

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre - Eau Terre Environnement

**ÉVALUATION DE L'APPORT DES DONNÉES
POLARIMÉTRIQUES RADARSAT-2 POUR LE SUIVI DE
L'HUMIDITÉ DU SOL ET LA CLASSIFICATION DES
STRUCTURES INTERNES DES TOURBIÈRES**

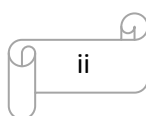
par
Messari Ouail

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Examineur externe	Samuel Corgne Université de Rennes II Service Géographie
Examineur interne	Alain N. Rousseau Institut National de la Recherche Scientifique Centre Eau Terre Environnement
Directrice de recherche	Monique Bernier Institut National de la Recherche Scientifique Centre Eau Terre Environnement
Co-directeur de recherche	Ahmed Erraji Centre Royal de Télédétection Spatiale Service Cartographie et Aménagement
Co-directeur de recherche	Andrès Jacome Financière agricole du Québec Développement international

© *Tous les droits sont réservés exclusivement à Messari Ouail, 2016.*



REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été effectué au sein du laboratoire de télédétection du centre INRS-ETE dans le cadre de la convention entre l'Institut Supérieur des Hautes Études en Développement Durable (ISHÉDD) et l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS).

Mes remerciements vont tout d'abord à Monsieur Kamal EL HAJI, directeur général de l'ISHÉDD, puisque toute cette aventure part de lui à l'origine. Merci de m'avoir fait confiance, de m'avoir lancé dans ce domaine et dans ce travail.

Je tiens à remercier également la professeure Monique Bernier qui m'a accepté comme étudiant gradué pendant la durée de la réalisation. Merci pour votre disponibilité, votre enthousiasme, vos commentaires constructifs, votre efficacité et vos soutiens scientifique et financier.

Je remercie Andrès Jacome (Ph.D.) pour son implication dans mon projet de maîtrise comme co-directeur. Cette maîtrise découle de travaux de recherche qu'il avait initiés durant un stage postdoctoral à l'INRS-ETE.

Je remercie l'Agence spatiale canadienne (ASC) pour sa contribution à l'aboutissement de cette recherche, en rendant accessible au projet Aqualyse, des données RADARSAT-2 par l'intermédiaire du programme SOAR, rien de ceci n'aurait été possible sans vous.

Je tiens à remercier également Jimmy Poulin, assistant de recherche à l'INRS-ETE, pour sa gentillesse et son soutien technique et Anas El Alem, stagiaire postdoctoral à l'INRS-ETE, pour les discussions scientifiques que nous avons eues durant cette recherche.

Mes remerciements s'adressent à mes parents ainsi que mon frère et ma sœur qui tiennent une place spéciale dans mon cœur, ceux-ci ont toujours cru en moi et m'ont encouragé tout au long de mes études. C'est grâce à vous que je suis ce que je suis maintenant. Qu'Allah vous protège.

Finalement, je veux remercier tous ceux qui ont contribué à leur façon à ce travail.

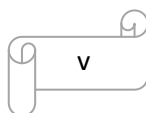
Dans la nature, tout a toujours une raison.

Si tu comprends cette raison, tu n'as plus

besoin de l'expérience

L. DE VINCI (1452 - 1519)

A mes ami(e)s



RÉSUMÉ

Le bassin versant La Grande se situe dans le nord-ouest du Québec. Le fleuve La Grande se jette dans la Baie de James (Québec, Canada). C'est aussi un complexe hydroélectrique générant environ 40% des besoins en électricité du Québec.

Les tourbières couvrent près de 20 % de l'environnement terrestre de ce bassin versant. Une compréhension de la dynamique hydrologique des écosystèmes des tourbières boréales est nécessaire afin de mieux gérer la productivité annuelle de l'hydroélectricité du complexe de La Grande. En raison de la grande dimension du bassin, il est impératif de développer des techniques de télédétection pour récupérer les paramètres hydrologiques.

Dans le cadre d'un projet de recherche sur l'humidité du sol des tourbières boréales du bassin versant de La Grande à la Baie de James, la télédétection radar multipolarisation a été exploitée afin d'évaluer son potentiel pour faire le suivi de l'humidité du sol dans les structures internes des tourbières. Pour ce faire, un ensemble de 36 images RADARSAT-2 ont été acquises en mode Quad-Pol Fin sur deux saisons végétatives de mai à octobre 2009 et 2010. Ces images ont été centrées sur deux tourbières nommées Abeille et Chenille. Un des objectifs du projet consistait à évaluer le potentiel de la polarimétrie radar, d'une part, divers paramètres polarimétriques ont été extraits de ces images RADARSAT-2 et ont été comparés avec des données d'humidité du sol recueillies sur le terrain lors de l'acquisition des images.

Les paramètres polarimétriques H (entropie), A (anisotropie), l'angle α et l'angle α_1 ont été évalués lors de cette étude. Le paramètre α_1 a indiqué une forte sensibilité à l'humidité de la surface du sol avec un coefficient de détermination R^2 de l'ordre de 0.77, ainsi qu'une dominance quasi-totale de la diffusion de surface avec une valeur de l'angle α inférieure à 45° pour toute la période d'étude. Cette étude a confirmé que le paramètre α_1 peut aussi être utilisé pour le suivi de l'humidité du sol en surface des tourbières à une profondeur de 5 cm.

Afin de délimiter les structures internes des tourbières (aquatiques, semi aquatiques et terrestres) et d'en suivre les changements saisonniers et interannuels, une approche de classification orientée-objets a aussi été mise en place. Une segmentation de l'image en objets homogènes, en se basant sur l'algorithme de *segmentation multirésolution*, a été

utilisée, suivi d'une *création hiérarchique des classes* thématiques, d'une classification hiérarchique et finalement, la validation des résultats obtenus. Les résultats obtenus montrent la capacité des données polarimétriques à bien délimiter les milieux humides (les tourbières), avec une précision estimée de 91%.

Mots clés : Tourbières boréales, télédétection, milieux humides, surveillance, humidité du sol, structures internes des tourbières, RADARSAT-2, paramètres polarimétriques, entropie, anisotropie, angle alpha, orientée-objets, segmentation multirésolution, classification, classification hiérarchique.

ABSTRACT

The River basin located in northern Quebec, Canada drains into James Bay. It is part of a hydroelectric complex generating about 40% of Quebec's demand in electricity.

Peatlands cover about 20% of the basin. Understanding the hydrological dynamics of boreal peatlands ecosystems is important to further improve the management of the annual hydroelectric production. Due to the large size of the basin, it is imperative to develop remote sensing monitoring techniques to assess key hydrological parameters.

As part of a research project on soil moisture in boreal peatlands located in the La Grande River basin, multipolarization radar remote sensing has been exploited to assess its potential to monitor soil moisture of the peatlands' internal structures. To do this, a set of 36 RADARSAT-2 Quad-pol and Fine images were acquired during two growing seasons from May to October 2009 and 2010. These images were centered on two peatlands referred to by the research team as the 'Abeille' and 'Chenille'. One of the project objectives was to evaluate the potential of radar polarimetry. First, various polarimetric parameters extracted from the RADARSAT-2 images were compared with soil moisture data collected in the field during the overpass of the satellite.

The potential of polarimetric parameters, the entropy (H), the anisotropy (A), the angle α and the angle α_1 , were analyzed in this study. The results revealed that the parameter α_1 indicated a strong sensitivity to soil moisture with a coefficient of determination R^2 equals to 0,77 and a near-total dominance of surface diffusion with an angle α below 45° for the entire study period. This study confirmed the usefulness of parameter α_1 to monitor soil moisture the surface of peatlands to a thickness of 5 cm.

To delineate the internal structures of peatlands (aquatic, semi aquatic and terrestrial) and to monitor seasonal and inter-annual changes, an object-oriented classification approach was also introduced. A segmentation of the image into homogeneous objects, based on a multi-resolution segmentation algorithm, was used, followed by a hierarchical construction of thematic classes, then a hierarchical classification, and finally validation. The results show the ability of polarimetric data to delineate wetlands, with an estimated accuracy of 91%.

Keywords : boreal peatlands, remote sensing, wetland monitoring, soil moisture, internal structures of peatlands, RADARSAT-2 polarimetric parameters, entropy, anisotropy, alpha angle, object-oriented, multi-resolution segmentation, classification, hierarchical classification.

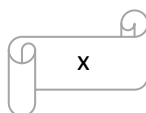


TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	vii
ABSTRACT.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xv
LISTE DES FIGURES	xvii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES	xx
CHAPITRE 1	1
INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Région d'étude.....	2
1.3 Problématique	3
1.5 Objectifs.....	5
CHAPITRE 2	7
CONTEXTE THÉORIQUE	7
2.1 Introduction :	7
2.2 Les tourbières.....	7
2.2.1 Distribution	7
2.2.2 Formation.....	11
2.2.2.1 Formation par comblement :	11
2.2.2.2 Formation par paludification :	13
2.2.3 Types de tourbières	13
2.2.4 Hydrologie des tourbières	14
2.3 Télédétection radar.....	16
2.3.1 La fréquence et les bandes radar :	19
2.3.2 Le capteur RADARSAT-2.....	21
2.4 Les images polarimétriques SAR	23
2.4.1 Les théorèmes de décompositions polarimétriques	24
2.4.1.1 Décompositions cohérentes	25
2.4.1.2 Décompositions incohérentes.....	26
2.4.1.2.1 Entropie (H).....	27
2.4.1.2.2 Anisotropie (A)	27

2.4.1.2.3	Angle α	28
2.4.1.2.4	Angle αl	28
2.5	Classification des données satellitaires radar à l'aide de l'approche orientée-objets	30
2.5.1	Segmentation	31
2.5.2	Classification de l'image	32
2.6	Conclusion	33
CHAPITRE 3		35
MÉTHODOLOGIE		35
3.1	Introduction.....	35
3.2	Zone d'étude.....	35
3.3	L'analyse de la relation entre les paramètres polarimétriques et les paramètres de surface (l'humidité du sol)	39
3.4	Classification orientée-objets des images polarimétriques RADARSAT-2..	46
3.4.1	Segmentation multi-résolution.....	48
3.4.1.1	Le poids des bandes spectrales	49
3.4.1.2	L'échelle d'observation	49
3.4.1.3	La composition du critère d'homogénéité	49
3.4.2	Création hiérarchique des classes	50
3.4.3	Sites d'entraînement	53
3.4.4	Classification de l'image	54
3.4.5	Validation de la classification.....	54
3.5	Production de cartes de variations de l'humidité entre 2009 et 2010 à la surface des tourbières	55
3.6	Conclusion	56
CHAPITRE 4		57
RÉSULTATS ET DISCUSSION		57
4.1	Introduction.....	57
4.2	Évaluation du potentiel des données polarimétriques pour la surveillance de l'humidité	57
4.1.1	Comportement de la rétrodiffusion en fonction de l'humidité.....	57
4.1.2	La relation des paramètres polarimétriques avec l'humidité.....	63
4.3	Classification orientée-objets des images polarimétriques RADARSAT-2..	66

4.4 Production de cartes représentant les variations de l'humidité à la surface des tourbières entre 2009 et 2010.....	70
4.4.1 Validation croisée du modèle	72
4.5 Conclusion	75
CHAPITRE 5	77
CONCLUSIONS GÉNÉRALES	77
RÉFÉRENCES.....	79
ANNEXE A.....	87
ANNEXE B.....	91
ANNEXE C.....	93
ANNEXE D.....	103

