

Département de géomatique appliquée

Faculté des lettres et sciences humaines

Université de Sherbrooke

Analyse des signaux radars polarimétriques en bandes C et L pour le suivi de l'humidité
du sol de sites forestiers

Safa Jammali

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences géographiques
(M.Sc.), Cheminement en physique de la télédétection

Septembre 2016

© Safa Jammali, 2016

Membres du Jury

Directrice de recherche : Prof. Ramata Magagi

Co-directeur de recherche : Prof. Kalifa Goïta

Évaluateur interne : Prof. Alexandre Langlois

Évaluateur externe : Prof. Alejandro Monsivais Huerto, Institut Polytechnique
du Mexique, Mexico (Mexique)

À ma perle,
À mon trésor le plus précieux,
À ma fille **Sajda Mansouri**

‘Nous trouverons un chemin... ou nous en créerons un.’

Hannibal, né en 247 av. J.-C. à Carthage (au nord-est de l'actuelle Tunis en Tunisie).

Phrase historique prononcée lors de La Traversée des Alpes - 212 av. JC.

Résumé

Dans les couverts forestiers, le suivi de l'humidité du sol permet de prévenir plusieurs désastres tels que la paludification, les incendies et les inondations. Comme ce paramètre est très dynamique dans l'espace et dans le temps, son estimation à grande échelle présente un grand défi, d'où le recours à la télédétection radar. Le capteur radar à synthèse d'ouverture (RSO) est couramment utilisé grâce à sa vaste couverture et sa résolution spatiale élevée. Contrairement aux sols nus et aux zones agricoles, le suivi de l'humidité du sol en zone forestière est très peu étudié à cause de la complexité des processus de diffusion dans ce type de milieu. En effet, la forte atténuation de la contribution du sol par la végétation et la forte contribution de volume issue de la végétation réduisent énormément la sensibilité du signal radar à l'humidité du sol. Des études portées sur des couverts forestiers ont montré que le signal radar en bande C provient principalement de la couche supérieure et sature vite avec la densité de la végétation. Cependant, très peu d'études ont exploré le potentiel des paramètres polarimétriques, dérivés d'un capteur polarimétrique comme RADARSAT-2, pour suivre l'humidité du sol sur les couverts forestiers. L'effet du couvert végétal est moins important avec la bande L en raison de son importante profondeur de pénétration qui permet de mieux informer sur l'humidité du sol.

L'objectif principal de ce projet est de suivre l'humidité du sol à partir de données radar entièrement polarimétriques en bandes C et L sur des sites forestiers. Les

données utilisées sont celles de la campagne terrain *Soil Moisture Active Passive Validation Experiment 2012* (SMAPVEX12) tenue du 6 juin au 17 juillet 2012 au Manitoba (Canada). Quatre sites forestiers de feuillus ont été échantillonnés. L'espèce majoritaire présente est le peuplier faux-tremble. Les données utilisées incluent des mesures de l'humidité du sol, de la rugosité de surface du sol, des caractéristiques des sites forestiers (arbres, sous-bois, litières...) et des données radar entièrement polarimétriques aéroportées et satellitaires acquises respectivement, en bande L (UAVSAR) à 30° et 40° et en bande C (RADARSAT-2) entre 20° et 30°. Plusieurs paramètres polarimétriques ont été dérivés des données UAVSAR et RADARSAT-2 : les coefficients de corrélation (ρ_{HHVV} , ϕ_{HHVV} , etc); la hauteur du socle; l'entropie (H), l'anisotropie (A) et l'angle alpha extraits de la décomposition de Cloude-Pottier; les puissances de diffusion de surface (Ps), de double bond (Pd) extraites de la décomposition de Freeman-Durden, etc. Des relations entre les données radar (coefficients de rétrodiffusion multifréquences et multipolarisations (linéaires et circulaires) et les paramètres polarimétriques) et l'humidité du sol ont été développées et analysées.

Les résultats ont montré que 1) En bande L, plusieurs paramètres optimaux permettent le suivi de l'humidité du sol en zone forestière avec un coefficient de corrélation significatif ($p\text{-value} < 0,05$): σ^0 linéaire et σ^0 circulaire (le coefficient de corrélation, r, varie entre 0,60 et 0,96), Ps (r entre 0,59 et 0,84), Pd (r entre 0,6 et 0,82), $\rho_{HHHV_30^\circ}$, $\rho_{VVHV_30^\circ}$, $\phi_{HHHV_30^\circ}$ and $\phi_{HHVV_30^\circ}$ (r entre 0,56 et 0,81) alors qu'en bande C, ils sont réduits à ϕ_{HHHV} , ϕ_{VVHV} et ϕ_{HHVV} (r est autour de 0,90). 2) En bande L, les paramètres polarimétriques n'ont pas montré de valeur ajoutée par rapport aux signaux

conventionnels multipolarisés d'amplitude, pour le suivi de l'humidité du sol sur les sites forestiers. En revanche, en bande C, certains paramètres polarimétriques ont montré de meilleures relations significatives avec l'humidité du sol que les signaux conventionnels multipolarisés d'amplitude.

Abstract

Over forest canopies, soil moisture monitoring allows to prevent many disasters such as paludification, fires and floods. As this parameter is very dynamic in space and time, its large-scale estimation is a great challenge, hence the use of radar remote sensing. Synthetic aperture radar (SAR) sensor is commonly used due to its wide spatial coverage and its high spatial resolution. Unlike bare soils and agricultural areas, only few investigations focused on the monitoring of soil moisture over forested areas due to the complexity of the scattering processes in this kind of medium. Indeed, the high attenuation of soil contribution by the vegetation and the high vegetation volume contribution significantly reduce the sensitivity of the radar signal to soil moisture. Studies conducted at C-band have shown that the radar signal mainly comes from the upper layer and it quickly saturates with the vegetation density. However, very few studies have explored the potential of polarimetric parameters derived from a fully polarimetric sensor such as RADARSAT-2, to monitor soil moisture over forest canopies. With its large penetration's depth, vegetation cover effect is less important at L-band, allowing thus to better inform on soil moisture.

The main objective of this project is to monitor soil moisture from fully polarimetric L and C bands radar data acquired over forested sites. The data used were collected during the field campaign of Soil Moisture Active Passive Validation EXperiment 2012 (SMAPVEX12) which took place from June 6 to July 17, 2012 in

Manitoba (Canada). Four deciduous forested sites were sampled. The main species is the trembling aspen. The data used included measurements of soil moisture, soil surface roughness, characteristics of the forested sites (trees, undergrowth, litter, etc.) and fully polarimetric airborne and satellite radar data respectively acquired at L-band (UAVSAR) with 30° and at 40° incidence angles and at C-band (RADARSAT-2) between 20° and 30°. Several polarimetric parameters were derived from UAVSAR and RADARSAT-2 data: the correlation coefficients (ρ_{HHVV} , ϕ_{HHVV} , etc); the pedestal height; entropy (H), anisotropy (A) and alpha angle extracted from Cloude-Pottier decomposition; surface (Ps) and double bounce (Pd) scattering powers extracted from Freeman-Durden decomposition, etc. Relationships between radar backscattering data (multifrequency and multipolarisation (linear/circular) backscattering coefficients and polarimetric parameters) and soil moisture were developed and analyzed.

The results showed that 1) at L-band, several optimal parameters allow soil moisture monitoring over forested sites with a significant correlation coefficient (p-value < 0.05): linear and circular σ^0 (the correlation coefficient, r, varies between 0.60 and 0.96), Ps (r varies between 0.59 and 0.84), Pd (r varies between 0.60 and 0.82), $\rho_{HHHV}_{30^\circ}$, $\rho_{VVHV}_{30^\circ}$, $\phi_{HHHV}_{30^\circ}$ and $\phi_{HHVV}_{30^\circ}$ (r varies between 0.56 and 0.81). However, at C-band, there are only few optimal parameters ϕ_{HHHV} , ϕ_{VVHV} and ϕ_{HHVV} (r is around 0.90). 2) at L-band, polarimetric parameters did not show any added values for soil moisture monitoring over forested sites compared to multipolarised σ^0 . Nevertheless, at C-band some polarimetric parameters show better significant relationships with the soil moisture than the conventional multipolarised backscattering amplitudes.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement mes encadreurs et mes professeurs Mme. Ramata Magagi et M. Kaifa Goïta qui m'ont encadrée pendant ma maîtrise. Ils ont toujours su me guider vers l'amélioration et me faire profiter de leurs conseils et de leurs importantes cultures scientifiques, tout en me laissant une grande liberté dans mon travail. Je les respecte énormément et j'apprécie énormément leurs efforts, leurs conseils et leurs patiences.

Je tiens aussi à remercier mes collègues au Département de géomatique appliquée et au CARTEL (surtout Vincent Beauregard) pour plusieurs discussions enrichissantes.

Je veux spécialement remercier mon mari, ma moitié, Dr. Sabeur Mansouri qui m'a donné la force, le soutien et le courage tout au long de la maîtrise.

Enfin, je remercie de tout mon cœur mes chers parents, Mohamed et Rachida ainsi que toute ma famille.

Safa Jammali

Table des matières

Résumé.....	iv
Abstract.....	vii
Remerciements.....	ix
Table des matières.....	x
Liste des figures	xii
Liste des tableaux.....	xv
Liste des acronymes.....	xvii
Chapitre 1 Introduction générale	1
1.1 Mise en contexte	1
1.1.1 Définition et influence de l’humidité du sol	1
1.1.2 L’humidité du sol en télédétection.....	3
1.2 Problématique	7
1.3 Objectifs.....	10
1.3.1 Objectif général.....	10
1.3.2 Objectifs spécifiques.....	10
1.4 Hypothèses.....	11
1.5 Structure du mémoire.....	11
Chapitre 2 État des connaissances et cadre théorique.....	12

2.1 Sensibilité du coefficient de rétrodiffusion aux paramètres de surface	13
2.2 Modélisation du coefficient de rétrodiffusion pour le suivi de l'humidité du sol	14
2.3 Utilisation des paramètres polarimétriques pour le suivi de l'humidité du sol.....	16
2.3.1 Coefficients de corrélation.....	18
2.3.2 Hauteur de socle.....	20
2.4 Décomposition polarimétrique.....	21
2.4.1 Décomposition de Freeman-Durden	23
2.4.2 Décomposition de Cloude-Pottier.....	25
Chapitre 3 Matériels et méthodes	33
3.1 Site d'étude	33
3.2 Données.....	34
3.3 Méthode	39
Chapitre 4 Potentiel des données radar polarimétriques en bandes L et C pour le suivi de l'humidité du sol sur les sites forestiers de SMAPVEX12	41
4.1 Résumé de l'article	42
4.2 Article	44
Chapitre 5 Conclusion.....	77
Références (Hors article)	79
Bibliographie.....	83

Liste des figures

Figure 1.1: Cycle de l'eau.....	3
Figure 1.2: a) Mesure d'humidité du sol par sondes, b) mesure gravimétrique de l'humidité du sol	4
Figure 2.1: Les mécanismes de diffusion (diffusion de surface (1), diffusion de volume (2), interaction surface-volume (3) sur une zone forestière	12
Figure 2.2: a) Ellipse de polarisation décrite par son orientation (ψ) et son ellipticité (χ), b) Polarisation linéaire (cas de polarisation verticale) et c) Polarisation circulaire (cas de polarisation droite-droite)	17
Figure 2.3: ρ_{HHVV} (a) et ϕ_{HHVV} (b) des sites forestiers F1, F2, F3 et 5 (encadrés noirs) du SMAPVEX12, extraits des données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) pour le 17/06/2012.....	19
Figure 2.4: Hauteur de socle des sites forestiers F1, F2, F3 et F5 (encadrés noirs) de SMAPVEX12, extraites des données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) pour le 17/06/2012.....	21
Figure 2.5: Puissances de diffusion de la décomposition Freeman-Durden pour les sites forestiers F1, F2, F3 et F5 (encadrés noirs) de SMAPVEX12 a) P_s , b) P_d et c) P_v , extraites des données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) pour le 17/06/2012. Les puissances sont normalisées par rapport au SPAN	24
Figure 2.6: Décomposition de Cloude-Pottier basée sur une décomposition en valeurs propres et en vecteurs propres de la matrice de cohérence (T).....	25

Figure 2.7 : Images de l'entropie H (a), l'anisotropie A (b) et l'angle alpha (c) pour les sites forestiers F1, F2, F3 et F5 (encadrés noirs) de SMAPVEX12, extraites des données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) pour le 17/06/2012	27
Figure 2.8 : Plan H/α de Cloude et Pottier (1997)	29
Figure 2.9 : Plan H/α de Cloude-Pottier pour les sites (a) F1, (b) F2, (c) F3 et (d) F5 de la campagne SMAPVEX12, en utilisant les données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) du 17/06/2012	30
Figure 2.10 : Plan H/α de Cloude-Pottier pour tous les sites forestiers de la campagne SMAPVEX12, en utilisant les données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) acquises du 17 juin au 17 juillet 2012	31
Figure 3.1 : Localisation du site SMAPVEX12 (rectangle noir) et des sites forestiers échantillonnés (F1, F2, F3, F5).....	34
Figure 3.2 : Mesure de la rugosité de surface du sol sur le site forestier F2.....	37
Figure 3.3 : Photos mettant en évidence la couverture du sol (sous bois) dans chaque site forestier F1 (a), F2 (b), F3 (c) et F5 (d)	38
Figure 3.4 : Organigramme méthodologique.....	40

Figures de l'article (chapitre 4):

Fig. 1. a) Study area localization, b) the red rectangles are the four forested sampling sites of SMAPVEX12 field campaign 50

Fig. 2. Temporal profile of soil moisture and precipitation over F1, F2, F3, and F5 sites 51

Fig. 3. Schematic diagram of the methodology 57

Fig. 4. Temporal profile of L-band linear (HH, VV and HV) and circular (RR, LL and RL) polarizations at $\theta = 30^\circ$ and 40° along with soil moisture over F1..... 61

Fig. 5. Temporal profile of L-band linear (HH, VV and HV) and circular (RR, LL and RL) polarizations at $\theta = 30^\circ$ and 40° , along with soil moisture over F3 61

Fig. 6. Temporal profile of C-band linear (HH, VV and HV) and circular (RR, LL and RL) polarizations along with soil moisture over F1 and F3 62

Fig. 7. Ps and Pd vs. the soil moisture at L-band over F1, F2, F3 and F5 66

Fig. 8. Ps and Pd vs the soil moisture at C-band over F1, F2 and F3 sites..... 66

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Description des variables analysées pour la présente étude..... 32

Tableau 3.1 : Récapitulatif des données utilisées 35

Tableaux de l'article (chapitre 4):

Table 1. Surface roughness measurements over SMAPVEX12 forested sites in the look direction of RADARSAT-2 and UAVSAR sensors 52

Table 2. Characteristics of the forested sites 53

Table 3. Availability of UAVSAR data over the study area..... 55

Table 4. List of wide mode Quad-pol RADARSAT-2 data used in this study. The ascending (A) and descending (D) directions correspond to the 7:10 PM and the 7:50 AM overpasses, respectively 56

Table 5. Pixels number for each polygon 58

Table 6. Correlation coefficients of σ^0 vs. soil moisture at L-band ($\theta = 30^\circ$) for F1, F2, F3 and F5 sites. Non-significant correlations (p -value > 0.05) are underlined..... 64

Table 7. Correlation coefficients of σ^0 vs. soil moisture at C-band for F1, F2 and F3 sites. None of them is significant..... 64

Table 8. Correlation coefficient of P_s and P_d vs. the soil moisture at L and C-bands for F1, F2, F3 and F5 sites. Significant correlations (p -value < 0.05) are shown with * 67

Table 9. Correlation coefficient of polarimetrics parameters to the soil moisture at L-band ($\theta = 30^\circ$) for F1, F2, F3 and F5 sites and at C-band for F1, F2 and F3 sites. Significant correlations (p-value < 0.05) are shown with * 68

Liste des acronymes

DHP (DBH): Diamètre de l'arbre à hauteur de poitrine (tree diameter-breast-height)

HS (ou SM): Humidité du sol (ou Soil Moisture)

NASA: National Aeronautics and Space Administration

MAFRI: Manitoba Agriculture, Food and Rural Initiatives

RSO (ou SAR): Radar à synthèse d'ouverture (Synthetic Aperture Radar)

SMAPVEX12 : Soil Moisture Active Passive Validation Experiment in 2012

SMOS : Soil Moisture and Ocean Salinity

UAVSAR: Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar

USDA: United States Department of Agriculture

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Mise en contexte

1.1.1 Définition et influence de l'humidité du sol

L'eau peut être à l'état gazeux dans l'atmosphère, à l'état liquide (que ce soit dans les océans, les mers, les fleuves, les rivières et jusqu'au moindre lac...) ou à l'état solide (glace) sur la surface ou dans le sol. Elle se transforme lors de sa circulation entre les océans, l'atmosphère et la surface terrestre grâce à l'énergie solaire (Pidwirny, 2006). Cette circulation s'appelle 'cycle de l'eau' (Figure 1.1). L'humidité du sol ou autrement dit la teneur en eau dans le sol est la quantité d'eau liquide présente dans les couches de sols. Cette quantité d'eau est faible par rapport à celle d'autres réservoirs. Toutefois, l'humidité du sol est un élément clé dans divers domaines.

En hydrologie, dépendamment de la valeur de l'humidité du sol, les précipitations se partagent en ruissellement ou infiltration (Brocca *et al.*, 2012). La connaissance de l'humidité du sol permet ainsi d'estimer la variation du stock d'eau dans le sol. Elle est aussi nécessaire pour prévenir l'érosion (Kirkby, 2001; Romkens *et al.*, 2001; Ziadat and Taimeh, 2013) et la sécheresse (Anderson *et al.*, 2012).

En agriculture, la transpiration des plantes, l'absorption de l'eau du sol par les racines et l'émission de l'eau à l'état de vapeur dans l'atmosphère sont gouvernées par la quantité d'eau disponible dans le sol. Ainsi, l'humidité du sol est un facteur essentiel non

seulement pour le maintien de l'équilibre hydrique des végétaux, mais aussi pour la croissance des plantes, le rendement des cultures (Bériaux *et al.*, 2011), la réduction des maladies fongiques (Troch *et al.*, 2003) et la prise des décisions d'irrigation (Shortt *et al.*, 2011).

Dans le domaine de la météorologie et du climat, l'humidité du sol possède une grande importance. En effet, l'humidité du sol est influencée par la précipitation. Par exemple, lorsqu'il y a un manque de précipitations, l'humidité du sol diminue et le risque de sécheresse augmente (Anderson *et al.*, 2012). Compte tenu de son rôle critique dans les bilans globaux d'eau et d'énergie qui régulent les processus hydrologiques et climatiques, l'humidité du sol est classée par le *Global Climate Observing System* (<http://www.gosic.org/content/gcos-terrestrial-ecv-soil-moisture>) comme une des Variables Climatiques Essentielles (VCE).

En foresterie, le suivi de l'humidité du sol détermine le développement de la biomasse (Santos *et al.*, 2002; Tsolmon *et al.*, 2002; Rauste 2005; Mitchard *et al.*, 2009). L'humidité du sol figure parmi les paramètres clés des modèles développés pour prévenir les risques naturels tels que 1) la paludification définie comme l'accumulation de matière organique causée par une augmentation de l'humidité du sol et des sphaignes (Lavoie *et al.*, 2005; Nappi, 2013), 2) les incendies (Bourgeau-Chavez *et al.*, 2007) et 3) les inondations (Merzouki *et al.*, 2011).

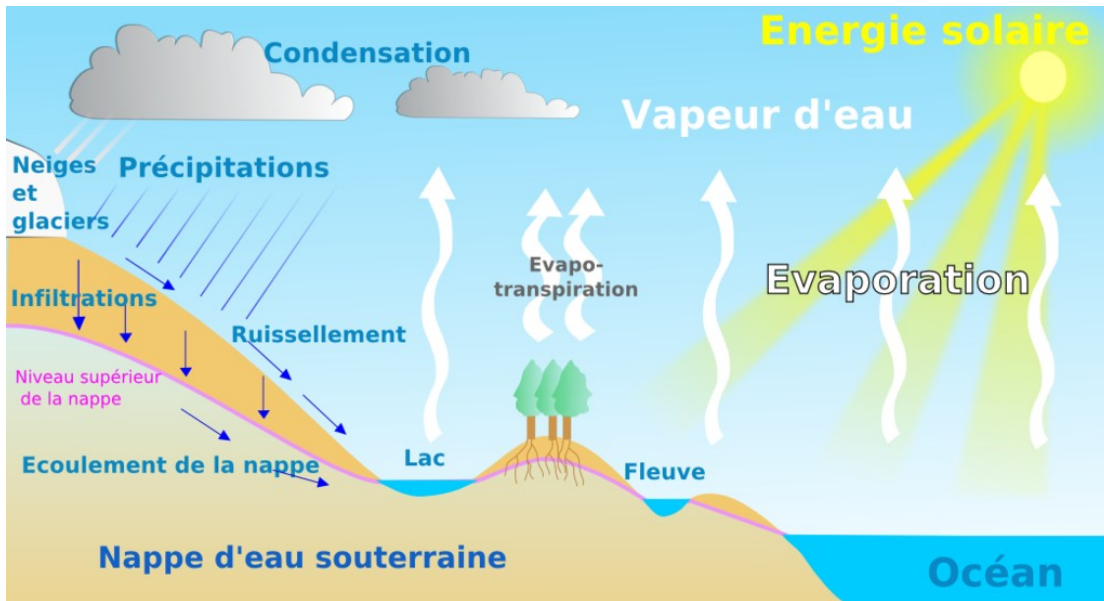


Figure 1.1: Cycle de l'eau

(https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_l'eau#/media/File:Cycle_de_l'eau.png)

1.1.2 L'humidité du sol en télédétection

En télédétection, l'humidité du sol est l'humidité de surface du sol, c'est-à-dire celle contenue dans les couches superficielles du sol (0-5 cm de profondeur du sol). C'est un paramètre très dynamique dans l'espace et dans le temps, si bien que son estimation à grande échelle présente un grand défi. Les méthodes traditionnelles de mesures *in-situ* de l'humidité du sol (par des sondes (Figure 1.2 a) ou par la méthode gravimétrique (Figure 1.2 b)) sont des méthodes rigoureuses. Toutefois, elles coûtent très chères, elles sont fastidieuses à mettre en œuvre et sont limitées à l'échelle spatiale et temporelle, puisque ce sont des mesures ponctuelles. D'où le recours à la télédétection, qui offre une vision synoptique et une répétitivité temporelle de plus en plus intéressante.



a)



b)

Figure 1.2: a) Mesure d'humidité du sol par sondes, b) mesure gravimétrique de l'humidité du sol

Le principe de mesure par télédétection consiste à réaliser des relations entre les signaux mesurés et l'humidité du sol. Ces signaux captés peuvent être l'énergie émise, réfléchi, ou rétrodiffusé de la surface observée, dans une longueur d'onde donnée du spectre électromagnétique. En analysant ces données, on peut extraire une estimation de l'humidité du sol d'une façon plus rapide, avec un moindre coût et surtout avec une meilleure couverture spatiale et temporelle que les méthodes traditionnelles. Dans cette optique, plusieurs méthodes de télédétection ont été examinées pour l'estimation de l'humidité du sol:

- **Le domaine optique :**

Dans ce domaine, le suivi de l'humidité du sol est basé sur le fait que les sols deviennent foncés lorsqu'ils sont humides. En effet, la réflectance diminue quand l'humidité du sol augmente (Ishida *et al.*, 1991). Certains chercheurs ont développé des

modèles physiques basés sur les données optiques pour estimer l'humidité du sol (Liu *et al.*, 2002; Lobell et Asner, 2002). Malgré le potentiel des données optiques pour le suivi de l'humidité du sol, ces approches restent limitées à cause de la faible pénétration de la couverture végétale par les ondes optiques, du bruit introduit par les effets atmosphériques, la présence de nuages, etc.

