – Principales caractéristiques du spectroradiomètre de marque Bruker, d'après Tanguy (2008).

La partie optique de l'instrument est équipée de miroirs motorisés qui permettent, à l'aide d'un logiciel, de sélectionner plusieurs voies de mesure différentes. Ce système est construit avec une grande étanchéité (à l'aide de fenêtres en KBr) et purgé pour protéger l'instrument de l'humidité (ensemble du spectrophotomètre balayé pas de l'azote gazeux en suspension). La source infrarouge est un barreau céramique de haute énergie, fonctionnant à 1500 K, et dont le diamètre du faisceau en sortie est de 35 mm.

Le Bruker (cf. Figure 17) est composé de trois compartiments :

- le compartiment faisceau convergent (standard) qui permet d'effectuer des mesures de transmission ou de réflexion spéculaire au moyen d'un faisceau convergent ;
- le compartiment détecteur qui est composé d'un détecteur MCT (Mercure Cadmium Tellure) de type photoconduction. Il est refroidi à l'azote liquide (77 K) pour réduire le bruit thermique parasite, et son domaine de détection s'étale de 7000 à 660 cm^{-1} (soit de 1,4 à 15 μm) ;
- le compartiment sphère intégrante qui permet essentiellement d'effectuer des mesures de réflectance spectrale directionnelle-hémisphérique. C'est un composant optique consistant en une cavité creuse avec un revêtement possédant un facteur de réflexion diffuse élevé, et des ports d'entrée et de sortie relativement petits. La sphère ONERA/DOTA a un diamètre de 127 mm, son revêtement interne est en infragold, et la taille des échantillons mesurés est de 34 mm de diamètre au maximum.

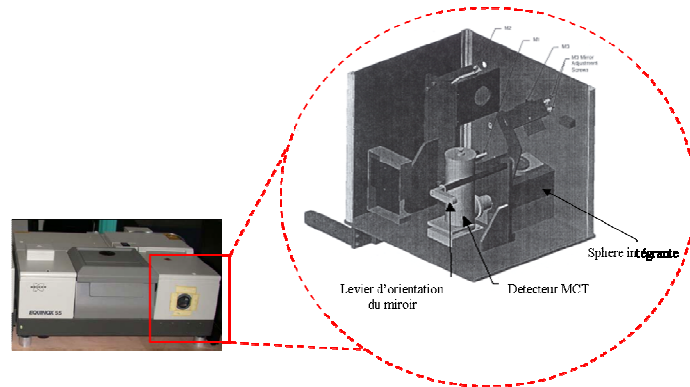


Figure 17 – Spectromètre Bruker, d'après Tanguy (2008).

Le principe de la mesure (Tanguy, 2008) consiste à effectuer le rapport de deux mesures successives : l'une sur l'échantillon à caractériser et l'autre sur l'étalon en infragold régulièrement certifié par son constructeur (Labsphère, www.labsphere.com). Cependant, toute la surface de l'échantillon à caractériser ne peut être couverte, car le faisceau de la source est plus petit que l'ouverture, et l'action de remplacer un matériau par un autre sur le porte échantillon modifie son pouvoir d'homogénéisation du flux incident : c'est l'erreur de substitution (Tanguy, 2008). Pour supprimer cette erreur, deux mesures supplémentaires sont alors nécessaires, en dirigeant le faisceau incident sur les parois de la sphère. Finalement, deux types de mesures s'effectuent pour l'échantillon et l'étalon (soit quatre mesures à réaliser) grâce à un miroir orientable à deux positions (cf. Figure 18) :

- mesure en faisceau direct (angle d'incidence de 13°) : le faisceau est dirigé sur l'étalon en infragold ou l'échantillon ;
- mesure en faisceau indirect : le faisceau est dirigé sur la paroi interne de la sphère.

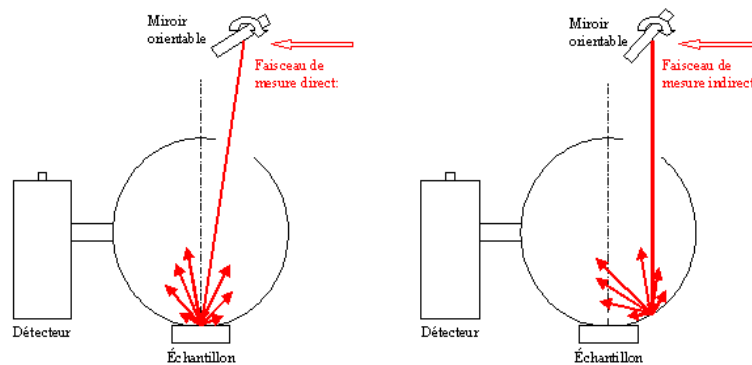


Figure 18 – Mesures en faisceau direct (à gauche) et indirect (à droite), d'après Tanguy (2008).

Ainsi, la réflectance spectrale directionnelle-hémisphérique ρ_{ech}^{dh} est définie par :

$$\rho_{ech}^{dh} = \frac{\rho_{ech}^{dir}}{\rho_{etal}^{dir}} \cdot \frac{\rho_{etal}^{ind}}{\rho_{ech}^{ind}} \cdot \rho_{etal} \quad (17)$$

où ρ_{etal} est la réflectance certifiée par Labsphère de l'étalon, ρ_{etal}^{dir} , ρ_{etal}^{ind} et ρ_{ech}^{dir} , ρ_{ech}^{ind} sont respectivement les réflectances spectrales mesurées sur l'étalon et l'échantillon en faisceau direct et indirect.

L'incertitude de la mesure de réflectance, estimée par Tanguy (2008), est inférieure à 3 % sur tout le domaine spectral couvert.

Les paramètres à retenir pour la sphère DOTA afin d'obtenir un bruit inférieur à 1 % (hors des bandes d'absorption) sont : un gain de 16, une résolution de 8 cm^{-1} et un nombre de 256 *scans* minimum.

Le four de laboratoire Sapratin

L'assèchement des échantillons est réalisé à l'aide du four de laboratoire de marque Sapratin disponible au laboratoire du DOTA (cf. Figure 19). Son avantage est de réaliser un séchage plus rapide et plus uniforme que le séchage naturel. Des études ont montré que le four de laboratoire fournit un meilleur dessèchement des échantillons qu'un four à micro-ondes (Peters, 2000). Cependant, ce séchage artificiel peut ne pas être représentatif d'un séchage naturel en extérieur.



Figure 19 – Four de laboratoire Sapratin.

II.1.1.1.2. Description des échantillons

Une trentaine d'échantillons de sols nus ont été prélevés dans plusieurs départements du Sud Ouest au Sud Est de la France. Ces prélèvements, effectués pour la plupart aléatoirement, permettent d'obtenir une diversité de texture et de couleur des échantillons (cf. Figure 20).

Les principales caractéristiques et informations subjectives collectées au moment du prélèvement de ces échantillons, sont répertoriées dans le Tableau 5. Notons que la nomenclature des échantillons a été choisie de façon à identifier le numéro de département puis le lieu de prélèvement. Le nombre d'échantillons prélevés sur chaque site est identifié entre parenthèse.



Figure 20 – Exemples d'échantillons de sols nus prélevés pour les mesures en laboratoire.

Echantillons	Caractéristiques lors du prélèvement
11Belvis (1)	Prélevés au printemps 2008 par une <i>personne extérieure</i> *
11Malves (1)	Prélevés au printemps 2008 par une <i>personne extérieure</i> *
12Vabres (1)	Prélevés au printemps 2008 par une <i>personne extérieure</i> * - Terre rouge
13Crau (2)	Prélevés en 2008 par l' <i>INRA</i> sur le site de la Crau (près du domaine du Merle)
24Coulounieix (1)	Prélevés au printemps 2008 par une <i>personne extérieure</i> * - Terre très argileuse
30Camargue (19)	Prélevés en été 2007 par l' <i>INRA</i> - Dix neuf échantillons prélevés sur des zones de cultures
30Pujaut (1)	Prélevés au printemps 2008 par l' <i>INRA</i> - Terre grise très fine
31Fauga (2)	Prélevés au printemps 2008 par l' <i>ONERA</i> sur le site de Fauga (www.onera.fr)
31Sorgho (1)	Prélevés en été 2008 par l' <i>ONERA</i> sur une zone de culture
31Tournesol (1)	Prélevés en été 2008 par l' <i>ONERA</i> sur une zone de culture
81Lautrec (1)	Prélevés au printemps 2008 par une <i>personne extérieure</i> * - Terre très argileuse
81StJulien (1)	Prélevés au printemps 2008 par une <i>personne extérieure</i> * - Terre blanche
84Avignon (1)	Prélevés en 2008 par l' <i>INRA</i> sur le site de Montfavet

Tableau 5 – Caractéristiques principales des échantillons. *Par personne extérieure, nous entendons une personne hors du projet sollicitée pour effectuer un prélèvement dans une zone donnée.

II.1.1.1.3. Description du protocole de mesures

Ce protocole est basé sur des mesures préliminaires (quatre échantillons de sols) qui ont été réalisées dans le cadre d'un stage de fin d'études à l'ONERA/DO TA Toulouse (Mourin, 2006). Ces mesures préliminaires couvrent l'ensemble du domaine optique, et ont mis en évidence deux résultats importants qui sont pris en compte lors de nos mesures :

- la rugosité d'un échantillon fait diminuer sa réflectance spectrale, jusqu'à 85 % par rapport à celle d'un échantillon lisse ;
- la variabilité spatiale de la réflectance sur le SWIR peut atteindre 8 %.

Principe de mesure des réflectances spectrales

La première étape consiste à préparer chaque instrument de mesures, dont les bancs expérimentaux sont illustrés sur la Figure 22.

Description du banc de mesure dans le domaine 0,4 – 2,5 μm

La configuration géométrique du montage réalisé pour les mesures avec le spectroradiomètre ASD, en mode *remote sensing*, est la suivante :

- le pistolet de l'ASD, placé au nadir à 19,4 cm de hauteur, est muni du *foreoptic* dont l'angle d'ouverture est de 10° pour couvrir la même zone d'échantillon que celle du Bruker (soit 3,4 cm de diamètre) ;
- l'angle d'illumination de la source (lampe solaire) est pris à 15°. Cette configuration permet de s'affranchir des effets spéculaires et de rétrodiffusion.

Après avoir mis en place le banc de mesure du domaine réflectif, il est nécessaire de laisser chauffer le spectroradiomètre ASD pendant au moins 1h avant de débiter les mesures. En effet, l'appareil doit calibrer radiométriquement ses unités pour minimiser des décrochages sur les spectres aux environs de $1\ \mu\text{m}$ et $1,8\ \mu\text{m}$, dus aux changements de détecteurs.

Dans la version *remote sensing*, aucune source d'illumination n'est fournie et une lampe dont le comportement spectral se rapproche de celui du soleil, est alors utilisée.

L'échantillon est placé sous le capteur (à l'aide de lasers de pointages afin de repérer sa position) et l'acquisition spectrale peut débiter. Une mesure de réflectance spectrale pour un contenu en eau donné correspond en réalité à une moyenne de plusieurs acquisitions. Ces différentes mesures de l'échantillon sont acquises successivement à différentes positions (sept rotations de 45° , cf. Figure 21), pour limiter l'impact de la variabilité spatiale de l'échantillon.

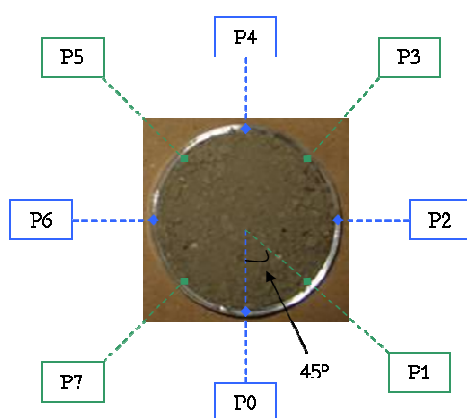


Figure 21 – Illustration des positions prises par l'échantillon pour une mesure de signature spectrale dans le domaine spectral réflectif.

Description du banc de mesure dans le domaine 3 – 14 μm

Concernant le spectromètre Bruker, aucun montage n'est nécessaire avant les mesures. Il convient seulement de déverser de l'azote liquide dans le détecteur MCT de la sphère, afin de le refroidir et d'effectuer le vide dans la sphère intégrante.

Par conséquent, il faut mettre l'appareil en service au moins 1h avant la première mesure pour permettre à la thermalisation d'être effective.

Les mesures avec le Bruker sont effectuées avec les paramètres retenus pour la sphère DOTA (cf. §II.1.1.1.1).

Etant donné que l'échantillon est placé sous une sphère intégrante, il n'est pas nécessaire d'effectuer de rotation de l'échantillon pour tenir compte de sa variabilité spatiale. En effet, les faisceaux lumineux provenant de n'importe quel point de la surface interne de la sphère sont distribués, en raison des multiples réflexions, de façon égale à tous les autres points de la sphère et ceci indépendamment de la direction originale de la lumière. La sphère intégrante est alors considérée comme un diffuseur qui conserve la puissance et dissout l'information spatiale.

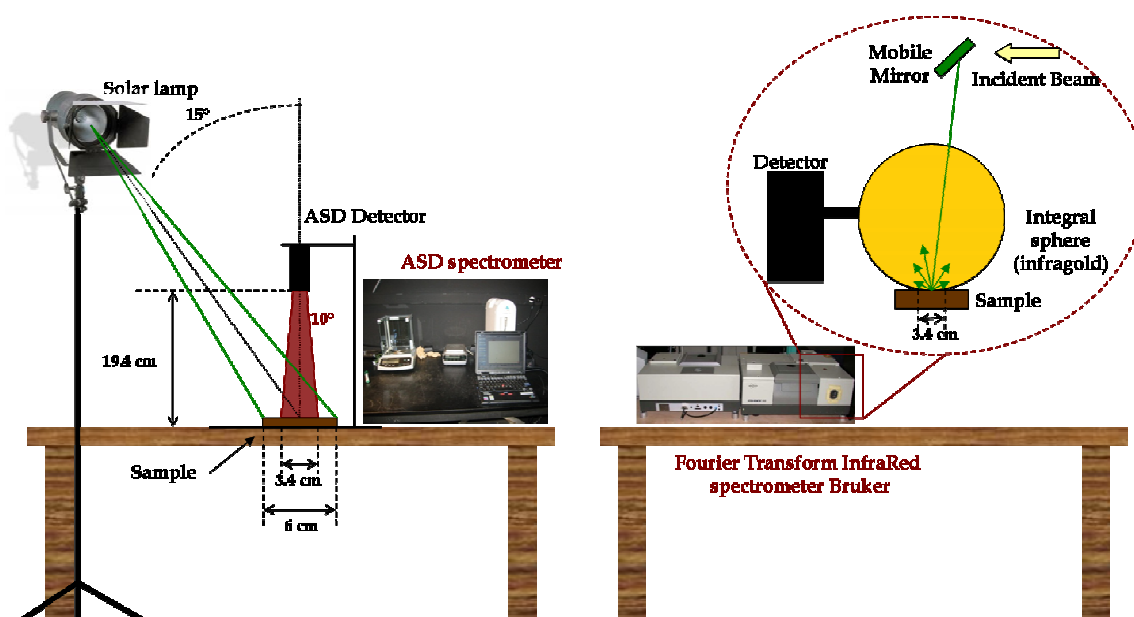


Figure 22 – Illustration des bancs expérimentaux utilisés pour les mesures en laboratoire, dans les domaines spectraux réfléchissant (à gauche) et IRT (à droite).

Préparation des échantillons de sols

L'étape suivante consiste à préparer les échantillons dans des portes échantillons de 1 cm d'épaisseur. Pour cela, des mesures tests ont été effectuées avec les échantillons de sols du Fauga (Haute-Garonne), et ont mis en évidence qu'il convient de :

- nettoyer les échantillons en ôtant toutes sortes de racines et de cailloux qui peuvent impacter sur la mesure de réflectance (rugosité non considérée) ;
- humidifier l'échantillon à l'aide d'une pissette jusqu'à saturation de celui-ci, c'est-à-dire jusqu'au moment où une fine pellicule d'eau se forme à la surface de l'échantillon ;
- effectuer une première pesée pour obtenir le contenu en eau à un instant donné (avant dessèchement et mesure).

Mesure des contenus en eau par méthode gravimétrique

La troisième étape consiste à définir le contenu en eau de l'échantillon de sol et le cycle de séchage optimum afin d'obtenir différents niveaux de SMC.

Les SMC mesurés sont des humidités gravimétriques (SMC_g en pourcentage de $g \cdot g^{-1}$), dont les valeurs sont obtenues en faisant le rapport de la masse d'eau dans l'échantillon rapportée à la masse de l'échantillon (cf. équation 3 du §I.1.1.2.2).

Toutefois, pour tenir compte de la variabilité du SMC durant les acquisitions spectrales, l'échantillon est pesé trois fois : à la sortie du four, après les mesures avec le spectromètre Bruker, et à la suite des mesures avec le spectroradiomètre ASD.

La masse de l'échantillon à un instant donné, correspond donc en réalité à la masse moyenne obtenue par ces trois pesées.

Avant d'effectuer les dessèchements des échantillons avec le four de laboratoire Sapratin, deux paramètres ont dû être déterminés : la durée de séchage nécessaire pour obtenir différents contenus en eau, et le temps nécessaire au dessèchement total d'un échantillon.

Pour cela, les résultats des mesures préliminaires ont été exploités (Mourin, 2006) et les paramètres suivants ont été retenus :

- la température du four doit être ajustée à 60°C, pour éviter à la surface des échantillons de se fendre trop rapidement ;
- un préchauffage du four de 1h à 60°C est nécessaire ;
- la durée de séchage entre les différentes mesures est prise à : $\Delta t = 35 \text{ min}$;
- le séchage complet d'un échantillon est obtenu après 24h au four à 60°C.

Synthèse du protocole de mesures

En définitive, les différentes étapes du protocole de mesures (neuf au total) sont décrites dans le Tableau 6. Le protocole se termine lorsque le dessèchement complet de l'échantillon a eu lieu, soit 24h après la première mesure.

Etape	Description
1	<i>Préparation</i> des <i>instruments</i> de mesures
2	<i>Préparation</i> de l' <i>échantillon</i>
3	<i>Pesée</i> de l' <i>échantillon</i>
4	Mesure sur le domaine 0,35 – 2,5 μm avec l' <i>ASD</i> (en moyenne 2 min par échantillon)
5	<i>Pesée</i> de l' <i>échantillon</i>
6	Mesure sur le domaine 3 – 12 μm avec le <i>Bruker</i> (en moyenne 4 min par échantillon)
7	<i>Pesée</i> de l' <i>échantillon</i>
8	<i>Séchage</i> de l'échantillon au <i>four</i> pendant <i>35 min</i>
9	Reprendre au point n° <i>3</i> jusqu'au séchage complet de l'échantillon après <i>24h au four</i>

Tableau 6 – Etapes du protocole de mesures en laboratoire.

II.1.1.2. Analyse des signatures spectrales mesurées

Les signatures spectrales acquises sont tout d'abord présentées. Une classification informelle des échantillons de sols nus est ensuite proposée, avant d'analyser l'impact de l'humidité sur les réflectances spectrales mesurées. Etant donné que les grandeurs mesurées dans les domaines réflectif et IRT ne sont pas identiques (respectivement réflectances bidirectionnelle et directionnelle-hémisphérique), le spectre complet d'un échantillon ne pourra être considéré. Les travaux vont donc s'effectuer distinctement sur ces deux domaines spectraux.

II.1.1.2.1. Description des mesures effectuées

La signature spectrale de trente deux échantillons de sols a été acquise pour cinq ou six niveaux de contenu en eau différents, suivant l'échantillon considéré. Au total, trois cent quatre vingt signatures spectrales sont obtenues sur le domaine optique 0,4 – 14 μm . (cf. Annexe V).

A titre d'exemple, les réflectances spectrales de l'échantillon **84Avignon** sont représentées sur la Figure 23. Comme décrit au §I.2.1.2.3, la réflectance diminue lorsque la valeur de contenu en eau augmente sur le domaine 0,4 – 14 μm . Les variations les plus importantes des niveaux de spectres s'observent principalement dans les domaines spectraux du NIR et du SWIR (0,8 – 2,5 μm), dénommé NSWIR pour la suite du document.

Dans le domaine réflectif (cf. Figure 23, à gauche), les niveaux de réflectances varient entre 0,05 et 0,5 suivant la valeur de SMC considérée. Dans le domaine IRT (cf. Figure 23, à droite) les niveaux des signatures spectrales (compris entre 0,025 et 0,25) sont deux fois moins élevées que celles du domaine réflectif, en raison de la prédominance du phénomène d'émission dans ce domaine spectral.

Le comportement spectral dépendant de la composition du sol (cf. §I.2.1.2), il convient tout d'abord de classifier les différents types de sols étudiés avant d'analyser plus précisément l'influence du contenu en eau sur les échantillons mesurés.

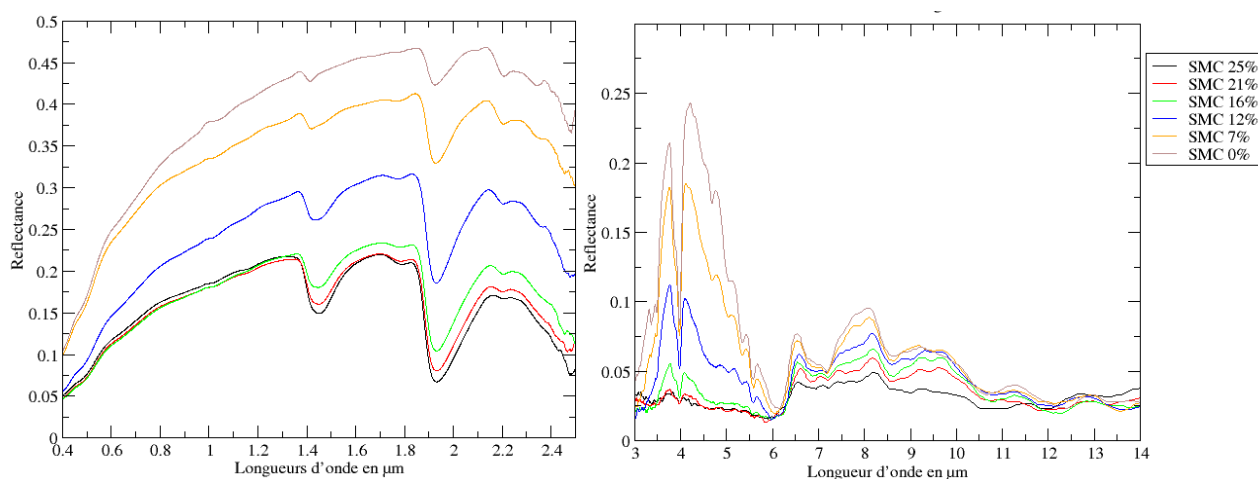


Figure 23 – Signatures spectrales acquises dans les domaines spectraux réflectif (à gauche) et IRT (à droite), du sol **84Avignon** pour différentes valeurs de SMC_g, d'après les mesures en laboratoire (cf. Annexe V).

II.1.1.2.2. Classification des échantillons de sols

En raison du manque d'information pédologique (structures, textures, composition chimique) des échantillons prélevés, pour en définir la composition, une classification informelle a été mise en place. Celle-ci est basée sur le comportement spectral des échantillons de sols secs, afin que la définition de la classe de sol ne soit pas altérée par le contenu en eau des sols.

Description

Le comportement des spectres de sols secs est étudié sur les domaines spectraux utilisés lors de la description des caractéristiques des propriétés optiques des sols (cf. §I.2.1.2), soient : VIS (0,4 – 0,8 μm), NSWIR (0,8 – 2,5 μm), MWIR (3 – 5,5 μm) et LWIR (8 – 14 μm).

Dans le domaine VIS, les trois types de comportements, définis dans la littérature par Courault *et al.* (1988) (cf. §I.2.1.2), sont observés sur les signatures spectrales mesurées sur les

échantillons de sols secs. Les termes T1V, T2V et T3V (T pour type, V pour VIS), sont alors utilisés pour définir trois sortes de comportements qui sont respectivement ceux des sols riches en calcium, riches en matière organique, et riches en oxyde de fer (cf. Tableau 7 et Figure 24).

Dans le domaine NSWIR (cf. Tableau 7 et Figure 24), quatre comportements spectraux, sont observés et définis par les termes T1NS, T2NS, T3NS et T4NS (T pour type, NS pour NSWIR). Les comportements sont les suivants :

- T1NS : spectre concave sur 0,8 – 1,2 μm puis convexe sur 1,2 – 2,5 μm avec une réflectance comprise entre 0,25 et 0,8 ;
- T2NS : spectre en pente ascendante sur 0,8 – 1,2 μm puis convexe sur l'intervalle 1,2 – 2,5 μm avec une réflectance comprise entre 0,2 et 0,5 ;
- T3NS : spectre convexe sur 0,8 – 1,2 μm puis faiblement convexe sur l'intervalle 1,2 – 2,5 μm avec une réflectance comprise entre 0,25 et 0,6 ;
- T4NS : spectre faiblement concave sur 0,8 – 1,2 μm puis en pente descendante sur l'intervalle 1 – 2,5 μm avec une faible réflectance (inférieure à 0,25).

Enfin, sur les domaines spectraux du MWIR et du LWIR (cf. Tableau 7, Figure 24), les principales caractéristiques spectrales décrites dans les travaux de Salisbury *et al.* (1992, 1994) (cf. §I.2.1.2) sont identifiées sur les mesures effectuées.

Pour la classification, les termes T1M et T2M (T pour type, M pour MWIR) sont affectés aux deux types de comportements du MWIR (courbe en cloche et à deux lobes). Les termes T1L, T2L et T3L (T pour type, L pour LWIR) pour le LWIR correspondent à des comportements dépendants des bandes de Reststrahlen (cf. §I.2.1).

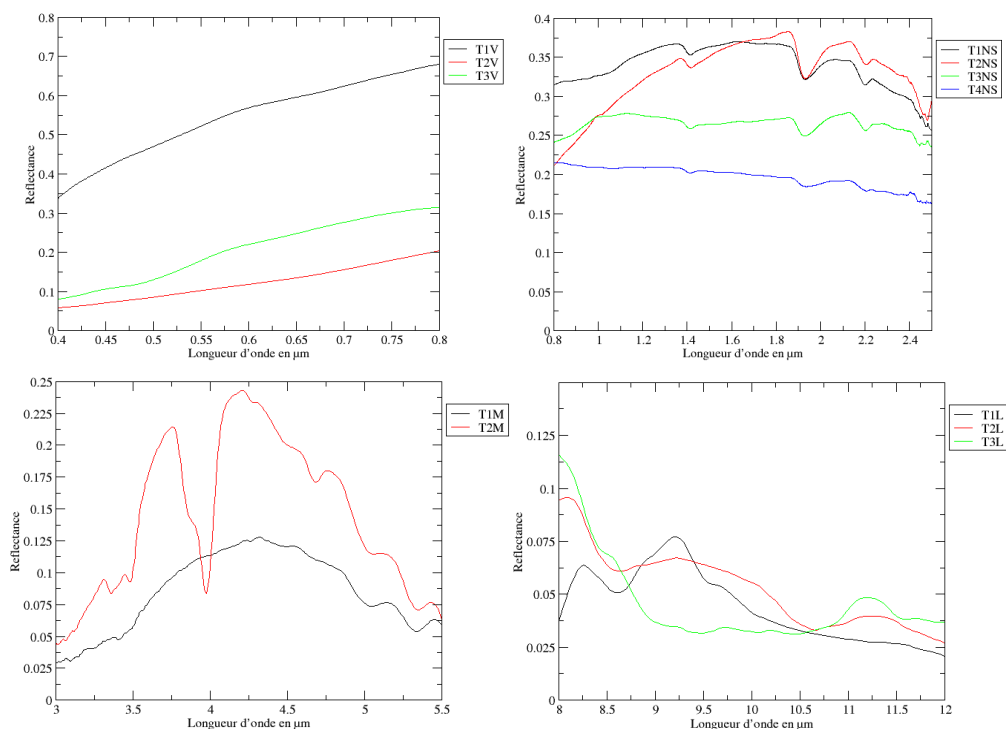


Figure 24 – Comportements spectraux observés sur les mesures dans le domaine du VIS (en haut, à gauche), NSWIR (en haut, à droite), MWIR (en bas, à gauche) et LWIR (en bas, à droite).

Neuf classes de sols (informelles) ont ainsi été définies à partir de l'analyse spectrale des échantillons de sols secs par la combinaison des différents comportements spectraux (cf. Tableau 8).

Comportements spectraux				
VIS	T1V	T2V	T3V	
	Courbe \pm convexe et réflectance élevée	Courbe faiblement concave et faible réflectance	Courbe concave puis convexe et réflectance \pm élevée	
NSWIR	T1NS	T2NS	T3NS	T4NS
	Courbe concave puis convexe et réflectance \pm élevée	Courbe en pente ascendante puis convexe et réflectance \pm élevée	Courbe convexe puis \pm convexe et réflectance \pm élevée	Courbe faiblement concave puis en pente descendante et faible réflectance
MWIR	T1M		T2M	
	Courbe en cloche Absorption du Quartz à 4,5 et 4,7 μm Absorption liaison H-C à \sim 3,5 μm		Absorption des carbonates à 4 μm , Absorption du Quartz à 4,5 et 4,7 μm Absorption liaison H-C à \sim 3,5 μm	
LWIR	T1L	T2L	T3L	
	Reststrahlen du Quartz : -> fort entre 8 et 9 μm -> fort entre 9 et 10 μm -> faible entre 12 et 14 μm	Reststrahlen du Quartz : -> fort entre 8 et 9 μm -> fort entre 9 et 10 μm -> faible entre 12 et 14 μm Reststrahlen des carbonates : -> faible à \sim 11,3 μm	Reststrahlen du Quartz : -> fort entre 8 et 9 μm Reststrahlen des carbonates : -> fort à \sim 11,3 μm	

Tableau 7 – Comportements spectraux issus de l'analyse des mesures.

Classe	VIS	NSWIR	LWIR	MWIR	Echantillons
1	T3V	T1NS	T1M	T1L	<i>11Belvis</i>
2	T3V	T1NS	T2M	T2L	<i>11Malves - 24Coulounieix - 31Tournesol - 81Lautrec</i>
3	T3V	T3NS	T1M	T1L	<i>12Vabres</i>
4	T3V	T2NS	T1M	T1L	<i>13Crau1 - 13Crau2 - 31Sorgho</i>
5	T3V	T2NS	T2M	T2L	<i>30BleA,B,C - 30LuzerneA,B,C - 30SolNuA,B,C - 30SolNuLabA,B,C - 30VigneA,B,C - 84Avignon</i>
6	T2V	T2NS	T2M	T2L	<i>30PrairieA,B,C</i>
7	T1V	T1NS	T2M	T3L	<i>81StJulien</i>
8	T3V	T4NS	T1M	T1L	<i>31FaugaSmos - 31FaugaX1</i>
9	T1V	T3NS	T2M	T2L	<i>30Pujaut</i>

Tableau 8 – Classification informelle des échantillons de sols mesurés.

Les spectres de la **classe5**, composée du plus grand nombre d'échantillons, sont illustrés sur la Figure 25. Les comportements spectraux des échantillons de cette classe sont cohérents sur les domaines spectraux réflectif et IRT, et la principale différence concerne les niveaux des réflectances. En effet, les valeurs du spectre du sol *84Avignon* de la **classe5** sont plus élevées que les autres (cf. Figure 25). Ces écarts sont liés à la rugosité (Mourin, 2006) et aux différentes couleurs des échantillons.

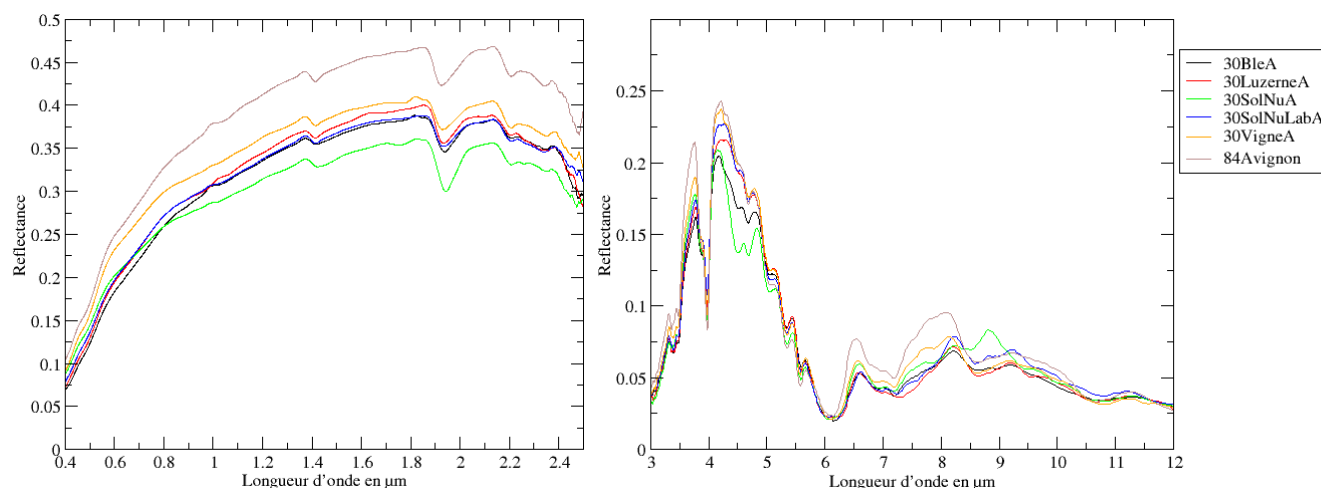


Figure 25 – Représentation des spectres de la *classe5* dans le réflectif (à gauche) et l'IRT (à droite).

Cette classification met donc en évidence les principales différences qui existent dans les réponses spectrales de nos échantillons de sols secs. Pour vérifier la cohérence de la classification établie, une validation de celle-ci est proposée afin qu'elle puisse être utilisées pour la suite de nos travaux.

Validation empirique de la classification

Le code de Munsell (cspoutdoors.com/munsoilcolch.htm) est une charte de couleur utilisée par les pédologues pour la classification des sols. Ce code comporte trois variables (HVC) :

- la teinte (Hue) qui détermine la nuance de couleur (rouge au bleu) ;
- la clarté (Value) qui correspond à la luminosité (noir au blanc) ;
- la pureté (Chroma) qui fournit la force de la couleur (terne à vif).

Dix teintes principales existent et sont définies de la manière suivante (cf. Figure 26):

- teintes de base : Rouge (R), Jaune (Y), Vert (G), Cyan (B), Violet (P) ;
- teintes secondaires : Orange (YR), Vert jaune (GY), Cyan foncé (BG), Bleu violacé (PB), Pourpre (RP).

Chacune de ces teintes est divisée en dix zones numérotées de 0 à 10. Le numéro 5 correspond au milieu de teinte, et le 10 à la frontière entre deux teintes. Les valeurs de luminosité de la teinte varient également de 0 à 10. Le numéro 0 correspond au noir tandis que le 10 équivaut à une brillance blanche. La saturation varie de 0 (gris) à une valeur supérieure qui dépend de la couleur.

Cette étude s'est effectuée, de façon subjective, à partir du *Munsell Soil Color Chart*, livre composé de plaquettes de nuanciers du code de Munsell (cf. Figure 26). A aucun moment de la définition des codes, les personnes se sont appuyées sur la classification établie a priori pour ne pas être influencées. Pour chaque échantillon de sol, la procédure de définition du code s'est déroulée en deux étapes :

- choix de la plaquette de nuance en définissant la teinte (valeur H) ;
- désignation d'une pastille de couleur définissant la luminosité et la saturation (valeurs V et C).

Les différentes valeurs (Hue, Value, Chroma) déterminées pour les différentes classe de sols sont indiquées dans le Tableau 9. On remarque qu'il existe des classes où la majorité voire la totalité des échantillons ont le même code Munsell (**classe5**, **classe6** et **classe8**). Cette information permet de valider la cohérence de ces classes. Ensuite, on peut noter que tous ces échantillons de sols, se réfèrent à quatre valeurs de teintes dont les plaquettes sont représentées sur la Figure 26. Les sols ont donc des teintes variant du rouge-orangé (2,5 YR) au jaune (5 Y). Enfin, on observe qu'il n'existe pas de code qui soit commun aux différentes classes de sols définies a priori. Ainsi, les échantillons séparés en différentes classes, le sont également par le code de Munsell.

Pour les **classe1**, **classe3**, **classe7** et **classe9**, composées d'un seul sol, les valeurs des codes Munsell sont bien distinctes. Le sol de la **classe1** (2,5 Y 6/6), est un sol plutôt jaune alors que celui de la **classe3** (2,5 YR 4/4) tire vers le rouge (cf. Figure 26). Les sols des **classe7** et **classe9** sont tous les deux très clairs, ayant pour effet d'obtenir des luminosités et saturations équivalentes (8/1). Toutefois, ils se distinguent par leur teinte : 5 Y pour la **classe7** et 2,5 Y pour la **classe9** (cf. Figure 26).

Les deux sols de la **classe8**, qui ont été prélevés sur le même site (Fauga, Toulouse) ont le même code de valeur 2,5 Y 4/3 (cf. Figure 26).

Les trois sols de **30Prairie**, assimilés à la **classe6**, ont également des valeurs de HVC identiques. Ces sols ont une couleur plutôt gris jaune (2,5 Y 5/2) (cf. Figure 26).

En revanche, pour les trois sols de la **classe4**, on observe une légère disparité entre les codes. Pour les deux sols provenant du site de la Crau, les échantillons sont de couleurs orange foncé (10 YR 4/6 et 10 YR 5/4, cf. Figure 26). Pour le troisième sol (issu de Midi-Pyrénées), le code 2,5 Y 5/3 indique une couleur plutôt jaunâtre. Cette différence est également visible sur les spectres secs de ces trois sols qui ont des niveaux de réflectances différents. En effet, le sol **31Sorgho** présente des valeurs un peu plus faibles que celles des deux autres échantillons **13Crau1** et **13Crau2** (cf. Annexe V).

Pour la **classe2**, même si les quatre sols ont une teinte identique (2,5 Y), ils ne présentent pas les mêmes valeurs de luminosité et de pureté. Deux sols sont très sombres, de couleur marron (2,5 Y 4/2 et 3/3), tandis que les deux autres sont plus clairs, tendant vers le jaune (2,5 Y 7/4 et 5/4). Cette distinction existe également sur les spectres secs où des bandes d'absorption du fer un peu plus prononcées sont observées. De plus, les valeurs de réflectances sont plus élevées pour les échantillons de sols plus clairs (cf. Annexe V).

Enfin, pour la **classe5** composée de seize sols, seulement deux codes de Munsell sont définis. Les quinze sols de Camargue, ont une couleur gris jaune (2,5 Y 6/2) plus claire que celle de la **classe6**. Le dernier sol composant cette classe est **84Avignon** et sa couleur (2,5 Y 7/2) indique qu'il est plus lumineux que les quinze autres (vérifié sur le spectre par un niveau de réflectance plus élevé, cf. Annexe V).

	Hue	Value	Chroma
Classe1 (1 sol)	2,5 Y	6	6
Classe2 (4 sols)	2,5 Y	7	4
	2,5 Y	4	2
	2,5 Y	5	4
	2,5 Y	3	3
Classe3 (1 sol)	2,5 YR	4	4
Classe4 (3 sols)	10 YR	4	6
	10 YR	5	4
	2,5 Y	5	3
Classe5 (16 sols)	2,5 Y	6	2
	2,5 Y	7	2
Classe6 (3 sols)	2,5 Y	5	2
Classe7 (1 sol)	5 Y	8	1
Classe8 (2 sols)	2,5 Y	4	3
Classe9 (1 sol)	2,5 Y	8	1

Tableau 9 – Code de Munsell des échantillons de sols des mesures.

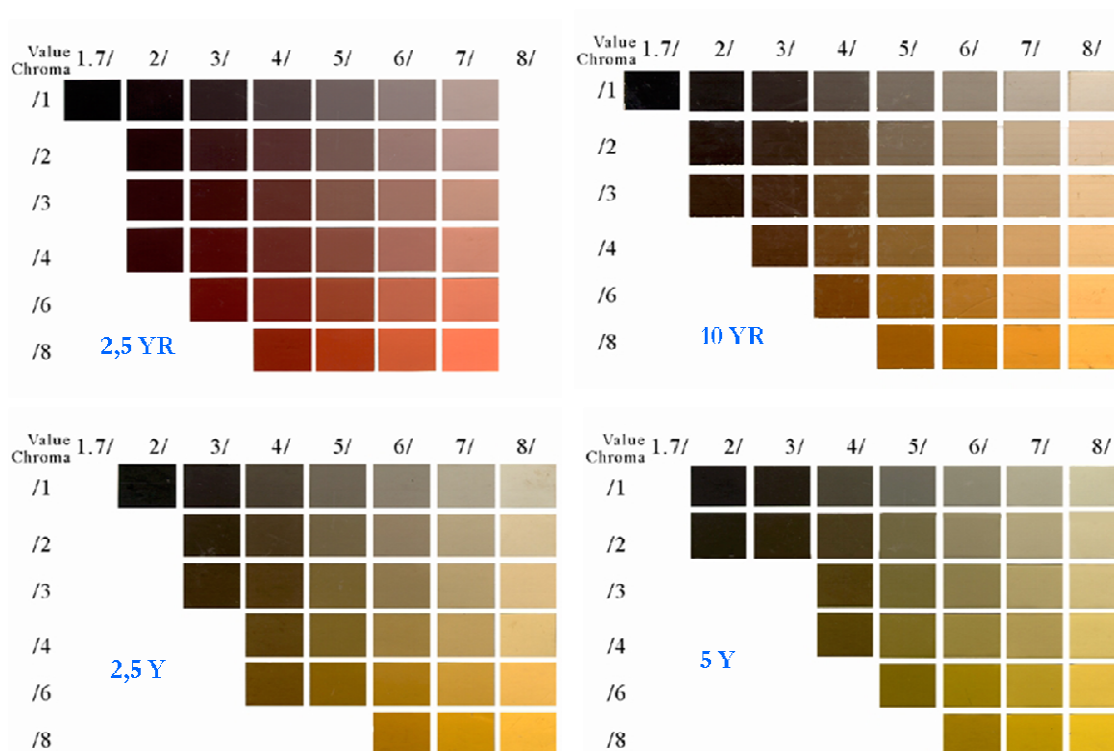


Figure 26 – Extrait de quatre nuanciers (2,5 YR – 10 YR – 2,5 Y – 5 Y) du code de Munsell. Les valeurs de luminosité (Value) sont indiquées à l'horizontale, et les valeurs de pureté (Chroma) à la verticale.

Pour conclure, la classification informelle basée sur le comportement des spectres secs, est validée par le code des couleurs de Munsell. Une cohérence des valeurs HVC avec les classes définies est observée. Les légères dissemblances sont expliquées par les niveaux spectraux.

Cette classification est exploitée dans la suite des travaux et notamment pour l'étude de l'impact du SMC.

II.1.1.2.3. Influence du contenu en eau sur les spectres mesurés

La réponse spectrale à l'humidité est étudiée pour définir les disparités suivant les classes de sol. Les informations des différences d'impact du SMC seront exploitées pour spécifier des critères d'estimation et pour analyser leurs performances.

Comportement des spectres en réponse à l'humidité

Les mesures montrent que l'augmentation de la valeur du SMC a pour conséquence :

- d'abaisser les niveaux globaux de réflectance sur l'ensemble du domaine spectral 0,4 – 14 μm jusqu'à une valeur seuil du SMC où la relation s'inverse ;
- d'atténuer les bandes d'absorption des minéraux dans les domaines VIS, NSWIR et MWIR et les bandes de Reststrahlen dans le LWIR ;
- d'augmenter l'amplitude et la largeur des bandes d'absorption de l'eau essentiellement à 1,4 μm et 1,9 μm .

Tous ces phénomènes sont représentés sur la Figure 27, où sont indiqués les sens de variations des bandes d'absorption et de Reststrahlen lorsque la valeur de contenu en eau des sols augmente.

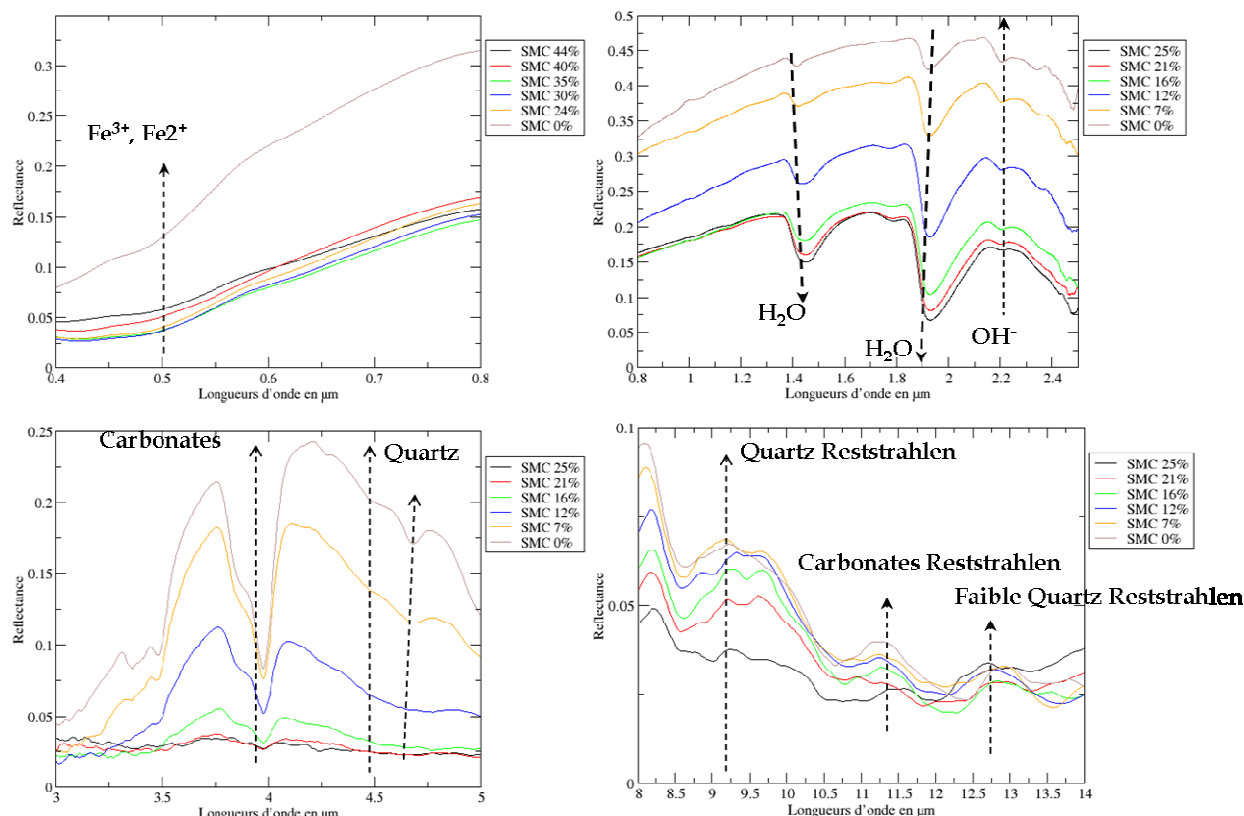


Figure 27 – Impact du SMC analysé à partir des mesures, sur les domaines du VIS (en haut, à gauche), NSWIR (en haut, à droite), MWIR (en bas, à gauche) et LWIR (en bas, à droite). Les flèches montantes et descendantes décrivent respectivement les augmentations et les diminutions des bandes lorsque le SMC augmente.

Pour tous les échantillons de sols, excepté celui de la **classe9**, une valeur de contenu en eau critique apparaît à partir de laquelle la valeur de la réflectance spectrale augmente lorsque le SMC augmente. Ce résultat est cohérent avec les études de la littérature effectuées dans le domaine réflectif (cf. §I.2.1.2.3). Sur nos mesures (cf. Figure 27, en haut), ce phénomène se produit sur le domaine spectral s'étalant du VIS au NIR (0,4 – 1,4 μm).

Dans le domaine IRT, ce phénomène apparaît également pour cette valeur critique de contenu en eau des sols. Les variations des niveaux de réflectance dépendent du type de sol, et du domaine considéré (MWIR ou LWIR).

Les valeurs de SMC_g critiques sont présentés dans le Tableau 10, avec les domaines spectraux sur lesquels elles impactent, c'est-à-dire où la relation entre les niveaux de réflectances et le contenu en eau des sols s'inverse.

	SMC_g critique moyen	VNIR	MWIR	LWIR
Classe1 (1 sol)	40 ‰ _g	X	X	X
Classe2 (4 sols)	28,5 ‰ _g	X	X	-
Classe3 (1 sol)	28 ‰ _g	X	X	-
Classe4 (3 sols)	35,6 ‰ _g	X	X	X
Classe5 (16 sols)	31,3 ‰ _g	X	X	-
Classe6 (3 sols)	43 ‰ _g	X	X	X
Classe7 (1 sol)	26 ‰ _g	X	X	-
Classe8 (2 sols)	28 ‰ _g	X	X	-
Classe9 (1 sol)	> 23 ‰ _g	-	-	-

Tableau 10 – Valeurs critiques de SMC_g moyen et domaines spectraux sur lesquels ces valeurs impactent (représentés par le symbole X).

Concernant les phénomènes liés aux bandes d'absorption ou de Reststrahlen, les variations de ces bandes en fonction du contenu en eau des sols sont illustrées sur la Figure 27.

Dans le domaine réflectif, l'impact majeur se situe au niveau des bandes d'absorption de l'eau liquide (centrées à 1,4 μm et 1,9 μm).

Dans le domaine IRT, lorsque les valeurs de SMC_g deviennent en moyenne supérieures à 20 ‰_g, il devient quasiment impossible de détecter la présence de certaines bandes d'absorption et de Reststrahlen. Ceci est valable pour tous les échantillons de sols. Le même phénomène est observé dans le domaine réflectif sur la bande 2,1 – 2,5 μm .

Comparaison des spectres secs et saturés

Afin d'approfondir cette analyse, une étude de comparaison des spectres secs et saturés, a été menée pour les différentes classes de sol dans les domaines spectraux VIS, NSWIR, MWIR et LWIR.

Pour chaque domaine spectral, cette analyse consiste tout d'abord à établir l'écart absolu Abs_Ecart (cf. Equation 19) entre ces spectres, pour tous les échantillons de sols et toutes les longueurs d'onde :

$$Abs_Ecart_n(\lambda) = \left| \rho_n^{sat}(\lambda) - \rho_n^{sec}(\lambda) \right| \quad (18)$$

où n représente le numéro d'échantillon, ρ_n^{sat} représente la réflectance spectrale de l'échantillon n obtenue pour un SMC saturé, ρ_n^{sec} représente la réflectance spectrale de l'échantillon n mesurée pour un SMC sec.

Les valeurs ainsi obtenues pour chaque échantillon sont ensuite intégrées et normalisées (cf. Equation 20) afin de définir des écarts moyens Int_Ecart :

$$Int_Ecart_n = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Abs_Ecart_n(\lambda) \cdot d\lambda \quad (19)$$

où λ_1 et λ_2 représentent respectivement les longueurs d'onde minimale et maximale de chaque domaine spectral étudié (VIS, NSWIR, MWIR et LWIR).

Enfin, ces valeurs d'écarts intégrés sont moyennées (cf. Equation 21) sur le nombre d'échantillons composant chaque classe, afin de fournir un résultat par classe de sols pour chaque domaine spectral considéré (cf. Tableau 11). Les valeurs de Moy_Ecart pour chaque domaine spectral s'écrivent alors :

$$Moy_Ecart = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Int_Ecart_i \quad (20)$$

où m représente le nombre d'échantillons par classe de sols.

Quelle que soit la classe considérée, les écarts moyens sont similaires dans le LWIR. Pour la majorité des classes, les écarts moyens sont inférieurs à 0,08 dans les domaines VIS et MWIR (hormis pour les **classe1**, **classe5** et **classe7**).

Ces valeurs mettent en évidence que certaines classes ont des variations quasi identiques pour deux niveaux extrêmes de SMC : **classe2** et **classe3** (sauf sur le NSWIR) puis **classe4** et **classe5**. De plus, ces classes ont des valeurs similaires de SMC saturés (cf. Tableau 11).

Pour les autres classes, des différences apparaissent suivant le domaine spectral. Par exemple, la **classe1** et la **classe7** présentent des écarts similaires dans le VIS (respectivement 0,1 et 0,13), alors que dans le MWIR la différence est notable (respectivement 0,05 et 0,17). Ceci peut être lié au fait que la valeur de SMC_g saturé de la **classe1** (44 %) est plus élevée que celle de la **classe7** (30 %). Autre exemple, la **classe6** et la **classe9** ont des valeurs d'écarts proches dans le NSWIR et le MWIR, tandis que dans le VIS, ces classes ont des valeurs différentes (respectivement 0,04 et 0,2).

Pour toutes les classes de sols réunies, les plus grands écarts se situent dans le NSWIR (0,21) et les plus faibles dans le LWIR (0,02). Les domaines du VIS et du MWIR présentent des écarts intermédiaires équivalents (0,09 et 0,08). Ces écarts confirment donc l'efficacité du NSWIR, et démontrent l'intérêt d'exploiter le MWIR pour l'estimation du SMC.

Sec vs Saturé	SMC _g saturés en %	<i>Moy _ Ecart</i>			
		VIS	NSWIR	MWIR	LWIR
Classe1 (1 sol)	44	0,1	0,23	0,05	0,02
Classe2 (4 sols)	30,8	0,08	0,22	0,07	0,02
Classe3 (1 sol)	32	0,08	0,15	0,07	0,02
Classe4 (3 sols)	35,7	0,05	0,21	0,07	0,02
Classe5 (16 sols)	33,6	0,1	0,22	0,1	0,02
Classe6 (3 sols)	46	0,04	0,18	0,08	0,01
Classe7 (1 sol)	30	0,13	0,36	0,17	0,02
Classe8 (2 sols)	33	0,07	0,13	0,04	0,02
Classe9 (1 sol)	23	0,2	0,17	0,08	0,006
Moyenne des classes		0,09	0,21	0,08	0,02

Tableau 11 – Ecarts significatifs moyens entre spectres secs et saturés, pour les classes de sols, dans le VIS, NSWIR, MWIR et LWIR.

II.1.2. Modèle Empirique de Sols (MES)

Les mesures en laboratoire sont limitées à quelques niveaux de contenu en eau, en raison des contraintes expérimentales (temps de séchage et durée des acquisitions spectrales, cf. Tableau 6). Afin de s'affranchir de cette limitation, un modèle empirique de sols (MES) est utile pour simuler des réflectances spectrales de sols nus pour des niveaux de SMC non atteints par les mesures, et de ce fait obtenir un pas d'échantillonnage en humidité plus faible. Ces spectres modélisés par le MES, vont donc compléter notre base de données de spectres de référence mesurés. L'intérêt d'un tel modèle est de l'utiliser également pour estimer le SMC_g à partir d'un spectre et d'une classe de sol donnés (cf. §II.2.2).

Le principe de mise en place du MES est tout d'abord présenté avant d'être défini à partir des mesures en laboratoire, puis évalué sur deux autres bases de données de signatures spectrales.

II.1.2.1. Principe du modèle

Le modèle empirique de sols est basé sur des travaux existants dans la littérature, et ajusté sur les mesures en laboratoire. Après une présentation des bases de la définition du modèle, la démarche de développement du modèle est décrite.

II.1.2.1.1. Bases de définition

Des modèles de spectres de sols ont été développés et validés par le passé dans le domaine réflectif (Muller, 2001 ; Lobell, 2002). Ces modèles relient la réflectance spectrale d'un sol humide à la réflectance du sol sec par une loi exponentielle pour un type de sol donné (cf. §I.2.2.2). De plus, aucune généralisation à une classe regroupant plusieurs sols n'est proposée.

La méthode du SMGM (Whiting, 2004 ; cf. §I.2.2.2) a également montré l'intérêt d'utiliser le logarithme népérien du spectre pour estimer le SMC dans le domaine spectral réflectif. L'utilisation d'un modèle fondé sur le logarithme des réflectances spectrales doit donc être évaluée.

Actuellement, aucun modèle de signature spectrale dépendante du SMC, n'est disponible dans la littérature pour le domaine IRT. La mise en place du MES doit donc être étendue au domaine spectral IRT.

Pour conclure, le développement du MES sera effectué à partir des spectres de référence mesurés et des classes de sols associées (cf. §II.1.1), en prenant en compte :

- le caractère spectral de l'information (impact du SMC variant suivant le domaine spectral considéré, cf. §II.1.1.2.3) ;
- la dépendance à l'humidité (pour simuler un niveau quelconque de SMC) ;
- l'information issue du logarithme népérien ;
- les domaines spectraux réflectif et IRT (couverture du domaine optique).

II.1.2.1.2. Démarche

Pour déterminer la loi mathématique (ou relation empirique) définissant le MES, la démarche consiste à évaluer plusieurs lois liant les valeurs de réflectance (ou de logarithme de réflectance) et de SMC pour une classe de sol et une longueur d'onde données dans les domaines réflectif et IRT.

Les valeurs de réflectance aux longueurs d'onde de $1,4 \mu\text{m}$ pour le réflectif et $4 \mu\text{m}$ pour l'IRT, sont représentées en fonction du SMC sur la Figure 28 pour les *classe1*, *classe3* et *classe4* (les classes étant choisie de façon arbitraire pour l'illustration). Par la suite, les illustrations fournies concerneront ces deux longueurs d'onde et ces classes afin de garder une cohérence (des résultats similaires ayant été obtenus pour toutes les classes et toutes les longueurs d'onde), ces longueurs d'ondes ayant été choisies pour les raisons suivantes : à $1,4 \mu\text{m}$ se situe une des bandes d'absorption de la molécule d'eau ; à $4 \mu\text{m}$ se trouve soit la bande d'absorption des carbonates pour les spectres de type T2M, soit le sommet de la courbe en cloche pour les spectres de type T1M (cf. §II.1.1.2.2). Ces représentations mettent en évidence que la tendance générale des nuages de points est curviligne pour les deux domaines spectraux quelle que soit la classe de sol considérée. Cette tendance est généralisable à toutes les longueurs d'onde et à toutes les classes de sols.

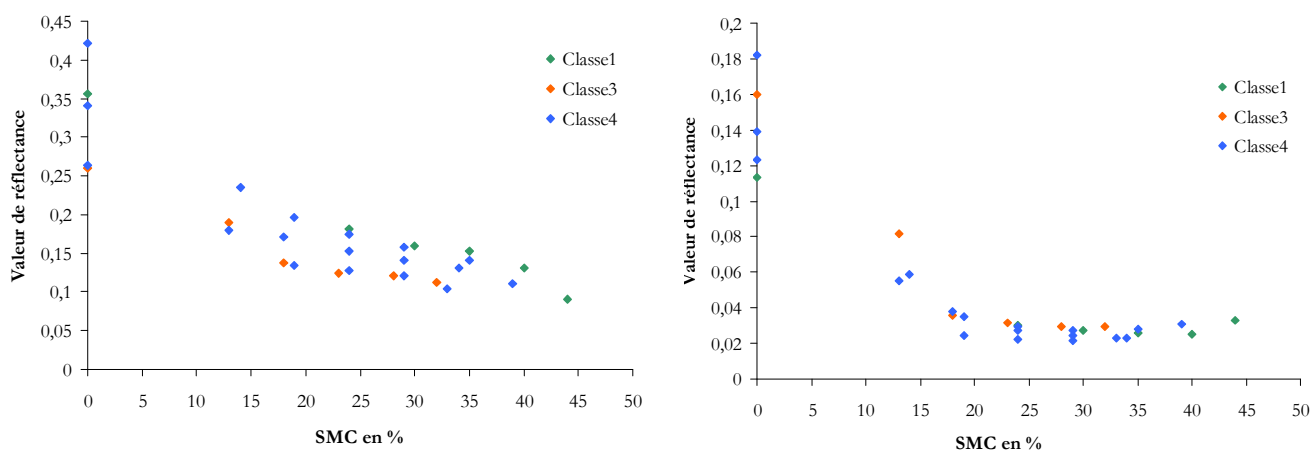


Figure 28 – Valeurs de réflectances en fonction du SMC_g pour trois classes de sol, dans le domaine réflectif à la longueur d'onde de $1,4 \mu\text{m}$ (à gauche) et dans le domaine IRT à la longueur d'onde de $4 \mu\text{m}$ (à droite).

Ainsi, plusieurs modèles de régression non linéaire sont appliqués sur ces nuages de points où les paramètres, dépendant de la longueur d'onde, sont déterminés pour la réflectance spectrale et le logarithme népérien de la réflectance spectrale.

Afin d'évaluer les performances de modélisations à partir de ces lois empiriques, une comparaison entre spectres mesurés et modélisés est effectuée pour chaque classe de sols et chaque domaine spectral. Finalement, les formulations fournissant les meilleurs résultats par domaine spectral, sont retenus et présentées dans le paragraphe suivant.

II.1.2.2. Description du MES à partir des mesures en laboratoire

Après avoir présenté la démarche, la définition, la description du modèle (MES) proposé et sa validation, sont fournies dans ce paragraphe.

II.1.2.2.1. Définition des lois empiriques du MES

Les lois empiriques spectrales retenues, sont celles qui permettent d'obtenir les meilleurs coefficients de détermination R^2 et les plus faibles valeurs d'écart-types entre les spectres mesurés et modélisés pour les différentes classes de sols et les deux domaines spectraux (réflectif et IRT). Ces lois correspondent à une régression non linéaire basée sur un polynôme quadratique, appliqué à la réflectance (pour le domaine réflectif) et au logarithme de la réflectance spectrale (pour le domaine IRT).

La Figure 29 représente les valeurs de réflectance pour le réflectif à la longueur d'onde 1,4 μm (cf. Figure 29, à gauche) et de logarithme de réflectance pour le domaine IRT à 4 μm (cf. Figure 29, à droite) en fonction du SMC pour les *classe1*, *classe3* et *classe4*. Pour ces longueurs d'onde, les R^2 des lois polynomiales sont supérieurs à 80 % quelle que soit la classe de sol considérée.

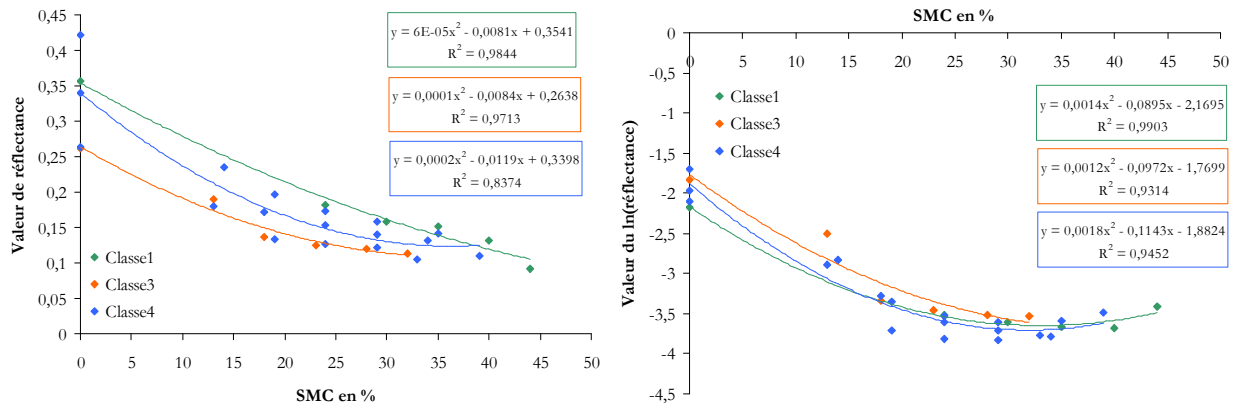


Figure 29 – Valeurs de réflectances à 1,4 μm (à gauche) et du logarithme de la réflectance à 4 μm (à droite) en fonction du SMC_g , pour trois classes de sols. Régressions polynomiales quadratiques (traits).