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Bandes, fréquences et longueurs d'onde utilisés en télédétection radar ainsi que leur profondeur approximative de pénétration du sol (tiré de (Rochon & Bonn, 1992) et (Henderson & Lewis, 1998)).	19
Tableau 2 : Les bandes utilisées par les différents satellites radar.	21
Tableau 3 : Les caractéristiques principales du satellite RADARSAT- 2 (tirée du site web de l'agence spatiale canadienne : http://www.asc-csa.gc.ca).	22
Tableau 4 : Attributs utilisés lors de la classification orientée-objet.	32
Tableau 5 : Tableau représentant les caractéristiques des images RADARSAT-2 utilisées.	42
Tableau 6 : Les décompositions polarimétriques calculées ainsi que leurs paramètres extraits des images RADARSAT-2.	43
Tableau 7 : Tableau représentant la description des classes trouvées à partir du premier niveau de segmentation de l'image RADARSAT-2.	51
Tableau 8 : Tableau représentant la description des classes utilisées pour le deuxième niveau de segmentation de l'image RADARSAT-2.	52
Tableau 9 : Nombre de sites d'entraînement choisis pour chaque classe.	53
Tableau 10 : La matrice de confusion pour la classification du niveau (Classe), dérivée des images RADARSAT-2.	69
Tableau 11 : Distribution des erreurs de l'humidité de surface du sol pour chaque date d'étude et pour l'ensemble des tourbières étudiées.	73
Tableau 12 : Données de terrain de l'humidité de la surface du sol pour chacune des tourbières du 17 août au 17 septembre 2010.	93
Tableau 13 : Résultats des mesures de l'humidité de la surface du sol ainsi que coefficients de rétrodiffusion pour chacune des tourbières du 17/08/2010 au 17/09/2010.	96
Tableau 14 : Données terrains de l'humidité de la surface du sol et les paramètres polarimétriques extraits des images RADARSAT-2.	99

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : La localisation du bassin versant "La Grande" dans la province de Québec (Canada) (Tirée de Jacome <i>et al.</i> (2013)).	2
Figure 2 : Carte du pourcentage de la superficie des tourbières par pays	8
Figure 3 : Carte de distribution des tourbières au Canada (tirée de (Tarnocai <i>et al.</i> ,2011)).	9
Figure 4 : Carte de répartition des principaux types de tourbières au Québec-Labrador (tirée de Payette et Rochefort, 2001).	10
Figure 5 : Dessin représentant les stades d'entourbement d'un lac par le procédé de comblement (modifiée de Payette et Rochefort, 2001).	12
Figure 6 : Les composantes hydrologiques du bilan d'une tourbière ombrotrophe (Inspirée de Yann, 2012).	15
Figure 7 : Les composantes hydrologiques du bilan d'une tourbière minérotrophe (Inspirée de Yann, 2012).	16
Figure 8 : La polarisation du signal électromagnétique (modifiée du site web : http://www.eorc.jaxa.jp).	18
Figure 9 : Les angles d'incidence (inspirée de (Bernier <i>et al.</i> , 2016)).	18
Figure 10 : Pénétration de différentes longueurs d'onde dans le sol selon son contenu en eau volumique (tiré de Ulaby <i>et al.</i> ,1982).	20
Figure 11 : Image polarimétrique RADARSAT-2 de la zone d'étude incluant la tourbière Abeille (Décomposition de Pauli) ©MDA, 2009.	23
Figure 12 : La délimitation du bassin versant de La Grande Rivière ainsi qu'une image polarimétrique RADARSAT-2 de la zone étudiée localisant les deux tourbières Chenille et Abeille. © MDA.	36
Figure 13 : Carte géo-référencée représentant les deux bassins versants de deux tourbières étudiées. À noter que l'on retrouve également le bassin versant d'une troisième tourbière (Mouche) qui n'a pas fait l'objet de ce mémoire.	36
Figure 14 : Photographie de la tourbière Abeille (Tirée de (Carrer, 2014)).	37
Figure 15 : Photographie aérienne où les marres de la tourbière Abeille sont mises en évidence ainsi que les trois micro-stations.	37

Figure 16 : Image satellitaire optique haute résolution de la tourbière Chenille (Tirée de Google Maps le 7 janvier 2016).....	38
Figure 17 : Photographie aérienne où les marres de la tourbière Chenille sont mises en évidence ainsi que les trois micro-stations.	39
Figure 18 : Approche méthodologique pour atteindre le premier objectif de l'étude....	40
Figure 19 : Profil de l'humidité du sol et des précipitations par rapport à la température maximale pour l'année 2010 (modifié de (Jacome <i>et al.</i> , 2013)).	41
Figure 20 : Photographies aériennes datant de 1992 de la région d'étude d'une taille de (22738 pixels x13302 pixels). La dimension des pixels est de 0,25 m.	45
Figure 21 : La répartition de certaines photographies numériques in situ de la tourbière Abeille illustrant la couverture végétale près des sondes FDR.	45
Figure 22 : Photographies numériques in situ illustrant la localisation des sondes FDR et la couverture végétale de la tourbière Chenille.	46
Figure 23 : Schéma représentant le processus de la classification orientée-objets.....	47
Figure 24 : Capture d'écran extraite du logiciel eCognition™ des différents types d'algorithmes de segmentation.	48
Figure 25 : Configuration de la segmentation d'image RADARSAT-2, capture d'écran extraite du logiciel eCognition™.	50
Figure 26 : Exemple d'hierarchie des classes thématiques de niveau (Groupe) et niveau (Classe), capture d'écran extraite du logiciel eCognition™.	54
Figure 27 : L'évolution de l'humidité du sol pour les sites étudiés du 17/08/2010 au 17/09/2010.....	58
Figure 28 : L'évolution du coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH pour les zones étudiées du 17 août 2010 au 17 septembre 2010.....	60
Figure 29 : L'évolution du coefficient de rétrodiffusion en polarisation HV pour les zones étudiées du 17 août 2010 au 17 septembre 2010.....	61
Figure 30 : Corrélation entre l'entropie (H) extrait des images RADARSAT-2 acquises entre le 17 août et le 17 septembre 2010 et l'humidité du sol.....	64
Figure 31 : Corrélation entre l'anisotropie (A) extrait des images RADARSAT-2 acquises entre le 17 août et le 17 septembre 2010 et l'humidité du sol...	65
Figure 32 : Corrélation entre l'angle alpha (α) extrait des images RADARSAT-2 acquises entre le 17 août et le 17 septembre 2010 et l'humidité du sol...	65
Figure 33 : Corrélation entre l'angle alpha-1 (α_1) extrait des images RADARSAT-2 acquises entre le 17 août et le 17 septembre 2010 et l'humidité du sol.	66

Figure 34 : Schéma représentant la procédure de la classification orientée-objets.	67
Figure 35 : Image représentant l'image polarimétrique RADARSAT-2 pour la date du 17/08/2010 et sa classification orientée-objets.	68
Figure 36 : Comparaison entre la classification orientée-objets d'une image optique (Haut) et une autre polarimétrique (Bas) pour la tourbière Abeille.	70
Figure 37 : Cartographie de la variation de l'humidité de surface (gauche), ainsi que la classification de l'occupation du sol (droite) pour la zone APF3 de la tourbière Abeille et pour la période entre août et septembre 2010.	71
Figure 38 : Distribution des erreurs de l'humidité du sol pour l'ensemble des tourbières étudiées.	74
Figure 39 : Dépendance du signal rétrodiffusé en polarisation HH à l'humidité du sol pour les tourbières étudiées et les dates d'étude.	103
Figure 40 : Dépendance du signal rétrodiffusé en polarisation HV à l'humidité du sol.	103
Figure 41 : Dépendance du signal rétrodiffusé en polarisation HH à l'humidité du sol pour les dates d'étude.	104
Figure 42 : Dépendance du rapport de copolarisation $\sigma^{\circ}(\text{HH}/\text{VV})$ à l'humidité du sol.	104
Figure 43 : Dépendance du rapport d'orthopolarisation $\sigma^{\circ}(\text{HH}/\text{HV})$ à l'humidité du sol.	105
Figure 44 : Dépendance du signal rétrodiffusé en polarisation HH à l'humidité du sol pour les tourbières étudiées.	105

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

MDA	McDonald, Dettwiler and Associates Ltd.
ASC	Agence Spatiale Canadienne.
RADARSAT-2	Satellite radar canadien de 2ème génération.
Quad-Pol	Polarisation quadruple (HH, HV, VH et VV).
HH	Polarisation de transmission et réception horizontale.
HV	Polarisation de transmission horizontale et réception verticale.
VH	Polarisation de transmission verticale et réception horizontale.
VV	Polarisation de transmission et réception verticale.
FQ	Fine Quad.
RSO	Radar à synthèse d'ouverture.
SAR	Synthetic Aperture Radar
TM	Tourbière minérotrophe.
TO	Tourbière ombrotrophe.
SDO	Solar Dynamics Observatory.
WISE	Wide-Field Infrared Survey Explorer.
Desc	Orbite descendante.
M_v	Humidité volumique du sol.
PF	zone inondée d'une façon permanente.
SF	zone inondée d'une façon saisonnière.
dB	Décibels.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

MISE EN CONTEXTE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

1.1 Mise en contexte

L'humidité du sol est une mesure indispensable pour différentes utilisations environnementales, notamment la validation de la modélisation hydrologique des bassins hydroélectriques, la prévision des inondations et l'évaluation des risques environnementaux. Cela nécessite un développement des techniques de surveillance temporelle afin d'évaluer tant l'humidité du sol, que le suivi de l'équivalent en eau de la neige; variables d'état d'un grand intérêt en modélisation hydrologique. La télédétection est la technique la plus appropriée pour assurer un suivi sur une grande superficie contrairement aux mesures in situ qui donnent seulement des valeurs ponctuelles (Normand, 1991). La télédétection radar est un excellent outil pour obtenir des images quantitatives, elle est reconnue pour sa capacité d'acquérir des données indépendamment des conditions météorologiques du temps d'acquisition des images (de jour comme de nuit). Le radar est sensible à la constante diélectrique du sol qui est un paramètre de surface (humidité du sol). La rétrodiffusion du radar dépend de l'humidité du sol, ainsi que de la topographie et de la rugosité de la surface (Dissanska *et al.*, 2010). Le satellite canadien RADARSAT-2 fonctionne en mode polarimétrique; ce qui permet d'obtenir simultanément les quatre polarisations (HH+HV+VH+VV) et la différence de phase. La polarimétrie, permet une bonne compréhension des mécanismes d'interaction du rayonnement électromagnétique avec la cible, ainsi qu'une détermination des mécanismes de diffusion dominants pour un milieu donné (forêt, surface aquatique, neige, etc.).

Cette étude a pour objectif principal d'évaluer le potentiel des images polarimétriques de RADARSAT-2 pour la surveillance de l'humidité du sol des tourbières boréales et leur cartographie. Étant donné le rôle important que joue les tourbières dans la régulation du débit d'eau du bassin versant, la détermination d'une relation entre les données polarimétriques et l'humidité du sol pourrait contribuer à long terme, grâce aux

techniques d'assimilation des données dans la modélisation hydrologique, à une gestion plus efficace des ressources hydriques.