- **Le domaine thermique :**

Le principe d'estimation de l'humidité du sol est basé sur l'utilisation de l'inertie thermique (qui décrit la résistance d'un sol aux variations de la température) et des mesures de la température de la surface. En effet, lorsque l'humidité du sol est élevée, le sol présente une plus grande inertie thermique. Le problème de cette approche provient du fait que : 1) elle est applicable seulement sur des régions à faible ou sans couverture végétale (Xue et Ni., 2006; Carlson *et al.*, 2004); 2) elle est limitée par l'opacité des nuages et les effets atmosphériques (Carlson *et al.*, 2004).

- **Le domaine micro-onde :**

Dans le domaine des micro-ondes, c'est la constante diélectrique du sol qui est directement liée à l'humidité du sol. De ce fait, l'humidité du sol peut-être estimée à partir de mesures micro-onde passive et active, acquises avec un radiomètre micro-onde ou un radar, respectivement. L'avantage de ces systèmes de mesures est qu'ils sont capables d'opérer dans différentes conditions météorologiques et de pénétrer les nuages et la pluie (Bonn et Rochon, 1992). Les capteurs micro-ondes passifs présentent une résolution temporelle pertinente (~ 3 jours pour SMOS) pour le suivi temporel de l'état hydrique du sol. Toutefois, ces systèmes sont limités par une résolution spatiale grossière

(~ 40 km pour SMOS et SMAP), qui ne convient pas aux applications pratiques à l'échelle locale.

Les capteurs micro-ondes actifs ont une résolution temporelle faible (~ 24 jours pour RADARSAT-2). Cette résolution temporelle est compensée par une résolution spatiale très fine, pouvant atteindre 3 m avec les capteurs Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO), comme RADARSAT-2. Avec l'apparition des radars entièrement polarimétriques, le signal radar mesure l'amplitude du signal dans les quatre polarisations (HH-HV-VH-VV) tout en fournissant l'information sur la phase (Lee et Pottier, 2009). Parmi ces radars, on trouve TerraSAR-X (bande X), RADARSAT-2 (bande C) et ALOS-PALSAR (bande L). L'analyse polarimétrique permet de réduire les facteurs de confusion et de mieux suivre l'humidité du sol par le moyen d'une décomposition polarimétrique (Dissanska *et al.*, 2010; Bourgeau-Chavez *et al.*, 2013a-b). En effet, cette dernière divise le signal rétrodiffusé par la cible en mécanismes de diffusion indépendants; et ceux qui sont réduits des effets de la végétation et de la rugosité de surface permettent un suivi de l'humidité du sol (Bourgeau-Chavez *et al.*, 2013a). Ces méthodes de décomposition ont été récemment utilisées pour l'estimation de l'humidité du sol dans des zones agricoles (Hajnsek *et al.*, 2009; Jagdhuber *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2016). Leurs applications dans les zones forestières sont encore limitées (Bourgeau-Chavez *et al.*, 2013a-b). Dans la littérature, les recherches qui ont profité de la disponibilité des données polarimétriques et des méthodes de décomposition ont essentiellement mis l'accent sur la cartographie des milieux humides, des cultures, de la couverture du sol, du volume des tiges, etc. (Touzi *et al.*, 2007; McNairn *et al.*, 2009; Qi *et al.*, 2012; Hong *et al.*, 2012).

1.2 Problématique

Plusieurs désastres naturels se rapportent à la quantité de l'eau dans le sol. En particulier, en zone de forêt (30% de la surface terrestre), une augmentation extrême de l'humidité du sol peut produire la paludification (Lavoie *et al.*, 2005; Nappi, 2013). Alors qu'une baisse extrême de l'humidité du sol entraîne l'augmentation du risque d'incendie de forêt (Bourgeau-Chavez *et al.*, 2007). La connaissance de l'humidité du sol est donc très importante pour la protection des forêts et de l'environnement. Les méthodes de mesure *in-situ* de l'humidité du sol sont les plus précises, toutefois elles coûtent très chères et elles sont aussi limitées dans l'espace et dans le temps. La nécessité de comprendre les variations de l'humidité du sol à l'échelle globale a motivé le lancement des satellites de télédétection opérant en bande L (Wagner *et al.*, 2007) : 1) *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS) de l'agence spatiale européenne, le 2 novembre 2009 et 2) *Soil Moisture Active and Passive mission* (SMAP) de *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) le 31 janvier 2015.

L'avantage de la télédétection micro-onde est qu'elle permet d'acquérir des données en tout temps, indépendamment des conditions atmosphériques (Bonn et Rochon, 1992). Ainsi, l'information sur l'humidité du sol est connue sur une large zone et avec une certaine répétitivité temporelle (de 24 jours pour RADARSAT-2). Grâce à la technologie de traitement du signal et aux données à résolution spatiale fine, les capteurs radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont couramment utilisés (Anderson et Croft, 2009). Cependant, l'onde rétrodiffusée vers le capteur (RSO) est une fonction des caractéristiques géométriques et des propriétés diélectriques de la cible (la rugosité de surface, le couvert végétal, la constante diélectrique) ainsi que des caractéristiques du

capteur (angle d'incidence, polarisation, et fréquence). L'intervention de tous ces paramètres rend l'estimation de l'humidité du sol difficile à partir de l'onde rétrodiffusée (Le Toan *et al.*, 1992; Ferrazoli et Guerriero, 1995; Pulliainen *et al.*, 1996). La plupart des études radar associées à la détection de l'humidité du sol ont été axées sur des surfaces nues, agricoles ou à végétation clairsemée, où l'effet de la couche de végétation est pratiquement ignoré ou contrôlé. Pour les surfaces à végétation dense telles que les forêts, le problème devient plus difficile parce que le couvert végétal dense: 1) réduit fortement la sensibilité du signal radar à l'humidité du sol à cause de la diffusion de la biomasse et de son atténuation exercée sur la contribution du sol (Lang *et al.*, 1993; Pulliainen *et al.*, 1996; Pulliainen *et al.*, 2004; Lucas *et al.*, 2012; Bourgeau-Chavez *et al.*, 2013a et b) et 2) possède un environnement de diffusion complexe (Wagner *et al.*, 2007). En raison du grand nombre d'inconnues dans les algorithmes d'estimation, peu d'études dans la littérature portent sur l'estimation de l'humidité du sol sous un couvert forestier.

La plupart des travaux qui ont utilisé la bande C ont été axés essentiellement sur l'estimation de la biomasse (Moghaddam et Saatchi, 1999; Santos *et al.*, 2002; Tsolmon *et al.*, 2002; Rauste, 2005; Mitchard *et al.*, 2009) et quelques un ont essayé d'estimer l'humidité du sol dans les régions boréales (Pulliainen *et al.*, 1996; Pulliainen *et al.*, 2004; Abbott *et al.*, 2007). Mais, ces derniers ont été limités par l'utilisation des RSO à simple polarisation ERS-1 et 2, RADARSAT-1. Les résultats obtenus étaient spécifiques aux sites étudiés, particulièrement en raison de la complexité des interactions qui dépendent à la fois de la structure physique de la végétation et de son contenu en eau. L'effet du couvert végétal est moins important en utilisant la bande L grâce à son

importante profondeur de pénétration qui permet de mieux informer sur l'humidité du sol (Wang *et al.*, 1998; Picard, 2002; Tabatabaenejad *et al.*, 2012).

Avec la disponibilité des données radars entièrement polarimétriques, la cible étudiée est mieux caractérisée et sa réponse polarimétrique peut être calculée pour chaque polarisation incidente (Lee et Pottier, 2009). Ainsi, le RSO polarimétrique permet de fournir des informations supplémentaires sur la variation structurelle de la végétation et de la rugosité de surface, ainsi que sur les effets de ces paramètres sur la diffusion. Plusieurs chercheurs ont utilisé des données polarimétriques afin de classifier les cibles à partir de discriminateurs polarimétriques (McNairn et Brisco, 2004; Touzi *et al.*, 1992) ou des paramètres de décomposition polarimétrique (Cloude et Pottier, 1997; Freeman et Durden, 1998; Touzi *et al.*, 2007; van Zyl *et al.*, 2011). Il y a actuellement un grand défi dans l'utilisation des paramètres polarimétriques afin d'estimer l'humidité du sol. Des études sur l'estimation de l'humidité du sol basées sur l'utilisation des paramètres polarimétriques ont été conduites principalement dans des zones agricoles (Arii, 2008; Hajnsek *et al.* 2003 et 2009; Jagdhuber *et al.*, 2013), avec plus ou moins de défis selon le type de culture et la phénologie (Wang *et al.*, 2016). Toutefois, Bourgeau-Chavez *et al.*, 2013a-b ont étudié les paramètres polarimétriques dans les couverts forestiers brûlés et clairsemés. Ils ont montré le potentiel des paramètres polarimétriques pour le suivi de l'humidité du sol. Cependant, leurs études étaient consacrées à la bande C seulement.

Pour notre part, nous proposons d'étudier le potentiel de la polarimétrie radar en bande L comparativement à celle en bande C dans le suivi de l'humidité du sol sur divers couverts forestiers.

1.3 Objectifs

1.3.1 Objectif général

L'objectif principal de ce projet est de contribuer au suivi de l'humidité du sol de sites forestiers, à partir de données radar entièrement polarimétriques en bandes L et C.

1.3.2 Objectifs spécifiques

1) Étudier la sensibilité des paramètres polarimétriques à l'humidité du sol, pour chaque bande:

- Déterminer la valeur ajoutée de l'information polarimétrique par rapport aux signaux conventionnels multipolarisés d'amplitude, pour le suivi de l'humidité du sol.
- Déterminer l'apport de la bande L par rapport à la bande C, pour le suivi de l'humidité du sol sur les sites forestiers de la campagne Soil Moisture Active Passive Validation Experiment 2012 (SMAPVEX12).

2) Déterminer le paramètre (ou l'ensemble des paramètres) polarimétrique optimal pour le suivi de l'humidité du sol sur les sites forestiers étudiés.

1.4 Hypothèses

Les hypothèses du présent travail sont les suivantes:

- 1) Les données entièrement polarimétriques permettraient de mieux suivre l'humidité du sol (Dissanska *et al.*, 2010; Bourgeau-Chavez *et al.*, 2013a-b).
- 2) Le signal en bande L pourrait être plus sensible à l'humidité du sol que celui en bande C grâce à son importante profondeur de pénétration dans la canopée de la forêt (Wang *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 1998).

1.5 Structure du mémoire

Ce mémoire est rédigé sous forme d'un mémoire par article, organisé comme suit: Le cadre théorique (ou autrement les notions théoriques utilisées dans ce mémoire) est présenté au chapitre 2. Il s'agit d'expliquer les paramètres polarimétriques utilisés pour le suivi de l'humidité du sol. Le matériel et la méthodologie sont illustrés dans le chapitre 3. Ce chapitre présente (1) les sites d'étude, (2) les données utilisées (terrain et radar) et (3) la démarche scientifique suivie afin de réaliser les objectifs du mémoire. Le chapitre 4 présente le manuscrit de l'article scientifique qui sera soumis dans une revue à comité de lecture. Le mémoire s'achève par une conclusion et des perspectives.

Chapitre 2

État des connaissances et cadre théorique

En zone de forêt, et dépendamment des caractéristiques du capteur, l'humidité du sol influence le signal radar (Pulliainen *et al.*, 1996) à travers la contribution du sol et le terme d'interaction sol-végétation tel qu'il est présenté à la Figure 2.1. La contribution de la végétation est influencée par son contenu en eau et son architecture (Moghaddam et Saatchi, 1999; Kim *et al.*, 2014).

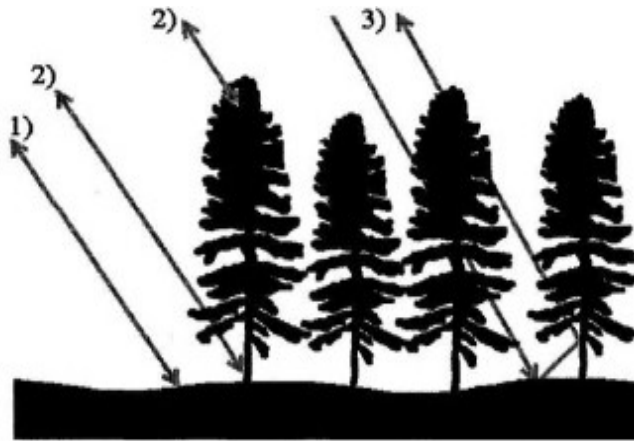


Figure 2.1: Les mécanismes de diffusion (diffusion de surface (1), diffusion de volume (2), interaction surface-volume (3) sur une zone forestière

2.1 Sensibilité du coefficient de rétrodiffusion aux paramètres de surface

Selon la polarisation, la fréquence et l'angle d'incidence de mesure, le coefficient de rétrodiffusion a une sensibilité différente aux propriétés et aux caractéristiques de la cible. En effet, en zone forestière, il a été montré qu'en bande L, le coefficient de rétrodiffusion est plus sensible à l'humidité du sol en polarisation HH (Moghaddam et al., 2000), tandis qu'en bande C, le coefficient de rétrodiffusion en polarisation HV augmente avec la densité du couvert végétal. Ce dernier vient principalement de la diffusion de la couronne des arbres (Wang *et al.*, 1994). En bande, en polarisations HH et HV, Wang *et al.* (1995; 1998) ont montré que le coefficient de rétrodiffusion d'une forêt de pins est plus sensible à la rugosité de la surface qu'en polarisation VV.

En bandes C, L et P, Dobson *et al.* (1992) ont étudié la sensibilité des coefficients de rétrodiffusion en polarisation HH, VV et HV à la biomasse forestière pour des angles d'incidence entre 40° et 50°. En particulier, ils ont étudié la dépendance de la rétrodiffusion AIRSAR aéroportée à la biomasse de forêts de conifères des Landes en France et de Duke en Caroline du Nord (États-Unis). Ils ont trouvé que la rétrodiffusion radar augmente linéairement avec l'augmentation de la biomasse. Le niveau de saturation du signal radar dépend de sa fréquence et de la biomasse forestière. Il est entre 100 et 200 tonnes/ha pour la bande P, entre 60 et 100 tonnes/ha pour la bande L et entre 10 et 20 tonnes/ha pour la bande C. En utilisant les données ERS-1 et JERS-1, Harrell *et al.* (1995) ont étudié la sensibilité du coefficient de rétrodiffusion en bande C (polarisation VV, 23°) et en bande L (polarisation HH, 35°) à la biomasse des forêts boréales de l'Alaska. Ils ont montré qu'en bande C, la végétation n'a pas un grand effet sur la rétrodiffusion radar lorsque la biomasse est inférieure à 10 kg/m². Toutefois, en bande L,

le coefficient de rétrodiffusion est sensible à la biomasse qui est inférieure à 6 kg/m^2 . Ils ont aussi montré que la sensibilité du coefficient de rétrodiffusion à la biomasse est influencée par l'humidité du sol. En effet, la corrélation de la biomasse avec la rétrodiffusion radar est plus forte vers la fin de l'hiver (neige) et vers la fin de l'été (surface sèche). Bourgeau-Chavez *et al.* (2013b) ont étudié la sensibilité des données RADARSAT-2 à l'humidité du sol dans les forêts boréales (brûlées, dominées par les arbustes, clairsemées et moyennement dense) de l'Alaska avec un angle d'incidence variant entre 19° et 21° . Ils ont trouvé une modeste corrélation (entre 0,6 et 0,7) entre le signal en polarisation HH, VV et HV et l'humidité du sol. Bourgeau-Chavez. (2013a) ont montré que la sensibilité du signal en bande C en polarisation VV à l'humidité du sol est semblable à celle en polarisation HH. Ils ont aussi montré que le signal en polarisation HH permet de mieux distinguer l'état de sol (sec ou humide).

2.2 Modélisation du coefficient de rétrodiffusion pour le suivi de l'humidité du sol

D'après les lois de Maxwell, les caractéristiques de propagation des ondes électromagnétiques dépendent des propriétés diélectriques du milieu. Et puisque l'eau a une constante diélectrique très élevée par rapport à celle des surfaces sèches, la rétrodiffusion d'un couvert végétal change en fonction du contenu en eau du sol et de la végétation (Engman et Chauhan, 1995). Le signal rétrodiffusé est la somme des trois composantes telles que décrites sur la Figure 2.1: La rétrodiffusion de la surface du sol, la rétrodiffusion du volume de la végétation et la rétrodiffusion résultant de l'interaction entre la végétation et le sol (Ulaby *et al.*, 1996). Des modèles théoriques et semi-

empiriques ont été développés pour relier le signal RSO à l'humidité du sol tout en connaissant la rugosité de surface du sol et la biomasse du couvert forestier à l'étude (Wang *et al.*, 1994; Pulliainen *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 1998; Pulliainen *et al.*, 1998; Moghaddam *et al.*, 2000). Les modèles semi-empiriques sont moins sensibles à la spécificité des sites, mais ils sont plus adéquats pour les surfaces du sol nu que pour les surfaces couvertes de végétation. Pulliainen *et al.* (1996, 2004) ont étudié la variation de l'humidité du sol dans une forêt boréale de Finlande en appliquant un modèle semi-empirique et en utilisant une séquence temporelle de données ERS-1 et ERS-2 (bande C, VV, 23°). Ils ont montré que l'utilisation de la bande C avec une seule polarisation nécessite la disponibilité d'informations complémentaires du sol et du site forestier. À partir d'un modèle de rétrodiffusion, Wang *et al.* (1998) ont étudié la sensibilité de la rétrodiffusion radar en bandes C et L aux paramètres de surface de trois sites forestiers, de biomasses différentes, de l'Université de Duke, en Caroline du Nord (États-Unis). Les paramètres de leur modèle sont l'épaisseur et le contenu en eau de la litière, la rugosité (la hauteur rms et la longueur de corrélation) et l'humidité du sol. Ils ont conclu qu'en bande L et en polarisation HH, la rétrodiffusion est plus sensible à la hauteur rms, à l'humidité et à l'épaisseur de la litière qu'à l'humidité du sol. Le signal rétrodiffusé est sensible à l'humidité du sol à des angles d'incidence entre 20° et 40°. La polarisation HV est légèrement sensible à l'humidité du sol seulement pour le cas de forêt à faible biomasse et avec des angles d'incidence entre 20° et 30°. En bande C et en polarisations HH et VV, le signal rétrodiffusé n'est sensible à l'humidité du sol que si l'angle d'incidence est entre 20° et 30° et que la forêt est de faible biomasse. Contrairement à la

bande L, ils ont aussi montré que la polarisation HV est insensible à l'humidité du sol dans tous les cas.

2.3 Utilisation des paramètres polarimétriques pour le suivi de l'humidité du sol

La polarisation est associée au mouvement du vecteur champ électrique oscillant au cours de la propagation d'une onde électromagnétique. La projection de ce mouvement dans le plan perpendiculaire au vecteur de propagation de l'onde est généralement décrite par une ellipse. Cette ellipse de polarisation est illustrée à la Figure 2.2 (a). Les caractéristiques de l'ellipse, décrite par son orientation (ψ) et son ellipticité (χ), informe sur le type de polarisation. En polarimétrie, la polarisation est dite linéaire ($\chi = 0^\circ$), avec les composantes horizontale ($\psi = 40^\circ$) et verticale ($\psi = 90^\circ$) (Figure 2.2 (b)). La polarisation est dite circulaire ($\psi = 45^\circ$), avec les composantes gauche L ($\chi = 45$) et droite R ($\chi = -45$) (Figure 2.2 (c)).

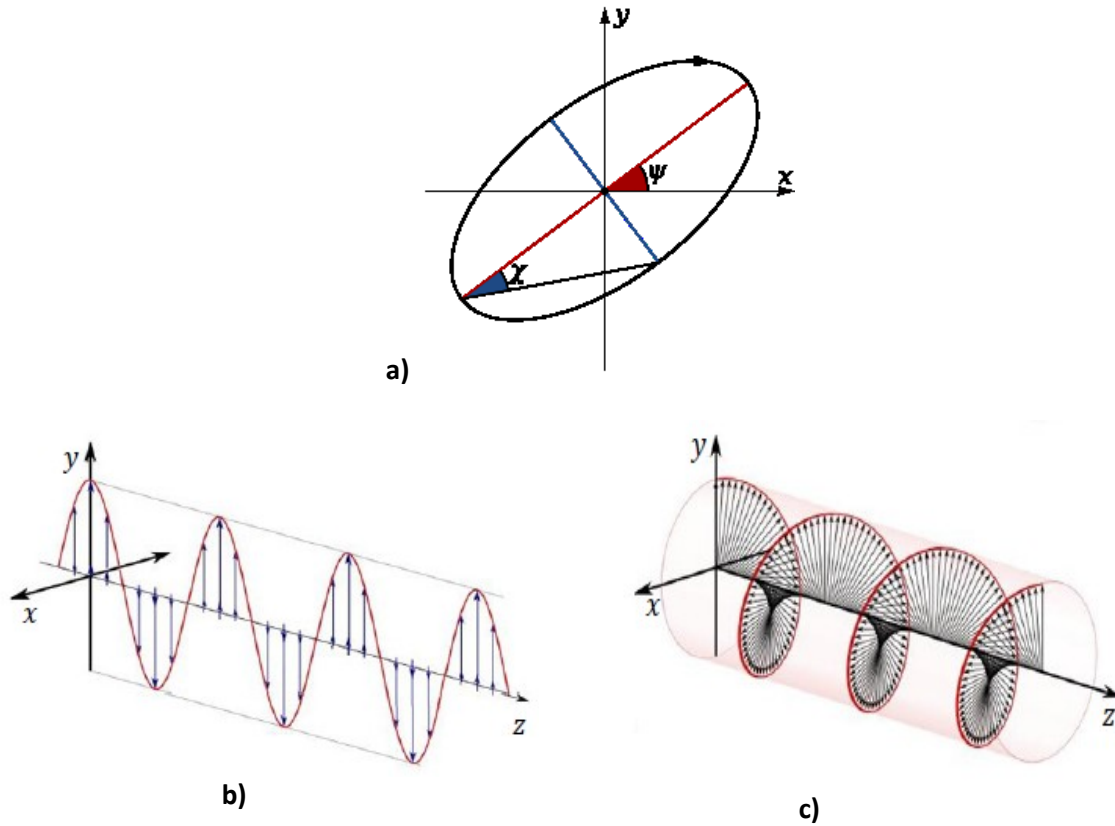


Figure 2.2: a) Ellipse de polarisation décrite par son orientation (ψ) et son ellipticité (χ), b) Polarisation linéaire (cas de polarisation verticale) et c) Polarisation circulaire (cas de polarisation droite-droite)

Avec un capteur RSO polarimétrique, l'espace d'observation est élargi, l'amplitude et la phase des signaux rétrodiffusés sont mesurées dans les quatre combinaisons linéaires de polarisations (HH, HV, VH et VV). Ces signaux forment la matrice complexe de Sinclair $[S]$ (équation 2.1) qui contient toute l'information provenant de la cible.

$$[S] = \begin{bmatrix} \langle S_{HH} \rangle & \langle S_{HV} \rangle \\ \langle S_{VH} \rangle & \langle S_{VV} \rangle \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

La représentation mathématique $\langle \rangle$ indique l'utilisation de la moyenne du signal retourné par les différents diffuseurs ponctuels dans le même pixel.