Le MES proposé est défini par les équations 21 et 22 par domaine spectral :

$$0,4 - 2,5 \mu\text{m} : \quad \rho_{SMC_g}^l(\lambda) = a_l(\lambda) \cdot SMC_g^2 + b_l(\lambda) \cdot SMC_g + c_l(\lambda) \quad (21)$$

$$3 - 14 \mu\text{m} : \quad LN[\rho_{SMC_g}^l(\lambda)] = f_l(\lambda) \cdot SMC_g^2 + g_l(\lambda) \cdot SMC_g + h_l(\lambda) \quad (22)$$

où l désigne la classe de sol étudiée, a , b et c sont les coefficients spectraux de la loi polynomiale quadratique du domaine réflectif, et f , g et h sont les coefficients spectraux de la loi polynomiale quadratique du domaine IRT.

II.1.2.2.2. Description des modélisations du MES

Le MES est au préalable étalonné pour chaque classe de sol afin de déterminer les coefficients spectraux des lois empiriques (a, b, c et f, g, h).

Tous les spectres de sols ne sont pas utilisés à cette étape afin d'en conserver pour la validation qui s'effectue sur l'ensemble des spectres mesurés (ayant servi ou pas à l'étalonnage). Pour chaque classe de sol, le nombre de spectres utilisés pour l'étalonnage est le nombre total de spectres auquel est déduit le nombre total de sol composant la classe. Par exemple, pour la **classe4** composée de 3 sols et de 18 spectres associés à des niveaux d'humidité différents, 15 spectres contribuent alors à l'étalonnage.

Les coefficients spectraux $a_i(\lambda)$, $b_i(\lambda)$, $c_i(\lambda)$ obtenus sur le domaine réflectif, sont représentés pour toutes les classes de sols sur la Figure 30.

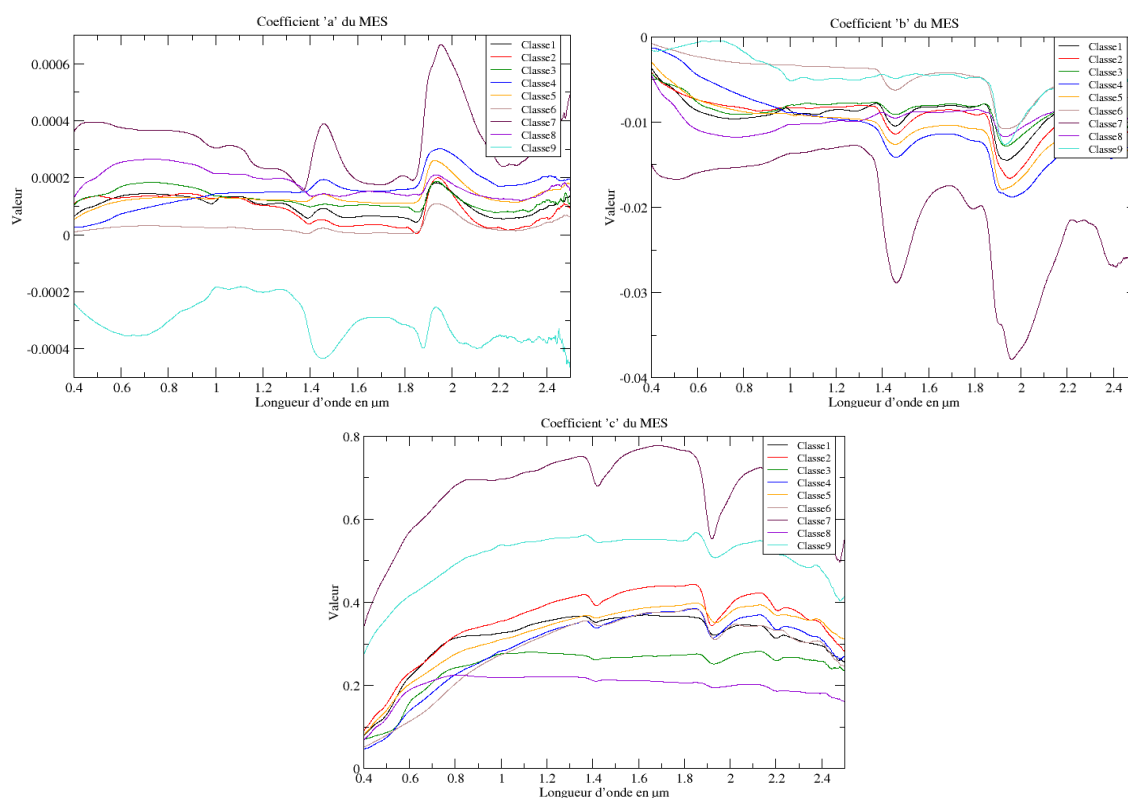


Figure 30 – Coefficients spectraux polynomiaux obtenus sur le domaine réflectif.

Le coefficient $c_i(\lambda)$, associé à un biais, a le plus de poids dans la fonction polynomiale car il est équivalent à la réflectance obtenue lorsque le SMC est de valeur nulle. Ce terme représente donc une valeur moyenne de réflectance spectrale de sol sec pour la classe de sol considérée. Ces valeurs sont tout à fait cohérentes avec les valeurs de spectres mesurés en laboratoire (cf. Annexe V) qui expliquent donc les différences observées sur la figure, suivant la classe de sol.

Les coefficients $a_l(\lambda)$ et $b_l(\lambda)$ ont de plus faibles valeurs que celles de $c_l(\lambda)$. Ils sont différents suivant la classe de sol, et le coefficient $b_l(\lambda)$ représentant un gain appliqué au SMC est 25 fois plus élevé que $a_l(\lambda)$.

Les différents comportements spectraux identifiés lors de la classification des sols dans les domaines du VIS et du NSWIR sont identifiables sur ces coefficients. Par exemple, pour les *classe7* et *classe9*, les comportements de $a_l(\lambda)$ et $b_l(\lambda)$, sont différents sur le VIS par rapport aux autres classes. Cette différence de comportement existe également dans la classification (cf. II.1.1.2.2), puisque ce sont les deux seules classes de sols à avoir un type de comportement T1V sur le domaine du VIS.

Une illustration de modélisation par le MES est fournie pour la *classe1* (cf. Figure 31). Les comparaisons visuelles entre mesures et modélisations permettent de mettre en évidence de faibles écarts pour les différentes valeurs de SMC (écarts les plus faibles dans le domaine réflectif). Le MES est alors validé plus précisément par la suite en quantifiant les erreurs commises.

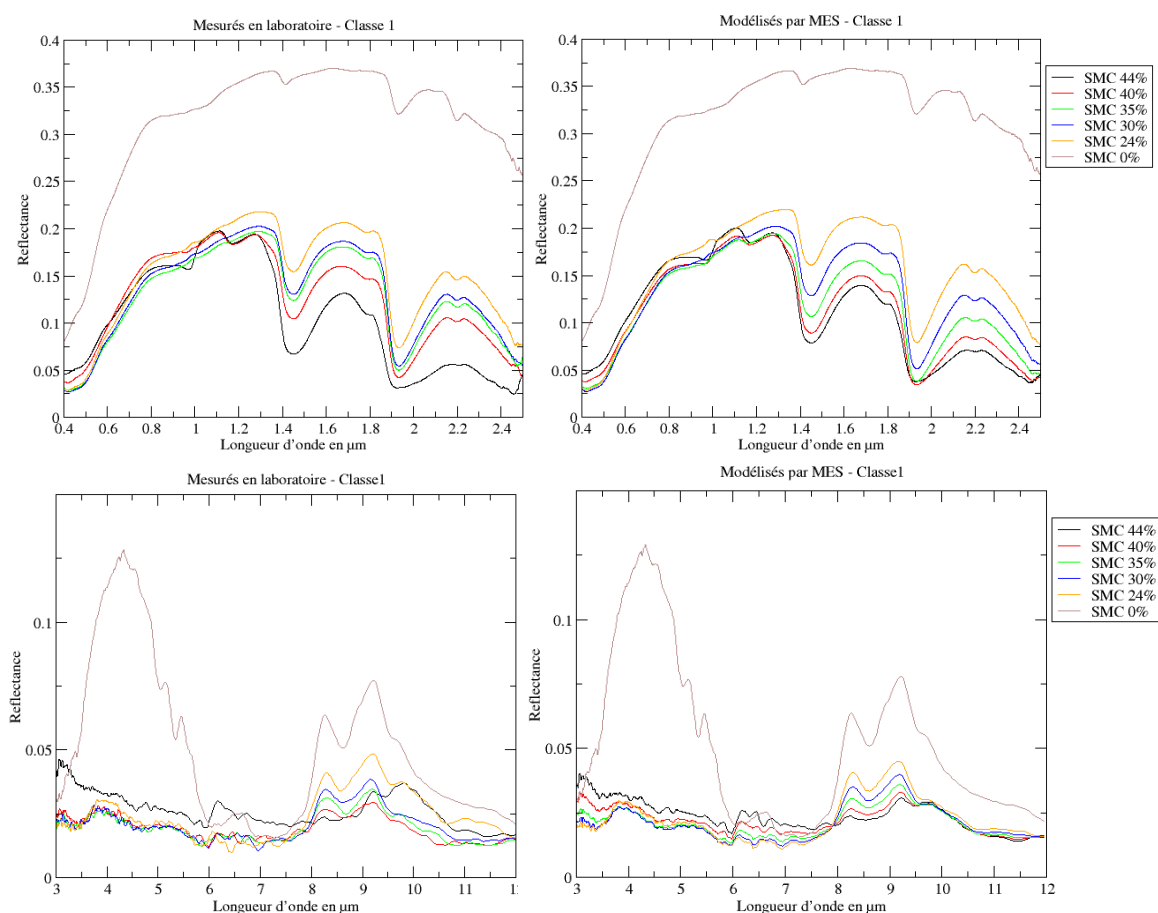


Figure 31 – Spectres mesurés (à gauche) et modélisés par le MES (à droite) pour la *classe 1* sur les domaines réflectif (en haut) et IRT (en bas) pour les différentes valeurs de SMC_g correspondant aux mesures.

II.1.2.2.3. Validation du modèle

La validation du MES est réalisée en deux étapes à partir des mesures en laboratoire. La première consiste à déterminer les performances du modèle à partir des spectres mesurés incluant ceux utilisés pour l'étalonnage, et la deuxième compare les performances du MES à celles du modèle de Lobell (2002) issu de la littérature.

Validation au moyen des spectres mesurés en laboratoire

Le principe est de comparer un spectre modélisé, pour une classe et un SMC_g donnés, à un ou plusieurs spectres de réflectances de la classe mesuré(s) pour le même SMC_g (sachant qu'une classe est composée d'un ou plusieurs sols).

Les différents critères utilisés pour l'analyse sont les suivants :

- le coefficient de détermination R^2 d'une régression linéaire appliquée sur le nuage de points représentant le spectre modélisé en fonction du spectre mesuré afin de vérifier la corrélation des données ;
- l'écart-type σ de ce nuage de points pour caractériser sa dispersion ;
- l'écart absolu entre les spectres modélisé et mesuré, moyenné sur tout le domaine spectral étudié, pour évaluer l'erreur sur le modèle.

Dans un premier temps, le MES est évalué sur les spectres utilisés à l'étalonnage afin de déterminer l'erreur de modélisation intrinsèque. Dans un second temps, il est évalué exclusivement sur les spectres n'ayant pas servi à l'étalonnage pour fournir des performances sur l'erreur de modélisation.

Evaluation de la performance intrinsèque

Les résultats indiqués dans le Tableau 12 correspondent à des valeurs moyennées sur le nombre de spectres (utilisés à l'étalonnage) composant chacune des classes.

MESURES	REFLECTIF			IRT		
	R ² en %	σ	Ecart absolu	R ² en %	σ	Ecart absolu
Classe1 (5 spectres)	99,5	0,003	0,005	94,7	0,001	0,002
Classe2 (18 spectres)	97	0,01	0,03	80	0,005	0,008
Classe3 (5 spectres)	99,5	0,003	0,007	95,6	0,002	0,003
Classe4 (15 spectres)	97,7	0,007	0,02	93,3	0,003	0,004
Classe5 (80 spectres)	99	0,004	0,02	90	0,004	0,006
Classe6 (15 spectres)	99,7	0,003	0,01	91,7	0,002	0,003
Classe7 (5 spectres)	99,9	0,003	0,006	98,2	0,002	0,001
Classe8 (10 spectres)	97,2	0,004	0,01	95,4	0,002	0,003
Classe9 (5 spectres)	99,8	0,002	0,005	99,9	0,001	0,004

Tableau 12 – Performances du MES sur les spectres mesurés en laboratoire et utilisés pour l'étalonnage, dans les domaines spectraux réflectif et IRT.

Dans le domaine réflectif (cf. Tableau 12), les corrélations sont élevées avec des valeurs supérieures à 97 % pour toutes les classes de sols. Les meilleures performances (R^2 de 99 %) sont obtenues pour les classes composées d'un seul sol (*classe1*, *classe3*, *classe7*, *classe9*) mais également pour les *classe5* et *classe6* composées de plusieurs sols (respectivement seize et trois). Ce dernier résultat est dû au fait que les sols de ces classes proviennent, pour la majorité, de la même région géographique et présentent de grandes similarités spectrales. Pour ces six classes, les nuages de points (cf. Figure 32) sont peu dispersés ($0,002 < \sigma < 0,004$) ce qui signifie que les spectres sont correctement modélisés sur toutes les longueurs d'onde du domaine considéré. L'écart absolu est en moyenne inférieur à 0,02 pour les réflectances spectrales dont les niveaux varient entre 0,02 et 0,8 suivant la classe de sol et le SMC considérés. L'écart est alors plus important pour les sols les plus humides mais l'erreur sur les niveaux de réflectances reste en moyenne inférieure à 20 % (cf. Figure 32).

Les performances plus faibles des trois autres classes, résultent des différences de niveaux de réflectance mesurés qui peuvent apparaître au sein d'une classe pour des SMC proches ou équivalents. Ces disparités sont d'autant plus importantes que les sols composants une classe proviennent de régions différentes, comme pour la *classe2* par exemple.

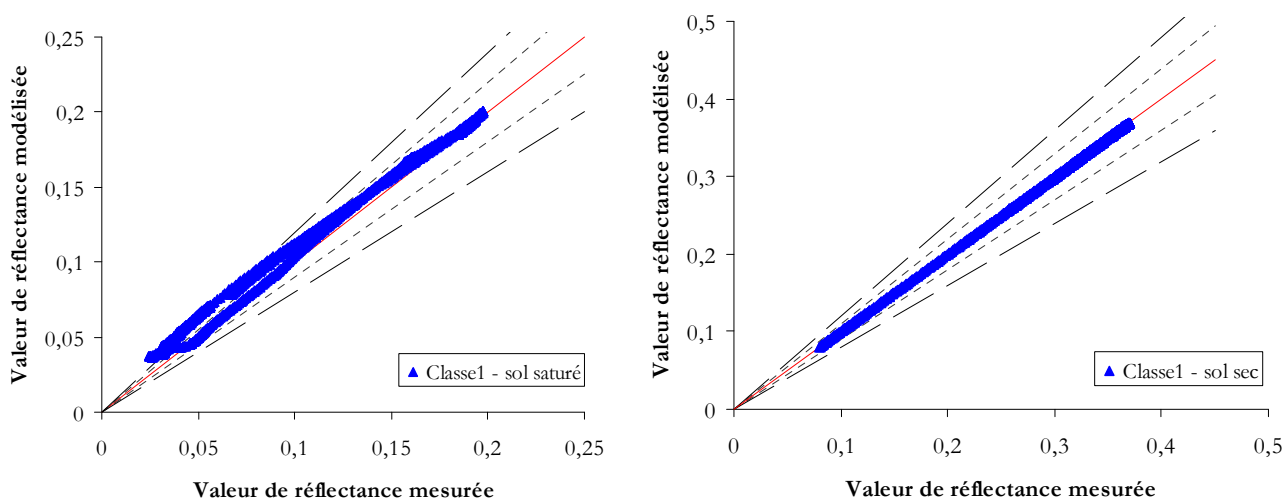


Figure 32 – Valeurs de réflectances mesurées en fonction de celles modélisées dans le domaine réflectif, pour un sol saturé (à gauche) et un sol sec (à droite) de la *classe1*. La bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 10 % et 20 %.

Sur le domaine de l'IRT (cf. Tableau 12) les modélisations sont bien corrélées aux mesures sur l'ensemble des classes considérées avec un R^2 supérieur à 90 %, excepté pour la *classe2*. Les spectres des quatre sols composant cette classe présentent des niveaux différents notamment dans le MWIR (cf. Annexe V). Le nuage de points (cf. Figure 33) est représenté pour illustrer les comparaisons dans ce domaine, sur un sol saturé (cf. Figure 33, à gauche) et un sol sec (cf. Figure 33, à droite). L'écart-type et l'écart absolu sont plus élevés lorsque le sol est saturé.

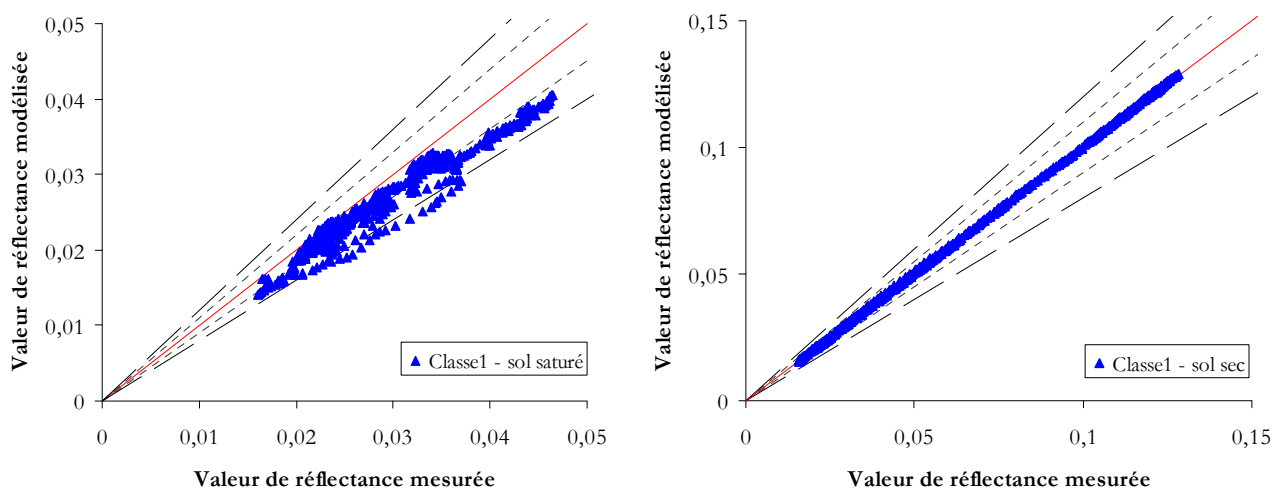


Figure 33 – Valeurs de réflectances mesurées en fonction de celles modélisées dans le domaine IRT, pour un sol saturé (à gauche) et un sol sec (à droite) de la *classe1*. La bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 10 % et 20 %.

Sur le domaine IRT, les modélisations sont moins bien corrélées aux mesures que sur le réflectif. Toutefois, les valeurs d'écart-types sont proches car le nombre de bandes spectrales dans le domaine réflectif est deux fois plus important que celui dans le domaine IRT ; et les écarts absolus sont du même ordre de grandeur car la réflectance du domaine réflectif présente un niveau quasiment deux fois plus élevé.

En conclusion, pour les échantillons de sols utilisés à l'étalonnage, le modèle MES représente le comportement spectral sur l'ensemble du domaine optique avec en moyenne une corrélation meilleure que 90 %, un écart-type inférieur à 0,005 et un écart absolu inférieur à 0,02.

Evaluation de la performance de modélisation

Les performances du MES sur les spectres qui n'ont pas servi à l'étalonnage sont à présent évaluées. Les résultats des comparaisons de ces spectres sont donnés dans le Tableau 13.

MESURES 2008	REFLECTIF			IRT		
	R ² en %	σ	Ecart absolu	R ² en %	σ	Ecart absolu
Classe1 (1 spectre)	96,5	0,009	0,01	91,3	0,001	0,001
Classe2 (4 spectres)	97,2	0,01	0,02	73	0,007	0,008
Classe3 (1 spectre)	99,2	0,003	0,009	68,1	0,003	0,003
Classe4 (3 spectres)	98,2	0,006	0,03	92,2	0,003	0,005
Classe5 (16 spectres)	99,2	0,004	0,02	91	0,004	0,005
Classe6 (3 spectres)	99,6	0,003	0,009	83,2	0,002	0,003
Classe7 (1 spectre)	99,8	0,005	0,06	69	0,01	0,03
Classe8 (2 spectres)	96,3	0,004	0,006	97,3	0,002	0,005
Classe9 (1 spectre)	98,7	0,007	0,08	57,8	0,01	0,01

Tableau 13 – Performances du MES sur les spectres mesurés en laboratoire et non utilisés pour l'étalonnage, dans les domaines spectraux réflectif et IRT.

Pour le domaine réflectif, les résultats sont comparables à ceux obtenus sur les spectres utilisés pour l'étalonnage. En revanche, pour le domaine IRT, les performances du MES sur les spectres non utilisés à l'étalonnage sont plus faibles. Quatre classes (*classe2*, *classe3*, *classe7*, et *classe9*) présentent des corrélations inférieures à 80 %. Pour les sols de la *classe2*, ceci est encore expliqué par les différences de niveaux des réflectances dans le MWIR. Concernant les trois autres classes, la mauvaise interpolation du polynôme est causée par un nombre d'échantillon de sol réduit pour ces classes (un seul sol par classe) et par l'échantillonnage irrégulier des niveaux de SMC. Par exemple pour la *classe7*, les lois empiriques sont définies à partir de nuages de points qui présentent un écart important entre les valeurs de SMC (transition des niveaux de SMC_g de 0 ‰ et 16 ‰), qui ne permet pas de reconstruire correctement la relation liant la réflectance au SMC pour une longueur d'onde donnée. Le modèle ne peut restituer sans erreur un spectre dont la valeur de SMC se situe dans cet intervalle.

Pour le domaine optique (0,4 – 14 μm), le MES permet toutefois de modéliser correctement des signatures spectrales non utilisées pour l'étalonnage, avec une corrélation meilleure que 80 %, un écart-type inférieur à 0,006 et un écart absolu inférieur à 0,03.

Validation par comparaison au modèle de Lobell

Les performances du MES sont comparées à celles du modèle de Lobell et al. (2002) (cf. équation 15, §I.2.2.2). Ce dernier conduit à des résultats acceptables même s'il présente l'inconvénient de ne pas être généralisable à différentes classes de sol.

Le modèle de Lobell est étalonné en utilisant les spectres secs et saturés de quatre classes composées d'un seul sol (*classe1*, *classe3*, *classe7* et *classe9*). Ensuite, des spectres sont modélisés pour des valeurs de SMC équivalentes aux mesures, et des comparaisons entre les modèles et les mesures sont effectuées.

Sur la Figure 34 sont représentés les spectres de la *classe1*, mesurés (à gauche), modélisés à partir de l'équation de Lobell (au centre) et modélisés par MES (à droite). Ce sol est choisi arbitrairement pour illustrer la comparaison des modèles.

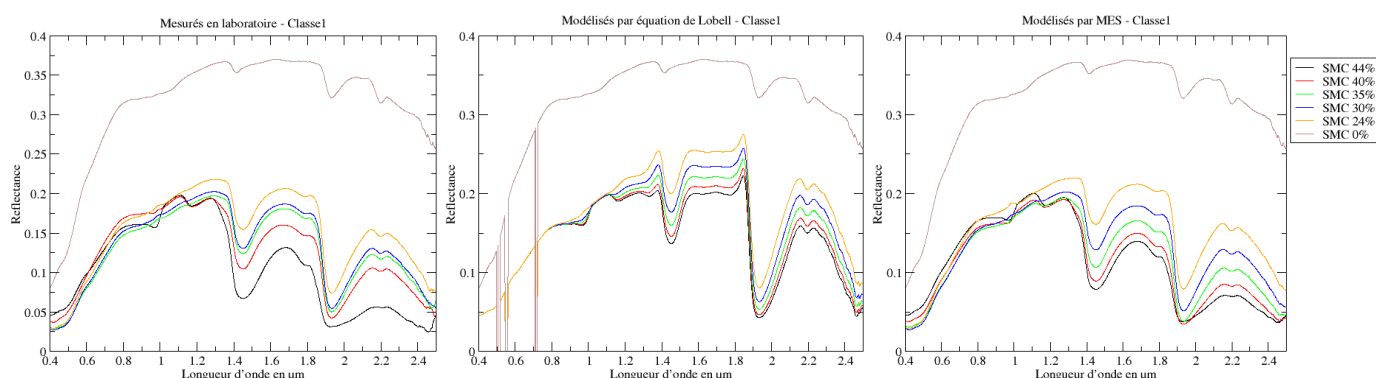


Figure 34 – Spectres mesurés (à gauche), modélisés par Lobell (au milieu) et par MES (à droite), de la *classe1* dans le domaine réflectif, pour différentes valeurs de SMC_g .

Les écarts entre spectres de sol sec modélisés et mesurés semblent équivalents pour le modèle de Lobell et le MES, hormis pour des bandes caractéristiques. Au-delà, le modèle de Lobell surestime les spectres modélisés par rapport aux mesures et ne maîtrise plus la modélisation de la réflectance lorsque le SMC augmente.

Le Tableau 14 permet de comparer les performances des deux modèles. Avec le modèle de Lobell, les corrélations entre modélisations et mesures sont plus faibles que celles obtenues avec le MES. Pour les quatre sols, les valeurs varient entre 73 % et 85 %, alors qu'elles sont de l'ordre de 99 % pour le MES. Les écarts-types sont dix fois plus élevés, et en moyenne l'écart absolu est cinq fois plus grand pour le modèle de Lobell par rapport aux valeurs obtenues pour le MES.

Pour conclure, dans le domaine réflectif, le modèle MES apporte une amélioration par rapport au modèle de Lobell quel que soit le SMC.

MESURES 2008	LOBELL			MES		
	R ² en %	σ	Ecart absolu moyen	R ² en %	σ	Ecart absolu moyen
Classe1 (6 spectres)	73,5	0,03	0,03	99	0,004	0,006
Classe3 (6 spectres)	73,3	0,02	0,03	99,4	0,003	0,007
Classe7 (6 spectres)	85,1	0,05	0,05	99,9	0,003	0,01
Classe9 (6 spectres)	84,8	0,02	0,08	99,6	0,003	0,02

Tableau 14 – Comparaison des performances du Modèle de Lobell et du MES sur les mesures en laboratoire, pour quatre classes de sols dans le domaine spectral réflectif.

II.1.2.3. Evaluation des performances du MES

Après avoir validé le MES sur les mesures en laboratoire, il convient d'évaluer ses performances sur d'autres jeux de mesures pour vérifier que le MES est généralisable à tout type de sol. Pour cela, deux jeux de données ont été utilisés : les mesures effectuées en laboratoire par Mourin (2006) et des mesures en laboratoire extraites de Liu et al. (2002).

II.1.2.3.1. Mesures en laboratoire de Mourin (2006)

Ces mesures effectuées à l'ONERA, sont constituées de quatre échantillons de sols dénommés : *craie*, *sable*, *terre* et *terreau*. Les spectres de ces échantillons ont été acquis dans les domaines réflectif et IRT, pour cinq (terreau) ou six (craie, sable, terre) niveaux de SMC_g différents, dans des conditions proches de celles définies dans notre protocole de mesure et avec les mêmes instruments (cf. §II.1.1.1).

L'évaluation du MES sur ce jeu de mesures, est effectuée de deux manières : sans et avec réétalonnage du MES.

Sans réétalonnage du MES

Le MES est tout d'abord utilisé sans réétalonnage, sur les sols dénommés *craie*, *sable* et *terre* (l'échantillon *terreau* n'est pas retenu à cette étape car il est composé d'un mélange de terre et d'humus). Au préalable, chacun de ces sols est associé à une classe par comparaison des signatures spectrales des sols secs.

Pour le sol *craie*, les réflectances spectrales sont modélisées avec les coefficients de la *classe7*, car leurs spectres ont des comportements identiques dans les domaines spectraux réflectif et IRT. Les spectres modélisés pour le sol *craie* et les différents SMC sont bien corrélés aux spectres mesurés dans les deux domaines spectraux avec respectivement un R^2 moyen de 98 % et 81,1 % (cf. Tableau 15).

Pour le sol *sable*, les modélisations ont été effectuées avec les coefficients de la *classe5*. Même s'il n'existe aucun échantillon de sol composé de sable dans cette classe, des caractéristiques spectrales communes existent entre ce sol et la *classe5*. Cependant, ces caractéristiques ne suffisent pas à modéliser correctement les spectres de réflectances du *sable*, car les performances du MES sont faibles pour le réflectif et l'IRT (R^2 de l'ordre de 76 % et 48 %). Pour améliorer ces résultats, il faudrait disposer des mesures sur différents échantillons de sable afin d'étalonner le MES au préalable.

Enfin, les spectres de *terre* ont été modélisés avec les coefficients de la *classe4*. Une bonne corrélation (83,3 %) entre modèles et mesures est observé dans les deux domaines spectraux.

Cette première étape d'évaluation du MES sur ce jeu de mesures est donc concluante, notamment pour le domaine réflectif.

MESURES 2006	REFLECTIF			IRT		
	R ² en %	σ	Ecart absolu moyen	R ² en %	σ	Ecart absolu moyen
Craie (6 spectres)	98	0,02	0,04	81,1	0,006	0,01
Sable (6 spectres)	76,8	0,02	0,04	47,8	0,02	0,02
Terre (6 spectres)	96,5	0,01	0,9	83,3	0,005	0,03

Tableau 15 – Performances du MES sur les mesures de Mourin (2006), sans réétalonnage, dans les domaines spectraux réflectif et IRT.

Avec réétalonnage du MES

Pour ce jeu de données, le MES a ensuite été étalonné pour ces sols avec quatre (*terreau*) ou cinq (*craie*, *sable*, *terre*) spectres. Les performances du MES établies sur tous les spectres de ce jeu de mesures (utilisés ou non à l'étalonnage) sont indiquées dans le Tableau 16, et confirment son efficacité. Des valeurs similaires (en termes de corrélation, d'écart-type et d'écart absolu) sont obtenues en comparaison à celles déduites de notre jeu de mesures (cf. Tableau 12 et Tableau 13), aussi bien sur le domaine réflectif que sur l'IRT.

Une illustration est fournie sur la Figure 35, avec la représentation des spectres mesurés et des spectres modélisés par MES pour l'échantillon de *craie* sur les domaines réflectif et IRT. On y observe des divergences similaires à celles obtenues avec notre jeu de mesures dans le domaine réflectif. Par exemple, le spectre avec la valeur de SMC la plus élevée, est sous-évalué sur le réflectif (cf. Figure 31 pour la *classe1*). Dans le domaine IRT, les plus grands écarts se situent dans le MWIR.

MESURES 2006	REFLECTIF			IRT		
	R ² en %	σ	Ecart absolu moyen	R ² en %	σ	Ecart absolu moyen
Craie (6 spectres)	98,8	0,01	0,02	91,3	0,003	0,004
Sable (6 spectres)	95,4	0,007	0,01	98,3	0,003	0,008
Terre (6 spectres)	97,5	0,009	0,03	94	0,004	0,009
Terreau (5 spectres)	99,5	0,005	0,02	93,1	0,001	0,004

Tableau 16 – Performances du MES sur les mesures de Mourin (2006), avec réétalonnage, dans les domaines spectraux réflectif et IRT.

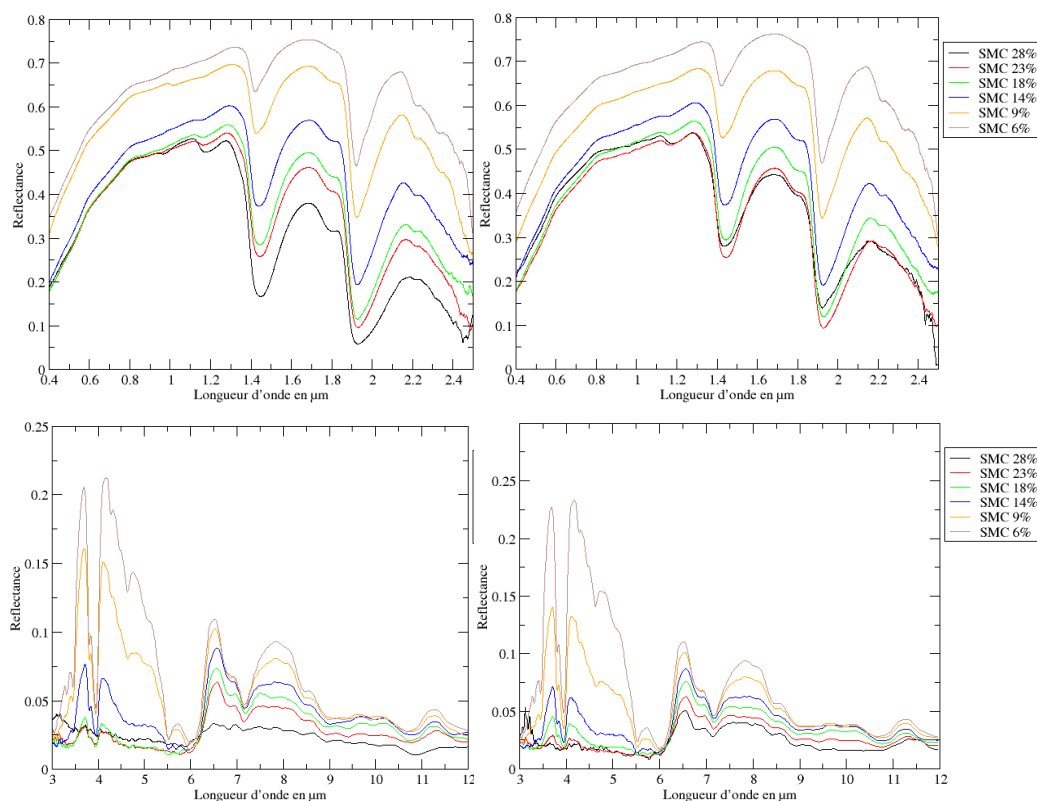


Figure 35 – Spectres mesurés (à gauche) et modélisés par le MES (à droite), pour l'échantillon de *craie* (mesures 2006) dans les domaines réflectif (en haut), et IRT (en bas), pour différentes valeurs de SMC.

Pour conclure, ces quatre sols permettent de vérifier que le MES est généralisable à d'autres types de sol sur les domaines réflectif et IRT. Les performances du MES peuvent être améliorées s'il est étalonné avec d'autres classes de sols communes comme par exemple les sables.

II.1.2.3.2. Mesures en laboratoire de Liu et al. (2002)

L'évaluation du MES repose à présent sur des mesures effectuées par Liu et al. (2002) sur quatre vingt onze échantillons de sols. Tous les spectres disponibles, mesurés pour quatre valeurs de SMC sur le domaine spectral réflectif sont utilisés.

Ces échantillons n'ayant pas été mesurés dans le domaine IRT, il n'est pas possible de les caractériser par notre classification basée sur les spectres de sols secs dans les domaines réflectif et IRT. Il est donc nécessaire de réétalonner le MES sur ces mesures.

Etant donné que le nombre de niveaux de SMC est limité à quatre, l'étape d'étalonnage du MES utilise tous les spectres de chaque sol (soit 364 spectres, puisque 91 sols pour 4 SMC).

Le nombre de sols étant très importants, les valeurs minimales, maximales et moyennes des performances du MES sont données dans le Tableau 17. Un R^2 moyen supérieur à 99 % est obtenu pour tous ces sols. Un exemple de modélisation est fourni par la Figure 36 pour un sol. Ces très bons résultats peuvent s'expliquer par le fait que tous les spectres ont été utilisés pour l'étalonnage.

En conclusion, le MES conduit à des modélisations de qualité après une adaptation de ses lois spectrales empiriques au jeu de mesures exploités.

MESURES LIU 2002	R^2 en %	σ	Ecart absolu moyen
Valeur minimale (364 spectres)	97,7	0,001	0,009
Valeur maximale (364 spectres)	99,9	0,006	0,04
Moyenne sur les 91 sols	99,5	0,003	0,04

Tableau 17 – Résultats des performances du MES sur les mesures de Liu *et al.* (2002), dans le domaine réflectif.

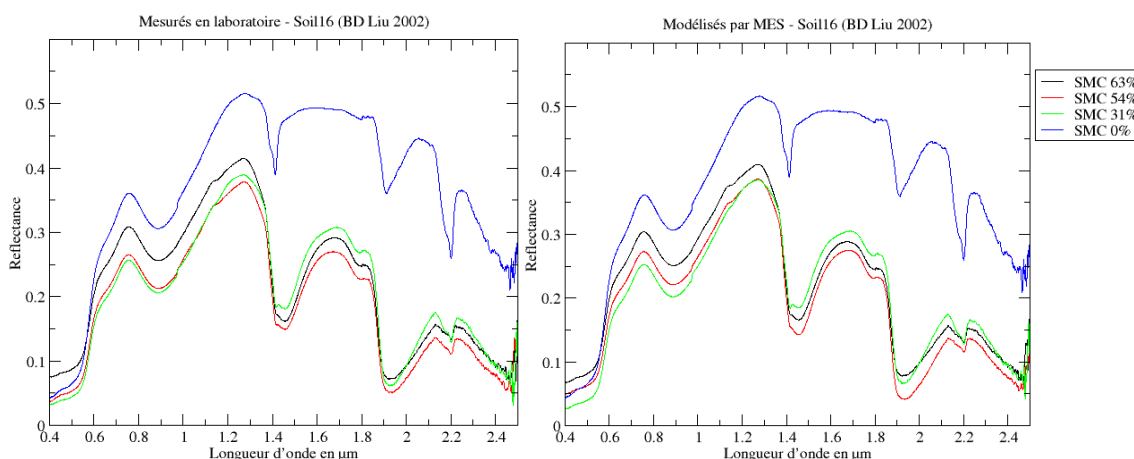


Figure 36 – Spectres mesurés du 'Soil16' issues des mesures de Liu *et al.* (2002) (à gauche) et spectres obtenus par MES (à droite).

II.1.3. Conclusions

Un nouveau jeu de données de réflectances spectrales basé sur le SMC a été mis en place dans les domaines spectraux réflectif et IRT. Ce jeu présente les avantages d'intégrer un nombre d'échantillons plus importants que les jeux existants par ailleurs, de couvrir tout le domaine optique et de prendre en compte plusieurs niveaux de SMC.

Ces mesures ont permis de définir une classification basée sur le comportement spectral des échantillons de sols secs sur les domaines suivants : VIS, NSWIR, MWIR et LWIR.

A partir des classes de sols définies, un nouveau modèle (MES) permettant la modélisation d'un spectre de réflectance quel que soit le SMC, a été établi. Ce modèle s'étend du domaine réflectif à l'IRT, avec de bonnes performances pour toutes les classes (R^2 supérieur à 90 % pour le domaine réflectif, et R^2 supérieur à 80 % pour le domaine IRT). Le MES est généralisable à d'autres jeux de données, et présente l'avantage d'être utilisable sans réétalonnage au préalable même si ses performances peuvent être améliorées lorsque celui-ci est pratiqué.

Les propriétés optiques de référence (mesurées et simulées) étant définies, la caractérisation du SMC à partir de celles-ci est abordée dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Estimation du contenu en eau des sols à partir des propriétés optiques de référence

L'objet de ce deuxième chapitre est de comparer et de sélectionner des critères permettant d'estimer le SMC à partir de la signature spectrale des sols nus dans les domaines réflectif et IRT. Pour cela, ces critères sont appliqués sur les propriétés optiques de référence, c'est-à-dire du jeu de données mesurés en laboratoire (cf. §II.1.1) et de spectres issus du modèle empirique de sols (MES) (cf. §II.1.2). Ces deux jeux de données sont respectivement appelés "spectres de référence mesurés" et "spectres de référence simulés". Par la suite, l'expression "tous les échantillons de sols pris ensemble" sera désignée par "classes regroupées".

Dans un premier temps, les méthodes localisées et globales conduisant à la détermination des critères d'estimation du SMC sont présentées.

Ensuite, les critères établis sont évalués à partir des spectres de référence sur l'ensemble du domaine optique. Le coefficient de corrélation R^2 est retenu pour évaluer la qualité de chaque loi empirique reliant le SMC à un critère (relation linéaire ou non liant le SMC au critère). Les différents critères sont comparés en termes de $RMSE$ (%). Les résultats sont présentés par domaine spectral.

Enfin, les critères retenus pour la détermination du SMC à partir de la signature spectrale d'un sol nu, dans les domaines spectraux réflectif et IRT, sont regroupés dans un outil appelé ALOHA (criteriA for soil moisture estimation from Hyperspectral data).

II.2.1. Méthodes d'estimation du contenu en eau des sols

Suite à la synthèse de l'état de l'art (cf. §I.2.3), on peut distinguer les méthodes localisées et globales.

II.2.1.1. Méthodes localisées

Ces méthodes regroupent les indices spectraux issus de la littérature dans le domaine réflectif (cf. §I.2.2.1.2), et de nouveaux indices définis au moyen d'un outil de calcul de matrices de corrélation (cf. Annexe VI).

II.2.1.1.1. Indices spectraux de la littérature

Les indices de la littérature (cf. Tableau 18) sont basés sur l'hypothèse d'une relation linéaire entre l'indice et un paramètre biophysique. Ils sont évalués, en termes de performance, à partir de régressions linéaires et du coefficient de corrélation linéaire de Pearson (cf. Annexe II).

Afin de s'assurer du choix des indices sensibles au SMC, la non linéarité de ces indices vis-à-vis de l'humidité est également analysée dans notre cas. Trois indices spectraux développés pour une application sol nu (cf. Annexe IV) ont été retenus pour le domaine réflectif et sont répertoriés dans le Tableau 18. : NSMI (Haubrock, 2008a), SASI (Khanna, 2007) et WISOIL (Bryant, 2003).

Indice	Bandes spectrales exploitées
NSMI	1,8 μm ; 2,119 μm
SASI	[0,84 – 0,87 μm] ; [1,23 – 1,25 μm] ; [1,63 – 1,65 μm]
WISOIL	1,3 μm ; 1,45 μm

Tableau 18 – Bandes spectrales exploitées par les indices spectraux issus de la littérature dans le domaine réflectif (cf. Annexe IV).

II.2.1.1.2. Nouveaux indices spectraux

Comme décrit dans la partie état de l'art (cf. §I.2.2), l'outil de matrice de corrélation (cf. Annexe VI) basé sur des corrélations linéaires a permis à Haubrock *et al.* (2008a) de définir un indice spectral NSMI (rapport normalisé) sensible au SMC exploitant des bandes spectrales du domaine réflectif.

Cet outil est alors utilisé pour définir de nouveaux indices spectraux dans les domaines spectraux réflectif et IRT. Les coefficients de corrélation linéaire (de Pearson) et également les coefficients de corrélation non linéaire (de Spearman) sont évalués (cf. Annexe II). Dans la littérature, seules les corrélations linéaires étant abordées, il est intéressant d'évaluer l'apport de la corrélation non linéaire pour l'étude de nouveaux indices (cf. Annexe II).

Dans les domaines réflectif et IRT, deux grandeurs, $X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j)$ et $X_{pente}(\lambda_i, \lambda_j)$ définies par les équations ci-dessous sont évaluées :

$$X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j) = \frac{\rho(\lambda_i) - \rho(\lambda_j)}{\rho(\lambda_i) + \rho(\lambda_j)} \quad (23)$$

$$X_{pente}(\lambda_i, \lambda_j) = \frac{\rho(\lambda_i) - \rho(\lambda_j)}{\lambda_i - \lambda_j} \quad (24)$$

où $\rho(\lambda_i)$ et $\rho(\lambda_j)$ correspondent respectivement à la valeur de la réflectance à la longueur d'onde λ_i et à la longueur d'onde λ_j .

Le rapport normalisé $X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j)$ est largement utilisé dans la littérature pour déterminer des indices spectraux et a l'avantage de diminuer sensiblement l'impact de la rugosité du sol sur la réflectance spectrale dans le domaine réflectif (cf. §I.2.2).

Concernant le choix de $X_{pente}(\lambda_i, \lambda_j)$, celui-ci est basé sur l'observation des spectres de référence mesurés. En effet, si on analyse des segments de droites (pentes) constitués par deux valeurs de réflectances spectrales, à deux longueurs d'onde, on observe qu'ils peuvent varier avec le SMC suivant les longueurs d'onde retenues. Par exemple (cf. Figure 37) pour l'échantillon **11Malves**, la pente (ou segment) définie à partir de points situés de chaque côté d'une bande d'absorption (ici $1,3 \mu\text{m}$ et $1,7 \mu\text{m}$) est négative pour des valeurs de SMC_g supérieures à 16 ‰ , alors qu'elle devient positive pour des SMC_g inférieurs à 7 ‰ .

Les relations empiriques liant le SMC aux nouveaux indices obtenus sont établies à partir de régressions linéaires ou non linéaires (polynomiale, logarithmique, etc.).

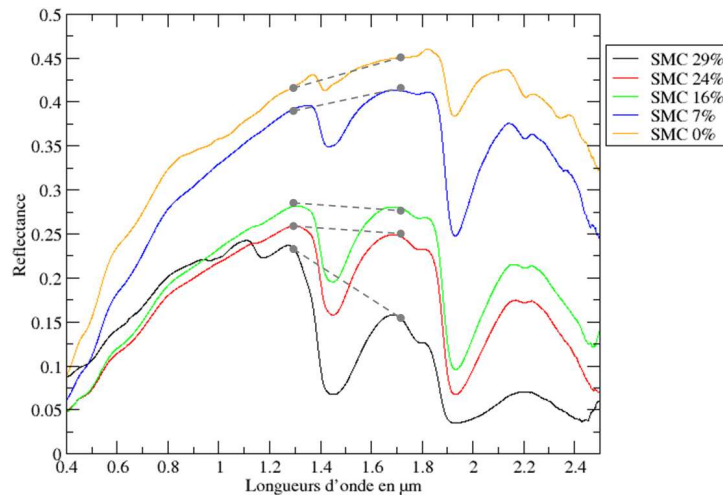


Figure 37 – Illustration des variations de pente (traits gris en pointillés) entre deux valeurs de réflectances spectrales prises à $1,3 \mu\text{m}$ et $1,7 \mu\text{m}$ pour différentes valeurs de SMC_g . Spectres de référence mesurés dans le réflectif sur l'échantillon **11Malves**.

II.2.1.2. Méthodes globales

Deux méthodes globales sont considérées : le modèle d'enveloppe convexe (exploité pour le SMGM ; Whiting, 2004) et l'inversion du MES (cf. §II.1.2).

II.2.1.2.1. Le modèle d'enveloppe convexe

Nous exploitons le modèle d'enveloppe convexe (dénommé "EC") qui est introduit par Whiting *et al.* (2003, 2004) pour mettre en place la méthode SMGM (cf. Figure 15, §I.2.2.2). Whiting *et al.* (2003, 2004) utilise l'EC pour ajuster une gaussienne inverse à la forme du spectre sur l'intervalle 1,8 – 2,8 μm . Dans notre cas, l'EC est exploitée pour modéliser la forme générale du spectre par domaine spectral (réflectif ou IRT). Un nouveau critère associé à l'écart entre l'EC et le spectre est alors défini. Pour cela, les points de l'enveloppe relatifs aux principales bandes d'absorption des minéraux sont filtrés pour représenter uniquement la forme générale du spectre (ou continuum) sur le domaine spectral considéré (cf. Figure 38).

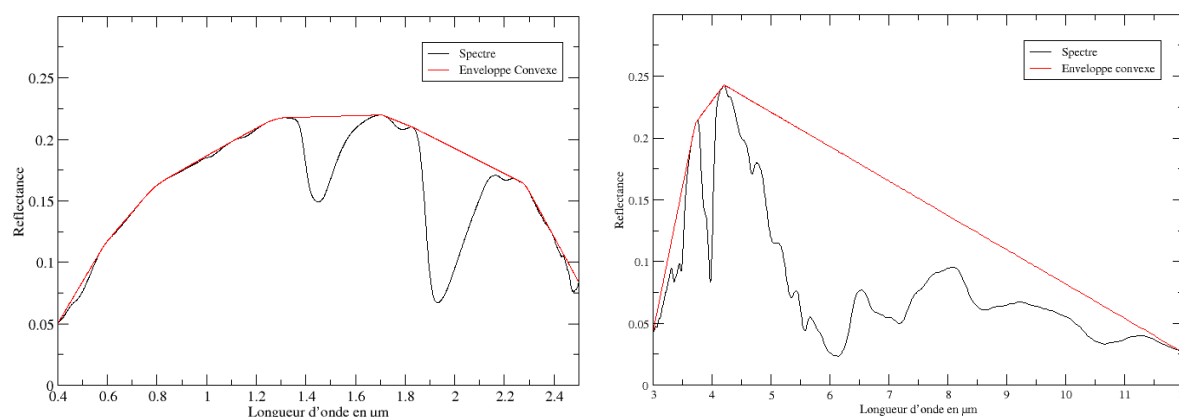


Figure 38 – Illustration du modèle d'EC dans le domaine réflectif (à gauche) et IRT (à droite) appliqué sur un spectre de référence mesuré.

L'aire sous la courbe, obtenue par soustraction du spectre à l'enveloppe convexe, varie suivant la valeur de SMC comme l'indique la Figure 39. Ce phénomène s'explique par les évolutions, suivant la valeur de SMC, que subissent les différentes bandes d'absorption (du VIS au MWIR) ou de Reststrahlen (pour le LWIR) présentes sur un spectre (cf. §II.1.1.2.3).

Dans le domaine réflectif, l'aire sous la courbe augmente avec le SMC car ceux sont les bandes d'absorption de l'eau (situées notamment à 1,4 μm et 1,9 μm) qui prédominent (cf. Figure 39, à gauche). Par contre, dans le domaine IRT, le phénomène inverse se produit, c'est-à-dire que l'aire diminue lorsque le SMC augmente (cf. Figure 39, à droite) car les bandes de Reststrahlen diminuent (cf. §II.1.1.2.3).

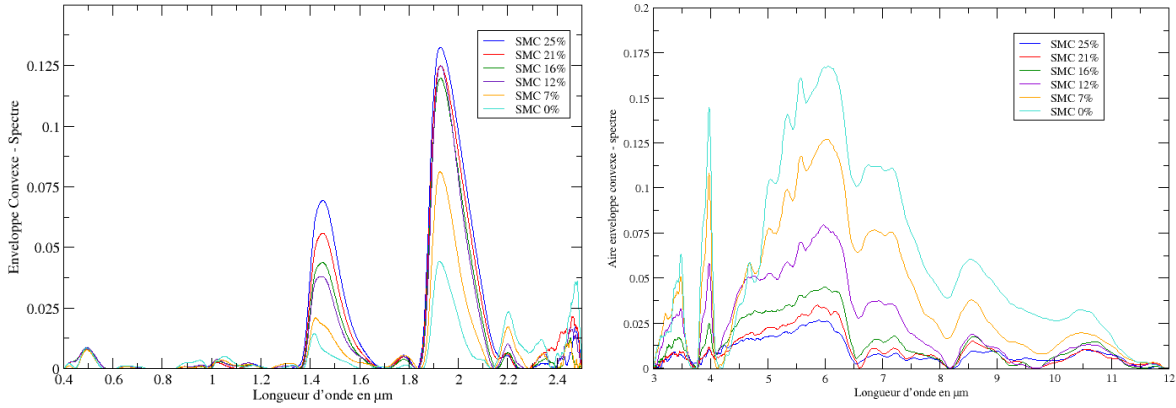


Figure 39 – Représentation de l'aire sous la courbe, entre l'EC et le spectre, pour différents niveaux de SMC_g dans les domaines réflectif (à gauche) et IRT (à droite).

Par conséquent, la méthode consiste à déterminer l'aire comprise entre l'enveloppe convexe et le spectre pour un SMC_g donné sur le domaine spectral étudié (réflectif ou IRT). Cette valeur d'aire est désignée aire sous l'EC. La relation entre le SMC_g et cette aire est ensuite modélisée par une régression linéaire.

Pour compléter ce modèle, le logarithme népérien du spectre est utilisé. En effet, les travaux de Whiting *et al.* (2004) ont également montré que l'application du SMGM sur le logarithme népérien de la réflectance spectrale améliore les performances d'estimation du SMC. Par conséquent, l'aire sous l'EC sera également calculée à partir du logarithme des spectres.

II.2.1.2.2. Inversion du MES

Pour rappel, le modèle empirique de sol (MES) permet pour chaque classe de sol, de simuler des spectres de réflectances pour un SMC_g donné sur l'ensemble du domaine optique (cf. §II.1.2). Dans ce cas, le MES est exploité en sens inverse pour fournir pour une classe de sol donnée, à partir de sa signature spectrale, le SMC associé.

Pour chaque classe de sol, le MES inverse consiste à estimer la valeur de SMC à partir des équations de modélisation du modèle direct (cf. §II.1.2). Les équations sont rappelées ci-dessous :

$$\rho_{SMC_g}^l(\lambda) = a_l(\lambda) \cdot SMC_g^2 + b_l(\lambda) \cdot SMC_g + c_l(\lambda) \quad (25)$$

$$LN[\rho_{SMC_g}^l(\lambda)] = f_l(\lambda) \cdot SMC_g^2 + g_l(\lambda) \cdot SMC_g + h_l(\lambda) \quad (26)$$

où l désigne la classe de sol étudiée, a , b et c sont les coefficients spectraux de la loi polynomiale quadratique du domaine réflectif, et f , g et h sont ceux de la loi polynomiale quadratique de l'IRT. Ces coefficients sont définis à l'étape d'étalonnage du MES (cf. §II.1.2).

La méthode d'inversion consiste à effectuer pour la classe de sol retenue, N modélisations de signatures spectrales correspondant à N valeurs de SMC, sur le domaine spectral considéré.

Pour chaque longueur d'onde, la réflectance, fournie en entrée, est comparée aux N réflectances modélisées. Le paramètre SMC optimal est celui qui minimise l'erreur quadratique définie dans le domaine réflectif (cf. équation 27) et le domaine IRT (cf. équation 28) :

$$E_{REFL} = \sum_{i=0}^q \left(\rho_{ent}(i) - (a_l(i) \cdot SMC_g^2 + b_l(i) \cdot SMC_g + c_l(i)) \right)^2 \quad (27)$$

$$E_{IRT} = \sum_{i=0}^q \left(LN[\rho_{ent}(i)] - (f_l(i) \cdot SMC_g^2 + g_l(i) \cdot SMC_g + h_l(i)) \right)^2 \quad (28)$$

où i représente la longueur d'onde considéré, ρ_{ent} est la réflectance spectrale dont on cherche à connaître le SMC et q correspond au nombre de longueur d'onde.

II.2.2. Evaluation des critères d'estimation du contenu en eau des sols

Une étude préliminaire est réalisée pour définir les critères à partir des méthodes définies au §II.2.1. L'évaluation des critères est effectuée en deux étapes par domaine spectral :

- les critères sont appliqués sur les spectres de référence mesurés ;
- les spectres de référence mesurés sont complétés par des spectres de référence simulés pour vérifier la robustesse des critères à des SMC non mesurés en laboratoire.

Pour chaque étape, la loi empirique liant le SMC au critère analysé est établie afin d'évaluer les performances du critère en termes de $RMSE$ et R^2 . La loi retenue est celle qui correspond aux meilleurs résultats.

II.2.2.1. Etude préliminaire

Une étude préliminaire est réalisée afin de déterminer :

- les indices de la littérature les mieux corrélés au SMC ;
- de nouveaux indices spectraux avec l'outil de matrice de corrélation ;
- la fonction (logarithme ou spectre) sur laquelle est appliquée l'enveloppe convexe dans le domaine spectral considéré.

II.2.2.1.1. Méthodes localisées

Indices spectraux de la littérature

Les performances des indices spectraux de la littérature (cf. Annexe IV) sont présentées en termes de R^2 dans le Tableau 19.

Indices	NSMI	SASI	WISOIL
R^2	74	24	79

Tableau 19 – R^2 (valeurs arrondies au % supérieur) obtenus par régression des indices de la littérature avec le SMC_g sur les classes regroupées des spectres de référence mesurés dans le domaine réflectif.

Les indices les mieux corrélés au SMC sont NSMI avec un R^2 de 74 %, et WISOIL avec un R^2 de 79 %, qui exploitent respectivement les bandes : 1,8 μm et 2,119 μm ; 1,3 μm et 1,45 μm . NSMI croît linéairement avec la valeur de SMC, au contraire de WISOIL qui diminue lorsque le SMC augmente (cf. Figure 43, à gauche). Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus dans la littérature (Haubrock, 2008a ; Bryant, 2003). Afin d'approfondir l'analyse de ces deux indices, leurs performances ont été étudiées par classe de sol (cf. Tableau 20).

R ² en %	NSMI	WISOIL
Classe1 (1 sol)	76	92
Classe2 (4 sols)	77	85
Classe3 (1 sol)	94	98
Classe4 (3 sols)	95	95
Classe5 (16 sols)	88	92
Classe6 (3 sols)	96	98
Classe7 (1 sol)	97	99
Classe8 (2 sols)	74	82
Classe9 (1 sol)	92	91

Tableau 20 – R² (valeurs arrondies au % supérieur) obtenus par corrélation de NSMI et WISOIL avec le SMC_g, sur chaque classe de sol.

L'évolution du SMC en fonction de ces indices et les droites de régressions associées, sont représentées sur la Figure 40 pour la **classe5** (plus grand nombre d'échantillons), la **classe7** (meilleur R² pour les deux indices) et la **classe8** (plus faible R² pour les deux indices).

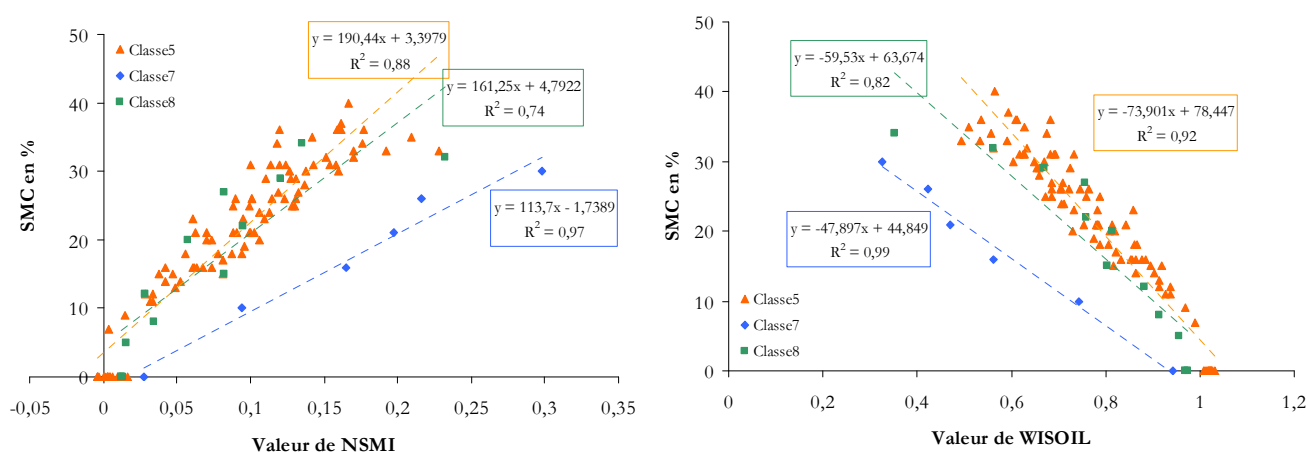


Figure 40 – SMC_g en fonction des indices NSMI (à gauche) et WISOIL (à droite) pour les **classe5**, **classe7** et **classe8**; les régressions linéaires sont représentées par les lignes en pointillés.

Pour les indices NSMI et WISOIL, les valeurs de R² se situent respectivement entre 74 % et 97 %, et entre 82 % et 99 %, suivant la classe de sol étudiée (cf. Tableau 20). Les plus faibles valeurs de R² sont obtenues avec la **classe8** (cf. Figure 40) du au comportement atypique des sols de cette classe dans le domaine du NSWIR (T4NS, spectre faiblement concave puis en pente descendante). Pour la **classe7**, composée d'un unique sol, ces indices sont très bien corrélés au SMC. Finalement, la **classe5**, la plus riche en nombre de sol, affiche de bonnes corrélations entre les indices et le SMC (R² respectivement de 88 % et 92 %).

Pour conclure, les deux indices NSMI et WISOIL ont de bonnes performances pour estimer le SMC quel que soit le type de sol analysé.

Nouveaux indices spectraux

A partir des spectres de références mesurés dans les domaines réflectif et IRT, de nouveaux indices spectraux reliés linéairement et non linéairement au SMC, sont évalués au moyen du calcul de matrices de corrélation. Deux étapes sont mises en place :

- étape 1 : définition des intervalles spectraux, communs à toutes les classes de sols, fortement corrélés au SMC (évaluation par classe de sol) ;
- étape 2 : définition des meilleures longueurs d'onde par corrélation sur les classes regroupées.

Etape 1 : définition des intervalles spectraux

Dans cette étape, les grandeurs $X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j)$ et $X_{pente}(\lambda_i, \lambda_j)$ (cf. équations 23 et 24) sont calculées pour chaque classe de sol par domaine spectral. Les coefficients de corrélation linéaire et non linéaire sont alors déterminés pour chaque couple de longueurs d'onde, et quatre matrices de corrélation sont générées par classe de sol (deux pour la grandeur étudiée, et deux pour le type de corrélation).

Dans le domaine réflectif, pour les deux grandeurs étudiées, le nombre de couples de longueurs d'onde corrélés (linéairement ou non) à plus de 90 % au SMC, est indiqué dans le Tableau 21. Ces résultats sont établis en moyennant ceux de toutes les classes de sols. Les combinaisons d'intervalles spectraux étudiées sont les suivantes : VIS – NSWIR (considéré équivalent à 1 – 2,5 μm) ; VIS – VIS ; NSWIR – NSWIR.

R²>90 %	X_{norm}/Lin	$X_{norm}/NLin$	X_{pente}/Lin	$X_{pente}/NLin$
Int1	23 033	111 896	321 761	469 060
Int2	30	91	7 159	4 688
Int3	340 033	788 501	184 046	418 556

Tableau 21 – Moyenne du nombre de couples de longueurs d'onde corrélés à plus de 90 % au SMC_g sur les intervalles spectraux Int1 ($\lambda_i \in VIS$ et $\lambda_j \in NSWIR$), Int2 ($\lambda_i \in VIS$ et $\lambda_j \in VIS$), Int3 ($\lambda_i \in NSWIR$ et $\lambda_j \in NSWIR$), pour les grandeurs X_{norm} et X_{pente} , corrélées linéairement (Lin) et non linéairement (NLin). Les nombres en gras correspondent à l'intervalle spectral où se situe la corrélation la plus élevée.