1.2 Région d'étude

Le bassin versant La Grande se situe dans la partie nord-ouest du Québec, Canada (52° N, 70° O), couvrant environ $97\,650\text{ km}^2$ et coulant d'Est vers l'Ouest sur plus de 893 km. Ce fleuve est le deuxième plus grand du Québec, après le fleuve Saint-Laurent et se jette sur le littoral Est de la Baie de James (Figure 1). Cette région est caractérisée par un climat de type subarctique. Les températures varient entre -35°C en janvier et 20°C en juillet. La région enregistre des précipitations moyennes annuelles de 830 mm par année, dont un tiers sous forme de neige.

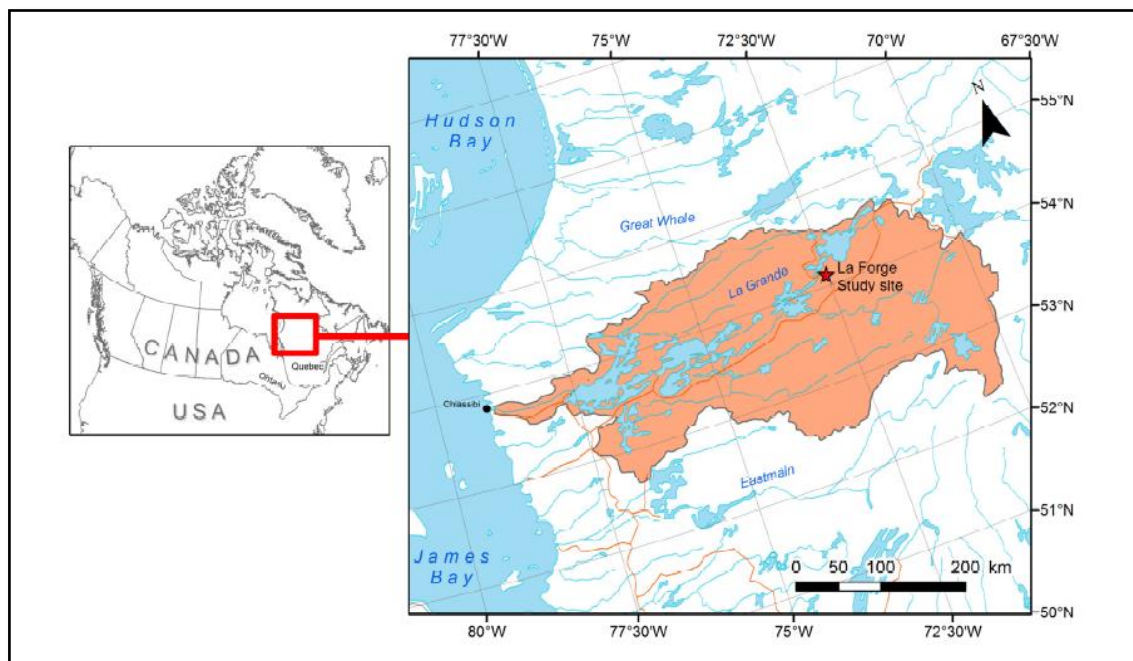


Figure 1 : La localisation du bassin versant "La Grande" dans la province de Québec (Canada) (Tirée de Jacome *et al.*(2013)).

La région d'étude se situe dans la partie centrale du bassin versant La Grande (54° N, 72° O) à la Baie de James (Québec, Canada). Elle se trouve sur le Bouclier Canadien. La zone d'étude "La Forge" est située à l'amont du bassin (Figure 1) et est caractérisée par des températures moyennes annuelles de l'ordre de -3.2°C . Les tourbières se retrouvent sur l'ensemble de la couverture terrestre du bassin. Ce sont des écosystèmes humides où l'action bactérienne est réduite, développés après le recul des glaciers sur

des sols mal drainés, dans lesquels le taux de production de la végétation dépasse le taux de décomposition, ce qui mène au développement de la tourbe (Payette, Serge ; Rochefort, Line, 2001).

1.3 Problématique

Dans le bassin La Grande, en été, les pertes dues à l'évapotranspiration sont plus importantes que les apports de précipitations (Dribault, 2012, Ouranos, 2016). Par ailleurs, si on ajoute à cette observation les inquiétudes autour de l'impact des changements climatiques sur les tourbières, cela attise l'intérêt d'un suivi de l'humidité du sol dans le contexte d'une stratégie de gestion de la production hydroélectrique. La télédétection est la technique la plus convenable pour faire un suivi de l'humidité du sol sur des grandes superficies. En effet, plusieurs travaux de recherche ont utilisé cet outil afin de suivre à très haute résolution les paramètres de surfaces et les changements hydrologiques dans les milieux humides (Fournier *et al.*, 2007). Le système satellitaire à hyperfréquences pourrait être un outil efficace à l'observation et l'étude des changements hydrologiques dans les bassins versants dominés par les tourbières tel que le bassin La Grande. C'est dans ce sens qu'une approche basée sur la télédétection radar est adoptée afin de réaliser un suivi de l'humidité du sol dans les tourbières de ce bassin versant.

Depuis la dernière décennie, les chercheurs commencent à centrer leur intérêt sur cette région. Plusieurs projets d'étude y ont été réalisés pendant cette période, commençant par *l'Étude des conditions de détérioration du drainage des tourbières minérotrophes de la région par l'analyse de profils de tourbe des compartiments terrestres et aquatiques* (Garneau, 2012). Ce projet a été lancé en 2006, financé par le programme CRSNG-RDC et Hydro-Québec. C'était une collaboration entre le Centre d'études nordiques de l'Université Laval, l'INRS-ETE, le Consortium Ouranos et Hydro-Québec. Ce projet avait comme objectif ultime l'étude des changements du régime hydrologique des tourbières et répondait à un besoin de connaissances sur le rôle des tourbières dans le cycle hydrologique.

En 2008, un projet pluridisciplinaire a été mis sur pied et intitulé *Écohydrologie des tourbières minérotrophes fortement aqualysées : suivi du cycle de l'eau et de la dynamique du CH₄ et du CO₂* (Payette, Serge, 2012). Cette étude était divisée en trois

volets (hydrologique, écologique et télédétection) afin d'élaborer un modèle conceptuel des tourbières minérotrophes à incorporer dans un modèle de prévision hydrologique.

Dans le cadre du volet télédétection, deux projets de recherche ont été effectués, le premier consistait à caractériser les changements de la structure spatiale des tourbières minérotrophes structurées du complexe La Grande depuis cinquante ans en précisant la répartition et l'étendue des compartiments terrestres et aquatiques à l'aide d'images satellitaires panchromatiques à très haute résolution et des photographies aériennes des années 1950 (Dissanska, 2012). Une approche originale de classification orientée objets des images satellitaires panchromatiques en très haute résolution a été développée afin d'identifier les tourbières structurées et leurs différentes unités morphologiques. Les résultats ont montré que la dynamique des structures semble spécifique pour chaque tourbière et est contrôlée par des facteurs autogènes qui influencent la rétention d'eau et le ruissellement dans les tourbières. La démarche s'est montrée efficace pour différents environnements du bassin versant, les tourbières étaient détectées et délimitées avec une très haute précision. Leurs éléments structuraux ont également été classifiés à un niveau satisfaisant.

Une seconde étude abordait la *caractérisation de la dynamique saisonnière de l'hydrologie des tourbières minérotrophes du moyen nord québécois, à l'aide de l'imagerie satellitaire multispectrale à très haute résolution spatiale GeoEye-1* (Dribault, 2012). Elle avait comme objectif principal le développement d'outils de contrôle efficaces pour les gestionnaires de l'eau à partir de l'analyse des processus hydrologiques dans les tourbières minérotrophes du bassin versant à l'échelle intra-saisonnière et à l'échelle locale. Deux régimes hydrologiques distincts ont été observés après l'analyse de la relation entre le niveau d'eau et le débit dans une tourbière. Lors du régime de stockage d'eau, l'étendue spatiale des compartiments aquatiques et semi-aquatiques, extraite de l'imagerie, augmente fortement. Tandis que, lors du ruissellement (débit fort qui ne s'explique pas par une augmentation significative du niveau d'eau), l'étendue spatiale des compartiments aquatiques et semi-aquatiques augmente peu. D'où l'intérêt de se pencher sur la détermination du seuil de changement de régime par imagerie satellite. Cela est d'une grande importance pour la compréhension et la modélisation de l'hydrologie des tourbières structurées.

En 2013, une étude intitulée, *La surveillance de l'humidité du sol dans les tourbières du bassin La Grande par les données radar multi polarisation* (Jacome et al., 2013) a été

réalisée. L'idée principale de cette étude était de savoir si l'analyse des images multi-date et multi-polarisation de RADARSAT-2 pouvait détecter des variations saisonnières des conditions d'humidité des sols de l'acrotelme. Pour se faire, une approche de détection de changement en utilisant un indice Delta (Δ) a été choisie. L'indice- Δ est basé sur une image de référence qui représente des conditions sèches, afin de maximiser la sensibilité de σ° (coefficient de rétrodiffusion) à l'évolution de l'humidité du sol par rapport au même endroit lorsque le sol (ou la tourbe) est humide. Cette approche a été testée pour trois polarisations (HH, HV, VV) et le rapport de polarisation croisée (HV/HH). Les résultats ont montré que le meilleur ajustement de la régression par rapport à l'humidité du sol dans les zones humides pouvait être obtenu avec le rapport de rétrodiffusion en polarisation croisée. L'indice de polarisation croisée multi-temporelle permet une estimation précise de l'humidité et de la surveillance des zones humides, quel que soit l'influence de la couverture végétale et de la rugosité.

1.5 Objectifs

Néanmoins, dans les études antérieures sur les tourbières boréales du bassin-versant de la rivière La Grande, la polarimétrie des images RADARSAT-2 n'a pas été exploitée (Dissanska *et al.*, 2007, Jacome *et al.*, 2013). Dans le cadre de ce mémoire, nous avons voulu répondre aux trois objectifs suivants concernant le suivi de l'humidité du sol dans les tourbières boréales :

- Évaluer la sensibilité des paramètres polarimétriques à l'humidité du sol dans la région du bassin versant La Grande à partir d'images quad-pol RADARSAT-2 ;
- Déterminer si les images polarimétriques permettent de délimiter avec précision les structures internes des tourbières (aquatiques, semi-aquatiques et terrestres) en utilisant une classification orientée-objet et
- Produire des cartes représentant les variations de l'humidité du sol entre 2009 et 2010 à la surface des tourbières.

CHAPITRE 2

CONTEXTE THÉORIQUE

2.1 Introduction :

Ce chapitre présente les notions théoriques nécessaires à la compréhension de l'approche méthodologique utilisée dans le cadre de cette étude. La définition de tourbières, leur répartition, leurs types, et leur hydrologie sont d'abord expliqués (section 2). La troisième section introduit la télédétection radar, les capteurs radars et les principes de télédétection microondes tout en présentant les résultats des études de suivi de l'humidité du sol à partir des paramètres polarimétriques. Après avoir présenté les images polarimétriques SAR et cité les théorèmes de décompositions polarimétriques, nous introduisons les étapes pour classifier les données satellitaires radar à l'aide de l'approche orientée-objets (section 7).

2.2 Les tourbières

2.2.1 Distribution

Les systèmes tourbeux couvrent une superficie globale de l'ordre de 4 million km² (Josten & Clarke, 2002, Moore *et al.*, 1998, Proulx-McInnis, 2010). Les tourbières occupent environ 17% de la superficie totale du globe (Jasinski & Payette, 2005, Proulx-McInnis, 2010) et recouvrent 11% du territoire canadien. Le Canada est le pays qui a la plus grande superficie de tourbières au monde (Figure 2).