2.3.1 Coefficients de corrélation

Le coefficient de corrélation entre deux canaux de polarisations est un nombre complexe. L'amplitude du coefficient de corrélation entre les deux canaux HH et VV (ρ_{HHVV}) indique à quel point les canaux de polarisations sont corrélés. Sa phase (ϕ_{HHVV}) mesure la différence de phase entre les deux canaux. En zone de forêt, Bourgeau-Chavez *et al.* (2013b) ont montré que ϕ_{HHVV} n'est pas sensible à l'humidité. Le Toan *et al.* (1992) ont montré que ces deux paramètres (l'amplitude et la phase) peuvent être utilisés pour améliorer l'estimation de la biomasse d'une zone forestière. Skriver *et al.* (1999) ont conclu que les comportements de ρ_{HHVV} et de ϕ_{HHVV} peuvent être utilisés pour identifier la nature du diffuseur et surtout pour différencier et classer les cultures des surfaces observées. En effet, la diffusion de surface est caractérisée par une grande amplitude ρ_{HHVV} et un faible déphasage ϕ_{HHVV} contrairement à la diffusion de volume. Skriver *et al.* (1999) ont également conclu que le coefficient de corrélation orthopolarisé (relatif aux deux canaux de polarisations HV et HH ou VV) ne contient pas beaucoup d'informations sur les types des diffuseurs. Pour cette raison, ils ne sont pas souvent étudiés. La Figure 2.3 montre des exemples de ρ_{HHVV} (a) et ϕ_{HHVV} (b) des sites forestiers F1, F2, F3 et F5 (encadrés noirs) de la campagne SMAPVEX12, extraits des données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) pour le 17/06/2012. Pour le site F1 (de faible biomasse), la valeur de ρ_{HHVV} est plus importante que celles des sites F2, F3 et F5

(ayant une biomasse plus importante) alors que la valeur de ϕ_{HHVV} est la plus faible. En accord avec Skriver *et al.*, 1999, ce résultat signifie que la diffusion de surface est plus importante dans le site F1 que les autres sites forestiers.

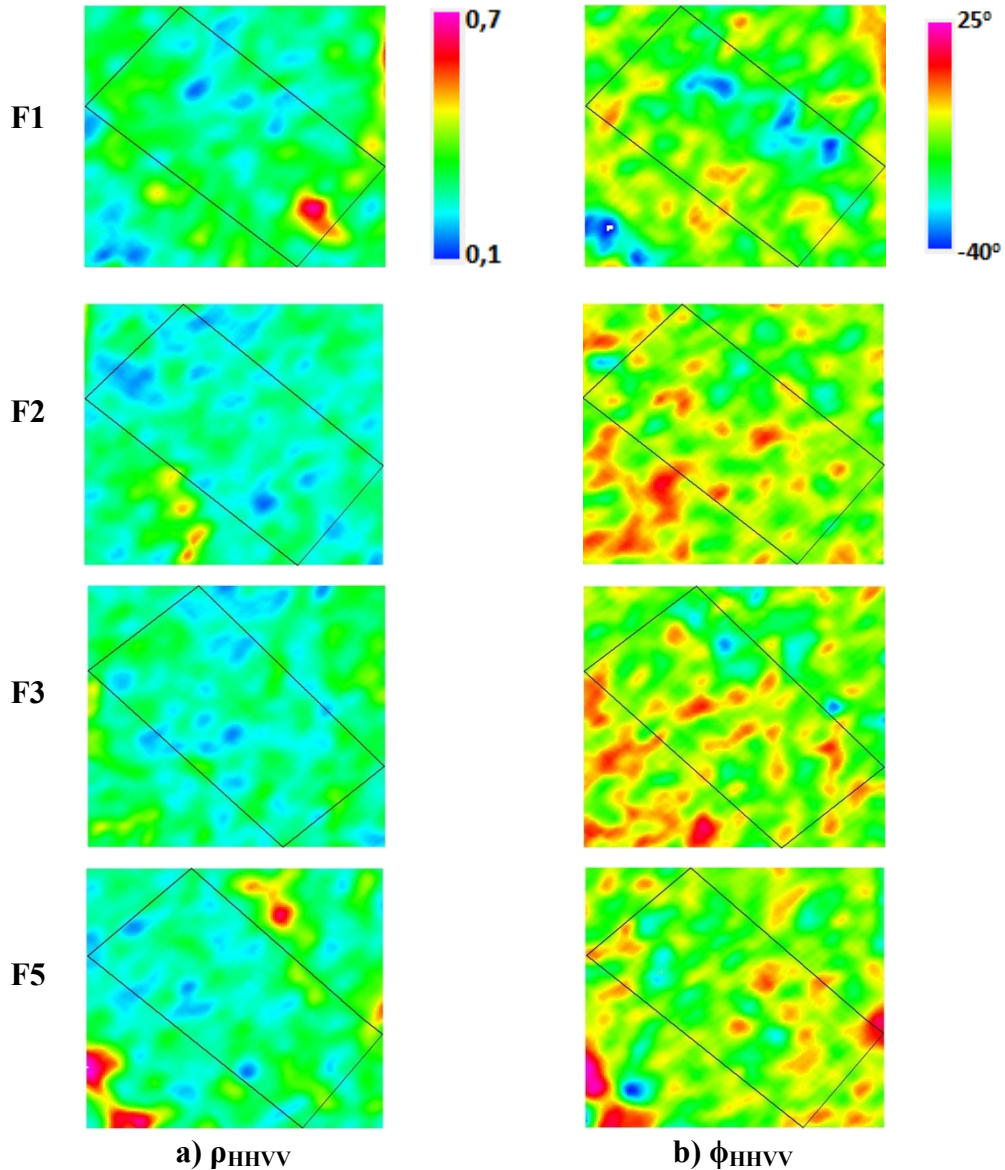


Figure 2.3: ρ_{HHVV} (a) et ϕ_{HHVV} (b) des sites forestiers F1, F2, F3 et 5 (encadrés noirs) du SMAPVEX12, extraits des données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) pour le 17/06/2012

2.3.2 Hauteur de socle

La hauteur de socle représente la quantité non polarisée du signal. Plus la hauteur de socle est faible, plus le signal est polarisé (et réciproquement, plus elle est élevée, plus le signal est dépolarisé par les diffusions de volume). En effet, la quantité dépolarisée du signal est égale aux rapports des valeurs propres minimales et maximales (Durden *et al.*, 1990). La hauteur du socle a été utilisée pour évaluer l'humidité du sol et la rugosité de la surface sur sol nu (Sokol *et al.*, 2004). Sur sols nus, ces auteurs ont trouvé une bonne corrélation ($r = 0.82$) entre la hauteur du socle et l'humidité du sol. En zone forestière, Bourgeau-Chavez *et al.* (2013b) ont trouvé une corrélation un peu plus faible ($r = 0.6$) entre la hauteur du socle et l'humidité du sol. La Figure 2.4 montre des exemples d'images de la hauteur de socle des sites forestiers F1, F2, F3 et F5 (encadrés noirs) de SMAPVEX12, extraites des données UAVSAR (bande L), à 30° (ligne de vol winnip_31603) pour le 17/06/2012. Ces figures montrent que le site F1 (de faible biomasse) présente les valeurs les plus faibles de la hauteur de socle par rapport aux sites F2, F3 et F5 (ayant une biomasse plus importante). En particulier, le site F2 (dense) présente la hauteur de socle la plus élevée. Ce qui signifie que le signal est plus dépolarisé sur le site F2.

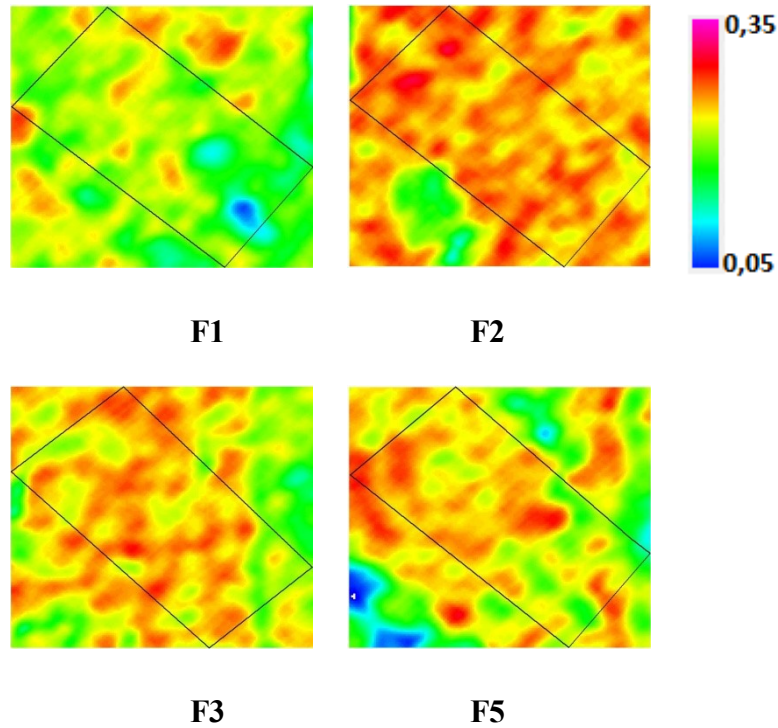


Figure 2.4: Hauteur de socle des sites forestiers F1, F2, F3 et F5 (encadrés noirs) de SMAPVEX12, extraites des données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) pour le 17/06/2012

2.4 Décomposition polarimétrique

La décomposition polarimétrique est une technique établie pour diviser le signal rétrodiffusé de la cible en mécanismes de diffusion indépendants. Cela permet de discriminer les effets de la végétation et de la rugosité de surface pour mieux suivre l'humidité du sol par le signal RSO (Touzi *et al.*, 2007). Plusieurs décompositions ont été formulées. Les plus couramment utilisées sont celles de Freeman-Durden et de Cloude-Pottier développées respectivement à partir des matrices de covariance [C] (équation 2.2) et de cohérence [T] (équation 2.3).

Ces matrices satisfont l'hypothèse de réciprocité ($S_{HV} = S_{VH}$) selon laquelle le signal en polarisation HV est égal à celui en polarisation VH (Durden *et al.*, 1990). Avec l'hypothèse de réciprocité, ces matrices sont symétriques et la somme des éléments diagonaux est égale à la puissance totale rétrodiffusée (SPAN). Cependant, les décompositions polarimétriques ont été essentiellement utilisées pour la classification des cibles urbaines, forestières, agricoles, eau, etc. (Fang et Wen 2005; Fang *et al.*, 2006; Wen *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2011). Elles sont utilisées dans quelques études pour estimer l'humidité du sol (Hajnsek *et al.*, 2009; Jagdhuber *et al.*, 2013, Bourgeau-Chavez *et al.*, 2013b; Wang *et al.*, 2016).

$$[C] = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2 \rangle & \langle \sqrt{2} S_{HH} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle \\ \langle \sqrt{2} S_{HV} S_{HH}^* \rangle & \langle 2 |S_{HV}|^2 \rangle & \langle \sqrt{2} S_{HV} S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV} S_{HH}^* \rangle & \langle \sqrt{2} S_{VV} S_{HV}^* \rangle & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle & \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & \langle 2(S_{HH} + S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ \langle (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & \langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle & \langle 2(S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ \langle 2S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & \langle 2S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & \langle 4|S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

* indique l'utilisation du complexe conjugué et $\langle \rangle$ la moyenne.

2.4.1 Décomposition de Freeman-Durden

La décomposition polarimétrique de Freeman-Durden divise la puissance totale rétrodiffusée en trois contributions (Figure 2.1) : une diffusion de surface par le sol, une diffusion de volume par la canopée, et une diffusion double bond qui représente des réflexions multiples à l'interface sol-végétation (Freeman et Durden, 1998). Elle n'est valide que si la symétrie de réflexion est respectée et si la surface de la cible est légèrement rugueuse. La puissance totale rétrodiffusée (SPAN) est égale à la somme des puissances de diffusion de surface (P_s), de volume (P_v) et de double bond (P_d). Chaque puissance de diffusion est générée par un modèle à partir de la matrice de covariance d'une cible. Ainsi, le modèle de diffusion de Bragg au premier ordre est utilisé afin de modéliser la diffusion de surface pour le cas de sols légèrement rugueux. La diffusion double bond est modélisée en utilisant la diffusion par un réflecteur en coin, et la diffusion de volume est modélisée par un nuage de dipôles orientés aléatoirement.

À partir de données RADARSAT-2, Bourgeau-Chavez *et al.* (2013a) ont montré que P_s et P_d possèdent un grand potentiel pour le suivi de l'humidité du sol dans un couvert forestier. Dans les travaux de Goncalves *et al.* (2011), menés avec des images RSO en bande L et à des angles d'incidence de 63-70°, des corrélations de l'ordre de 0,6 sont obtenues entre le volume de tiges et les contributions du signal P_d et P_v . La Figure 2.5 montre les contributions de sol P_s (a), de double bond P_d (b) et de volume P_v (c) normalisées par rapport au SPAN, sur les sites forestiers F1, F2, F3 et F5 (encadrés noirs) de la campagne SMAPVEX12, extraites des données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) pour le 17/06/2012. Elle montre que 1) l'intensité de la diffusion de surface est légèrement importante au site F1 par rapport aux autres sites; 2)

l'intensité de la diffusion double bond est faible pour tous les sites; 3) l'intensité de la diffusion de volume est dominante dans tous les sites, mais beaucoup plus faible sur le site F1.

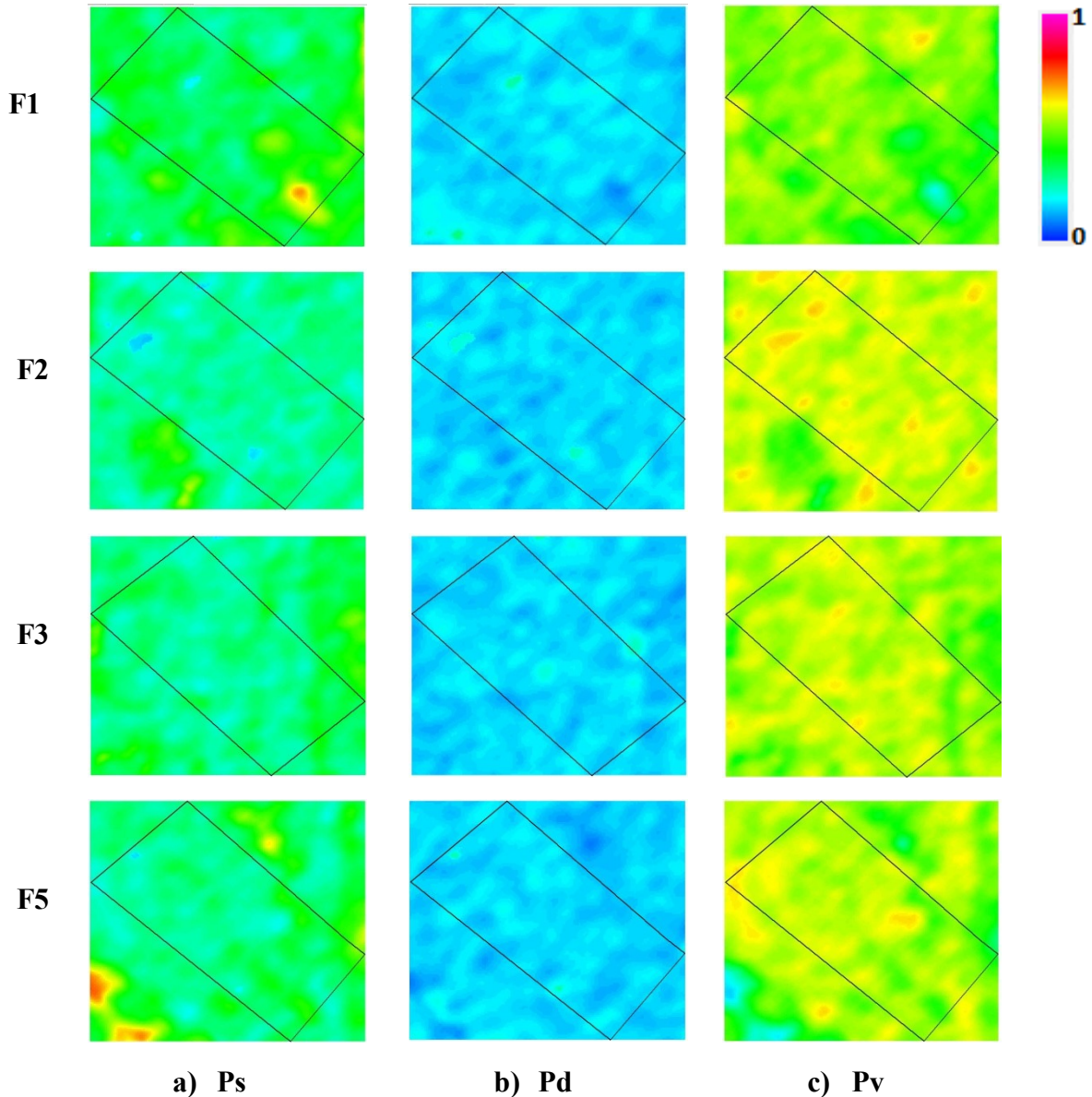


Figure 2.5: Puissances de diffusion de la décomposition Freeman-Durden pour les sites forestiers F1, F2, F3 et F5 (encadrés noirs) de SMAPVEX12 a) Ps, b) Pd et c) Pv, extraites des données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) pour le 17/06/2012. Les puissances sont normalisées par rapport au SPAN

2.4.2 Décomposition de Cloude-Pottier

La décomposition polarimétrique de Cloude-Pottier (Cloude et Pottier, 1997) est basée sur une décomposition en valeurs propres (λ_i) et en vecteurs (u_i) propres de la matrice de cohérence (T). Ainsi, trois paramètres pertinents (l'entropie (H), l'anisotropie (A) et l'angle (α)) sont calculés afin de distinguer les divers mécanismes de diffusion. La Figure 2.6 montre comment ces paramètres sont extraits des valeurs propres et des vecteurs propres de la matrice de cohérence (T).

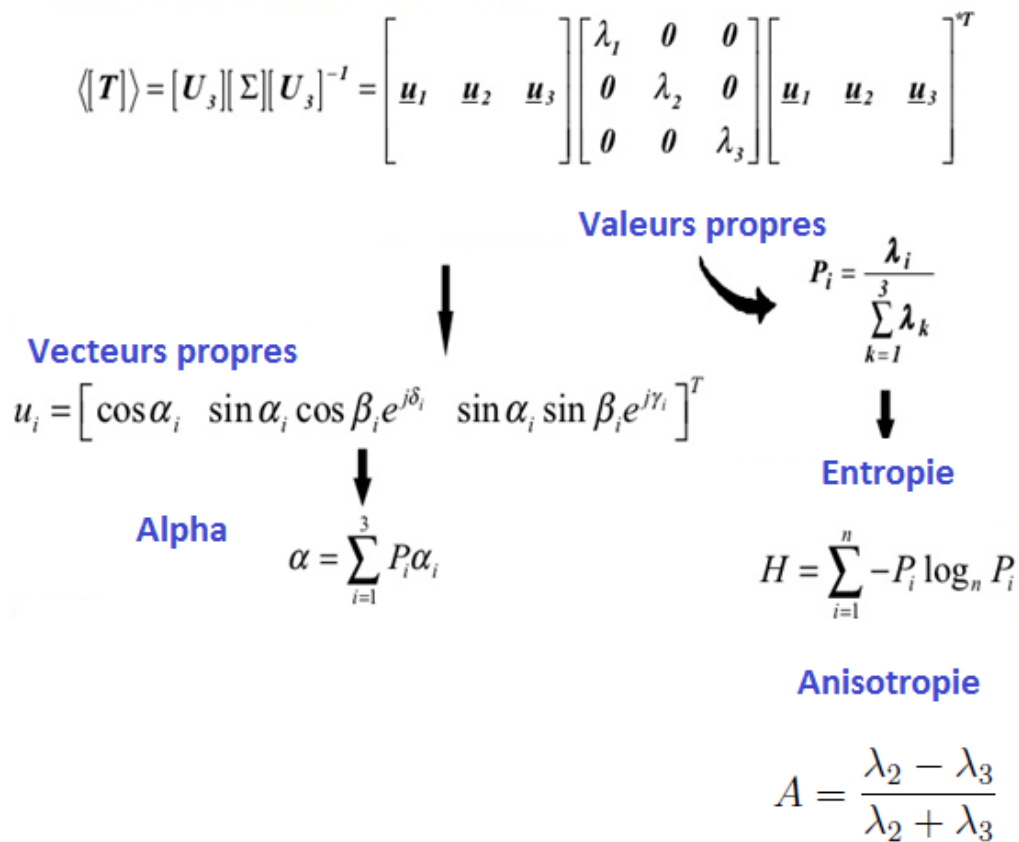


Figure 2.6: Décomposition de Cloude-Pottier basée sur une décomposition en valeurs propres et en vecteurs propres de la matrice de cohérence (T)

L'entropie (H) indique le caractère aléatoire de rétrodiffusion globale (la pureté du mécanisme de diffusion). Sa valeur varie entre 0 et 1. La valeur 0 signifie que la diffusion provient d'un seul mécanisme de diffusion (la surface ou le dièdre) alors que la valeur 1 signifie que le mécanisme de diffusion est complètement aléatoire et qu'aucune information polarimétrique ne peut être extraite. L'angle (α) varie entre 0° et 90° . Il évalue la nature du mécanisme diffusant (volume, surface, double réflexion). Si l'angle (α) est près de 0° , alors la diffusion de surface est dominante. Si l'angle est près de 45° , c'est la diffusion de volume qui domine, alors que la diffusion double bond est la dominante quand cet angle est près de 90° . L'anisotropie (A) varie entre 0 et 1. Elle exprime l'importance des mécanismes secondaires. Si l'entropie est importante alors l'anisotropie permet de distinguer les mécanismes de diffusion secondaires, tandis que si l'entropie est faible, l'anisotropie est affectée par le bruit et n'est pas utilisable (Lee et Pottier, 2009). La somme des valeurs propres de la matrice de cohérence T représente la puissance totale rétrodiffusée par la cible, le SPAN. La Figure 2.7 montre des exemples d'images de l'entropie H (a), l'anisotropie A (b) et d'angle α (c) sur les sites forestiers F1, F2, F3 et F5 (encadrés noirs) de la campagne SMAPVEX12, extraites des données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol , winnip_31603) pour le 17/06/2012. Pour tous les sites forestiers, 1) l'entropie est proche de 1 indiquant que le mécanisme de diffusion est aléatoire; 2) L'angle (α) est proche de 45° , ce qui reflète la dominance de la diffusion de volume.

