

**ÉTUDE DU POTENTIEL DES DONNÉES
POLARIMÉTRIQUES RADARSAT-2 POUR LE
SUIVI DE L'HUMIDITÉ DU SOL EN MILIEU
AGRICOLE (CAMPAGNE 2008 SUR LA PLAINE
CAMPIDANO, SARDAIGNE, ITALIE**

Rapport de recherche No R-1194

2010



Université du Québec

Institut national de la recherche scientifique

Eau, Terre et Environnement

**Étude du potentiel des données polarimétriques
RADARSAT-2 pour le suivi de l'humidité du sol en milieu
agricole (campagne 2008 sur la plaine Campidano,
Sardaigne, Italie)**

Par :

Maria Dissanska, Claudio Paniconi et Monique Bernier

Rapport technique no R-1194
réalisé dans le cadre du projet ESA-AO 537

Mai 2010

ISBN : 978-2-89146-786-5

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES	I
LISTE DES FIGURES.....	III
LISTE DES TABLEAUX	V
REMERCIEMENTS.....	IX
INTRODUCTION	1
1. PROBLÉMATIQUE	3
1.1. L'HUMIDITÉ DU SOL	3
1.2. LES IMAGES RSO	4
1.3. LES IMAGES RSO ET LEUR SENSIBILITÉ À L'HUMIDITÉ DU SOL.....	5
1.3.1. Paramètres influent l'estimation de l'humidité du sol à partir des images RSO.....	6
1.3.1.1. Configuration du système radar.....	6
1.3.1.2. Paramètres de la surface.....	8
1.3.2. Modèles.....	9
2. OBJECTIFS.....	13
3. MÉTHODE	15
3.1. LE SECTEUR D'ÉTUDE.....	15
3.2. LES DONNÉES UTILISÉES.....	17
3.2.1. Données terrain.....	17
3.2.2. Les images.....	18
3.3. PRÉTRAITEMENT DES DONNÉES	22
3.3.1. Données terrain.....	22
3.3.2. Les images.....	23
3.4. DÉTECTION DES CHANGEMENTS DE L'HUMIDITÉ DU SOL	31
3.5. ANALYSE POLARIMÉTRIQUE.....	32
4. RÉSULTATS – ANALYSE ET DISCUSSION.....	35
4.1. COMPORTEMENT DE LA RÉTRODIFFUSION EN FONCTION DES PARAMÈTRES DE SURFACE.....	35
4.1.1. Comportement de la rétrodiffusion en fonction de l'humidité du sol.....	35
4.1.2. Comportement de la rétrodiffusion en fonction de la rugosité du sol.....	44
4.1.3. Détection des changements de l'humidité du sol.....	47
4.2. ANALYSE DES PARAMÈTRES POLARIMÉTRIQUES.....	48
4.2.1. Décomposition de Pauli.....	48

4.2.2.	<i>Décomposition de Cloude et Pottier</i>	50
4.2.3.	<i>La relation des paramètres polarimétriques avec les paramètres de la surface (l'humidité du sol et la rugosité)</i>	55
4.2.4.	<i>Signature polarimétrique</i>	58
4.3.	PROBLÈMES RENCONTRÉS	60
5.	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS DE TRAVAUX FUTURS	61
	ANNEXE : PROCÉDURE POUR L'ÉCHANGE DES DONNÉES ENTRE POLSARPRO ET PCI GEOMATICA POUR L'EXTRACTION DES PARAMÈTRES POLARIMÉTRIQUES DES CHAMPS INDIVIDUELS	63
	LISTE DE RÉFÉRENCES	69

Liste des figures

FIGURE 4.1. LOCALISATION DE SITES D'ÉTUDE – CAMPIDANO (ÎLE SARDAIGNE, ITALIE) SUR LE COMPOSÉ COULEUR DE L'IMAGE ASTER ORTHORÉCTIFIÉE (RVB – BANDES B3/B2/B1) - LES CONTOURS ORANGES DÉLIMITENT LES CHAMPS ÉCHANTILLONNÉS.	16
FIGURE 4.2 PROFILOMÈTRE UTILISÉ POUR CARACTÉRISER LE PROFIL D'ÉLEVATION DU SOL	18
FIGURE 4.3. MODES D'ACQUISITION DU RADARSAT-2 (LARSON, 2008)	19
FIGURE 4.4. FILTRES APPLIQUÉS SUR LE COMPOSÉ COULEUR DE L'IMAGE RADARSAT-2 DU 24 JUIN 2008 (ROUGE – HH, VERT – HV, BLEU – VV).....	25
FIGURE 4.5. IMAGES RADARSAT-2 DU 24 JUIN 2008, APRÈS L'APPLICATION D'UN FILTRE LEE ET RÉÉCHANTILLONNAGE PAR «PLUS PROCHE VOISIN (NN)» ET «CUBIQUE».....	30
FIGURE 5.1. L'ÉVOLUTION DE L'HUMIDITÉ DU SOL POUR LES PARCELLES ÉTUDIÉES DU 24/05/2008 AU 24/06/2008. LE JOUR 0 CORRESPOND AU DÉBUT DE LA PÉRIODE D'ÉTUDE SOIT LE 24 MAI 2008, LE JOUR 31 CORRESPOND AU 24 JUIN 2008.....	36
FIGURE 5.2. L'ÉVOLUTION DU COEFFICIENT DE RÉTRODIFFUSION EN POLARISATION HH POUR LES PARCELLES ÉTUDIÉES DU 24/05/2008 AU 24/06/2008. LE JOUR 0 CORRESPOND AU DÉBUT DE LA PÉRIODE D'ÉTUDE SOIT LE 24 MAI 2008, LE JOUR 31 CORRESPOND AU 24 JUIN 2008.	37
FIGURE 5.3. L'ÉVOLUTION DU COEFFICIENT DE RÉTRODIFFUSION EN POLARISATION HV POUR LES PARCELLES ÉTUDIÉES DU 24/05/2008 AU 24/06/2008. LE JOUR 0 CORRESPOND AU DÉBUT DE LA PÉRIODE D'ÉTUDE, SOIT LE 24 MAI 2008, LE JOUR 31 CORRESPOND AU 24 JUIN 2008.	37
FIGURE 5.4. DÉPENDANCE DU SIGNAL RÉTRODIFFUSÉ EN POLARISATION HH À L'HUMIDITÉ DU SOL POUR TOUTES LES DATES ET POUR TOUTES LES PARCELLES ÉTUDIÉES.	38
FIGURE 5.5. DÉPENDANCE DU SIGNAL RÉTRODIFFUSÉ EN POLARISATION HH À L'HUMIDITÉ DU SOL POUR LES 5 DATES POUR LESQUELLES LES IMAGES RADARSAT-2 SONT DISPONIBLES.	39
FIGURE 5.6. DÉPENDANCE DU SIGNAL RÉTRODIFFUSÉ EN POLARISATION HV À L'HUMIDITÉ DU SOL.	39
FIGURE 5.7. DÉPENDANCE DU RAPPORT DE COPOLARISATION $\sigma_{HH}^0 / \sigma_{VV}^0$ À L'HUMIDITÉ DU SOL.	40
FIGURE 5.8. DÉPENDANCE DU RAPPORT D'ORTHOPOLARISATION $\sigma_{HH}^0 / \sigma_{HV}^0$ À L'HUMIDITÉ DU SOL.....	41
FIGURE 5.9. DÉPENDANCE DU SIGNAL RÉTRODIFFUSÉ EN POLARISATION HH À L'HUMIDITÉ DU SOL POUR CHAQUE UNE DES PARCELLES.	41
FIGURE 5.10. DÉPENDANCE DU SIGNAL RÉTRODIFFUSÉ EN POLARISATION HV À L'HUMIDITÉ DU SOL POUR CHAQUE UNE DES PARCELLES ÉTUDIÉES.	42
FIGURE 5.11. DÉPENDANCE DU RAPPORT DE ORTHOPOLARISATION $\sigma_{HH}^0 / \sigma_{HV}^0$ À L'HUMIDITÉ DU SOL POUR CHACUNE DES PARCELLES ÉTUDIÉES.	43
FIGURE 5.12. DÉPENDANCE DU RAPPORT DE COPOLARISATION $\sigma_{HH}^0 / \sigma_{VV}^0$ À L'HUMIDITÉ DU SOL POUR CHACUNE DES PARCELLES ÉTUDIÉES.	44

FIGURE 5.13. ÉCART TYPE DES HAUTEURS (S) ET LONGUEUR DE CORRÉLATION (L_c) POUR TOUS LES CHAMPS ÉTUDIÉS.....	45
FIGURE 5.14. LE COMPORTEMENT DU COEFFICIENT DE RÉTRODIFFUSION EN POLARISATION HH EN FONCTION DE L'ÉCART TYPE DES HAUTEURS (S) POUR TOUS LES CHAMPS ÉTUDIÉS.	46
FIGURE 5.15 LE COMPORTEMENT DU COEFFICIENT DE RÉTRODIFFUSION EN POLARISATION HH EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE CORRÉLATION POUR TOUS LES CHAMPS ÉTUDIÉS.....	46
FIGURE 5.16. LA RELATION ENTRE LE RATIO MULTI TEMPOREL DE COEFFICIENTS DE RÉTRODIFFUSION POUR LE 24 MAI (T1) ET LE 17 JUIN 2008 (T2) ET L'HUMIDITÉ DU SOL POUR LE 24 MAI 2008.	47
FIGURE 5.17. LA DÉCOMPOSITION DE PAULI DES IMAGES RADARSAT-2 DU 24 MAI 2008 ET DU 24 JUIN 2008; CHAQUE COULEUR REPRÉSENTE DIFFÉRENTS MÉCANISMES DE DIFFUSION : ROUGE : ($S_{HH} - S_{VV}$) - REFLEXION PAIRE (FORET ET ZONES URBAINES), VERT : ($2S_{HV}$) – REFLEXION DE VOLUME (ZONES VEGETALES), BLEU : ($S_{HH} + S_{VV}$) - REFLEXION IMPAIRE (REFLEXION DE SURFACE).....	49
FIGURE 5.18. LA VARIATION SPATIALE DE L'ENTROPIE POUR LA ZONE D'ÉTUDE POUR LE 24 MAI ET LE 24 JUIN 2008.....	53
FIGURE 5.19. LA VARIATION SPATIALE DU PARAMÈTRE POLARIMÉTRIQUE ANGLE ALPHA (α) POUR LA ZONE D'ÉTUDE POUR LES DATES D'ACQUISITION DU 24 MAI ET DU 24 JUIN 2008.	53
FIGURE 5.20. LA CLASSIFICATION H- α D'UNE SCÈNE DES IMAGES RADARSAT-2 POUR LE 24 MAI ET LE 24 JUIN 2008 ET LES SCHÉMAS DE CLASSIFICATION H- α CORRESPONDANTS.	54
FIGURE 5.21. CORRÉLATION ENTRE LES PARAMÈTRES POLARIMÉTRIQUES H, A, α , α_1 , λ ET RVI EXTRAITS DES IMAGES RADARSAT-2 ACQUISES LE 24 MAI ET 24 JUIN 2008 ET L'HUMIDITÉ DU SOL M_v	56
FIGURE 5.22. CORRÉLATION ENTRE LES PARAMÈTRES POLARIMÉTRIQUES H, A, α , α_1 , EXTRAITS DES IMAGES RADARSAT-2 ACQUISES LE 24 MAI ET LE 24 JUIN 2008 ET LES PARAMÈTRES DE LA RUGOSITÉ S ET L_c	57
FIGURE 5.23. SIGNATURES POLARIMÉTRIQUES COPOLARISÉES POUR LES PARCELLES F_11, F_21_1, F_21_2, ET F_31 EXTRAITES DES IMAGES RADARSAT-2 POLARIMÉTRIQUES ACQUISES LE 24 MAI 2008 ET LE 24 JUIN 2008, LES DATES CORRESPONDANT AU DÉBUT ET À LA FIN DE LA PÉRIODE D'ÉTUDE.....	59

Liste des tableaux

TABLEAU 4.1. CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DU SATELLITE RADARSAT- 2.....	21
TABLEAU 4.2. CARACTÉRISTIQUES DES IMAGES RADARSAT-2 UTILISÉES	21
TABLEAU 4.3. RÉSULTATS DES MESURES DE L'HUMIDITÉ POUR TOUS LES CHAMPS ÉTUDIÉS.....	23
TABLEAU 4.4. RÉSULTATS DES MESURES DE PARAMÈTRES DE RUGOSITÉ (S ET L_c) POUR TOUS LES CHAMPS ÉTUDIÉS.....	23
TABLEAU 4.5. COMPARAISON ENTRE LE COEFFICIENT DE RÉTODIFFUSION EXTRAIT DE CHAQUE PARCELLE DE L'IMAGE RADARSAT-2 DU 24-06-2008 APRÈS APPLICATION DE FILTRE LEE, ENHANCED LEE, FROST, KUAN ET MOYEN	26
TABLEAU 4.6. COEFFICIENTS DE RÉTODIFFUSION MOYENNE POUR TOUTES LES PARCELLES EXTRAITS DES IMAGES RADARSAT-2 DU 24 JUIN 2008, APRÈS L'APPLICATION DE RÉÉCHANTILLONNAGE PAR « LE PLUS PROCHE VOISIN (NN) » ET « CUBIQUE ».....	29
TABLEAU 7. PARAMÈTRES POLARIMÉTRIQUES EXTRAITS DE LA DÉCOMPOSITION AUX VALEURS PROPRES DES MATRICES DE COHÉRENCE [T] DES IMAGES RADARSAT-2 DU 24 MAI 2008 ET DU 24 JUIN 2008.	51

Lexique

ASC :	Agence spatiale canadienne
ASTER :	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - un instrument d'imagerie installé sur Terra, un satellite lancé en Décembre 1999 dans le cadre du système d'observation de la Terre de la NASA (EOS);
dB :	Décibel;
GCP :	Points de contrôle au sol (G round C ontrol P oint)
GPS :	Global Positioning System
M_v :	Humidité volumétrique du sol;
MNA :	Modèle numérique du terrain;
NBMI :	N ormalized radar B ackscatter soil M oisture I ndex (indice de l'humidité par différence normalisée);
σ° :	Coefficient de rétrodiffusion;
Radar :	acronyme pour <i>Radio Detection And Ranging</i> (détection et télémétrie par onde radio);
RSO :	Radar à synthèse d'ouverture;
RADARSAT :	Satellite RADARSAT-2 lancé en 2007, acquiert des images radar polarimétrique;
HH :	Mode de polarisation: transmission horizontale et réception horizontale
HV :	Mode de polarisation: transmission horizontale et réception verticale;
VH :	Mode de polarisation: transmission verticale et réception horizontale;
VV:	Mode de polarisation: transmission verticale et réception verticale;
RMS :	Root mean square (hauteur quadratique moyenne de l'aspérité de la surface – caractérise la variation verticale de la surface (la rugosité)
SLC :	Single-look complex (Visée unique complexe);
SOAR :	Science and Operational Applications Research for RADARSAT-2;

Remerciements

Maria Dissanska tiens tout d'abord à remercier le professeur Claudio Paniconi et sa directrice de recherche, la professeure Monique Bernier, de lui avoir confié ce mini-projet. Cela lui a permis d'acquérir de nouvelles connaissances sur la polarimétrie radar et une expérience fort appréciée de travail avec des données radar polarimétriques.

Elle remercie Imen Gherdoudj, actuellement stagiaire postdoctorale à l'Université de Sherbrooke, pour ses conseils pratiques et le partage de son expérience, des données terrain de la Sardaigne et des programmes pour la numérisation des photos de profilomètre. Elle a également apprécié son regard critique qui a permis de trouver un problème avec le logiciel utilisé (PCI Geomatics v.10.1.4) pour le traitement des données radar. Elle est reconnaissante à Yves Gauthier, agent de recherche à l'INRS, qui lui a aidé à clarifier le mystère avec le logiciel.

Elle remercie aussi Stéphane Mermoz, alors doctorant en cotutelle à l'INRS, de l'avoir aidé dans ses premiers pas avec le logiciel PolSARpro et d'avoir répondu à toutes ses questions concernant la polarimétrie radar. Merci à Rebecca Fillion, étudiante au doctorat, d'avoir partagé des informations sur les campagnes de terrain. Merci également à Jimmy Poulin, assistant de recherche, d'avoir fourni les données vectorielles pour les corrections géométriques.

Introduction

L'humidité du sol est l'un des paramètres clés pour les différentes applications environnementales, tel que l'hydrologie, l'agriculture, la météorologie et l'évaluation des risques naturels. Comme ce paramètre est très dynamique dans l'espace et dans le temps, son estimation est un défi. La télédétection est l'outil le plus approprié pour assurer un suivi régulier, sur de grandes superficies et est moins coûteux par rapport des études in situ (Moran *et al.*, 2004; Ulaby *et al.*, 1986). De plus, les systèmes satellitaires à micro-ondes sont davantage reconnus non seulement à cause de leur sensibilité aux variations de certains paramètres du sol (comme la constante diélectrique), mais aussi à cause de leur capacité d'acquérir des données le jour et la nuit sans être limités par l'illumination solaire et les conditions météorologiques (la couverture nuageuse et la brume). De nombreuses études (Kurosu *et al.*, 1995) ont démontré le potentiel des images radar pour la cartographie et le suivi de changements relatifs de l'humidité du sol (Fellah *et al.*, 1997; Kasischke *et al.*, 2009; Pultz *et al.*, 1997; Ulaby *et al.*, 1996; Wever and Henkel, 1995), ainsi que l'estimation de l'humidité absolue à l'aide de modèles inversés (Oh, 2006; Moran *et al.*, 2000; Oh, 2004). Comme le signal rétrodiffusé est influencé par quelques caractéristiques de la surface (la constante diélectrique, la rugosité, la topographie et le couvert végétal), l'intégration de données multi-temporelles (Rahman *et al.*, 2008; Moran *et al.*, 2000), multi-fréquence, multi-polarimétriques ou multi-angles (Holah *et al.*, 2005; Srivastava *et al.*, 2003) est souvent requise pour améliorer l'extraction des caractéristiques de la surface du sol (Ulaby *et al.*, 1996). Le lancement de satellites dotés d'un mode polarimétrique, comme RADARSAT-2, augmente le contenu en informations et permet de mieux comprendre les mécanismes de diffusion et d'interactions de l'onde avec la cible. Toutefois, certaines études (Baghdadi *et al.*, 2006; McNairn and Brisco, 2004) ont révélé que l'utilisation des polarisations multiples n'apporte pas une amélioration significative de l'estimation de l'humidité du sol, mais est utile pour la discrimination entre l'effet de l'humidité du sol et la rugosité sur le signal rétrodiffusé.

Ce mini-projet de recherche s'inscrit dans le cadre du projet ESA-AO 537 dont l'un des objectifs principaux est de développer et de tester des algorithmes pour l'extraction de paramètres du sol, tel que l'humidité, à partir des images RSO polarimétriques. Plus particulièrement, ce mini-projet vise à étudier le potentiel des images RADARSAT-2 pour le suivi de l'humidité du sol nu de champs agricoles du Campidano (Sardaigne, Italie) afin de déterminer une relation entre le signal radar (les paramètres polarimétriques) et l'humidité et la rugosité du sol nu. La détermination d'une relation entre les paramètres polarimétriques et l'humidité du sol contribuera à long terme à une meilleure gestion des ressources hydriques et des pratiques agricoles.

1. Problématique

L'île de la Sardaigne (Italie) est caractérisée par un climat méditerranéen dont le trait principal est sa grande variabilité d'une année à une autre. Les précipitations et le vent sont irréguliers et de longues périodes de sécheresse sont fréquentes. Ces caractéristiques posent aujourd'hui de sérieuses limites aux besoins primaires de la consommation domestique, industriels et des pratiques agricoles (l'irrigation). Une comparaison de l'offre et la demande montre clairement un déficit d'approvisionnement en eau d'environ la moitié des besoins totaux, surtout pour l'irrigation (Aru *et al.*, 2006). En conséquence, il y a une nécessité pour une nouvelle stratégie d'utilisation de l'eau et de gestion des bassins versants. En outre, les nouvelles préoccupations autour de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture imposent le besoin d'un suivi précis et fréquent de la disponibilité de l'eau dans les sols. Alors que la mesure in situ de l'humidité du sol est quantitativement exacte, elle représente mal la distribution spatiale et temporelle de l'humidité du sol (Lakhankar *et al.*, 2009). Par conséquent, il existe un fort intérêt d'évaluer le potentiel des images satellitaires pour le suivi et la cartographie de l'humidité du sol pour les applications agricoles et hydrologiques.

1.1. L'humidité du sol

Le sol peut être présenté comme un mélange de particules solides, d'air et d'eau à la fois libre et liée (Barrett *et al.*, 2009; Ulaby *et al.*, 1986). Les particules de sol sont classées en trois catégories : sable, limon, ou argile, selon leur taille. Les pourcentages relatifs de ces catégories déterminent alors la classe de texture du sol. La texture du sol influence la capacité de rétention de l'eau. La teneur en eau ou l'humidité du sol est la quantité d'eau contenue dans la matrice du sol. Les deux termes couramment utilisés pour caractériser la teneur en eau d'un échantillon de sol sont l'humidité volumétrique (m_v) et l'humidité gravimétrique (m_g). Le teneur en eau volumétrique, m_v , est définie mathématiquement comme suit:

$$m_v = \frac{V_e}{V_T} [\text{cm}^3/\text{cm}^3]; \quad \text{Eq. 1}$$

où V_e est le volume d'eau et $V_T = V_s + V_e + V_a$ est le volume total du mélange sol + eau + air. L'humidité gravimétrique est exprimé par :

$$m_g = \frac{W_e}{W_{\text{sec}}} \times 100 = 100 \frac{m_v}{\rho_b} (\%), \quad \text{Eq. 2}$$

où W_e et W_{sec} représentent le poids de l'eau dans l'échantillon du sol et le poids de l'échantillon sec respectivement; ρ_b est la densité du sol (sec) par rapport au volume total V_T et est connu sous le terme densité apparente (bulk density). Les résultats de l'étude de Topp *et al.* (1980) ont montré qu'il existe une forte dépendance entre la teneur en eau volumétrique du sol et la constante diélectrique du sol, ainsi qu'une faible influence de type du sol, de la densité, de la texture, de la salinité et de la température sur cette constante. La mesure volumétrique est préférée parce que la constante diélectrique du mélange sol-eau est une fonction du volume de la fraction d'eau dans le mélange. En général, la dispersion observée de l'humidité du sol gravimétrique est plus élevée, résultant des variations dans la compaction du sol (ou densité apparente) (Ulaby *et al.*, 1986). Avec l'augmentation de l'humidité du sol, l'eau est en mesure de se déplacer librement autour des particules du sol et c'est cette eau libre qui a un effet dominant sur la constante diélectrique. Les propriétés diélectriques du milieu déterminent les caractéristiques de propagation des ondes électromagnétiques dans celui-ci. Comme conséquence, elles affectent les propriétés émissives et réfléchissantes à la surface. Donc, étant donnée la dépendance de la constante diélectrique à la teneur en eau volumétrique dans le domaine des micro-ondes, la teneur en eau des sols peut être mesurée par des techniques radiométriques (micro-ondes passive) et radar (micro-ondes actives) (Behari, 2005).

1.2. Les images RSO

Le terme radar est l'acronyme pour *Radio Detection And Ranging* (détection et télémétrie par onde radio). Le radar fournit lui-même l'énergie requise et peut donc être utilisé aussi bien la nuit que le jour sans être dépendant de l'illumination solaire. Ce type de système est appelé système de télédétection active. Les radars transmettent vers la cible un signal radio dans les hyperfréquences et détectent la partie rétrodiffusée du signal et le délai de retour. L'intensité du signal rétrodiffusé est mesurée pour discerner les différentes cibles, et le délai entre la transmission et la réception du signal sert à déterminer la distance (ou la portée) de la cible. La télédétection radar n'utilise qu'une portion du spectre, soit les fréquences qui s'étendent de 0,3 GHz à 300 GHz (exprimée en longueurs d'onde de 1 m à 1 mm). Opérant dans la région spectrale des micro-ondes permet d'éviter les effets des nuages, la pluie, le brouillard, les fumées, etc.

L'imagerie radar à synthèse d'ouverture (RSO) est la configuration active à hyperfréquences la plus couramment utilisée. La technologie de traitement du signal utilisée permet de simuler une ouverture de l'antenne très longue. Comme résultat, ces capteurs offrent une résolution très élevée (Anderson and Croft, 2009). Les capteurs RSO peuvent actuellement fournir une résolution spatiale de 1 à 25 m (RADARSAT-2, TerraSAR-X) et une couverture nécessaire (25-500 km) à la gestion de l'eau à l'échelle des champs agricoles.

Une image RSO est une matrice 2-D où chaque pixel est associé à une petite zone de la surface de la terre dont la taille ne dépend que des caractéristiques des systèmes RSO. Chaque pixel fournit un nombre complexe (lié à l'amplitude et à la phase du signal) associé à la réflectivité de l'ensemble des diffuseurs contenus dans la cellule de résolution de RSO (Lee and Pottier, 2009). Le coefficient de rétrodiffusion (σ°) est la fraction qui décrit la quantité d'énergie rétrodiffusée par rapport à l'énergie incidente. L'intensité de σ° est une fonction des propriétés physiques et électriques de la cible, ainsi que la longueur d'onde (λ), la polarisation et l'angle d'incidence (θ) du radar. Par conséquent, en raison des interactions complexes de ces paramètres, il n'est pas possible d'estimer la contribution de diffuseurs individuels et d'attribuer les variations de rétrodiffusion à un seul paramètre (Zillmann *et al.*, 2004).

1.3. Les images RSO et leur sensibilité à l'humidité du sol

La théorie derrière la télédétection micro-ondes de l'humidité du sol est basée sur le contraste important entre les propriétés diélectriques de l'eau liquide ($\epsilon' \sim 80$) et les particules du sol sec ($\epsilon' < 4$) qui se traduit par une forte dépendance de la constante diélectrique (ϵ') à l'humidité volumétrique du sol (m_v) (Engman and Chauhan, 1995). Comme l'humidité augmente, la constante diélectrique du mélange sol-eau augmente et ce changement est détectable par des capteurs à micro-ondes. En général, une augmentation de l'humidité du sol conduit à une augmentation du coefficient de rétrodiffusion. Malgré la forte sensibilité à l'humidité du sol, le lien entre signal RSO et l'humidité du sol est atténué par des variations dans la structure géométrique de la surface du sol (la topographie, la rugosité) et la densité de la végétation (si présente).