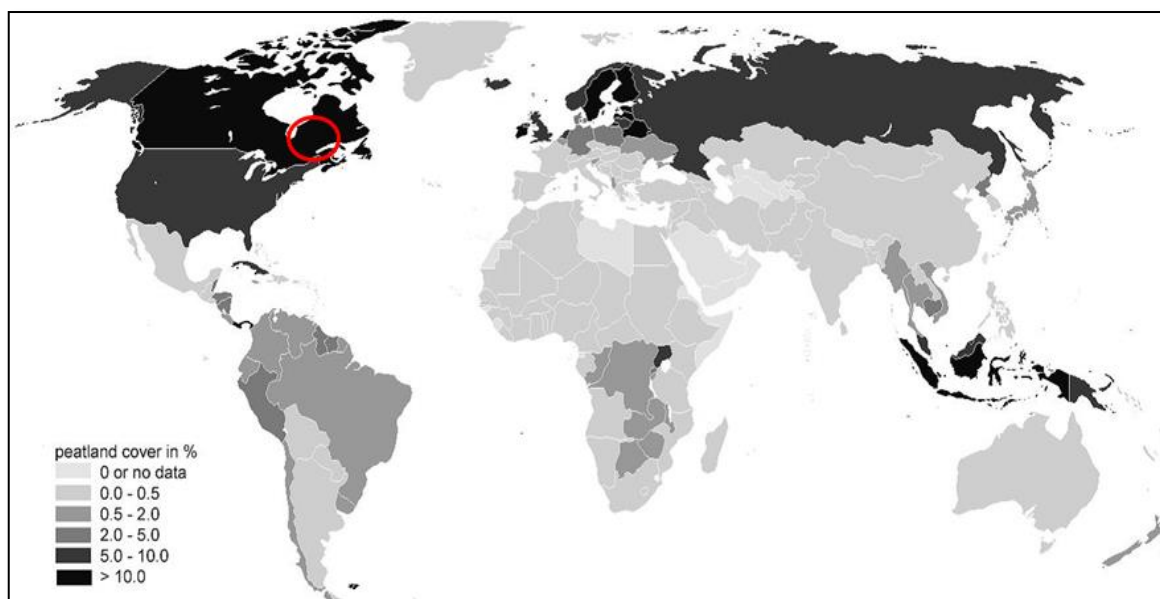


Figure 2 : Carte du pourcentage de la superficie des tourbières par pays (tirée de (Clarke *et al.*, 2002)).

Au Québec, la superficie des tourbières est d'environ 120.000 km² (Dribault, 2012), ce qui représente 10,5% de leur superficie au Canada (Jasinski & Payette, 2005, Proulx-McInnis, 2010). Les zones où l'on retrouve les plus grandes concentrations de tourbières se trouvent dans les basses terres de la Baie d'Hudson et de la Baie de James, en Ontario, au Manitoba et au Québec (Figure 3). Cette répartition est entre autres due aux conditions climatiques (température et précipitations) et topographiques (dépressions, mauvais drainage), qui influencent la croissance des végétaux et l'accumulation de la tourbe. Dans la région du bassin versant de la rivière La Grande, à l'Est de la Baie James où notre zone d'étude se situe, les tourbières minérotrophes dominent, suite à des conditions climatiques (climat rigoureux) et topologiques (altitude plus élevée) (Figure 4) (Dribault, 2012, Jasinski & Payette, 2005, Moore *et al.*, 1998, Proulx-McInnis, 2010).

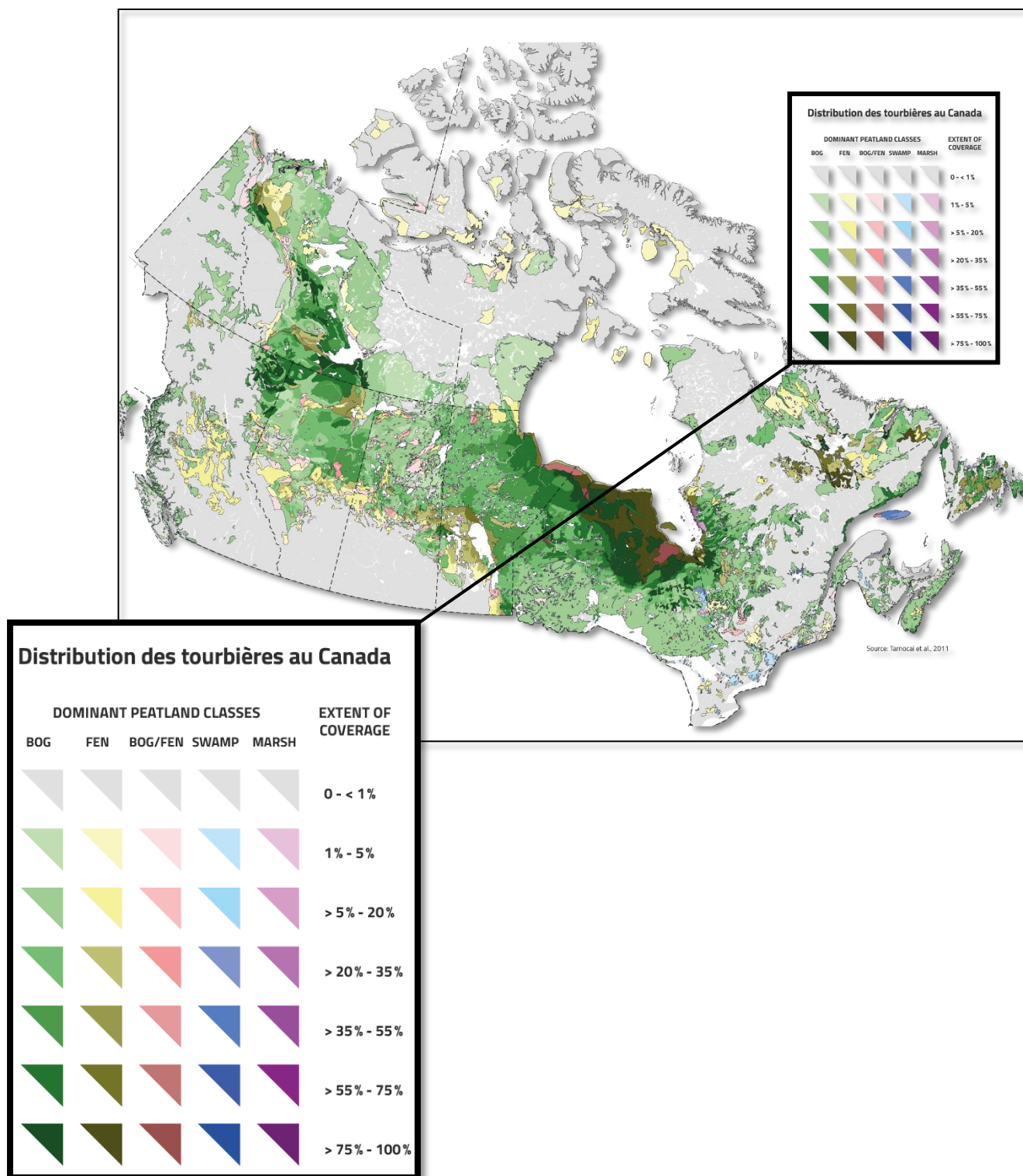


Figure 3 : Carte de distribution des tourbières au Canada (tirée de (Tarnocai *et al.*, 2011)).

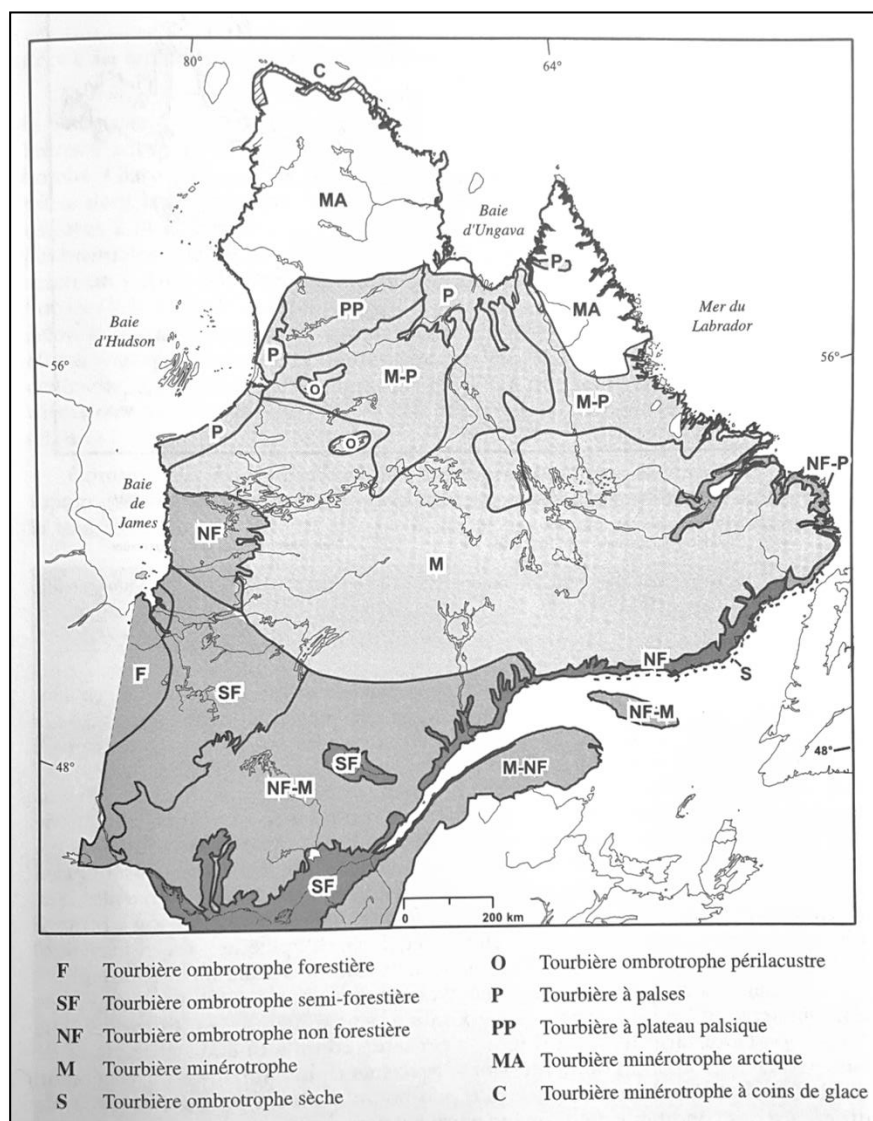


Figure 4 : Carte de répartition des principaux types de tourbières au Québec-Labrador (tirée de Payette et Rochefort, 2001).

Les tourbières sont définies comme étant des écosystèmes humides et généralement acides, recouverts de végétation composée principalement de plantes dites hygrophytes aptes à la formation de tourbe (Jasinski & Payette, 2005, Moore *et al.*, 1998). Elles sont caractérisées par leur capacité d'accumulation de la matière organique fossile, sur une profondeur d'au moins 30 à 40 cm (Racine, 2005). Elles se forment lorsque le sol est constamment saturé d'eau. Les *sphaignes* et les *mousses brunes*, constituent la végétation dominante des tourbières. Ces organismes appelés "éponges naturelles" ont la capacité d'acidifier le milieu et d'absorber une grande quantité d'eau (10 à 15 fois leur poids sec), tout en favorisant leur croissance et l'accumulation de tourbe (Proulx-McInnis, 2010, Rydin & Jeglum, 2006). Les tourbières sont décrites comme un milieu à

drainage variable où le processus d'accumulation organique prévaut sur les processus de décomposition et d'humidification, peu importe la composition botanique des restes végétaux (Moore *et al.*, 1998).