Les résultats de l'intervalle du VIS (cf. Tableau 21, Int2) présentent peu de couples de longueurs d'onde sensibles au SMC, quel que soient la grandeur et le type de corrélation considérés, et globalement les valeurs de R^2 les plus faibles. Le faible lien existant entre le SMC et ces grandeurs dans le VIS s'explique par le comportement des réflectances spectrales en fonction du SMC sur cet intervalle (0,4 – 0,8 μm) :

- quelle que soit la classe de sol étudiée, les variations des pentes des spectres sont faibles et donc pas assez discriminantes sur cet intervalle spectral lorsque le SMC est modifié ;
- les variations de SMC impactent principalement sur les niveaux de réflectances spectrales et non sur la profondeur des bandes d'absorption (cf. §II.1.1.2.3).

Aux vues des mauvais résultats pour les couples de longueurs d'onde du VIS, cet unique intervalle est exclu pour la recherche d'une grandeur dédiée à l'estimation du SMC.

Pour les couples constitués de longueurs d'onde appartenant aux intervalles du VIS et du NSWIR (cf. Tableau 21, Int1), la grandeur $X_{pente}(\lambda_i, \lambda_j)$ présente le plus grand nombre de couples corrélés au SMC qui ne correspond généralement pas aux corrélations les plus élevées. Le choix est fait d'exclure également cette combinaison d'intervalles spectraux, afin de se concentrer sur les corrélations les plus élevées.

Enfin, quelle que soit la classe de sol, les couples de longueurs d'onde les plus nombreux et les plus sensibles au SMC sont associés à la corrélation linéaire et à la grandeur $X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j)$, sur l'intervalle NSWIR (cf. Tableau 21, Int3).

Par conséquent, dans le domaine réflectif, l'intervalle retenu pour la deuxième étape de calcul est celui du NSWIR.

Dans le domaine IRT, comme pour le domaine réflectif, le nombre de couples de longueurs d'onde ayant un R^2 supérieur à 90 %, est indiqué dans le Tableau 22. Les combinaisons d'intervalles spectraux étudiées dans ce cas sont les suivantes : MWIR – LWIR ; MWIR – MWIR ; LWIR – LWIR. L'intervalle spectral 5,5 – 8 μm , qui présente de fortes corrélations au SMC, n'est cependant pas étudié du fait qu'il se situe en dehors d'une fenêtre atmosphérique.

$R^2 > 90\%$	X_{norm}/Lin	$X_{norm}/NLin$	X_{pente}/Lin	$X_{pente}/NLin$
Int1	0	656	272	1 881
Int2	17 767	9 870	12 155	20 360
Int3	16	83	751	516

Tableau 22 – Moyenne du nombre de couples de longueurs d'onde corrélés à plus de 90 % au SMC_g sur les intervalles spectraux Int1 ($\lambda_i \in MWIR$ et $\lambda_j \in LWIR$), Int2 ($\lambda_i \in MWIR$ et $\lambda_j \in MWIR$), Int3 ($\lambda_i \in LWIR$ et $\lambda_j \in LWIR$), pour les grandeurs X_{norm} et X_{pente} , corrélées linéairement (Lin) et non linéairement (NLin). Les nombres en gras correspondent à l'intervalle spectral où se situe la corrélation la plus élevée.

Quels que soient la classe de sol, la grandeur et le type de corrélation, les combinaisons de longueurs d'onde impliquant le domaine du LWIR (cf. Tableau 22, Int1 et Int3) présentent très peu ou pas de couples de longueurs d'onde (λ_i, λ_j) corrélés à plus de 90 % avec le SMC.

Le plus grand nombre de bonne corrélation (R^2 supérieur à 90%) est obtenu pour l'intervalle du MWIR. Pour les deux grandeurs, les longueurs d'onde appartenant aux intervalles 3 – 3,5 μm et 4 – 4,5 μm , sont respectivement fortement corrélées (R^2 supérieurs à 90 %) aux bandes spectrales 3 – 5,5 μm et 5 – 6 μm . Les variations de SMC se traduisent donc principalement par des changements de valeurs de réflectances sur les bandes 3 – 4 μm (flanc gauche du spectre) et 4 – 5,5 μm (flanc droit du spectre) (cf. Figure 6, §I.2.1.2.2).

Par conséquent, seul l'intervalle spectral du MWIR (3 – 5,5 μm) du domaine IRT sera pris en compte dans la deuxième étape du calcul de matrices de corrélation.

Etape 2 : définition des meilleures longueurs d'onde et grandeurs associées

Dans cette seconde étape, les deux grandeurs sont calculées pour les classes regroupées sur les intervalles spectraux définis à la première étape (soit NSWIR et MWIR). Les valeurs obtenues sont ensuite corrélées linéairement et non linéairement avec les valeurs de SMC, et de nouvelles matrices de corrélation sont générées.

Dans le domaine du NSWIR, le nombre de bandes spectrales, corrélées à plus de 80 %, est plus important pour le rapport normalisé que pour la pente (cf. Figure 41). Les couples de longueurs d'onde, où la corrélation est la plus élevée, se situent sur la bande spectrale 2 – 2,4 μm pour les deux grandeurs.

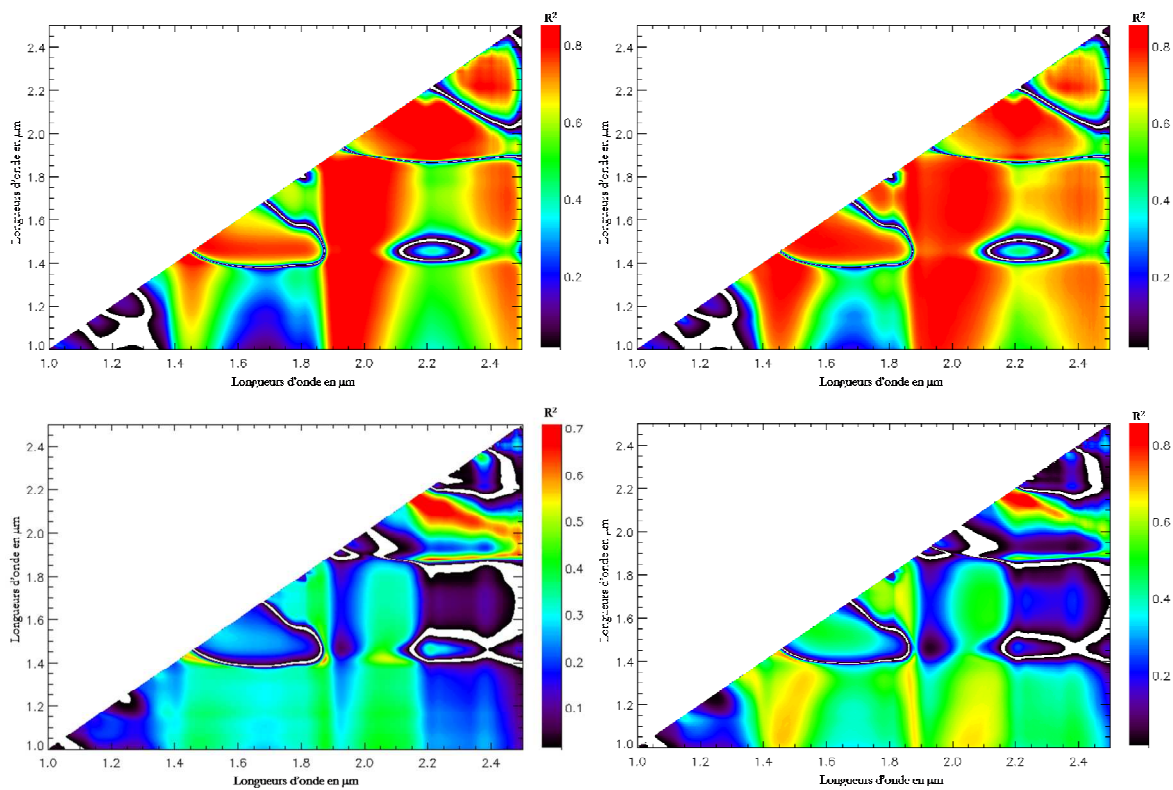


Figure 41 – Matrices de corrélation linéaire (à gauche) et non linéaire (à droite) de $X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j)$ (en haut) et de $X_{pente}(\lambda_i, \lambda_j)$ (en bas) calculées pour les classes regroupées dans le NSWIR.

Finalement, pour chaque grandeur et type de corrélation, les couples de longueurs d'onde qui conduisent à la corrélation la plus élevée avec le SMC dans le NSWIR, sont :

- 2,076 – 2,228 μm pour $X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j)$: $R^2 = 87\%$ - corrélation linéaire ;
- 2,122 – 2,23 μm pour $X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j)$: $R^2 = 87\%$ - corrélation non linéaire ;
- 2,138 – 2,239 μm pour $X_{pente}(\lambda_i, \lambda_j)$: $R^2 = 88\%$ - corrélation non linéaire.

Pour le MWIR, les matrices obtenues sont représentées sur la Figure 42. Les meilleures corrélations (supérieures à 80 %) se situent en limite de fenêtre atmosphérique pour les deux grandeurs calculées. La matrice de $X_{pente}(\lambda_i, \lambda_j)$ présente un nombre plus élevé de bandes spectrales fortement corrélées au SMC que celle de $X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j)$. Les valeurs de corrélation les plus élevées sont obtenues pour la bande 4 – 6 μm (cf. Figure 42). Le nombre de couples de longueurs d'onde corrélés à plus de 80 % avec le SMC est moins important pour une corrélation non linéaire.

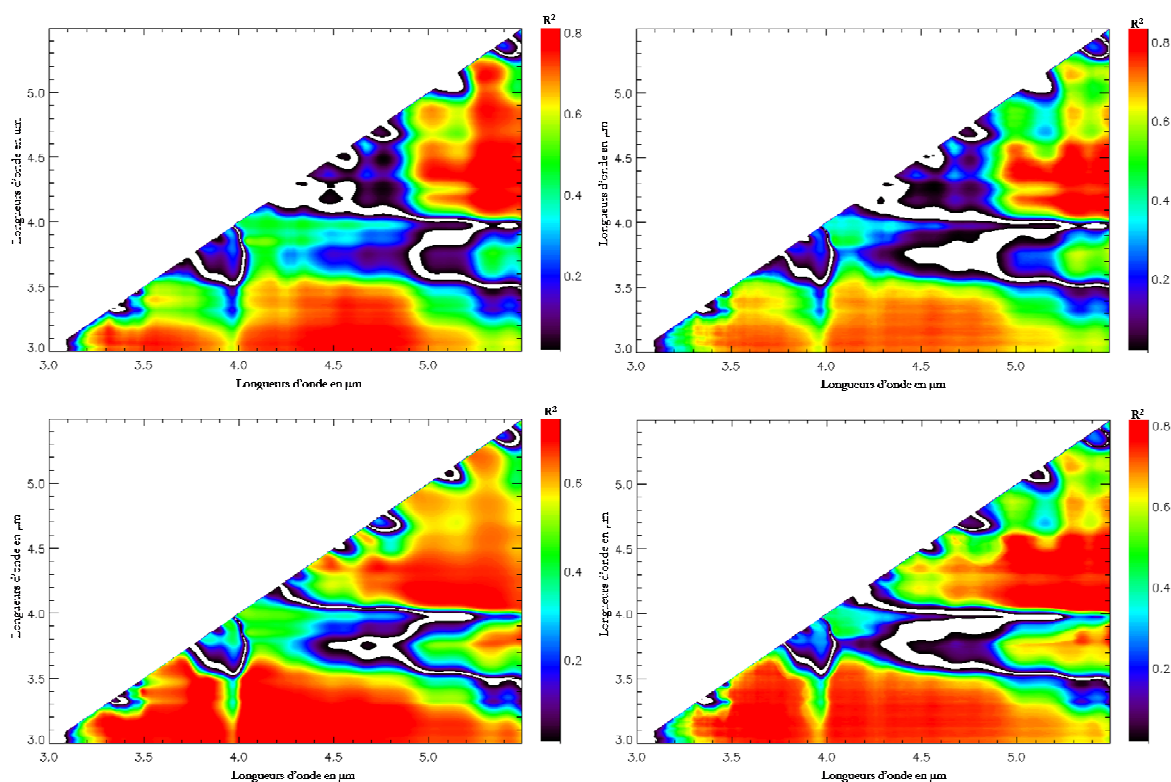


Figure 42 – Matrices de corrélation linéaire (à gauche) et non linéaire (à droite) de $X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j)$ (en haut) et de $X_{pente}(\lambda_i, \lambda_j)$ (en bas) calculées pour les classes regroupées dans le MWIR.

Finalement, pour le domaine du MWIR, les couples de longueurs d'onde les plus sensibles au SMC sont :

- 4,357 – 5,29 μm pour $X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j)$: $R^2 = 83\%$ - corrélation linéaire
- 4,364 – 5,28 μm pour $X_{norm}(\lambda_i, \lambda_j)$: $R^2 = 85\%$ - corrélation non linéaire
- 4,446 – 5,28 μm pour $X_{pente}(\lambda_i, \lambda_j)$: $R^2 = 83\%$ - corrélation non linéaire

Synthèse

Dans le domaine réflectif, deux indices de la littérature sont retenus afin de servir de base de comparaison : NSMI (Haubrock, 2008a) et WISOIL (Bryant, 2003).

Trois nouveaux indices spectraux sont développés dans le NSWIR :

- NINSOL (Normalized Index of Nswir domain for Smc estimatiOn from Linear correlation) :

$$NINSOL = \frac{\rho_{2,076} - \rho_{2,228}}{\rho_{2,076} + \rho_{2,228}} \quad (29)$$

- NINSON (Normalized Index of Nswir domain for Smc estimatiOn from Non linear correlation) :

$$NINSON = \frac{\rho_{2,122} - \rho_{2,23}}{\rho_{2,122} + \rho_{2,23}} \quad (30)$$

- SINSON (Slope Index of Nswir domain for Smc estimatiOn from Non linear correlation) :

$$SINSON = \frac{\rho_{2,138} - \rho_{2,239}}{2,138 - 2,239} \quad (31)$$

où ρ_i correspond à la valeur de réflectance à la longueur d'onde i en μm .

Dans le domaine IRT, et notamment dans le MWIR, trois nouveaux indices spectraux sont développés :

- NIMSOL (Normalized Index of Mwir domain for Smc estimatiOn from Linear correlation) :

$$NIMSOL = \frac{\rho_{4,357} - \rho_{5,29}}{\rho_{4,357} + \rho_{5,29}} \quad (32)$$

- NIMSON (Normalized Index of Mwir domain for Smc estimatiOn from Non linear correlation) :

$$NIMSON = \frac{\rho_{4,364} - \rho_{5,28}}{\rho_{4,364} + \rho_{5,28}} \quad (33)$$

- SIMSON (Slope Index of Mwir domain for Smc estimatiOn from Non linear correlation) :

$$SIMSON = \frac{\rho_{4,446} - \rho_{5,28}}{4,446 - 5,28} \quad (34)$$

où ρ_i correspond à la valeur de réflectance à la longueur d'onde i en μm .

Ces indices spectraux, sont par la suite appliqués sur les spectres de référence, afin de définir les lois empiriques les liant au SMC (cf. §II.2.2.2.1). Les longueurs d'onde retenues pour ces indices sont données pour la plupart au 1/100e près, et ne correspondent pas aux bandes spectrales des instruments hyperspectraux existants ou à venir. Une analyse de sensibilité par rapport à ce décalage spectral est effectuée, et présentée dans la troisième partie de ce manuscrit (cf. §III.1).

II.2.2.1.2. Méthodes globales

Cette étape préliminaire est mise en place pour déterminer, sur chacun des domaines spectraux, les performances du critère d'aire sous l'enveloppe convexe sur les spectres et les logarithmes des spectres.

Les enveloppes convexes des spectres et de leurs logarithmes, sont déterminées dans le domaine réflectif (0,4 – 2,5 μm) et IRT (3 – 14 μm), pour tous les échantillons de sols. Les aires sous l'EC sont ensuite calculées, et la corrélation linéaire entre l'aire et le SMC est évaluée par classe de sols et pour toutes les classes regroupées. Les coefficients de détermination R^2 associés à ces aires sous l'enveloppe convexe sont présentés dans le Tableau 23.

Aire sous l'EC	spectre		LN(spectre)	
	0,4 – 2,5 μm	3 – 14 μm	0,4 – 2,5 μm	3 – 14 μm
Classe1 (1 sol)	78	81	80	93
Classe2 (4 sols)	58	82	74	58
Classe3 (1 sol)	94	97	94	89
Classe4 (3 sols)	69	85	95	92
Classe5 (16 sols)	70	80	92	75
Classe6 (3 sols)	80	86	98	84
Classe7 (1 sol)	96	87	97	82
Classe8 (2 sols)	70	84	84	76
Classe9 (1 sol)	93	89	91	83
Tous échantillons	25	72	76	57

Tableau 23 – R^2 (valeurs arrondies au % supérieur) obtenus par régression du SMC à l'aire sous l'EC appliquée sur le spectre et son logarithme dans les domaines réflectif et IRT pour les spectres de référence mesurés.

Dans le domaine réflectif (cf. Tableau 23), pour tous les échantillons, pris par classe ou regroupés, l'aire sous l'EC est un critère plus sensible au SMC lorsque l'enveloppe est calculée sur le logarithme du spectre. Ce résultat est en accord avec la méthode SMGM (Whiting, 2004). Toutes les classes, excepté la *classe2* où des différences d'amplitude des bandes d'absorptions apparaissent d'un sol à l'autre, fournissent des R^2 supérieurs à 80 %. Pour tous les échantillons, lorsque toutes les classes sont regroupées, le R^2 est de 76 %. Ce critère peut donc être appliqué à tout type de sol.

Par conséquent, dans le domaine réflectif, le critère retenu est l'aire sous l'enveloppe convexe du logarithme du spectre. Ce critère est lié au SMC par une loi linéaire.

Dans le domaine IRT, le critère d'aire sous l'EC évalué sur le spectre fournit les meilleurs résultats, avec un R^2 de 72 % lorsque toutes les classes de sols sont regroupées. Le meilleur ajustement de ce nuage de points s'effectue par une loi logarithmique, et présente un coefficient de détermination R^2 de 87 %.

Par conséquent, dans le domaine IRT, le critère retenu est l'aire sous l'enveloppe convexe du spectre, lié au SMC par une loi logarithmique.

II.2.2.2. Evaluation des critères dans le domaine réflectif

Les résultats associés aux critères sont présentés par type de méthode.

II.2.2.2.1. Méthodes localisées

Indices spectraux de la littérature

Application sur les spectres de référence mesurés

Les performances de ces deux indices sont évaluées à partir des relations linéaires établies entre chaque indice et le SMC (cf. Figure 43, à gauche) où le R^2 et le $RMSE$ sont calculés.

Le $RMSE$ le plus faible est obtenu pour WISOIL (5,7 ‰) alors que pour l'indice NSMI sa valeur est de 6,4 ‰. Pour l'indice NSMI, 52 % des points ont une erreur relative sur l'estimation du SMC supérieure à 20 %, alors que WISOIL en présente seulement 24 %. De plus, pour ces deux critères, la majorité des points se situent en deçà de la bissectrice (droite rouge), indiquant ainsi une sous-estimation des valeurs de SMC.

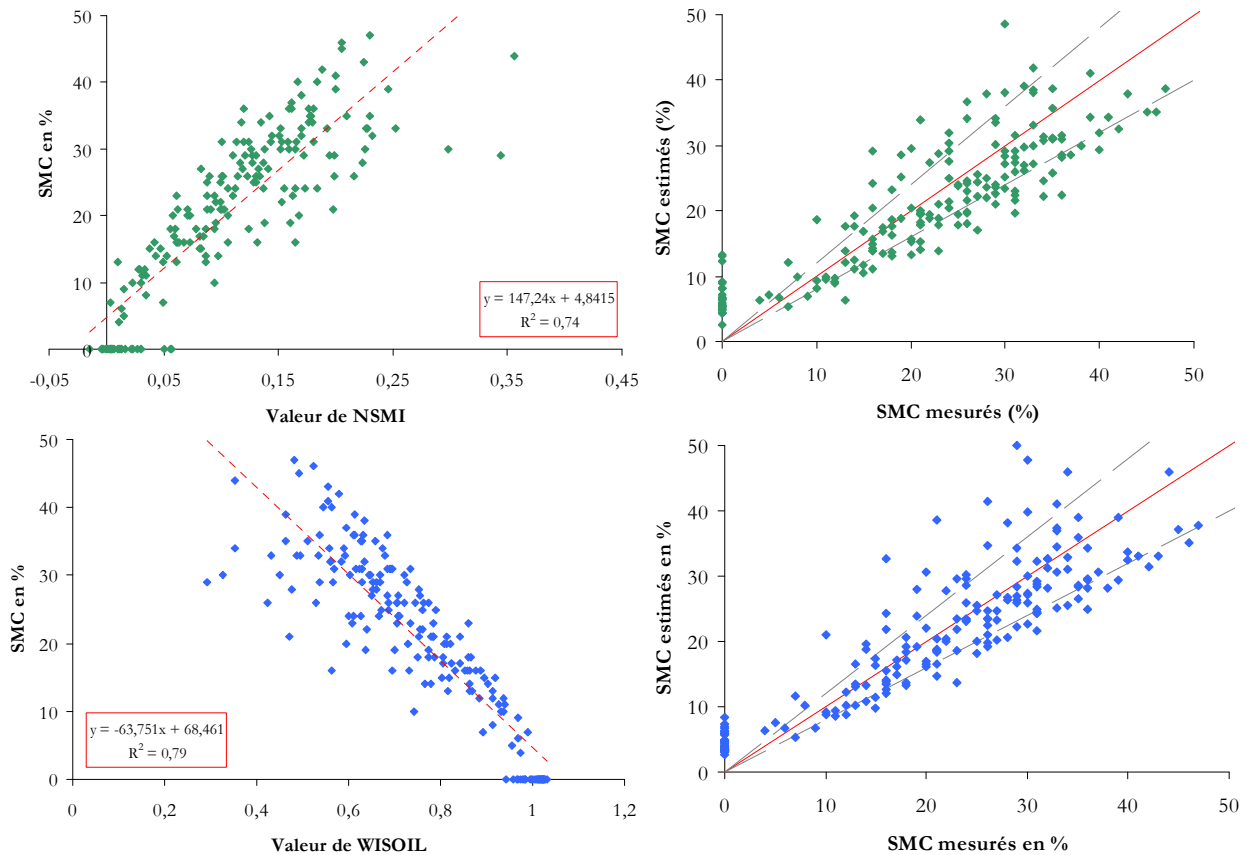


Figure 43 – Indices évalués sur les spectres de référence mesurés : SMC_g en fonction des indices NSMI (en haut, à gauche) et WISOIL (en bas, à gauche) pour toutes les classes regroupées ; les régressions sont représentées par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de ces indices en fonction des SMC_g mesurés (à droite); la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %.

Application sur les spectres de référence mesurés et simulés

Ces deux indices sont à présent appliqués sur les spectres simulés. Les lois empiriques liant le SMC aux indices sont alors définies et exploitées par la suite (cf. §III.1 et §III.2). Ces nouvelles lois empiriques obtenues à partir des spectres de référence mesurés et simulés (cf. Figure 44, à gauche), sont quasiment identiques à celles définies à partir des spectres de référence mesurés (cf. Figure 43, à gauche).

Pour chaque indice, les $RMSE$ sur l'estimation du SMC varient très peu par rapport au cas précédent : NSMI (6,2 ‰), WISOIL (5,7 ‰). Leurs nuages de points sont assez dispersés, essentiellement au dessus de la bissectrice (droite rouge, cf. Figure 44) ce qui conduit à des valeurs de $RMSE$ élevées. Les points les plus éloignés (au dessus de la bissectrice, cf. Figure 44) correspondent aux valeurs de SMC obtenues avec les spectres de réflectances de la **classe7**, composée d'un sol de type calcaire. NSMI surestime de manière plus importante que WISOIL les valeurs de SMC_g de niveaux inférieurs à 15 ‰. Pour les deux indices, la majorité des points se situent en deçà de la bissectrice et indiquent une sous estimation du SMC pour des SMC_g supérieurs à 15 ‰.

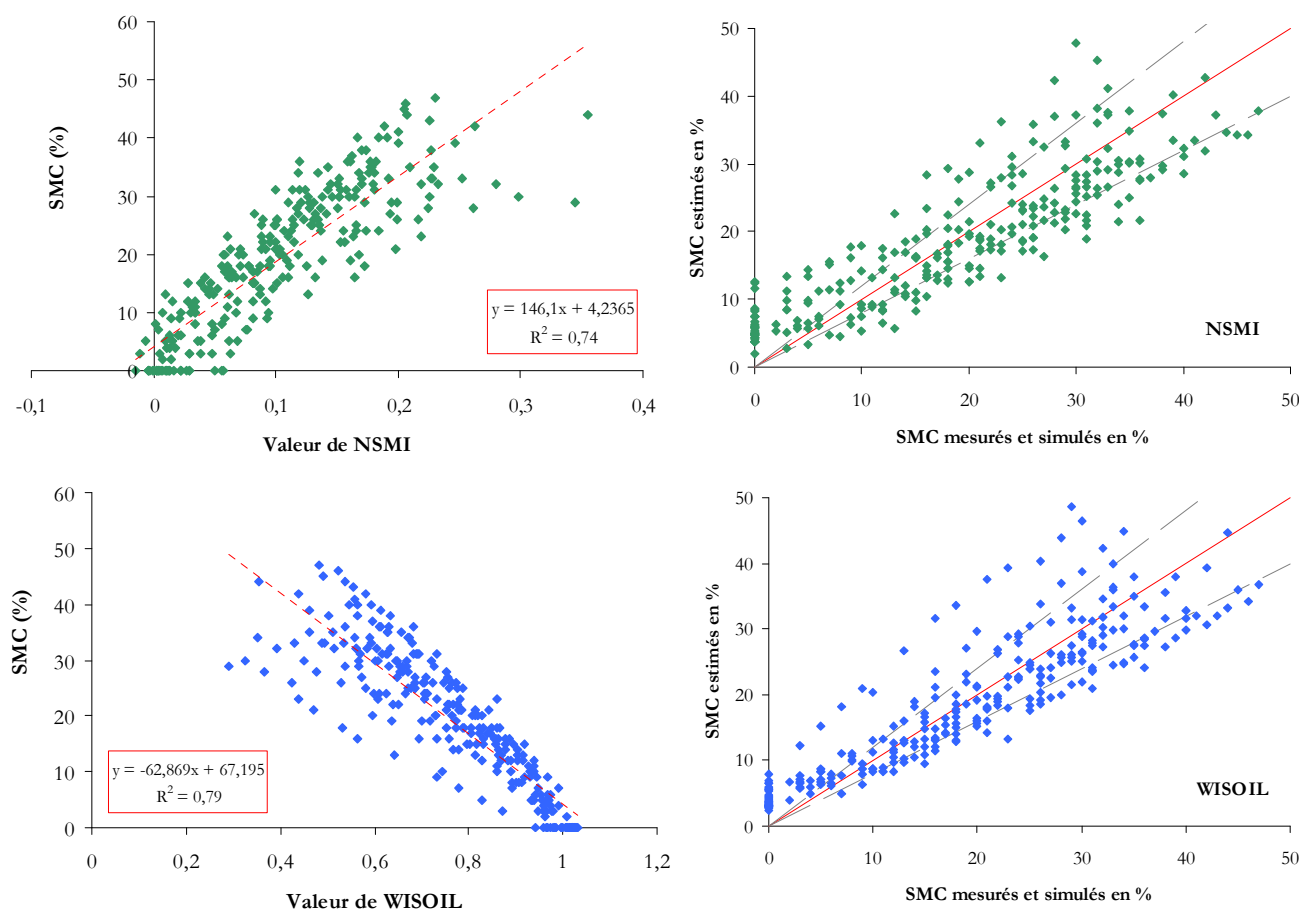


Figure 44 – Indices évalués sur les spectres de référence mesurés et simulés : SMC_g en fonction des indices NSMI (en haut, à gauche) et WISOIL (en bas, à gauche) pour toutes les classes regroupées ; les régressions sont représentées par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de ces indices en fonction des SMC_g mesurés et simulés (à droite) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %.

Indices spectraux issus de l'outil de matrices de corrélation

Application sur les spectres de référence mesurés

Les valeurs de SMC sont représentées, pour toutes les classes de sols regroupées en fonction des trois indices calculés sur les spectres de référence mesurés (cf. Figure 45).

Le SMC est relié linéairement à NINSOL et par des lois polynomiales de second degré à NINSON et SINSON. Les valeurs de coefficient de détermination R^2 sont respectivement de 87 %, 85 % et 82 % (cf. Figure 45, à gauche). Ces valeurs sont donc supérieures à celles obtenues avec les indices précédents.

Concernant l'estimation du SMC à partir de ces lois (cf. Figure 45, à gauche), les *RMSE* sont de 4,5 %_g pour NINSOL, 4,9 %_g pour NINSON et 5,4 %_g pour SINSON. Ces erreurs sont inférieures à celles commises par les indices de la littérature. Les valeurs de SMC estimées avec ces nouveaux indices sont représentées en fonction des SMC mesurés (cf. Figure 45, à droite). La majorité des points (de l'ordre de 70 %) ont une erreur relative inférieure à 20 %. Cependant, l'indice SINSON a plus de difficultés à retrouver des valeurs de SMC_g inférieures à 20 %_g, que les deux autres indices.

Notre objectif étant de disposer d'un critère couvrant toute la gamme de variation du SMC, seuls les deux indices NINSOL et NINSON sont retenus.

Application sur les spectres de référence mesurés et simulés

Les nouvelles valeurs *RMSE* obtenues avec les indices NINSOL et NINSON sont quasi identiques à celles établies à partir des spectres mesurés : 4,4 %_g pour NINSOL et 4,8 %_g pour NINSON. En effet, les lois empiriques liant le SMC à ces indices évalués sur les spectres de référence mesurés et simulés (cf. Figure 46, à gauche) sont similaires à celles obtenues à partir des spectres de référence mesurés (cf. Figure 45, à gauche).

Ces indices présentent de meilleures performances que celles des indices de la littérature. Les nuages de points sont d'ailleurs plus recentrés que ceux de NSMI et WISOIL (cf. Figure 44) car les indices NINSOL et NINSON (cf. Figure 46) ont été développés pour toutes les classes regroupées. Les valeurs de SMC_g inférieures à 15 %_g sont moins bien estimées avec NINSON que NINSOL, et au-delà, la majorité des SMC sont estimés avec une erreur relative inférieure à 20 % pour les deux indices.

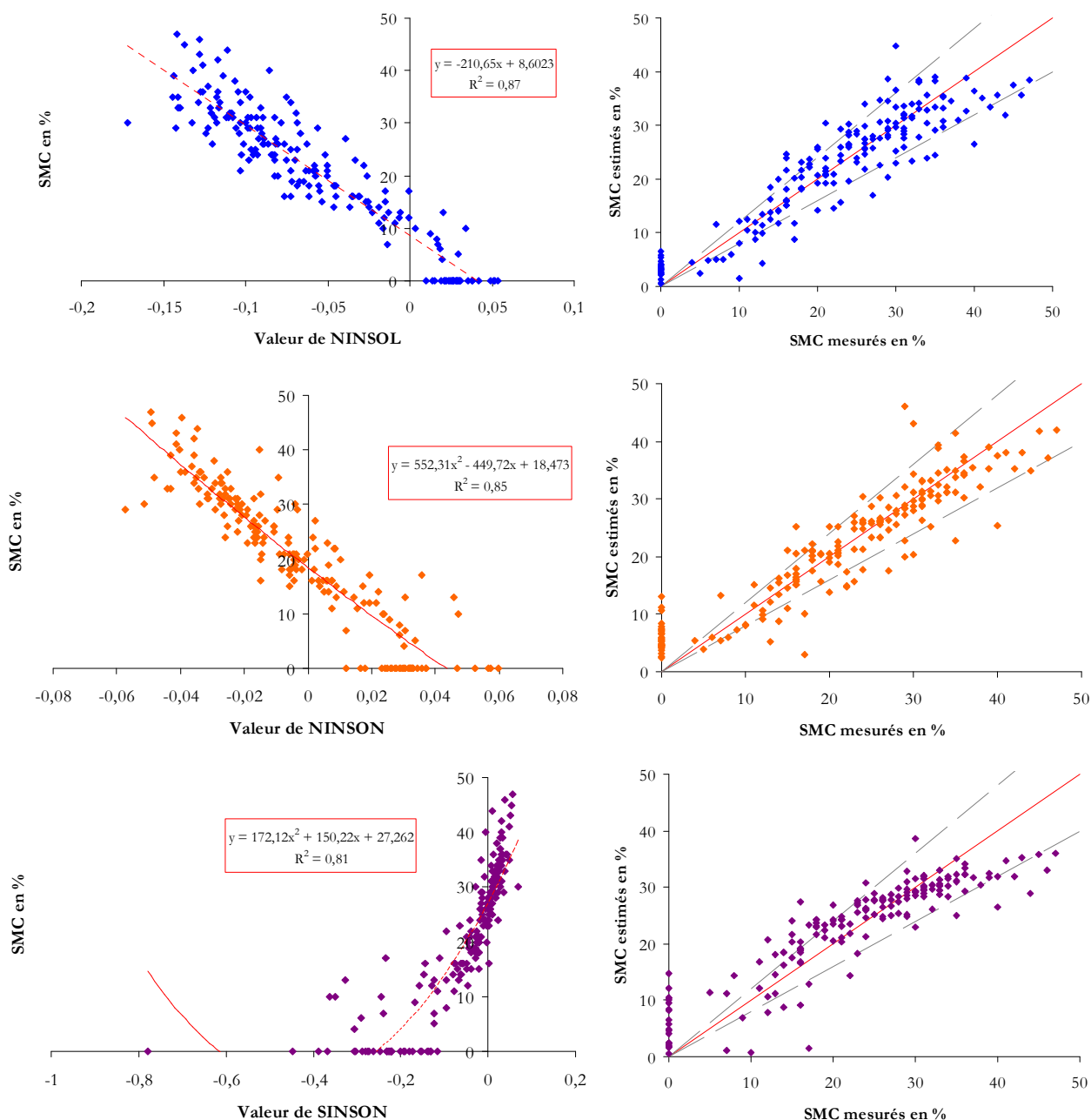


Figure 45 – Indices évalués sur les spectres de référence mesurés dans le domaine réflectif : SMC_g en fonction des indices NINSOL (en haut, à gauche), NINSON (au milieu, à gauche) et SINSON (en bas, à gauche) pour toutes les classes regroupées ; les régressions sont représentées par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de ces indices en fonction des SMC_g mesurés (à droite); la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %.

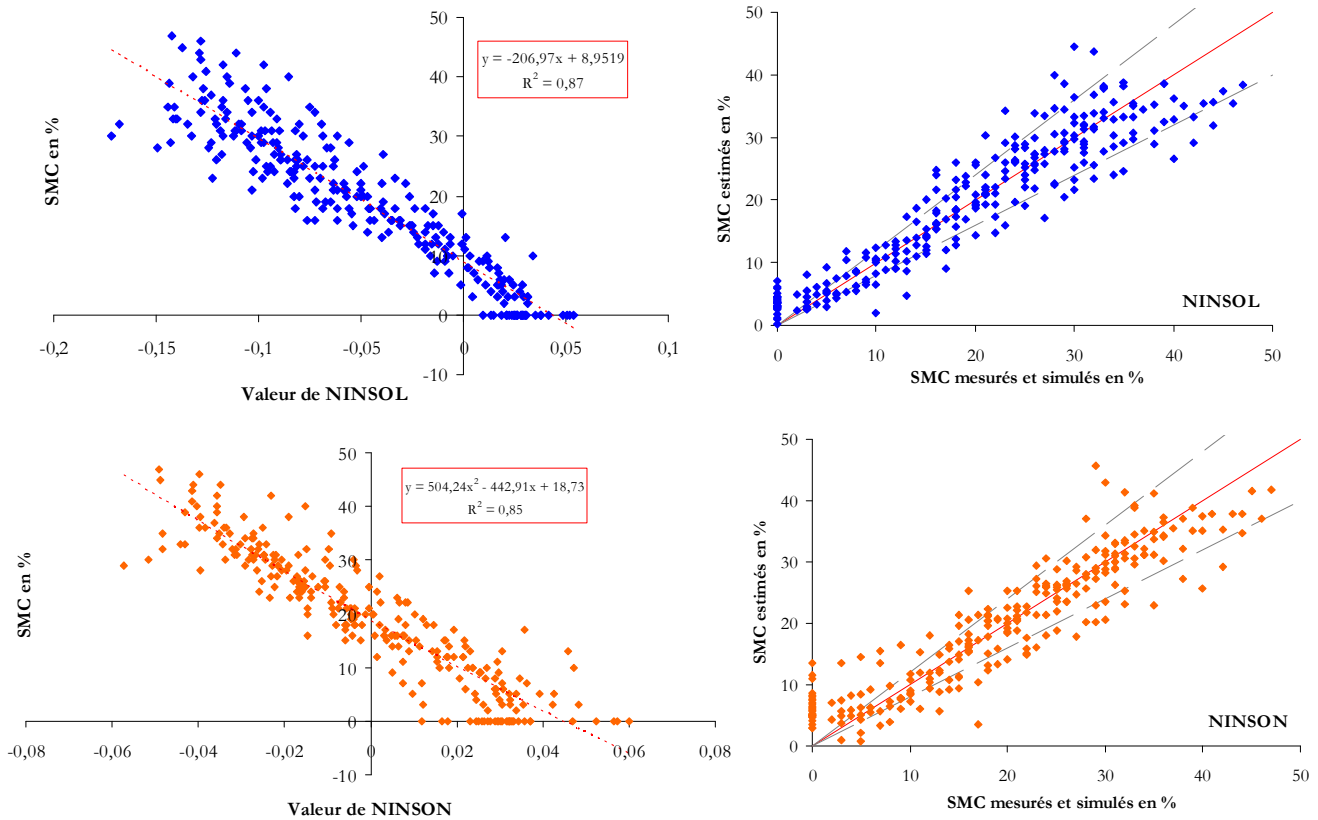


Figure 46 – Indices évalués sur les spectres de référence mesurés et simulés dans le domaine réflectif : SMC_g en fonction des indices NINSOL (en haut, à gauche) et NINSON (en bas, à gauche) pour toutes les classes regroupées ; les régressions sont représentées par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de ces indices en fonction des SMC_g mesurés et simulés (à droite) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %.

II.2.2.2.2. Méthodes globales

Aire sous l'enveloppe convexe

Application sur les spectres de référence mesurés

Les matrices de corrélation ayant montré que les longueurs d'onde les plus sensibles correspondent au domaine NSWIR, le critère aire sous l'EC du logarithme du spectre est à présent évalué sur cet intervalle spectral.

L'enveloppe convexe est calculée sur l'intervalle 1 – 2,4 μm du NSWIR, pour s'affranchir du bruit de mesure de l'instrument sur les bords du spectre entre 2,4 μm et 2,5 μm .

Dans le NSWIR (cf. Figure 47), l'application de l'EC sur le logarithme du spectre apporte une amélioration pour l'estimation du SMC dans le domaine réflectif. Le coefficient R^2 et la valeur $RMSE$ passent respectivement de 76 % à 80 %, et de 6,2 %_g à 5,6 %_g.

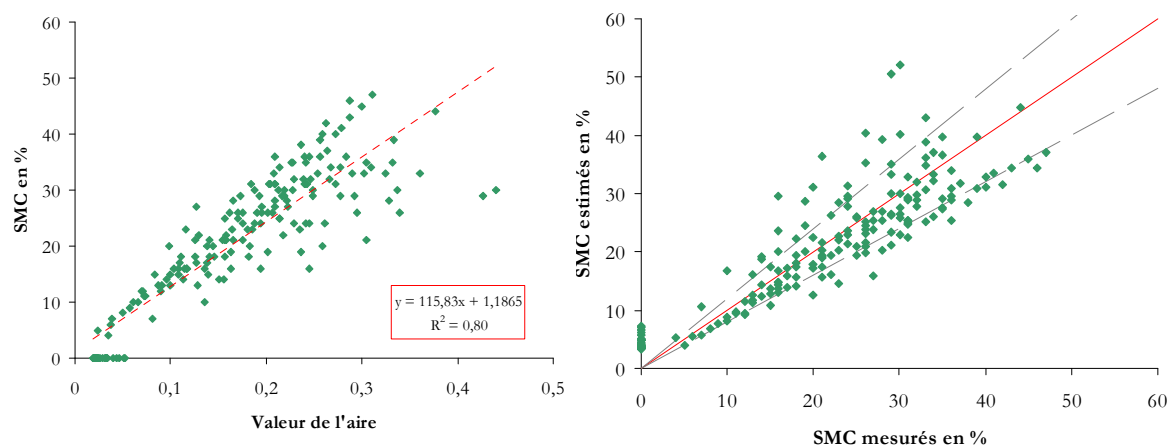


Figure 47 – Aire sous l'EC appliquée sur le logarithme des spectres de référence mesurés dans le domaine NSWIR : SMC_g en fonction de l'aire (à gauche) pour toutes les classes regroupées; la régression est représentée par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de l'aire en fonction des SMC_g mesurés (à droite) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %.

Afin de mieux comprendre les différences obtenus entre le domaine réflectif et NSWIR, une illustration du modèle d'EC appliqué sur le logarithme de la réflectance dans ces domaines spectraux, est donnée par la Figure 48 pour un échantillon de sol (*84Avignon*) de la *classe5* choisi arbitrairement. Les aires sous l'EC dans le domaine du VIS sont très faibles (cf. Figure 48, à gauche) et varient peu en fonction du SMC. Ces valeurs d'aires qui ne sont pas corrélés au SMC provoquent donc une diminution de la corrélation dans le domaine spectral réflectif (0,4 – 2,5 μm). Par contre, dans le NSWIR (cf. Figure 48, à droite), les principales bandes d'absorption qui impactent sur la valeur de l'aire sous l'EC sont celles liées à l'eau, conduisant ainsi à une bonne corrélation avec le SMC.

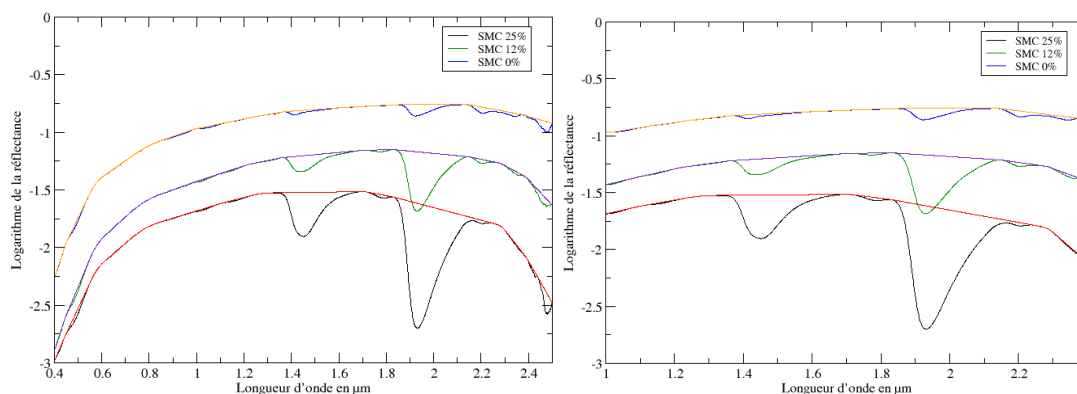


Figure 48 – Modèle d'EC appliqué sur les logarithmes des spectres de réflectances du sol *84Avignon* pour trois valeurs de SMC_g dans les domaines réflectif (à gauche) et NSWIR (à droite).

Ainsi, à partir du modèle d'enveloppe convexe, le critère retenu dans le domaine réflectif, est l'aire sous l'EC du LN(spectre) sur 1 – 2,4 μm .

Application sur les spectres de référence mesurés et simulés

Le modèle d'EC est maintenant appliqué sur les logarithmes des spectres modélisés dans le NSWIR (1 – 2,4 μm). Les nouvelles valeurs d'aire complètent celles obtenues avec les spectres

mesurés, et la loi empirique liant le SMC à l'aire sous l'EC fournit des résultats avec un R^2 de l'ordre de 80 % (cf. Figure 49, à gauche). Le SMC est ensuite estimé (cf. Figure 49, à droite) à partir de cette loi. L'erreur sur l'estimation est identique à celle obtenue précédemment (valeur $RMSE$ de 5,6 %_g).

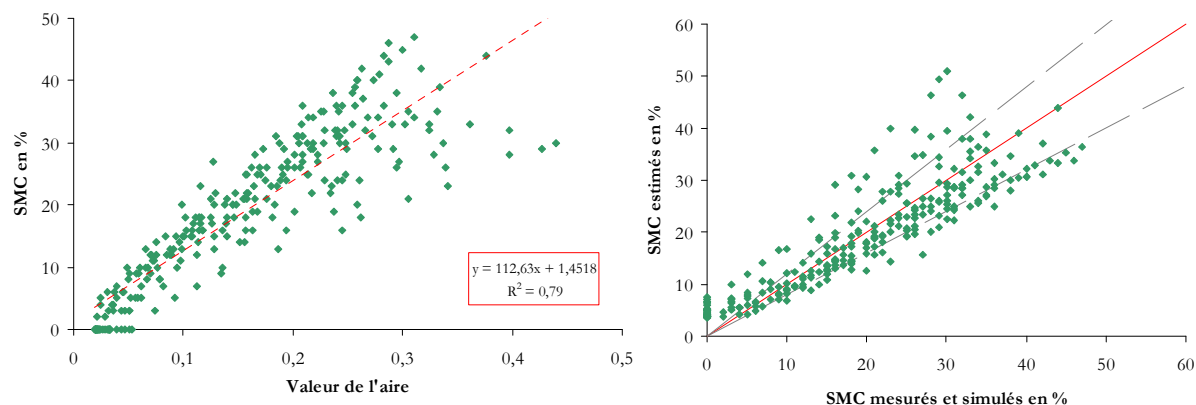


Figure 49 – Aire sous l'EC appliquée sur le logarithme des spectres de référence mesurés et simulés dans le domaine NSWIR : SMC_g en fonction de l'aire (à gauche) pour toutes les classes regroupées; la régression est représentée par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de l'aire en fonction des SMC_g mesurés et simulés (à droite); la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %.

Inversion du MES

Le modèle empirique de sol inverse est évalué sur les spectres de référence mesurés dans le domaine spectral réflectif.

Une comparaison entre les valeurs de SMC estimés par le MES inverse et celles du SMC mesuré correspondant est effectuée. Pour chaque classe de sol, une valeur $RMSE$ est alors déterminée (cf. Tableau 24).

Réfectif	RMSE (% _g)
Classe1 (1 sol)	2,4
Classe2 (4 sols)	4,5
Classe3 (1 sol)	2,2
Classe4 (3 sols)	4,8
Classe5 (16 sols)	3,9
Classe6 (3 sols)	3,6
Classe7 (1 sol)	1,9
Classe8 (2 sols)	3,7
Classe9 (1 sol)	2,1

Tableau 24 – Valeurs $RMSE$ (%_g) associées au MES inverse, par classe de sol, dans le domaine réflectif.

Les classes composées d'un unique sol (*classe1*, *classe3*, *classe7* et *classe9*), ont des valeurs $RMSE$ inférieures à 3 %_g. Pour ces classes, les valeurs de SMC estimé en fonction du SMC mesuré, sont représentées sur la Figure 50 (en haut, à gauche). Les SMC pour ces classes de sols sont caractérisés par une erreur relative inférieure à 10 %.

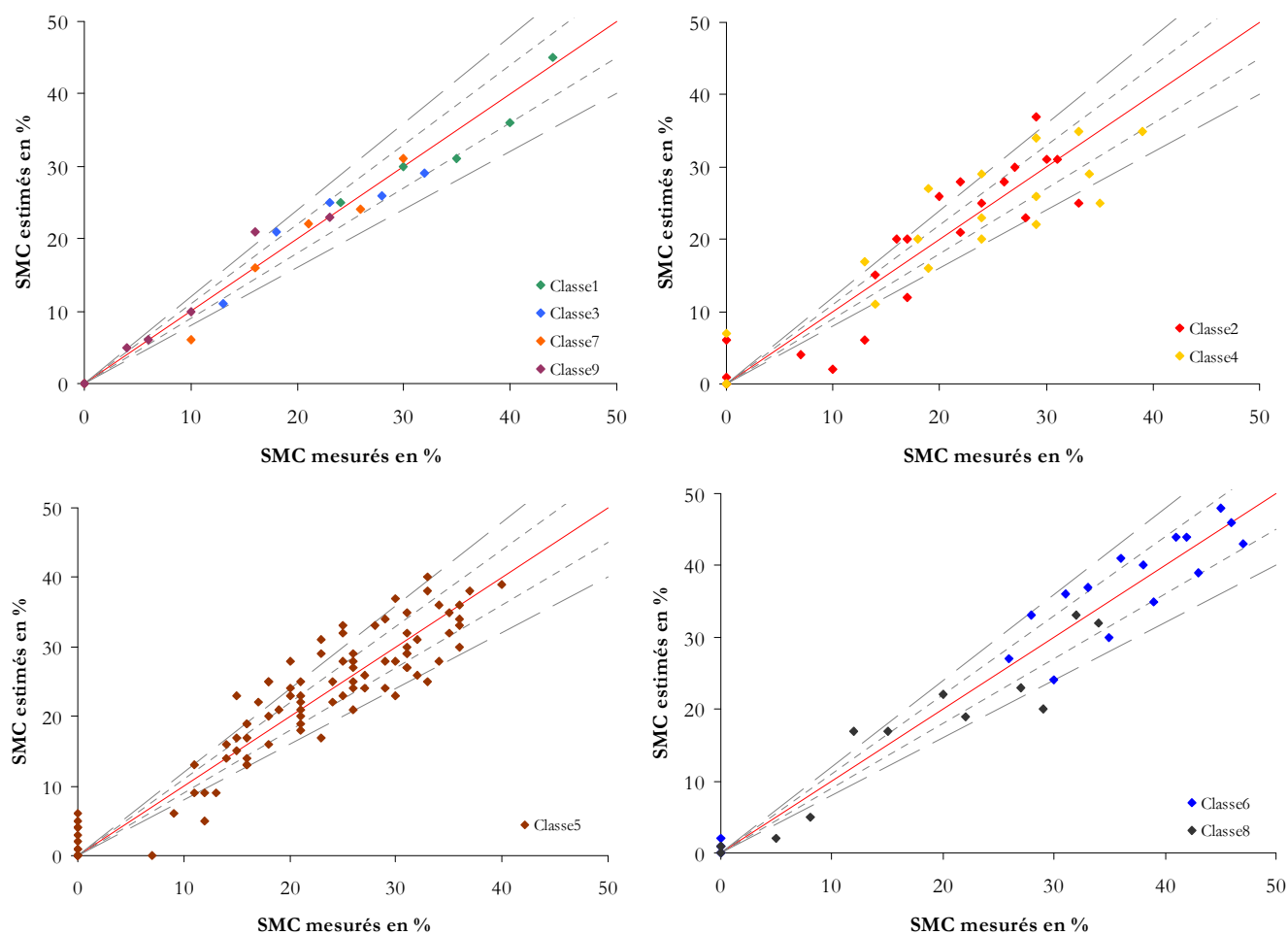


Figure 50 – MES inverse appliqué sur les spectres de référence mesurés dans le domaine réflectif : SMC_g estimés en fonction des SMC_g mesurés pour toutes les classes de sols ; la bissectrice est représentée sur les graphiques par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 10 % et 20 %.

Les *classe2* et *classe4* présentent les *RMSE* les plus élevés avec des valeurs supérieures à 4 %_g (cf. Tableau 24). Les erreurs relatives faites sur l'estimation du SMC, pour ces deux classes de sol, sont majoritairement inférieures à 20 % (cf. Figure 50). Quelques points présentent également des erreurs supérieures à 20 % (surtout pour la *classe2*). Ces deux classes présentent les performances de modélisation les plus faibles (R^2 de l'ordre de 97 %, cf. §II.1.2.2.3), ces résultats sont donc en accord avec les performances établies lors de la validation du MES.

Les *classe5*, *classe6* et *classe8*, présentent des *RMSE* de valeurs intermédiaires, comprises entre 3 %_g et 4 %_g (cf. Tableau 24). Les erreurs relatives faites sur l'estimation du SMC sont majoritairement inférieures à 20 % (cf. Figure 50). Pour la *classe5*, ce résultat s'explique par le grand nombre d'échantillon de sols (seize au total) la composant. La *classe6* qui fournit des performances élevées dans le sens direct (R^2 de 99 %) équivalentes à celles des classes composées d'un unique échantillon, estime le SMC avec une erreur relative moyenne inférieure à 10 %. La valeur *RMSE* est plus élevée que celle des classes composées d'un seul sol car la *classe6* est composée de trois sols. Pour la *classe8*, les performances d'estimation du SMC corroborent celles du modèle direct (R^2 de 97 %).

Finalement, dans le domaine réflectif, le *RMSE* moyen obtenu pour toutes les classes de sol avec le MES inverse est de 3,2 ‰. La valeur minimale pour la **classe7** est de 1,9 ‰ et la valeur maximale pour la **classe4** est de 4,8 ‰.

II.2.2.2.3. Synthèse dans le domaine réflectif

Les performances du critère d'aire sous l'enveloppe convexe (*RMSE* de 5,6 ‰) sont équivalentes à celles de l'indice WISOIL (*RMSE* de 5,7 ‰). Les performances du MES inverse sont proches de celles des indices NINSOL (*RMSE* de 4,4 ‰) et NINSON (4,8 ‰), et en dessous de celles obtenues avec les autres critères (NSMI, WISOIL, et l'aire sous l'EC). Ces derniers sont généralisables à tout type de sol alors que le MES inverse fonctionne par classe de sols.

Pour conclure, les indices NSMI, WISOIL, NINSOL et NINSON sont conservés pour la suite des travaux, ainsi que le critère d'aire sous l'enveloppe convexe appliqué sur le logarithme des spectres dans le NSWIR, leurs performances étant proches. Le SMC sera alors évalué à partir des lois définies sur les spectres de référence mesurés et simulés. Concernant le MES inverse, avec une connaissance a priori de la classe de sol, ce critère est un estimateur du SMC adapté avec des performances acceptables, et est donc également retenu pour la suite des travaux.

II.2.2.3. Evaluation des critères dans le domaine IRT

Comme dans le domaine réflectif, les résultats sont présentés par méthode.

II.2.2.3.1. Méthodes localisées

Dans ce domaine spectral, trois nouveaux indices spectraux (NIMSOL, NIMSON et SIMSON) issus de l'étude préliminaire (cf. §II.2.2.1), sont analysés.

Application sur les spectres de référence mesurés

La régression linéaire appliquée sur le nuage de points fourni par NIMSOL produit un coefficient de détermination R^2 de 83 % (cf. Figure 51). Les lois polynomiales quadratiques appliquées sur les points obtenus par NIMSON et SIMSON donnent respectivement un R^2 de 86 % et 79 % (cf. Figure 51, à gauche).

Concernant l'estimation du SMC à partir de ces lois (cf. Figure 51, à gauche), les valeurs *RMSE* sont de 5,2 ‰ pour NIMSOL, 4,7 ‰ pour NIMSON et 5,8 ‰ pour SIMSON.

Les valeurs de SMC estimées avec ces indices sont représentées en fonction des SMC mesurés (cf. Figure 51, à droite). Pour les indices NIMSOL et NIMSON, la majorité des points (de l'ordre de 70 %) ont une erreur relative inférieure à 20 %. Cependant, une difficulté réside dans l'estimation des niveaux de SMC_g inférieurs à 20 ‰. Cette difficulté avait déjà été évoquée précédemment lors de l'étude de l'impact du SMC sur les spectres de référence mesurés (cf. §II.1.1.2.3). En revanche, pour l'indice SIMSON, l'estimation du SMC ne s'effectue pas

correctement. En effet, pour des SMC_g inférieurs à 30 %, le SMC est surestimé avec une erreur relative supérieure à 20 % dans la majorité des cas. Au-delà, les valeurs de SMC sont largement sous-estimées car la loi polynomiale s'ajuste mal aux valeurs de SMC_g supérieures 30 %_g (saturations des valeurs).

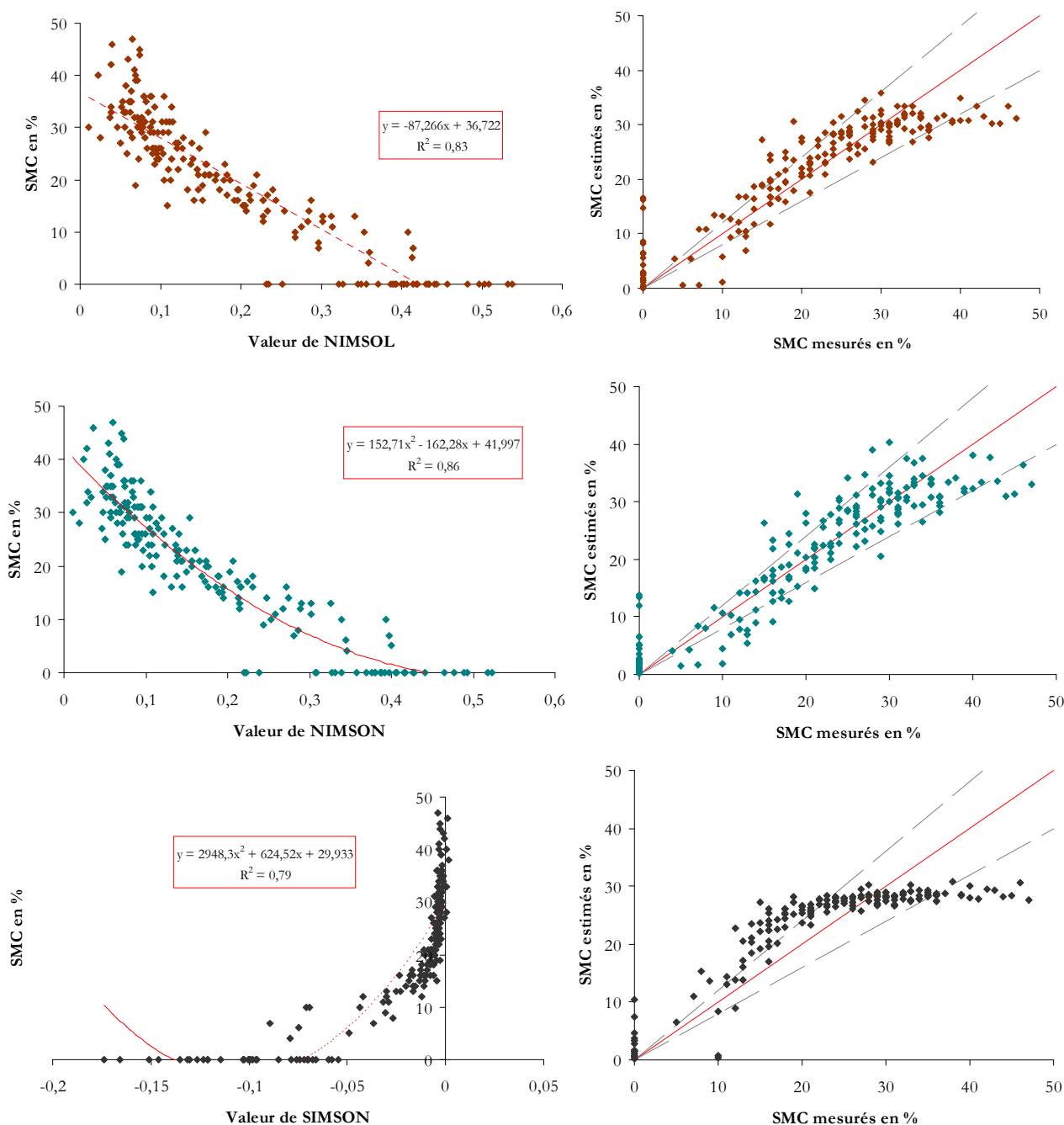


Figure 51 – Indices évalués sur les spectres de référence mesurés dans le domaine IRT : SMC_g en fonction des indices NIMSOL (en haut, à gauche), NIMSON (au milieu, à gauche) et SIMSON (en bas, à gauche) pour toutes les classes regroupées ; les régressions sont représentées par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de ces indices en fonction des SMC_g mesurés (à droite); la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %.

En définitive, seuls les indices NIMSOL et NIMSON sont retenus dans le domaine IRT.

Application sur les spectres de référence mesurés et simulés

Les indices NIMSOL et NIMSON sont appliqués sur les spectres simulés dans le domaine IRT. Ces nouvelles valeurs d'indices complètent celles établies avec les spectres de référence mesurés, et les nouvelles valeurs *RMSE* sont de 5,2 %_g pour NIMSOL et 4,6 %_g pour NIMSON. Ces indices offrent des performances équivalentes à celles obtenues avec les spectres de référence mesurés. En effet, leurs lois empiriques sont similaires (cf. Figure 51 et Figure 52, à gauche).

Les nuages de points de ces deux indices, sont assez similaires (cf. Figure 52, à droite) avec une tendance à sous estimer les *SMC_g* supérieurs à 35 %_g. Les erreurs les plus importantes, pour NIMSOL et NIMSON sont observées pour des niveaux de *SMC_g* inférieurs à 15 %_g.

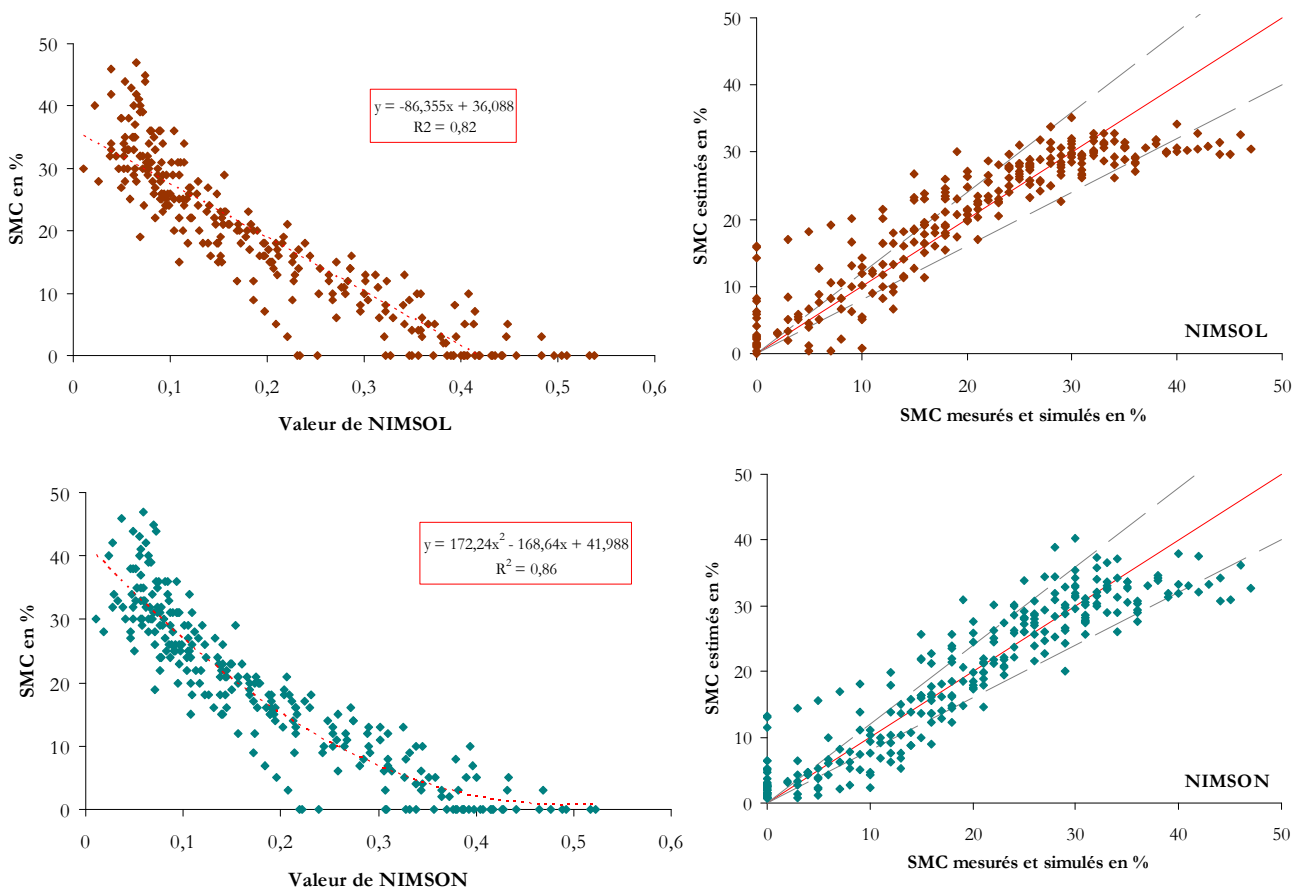


Figure 52 – Indices évalués sur les spectres de référence mesurés et simulés dans le domaine IRT : *SMC_g* en fonction des indices NIMSOL (en haut, à gauche) et NIMSON (en bas, à gauche) pour toutes les classes regroupées ; les régressions sont représentées par les lignes en pointillés. *SMC_g* estimés à partir de ces indices en fonction des *SMC_g* mesurés (à droite); la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %.