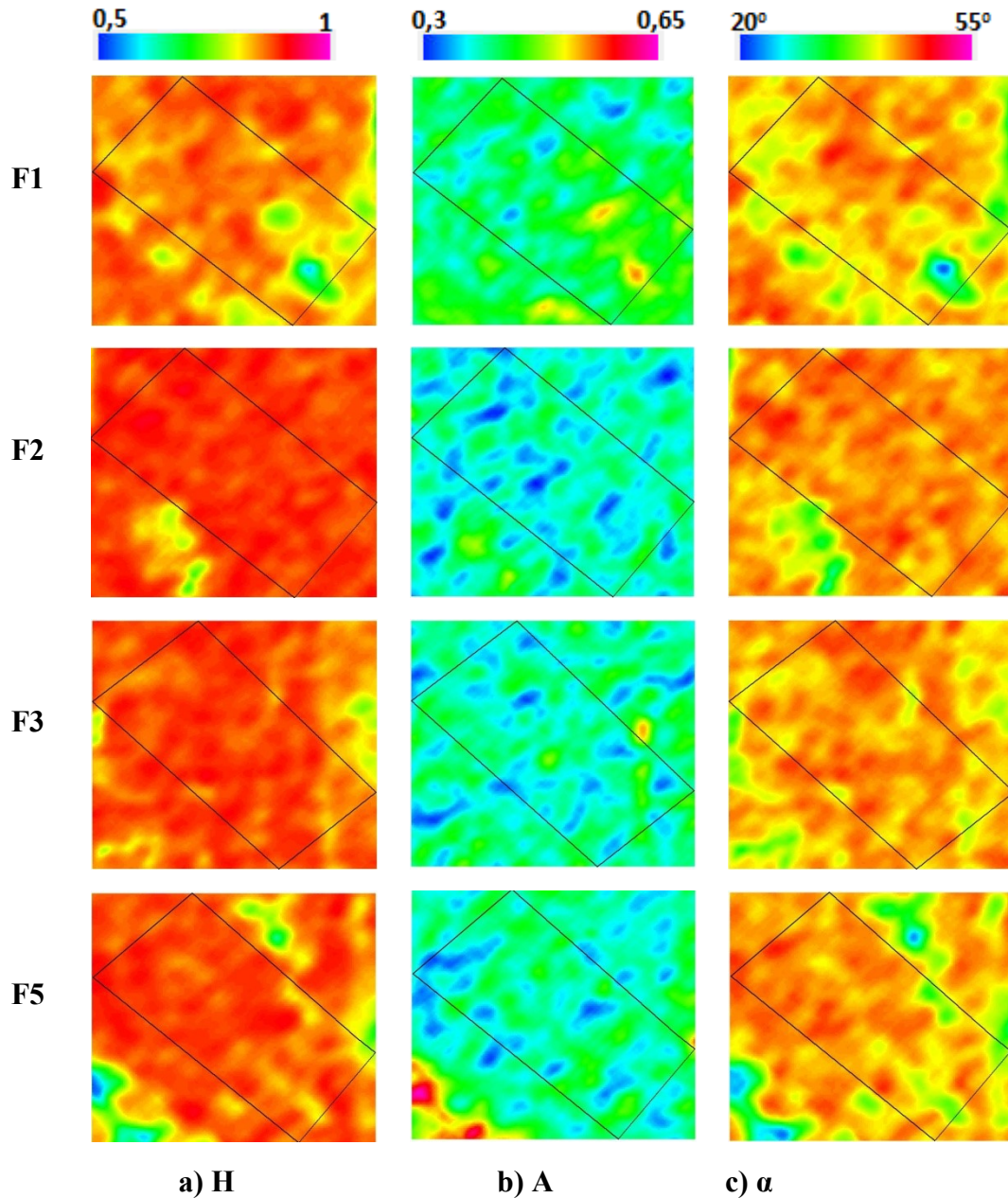


Figure 2.7 : Images de l'entropie H (a), l'anisotropie A (b) et l'angle α (c) pour les sites forestiers F1, F2, F3 et F5 (encadrés noirs) de SMAPVEX12, extraites des données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) pour le 17/06/2012

Cloude et Pottier, (1997) ont élaboré un plan H/α pour classifier les mécanismes de diffusion. Dans ce plan présenté à la Figure 2.8, les zones 1 et 4 correspondent à la diffusion de surface. Les zones 2, 5 et 7 correspondent à la diffusion de volume. Les trois

autres zones (3, 6 et 8) représentent la diffusion double bond. La zone en gris représente des valeurs physiquement impossibles (Lee et Pottier, 2009). Les paramètres polarimétriques H , A , et α ont été utilisés pour l'estimation de l'humidité du sol, beaucoup plus en zones agricoles (Hajnsek *et al.*, 2009; Jagdhuber *et al.*, 2013) qu'en zones forestières (Jagdhuber *et al.*, 2012). Sur un champ agricole nu, Dissanska *et al.* (2010) ont trouvé une corrélation supérieure à 0,70 entre H , α et l'humidité du sol alors qu'aucune dépendance n'est observée entre A et l'humidité et la rugosité du sol. Au contraire, dans des travaux plus récents, Baghdadi *et al.* (2012 et 2013) ont observé une faible corrélation entre H , A , α et les paramètres du sol (l'humidité et la rugosité du sol) dans les champs agricoles nus. McNeill et Pairman (2005) et Garestier *et al.* (2009) ont utilisé les paramètres polarimétriques, extraits de la décomposition de Cloude Pottier, pour étudier les caractéristiques d'un couvert forestier. Ils ont trouvé une corrélation entre les paramètres de décomposition et l'âge des peuplements forestiers ainsi que la hauteur des arbres. Dans les forêts boréales d'Alaska, Bourgeau Chavez *et al.* (2013a et 2013b) ont montré que les paramètres H , A et α ont une faible corrélation à l'humidité du sol. La Figure 2.9 illustre le plan H/α de Cloude-Pottier (1997) pour les sites F1 (a), F2 (b), F3 (c) et F5 (d) de la campagne SMAPVEX12, en utilisant les données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) du 17/06/2012. Elle montre que pour cette acquisition UAVSAR, certains points du site F1 appartiennent à la zone 4 du plan H/α , correspondant au processus de diffusion de surface; ce qui n'est pas le cas des autres sites. La Figure 2.10 montre une vue d'ensemble du plan H/α pour toutes les acquisitions UAVSAR à 30° (ligne de vol winnip_31603) de la campagne SMAPVEX12. Sur cette figure, chaque point représente un couple de valeurs moyennes de H et α , calculées sur

chaque site, pour une acquisition UAVSAR entre le 17 juin et le 17 juillet 2012. Tous les points appartiennent à la zone 5 du plan H/α , montrant ainsi que la diffusion de volume est dominante pour tous les sites. Les Figs 2.9 et 2.10 sont en conformité avec le résultat obtenu avec la décomposition de Freeman-Durden (Fig. 2.5).

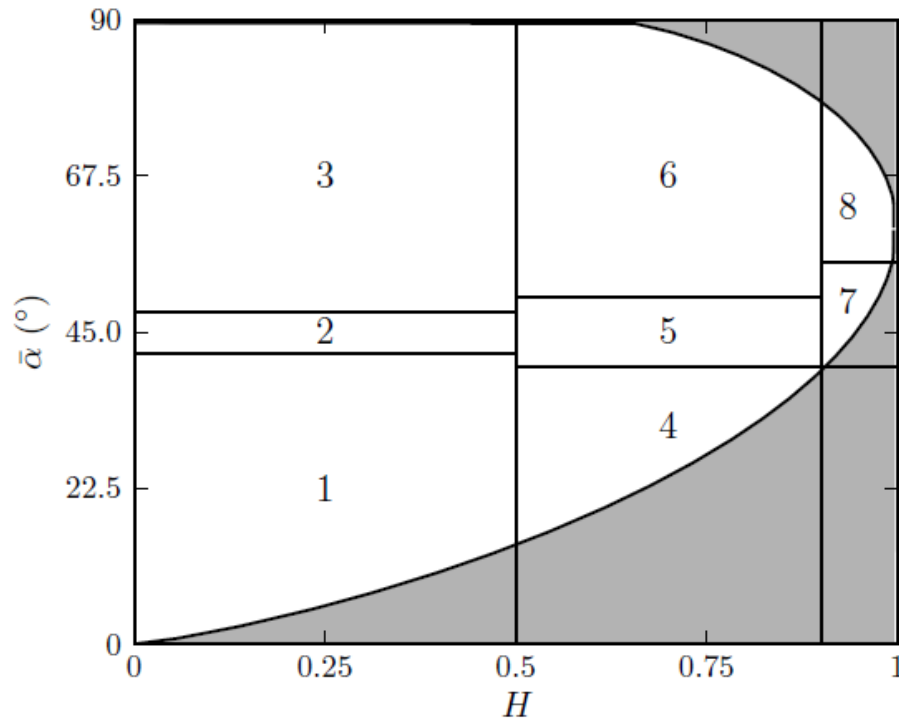


Figure 2.8 : Plan H/α de Cloude et Pottier (1997)

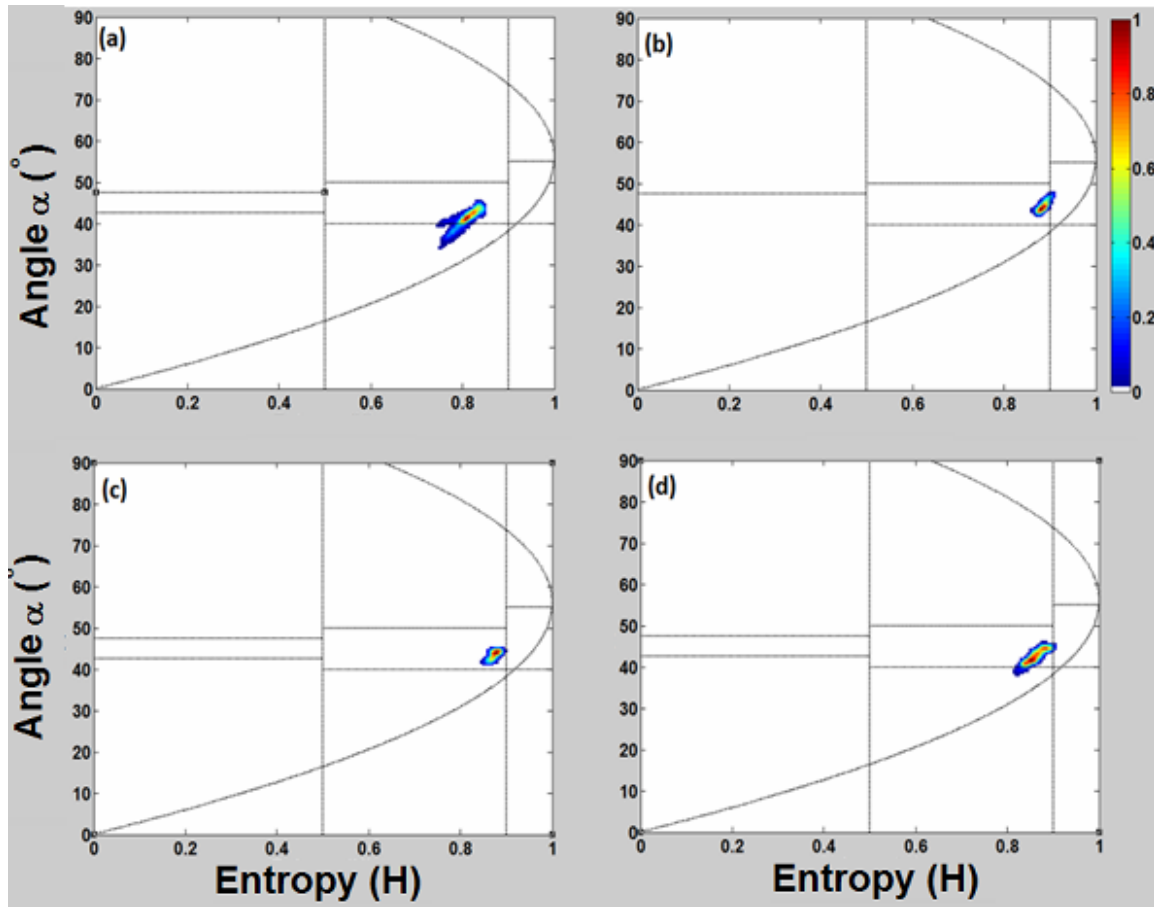


Figure 2.9 : Plan H/ α de Cloude-Pottier pour les sites (a) F1, (b) F2, (c) F3 et (d) F5 de la campagne SMAPVEX12, en utilisant les données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) du 17/06/2012

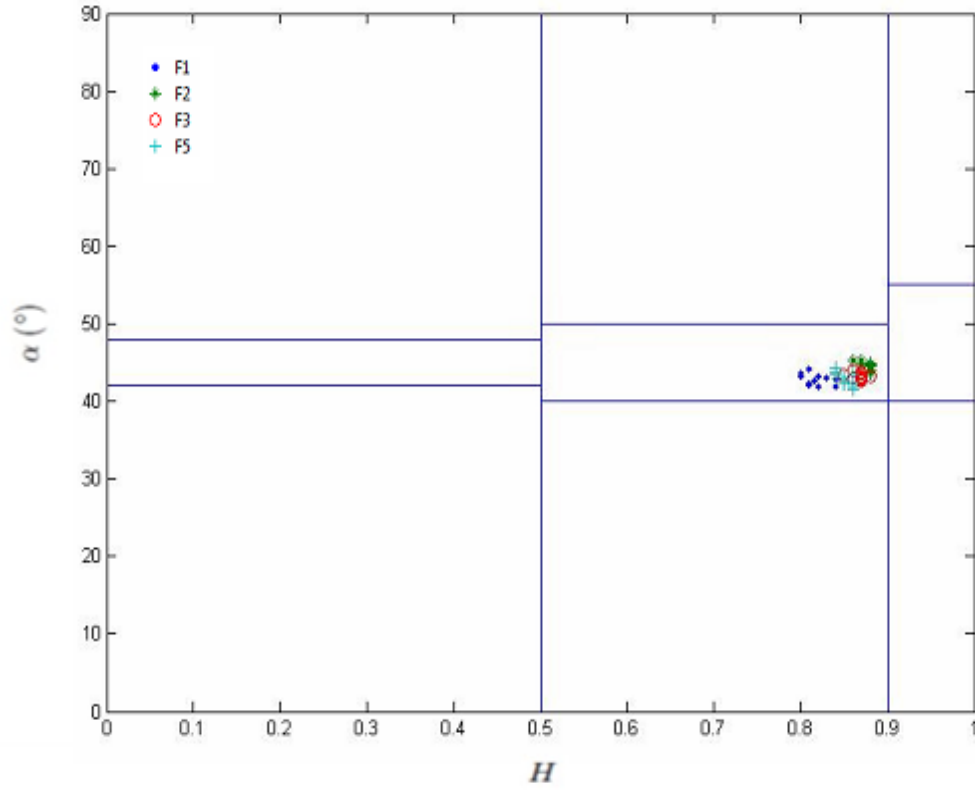


Figure 2. 10 : Plan H/α de Cloude-Pottier pour tous les sites forestiers de la campagne SMAPVEX12, en utilisant les données UAVSAR (bande L) à 30° (ligne de vol winnip_31603) acquises du 17 juin au 17 juillet 2012

Le Tableau 2.1 présente la liste de toutes les variables polarimétriques considérées dans cette étude.

Tableau 2.1 : Description des variables analysées pour la présente étude

Paramètre	Description
$\sigma^{0}_{HH}, \sigma^{0}_{VV}, \sigma^{0}_{HV}$	Coefficient de rétrodiffusion HH, VV et HV en dB
ϕ_{HHHV}, ϕ_{VVHV}	Différence de phase entre les deux canaux HH et VV, HH et HV, VV et HV
ρ_{HHHV}, ρ_{VVHV}	Coefficient de corrélation entre les deux canaux HH et VV, HH et HV, VV et HV
H	Entropie extrait de la décomposition de Cloude-Pottier
A	Anisotropie extrait de la décomposition de Cloude- Pottier
α	Angle alpha extrait de la décomposition de Cloude-Pottier
Ps	Puissance de diffusion de la surface extraite de la décomposition de Freeman-Durden (dB)
Pd	Puissance de diffusion du double rebond extraite de la décomposition de Freeman-Durden (dB)
La hauteur du socle	Quantité dépolarisée du signal

Chapitre 3

Matériels et méthodes

3.1 Site d'étude

La zone d'étude est la partie Nord-ouest du site de la campagne SMAPVEX12, localisé à l'ouest du centre de la province du Manitoba, au Canada ($98^{\circ} 0' 23''$ W, $49^{\circ} 40' 48''$ N). La campagne SMAPVEX12 s'est déroulée du 6 juin au 17 juillet 2012. Plus de détails sur cette campagne sont fournis par McNairn *et al.* (2015) et sur le site de SMAPVEX12 (<https://smapvex12.espaceweb.usherbrooke.ca>). La Figure 3.1 montre la localisation des quatre sites forestiers d'intérêts (F1, F2, F3, F5) au sein du site de SMAPVEX12. Ces sites sont constitués majoritairement d'arbres de feuillus (peuplier faux tremble). Ils sont différents du point de vue de la densité des arbres et de leur contenu en eau, de la végétation couvrant le sol, ainsi que des caractéristiques du sol (humidité et rugosité de surface).

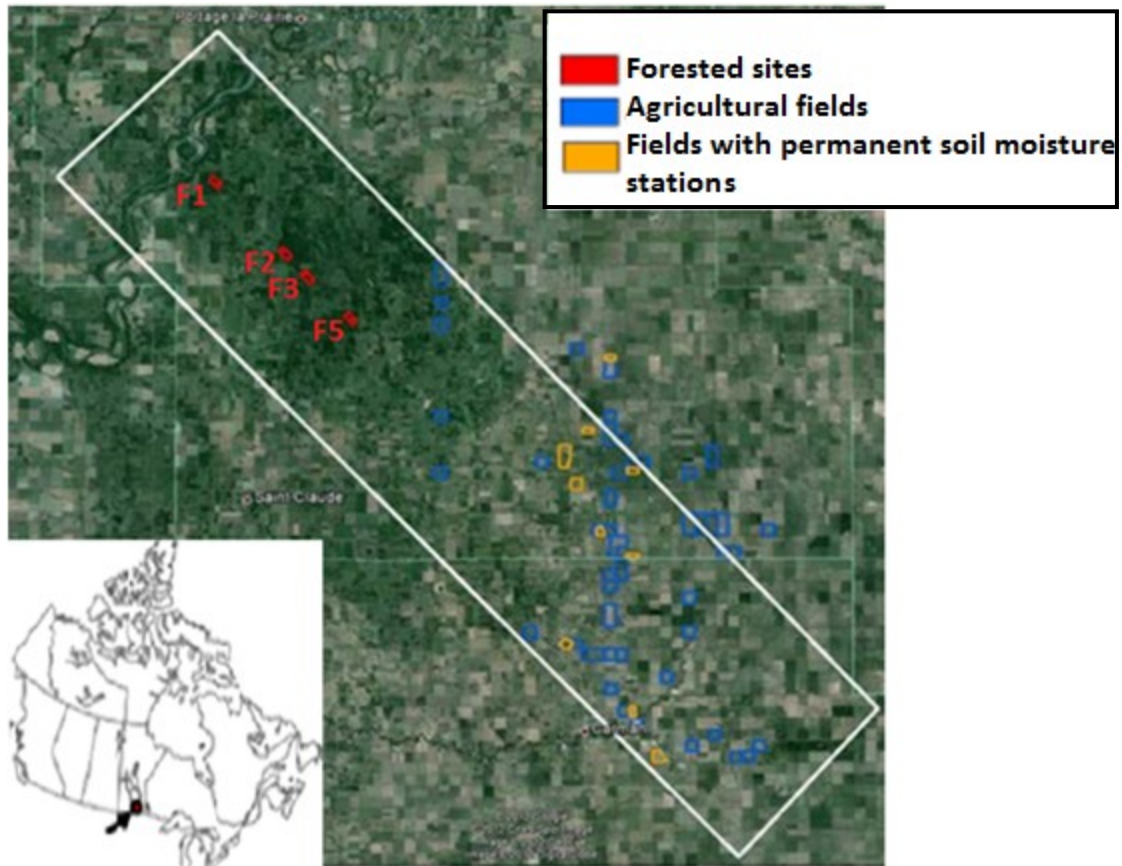


Figure 3.1 : Localisation du site SMAPVEX12 (rectangle noir) et des sites forestiers échantillonnés (F1, F2, F3, F5).

3.2 Données

Les données utilisées dans ce projet sont composées des mesures terrain des caractéristiques du sol et de la forêt, des données météorologiques et des données radar aéroportées (UAVSAR) et satellitaires (RADARSAT-2). Le Tableau 3.1 présente un récapitulatif des données utilisées. Des informations complémentaires sur toutes ces données utilisées sont présentées dans le chapitre 4, Section 3.

Tableau 3.1 : Récapitulatif des données utilisées

Données	Type	Source	Sites
Caractéristiques du sol	Humidité du sol ($m^3 \cdot m^{-3}$) <i>in-situ</i>	Mesures <i>in-situ</i> à l'aide de sondes hydraprobes Mesures <i>in-situ</i> gravimétriques Réseaux de stations temporaires: <i>United States Department of Agriculture (USDA)</i> et <i>Manitoba Agriculture, Food and Rural Initiatives (MAFRI)</i> .	F1, F2, F3 et F5
	Rugosité du sol <i>in-situ</i> : RMS (cm) et longueur de corrélation (cm)	Profilomètre à aiguilles	F1, F2, F3 et F5
Caractéristiques de la végétation	DHP des arbres, densité des troncs (nb/m^2), couverture et hauteur de la végétation au sol, <i>in-situ</i>	Échantillonnages terrain	F1, F2, F3 et F5
Météorologiques	Précipitations (mm) <i>in-situ</i>	Station météo Portage Southport	F1, F2 et F3
		Station météo Wingham Farm Ltd	F5
Radar polarimétriques	Aéroportées, bande L, $\theta = 30^\circ$ et 40°	UAVSAR	F1, F2, F3 et F5
	Satellitaire, bande C, θ entre 20° et 30°	RADARSAT-2	F1, F2 et F3

Humidité du sol : Parallèlement à l'acquisition des données radars, les mesures de l'humidité du sol sont prises à 5 cm de profondeur avec des sondes hydrophobes manuelles. Neuf mesures sont prises sur chaque site forestier (de 6 h:30 du matin à 12 h, correspondant à la mesure des vols aéroportés UAVSAR). Elles sont complétées par des

données de réseaux de stations temporaires d'humidité du sol du *United States Department of Agriculture (USDA)* et *Manitoba Agriculture, Food and Rural Initiatives (MAFRI)*. Une comparaison entre les données d'humidité du sol mesurées par les sondes hydrophobes manuelles et celles par les stations temporaires a été faite. Il est remarqué que les valeurs mesurées par les sondes manuelles sont très faibles par rapport à celles mesurées par les stations temporaires (surtout pour le site F1). Ainsi, les données des stations temporaires sur les sites F1, F2 et F3 ont été considérées dans ce travail. Sur le site F5, comme aucune station n'a été installée, les données prises par les sondes manuelles ont été considérées.