2.2.2 Formation

Au Québec, la formation des tourbières boréales aurait débutée vers 7 000 ans BP, suite à la déglaciation et la régression de la mer de Tyrrell (Payette & Rochefort, 2001). Le processus de formation des tourbières s'étale sur des siècles. La tourbe est composée de matière organique généralement décomposée (Sphaignes et d'autres plantes). L'acidification du milieu s'accroît au fur et à mesure de la chute des températures, ce qui rend la décomposition dans ces écosystèmes difficile. L'action bactérienne est réduite dans ce type d'environnement, ce qui résulte en un taux de production des plantes qui dépasse le taux de décomposition (Charman, 2002, Dribault, 2012). Au fil du temps, les débris des plantes qui se décomposent lentement s'accumulent et constituent la tourbe qui peut dépasser six (6) mètres de profondeur à certains endroits. Le développement de la tourbe est d'environ 0,5 à 1 mm par année dans les tourbières boréales canadiennes. L'évolution des habitats aquatiques et terrestres en tourbières peut être affectée par des changements climatiques (facteurs allogènes) (Dribault, 2012, Payette & Rochefort, 2001, Proulx-McInnis, 2010), topographiques et hydrologiques (facteurs autogènes). La formation des tourbières s'échelonne sur deux procédés. Elles se forment par comblement et par paludification (Payette & Rochefort, 2001).

2.2.2.1 Formation par comblement :

L'entourbement par comblement se produit sur un lac peu profond ou une mare. Il se développe une végétation aquatique qui flotte sur l'eau, composée d'hydrophiles. La végétation s'étale progressivement en formant ce qu'on nomme un tapis flottant (Figure 5).

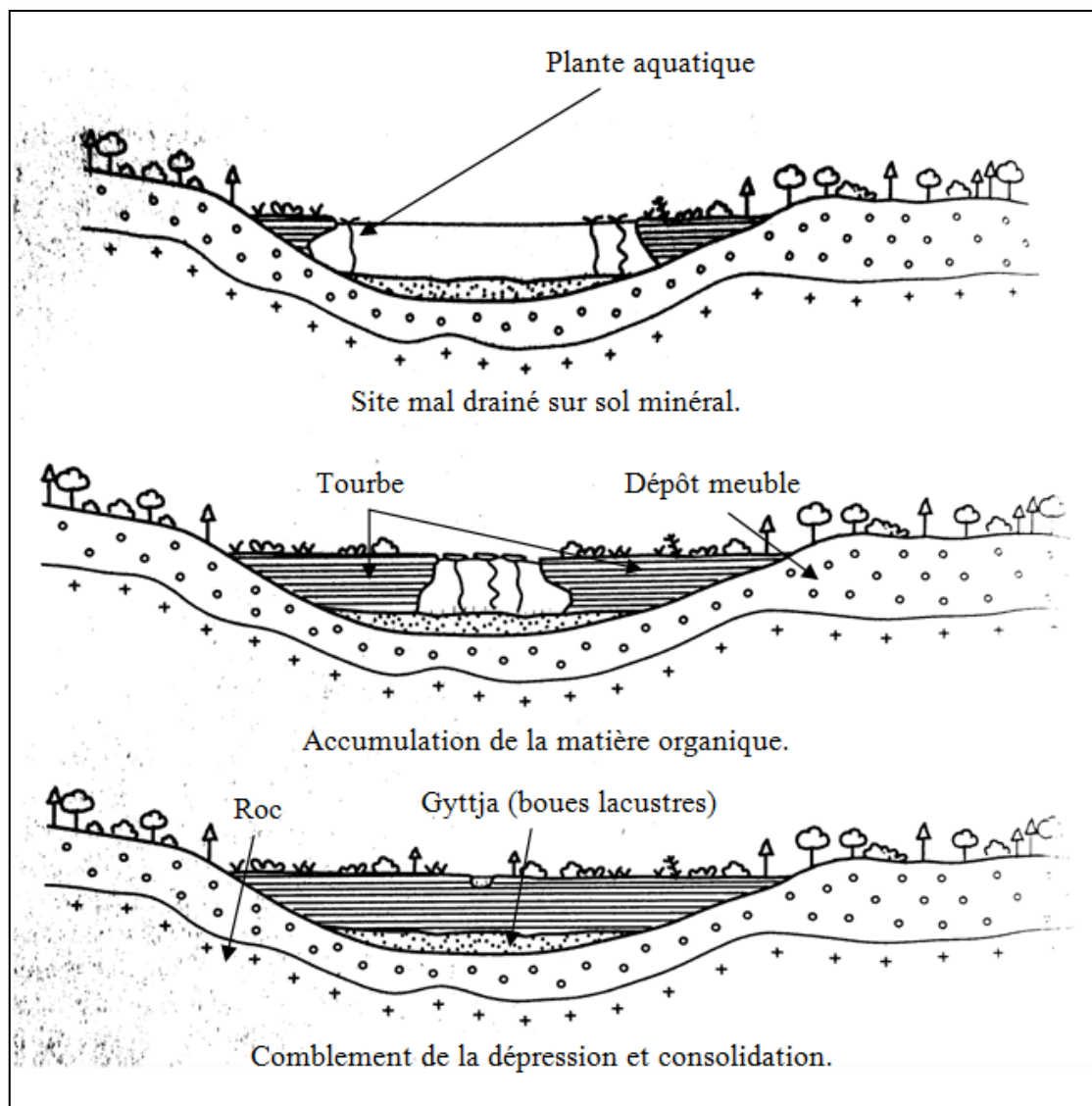


Figure 5 : Dessin représentant les stades d'entourbement d'un lac par le procédé de comblement (modifiée de Payette et Rochefort, 2001).

Il y a alors accumulation de matière organique sur les bords et le fond du plan d'eau qui se comble jusqu'à disparaître complètement. Les stades d'entourbement par comblement évoluent selon la topographie du site, les conditions climatiques, la nature de la végétation bordière, et du drainage du bassin-versant (Payette & Rochefort, 2001). La pente du fond du lac, les niveaux lacustres et les changements climatiques, jouent un rôle primordial dans l'évolution de la végétation bordière (Moore *et al.*, 1998, Payette, Serge ; Rochefort, Line, 2001). En période d'hiver ou en bas des niveaux lacustres, la végétation bordière s'élargit rapidement vers le centre du lac, avant d'être retardée et submergée par la remontée du niveau d'eau (Campbell-Renaud, 2014, Payette & Rochefort, 2001, Proulx-McInnis, 2010).

2.2.2.2 Formation par paludification :

La paludification est un procédé dynamique de la formation des tourbières. Elle se produit sur un sol généralement sec et se propage sur des grands territoires. Ce phénomène, peut prendre plusieurs formes, selon les conditions climatiques (Campbell-Renaud, 2014, Payette & Rochefort, 2001). Lorsque les sols sont mal drainés, et les conditions climatiques sont humides, l'entourbement par paludification débute. Les mousses commencent peu à peu à y grandir et se développent. « Le niveau du sol s'élève au fur et à mesure que la tourbe s'accumule sous les sphaignes, étouffe les arbres par asphyxie et la tourbière se forme ».

2.2.3 Types de tourbières

Il existe plusieurs classifications qui permettent l'identification et la description des tourbières. On distingue généralement deux grands types de tourbières en fonction de leur composition chimique, de leur morphologie de surface, de leur mode d'alimentation hydrique et du type de végétation qui les compose : les tourbières ombrotrophes (bogs) et les tourbières minérotrophes (fens) (Payette & Rochefort, 2001, Proulx-McInnis, 2010).

Les tourbières ombrotrophes (bogs), sont alimentées en eau et en éléments nutritifs par les eaux pluviales (les précipitations atmosphériques). Suite à l'accumulation progressive de la tourbe, la nappe phréatique commence graduellement à prendre place au-dessus de la nappe souterraine (Payette & Rochefort, 2001). Les tourbières ombrotrophes sont caractérisées par des conditions d'alimentation en éléments minéraux faibles (conductivité $< 80 \mu\text{S/cm}$). La végétation dans ce milieu est prédominée par les *sphaignes* et des *éricacées* (Dribault, 2012, Proulx-McInnis, 2010). Ces dernières, favorisent l'acidification du milieu ($3,5 < \text{pH} < 4,6$) (Dribault, 2012, Proulx-McInnis, 2010).

Les tourbières minérotrophes (fens), sont alimentées par les eaux pluviales et par les eaux de ruissellement (eaux chargées en éléments minéraux). L'eau existante dans les fens est caractérisée par une forte concentration en minéraux (conductivité $> 80 \mu\text{S/cm}$), et un pH de l'eau qui varie entre 4,6 et 7,5 (Payette & Rochefort, 2001). La végétation

dans ce milieu est composée des *mousses brunes*, qui font partie de la famille des *amblystegiaceae*, et des *cypéracées*.

2.2.4 Hydrologie des tourbières

Le calcul du bilan hydrologique est primordial pour l'assimilation du fonctionnement des processus hydrologiques spécifiques des tourbières. Le bilan hydrologique des tourbières est le résultat d'une comparaison, des apports d'eau sur celles-ci, avec les sorties qui s'y opèrent. Ce bilan peut être calculé selon l'équation suivante :

$$\sum \text{Apports} - \sum \text{Pertes} = \Delta S \quad (1)$$

D'un point de vue hydrologique, les tourbières peuvent être alimentées en eau par les précipitations comme par les eaux de drainage du bassin versant (eaux de ruissellement de surface). D'où l'équation (1) peut se réécrire comme suit (Carter, 1986) :

$$(P + E_R + E_S) - (ET + S_R + S_S) = \pm \Delta S$$

$$(1) \text{ devient : } P + E_R + E_S = ET + S_R + S_S \pm \Delta S \quad (2)$$

Avec :

P : Précipitation (pluie ou neige)

E_R : Entrée par ruissellement de surface

E_S : Entrée souterraine

ET : Évapotranspiration

S_R : Sortie par ruissellement de surface

S_S : Sortie souterraine

ΔS : Variation de stockage

L'évapotranspiration par l'ensemble des végétaux, l'écoulement aux exutoires des ruisseaux qui parcourent la tourbière et le débit sortant du système (infiltration dans le substrat rocheux de la tourbière), constituent les parties principales des pertes.

Malgré la forte capacité d'absorption de l'eau par les *sphaignes* dans les tourbières ombrotrophes (TO), l'eau stockée est éphémère. Cela est traduit par les pertes verticales et latérales que subissent les TO (Figure 6). Vu que le ruissellement de surface est quasi-inexistant dans ces milieux, le régime d'écoulement de l'eau est un écoulement

hypodermique. Une grande partie de cet écoulement s'infiltré dans la tourbe, par des canaux naturels qui varient selon la porosité de l'ensemble tourbeux. Cet écoulement, dépend principalement des précipitations, du niveau de la nappe et de l'évapotranspiration.