II.2.2.3.2. Méthodes globales

Aire sous l'EC

Application sur les spectres de référence mesurés

Les matrices de corrélation ayant montré que le domaine du MWIR (3 – 5,5 μm) présentait les longueurs d'onde les plus sensibles à l'humidité, le critère de l'aire sous l'EC du spectre est à présent appliqué dans ce domaine.

Sur l'intervalle spectral du MWIR, les performances du critère d'aire sous l'EC sont diminuées par rapport à celles du domaine IRT (3 – 14 μm) (cf. §II.2.2.1). Le coefficient de détermination R^2 obtenu par une régression linéaire est seulement de 56 % ($RMSE$ de 8,3 %_g), et s'améliore légèrement en considérant une régression non linéaire (R^2 de 68 % et $RMSE$ de 7,1 %_g). Cependant, ce résultat reste en deçà de celui établi précédemment sur le domaine IRT complet (R^2 de 87 % et $RMSE$ de 4,6 %_g).

Ce résultat est illustré sur la Figure 53. La loi empirique s'ajuste mal au nuage de points qui est très étalé (cf. Figure 53, à gauche), et par conséquent le nuage de points des valeurs de SMC estimés en fonction des SMC mesurés est dispersé (cf. Figure 53, à droite).

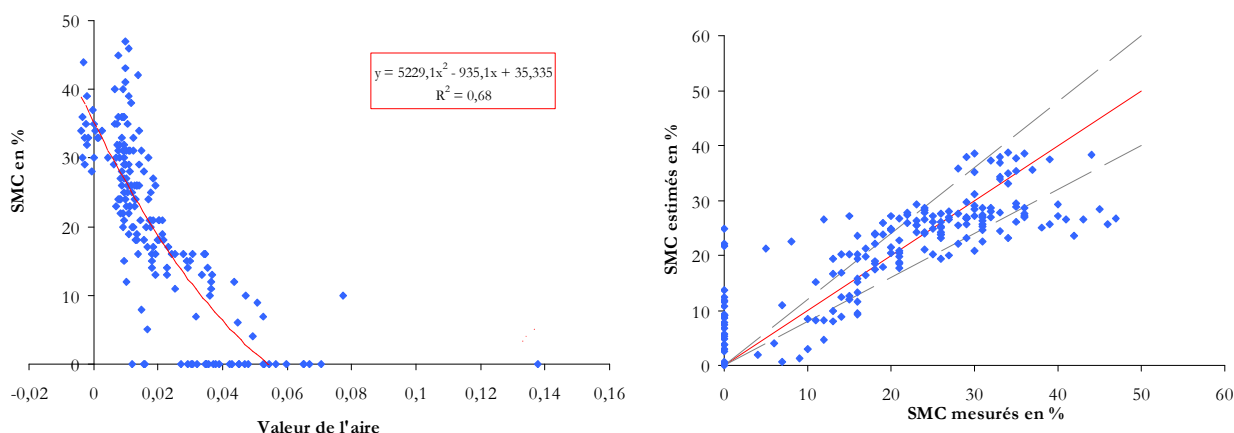


Figure 53 – Aire sous l'EC appliquée sur les spectres de référence mesurés dans le domaine MWIR : SMC_g en fonction de l'aire (à gauche) pour toutes les classes regroupées; la régression est représentée par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de l'aire en fonction des SMC_g mesurés (à droite) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %.

Pour comprendre ces résultats, la Figure 54 représente le modèle d'EC appliqué sur les spectres de l'échantillon de sol **84Avignon**, pour trois niveaux de SMC, dans les domaines IRT (à gauche) et MWIR (à droite). Dans le domaine IRT, les principales variations de l'aire sont liées à la différence de niveau de réflectance existant entre le MWIR et LWIR (cf. Figure 54, à gauche). Ces aires sous l'EC varient fortement en fonction du SMC, expliquant la corrélation importante. Dans le MWIR (cf. Figure 54, à droite), les variations de l'aire sont liées principalement au pic d'absorption des carbonates à 4 μm . Cependant ces minéraux ne sont pas présents dans tous les sols (courbes en cloche). Ces différences de comportements entraînent

donc une baisse de la corrélation entre le SMC et les valeurs d'aire sous l'enveloppe convexe pour les sols ne présentant pas ce comportement de courbe en cloche.

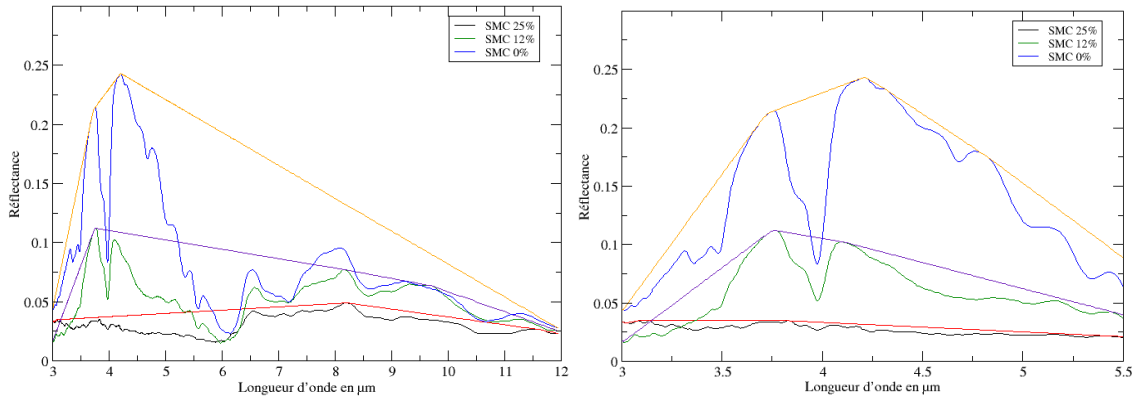


Figure 54 – Modèle d'EC appliqué sur les spectres de réflectances du sol **84Avignon**, pour trois valeurs de SMC dans les domaines IRT (à gauche) et MWIR (à droite).

Ainsi, à partir du modèle d'enveloppe convexe, le critère retenu pour l'estimation du SMC dans le domaine spectral IRT, est l'aire sous l'EC du spectre sur 3 – 14 µm (corrélé non linéairement avec un R^2 de 87 % et un $RMSE$ de 4,6 %_g). Cependant, dans le cas de mesures réelles, l'impact de l'atmosphère sur le domaine 5 – 8 µm est à prendre en considération.

Application sur les spectres de référence mesurés et simulés

L'étude de ce critère est complétée par les spectres de référence simulés dans le domaine IRT (3 – 14 µm). La loi empirique liant le SMC à l'aire sous l'EC (cf. Figure 55, à gauche) conduit à des SMC estimés proches de ceux obtenus avec les spectres de référence mesurés : $RMSE$ de 4,6 %_g. Cette loi empirique est donc exploitée pour la suite.

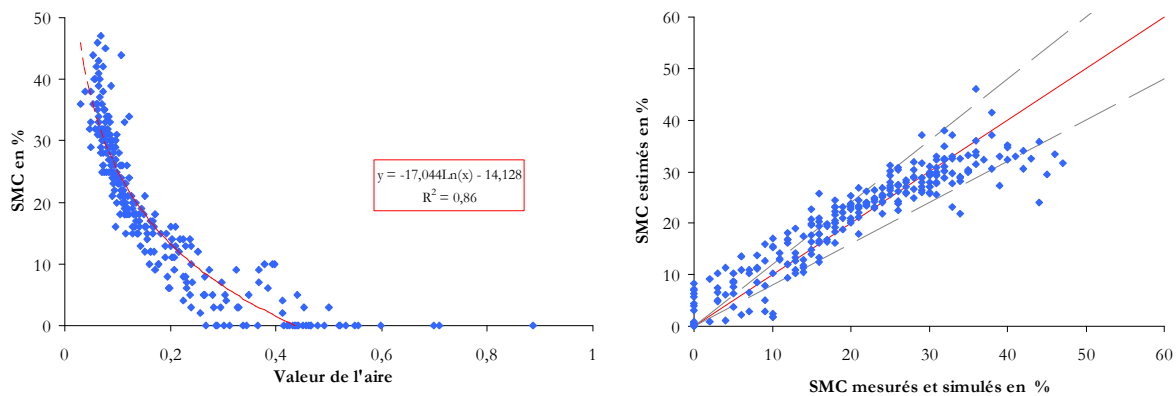


Figure 55 – Aire sous l'EC appliquée sur les spectres de référence mesurés et simulés dans le domaine IRT : SMC_g en fonction de l'aire (à gauche) pour toutes les classes regroupées; la régression est représentée par les lignes en pointillés. SMC_g estimés à partir de l'aire en fonction des SMC_g mesurés (à droite) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %.

Inversion du MES

Dans le domaine IRT, les valeurs $RMSE$ sur l'estimation du SMC sont présentées dans le Tableau 25 pour chaque classe de sol.

IRT	RMSE (% _g)
Classe1 (1 sol)	2,9
Classe2 (4 sols)	3
Classe3 (1 sol)	2,9
Classe4 (3 sols)	2,9
Classe5 (16 sols)	3,4
Classe6 (3 sols)	3,4
Classe7 (1 sol)	2,3
Classe8 (2 sols)	2,1
Classe9 (1 sol)	2,5

Tableau 25 – Valeurs $RMSE$ (%_g) associées au MES inverse, par classe de sol, dans le domaine IRT.

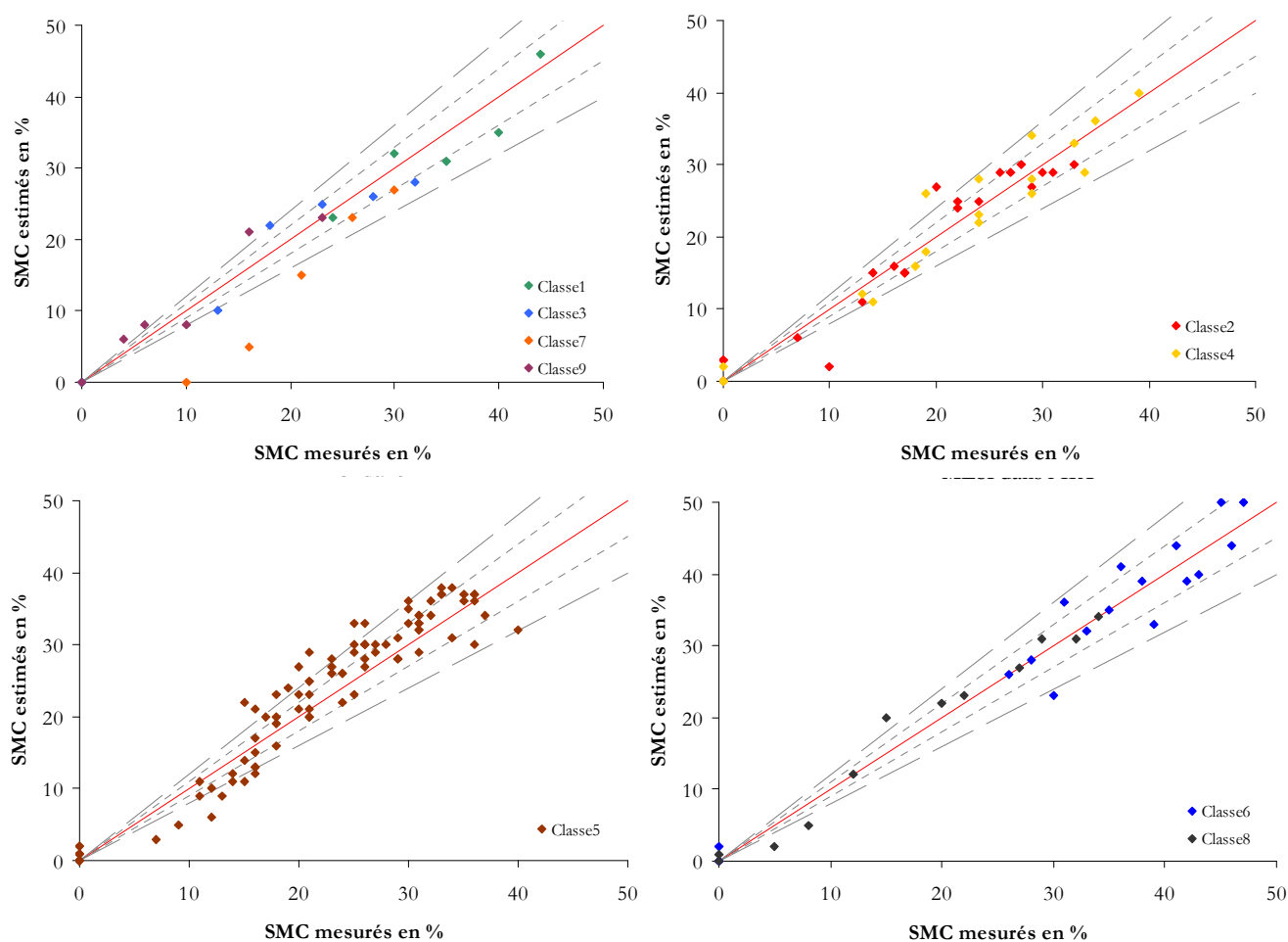


Figure 56 – MES inverse appliqué sur les spectres de référence mesurés dans le domaine IRT : SMC_g estimés en fonction des SMC_g mesurés pour toutes les classes de sols ; la bissectrice est représentée sur les graphiques par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 10 % et 20 %.

Dans ce cas, la plupart des classes ont une valeur *RMSE* inférieure à 3 ‰. Pour les *classe2*, *classe4* et *classe8*, les performances sont meilleures pour l'IRT que pour le réflectif. Pour les *classe1*, *classe3*, et *classe9*, les *RMSE* restent du même ordre de grandeur que ceux obtenus pour le réflectif. Par contre pour la *classe7*, la valeur *RMSE* devient supérieure à 2 ‰ dans l'IRT, alors qu'elle était inférieure à 2 ‰ dans le réflectif.

Les *classe5* et *classe6*, présentent des valeurs *RMSE* comprises entre 3 ‰ et 4 ‰ comme pour le réflectif, mais légèrement plus faibles (cf. Tableau 25) et la majorité des erreurs relatives reste inférieure à 20 % (cf. Figure 56).

Finalement, l'estimation du SMC au moyen du MES inverse dans le domaine IRT, fournit un *RMSE* moyen pour toutes les classes de sol de 2,8 ‰. Les valeurs minimale et maximale sont respectivement de l'ordre de 2,1 ‰ (*classe8*) et 3,4 ‰ (*classe6*).

II.2.2.3.3. Synthèse dans le domaine IRT

Dans le domaine IRT, le MES inverse est le critère le plus performant, avec une valeur moyenne de *RMSE* de 2,8 ‰ en deçà de celles produites par les critères établis précédemment dans ce même domaine spectral : NIMSOL (*RMSE* de 5,2 ‰), NIMSON (*RMSE* de 4,6 ‰) et l'aire sous l'EC (*RMSE* de 4,6 ‰).

Pour conclure, les indices NIMSOL et NIMSON, le critère d'aire sous l'EC du spectre dans l'IRT, et le MES inverse sont retenus pour la suite des travaux.

II.2.3. Synthèse : ALOHA (criteria for soil moisture estimation from Hyperspectral data)

Les méthodes localisées et globales ont permis de déterminer huit critères de caractérisation du SMC, dans les domaines spectraux réflectif et IRT valable quelque soit le type de sol parmi les échantillons étudiés. Chacun de ces critères permettent d'estimer la valeur de SMC avec une erreur relative inférieure à 20 % sur les spectres de référence mesurés et simulés.

Nous définissons le terme ALOHA (criteria for soil moisture estimation from Hyperspectral data) comme étant l'ensemble de tous les critères retenus au cours de cette étude. ALOHA est donc constitué des critères suivants :

- Dans le domaine réflectif :
 - NSMI (RMSE de 6,2 %_g)
 - WISOIL (RMSE de 5,7 %_g)
 - NINSOL (RMSE de 4,4 %_g)
 - NINSON (RMSE de 4,9 %_g)
 - Aire sous l'EC du LN(spectre) sur 1 – 2,4 μm (RMSE de 5,6 %_g)
 - MES inverse (RMSE de 3,2 %_g)

- Dans le domaine IRT :
 - NIMSOL (RMSE de 5,2 %_g)
 - NIMSON (RMSE de 4,7 %_g)
 - Aire sous l'EC du spectre sur 3 – 14 μm (RMSE de 4,6 %_g)
 - MES inverse (RMSE de 2,8 %_g)

La sensibilité de tous ces critères doit à présent être étudiée en fonction des conditions atmosphériques et des caractéristiques du capteur avant de les valider sur des données hyperspectrales réelles.

Partie III

Validation d'ALPHA sur des données hyperspectrales simulées et acquises



Chapitre 1

Etude de sensibilité d'ALOHA dans le domaine optique

Les critères regroupés dans ALOHA ont été définis et évalués à partir de propriétés optiques spectrales de référence supposées parfaites (non entachées d'erreur). Dans le cas d'acquisition en extérieur, l'accès à ces grandeurs passe par la télédétection qui introduit des incertitudes liées notamment à la présence de l'atmosphère et aux imperfections de l'instrument d'acquisition. L'impact de ces incertitudes sur l'estimation du SMC doit être évalué et c'est l'objet de ce chapitre. La méthode proposée repose sur l'utilisation d'un simulateur end-to-end, qui consiste à simuler le signal au niveau du capteur pour un sol de signature spectrale connue (spectres de référence) puis à estimer le signal au niveau du sol après modélisation du capteur et correction atmosphérique.

Dans une première partie de ce chapitre, ce simulateur end-to-end est décrit de manière détaillée. La simulation du signal au niveau du capteur est en premier lieu abordée, en présentant la prise en compte de l'atmosphère au moyen d'un code de transfert radiatif et celle des caractéristiques instrumentales aux moyens de la sensibilité spectrale et de défauts d'étalonnage. Ensuite, la méthode d'estimation du signal au niveau de la surface après correction atmosphérique est décrite. Les méthodes de correction atmosphérique et de séparation émissivité/température, utilisées dans nos travaux, exploitent des outils déjà existants en connaissant leurs avantages et leurs inconvénients (hypothèses simplificatrices) intrinsèques.

Dans un second temps, ALOHA est appliqué sur les spectres simulés. Un bilan de performances est établi sur un cas de simulation de référence (dit nominal), et une analyse de sensibilité est réalisée à partir d'une analyse monovariante des paramètres influents liés à l'atmosphère et à l'instrument. Les résultats sont analysés par domaine spectral.

III.1.1. Description du simulateur end-to-end

Le simulateur exploite des données spectrales sur le domaine optique 0,4 – 14 μm , et est constitué de deux modules principaux (cf. Figure 57) :

- module 1 simulant la luminance spectrale issue d'une scène plane au niveau du capteur ;
- module 2 estimant les réflectances spectrales au niveau du sol, à partir de luminances spectrales simulées ou acquises par un imageur hyperspectral.

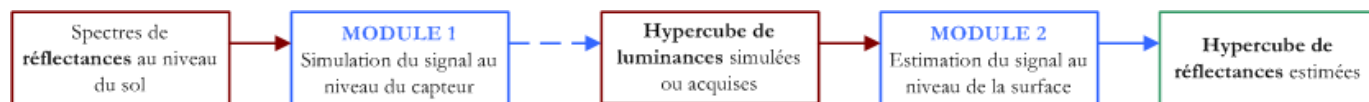


Figure 57 – Représentation schématique du simulateur end-to-end.

III.1.1.1. Simulation du signal au niveau du capteur

Le premier module du simulateur end-to-end (cf. Figure 58) simule des luminances spectrales (cf. Annexe III) en entrée et/ou sortie du capteur à partir de réflectances spectrales au niveau du sol (supposé plat et homogène), en tenant compte de l'atmosphère, des conditions géométriques de prise de vue et des caractéristiques de l'instrument.

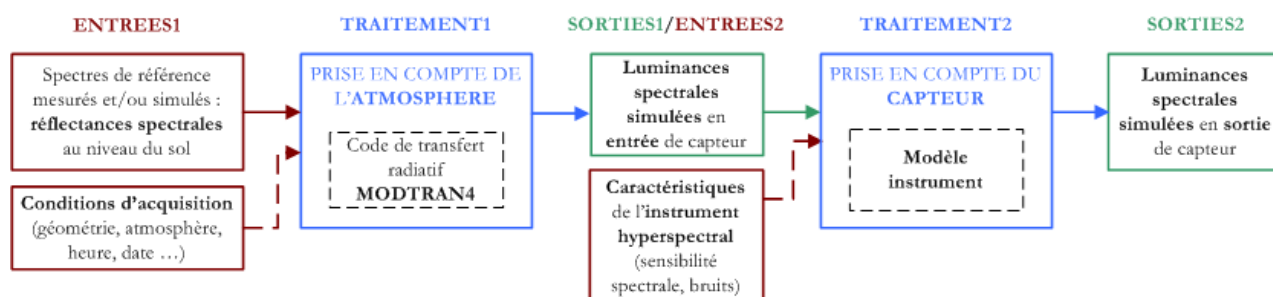


Figure 58 – Représentation schématique du module 1 de simulation du signal au niveau du capteur.

Les réflectances spectrales sont soit issues de mesures soit simulées (signatures spectrales obtenues pour différentes valeurs de contenu en eau, cf. §II.1).

La modélisation du signal au niveau du capteur dans le système Terre-atmosphère est réalisée avec le code de transfert radiatif MODTRAN4 (MODerate resolution atmospheric TRANsmission ; Berk, 1998, 1999). Le capteur est décrit par un modèle instrumental dont les principales caractéristiques sont les suivantes : sensibilité spectrale et sources de bruit.

En sortie, le module de traitement fournit des luminances spectrales simulées au niveau du capteur.

Les termes radiatifs composant le signal au niveau du capteur sont rappelés, et la méthode de prise en compte de l'instrument est décrite.

III.1.1.1.1. Modélisation de la luminance spectrale au niveau de l'instrument

Soit un capteur observant une surface plane, homogène et supposée lambertienne (Borner, 2001 ; Boyd, 2004), les principales contributions radiatives du signal au niveau du capteur sont représentées sur la Figure 59, la dépendance en longueur d'onde étant sous-entendue. La luminance totale L_{EC} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$) est la somme des luminances suivantes (les contributions de l'environnement étant négligées) :

- luminance réfléchiée par la surface $L_{reflechie}$, constituée des composantes solaire (due à l'éclairement solaire $E_{solaire}$) et atmosphérique descendante L_{atm}^{\downarrow} ;
- luminance atmosphérique montante L_{atm}^{\uparrow} comprise entre la surface et le capteur ;
- luminance émise L_{emise} par la surface pour le domaine IRT (3 – 14 μm).

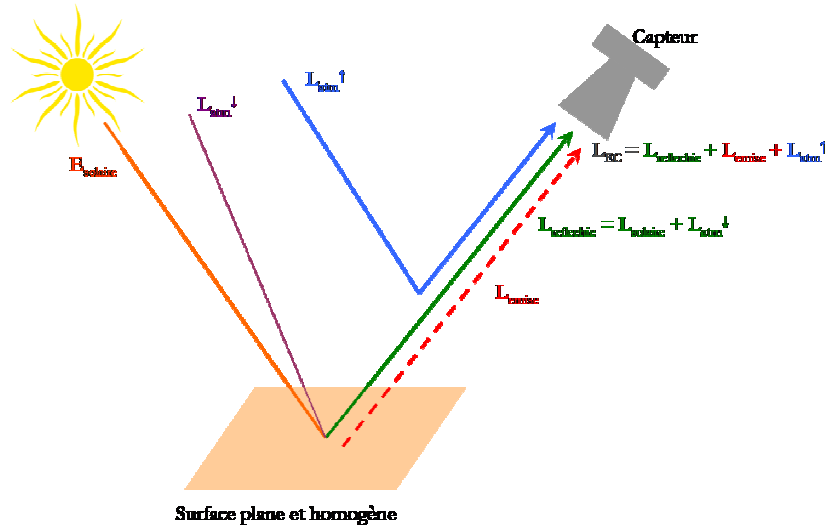


Figure 59 – Termes contribuant au signal en entrée de capteur visant une surface plane et homogène.

La contribution de la luminance totale définie au niveau de la surface peut s'écrire comme une fonction linéaire de la luminance issue de la surface étudiée ($L_{surface}$) atténuée par la transmission atmosphérique τ . La luminance totale en entrée de capteur L_{EC} s'écrit alors :

$$L_{EC}(\lambda) = \tau(\lambda) \cdot L_{surface}(\lambda) + L_{atm}^{\uparrow}(\lambda) \quad (35)$$

Où :

$$L_{surface}(\lambda) = L_{reflechie}(\lambda) + L_{emise}(\lambda) \quad (36)$$

Avec :

- $L_{reflechie}$ dépendant de la réflectance ρ de la surface observée (cf. équation 37) et de l'éclairement solaire $E_{solaire}$ (considéré négligeable sur 8 – 14 μm) :

$$L_{reflechie}(\lambda) = \rho(\lambda) \cdot E_{solaire}(\lambda) + \rho(\lambda) \cdot L_{atm}^{\downarrow}(\lambda) \quad (37)$$

- L_{emise} fonction de l'émissivité ε de la surface et de sa température T_s (où B est la luminance du corps noir estimée à partir de la loi de Planck):

$$L_{emise}(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \cdot B(\lambda, T_s) \quad (38)$$

Tous ces contributeurs sont estimés par le code de transfert radiatif MODTRAN4.

III.1.1.1.2. Modélisation de la luminance spectrale en sortie d'instrument d'acquisition

L'instrument d'acquisition (appelé par la suite capteur) est modélisé par sa sensibilité spectrale et ses sources de bruit instrumental.

Modélisation du signal en sortie du capteur

La luminance en sortie de capteur (L_{SC}) dépend de la luminance en entrée de capteur (L_{EC}) convoluée à la réponse spectrale de l'instrument (S_K), où K correspond à la $K^{ième}$ bande spectrale de l'instrument considéré (Miesch., 2005) :

$$L_{SC}^K(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{EC}(\lambda) \cdot S_K(\lambda) d\lambda \quad (39)$$

La Figure 60 illustre le passage des luminances spectrales en entrée de capteur (courbes noires) à celles en sortie de capteur (courbes rouges). Les sensibilités spectrales considérées sont celles de l'instrument hyperspectral HyMap (128 bandes spectrales) pour le domaine spectral réflectif (cf. Figure 60, à gauche) et celles de l'instrument AHS-160 (17 bandes ; Fernandez, 2005) pour le domaine spectral IRT (cf. Figure 60, à droite).

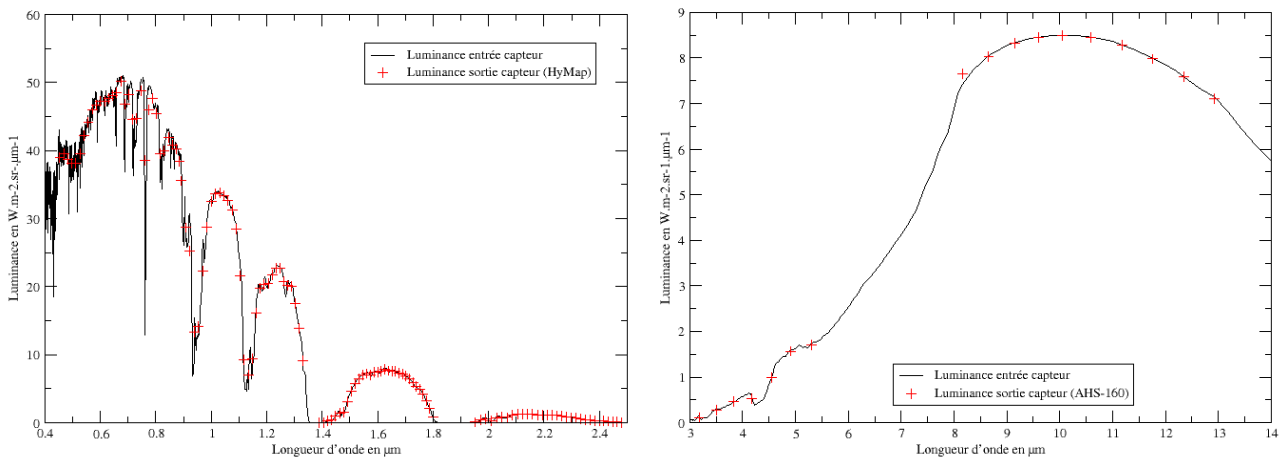


Figure 60 – Luminances spectrales en entrée de capteur simulées par MODTRAN4 (en noir), et luminances spectrales simulées en sortie du capteur (en rouge) dans les domaines spectraux réflectif (à gauche) et IRT (à droite). Le symbole "+" représente la longueur centrale de chaque bande.

Modélisation du signal en sortie de capteur avec en prise en compte d'incertitudes sur les étalonnages absolu et inter-bande

Seules les incertitudes liées à la connaissance des coefficients d'étalonnages absolu et inter-bande sont prises en compte. Les instruments considérés présentant des SNR élevés permettent de négliger l'impact du bruit aléatoire associé à la chaîne de détection.

Ces incertitudes sont modélisées de la manière suivante (Warner, 2001 ; Okin, 2000) :

- incertitude liée à l'étalonnage radiométrique absolu :

$$B_{Etal} = L_{SC}(\lambda) \cdot C_{Etal} \quad (40)$$

où C_{Etal} est le coefficient d'étalonnage absolu (%) associé à la conversion de la sortie instrumentale en valeurs physiques (luminances en haut de l'atmosphère) ;

- incertitude liée à l'étalonnage inter-bande :

$$B_{\Delta\lambda} = L_{SC}(\lambda) \cdot C_{\Delta\lambda} \cdot U(-0,5;0,5) \quad (41)$$

où $C_{\Delta\lambda}$ est le coefficient d'étalonnage inter-bande (%) et $U(-0,5;0,5)$ est une loi uniforme, loi de probabilité de moyenne nulle et d'écart-type égal à $\frac{1}{2\sqrt{3}}$ (Bouleau, 1986).

La luminance en sortie de capteur prenant en compte ces incertitudes (L_{SCB} , cf. Figure 61) est donc déduite de la formule ci-dessous (pour simplifier les notations, la dépendance en longueur d'onde n'est pas introduite dans les différents types de bruit modélisés) :

$$L_{SCB}(\lambda) = L_{SC}(\lambda) + B_{\Delta\lambda} + B_{Etal} \quad (42)$$

Pour les instruments HyMap et AHS-160, les luminances spectrales en sortie du capteur dégradées par du bruit sont illustrées par la Figure 61.

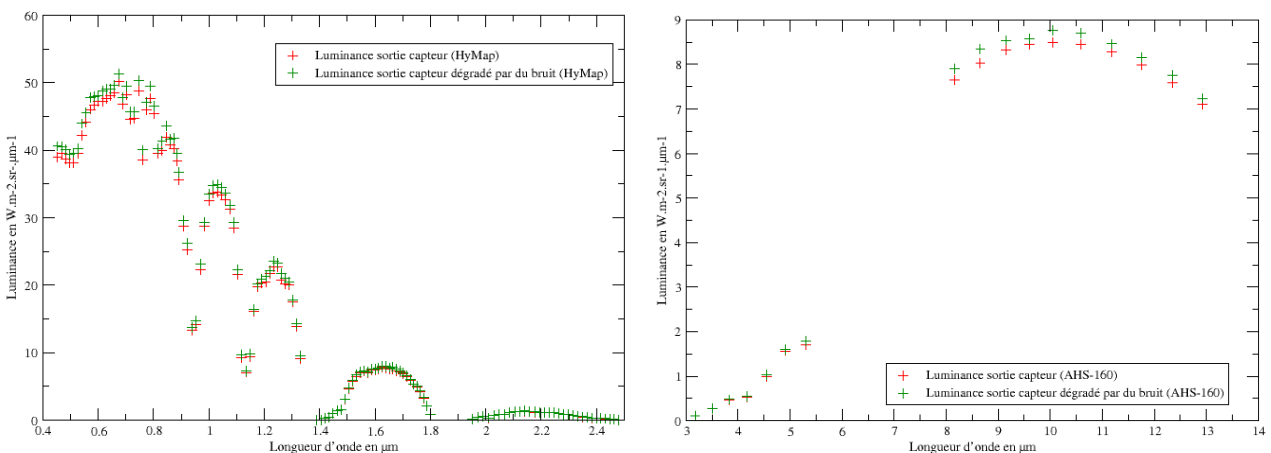


Figure 61 – Luminances spectrales simulées en sortie du capteur (en rouge) et dégradées par les incertitudes (en vert) composé de B_{SNR} , $B_{\Delta\lambda}$ et B_{Etal} , dans les domaines spectraux réflectif (à gauche) et IRT (à droite). Les paramètres utilisés sont pour le domaine réflectif : $C_{\Delta\lambda} = 2\%$ et $C_{Etal} = 2\%$; et pour le domaine IRT : $C_{\Delta\lambda} = 2\%$ et $C_{Etal} = 2\%$. Le symbole "+" représente la longueur centrale de chaque bande.

III.1.1.2. Estimation des propriétés optiques de surface

Le second module du simulateur (cf. Figure 62), permet d'estimer des réflectances spectrales au niveau du sol à partir de luminances spectrales simulées (module 1) ou acquises par un imageur hyperspectral.

Pour cela, deux modules de correction atmosphérique sont intégrés suivant le domaine spectral considéré :

- COCHISE (COde de Correction atmosphérique Hyperspectrale d'Images de Senseurs Embarqués ; Miesch, 2005) dans le domaine réflectif ;
- Correction atmosphérique et séparation de l'émissivité et de la température de surface sous certaines hypothèses simplificatrices dans l'IRT.

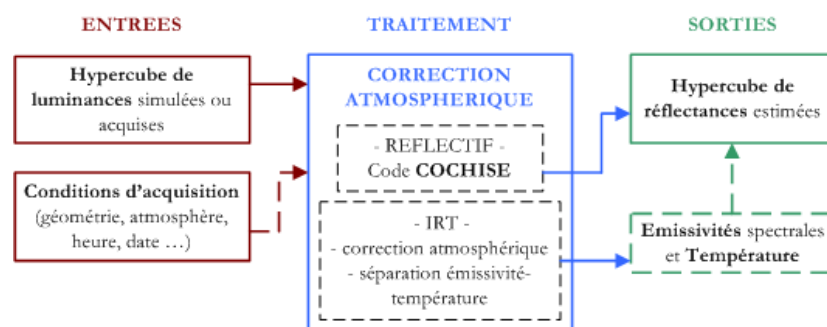


Figure 62 – Représentation schématique du module 2 d'estimation des propriétés optiques de surface.

Les données d'entrée de ce module sont :

- un hypercube de luminances simulées ou acquises ;
- les conditions d'acquisition de l'instrument hyperspectral considéré.

III.1.1.2.1. Correction atmosphérique dans le réflectif

Le code de correction atmosphérique COCHISE (Boucher, 2002 ; Poutier, 2002 ; Miesch, 2005) permet de corriger les perturbations de l'atmosphère sur une image acquise par un instrument hyperspectral, et d'estimer la réflectance spectrale au niveau de la surface.

COCHISE permet de déterminer (Poutier, 2002 ; Miesch, 2005) :

- une image du contenu intégré en vapeur d'eau à la résolution spatiale de l'hypercube d'entrée ;
- un hypercube de réflectances spectrales.

La Figure 63 est un exemple de sortie obtenu avec COCHISE (Miesch, 2005). Deux spectres estimés, pour deux niveaux de SMC (sec et saturé), sont comparés aux spectres mesurés correspondants et utilisés en entrée du module 1. Les principales erreurs d'estimation se situent dans les bandes d'absorption de la vapeur d'eau atmosphérique (1,4 μm et 1,9 μm). Le décalage spectral du minimum de la bande d'absorption situé à 1,9 μm , est plus important que pour celle à 1,4 μm .

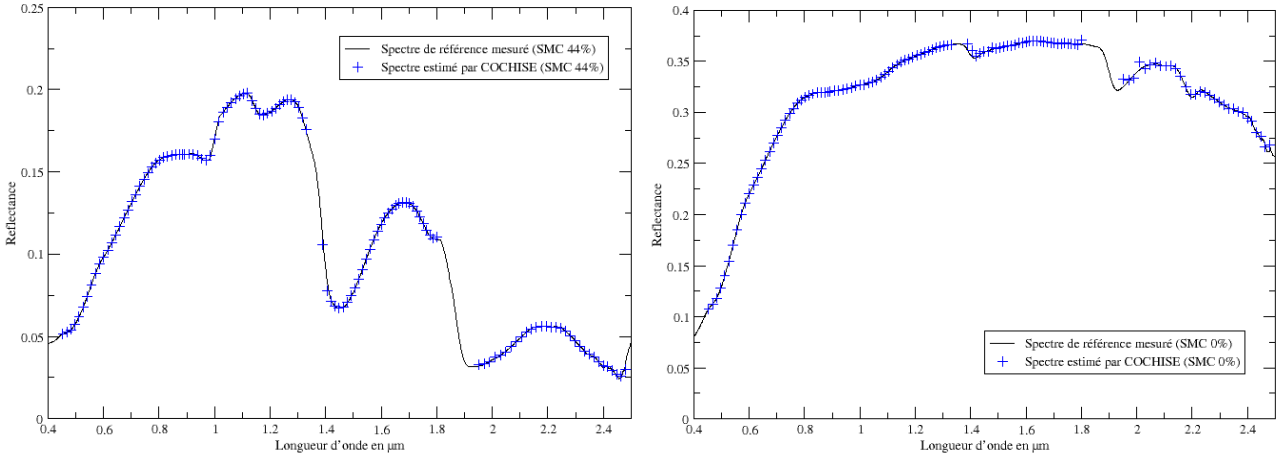


Figure 63 – Réflectances spectrales mesurées et estimées avec COCHISE dans le domaine réflectif pour un sol (*classe1*) saturé (à gauche) et sec (à droite). Le symbole "+" représente la longueur centrale de chaque bande.

III.1.1.2.2. Correction atmosphérique dans l'IRT

Cette méthode de correction suppose connues les caractéristiques de l'atmosphère et, soit la température de surface soit l'émissivité.

L'algorithme permet de déterminer dans un premier temps les termes atmosphériques au moyen du code de transfert radiatif MODTRAN4. Ensuite, l'utilisation d'une méthode de séparation émissivité/température *Maximal Spectral Temperature* (Salvaggio, 2001), est utilisée pour évaluer la température de surface, en supposant connue l'émissivité sur un intervalle spectral donné, pour ensuite en déduire l'émissivité spectrale.

Description de l'algorithme

Pour faciliter la description de l'algorithme, celui-ci est présenté au niveau du signal en entrée de capteur. Pour une utilisation du code en sortie de capteur, les termes des équations sont convolués à la sensibilité spectrale de l'instrument (cf. §III.1.1.2).

La luminance en entrée de capteur (L_{EC}) se réécrit d'après l'équation 43 :

$$L_{EC} = \tau \cdot (1 - \varepsilon) \cdot [L_{atm}^{\downarrow} + E_{solaire}] + \tau \cdot \varepsilon \cdot B(T_S) + L_{atm}^{\uparrow} \quad (43)$$

où le terme solaire est également pris en compte car il n'est pas négligeable dans le domaine du MWIR (3 – 5,5 µm).

Les conditions atmosphériques étant connues, MODTRAN4 estime les termes radiatifs de cette équation : τ , $E_{solaire}$, L_{atm}^{\downarrow} , et L_{atm}^{\uparrow} . La luminance de surface ($L_{surface}$) se déduit alors de l'équation suivante :

$$L_{surface} = \frac{L_{EC} - L_{atm}^{\uparrow}}{\tau} \quad (44)$$

Ensuite, en utilisant la méthode *Maximum Spectral Temperature* de Salvaggio *et al.* (2001), il est possible, à partir des équations 45 et 46, en supposant connue l'émissivité dans une bande spectrale d'estimer la température de surface puis l'émissivité spectrale.

$$\varepsilon = \frac{L_{surface} - [L_{atm}^{\downarrow} + E_{solaire}]}{B(T_s) - [L_{atm}^{\downarrow} + E_{solaire}]} \quad (45)$$

$$T = B^{-1} \left[\frac{L_{surface} - [L_{atm}^{\downarrow} + E_{solaire}]}{\varepsilon} + [L_{atm}^{\downarrow} + E_{solaire}] \right] \quad (46)$$

où B^{-1} correspond à la loi de Planck inverse

La méthode consiste à évaluer la température de surface en supposant connue et constante, sur un intervalle spectral donné, la valeur maximale de l'émissivité (ε_{max}). Ainsi, le spectre de température (cf. équation 46) est calculé sur cet intervalle pour la valeur d'émissivité ε_{max} . En supposant le terme $L_{surface} - [L_{atm}^{\downarrow} + E_{solaire}]$ strictement positif, la température de surface T_s est alors considérée supérieure à la température T . Ainsi, la température de surface estimée correspond à la valeur maximale de la température spectrale (Kanani, 2005) :

$$\hat{T}_s = \max(T(\lambda)) \quad (47)$$

Connaissant la température de surface, l'émissivité spectrale est alors déterminée par l'équation 46, et la réflectance spectrale en est déduite :

$$\rho = 1 - \varepsilon \quad (48)$$

En ne tenant pas compte des bandes d'absorptions du CO_2 (4,2 – 4,4 μm), du NO_2 (4,5 μm) et de la vapeur d'eau (5,5 – 8 μm), l'erreur absolue moyenne entre le spectre estimé et le spectre mesuré est de l'ordre de 0,03 (pour 27 comparaisons) quel que soit le niveau de SMC. Cette erreur absolue est de l'ordre de celle obtenue dans la littérature (0,05 dans le MWIR et à 0,02 dans le LWIR ; Salvaggio, 2001 ; Kanani, 2005).

Dans le domaine 5,5 – 8 μm , en raison d'une transmission proche de zéro due à la forte absorption de la vapeur d'eau, l'estimation des propriétés optiques de surface n'est pas envisageable. Par conséquent, les critères d'ALOHA associés aux méthodes globales seront appliqués uniquement sur les fenêtres atmosphériques du domaine IRT. Ainsi, les conditions suivantes sont retenues :

- le critère d'aire sous l'EC n'est pas évalué. Dans le paragraphe II.2.2.3.2, il a été vérifié que ce critère n'est pas adapté dans le domaine MWIR pour une estimation du SMC. De plus, il a également été vérifié que ce critère n'est pas adapté au domaine du LWIR ;
- le MES inverse est appliqué sur chaque domaine MWIR et LWIR.

III.1.2. Estimation du contenu en eau des sols à partir de données hyperspectrales simulées

L'estimation de performance et l'analyse de sensibilité des critères d'ALOHA (cf. §II.2.3) sont effectuées sur des données hyperspectrales simulées. Le simulateur est utilisé afin d'estimer un hypercube de réflectances dans les domaines spectraux réflectif et IRT. ALOHA est ensuite appliqué sur l'hypercube de réflectances et permet d'estimer le contenu en eau des sols.

L'évaluation de performance des critères après prise en compte des caractéristiques de l'instrument et de l'atmosphère, est réalisée au moyen d'un cas de simulation nominal. Ce cas nominal revient à se placer dans des conditions réalistes d'acquisition aéroportées par un instrument hyperspectral existant. Les contenus en eau estimés sont ainsi comparés aux contenus en eau estimés sur les spectres de référence.

L'étude de sensibilité est réalisée en évaluant l'impact de sources d'erreur (méconnaissance du contenu intégré en vapeur d'eau de l'atmosphère et prise en compte de défauts d'étalonnage) sur l'estimation du SMC, au moyen de cas de simulation particuliers. Les contenus en eau estimés sur les spectres simulés pour ces cas particuliers sont comparés à ceux estimés sur les spectres du cas nominal.

Les paramètres des cas de simulation (nominal et particuliers) sont présentés avant d'aborder l'analyse des résultats par domaine spectral.

III.1.2.1. Présentation des cas de simulation

Le cas de simulation dit nominal, dénommé *s0*, est tout d'abord défini, suivi des cas de simulation particuliers.

III.1.2.1.1. Cas nominal : prise en compte de l'instrument et de l'atmosphère

Les paramètres du cas de simulation nominal *s0* sont définis à partir des conditions d'acquisition réelles de données hyperspectrales aéroportées acquises par l'instrument HyMap (Cocks, 1998 ; données exploitées par la suite pour la validation d'ALOHA, cf. §III.2).

La scène est décrite par sa réflectance spectrale et sa température de surface. Les réflectances spectrales correspondent à des spectres de référence mesurés (cf. §II.1.1) choisis suivant deux conditions : un sol par classe et trois niveaux de SMC (sec, saturé et intermédiaire). La température de surface est fixée à 293 K (~20°C).

Les conditions climatiques sont décrites par le modèle atmosphérique standard (US Standard Atmosphere 1976 ; Berk, 1999) avec une valeur du contenu intégré en vapeur d'eau fixé à 1,5 g.cm⁻².

Pour le domaine réflectif, l'instrument considéré est l'imageur hyperspectral aéroporté HyMap (Cocks, 1998) couvrant le domaine spectral 0,4 – 2,5 μm . Les principales caractéristiques du capteur sont répertoriées dans le Tableau 26.

Dans le domaine IRT, l'instrument considéré est l'imageur hyperspectral aéroporté AHS-160 (Fernandez, 2005) couvrant les domaines réflectif et IRT. Seules les bandes de l'IRT sont exploitées (3 – 14 μm). Ses principales caractéristiques, ainsi que les longueurs d'onde centrales des bandes spectrales, sont données respectivement dans les Tableau 26 et Tableau 27.

Caractéristiques	Valeurs pour HyMap	Valeurs pour AHS-160
Couverture spectrale	0,4 – 2,5 μm (128 bandes)	3 – 5,5 μm (7 bandes) 8 – 13 μm (10 bandes)
Résolution spectrale	15 à 20 nm	300 nm (MWIR) 450 nm (LWIR)
Résolution spatiale une altitude de 2°km	4 m	4 m

Tableau 26 – Principales caractéristiques des instrument HyMap et AHS-160 utilisés pour les simulations.

N° bande	1	2	3	4	5	6	7				
λ en μm	3,18	3,51	3,84	4,17	4,55	4,93	5,31				
N° bande	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
λ en μm	8,18	8,66	9,15	9,6	10,07	10,59	11,18	11,78	12,35	12,93	

Tableau 27 – Longueurs d'onde centrales des bandes spectrales de l'instrument AHS-160 pour le domaine IRT.

Le Tableau 28 synthétise les conditions de simulation caractérisant le cas nominal.

Capteurs	HYMAP (Réflectif)	AHS-160 (IRT)
Conditions d'acquisition	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Altitude du capteur : 2 km ▪ Visée du capteur : nadir ▪ Pas de prise en compte de défauts d'étalonnage ▪ Heure = 11h TU 	
Conditions climatiques	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Profil atmosphérique : US Standard ▪ Contenu intégré en vapeur d'eau du profil atmosphérique : 1,5 g.cm⁻² ▪ Aérosol de type rural (visibilité de 23 km) 	
Conditions de la scène	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Température du sol : 293 K (20°C) ▪ Spectres de référence mesurés : <ul style="list-style-type: none"> ➤ 11Belvis (Classe1) – SMC 44 %_{0g} / 30 %_{0g} / 0 %_{0g} ➤ 24Coulounieix (Classe2) – SMC 33 %_{0g} / 13 %_{0g} / 0 %_{0g} ➤ 12Vabres (Classe3) – SMC 32 %_{0g} / 18 %_{0g} / 0 %_{0g} ➤ 13Crau1 (Classe4) – SMC 39 %_{0g} / 24 %_{0g} / 0 %_{0g} ➤ 30BleA (Classe5) – SMC 36 %_{0g} / 15 %_{0g} / 0 %_{0g} ➤ 30PrairieC (Classe6) – SMC 46 %_{0g} / 28 %_{0g} / 0 %_{0g} ➤ 81StJulien (Classe7) – SMC 30 %_{0g} / 16 %_{0g} / 0 %_{0g} ➤ 31FaugaSmos (Classe8) – SMC 32 %_{0g} / 12 %_{0g} / 0 %_{0g} ➤ 30Pujaut (Classe9) – SMC 23 %_{0g} / 10 %_{0g} / 0 %_{0g} 	

Tableau 28 – Paramètres du cas de simulation nominal *s0*.

III.1.2.1.2. Cas particuliers : prise en compte de sources d'erreur au niveau de l'instrument et de l'atmosphère

Les critères d'ALOHA exploitent le signal acquis dans des bandes spectrales caractérisées par une sensibilité importante à la vapeur d'eau. L'impact de la méconnaissance des aérosols est négligé dans notre cas car le comportement spectral des aérosols est peu variable et leur impact radiatif est réduit pour des visibilités moyennes. Pour ces raisons, la principale source d'incertitude pour la correction atmosphérique est liée à la méconnaissance du contenu intégré en vapeur d'eau.

Lors de l'étude des performances des critères, basée sur le cas de simulation nominal, les luminances spectrales sont simulées sans tenir compte des défauts d'étalonnage considéré (HyMap ou AHS-160). Les défauts d'étalonnage inter-bande et absolu sont modélisées pour les cas particuliers afin d'évaluer leurs influences sur l'estimation du SMC.

Chaque cas de simulation particulier correspond à la variation de l'un des paramètres décrits précédemment, les autres paramètres étant fixés à leur valeur nominale. L'impact des variations de ces paramètres sur l'estimation du SMC est ensuite évalué pour chaque critère.

Variation du contenu intégré en vapeur d'eau (cas *s1* à *s4*)

Quatre valeurs de contenu intégré en vapeur d'eau sont retenues pour l'étude de sensibilité : ces valeurs varient entre 0,5 et 2,5 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ (la valeur pour le cas nominal étant de 1,5 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Cette plage de variation correspond à une modification des largeurs de bandes d'absorption et du continuum de la transmission atmosphérique (cf. Figure 64).

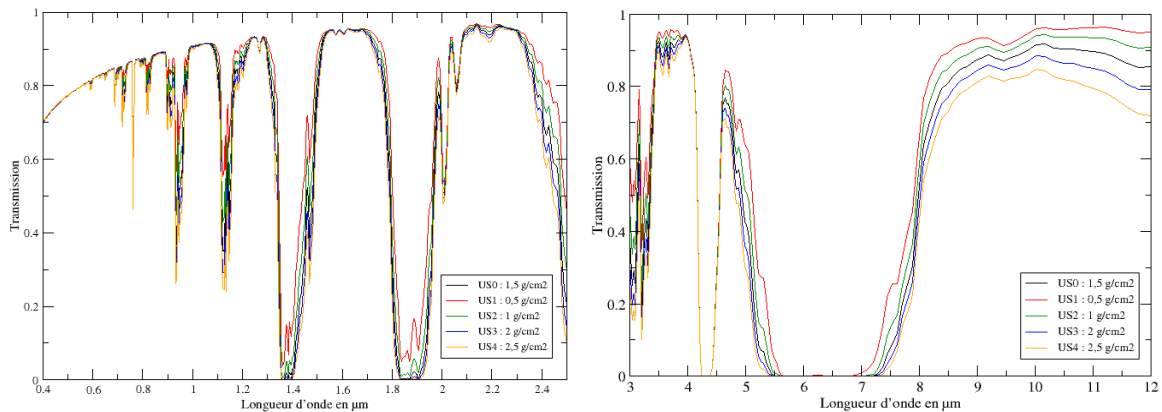


Figure 64 – Transmission atmosphérique pour le domaine réflectif (à gauche) et IRT (à droite) du profil US standard pour des contenus intégrés en vapeur d'eau de 0,5 à 2,5 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Les cas de simulation particuliers, pour chaque domaine spectral, sont alors les suivants:

- cas *s1*: paramètres du cas *s0* avec contenu intégré en vapeur d'eau de 0,5 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$;
- cas *s2*: paramètres du cas *s0* avec contenu intégré en vapeur d'eau de 1 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$;
- cas *s3*: paramètres du cas *s0* avec contenu intégré en vapeur d'eau de 2 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$;
- cas *s4*: paramètres du cas *s0* avec contenu intégré en vapeur d'eau de 2,5 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Prise en compte de défauts d'étalonnage (cas *s5* et *s6*)

La luminance spectrale associée au cas nominal *s0*, est dégradée par les défauts d'étalonnage définis dans le Tableau 29 (cf. §III.1.1.1.2).

Pour le domaine réflectif, les valeurs sont basées sur les spécifications de l'instrument HyMap (Cocks, 1998).

Pour le domaine IRT, des hypothèses sont faites pour définir les coefficients d'étalonnages inter-bande et absolu car les informations associées n'ont pas été trouvées dans la littérature, pour l'instrument AHS-160. Ces valeurs sont choisies identiques à celle de l'instrument HyMap.

Paramètres	REFLECTIF	IRT
$C_{\Delta\lambda}$	3 %	3 %
C_{etal}	5 %	5 %

Tableau 29 – Paramètres définissant les incertitudes liées aux coefficients d'étalonnage.

Deux cas particuliers de simulations sont définis par domaine spectral :

- cas *s5* : paramètres du cas *s0* avec défaut d'étalonnage inter-bande ;
- cas *s6* : paramètres du cas *s0* avec défaut d'étalonnage absolu.

Avec les hypothèses définies au §III.1.1.1.2, un défaut lié à l'étalonnage inter-bande (cf. équation 41) a pour effet de modifier aléatoirement les valeurs de luminances alors qu'un défaut relatif à l'étalonnage absolu (cf. équation 40) induit une modification globale du niveau de la luminance spectrale (cf. Figure 65).

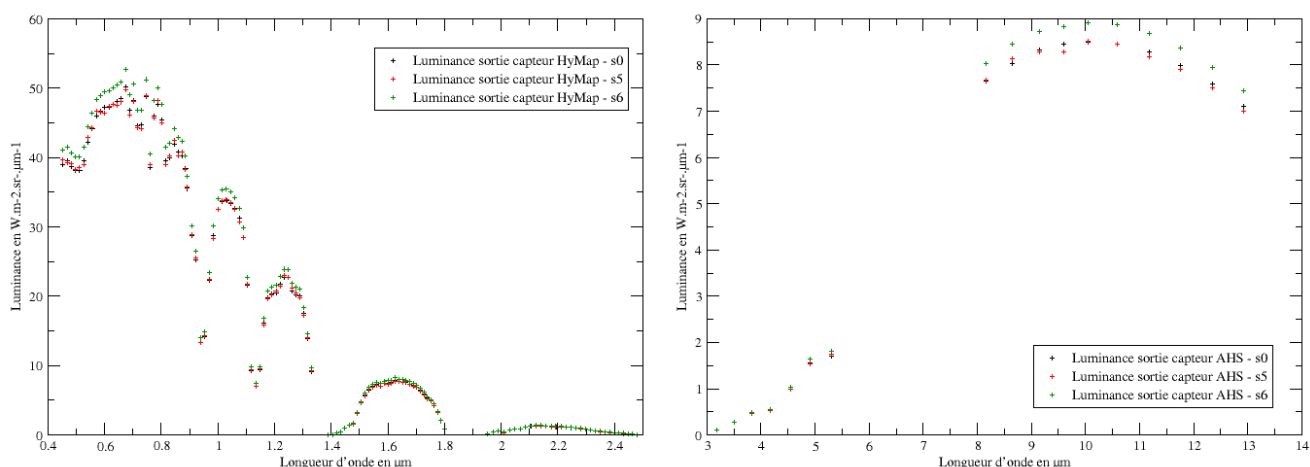


Figure 65 – Luminances spectrales simulées en sortie de capteur (en noir) dégradées par une erreur d'étalonnage inter-bande (cas *s5*, en rouge) et par une erreur d'étalonnage absolu (cas *s6*, en vert), dans les domaines spectraux réflectif (à droite) et IRT (à gauche). Le symbole "+" représente la longueur centrale de chaque bande.

III.1.2.2. Analyse des résultats d'ALOHA

Les contenus en eau estimés au moyen d'ALOHA sur les spectres simulés sont analysés par domaine spectral et par type de méthode (localisées ou globales).

Les résultats du cas nominal permettent de déterminer des performances moyennes des critères après prise en compte de l'instrument et de l'atmosphère.

Les contenus en eau estimés à partir des spectres simulés par les cas particuliers $s1$ à $s6$ sont comparés à ceux déduits du cas nominal $s0$, afin d'évaluer l'impact des variations des paramètres considérés.

III.1.2.2.1. Domaine spectral réflectif

Les critères d'estimation du SMC et leur cadre d'utilisation sont définis à partir de l'étude réalisée au §II.2. Les critères retenus sont les suivants : les indices NSMI, WISOIL, NINSOL et NINSON, l'aire sous l'enveloppe convexe et le MES inverse (cf. §II.2.3).

Les indices exploitent des longueurs d'onde bien particulières (cf. §II.2.2.1). Il est donc nécessaire de les adapter aux bandes spectrales de l'instrument hyperspectral considéré (Haubrock, 2008b). L'écart entre les valeurs de longueurs d'onde des indices et les longueurs d'onde centrales des bandes spectrales HyMap est en moyenne inférieure à 3 nm.

L'aire sous l'enveloppe convexe est déduite de chacune des signatures spectrales simulées sur le domaine 1 – 2,4 μm .

Pour le MES inverse, il est nécessaire de fixer la classe de sol à partir de la signature spectrale simulée pour le sol sec.

Impact de la prise en compte de l'instrument et de l'atmosphère

Analyse des SMC estimés par méthodes localisées

Pour l'indice NSMI, l'erreur relative est de l'ordre de 1 % pour des SMC_g supérieurs à 15 %_g et de l'ordre de 10 % pour des SMC_g inférieurs à 15 %_g (cf. Figure 66, points verts).

Pour l'indice WISOIL, le nuage de points (cf. Figure 66, points jaunes) se situe quasiment sur la bissectrice car l'erreur relative moyenne est de l'ordre de 1,5 %.

L'indice NINSOL (cf. Figure 66, points rouges) a tendance à surestimer les valeurs de SMC par rapport à celles estimées sur les spectres mesurés. Il présente cependant un nuage de points avec une erreur relative inférieure à 10 % pour des valeurs de SMC_g supérieures à 15 %_g.

Pour NINSON, les points (cf. Figure 66, points gris) sont très proches de la bissectrice quel que soit le niveau de SMC (erreur de l'ordre de 5 %).

La modélisation de l'atmosphère et des caractéristiques instrumentales représentatives d'un instrument existant, introduite pour se placer dans un cas réaliste, a donc un impact faible sur les performances des indices spectraux. Ces derniers sont donc adaptés pour des mesures effectuées en laboratoire et des acquisitions hyperspectrales réalisées dans des conditions réelles.

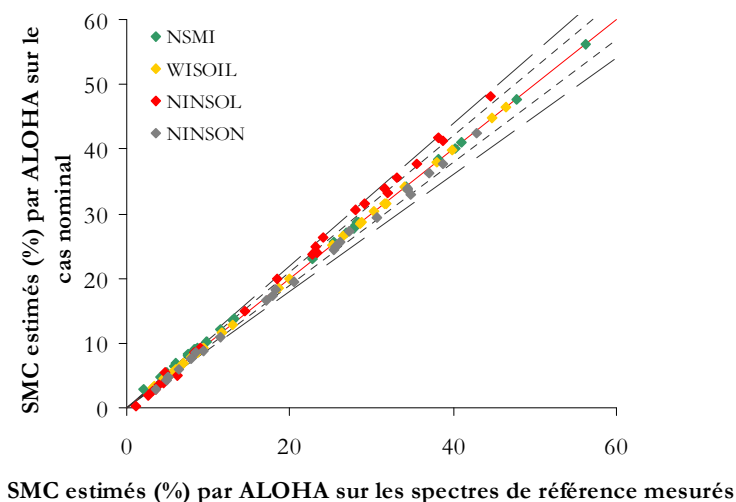


Figure 66 – Méthodes localisées du domaine réflectif : SMC_g estimés par ALOHA sur spectres simulés (cas nominal) en fonction des SMC_g estimés par ALOHA sur spectres de référence mesurés ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %.

Analyse des SMC estimés par méthodes globales

Pour le critère aire sous l'EC (cf. Figure 67, points bleus), l'erreur relative est de l'ordre de 6,5 %. Pour des niveaux de SMC_g supérieurs à 15 %_g l'erreur est de l'ordre de 2 %, et de l'ordre de 10 % pour les niveaux de SMC_g inférieurs à 15 %_g (résultats similaires à ceux de NSMI).

Le MES inverse conduit à une erreur relative inférieure à 10 % (cf. Figure 67, points oranges), quelle que soit la valeur de SMC.

Ces deux critères ont donc également une faible sensibilité aux erreurs instrumentales et à la méconnaissance de l'atmosphère.

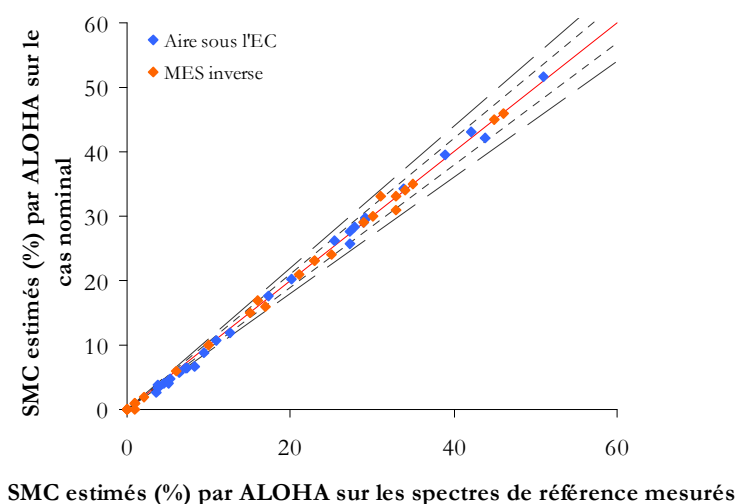


Figure 67 – Méthodes globales du domaine réflectif : SMC_g estimés par ALOHA sur spectres simulés (cas nominal) en fonction des SMC_g estimés par ALOHA sur spectres de référence mesurés ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %.