Rugosité du sol : Pour chaque site forestier, les mesures de la rugosité du sol ont été effectuées à deux endroits. À chaque emplacement, la rugosité de la surface a été mesurée, dans les directions d'observation des capteurs RADARSAT-2 et UAVSAR à partir d'un appareil photo numérique et d'un profilomètre d'un mètre de longueur. La Figure 3.2 est un exemple de prise de mesure de la rugosité de surface du sol sur le site F2. Pour chaque capteur et à chaque emplacement de mesure, les photos de trois profils ont été réunies en un seul profil de 3 m à l'aide d'une application de MATLAB. Cette application permet de fournir les deux paramètres de rugosité qui sont l'écart type des hauteurs de surface (la hauteur rms) et la longueur de corrélation.



Figure 3.2 : Mesure de la rugosité de surface du sol sur le site forestier F2

Couvert forestier : Sur chaque site forestier, l'échantillonnage du couvert forestier a été conduit sur une zone circulaire de diamètre de 200 m . La valeur du diamètre à hauteur de poitrine (DHP), le type de couverture du sol par la végétation (sous-bois, litières, herbes, arbustes) et sa hauteur sont déterminés. La Figure 3.3 montre la végétation couvrant le sol dans chaque site forestier : le site F1 (a), le site F2 (b), le site F3 (c) et le site F5 (d).

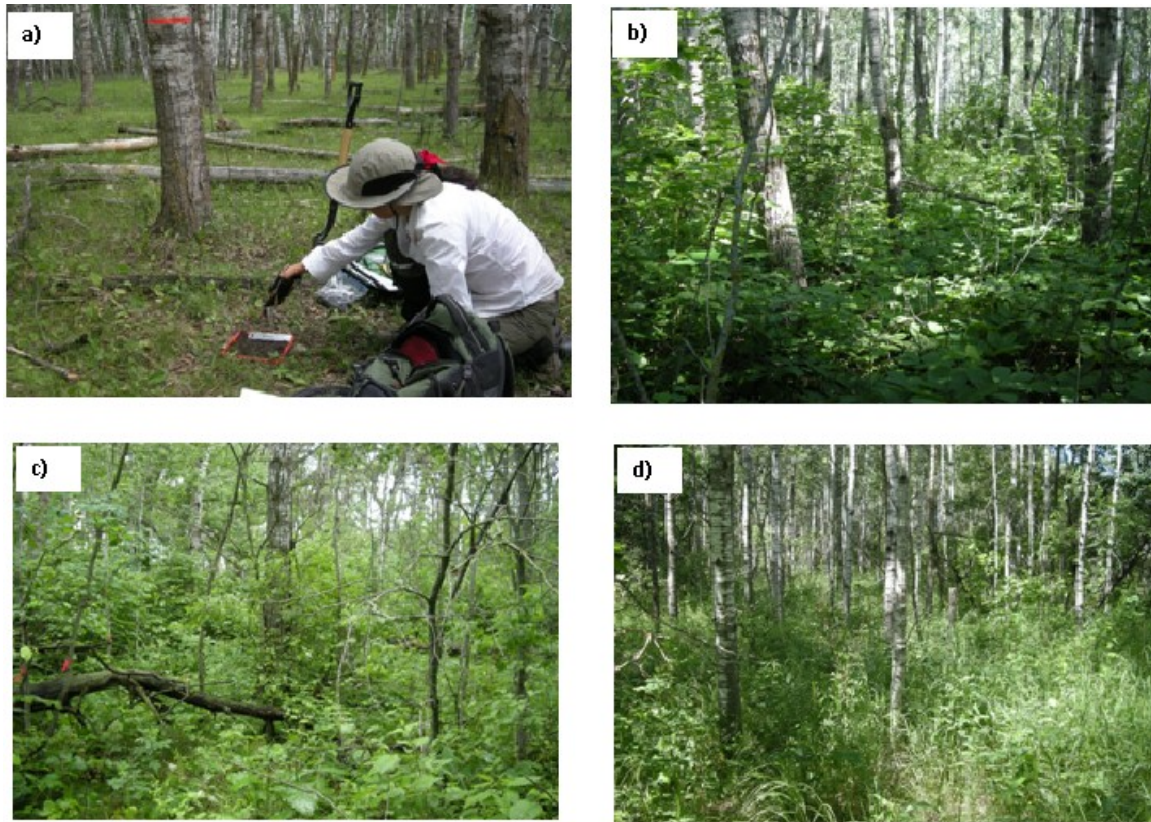


Figure 3.3 : Photos mettant en évidence la couverture du sol (sous bois) dans chaque site forestier F1 (a), F2 (b), F3 (c) et F5 (d)

Données radar: Il s'agit d'images UAVSAR aéroportées (en bande L à 30° et à 40°) entièrement polarimétriques acquises entre 06h et 12h presque simultanément avec les mesures manuelles d'humidité du sol. Le projet bénéficie aussi d'images RADARSAT-2 entièrement polarimétriques (en bande C, angle d'incidence entre 20° et 30°) acquises pendant la campagne SMAPVEX12.

Il est à noter que plus de détails sur les données terrain de caractéristiques du sol (humidité, rugosité de surface) et de la végétation (DBH, densité des arbres, couverture

du sol, etc.) ainsi que les données auxiliaires (précipitation) et les données radar aéroportées et satellitaires sont fournis dans la Section 3 du chapitre 4.

3.3 Méthode

La méthodologie comporte trois étapes principales: (1) extraction des paramètres polarimétriques, (2) calculs statistiques et (3) interprétation des résultats obtenus. Toutes les étapes sont décrites dans l'organigramme méthodologique (Figure 3.4). Plus de détails sur la méthodologie adoptée sont présentés dans la Section 4 du chapitre 4.

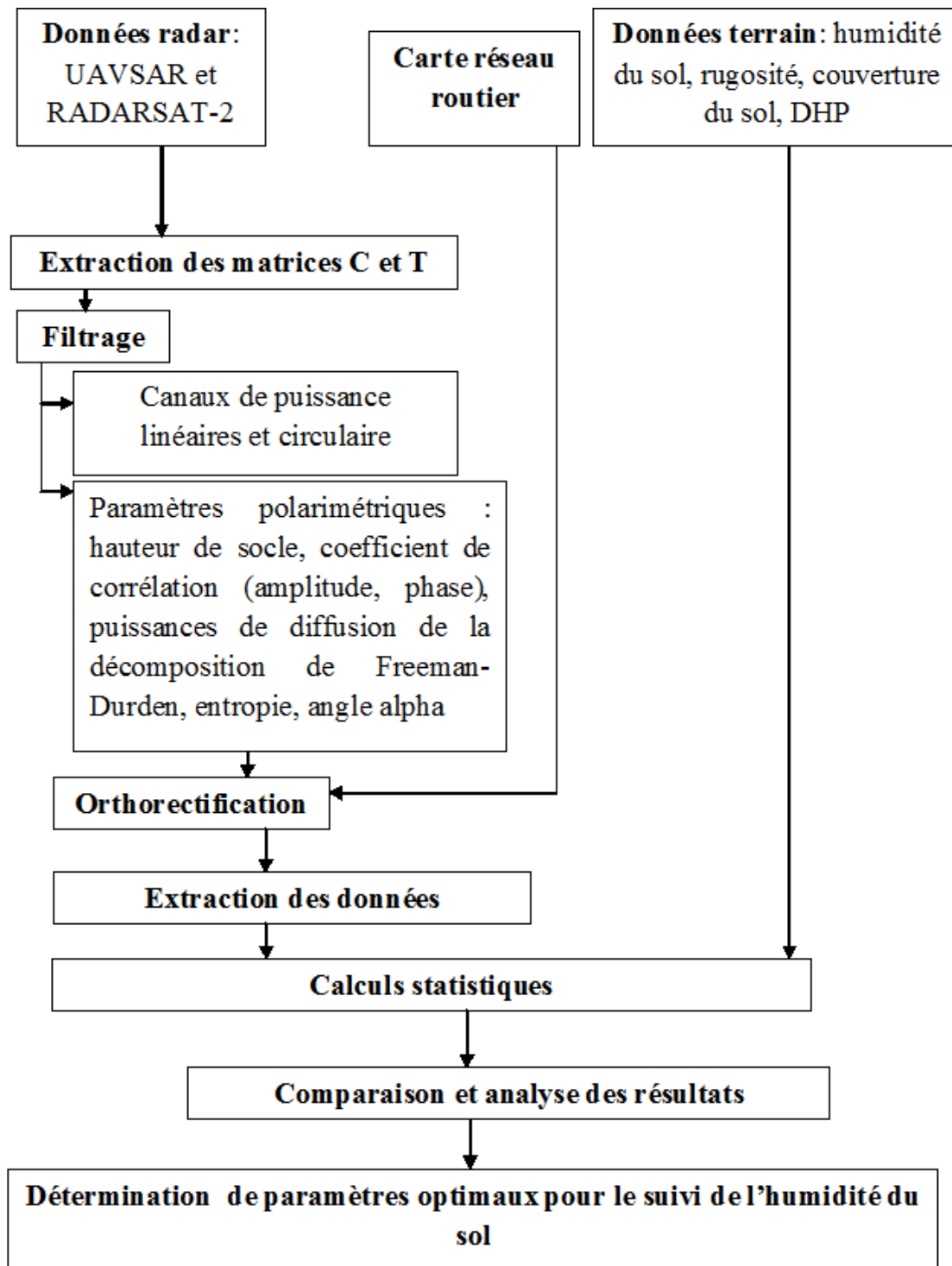


Figure 3.4 : Organigramme méthodologique

Chapitre 4

Potentiel des données radar polarimétriques en bandes L et C pour le suivi de l'humidité du sol sur les sites forestiers de SMAPVEX12

Ce chapitre est le manuscrit d'un article scientifique qui sera soumis pour publication à *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Il décrit les données et la méthodologie utilisée pour l'atteinte des objectifs du mémoire ainsi que les résultats obtenus.

This Chapter is the manuscript of a scientific paper that will be submitted for publication to *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. It describes the data and the methodology used to meet our research objectives as well as the obtained results.

Title of the manuscript: Potential of L and C bands polarimetric radar data for the monitoring of soil moisture over forested sites.

Auteurs (*Authors*): Safa Jammali, Ramata Magagi, Kalifa Goita.

4.1 Résumé de l'article

L'humidité du sol est un paramètre important pour prévenir certaines catastrophes en zone forestière comme les incendies de forêt, les inondations et la paludification. Cependant, peu d'investigation ont porté sur le suivi de l'humidité du sol en utilisant le radar à synthèse d'ouverture (RSO) dans les zones forestières. Des études ont montré qu'en zones forestières, le signal RSO en bande C provient principalement de la couche supérieure des arbres et sature assez rapidement avec la densité de la végétation. D'autres études ont montré que l'effet de la couverture végétale est moins important en utilisant la bande L qui, permet ainsi de mieux suivre l'humidité du sol. Par ailleurs, très peu d'études ont exploré le potentiel des paramètres radar polarimétriques, pour le suivi de l'humidité du sol sur des sites forestiers.

Le but de cette étude est de suivre l'humidité du sol à partir de données entièrement polarimétriques en bandes C et L sur des sites forestiers et de déterminer le paramètre (ou l'ensemble de paramètres) polarimétrique optimal pour le suivi de l'humidité du sol sur des couverts forestiers. Les données utilisées sont celles de la campagne de terrain *SMAP Validation Experiment 2012* (SMAPVEX12) tenue du 6 juin au 17 juillet 2012 à Winnipeg, (Manitoba, Canada). Elles sont composées de données radar satellitaires de RADARSAT-2 acquises en bande C avec des angles d'incidence compris entre 20° et 30°, de données radar aéroportées du capteur *Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar* (UAVSAR) acquises en bande L avec des angles d'incidence de 30° et 40°, ainsi que de données terrain. Celles-ci caractérisent le sol (l'humidité du sol et la rugosité de la surface) et la végétation (le diamètre de l'arbre à hauteur de poitrine (DHP), teneur en eau des arbres et la couverture du sol). Les

coefficients de rétrodiffusion linéaire et circulaire (σ^0) et plusieurs paramètres polarimétriques dont les coefficients de corrélation (ρ_{HHVV} , ϕ_{HHVV} ...), la hauteur du socle, l'entropie (H), l'anisotropie (A) et l'angle α extraits de la décomposition de Cloude–Pottier et les puissances de diffusion de surface (Ps) et de double bond (Pd) extraites de la décomposition de Freeman-Durden ont été utilisés dans le développement de relations avec l'humidité du sol. Ces relations ont par la suite été analysées.

Les résultats montrent qu'en bande L: a) plusieurs paramètres optimaux permettent le suivi de l'humidité du sol sur les sites forestiers: σ^0 linéaire et σ^0 circulaire (le coefficient de corrélation, r, varie entre 0,60 et 0,96), Ps (r varie entre 0,59 and 0,84), Pd (r varie entre 0,60 et 0,82), $\rho_{HHHV}_{30^\circ}$, $\rho_{VVHV}_{30^\circ}$, $\phi_{HHHV}_{30^\circ}$ et $\phi_{HHVV}_{30^\circ}$ (r varie entre 0,56 et 0,81) b) comparés à σ^0 , les paramètres polarimétriques ne montrent pas de valeur ajoutée pour le suivi de l'humidité du sol sur les sites forestiers.

Cependant, en bande C, a) le nombre de paramètres optimaux permettant de suivre l'humidité du sol est réduit à ϕ_{HHHV} , ϕ_{VVHV} et ϕ_{HHVV} (r est autour de 0,90) et b) par rapport à σ^0 , ces paramètres montrent des relations significatives avec l'humidité du sol des sites forestiers de SMAPVEX12.

Mots-clés: SAR, bande L, bande C, humidité du sol, sites forestiers de SMAPVEX12, coefficients de rétrodiffusion, paramètres polarimétriques, développement de relations, paramètres optimaux.

4.2 Article

Potential of L and C bands polarimetric radar data for the monitoring of soil moisture over SMAPVEX12 forested sites

S. Jammali, R. Magagi and K. Goita

CARTEL, Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, 2500 Boul. de l'Université, Sherbrooke, QC, J1K 2R1, Canada.

Abstract

Soil moisture is an important parameter to prevent forest disaster like fire, floods and paludification. However, few investigations have focused on the monitoring of soil moisture using the Synthetic aperture radar (SAR) over forested areas. Studies have shown that at C-band, SAR signal comes mainly from the upper layer of trees and it quickly saturates with vegetation density. Other studies have shown that vegetation effect is less important using L-band so that it allows better monitoring of soil moisture. However, very few studies have investigated the potential of polarimetric parameters to monitor soil moisture over forested sites.

The purpose of this study is to monitor soil moisture from L and C bands fully polarimetric SAR data acquired over forested sites and to determine the optimal polarimetric parameter (or a set of optimal parameters) for soil moisture monitoring over forested sites. The data used were collected during the SMAP Validation Experiment 2012 (SMAPVEX12) field campaign held from June 6th to July 17th 2012 in Winnipeg, (Manitoba, Canada). They consisted of RADARSAT-2 radar satellite data acquired in C-band with incidence angles ranging from 20° to 30°, L-band radar airborne data acquired

at 30° and 40° incidence angles with the Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar (UAVSAR) sensor, and ground data. The ground data included the characteristics of soil (soil moisture and surface roughness) and vegetation (tree diameter-breast-height (DBH), tree water content, and soil cover). Linear and circular backscattering coefficients (σ^0) and several polarimetric parameters including the correlation coefficients (ρ_{HHVV} , ϕ_{HHVV} ...), the pedestal height, the entropy (H), the anisotropy (A), the α angle extracted from Cloude-Pottier decomposition, and the scattering (Ps) and the double bounce powers (Pd), extracted from Freeman-Durden decomposition were used in developing relationships with soil moisture. These relationships were subsequently analyzed.

The results show that at L-band a) several optimal parameters allow the monitoring of soil moisture over forested sites: linear and circular σ^0 (the correlation coefficient, r, varies between 0.60 and 0.96), Ps (r varies between 0.59 and 0.84), Pd (r varies between 0.60 and 0.82), $\rho_{HHHV}_{30^\circ}$, $\rho_{VVHV}_{30^\circ}$, $\phi_{HHHV}_{30^\circ}$ and $\phi_{HHVV}_{30^\circ}$ (r varies between 0.56 and 0.81) and b) compared to σ^0 , the polarimetric parameters did not show added values for soil moisture monitoring over forested sites.

However, at C-band, a) the polarimetric parameters allowing soil moisture monitoring are limited to only ϕ_{HHHV} , ϕ_{VVHV} and ϕ_{HHVV} (r is around to 0.90), and b) compared to σ^0 , these parameters show significant relationships with the soil moisture of SMAPVEX12 forested sites.

Keywords: SAR, L-band, C-band, soil moisture, SMAPVEX12 forested sites, backscattering coefficients, polarimetric parameters, developing relationships, optimal parameters.

1. Introduction

Soil moisture is a key parameter for several environmental domains. It plays an important role in hydrological processes related to runoff production (Georgakakos and Baumer, 1996) and evapotranspiration (Sokol *et al.*, 2004). Soil moisture also governs agricultural processes. It is a determining factor for crop development (Bériaux *et al.*, 2011). For example, yield declines and the appearance of fungal diseases can result from low and high soil moisture content, respectively (Troch *et al.*, 2003). Soil moisture also influences soil erosion processes. It controls the distribution of precipitation between infiltration and runoff (Kirkby, 2001; Romkens *et al.*, 2001; Ziadat and Taimeh, 2013). It also influences the weather and climate events (Entekhabi *et al.*, 2010). Due to these determining roles in the processes (infiltration, runoff, evaporation, etc.) governing the water cycle and the global energy, soil moisture is recognised by the Global Climate Observing System (GCOS, 2013) as an essential climate variable. Over the forest cover which represents 30% of Earth's surface, an extreme increase in soil moisture can produce paludification (Lavoie *et al.*, 2005; Nappi, 2013), while an extreme decrease in soil moisture can cause the risk of forest fires (Bourgeau-Chavez *et al.*, 2007). Therefore, the knowledge of soil moisture is very important for the protection of forested areas.

Due to their high cost, in-situ soil moisture measurements are limited in space and time. With the launch of L-band passive microwave satellite Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) of the European Space Agency (ESA) in November 2009 followed by Soil Moisture Active and Passive Mission (SMAP) of the National Administration of Aeronautics and Space (NASA) in January 2015, considerable advances were made in the soil moisture monitoring at global scale. However, the areas covered by dense

vegetation are still less-investigated. In active microwave, Synthetic aperture radar (SAR) with its fine spatial resolution is commonly used in wide range swaths for soil moisture estimation (Anderson and Croft, 2009). In contrast to passive microwave, SAR data presents low temporal frequency (24 days for RADARSAT-2) and it is much more affected by surface properties such as surface roughness and vegetation, which make the soil moisture estimation difficult (Le Toan *et al.*, 1992; Ferrazoli and Guerriero 1995; Pulliainen *et al.*, 1996). Most radar studies associated with soil moisture monitoring focused on bare surfaces, agricultural areas or sparse vegetation where the effect of the vegetation is more or less low or can be ignored. For densely vegetated surfaces such as forests, the issue can be addressed as a decrease in the radar signal's sensitivity to soil moisture due to biomass scattering which reduces the contribution of the soil (Lang *et al.*, 1993; Pulliainen *et al.*, 1996; Pulliainen *et al.*, 2004; Lucas *et al.*, 2012; Bourgeau-Chavez *et al.*, 2013a-b). In addition, forested areas represent a complex scattering environment (Wagner *et al.*, 2007) with several unknowns in the soil moisture estimation algorithms. For this reason, only few studies can be found in the literature about the soil moisture estimation under forest canopy.

At C-band, the radar signal is affected by the structure and the water content of the vegetation. The degree of interaction with the vegetation depends on the incidence angle and the polarization (Freeman and Durden, 1998). It can be noted that most of the work using the C-band radar data have focused on the estimation of biomass (Santos *et al.*, 2002; Tsolmon *et al.*, 2002; Rauste 2005; Mitchard *et al.*, 2009) and few investigations have attempted to estimate soil moisture in boreal forests (Pulliainen *et al.*, 1996; Pulliainen *et al.*, 2004; Abbott *et al.*, 2007). However, their results were sites

specific and were limited by the use of single-polarization SAR such as ERS-1 and RADARSAT-1. To reduce the influence of vegetation on the radar signal, low incidence angle (less than 30°) or low frequency (L-band) can be used since they provide less interaction with the canopy and thus allow a better access to soil parameters (Freeman and Durden, 1998; Wang *et al.*, 1998; Picard, 2002; Tabatabaenejad *et al.*, 2012).

With the availability of fully polarimetric radar data, additional information can be obtained on the structural change of the vegetation and of the surface roughness as well as on the scattering contributions of these parameters (Lee and Pottier, 2009; Bourgeau-Chavez *et al.* (2013a-b)). Several investigations focused on target classification using polarimetric discriminators (McNairn and Brisco, 2004; Touzi *et al.*, 1992) and target decomposition approaches (Cloude, 1997; Freeman and Durden, 1998; Touzi *et al.*, 2007; van Zyl *et al.*, 2011). Currently, there is a great challenge in the use of polarimetric parameters to estimate soil moisture. Studies found in the literature were primarily focused over agricultural areas (Arii, 2008; Hajnsek *et al.*, 2009 and 2003; Jagdhuber *et al.*, 2013). Bourgeau-Chavez *et al.* (2013a-b) studied the C-band polarimetric parameters in burned forest area in order to discriminate between wet and dry soil conditions.

The aim of this paper is to analyze the potential of both L and C bands fully polarimetric SAR signals for soil moisture monitoring over the forested sites of SMAP Validation Experiment 2012 (SMAPVEX12) field campaign. The area under study is located in southwest of Winnipeg, Manitoba (Canada). Ground surface measurements and SAR data used in this study were acquired during SMAPVEX12 field campaign. The SAR data consisted of C-band RADARSAT-2 satellite acquisitions at incidence angles of 20°-30° and L-band airborne Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar

(UAVSAR) acquisitions at 30° and 40° incidence angles. The ground data characterized soil and vegetation parameters: soil moisture, roughness, DBH of trees and floor cover. In this paper, relationships between radar data (backscatter coefficient and some polarimetric parameters) and soil moisture were developed and interpreted from statistical analysis (linear correlation coefficient and significance test) in order to identify the optimal parameter or the optimal set of parameters for soil moisture monitoring over forested sites.

2. Study Area

SMAPVEX12 study area (<https://smapvex12.espaceweb.usherbrooke.ca>) was located southwest of Winnipeg, Manitoba in Canada (98° 0' 23'' W, 49° 40' 48'' N). The experiment was conducted during 6 weeks between June 6 and July 17, 2012 to capture variable soil and vegetation conditions. More details about SMAPVEX12 campaign are given by McNairn *et al.*, (2015).

In this paper, we focused on the F1, F2, F3 and F5 forested sites of SMAPVEX12 campaign which are a mix of forest/grassland land cover. The area is characterised by a flat topography of about 315 m in average (<http://fr-ca.topographic-map.com/places/Manitoba-437295/>). Over these forested sites, the main tree species is Trembling Aspen. Fig. 1.a shows the location of SMAPVEX12 area. In Fig. 1.b, the red rectangles present the location of the four SMAPVEX12 forested sites (F1, F2, F3 and F5) under study.