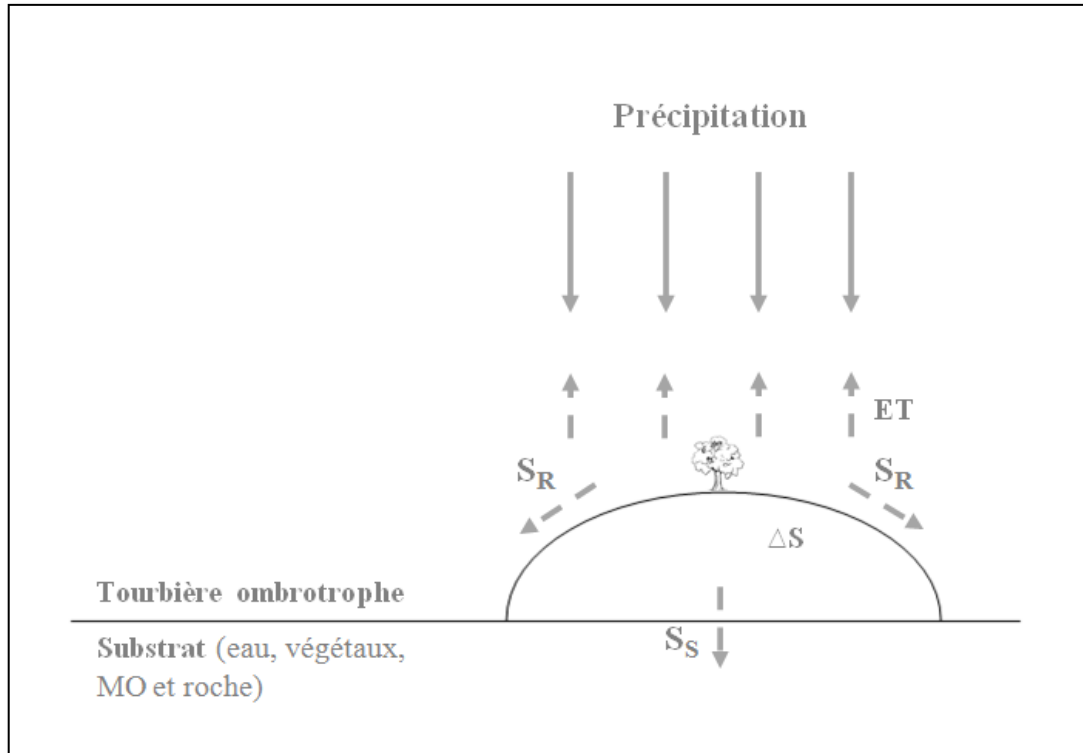


Figure 6 : Les composantes hydrologiques du bilan d'une tourbière ombrotrophe (Inspirée de Yann, 2012).

La variation de stockage des tourbières minérotrophes (TM) peut être influencée par les mares (Dribault, 2012, Proulx-McInnis, 2010). On distingue deux types de mares selon leurs capacités de survivre : les moins profondes (quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres) et les plus profondes (1 à 2 m) (Payette & Rochefort, 2001, Tardif, 2010). Les moins profondes peuvent disparaître complètement en périodes sèches, cependant les plus profondes garderont presque la même surface. Ces variations de superficies font varier à la fois le régime d'écoulement et le temps de concentration (Tardif, 2010). Contrairement aux TO, les TM ont deux termes hydrologiques qui peuvent être ajoutés au bilan puisqu'il y a entrée par ruissellement et entrée souterraine (Figure 7).

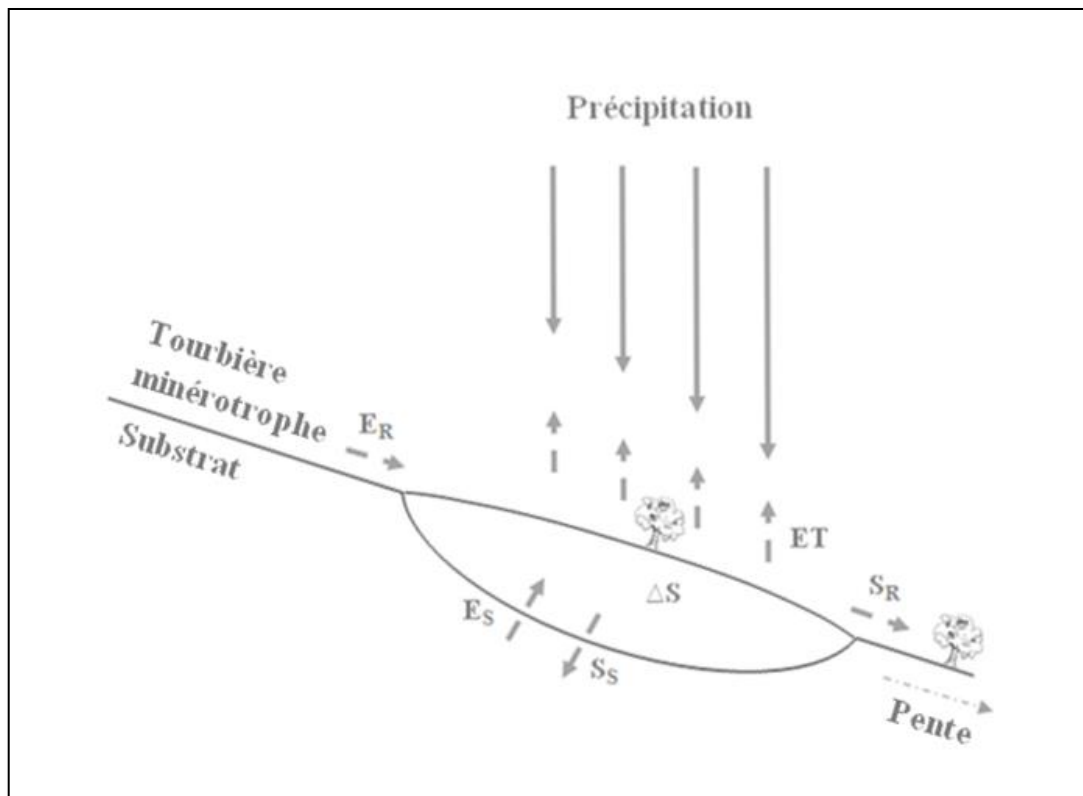


Figure 7 : Les composantes hydrologiques du bilan d'une tourbière minérotrophe (Inspirée de Yann, 2012).

2.3 Télédétection radar

La télédétection joue un rôle primordial dans le domaine hydrologique, et cela pour des objectifs divers. Des études ont été menées notamment pour la caractérisation des changements éco-hydrologiques et la surveillance des risques environnementaux. En effet, la capacité des satellites radar de recueillir les informations sur des zones inaccessibles jour et nuit, peu importe les conditions météorologiques, fait de la télédétection radar un outil de choix. Le radar transmet un rayonnement d'hyperfréquence vers la cible, qui à son tour, peut engendrer une onde rétrodiffusée. L'intensité de l'onde rétrodiffusée peut être influencée généralement par la topographie, la couche végétale, la rugosité et l'humidité du sol (Dissanska *et al.*, 2010). Le principe fondamental des satellites radar réside dans :

- ✓ La transmission sur la surface de la Terre d'un rayonnement électromagnétique dans le spectre des microondes caractérisé par sa longueur d'onde et sa polarisation ;
- ✓ La mesure de la quantité d'énergie rétrodiffusée par la cible ;

- ✓ La transformation par traitement numérique des énergies enregistrées par le capteur en image dans laquelle chaque pixel est constitué de valeurs, obtenues par le rayonnement rétrodiffusé par la cible.

Les satellites radars (télédétection active) ont plusieurs avantages, notamment leur faible sensibilité aux conditions atmosphériques et météorologiques (l'absence de la lumière du soleil (nuit) et la présence d'un couvert nuageux ou de faibles précipitations ne représentent pas un obstacle à la prise de mesures).

- **Polarisation** : C'est une propriété essentielle de la propagation et de la diffusion des hyperfréquences. Les radars sont conçus de manière à transmettre le rayonnement des hyperfréquences en polarisation horizontale (H) ou verticale (V) ou circulaire. Il existe quatre combinaisons possibles des polarisations transmission-réception : HH, VV (polarisation parallèle, car les polarisations transmission-réception sont les mêmes), HV et VH (polarisation croisée, puisque les polarisations transmission-réception sont orthogonales) ;

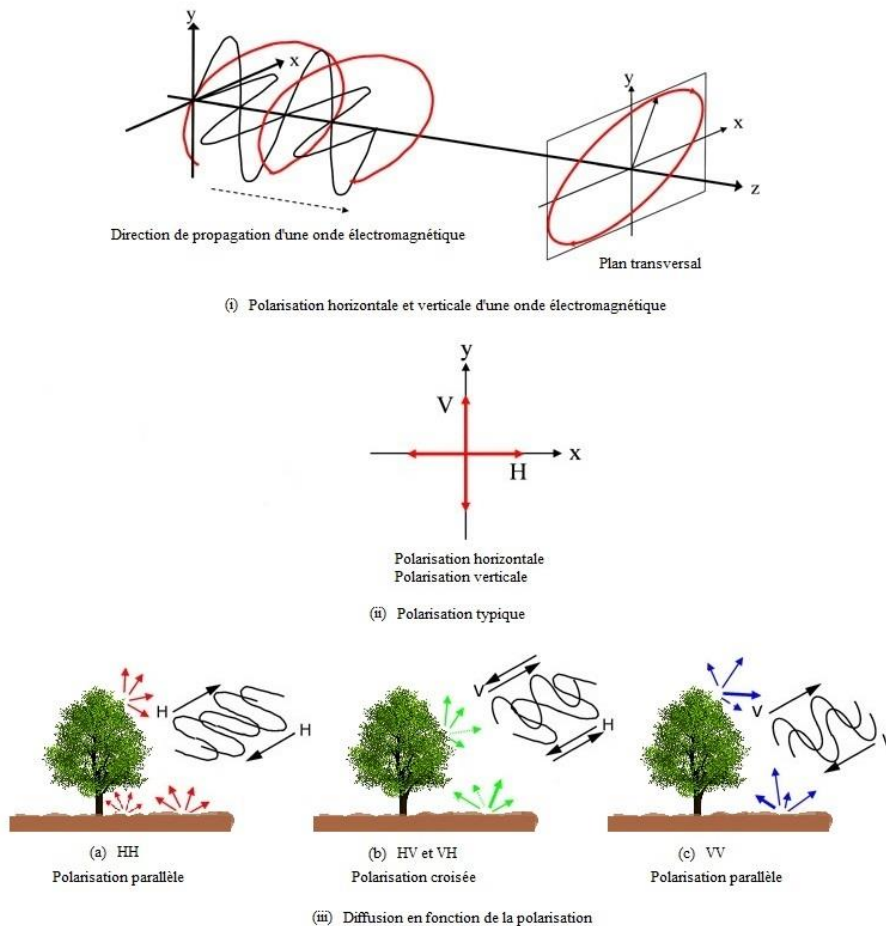


Figure 8 : La polarisation du signal électromagnétique (modifiée du site web : <http://www.eorc.jaxa.jp>).

- **Angle d'incidence :** C'est un paramètre primordial pour déterminer la quantité d'énergie qui sera rétrodiffusé. Lorsque l'angle d'incidence par rapport à la surface augmente, la sensibilité du radar à l'humidité du sol diminue et celle à la rugosité augmente.