La rétrodiffusion radar, σ° , d'une surface de végétation est composée de trois contributions,

$$\sigma^\circ = \tau^2 \sigma_s^\circ + \sigma_{dv}^\circ + \sigma_{int}^\circ \quad \text{Eq. 3}$$

où σ_s° est la rétrodiffusion de la surface du sol nu, τ^2 est l'atténuation du signal du sol par la couche de végétation, σ_{dv}° est la contribution directe de la rétrodiffusion par la végétation et σ_{int}° représente une diffusion multiples de la végétation et du sol (Ulaby *et al.*, 1996). Si la biomasse ne dépasse pas $0,5 \text{ kg.m}^{-2}$, $\tau^2 \approx 1$, le deuxième et le troisième terme dans l'équation 3 sont négligeables et l'effet de la végétation peut être ignoré.

Dans le cas des sols nus (ou à faible végétation), le coefficient de rétrodiffusion du sol σ_s° , de son côté, est lié directement à l'humidité du sol et peut être présenté sous la forme suivante:

$$\sigma_s^\circ = f(R, a, M_v), \quad \text{Eq. 4}$$

où R est la rugosité de la surface, le terme a représente la sensibilité à l'humidité du sol et M_v est l'humidité du sol volumétrique (Engman and Chauhan, 1995). Cependant, la rugosité et la sensibilité à l'humidité varient avec la longueur d'onde, la polarisation et l'angle d'incidence.

1.3.1. Paramètres influent l'estimation de l'humidité du sol à partir des images RSO

1.3.1.1. Configuration du système radar

- **Fréquence (f)** – Les systèmes radar fonction dans le domaine de hyperfréquences ($f \sim 300 - 0.3$ GHz, $\lambda \sim 1$ mm - 1 m). La fréquence du rayonnement a un impact direct sur l'interaction entre le signal incident et la cible. Les longueurs d'onde de bande L ($f \sim 1 - 2$ GHz, $\lambda \sim 30 - 15$ cm), C ($f \sim 4 - 8$ GHz, $\lambda \sim 7.5 - 3.8$ cm) et X ($f \sim 8 - 12$ GHz, $\lambda \sim 3.8 - 2.5$ cm) sont les plus couramment utilisées pour estimer l'humidité du sol (Wagner *et al.*, 2007). La fréquence détermine la profondeur de pénétration dans le sol et le couvert végétal. Les longueurs d'onde plus longues (bande L) pénètrent plus profondément dans le sol et le couvert végétal. Cependant, la profondeur de pénétration n'est pas constante pour une fréquence donnée mais elle dépend aussi du contenu en eau du sol. Dans un sol plus humide la pénétration est plus faible. L'épaisseur réelle de la couche de surface du sol responsable de la plupart de l'énergie rétrodiffusée varie entre environ 1 cm pour un sol très humide et 15 cm pour un sol sec (Ulaby *et al.*, 1986). La sensibilité à la rugosité est aussi dépendante de la fréquence. Les surfaces apparaissent plus lisses aux longueurs d'ondes plus grandes (McNairn and Brisco, 2004).

- **Angle d'incidence (θ)** – un paramètre très important dans l'interaction entre le signal radar et la cible, car il détermine la façon dont le signal radar sera réfléchi. La sensibilité du radar à l'humidité du sol diminue lorsque l'angle d'incidence augmente. Ainsi, à un angle d'incidence plus élevée, la végétation intercepte une plus grande partie du signal et l'atténue. Les études d'Ulaby *et al.* (1986) montrent qu'à un angle d'incidence de $\sim 10^\circ$, la dépendance de σ_{hh} à la rugosité de surface est très faible pour les ondes à fréquence de 1.1 GHz, 4.25GHz et 7.25GHz. Par conséquent, c'est le meilleur angle d'incidence pour estimer l'humidité du sol. Par contre, le signal radar est plus sensible à la rugosité de la surface aux angles plus élevés.

• **Polarisation** – une propriété de l’onde électromagnétique qui décrit l’orientation du champ électrique du signal émis et reçu dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. L’antenne du radar transmet habituellement des hyperfréquences avec une polarisation horizontale (H) ou verticale (V). et reçoit de l’énergie rétrodiffusée avec polarisation horizontale ou verticale, mais certains radars peuvent émettre et recevoir les deux (RADARSAT-2, TerraSAR-X, ALOS). Il peut donc y avoir quatre combinaisons de polarisations de transmission et réception: HH, VV, HV et VH (Centre canadien de télédétection, 2010b). Quand la polarisation des ondes émise et réfléchi est identique, l’acquisition est donc en polarisation parallèle (HH, VV), tandis que si elles sont en deux directions perpendiculaires (HV, VH), la polarisation s’appelle croisée. Avec l’augmentation de la rugosité de surface ou la densité du couvert végétal, la dépolarisation du signal augmente. En conséquence, l’intensité du signal en polarisation croisée (HV) augmente.

Le processus par lequel le signal radar est diffusé par la cible dépend de la polarisation du signal incident. Les différentes polarisations ont différentes profondeurs de pénétration pour la même fréquence et les mêmes caractéristiques de surface du sol.

Pour l’estimation de l’humidité du sol, souvent les rapports de copolarisation (p) ou d’orthopolarisation (q) sont utilisés (Oh *et al.*, 1992), où p et q sont définis comme :

$$p = \frac{\sigma_{hh}^{\circ}}{\sigma_{vv}^{\circ}} \qquad q = \frac{\sigma_{hv}^{\circ}}{\sigma_{vv}^{\circ}} \qquad \text{Eq. 5}$$

Selon les études (Oh, 2004; Ulaby *et al.*, 1986), le rapport d’orthopolarisation (q) est presque insensible à l’humidité du sol. En dB, le rapport d’orthopolarisation (depolarisation) est défini par :

$$q = \sigma_{hv}^{\circ} (dB) - \sigma_{vv}^{\circ} (dB) \qquad \text{Eq. 6}$$

Holah *et al.* (2005) ont observé une relation linéaire entre le rapport d’orthopolarisation (σ_{hh}/σ_{hv}) et l’humidité du sol volumétrique.

Holah *et al.* (2005) ont aussi étudié la dépendance du signal radar du capteur ASAR/ENVISAT (bande C) à la rugosité. Leur étude montre que la dynamique de la rétrodiffusion pour les polarisations HH et HV est très faible (~1dB) pour les surfaces ayant une rugosité dont rms de la hauteur varie entre 0,5 et 3,56 cm et des angles d’incidence entre 20° et 24°. Pour la polarisation VV, la dépendance de la rétrodiffusion à rms de l’hauteur de la surface est également très faible, pour tous les angles d’incidence étudiés. Ainsi, leurs résultats montrent que les polarisations

HH et HV sont plus sensibles à la rugosité de la surface que la polarisation verticale (VV) et que le rapport d'orthopolarisation (σ_{hh}/σ_{hv}).

1.3.1.2. Paramètres de la surface

- **Topographie** - La topographie modifie l'angle d'incidence local. Les pentes orientées vers le système radar auront un angle d'incidence local plus petit que pour une surface plane, tandis que les pentes orientées à l'opposé du radar auront un angle d'incidence local plus important que celui supposé pour une surface plane. Cette variation de l'angle d'incidence provoque de variation dans le coefficient de rétrodiffusion pour des surfaces avec des caractéristiques similaires.

- **Végétation** - L'effet de la végétation est d'atténuer les émissions micro-ondes par le sol, mais il ajoute aussi au flux radiatif total avec ses propres émissions (Engman and Chauhan, 1995). La mesure dans laquelle la végétation influe sur la détermination de l'humidité du sol dépend de la densité de la végétation, de la longueur d'onde, de l'angle d'incidence et de la polarisation. Le couvert végétal est plus transparent pour les longueurs d'onde plus longues (bande L) et la surface du sol a une contribution significative dans le signal rétrodiffusé mesuré. Les longueurs d'ondes plus courtes (bande X) sont dominées par la diffusion de la surface du couvert végétal. Aussi, la polarisation VV est beaucoup plus affectée par la végétation que la polarisation HH à cause de sa dépendance à la structure végétale (Engman and Chauhan, 1995). Comme résultat, σ_v diminue. Avec le développement saisonnier de la végétation, la structure du couvert végétal change. En conséquence, la rétrodiffusion croisée (σ_{hv}) augmente grâce à dépolarisation du signal par l'orientation correspondante des composantes des plantes (Zillmann *et al.*, 2004).

- **Rugosité** – un paramètre physique caractérisant la surface du sol. La rugosité du sol peut être considérée comme une hauteur variable de la surface du sol par rapport à une surface de référence. La rugosité peut être considérée comme la somme des différentes composantes correspondant à des échelles différentes: (1) agrégats individuels et grains; (2) mottes de terre, qui représentent la composante aléatoire; (3) des sillons ou labours du sol et (4) les tendances topographiques, qui constituent la surface de référence. Pour de nombreux domaines agricoles, la rugosité dépend de la direction: les champs labourés ont une rugosité différente dans la direction des rangs par rapport à la direction perpendiculaire à leur orientation. L'orientation de sillons par rapport de la ligne de vol du satellite est également importante (Verhoest *et al.*, 2008).

La rugosité du sol détermine le type de rayonnement réfléchi. Une surface très lisse reflète toute l'énergie dans la direction spéculaire et aucun signal n'atteint l'antenne, alors qu'une surface très rugueuse diffuse l'onde incidente dans toutes les directions. La plupart des surfaces naturelles reflètent à la fois le signal incident et des signaux diffus, avec des proportions variant en fonction de la rugosité et l'angle d'incidence local (Ulaby *et al.*, 1986). La rugosité du sol est la limitation majeure pour l'estimation de l'humidité du sol. Souvent, les effets de la rugosité sur le signal rétrodiffusé sont égaux ou supérieurs à ceux produits par l'humidité du sol. Pour une surface très rugueuse, le coefficient de rétrodiffusion est plus élevé et, en conséquent, la surface apparaît plus claire sur l'image radar (Ulaby *et al.*, 1986). Avec l'augmentation de la rugosité de surface, les effets des diffusions multiples deviennent plus forts, générant une composante de diffusion HV adéquat (Hajnsek, 2003). Le coefficient de rétrodiffusion peut avoir une variation jusqu'à 45 dB en raison de la rugosité de la surface dépendamment de l'angle d'incidence et de la fréquence. Pour les surfaces très rugueuses, le coefficient de rétrodiffusion varie faiblement avec l'angle d'incidence (Ulaby *et al.*, 1986). La présence de couverture végétale diminue l'effet de la rugosité sur le signal rétrodiffusé.

La texture du sol affecte le signal radar. Cependant, compte tenu des autres facteurs, son effet est relativement faible et peut être négligée pour des raisons pratiques (Engman and Chauhan, 1995). Alors, la détermination de l'effet de la rugosité sur le signal rétrodiffusé devient le principal paramètre à estimer afin d'inverser le coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité du sol.

En conclusion, pour une meilleure sensibilité à l'humidité du sol et une influence minimale de la rugosité et de la végétation, les paramètres optimaux du capteur correspondent à une fréquence dans l'ordre de 4-5 GHz (bande C) et un angle d'incidence dans l'intervalle de 7-22° qu'importe la polarisation du signal. Pour les champs labourés, la polarisation croisée HV est préférée, car elle est moins sensible à la direction de sillons en comparaison de σ_{hh} et σ_{vv} . En général, l'humidité présente dans la couche supérieure (0-5 cm) de la surface du sol semble décrire adéquatement la réponse du radar (Ulaby *et al.*, 1986).

1.3.2. Modèles

En raison des interactions complexes entre les facteurs mentionnés ci-dessus, il est difficile d'estimer l'humidité du sol avec des données RSO à polarisation unique, ou à une

seule fréquence ou à un angle d'incidence unique. Plusieurs algorithmes ont été développés pour déceler (démêler) les influences relatives de la rugosité, de la végétation et de l'humidité du sol sur le signal rétrodiffusé (σ°). Ces modèles peuvent être empiriques, semi-empiriques, ou théoriques. Ils essaient de prédire le coefficient de rétrodiffusion d'une configuration radar donnée (la fréquence, la polarisation et l'angle d'incidence) et les caractéristiques de surface (propriétés diélectriques et la rugosité de surface) connues. L'inversion de ces modèles, donc, permet d'estimer les paramètres de la surface à partir de la rétrodiffusion mesurée pour une configuration du capteur donnée.

Les modèles physiques sont fondés sur les théories électromagnétiques de diffusion. Les modèles standard sont basés sur l'approximation de Kirchhoff (GOM – Geometrical Optics Model. POM – Physical Optics Model) et le modèle des petites perturbations (SPM). Ces modèles peuvent être appliqués uniquement pour des conditions restreintes de rugosité. Le modèle IEM (Integral Equation Model) (Fung and Chen, 1992) a obtenue la plus grande popularité car ce modèle unifie les modèles de Kirchhoff et SPM et, comme résultat, son domaine de validité couvre une gamme plus vaste de rugosités.

Cependant, nombreuses sont les études (Leconte *et al.*, 2004; Baghdadi *et al.*, 2002) qui montrent que l'IEM et d'autres modèles existants ne fournissent pas toujours une bonne concordance avec les données extraites des capteurs radar. La raison principale est que ces modèles échouent en ne pouvant rendre compte avec précision de la géométrie complexe de la surface du sol (l'effet de la rugosité) (Wagner *et al.*, 2007). En dépit de leur complexité, seuls des modèles théoriques peuvent produire une compréhension de l'interaction entre l'onde électromagnétique et la surface terrestre.

Il existe un grand nombre de modèles empiriques. La plupart de ces modèles sont basé sur la régression entre le coefficient de rétrodiffusion observé et l'humidité du sol (**Eq. 1-2**). Souvent, ces modèles présument que la rugosité additionne un supplément à l'intensité du signal rétrodiffusé. Pour une surface nue avec une rugosité uniforme, le lien entre l'humidité du sol et le coefficient de rétrodiffusion pourrait être présenté comme :

$$M_v = a + b\sigma_s^\circ \quad \text{Eq. 7}$$

où **a** et **b** sont les coefficient de régression, qui englobent la rugosité de la cible et les paramètres caractérisant la prise de scène et le capteur, comme la longueur d'onde, l'angle d'incidence et la polarisation.

Cependant, comme les modèles empiriques sont dérivés des données terrain, ils sont dépendants des sites et s'appliquent aux conditions de surface et aux paramètres du radar au moment de l'expérience (Chen *et al.*, 1995).

Dubois et al. (1995) ont proposé un modèle empirique basé sur les coefficients de rétrodiffusion à polarisation verticale (σ_{hh}) et horizontale (σ_{vv}). Ils l'ont testé sur une variété des scènes prises entre 1991 et 1994 avec différents capteurs (SIR-C et AIRSAT). Leurs résultats montrent une erreur de moins de 4% pour l'estimation de l'humidité du sol. Cependant, ce modèle a aussi un domaine de validité très restreint.

Pour éviter les limitations des modèles empiriques et théoriques, des modèles semi-empiriques ont été développés. Ceux-ci sont fondés sur des bases théoriques avec certains paramètres du modèle dérivés de données expérimentales. Le plus connus sont les modèles de Oh (Oh et al. 1992; Oh, 2004). Oh propose une technique d'inversion appliquée sur les coefficients de rétrodiffusion polarimétriques σ_{vh} et p ($p = \sigma_{hh}/\sigma_{vv}$). Pour améliorer les performances de l'IEM, (Baghdadi *et al.*, 2004), ont proposé une approche semi-empirique qui consiste à utiliser une forme donnée de la fonction d'autocorrélation et d'estimer la longueur de corrélation pour chaque configuration radar et chaque rms de l'hauteur. Ainsi, ils ont proposé une longueur de corrélation optimale, qui sert comme paramètre d'étalonnage pour le modèle.

Plusieurs autres techniques pour l'extraction de l'humidité du sol ont été proposées. Ces techniques sont basées surtout sur les données multitemporelles, multi-angles ou multi-polarimétriques dont la principale idée est de minimiser l'influence de la végétation et de la rugosité.

Malgré les efforts extensifs, plus de 30 ans après le lancement du premier satellite à RSO (Seasat, 1978), l'extraction d'humidité du sol à partir des images satellitaires n'a pas atteint une étape opérationnelle.

2. Objectifs

Quelques études évaluant le potentiel des images ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) pour le suivi de l'humidité du sol de la plaine Campidano (Sardaigne, Italie) ont été déjà réalisées (Gherboudj *et al.*, 2007; Guillotte *et al.*, 2005; Hoang, 2008). Celles-ci étaient surtout qualitatives. Leur objectif était de déterminer si les variations du coefficient de rétrodiffusion et d'autres changements détectés dans la séquence d'images correspondaient aux données terrain (l'humidité du sol, la rugosité du sol, précipitations, l'irrigation, le couvert végétale, le modèle numérique d'altitude) et s'ils pourraient être attribués aux variations d'humidité du sol. Gherboudj *et al.* (2007) ont aussi essayé de modéliser le signal radar en utilisant des paramètres du sol comme l'humidité et la rugosité en appliquant une approche semi-empirique. Cependant, leurs résultats montrent que l'interaction de l'humidité et de la rugosité des sols sur le signal radar est très complexe.

À la suite de ces travaux, l'objectif de la présente étude est d'évaluer le potentiel des images RADARSAT-2 polarimétriques pour le suivi de l'humidité du sol nu de champs agricoles du Campidano (Sardaigne, Italie) et de déterminer une relation entre le signal radar (les paramètres polarimétriques) et l'humidité et la rugosité du sol nu.

3. Méthode

Pour la réalisation de l'objectif du mini-projet, plusieurs méthodes d'analyse polarimétrique ont été évaluées, tout en précisant la relation entre les paramètres du sol (l'humidité et la rugosité) et la réponse des paramètres polarimétriques. Parmi ces méthodes, nous avons retenu 1) la décomposition de Pauli, 2) la décomposition de Cloude et de Pottier au moyen de ses trois paramètres : entropie (H), anisotropie (A) et angle α , et 3) la signature polarimétrique. La démarche suivie pour la réalisation de ce mini-projet comporte trois étapes : le prétraitement des images, l'extraction des paramètres polarimétriques et l'analyse des résultats.

3.1. Le secteur d'étude

Les 10 parcelles agricoles étudiées sont situées dans la plaine du Campidano en Sardaigne, Italie. Le secteur d'étude est présenté à la Figure 3.1. Le territoire de l'île de la Sardaigne est essentiellement accidenté et montagneux (altitude moyenne : 500 m) et atteint une altitude maximale de 1834 m dans la partie centre-orientale de l'île (à Punta Lamarmora, dans le massif du Gennargentu). La seule plaine est celle du Campidano, située dans la partie sud-ouest de la Sardaigne qui s'étend sur une longueur d'environ 100 km entre Cagliari et Oristano. L'agriculture y est l'occupation principale. Le climat est de type méditerranéen, avec des étés chauds et humides atténués par des brises marines, et des températures pouvant atteindre 35°C en juillet et août. La période des pluies se situe entre novembre et février (surtout au Nord-Ouest), mais le volume annuel des précipitations reste faible. L'île est souvent frappée par des sécheresses, avec des températures pouvant monter jusqu'à 45°C. La superficie des parcelles agricoles étudiées varie entre 3600 m² (champ f_22) et 31000 m² (champs f_21). Seulement un de ces champs a été irrigué (f_11). Le champ f_21 a été séparé en deux parcelles, car, selon les notes prises sur le terrain (fichier 2008_SamplingMethodology_Final_OK[1].doc), la partie plus proche des bâtisses (f_21_2) est plus sableuse, lisse et sèche, tandis que la partie plus éloignée (f_21_1) est plus argileuse, plus rugueuse et humide. Toutefois, une contradiction entre cette description et les données terrain a été trouvée. Selon les données terrain et les coordonnées GPS associées, la partie plus près des bâtisses est plus humide.

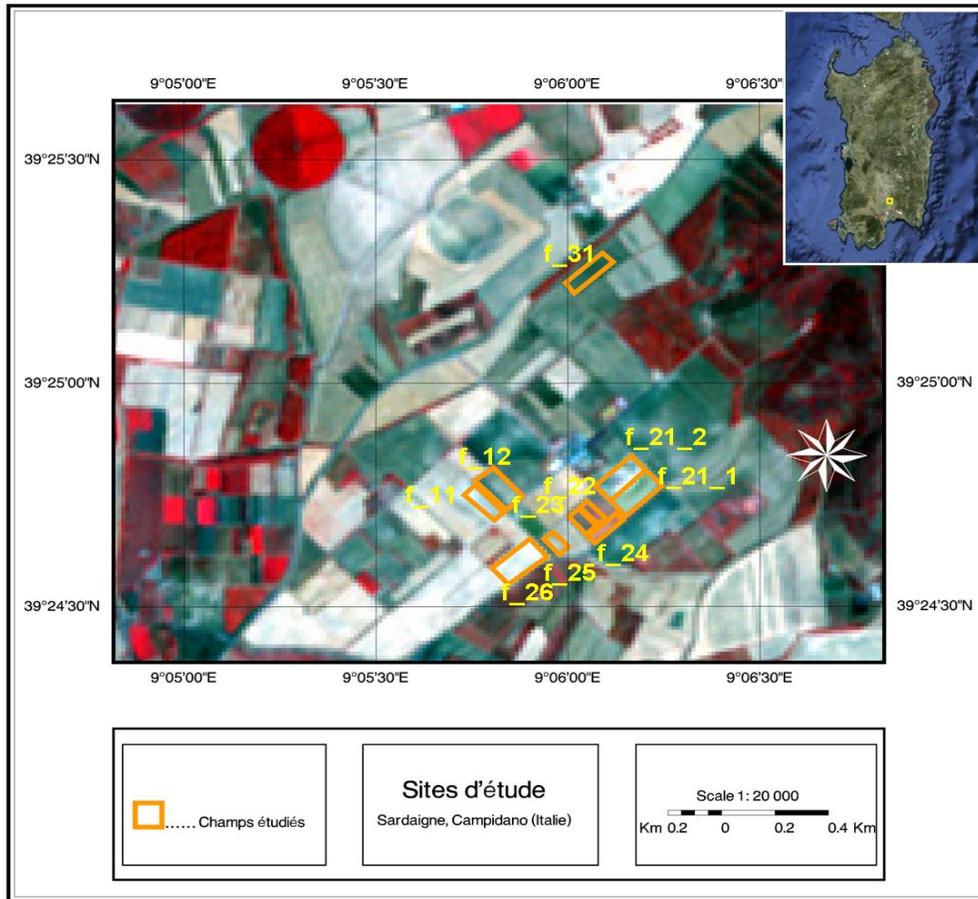


Figure 3.1. Localisation de sites d'étude – Campidano (Île Sardaigne, Italie) sur le composé couleur de l'image ASTER orthoréctifiée (RVB – bandes B3/B2/B1) - Les contours oranges délimitent les champs échantillonnés.

3.2. Les données utilisées

3.2.1. Données terrain

3.2.1.1. Humidité du sol

Les mesures d'humidité utilisées pour cette étude ont été effectuées à l'aide de sondes FDR (Frequency Domain Reflectometry). Cet appareil mesure, avec quatre électrodes, l'écart de fréquence ou de phase entre l'onde émise et l'onde réfléchie, qui varient selon la teneur en eau dans le sol. Lors de la campagne de terrain en 2008, un total de 9 champs ont été échantillonnés. En mai 2008 seulement 3 champs de sol nus ont été échantillonnés. Lors de chaque passage du satellite, de 20 à 25 points ont été échantillonnés sur chaque parcelle. Pour chaque point échantillonné, 3 mesures représentatives de conditions d'humidité ont été prises pour chacune des 3 profondeurs suivantes : à la surface, à 5 cm et à 10 cm de profondeur. En surface, les sondes ont été installées verticalement ce qui permet de mesurer une valeur d'humidité intégrée. Aux profondeurs de 5 cm et 10 cm, les sondes ont été installées horizontalement. En juin, 6 parcelles de sols nus ont été ajoutées. Pour chacune de ces parcelles, 5 points ont été échantillonnés à deux profondeurs différentes : à 5 cm et à 10 cm. Des mesures gravimétriques ont été réalisées pour la calibration de sondes FDR. Selon les notes de l'équipe qui a effectué cette calibration, la différence entre les mesures obtenues par les sondes FDR et par la méthode gravimétrique est toujours moins de 5% (fichier 2008_SamplingMethodology_Final_OK[1].doc). Des relevés GPS ont été effectués sur chaque point de mesure. Les contours des parcelles ont été définis par les coordonnées de quatre points échantillonnés aux extrémités de chaque parcelle.

3.2.1.2. Rugosité du sol

Les mesures de rugosité ont été effectuées à l'aide d'un profilomètre (rugosimètre) à aiguilles de 1 m de longueur avec une distance entre les aiguilles de 2 cm (**Figure 4.2**). Des photos numériques du profilomètre ont été prises afin d'enregistrer la rugosité de la surface. Les mesures ne sont prises qu'une seule fois pour toute la campagne. Pour chaque parcelle, 3 points choisis aléatoirement ont été échantillonnés.



Figure 3.2 Profilomètre utilisé pour caractériser le profil d'élévation du sol

3.2.2. Les images

Pour la réalisation du mini-projet, des images RADARSAT-2 ont été utilisées. Opérationnel depuis décembre 2007, le satellite RADARSAT-2 est équipé d'un système RSO performant dont l'avantage principal, par rapport aux caractéristiques de son prédécesseur RADARSAT-1, est l'ajout de données polarimétriques (en mode fin et standard). En effet, le capteur RADARSAT-1 acquiert des images avec un signal copolarisé HH, tandis que RADARSAT-2 peut envoyer et recevoir des ondes radar dans les deux polarisations, soit horizontale (H) et verticale (V). Cela produit des signaux copolarisés (HH et VV) et des signaux de polarisation croisée (HV et VH). Alors, RADARSAT-2 offre 3 modes polarimétriques suivants :

- **Polarisation Double** : (HH et HV) ou (VH et VV)
- **Polarisation Quadruple**: (HH + VV + HV + VH)
- **Polarisation Sélective Unique**: (HH) ou (HV) ou (VH) ou (VV)

RADARSAT-2 est le premier satellite commercial à offrir des capacités de polarisation quadruple (quad-pol) en bande C (5.405 GHz). Comme résultat, 4 canaux (HH, HV, VV et VH) de polarisation différents sont acquis par l'image. En mode quad-pol, l'information sur l'amplitude et la phase des ondes radar est conservée à la fois, ainsi que

Afin de réaliser l'objectif de ce mini-projet, 5 images RADARSAT-2 de type Single Look Complex (SLC) en mode Quad-Pol Fin (polarisation quadruple : HH, HV, VH, VV) ont été utilisées. Ces images ont été acquises dans le période du 24 mai au 24 juin 2008. L'angle d'incidence pour les 5 images varie entre 19,8° et 28,7°, la résolution spatiale en azimut est d'environ 5 m et en portée est d'environ 12 m respectivement. Ces images ont été fournies par l'Agence spatiale canadienne (ASC) dans le cadre du programme SOAR (Science and Operational Applications Research for RADARSAT-2). Les caractéristiques des images utilisées sont présentées au **Tableau 4.2**.