Comparaison des performances

Les performances des critères sont comparées en termes de valeurs $RMSE$, évaluées sur les SMC mesurés. La valeur la plus élevée est obtenue avec l'indice NSMI (de l'ordre de 8 ‰) alors que la plus faible erreur correspond au MES inverse (de l'ordre de 3 ‰). L'aire sous l'enveloppe convexe et l'indice WISOIL présentent des performances équivalentes de l'ordre de 7 ‰), comme les indices NINSOL et NINSON (de l'ordre de 6,5 ‰). Ces résultats sont cohérents, en terme de hiérarchisation, avec ceux présentés lors de l'application des critères sur les propriétés optiques de référence (cf. §II.2.3).

Cette analyse permet de déduire le MES inverse comme le critère le plus performant lorsqu'on se place dans des conditions d'acquisition réalistes ($RMSE$ deux fois plus faible que pour les autres critères).

Impact de la variation du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère (*s1* à *s4*)

Analyse des SMC estimés par méthodes localisées

Quel que soit le contenu en vapeur d'eau atmosphérique, les erreurs relatives liées à l'indice NSMI (cf. Figure 68, en haut à gauche) sont inférieures à 5 ‰ pour des SMC_g supérieurs à 15 ‰, et inférieures à 10 ‰ pour des SMC_g inférieurs à 15 ‰. Par exemple, l'augmentation d'un contenu en vapeur d'eau de 1,5 g.cm⁻² à 2,5 g.cm⁻² (*s0* à *s4*) implique une augmentation de l'erreur moyenne d'estimation du SMC de 6 ‰.

L'indice NSMI, qui exploite les longueurs d'onde centrales des bandes de HyMap (1,8 μm et 2,1228 μm), est influencé par la variation du contenu en vapeur d'eau à cause d'une modification de la valeur de réflectance à la longueur d'onde de 1,8 μm (cf. Figure 69). Les SMC sont alors surestimés si les contenus en vapeur d'eau sont augmentés (*s3* et *s4*), et sous estimés si les contenus en vapeur d'eau sont diminués (*s1* et *s2*).

Pour les indices WISOIL, NINSOL et NINSON (cf. Figure 68), l'erreur moyenne sur l'estimation du SMC reste stable quel que soit le cas de simulation. L'impact des variations du contenu en vapeur d'eau est inférieur ou de l'ordre de 1 ‰ suivant l'indice considéré.

La variation de la largeur des bandes d'absorption de la vapeur d'eau atmosphérique impacte donc faiblement les valeurs des indices WISOIL, NINSOL et NINSON. Les valeurs de réflectances aux longueurs d'onde de HyMap exploitées par ces indices (WISOIL : 1,3028 μm et 1,4488 μm ; NINSOL : 2,0674 μm et 2,23 μm et NINSON : 2,1228 μm et 2,23 μm) varient peu d'une simulation à l'autre (cf. Figure 69).

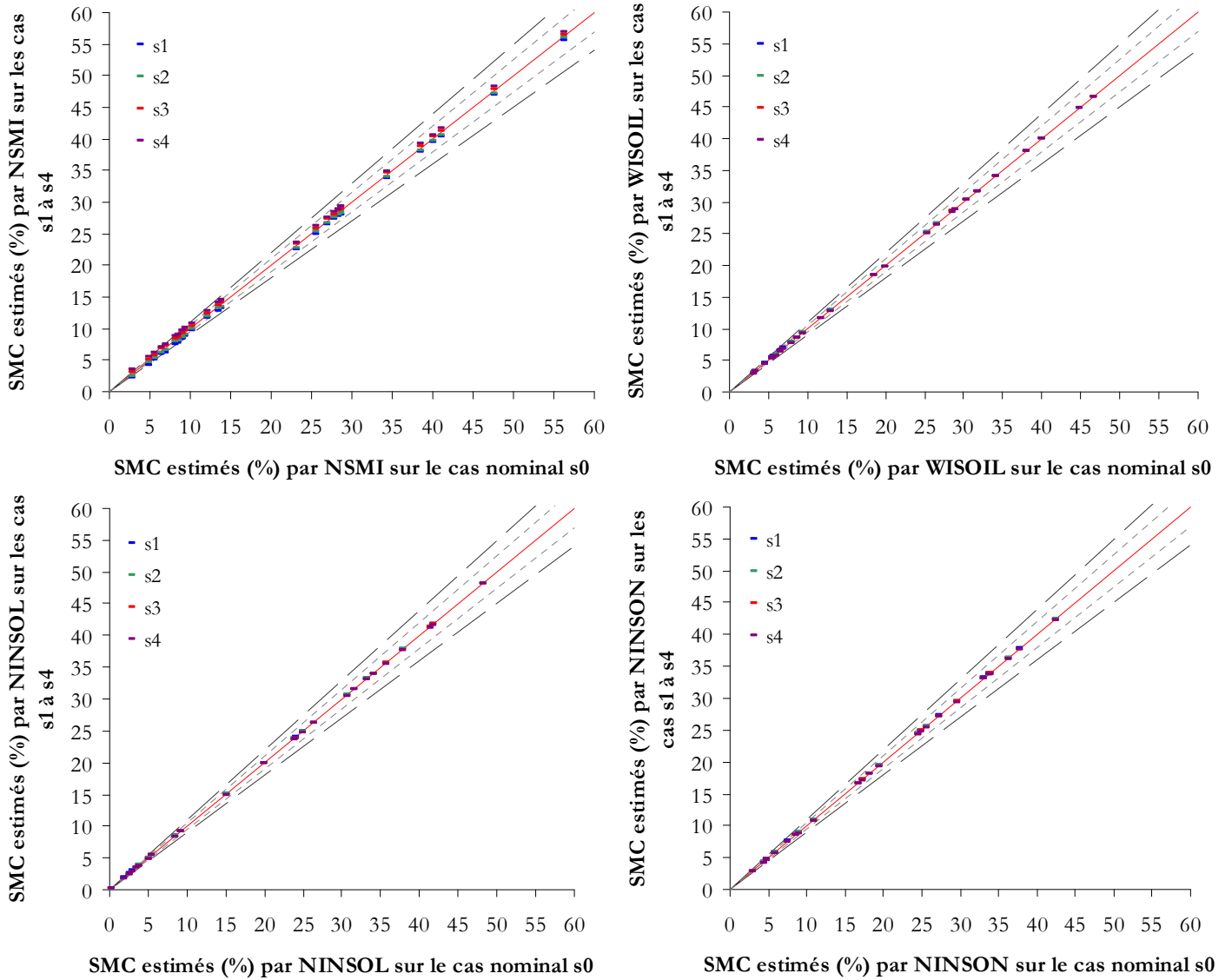


Figure 68 – Méthodes localisées du domaine réflectif : SMC_g estimés pour les cas $s1$ à $s4$ en fonction des SMC_g estimés pour le cas nominal (cas $s0$) dans le domaine spectral réflectif ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %.

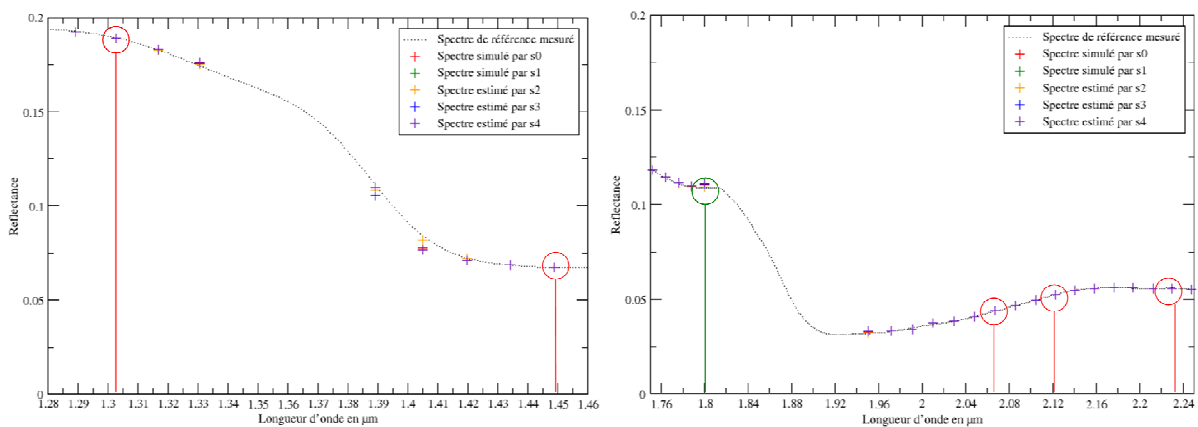


Figure 69 – Réflectances simulées par les simulations $s0$, $s1$, $s2$, $s3$ et $s4$ et spectre de référence mesuré associé, sur les domaines spectraux 1,28 – 1,46 μm (à gauche) et 1,75 – 2,25 μm (à droite). Longueurs d'onde exploitées par WISOIL (à gauche, cercles rouges), NSMI (à droite, cercles vert et rouge), NINSOL et NINSON (à droite, cercles rouges).

Analyse des SMC estimés par méthodes globales

Les SMC estimés avec le critère aire sous l'EC présentent des erreurs relatives inférieures à 5 % pour les valeurs de SMC_g supérieures à 15 %_g (cf. Figure 70, à gauche). Pour les niveaux de SMC considérés, une augmentation du contenu intégré en vapeur d'eau atmosphérique conduit à une sous-estimation du SMC et une diminution de ce contenu engendre une surestimation du SMC. La diminution d'un contenu en vapeur d'eau de $1,5 \text{ g.cm}^{-2}$ ($s0$) à $0,5 \text{ g.cm}^{-2}$ ($s1$) mène à une augmentation de 5 % de l'erreur relative moyenne sur l'estimation du SMC. Si le contenu en vapeur d'eau augmente de $1,5 \text{ g.cm}^{-2}$ ($s0$) à $2,5 \text{ g.cm}^{-2}$ ($s4$), l'erreur relative moyenne augmente de 16 %. Une surestimation du contenu en vapeur d'eau atmosphérique a un impact important pour ce critère (notamment pour des SMC_g inférieurs à 15 %_g où les valeurs sont surestimées).

Pour le MES inverse, la variation du contenu intégré en vapeur d'eau atmosphérique n'a pas d'influence sur la valeur de SMC estimé (cf. Figure 70, à droite ; erreur moyenne sur l'estimation du SMC modifiée de 0,15 % pour $s1$ à $s4$).

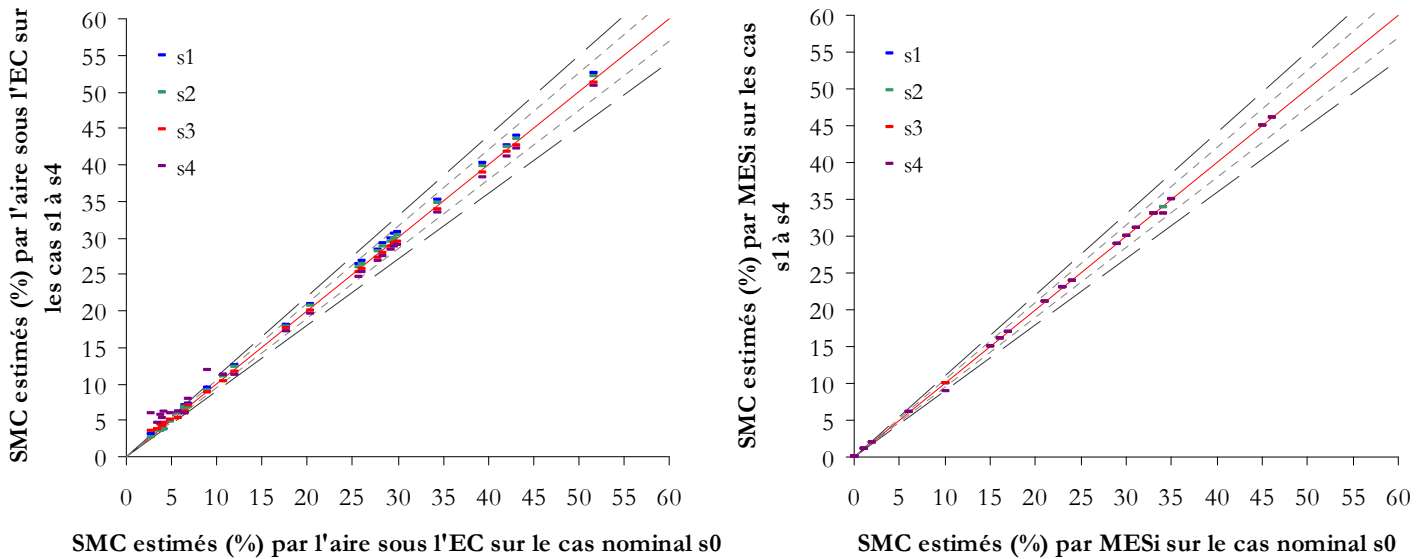


Figure 70 – Méthodes globales : SMC_g estimés pour les cas $s1$ à $s4$ en fonction des SMC_g estimés pour le cas nominal (cas $s0$) dans le domaine spectral réflectif ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %.

Synthèse

Les critères les moins robustes à la variation du contenu intégré en vapeur d'eau de l'atmosphère sont l'indice NSMI et l'aire sous l'enveloppe convexe.

Les critères WISOIL, NINSOL, NINSON et MES inverse sont les moins sensibles aux variations de ce contenu intégré en vapeur d'eau atmosphérique.

Impact des défauts d'étalonnage ($s5$ et $s6$)

Analyse des SMC estimés par méthodes localisées

Seule l'incertitude liée à l'étalonnage inter-bande (cas $s5$) impacte sur les critères issus des méthodes localisées (erreur moyenne de l'ordre de 8 %). NSMI est le plus sensible à la prise en compte de ce défaut (cf. Figure 71, en haut, à gauche), avec une erreur moyenne de l'ordre de 10 %.

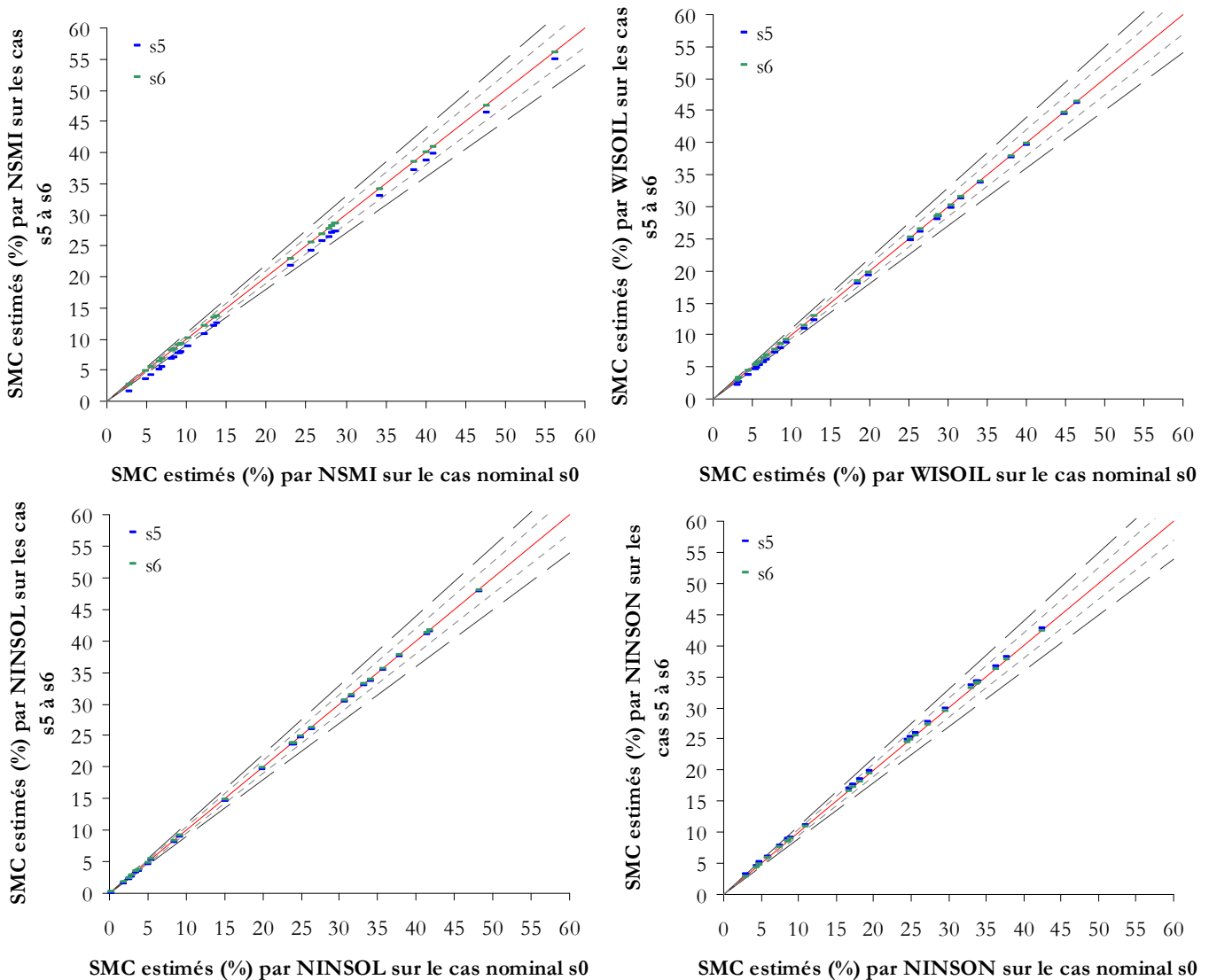


Figure 71 – Méthodes localisées : SMC_g estimés pour les cas $s5$ et $s6$ en fonction des SMC_g estimés pour le cas nominal (cas $s0$) dans le domaine spectral réfléchif ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %.

Analyse des SMC estimés par méthodes globales

Pour l'aire sous l'EC (cf. Figure 72, à gauche), l'incertitude lié à l'étalonnage inter-bande impacte en moyenne de 5 % sur l'erreur d'estimation pour des SMC_g supérieurs à 15 %, et de

20 % pour des SMC_g inférieurs à 15 %. La tendance générale de ce défaut instrumental est de surestimer les valeurs de SMC estimées avec ce critère liée à une surestimation du coefficient d'étalonnage absolu. Les fluctuations des réflectances spectrales engendrées par ce bruit instrumental aléatoire modifient l'écart entre le spectre simulé (cas **s5**) et son enveloppe convexe, conduisant à une variation de la valeur d'aire sous l'EC. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que les niveaux de réflectances sont élevés.

Le défaut d'étalonnage absolu introduit une erreur moyenne de 7 % sur l'estimation du SMC avec le critère d'aire sous l'EC. Modifier par un bruit multiplicatif les niveaux de réflectances (cas **s6**), a pour effet de changer la forme de l'enveloppe convexe, et de ce fait l'aire sous l'EC.

Une erreur d'étalonnage inter-bande n'impacte pas sur les performances du MES inverse, puisque ses fluctuations aléatoires ne modifient pas le niveau des réflectances.

Le MES inverse est sensible au bruit instrumental lié à l'étalonnage absolu (erreur moyenne de 17 %), puisque le MES inverse est sensible aux variations globales du niveau de la signature spectrale.

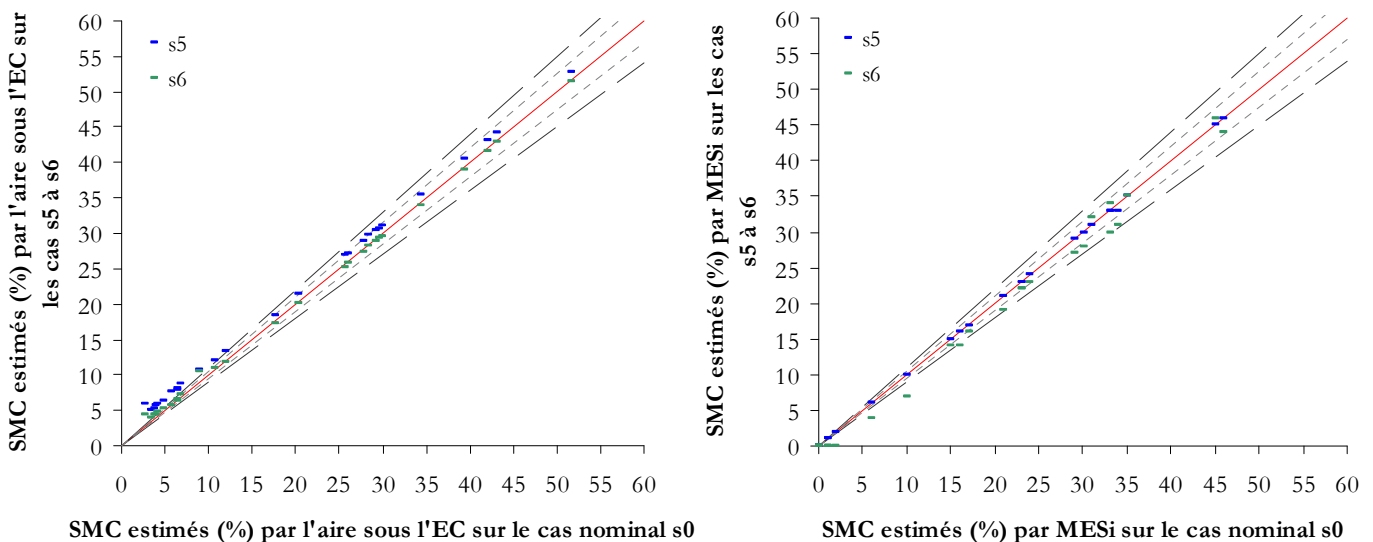


Figure 72 – Méthodes globales : SMC_g estimés pour les cas **s5** et **s6** en fonction des SMC_g estimés pour le cas nominal (cas **s0**) dans le domaine spectral réfléchif ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %.

Synthèse

Pour conclure, le défaut lié à l'étalonnage absolu n'a pas d'impact sur les méthodes localisées (indices spectraux). Seule la qualité de l'étalonnage inter-bande est importante. Le critère le moins robuste est NSMI.

Pour les méthodes globales, l'aire sous l'EC est le critère le moins robuste car il est impacté de manière identique par la qualité des deux types d'étalonnage et sa sensibilité dépend de la valeur de SMC. Le MES inverse n'est pas sensible à l'étalonnage inter-bande, et la qualité de l'étalonnage absolu influe de manière non négligeable sur ses performances.

III.1.2.2.2. Domaine spectral IRT

Les critères d'estimation du SMC retenus et leur cadre d'utilisation sont définis à partir de l'étude réalisée au §II.2.3 et des considérations établies au §III.1.1.2.2. Les critères analysés sont alors les suivants : les indices NIMSOL et NIMSON, et le MES inverse appliqué aux domaines MWIR et LWIR.

Les indices NIMSOL et NIMSON doivent être adaptées aux longueurs d'onde centrales des bandes spectrales de l'instrument AHS-160 (bande 5 et bande 7, cf. Tableau 27). Néanmoins, la configuration instrumentale est très éloignée des deux longueurs d'onde optimales qui définissent chaque indice (NIMSOL : 4,357 μm et 5,29 μm , NIMSON : 4,364 μm et 5,28 μm , cf. §II.2.2.1.1). Les écarts entre les longueurs d'onde optimales et les longueurs d'onde centrales des bandes spectrales de AHS-160 associées, sont de l'ordre de 200 nm pour la première et de 20 nm pour la seconde. Une étude, basée sur les spectres de référence mesurés, met en évidence que l'erreur sur l'estimation du SMC est supérieure à 40 % pour les deux indices si les longueurs d'onde exploitées correspondent à celles des bandes 5 (4,55 μm) et 7 (5,31 μm) de AHS-160. Cette étude a également permis de déterminer les écarts maximums acceptables entre les longueurs d'onde optimales et celles exploitées. Les valeurs sont de l'ordre de 30 nm pour la première longueur d'onde de chaque indice, et de 10 nm pour la seconde.

En outre, la résolution spectrale de AHS-160 dans le MWIR est de 300 nm, alors que ces indices ont été définis avec une résolution spectrale de l'ordre de 10 nm. Une analyse de l'impact de la largeur de bande sur la définition des indices a été effectuée à partir des spectres de référence mesurés. En échantillonnant les spectres à la résolution spectrale de AHS-160 (300 nm), l'erreur commise au niveau des SMC estimés est en moyenne supérieure à 50 % pour NIMSOL et à 15 % pour NIMSON, par rapport aux SMC estimés avec la largeur de bande des spectres de référence. Afin de limiter cet impact, la recherche d'une largeur de bande maximale exploitable par ces indices a été investiguée. Les résultats montrent, pour les deux indices, que celle-ci doit être inférieure à 50 nm afin que l'erreur moyenne sur les SMC estimés soit inférieure à 5 %.

Finalement, les deux indices sont sensibles au décalage de la longueur d'onde exploitée, et notamment pour celles situées à 4,357 μm et 4,364 μm , et à la largeur de bande de l'instrument. L'utilisation de ces indices spectraux pour l'évaluation du contenu en eau des sols, n'est donc pas réalisable à partir de données acquises par cet instrument.

Impact de la prise en compte de l'instrument et de l'atmosphère

Le MES inverse appliqué sur le domaine du LWIR produit un nuage de points dispersé (cf. Figure 73). L'erreur est liée au fait que les spectres simulés sur ce domaine ont des niveaux plus bas que les spectres de référence mesurés.

Les signatures spectrales restituées dans le MWIR, présentent de fortes discontinuités sur l'intervalle spectral 4,2 – 4,5 μm , causé par la forte bande d'absorption du CO_2 et par la plus

faible du NO_2 (Salvaggio, 2001). Les bandes 4 et 5 de l'instrument AHS-160 ne sont donc pas exploitables. De plus, du fait d'une largeur de bande importante (300 nm) sur ce domaine spectral, le signal est également dégradé pour les bandes 6 et 7. Ainsi, dans le MWIR, le MES est uniquement appliqué sur le signal issu des bandes 1, 2 et 3.

Dans le domaine du MWIR, les erreurs relatives à l'estimation du SMC sont globalement inférieures à 20 %, résultats cohérents avec ceux du MES inverse appliqué sur les spectres de référence dans l'IRT (cf. §II.2.2.3.2). Dans ce domaine, les écarts entre les spectres simulés et de référence sont moins importants que dans le LWIR.

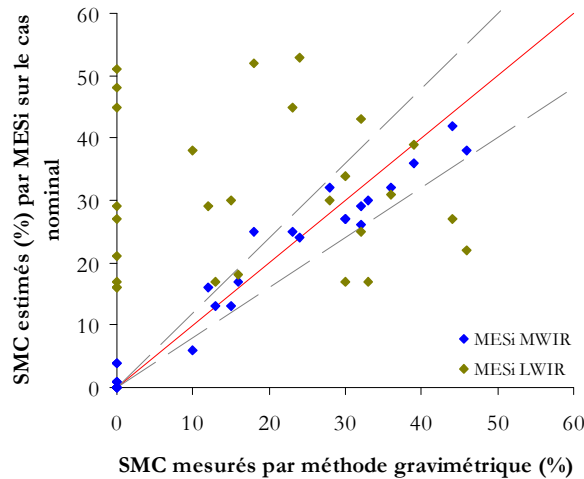


Figure 73 – SMC_g estimés par le MES inverse sur les spectres simulés (cas nominal) en fonction des SMC_g mesurés (méthode gravimétrique) dans les domaines spectraux MWIR et LWIR ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en pointillés représentent les limites d'une erreur relative de 20 %.

Pour conclure, le MES inverse appliqué au domaine du MWIR présente un RMSE inférieur à 3,5 %_g, et est donc adapté à l'évaluation du SMC dans le cas réaliste de la prise en compte d'un instrument aéroporté existant et de l'introduction de l'atmosphère. Cependant, le faible rapport signal sur bruit dans ce domaine spectral particulier est à prendre en considération pour une évaluation plus approfondie des performances de ce critère. Ainsi, le MES inverse sera appliqué uniquement au domaine du MWIR pour la suite de l'analyse.

Impact du contenu intégré en vapeur d'eau de l'atmosphère (s1 à s4)

L'erreur moyenne est de l'ordre de 5 % pour les SMC estimés avec le MES inverse appliqué au MWIR pour les cas de simulation **s1** à **s4**, par rapport au cas **s0** (cf. Figure 74).

Pour des SMC_g supérieurs à 15 %_g, une augmentation du contenu intégré en vapeur d'eau (**s3** et **s4**) a tendance à surestimer les valeurs de SMC et une diminution de ce contenu (**s1** et **s2**) mène à une sous-estimation des valeurs de SMC_g . Au contraire, pour des SMC_g inférieurs à 15 %_g, les valeurs de SMC sont sous-évaluées lorsque le contenu intégré augmente et surévalués lorsqu'il diminue. Les variations des SMC estimés sont causées par les différences de niveaux de réflectances qui apparaissent, par rapport au cas nominal, suivant le cas de simulation considéré. De plus, les résultats sont différents suivant le niveau de SMC car les spectres associés n'ont pas le même comportement sur l'intervalle exploité (3 – 4 μm , cf. §II.1.1.2.3, Figure 27).

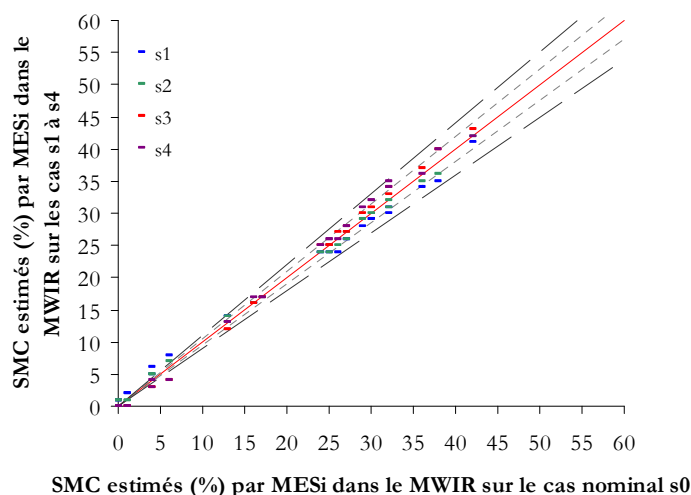


Figure 74 – MES inverse dans le MWIR : SMC_g estimés pour les cas $s1$ à $s4$ en fonction des SMC_g estimés pour le cas nominal (cas $s0$) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %.

Impact des défauts d'étalonnage ($s5$ et $s6$)

L'incertitude relative à l'étalonnage absolu a plus d'impact que celle de l'étalonnage inter-bande sur les performances du MES inverse appliqué au MWIR (résultat cohérent avec celui du domaine réflectif) (cf. Figure 75). L'erreur moyenne sur l'estimation du SMC est de 13 % pour l'étalonnage absolu et de 9 % pour l'étalonnage inter-bande.

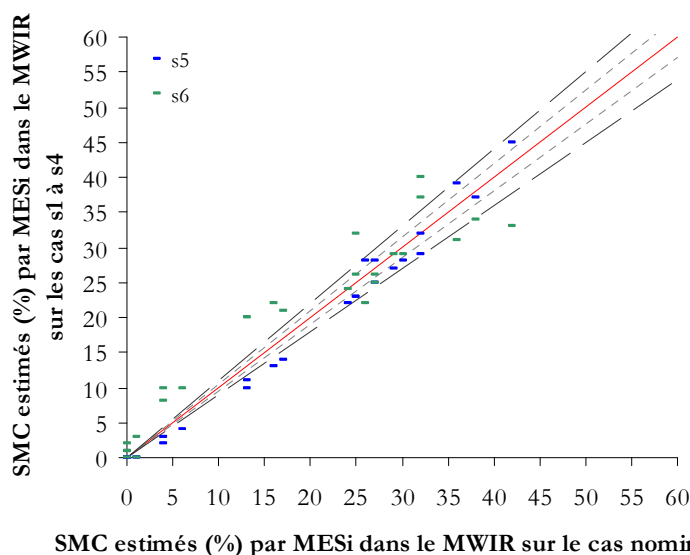


Figure 75 – MES inverse dans le MWIR : SMC_g estimés pour les cas $s5$ et $s6$ en fonction des SMC_g estimés pour le cas nominal (cas $s0$) ; la bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en petits et grands pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 5 % et 10 %.

III.1.3. Synthèse

Les performances et les sensibilités des critères d'ALOHA ont été évaluées par domaine spectral au moyen du simulateur end-to-end.

L'étude relative à la simulation d'un cas réaliste (appelé cas nominal) basé sur la modélisation d'un instrument aéroporté existant (HyMap ou AHS-160) et la prise en compte de l'atmosphère a permis de déterminer les critères les plus performants par type de méthode (localisée et globale) et par domaine spectral.

Dans le domaine réflectif, les erreurs liées à la prise en compte de l'instrument et de l'atmosphère sont inférieures à 10 %, et les critères les plus performants sont : les indices NINSOL et NINSON ($RMSE$ de 6,5 %) et le MES inverse ($RMSE$ de 3 %).

Dans le domaine IRT, pour évaluer les performances des indices NIMSOL et NIMSON sur des données acquises par un instrument hyperspectral, il est nécessaire que l'écart entre les longueurs d'onde optimales et instrumentales soit inférieur à 30 nm, et que la largeur de bande spectrale soit inférieure à 50 nm. La configuration de AHS-160 étant très éloignée de ces conditions, ces indices et le critère aire sous l'EC n'ont pu être appliqués. Finalement, seul le MES inverse appliqué sur le domaine spectral du MWIR est retenu ($RMSE$ de 3,5 %). Les SMC estimés avec ce critère n'ont pu être comparés qu'à ceux mesurés en laboratoire, puisque le MES inverse était appliqué aux propriétés optiques de référence sur le domaine IRT. Toutefois, l'erreur d'estimation du SMC est globalement inférieure à 20 %, résultat similaire à celui obtenu à partir des spectres de référence sur l'IRT. On peut ainsi considérer que la source d'erreur liée à la prise en compte de l'instrument et de l'atmosphère, impacte faiblement les performances du MES inverse (une erreur inférieure à 10 % peut être considéré comme dans le domaine réflectif).

L'étude de sensibilité à différents paramètres identifiés comme influents (à savoir le contenu intégré en vapeur d'eau atmosphérique et les défauts d'étalonnages inter-bande et absolu) conduit aux résultats suivants :

- quels que soient le critère et l'erreur considérés, les impacts sont plus importants pour des SMC_g inférieurs à 15 % ;
- méthodes localisées :
 - l'impact le plus important est lié à l'erreur d'étalonnage inter-bande ;
 - quelle que soit la source d'erreur, NSMI est l'indice le moins robuste ;
 - WISOIL, NINSOL et NINSON sont peu impactés par la variation du contenu intégré en vapeur d'eau et par une erreur d'étalonnage absolu.
- méthodes globales :
 - l'aire sous l'EC est le critère le moins robuste à la variation du contenu en vapeur d'eau et à une erreur d'étalonnage inter-bande ;
 - dans le réflectif, le MES inverse est seulement impacté par une erreur d'étalonnage absolu ;
 - le MES inverse est moins performant dans le domaine du MWIR.

Dans le domaine réflectif, ces résultats vont être vérifiés dans le cadre de l'évaluation des performances de ces critères sur des données acquises par l'instrument HyMap (cf. §III.2).

A défaut de mesures réelles acquises sur le domaine IRT, les résultats qui y sont associés ne peuvent actuellement être confirmés.

Chapitre 2

Evaluation des performances d'ALOHA sur des données acquises dans le domaine réflectif

L'objet de ce dernier chapitre est d'évaluer, dans le domaine réflectif, les performances des critères d'estimation du contenu en eau (ALOHA, cf. §II.2.3) appliqués sur des données de réflectance réelles.

Dans le cadre des travaux du PRF ENVIRO (cf. Introduction), une campagne d'opportunité (HyEurope 2009) organisée par l'ONERA avec les moyens du DLR a été réalisée en août 2009, et a permis l'acquisition d'images hyperspectrales aéroportées sur des régions du Sud-Est de la France. Simultanément, des mesures terrain (réflectances spectrales et humidités de surface) ont été réalisées sur une zone de sol nu. Afin d'exploiter les données acquises pour l'évaluation des critères, des prétraitements comprenant une correction atmosphérique sont nécessaires.

Les campagnes d'acquisition des images aéroportées et de mesures terrain sont tout d'abord décrites. Ensuite, les performances de chaque critère d'ALOHA sont évaluées par comparaison statistique aux mesures terrain. Enfin, une analyse des sources d'erreur prépondérantes et de leur impact sur les performances des différents critères est réalisée.

III.2.1. Description des campagnes aéroportée et terrain

La campagne aéroportée HyEurope 2009, gérée par le DLR (centre aérospatial Allemand, *www.dlr.de*) en collaboration avec HyVista Corporation (*www.hyvista.com*), a permis d'acquérir sur des zones d'Europe des images hyperspectrales avec l'instrument aéroporté HyMap couvrant le domaine spectral réflectif 0,4 – 2,5 μm . Cette campagne et les données associées exploitées sont tout d'abord décrites. Ensuite, la campagne de mesures terrain adaptée à notre besoin est présentée.

III.2.1.1. Campagne aéroportée avec l'instrument HyMap

Les secteurs couverts lors de la campagne HyEurope 2009, et notamment ceux levés dans le cadre du PRF ENVIRO, sont tout d'abord décrits. Ensuite, l'instrument hyperspectral HyMap est présenté avant de décrire les caractéristiques des données acquises.

III.2.1.1.1. Secteurs couverts par HyEurope 2009

La campagne HyEurope 2009 s'est déroulée au cours de l'été 2009 dans plusieurs pays européens (Allemagne, Espagne, France, République Tchèque et Turquie).

Dans le cadre du PRF ENVIRO, les images acquises sur des régions du Sud-Est de la France le 11 août 2009 sont exploitées. Le secteur de Garons (cf. Figure 76) est celui retenu pour déployer la collecte d'informations terrain adaptées aux objectifs du PRF ENVIRO et de nos travaux, car il s'agit d'une zone agricole composée de cultures et de sols nus.

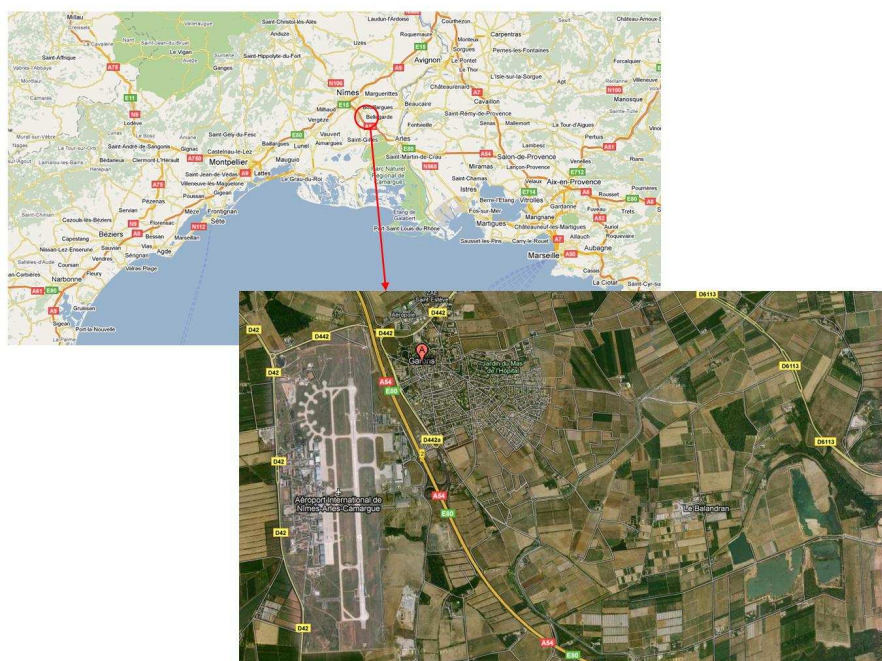


Figure 76 – Secteur de Garons où se situe la zone de collecte d'informations terrain.

III.2.1.1.2. L'instrument HyMap et les données hyperspectrales

Le spectromètre imageur HyMap acquiert des images par technologie *whiskbroom* (cf. §I.1.2.2), c'est-à-dire par rotation d'un miroir mobile. Le signal collecté est dispersé sur quatre spectromètres produisant chacun 32 bandes spectrales avec une résolution spectrale de l'ordre de 15 nm. Ses principales caractéristiques techniques sont détaillées dans le Tableau 30.

Caractéristiques spectrales de HyMap		
Couverture spectrale		0,4 – 2,5 μm (128 bandes)
Résolution spectrale		15 à 20 nm
<i>Module</i>	<i>Couverture spectrale</i>	<i>Largeur à mi-hauteur</i>
VIS	0,45 – 0,89 μm	15 nm
NIR	0,89 – 1,35 μm	15 nm
SWIR1	1,4 – 1,8 μm	13 nm
SWIR2	1,95 – 2,48 μm	17 nm
Caractéristiques spatiales de HyMap		
Nombre de pixels		512 x nombre de lignes
Champ de vue instantané (IFOV)		2,5 mrad (horizontal) 2 mrad (vertical)
Champ de vue (FOV)		61,3 degrés
Fauchée		2,3 km

Tableau 30 – Caractéristiques de l'imageur hyperspectral HyMap, d'après Cocks (1998) et Weide (2010).

Sur le secteur de Garons, les images ont été acquises vers 11h TU à une altitude de 2126 m correspondant à une résolution spatiale de 4 m. Le DLR fournit les données étalonnées (Weide, 2010) en luminance en entrée instrument ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$) dans 125 bandes spectrales.

Pour nos travaux, les luminances sont converties en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$.

III.2.1.2. Campagne de mesures terrain

Simultanément aux acquisitions aéroportées, des mesures de réflectances spectrales et d'humidité du sol ont été effectuées sur deux zones adjacentes de sols nus labourées.

III.2.1.2.1. Description des zones de mesures

La première zone, dénommée *parcelle n°1*, présente une forte rugosité et une surface relativement sèche (cf. Figure 77, à gauche). La seconde, dénommée *parcelle n°2*, est humidifiée par la présence d'un système d'irrigation et présente une rugosité plus faible que celle de la première zone (cf. Figure 77, à droite). On peut noter sur ces images la forte rugosité de la surface mais aucune information chiffrée précise de cette rugosité n'est disponible.



Figure 77 – Zones de la campagne de mesures terrain sur le secteur de Garons, parcelle n°1 non irriguée (à gauche) et parcelle n°2 irriguée (à droite).

Chaque parcelle est une surface délimitée par une taille de $30 \times 30 \text{ m}^2$, correspondant à une zone couverte par au moins 60 pixels de l'image hyperspectrale.

Sur chaque parcelle, des mesures sont régulièrement effectuées, selon le protocole donné en Figure 78 afin de pouvoir caractériser la variabilité spatiale de l'humidité de surface.

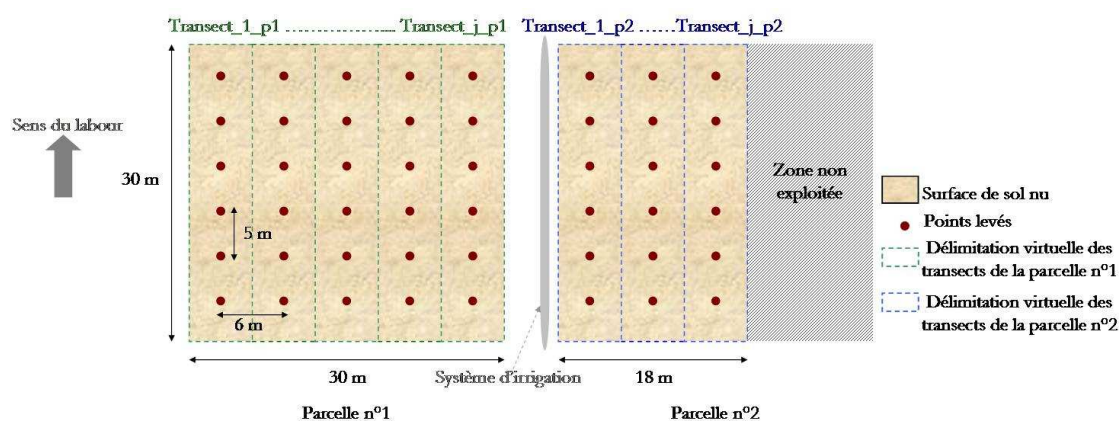


Figure 78 – Description du protocole de mesures pour chaque parcelle (le schéma n'est pas à l'échelle). Notation introduite : $\text{Transect}_{j_pk} = \text{Transect}_{n^{\circ}j}$ pour la Parcelle $n^{\circ}k$.

Chaque point de mesure (cf. Figure 78, point rouge), localisé par une position GPS (Global Positioning System), correspond à une mesure de contenu en eau et à plusieurs acquisitions de signatures spectrales.

Finalement, sur la parcelle n°1, trente points de mesures ont été recueillis. Pour la parcelle n°2, le plan de mesure initialement défini n'a pu être respecté en raison d'une panne de matériel. Seulement dix-huit points de mesures d'humidité ont pu être levés (soit trois transects), et douze points de mesures de signatures spectrales ont pu être acquis (soit deux transects).

III.2.1.2.2. Acquisition des mesures terrain

Les mesures de contenu en eau correspondent à des SMC volumiques ($\% \text{ v}$) acquis au moyen d'une sonde diélectrique TDR du type *Trime FM* (cf. §I.2.1.1). Cette sonde est composée de deux broches, espacées de 2 cm, dont la longueur permet d'effectuer des mesures intégrées sur une profondeur de sol de 5 cm.

Les réflectances directionnelles-hémisphériques sont acquises avec un spectroradiomètre portable de marque ASD FieldSpec pro (instrument identique à celui utilisé pour les acquisitions en laboratoire, cf. §II.1). Le spectromètre est étalonné sur le terrain au moyen d’un spectralon dont la réflectance est de 99 %. Les acquisitions s’effectuent avec une fibre optique, dont le FOV est de 25°, positionnée à une hauteur moyenne de 1 m. Ainsi, la zone visée en nadir a pour diamètre moyen 45 cm.

Pour tenir compte de la variabilité spatiale et de la rugosité de la zone du point levé, la réflectance est mesurée plusieurs fois. La signature spectrale est ainsi acquise une dizaine de fois en effectuant des rotations autour de la zone visée.

Les mesures terrain ont été effectuées 1h30 environ après les acquisitions avec l’instrument HyMap, soit aux environs de 12h30 TU.

III.2.1.2.3. Analyse des mesures terrain

Le jeu de données en termes de contenu en eau (SMC) et signature spectrale acquis sur les deux parcelles est analysé dans ce paragraphe.

Contenu en eau des sols (SMC)

Le détail des mesures de SMC est donné en Annexe VII. Les valeurs moyennes, minimales et maximales ainsi que les écart-types sont présentés dans le Tableau 31 par transect afin d’étudier la variabilité spatiale intra-parcellaire du SMC. De plus, la répartition spatiale du SMC est représentée pour les deux parcelles sur la Figure 79. Cette représentation est obtenue par une méthode d’interpolation du plus proche voisin.

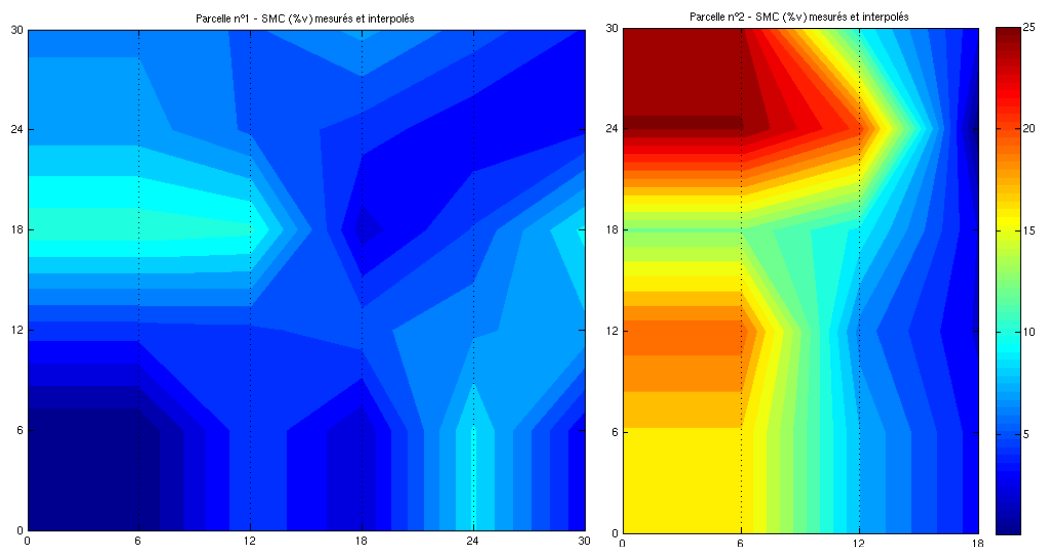


Figure 79 – SMC_v (%_v) mesurés et interpolés sur les parcelles n°1 (à gauche) et n°2 (à droite). Les abscisses et ordonnées représentent les dimensions spatiales des parcelles (en mètres) et les tracés en pointillés représentent les limites des transects.

Sur la parcelle n°1 (cf. Tableau 31), les valeurs moyennes de SMC de chaque transect sont du même ordre de grandeur (entre 5 et 6 %_v). Le premier transect (Transect_1_p1) présente l'écart-type le plus élevé (3,7 %_v), car la valeur du premier point levé est inférieure à 1 %_v, alors que celle acquise à 18 m environ, est de l'ordre de 10 %_v (cf. Figure 79, à gauche). Transect_2_p1 présente une variabilité spatiale proche de celle du premier transect, avec la zone la plus humide située au-delà de 15 m environ et caractérisée par une valeur maximale du contenu en eau de l'ordre de 10 %_v. La valeur minimale de SMC de ce transect est plus élevée (4,6 %_v) que celle de Transect_1_p1, ce qui implique un écart-type plus faible. Le troisième transect est la zone où la valeur moyenne de SMC est la plus faible (4,5 %_v) car la valeur maximale de contenu en eau mesuré n'atteint pas les 8 %_v. Les quatrième et cinquième transects présentent des valeurs de SMC quasi-identiques, et une répartition spatiale contraire au premier et au second transects : les zones les plus humides se situent entre 0 et 15 m, et au-delà les surfaces s'assèchent.

Finalement, la parcelle n°1 semble divisée en trois zones (cf. Figure 79, à gauche) :

- Transect_1_p1 et Transect_2_p1 : SMC_v supérieurs à 5 %_v en haut de la zone ;
- Transect_3_p1 : SMC_v de l'ordre de 5 %_v le long du transect ;
- Transect_4_p1 et Transect_5_p1 : SMC_v supérieurs à 5 %_v en bas de la zone.

Sur la parcelle n°2 (cf. Tableau 31), les valeurs moyennes de contenu en eau sont très différentes sur les trois transects considérés. Les valeurs de SMC les plus élevées se situent sur le Transect_1_p2, avec une valeur moyenne de l'ordre de 20 %_v et des contenus en eau supérieurs à 12,8 %_v. Ce résultat est lié au fait que ce transect est placé à côté du système d'irrigation. Le second transect présente des valeurs moyennes deux fois moins élevées que celle du premier (10 %_v), car la valeur minimale atteinte est de l'ordre de 6 %_v. Pour ce second transect l'écart-type est le plus important. Enfin, le dernier transect (Transect_3_p2) le plus éloigné du système d'irrigation, est une zone où les SMC mesurés ne dépassent pas 4 %_v.

La parcelle n°2 est également divisée en trois zones (cf. Figure 79, à droite) :

- Transect_1_p2 : SMC_v les plus élevés (supérieurs à 12 %_v) ;
- Transect_2_p2 : SMC_v intermédiaires (6 %_v < SMC_v < 20 %_v) ;
- Transect_3_p2 : SMC_v les plus faibles (inférieurs à 4 %_v).

Par la suite l'analyse sera effectuée par transect, et au niveau global de chaque parcelle.

SMC_v en %_v	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
Transect_1_p1	5,4	3,7	0,06	10,7
Transect_2_p1	6	2,2	4,6	10,3
Transect_3_p1	4,5	2	2,1	7,3
Transect_4_p1	5,9	2	3,2	9,1
Transect_5_p1	5,7	2,5	3,1	9,3
Transect_1_p2	20,4	4,9	12,8	25,1
Transect_2_p2	10,1	5,4	5,9	20,6
Transect_3_p2	2,1	1,5	0,1	3,4

Tableau 31 – Valeurs moyennes, minimales et maximales, et écart-types des SMC_v (%_v) mesurés sur les transects des parcelles n°1 et n°2.

Signatures spectrales

Les signatures spectrales moyennes acquises sur les différents transects sont représentées sur la Figure 80. Afin de limiter le bruit important autour de $1,4\ \mu\text{m}$, $1,9\ \mu\text{m}$ et $2,1\ \mu\text{m}$ due à l’absorption atmosphérique, une correction basée sur une interpolation (Dorigo, 2006), est appliquée.

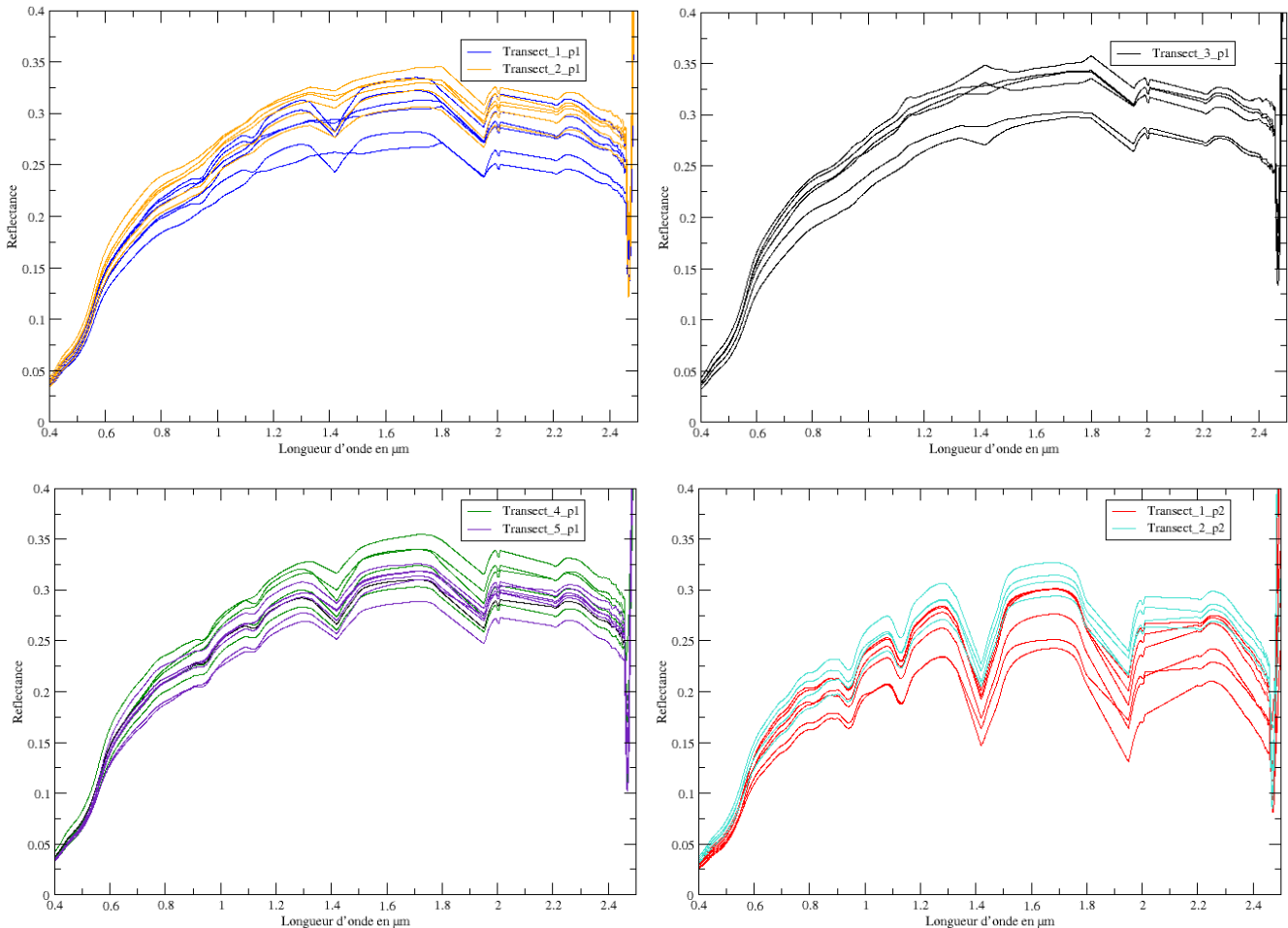


Figure 80 – Réflectances spectrales acquises sur la parcelle n°1 (à gauche) et la parcelle n°2 (à droite).

Les réflectances spectrales acquises sur le deuxième transect de la parcelle n°1 (Transect_2_p1, cf. Figure 80, en haut à gauche) sont globalement plus élevées que celle du Transect_1_p1, avec des bandes d’absorption de l’eau ($0,97\ \mu\text{m}$; $1,2\ \mu\text{m}$; $1,4\ \mu\text{m}$ et $1,9\ \mu\text{m}$) moins marquées. Cette différence de comportement est cohérente avec le fait que les points le long du second transect ont un contenu en eau moins élevé que celui du premier transect (cf. §II.1.1.2).

Pour le troisième transect de la parcelle n°1 (cf. Figure 80, en haut à droite), en moyenne les niveaux de réflectances spectrales se situent entre les réflectances spectrales minimales du Transect_1_p1 et maximales du Transect_2_p1. Ce résultat corrobore le fait que les contenus en eau mesurés sur ce transect correspondent à des valeurs de SMC intermédiaires.

Enfin, les spectres mesurés sur les Transect_4_p1 et Transect_5_p1 (cf. Figure 80, en bas à gauche), présentent en moyenne des niveaux de réflectances identiques. Ces niveaux sont proches de ceux obtenus pour les deux premiers transects. Ce constat est également cohérent avec les résultats de l'analyse des contenus en eau.

Sur la parcelle n°2, (cf. Figure 80, en bas à droite) les spectres dont les niveaux sont les plus bas et où les bandes d'absorption de l'eau sont les plus prononcées, correspondent au premier transect. Ce résultat est en accord avec les niveaux de SMC mesurés au sol.

Globalement, tous les spectres de la parcelle n°2 présentent des niveaux plus faibles que ceux de la parcelle n°1. Les bandes d'absorption de l'eau étant plus marquées pour la parcelle n°2, ce résultat confirme que le contenu en eau des sols de la parcelle n°2 est bien plus élevé que celui mesuré sur la parcelle n°1.

Les spectres mesurés sur le terrain ont des comportements spectraux proches de spectres mesurés en laboratoire des *classe4* et *classe5* dans le domaine spectral réflectif (cf. §II.1.1.2.2). L'information spectrale du domaine IRT étant inconnue, ces deux classes de sols sont considérés par la suite pour l'application du critère MES inverse.

III.2.2. Estimation du contenu en eau des sols à partir des données hyperspectrales acquises

Afin d'analyser les résultats d'estimation du contenu en eau au niveau des zones de mesures terrain, il convient d'extraire les informations des données hyperspectrales (réflectances spectrales et contenus en eau des sols) concernant uniquement les parcelles n°1 et n°2. Pour cela, un prétraitement des images hyperspectrales consistant en l'extraction des zones d'intérêt et en leur correction atmosphérique est effectué afin d'obtenir l'hypercube de réflectance pour chaque parcelle.

Ensuite, les critères d'estimation de l'humidité de surface sont appliqués sur ces hypercubes pour générer des cartes de contenu en eau. Ces dernières sont analysées pour évaluer les performances d'ALOHA et fournir un bilan d'erreur.

III.2.2.1. Prétraitement des données hyperspectrales

Les prétraitements réalisés ont pour but de sélectionner les zones de l'image correspondant aux zones mesurées sur le terrain, et d'effectuer les corrections atmosphériques.

La zone de sol nu sur laquelle se situent les parcelles est représentée sur la Figure 81. L'hypercube correspondant à la zone traitée est de taille 55 pixels x 55 pixels.

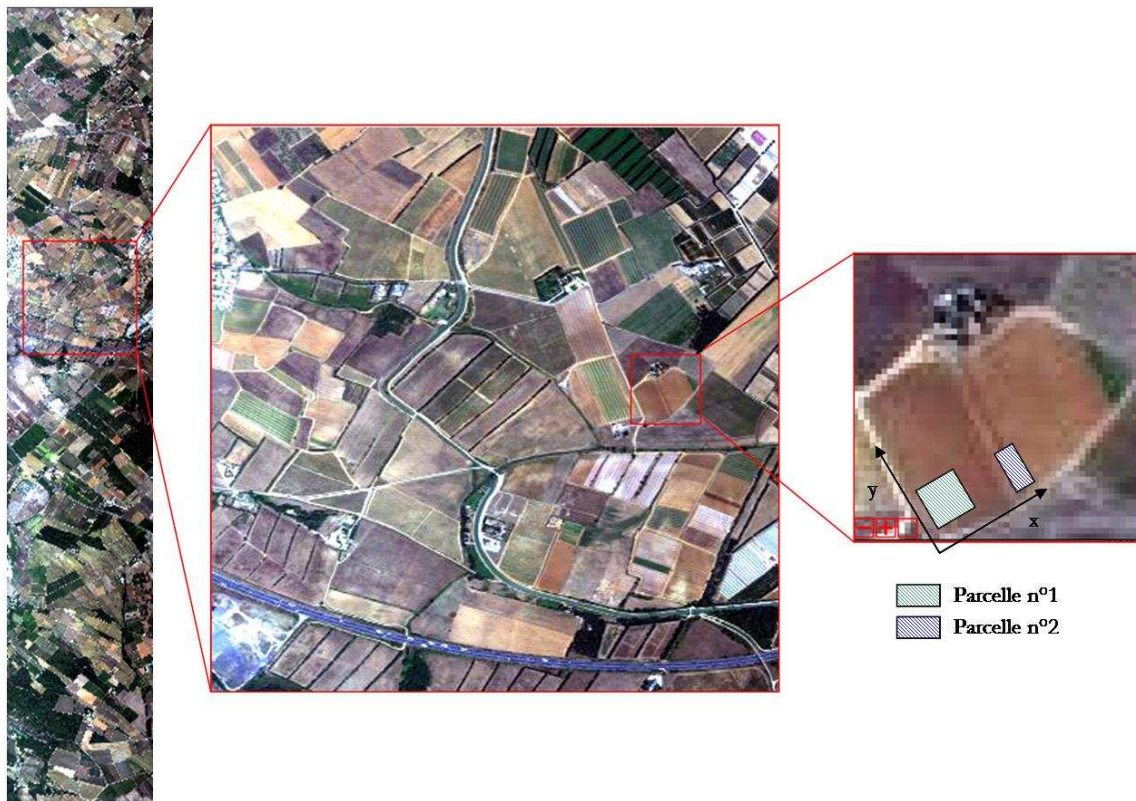


Figure 81 – Localisation des parcelles n°1 et n°2 (représentation faite avec le logiciel ENVI, www.itvvis.com). Les directions x et y représentent respectivement le sens d'acquisition des transects et le sens du labour.