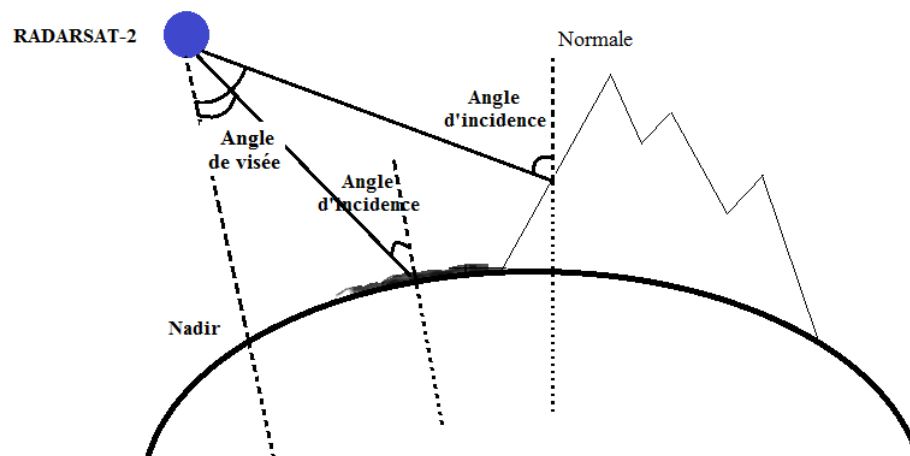


Figure 9 : Les angles d'incidence (inspirée de (Bernier *et al.*, 2016)).

2.3.1 La fréquence et les bandes radar :

Les radars sont des capteurs qui opèrent dans différentes fréquences de la partie micro-ondes du spectre électromagnétique. La profondeur de pénétration des microondes dans le sol dépend essentiellement de deux facteurs : la fréquence (ou, la longueur d'onde) et la constante diélectrique du sol (Dissanska *et al.*, 2010). Le tableau 1 ci-dessous montre le résultat de la variation des deux paramètres sur la profondeur de pénétration dans le sol. En effet, plus la longueur d'onde est grande (Bande P), plus l'onde va loin dans la profondeur du sol. La pénétration dans le couvert végétal varie aussi avec la fréquence et la structure de la végétation. Une zone forestière sera vitreuse pour des longueurs d'ondes importantes (la bande P ou la bande L), par contre, elle sera impénétrable pour des petites longueurs d'onde (la bande X). Il est important de noter que la pénétration dans le sol est fonction de la constante diélectrique du milieu (et donc de la teneur en eau du sol). Plus la teneur en eau du sol est importante, moins l'onde pénètre profondément dans le sol et vice versa (Racine, 2005), ce qui rend négligeable la diffusion volumique du sol.

Tableau 1 : Bandes, fréquences et longueurs d'onde utilisés en télédétection radar ainsi que leur profondeur approximative de pénétration du sol (tiré de (Rochon & Bonn, 1992) et (Henderson & Lewis, 1998)).

Bande	Fréquence (GHz)	Longueur d'onde (cm)	Profondeur de pénétration approximative (cm)
P	0,3 - 1	30 - 100	50
L	1 – 2	15 - 30	25
S	2 – 4	7,5 - 15	10
C	4 – 8	3,75 - 7,5	5
X	8 - 12,5	2,4 - 3,75	3
Ku	12,5 - 18	1,67 - 2,4	1
K	18 – 27	1,1 - 1,67	1
Ka	27 – 40	0,75 - 1,1	1

Il est important de noter que la profondeur de pénétration n'est pas liée seulement à la fréquence mais elle est liée aussi au contenu en eau du sol. En effet, plus l'humidité du sol est faible, plus la pénétration de l'onde sera maximale et vice versa (Figure 10). La profondeur de pénétration réelle des longues longueurs d'ondes (bande X) varie entre environ 1 cm pour un sol très humide et 15 cm pour un sol sec (Ulaby *et al.*, 1982).

Pour un sol humide, elle est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, ainsi en bande C (RADARSAT-2), la pénétration est de l'ordre de 5 cm. Plus la longueur d'onde est grande, plus la pénétration est importante, jusqu'à 30 cm en bande L.

Les longueurs d'onde des bandes L, C et X sont les plus couramment utilisées pour estimer l'humidité du sol (Bartsch *et al.*, 2007).

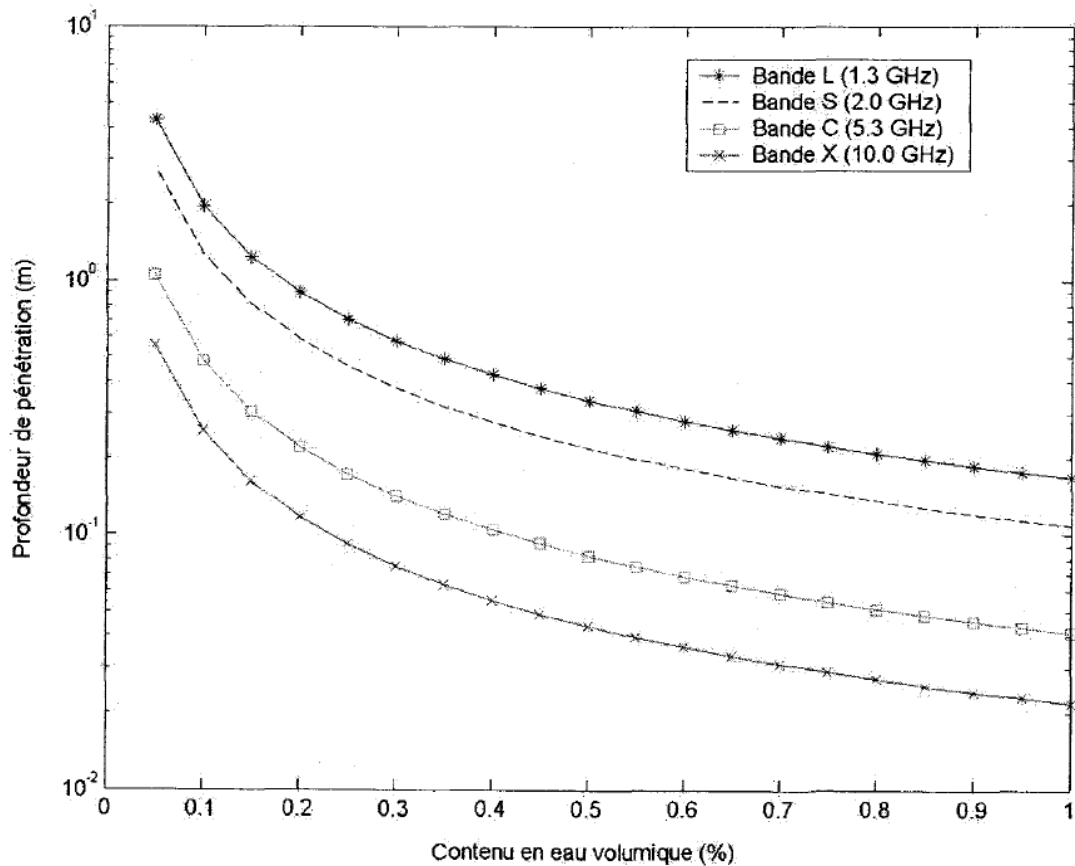


Figure 10 : Pénétration de différentes longueurs d'onde dans le sol selon son contenu en eau volumique (tiré de Ulaby *et al.*, 1982).

Tableau 2 : Les bandes utilisées par les différents satellites radar.

Bande	Satellite	Année de mise en orbite
Ka, K et Ku	○ Pas de radar en orbite (systèmes aéroportés)	
X	○ SAR-Lupe	2006
	○ TerraSAR-X	2007
	○ COSMO-SkyMed	2007
	○ TecSAR	2008
	○ RISAT-2	2009
	○ TanDEM-X	2010
C	○ ERS-1	1991
	○ TOPEX	1992
	○ RADARSAT-1	1995
	○ Jason-1	2001
	○ Envisat	2002
	○ RADARSAT- 2	2007
	○ RISAT-1	2012
	○ Sentinel-1	2014
	○ Sentinel-1B	2016
S	○ CALIPSO	2006
	○ NISAR	2020
L	○ SEASAT	1978
	○ JERS-1	1992
	○ PALSAR	2006
	○ SMAP (le capteur SAR ne fonctionne pas)	2015
P	○ Future mission Biomasse de l'ESA	≥ 2017

2.3.2 Le capteur RADARSAT-2

RADARSAT-2 est un satellite muni d'un capteur radar opérant en bande C (5,405 GHz). Il a été lancé le 14 décembre 2007. Le système satellitaire RADARSAT-2 est caractérisé par sa bande de fréquence, sa résolution spatiale, sa polarisation et ses angles d'incidence. Il a une résolution spatiale de 3 à 100 m et des angles d'incidence allant de 10° à 60° (Dissanska *et al.*, 2010). Le tableau ci-dessous, résume l'ensemble des

caractéristiques du satellite RADARSAT-2. Il permet l'acquisition des images avec une résolution assez élevée (8m de résolution spatiale en mode fin), qui favorise la distinction entre les surfaces observées (CCT, 2013). Le fait que le capteur RADARSAT-2 fournisse des données en quatre polarisations permet d'utiliser les paramètres polarimétriques pour la caractérisation des paramètres de surface.

Tableau 3 : Les caractéristiques principales du satellite RADARSAT- 2 (tirée du site web de l'agence spatiale canadienne : <http://www.asc-csa.gc.ca>).

Caractéristiques générales de RADARSAT-2	
<i>Type de satellite</i>	Radar à synthèse d'ouverture (SAR)
<i>Poids au lancement</i>	2 200 kg
<i>Durée de vie anticipée</i>	7 ans
<i>Dimensions de l'antenne RSO</i>	15m x 1,5m
Caractéristiques de l'instrument radar	
<i>Bande de fréquence</i>	Bande C (5,405 GHz)
<i>Largeur de bande</i>	100 MHz
<i>Résolution spatiale</i>	3 à 100 m
<i>Polarisation</i>	HH, HV, VH, VV
<i>Angles d'incidence</i>	10° à 60°
Caractéristiques de l'orbite	
<i>Orbite</i>	Héliosynchrone
<i>Altitude</i>	798 km
<i>Inclinaison</i>	98,6°
<i>Période</i>	100,7 minutes
<i>Orbite par jour</i>	14
<i>Répétitivité</i>	24 jours
Couverture (fauchée de 500 km)	
<i>Au nord de 70°</i>	Chaque jour
<i>Au nord de 48° et 70°</i>	Tous les 1-2 jours
<i>Équateur</i>	Tous les 2-3 jours

2.4 Les images polarimétriques SAR

Une image polarimétrique SAR est une image radar à ouverture synthétique polarimétrique. Le radar transmet un rayonnement en hyperfréquences (ondes polarisées) en polarisation soit horizontale (H) ou verticale (V). Après contact avec la cible, un capteur reçoit la partie réfléchi de l'onde polarisée horizontalement, verticalement ou la combinaison des deux. Une image radar polarimétrique est une image qui capte la polarisation complète du signal radar émis et reçu. Elle contient l'information sur les quatre polarisations (HH, HV, VH et VV) ainsi que la différence de phase entre chacun de ces quatre canaux. La **Figure 11** représente trois images polarimétriques RADARSAT-2 (18 mai, 11 juin et 5 juillet 2009) affichée en décomposition de Pauli (**Rouge** : T22, **Vert** : T33 et **Bleu** : T11) (Voir section 2.4.1.1).