Tableau 3.1. Caractéristiques principales² du satellite RADARSAT-2

Information générale	
Type de satellite	Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO)
Poids	2200 kg
Durée de la mission	7 ans
RSO antenne dimensions	15m x 1.5m
Panneaux solaires (chaque)	3.73m x 1.8m
Bus dimensions	3.7m x 1.36m
Caractéristiques du système RSO	
Bande de fréquence	C- Bande (5.405 GHz)
Bande passante	100 MHz
Polarisation	HH, HV, VH, VV
Résolution spatiale	De 3 à 100 mètres
Direction de visée	Visée à gauche et à droite de routine
Caractéristiques orbitales	
Orbite	Héliosynchrone
Altitude	798 km
Inclinaison	98.6 degrés
Période	100.7 minutes
Héliosynchrone	14 orbites par jour
Cycle de revisite	24 jours
Couverture avec une largeur de fauchée de 500 km	
70°N	Quotidiennement
Entre 48°N et 70°N	Tous les 1-2 jours
À l'équateur	Tous les 2-3 jours

Tableau 3.2. Caractéristiques des images RADARSAT-2 utilisées

Date	L'heure locale de passage	Orbite	Type	Mode	Angle d'Incidence	Résolution, portée au sol x azimuth
24 mai 2008	09 :39	desc	SLC	Quad-Pol Fin, FQ3 (HH, VV, HV, VH)	20°,9 – 22°,8	12.7 x 5.4 m
27 mai 2008	21 :08	asc	SLC	Quad-Pol Fin, FQ2 (HH, VV, HV, VH)	19°,8 – 21°,8	13.3 x 4.9 m
13 juin 2008	21 :13	asc	SLC	Quad-Pol Fin, FQ7 (HH, VV, HV, VH)	25°,8 – 27°,6	10.5 x 4.7 m
17 juin 2008	09 :39	desc	SLC	Quad-Pol Fin, FQ3 (HH, VV, HV, VH)	20°,9 – 22°,8	12.7 x 5.3 m
24 juin 2008	09 :35	desc	SLC	Quad-Pol Fin, FQ8	26°,9 – 28°,7	10.1 x 4.8 m

² http://www.radarsat2.info/about/mediakit/backgrounder_R2.pdf

				(HH, VV, HV, VH)		
--	--	--	--	------------------	--	--

Une image ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) a été également utilisée comme image de référence pour la correction géométrique des images RADARSAT-2. La mode VNIR (Visible and Near Infrared) de cette image, composé des trois bandes B1 ($\lambda \approx 0.52 - 0.60$ nm), B2 ($\lambda \approx 0.63 - 0.69$ nm) et B3 ($\lambda \approx 0.76 - 0.86$ nm) dans le spectre visible et proche infrarouge, a été utilisée car la résolution est la plus élevée (15 mètres). Le niveau de prétraitement est L1B (avec une calibration radiométrique et un rééchantillonnage géométrique appliqués par le fournisseur). L'image ASTER a été acquise le 17 juillet 2007.

3.3. **Prétraitement des données**

3.3.1. **Données terrain**

L'humidité

Pour la présente étude, seules les mesures d'humidité à la surface et de 0 à 5 cm ont été prises en compte, car la pénétration du signal radar en bande C varie entre 0 et 5 cm dépendamment du contenu en eau dans le sol. Pour chaque point échantillonné, 3 mesures ont été prises pour chaque profondeur. Une moyenne de toutes ces mesures (3 mesures x 2 profondeurs = 6 mesures pour chaque points échantillonné) a été calculée. Ensuite, la moyenne des valeurs pour tous les points échantillonnés dans une parcelle donnée a été prise comme la mesure d'humidité à l'échelle du champ. L'humidité varie entre 2,8 % et 15,1%. L'écart-type de la moyenne d'humidité du sol est relativement faible et varie entre 0,53 et 2,74%. Les résultats sont présentés au **Tableau 4.3**.

La rugosité

Dans le cadre de ce mini-projet, les positions des aiguilles ont été lues à partir de photos du profilomètre à l'aide d'un programme permettant de créer un profil de la rugosité. Ces profils ont ensuite été utilisés pour le calcul de l'écart type de la hauteur de la surface (**s**) du sol ainsi que pour le calcul de la longueur de la corrélation (**I_c**). Ces deux paramètres sont utilisés pour caractériser les variations verticales et horizontales de la surface. Ces valeurs dépendent des pratiques agricoles et des effets de la pluie sur le sol (Baghdadi *et al.*, 2003). Pour chaque parcelle, pour les trois points échantillonnés, de 3 à 5 profils ont été utilisés pour calculer la moyenne de **s** et **I_c** (**Tableau 4.3**). Dans les cas, où des profils en deux directions perpendiculaires (x et y) étaient disponibles, 3 profils pour chaque point échantillonné ont été utilisés pour calculer le moyenne de **s** et **I_c** .

Tableau 3.3. Résultats des mesures de l'humidité pour tous les champs étudiés.

Parcelle	24-05-2008		27-05-2008		13-06-2008		17-06-2008		24-06-2008	
	$m_{v, \%}$	σ_{mv}								
f_11	15,13	1,94	14,92	1,57	13,85	2,74	11,81	2,25	9,98	1,76
f_21_1	13,06	0,77	9,90	1,16	5,57	1,41	5,85	1,97	5,01	1,23
f_21_2	15,13	2,03	11,77	1,24	6,92	1,01	8,43	1,55	6,00	1,24
f_31	11,42	1,39	5,99	1,40	4,71	1,04	4,52	0,82	2,76	0,84
f_22					4,84	0,53	5,22	0,76	3,1	0,55
f_12							5,35	2,15	4,84	0,76
f_23					4,64	1,22	5,38	1,31	3,85	0,95
f_24					5,42	1,18	5,26	1,09	2,92	0,82
f_25					4,82	0,54	3,9	1,19	3,46	1,06
f_26					3,5	1,84	3,47	1,08	2,9	1,04

Tableau 3.4. Résultats des mesures de paramètres de rugosité (s et l_c) pour tous les champs étudiés.

Parcelle	13-06-2008			
	$s, \text{ cm}$	$\sigma_s, \text{ cm}$	$l_c, \text{ cm}$	$\sigma_{l_c}, \text{ cm}$
f_11	1,41	0,48	15,06	10,08
f_21	1,68	0,59	9,82	4,78
f_31	1,66	0,29	8,17	6,25
f_22	2,00	0,78	13,38	9,61
f_12	2,11	1,05	16,13	13,08
f_23	2,88	1,16	17,43	8,15
f_24	2,73	1,33	13,04	6,96
f_25	2,26	1,51	15,74	7,60
f_26	2,20	0,97	7,59	4,20

3.3.2. Les images

Afin de rendre les informations enregistrées dans les images radar utilisables pour l'analyse, les images radar ont besoin d'une série de prétraitements. Ces prétraitements incluent trois étapes essentielles : l'étalonnage radiométrique, la réduction du chatoiement et la correction géométrique.

Étalonnage radiométrique

L'étalonnage radiométrique des images RADARSAT-2 a été effectué automatiquement par le logiciel PCI Geomatica. Cet étalonnage a pour but de calculer le coefficient de rétrodiffusion (σ^0) à partir des valeurs numériques du pixel et l'information spécifique à la configuration du capteur, telle que l'angle d'incidence, la fréquence, et la polarisation. Une telle calibration permet d'effectuer des analyses multi-temporelles des différentes images acquises avec la même configuration du capteur (Baghdadi *et al.*, 2008)

Réduction de chatoiement

Le chatoiement est un phénomène semblable à du bruit, inhérent aux radars à synthèse d'ouverture (RSO). Le chatoiement est produit par l'interférence aléatoire des ondes électromagnétiques diffusées par des objets multiples dans chaque cellule de résolution. Son effet se manifeste comme une texture granuleuse « sel et poivre » sur les images. Le chatoiement dégrade la qualité des images et, en conséquence, l'efficacité de leur analyse et leur interprétation est réduite. Pour réduire son effet, le lissage et le filtrage sont souvent utilisés. De nombreux algorithmes ont été élaborés pour filtrer le chatoiement. Parmi ces méthodes, le filtre de Lee (Lee, 1980) a obtenu la plus grande popularité car il réduit le chatoiement mais préserve les contours et le contraste entre les objets.

Pour réduire le chatoiement des images, un filtre Lee de taille 5 x 5 pixels a été appliqué sur les canaux polarimétriques (HH, HV, VH, VV) individuels. Le filtre Lee a été appliqué aux images RADARSAT-2 avant l'application de corrections géométriques afin de ne pas altérer le signal radar par les transformations. Ceci permet de rendre l'image plus claire afin de faciliter l'identification des points de contrôle au sol (GCP). Comme l'application du filtre de Lee a créé des effets visuels (« des taches ») montrés à la **Figure 4.4**, les filtres Frost, Kuan, Moyen et Lee Rehaussé ont également été essayés (appliqués). Comme le montre le **Tableau 4.5**, la différence dans la rétrodiffusion, extraite de chaque parcelle après le filtrage de l'image avec les cinq filtres, est très minime. La plus grande différence est entre le filtre « Moyen » et le filtre Lee. Alors, malgré l'apparence tachetée des images filtrées avec le filtre Lee, le contraste et la résolution des éléments plus fins sont meilleurs. Comme résultat, ce dernier a été retenu pour nos traitements.

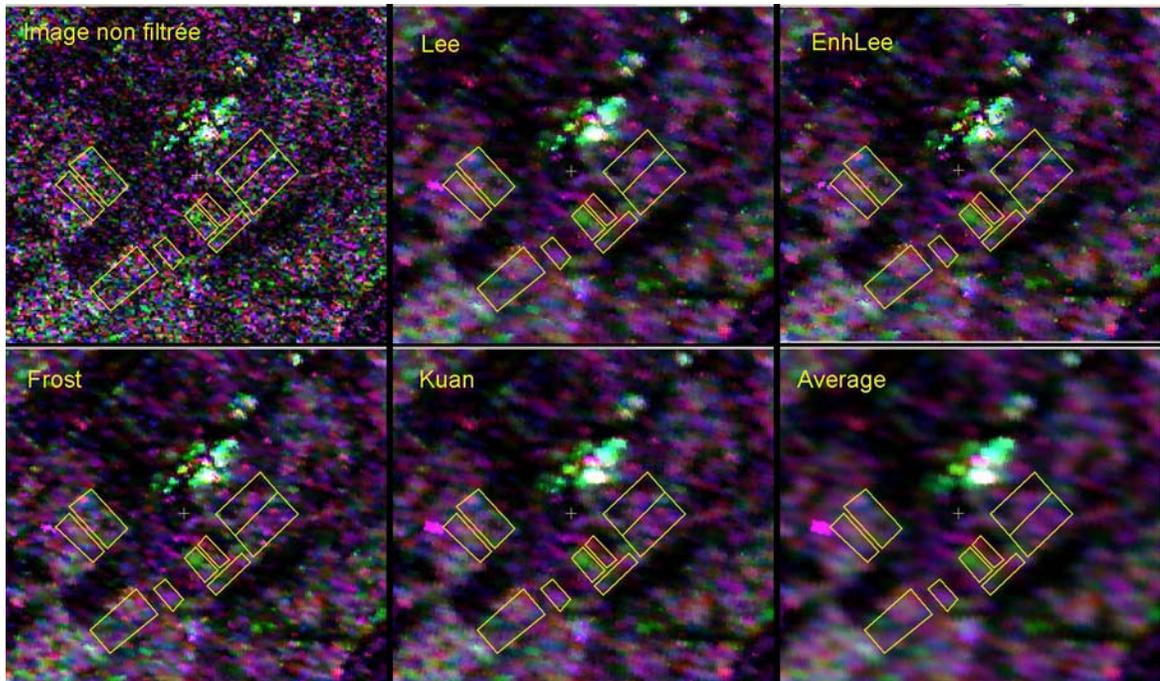


Figure 3.4. Filtres appliqués sur le composé couleur de l'Image RADARSAT-2 du 24 juin 2008 (Rouge – HH, Vert – HV, Bleu – VV)

En parallèle, pour l'analyse des paramètres polarimétriques (entropie, anisotropie, etc) basés sur la matrice de cohérence, un filtre Lee (Refined Lee PolSar Speckle Filter) intégré dans le logiciel PolSARPro a été appliqué afin de ne pas altérer les caractéristiques de diffusion (la différence de phase et la corrélation entre les polarisations)(Lee and Pottier, 2009). Ce filtre a été appliqué après un lissage (multi-looking) dans la direction de l'azimut.

Tableau 3.5. Comparaison entre le coefficient de rétrodiffusion extrait de chaque parcelle de l'image RADARSAT-2 du 24-06-2008 après application de filtre Lee, Enhanced Lee, Frost, Kuan et Moyen

24-06-2008	Rétrodiffusion					Différence			
	Lee	EnhLee	Frost	Kuan	Average	Abs(Lee-EnhLee)	Abs(Lee-Frost)	Abs(Lee-Kuan)	Abs(Lee-Average)
Parcelle	HH, dB	HH, dB	HH, dB	HH, dB	HH, dB	HH, dB	HH, dB	HH, dB	HH, dB
f_11	-9,91	-9,91	-9,94	-9,90	-9,88	0,001	0,028	0,010	0,036
f_21_1	-10,74	-10,78	-10,73	-10,75	-10,82	0,036	0,008	0,004	0,082
f_21_2	-11,33	-11,34	-11,37	-11,30	-11,29	0,014	0,040	0,030	0,038
f_31	-9,62	-9,63	-9,66	-9,58	-9,60	0,007	0,039	0,042	0,016
f_22	-10,31	-10,32	-10,33	-10,33	-10,41	0,001	0,012	0,020	0,091
f_12	-10,76	-10,81	-10,70	-10,74	-10,85	0,048	0,062	0,017	0,087
f_23	-11,04	-11,05	-11,04	-11,02	-11,00	0,007	0,007	0,018	0,041
f_24	-10,96	-10,97	-10,90	-10,94	-11,05	0,011	0,056	0,020	0,093
f_25	-10,33	-10,32	-10,24	-10,35	-10,44	0,017	0,090	0,011	0,102
f_26	-10,14	-10,13	-10,15	-10,13	-10,16	0,005	0,014	0,006	0,023
						Total abs. diff. = 0,148	Total abs. diff. = 0,355	Total abs. diff. = 0,178	Total abs. diff. = 0,609
	HV, dB	HV, dB	HV, dB	HV, dB	HV, dB	HV, dB	HV, dB	HV, dB	HV, dB
f_11	-19,24	-19,24	-19,29	-19,21	-19,25	0,000	0,048	0,026	0,008
f_21_1	-20,53	-20,55	-20,47	-20,52	-20,56	0,015	0,057	0,008	0,030
f_21_2	-20,99	-21,01	-21,03	-20,98	-20,98	0,013	0,033	0,015	0,014
f_31	-17,60	-17,61	-17,60	-17,61	-17,66	0,004	0,001	0,003	0,053
f_22	-21,29	-21,31	-21,31	-21,32	-21,28	0,020	0,024	0,031	0,008
f_12	-19,22	-19,22	-19,16	-19,21	-19,34	0,006	0,059	0,009	0,126
f_23	-17,41	-17,43	-17,35	-17,38	-17,65	0,015	0,068	0,030	0,239
f_24	-20,19	-20,19	-20,09	-20,19	-20,35	0,000	0,094	0,002	0,159
f_25	-20,34	-20,34	-20,36	-20,34	-20,40	0,000	0,018	0,000	0,059
f_26	-19,09	-19,10	-19,06	-19,06	-19,13	0,010	0,029	0,023	0,042
						Total abs. diff. = 0,083	Total abs. diff. = 0,431	Total abs. diff. = 0,147	Total abs. diff. = 0,736
	VV, dB	VV, dB	VV, dB	VV, dB	VV, dB	VV, dB	VV, dB	VV, dB	VV, dB
f_11	-9,92	-9,92	-9,94	-9,92	-9,86	0,000	0,019	0,005	0,056
f_21_1	-10,39	-10,39	-10,36	-10,39	-10,46	0,000	0,025	0,007	0,074
f_21_2	-11,05	-11,07	-11,08	-11,02	-11,01	0,022	0,029	0,032	0,034
f_31	-9,14	-9,13	-9,14	-9,14	-9,18	0,003	0,005	0,006	0,049
f_22	-11,88	-11,88	-11,85	-11,87	-12,00	0,004	0,032	0,018	0,120
f_12	-10,46	-10,49	-10,41	-10,43	-10,55	0,025	0,056	0,031	0,089
f_23	-11,48	-11,49	-11,43	-11,47	-11,58	0,005	0,046	0,011	0,099

f_24	-11,17	-11,22	-11,13	-11,17	-11,37	0,048	0,045	0,003	0,196
f_25	-9,83	-9,83	-9,76	-9,81	-10,01	0,001	0,066	0,018	0,182
f_26	-10,23	-10,22	-10,22	-10,22	-10,28	0,004	0,008	0,009	0,057
						Total abs. diff. = 0,112	Total abs. diff. = 0,331	Total abs. diff. = 0,140	Total abs. diff. = 0,956

Correction géométrique

Avant l'analyse de données, un traitement initial est nécessaire afin de corriger les distorsions géométriques causées par la courbure de la Terre et sa rotation, le relief à la surface, ainsi que l'altitude, la vitesse et le comportement de la plate-forme, etc. De plus, les images radar, à cause de leur géométrie de visée, subissent différents types des distorsions, comme des distorsions dues au :

- déplacement du relief (« forshortening » et « layover »);
- effet d'ombre;
- échelle oblique.

Les images RADARSAT-2 ont été géoréférencées en système de coordonnées UTM (zone 32 S D000-NAD83) afin de permettre une localisation précise des parcelles étudiées. La correction géométrique des images radar a été effectuée à l'aide d'une image ASTER orthorectifiée. De son côté, l'image ASTER a été rectifiée en utilisant des points de contrôle (GCPs) extraits à partir de vecteurs des routes principales et des chemins de fer (Le Portail Cartographique National , Italie) ³ et d'un Modèle Numérique d'Altitude (MNA) de la région d'étude. La résolution du pixel du MNA utilisé était de 400 m.

Les corrections des images RADARSAT-2 sont faites en utilisant l'algorithme « SAR Specific Model » de PCI Geomatics, tel que recommandé dans le guide de PCI Geomatics pour la correction des images RADARSAT-2 (PCI Geomatics). Ce modèle utilise des paramètres orbitaux supplémentaires qui permettent de maintenir une précision de positionnement avec un nombre réduit de points de contrôle. Quand le nombre de points de contrôle est supérieur à 8 et qu'ils sont bien répartis sur toute l'image, le « SAR Specific Model » donne des résultats similaires à ceux du modèle de Toutin. Pour les fins de ce travail, environ 20 points de contrôle ont été sélectionnés à partir de l'image ASTER orthorectifiée. La majorité de ces points ont été pris à proximité du site d'étude et sont identiques sur les cinq images. Lors de l'orthorectification, les images ont été rééchantillonnées à une résolution de 5 m. La précision des corrections varie entre 0,73 et 1,3 pixels. Comme méthode de rééchantillonnage, la méthode du « plus proche voisin » a été utilisée afin de ne pas altérer le signal radar. Cependant, comme le montre le Tableau 4.5, la différence dans les coefficients de rétrodiffusion moyens pour les parcelles extraites après l'application du rééchantillonnage par « plus proche voisin » et « cubique » est très minime, de l'ordre de ~ 0,01 dB, qui est sous le seuil de sensibilité radiométrique de l'antenne RADARSAT-2.

³ <http://www.pcn.minambiente.it/PCN/index.php?lan=fr>

Tableau 3.6. Coefficients de rétrodiffusion moyenne pour toutes les parcelles extraits des images RADARSAT-2 du 24 juin 2008, après l'application de rééchantillonnage par « le plus proche voisin (NN) » et « cubique »

parcelle	Lee_NN	Lee_Cubic	Lee_NN	Lee_Cubic	Lee_NN	Lee_Cubic	Lee_NN	Lee_Cubic
	HH	HH	HV	HV	HH, dB	HH, dB	HV, dB	HV, dB
f_11	0,1020	0,1016	0,0119	0,0119	-9,91	-9,93	-19,24	-19,24
f_21_1	0,0843	0,0846	0,0088	0,0089	-10,74	-10,73	-20,53	-20,51
f_21_2	0,0736	0,0738	0,0080	0,0079	-11,33	-11,32	-20,99	-21,00
f_31	0,1092	0,1091	0,0174	0,0174	-9,62	-9,62	-17,60	-17,60
f_22	0,0930	0,0935	0,0074	0,0074	-10,31	-10,29	-21,29	-21,30
f_12	0,0839	0,0839	0,0120	0,0120	-10,76	-10,76	-19,22	-19,19
f_23	0,0787	0,0792	0,0181	0,0183	-11,04	-11,01	-17,41	-17,37
f_24	0,0802	0,0802	0,0096	0,0096	-10,96	-10,96	-20,19	-20,17
f_25	0,0926	0,0934	0,0092	0,0092	-10,33	-10,30	-20,34	-20,38
f_26	0,0968	0,0969	0,0123	0,0123	-10,14	-10,14	-19,09	-19,09

De plus, l'image produite avec un rééchantillonnage cubique est visiblement plus lisse. Alors, pour les travaux futurs, un rééchantillonnage cubique pourrait être utilisé.

Pour les fins d'analyse des paramètres polarimétriques extraits de la matrice de cohérence, la correction géométrique a été appliquée après le calcul de la matrice de cohérence (paramètres obtenus avec PolSARpro), afin de ne pas perdre l'information sur la phase. Une description détaillée de la correction géométrique des images produites par PolSARpro est donnée dans l'Annexe.

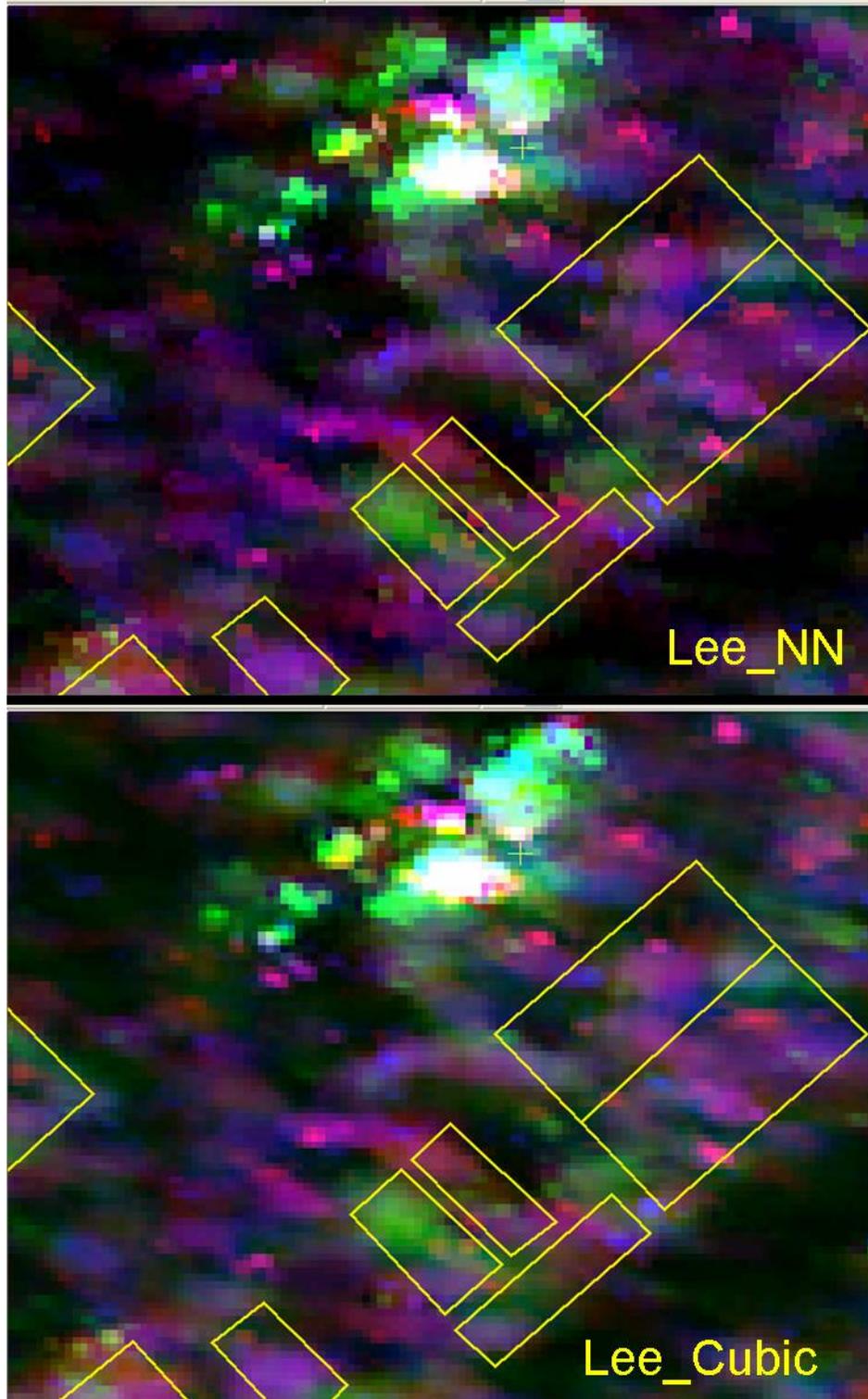


Figure 3.5. Images RADARSAT-2 du 24 juin 2008, après l'application d'un filtre Lee et rééchantillonnage par «plus proche voisin (NN) » et « cubique »

3.4. Détection des changements de l'humidité du sol

Pour minimiser les problèmes posés par la description adéquate de la rugosité des surfaces naturelles et de la végétation, l'utilisation de méthodes de détection de changement a été suggérée (Engman and Chauhan, 1995). Cette méthode consiste en l'utilisation des images multitemporelles. Il est supposé que la rugosité et la biomasse végétale changent généralement sur une période assez longue par rapport aux changements dans l'humidité du sol. En conséquence, le changement du coefficient de rétrodiffusion entre deux passages répétitifs du satellite pourrait être considéré comme un changement provoqué uniquement par les variations de l'humidité du sol.