III.2.2.1.1. Extraction des zones d'intérêt

Les hypercubes de luminances fournis par le DLR n'étant pas géoréférencés, les transects sont localisés visuellement sur l'image. L'utilitaire de définition de région d'intérêt (ROI) du logiciel ENVI est exploité pour couvrir les transects. Ainsi, huit ROI (cinq pour la parcelle n°1 et trois pour la parcelle n°2) constituées de 11 pixels sont définies (cf. Figure 82).

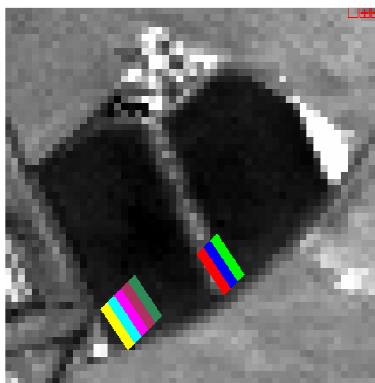


Figure 82 – ROI associées aux transects de la parcelle n°1 (jaune à bleu-vert) et de la parcelle n°2 (rouge à vert).

III.2.2.1.2. Comparaison des réflectances terrain et estimées à partir des images hyperspectrales

La correction atmosphérique des hypercubes est effectuée au moyen du module décrit dans le §III.1.1, et d'une interpolation sur les bandes spectrales 1,4 μm et 1,9 μm (cf. §III.1.2).

Afin de valider les spectres extraits, une analyse statistique basée sur les ROI est mise en œuvre. Les valeurs estimées de réflectances spectrales minimale, maximale, moyenne et moyenne plus ou moins l'écart-type, de chaque transect, sont alors comparées à celles mesurées sur le terrain (cf. Figure 83). Du fait d'un rapport signal sur bruit du spectroradiomètre ASD faible entre 2 μm et 2,2 μm , les réflectances spectrales ont été interpolées sur ce domaine et ne sont donc pas représentatives (Dorigo, 2006).

Pour la parcelle n°1, deux transects (Transect1_p1 et Transect5_p1) sont choisis arbitrairement pour l'illustration (cf. Figure 83, en haut et au milieu), sachant que des conclusions similaires peuvent être tirées pour les autres transects. Les signatures spectrales terrain et estimées présentent une évolution similaire, notamment pour Transect5_p1 avec les pics d'absorption caractéristiques (cf. §II.1.2). Les niveaux de réflectance différent et en règle générale sont moins élevés pour les spectres estimés. De plus, les bandes d'absorption à 1,4 μm sur les signatures spectrales estimées sont plus marquées.

Pour la parcelle n°2 (cf. Figure 83, en bas), seule les signatures spectrales du premier transect sont illustrées. Des similarités existent entre les signatures spectrales terrain et estimées : le comportement et la présence et la profondeur des bandes d'absorption de l'eau situées à 1,4 μm et 1,9 μm . Par ailleurs, les spectres estimés sont toujours moins élevés que ceux des mesures terrain et des différences apparaissent au niveau des bandes d'absorption situées à 0,9 μm et 1,1 μm . Enfin, pour chaque statistique, les écarts entre les deux modes d'acquisitions sont plus faibles que ceux observés sur la parcelle n°1.

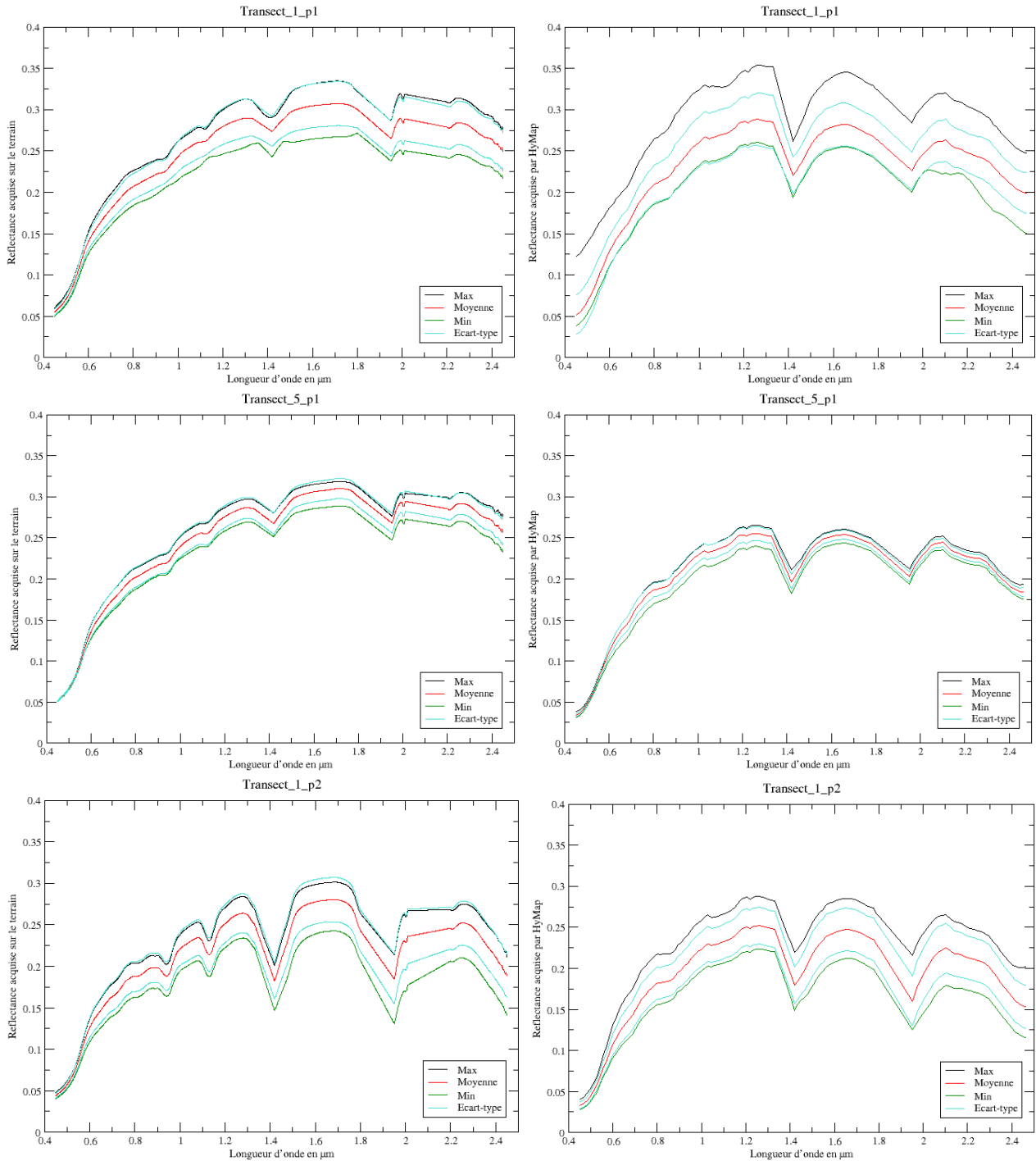


Figure 83 – Valeurs spectrales minimales, maximales, moyennes et moyennes plus ou moins l'écart-types, évaluées à partir des mesures terrain (à gauche) et de l'hypercube (à droite) pour deux transects de la parcelle n°1 et un transect de la parcelle n°2.

Toutes les différences observées entre les spectres terrain et estimés ont plusieurs origines :

- la rugosité de la surface a tendance à diminuer les niveaux de réflectances (cf. §II.1.1). En effet, l'imageur HyMap mesure des flux sur des surfaces plus importantes (résolution spatiale est de 4 m) que celles acquises avec le spectroradiomètre ASD (résolution spatiale de 45 cm). Etant donné la présence de fortes rugosités sur les parcelles dues au labour, son impact est à considérer ;

- la configuration géométrique d'acquisition modifie également les niveaux de réflectances. En effet, même si les deux acquisitions sont effectuées en visée nadir, la position du soleil n'est pas identique car les mesures ne sont pas simultanées (1h30 de décalage). Les ombrages et les effets directionnels sont donc différents ;
- le décalage temporel entre les deux acquisitions peut conduire à un assèchement de la couche superficielle du sol (Duchaufour, 2001) ;
- la correction atmosphérique est de moins bonne qualité au niveau des bandes d'absorption de vapeur d'eau atmosphérique (0,9 μm , 1,1 μm , 1,4 μm et 1,9 μm).

La différence de résolution spectrale entre les deux instruments a été analysée. Pour cela, les spectres issus de l'ASD ont été rééchantillonnés à la résolution spectrale de l'instrument HyMap. L'écart entre les spectres ASD aux deux résolutions est en moyenne de 5 %.

III.2.2.2. Analyse des contenus en eau des sols estimés

Les critères d'ALOHA appliqués sur les spectres de réflectances permettent de déterminer des cartes de contenu en eau gravimétrique ($\%_g$), qui sont présentées dans un premier paragraphe. Avant d'être comparées aux données terrain, ces cartes sont converties en contenus en eau volumiques ($\%_v$).

III.2.2.2.1. Cartes de contenus en eau des sols gravimétriques

Les cartes de SMC gravimétriques obtenues sur les parcelles n°1 et n°2 sont représentées sur la Figure 84. Pour tous les critères, la variabilité spatiale des cartes est cohérente avec celle des mesures terrain, les SMC les plus élevés correspondants à la zone fortement irriguée.

L'aire sous l'enveloppe convexe fournit une carte de la parcelle n°1 (cf. Figure 84, parcelle de gauche) relativement homogène avec des niveaux de SMC_g variant entre 7 et 11 $\%_g$. La parcelle n°2 (cf. Figure 84, parcelle de droite) présente des SMC_g plus élevés (supérieur à 15 $\%_g$) au niveau des deux premiers transects, puis des SMC_g équivalents à la parcelle n°1 pour le troisième transect.

Pour la parcelle n°1, les indices NSMI, NINSOL et NINSON produisent des cartes relativement homogènes où le contenu en eau est inférieur à 5 $\%_g$. L'indice WISOIL génère une carte de SMC_g avec des valeurs beaucoup plus élevées (entre 9 et 17 $\%_g$), et notamment sur la parcelle n°2 avec SMC_g supérieurs à 20 $\%_g$ près du système d'irrigation. Seul l'indice NSMI produit une carte où les niveaux de SMC_g sont faibles même à proximité du système d'irrigation.

Concernant le critère MES inverse, les cartes obtenues avec les **classe4** et **classe5** (cf. §III.2.1.2.2) sont assez similaires (cf. Figure 84, MESi4 et MESi5) en terme de répartition spatiale du SMC. La carte associée à la **classe5** présente en moyenne des valeurs de SMC_g plus élevées que celle de la **classe4** (variation entre 10 et 20 $\%_g$ pour la **classe 5** et entre 6 et 15 $\%_g$ pour la **classe 4** en excluant la zone irriguée).

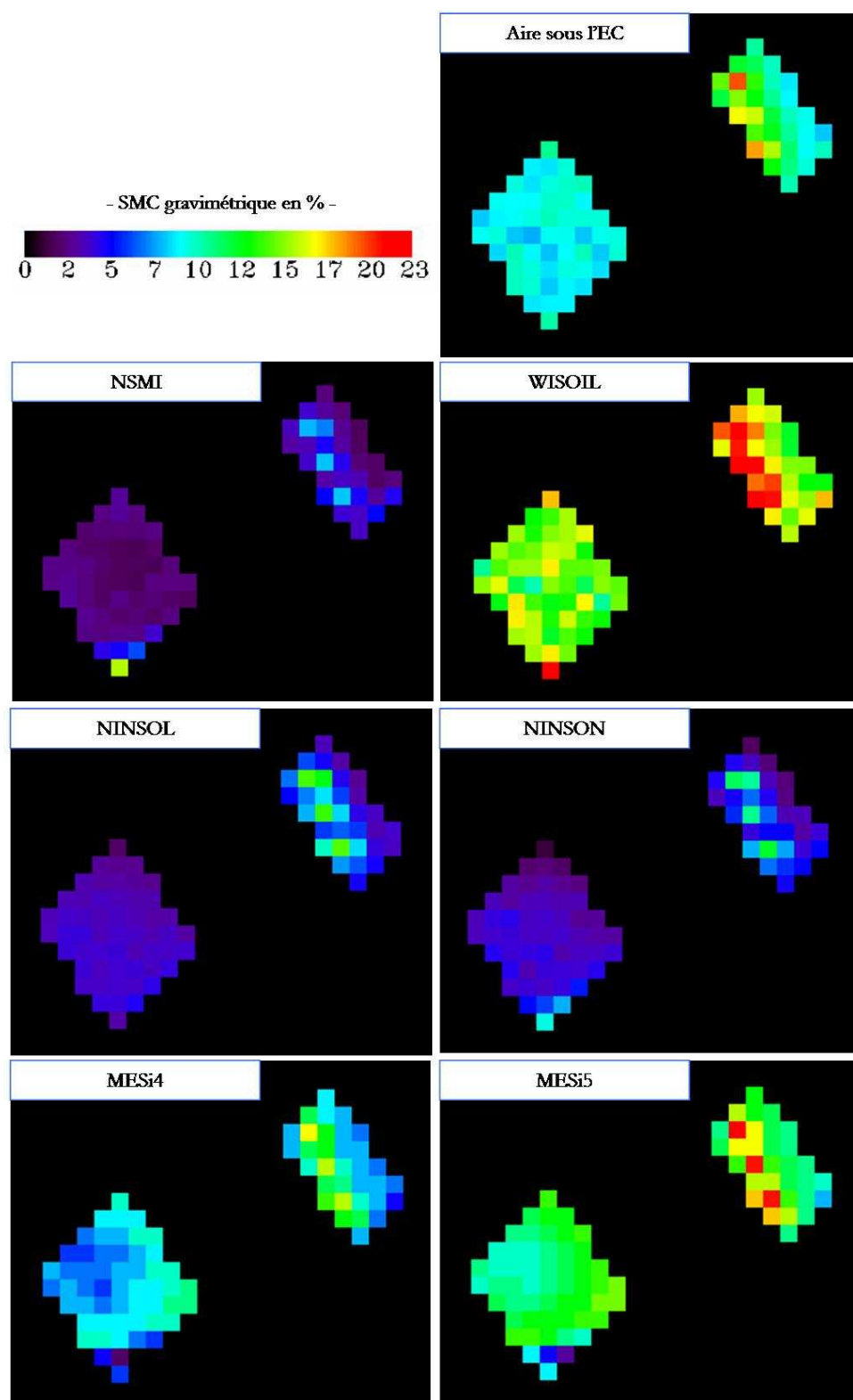


Figure 84 – Cartes de contenus en eau de sols (gravimétriques) obtenues avec ALOHA, sur les parcelles n°1 (parcelle de gauche) et n°2 (parcelle de droite).

III.2.2.2.2. Conversion des cartes de contenu en eau des sols

Afin de comparer les résultats obtenus avec les mesures terrain, il est d'abord nécessaire de convertir les SMC gravimétriques estimés en SMC volumiques, au moyen de l'équation suivante :

$$SMC_v = SMC_g \times d_{sol} \quad (49)$$

où d_{sol} est la densité apparente du sol.

Ne disposant pas du matériel nécessaire pour effectuer la mesure de densité du sol, des renseignements ont été pris auprès de spécialistes et confortés par une recherche bibliographique. D'après la littérature (Gong, 2003 ; Gagnon, 2006), la densité du sol se situe généralement entre $1,1 \text{ g.cm}^{-3}$ et $1,7 \text{ g.cm}^{-3}$. De plus, la sonde diélectrique TDR est calibrée pour cet intervalle de densité. La valeur médiane ($1,4 \text{ g.cm}^{-3}$) est alors retenue pour réaliser cette conversion.

Cependant, le SMC volumique de l'équation 49 ne correspond pas exactement au SMC volumique mesuré sur le terrain. En effet, le SMC_g de l'équation 49, estimé à partir des données hyperspectrales est associé au premier centimètre du sol, alors que le SMC_v acquis sur le terrain correspond à 5 cm de profondeur (cf. §I.2.1.2). Afin de pouvoir comparer les résultats, un facteur correctif dépendant du type de sol considéré, doit être appliqué sur le SMC_g de l'équation 49 (Haubrock, 2008b). Ce qui conduit à considérer l'équation suivante :

$$SMC_v = \frac{SMC_g \times d_{sol}}{\alpha} \quad (50)$$

où α est le facteur de correction.

Haubrock *et al.* (2008b) a proposé un facteur de correction pour les sols de type sableux mais aucune mesure de ce type n'existe pour d'autres types de sol. C'est pourquoi, sa valeur est arbitrairement fixée à 1 dans notre cas. Ce qui revient à faire l'hypothèse du SMC_g , et par conséquent du SMC_v (cf. équation 50), homogène sur la profondeur de mesure.

III.2.2.2.3. Cartes de contenus en eau des sols volumiques

Les valeurs moyennes des SMC volumiques estimés par les différents critères sur chaque transect (parcelles n°1 et n°2) sont comparées aux SMC volumiques moyens mesurés sur le terrain (cf. Figure 85 et Figure 86). Les résultats sont présentés par type de méthode.

Analyse des SMC estimés par méthodes localisées

L'indice WISOIL surestime le SMC quel que soit son niveau (cf. Figure 85). Ceci peut s'expliquer par le fait que les spectres acquis par HyMap ont des bandes d'absorption plus profondes que les spectres terrain associés aux SMC mesurés (cf. Figure 83). Ainsi, la valeur de l'indice WISOIL obtenue sur les spectres estimés est plus faible que celle qui devrait être déduite

des spectres terrain (rapport spectral qui diminue), et par conséquent le SMC estimé est plus élevé (cf. §II.2).

Les indices NSMI, NINSOL et NINSON présentent les erreurs relatives les moins élevées, et globalement inférieures à 20 %, pour des SMC_v compris entre 5 ‰ et 20 ‰. Ce résultat est lié à la concordance observée entre les spectres terrain et estimés autour de la bande d’absorption située à 1,9 μm (exploitée par NSMI) et aux alentours des bandes localisées à 2 μm (exploitées par NINSOL et NINSON). Ces indices ont une tendance générale à sous-estimer le SMC, notamment au-delà de 20 ‰, en raison d’un écart plus faible entre les réflectances aux longueurs d’onde considérées, par rapport à l’écart des réflectances mesurées sur le terrain.

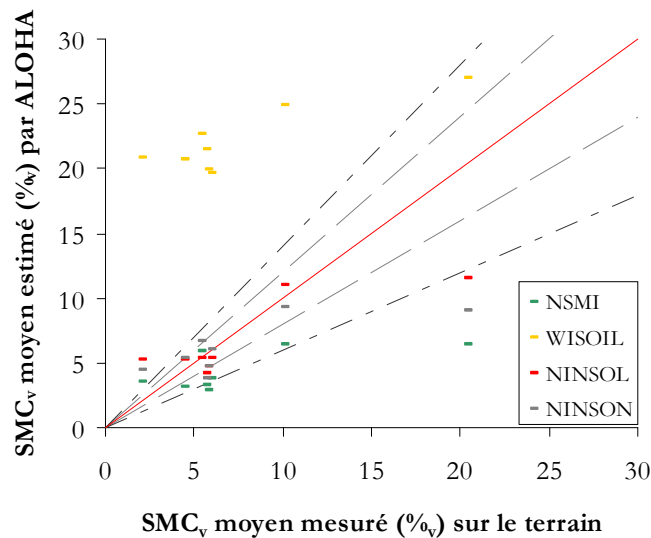


Figure 85 – SMC_v moyen estimé (‰) par ALOHA (méthodes localisées) en fonction de SMC_v moyen (‰) déduit des mesures terrain. La bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en grands et petits pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 20 % et 40 %.

Analyse des SMC estimés par méthodes globales

Les critères aire sous l’EC et le MES inverse surestiment le SMC. Une explication est que les spectres estimés ont des bandes d’absorption plus profondes et des niveaux plus bas que les spectres terrain (cf. Figure 83). Ainsi, on peut déduire que (cf. §II.2) :

- l’aire sous l’EC est plus grande et donc que le SMC estimé est plus élevé ;
- le MES inverse surestime le SMC car les niveaux de réflectances sont plus faibles.

Parmi ces critères, le MES inverse avec *classe4* produit les erreurs relatives les moins importantes (proches de 40 % pour des SMC_v supérieurs à 5 ‰, cf. Figure 86). Nous considérons donc que cette classe de sol est la mieux adaptée pour évaluer le SMC de cette surface de sol nu.

Dans tous les cas, ces critères conduisent aux plus fortes erreurs d’estimation du contenu en eau de sols par rapport aux indices NSMI, NINSOL et NINSON (erreur relative supérieure à 40 %, cf. Figure 86).

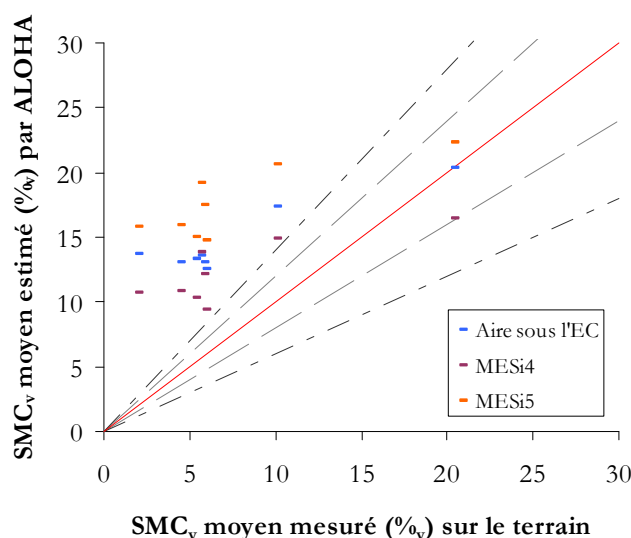


Figure 86 – SMC_v moyen estimé ($\%_v$) par ALOHA (méthodes globales) en fonction de SMC_v moyen ($\%_v$) déduit des mesures terrain. La bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en grands et petits pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 20 % et 40 %.

Synthèse

Les méthodes localisées et globales appliquées sur un sol nu, qui n'a pas été utilisé à l'étalonnage des lois liant le SMC aux critères, ne semblent pas adaptées à l'estimation de SMC de mêmes niveaux. Les résultats mis en évidence sont :

- pour des SMC_p inférieurs à 20 $\%_v$, les critères les plus performants sont NINSOL, NINSON et NSMI ;
- pour des SMC_p supérieurs à 20 $\%_v$, les critères les plus performants sont le MES inverse et l'aire sous l'EC ;
- l'indice WISOIL n'est pas adapté dans les deux cas.

Il doit être pris en considération qu'une seule valeur moyenne, mesurée sur le terrain, de SMC_p supérieure à 20 $\%_v$ est disponible. L'interprétation des résultats au-delà de ce seuil est donc à nuancer.

III.2.2.3. Analyse de l'impact des sources d'erreur identifiées

Les principales sources d'erreur identifiées et analysées sont les suivantes :

- erreur sur les données terrain liée à l'étalonnage de la sonde TDR ;
- erreur liée à un décalage géométrique des ROI en raison du non géoréférencement des données hyperspectrales (cf. §III.2.2.1.1) ;
- erreur liée au défaut instrumental (étalonnages absolu et inter-bande) et à la correction atmosphérique des données hyperspectrales (cf. §III.1.2) ;
- erreur liée à la conversion des SMC gravimétriques estimés en SMC volumiques (cf. §III.2.2.2.2) ;
- erreur liée à l'hypothèse de variabilité du SMC sur une profondeur de sol de 5 cm (cf. §III.2.2.2.2).

Ces sources d'erreur sont celles pour lesquelles des informations sont disponibles pour évaluer leur impact sur chaque critère. D'autres sources d'erreur comme la rugosité existent mais une analyse ne peut être conduite car aucune donnée les caractérisant n'est à notre disposition.

III.2.2.3.1. Erreur liée à l'étalonnage de la sonde

La sonde diélectrique TDR, utilisée pour les acquisitions terrain (cf. §III.2.1.2.2), mesure des SMC volumiques avec une précision relative de $\pm 2\%$. En tenant compte de cette erreur sur les SMC_v moyens mesurés sur le terrain, la variation de l'erreur relative est inférieure à 2% pour les critères adaptés à l'estimation de SMC_v inférieurs à 20%, et inférieure à 5% pour les autres. Ces variations étant très faibles, nous considérons que cette source d'erreur n'influence pas les résultats d'estimation du SMC.

III.2.2.3.2. Erreur liée à un décalage géométrique des ROI

L'erreur entre un pixel repéré sur l'image et le point correspondant sur le terrain est fixée à un pixel (erreur maximum commise lors du repérage des ROI).

Les ROI sont alors décalées de 1 pixel dans les directions horizontale et verticale, et de nouvelles statistiques sont extraites pour chaque critère. Les valeurs moyennes de SMC évaluées au niveau parcellaire sont comparées à celles obtenues avant l'introduction de cette erreur, afin de déterminer pour chaque critère une erreur globale représentative du décalage dans les deux directions pour les deux parcelles.

Le décalage des ROI n'impacte pas de la même manière sur les critères et les parcelles. Sur la parcelle n°1, l'erreur globale sur les valeurs de SMC_v est plus importante pour les indices NSMI et NINSON (de l'ordre de 10%) que pour les critères NINSOL, WISOIL, aire sous l'EC et MES inverse (inférieure à 5%). Quel que soit le critère, l'erreur est toujours plus élevée lors d'un décalage horizontal.

Pour la parcelle n°2, l'erreur globale est plus élevée que celle de la parcelle n°1. Sa valeur est de l'ordre de 15% pour NSMI, NINSON et NINSOL, et inférieure à 10% pour WISOIL, aire sous l'EC et MES inverse.

Dans la direction horizontale, les ROI de la parcelle n°1 sont décalées vers la parcelle n°2, les pixels associés à ces ROI correspondant toujours à une zone sèche (cf. Figure 79). Les ROI de la parcelle n°2 sont décalées vers une zone moins humide (on s'éloigne du système d'irrigation), ce qui engendre un SMC global moins élevé que celui obtenu avec les ROI initiales (cf. Figure 79).

Dans la direction verticale, le SMC n'ayant pas été caractérisé sur le terrain, nous supposons que les niveaux de SMC et la variabilité spatiale sont cohérents du reste de la parcelle sur les 4 mètres situés en dessus, en sachant qu'aucun système d'irrigation n'était présent au Nord des parcelles. Le niveau de SMC est donc du même ordre de grandeur que celui des ROI initiales pour chaque parcelle.

Cette analyse sur le terrain de l'impact des décalages confirme les résultats obtenus, et le fait que les écarts entre les SMC estimés initiaux et les SMC estimés après décalage sont plus importants pour la parcelle n°2.

Pour conclure, l'erreur globale (pour les deux parcelles) est inférieure à 15 % pour NSMI, NINSOL et NINSON, et inférieure à 10 % pour WISOIL, l'aire sous l'EC et MES inverse. Ces valeurs sont dépendantes des zones d'intérêt analysées.

III.2.2.3.3. Erreur liée aux défauts d'étalonnage et à la correction atmosphérique des données hyperspectrales

L'analyse de ces sources d'erreur est effectuée au moyen des résultats issus de l'étude de sensibilité d'ALOHA (cf. §III.1.2). La quantification des erreurs obtenue lors de cette analyse est représentée dans les figures sous la forme de barres d'erreur.

Variation du contenu intégré en vapeur d'eau de l'atmosphère

L'erreur d'évaluation du contenu intégré en vapeur d'eau de l'atmosphère est fixée à $\pm 1 \text{ g.cm}^{-2}$, en considérant que le contenu initial est de $1,5 \text{ g.cm}^{-2}$ (cas **s1** et **s4**, cf. §III.1.2).

Quel que soit le SMC considéré, l'impact de ces variations du contenu en vapeur d'eau est inférieur à 2 % pour le MES inverse et les indices NINSOL, NINSON et WISOIL. Cette erreur est donc considérée comme négligeable pour ces critères.

Pour NSMI et l'aire sous l'EC, les variations du contenu intégré en vapeur d'eau influent sur l'estimation du SMC, et cet impact dépend du niveau de SMC (seuil en terme de SMC_g de 15 ‰). Ces résultats sont représentés sous la forme de barre d'erreur en évaluant le seuil à un SMC_p de l'ordre 20 ‰ pour une densité de sol apparente de $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$ (cf. Figure 87) (une seule valeur au-delà de ce seuil ayant été mesurée sur le terrain). La Figure 87 est identique à la Figure 86 sur laquelle l'erreur issue de l'analyse de sensibilité relative aux cas **s1** et **s4** a été reportée sous la forme de barre d'erreur.

L'erreur d'estimation du contenu en eau atmosphérique a un impact limité sur les performances de l'indice NSMI (de l'ordre de 6 %). Pour le critère aire sous l'EC, cette erreur engendre une modification de ses performances, beaucoup plus significative lorsque le contenu en eau atmosphérique est surestimé. Par conséquent, l'aire sous l'EC est moins robuste à ces erreurs d'évaluation du contenu intégré en vapeur d'eau en comparaison à NSMI.

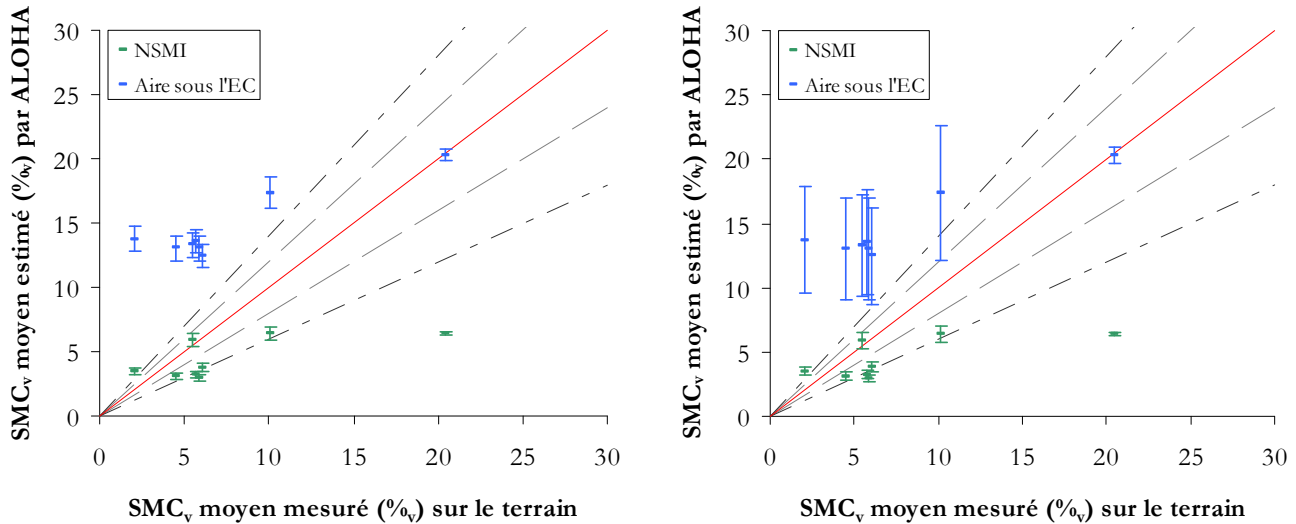


Figure 87 - Critères NSMI et aire sous l'EC : Impact d'une variation du contenu intégré en vapeur d'eau atmosphérique de -1 g.cm^{-2} (à gauche) et de 1 g.cm^{-2} (à droite) sur les SMC_v moyens estimés. La bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en grands et petits pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 20 % et 40 %.

Défauts d'étalonnages inter-bande et absolu

L'erreur d'étalonnage inter-bande est estimée à 3 %, et l'erreur d'étalonnage absolu à 5 % (cas **s5** et **s6**, cf. §III.1.2).

Dans le domaine réflectif, l'erreur d'étalonnage inter-bande (cas **s5**, cf. §III.1.2) impacte sur tous les critères, excepté sur le MES inverse, et son impact dépend du niveau de SMC (seuil en terme de SMC_g de 15 %). Quel que soit le critère, l'impact est négligeable pour les SMC_g supérieurs à ce seuil. Les résultats pour les critères sensibles à ce défaut d'étalonnage sont représentés sous la forme de barres d'erreur (cf. Figure 88, à gauche qui est à considérer identique à la Figure 86 sur laquelle l'erreur issue de l'analyse de sensibilité relative au cas **s5** a été reportée sous la forme de barre d'erreur) en considérant la valeur seuil de SMC_p à 20 %_v. Globalement, cet impact est le plus important pour l'aire sous l'EC et WISOIL, et plus faible pour les autres indices.

L'erreur d'étalonnage absolu (cas **s6**, cf. §III.1.2) dans le domaine réflectif impacte principalement sur les critères issus des méthodes globales (cf. Figure 88, à droite). Son influence est comparable pour les deux critères.

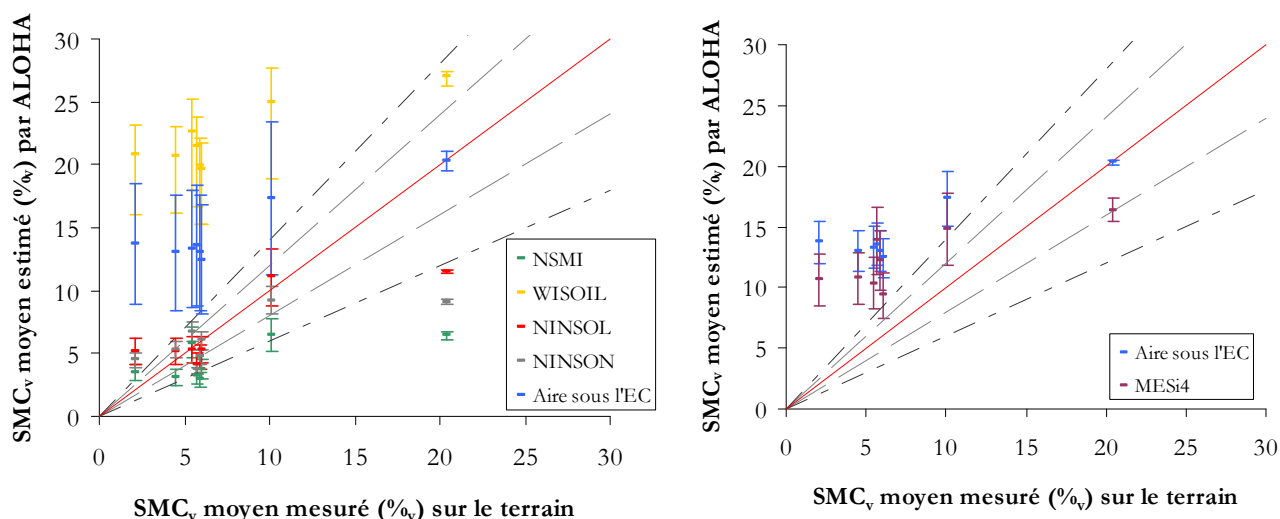


Figure 88 – Impact d'une erreur d'étalonnage inter-bande de 3 % (à gauche) et d'une erreur d'étalonnage absolu de 5 % (à droite) sur les SMC_v moyens estimés. La bissectrice est représentée par la droite rouge, et les droites en grands et petits pointillés représentent respectivement les limites d'une erreur relative de 20 % et 40 %.

III.2.2.3.4. Erreur liée à la densité de sol

Son impact est étudié en modifiant la valeur utilisée pour les conversions des cartes de SMC volumiques. La densité de sol utilisée est celle des deux valeurs limites supportées par la sonde diélectrique : $1,1 \text{ g.cm}^{-3}$ et $1,7 \text{ g.cm}^{-3}$. Les contenus en eau volumiques moyens estimés par HyMap sont alors déterminés avec ces densités de sols. Cela revient à introduire une erreur relative de $\pm 20 \%$ sur la densité du sol conduisant à une erreur sur le SMC_v estimé par chaque critère de $\pm 20 \%$ (cf. équation 49).

Moeys (2007) réalise une synthèse bibliographique concernant la variabilité spatiale de la densité apparente d'un sol. Il met en évidence que la densité apparente est caractérisée par une variabilité spatiale faible à modérée, et que cette variabilité ne semble pas liée à l'échelle spatiale. Elle est à mettre en relation avec la gamme de valeurs restreinte que peut prendre la densité apparente d'un sol cultivable non irrigué. Sous l'hypothèse qu'une population de densités apparentes suit une distribution de probabilité uniforme entre $0,9 \text{ g.cm}^{-3}$ et $1,9 \text{ g.cm}^{-3}$ (rapport de l'ordre de 2 entre les deux valeurs de densité extrêmes), le coefficient de variation (calculé en divisant l'écart-type par la moyenne) est alors proche de 20 % (Moeys, 2007).

Le rapport entre les densités de sols humide et sec peut varier entre $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$ (pour un sable uniforme compacté) et $1,9 \text{ g.cm}^{-3}$ (pour l'argile organique) suivant le type de sol (résultats obtenus à partir de mesures de l'USGS ; Gagnon, 1996).

En prenant en compte cet écart de densité entre un sol sec et humide et l'analyse de Moeys (2007), on peut en déduire que la variabilité spatiale sur la zone analysée, composée d'une parcelle sèche et d'une parcelle ayant été irriguée, ne doit pas être négligée. Pour de futures campagnes de mesures liées à notre problématique, la densité apparente devra donc être caractérisée.

III.2.2.3.5. Erreur liée à la variabilité du SMC sur la profondeur

L'impact de l'erreur sur la variabilité du profil vertical d'humidité est étudié en modifiant la valeur du facteur de correction du SMC volumique (cf. équation 50). Une erreur relative de $\pm 20\%$ est appliquée sur le facteur de correction α (initialement fixé à 1). Cela implique une erreur de $\pm 20\%$ sur les SMC_v estimés par les différents critères.

La redistribution de l'eau après une pluie ou un arrosage est illustrée par les profils hydriques (cf. Figure 89 ; Soltner, 2000). L'eau se déplace vers les taux d'humidité décroissants qui s'explique par la différence de potentiel capillaire entre deux zones d'humidité différentes (cf. Annexe I). Le profil d'humidité vertical du sol dépend de la composition du sol et de sa densité apparente ainsi que du temps écoulé depuis la période d'irrigation et du volume d'eau déversé.

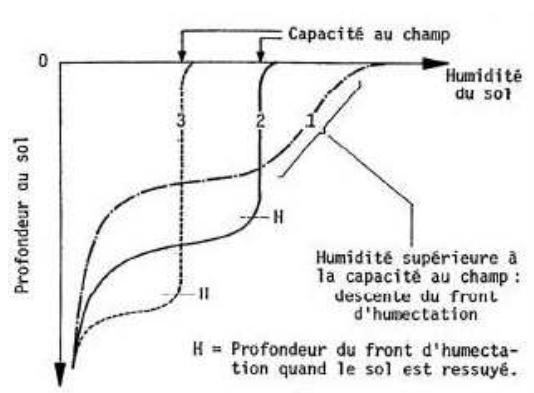


Figure 89 – (1) Profil hydrique sitôt l'arrêt de la pluie ou de l'arrosage ; (2) Profil hydrique après redistribution de l'eau dans un sol argilo-limoneux ; (3) Profil hydrique après redistribution de l'eau dans un sol sablo-limoneux ; H=profondeur du front d'humectation (2 à 5 fois la hauteur d'eau tombée en mm) selon la texture et la structure, d'après Soltner (2000).

Des travaux concernant le profil vertical de l'humidité sur les cinq premiers centimètres de profondeur (Le Morvan, 2008), ont montré que le SMC a une tendance générale à augmenter avec la profondeur. Cette variation dépend du niveau de SMC considéré (cf. Figure 90). Plus le niveau est bas, plus la variation est importante (Le Morvan, 2008).

L'hypothèse d'homogénéité suivant les 5 cm de profondeur sera donc à vérifier au cours d'une prochaine campagne d'acquisition par la mesure du profil vertical d'humidité.

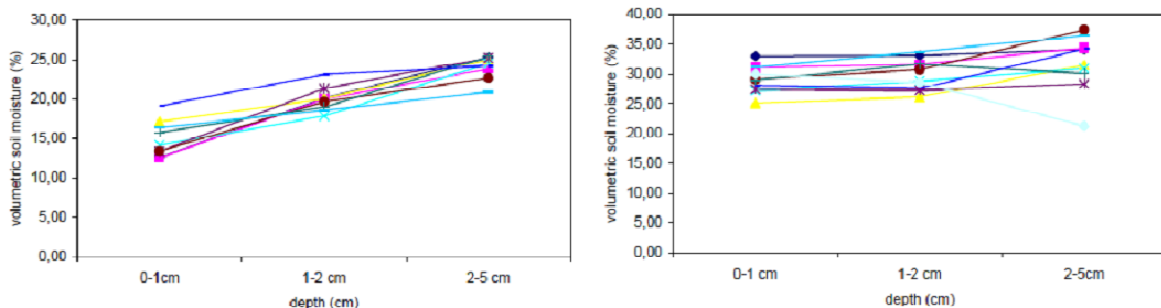


Figure 90 – Variations de l'humidité volumique (%) d'échantillons de sols (60% limon, 30% argile, 10% sable) en fonction de la profondeur, d'après Le Morvan (2008).

III.2.2.3.6. Synthèse

Cette analyse permet de déterminer pour chaque critère, le ou les sources d'erreur qui impactent sur l'estimation du SMC (cf. Tableau 32).

	ΔROI	$\Delta\text{H}_2\text{O}$	$\Delta\lambda$	ΔL	$\Delta\text{d}_{\text{sol}}$	$\Delta\alpha$
NSMI	15 %	6 %	13 %	<2 %	20 %	20 %
WISOIL	10 %	<2 %	6 %	<2 %	20 %	20 %
NINSOL	15 %	<2 %	11 %	<2 %	20 %	20 %
NINSON	15 %	<2 %	7 %	<2 %	20 %	20 %
Aire sous l'EC	10 %	11 %	25 %	10 %	20 %	20 %
MES inverse	10 %	<1 %	<1 %	15 %	20 %	20 %

Tableau 32 – Impact des sources d'erreur identifiées : ΔROI (décalages des ROI) – $\Delta\text{H}_2\text{O}$ (variations du contenu intégré en vapeur d'eau) – $\Delta\lambda$ (erreur d'étalonnage inter-bande) – ΔL (erreur d'étalonnage absolu) – $\Delta\text{d}_{\text{sol}}$ (erreur sur la valeur de densité de sol apparente) – $\Delta\alpha$ (erreur sur le facteur de correction pour la variabilité du profil hydrique).

Pour les critères issus des méthodes localisées, toutes les erreurs analysées sont comparables excepté l'influence négligeable de l'étalonnage absolu. De plus pour les indices WISOIL, NINSOL et NINSON, l'impact du contenu intégré en vapeur d'eau est négligeable.

Pour le critère aire sous l'EC, l'impact des erreurs engendre des variations entre 10 % (erreur d'extraction de ROI) et 25 % (erreur d'étalonnage inter-bande). Pour le critère MES inverse, les erreurs analysées sont du même ordre de grandeur hormis pour le contenu intégré en vapeur d'atmosphérique et l'étalonnage inter-bande.

Pour tous les critères, les impacts de l'extraction des ROI, de la variabilité du profil d'humidité en profondeur, et de la valeur de densité apparente du sol, sont similaires. Il est donc essentiel d'évaluer les caractéristiques pédologiques lors d'une campagne de mesures terrain. Pour de nouvelles applications sur des données réelles, il sera nécessaire d'utiliser des données géoréférencées. De plus, pour mener l'analyse d'impact du décalage à terme, il aurait été intéressant de disposer de mesures (avec un échantillonnage au sol plus faible) de SMC sur le terrain autour des zones d'intérêt.

La variation du contenu intégré en vapeur d'eau est la source d'erreur qui influence le moins les performances des critères. Toutefois, les critères NSMI (6 %) et aire sous l'EC (11 %) sont les moins robustes à une estimation erronée de ce paramètre.

L'impact de l'incertitude sur l'étalonnage inter-bande est similaire pour les méthodes localisées (valeur qui varie autour de 10 %). Cet impact est négligeable pour le MES inverse et prépondérant pour l'aire sous l'EC (25 %).

L'impact de l'incertitude sur l'étalonnage absolu est négligeable pour les méthodes localisées. Cet impact est comparable pour les méthodes globales (entre 10 et 15 %).

III.2.3. Conclusions

Les zones d'intérêt retenues dans le cadre de cette application sur des données réelles sont des parcelles de sols nus labourés avec présence d'un système d'irrigation.

Les contenus en eau estimés à partir des images de réflectance, ont été comparés aux SMC mesurés sur le terrain afin d'évaluer les performances d'ALOHA dans le domaine réflectif.

Pour cela, les données hyperspectrales sont prétraitées au préalable : correction atmosphérique et détermination de ROI associées aux zones d'intérêt. Ensuite, les cartes de contenus en eau gravimétriques sont converties en contenus en eau volumiques avec des hypothèses sur la densité apparente du sol et sur la variabilité du profil vertical d'humidité. Les valeurs moyennes de SMC estimés (obtenues pour les ROI) sont finalement comparées aux valeurs moyennes des SMC mesurés sur le terrain (acquises par transect) :

- pour des SMC_v inférieurs à 20 %, les critères les plus performants sont NINSOL, NINSON et NSMI ;
- pour des SMC_v supérieurs à 20 %, les critères les plus performants sont le MES inverse et l'aire sous l'EC ;

Dans le cadre de cette application, l'indice WISOIL n'est pas adapté.

Cette analyse a été complétée par l'étude de l'impact de sources d'erreur identifiées. Globalement, leur influence varie entre 6 et 20 % excepté pour :

- les critères WISOIL, NINSOL, NINSON et le MES inverse peu sensibles à l'incertitude sur le contenu intégré en vapeur d'eau atmosphérique ;
- l'impact important de ce paramètre sur l'aire sous l'EC ;
- l'impact important de l'erreur d'étalonnage inter-bande sur l'aire sous l'EC et négligeable pour le MES inverse ;
- l'influence négligeable de l'incertitude de l'étalonnage absolu sur les critères associés aux méthodes localisées.

Conclusions

L'objectif de cette thèse était d'estimer le contenu en eau des sols nus à partir de la télédétection aéroportée hyperspectrale à haute résolution spatiale. Les travaux présentés dans cette thèse montrent la faisabilité d'estimer les contenus en eau de sol nu à partir d'images à hautes résolutions spatiale et spectrale. Ces premiers résultats encourageant ont également permis d'identifier et d'évaluer les principales sources d'incertitudes.

Pour estimer ce contenu en eau des sols, nommé SMC (Soil Moisture Content), par imagerie hyperspectrale, il est nécessaire de disposer d'outils de modélisation du signal mesuré dans le système Terre-Atmosphère en fonction du SMC, de caractériser son impact sur les signatures spectrales de différents types de sol et enfin de mettre en place une méthode d'estimation du SMC à partir de données hyperspectrales. Si l'estimation du SMC a déjà donné lieu à divers travaux, des limitations ont pu être identifiées parmi lesquelles :

- le manque de jeux de données de signatures spectrales établies en fonction du SMC sur tout le domaine spectral 0,4 – 14 μm ;
- l'existence de critères d'estimation du SMC dans le domaine réflectif souvent adaptés pour un (ou plusieurs) type(s) de sol, mais parfois nécessitant un étalonnage au préalable en laboratoire ;
- l'absence de critère d'estimation de contenu en eau des sols dans le domaine émissif.

Notre travail s'est donc concentré principalement sur la mise en place de critères d'estimation du SMC dans tout le domaine optique, l'évaluation comparée de leurs performances et leur validation expérimentale.

Mise en place de critères d'estimation du SMC

Ce travail a donc eu pour premier objectif de constituer un jeu de données de propriétés optiques de référence à partir des signatures spectrales (réflectances spectrales) acquises sur le domaine optique (0,4 – 14 μm) pour plusieurs contenus en eau (cinq à six niveaux atteints) à partir de trente-deux échantillons de sol prélevés dans le Sud-Ouest et le Sud-Est de la France. Ensuite, afin de simuler la signature spectrale d'un sol pour tout type de contenu en eau, un modèle empirique de propriétés optiques spectrales de sol nu (MES) a été développé sur l'ensemble du domaine optique. Il est basé sur une classification informelle des échantillons issue de l'analyse des signatures spectrales des sols secs. Ses performances pour toutes les classes de sols étudiées montrent des $R^2 > 90\%$ dans le domaine réflectif, et des $R^2 > 80\%$ dans le domaine IRT. Ce modèle a également été validé sur d'autres jeux de données existants dans le domaine réflectif (Mourin, 2006 ; Liu, 2002).

L'évaluation de critères d'estimation du contenu en eau des sols a ensuite été menée à partir de l'analyse des propriétés optiques de référence. Deux classes de méthodes, localisées et

globales, ont été mises en place sur l'ensemble du domaine optique. Pour les méthodes localisées, nous avons établi, à partir des matrices de corrélation, de nouveaux indices spectraux qui ont été comparés aux indices spectraux déjà existants. Les méthodes globales proposées ici incluent un modèle d'enveloppe convexe, inspiré du modèle de Whiting *et al.* (2004), et un modèle empirique inverse (MES inverse) qui consiste à déterminer le contenu en eau des sols en supposant la classe de sol connue (classification empirique obtenue à partir du comportement spectral du sol sec).

Ces méthodes, appliquées sur les propriétés optiques de référence, ont permis de retenir et d'évaluer six critères dans le domaine spectral réflectif et quatre dans le domaine IRT (cf. Tableau 33) regroupés dans l'outil ALOHA (critères pour la mesure de l'humidité estimée à partir de données spectrales).

Critères du domaine réflectif	Performances (RMSE)
NSMI (Haubrock, 2008a)	6 ‰ _g
WISOIL (Bryant, 2003)	6 ‰ _g
NINSOL	4,4 ‰ _g
NINSON	4,8 ‰ _g
Aire sous l'EC appliquée sur le logarithme du spectre dans le domaine du NSWIR	6 ‰ _g
MES inverse	3,8 ‰ _g
Critères du domaine IRT	Performances (RMSE)
NIMSOL	5,2 ‰ _g
NIMSON	4,6 ‰ _g
Aire sous l'EC appliquée sur le spectre associé au domaine IRT	4,6 ‰ _g
MES inverse	2,8 ‰ _g

Tableau 33 – Performances des critères des domaines spectraux réflectif et IRT associées à l'évaluation du SMC à partir des propriétés optiques de référence.

Evaluation des performances des critères d'estimation

Nous avons ensuite évalué les performances de l'outil ALOHA à l'aide d'un simulateur complet, développé sur l'ensemble du domaine optique à partir d'outils existants pour :

- simuler des mesures hyperspectrales en sortie capteur en prenant en compte l'atmosphère et l'instrument ;
- estimer le SMC à partir de ces mesures.

Afin de simuler des cas réalistes, les mesures sont synthétisées par des acquisitions d'instruments existants : HyMap dans le domaine réflectif et AHS-160 dans le domaine IRT. Du fait de la configuration instrumentale de AHS-160 (largeur de bande spectrale importante essentiellement), certains critères ont été écartés lors de cette analyse car ils présentaient une dégradation des performances trop importante (critères non adaptés à ce type d'instrument).

L'évaluation des performances est effectuée en deux étapes. La première étape (cas nominal) consiste à comparer le SMC estimé par les différents critères, avec une description du système Terre-Atmosphère moyenne supposée connue, au SMC associé au jeu de référence en

entrée du simulateur. Cette étape a permis d'évaluer les performances moyennes intrinsèques de ces critères d'estimation du SMC par télédétection hyperspectrale. Les erreurs sont inférieures à 10% pour tous les critères évalués sur tout le domaine spectral. Les critères les plus performants sont :

- dans le domaine réflectif : NINSOL, NINSON et le MES inverse ;
- dans le domaine IRT : le MES inverse appliqué sur le domaine du MWIR.

Dans une deuxième étape, une analyse monovariante a été menée afin d'évaluer l'impact des incertitudes relatives à la correction atmosphérique (erreur d'estimation du contenu intégré en vapeur d'eau atmosphérique) ou à l'étalonnage (absolu et inter-bande) sur les performances par rapport au cas nominal. Les résultats obtenus sont les suivants :

- dans tous les cas étudiés, les erreurs d'estimation du SMC sont plus importantes pour des SMC_g inférieurs à 15 %_g ;
- pour les méthodes localisées :
 - l'erreur d'étalonnage inter-bande entraîne les erreurs d'estimation du SMC les plus importantes ;
 - NSMI est le critère le moins robuste à toutes les sources d'erreurs ;
 - les critères WISOIL, NINSOL et NINSON sont peu sensibles aux erreurs sur le contenu intégré en vapeur d'eau et d'étalonnage absolu.
- pour les méthodes globales :
 - le critère de l'aire sous l'EC est le critère le moins robuste aux erreurs sur le contenu en vapeur d'eau et d'étalonnage inter-bande ;
 - le critère MES inverse est surtout sensible à l'erreur d'étalonnage absolu dans le domaine réflectif et a des performances dégradées dans le domaine MWIR.

Validation expérimentale

Une validation expérimentale des différents critères d'estimation du SMC du domaine réflectif a été réalisée en exploitant les données aéroportées acquises par l'instrument hyperspectral HyMap associées à des mesures de vérité terrain. La zone d'intérêt est un sol nu labouré traversé par un système d'irrigation.

Les SMC mesurés sur le terrain sont comparés aux SMC estimés. Pour les méthodes localisées, le critère WISOIL a des performances médiocres. Pour NINSON et NINSOL, les écarts entre les SMC mesurés et simulés sont inférieurs à 20 % pour la gamme de SMC entre 5 et 20 %_v. De plus, le critère NSMI sous-estime le SMC. Pour les méthodes globales, les SMC estimés sont systématiquement surestimés pour les SMC inférieurs à 15 %_v.

Une analyse des sources d'erreurs a ensuite été réalisée. Les sources d'erreur analysées sont : erreur liée au décalage absolu entre les points de mesures terrain et aéroportées, défauts d'étalonnage, incertitudes sur l'évaluation du contenu intégré en vapeur d'eau atmosphérique, incertitudes sur la valeur de densité apparente de sol et la variabilité du profil vertical de SMC. Les impacts de ces sources sont donnés par ordre décroissant :

1. erreurs sur les valeurs de densité de sol et du facteur de correction lors de la conversion des images de contenus en eau gravimétriques en contenus en eau volumiques ;
 2. erreurs d'étalonnages inter-bande ou/et absolu de l'instrument hyperspectral ;
 3. erreur liée au décalage absolu entre les points de mesures terrain et aéroportées ;
 4. erreur d'évaluation du contenu intégré en vapeur d'eau de l'atmosphère.
- Ces résultats sont en accord avec ceux établis lors de l'étude de sensibilité théorique.

Perspectives

Nous avons mis en évidence que la caractérisation du type de sol (densité apparente, identification fractions fines et grossières, granulométrique, rugosité, permittivité, ...) était un des facteurs les plus limitants pour la précision de l'estimation du SMC. Afin de réduire cette source d'incertitude, il faut en premier lieu envisager une extension du jeu de données de signatures spectrales de référence en renseignant ces caractéristiques pour chaque échantillon. Cela permettrait alors de mieux préciser les classes de sol et diminuer les incertitudes associées. L'extension de cette base à d'autres échantillons prélevés sur le terrain en fonction de carte pédologique permettrait d'élargir le panel des types de sol analysés pour améliorer le modèle de sol nu proposé et ainsi accroître ses performances d'estimation du SMC. Afin d'évaluer l'impact de la rugosité, de la variabilité spatiale de la densité apparente et de la variabilité du profil vertical du SMC, une expérimentation en laboratoire, à partir d'échantillons de sols prélevés sur le terrain en conservant leur structure, permettrait de mieux appréhender le comportement des sols nus lorsque l'humidité varie dans un cas réel.

Nous avons évalué la sensibilité des critères à l'incertitude sur les valeurs de paramètres d'entrée. Leur impact étant différent suivant le critère considéré, un axe d'amélioration serait de combiner différents critères.

Les travaux réalisés sur le terrain ont mis en évidence la difficulté de la mesure directe du SMC. En se plaçant dans un cas réel avec une complexité apparente liée à la surface labourée à forte rugosité, à la présence de tassement et à l'existence d'un système d'irrigation, l'interprétation des résultats a été difficile. Pour de futures campagnes, les points suivants devront être pris en compte :

- la représentativité des mesures par sonde TDR : caractériser la profondeur optimale qui serait comparable à une mesure par télédétection ; caractériser la variabilité spatiale du SMC ; définir le pas d'échantillonnage spatial à utiliser pour que les mesures terrain soient représentatives d'une mesure à distance pour une résolution spatiale donnée ;
- la connaissance du sol : déterminer les principales propriétés physico-chimiques du sol pour une observation par télédétection ; analyser l'impact de la géométrie de la surface (rugosité) ;
- la connaissance du milieu observé : si une zone irriguée est présente, il serait nécessaire de déterminer l'heure d'arrêt de l'irrigation et d'estimer le volume d'eau déversé, ou, le cas échéant, mettre en place un système d'irrigation contrôlé. Suivant la période d'acquisition, une connaissance du taux de précipitation des jours précédants la campagne de mesures terrain serait utile. Une identification des zones de tassement du sol liées aux passages des engins agricoles serait également nécessaire pour caractériser l'impact sur l'estimation du SMC.

Pour cela, le contenu en eau des sols devra être acquis sur une grille de points très fine afin de pouvoir caractériser plus précisément sa variabilité spatiale et prendre en compte l'impact du tassement. Ensuite, des mesures de rugosité de surface devront être effectuées pour analyser son impact sur l'estimation du SMC. Enfin, la porosité des sols étudiés devra être analysée pour évaluer précisément le SMC suivant la profondeur d'analyse. La manière dont l'eau est retenue par le sol, et la manière dont elle circule dans le sol sont intrinsèquement liées aux caractéristiques de cette porosité (Moeys, 2007). Cette dernière est obtenue à partir de la densité apparente du sol et de la masse volumique du solide. Ainsi, il s'avèrera nécessaire de caractériser avec précision la densité apparente du sol et sa variabilité spatiale.

Lors de mesures aéroportées, les résultats obtenus ont montré que les instruments hyperspectraux existants dans le domaine réflectif ont des performances suffisantes en terme de rapport signal sur bruit mais qu'il convenait de bien maîtriser l'étalonnage inter-bande et/ou l'étalonnage absolu suivant le critère considéré. De plus, il est important de disposer de données géoréférencées. L'évaluation des performances des critères relatifs au domaine spectral réflectif pourrait être complétée en utilisant le jeu de données acquis par l'instrument HyMap en 2005 sur le site de Welzow (Allemagne). Ce jeu ayant servi à la validation de l'outil HYSOMA (HYperspectral SOil MApper) qui comprend les indices NSMI et la méthode SMGM (Eisele, 2010), nous pourrions alors envisager une inter-comparaison entre les méthodes d'estimations du SMC.

Aussi pour améliorer les performances d'estimation du SMC, il serait intéressant d'appliquer ALOHA sur des données hyperspectrales aéroportées acquises dans le domaine IRT, avec des mesures terrain à l'appui, afin de confirmer les résultats obtenus lors de l'étude de sensibilité. Afin de pouvoir utiliser les différents critères de ce domaine spectral, l'instrument hyperspectral devra présenter des caractéristiques particulières, notamment au niveau de la largeur de bandes dans le domaine MWIR (inférieure à 50 nm). Des nouveaux instruments hyperspectraux dans le domaine infrarouge voient le jour et des données seront disponibles à court et moyen termes (Telops, Puckrin, 2009 ; AisaOWL, www.specim.fi ; TASI-600 et MASI-600, www.itres.com ; Sysiphe, Rousset-Rouvière, 2010 ; Thétas, 2009) permettant ainsi l'accès au domaine IRT avec de hautes résolutions spectrale et spatiale.

Ces travaux ont permis de mettre en place un simulateur complet offrant de nouvelles possibilités :

- mieux évaluer l'impact des différentes incertitudes sur les performances de chaque critère et en particulier identifier les éventuels effets de couplage entre les sources d'erreur par le biais de plans d'expériences ;
- dimensionner des bandes optimales en termes de position et de largeur pour chaque critère et éventuellement le gain apporté par une méthode multi-critère.

En particulier un tel simulateur pourra servir au dimensionnement du futur instrument MISTIGRI (Lagouarde, 2010) pour définir les bandes spectrales optimales dans le domaine LWIR.

Ces premiers travaux ont permis de montrer la faisabilité d'estimer les contenus en eau de sol nu à partir de la télédétection hyperspectrale à haute résolution spatiale mais également d'identifier les sources d'incertitude dont certaines ont pu être évaluées. Ces premiers résultats sont encourageants.

Les applications envisagées pour ces travaux sont les suivantes :

- pour une application de traficabilité, les outils développés couplés à des informations sur le terrain, le véhicule et son utilisation pourraient être déjà utilisés pour fournir une décision de passage ou non du véhicule ;
- pour l'estimation de l'humidité au niveau d'un couvert composé de sols nus et végétation rase et éparse (par exemple culture au stade de levée), la combinaison du modèle de sol nu développé avec des modèles de végétation existants (Gerber, 2010 ; Jacquemoud, 2009) pourrait être investiguée.

Bibliographie

A

Angström A.

"The albedo of various surfaces of ground", *Geografiska Annali*, vol. 7, 323-327, **1925**.

B

Bannari A., Morin D., and He D.G.

"Caractérisation de l'environnement urbain à l'aide des indices de végétation dérivés des données de hautes résolutions spatiale et spectrale", *Téledétection des milieux urbains et périurbains*, Ed AUPELF-UREF, 47-64, **1997**.

Barat M., and Dubois-Fernandez P.

"Enviro, an ONERA research project and the associated Data Base and Portal", *Jigot'08*, Journées Informations Géographiques et Observation de la Terre, Marseille, 24-25 Novembre **2008**.

Beauchamp J.

Cours de pédologie en ligne <http://www.u-picardie.fr/beauchamp/>, **2006**.

Bedidi A., Cervelle B., Madeira J., and Pouget M.

"Moisture effects on spectral characteristics (visible) of lateritic soils", *Soil Science*, vol. 153, 129-141, **1992**.

Ben-Dor E., Chabrillat S., Dematte J.A.M., Taylor G.R., Hill J., Whiting M.L., and Sommer S.

"Using imaging spectroscopy to study soil properties", *Remote Sensing of Environment*, doi:10.1016/j.rse.2008.09.019, **2009**.

Ben-Dor E., Patkin K., Banin A. and Karnieli A.

"Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data – a case study over clayey soils in Israel", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23(6), 1043-1062, **2002**.

Berk A., Anderson G.P., Acharya P.K., Chetwynd J.H., Bernstein L.S., Shettle E.P., Matthew M.W., and Adler-Golden S.M.

"MODTRAN4 USER'S MANUAL", Air Force Research Laboratory, **1999**.

Berk A., Bernstein L.S., Anderson G.P., Acharya P.K., Robertson D.C., Chetwynd J.H., and Adler-Golden S.M.

"MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS", *Remote Sensing of Environment*, vol. 65, 367-375, **1998**.

Boucher Y., Poutier L., Achard V., Lenot X., and Miesch C.

"Validation and robustness of an atmospheric correction algorithm for hyperspectral images", *Proceedings SPIE AeroSense 2002*, Orlando Floride, **2002**.

Bouleau N.,

"Probabilités de l'ingénieur, variables aléatoires et simulation", Hermann, Paris, **1986**.

Borner A., Wiest L., Reulke R., Richter R., Keller P., Schaepman M., and Schläpfer D.

"SENSOR: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems", *ISPRS Journal of Photogrammetry*, vol. 55, 299-312, **2001**.