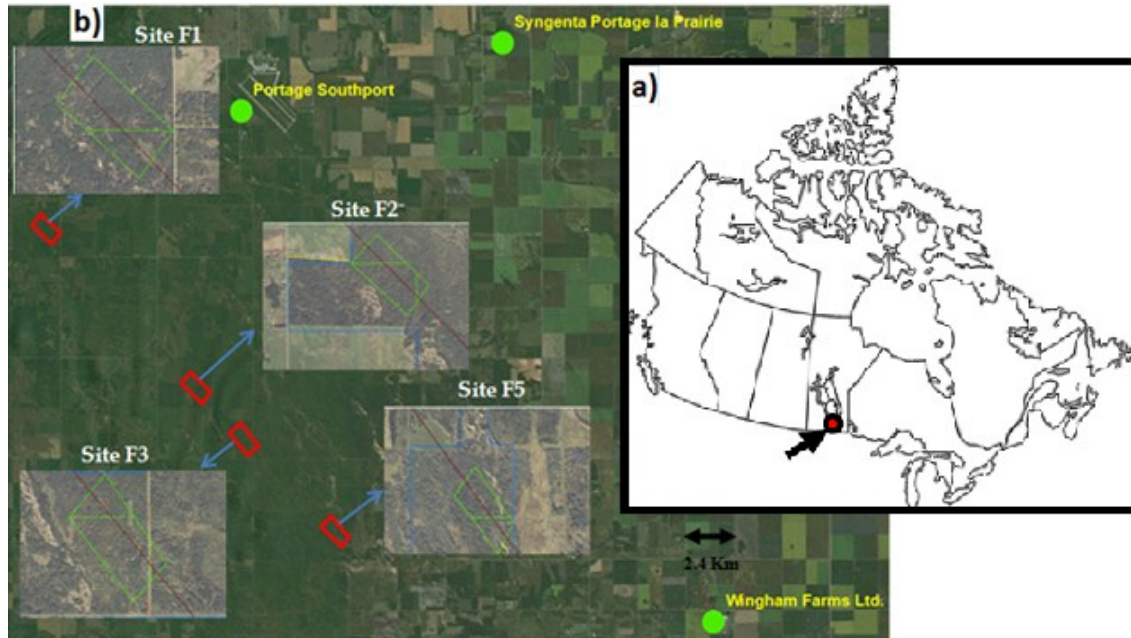


Fig. 1. a) Study area localization, b) the red rectangles are the four forested sampling sites of SMAPVEX12 field campaign

3. Data

They consisted of ground measurements of soil and vegetation characteristics, satellite and airborne SAR data, and auxiliary data.

3.1 Ground measurements and processing

For each forested site which is approximately 800 m x 800 m, a random circular area of 200 m diameter was selected. Within this area, measurements characterizing soil (soil moisture and surface roughness) and vegetation (diameter at breast height (DBH), water content, density of the trunk, cover floor, etc.) were collected.

Soil moisture: Volumetric soil moisture was manually measured (with hydra probe sensor) during SMAPVEX12 campaign. In addition, we make use of 5 cm depth hourly soil moisture measurements collected by temporary stations installed over the sites F1, F2, and F3 by Manitoba Agriculture, Food and Rural Initiatives (MAFRI) and the United

States Department of Agriculture (USDA). Over the F1 site, the manually measured soil moisture values were lower than the soil moisture measured by USDA station. Also, due to the high amount of organic matter covering the soils of the forested sites, issues of calibration occurred with the manual soil moisture measurements. Therefore, measurements by temporary stations will be considered for F1, F2 and F3 sites. Since no station has been installed over F5 site, the manually measured soil moisture will be considered for this site. For each date, soil moisture values (taken between 6:30 am to 12 am) were averaged. Fig. 2 presents the temporal evolution of soil moisture measurements along with precipitation over F1, F2, F3, and F5 sites. It shows that for the four sites, soil moisture goes relatively through three phases according to precipitation. It is high from June 7th to June 22nd 2012 and then decreases from June 6th to July 12 2012 due to the lack of precipitation. At the end of the field campaign it increases with some rain events.

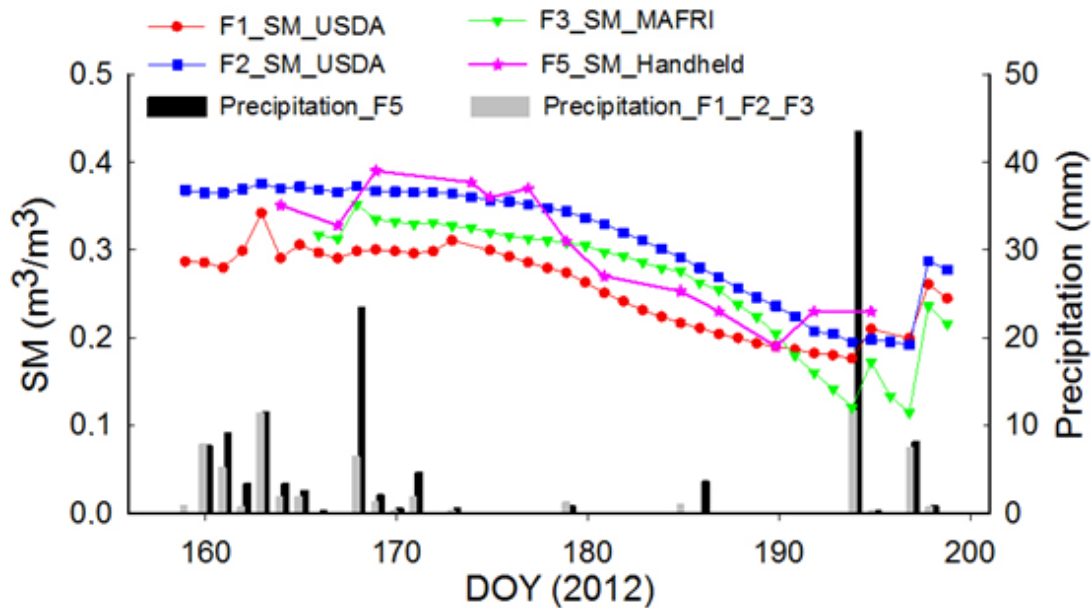


Fig. 2. Temporal profile of soil moisture and precipitation over F1, F2, F3, and F5 sites

Surface roughness: Soil surface roughness parameters (rms height, correlation length) were measured at two locations over the F1, F2, and F3 sites and at one location over the F5 site in the look directions of RADARSAT-2 and UAVSAR sensors. For each location and each look direction, the measurements result from a 3-m profile obtained with a pin profilometer. Table 1 shows the average values of the surface rms height and correlation length obtained in the look directions of RADARSAT-2 and UAVSAR over each forested site. The values of rms and correlation length vary from 0.7 to 1.7 cm and 10.5 to 22.75 cm, respectively.

Table 1. Surface roughness measurements over SMAPVEX12 forested sites in the look direction of RADARSAT-2 and UAVSAR sensors

Forest site	UAVSAR		RADARSAT-2	
	RMS (cm)	Correlation length (cm)	RMS (cm)	Correlation length (cm)
F1	0.93	18.75	1.05	15.5
F2	1.63	22.75	1.04	10.5
F3	1.46	17	1.61	14
F5	0.85	13	0.77	15.5

Vegetation data: DBH was measured and then used to estimate the biomass of Trembling Aspen (the dominant tree species) with an error of +/- 7.2 kg/m² (Resources naturelles Canada, 2014; Lambert *et al.*, 2005). In this calculation, only trees with DBH greater than (or equal to) 0.02 m are considered. Those with smaller DBH are considered as floor cover. The estimated tree biomass are subsequently used to calculate the total biomass (biomass x tree trunk density). Results show that F3 is the densest site with a

biomass of 138.39 kg/m² while F1, F2 and F5 presents similar biomass values of 34.12 kg/m², 39.69 kg/m² and 37.7 kg/m² respectively (Table 2).

The type of floor cover (undergrowth, litter, grasses, shrubs, etc...) and its depth are also determined. As shown in Table 2, F1 presents the lowest floor cover (covered at 44% of grass coverage and a depth of about 0.04 m). F2 and F3 present very similar floor cover depth which is higher than those of F1 and F5; while, the floor fractional cover is very similar over F3 and F5 sites and higher than those of F1 and F2. According to the values listed in Table 2, F3 presents the highest floor cover, followed by F2. Additional characteristics of the forested sites are listed in Table 2.

Table 2. Characteristics of the forested sites

	F1	F2	F3	F5
Forest type	The majority of species are trembling aspen			
DHP (m)	0.25	0.21	0.28	0.15
Tree VWC (kg/m²)	15.39	25.63	7.34	14.10
Trunk density (nb/m²)	0.14	0.25	0.43	0.54
Floor fractional cover (%)	Mainly grass (44)	Mixed (herbs, shrub dead wood and litter...) (49)	Grass and litter (69.5)	Grass (67)
Floor cover depth (m)	0.04	1.13	1.15	0.71
Biomass (kg/m²)	34.12	39.69	138.39	37.7

3.2 Auxiliary data

They consisted mainly of precipitation data downloaded from Environment Canada website (<http://www.ec.gc.ca/>). For F1, F2 and F3 sites, precipitation data were

acquired from Portage Southport station (Fig. 1). The precipitation data used for F5 site were acquired from Wingham Farm Ltd. station (Fig. 1).

3.3 SAR data and processing

UAVSAR data: UAVSAR was in board of NASA Gulfstream-III aircraft. It is a fully polarimetric L-band (1.26 GHz) SAR operating at 25° - 65° incidence angles, with spatial resolution of 4.5 m x 5 m. The images in MLC format acquired from 17 June to 17 July during SMAPVEX12 field campaign were free downloaded from the NASA site (<http://uavsar.jpl.nasa.gov>). These images were acquired simultaneously with manual measurements of soil moisture. Table 3 shows the availability of UAVSAR data over the study area. In order to optimise the soil moisture monitoring over the forested sites, the flight lines providing the smallest incidence angles are considered. They are identified as winnip_31603 and winnip_31604 with incidence angles of 30° and 40°, respectively.

RADARSAT-2 data: The project also benefits from C-band (5.4 GHz) fully polarimetric RADARSAT-2 images acquired at incidence angles between 20° and 30°. Table 4 shows the characteristics of the seven Wide Quad-Polarimetric RADARSAT-2 acquisitions during the SMAPVEX12 field campaign. Since F5 is not covered with RADARSAT-2 images at the same dates as ground soil moisture measurements, soil moisture monitoring at C-band cannot be conducted over this site.

PolSARpro (version 5) and PCI Geomatica (version 2013) softwares are used for the processing of both UAVSAR and RADARSAT-2 images and the extraction/computation of the backscattering coefficients and polarimetric parameters through the following steps:

- Extraction of the covariance matrix (C) and coherency matrix (T);
- Applying a Boxcar filter 7x7 (Lee and Ainsworth, 2008; López-Martínez *et al.*, 2013) to the images;
- Extraction and computation of the backscattering coefficients and several polarimetric parameters and
- Images orthorectification using road network map created with QuantumGIS and Orthoengine to remove geometric distortions.

Table 3. Availability of UAVSAR data over the study area

DOY 2012	Angle d'incidence
199	30°, 40°
196	40°
195	30°, 40°
192	30°, 40°
190	30°, 40°
187	30°, 40°
181	30°, 40°
179	30°, 40°
177	30°, 40°
175	30°, 40°
174	40°
171	30°, 40°
169	30°, 40°

Table 4. List of wide mode Quad-pol RADARSAT-2 data used in this study. The ascending (A) and descending (D) directions correspond to the 7:10 PM and the 7:50 AM overpasses, respectively

DOY 2012	Flight direction	Beam Mode	Incidence angle (°)
164	D	FQ8W	26.1–29.4
165	A	FQ10W	28.4–31.6
172	A	FQ6W	23.7–27.2
179	A	FQ2W	19.0–22.7
188	D	FQ8W	26.1–29.4
189	A	FQ10W	28.4–31.6
196	A	FQ6W	23.7–27.2

4. Methodology

It included the processing of ground measurements and of SAR images presented in Sections 3.2 and 3.3, respectively. Then, the backscattering coefficients and several polarimetric parameters were extracted or computed from the covariance matrix (C) and the coherency matrix (T). They are related to ground soil moisture measurements using linear relationships which are statistically interpreted from the correlation coefficients and the significance tests (p-value). In the last step, the optimal polarimetric parameter or the optimal set of polarimetric parameters for soil moisture monitoring over the forested sites will be identified based on the statistical analyses. Fig. 3 presents the schematic diagram of the methodology which is described in Sections 4.1, 4.2 and 4.3.

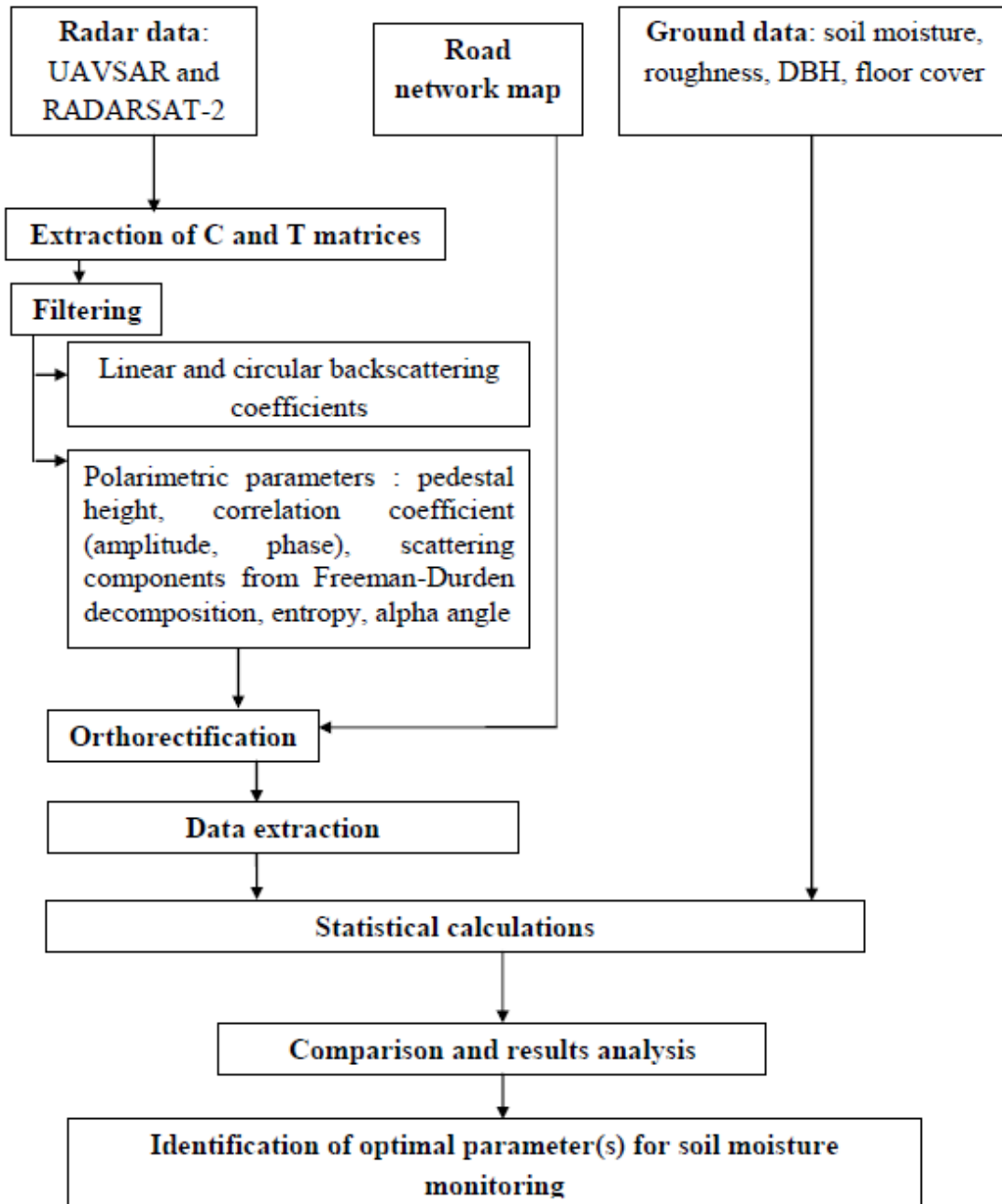


Fig. 3. Schematic diagram of the methodology

4.1 Extraction of backscattering coefficients and polarimetric parameters

In this study, we consider the linear (σ_{HH}^0 , σ_{VV}^0 and σ_{HV}^0) and circular (σ_{RR}^0 , σ_{LL}^0 and σ_{RL}^0) backscattering coefficients and the following polarimetric parameters:

correlation coefficient with its amplitude (ρ) and its phase (φ), parameters extracted from target decompositions of Coude-Pottier and Freeman-Durden (H , α , A , P_s and P_d) and the pedestal height. These parameters are considered according to their potential for soil moisture monitoring over bare surfaces, agricultural areas or over sparse vegetation (Sokol *et al.*, 2004; Adams *et al.*, 2013; Baghdadi *et al.*, 2012-2013; Bourgeau Chavez *et al.*, 2013a-b).

For each forest site, for each frequency and each SAR image acquisition date, the backscattering coefficients and the polarimetric parameters are extracted within the same polygon which number of pixels depends on the spatial resolution of the images (Table 5). The average values of the backscattering coefficients and of the polarimetric parameters were computed over the polygons and subsequently used in this paper.

Table 5. Pixels number for each polygon

	F1	F2	F3	F5
L-band images	597	596	511	715
C-band images	359	357	306	431

4.2 Linear regressions and statistical analyses

For each frequency and each forested site, linear regressions were developed between ground soil moisture measurements (Section 3.1) and the mean values of the backscattering coefficients and of the polarimetric parameters computed in Section 4.1. They will be used to analyze the potential of both L and C bands fully polarimetric SAR

signals for soil moisture monitoring over forested sites different from their characteristics (biomass, trees water content, floor cover, etc.) and to identify the optimal parameter or the optimal set of parameters for soil moisture monitoring over the forested sites under study. For each regression, the correlation coefficient (R) is computed and like several authors a significance test (p-value) is conducted for statistical analyses of the regressions (Bourgeau-Chavez et al., 2013a; Bourgeau-Chavez et al., 2013b; Trudel et al., 2012). For a given risk α , the null hypothesis: H_0 = the radar data (backscattering coefficients, polarimetric parameters) and the soil moisture are independent is tested against the alternative hypothesis: H_1 = the radar data (backscattering coefficients, polarimetric parameters) and the soil moisture are significantly correlated. If the p-value is less than α (here it is considered equal to 5%), the null hypothesis is rejected in favor of the alternative hypothesis and the correlation coefficient of the regression is considered as statistically significant.

4.3 Results interpretation

It is conducted by using the magnitude of the significant correlation coefficients which will allow to compare the potentials of L and C-bands fully polarimetric SAR data for soil moisture monitoring over forest sites, determine for each frequency the added value of fully polarimetric SAR data *vs.* the backscattering coefficients, and finally identify the optimal parameters for soil moisture monitoring over forest sites

5. Results and discussion

Qualitative analysis is first conducted with the temporal profiles of L and C-bands linear and circular backscattering coefficients and those of soil moisture measurements over the least dense site F1 and the densest site F3. It is followed by the analyses of the regressions results developed in Section 4.2.

5.1 Temporal profiles of the linear and circular backscattering coefficients

5.1.1 At L-band using UAVSAR data at 30° and 40°

At L-band, at 30° and 40° incidence angles, the temporal profiles of the linear and circular backscatter coefficients for all polarizations (HH, VV, HV, RR, RL and LL) are similar to that of soil moisture (Fig. 4a and 4b; Fig. 5a and 5b). For both 40° and 30°, HH remains higher than VV over all the sites. Fig. 4a and 5a showed that the difference between HH and VV decreases with an increase in vegetation from F1 to F3 sites. This result is expected and is mainly due to depolarization process which occurs with an increasing volume scattering. While the signals of linear polarisations are well contrasted ($\sigma_{HH}^0 > \sigma_{VV}^0 > \sigma_{HV}^0$), the signals of circular polarizations are close to each other, and much more over the denser F3 site (Fig. 4b and 5b).

In addition, Figs 4 and 5 showed that for F1 and F3 sites, there is almost no difference between the 30° and 40° linear and circular backscattering coefficients. For this reason L-band parameters will be subsequently analysed at only 30°.

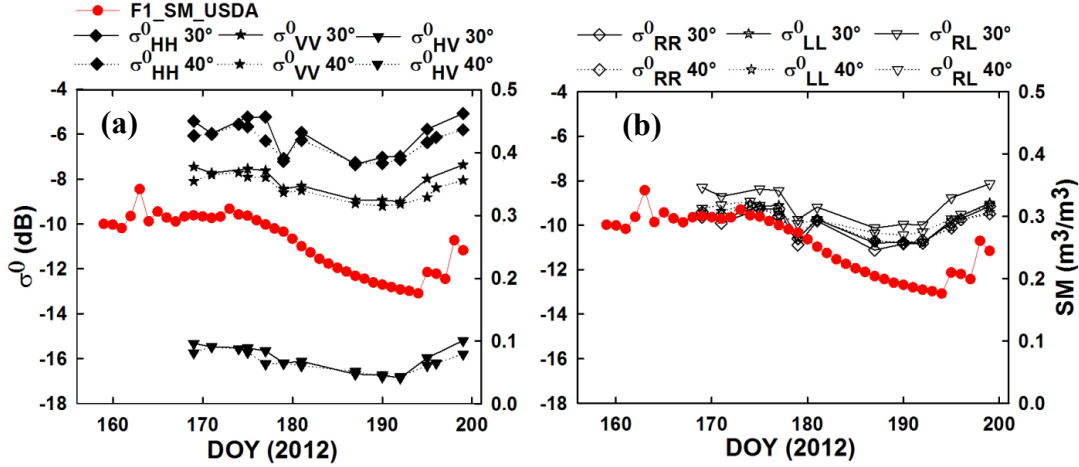


Fig. 4. Temporal profile of L-band linear (HH, VV and HV) and circular (RR, LL and RL) polarizations at $\theta = 30^\circ$ and 40° along with soil moisture over F1.