Dans le cadre de ce mini-projet, le lien entre l'humidité volumétrique du sol et le rapport simple des coefficients de rétrodiffusion multitemporelles σ_{t1} et σ_{t2} (Eq. 8), proposé par Shoshany et al. (2000) (Shoshany *et al.*, 2000) a été testé :

$$m_v = a(\sigma_{t_1} / \sigma_{t_2}) + b \quad \text{Eq. 8}$$

où m_v est l'humidité volumétrique du sol en %, $\sigma_{t_{1,2}}$ sont les coefficients de rétrodiffusion pour deux passages du satellite (t_1 et t_2) et a et b sont des coefficient de régression linéaire. Les auteurs mentionnés ci-dessus ont également proposé une forme logarithmique pour le rapport normalisé afin de minimiser la diffusion de points (Eq. 9). Cette relation a été aussi testée :

$$\ln(m_v) = a \ln(NBMI) + b \quad \text{Eq. 9}$$

où NBMI (Normalized radar Backscatter soil Moisture Index) est donné par l'équation suivante :

$$NBMI = \frac{\sigma_{t_1} + \sigma_{t_2}}{\sigma_{t_1} - \sigma_{t_2}} \quad \text{Eq. 10}$$

Pour appliquer cette méthode, les images doivent être acquises avec la même configuration du capteur RSO. Donc, les images RADARSAT-2 des 24 mai et 17 juin 2008 ont été utilisées, car la configuration de prise de vue de ces images est presque la même (les angles d'incidence (entre 20°,9 et 22°,8), l'orbite (descendante), la faisceau (FQ3), l'heure de passage (09 h 39 m)).

3.5. Analyse polarimétrique

Les images RADARSAT-2 (mode quad-pol) contiennent des informations polarimétriques complètes sur le pixel imagé (l'amplitude + la phase relative entre les canaux) Le but de l'analyse polarimétrique est d'extraire ces informations liées aux propriétés des cibles étudiées.

Comme l'objectif fixé dans le cadre de ce mini-projet est l'évaluation du potentiel des images RADARSAT-2 polarimétriques pour le suivi de l'humidité du sol en milieu agricole, les outils polarimétriques suivants ont été explorés : décomposition de Pauli, décomposition de Cloude et Pottier (Entropie, Anisotropie, Angle α) et signature polarimétrique. Pour le traitement des données de la polarimétrie radar, le logiciel PolSARpro (Agence Spatiale Européenne) a été utilisé. Le comportement du coefficient de rétrodiffusion σ^0 selon les paramètres de surface a été également étudié afin de préciser la relation entre les conditions du sol et les paramètres polarimétriques.

Comportement de la rétrodiffusion en fonction des paramètres de surface

Le coefficient de rétrodiffusion (σ^0) dans chaque canal polarimétrique est le paramètre polarimétrique le plus utilisé pour l'étude des paramètres de la surface. Il représente la portion du signal radar que la cible redirige directement vers l'antenne radar. Comme une première étape, l'intensité (I) moyenne dans les quatre canaux polarimétriques HH, HV, VH et HH, a été extraite des images RADARSAT-2, filtrées et orthoréctifiées, pour chaque parcelle (polygone). Ce coefficient a été transformé en décibel (dB) en appliquant l'équation suivante :

$$\sigma^0 \text{ [dB]} = 10 * \log(\sigma^0) \quad \text{Eq. 11}$$

Ensuite, les relations suivantes ont été explorées :

- Coefficient de rétrodiffusion – humidité du sol (σ^0 - m_v) pour tous les canaux polarimétriques (HH, HV, VH, VV);
- Coefficient de rétrodiffusion – écart type de la hauteur de la surface du sol (σ^0 - s) pour tous les canaux polarimétriques (HH, HV, VH, VV);
- Rapport $\sigma^0_{hh}/\sigma^0_{vv} - m_v$
- Rapport $\sigma^0_{hh}/\sigma^0_{vv} - s$
- Rapport $\sigma^0_{hv}/\sigma^0_{vv} - m_v$
- Rapport $\sigma^0_{hv}/\sigma^0_{vv} - s$

Décomposition de Pauli

La décomposition de Pauli permet de séparer les contributions de diffusions de nature différente encodées dans les données polarimétriques. La rétrodiffusion par des cibles agricoles est généralement formée par une combinaison de 3 composantes soit la diffusion de la surface, la diffusion dans le volume (causée par la végétation), et le signal provenant de l'interaction entre la végétation et le sol. La contribution relative de chaque composante dépend des paramètres du système (fréquence, polarisation et angle d'incidence) et de la cible.

La décomposition de Pauli, exprime la matrice de diffusion $[S]$ comme une somme (Eq. 12) de 3 matrices $[S]_a$, $[S]_b$, $[S]_c$, où chaque matrice correspond à un mécanisme de diffusion particulier (Lee and Pottier, 2009). La matrice $[S]_a$ correspond à diffusion de surface (zones agricoles) produit par les réflexions impaires, $[S]_b$ est associée avec la diffusion dièdre (forêt, zones urbaines) produit par les réflexions multiples paires et $[S]_c$ représente la diffusion du volume (les zones végétales).

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{hv} & S_{vv} \end{bmatrix} = \alpha[S]_a + \beta[S]_b + \gamma[S]_c, \quad \text{Eq. 12}$$

où

$$\alpha = \frac{S_{hh} + S_{vv}}{\sqrt{2}}$$

$$\beta = \frac{S_{hh} - S_{vv}}{\sqrt{2}}$$

$$\gamma = \sqrt{2}S_{hv}$$

Cette décomposition est souvent utilisée pour la visualisation des images radar polarimétriques. Les images composées couleur sont formées à l'aide des intensités $|\alpha|^2$, $|\beta|^2$ et $|\gamma|^2$ qui correspondent aux 3 mécanismes physiques décrits ci-dessus. L'analyse des couleurs dominantes permet d'identifier le mécanisme de diffusion dominant.

Décomposition de Cloude et Pottier

Cloude et Pottier (1997) ont proposé une méthode d'extraction de diffusion moyenne basée sur la décomposition aux valeurs propres de la matrice de cohérence [7] pour analyser en profondeur les différents mécanismes de diffusion des cibles. Selon la décomposition de Cloude et Pottier, la matrice de cohérence révèle trois mécanismes de diffusion indépendants, qui sont la diffusion de surface, la double réflexion et la diffusion de

volume. Ils ont défini 3 paramètres (entropie (H), anisotropie (A) et angle alpha (α)) qui permettent de mieux distinguer les divers mécanismes de diffusion.

Entropie (H) – L'entropie est définie comme l'indicateur du caractère aléatoire du phénomène de rétrodiffusion global. C'est une mesure de dominance d'un mécanisme de diffusion donné. Elle est normalisée entre les valeurs 0 et 1. Une entropie de 0 signifie que la diffusion provient d'un seul mécanisme de diffusion (soit de la surface ou dièdre) et l'entropie égale à 1 représente un mécanisme de diffusion complètement aléatoire et aucune information polarimétrique ne peut être extraite (Centre canadien de télédétection 2010a).

- Entropie – humidité du sol (H - m_v) ;
- Entropy – écarte type du sol (H - s) ;

Angle alpha (α) – quand l'entropie est très basse, l'angle alfa donne de l'information sur la nature du mécanisme diffusant principal (volume, surface, double réflexion).

Anisotropie (A) – L'anisotropie est une mesure de différence entre les mécanismes de diffusion secondaires.

Signatures polarimétriques

La signature polarimétrique est un autre outil polarimétrique à l'aide duquel les mécanismes de rétrodiffusion pourraient être caractérisés. C'est une méthode graphique permettant de visualiser la réponse d'une cible en fonction des polarisations incidentes et rétrodiffusées. Le graphique tridimensionnel est généré à partir des données polarimétriques qui caractérise les réponses du RSO (McNairn and Brisco, 2004).

4. Résultats – analyse et discussion

L'analyse des résultats obtenues nous permet d'évaluer le potentiel des données polarimétrique RADARSAT-2 pour le suivi de l'humidité du sol en milieu agricole.

4.1. Comportement de la rétrodiffusion en fonction des paramètres de surface

Le comportement du signal radar rétrodiffusé σ^0 en polarisation HH, HV, VH, VV, a été étudié en fonction des paramètres du sol, soit l'humidité (m_v) et la rugosité (s et l_c). Le comportement des rapports de copolarisation $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ et d'orthopolarisation $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{hv}^0$ en fonction des paramètres du sol mentionnés a été également étudié.

4.1.1. Comportement de la rétrodiffusion en fonction de l'humidité du sol

Comme il est démontré à la **Figure 5.1.**, durant la période d'étude, soit du 24/05/2008 au 24/06/2008, la dynamique de l'humidité reste très faible. L'humidité du sol diminue avec le temps d'environ 15% pour atteindre un niveau stable de 5% sur toutes les parcelles étudiées pour les trois dernières dates. Le champ f_11 a une humidité plus élevée par rapport aux autres champs car c'est un champ irrigué.

Une légère tendance de diminution du coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH en fonction du temps a été également observée (**Figure 5.2**). Il faut noter que le coefficient de rétrodiffusion est plus élevé pour le 27 mai 2008 (jour 3 à la figure 5.2) que pour 24 mai 2008, même si l'humidité dans les champs pour lesquels les mesures ont été prises à cette date est plus basse. Une variation temporelle du signal rétrodiffusé de 1 à 5 dB peut être observée pour chacune des parcelles étudiées. Ainsi, on peut remarquer, pour chaque date de prise de mesures d'humidité, que le signal rétrodiffusé varie d'environ 2-3 dB (contour rouge à la Figure 5.2). Cette variation est due à la différence des champs en rugosité, en topographie ou en état du labour du sol.

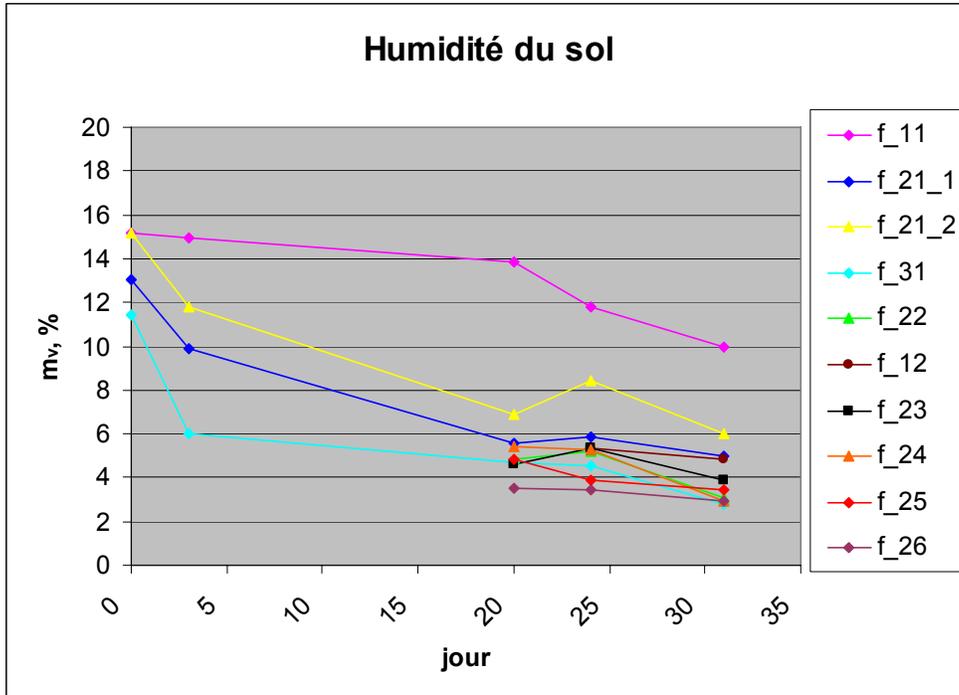


Figure 4.1. L'évolution de l'humidité du sol pour les parcelles étudiées du 24/05/2008 au 24/06/2008. Le jour 0 correspond au début de la période d'étude soit le 24 mai 2008, le jour 31 correspond au 24 juin 2008.

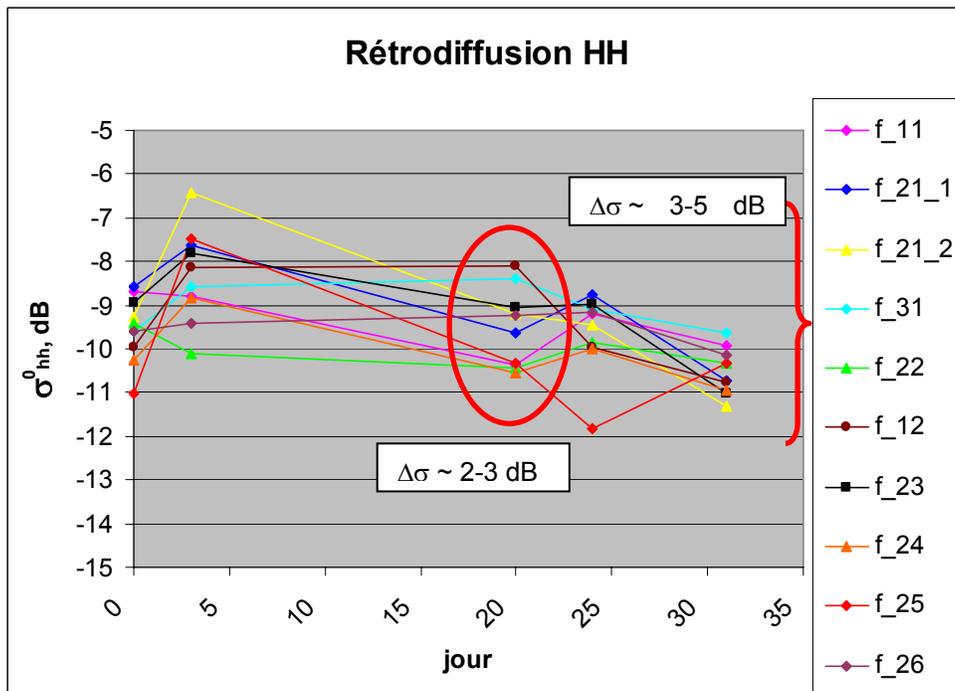


Figure 4.2. L'évolution du coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH pour les parcelles étudiées du 24/05/2008 au 24/06/2008. Le jour 0 correspond au début de la période d'étude soit le 24 mai 2008, le jour 31 correspond au 24 juin 2008.

La figure de l'évolution du signal rétrodiffusé en polarisation VV n'est pas illustrée dans le présent document car son comportement est très similaire à celui en polarisation HH. Le signal en polarisation HV (**Figure 5.3**) ne démontre pas une tendance claire durant la période d'étude. La variation du signal en polarisation HV entre les 10 parcelles est d'environ 5dB pour une date donnée.

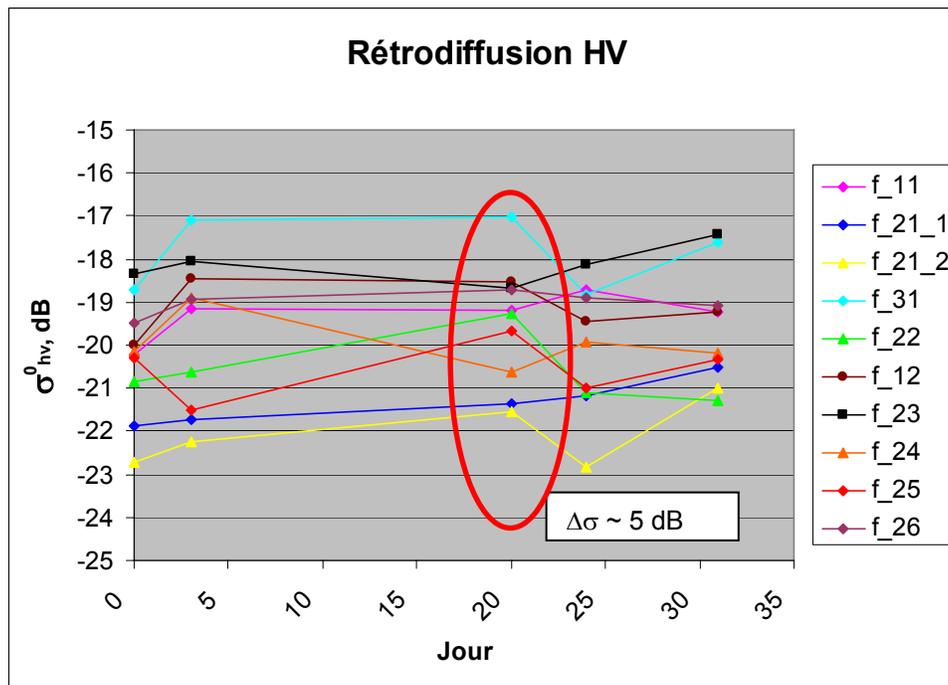


Figure 4.3. L'évolution du coefficient de rétrodiffusion en polarisation HV pour les parcelles étudiées du 24/05/2008 au 24/06/2008. Le jour 0 correspond au début de la période d'étude, soit le 24 mai 2008, le jour 31 correspond au 24 juin 2008.

La **Figure 5.4** représente la dépendance du coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH à l'humidité du sol pour toutes les parcelles étudiées et pour toutes les dates, sans tenir compte de la rugosité de parcelles. La corrélation observée est très faible. La faible dynamique de l'humidité du sol ($\Delta m_v \sim 10\%$) et les différentes caractéristiques des champs comme la rugosité, la présence de la végétation, la différence des angles d'incidence locales ou les différentes pratiques agricoles pourraient être mises en cause. La sensibilité du signal radar à l'humidité du sol est $\sim 0,12$ dB/%, ce qui est inférieur aux valeurs obtenues dans le cadre d'autres études avec de capteurs différents [\sim de 0,18 à 0,34 dB/% (Holah *et al.*, 2005;

Shoshany *et al.*, 2000) pour un angle d'incidence variant entre 20° et 24°]. Toutefois, la gamme d'humidité était beaucoup plus grande.

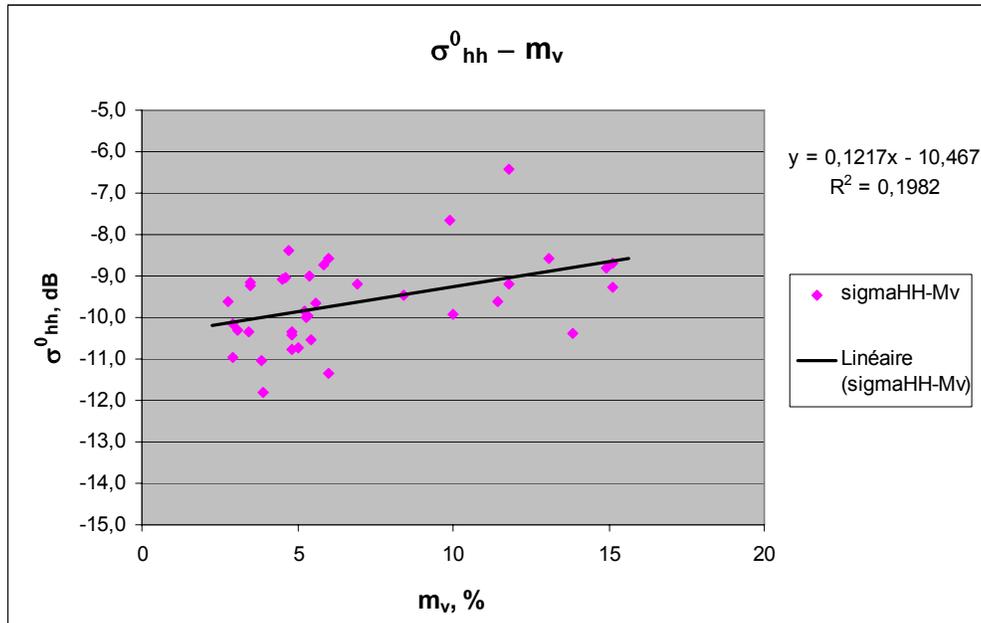


Figure 4.4. Dépendance du signal rétrodiffusé en polarisation HH à l'humidité du sol pour toutes les dates et pour toutes les parcelles étudiées.

Ainsi, comme le démontre la **Figure 5.5**, la relation entre le signal rétrodiffusé en polarisation HH et l'humidité du sol pour une date donnée n'est pas claire. La variabilité de σ_{hh}^0 entre les parcelles pour une date donnée est d'environ 1 à 2dB et est probablement due à l'influence des autres caractéristiques des champs individuels. Il est intéressant de noter que les tendances pour les dates du 24 mai 2008 et du 17 juin 2008 se ressemblent beaucoup. Il est important aussi de noter que les images RADARSAT-2 de ces deux dates ont été prises avec la même configuration radar (les angles d'incidence (entre 20°,9 et 22°,8), l'orbite (descendante), la faisceau (FQ3)). Cette observation confirme que la différence du coefficient de rétrodiffusion avec le temps n'est pas seulement due au changement de l'humidité mais aussi à la différence de la configuration du système radar.

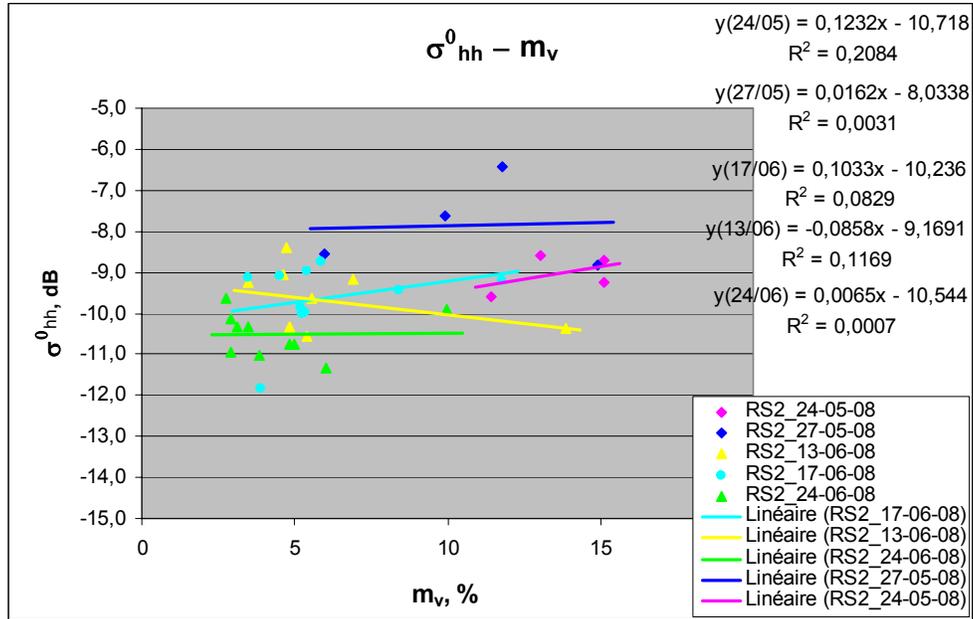


Figure 4.5. Dépendance du signal rétrodiffusé en polarisation HH à l'humidité du sol pour les 5 dates pour lesquelles les images RADARSAT-2 sont disponibles.

La **Figure 5.6** montre que le coefficient de rétrodiffusion en polarisation HV pour toutes les parcelles étudiées et pour toutes les dates, sans tenir compte de la rugosité, est quasiment indépendant de l'humidité du sol.

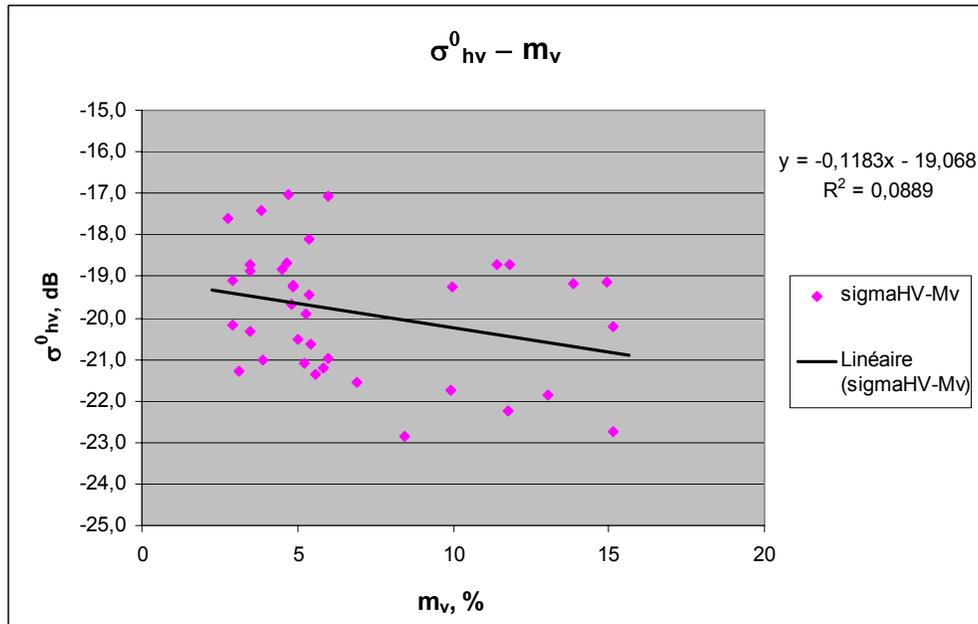


Figure 4.6. Dépendance du signal rétrodiffusé en polarisation HV à l'humidité du sol.

La situation est similaire pour les rapports de copolarisation $\sigma_{hh}^0/\sigma_{vv}^0$ et d'orthopolarisation $\sigma_{hh}^0/\sigma_{hv}^0$ (Figure 5.7 et Figure 5.8).

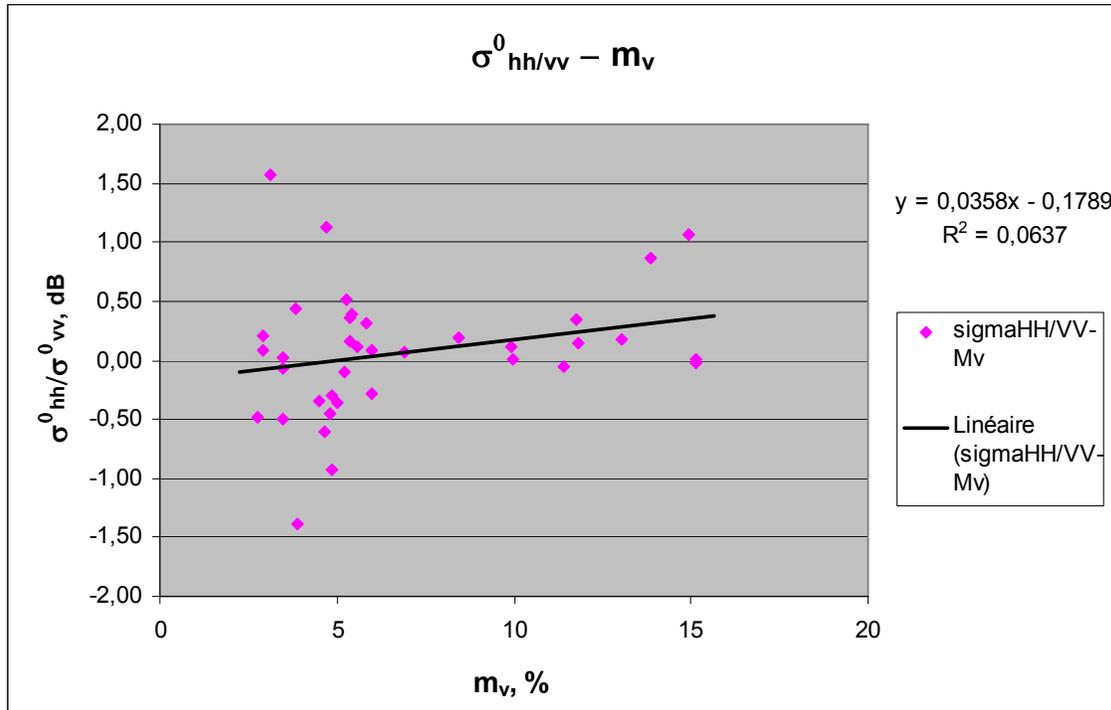


Figure 4.7. Dépendance du rapport de copolarisation $\sigma_{hh}^0/\sigma_{vv}^0$ à l'humidité du sol.