Boyd D.S. and Petitcolin F.

"Remote sensing of the terrestrial environment using middle infrared radiation (3.0-5.0 μm)", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25(17), 3343-3368, **2004**.

Bryant R., Thoma D., Moran S., Holifield C., Goodrich D., Keefer T., Paige G., Williams D., and Skirvin S.

"Evaluation of Hyperspectral, Infrared Temperature and Radar Measurements for Monitoring Surface Soil Moisture", *Proceedings of the First Interagency Conference on Research in the Watersheds*, 27-30 October, Benson, Arizona, 528-533, **2003**.

Burke E.J., and Simmonds L. P.

"Effects of sub-pixel heterogeneity on the retrieval of soil moisture from passive microwave radiometry", *International Journal of Remote Sensing*, 24(10), 2085-2104, **2003**.

C

Ceccato P., Gobron N., Flasse S., Pinty B., and Tarantola S.

"Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1 Theoretical approach", *Remote Sensing of Environment*, vol. 82, 188-197, **2002**.

Chabrillat S., Kaufmann H., Haubrock S., Richter N., and Spengler D.

"New Developments from Optical Remote Sensing of the Assessment and Monitoring of Land Degradation in Drylands", *Atelier PNTS hyperspectral*, Nantes, 11-12 April **2007**.

Chabrillat S., Kaufmann H., Merz B., Mueller A., Bens O. and Lemnitz C.

"Development of relationships between reflectance and erosion modeling: test site preliminary field spectral analysis", *In 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, Herrsching, Germany, p. 165-172, 13-16 May **2003**.

Chabrillat S., Goetz A.F.H., Olsen H.W., and Krosley L.

"Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution", *Remote Sensing of Environment*, vol. 82, 431-445, **2002**.

Chen J.M., Yang B.J., and Zhang R.H.

"Soil thermal emissivity as affected by its water content and surface treatment", *Soil Sciences*, 148(6), 433-435, **1989**.

Clark R.N., and Roush T.L.

"Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications", *Journal of Geophysical Research*, vol. 89, 6329-6340, **1984**.

Cocks T., Jenssen R., Stewart A., Wilson I., and Shields T.

"The HyMap Airborne Hyperspectral Sensor: The System, Calibration and Performance", *Proceedings 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, Zurich, p. 37-43, 6-8 October **1998**.

Courault D., Girard M.C., and Escadafal R.

"Modélisation de la couleur des sols par télédétection", *Actes du 4^e Coll. Int. Signatures spectrales d'objets en télédétection*, Aussois, 357-362, **1988**.

D

Dehaan R., and Taylor G. R.

"Image-derived spectral endmembers as indicators of salinity", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, 775-794, **2003**.

Dorigo W., Bachmann M., and Heldens W.

"AS Toolbox and Processing of field spectra, User's manual", Version 1.12, November **2006**.

Douzals J.-P.

"Mesures physiques de la variabilité des sols en agriculture de précision", *Ingénieries – EAT n°24*, Décembre **2000**.

Duchaufour P.

"Introduction à la science du sol - Sol, végétation, environnement", Dunod, **2001**.

E

Eisele A. and Chabrilat S.

"The Hyperspectral Soil Mapper (HYSOMA)", EUFAR (European Facility for Airborne Research), JRA2 (HYQUAPRO) Progress Meeting 5, Météo France, Toulouse, 26 October **2010**.

Escadafal R.

"Les propriétés spectrales des sols", *Journées télédétection*, Paris, Orstom, coll. Colloques et Séminaires, p 19-41, 14-17 Novembre **1990**.

F

Fernández-Renau A., Gómez J.A., and de Miguel E.

"The INTA AHS system", *Proceedings SPIE*, vol. 5978, 471-478, **2005**.

G

Gagnon S.

"Caractérisation de la variabilité spatiale des paramètres hydrogéologiques provenant des sources d'information existantes", Thèse, Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-Eau, Québec, Avril, **1996**.

Galantowicz J.F., Entekhabi D., and Njoku E.G.

"Estimation of soil-type heterogeneity effects in the retrieval of soil moisture from radiobrightness", *IEEE Transactions Geosciences Remote Sensing*, vol. 38, 312-316, **2000**.

Galvez R.

Cours de pédologie en ligne

http://www.gci.ulaval.ca/professeurs/rgalvez/extrag%C3%A9o/chapitre1_les%20sols.pdf
2009.

Gerber F., Marion R., Olioso A., Jacquemoud S., Ribeiro da Luz B., and Fabre S.

"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*, in press, **2010**.

Gong Y., Cao Q., and Sun Z.

"The effects of soil bulk density, clay content and temperature, on soil water content measurement using time-domain reflectometry", *Hydrological Processes*, vol. 17, 3601–3614, **2003**.

Green R.O., Eastwood M.L, Sarture C.M., Chrien T.G., Aronsson M., and Chippendale B.J.

"Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS)", *Remote Sensing of Environment*, vol. 65, 227-248, **1998**.

Guyot G.

"Signatures spectrales des surfaces naturelles", *Collection Télédétection satellitaire, Paradigme*, Caen, **1989**.

H

Haubrock S.-N., Chabrillat S., Kuhnert M., Hostert P., and Kaufmann H.

"Surface soil moisture quantification and validation based on hyperspectral data and field measurements", *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 2, 023552, doi: 10.1117/1.3059191, **2008b**.

Haubrock S.-N., Chabrillat S., Lemnitz C., and Kaufmann H.

"Surface soil moisture quantification models from reflectance data under field conditions", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29(1), 3-29, **2008a**.

I

Iris J.-M.

"Analyse et interprétation de la variabilité spatiale de la densité apparente dans trois matériaux ferrallitiques", *Science du sol*, vol. 24, n°3, 245-256, **1986**.

J

Jacquemoud S., Verhoef W., Baret F., Bacour C., Zarco-Tejada P.J., Asner G.P., François C., and Ustin S.L.

"PROSPECT + SAIL Models: a review of use for vegetation characterization", *Remote Sensing of Environment*, in press, **2009**.

Jones C.L., Weckler P.R., Maness N.O., Stone M-L., and Jayasekara R.

"Estimating Water Stress in Plants Using Hyperspectral Sensing", 2004, *ASAE/CSAE Annual International Meeting Sponsored by ASAE/CSAE*, Ontario, 1-4 August, **2004**.

K

Kanani K.

"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, Université Louis Pasteur, **2005**.

Khanna S., Palacios-Orueta A., Whiting M.L., Ustin S.L., Riaño D., and Litago J.

"Development of Angle Indexes for Soil Moisture Estimation, Dry Matter Detection and Land-cover Discrimination", *Remote Sensing of Environment*, vol. 109, 154-165, **2007**.

L

Lagouarde J.-P., Bach M., Boulet G., Briottet X., Cherchali S., Coudert B., Dedieu G., Gamet Ph., Hagolle O., Jacob F., Nerry F., Oliso A., Ottlé C., Pascal V., Roujean J.-L., Sobrino J.A., and Tintó Garcia-Moreno F.

"MISTIGRI, a microsatellite project associating high spatial resolution and high revisit frequency in the Thermal InfraRed", *RAQRS meeting*, Valencia, Spain, September **2010**.

Le Morvan A., Zribi M., Baghdadi N. and Chanzy A.

"Soil moisture profile effect on radar signal measurement", *Sensors*, 8, 256-270, **2008**.

Liu W., Baret F., Gu X., Tong Q., Zheng L., and Zhang B.

"Evaluation of methods for soil surface moisture estimation from reflectance data", *International Journal of Remote Sensing*, 24, 2069-2083, **2003**.

Liu W., Baret F., Gu X.F., Tong Q., Zheng L., and Zhang B.

"Relating soil surface moisture to reflectance", *Remote Sensing of Environment*, vol. 81, 238-246, **2002**.

Lobell D., and Asner G.

"Moisture Effects on Soil Reflectance", *Soil Sciences American Journal*, vol. 66, 722-727, **2002**.

M

McNabb D.H., Nyugen H., and Startsev A.D.

"Soil wetness and traffic level effects on bulk density and air-filled porosity of compacted boreal forest soils", *Soil Science Society of America Journal*, vol. 65, n°4, 1238-1247, **2001**.

Miesch C., Poutier L., Achard V., Briottet X., Lenot X., and Boucher Y.

"Direct and inverse radiative transfer solutions for visible and near infrared hyperspectral imagery", *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, vol. 43(7), **2005**.

Mira M., Valor E., Boluda R., Caselles V., and Coll C.

"Influence of soil water content on the thermal infrared emissivity of bare soils: implication for land surface temperature determination", *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, F04003, **2007b**.

Mira M., Valor E., Boluda R., Caselles V., and Coll C.

"Influence of the soil moisture effect on the thermal infrared emissivity ", *Tethys*, vol. 4, 3-9, **2007a**.

Moeys J.

"Variabilité spatiale et déterminismes agro-pédologiques du devenir d'un herbicide dans l'horizon de surface - Application au cas de l'isoproturon dans un secteur agricole de Beauce chartraine", Doctorat Science du Sol, UMR 1091, Environnement et Grandes Cultures, AgroParistech 2007AGPT0063, p.308, **2007**.

Moreno J.

"Optical Theory Basics – 1 Radiative transfer", disponible en ligne à <http://earth.esa.int/landtraining07/D1LB1-Moreno.pdf>, **2007**.

Mourin H.,

"Caractérisation de l'influence de l'humidité sur la réflectance spectrale d'échantillons de sols nus dans le domaine optique 0.4 - 15 μm ", *mémoire pour l'obtention du diplôme du grade d'ingénieur civil polytechnicien*, Belgique, **2006**.

Muller E., and Décamps H.

"Modeling soil moisture-reflectance", *Remote Sensing of Environment*, vol. 76, 173-180, **2001**.

Musy A.

Cours d'hydrologie en ligne disponible à <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre7/main.html>, **2005**

N**Neema D. L., Shah A., and Patel A.N.**

"A statistical optical model for light reflection and penetration through sand", *International Journal of Remote Sensing*, 8 (8), 1209-1217, **1987**.

O**Okin G.S., and Roberts D.A.**

"Linear unmixing of simulated, noisy spectra: vegetation detection limits in areas of low cover", in Green, R.O., ed., *The 2000 AVIRIS Workshop*: Pasadena, California, Jet Propulsion Laboratory, **2000**.

P**Palacios A., Khanna S., Litago J., Whiting M.L., and Ustin S.L.**

"Assessment of NDVI and NDWI spectral indices using MODIS time series analysis and development of a new spectral index based on MODIS shortwave infrared bands", *Remote sensing and geoinformation processing in the assessment and monitoring of degradation and desertification*, Trier, Germany, **2005**.

Peters J.

"On-Farm Moisture Testing of Corn Silage", *Focus on Forages*, UW-Madison. vol 2 n°6, disponible en ligne à <http://www.unwex.edu/ces/crops/unforage/CSMoisture.pdf>, **2000**.

Planet W. G.

"Some comments on reflectance measurements of wet soils", *Remote Sensing of Environment*, vol. 1, 127-129, **1970**.

Poutier L., Miesch C., Lenot X., Achard V., and Boucher Y.

"COMANCHE and COCHISE: two reciprocal atmospheric codes for hyperspectral remote sensing", *AVIRIS Earth Science and Applications Workshop Proceedings*, **2002**.

Puckrin E., Turcotte C.S., Lahaie P. and Dubé D.

"Airborne measurements in the infrared using FTIR-based imaging hyperspectral sensors", *SPIE Proceedings*, vol. 7324-46, 13-17 April **2009**.

R

Renouf L.

"La conciliation de l'exploitation forestière et du respect des sols : un exemple concret en Picardie", AgroParisTech Centre ENGREF de Nancy, Office National des Forêts, Rapport de stage, Promotion 17 (2006-2009), **2009**.

Robert M.

"Le sol : interface dans l'environnement ressource pour le développement", Ed Masson 244 pages, **1996**.

Rousset-Rouvière L.

"SYstème Spectro-Imageur de mesure des Propriétés optiques Hyperspectrales Embarqué", Poster, *International Conference on Airborne Research for the Environment (ICARE 2010)*, 25-31 Octobre, Toulouse, **2010**.

S

Salisbury J.W., and D'aria D.M.

"Emissivity of terrestrial materials in the 3 - 5 μm atmospheric window", *Remote Sensing of Environment*, vol. 47, 345-361, **1994**.

Salisbury J.W., and D'aria D.M.

"Emissivity of terrestrial materials in the 8 - 14 μm atmospheric window", *Remote Sensing of Environment*, vol. 42, 83-106, **1992**.

Salvaggio C., and Miller C.J.

"Comparison of field and laboratory collected midwave and longwave infrared emissivity spectra/data reduction techniques", *Proceedings of the SPIE, Image Exploitation and Target Recognition, Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VII*, vol. 4381, Orlando, FL, April **2001**.

Soltner D.

"Les bases de la production végétale, T I : le sol et son amélioration. ", 22^e Edition, Editions Sciences et techniques agricoles *Le Clos Lorelle*, 49130 Saint-Gemmes-Sur-Loire., 472 P, **2000**.

Stoner E. R., and Baumgardner M. F.

"Physiochemical, site and bidirectional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils", *LARS*, Purdue University, USA, 111679, **1980**.

T

Tanguy B.

"Intercomparaison, évaluation et amélioration de l'étalonnage d'instruments de mesure de réflectance spectrale en infrarouge", Rapport ONERA RT 1/13361 DOTA, **2008**.

Taylor G. R., Day M., Mitcheck A., and Roff A.

"Hyperspectral imagery as a tool for the assessment of stubble content in a fallow soil", *Proceedings Workshop on Hyperspectral Remote Sensing and Field Spectroscopy of Agricultural Crops and Forest Vegetation*, Australia, 10 February, **2006**.

Thétas S., Bernhardt S., Caes M., Coudrain C., Cymbalista P., Deschamps J. and Primot J.

"SIELETTERS : a Static Fourier Transform Infrared Imaging Spectrometer for Airborne Hyperspectral Measurements", presentation OTAN, **2009**.

Tillé Y.

Cours de statistique descriptive en ligne

http://www2.unine.ch/webdav/site/statistics/shared/documents/cours_de_statistique_descriptive.pdf
2008.

U

Urai M., Matsunaga T., and Ishii T.

"Relationship between soil moisture content and thermal infrared emissivity of the sand sampled in Muus Desert, China", *Remote Sensing Society of Japan*, 17(4), 322-331, **1997**.

V

Van Bavel C.H.M., and Hillel D.

"Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat", *Agricultural Meteorology*, vol. 17, 453-476, **1976**.

Vauclin M.

"L'humidité des sols en hydrologie: intérêt et limites de la télédétection", *Hydrological Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission*, Proceedings of the Hamburg Symposium, IAHS 145, **1983**.

W

Warner A., Blonski S., Gasser G., Ryan R., and Zanoni V.

"An approach to application validation of multispectral sensors using AVIRIS data", *AVIRIS Workshop*, **2001**.

Weide S.

"Airborne remote sensing, HyEurope 2009, Summary report", *HyEurope-CRT*, 1, **2010**.

Whalley W.R., Leeds-Harrison P.B., and Bowman G.E.

"Estimation of soil moisture status using near infrared reflectance", *Hydrological Processes*, 5:321-327, **1991**.

Whiting M. L., Palacios-Orueta A., Li L., and Ustin S. L.

"Light absorption model for water content to improve soil mineral estimates in hyperspectral imagery", *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Proceedings Pecora 16: Global Priorities in Land Remote Sensing, Sioux Falls, South Dakota. October 23-27, **2005**.

Whiting M.L., Li L., and Ustin S.L.

"Predicting water content using Gaussian model on soil spectra", *Remote Sensing of Environment*, vol. 89, 535-552, **2004**.

Whiting M.L., Li L., and Ustin S.L.

"Estimating surface soil moisture in simulated Aviris spectra", *AVIRIS Workshop*, **2003**.

Z

Zarco-Tejada P.J., Rueda C.A., Ustin S.L.

"Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods", *Remote Sensing of Environment*, vol. 85, 109-124, **2003**.

Annexe I

Généralités pédologiques

Des notions principales de pédologies sont données dans cette annexe afin d'approfondir la compréhension des mécanismes des sols.

Formations et évolutions des sols

Au cours du temps, la pédogénèse montre que le sol se différencie en couches superposées appelées horizons, dont l'ensemble constitue le profil pédologique (Duchaufour, 2001). Les horizons sont d'autant plus distincts que le sol est évolué, et les principaux horizons constituant le profil pédologique sont (cf. Figure 91).

- horizon O : couche organique où les débris végétaux s'accumulent à la surface ;
- horizon A : couche contenant de la matière organique et de la matière minérale ;
- horizon B : couche enrichie en divers constituants (minéraux et organiques) ;
- horizon C : couche d'altération de la roche mère où sa transformation est limitée.

L'horizon d'humus se crée sur la roche altérée (profil AC, cf. Figure 91), puis un horizon de type B apparaît, pouvant à son tour se subdiviser. Ainsi, le profil pédologique évolue de façon progressive (cf. Figure 91, à droite) jusqu'à atteindre un état d'équilibre avec le climat et la végétation. Les cycles évolution-régression (érosion) des sols peuvent se succéder à intervalles de temps courts (cataclysmes, action de l'homme) ou longs (pulsations climatiques).

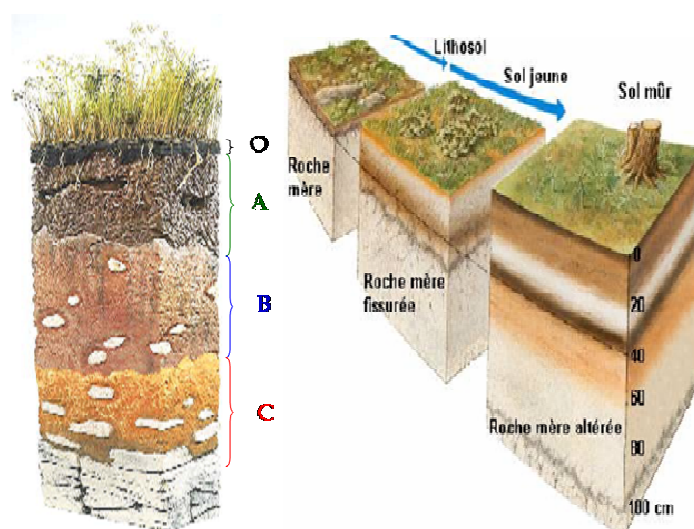


Figure 91 - Principaux horizons d'un profil de sol (à gauche) et illustration de l'évolution des sols avec apparition des différents horizons (à droite), d'après Galvez (2009).

Le sol est donc un milieu complexe, qui se forme à la rencontre de la lithosphère, de l'atmosphère et des êtres vivants (par exemple, 1 gramme de terre peut contenir 1000 à 100 000 animaux microscopiques). La composition volumique moyenne du sol (Robert, 1996) est la suivante : 38 % de fraction minérale, 12 % de fraction organique, 15 % à 35 % de phase liquide (issue des précipitations, de la nappe phréatique, d'eau de ruissellement, etc.), et 15 % à 35 % de phase gazeuse (issue de l'air hors du sol, de la respiration de la végétation, etc.).

Structures et textures des sols

La structure du sol (Duchaufour, 2001) (cf. Figure 92) est relative au mode d'assemblage des particules, aux niveaux macroscopique et microscopique. Elle détermine la distribution spatiale de la matière et des vides (pores), qui peuvent être occupés par de l'eau ou de l'air. Une classification des structures en fonction de leur mode de formation, permet de distinguer trois grands types : particulaire (sol très meuble), massive (éléments liés par un ciment minéral) et fragmentaire (en agrégat (nm) ou grumeaux (cm), très favorable aux cultures).

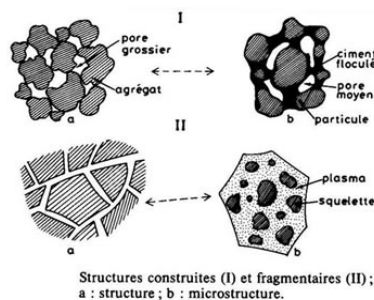


Figure 92 – La structure d'un sol au niveau macroscopique (a) et microscopique (b), d'après Duchaufour (2001).

De plus une classification des textures est également proposée pour définir les principales propriétés physico-chimiques des sols, représentée sous la forme du triangle des textures (cf. Figure 93). Ses trois extrémités correspondent à 100% de sable (S), de limon (L) et d'argile (A) et ses trois côtés aux pourcentages de mélange de sable, de limon et d'argile. De ce triangle, on en déduit que les textures de sols peuvent se décomposer en quatre groupes (Duchaufour, 2001) :

- sableux : sol bien aéré, pauvre en réserve d'eau et en éléments nutritifs ;
- limoneux : l'excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une structure massive ;
- argileux : sol chimiquement riche, mais constitué d'un milieu imperméable et mal aéré, formant un obstacle à la pénétration des racines ;
- équilibré : ce groupe correspond à l'optimum, dans la mesure où il présente la plupart des qualités des trois types précédents, sans en avoir les défauts.

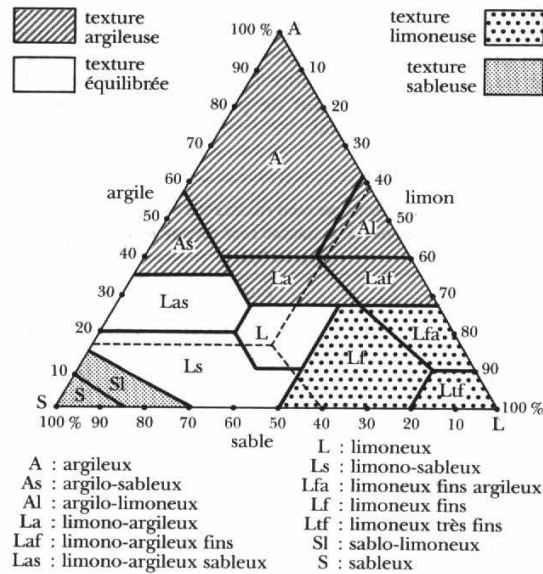


Figure 93 – Illustration d'un triangle des textures de sols (www.designvegetal.com).

L'état de l'eau dans le sol

La teneur en eau des sols est fonction du profil de sol, et par conséquent de sa composition, sa texture et sa structure. Cette quantité d'eau dépend de la porosité et de la perméabilité du sol. D'une manière générale, on distingue quatre grands types de forme d'eau (cf. Figure 94) en fonction de la taille des porosités :

- l'eau libre : elle s'écoule librement dans des macroporosités (supérieures à 10 μm) sous l'effet de la gravité. La majorité de cette eau libre circule en profondeur pour rejoindre les nappes phréatiques ;
- l'eau capillaire et l'eau liée : elles remplissent les pores capillaires, c'est-à-dire fins (inférieurs à 10 μm), et sont absorbables par les racines ;
- l'eau hygroscopique : elle est piégée à la surface par des pores très fins (inférieurs à 0,2 μm) et forme une fine pellicule à la surface des particules du sol ;
- l'eau d'hydratation : elle est encore plus microscopique, et est incluse à l'intérieur des minéraux.

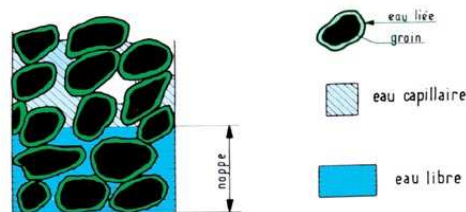


Figure 94 – Trois formes d'eau dans le sol (www.planete-tp.com).

Ces formes d'eau et notamment les eaux capillaires et liées, représentent des variables fondamentales pour évaluer les réserves d'eau utile (RU) à la végétation (Duchaufour, 2001). La notion d'eau utile correspond à la quantité d'eau stockée par le sol qui peut être absorbée et

restituée par les plantes. La valeur d'eau utile ou eau disponible, se définit comme la différence entre deux variables qui dépendent de la texture du sol :

- la capacité au champ : teneur en eau maximale que peut retenir le sol ;
- le point de flétrissement : valeur limite de teneur en eau qui peut être absorbée par la végétation.

Le taux d'humidité, c'est à dire le taux de teneur en eau de chaque variable (capacité au champ et point de flétrissement), dépend de la texture du sol (cf. Figure 95). En effet, on observe que cette eau disponible est faible pour les sables, maximale pour les limons, et diminue pour les argiles suite à l'augmentation du point de flétrissement.

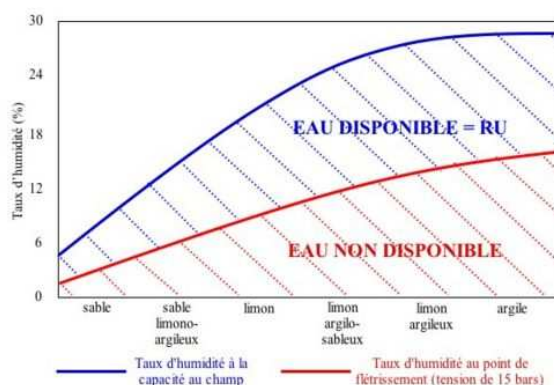


Figure 95 – Taux d'humidité dans le sol en fonction de la texture (www.afidol.org).

Plusieurs états hydriques des sols (cf. Figure 96), allant des sols saturés aux sols secs sont distingués. Pour les sols saturés, tous les vides sont remplis et le sol ne peut plus emmagasiner d'eau. Après saturation du sol, l'état de ressuyage (l'eau de gravité s'écoule et vide les macro porosités) apparaît. L'eau restant après ressuyage correspond alors à la capacité au champ, c'est-à-dire à l'eau qui est retenue dans les porosités des capillaires. L'état de sécheresse est atteint au moment où les racines ne peuvent plus absorber l'eau du sol, car l'eau n'est plus disponible dans les pores capillaires.

Pour l'état hydrique saturé, des valeurs indicatives de contenu en eau des sols volumique sont données à titre d'exemple pour trois textures de sol (cf. Figure 96) :

- sol sableux : $0,4 < SMC_v < 0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
- sol limono-sableux : $0,3 < SMC_v < 0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
- sol argileux : $SMC_v > 0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$

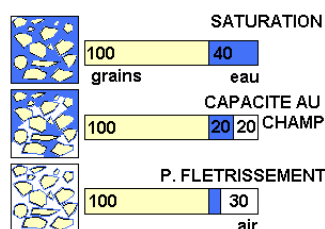


Figure 96 – Etats de l'eau dans le sol, d'après Beauchamp (2006).

Annexe II

Grandeurs mathématiques

Les données de ce document sont analysées au moyen de la statistique descriptive, partie des statistiques qui regroupe les nombreuses techniques utilisées pour décrire un ensemble relativement important de données. Les formulations des notions utilisées dans ce document sont données ci-dessous (Tillé, 2008).

Indicateurs de dispersion

Soit n valeurs distinctes d'une variable x , dont la moyenne est notée \bar{x} . La variance notée Var , qui permet de caractériser la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne, s'interprète comme la moyenne des carrés des écarts à la moyenne :

$$Var = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

L'écart-type σ (écart quadratique moyen), correspond à la racine carrée de la variance :

$$\sigma = \sqrt{Var}$$

Corrélations et régressions linéaires

Une corrélation existe entre deux variables x et y si la tendance générale de ces deux variables est de varier dans le même sens ou en sens contraire. La corrélation est linéaire quand les points du diagramme de dispersion (représentation de y en fonction de x) ont tendance à se rapprocher d'une même droite ; et non linéaire quand les points ont tendance à se rapprocher d'une même courbe. Si les deux variables évoluent dans le même sens alors la corrélation sera positive. Elle sera négative si elles évoluent en sens contraire. Une mesure de cette corrélation est obtenue par le calcul du coefficient de corrélation linéaire ou non linéaire.

Coefficient de corrélation linéaire

Le coefficient de corrélation linéaire utilisé est celui de Pearson, noté r_{pe} , dont la formulation est la suivante :

$$r_{pe} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \bar{y})^2}}$$

où x_i et y_i appartiennent respectivement à la distribution (x_1, \dots, x_n) et (y_1, \dots, y_n) .

Coefficient de corrélation non linéaire

Le coefficient de corrélation non linéaire utilisé est celui de Spearman, noté r_{sp} , appelé coefficient de rang. Le coefficient de Spearman est fondé sur l'étude de la différence des rangs. Ce coefficient est donc très utile lorsque l'analyse du nuage de point révèle une forme curviligne dans une relation qui semble mal s'ajuster à une droite. Sa formule mathématique est la suivante :

$$r_{sp} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (R_g(x_i) - \bar{R}_g(x))(R_g(y_i) - \bar{R}_g(y))}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} (R_g(x_i) - \bar{R}_g(x))^2} \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} (R_g(y_i) - \bar{R}_g(y))^2}}$$

où $R_g(x_i)$ est le rang de x_i dans la distribution (x_1, \dots, x_n) , $\bar{R}_g(x)$ est la moyenne des valeurs de $R_g(x_i)$, $R_g(y_i)$ est le rang de y_i dans la distribution (y_1, \dots, y_n) et $\bar{R}_g(y)$ est la moyenne des valeurs de $R_g(y_i)$.

Régression linéaire

La régression permet d'étudier l'association entre deux variables. Un modèle de régression simple suppose la relation affine suivante entre x_i et y_i où $i = 1, \dots, n$:

$$y_i = a \cdot x_i + b$$

La régression linéaire consiste donc à estimer les valeurs a et b , et à quantifier la validité de cette relation grâce au coefficient de détermination R^2 correspondant au carré de la valeur du coefficient de corrélation utilisé. La valeur de R^2 est donc comprise entre 0 et 1.

Indicateur de précision

L'erreur $RMSE$ (Root Mean Square Error), utilisée pour caractériser la précision d'un ensemble de mesure, est défini par l'équation suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (x_n^{mes} - x_n^{est})^2}{n}}$$

où n correspond au nombre de points comparés, x_n^{mes} et x_n^{est} correspondent respectivement à la valeur n de la variable x mesurée et estimée.

Annexe III

Grandeurs radiométriques

L'interprétation des mesures de télédétection requiert la manipulation de grandeurs physiques qui caractérisent le rayonnement et les propriétés spectrales des milieux observés. Les équations essentielles à leur compréhension sont données dans cette annexe (Moreno, 2007).

Notions élémentaires

Avant de définir les différentes grandeurs radiométriques mises en jeu pour la mesure optique, les différentes composantes de direction et la notion d'angle solide sont rappelées.

En télédétection, l'intensité du signal mesuré par un capteur dépend de l'angle de visée de celui-ci, exprimé de plusieurs manières. L'angle de visée (l'angle par rapport à l'emplacement de la surface qui est observée) s'exprime en termes d'angle d'azimut et d'angle zénithal (cf. Figure 97) :

- L'angle de visée en azimut, noté φ , est une mesure angulaire (en degrés) et est habituellement compté par rapport au Nord (la direction plein Est correspondant à 90°) ;
- L'angle zénithal de visée, noté θ , est une mesure angulaire (en degrés) par rapport à la verticale (la direction directement vers le haut correspondant à 0° et l'horizon à 90°).

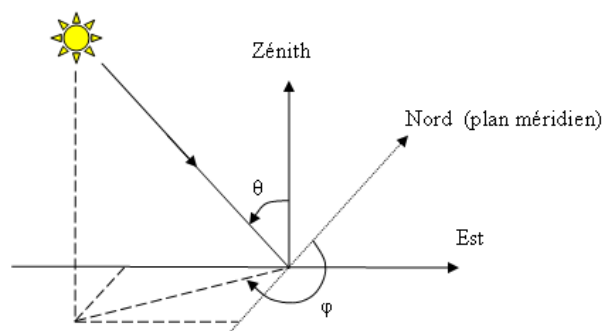


Figure 97 – Repérage de l'angle zénithal θ et azimutal φ .

Le rayonnement d'une source lumineuse ponctuelle se propage dans un cône ayant pour sommet la source elle-même. L'angle solide Ω (cf. Figure 98) qui caractérise l'ouverture plus ou moins grande de ce cône peut être évalué à partir de l'aire S de la surface qu'il découpe sur une sphère de rayon R_s . Plus le cône est ouvert, plus cette aire est grande. Par conséquent, un angle solide élémentaire $d\Omega$ délimite un cône dans l'espace et s'exprime en stéradians (sr) :

$$d\Omega = \frac{dS}{R_s^2}$$

où dS est l'aire que découpe le cône sur une sphère de rayon R_s , dont le centre est au sommet du cône.

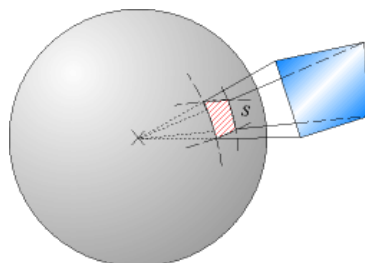


Figure 98 – Angle solide : rapport entre la surface (en rose) de la projection d'un objet (en bleu) sur une sphère et le carré du rayon de celle-ci.

Rayonnement

Les grandeurs énergétiques permettent de caractériser l'intensité des flux et des transferts d'énergie en fonction de la configuration géométrique de la source d'émission et de la surface réceptrice. La grandeur du signal incident sur une surface est appelée éclairement et dépend de la surface qui le reçoit. L'éclairement E est le flux reçu par unité de surface ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) :

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

où Φ est le flux énergétique qui désigne la puissance rayonnée par une source ponctuelle dans toutes les directions.

La luminance L est la puissance rayonnée dans la direction $\vec{d}(\theta, \varphi)$ par unité d'angle solide et par unité de surface de la source projetée dans la direction \vec{d} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$) :

$$L(\theta, \varphi) = \frac{d^2\Phi(\theta, \varphi)}{d\Omega dS \cos \theta}$$

Pour chacune de ces grandeurs physiques, une densité spectrale est définie et la notion de luminance spectrale est utilisée (exprimée en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$).

Réflectance et émissivité

Dans le domaine du VIS au SWIR, le phénomène de réflexion prédomine celui d'émission dans des conditions de température standard des surfaces terrestres. La notion de BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function) est définie, pour décrire la réflexion d'une onde lumineuse sur une surface, en fonction de la direction d'incidence et de la direction réfléchie. Cette fonction met en évidence le fait que la réflectance dépend à la fois de la direction

de la source (\vec{d}_s) et de la direction de visée du détecteur (\vec{d}_v). Ces directions sont définies par les angles zénithaux (θ_s et θ_v) et azimutaux (φ_s et φ_v) (cf. Figure 99). La BRDF est donnée par la formule suivante :

$$BRDF(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v, \lambda) = \frac{dL_v(\theta_v, \varphi_v, \lambda)}{dE_s(\theta_s, \varphi_s, \lambda)}$$

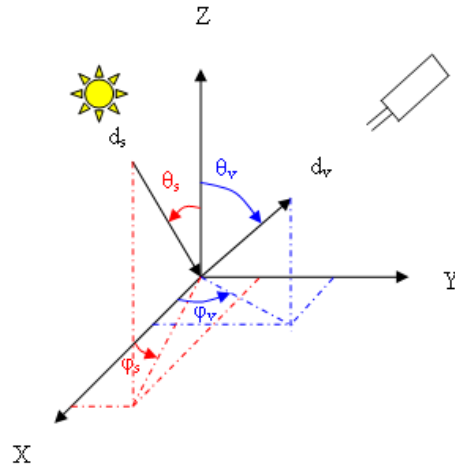


Figure 99 – Définition de la BRDF.

La notion de BRDF permet de définir différents types de réflectance en fonction de l'angle solide du flux incident et réfléchi. Sachant que l'angle solide peut être directionnel ou hémisphérique, sont définies :

- la réflectance bidirectionnelle :

$$\rho^{dd}(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v, \lambda) = \pi \times BRDF(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v, \lambda)$$

- la réflectance directionnelle hémisphérique, qui se déduit de la BRDF par intégration de la luminance réfléchie sur la demi sphère :

$$\rho^{dh}(\theta_s, \varphi_s, \lambda) = \frac{\int L_v(\theta_v, \varphi_v, \lambda) \cos \theta_v d\Omega_v}{dE_s(\theta_s, \varphi_s, \lambda)}$$

- la réflectance hémisphérique directionnelle :

$$\rho^{hd}(\theta_v, \varphi_v, \lambda) = \frac{dL_v(\theta_v, \varphi_v, \lambda)}{\int_{2\pi} E_s(\theta_s, \varphi_s, \lambda) \cos \theta_s d\Omega_s}$$

Dans le cas d'un réflecteur lambertien (surface dont la luminance ne dépend pas de la direction), la valeur de la BRDF est constante quelle que soit la direction.

Dans le domaine du LWIR, le phénomène d'émission prévaut à celui de la réflexion. La loi qui définit le comportement émissif d'un matériau est la loi de Planck ou loi du corps noir. Le corps noir (CN) est un modèle théorique de comportement radiatif, où toute l'énergie accumulée par un objet est transformée en énergie radiative. La loi de Planck (cf. Figure 100) établit la

relation entre la luminance spectrale d'un corps noir et sa température en fonction de la longueur d'onde λ :

$$L_{CN}(\lambda) = \frac{2\pi h c_v^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc_v}{\lambda k T}} - 1 \right)}$$

Où c_v est la vitesse de la lumière : 3.10^8 m.s^{-1} ,

h est la constante de Planck : $6,63.10^{-34} \text{ J.s}$,

k est la constante de Boltzmann : $1,38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$,

T est la température du corps noir en K.

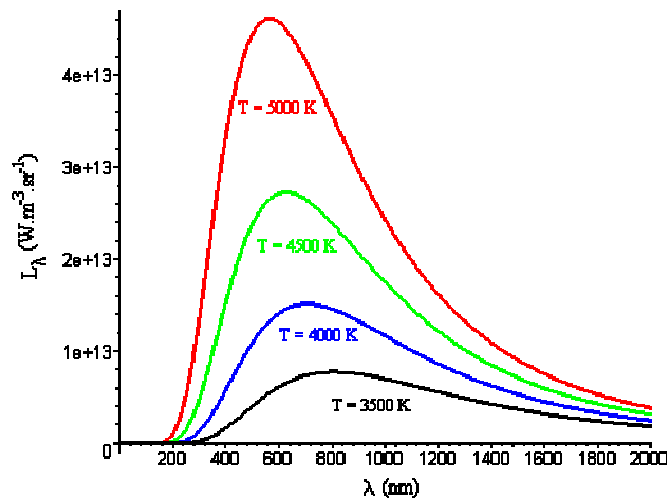


Figure 100 – Loi de Planck.

Les corps naturels ne répondent pas à la définition du corps noir. La notion d'émissivité a été introduite pour caractériser l'émission des corps naturels par référence à celle d'un corps noir de même température. La luminance d'un corps naturel s'écrit :

$$L(\theta, \varphi, \lambda, T) = \varepsilon(\theta, \varphi, \lambda, T) \times L_{CN}(T)$$

Pour un corps opaque à l'équilibre thermodynamique, l'émissivité et la réflectance sont liées par la loi de Kirchhoff :

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - \rho(\lambda) - \tau(\lambda)$$

Annexe IV

Indices spectraux

Principaux indices spectraux du domaine réflectif

Indice	Formule	Nom	Référence
ANIR	α_{NIR1}	Angle at NIR	Khanna (2007)
GVMi	$\frac{(\rho_{NIR} + 0,1) - (\rho_{SWIR} + 0,02)}{(\rho_{NIR} + 0,1) + (\rho_{SWIR} + 0,02)}$	Global Vegetation Moisture Index	Ceccato (2002)
MSAVI	$2\rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_R) \cdot 2^{-1}}$	Modified Soil Adjusted Vegetation Index	Bannari (1997)
MSI	$\frac{\rho_{SWIR}}{\rho_{NIR}}$	Moisture Stress Index	Bryant (2003)
NDVI	$\frac{\rho_{SWIR} - \rho_R}{\rho_{SWIR} + \rho_R}$	Normalized Difference Vegetation Index	Bogonko (2005)
NDWI	$\frac{\rho_{SWIR} - \rho_{NIR1}}{\rho_{SWIR} + \rho_{NIR1}}$	Normalized Difference Water Index	Khanna (2007)
NSMI	$\frac{\rho_{1,8} - \rho_{2,119}}{\rho_{1,8} + \rho_{2,119}}$	Normalized Soil Moisture Index	Haubrock (2008a)
SANI	$\beta_{SWIR1} \cdot \frac{\rho_{SWIR2} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR2} + \rho_{NIR}}$	Shortwave Angle Normalized Index	Khanna (2007)
SASI	$\beta_{SWIR1} \cdot (\rho_{SWIR2} - \rho_{NIR})$	Shortwave Angle Slope Index	Khanna (2007)
SAVI	$(1 + L) \cdot \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$	Soil Adjusted Vegetation Index	Bogonko (2005)
SIWSI	$\frac{\rho_{SWIR2} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR2} + \rho_{NIR}}$	Shortwave Infrared Water Stress Index	Khanna (2007)
SRWI	$\frac{\rho_{0,858}}{\rho_R}$	Simple Ratio Water Index	Zarco (2003)
TSAVI	$\frac{a \cdot (\rho_{NIR} - a \cdot \rho_R - b)}{\rho_R + a \cdot \rho_{NIR} - a \cdot b + 0,08(1 + a^2)}$	Transformed Soil Adjusted Vegetation Index	Bannari (1997)
WI	$\frac{\rho_{0,9}}{\rho_{0,97}}$	Water Index	Jones (2004)
WISOIL	$\frac{\rho_{1,45}}{\rho_{1,3}}$	WISOIL	Bryant (2003)

Lexique des termes introduit

Terme	Définition	Valeur
ρ_i	Réflectance à la longueur d'onde i en μm	-
ρ_V	Réflectance moyenne de la bande V	-
ρ_R	Réflectance moyenne de la bande R	-
ρ_{NIR}	Réflectance moyenne de la bande NIR	-
ρ_{NIR1}	Réflectance moyenne de la bande 2 de MODIS (0,84 – 0,87 μm)	-
ρ_{SWIR}	Réflectance moyenne de la bande SWIR	-
ρ_{SWIR1}	Réflectance moyenne de la bande 5 de MODIS (1,23 – 1,25 μm)	-
ρ_{SWIR2}	Réflectance moyenne de la bande 6 de MODIS (1,63 – 1,65 μm)	-
β_{SWIR1}	Angle entre ρ_{NIR1} - ρ_{SWIR1} - ρ_{SWIR2}	-
α_{NIR1}	Angle entre ρ_R - ρ_{NIR1} - ρ_{SWIR1}	-
a et b	Pente et ordonnée à l'origine de la droite des sols nus	$\rho_{NIR} = a \cdot \rho_R + b$
λ_V	Longueur d'onde centrale de la bande V	0,54 μm
λ_R	Longueur d'onde centrale de la bande R	0,66 μm
λ_{NIR}	Longueur d'onde centrale de la bande NIR	0,89 μm
L	Facteur d'ajustement	1 pour sol nu; 0,5 pour peu de végétation; 0 pour végétation dense.

Annexe V

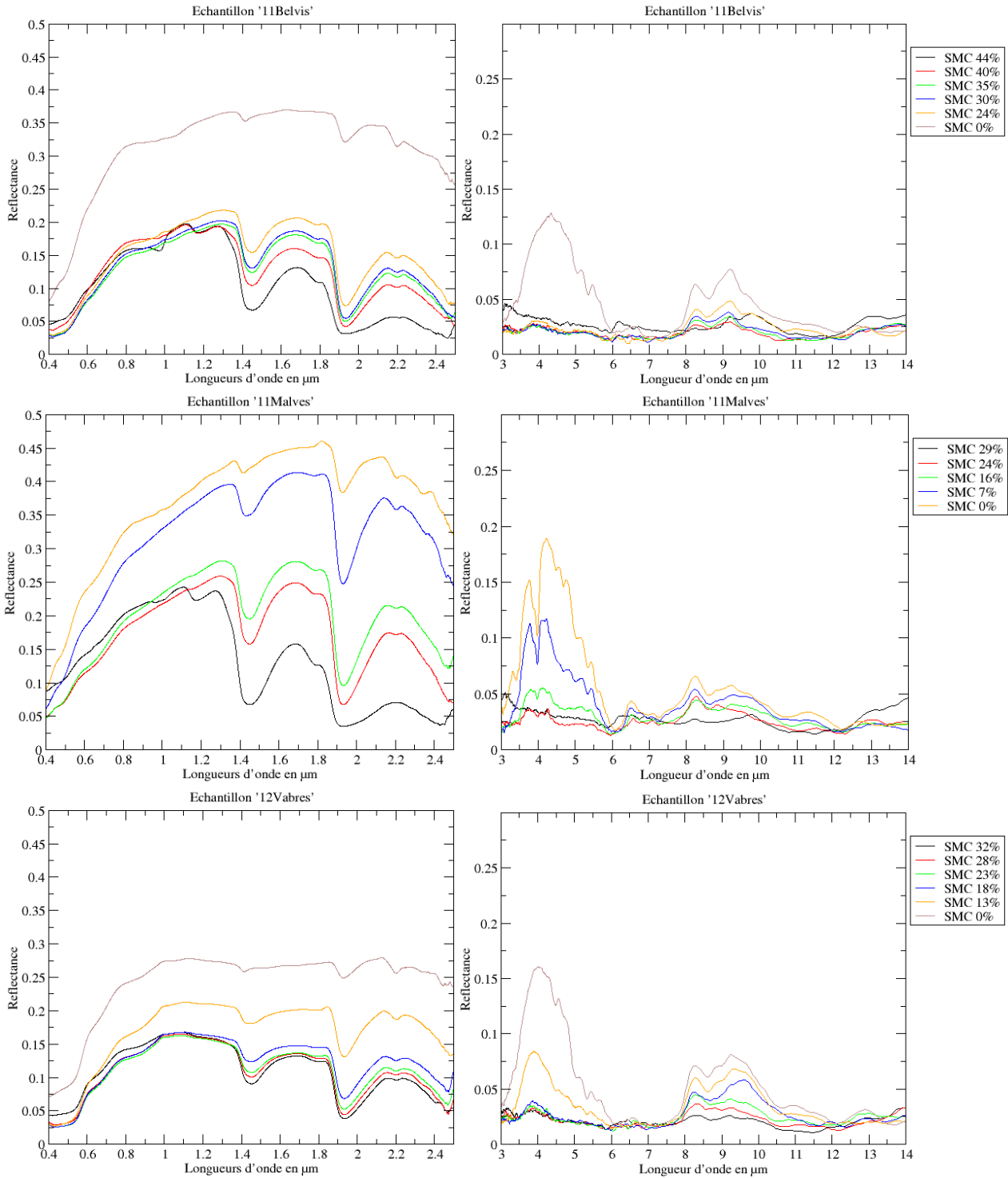
Mesures de laboratoire

Contenus en eau (SMC_g) gravimétriques (%_g) associés aux mesures de signatures spectrales

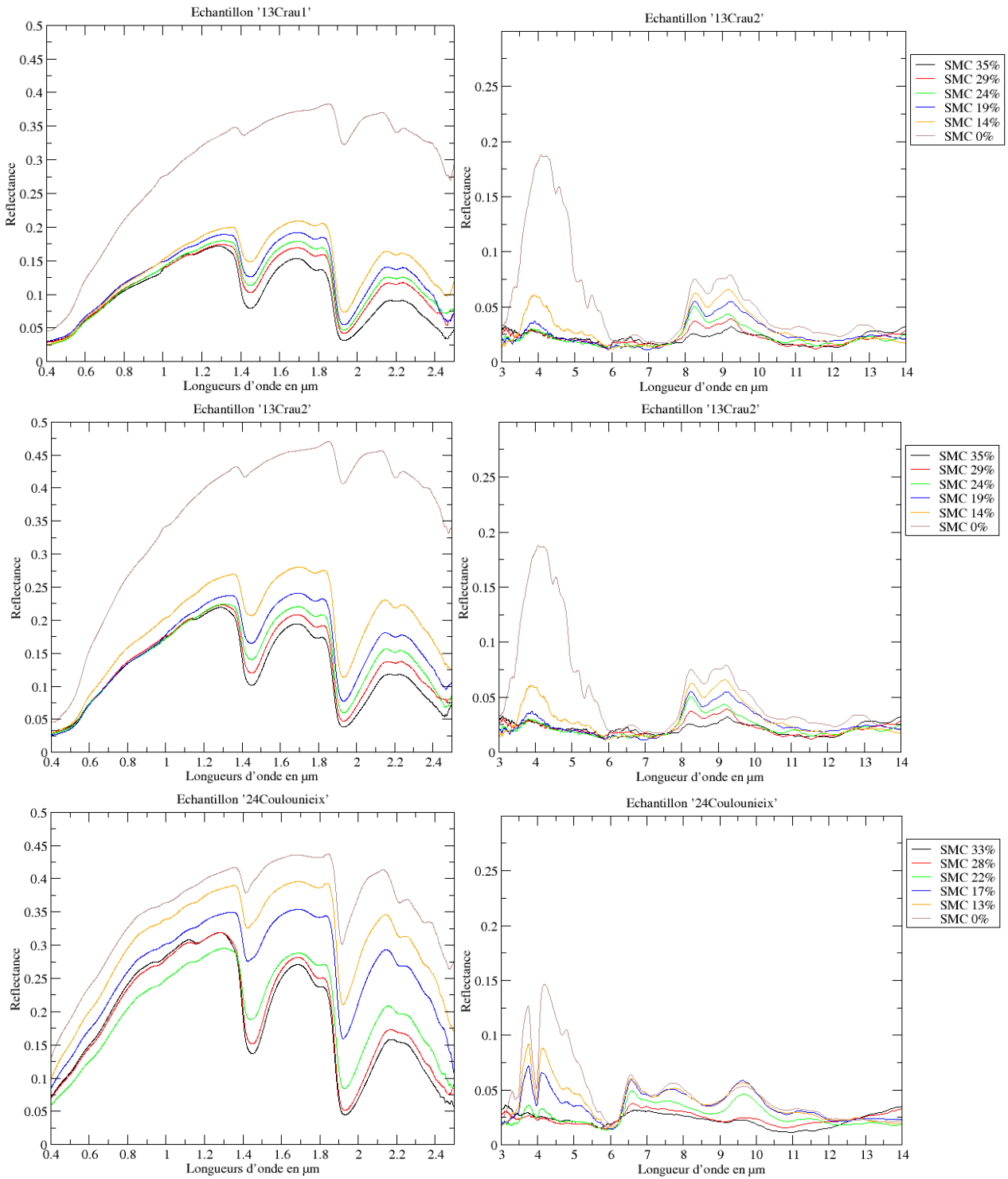
Echantillons	SMC1	SMC2	SMC3	SMC4	SMC5	SMC6
<i>11Belvis</i>	44	40	35	30	24	0
<i>11Malves</i>	29	24	16	7	0	-
<i>12Vabres</i>	32	28	23	18	13	0
<i>13Crau1</i>	39	34	29	24	18	0
<i>13Crau2</i>	35	29	24	19	14	0
<i>24Coulounieix</i>	33	28	22	17	13	0
<i>30BleA</i>	36	31	26	21	15	0
<i>30BleB</i>	40	35	31	25	18	0
<i>30BleC</i>	37	34	29	23	18	0
<i>30LuzerneA</i>	36	31	26	21	16	0
<i>30LuzerneB</i>	33	28	23	17	11	0
<i>30LuzerneC</i>	33	30	25	20	15	0
<i>30PrairieA</i>	45	41	36	31	26	0
<i>30PrairieB</i>	47	43	39	35	30	0
<i>30PrairieC</i>	46	42	38	33	28	0
<i>30Pujaut</i>	23	16	10	6	4	0
<i>30SolNuA</i>	36	31	25	20	15	0
<i>30SolNuB</i>	35	31	26	21	16	0
<i>30SolNuC</i>	30	26	20	14	9	0
<i>30SolNuLabA</i>	35	31	27	23	18	0
<i>30SolNuLabB</i>	32	29	24	19	14	0
<i>30SolNuLabC</i>	33	29	24	18	13	0
<i>30VigneA</i>	32	27	21	16	11	0
<i>30VigneB</i>	30	26	21	16	12	0
<i>30VigneC</i>	34	31	26	21	16	0
<i>31FaugaSmos</i>	32	27	20	12	5	0
<i>31FaugaX1</i>	34	29	22	15	8	0
<i>31Sorgho</i>	33	29	24	19	13	0
<i>31Tournesol</i>	30	26	20	14	10	0
<i>81Lautrec</i>	31	27	22	17	0	-
<i>81StJulien</i>	30	26	21	16	10	0
<i>84Avignon</i>	25	21	16	12	7	0