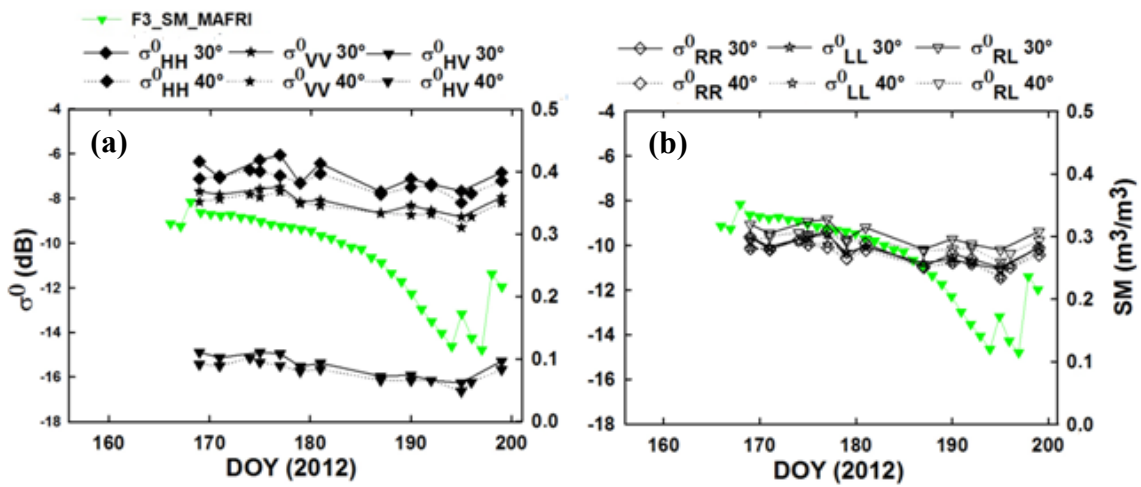


Fig. 5. Temporal profile of L-band linear (HH, VV and HV) and circular (RR, LL and RL) polarizations at $\theta = 30^\circ$ and 40° , along with soil moisture over F3

5.1.2. At C-band using RADARSAT-2 data at 20° , 25° and 30°

In contrast to L-band, at C-band, all linear and circular backscattering coefficients showed small variation with soil moisture (Fig. 6a and 6b). Over F1 site, the variations in the temporal profiles are due to the difference in the incidence angles of RADARSAT-2

images (20°, 25° and 30°, Table 4). However, over F3 site, due to a high volume contribution, the sensitivity of the signal to the incidence angle decreased. At C-band, unlike what was observed at L-band, HH and VV are superimposed even over F1 site. This is a sign of depolarization resulting from a high volume contribution at C-band (Baronti *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 1998; Jeffrey *et al.*, 2014) which reduces the contribution of the interaction term (Fung, 1994). The circular polarizations present different behavior than in L-band. RL is higher than RR and LL. These latter (RR and LL) are superimposed and close to HV, while RL is close to HH and VV (Fig. 6a and 6b). According to Baronti *et al.* (1995), these behaviors are mainly related to vegetation scatterers' characteristics which govern the volume scattering.

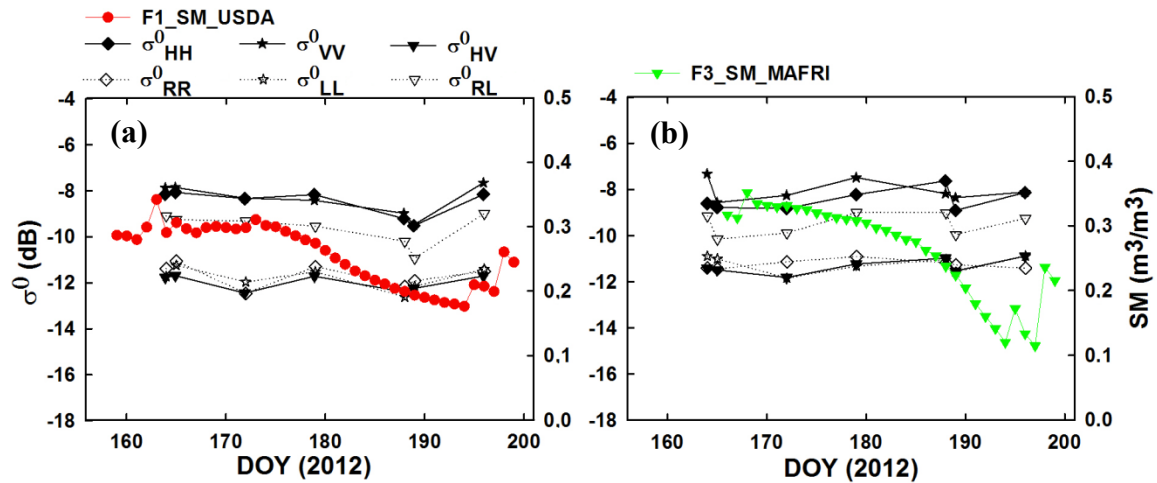


Fig. 6. Temporal profile of C-band linear (HH, VV and HV) and circular (RR, LL and RL) polarizations along with soil moisture over F1 and F3

5.2 Regressions analyses

5.2.1 From L and C-bands backscattering coefficients

Table 6 shows the correlation coefficients between soil moisture and the L-band linear and circular backscattering coefficients acquired at 30° over F1, F2, F3, and F5 sites. In most cases significant correlations are observed (p-value lower than 0.05). Compared to the results obtained over the 3 other sites, F2 presents the low correlation values and the cases of non-significant correlations. This can be explained by the characteristics of F2 site which combine high tree water content value (Table 2) and about 50% of mixed floor cover composed of litter, shrubs, etc. In addition, Table 1 shows that in the UAVSAR look direction, F2 site presents high value of surface rms height, which will contribute to decrease the potential of soil moisture monitoring.

These results are in agreement with Wang *et al.* (1998) who studied the sensitivity of L and C bands backscattering coefficients to ground surface of Duke University forested sites located in North Carolina (United States). The parameters of their model are the litter depth, the litter volumetric moisture, the surface roughness (rms height and correlation length) and the soil moisture. They concluded that at L-band, HH and VV acquisitions between 20° to 40° incidence angle allow the monitoring of soil moisture; at this frequency, the surface rms height acts more on the radar signal than the correlation length which almost doesn't affect the signal. Contrary to our results, they showed slight sensitivity of HV polarization to soil moisture for only low forest biomass observed between 20° and 30° incidence angles. Indeed, in Table 6, HV leads to good and significant correlations with soil moisture even over forest with dense biomass.

Compared to L-band, the correlations of C-band RADARSAT-2 data at 20°, 25° and 30° are low and not significant (Table 7) over the four forested sites. Therefore, the C-band backscattered signal in linear or circular polarizations are not suitable to monitor the soil moisture even over F1 site characterised with low biomass. In accord with several authors (Wang *et al.*, 1998, Freeman and Durden, 1998), the low C-band signal penetration into the canopy and the volume contribution from the biomass reduce the sensitivity of the signal to soil parameters.

Table 6. Correlation coefficients of σ^0 vs. soil moisture at L-band ($\theta = 30^\circ$) for F1, F2, F3 and F5 sites. Non-significant correlations (p-value > 0.05) are underlined

	F1	F2	F3	F5
$\sigma^0_{HH_30^\circ}$	0.60	<u>0.50</u>	0.62	0.82
$\sigma^0_{VV_30^\circ}$	0.78	0.77	0.77	0.96
$\sigma^0_{HV_30^\circ}$	0.80	0.65	0.85	0.94
$\sigma^0_{RR_30^\circ}$	0.64	<u>0.56</u>	0.66	0.84
$\sigma^0_{LL_30^\circ}$	0.68	0.64	0.81	0.88
$\sigma^0_{RL_30^\circ}$	0.69	0.66	0.70	0.92

Table 7. Correlation coefficients of σ^0 vs. soil moisture at C-band for F1, F2 and F3 sites. None of them is significant

	F1	F2	F3
σ^0_{HH}	0.74	0.55	0.30
σ^0_{VV}	0.56	0.58	0.30
σ^0_{HV}	0.31	0.01	0.69
σ^0_{RR}	0.31	0.76	0.84
σ^0_{LL}	0.53	0.21	0.74
σ^0_{RL}	0.63	0.62	0.16

5.2.2 From L and C-bands polarimetric parameters

Freeman-Durden decomposition: Over F1, F2, F3 and F5 sites, Fig. 7 shows increasing relationships between soil moisture and soil contribution (Ps) and soil-vegetation (double bounce) contribution (Pd) at L-band. The slope and the correlations coefficient values of these relationships decrease with the increase in forest biomass; accordingly Table 8 shows no dependence between Ps, Pd and soil moisture over F2 and F3 sites. Indeed, over forest sites with high biomass and high tree water content values (Table 2), a high volume scattering prevents Ps and Pd to monitor soil moisture.

At C-band, while Pd presents significant correlations with soil moisture over F1, F2 and F3 sites (Table 8), Ps doesn't show any potential for soil moisture monitoring. However, these C-band results should be interpreted with caution due to the limitation in the dataset used and in the distribution of soil moisture values over the sites. Indeed, two and three point clouds appear in Fig. 8 for F1 and F3 sites, respectively. They are not enough to account for the high variability (standard deviation) observed in Ps and Pd over a given forested site (Fig. 8).

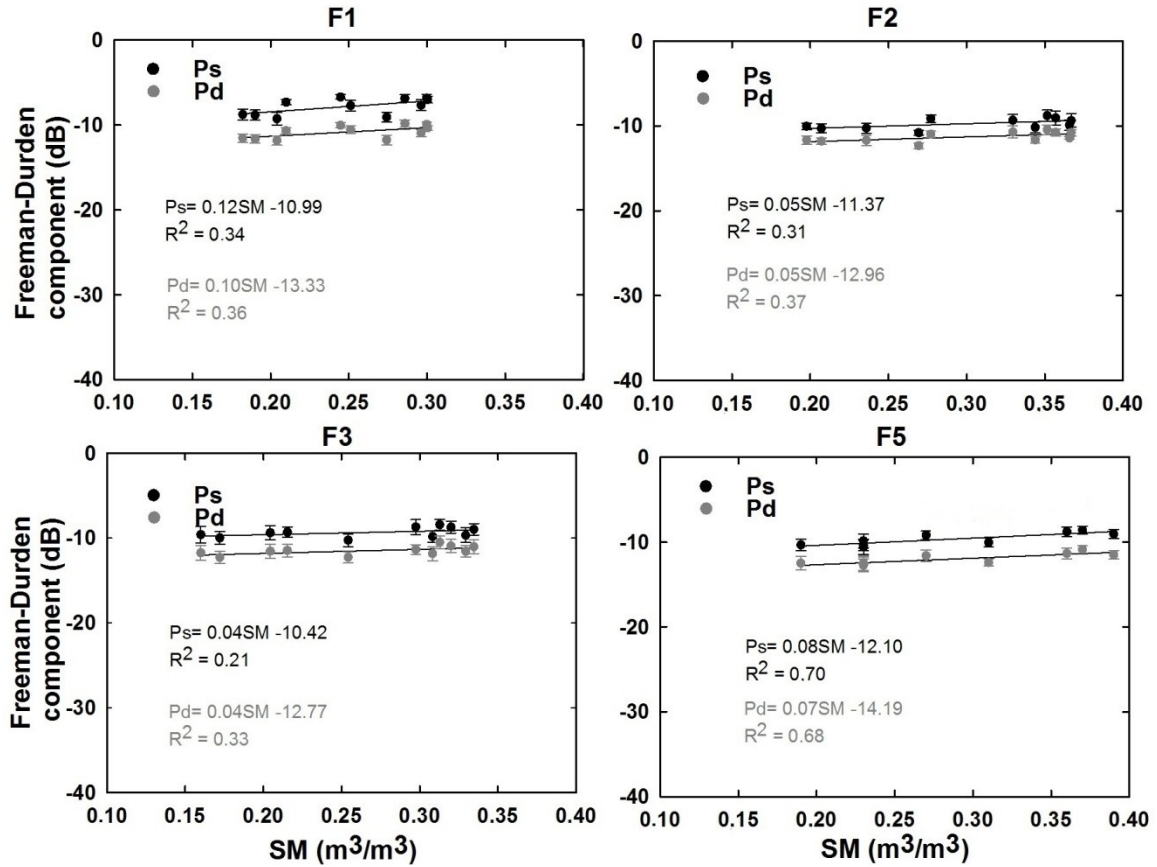


Fig. 7. Ps and Pd vs. the soil moisture at L-band over F1, F2, F3 and F5

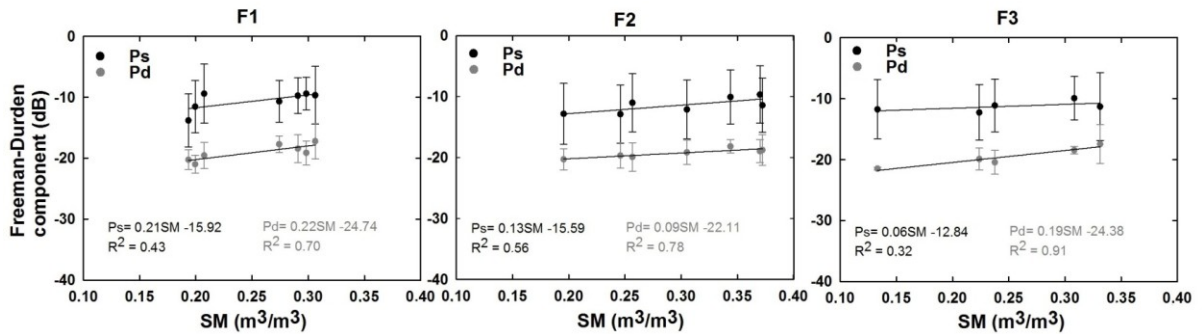


Fig. 8. Ps and Pd vs the soil moisture at C-band over F1, F2 and F3 sites

Table 8. Correlation coefficient of Ps and Pd vs. the soil moisture at L and C-bands for F1, F2, F3 and F5 sites. Significant correlations (p-value < 0.05) are shown with *

	F1	F2	F3	F5
Ps_L_30°	0.59*	0.55	0.46	0.84*
Pd_L_30°	0.60*	0.61*	0.57	0.82*
Ps_C	0.65	0.74	0.56	
Pd_C	0.83*	0.88*	0.95*	

Cloude-Pottier decomposition : For both L and C bands, Cloude-Pottier decomposition parameters (H, A, α) don't provide any significant correlation with soil moisture over all forested sites (Table 9). In fact, in Cloude-Pottier H/ α plan, the scattering mechanisms are mainly located in the volume scattering zone # 5 (Figures 2.9-2.10), leading to low sensitivity of Cloude-Pottier parameters to soil moisture. These results are in agreement with those obtained by Bourgeau Chavez *et al.* (2013a and 2013b) over boreal forest.

Pedestal height at L and C bands

While Bourgeau-Chavez *et al.* (2013b) found a good correlation between the pedestal height and the soil moisture, Table 9 shows that for both L and C bands, the pedestal height is independent of soil moisture over all forested sites.

Correlation coefficient at L and C bands

In some cases, at L-band ($\rho_{HHHV_30^\circ}$ in F2; $\rho_{VVHV_30^\circ}$ in F1, $\phi_{HHHV_30^\circ}$ and $\phi_{HHVV_30^\circ}$ in F3) and C- band (ϕ_{VVHV} , ϕ_{HHVV} in F1 and ϕ_{HHVV} , ϕ_{HHHV} in F3), the amplitude of the

correlation coefficient (ρ) and the phase (ϕ) showed a significant correlation with soil moisture (Table 9). However, the results in C-band should be considered with caution due to the same reason already mentioned about the limitation in the dataset used.

Table 9. Correlation coefficient of polarimetrics parameters to the soil moisture at L-band ($\theta = 30^\circ$) for F1, F2, F3 and F5 sites and at C-band for F1, F2 and F3 sites. Significant correlations (p-value < 0.05) are shown with *

	F1	F2	F3	F5
Pedestal Hight_ L-band	0.31	0.11	0.32	0.44
ρ_{HHHV}_ L-band	0.56	0.61*	0.57	0.02
ρ_{VVHV}_ L-band	0.65*	0.38	0.03	0.53
ρ_{HHVV}_ L-band	0.39	0.28	0.40	0.06
ϕ_{HHHV}_ L-band	0.29	0.33	0.81*	0.30
ϕ_{VVHV}_ L-band	0.03	0.46	0.25	0.06
ϕ_{HHVV}_ L-band	0.26	0.33	0.60*	0.47
Entropie_ L-band	0.35	0.14	0.29	0.48
Alpha_ L-band	0.24	0.16	0.55	0.07
Anisotropie_ L-band	0.12	0.12	0.38	0.27
<hr/>				
Pedestal Hight_ C-band	0.53	0.65	0.14	
ρ_{HHHV}_ C-band	0.07	0.73	0.16	
ρ_{VVHV}_ C-band	0.15	0.33	0.15	
ρ_{HHVV}_ C-band	0.21	0.73	0.58	
ϕ_{HHHV}_ C-band	0.17	0.08	0.96*	
ϕ_{VVHV}_ C-band	0.85*	0.06	0.00	
ϕ_{HHVV}_ C-band	0.90*	0.03	0.90*	
Entropie_ C-band	0.39	0.69	0.14	
Alpha_ C-band	0.37	0.71	0.17	
Anisotropie_ C-band	0.68	0.01	0.30	

Conclusion

In this work, a comparative study was conducted to evaluate the potential of polarimetric L-band (UAVSAR) and C-band (RADARSAT-2) data for soil moisture monitoring over SAMPVEX12 forested sites (Manitoba, Canada). Previous to data analysis, Polarimetric SAR data was 1st processed including a boxcar filtering and geometric corrections. Then the relationships between soil moisture, σ^0 and some polarimetric parameters are analysed. Results showed that: 1) At C-band, soil moisture cannot be monitored using linear or circular backscattering coefficients over SAMPVEX12 forested sites even for the low-biomass site. At L-band, linear or circular backscattering coefficients were in most cases significantly correlated to soil moisture over the forested sites. Therefore, relative to the C-band, this comparative study confirmed the higher potential of the L-band linear and circular backscattering coefficients for soil moisture monitoring over forested sites different from each other. 2) While at L-band ($\theta = 30^\circ$) P_s and P_d showed great potential for soil moisture monitoring over the less denser forested sites (F1 and F5), at C-band the observed weak potential of P_s and the high potential of P_d should be interpreted with caution due to the limitation in the dataset used and in the distribution of soil moisture values over the sites. 3) For both of C and L bands, Cloude-Pottier decomposition parameters (H , A , and α) and the pedestal height show no potential for soil moisture monitoring over SAMPVEX12 forested sites. 4) For the amplitude and the phase of the correlation coefficient, in some cases, they give significant correlations with soil moisture for both L and C bands. 5) Finally, at C-band, the dataset used showed significant relationships between some polarimetric parameters (ϕ_{VVHV} , ϕ_{HHVV} in F1 and ϕ_{HHVV} , ϕ_{HHHV} in F3) and soil moisture.

Therefore compared to σ^0 , the C-band polarimetric parameters provided an added value for soil moisture monitoring. This result is interesting since at C band, σ^0 saturates quickly over forested areas. Although the phases (ϕ_{HHHV} , ϕ_{VVHV} and ϕ_{HHVV}) of the correlation coefficients between multipolarised channels are found to be significantly correlated to soil moisture ($r \sim 0.90$), the developed relationships at C band must be tested over others sites and other datasets. However, compared to σ^0 , the results obtained with the L-band polarimetric parameters did not show any additional or significant contributions for soil moisture monitoring. Based on the results obtained in this study, future works will be devoted to the development of an empirical model, using the identified optimal parameters, for soil moisture estimation over forested sites.

Acknowledgements

This study received the funding of the Canadian Space Agency Class Grant and the Contribution Program as part of the Canadian plan to spatial missions of soil moisture. The authors would like to thank the funding agencies of SMAPVEX12 (NSERC, EC, CSA, AAFC, NASA, USDA) and all the participants to SMAPVEX12.

References

Abbott, K. N., Leblon, B., Staples, G. C., Maclean, D. A., and Alexander, M. E. (2007) Fire danger monitoring using RADARSAT-1 in a northern boreal forest. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, n. 6, p. 1317-1338.

Adams, J. R., Berg, A., McNairn, H., and Merzouki, A. (2013) Sensitivity of C-band SAR polarimetric variables to unvegetated agricultural fields. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 39, p. 1-16.

Anderson, K. and Croft, H. (2009) Remote sensing of soil surface properties. *Progress in Physical Geography*, vol. 33, n. 4, p. 457-473.

Arii, M. (2008) Retrieval of soil moisture under vegetation using polarimetric radar. Thèse de doctorat. California Institute of Technology, Pasadena, CA.

Baghdadi, N., Dubois-Fernandez, P., Dupuis, X., and Zribi, M. (2013) Sensitivity of Main Polarimetric Parameters of Multifrequency Polarimetric SAR Data to Soil Moisture and Surface Roughness Over Bare Agricultural Soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 10, n. 4, p. 731-735.

Baghdadi, N., Cresson, R., Pottier, E., Aubert, M., Mehrez, Z., Jacome, A., and Benabdallah, S. (2012) A potential use for the C-band polarimetric SAR parameters to characterize the soil surface over bare agriculture fields. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, n. 10, p. 3844-3858.

Baronti, S., Del Frate, F., Ferrazzoli, P., Paloscia, S., Pampaloni, P., and Schiavon, G. (1995) SAR polarimetric features of agricultural areas. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, p. 2639-2656.

Bériaux, E., Lambot, S., and Defourny, P. (2011) Estimating surface-soil moisture for retrieving maize leaf-area index from SAR data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 37, no. 1, p. 136-150.

Bourgeau-Chavez, L. L., Leblon, B., Francois, C., and Joseph, R. (2013a) Assessment of polarimetric SAR data for discrimination between wet versus dry soil moisture conditions. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 34, no. 16, p 5709-5730.

Bourgeau-Chavez, L. L., Leblon, B., Francois, C., and Joseph, R. (2013b) Evaluation of polarimetric Radarsat-2 SAR data for development of soil moisture retrieval algorithms over a chronosequence of black spruce boreal forests. *Remote Sensing of Environment*, vol. 132, no. p.71-85.

Bourgeau-Chavez, L. L., Garwood, G., Riordan, K., Cella, B., Alden, S., Kwart, M., and Murphy, K. (2007) Improving the prediction of wildfire potential in Boreal Alaska with Satellite Imaging Radar. *Polar Record*, vol. 43, n. 4, p. 321-330.

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, n. 1, p. 68-78.

Dissanska, M., Paniconi, C., and Bernier, M. (2010) 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 technique no R-1194, réalisé dans le cadre du projet ESA-AO 537.

Entekhabi, D., Njoku E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., Entin, J. K., Goodman, S. D., Jackson, T. J., Johnson, J., Kimball, J., Piepmeier, J. R., Koster, R. D., Martin, N., McDonald, K. C., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J. C., Spencer, M. W., Thurman, S. W., Leung, T., and van Zyl, J. (2010) The soil moisture active passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 5, p. 704-716.

Ferrazoli, P. and Guerriero, L. (1995) Radar sensitivity to tree geometry and woody volume: a model analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, n. 2, p. 360-371.

Freeman, A. and Durden, S. L. (1998) A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, n. 3, p. 963-973.

Fung, A. K. (1994) *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*. Artech House, 573 pages.

Garestier, F., Dubois-Fernandez, P. C., Guyon, D., and Le Toan, T. (2009) Forest biophysical parameter estimating using L-band and P-band polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, n. 10, p. 3379-3388.

Georgakakos, K. P and Baumer, O. W. (1996) Measurement and utilization of on-site soil moisture data. *Journal of Hydrology*, vol. 184, n. 1-2, p. 131-152.

Gherboudj, I., Magagi, R., Berg, A., and Toth, B. (2011) Soil moisture retrieval over agricultural fields from multi-polarized and multi-angular RADARSAT-2 SAR data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, n. 1, p. 33-43.

Global Terrestrial Observing System (GTOS) (2013) GCOS Terrestrial ECV - Soil Moisture, ECV Data Access Matrix, Asheville, NC, <http://www.gosic.org/content/gcos-terrestrial-ecv-soil-moisture>

Goncalves, F., Santos, J., and Treuhaft, R. (2011) Stem volume of tropical forests from polarimetric radar. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 32, n. 2, p. 503-522.