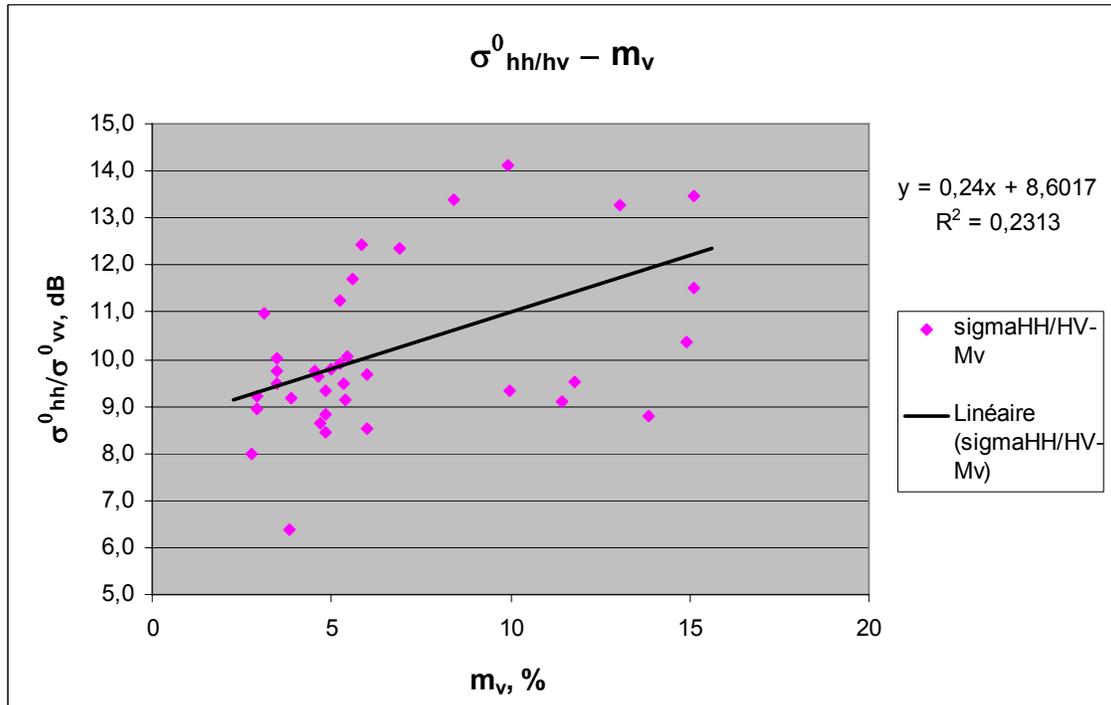


Figure 4.8. Dépendance du rapport d'orthopolarisation $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{hv}^0$ à l'humidité du sol.

Pour essayer d'analyser plus en détail cette faible dépendance du signal rétrodiffusé à l'humidité du sol et sa grande variabilité, les mêmes dépendances ont été étudiées à l'échelle des champs individuels. Comme le montre la **Figure 5.9**, deux tendances principales se dessinent. Les champs f_11, f_21_1, f_21_2, f_24, f_22, f_25 montrent une sensibilité à l'humidité du sol qui varie de 0,13 dB/% (parcelle f_22) à 0,27 dB/% (parcelle f_24). La parcelle f_31 pour la date du 24 mai 2008 a un coefficient de rétrodiffusion σ_{hh}^0 relativement bas pour une teneur en eau d'environ 11%. Quand cette mesure est ignorée, la relation entre σ_{hh}^0 et m_v devient plus forte ($R^2 \sim 0,7$) et la sensibilité du signal radar est devenue $\sim 0,35$ dB/%. La deuxième tendance présente une pente plus forte qui pourrait être associée à un sol plus sableux, comme le suggère les résultats expérimentaux de Ulaby *et al.* (1981).

Bien que la corrélation entre le coefficient de rétrodiffusion et l'humidité du sol reste faible ($\sim 0,5 - 0,8$), la sensibilité du signal radar à l'humidité du sol à l'échelle des parcelles individuelles est comparable à celle des autres études (Holah *et al.*, 2005; Shoshany *et al.*, 2000; Ulaby *et al.*, 1986). La faible corrélation s'explique par la faible dynamique de l'humidité durant la période étudiée et le petit nombre de mesures pour chaque parcelle (de 2 à 5 points correspondant à l'humidité moyenne des parcelles pour les dates d'acquisition des images RADARSAT-2).

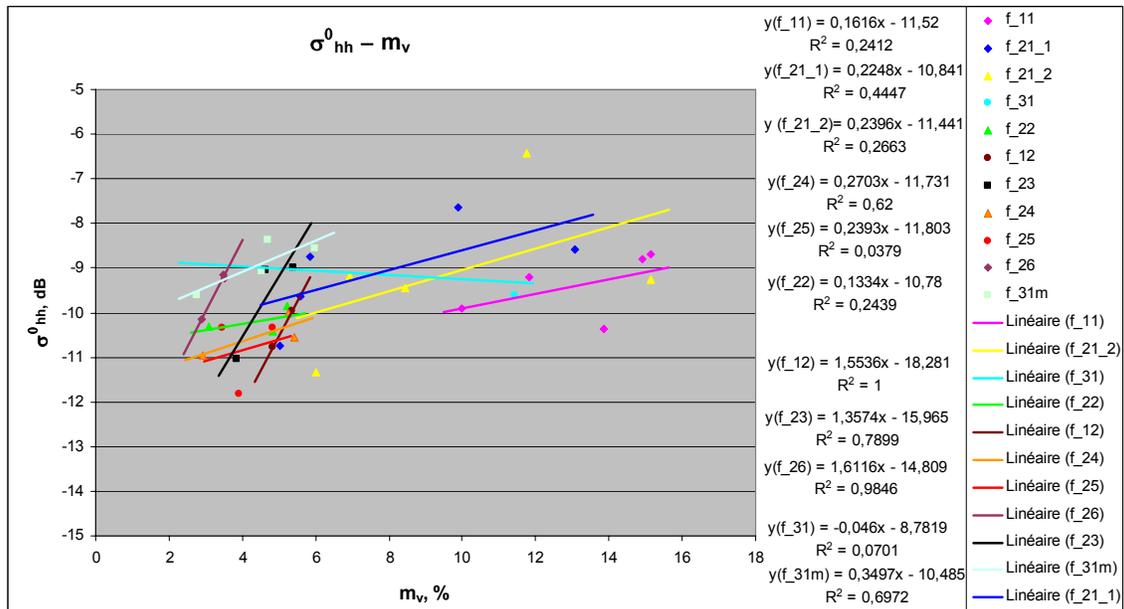


Figure 4.9. Dépendance du signal rétrodiffusé en polarisation HH à l'humidité du sol pour chaque une des parcelles.

Au niveau des champs individuels, le signal en polarisation croisée, σ_{hv}^0 , révèle une tendance très similaire (**Figure 5.10**) pour les quatre parcelles dont nous avons des mesures d'humidité pour toutes les 5 dates (f_11, f_21_1, f_21_2, f_31). Cette tendance est négative, avec une sensibilité (pente) qui varie entre -0,12 dB/% (parcelle f_31) et -0,15 dB/% (f_21_2). Le coefficient de détermination R^2 pour les parcelles f_21_1 et f_21_2 est de 0,7 et de 0,5 respectivement, ce qui correspond à une corrélation de 0,83 et de 0,71. Cependant, cette pente négative est en contradiction avec des études utilisant d'autres capteurs radar où la pente est positive ou inexistante (Holah *et al.*, 2005; Ulaby *et al.*, 1986). Il faut noter que la variation de σ_{hv}^0 est d'environ 1-2 dB. Est-ce que cette relation est significative, il faudrait le vérifier quand plus de données seront disponibles sur un plus grand intervalle d'humidité. Le signal rétrodiffusé en polarisation HV pour les champs qui ont des mesures d'humidité pour seulement 2 ou 3 dates et une variation de l'humidité très faible (de l'ordre de la variabilité de l'humidité dans les champs individuels - voir le Tableau 4.3) a plutôt un comportement aléatoire.

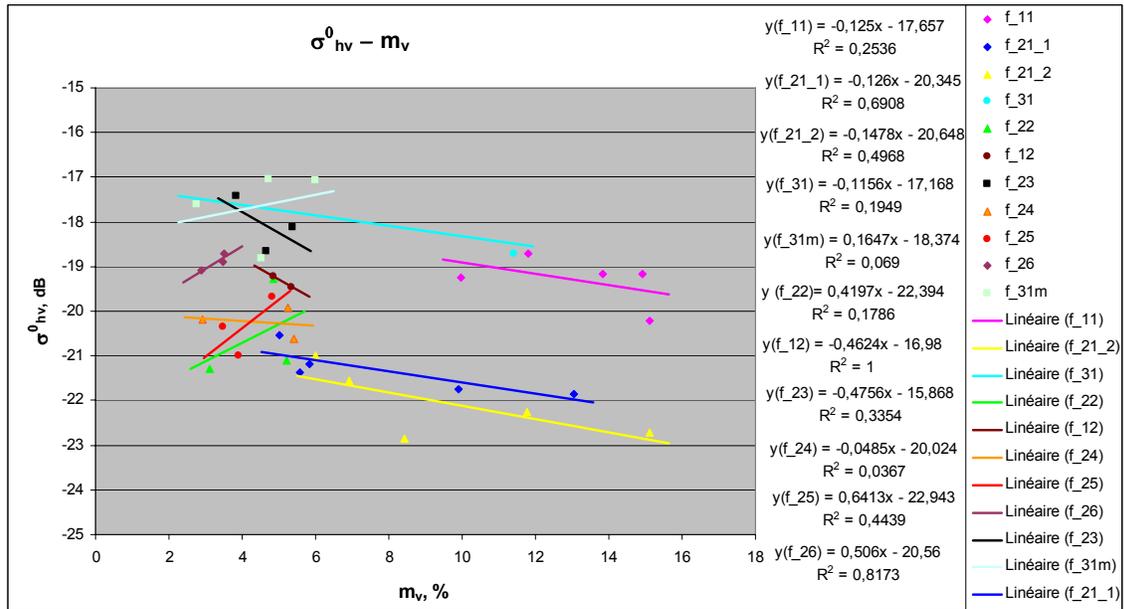


Figure 4.10. Dépendance du signal rétrodiffusé en polarisation HV à l'humidité du sol pour chaque une des parcelles étudiées.

À l'échelle des parcelles individuelles (**Figure 5.11.**), le rapport d'orthopolarisation $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{hv}^0$, pour les parcelles f_11, f_21_1, f_21_2, f_31m et f_24 montre une sensibilité de 0,19 dB/% (parcelle f_31m) à 0,39 dB/% (parcelle f_21_2). Le coefficient de corrélation est aussi relativement élevé ($R^2 \sim 0,11$ à 0,99 qui correspond à une corrélation de 0,33 (parcelle f_31m) à 0,99 (parcelle f_24)). Cependant, ce résultat est en contradiction avec les résultats de Ulaby *et al.* (1986). Selon leur résultats, la différence de rapports de orthopolarisation $\sigma_{hv}^0 / \sigma_{hh}^0$ est très

minime entre les sols secs et humides pour une rugosité donnée (pour les radars à fréquence de 1.1 GHz et 7.25GHz et rms h ~ 1,1 cm). Les auteurs mentionnent que ce comportement du rapport d'orthopolarisation n'est pas nécessairement représentatif pour d'autres paramètres (rugosité, angle d'incidence ou la fréquence).

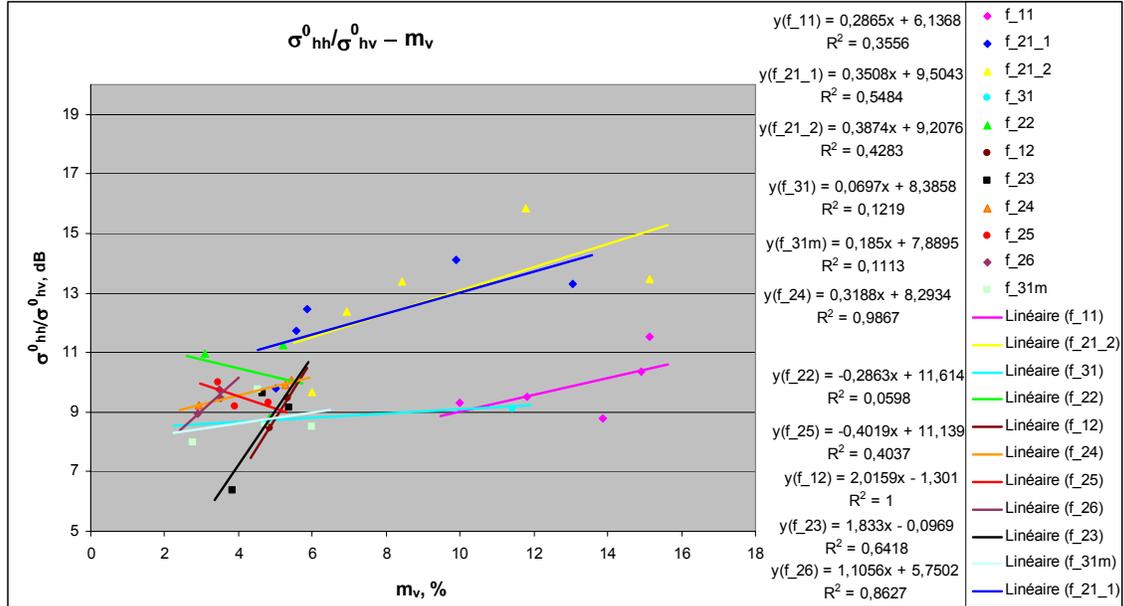


Figure 4.11. Dépendance du rapport de orthopolarisation $\sigma_{hh}^0/\sigma_{hv}^0$ à l'humidité du sol pour chacune des parcelles étudiées.

Cependant, comme il est démontré à la Figure 5.12, le rapport de copolarisation à l'échelle des parcelles étudiées ne révèle pas une forte dépendance.

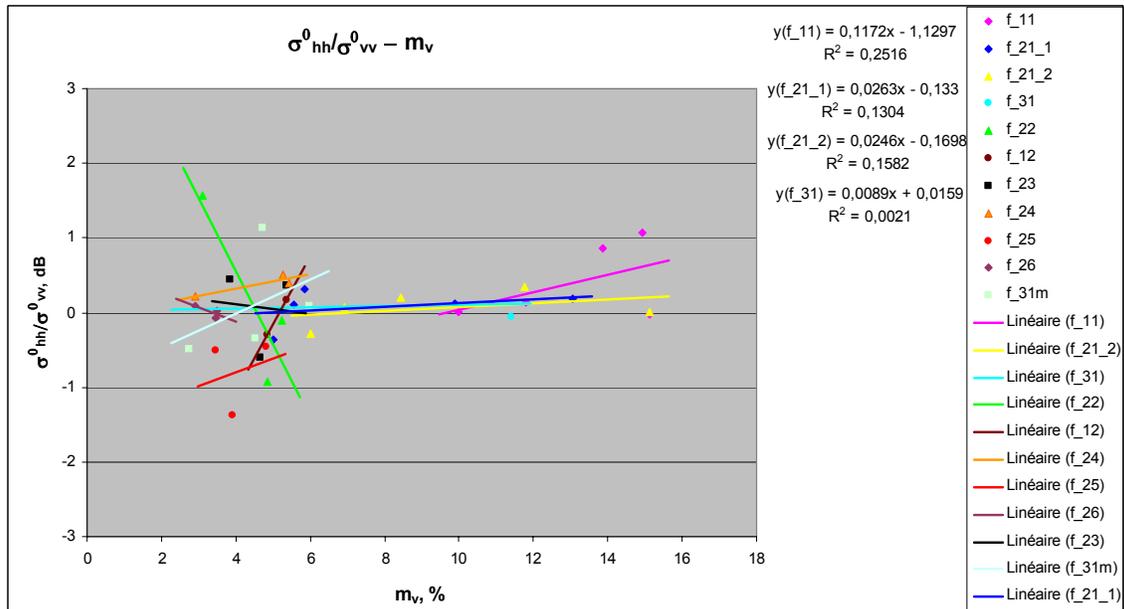


Figure 4.12. Dépendance du rapport de copolarisation $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ à l'humidité du sol pour chacune des parcelles étudiées.

Il faut noter aussi que selon les modèles théoriques, pour les sols nus, $\sigma_{hh}^0 < \sigma_{vv}^0$, c.-à-d. que leur rapport (exprimé en dB devient leur soustraction $\sigma_{hh}^0 - \sigma_{vv}^0$) devrait être négatif ou presque nul pour des sols secs et très rugueux. Dans notre cas, nous avons aussi des valeurs positives. Toutefois, la plupart de ces valeurs sont < 0.5 dB donc plus petites que la précision radiométrique du capteur.

4.1.2. Comportement de la rétrodiffusion en fonction de la rugosité du sol

Le comportement du signal radar rétrodiffusé σ^0 en polarisation HH, HV, VV, a été étudié également en fonction de la rugosité par le moyen des deux paramètres principaux, soit l'écart type des hauteurs (s) et de la longueur de corrélation (l_c), utilisés pour la caractérisation des variations verticales et horizontales de la surface. La figure 5.13 démontre la variation de ces deux paramètres pour les champs individuels. Les champs f_11, f_21 et f_31 ont un écart type plus petit que le reste des champs. Les champs f_22, f_12, f23, f_24, f_25 et f_26 ont été prêts pour l'étude à partir de 13 juin. Il est possible que l'écart type plus élevé de ces champs soit causé par leur traitement récent.

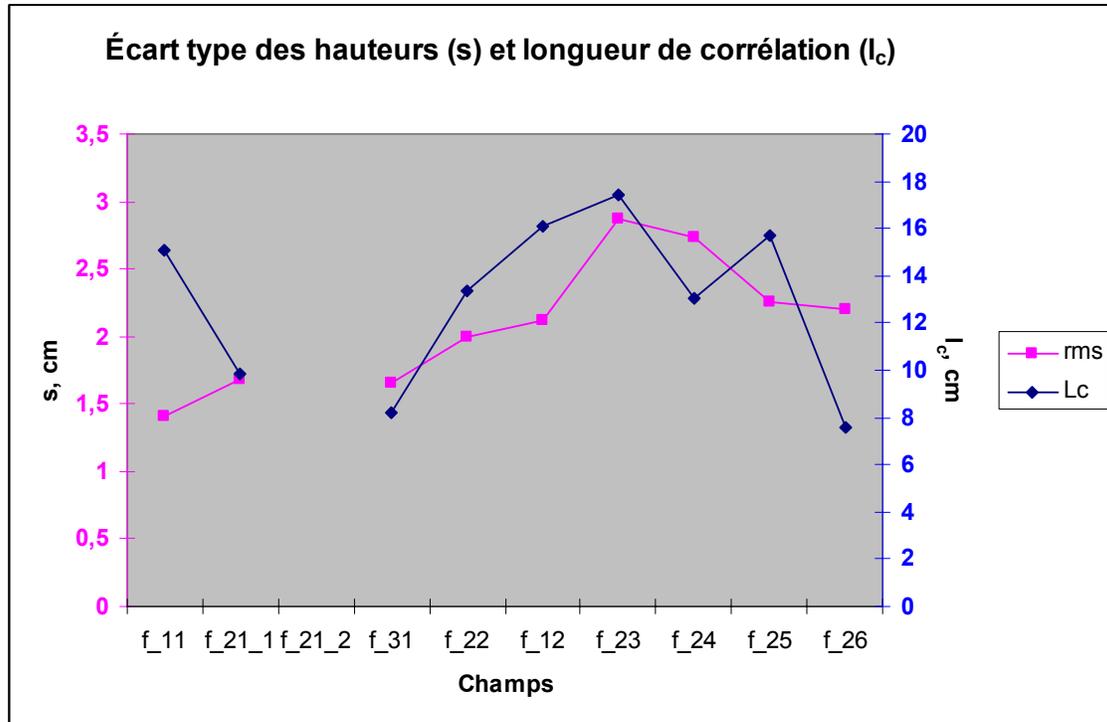


Figure 4.13. Écart type des hauteurs (s) et longueur de corrélation (l_c) pour tous les champs étudiés.

Il faut rappeler que les mesures de rugosité sont prises qu'une seule fois pour toute la campagne. Donc, pour étudier le comportement du signal rétrodiffusé pour chaque date, nous avons utilisé les mêmes valeurs de s et l_c , ce qui donne comme résultat la variabilité du signal σ_{hh}^0 d'environ 2-3 dB pour une rugosité fixe (Figure 5.14). Cette variabilité concorde avec la variabilité du signal rétrodiffusé causé par l'humidité du sol (Figure 5.9). Cependant, la dépendance de σ_{hh}^0 à s est insignifiante. Le même est le comportement du signal radar σ_{hh}^0 en fonction de l_c (Figure 5.15). Cette faible sensibilité à la rugosité s'expliquerait par la sécheresse du sol en juin 2008 qui engendrerait une certaine pénétration du signal dans le sol et de la diffusion de volume.

...

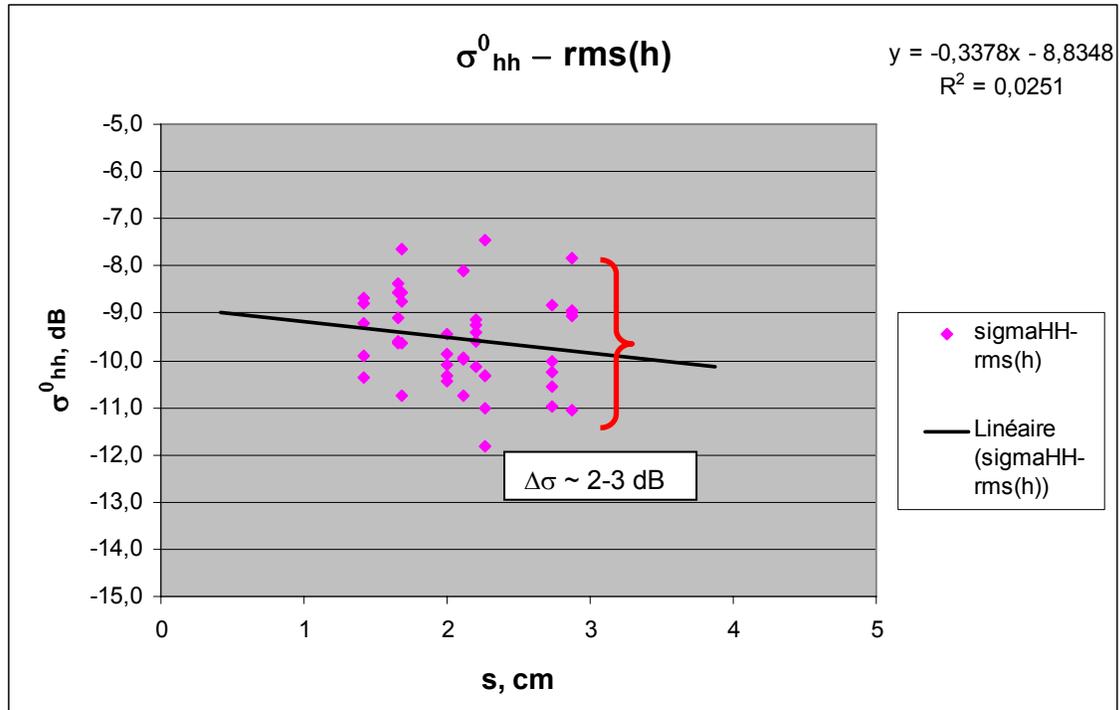


Figure 4.14. Le comportement du coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH en fonction de l'écart type des hauteurs (s) pour tous les champs étudiés.

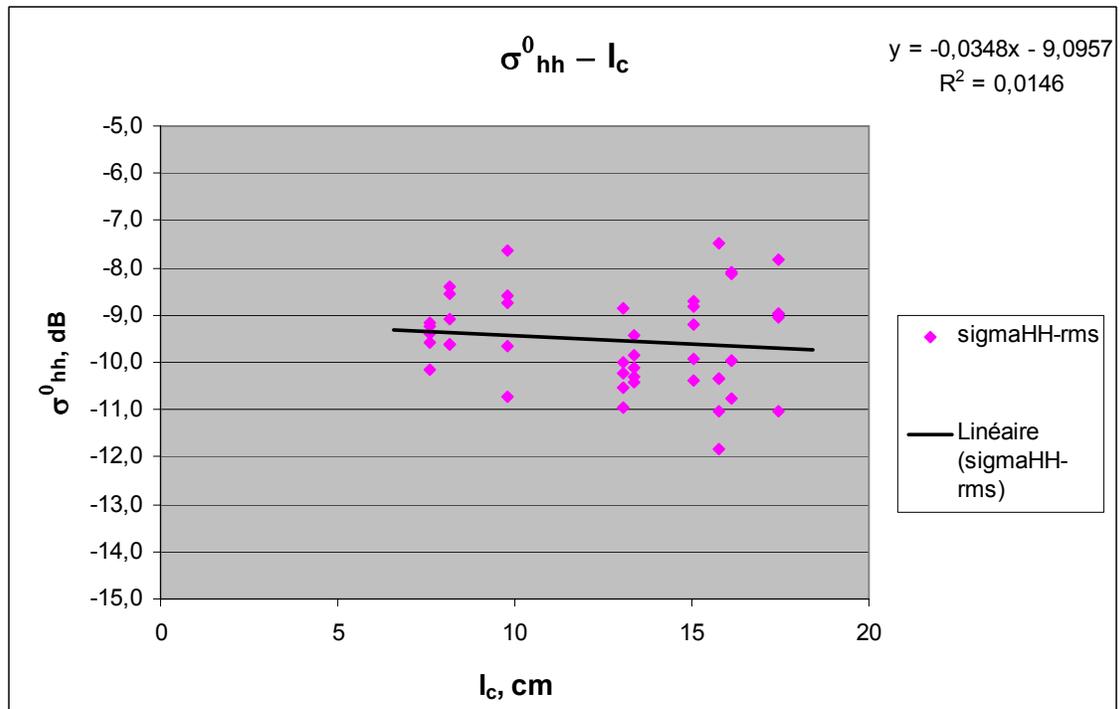


Figure 4.15 Le comportement du coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH en fonction de la longueur de corrélation pour tous les champs étudiés.