Spectres de réflectances acquis dans les domaines réflectif et IRT

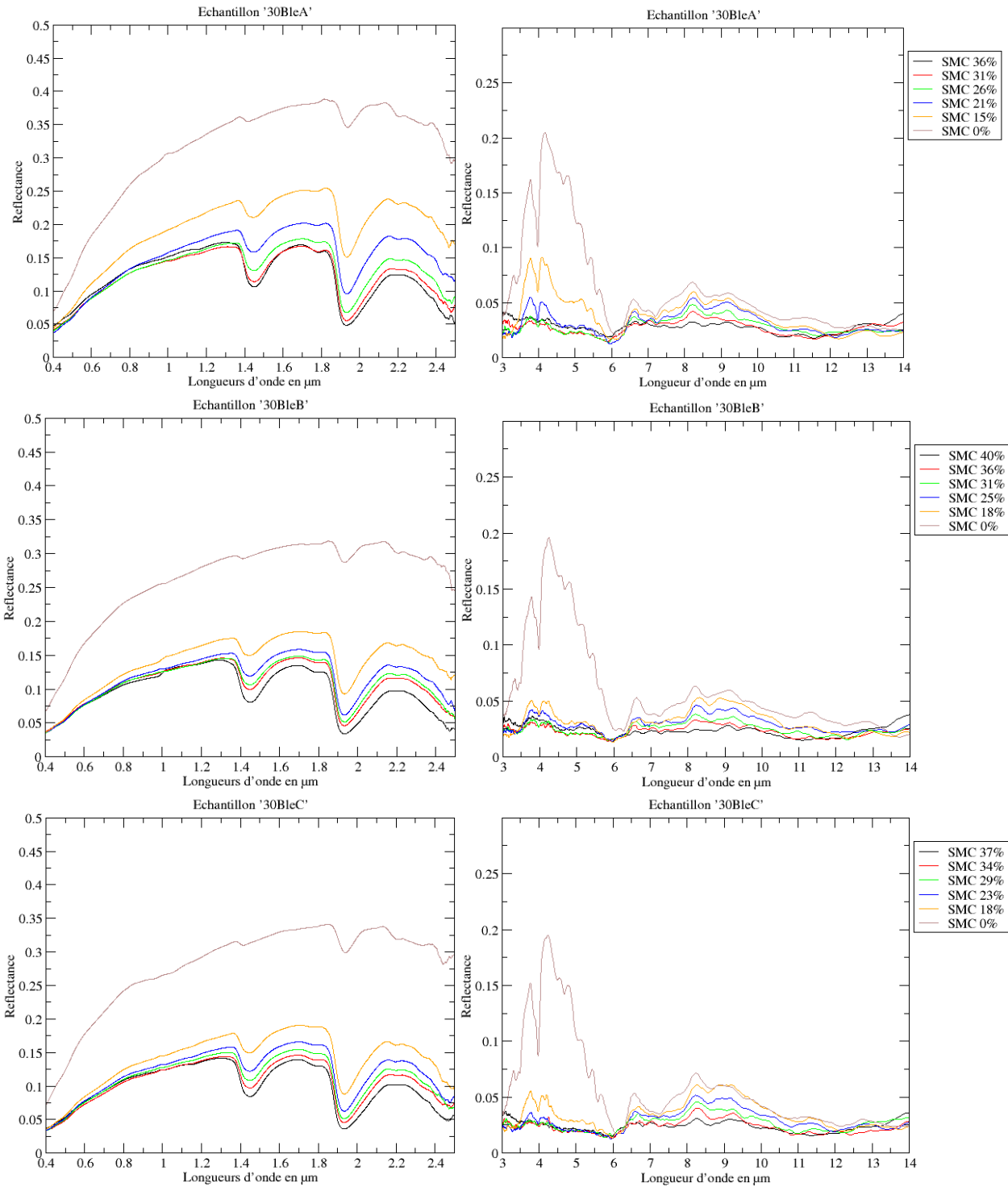
- 11Belvis à 12Vabres -

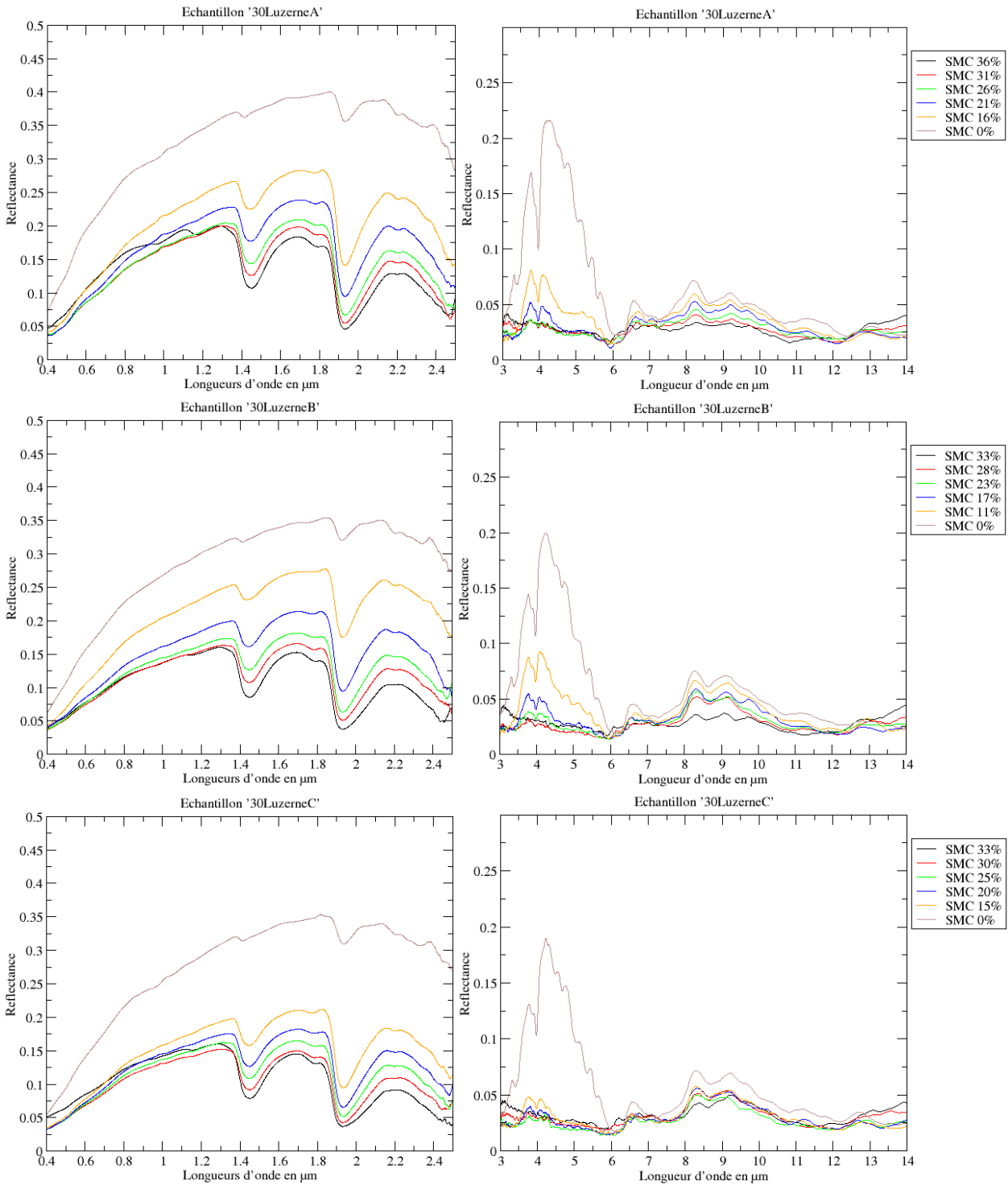


- 13Crau1 à 24Coulounieix -

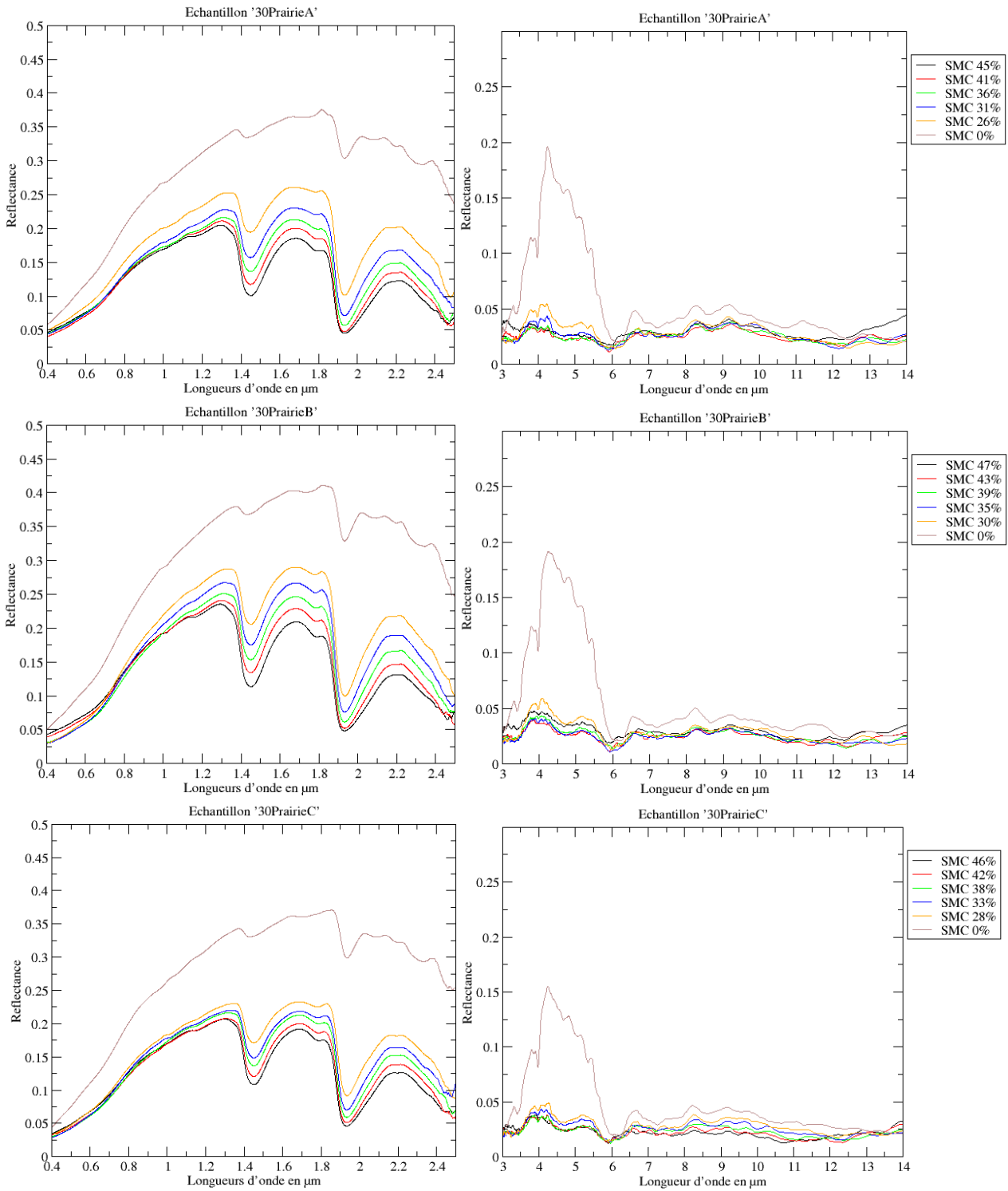


- 30BleA à 30BleC -

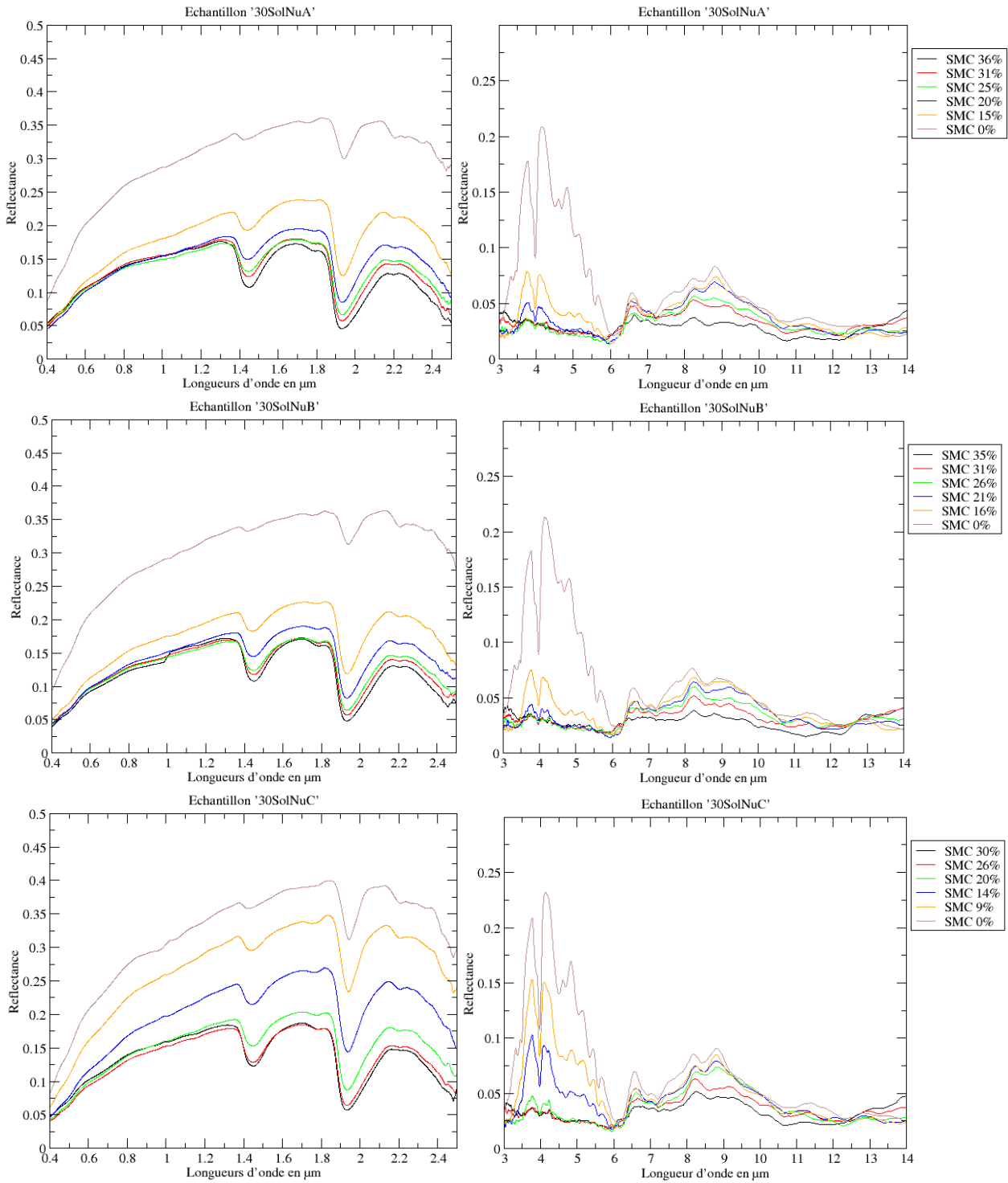


- 30LuzerneA à 30LuzerneC -

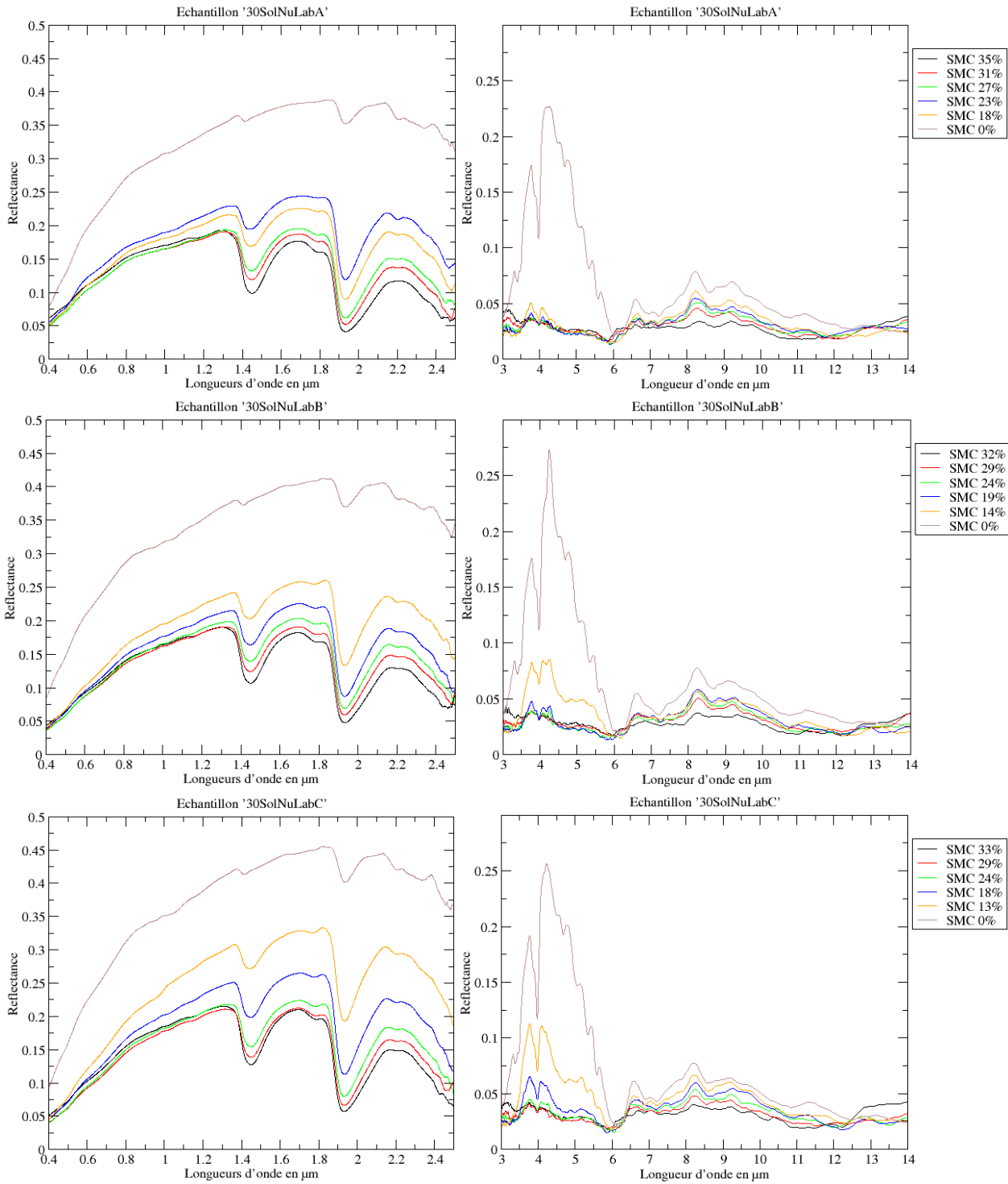
- 30PrairieA à 30PrairieC -



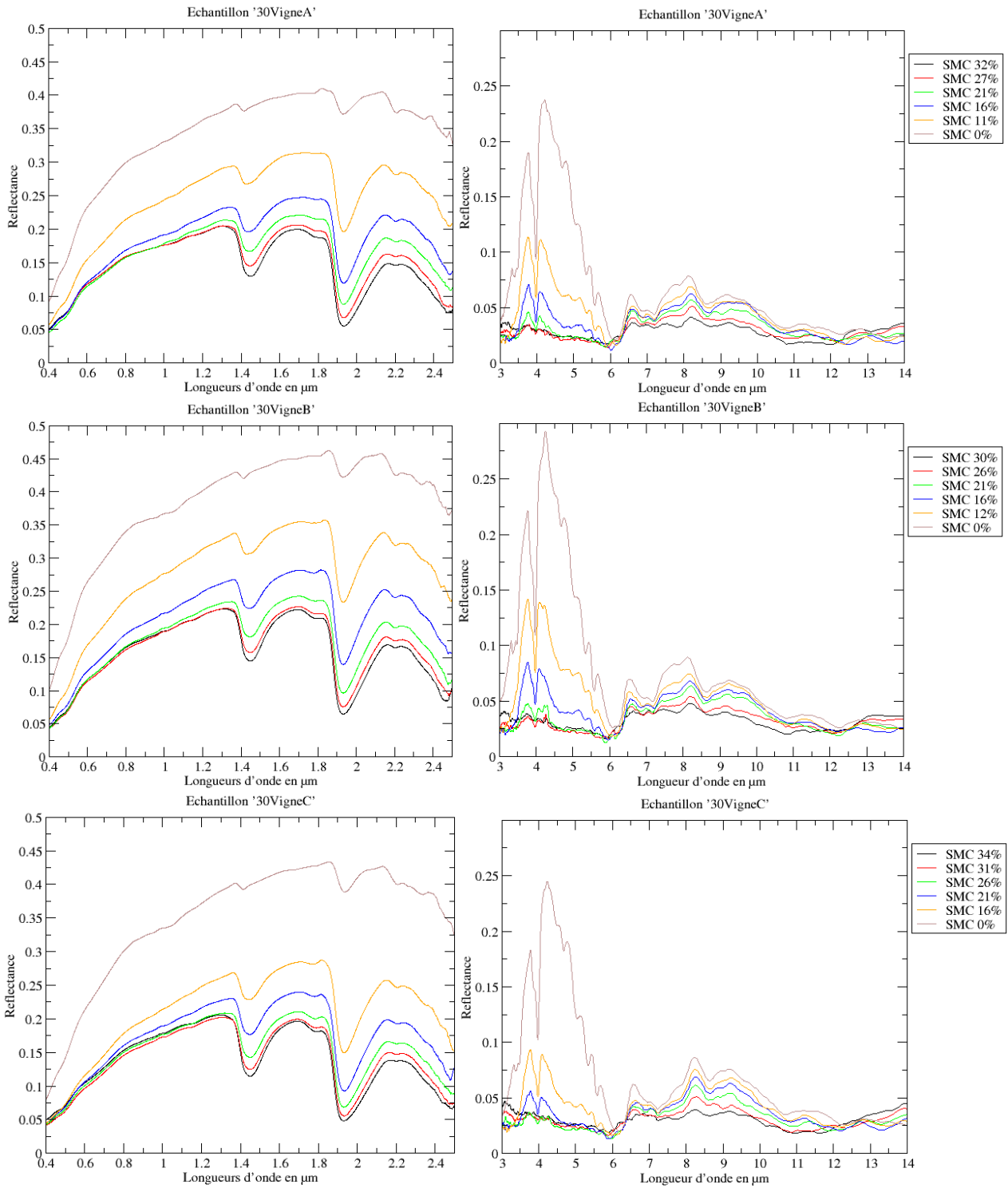
- 30SolNuA à 30SolNuC -



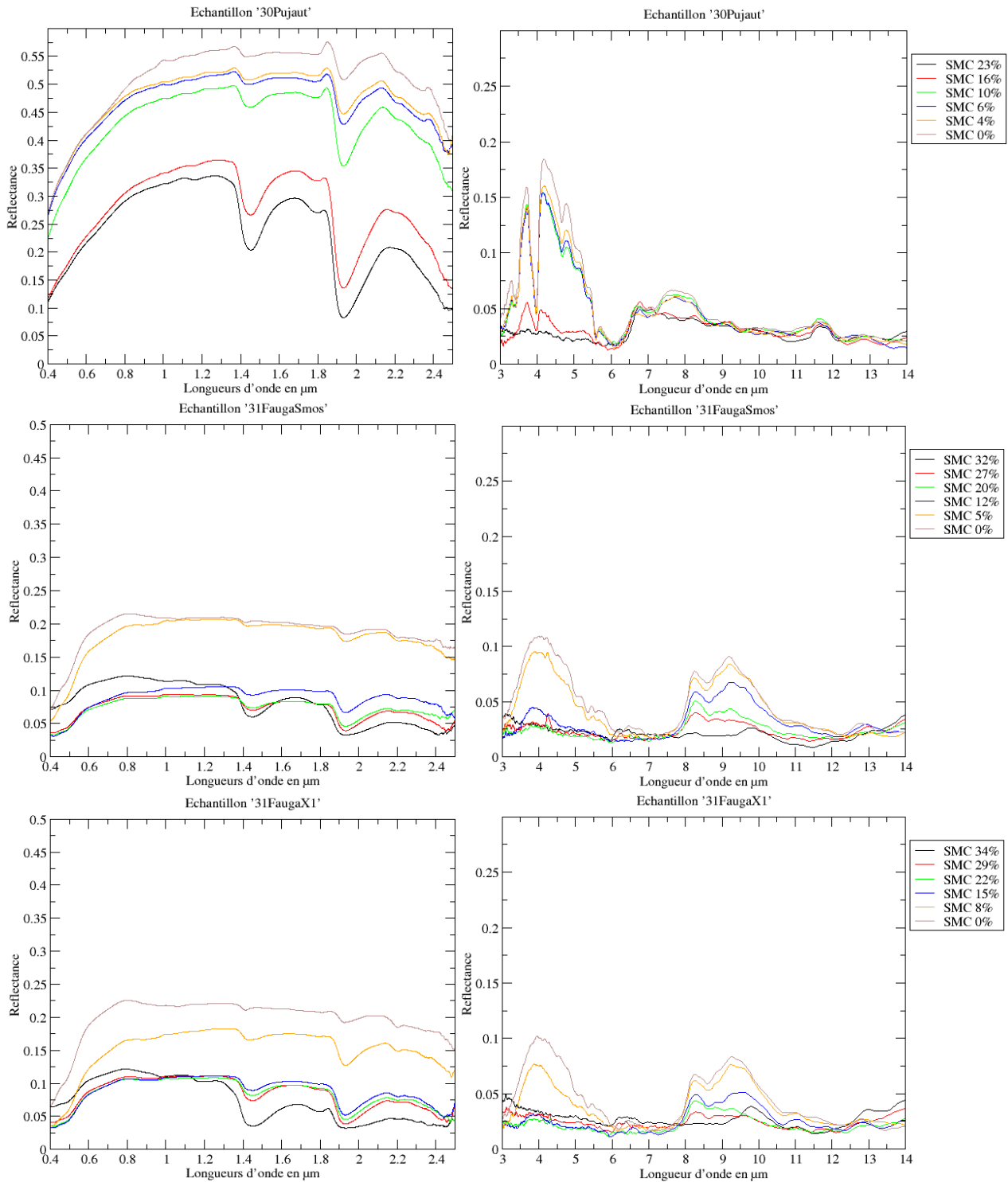
- 30SolNuLabA à 30SolNuLabC -



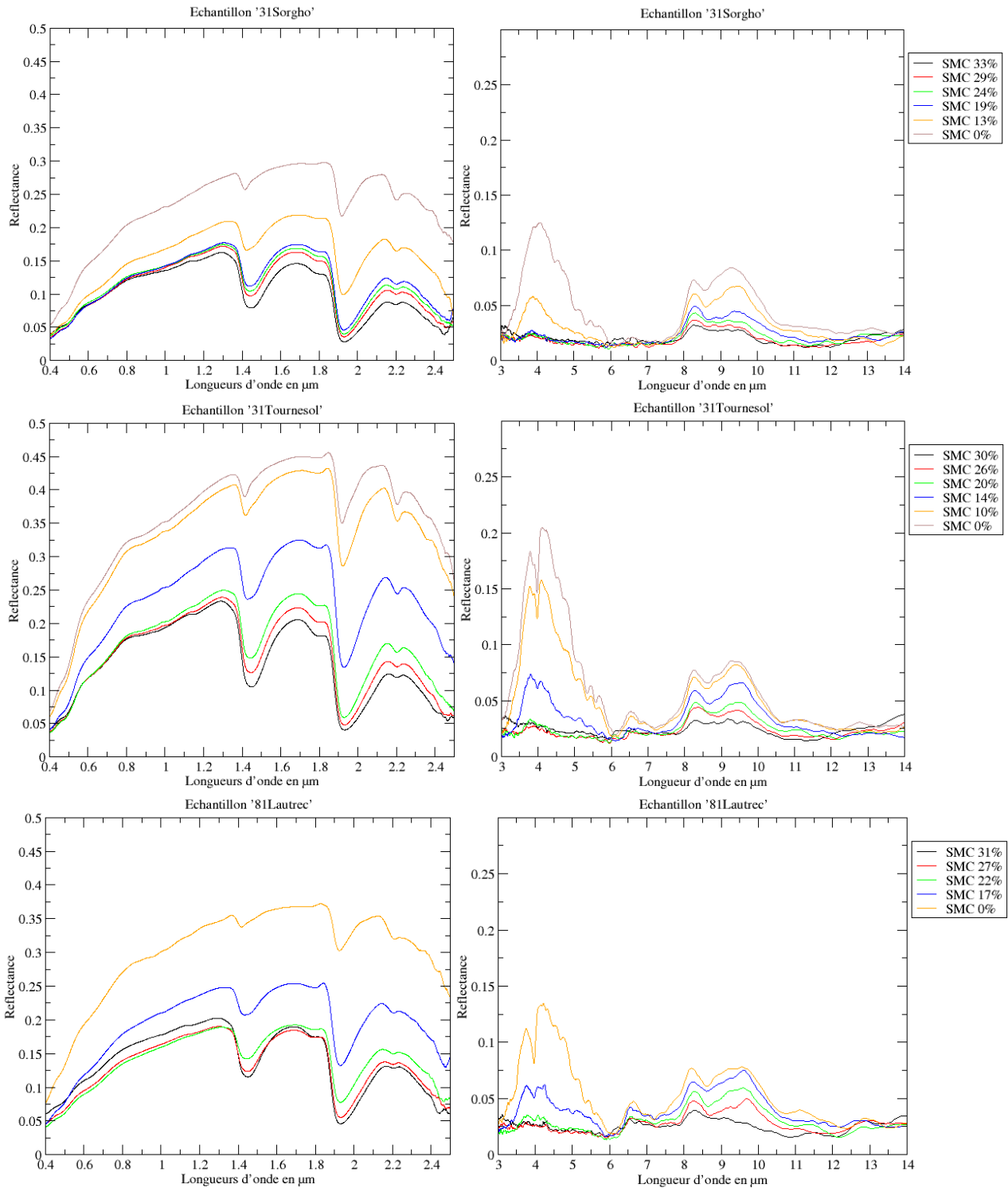
- 30VigneA à 30VigneC -



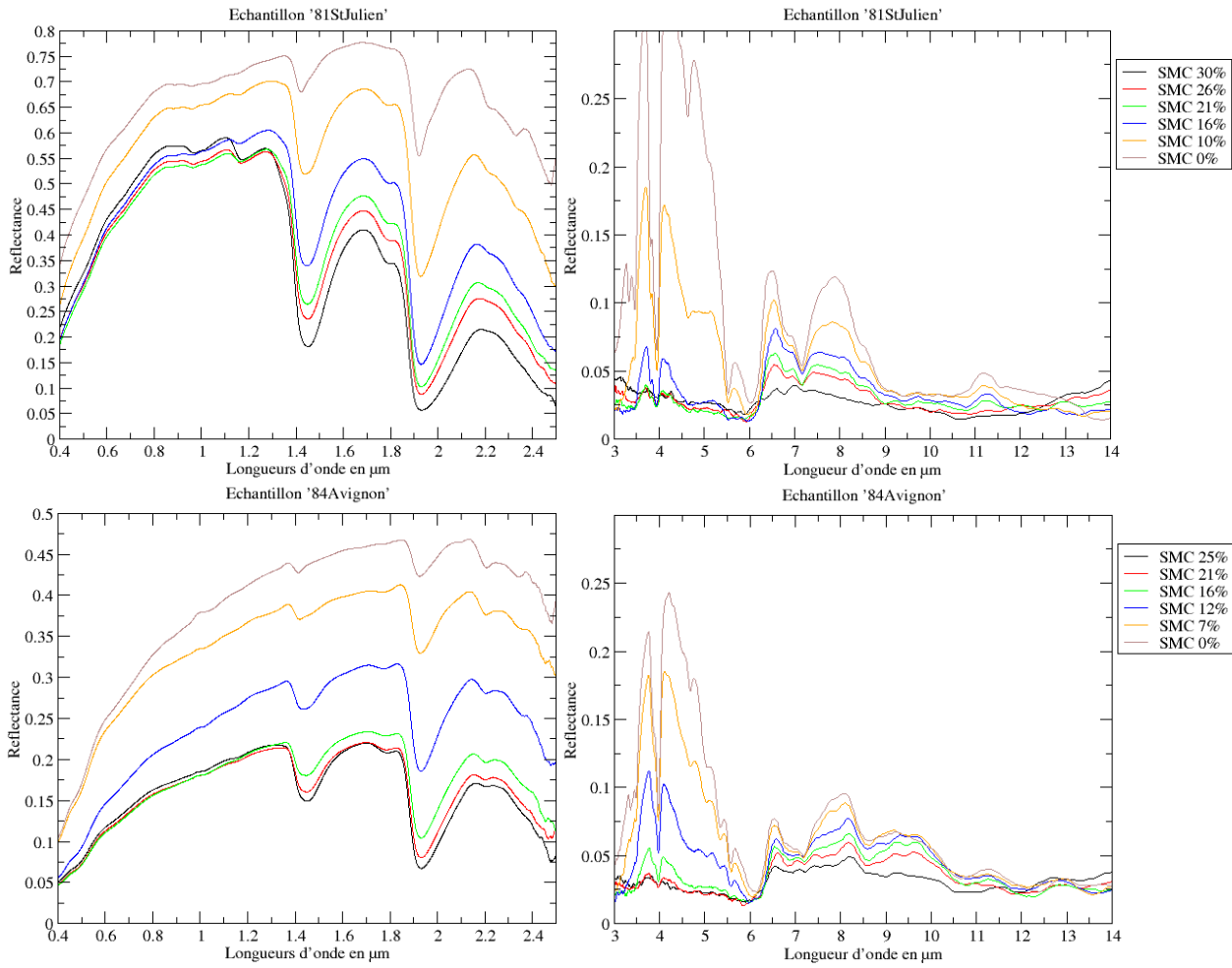
- 30Pujaut à 31FaugaX1 -



- 31Sorgho à 81Lautrec -



- 81StJulien à 84Avignon -



Annexe VI

Matrices de corrélation

Etudier la corrélation entre deux ou plusieurs variables revient à analyser l'intensité de la liaison qui peut exister entre ces variables. Cet outil permet alors de définir le meilleur couple de longueurs d'onde sensible au contenu en eau du sol dans les domaines réflectif et IRT.

A partir d'un spectre de réflectance, une grandeur (du type indice spectral) est calculée pour tous les couples de longueurs d'onde (λ_i, λ_j) . Cette grandeur est évaluée pour plusieurs spectres correspondants à différentes valeurs de SMC. Ensuite, pour chaque couple de longueur d'onde, la corrélation est établie entre les valeurs de SMC et cette grandeur. Les coefficients de déterminations R^2 , carrés des coefficients de corrélation (cf. Annexe II), s'inscrivent alors dans une matrice de corrélation symétrique (cf. Figure 101) où seulement la moitié des couples de longueurs d'onde sont représentés.

La Figure 101 fournit un exemple de matrice de corrélation calculée à partir de spectres de référence mesurés sur un échantillon de sol pour une grandeur représentant un rapport normalisé. Les couples de longueurs d'onde présentant les valeurs les plus élevées de R^2 sont alors retenus pour définir de nouveaux indices spectraux.

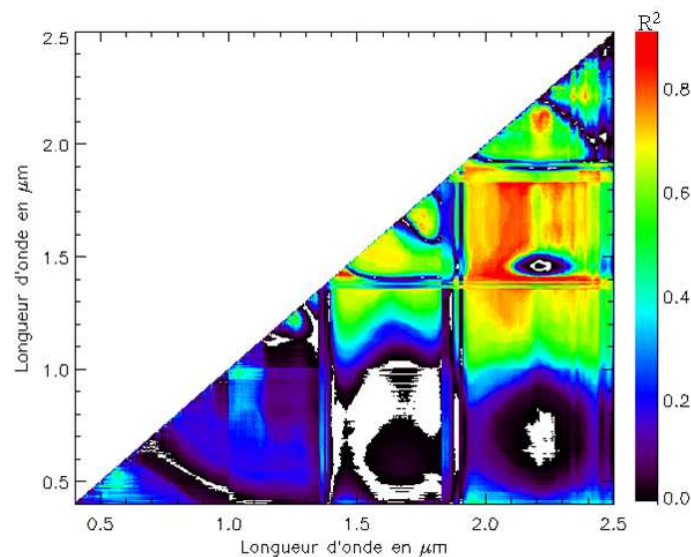


Figure 101 – Illustration d'une matrice de corrélation calculée sur un échantillon de sol nu dans le réflectif.

Annexe VII

Mesures de terrain

Contenus en eau (SMC_v) volumiques (%_v) mesurés sur le terrain

Notation : N_Ti_pj où N est le numéro du point levé ; i le numéro de transect et j le numéro de parcelle.

- Parcelle n°1 -

Point	SMC	Spectre	Latitude (Nord)	Longitude (Est)
1_T1_p1	0,06	oui	43°45'07.4"	4°26'45.1"
2_T1_p1	4,5	oui	43°45'07.5"	4°26'45.3"
3_T1_p1	3	oui	43°45'07.7"	4°26'45.4"
4_T1_p1	10,7	oui	43°45'07.8"	4°26'45.5"
5_T1_p1	7,5	oui	43°45'07.9"	4°26'45.6"
6_T1_p1	6,8	oui	43°45'08.1"	4°26'45.6"
1_T2_p1	4,9	oui	43°45'07.3"	4°26'45.5"
2_T2_p1	4,7	oui	43°45'07.6"	4°26'45.6"
3_T2_p1	4,6	oui	43°45'07.7"	4°26'45.7"
4_T2_p1	10,3	oui	43°45'07.8"	4°26'45.8"
5_T2_p1	5,8	oui	43°45'08.0"	4°26'45.9"
6_T2_p1	5,8	oui	43°45'08.1"	4°26'45.9"
1_T3_p1	2,1	oui	43°45'07.4"	4°26'45.8"
2_T3_p1	5,7	oui	43°45'07.6"	4°26'45.8"
3_T3_p1	5	oui	43°45'07.6"	4°26'46.0"
4_T3_p1	2,5	oui	43°45'07.8"	4°26'46.0"
5_T3_p1	4,5	oui	43°45'07.9"	4°26'46.0"
6_T3_p1	7,3	oui	43°45'08.0"	4°26'46.2"
1_T4_p1	9,1	oui	43°45'07.3"	4°26'46.1"
2_T4_p1	6,8	oui	43°45'07.4"	4°26'46.0"
3_T4_p1	5,5	oui	43°45'07.6"	4°26'46.2"
4_T4_p1	5,1	oui	43°45'07.7"	4°26'46.2"
5_T4_p1	3,2	oui	43°45'07.8"	4°26'46.4"
6_T4_p1	5,5	oui	43°45'07.9"	4°26'46.4"
1_T5_p1	3,1	oui	43°45'07.2"	4°26'46.3"
2_T5_p1	7,7	oui	43°45'07.4"	4°26'46.3"
3_T5_p1	6,4	oui	43°45'07.5"	4°26'46.5"
4_T5_p1	9,3	oui	43°45'07.7"	4°26'46.5"
5_T5_p1	3,8	oui	43°45'07.8"	4°26'46.6"
6_T5_p1	3,9	oui	43°45'08.0"	4°26'46.7"
1_T1_p2	16,9	oui	43°45'07.0"	4°26'48.9"
2_T1_p2	19,7	oui	43°45'07.1"	4°26'48.9"
3_T1_p2	23,7	oui	43°45'07.3"	4°26'48.9"
4_T1_p2	12,8	oui	43°45'07.5"	4°26'49.1"
5_T1_p2	25,1	oui	43°45'07.6"	4°26'49.2"
6_T1_p2	24,3	oui	43°45'07.8"	4°26'49.3"

- Parcelle n°2 -

Point	SMC	Spectre	Latitude (Nord)	Longitude (Est)
1_T1_p2	16,9	oui	43°45'07.0"	4°26'48.9"
2_T1_p2	19,7	oui	43°45'07.1"	4°26'48.9"
3_T1_p2	23,7	oui	43°45'07.3"	4°26'48.9"
4_T1_p2	12,8	oui	43°45'07.5"	4°26'49.1"
5_T1_p2	25,1	oui	43°45'07.6"	4°26'49.2"
6_T1_p2	24,3	oui	43°45'07.8"	4°26'49.3"
1_T2_p2	8	oui	43°45'07.1"	4°26'49.2"
2_T2_p2	6,5	oui	43°45'07.1"	4°26'49.3"
3_T2_p2	5,9	oui	43°45'07.3"	4°26'49.3"
4_T2_p2	9,7	oui	43°45'07.4"	4°26'49.4"
5_T2_p2	20,6	oui	43°45'07.6"	4°26'49.5"
6_T2_p2	9,8	oui	43°45'07.9"	4°26'49.5"
1_T3_p2	3,4	non	43°45'07.1"	4°26'49.4"
2_T3_p2	2,8	non	43°45'07.3"	4°26'49.6"
3_T3_p2	0,1	non	43°45'07.4"	4°26'49.7"
4_T3_p2	2,9	non	43°45'07.6"	4°26'49.8"
5_T3_p2	0,1	non	43°45'07.8"	4°26'49.9"
6_T3_p2	3,1	non	43°45'08.1"	4°26'50.0"

Annexe VIII

Travaux sur les feuilles

IEEE GEOSCI. REMOTE SENS. LETT.

Influence of Water Content on Spectral Reflectance of Leaves in the 3–15- μm Domain

Sophie Fabre, Audrey Lesaignoux, Albert Olioso, and Xavier Briottet

Abstract—This letter describes a laboratory experiment where reflectance signatures of three plant species are measured at a leaf level in the 3–15- μm spectral domain. The leaf samples are progressively dried in order to analyze the behavior of their spectral signature according to the variations in their water content. Our first objective aims to underline leaf water content (LWC) impact on the spectral signatures. This work is a necessary step toward further studies dealing with interpretation of multispectral remote sensing data or estimation of water stress and energy budget. The drying process and measurement method are detailed. This letter deals with dry and fresh leaves (as found in literature) and considers intermediate water content levels as well. For intermediate LWC levels, our analysis outlines some important results: The spectral domain may be divided into two parts, namely, 3–5.5 and 5.5–15 μm , each corresponding to different impacts of LWC variation; both sides of a cherry tree leaf have not the same behavior according to the water content amount; and, in the 8–15- μm , the drying process impacts when the LWC becomes lower than a threshold value (around 30%).

Index Terms—Leaf, optical properties, spectral reflectance, thermal infrared domain, water content.

1. INTRODUCTION

THE IMPACT of leaf water content (LWC) on leaf reflectance has been widely documented in the 0.4–2.5- μm solar spectrum for a long time [1]. It has been shown that the shortwave infrared (1.4–2.5 μm) is strongly influenced by the water in plant tissue, particularly at 1.45 and 1.94 μm . Radiometric measurements in this domain have been suggested for estimating vegetation water content [2]. Conversely, little information is available for larger wavelengths situated in the 3–20 μm range. However, this information can be helpful for remote sensing interpretation of land surface and atmospheric studies (for example, in the 7–15- μm range [3] or around 4.7 μm [4]). Only few measurements of leaf spectral reflectance and emissivity were presented in the past

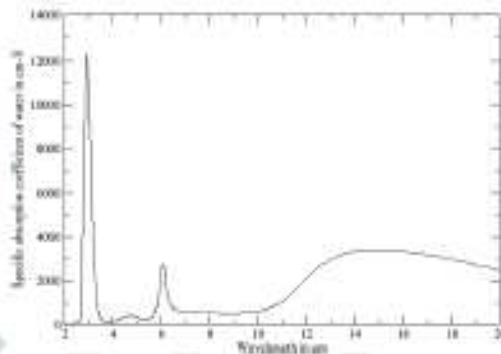


Fig. 1. Specific absorption coefficient of water. Redrawn from [11].

[5]–[10]. Moreover, these measurements considered fresh or fully dried leaves only. Intermediate moisture levels (that means variation of leaf reflectance as a function of water content) were not considered. These measurements showed that the differences between wet and dry leaf reflectances in the 7–15- μm spectral range are limited in comparison to those in the 1.4–2.5- μm range. Similar differences between wet and dry leaf reflectances are expected in the 3–6- μm window [10]. These low differences may be explained by the high absorption characteristics of the other leaf materials which limit the effect of water. As shown in Fig. 1, the absorption coefficient of water is usually very high, which is above 2.5 μm with fundamental molecular vibrations of water located at 2.86, 3.05, and 6.08 μm [11].

Furthermore, active mid-infrared backscatter characteristics of various agricultural crop leaves were measured at different wavelengths in the 9–11- μm spectral domain. Both copolarized and cross-polarized reflectance dependences on leaf moisture were analyzed by Narayanan *et al.* [12]. They pointed out the interest of using this range to study the impact of leaf moisture. However, these works were based on directional active measurements, and their results cannot be transposed to the analysis of remote sensing data which are currently limited to passive acquisitions and which are not obtained in the same geometrical conditions.

In order to analyze the impact of LWC on spectral reflectance, we conducted a laboratory experiment. Spectral reflectances were measured over the entire thermal infrared spectral domain between 3 and 15 μm for leaves which were progressively dried. The analysis of these laboratory measurements is provided for the middle infrared (3–5 μm) and the long-wave infrared (LWIR; 5.5–15 μm) domains.

Manuscript received September 28, 2009; revised February 3, 2010 and April 8, 2010; accepted April 13, 2010. This work was supported in part by the PSE ENVIRO Program (internal federative project lead at the Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques (ONERA)) and in part by the Institut National des Sciences de l'Univers through the French National Program for Spatial Remote Sensing (PNTS).

S. Fabre and X. Briottet are with ONERA, 31055 Toulouse, France (e-mail: Sophie.Fabre@onera.fr; Xavier.Briottet@onera.fr).

A. Lesaignoux is with ONERA, 31055 Toulouse, France, and also with the Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, Université de Toulouse, 31055 Toulouse, France (e-mail: Audrey.Lesaignoux@onera.fr).

A. Olioso is with the Environnement Modélisation et Modélisation des Agro-Hydrosciences, Unité Mixte de Recherche 1114, Institut National de la Recherche Agronomique, 84914 Avignon, France (e-mail: olioso@avignon.inra.fr).

Digital Object Identifier 10.1109/LGRS.2010.2053518

AQ1
AQ2
AQ3
AQ4
AQ5
AQ6
AQ7
AQ8
AQ9

69 AQ10

70 First, a laboratory measurement method and the acquired
71 spectral reflectance at several water contents are described in
72 Section II. Results are then analyzed in Section III. Discussions
73 will follow in Section IV. Finally, conclusions and perspectives
74 are given in Section V.

75 II. METHOD AND MEASUREMENTS

76 A. Overview of the Measurement Sequence and the 77 Drying Process

78 The effect of water content on leaf optical properties was in-
79 vestigated for three plant species: one monocotyledon, namely,
80 sorghum (*Sorghum bicolor*), and two dicotyledons, namely,
81 sunflower (*Helianthus annuus*) and cherry tree (*Prunus avium*).
82 A preliminary visual analysis showed that their leaves differed
83 by their thickness, color, surface composition (waxes of abaxial
84 leaves of *Prunus* was more visually apparent), and roughness.
85 All samples were collected in agricultural fields near Toulouse
86 (France) during summer 2006. Branch and plants selected for
87 their good health and physiologic conditions were collected and
88 stored in a fresh environment for an efficient conservation. Be-
89 cause of instrumental constraints, a part of leaf was sampled for
90 each species before proceeding to the spectral measurements.

91 In order to measure the reflectance spectra at different mois-
92 ture levels, successive LWCs were obtained by progressively
93 drying the leaf samples in a laboratory oven (Sapratin brand).
94 In order to avoid leaf rolling, the oven temperature was set
95 to 60 °C, the drying time was limited to 30 min, and a rigid
96 perforated sheet was put on the sample during the drying
97 (experimental conditions inferred by preliminary tests). Thus,
98 spectral reflectances of each leaf sample were measured at a
99 minimum of five LWC levels. In order to obtain fully dried
100 leaves, the samples were put in the oven for a period of 24 h
101 between the two last spectral measurements. At each drying
102 step, the reflectance spectrum of the leaf sample was measured
103 using a spectrometer operating in the 3–15- μm range. In or-
104 der to control the leaf moisture variations during the spectral
105 measurements and to provide an accurate moisture assessment,
106 the sample was weighed before and after each acquisition of
107 reflectance data. The spectra were always measured using the
108 same leaf on both sides for each species, as well as the same
109 location on the leaf. The spatial variability within the leaf was
110 not investigated. The dissimilar spectral behaviors are presented
111 in the next paragraph.

112 B. Measurement of LWC

113 Leaf weights were measured using a laboratory scale with
114 100- μg accuracy. The LWC (in percent) was deduced from
115 dry (m_D) and wet (m_W) weights according to the following
116 relation: $LWC = 100 (m_W - m_D)/m_W$. The weight m_D
117 of the fully dried sample was obtained after 24 h of drying
118 (assuming that residual LWC was 2% [13]).

119 C. Measurement of Spectral Reflectances

120 In the 3–15- μm domain, spectral reflectances were directly
121 measured with a Fourier transform infrared instrument: Bruker

122 Equinox 55 spectrometer (<http://www.brukeroptics.com/>). Ow-
123 ing to several mercury-cadmium-telluride detectors, which
124 were cooled with liquid nitrogen (77 K) in order to reduce ther-
125 mal noise, it made it possible to scan with a waveband of 7000
126 to 370 cm^{-1} , i.e., from 1.4 to 27 μm , with a standard spectral
127 resolution better than 0.5 cm^{-1} . One measure resulted from
128 the average of 256 acquisitions (scans) done with an 8- cm^{-1}
129 resolution (providing a noise level less than 2% [14]). In
130 order to keep a good signal-to-noise ratio, only the 3–15- μm
131 range was used. The instrument was set using an Infragold
132 integration sphere, with a 127-mm diameter, and measured
133 directional-hemispherical reflectances. The sphere was purged
134 to remove carbon dioxide and water vapor. The angle of the
135 incident beam was 13°. Under this sphere, the sample size had
136 a minimum diameter of 36 mm. Due to the long duration of the
137 measurement sequence, we limited our measures to only one
138 sample per species. The reflectance was obtained by comparing
139 the measurement to an Infragold diffuse reference (annually
140 certified by Labsphere).

141 III. RESULTS: MEASURED SPECTRA AT 142 SEVERAL WATER CONTENTS

143 A. Fresh Leaf Samples

144 Fig. 2 shows the spectral reflectances acquired in the
145 3–15- μm domain for different LWCs. For fresh leaves, the
146 spectral reflectance levels were low and ranged between
147 0.02 and 0.07. The sunflower leaf sample exhibited weaker
148 spectral reflectance levels than those related to cherry tree and
149 sorghum leaf samples. The behaviors of both leaf sides were
150 dissimilar for the cherry tree leaf sample (see spectral ranges
151 3–5 and 8–10 μm in Fig. 2).

152 In the middle infrared domain, i.e., 3–5.5 μm , our measure-
153 ments were similar to spectra of typical green foliage measured
154 by Salisbury and D'Arta [9], with low reflectance due to intense
155 leaf water absorption [5] (Fig. 1). In this spectral domain,
156 leaf samples had similar global behaviors with two apparent
157 maxima around 4 and 5.2 μm , due to cellulose absorption for
158 dry leaves and water absorption at 4.65 μm for fresh leaves
159 (Fig. 1), and the Reststrahlen bands near 3.43 and 3.51 μm due
160 to the H–C vibration bands [10], [15]. Furthermore, for all the
161 spectra, the strong absorption at 3.05 μm linked to water (Fig. 1)
162 is well noticed.

163 In the 5.5–15- μm range, the absorption peak linked to water
164 at 6 μm (Fig. 1) is observed for the abaxial cherry, adaxial
165 sunflower, and adaxial sorghum samples.

166 In the entire spectral domain 3–15 μm , a more detailed
167 analysis showed that the spectral features varied from one
168 species to another. Furthermore, in the case of the cherry leaf
169 sample, both sides of the leaf had dissimilar spectral signatures:
170 In the 3–5.5- μm range, the reflectance level difference between
171 both sides was around 0.02, and double reflectance peaks
172 became less apparent for the adaxial side of the leaf; in the
173 8–15- μm range, the reflectance peak around 8.7 μm was less
174 pronounced than for the abaxial side of the leaf [Fig. 2(a) → 1].
175 This was in agreement with previously published data [7]–[10],
176 [15] and with the data available in the MODIS (<http://www.176>

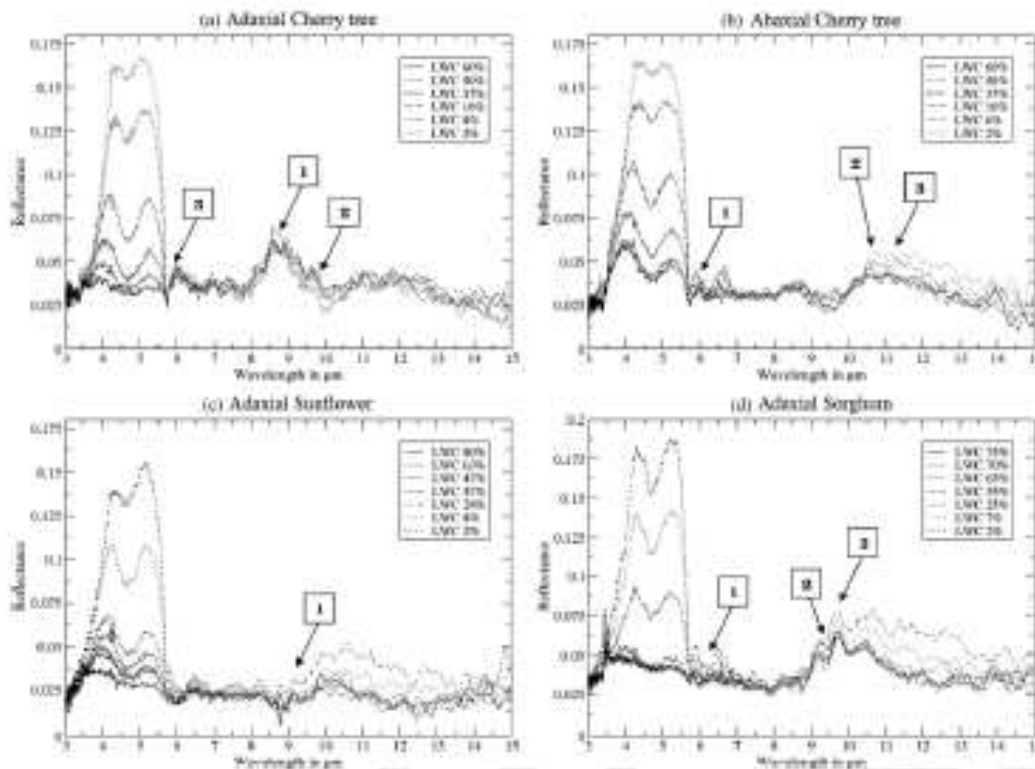


Fig. 2. Spectral reflectance of leaves for several water contents in the thermal domain: (a) Adaxial and (b) abaxial sides of cherry tree, (c) adaxial side of sunflower, and (d) sorghum leaf samples. Arrow labels locate a specific behavior, detailed in the document.

177 icess.ucsb.edu/modis/1/MIS/html/em.html) spectral library. In-
 178 deed, the spectral signatures of abaxial and adaxial side leaves
 179 of green cherry (*Prunus serotina*) presented in [8] and those
 180 of *Prunus serotina* measured by Ribeiro da Luz [15] were
 181 in good agreement with our measurements: the maximum
 182 of reflectance at 5.94 μm [Fig. 2(b) \rightarrow 1] and at 9.67 μm
 183 [Fig. 2(a) \rightarrow 2] due to the absorption of triterpenes existing in
 184 resin, absorption peaks at 5.75 μm [Fig. 2(a) \rightarrow 3] due to the
 185 C–O double bond, and between 8.7- and 9.7- μm [Fig. 2(a) \rightarrow 1]
 186 reflectance peaks due to leaf compounds other than cellulose.
 187 In fact, the very subtle reflectance maxima of cellulose in this
 188 range are normally accompanied by high transparency between
 189 10.5 and 12 μm [Fig. 2(b) \rightarrow 2] and by a volume scattering
 190 feature at 11.15 μm [Fig. 2(b) \rightarrow 3] [5], [7].
 191 The sunflower leaf sample had similar spectral signature
 192 as the one of Red oak leaf in [9] and was close to those of
 193 *Helianthus annuus* and *Cucurbita pepo* in [15]. For the *Helianthus*
 194 *annuus* variety, the only difference was related to the absorption
 195 peak near 9 μm [Fig. 2(c) \rightarrow 1].
 196 The sorghum spectral signature looked like *Inula*grass
 197 blades in [9] and *Zea mays* in [7], [15]: absorption peaks
 198 near 6 μm [Fig. 2(d) \rightarrow 1] due to water [Fig. 1] and 9.5 μm
 199 [Fig. 2(d) \rightarrow 2], the maximum of reflectance at 9.62 μm
 200 [Fig. 2(d) \rightarrow 3] *a priori* related to COH bending, and the
 201 presence of hemicellulose.

B. Drying Leaf Samples

202

For fully dried leaves (Fig. 2; a residual LWC of 2%), the
 203 spectral reflectance levels increased and ranged between 0.02
 204 and 0.18. The spectral reflectance signature of cherry tree
 205 sample was in good agreement with dried cherry leaf in [8].
 206 Dried sorghum and dried sunflower spectra were similar to
 207 senescent foliage of rye grass in [9] and [10] with weaker
 208 reflectance levels, particularly in the 3–5- μm domain. Further-
 209 more, our measurements tallied with the spectra of dry plant
 210 materials in [1]. For example, the signature due to the mixture
 211 of holocellulose and lignin was well observed with a maximum
 212 around 4–5.5 μm .
 213

In complement to the spectra in Fig. 2, the impact of leaf
 214 drying is shown for two specific wavelengths in Fig. 3. For our
 215 data set, the water had more impact in the 3–5 μm domain. In-
 216 deed, the spectral reflectance increased when the water content
 217 decreased, and the levels between fresh and dry spectra differed
 218 from 0.1 to 0.14 [Figs. 2 and 3(a)]. Furthermore, the reflectance
 219 levels were more influenced when LWC varied below 30% to
 220 40% (in relation to the high absorption by water). In Fig. 3(a),
 221 the reflectance at 4.1 μm increased with LWC, as an exponential
 222 function. There were few spectral variations in the 5.5–10- μm
 223 spectral domain due to the strong absorption of cellulose.
 224

The impact of water content increased beyond 10 μm . This
 225 increase is underlined in particular for low LWC (LWC < 20%), 226

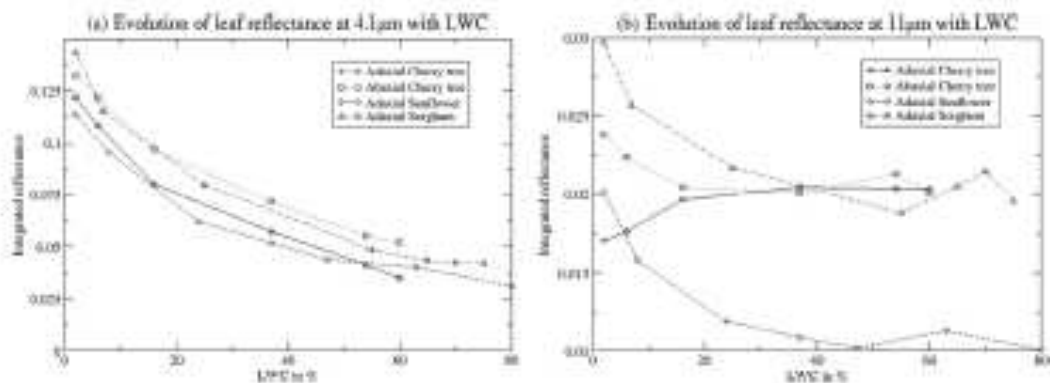


Fig. 3. Leaf reflectances at (a) 4.1 and (b) 11 μm as a function of LWC (warden the chosen is atmospheric window only).

227 with variations of reflectances between 0.03 and 0.01 at 11 μm
 228 [Fig. 3(b)]. This behavior was not observed for the abaxial side
 229 of the cherry tree, and the drying impact was different on both
 230 sides of the cherry tree leaf. This might be due to dissimilar leaf
 231 compounds and textures on the two sides of the leaf.

232

IV. DISCUSSION

233 Works conducted in [5], [7]–[10], and [15] provide infor-
 234 mation for the interpretation of fresh and dry leaf spectra and
 235 allow one to validate our measurements by comparison. The
 236 leaf spectra behavior might be then defined, owing to its specific
 237 components (see, for example, the spectral impact of wax on
 238 cherry tree sample or of hemicellulose on sorghum sample). For
 239 fresh and dry conditions, some differences in terms of spectral
 240 reflectance level appeared in comparison to [8]–[10], [7], and
 241 [15] data. For example, sorghum spectra had similar levels as
 242 those of *Indian grass* [10], *Zea Mays* [15], and *Rye grass* [10]
 243 in the 8–15- μm range, but lower levels at shorter wavelengths.
 244 In the case of sunflower, the reflectance levels were always
 245 different from those found in the literature. These differences
 246 might be explained by variations in the chemical composition
 247 of leaves, particularly in the surface layers, and/or by variations
 248 in the structure of the leaves. Such changes might be related to
 249 differences in plant cultivar, as well as differences in leaf age
 250 and growth conditions.

251 To our knowledge, our study is the first one to report the
 252 impact of leaf drying on reflectance in the 3–15- μm range. A
 253 previous study at canopy level by Oliso *et al.* [3] suggested
 254 the impact of such drying but no direct evidence was given
 255 at leaf level. This letter showed that the drying impact may
 256 be different according to species, spectral domain, and LWC
 257 level. The first evidence in our results was that the investigated
 258 domain could be split into two parts: one above and the other
 259 below 5.5 μm . All samples had the same spectral behavior in
 260 the 3–5.5- μm range, whereas it changed according to species
 261 in the 8–15- μm range. For all leaf samples, the reflectance at
 262 a given wavelength in 3–5.5 μm had an exponential behavior
 263 according to water content decrease. A quite similar behavior
 264 was noticed for most of the samples in the 8–15 μm , except for
 265 the adaxial side cherry tree leaf which was almost unaffected by

drying. In this last range, the observed changes in reflectance
 266 were limited and occurred mostly for LWC lower than 30%. At
 267 higher LWC, reflectances were almost unaffected, while in the
 268 3–5.5- μm range, reflectance changes were continuous. 269

Only measurements of leaf directional-hemispherical re-
 270 flectances were presented in this letter, and no attempt was
 271 done for deriving leaf emissivity. If the validity of the Kirchhoff
 272 law is not challenged, the derivation of leaf spectral emis-
 273 sivities would require the measurement of leaf directional-
 274 hemispherical transmittance in order to derive the absorptance
 275 of directional radiation. Indeed, the works in [16] and [17]
 276 highlighted that drying leaves might not be opaque in the
 277 thermal infrared domain (in particular, in the spectral domains
 278 characterized by high leaf reflectances). 279

Our study was the first step for considering the impact of
 280 vegetation water content on spectral properties in the mid-
 281 and thermal-infrared domains. It only considered the leaf level
 282 and could not be used per se for the direct interpretation
 283 of land surface spectral properties and satellite signal. Many
 284 other factors would have to be accounted for, such as sensor
 285 performances, geometry of acquisition, vegetation architecture,
 286 soil optical properties, atmospheric properties, and the relative
 287 contributions of reflected radiations (solar and atmospheric) and
 288 of emitted radiations according to wavelength. The assessment
 289 of all these factors would require the integration of various spe-
 290 cific models, including atmospheric radiative transfer models,
 291 sensor models, and vegetation canopy radiative transfer models.
 292 These last ones have to be used for analyzing the impact of
 293 geometry of acquisition, vegetation architecture (Leaf Area
 294 Index, leaf angle distribution, etc.), and soil spectral proper-
 295 ties on land surface spectral emissivities or spectral radiances
 296 [10], [14], [17], [18]. It is important to notice that coherent
 297 modeling of directional radiances requires solving leaf and
 298 soil energy balances in order to account for the distribution of
 299 surface temperatures inside the canopy and at the soil surface,
 300 which also require the knowledge of leaf optical properties
 301 over the whole spectral range. Another point to consider in
 302 the future concerns the differences between drying conditions
 303 in the laboratory and *in vivo*. This drying process differ-
 304 ence might affect the relationship between LWC and spectral
 305 properties. 306

307

V. CONCLUSION

308 We have presented the laboratory measurements of spectral
309 directional-hemispherical reflectances acquired on leaf sam-
310 ples in the 3–15- μm domain. Three species have been investi-
311 gated. Our measurements were in good agreement with existing
312 data published in literature for fresh and fully dried leaves (even
313 if the reflectance levels differ). The originality of our work
314 consists not only in measuring spectral signatures for fresh and
315 dry samples but also for intermediate LWCs. Our measurement
316 analysis has led to the following significant points:

317 1) The investigated spectral domain might be divided into
318 two parts: 3–5.5 and 5.5–15 μm . In the first domain
319 (mid-wave infrared), the reflectance was very sensitive
320 to LWC, whereas in the LWIR domain, this dependence
321 remains very weak for wavelengths higher than 10 μm .
322 2) The considered species and leaf side had a different
323 behavior according to the water content amount.

324 In future laboratory experiments, these measurements will
325 be completed by increasing the set of leaf samples in order to
326 validate our first results. Moreover, it will be interesting to mea-
327 sure both reflectance and transmittance in order to describe the
328 complete optical property behavior, including emissivity, ac-
329 cording to water content amount. The experiment measurement
330 geometry and observation conditions were not representative of
331 those related to remote sensing observations. Further analyses
332 are in progress for including the impact of other factors such as
333 atmospheric conditions, canopy architecture [19], or soil water
334 content [18].

335

ACKNOWLEDGMENT

336 The authors would like to thank S. De Cang, H. Mourin
337 (IRM Belgium), and B. Tanguy (ONERA) for the help during
338 the experimental instrumentation manipulation.

339

REFERENCES

340 [1] H. W. Gamman, *Leaf Optical Properties in Visible and Near-Infrared*
341 *Light*, Graduate Studies, Texas Tech University (No. 29), Lubbock, TX:
342 Texas Tech Press, 1985.
343 [2] P. J. Zarco-Tejada, C. A. Ronda, and S. L. Ustin, "Water content estimation
344 in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods,"
345 *Remote Sens. Environ.*, vol. 85, no. 1, pp. 109–124, Apr. 2003.

[3] A. Olmos, G. Soria, J. Sobrino, and B. Duchemin, "Evidence of low land
346 surface thermal infrared emissivity in presence of dry vegetation," *IEEE*
347 *Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 4, no. 1, pp. 112–116, Jan. 2007. 348
[4] S. P. Ho, D. P. Edwards, J. C. Galla, J. Chen, D. Zedler, G. L. Francis,
349 M. N. Denton, and J. R. Drummond, "Estimates of 4.7- μm surface emissiv-
350 ity and their impact on the retrieval of tropospheric surface moisture by
351 measurements of pollution in the troposphere (MOPITT)," *J. Geophys.*
352 *Res.*, vol. 110, p. D21 308, 2005. DOI:10.1029/2005JD005946. 353
[5] C. D. Bridges, "Thermal infrared reflectance of dry plant materials:
354 2.5–20 μm ," *Remote Sens. Environ.*, vol. 26, no. 2, pp. 265–285, 1988.
355
[6] P. N. Hasse, D. I. Jordan, and C. E. Smith, "Polarized directional re-
356 flectance from barren and meadow leaves," *Opt. Eng.*, vol. 3, no. 41,
357 pp. 1007–1012, 2002. 358
[7] H. Ribeiro da Luz and J. K. Crowley, "Spectral reflectance and emissivity
359 features of broad leaf plants: Prosopis for remote sensing in the thermal
360 infrared (8.0–14.0 μm)," *Remote Sens. Environ.*, vol. 109, no. 4, pp. 393–
361 405, Aug. 2007. 362
[8] J. W. Salisbury and N. M. Milton, "Thermal infrared (2.5 to 13.5 μm) di-
363 rectional and hemispherical of leaves," *Photogramm. Eng. Remote Sens.*,
364 vol. 54, no. 9, pp. 1301–1304, 1988. 365
[9] J. W. Salisbury and D. M. D'Ariz, "Transmissivity of terrestrial materials in
366 the 3–14 μm atmospheric window," *Remote Sens. Environ.*, vol. 42, no. 2, 367
pp. 83–106, Nov. 1992. 368
[10] J. W. Salisbury and D. M. D'Ariz, "Transmissivity of terrestrial materials in
369 the 3–5 μm atmospheric window," *Remote Sens. Environ.*, vol. 47, no. 3, 370
pp. 345–354, Mar. 1994. 371
[11] D. M. Wadzinski, S. Wong, and M. R. Querry, "Wedge shaped cell for
372 highly absorbent liquids: Infrared optical constants of water," *Appl. Opt.*,
373 vol. 28, no. 9, pp. 1714–1719, May 1989. 374
[12] R. M. Narayanan, L. N. Medler, and T. J. Schmitz, "Mid infrared laser
375 reflectance of crop leaves subjected to water stress," in *Proc. Int. Geosci.*
376 *Remote Sens. Symp.*, Houston, TX, 1992, pp. 339–344. 377
[13] J. Pature, "On-farm moisture testing of corn silage," *Forage Forage*, vol. 2,
378 no. 5, pp. 1–3, 2000. 379
[14] H. Tanguy, *Intercomparaison, évaluation et amélioration de l'échantillonnage*
380 *d'instruments de mesure de réflectance spectrale en infrarouge*, Rapport
381 ONERA RT 1/13361 DOTA, 2008. 382
[15] H. Ribeiro da Luz, "Propriedades ópticas das plantas no infravermelho
383 termal (2.5–14 μm)," Ph.D. dissertation, Instituto de Física de São Carlos,
384 Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 2005. 385
[16] F. Gobet, A. Olmos, S. Jacquemont, H. Maron, and B. Tanguy, "Mod-
386 eling infrared optical properties of leaves to improve water content
387 estimation," in *Proc. AGU Fall Meeting*, San Francisco, CA, 2008. 388
[17] A. Olmos, F. Barot, and S. Jacquemont, "Adaptation of the leaf optical
389 property model PROSPECT to thermal infrared," in *Proc. Int. Workshop*
390 *Remote Sens. Model Surface Properties*, Paris, France, Jan. 20–22, 2006. 391
[18] A. Lougouzoa, S. Jabon, X. Urstein, and A. Olmos, "Soil moisture
392 impact on lab measured reflectance of bare soils in the optical domain
393 0.4–15 μm ," in *Proc. IGARSS*, Cape Town, South Africa, Jul. 12–17,
394 2009, pp. III-523–III-525. 395
[19] A. Olmos, J. Sobrino, G. Soria, M. Chelle, B. Duchemin, and F. Jacob,
396 "Test of the SAIL – Thermique radiative transfer model for simulating
397 thermal infrared emissivity and emissivity spectra of plant canopy," in
398 *Proc. IGARSS*, South Africa, Jul. 12–17, 2009. 399
400

**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 – 14 μm**

L'humidité des sols nus (en anglais **Soil Moisture Content**, noté SMC) constitue une variable fondamentale dans plusieurs sciences de l'environnement. Pour mesurer le SMC, les données de télédétection, qui présentent de grandes couvertures spatiale et temporelle ainsi que des résolutions spatiales élevées, offrent de multiples avantages par rapport aux méthodes in situ. Parmi les données de télédétection, l'imagerie hyperspectrale aéroportée procure une information très détaillée d'une scène, puisque chaque pixel du paysage observé possède une signature spectrale caractéristique. L'objectif de ce travail de thèse est donc d'estimer le SMC à partir de l'imagerie hyperspectrale aéroportée à haute résolution spatiale dans le domaine optique 0,4 – 14 μm . Dans un premier temps, à partir de propriétés optiques de référence mesurées en laboratoire plusieurs critères d'estimation du SMC ont été établis, évalués et comparés sur le domaine optique. De plus, un modèle empirique de réflectance de sol a été développé afin de simuler la signature spectrale d'un sol pour un SMC donné. Ce modèle est inversé pour estimer le contenu en eau à partir des réflectances spectrales. Ensuite, une chaîne de traitement a été développée afin d'estimer le contenu en eau des sols à partir d'acquisitions hyperspectrales aéroportées. Une analyse de sensibilité et des performances de la chaîne de traitement, prenant en compte des défauts d'étalonnage instrumentaux, de la connaissance des conditions atmosphériques, de la méthode de correction atmosphérique et des approches d'estimation du SMC à partir de la réflectance de surface, a été réalisée. Finalement, les critères d'estimation du SMC établis pour le domaine 0,4 – 2,5 μm , ont été validés en exploitant une campagne avec information terrain réalisée sur le site de Garons (France) avec l'instrument aéroporté HyMap. Les résultats montrent que le SMC est estimé avec une précision équivalente à celle des méthodes existantes dans la littérature.

Mots clés : humidité des sols, propriété optique, imagerie hyperspectrale, haute résolution spatiale

**Soil moisture content estimation
from hyperspectral and high spatial resolution images
on optical domain 0.4 – 14 μm**

Soil Moisture Content (SMC) is fundamental variable for environmental science. Remote sensing data have higher spatial and temporal cover with high spatial resolution than in-situ data to measure SMC. Among remote sensing data, airborne hyperspectral data give scene detailed information where each pixel of observed landscape has a spectral signature characteristic. Objective of this work is to estimate SMC from airborne hyperspectral with high spatial resolution images on optical domain 0.4 – 14 μm . In first time, from optical properties of reference acquired on laboratory, several criteria have been established, evaluated and compared on the whole optical domain. Furthermore, an empirical model of soil spectral reflectance has been developed to simulate soil spectral signature with SMC. Inverse model has been used to estimate moisture content from spectral reflectance. Then, processing chain has been developed to estimate soil moisture content from airborne hyperspectral data. Sensitivity analysis and efficiency of processing chain, consider to instrumental calibration default, knowledge of atmospheric conditions, atmospheric correction and criteria for SMC estimation, have been realised. Finally, criteria for SMC estimation established on 0.4 – 2.5 μm have been validated. Data proceeded from airborne hyperspectral HyMap campaign where in-situ data have been collected on Garons site (France). Results show SMC is estimated with a precision like existing method of literature.

Keywords : soil moisture content, optical properties, hyperspectral images, high spatial resolution