Hajnsek, I., Jagdhuber, T., Schon, H., and Papathanassiou, K.P. (2009) Potential of Estimating Soil Moisture Under Vegetation Cover by Means of PolSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, n. 2, p. 442-454.

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, p. 727-744.

Jagdhuber, T., Hajnsek, I., Bronstert, A., and Papathanassiou, K. P. (2013) Soil Moisture Estimation Under Low Vegetation Cover Using a Multi-Angular Polarimetric Decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, n. 4, p.2201-2215.

Jagdhuber, T., Hajnsek, I., Sauer, S., Papathanassiou, K. P., and Bronstert, A. (2012) Soil Moisture Retrieval under Forest Using Polarimetric Decomposition Techniques at P-Band. *Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, p.709-712.

Jeffrey, W. C., Kovacs, J. M., Shang, J., and Jiao. X. (2014) Multi-Temporal Polarimetric RADARSAT-2 for Land Cover Monitoring in Northeastern Ontario, Canada. *Remote Sensing*, vol. 6, n. 3, p. 2372-2392.

Kim, S. B., van Zyl, J., and Njikou, E. (2013) Retrieval of surface layer soil moisture using time series L-band UAVSAR data. *UAVSAR Workshop*. P,13.

Kirkby, M. J. (2001) Modelling the interactions between soil surface properties and water erosion. *Catena*, vol. 46, n. 2-3, p. 89-102.

Lambert, M. C., Ung, C. H., and Raulier, F. (2005) Canadian national tree aboveground biomass equations. *Can. J. For. Res.* 35:1996-2018.

Lang, R. H., Landry, R., Kilic, O., and Chauhan, N. (1993) Effect of species structure and dielectric constant on C-band forest backscatter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 2, p. 583-586.

Lavoie, M., Paré, D., Fenton, N., Groot, A., and Taylor, K. (2005) Paludification and management of forested peatlands in Canada: a literature review. *Environ. Rev.* vol.13, n. 2, p. 21-50.

Lee, J. S. and Pottier, E. (2009) *Polarimetric radar imaging : from basics to applications*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Lee, J. S and Ainsworth, T. (2008) Evaluation and bias removal of multilook effect on entropy/alpha/anisotropy in polarimetric SAR decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46 (10), pp.3039-3052.

Le Toan, T., Beaudoin, A., Riom, J., and Guyon, D (1992) Relating forest biomass to SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n. 2, p. 403-411.

López-Martínez, C., Alonso-González, A., and Fàbregas, X. (2013) Perturbation Analysis of Eigenvector-Based Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52 (4), pp.2081-2095

Lucas, R., Mitchell, A., and Proisy, C. (2012) The use of Polarimetric AIRSAR (POLSAR) data for characterising mangrove communities. AIRSAR Earth Science and Applications Workshop, 4-6 mars, Pasadena, CA, USA.

McNairn, H., Jackson, T. J., Wiseman, G., Bélair, S., Berg, A., Bullock, P., Colliander, A., Cosh, M. H., Kim, S., Magagi, R., Moghaddam, M., Njoku, E. G., Adams, J. R., Homayouni, S., Ojo, E. R., Rowlandson, T. L., Shang, J., Goïta, K., and Hosseini M. (2015). The Soil Moisture Active Passive Validation Experiment 2012 (SMAPVEX12): Prelaunch Calibration and Validation of the SMAP Soil Moisture Algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, n. 5, p. 2784-2801.

McNairn, H. and Brisco, B. (2004) The application of C-band polarimetric SAR for agriculture: A review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 30, n. 3, p. 525-542.

McNeill, S. and Pairman, D. (2005) Stand age retrieval in production forest stands in New Zealand using C and L-band polarimetric radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.43, n. 11, p. 2503-2515.

Mitchard, E. T. A., Saatchi, S.S., Woodhouse, I. H., Nangendo, G., Ribeiro, N. S., and Williams, M. (2009) Using satellite radar backscatter to predict above-ground woody biomass: A consistent relationship across four different African landscapes. *Geophysical Research Letters*, vol. 36, Article Number. L23401.

Nappi, A. (2013) Paludification. Fascicule 4.9. Dans Bureau du forestier en chef. Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018. Gouvernement du Québec, Roberval, Qc, p. 193-199.

Picard, G. (2002) Modélisation radar des couverts végétaux Applications à la télédétection de couverts forestiers et agricoles. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier, Toulouse.

Pulliainen, J. T., Mikkela, P. J., Hallikainen, M. T., and Konen, J. P. (1996) Seasonal Dynamics of C-Band Backscatter of Boreal Forests with Applications to Biomass and Soil Moisture Estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, n. 3, p. 758-770.

Pulliainen, J. T., Hari, P., Hallikainen, M. T., Patrikainen, N., Perämäki, M., and Kolari, P. (2004) Monitoring of soil moisture and vegetation water content variations in boreal forest from C-band SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 2, p. 1013-1016.

Praks, J., Koeniguer, E. C., and Hallikainen, M. T. (2009) Alternatives to Target Entropy and Alpha Angle in SAR Polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, n. 7, p. 2262-2273.

Rauste, Y. (2005) Multi-temporal JERS SAR data in boreal forest biomass mapping. *Remote Sensing of Environment*, vol. 97, n. 2, p. 263-275.

Ressources naturelles Canada (2014) Calcul de la biomasse et des nutriments. Gouvernement du Canada, <https://apps-scf-cfs.rncan.gc.ca/calc/fr/calculateur-calculator>

Rignot, E., Way, J. B., McDonald, K. L., Viereck, L., Williams, C., Adams, P., Payne, C., Wood, W., and Shi. J. (1994). Monitoring of Environmental Conditions in Taiga Forests Using ERS-1 SAR. *Remote Sensing Environment*, vol. 49, p. 145-154.

Romkens, M. J. M., Helming, K., and Prasad, S. N. (2001) Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness and soil water regimes. *Catena*, vol. 46, n. 2-3, p. 103-123.

Santos, J. R., Lacruz, M. S. P., Araujo, L. S., and Keil, M. (2002) Savanna and tropical rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, n. 7, p. 1217-1229.

Silva, A. M. T. and Dias, J. M. B. (1997). The effect of forest understory on synthetic aperture Radar Backscatter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 2, p. 773 -777.

Skriver, H., Svendsen, M. T., and Thomsen, A. G. (1999) Multitemporal C- and L-band polarimetric signatures of crops. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, n. 5, p. 2413-2429.

Sokol, J., McNairn, H. and Pultz, T. J. (2004) Case studies demonstrating the hydrological applications of C-band multipolarized and polarimetric SAR. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 30, n. 3, p. 470-483.

Tabatabaenejad, A., Burgin, M., and Moghaddam, M. (2012) Potential of L-Band Radar for Retrieval of Canopy and Subcanopy Parameters of Boreal Forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, n. 6, p. 2150-2160.

Troch, P. A., Paniconi, C., and McLaughlin, D. (2003) Catchment-scale hydrological modeling and data assimilation. *Advances in Water Resources*, vol. 26, n. 2, p. 131-135.

Trudel, M., Charbonneau, F., and Leconte, R. (2012) Using RADARSAT-2 polarimetric and ENVISAT-ASAR dual-polarization data for estimating soil moisture over agricultural fields. *Can. J. Remote Sensing*, vol. 38, n. 4, p. 514-527.

Touzi, R., Goze, S., LeToan, T., Lopes, A., and Mougin, E. (1992) Polarimetric discriminators for SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n. 5, p.973-980.

Touzi, R., Deschamps, A., and Rother, G. (2007) Wetland characterization using polarimetric RADARSAT-2 capability. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 33, n.1, p. 56-S67.

Tsolmon, R., Tateishi, R., and Tetuko, J. S. S. (2002). A method to estimate forest biomass and its application to monitor Mongolian Taiga using JERS-1 SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, n. 4, p. 971-978.

Van Zyl, J. J., Arii, M., and Kim, Y. (2011). Model-based decomposition of polarimetric SAR covariance matrices constrained for nonnegative eigenvalues. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, n. 9, p. 3452-3459.

Wagner, W., Blöschl, G., Pampaloni, P., Calvet, J. C., Bizzarri, B., Wigneron, J. P., and Kerr, Y. (2007) Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications. *Nordic Hydrology*, vol. 38, n. 1, p.1-20.

Wang, Y., Day, J. L., and Davis, F. W. (1998) Sensitivity of modeled C- and L-band radar backscatter to ground surface parameters in loblolly pine forest. *Remote Sensing Environment*, vol. 66, n. 3, p. 331-342.

Wang, Y., Hess, L. L., Filoso, S., and Melack, J. M. (1995) Understanding the Radar Backscattering from Flooded and Non flooded Amazonian Forests: Results from Canopy Backscatter Modeling. *Remote Sensing Environment*, vol. 54, n. 3, p.324-332.

Ziadat, M. and Taimeh, A. Y. (2013) Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment. *Land degradation and development*, vol.24, p.582-590.

Chapitre 5

Conclusion

Dans ce travail, l'objectif principal était l'évaluation du potentiel de données polarimétriques en bandes L (UAVSAR) et C (RADARSAT-2) pour le suivi de l'humidité du sol dans les sites forestiers de SAMPVEX12 localisés au Manitoba (Canada). Il s'agissait d'étudier l'efficacité de la polarimétrie radar en bandes L et C pour le suivi de l'humidité du sol sur divers couverts forestiers, différents de par leur densité, biomasse, sous-bois, etc. Pour y arriver, la méthodologie utilisée est la suivante 1) un prétraitement des images incluant un filtrage (filtre boxcar) et les corrections géométriques, 2) une extraction des paramètres polarimétriques, 3) des calculs statistiques et 4) une interprétation des résultats obtenus.

Le résultat marquant du présent travail se trouve dans l'identification de certains paramètres radar qui permettent de mieux suivre l'humidité du sol en zone forestière en bandes L et C. En bande L (30° d'angle d'incidence), il a été montré que plusieurs paramètres optimaux permettent le suivi de l'humidité du sol, dont le signal rétrodiffusé tant pour les polarisations linéaires que circulaires. En polarimétrie radar bande L, P_s et P_d permettent le suivi de l'humidité du sol uniquement dans les forêts à faible taux de biomasse. Aussi, l'étude d'autres paramètres polarimétriques (coefficient de corrélation (ρ , φ), H , α , A) et la hauteur de socle) a révélé que certains d'entre eux ont un potentiel

pour le suivi de l'humidité du sol en bande L. En bande C, en raison de la faible profondeur de pénétration du signal, la biomasse en zone forestière reste toujours un obstacle pour le suivi de l'humidité du sol à partir des signaux conventionnels multipolarisés d'amplitude et de paramètres polarimétriques. En revanche, certains paramètres polarimétriques (ϕ_{HHHV} , ϕ_{VVHV} et ϕ_{HHVV}) ont montré une valeur ajoutée par rapport aux signaux conventionnels multipolarisés d'amplitude, pour le suivi de l'humidité du sol.

En récapitulant, notre objectif d'identification des paramètres optimaux permettant le suivi de l'humidité du sol en zone forestière est réalisé. Concernant nos hypothèses prédéfinies, nous avons vérifié que le signal en bande L est plus sensible à l'humidité du sol que celui en bande C grâce à son importante profondeur de pénétration dans la canopée de la forêt. Toutefois, l'hypothèse basée sur le fait que les données entièrement polarimétriques permettent de mieux suivre l'humidité du sol est seulement vérifiée en bande C. En effet, les résultats obtenus avec les paramètres polarimétriques en bande L sont bien en deçà de ceux obtenus avec les coefficients de rétrodiffusion multipolarisé.

Références (Hors article)

Anderson, W. B., Zaitchik, B. F., Hain, C.R., Anderson, M. C., Yilmaz, M. T., Mecikalski, J., and Schultz, L. (2012) Towards an integrated soil moisture drought monitor for East Africa. *Hydrology and earth system sciences*, vol.16, p. 2893 - 2913.

Brocca, L., Moramarco, T., Melone, F., Wagner, W., Hasenauer, S., and Hahn, S. (2012) Assimilation of Surface- and Root-Zone ASCAT Soil Moisture Products Into Rainfall-Runoff Modeling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.50, p.2542-2555.

Bonn, F. and Rochon, G. (1992) *Précis de télédétection*, vol. 1: Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec, Sillery, 485 pages.

Carlson, T. N., Ripley D. A. J., and Schmugge, T. J. (2004) Rapid soil drying and its implications for remote sensing of soil moisture and the surface energy fluxes. *Thermal remote sensing in land surface processes*, p. 440. ISBN 0-203-57286-6.

Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Le Toan, Beaudoin, A., Kasischke, E. S., and Christensen, N. (1992) Dependence of Radar Backscatter on Coniferous Forest Biomass. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n. 2, p. 412-415.

Durden, S.L., van Zyl, J. J., and Zebker, H. A. (1990) Unpolarized component in polarimetric radar observations of forested areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 2, p. 268-271.

Engman, E. T. and Chauhan, N. (1995) Status of Microwave Soil Moisture Measurements with Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment*, vol. 51, n. 1, p. 189-198.

Fang, C. and Wen, H. (2005) A New Classification Method Based on Cloude-Pottier Eigenvalue/eigenvector Decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 1, p. 296-299.

Fang, C., Wen, H., and Yirong, W. (2006) An Improved Cloude-Pottier Decomposition Using H/α /SPAN and Complex Wishart Classifier for Polarimetric SAR Classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, p. 1-4.

Harrell, P. A., Bourgeau-Chavez, L. L., Kasischke, E. S., French, N. H. F., and Christensen, N. L. (1995) Sensitivity of ERS-1 and JERS-1 radar data to biomass and stand structure in Alaskan boreal forest. *Remote Sensing of Environment*, vol. 54, n. 3, p. 247-260.

Hong, M. G, Jeong, I. K., Choi, J., and Kim, C. (2012) Mapping of ALOS PALSAR σ_0 -based forest stem volume classification map. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, p.6523-6529.

Ishida T, Ando H., and Fukuhara M. (1991). Estimation of complex refractive index of soil particles and its dependence on soil chemical properties. *Remote Sensing of Environment*, vol.38, p. 173–182.

Kim, S. B., Moghaddam, M., Tsang, L., Burgin, M., Xu, X., and Njoku, E. G. (2014) Models of L-Band Radar Backscattering Coefficients Over Global Terrain for Soil Moisture Retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, n°2, p. 1381- 1396.

Liu, S. F., Liou, Y. A., Wang, W. J., Wigneron, J. P., and Lee, J. B. (2002) Retrieval of crop biomass and soil moisture from measured 1.4 and 10.65 brightness temperatures, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, p. 1260– 1268.

Lobell D. B. and Asner, G. P. (2002) Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 66, p. 722–727

McNairn, H., Shang J., Champagne, C., and Jiao, X. (2009) TERRASAR-X and RADARSAT-2 for crop classification and acreage estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* ,vol. 2, p.898 -901

Merzouki, A., McNairn, H., and Pacheco, A. (2011) Mapping Soil Moisture Using RADARSAT-2 Data and Local Autocorrelation Statistics. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 4, no.1, p.128-137.

Moghaddam, M., Saatchi, S., and Cuenca, R. H. (2000) Estimating subcanopy soil moisture with radar. *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, p. 14899-14911.

Moghaddam, M. and Saatchi, S. (1999) Monitoring tree moisture using an estimation algorithm applied to SAR data from BOREAS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37, n. 2, p. 901-916.

Pidwirny, M. (2006). *Fundamentals of Physical Geography*. Chap. 8, The Hydrologic Cycle, 2nd Edition, <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8b.html>

Pullianen, J. T., Manninen, T., and Hallikainen M. T. (1998) Application of ERS-1 Wind Scatterometer Data to Soil Frost and Soil Moisture Monitoring in Boreal Forest Zone. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, n. 3, p. 849-863.

Qi, Z., Yeh, A. G., Li, X., and Lin, Z. (2012) A novel algorithm for land use and land cover using RADARSAT-2 polarimetric SAR data. *Remote Sensing Environment*, vol. 118, p. 21-39.

Shortt, R., Verhallen, A., and Fisher, P. (2011) Surveiller l'humidité du sol pour améliorer les décisions d'irrigation. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/11-038.htm>

Ulaby, F.T., Dubois, P. C, and van Zyl, J. (1996) Radar mapping of surface soil moisture. *J Hydrol*, vol.184, n. 1-2, p.57-84.

Wang H., Magagi R., Goita K., Jagdhuber T. and Hajnsek I. (2016) Evaluation of Polarimetric Decomposition for Soil Moisture Retrieval over Vegetated Agricultural Fields. *Remote Sensing*, vol. 8, n. 2, p. 142.

Wang, S., Pei, J., Liu, K., Zhang, S, and Chen, B. (2011) Unsupervised classification of POLSAR data based on the polarimetric decomposition and the co-polarization ratio. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, p. 424-427.

Wang, Y., Kasischke, E. S., Melack, J. M., Davis, F. W., and Christensen, N. L. (1994) The Effects of Changes in Loblolly Pine Biomass and Soil Moisture on ERS-1 SAR Backscatter. *Remote Sensing Environment*, vol. 49, p.25-31.

Wen, Y., Zou, T. Y., Sun, H., and Xu, X. (2008) Improved Unsupervised Classification Based on Freeman-Durden Polarimetric Decomposition. *Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, p. 1-4.

Xue H. and Ni S. (2006). Progress in the study on monitoring of soil moisture with thermal infrared remote sensing, *Agricultural Research in the Arid Areas*, vol. 24, p. 168–172.

Bibliographie

Alberga, V. (2007) A study of land cover classification using polarimetric SAR parameters. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, no 17, p. 3851_3870.

Arii, M., van Zyl, J. J., and Kim, Y (2010). A General Characterization for Polarimetric Scattering From Vegetation Canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.48, no.9, p.3349-3357.

Baghdadi, N., Boyer, N., Todoroff, P., El Hajj, M., and Bégué, A. (2009) Potential of SAR sensors TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS for monitoring sugarcane crops on Reunion Island. *Remote Sensing of Environment*, p.1724–1738.

Baghdadi, N., Bruand, A., Zribi, M., King, C., and Holah, N. (2005) Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote Sensing of Environment*, p.78–86.20

Baghdadi, N., Holah, N., and Zribi, M. (2006) Soil moisture estimation using multi-incidence and multi-polarization ASAR data. *International Journal of Remote Sensing*, p.1907–1920.

Boerner, W., Mott, H., Lueneburg, E., Livingstone, C., Brisco, B., Brown, R. J., and Paterson, J. S. (1998) Polarimetry in radar remote sensing : Basic and applied concepts. In: F. M. Henderson & A. J. Lewis eds. *Manual of remote sensing: Principles and applications of imaging radar*, vol. 2. New York, John Wiley & Sons, p.271–357.

Bourgeau-Chavez, L. L., Kasischke, E. S., Brunzell, S. M., Mudd, J. P., Smith, K. B., and Frick, A. L (2001) Analysis of space-borne SAR data for wetland mapping in Virginia riparian ecosystems. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.22, no.18, p.3665-3687.

Clark, R. B., Creed, I. F., and Sass, G. Z (2009). Mapping hydrologically sensitive areas on the Boreal Plain: a multitemporal analysis of ERS synthetic aperture radar data. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.30, no.10, p.2619-3635.

Dobson, M. C. and Ulaby, F. T. (1998) Mapping Soil Moisture Distribution With Imaging Radar. In: F. M. Henderson et A. J. Lewis eds. *Manual of remote sensing: Principles and applications of imaging radar*, vol. 2. New York, John Wiley et Sons, p.407-433.

Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Pierce, L. E., Sharik, T. L., Bergen, K. M., Kellndorfer, J., Kendra, J. R., Li, E., Lin, Y. C., Nashashibi, A., Sarabandi, K., and Siqueira, P (1995) Estimation of Forest Biophysical Characteristics in Northern Michigan with SIR-C/X-SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.33, no.4, p.877-895.

Freeman, A. (2007) Fitting a Two-Component Scattering Model to SAR data from forest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.45, no.8, p.2583-2592.

Gherboudj, I., Magagi, R., and Goita, K. (2012) Validation of SMOS data over agricultural and boreal forest areas in Canada. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, p.1623-1635.

Guissard, A. (1994). Mueller and Kennaugh matrices in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.32, no.3, p.590-597.

Hess, L. L., Melack, J. M., and Simonett, D. S (1990) Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, no.7, p.1313-1325.

Imhoff, M. L (1995) Radar Backscatter and Biomass Saturation: Ramification for Global Biomass Inventory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, p.511-518.

Jiao, X., McNairn, H., Shang, J., Pattey, E., Liu, J., and Champagne, C. (2011) The sensitivity of RADARSAT-2 polarimetric SAR data to corn and soybean leaf area index. *Canadian Journal of Remote Sensing*, pp.69-81.

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, p.1868-1873.

Kerr, Y. H. (2006) Soil moisture from space: Where are we? *Hydrogeology Journal*, p.117-120.

Kim, Y., Member, S., and van Zyl, J. J. (2009) A Time-Series Approach to Estimate Soil Moisture Using Polarimetric Radar Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, p.2519–2527.

Lee, J. S., Jurkevich, L., Dewaele, P., Wambacq, P., and Oosterlinck, A (1994) Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review. *Remote Sensing Review*, vol.8, no.4, p.313-340.

Lopes, A., and Sery, F. (1997) Optimal speckle reduction for the product model in multilook polarimetric SAR imagery and the Wishart distribution. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, no.3, p. 632-647.

Mattia, F., Le Toan, T., Souyris, J.-C., De Carolis, G., Floury, N., Posa, F., and Pasquariello, G. (1997) The effect of surface roughness on multifrequency polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, no 4, p. 954-966.

McNairn, H., Duguay, C., Brisco, B., and Pultz, T. J. (2002) The effect of soil and crop residue characteristics on polarimetric radar response. *Remote Sensing of Environment*, vol. 80, no 2, p. 308-320.

Moghaddam, M., McDonald, K., Cihlar, J., and Chen, W. (2003) Mapping Wetlands of the North American Boreal Zone from Satellite Radar Imagery. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 21-25 July, Toulouse, France, vol.1, p.261-263.

Proisy, C., Mougín, E., Fromard, F., and Karam, M. A (2000) Interpretation of polarimetric radar signature of mangrove forest. *Remote Sensing of Environment*, vol.71, p.56-66.

Touzi, R., and Charbonneau, F. (2002) Characterization of target symmetric scattering using polarimetric SARs. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.40, no.11, p.2507-2516.

Touzi, R., and Charbonneau, F. (2004). PWS: a friendly and effective tool for polarimetric image analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol.30, no.3, p.566-57.

Touzi, R., Boerner, W. M., Lee, J. S., and Lueneburg, E. (2004) A review of polarimetry in the context of synthetic aperture radar: concepts and information extraction. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. no.3, p.380-407.

Touzi, R. (2007) Speckle effect on polarimetric target scattering decomposition of SAR imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol.33, no.1, p.60-68.

Ulaby, F. T., Held, D., Dobson, M. C., McDonald, K. C., and Senior, T. B. A. (1987) Relating Polarization Phase Difference of SAR Signals to Scene Properties. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-25, no.1, p.83-92.

van Zyl, J. (1989) Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 27, no 1, p. 36-45.