Nous avons également noté que les coefficients de rétrodiffusion en polarisation VV et HV étaient aussi quasiment indépendants de s et I_c .

4.1.3. Détection des changements de l'humidité du sol

Dans le cadre de ce mini-projet, le lien entre l'humidité volumétrique du sol et le rapport simple des coefficients de rétrodiffusion multitemporelles $\sigma_{t1}^0 / \sigma_{t2}^0$ pour les dates du 24 mai 2008 ($t1$) et du 17 juin 2008 ($t2$) ayant la même configuration de prise des images et en supposant que la rugosité et le couvert végétal n'ont pas changé entre ces deux dates, a été testé. Nous avons établi le lien suivant :

$$\frac{\sigma_{t1}^0}{\sigma_{t2}^0} = -0.0225m_v + 1.2975 \quad \text{en se basant seulement sur les 4 mesures d'humidité}$$

disponible (parcelles f_11, f_21_1, f_21_2, f_31) pour le 24 mai 2008 (**Figure 5.16**). Cependant, le coefficient de corrélation est assez élevé - 0.86. La régression trouvée a été appliquée sur les coefficients de rétrodiffusion des autres parcelles (qui n'ont pas de mesures d'humidité) afin de calculer leur humidité du sol pour le 24 mai 2008.

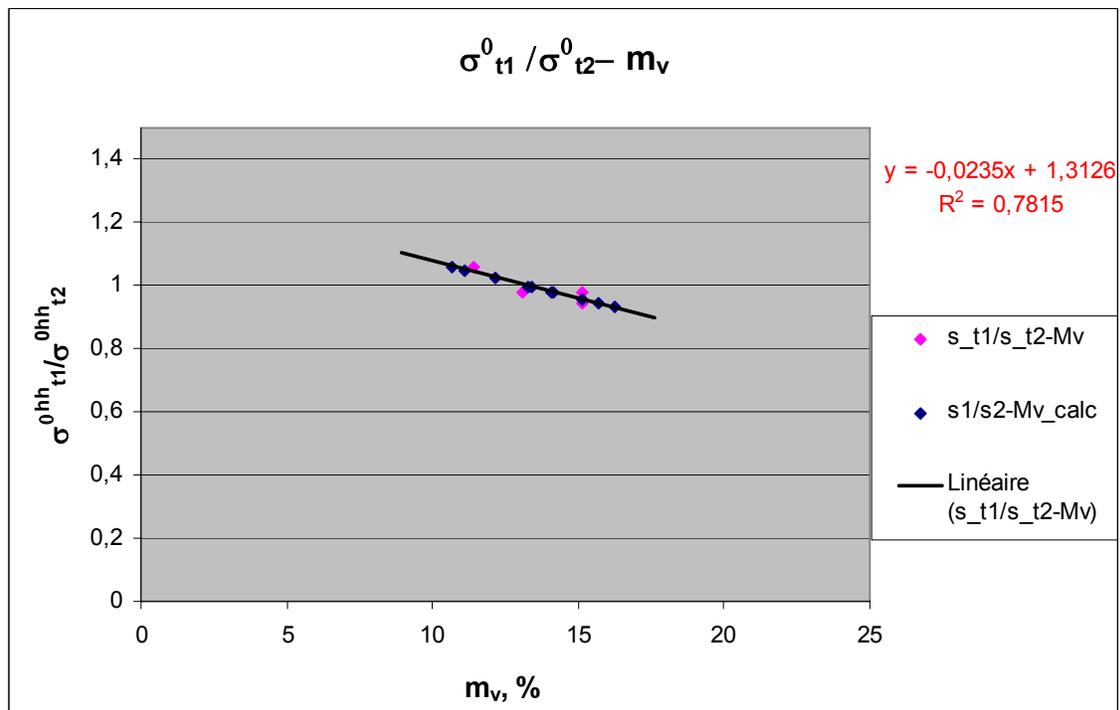


Figure 4.16. La relation entre le ratio multi temporel de coefficients de rétrodiffusion pour le 24 mai ($t1$) et le 17 juin 2008 ($t2$) et l'humidité du sol pour le 24 mai 2008.

4.2. Analyse des paramètres polarimétriques

Pour faciliter l'interprétation du signal rétrodiffusé, différents paramètres et outils polarimétriques ont été explorés.

4.2.1. Décomposition de Pauli

La décomposition de Pauli est souvent utilisée pour la représentation des mécanismes de diffusion. Cette information est visualisée sous forme d'une image colorée dont chacun des canaux de couleur correspond aux intensités α , β et γ décrits dans le paragraphe 4.5.1.2. Ces intensités correspondent aux 3 mécanismes physiques de diffusion, soit diffusion de surface, diffusion dièdre et diffusion de volume. La **Figure 5.17** montre la décomposition de Pauli pour le 24 mai 2008 et le 24 juin 2008, correspondant au début et à la fin de période d'étude.

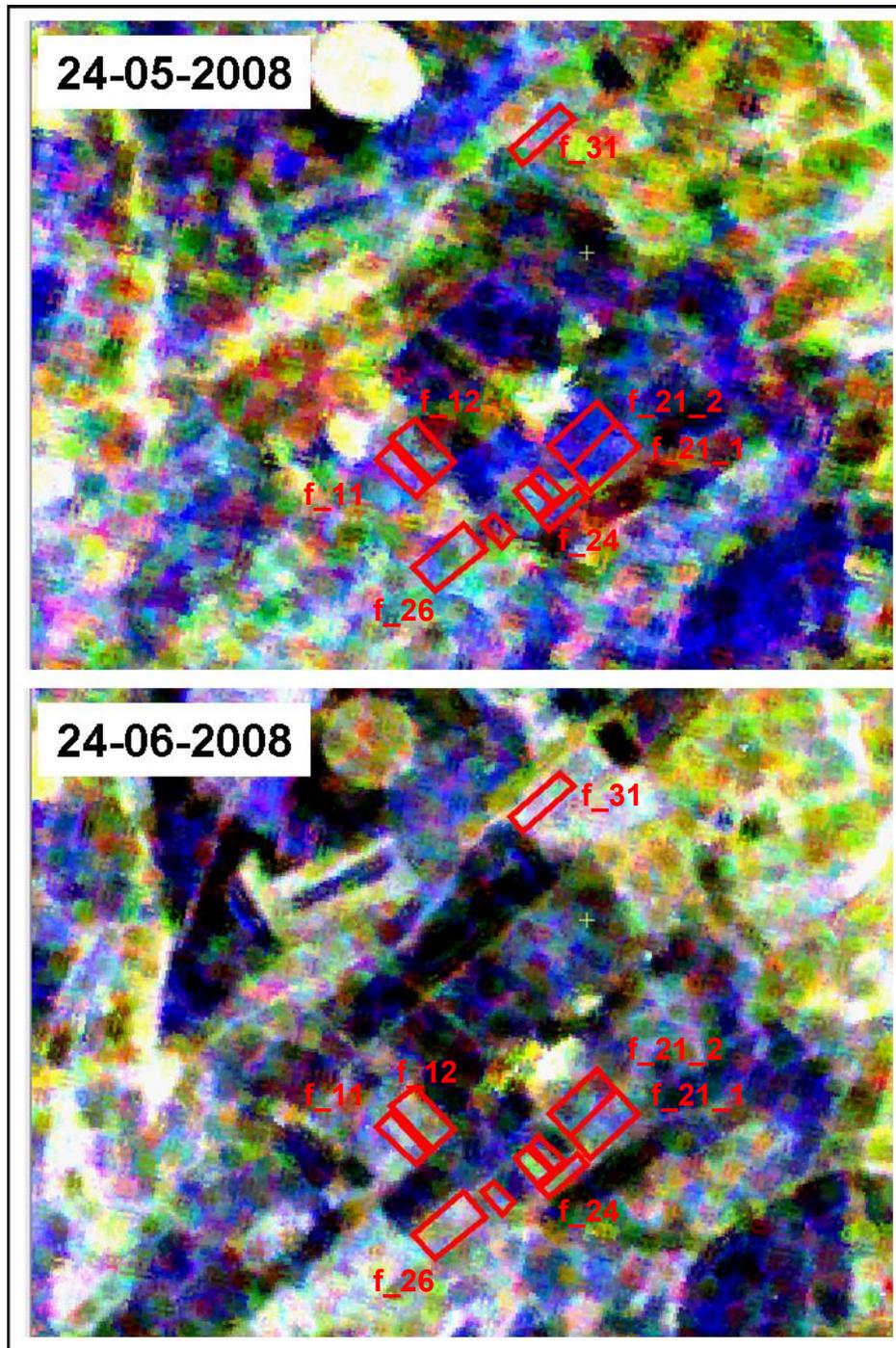


Figure 4.17. La décomposition de Pauli des images RADARSAT-2 du 24 mai 2008 et du 24 juin 2008; Chaque couleur représente différents mécanismes de diffusion : Rouge : $(S_{hh} - S_{vv})$ - réflexion paire (forêt et zones urbaines), Vert : $(2S_{hv})$ - réflexion de volume (zones végétales), Bleu : $(S_{hh} + S_{vv})$ - réflexion impaire (réflexion de surface).

L'analyse des couleurs dominantes montre que sur les images de 24 mai 2008, le mécanisme de diffusion de surface est le mécanisme dominant pour les parcelles f_21_1, f_21_2 et f_24. Le champ f_31 montre une couleur verte qui est associée avec la diffusion de volume. Cela pourrait être un indice d'un couvert végétal assez dense. Les autres champs montrent une couleur bleu-vert ce qui indique la présence de végétation ou de restes de végétation. Un mois plus tard, nous pouvons identifier que la couleur de toutes les parcelles a changé. Les parcelles f_21_1 et f_21_2 ont encore une teinte bleue. Cependant, la couleur blanchâtre des autres champs représente un mélange de mécanismes de diffusion. Comme l'humidité du sol pour la date de 24 juin est assez basse ($m_v \sim 3\%$), ce changement ne provient pas du développement de la végétation. L'effet observé serait associé à l'interaction du signal radar incident avec une couche du sol plus épaisse, car la profondeur de pénétration du signal radar augmente avec la diminution de teneur en eau dans le sol. Cela pourrait être aussi une explication de la tendance inversée du signal radar en polarisation HV et du rapport d'orthopolarisation HH/HV de la humidité du sol. Probablement que la pénétration du signal radar plus en profondeur génère une composante HV plus élevée quand le sol est très sec.

4.2.2. Décomposition de Cloude et Pottier

Tableau 7 résume certaines des paramètres polarimétriques extraits de la décomposition aux valeurs propres (λ_1 , λ_2 et λ_3) de la matrice de cohérence T. Les paramètres **p1**, **p2**, et **p3** sont nommés « probabilité de valeurs propres » et sont une mesure de l'importance relative de valeurs propres. Le paramètre **p1** est plus élevé pour les deux dates, indiquant l'importance de la valeur propre λ_1 .

Cette décomposition est aussi référée comme étant une décomposition H/A/ α . Les paramètres H (entropie), A (anisotropie), et angle alpha α , qui sont aussi des fonctions de λ_1 , λ_2 et λ_3 , sont souvent utilisés pour simplifier l'analyse de l'information codée dans le signal rétrodiffusé.

Tableau 7. Paramètres polarimétriques extraits de la décomposition aux valeurs propres des matrices de cohérence [7] des images RADARSAT-2 du 24 mai 2008 et du 24 juin 2008.

	24-05-2008			24-06-2008		
champ	Entropie	Anisotropie	Alpha	Entropie	Anisotropie	Alpha
f_11	0,51	0,32	20,94	0,60	0,27	25,94
f_21_1	0,42	0,35	16,07	0,57	0,33	24,12
f_21_2	0,36	0,31	14,10	0,58	0,37	25,18
f_31	0,61	0,34	25,29	0,66	0,32	29,54
f_22	0,51	0,31	20,65	0,53	0,33	24,86
f_12	0,59	0,31	24,74	0,66	0,32	29,77
f_23	0,53	0,32	21,62	0,73	0,35	33,80
f_24	0,57	0,33	24,29	0,66	0,29	29,21
f_25	0,59	0,36	25,62	0,60	0,32	25,95
f_26	0,59	0,27	25,27	0,67	0,28	30,10
	alpha1	alpha2	alpha3	alpha1	alpha2	alpha3
f_11	7,81	84,08	85,52	10,37	83,62	82,57
f_21_1	5,36	86,48	86,32	8,68	83,82	84,69
f_21_2	5,78	85,90	86,34	9,55	82,27	85,24
f_31	8,45	83,61	85,12	11,56	82,26	82,55
f_22	7,67	83,85	86,39	12,23	82,22	81,98
f_12	8,98	83,53	84,40	12,04	80,78	83,30
f_23	7,40	85,05	85,02	12,73	80,42	83,02
f_24	9,65	82,01	85,45	10,84	82,60	82,85
f_25	9,93	83,35	83,26	10,39	81,57	84,65
f_26	9,81	83,43	83,56	11,81	82,03	82,31
	p1	p2	p3	p1	p2	p3
f_11	0,83	0,11	0,06	0,78	0,14	0,08
f_21_1	0,87	0,09	0,04	0,79	0,14	0,07
f_21_2	0,90	0,07	0,04	0,79	0,15	0,07
f_31	0,77	0,15	0,07	0,74	0,17	0,09
f_22	0,83	0,11	0,06	0,82	0,12	0,06
f_12	0,79	0,14	0,07	0,74	0,17	0,09
f_23	0,82	0,12	0,06	0,69	0,21	0,10
f_24	0,80	0,14	0,07	0,74	0,17	0,09
f_25	0,78	0,15	0,07	0,78	0,14	0,08
f_26	0,79	0,13	0,08	0,73	0,17	0,10
	λ1	λ2	λ3	λ1	λ2	λ3
f_11	0,20	0,03	0,01	0,15	0,03	0,02
f_21_1	0,20	0,02	0,01	0,13	0,02	0,01
f_21_2	0,19	0,01	0,01	0,11	0,02	0,01
f_31	0,15	0,03	0,01	0,17	0,04	0,02
f_22	0,18	0,02	0,01	0,11	0,02	0,01
f_12	0,13	0,02	0,01	0,11	0,03	0,01
f_23	0,19	0,03	0,01	0,11	0,03	0,02

f_24	0,13	0,02	0,01	0,11	0,02	0,01
f_25	0,12	0,02	0,01	0,12	0,02	0,01
f_26	0,16	0,03	0,01	0,14	0,03	0,02
	rvi	pedestal	lambda	rvi	pedestal	lambda
f_11	0,23	0,07	0,17	0,32	0,10	0,13
f_21_1	0,17	0,05	0,17	0,28	0,09	0,11
f_21_2	0,14	0,04	0,17	0,27	0,09	0,09
f_31	0,29	0,10	0,13	0,35	0,12	0,14
f_22	0,24	0,07	0,15	0,24	0,07	0,09
f_12	0,29	0,09	0,11	0,35	0,12	0,09
f_23	0,25	0,08	0,16	0,40	0,15	0,09
f_24	0,27	0,09	0,11	0,36	0,13	0,09
f_25	0,28	0,09	0,10	0,30	0,10	0,10
f_26	0,31	0,10	0,13	0,38	0,13	0,11

Comme le montre le **Tableau 7**, l'entropie augmente légèrement pour toutes les parcelles pendant la période d'étude. L'entropie pour les parcelles f_21_1 et f_21_2 pour la date de 24 mai 2008 est au dessous de 0,5 et leur apparence à la **Figure 5.18** est très différente de celle des autres parcelles. L'angle α , qui détermine le type de diffusion dominante, est inférieur à 45° pour les deux dates et pour toutes les parcelles. Cela indique une dominance de la diffusion de surface. Les parcelles f_21_1 et f_21_2 montrent de nouveau une valeur différente du reste des parcelles pour la date du 24 mai 2008 (**Figure 5.19**).

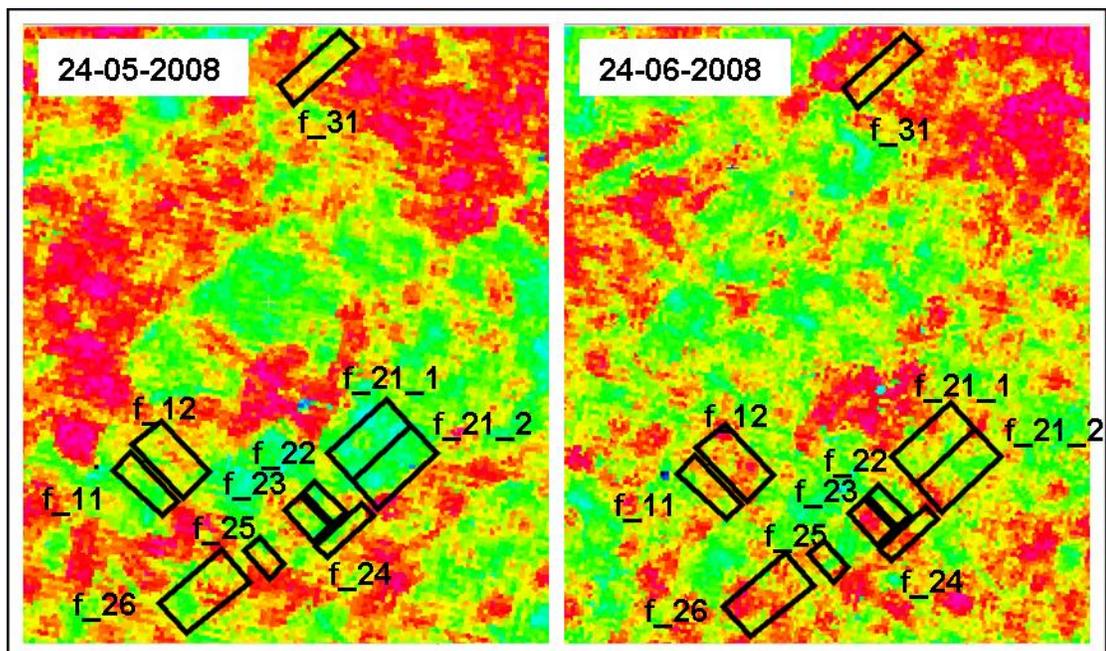


Figure 4.18. La variation spatiale de l'entropie pour la zone d'étude pour le 24 mai et le 24 juin 2008.

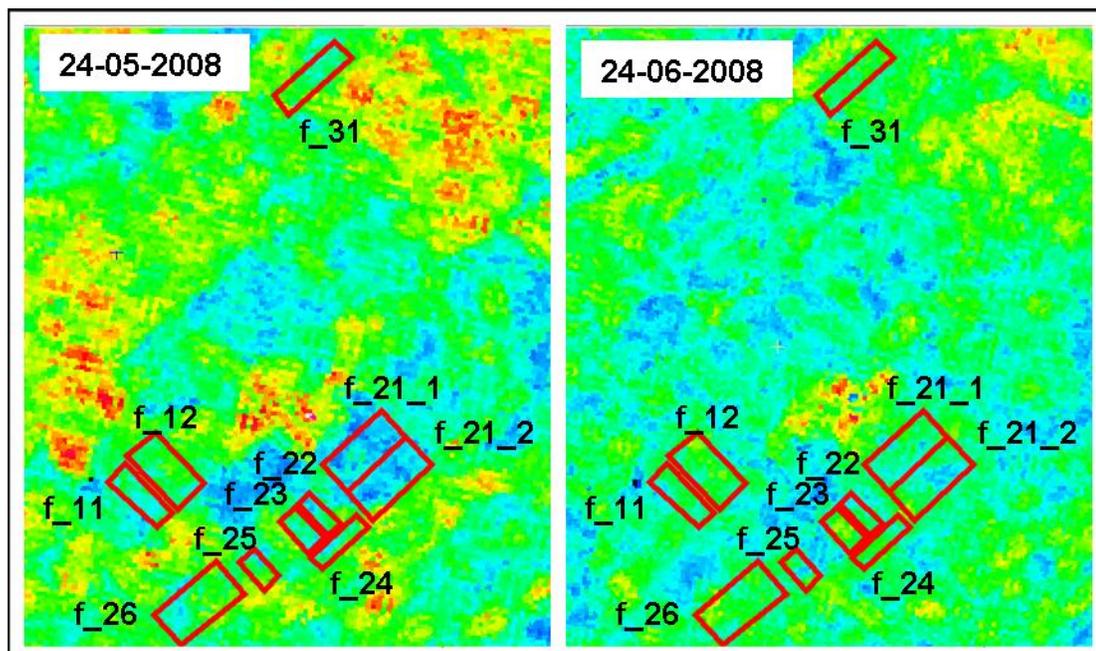


Figure 4.19. La variation spatiale du paramètre polarimétrique Angle alpha (α) pour la zone d'étude pour les dates d'acquisition du 24 mai et du 24 juin 2008.

Le paramètre **A** (anisotropie) reste relativement similaire pour les deux dates. L'anisotropie est un paramètre complémentaire à l'entropie et il est souvent utilisé quand l'entropie est plus élevée que 0.7 pour distinguer les mécanismes de diffusion secondaires. Dans notre cas, seulement un champ (f_23) a une entropie plus élevée que 0.7 pour le 24 juin 2008. Son paramètre p2 est aussi plus élevé le 24 juin 2008, indiquant l'importance du deuxième mécanisme de diffusion. En général, comme le montre le **Tableau 7**, le paramètre p2 a augmenté légèrement pour toutes les parcelles pour le 24 juin 2008, tandis que p1 a diminué. Cela pourrait être dû au développement de la végétation pour la période étudiée ou de l'interaction du signal radar avec une couche de sol plus profonde, même si le mécanisme principal reste la diffusion de surface (**Figure 5.20**).

Un autre paramètre intéressant est le paramètre RVI (Radar Vegetation Index) (Kim *et al.*, 2004). Même si une faible augmentation de RVI a été observée le 24 juin par rapport au 24 mai 2008, les valeurs de RVI sont dans l'intervalle 0,2 – 0,4, qui correspond à un couvert végétal modeste. Les parcelles f_21_1 et f_21_2 ont un RVI < 0,2 pour le 24 mai 2008, donc les surfaces de ces parcelles pourraient être considérées

complètement libre de végétation. Ce résultat concorde avec la basse entropie observée pour ces deux parcelles.

Les paramètres α et $\alpha.1$ pour les parcelles f_21_1 et f_21_2 sont aussi plus basses en comparaison des autres parcelles.

La **Figure 5.20** illustre la classification non-supervisée d'une scène RADARSAT-2, basée sur les paramètres H et α de chaque pixel de l'image, pour les 24 mai et 24 juin 2008. La **Figure 5.20** représente également le plan $H-\alpha$ de la zone illustrée pour le 24 mai et le 24 juin 2008.

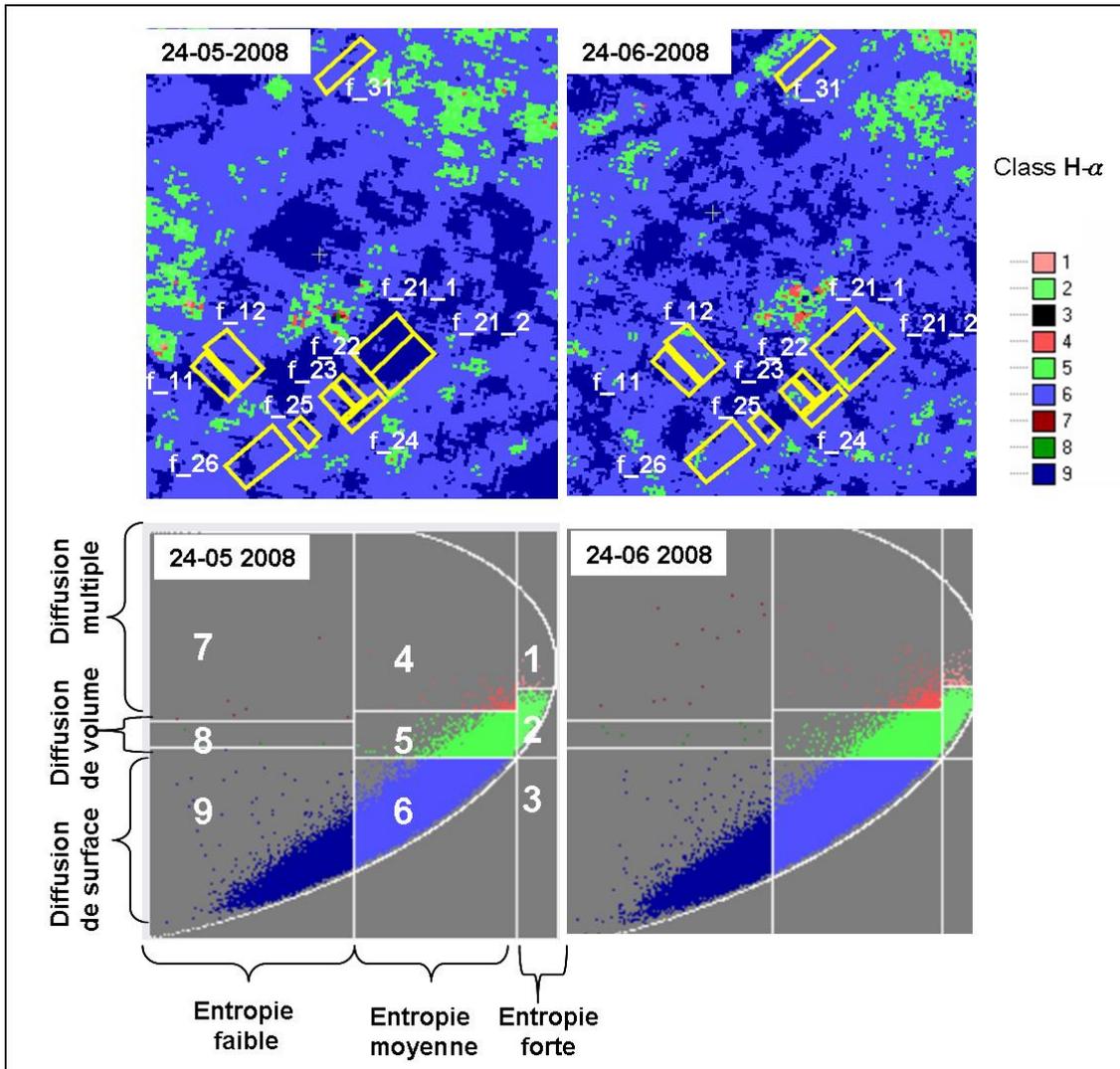


Figure 4.20. La classification $H-\alpha$ d'une scène des images RADARSAT-2 pour le 24 mai et le 24 juin 2008 et les schémas de classification $H-\alpha$ correspondants.

La couleur bleue des parcelles à l'étude selon le plan $H-\alpha$ suggère que le signal rétrodiffusé provenant de ces zones correspond à la zone 6 du schéma de classification de Cloude et Pottier. Cette zone est caractérisée par une entropie moyenne associée à la rugosité de la surface et le développement de couvert végétal. Effectivement, l'écart type des hauteurs des champs étudiés varie entre 1,4 et 2,9 cm, ce qui correspond à une rugosité moyenne. Le principal mécanisme de diffusion dans cette zone est la diffusion de surface. Pour le 24 mai 2008, les parcelles f_21_1 et f_21_2 sont associées à la zone 9, à cause de leur basse entropie. La classe 9, correspond à la diffusion d'une surface très lisse.

4.2.3. La relation des paramètres polarimétriques avec les paramètres de la surface (l'humidité du sol et la rugosité).

Le but principal des décompositions polarimétriques est de séparer le signal rétrodiffusé d'une cible distribuée, produit par tous les diffuseurs dans une cellule de résolution, en contributions élémentaires de mécanismes de diffusion uniques. Une telle décomposition pourrait aider aussi à découpler les effets de l'humidité du sol et la rugosité sur le signal rétrodiffusé (Ferro-Famil *et al.*, 2002; Hajnsek *et al.*, 2003).

Selon Hajnsek et al. (2003) l'anisotropie est une mesure de la rugosité de la surface, indépendante de l'humidité du sol, alors que l'entropie et l'angle alpha sont deux paramètres nécessaires pour l'estimation de l'humidité du sol. Donc, l'estimation de paramètres H , A et α permet de séparer l'effet de la rugosité et de l'humidité. Daniel *et al.* (2008) affirment que le paramètre α_1 est un paramètre indépendant de la rugosité et de l'angle azimutal et, en conséquence, est approprié pour l'estimation de l'humidité du sol.

Dans le cadre de ce mini-projet nous avons testé la dépendance des paramètres H , A , α , α_1 , λ et rvi de l'humidité de sol (**Figure 5.21**) et des paramètres de la rugosité (s et I_c) (**Figure 5.22**).

Comme il est démontré à la **Figure 5.21**, le paramètre polarimétrique α_1 , est le paramètre le plus dépendant de l'humidité volumétrique du sol. Son coefficient de détermination R^2 est de 0,72, donc une très forte corrélation (0,85). Les autres paramètres polarimétriques, notamment H , α , λ et RVI , ont un coefficient de détermination $R^2 > 0,52$, donc un coefficient de corrélation $> 0,72$. On peut remarquer aussi que le paramètre α a une pente très forte de -0.91, qui indique que ce paramètre est très sensible à l'humidité du sol. Nos résultats indiquent également que l'anisotropie

est indépendante de l'humidité du sol, ce qui est en accord avec d'autres études (Hajnsek *et al.*, 2003).

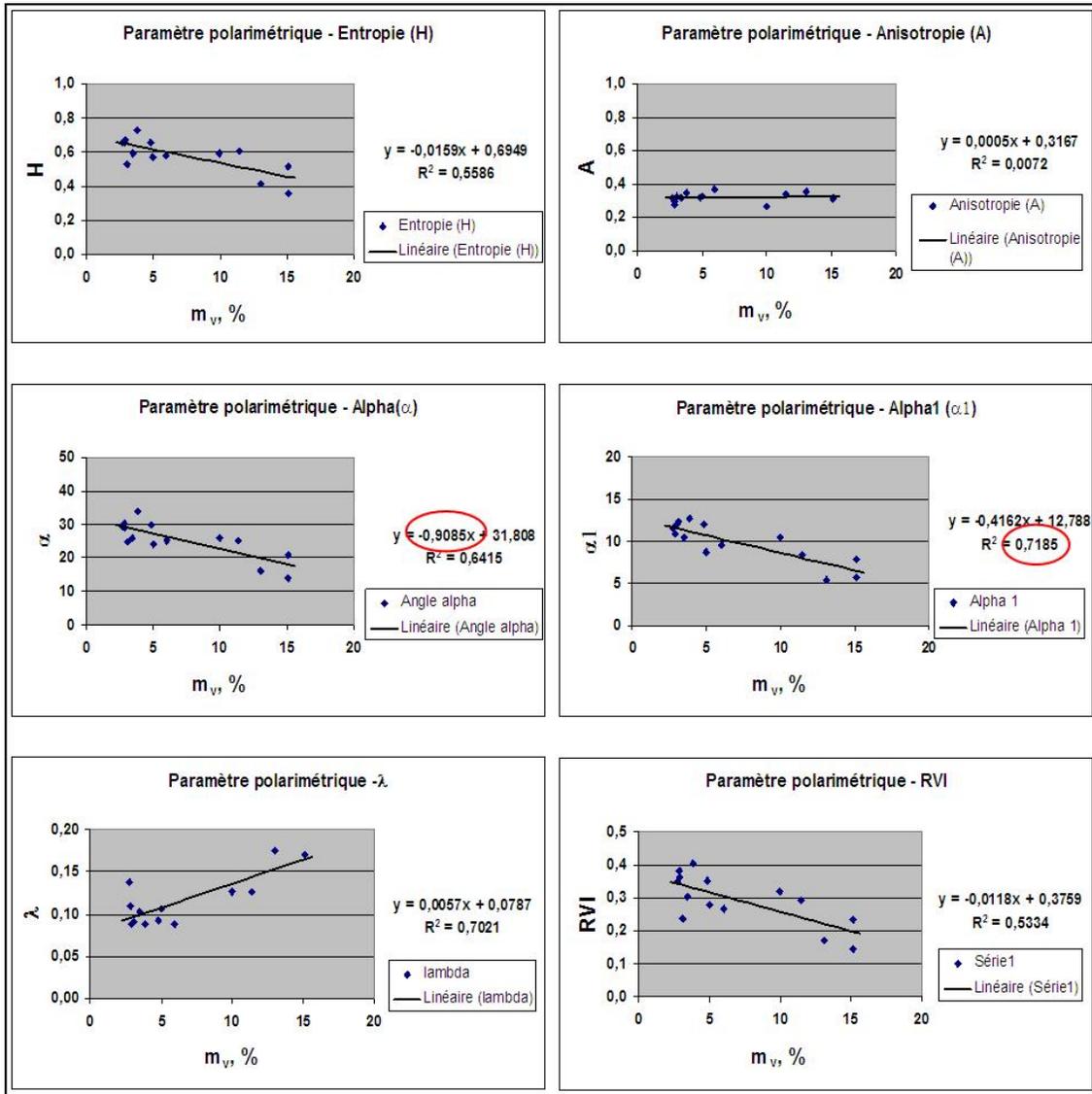


Figure 4.21. Corrélation entre les paramètres polarimétriques H, A, α , α_1 , λ et RVI extraits des images RADARSAT-2 acquises le 24 mai et 24 juin 2008 et l'humidité du sol m_v .

Cependant, il faut noter la pente négative de paramètres **H**, **α** , **α_1** . L'entropie et l'angle α plus élevés pour les sols très secs pourraient être expliqués par la rétrodiffusion d'une couche de sol plus profonde (plus épaisse, donc interaction dans le volume de couche de sol) causé par la pénétration du signal radar plus en profondeur.

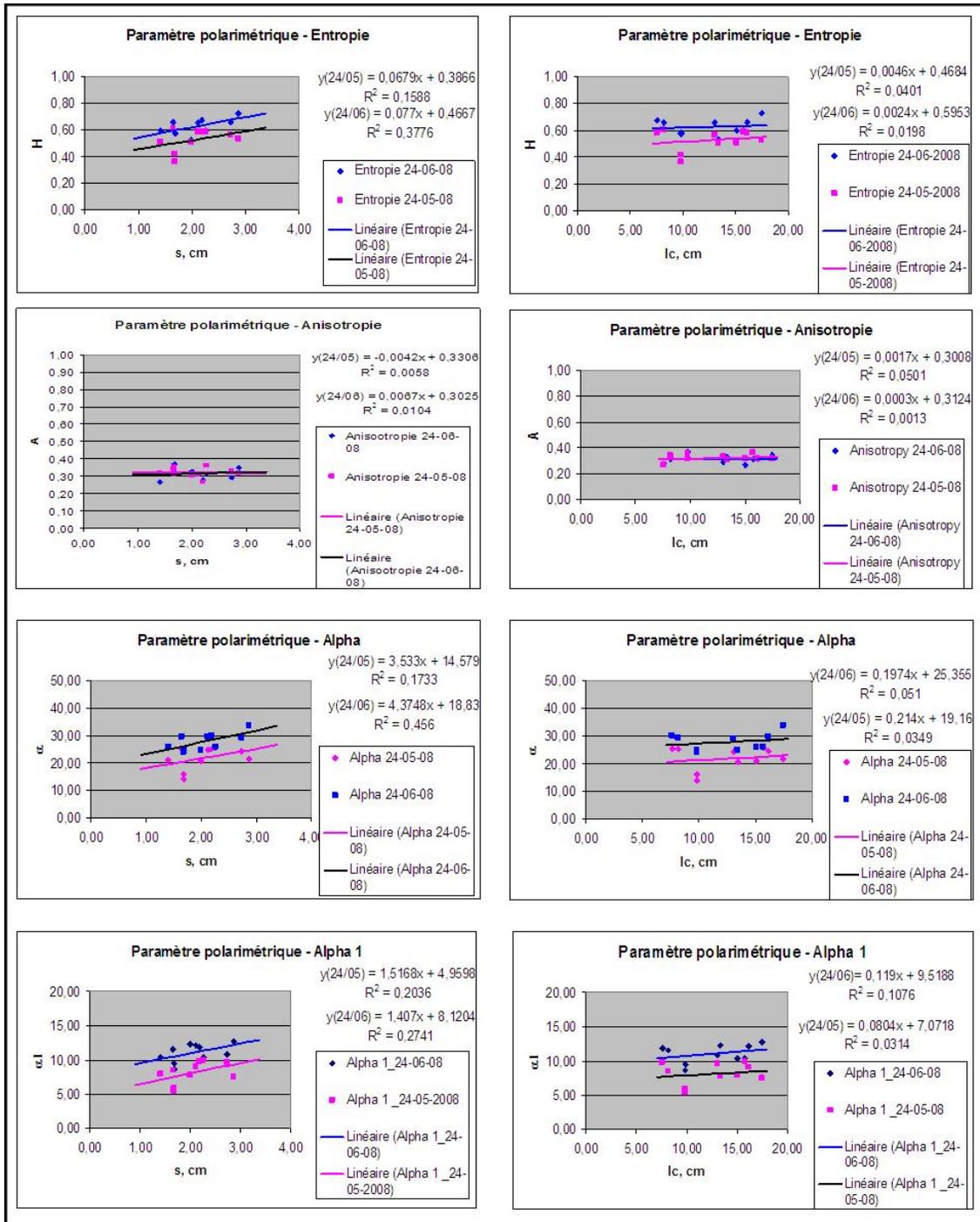


Figure 4.22. Corrélation entre les paramètres polarimétriques H, A, α , α_1 , extraits des images RADARSAT-2 acquises le 24 mai et le 24 juin 2008 et les paramètres de la rugosité s et l_c .

Les paramètres H, α , α_1 , montrent aussi une légère dépendance du paramètre s (l'écart type de la hauteur de la surface). Cette dépendance est plus

élevée le 24 juin 2008. Cependant, l'anisotropie, qui est supposée être sensible à la rugosité, ne montre pas une telle dépendance. Cela indique que les mécanismes secondaires ne changent pas avec la rugosité de la surface. Aucun des ces 4 paramètres polarimétriques (H , A , α , α_1) ne montre une dépendance à la longueur de la corrélation l_c .

4.2.4. Signature polarimétrique

Les signatures polarimétriques sont un autre outil pour représenter la réponse des cibles. La **Figure 5.23** montre les signatures copolarisées pour les parcelles f_11, f_21_1, f_21_2, et f_31 extraites des images RADARSAT-2 polarimétriques acquises le 24 mai 2008 et le 24 juin 2008, les dates correspondant du début et de la fin de période d'étude. Les parcelles f_21_1 et f_21_2 ont une signature différente des deux autres parcelles pour la date du 24 mai, donc le mécanisme de diffusion du signal radar est différent. Leurs signatures ont une forme en selle, typique d'une double réflexion, associée aux champs non labourés (McNairn and Brisco, 2004). Leur socle est aussi plus bas, ce qui indique une faible dépolarisation caractéristique pour les surfaces très lisses. La rétrodiffusion en polarisation VV (angle d'orientation de 90°) est relativement plus forte pour les parcelles f_11 et f_31 pour le 24 mai 2008, ce qui suggère que le processus de diffusion de surface est dominant. Pour la période étudiée, le socle de 4 parcelles a augmenté, ce qui signifie une plus forte dépolarisation. Le champ f_31 garde la même forme de signature, tandis que les signatures des trois autres parcelles ont changé. Évidemment, ces changements sont dus au changement soit de la rugosité, soit du couvert végétal, mais pas au changement de l'humidité du sol.

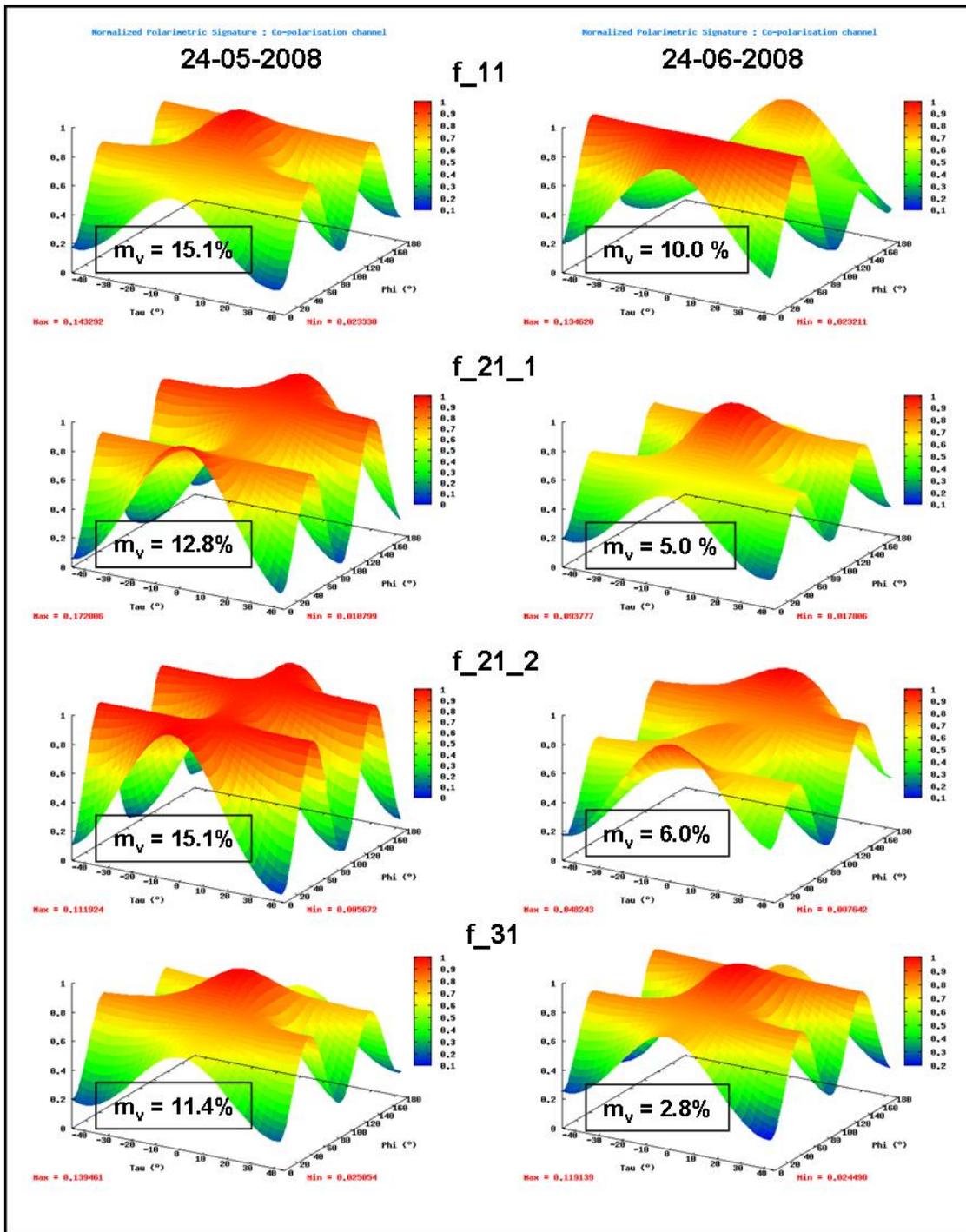


Figure 4.23. Signatures polarimétriques copolarisées pour les parcelles f_11, f_21_1, f_21_2, et f_31 extraites des images RADARSAT-2 polarimétriques acquises le 24 mai 2008 et le 24 juin 2008, les dates correspondant au début et à la fin de la période d'étude

4.3. Problèmes rencontrés

Lors de ce travail un problème majeur a été rencontré, il s'agit d'un bug sur la version 10.1.4 du logiciel PCI Geomatica concernant l'étalonnage des données RADARSAT-2 en mode quad-pol. Les valeurs de rétrodiffusion extraites avec cette version de PCI Geomatica sont fausses, elles ne correspondent pas aux intensités même si à côté des bandes 9, 10, 11 et 12 il est affiché « Intensity ». À cause de ce problème, le travail a dû être repris du début.

Dans les nouvelles versions 10.2 et 10.3, les valeurs des bandes 9, 10, 11 et 12 correspondent aux intensités, mais à côté de celle-ci il s'affiche « Amplitude ». Donc, tout est mélangé de nouveau et cela peut causer des problèmes pour les personnes ayant peu d'expérience avec les données radar.

Un autre problème rencontré est lié au programme utilisé pour la numérisation des données de profilomètre. Ce programme a été modifié pour qu'il représente correctement les paramètres du profilomètre utilisé durant la campagne de terrain de 2008.

5. Conclusion et recommandations de travaux futurs

Dans le cadre de ce mini-projet, le potentiel des images RADARSAT-2 polarimétriques pour le suivi de l'humidité du sol nu de champs agricoles du Campidano (Sardaigne, Italie) a été évalué. Avant l'analyse des images, un prétraitement a été appliqué, incluant un filtre Lee et des corrections géométriques. L'application du filtre Lee avant la correction géométrique nous a permis d'avoir des images plus nettes avec un meilleur contraste et, de cette manière, de faciliter l'identification des points de contrôle pour une meilleure correction géométrique.

Nous avons étudié le comportement du signal radar en polarisations HH, HV, VH, VV, en fonction des paramètres de surface du sol, soient l'humidité et la rugosité, afin de déterminer une relation entre eux. Tout d'abord, il faut mentionner la faible dynamique de l'humidité pour la période étudiée. En prenant en compte tous les champs pour toutes les dates pour lesquelles des mesures de l'humidité du sol ont été prises, une très faible dépendance du signal radar à l'humidité du sol a été observée ($R^2 \sim 0,2$ en polarisation HH et $R^2 \sim 0,23$ en HH/HV). La tendance est atténuée par les variations du signal radar dues à la différence de champs en rugosité, en topographie ou en état du labour du sol. La sensibilité du signal radar à l'humidité du sol obtenue était de 0,12 dB/% en polarisation HH, de -0,12 en HV de 0,04 en HH/VV et de 0,24 en HH/HV.

Pour essayer d'analyser plus en détail la faible dépendance du signal rétrodiffusé à l'humidité du sol et sa grande variabilité, le comportement du signal rétrodiffusé en fonction des paramètres de surface a été étudié à l'échelle des champs individuels. De cette manière, les variations causées par la différence en rugosité et texture du sol, l'état de labour, orientation de sillons ou la topographie entre les champs ont été éliminées. Les résultats montrent une dépendance plus forte à l'humidité du sol en polarisation HH ($R^2 \sim 0,16 - 0,7$), HV ($R^2 \sim 0,2 - 0,7$) et HH/HV ($R^2 \sim 0,11 - 0,56$), ainsi qu'une sensibilité plus élevée en HH (de 0,16dB/% à 0,35dB/%), en HV (de -0,12 dB/% à -0,15 dB/%) et en HH/HV (de 0,19 dB/% à 0,39 dB/%), comparable à celle des autres études pour les quatre parcelles dont nous avons des mesures d'humidité pour toutes les 5 dates (f_11, f_21_1, f_21_2, f_31). Le fait que les parcelles individuelles ont un comportement similaire est très prometteur. Cependant, ces relations sont basées seulement sur 5 mesures (une mesure de l'humidité moyenne par champs pour les 5 dates dont nous avons des images RADARSAT-2). Leur validité devrait être validée quand plus de données seront disponibles pour un plus grand intervalle d'humidité.

Nous avons également montré que le coefficient de rétrodiffusion dans les quatre polarisations, soit HH, HV, VH, et VV, est quasiment indépendant des paramètres de rugosité s et l_c .

De plus, ce travail a montré que les données polarimétriques, extraites à l'aide des décompositions polarimétriques, contiennent des informations supplémentaires à l'information fournie par les coefficients de rétrodiffusion. Elles permettent de mieux comprendre le comportement des coefficients de rétrodiffusion et leurs rapports en les liant aux mécanismes de diffusion.

Nous avons testé la dépendance des paramètres polarimétriques **H**, **A**, α , α_1 , λ et **RVI** aux paramètres de la surface (l'humidité du sol et la rugosité). Une corrélation $> 0,71$ a été observée entre l'entropie, l'angle α , α_1 , λ et RVI et l'humidité du sol. Cependant, ce résultat est basé sur l'analyse d'un total de 14 parcelles (10 parcelles pour le 24 juin et 4 parcelles pour le 24 mai 2008, qui ont des mesures d'humidité) et une très faible dynamique de l'humidité du sol. Donc, l'analyse polarimétrique d'autres images RADARSAT-2, prises dans des conditions similaires, sera nécessaire pour enrichir la base de données et pour éventuellement confirmer ou rejeter les dépendances trouvées. Nous avons trouvé aussi que l'entropie, l'angle α et α_1 ont une légère dépendance à l'écart type des hauteurs de la surface du sol **s** et aucune dépendance avec I_c . Le paramètre polarimétrique anisotropie (**A**) ne montre aucune dépendance aux paramètres de surface.

Les résultats de ce travail laissent supposer que les données RADARSAT-2 polarimétriques ont du potentiel pour le suivi de l'humidité du sol nu à l'échelle de parcelles agricoles. Le fait que le capteur RADARSAT-2 fournisse des données en 4 polarisations simultanément permet d'extraire la matrice de diffusion complète et, ensuite, d'utiliser une panoplie de paramètres polarimétriques, qui semblent prometteurs pour la caractérisation des paramètres de surface.

Cependant, pour une meilleure caractérisation du lien entre les données RADARSAT-2 et les paramètres de surface du sol, il faudrait avoir un plus grand nombre d'images couvrant un intervalle plus large de l'humidité. Ainsi, il serait préférable que les champs à l'étude soient de plus grande taille. Cela permettrait d'extraire la rétrodiffusion et les paramètres polarimétriques de polygones plus à l'intérieur de ces champs. De cette manière, les erreurs potentielles liées aux corrections géométriques seraient diminuées. Certaines améliorations pourraient être apportées au profilomètre en fixant à deux points les aiguilles. Ainsi, un ajout au programme de numérisation des données de rugosité, concernant la rotation du système de coordonnées du profilomètre par rapport au système de coordonnées des photos, améliorerait la précision de paramètres **s** et I_c .

Annexe : Procédure pour l'échange des données entre PolSARpro et PCI Geomatica pour l'extraction des paramètres polarimétriques des champs individuels

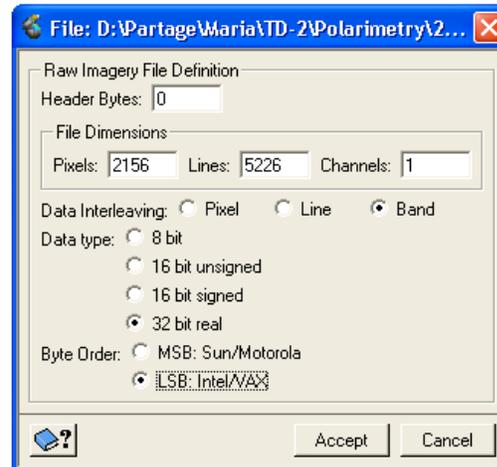
La procédure suivante a été appliquée pour le traitement des données PolSARpro afin d'extraire les paramètres polarimétriques pour les champs individuels.

1). La matrice de cohérence est créée à partir du fichier product.xml. Comme résultat, 9 fichiers .bin sont créés + 1 fichier config.txt.

2). Après l'extraction des éléments de la matrice de cohérence, une correction géométrique pourrait être appliquée à l'aide de l'OrthoEngine de PCI Geomatics. Le premier pas est de renommer tous les fichiers .bin en .raw pour que Focus de PCI Geomatica puisse les ouvrir. Après que les fichiers .raw sont créés, pour les ouvrir correctement, il est nécessaire de fournir des informations suivantes :

Header Bytes : 0
File Dimensions : **Nombre de pixels et de ligne varie selon l'image. Si «multilooking» a été appliqué lors d'extraction de la matrice de cohérence, le nombre de pixels et des lignes sera différent de ceux de l'image originale. Pour savoir le nombre exact, on pourrait consulter le fichier config.txt créé lorsque la matrice de cohérence est extraite.**

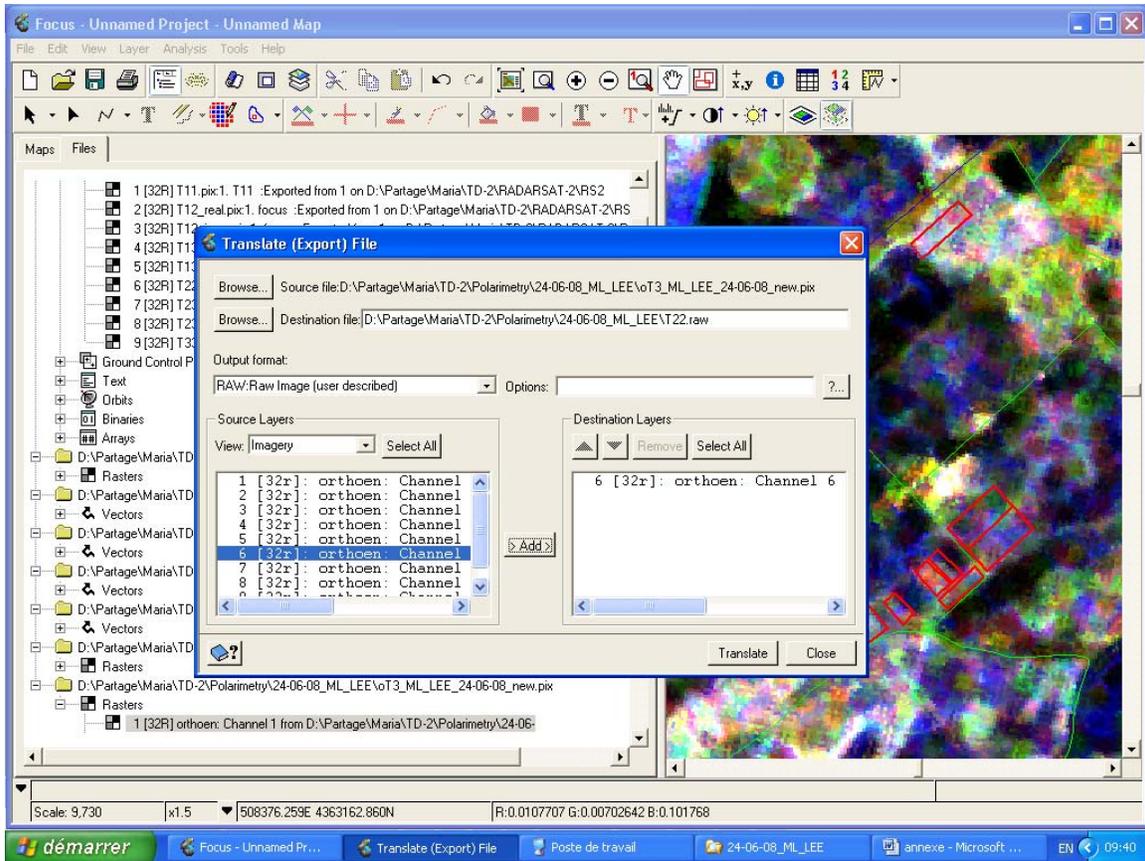
Data interleaving: **Band**
Data type: **32 bit real**
Byte Order: **LSB**



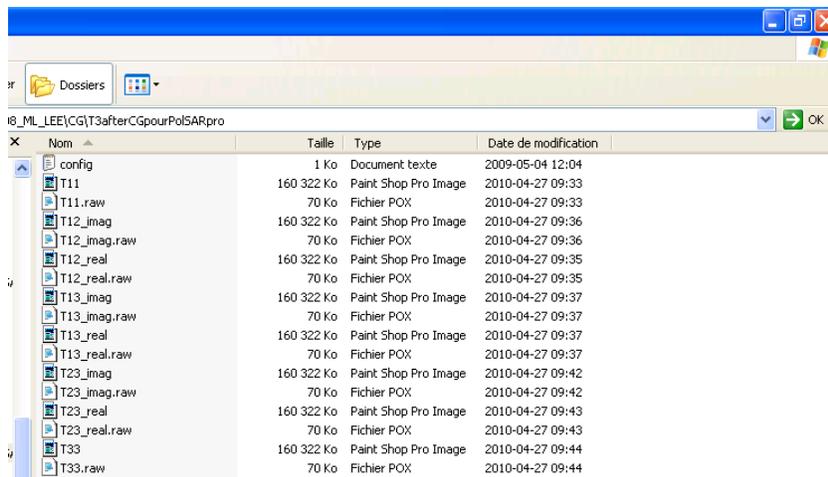
3). Après que tous les 9 fichiers .raw sont ouverts, on crée avec eux un fichier .pix. Dans ce fichier .pix il faut ajouter les 5 bandes du fichier product.xml qui contient des informations orbitales.

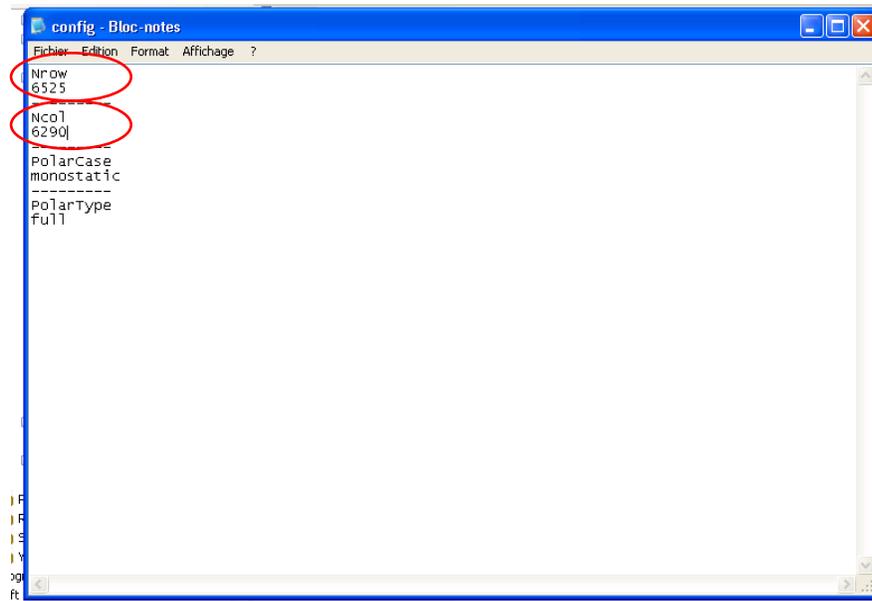
4). Après la création du fichier .pix, une correction géométrique pourrait être appliquée.

5). Pour continuer le traitement avec PolSARpro, il faut de nouveau transformer les bandes du fichier orthoréctifié .pix contenant les éléments de la matrice de cohérence en 9 fichiers .raw. Un exemple est montré ci-dessous :

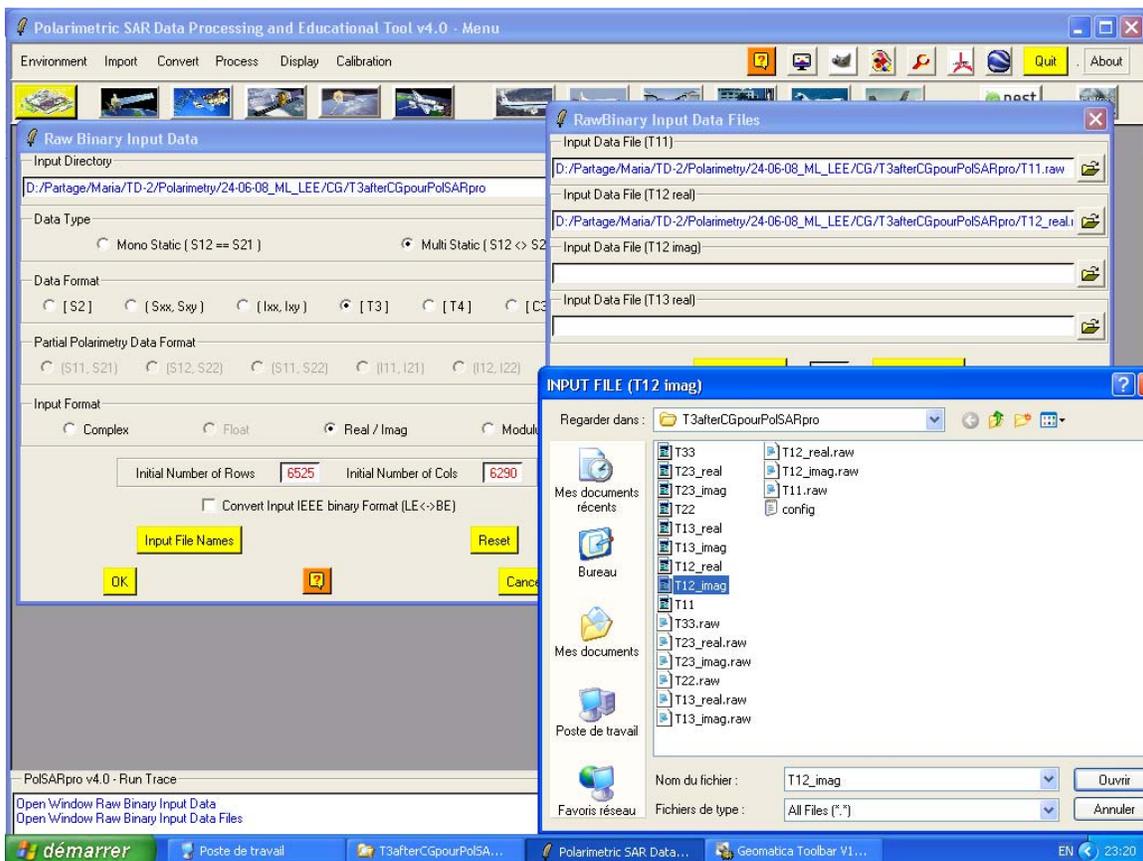


6). À cause du changement du nombre de pixels et de lignes après la correction géométrique, il est nécessaire d'éditer le fichier « config.txt » qui devrait être dans le même dossier que les fichiers pour les composantes de la matrice T3 produits après la correction géométrique.

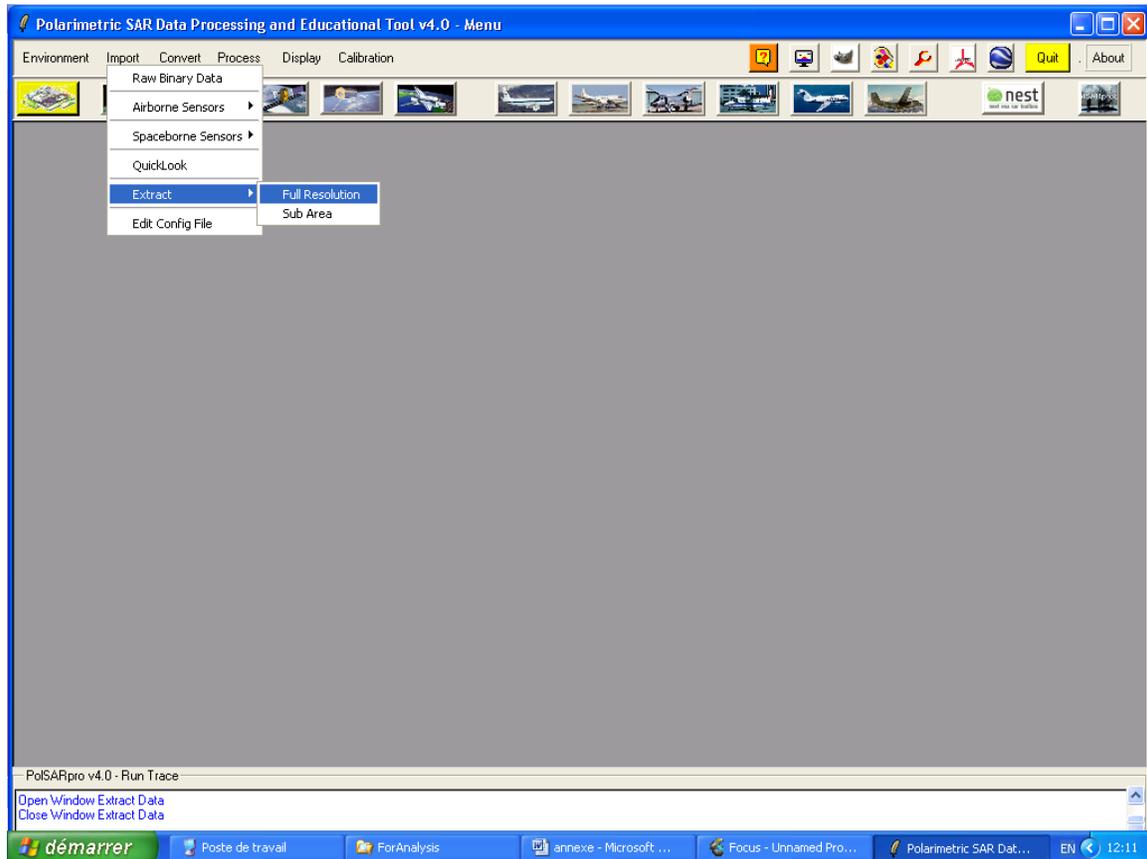




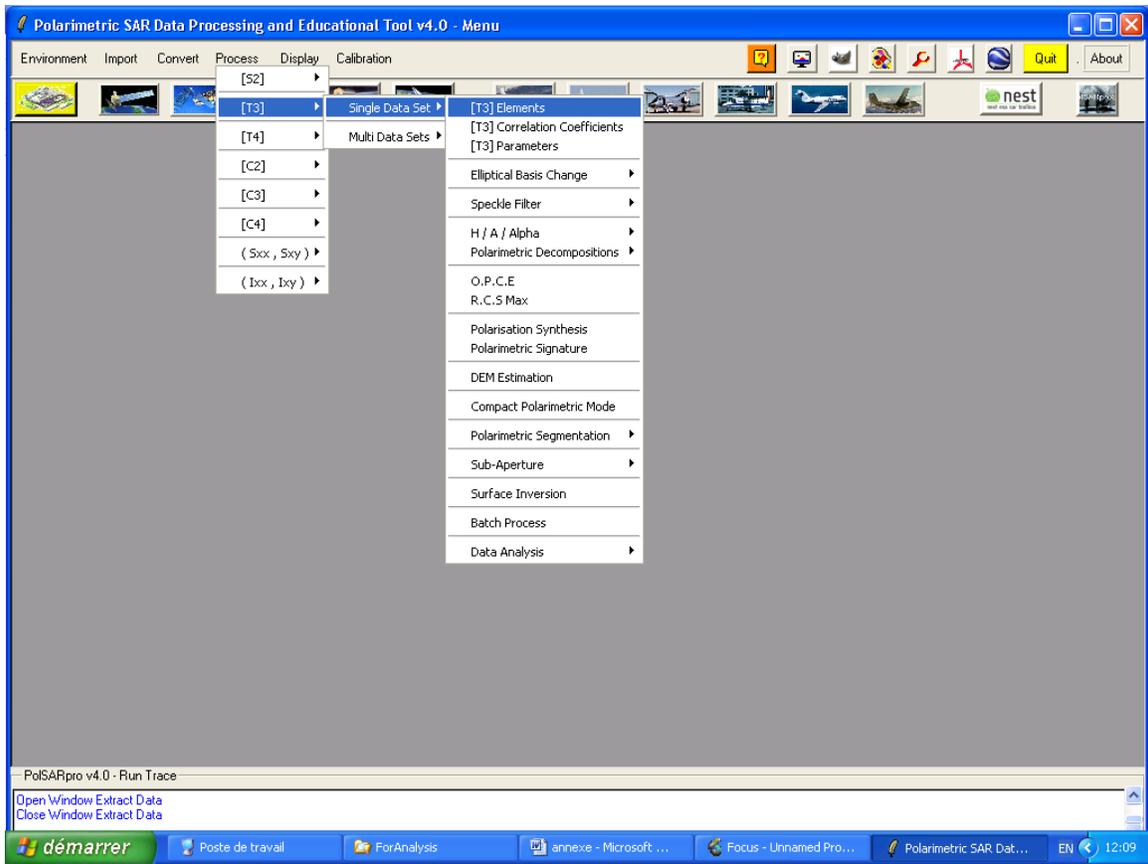
7). Après ces transformations, les fichiers contenant les éléments de la matrice de cohérence, peuvent être utilisés de nouveau dans PolSARpro.



8). Ensuite, les éléments de la matrice devraient être extraits :



9). Après ces opérations, les paramètres polarimétriques peuvent être extraits :



10). En général, les paramètres polarimétriques choisis sont enregistrés dans des fichiers .bin. Pour extraire les paramètres polarimétriques pour les champs individuels, ces fichiers devraient être lus de nouveau par Focus PCI Geomatics de la même manière que celle décrite dans 2) ci-dessus. Cependant, même s'ils sont bien géométriquement corrigés, ces fichiers ont perdu l'information géographique. Donc, il faut les reprojeter dans la projection voulue. Il serait mieux de créer un seul fichier .pix à partir des bandes contenant les paramètres polarimétriques et, ensuite, de reprojeter ce fichier.

11). Extraire les paramètres polarimétriques moyens pour les polygones des champs individuels à l'aide de Modeler de PCI Geomatics. Pour les bandes contenant une classification donnée (ex. H-alpha classification), le « mode » de pixels classifiés appartenant à un champ donné a été utilisé.

Liste de références

- Anderson, K., and Croft, H. 2009. Remote Sensing of Soil surface properties. *Progress in Physical Geography*, Vol. 33, No. 4, pp. 457-473.
- Aru, A., Tomasi, D., and Vacca, A. 2006. Aspects of environmental degradation in Sardinia. *Preparing for the next generation of watershed management programmes and projects - Water resources for the future.*, Porto Cervo, Sassari, Sardinia, Italy . Watershed Management and Sustainable Mountain Development Working Paper (FAO), No. 9, eds. P.C. Zingari, and L. Tennyson, FAO, Rome (Italy).
- Baghdadi, N., Bonnifait, L., King, C., and Bourguignon, A. 2003. Utilisation des images RSS pour un étalonnage empirique du modèle IEM dans un contexte de sols nus limoneux et zones agricoles. *Téledétection*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-16.
- Baghdadi, N., Cerdan, O., Zribi, M., Auzet, V., Darboux, F., El Hajj, M., and Bou Kheir, R. 2008. Operational performance of current synthetic aperture radar sensors in mapping soil surface characteristics in agricultural and erosion modelling. *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 9-20.
- Baghdadi, N., Gherboudj, I., Zribi, M., Sahebi, M., King, C., and Bon, F. 2004. Semi-empirical calibration of the IEM backscattering model using radar images and moisture and roughness field measurements. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, No. 18, pp. 3593-3623.
- Baghdadi, N., Holah, N., and Zribi, M. 2006. Soil moisture estimation using multi-incidence and multi-polarization ASAR data. *International Journal of Remote Sensing* , Vol. 27, No. 10, pp. 1907-1920.
- Baghdadi, N., King, C., Bourguignon, A., and Remond, A. 2002. Potential of ERS and Radarsat data for surface roughness monitoring over bare agricultural fields: Application to catchments in Northern France. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, No. 17, pp. 3427-3442.
- Barrett, B.W., Dwyer, E., and Whelan, P. 2009. Soil Moisture Retrieval from Active Spaceborne Microwave Observations: An Evaluation of Current Techniques. *Remote Sensing*, Vol. 1, pp. 210-242.
- Behari, J. 2005. *Microwave Dielectric Behaviour of Wet Soils*. Remote Sensing and Digital

Image Processing, 8. Springer & Anamaya Publishers, New Delhi, India, Berlin.

Centre canadien de télédétection. "Tutoriel: La polarimétrie radar." Web page, [accessed May 2010a]. Available at http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/polarim/index_f.php.

Centre canadien de télédétection. "Tutoriel: Notions fondamentales de télédétection." Web page, [accessed May 2010b]. Available at http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_f.php.

Chen, K.S., Yen, S.K., and Huang, W.P. 1995. A Simple Model for Retrieving Bare Soil Moisture from Radar-Scattering Coefficients. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 54, pp. 121-126.

Cloude, S.R., and Pottier, E. 1997. An Entropy Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, No. 1, pp. 68-78.

Daniel, S., Allain, S., Ferro-Famil, L., and Pottier, E. 2008. Surface Parameter Estimation over Periodic Surfaces Using a Time-Frequency Approach. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2008. IEEE International*, Boston, MA .pp. II-406 - II-409.

Engman, E.T., and Chauhan, N. 1995. Status of Microwave Soil Moisture Measurements with Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 51, pp. 189-198.

Fellah, K., Meyer, C., Laugier, O., Clandillon, S., and De Fraipont, P. 1997. Potential and limitations of multi-temporal SAR data in a quantitative approach for multi-scalar hydrological applications. Synthesis of ERS Alsace/Camargue pilot project. *The 3rd ERS Symposium*, Florence.

Ferro-Famil, L., Allain, S., and Pottier, E. 2002. Extraction of surface parameters from SAR data using polarimetric descriptors. *Proceedings of the Third International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*, Sheffield, UK. Edited by A. Wilson. ESA Publications Division, ESA SP-475, Noordwijk, Netherlands.

Fung, A.K., and Chen, K.S. 1992. Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, pp. 356-369.

Gherboudj, I., Fillion, R., Paniconi, C., Bernier, M., Melis, M., and Soddu, A. 2007. Field and basin scale analyses of ASAR imagery for soil moisture estimation in the Campidano

plain, Sardinia. *Proceeding Envisat Symposium 2007 (ESA SP-636)*, Montreux, Switzerland.

Guillotte, K., Gherboudj, I., Paniconi, C., Bernier, M., Marrocu, M., Dessena, M.A., Botti, P., Soddu, A., Fanni, S., Meloni, R., Fantola, F., and Usai, D. 2005. Analyses of ASAR imagery for hydrological applications in Sardinia, Italy. *Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium (ESA SP-572)*, Salzburg, Austria.

Hajnsek, I. 2003. "Inversion of surface parameters using polarimetric SAR." Friedrich-Schiller-Universität Jena » Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät.

Hajnsek, I., Pottier, E., and Cloude, S.R. 2003. Inversion of Surface Parameters From Polarimetric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 4, pp. 727-744.

Hoang, K.H. 2008. *Analyse des fluctuations temporelles du signal radar afin de suivre les variations de l'humidité du sol dans la plaine du Campidano en Sardaigne, Italie.*, INRS-ETE.

Holah, N., Baghdadi, N., Zribi, M., Bruand, A., and King, C. 2005. Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 96, No. 1, pp. 78-86.

Kasischke, E.S., Bourgeau-Chavez, L.L., Rober, A.R. , Wyatt, K.H., Waddington, J.M., and Turetsky, M.R. 2009. Effects of soil moisture and water depth on ERS SAR backscatter measurements from an Alaskan wetland complex. *Remote Sensing of Environment* , Vol. 113, pp. 1868–1873.

Kim, Y. and van Zyl, J. 2004. "Vegetation Effects on soil Moisture Estimation." Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2004, Pasadena, CA .

Kurosu, T., Fujita, M., and Chiba, K. 1995. Monitoring of rice crop growth from space using the ERS-1 C-band SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.*, Vol. 33, pp. 1092-1096.

Lakhankar, T., Krakauer, N., and Khanbilvardi, R. 2009. Applications of microwave remote sensing of soil moisture for agricultural applications. *International Journal of Terraspace Science and Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 81-91.

Larson, W. 2008. RADARSAT-2: A Vital New Source of Global Geospatial Intelligence. *Imaging Notes* , Vol. 23, No. 3, pp. 38-43.

- Leconte, R., Brissette, F., Galarneau, M., and Rousselle, J. 2004. Mapping near-surface soil moisture with RADARSAT-1 synthetic aperture radar data. *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 1, pp. W01515.
- Lee, J.-S. 1980. Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAM1-2, No. 2.
- Lee, J.-S., and Pottier, E. 2009. *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. Optical Science and Engineering. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- McNairn, H., and Brisco, B. 2004. The application of C-band polarimetric SAR for agriculture: a review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, No. 3, pp. 525-542.
- Moran, M.S., Hymer, D.C., Qi, J., and Sano, E.E. 2000. Soil moisture evaluation using multi-temporal synthetic aperture radar SAR in semiarid rangeland. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 105, pp. 69-80.
- Moran, M.S., Peters-Lidard, C.D., Watts, J.M., and McElroy, S. 2004. Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, No. 5, pp. 805-826.
- Oh, Y. 2004. Quantitative Retrieval of Soil Moisture Content and Surface Roughness From Multipolarized Radar Observations of Bare Soil Surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 42, No. 3, pp. 596-601.
- 2006. Robust inversion technique for retrieving soil moisture from multi-polarised backscatter of bare surface. *Electronics Letters*, Vol. 42, No. 7.
- Oh, Y., Sarabandi, K., and Ulaby, F.T. 1992. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, pp. 370-382.
- PCI Geomatics. "Orthorectifying RADARSAT-2: Quick Guide." Web page. Available at www.pcigeomatics.com.
- Pultz, T.J., Crevier, Y., Brown, R.J., and Boisvert, J. 1997. Monitoring Local Environmental Conditions with SIR-C/X-SAR. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 59, No. 2, pp. 248-255.
- Rahman, M.M., Moran, M.S., Thoma, D.P., Bryant, R., Holifield Collins, C.D., Jackson, T., Orr, B.J., and Tischler, M. 2008. Mapping surface roughness and soil moisture using multi-

- angle radar imagery without ancillary data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 112, pp. 391-402.
- Shoshany, M., Svoray, T., Curran, P.J., Foody, G.M., and Perevolotsky, A. 2000. The relationship between ERS-2 SAR backscatter and soil moisture: generalisation from a humid to semi-arid transect. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, No. 11, pp. 2337-2343.
- Srivastava, H.S., Patel, P., Manchanda, M.L., and Adiga, S. 2003. Use of multiincidence angle RADARSAT-1 SAR data to incorporate the effect of surface roughness in soil moisture estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 7, pp. 1638-1640.
- Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P. 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 574-582.
- Ulaby, F.T., Dobson, M.C., and Bradley, G.A. 1981. Radar reflectivity of bare and vegetation-covered soil. *Advanced in Space Research*, Vol. 1, No. 10, pp. 91-104.
- Ulaby, F.T., Dubois, P.C., and van Zyl, J. 1996. Radar mapping of surface soil moisture. *Journal of Hydrology*, Vol. 184, No. 1-2, pp. 57-84.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K., and Fung, A.K. 1986. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol. III -- Volume Scattering and Emission Theory, Advanced Systems and Applications*. Vol. From Theory to Applications. Artech House, Inc., Dedham, Massachusetts.
- Verhoest, N.E.C., Lievens, H., Wagner, W., Álvarez-Mozos, J., Moran, M.S., and Mattia, F. 2008. On the Soil Roughness Parameterization Problem in Soil Moisture Retrieval of Bare Surfaces from Synthetic Aperture Radar. *Sensors*, Vol. 8, pp. 4213-4248.
- Wagner, W., Blöschl, G., Pampaloni, P., Calvet, J.-C., Bizzarri, B., Wigneron, J.-P., and Ker, Y. 2007. Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications. *Nordic Hydrology*, Vol. 38, No. 1, pp. 1-20.
- Wever, T., and Henkel, J. 1995. Evaluation of the AIRSAR system for soil moisture analysis. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 53, No. 2, pp. 118-122.
- Zillmann, E., Lilienthal, H., Schrage, T., and Schnug, E. 2004. Significance of radar remote sensing imagery for agricultural applications. *Landbauforschung Völkenrode*, Vol. 54, No. 4, pp. 199-210.