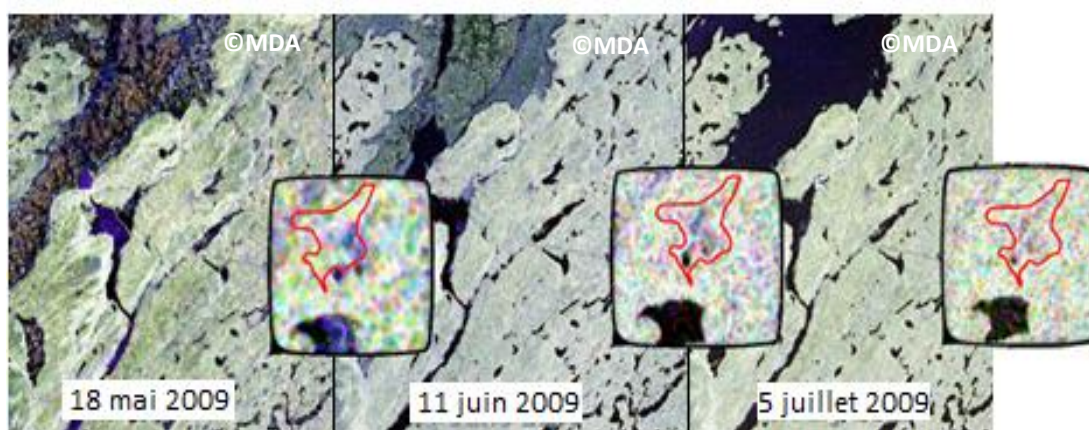


Figure 11 : Image polarimétrique RADARSAT-2 de la zone d'étude incluant la tourbière Abeille (Décomposition de Pauli) ©MDA, 2009.

Lorsqu'une onde polarisée horizontalement (ou verticalement) touche une cible, l'onde diffusée peut avoir des composantes dans les deux directions orthogonales (horizontales et verticales). Ces composantes constituent un ensemble complet permettant de représenter l'onde électromagnétique. Analogiquement, les propriétés de diffusion d'une cible sont contenues en totalité par la matrice de diffusion [S] qui décrit comment la diffusion transforme le champ électrique de l'onde incidente au champ électrique de l'onde diffusée. Tout diffuseur est caractérisé par sa matrice de diffusion [S] qui s'écrit sous la forme (Lee & Pottier, 2009) :

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Les coefficients de la matrice sont des valeurs complexes, et ils reflètent la réponse mesurée de polarisation de transmission-réception. La matrice [S] peut-être exprimée sous la forme du transposé de la matrice des vecteurs de rétrodiffusion :

$$\mathbf{K}_S = (\mathbf{S}_{HH}, \mathbf{S}_{HV}, \mathbf{S}_{VH}, \mathbf{S}_{VV})^t \quad (4)$$

Une image polarimétrique SAR est appelée une image multi-canal, car les éléments du vecteur représentent les canaux des images polarimétriques (Lee & Pottier, 2009). L'énergie totale reçue est définie par :

$$\text{SPAN} = |\mathbf{S}_{HH}|^2 + |\mathbf{S}_{HV}|^2 + |\mathbf{S}_{VH}|^2 + |\mathbf{S}_{VV}|^2 \quad (5)$$

Avec :

SPAN : l'énergie totale reçue.

$\mathbf{S}_{HH}$, $\mathbf{S}_{HV}$, $\mathbf{S}_{VH}$ et $\mathbf{S}_{VV}$: les vecteurs de rétrodiffusion.

$|\mathbf{S}_{HH}|$, $|\mathbf{S}_{HV}|$, $|\mathbf{S}_{VH}|$ et $|\mathbf{S}_{VV}|$ représentent les normes des vecteurs de rétrodiffusion.

Les imageries radar sont souvent utilisés en hydrologie et en gestion des ressources en eau pour caractériser les changements éco-hydrologiques des bassins versants et d'estimer les variations de l'humidité du sol (Filion, 2015, Ouattara, 2002).

La télédétection de l'humidité du sol est possible grâce au contraste diélectrique entre les propriétés diélectriques de l'eau liquide (constante diélectrique de 80) et les particules du sol minérales ou organiques (constante diélectrique de l'ordre de 3). Si l'humidité du sol augmente, la constante diélectrique du complexe sol (matière minérale, organique et eau liquide) augmente et se traduit par une augmentation du signal microonde rétrodiffusé vers le capteur radar.

On distingue deux types de décompositions : les décompositions cohérentes et les décompositions incohérentes.

2.4.1 Les théorèmes de décompositions polarimétriques

L'onde rétrodiffusée d'une cible, est essentiellement caractérisée par une information polarimétrique (CCT, 2013). Cette dernière décrit la géométrie, les caractéristiques biologiques et physiques de la cible. Afin de mener une analyse polarimétrique des images radar, une représentation de cette information est nécessaire. Cette

représentation ne peut se réaliser que par une décomposition polarimétrique de la cible (Nait & Aichouche, 2009).

2.4.1.1 Décompositions cohérentes

Les décompositions cohérentes sont « l'ensemble de théorèmes développés pour une caractérisation de la rétrodiffusion d'une cible » (Cloude & Pottier, 1996, Nait & Aichouche, 2009). L'objectif de ces décompositions est d'exprimer la matrice de diffusion $[S]$ mesurée par le radar, en tant que la combinaison des réponses de dispersion d'objets simples :

$$S = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \text{ (Matrice de diffusion)} \quad (6)$$

Où α_i est le coefficient de diffusion, tandis que S_i est la réponse de chacun des objets, nommé les objets canoniques. Différents décompositions permettant d'analyser les propriétés polarimétriques des diffuseurs purs ont été développées, telles que la décomposition de Pauli, de Krogager, de Cameron et de Touzi. D'abord, la décomposition de Pauli permet de distinguer la nature du mécanisme de diffusion implicite dans les données polarimétriques. La rétrodiffusion engendrée par des tourbières est généralement formée par une combinaison de trois composantes : la diffusion de la surface (causée par la surface de l'eau), la diffusion volumique (la végétation), et la double réflexion qui provient de l'interaction entre la végétation et le sol. Cette décomposition exprime la matrice de diffusion $[S]$ comme une somme de trois matrices $[S]_a$, $[S]_b$, $[S]_c$ dans une base dite la base de Pauli. Cette équation est donnée à l'**Annexe A (Équation A1)** (Cloude & Pottier, 1996), où chaque matrice correspond à un mécanisme de diffusion particulier (**Équations A2, A3, A4, et A5**) (Lee & Pottier, 2009). Ensuite, la décomposition de Krogager (Gaglione *et al.*, 2014) consiste à écrire la matrice de diffusion sous la forme d'une combinaison des réponses d'une sphère, d'un diplane et d'une hélice. Cette décomposition s'écrit dans la base linéaire orthogonale (h,v) (**Équation A6**). Si on suppose que la matrice de diffusion est exprimée dans la base de polarisation circulaire (r,l), alors la matrice de diffusion se réécrit autrement (**Équations A7, A8**). Ensuite, la décomposition de Cameron (Cloude & Pottier, 1996) consiste à factoriser la matrice de diffusion $[S]$ (**Équation A9**) en se basant sur les deux propriétés de base de la cible (la réciprocité et la symétrie). Enfin, la

décomposition de Touzi est un corollaire déduit de la décomposition de Cameron. Elle a été développée afin de mieux identifier les cibles dans une image SAR (Gosselin, 2013). Elle permet la détermination de la nature de la cible à partir de la matrice des composantes symétriques maximales $[S_{\text{sym}}^{\text{Max}}]$. Deux types de cibles radar sont reconnus : les cibles ponctuelles (cible dure, bateau, bâtiment) dont la réponse pure occupe un seul pixel et les cibles naturelles dont la réponse est constituée de plusieurs pixels (parcelle agricole, forêt, tourbière).

2.4.1.2 Décompositions incohérentes

Contrairement aux décompositions cohérentes, où la matrice de diffusion $[S]$ a uniquement la capacité de caractériser les cibles pures, les décompositions incohérentes permettent une meilleure caractérisation de la rétrodiffusion des cibles naturelles (Nait & Aichouche, 2009). Différentes décompositions peuvent être regroupées. Dans la suite de ce chapitre, nous présenterons les décompositions d'Huynen, de Freeman-Durden, de Yamaguchi et de Cloude-Pottier (Lee & Pottier, 2009). Premièrement, la décomposition phénoménologique d'Huynen permet l'analyse des cibles distribuées. L'étude se mène à l'aide de la matrice de covariance $[T]$ (**Équation A10**) paramétrée par neuf coefficients, nommés coefficients d'Huynen.

L'ensemble de ces paramètres distincts permet généralement une interprétation physique de la cible. Deuxièmement, la décomposition de Freeman-Durden est basée sur la factorisation de la matrice de diffusion en trois mécanismes de diffusion : diffusion surfacique, double rebond (double réflexion) et diffusion volumique (**Équation A11**) (Lee & Pottier, 2009, Nait & Aichouche, 2009). Troisièmement, la décomposition de Yamaguchi intervient pour compléter la décomposition de Freeman-Durden. Elle consiste à ajouter une quatrième composante, qui décrit la diffusion d'une hélice. Afin d'analyser en précision les différents mécanismes de diffusion des cibles, Cloude et Pottier (1996) (Cloude & Pottier, 1996) ont proposé une méthode d'extraction de diffusion moyenne à partir de la décomposition de la matrice de cohérence $[T]$ en valeurs propres. Le principe de cette décomposition consiste à exprimer la matrice de cohérence en fonction de trois mécanismes de diffusion indépendants soit la diffusion de surface, la diffusion de volume et le double bond. En 1997, Cloude et Pottier ont défini trois paramètres : entropie (H), anisotropie (A) et angle alpha (α), qui permettent

de mieux distinguer les divers mécanismes de diffusion (Lee & Pottier, 2009). En plus, cette décomposition consiste à factoriser une cible distribuée en somme de trois cibles pures (Nait & Aichouche, 2009). Elle se traduit par l'écriture de la matrice de cohérence [T] dans une base de ses vecteurs propres, qui caractérisent les phénomènes physiques de la diffusion (**Équation A12**).

2.4.1.2.1 Entropie (H)

L'entropie est définie comme mesure de dominance d'un mécanisme de diffusion donné. C'est une estimation du caractère aléatoire de la diffusion. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Une entropie de 0 indique que la diffusion provient d'un mécanisme de diffusion unique et l'entropie égale à 1 représente un mécanisme de diffusion totalement aléatoire et aucune information polarimétrique ne peut être extraite. Elle est aussi définie par la mesure du degré du désordre aléatoire statistique de la rétrodiffusion (**Équation A13**). Deux cas se distinguent :

$H = 0$:

- ✓ On parle d'une cible pure ;
- ✓ Un signal polarisé ;
- ✓ $\lambda_1 = SPAN$, $\lambda_2 = 0$ et $\lambda_3 = 0$ et
- ✓ Un seul mécanisme de rétrodiffusion intervient dans la réponse globale de la cible.

$H = 1$:

- ✓ On parle d'une cible distribuée ;
- ✓ Un signal non polarisé ;
- ✓ $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{SPAN}{3}$ et
- ✓ Plusieurs mécanismes de rétrodiffusion interviennent dans la réponse globale de la cible et leur probabilité d'apparition est égale.

2.4.1.2.2 Anisotropie (A)

L'anisotropie permet de mesurer la différence entre les mécanismes de diffusion secondaires. L'anisotropie intervient comme un complément de l'entropie. En effet, elle

donne des informations supplémentaires lorsque l'entropie $H \geq 0,7$; deux cas se distinguent :

- ✓ Si l'entropie (H) est faible, l'anisotropie (A) est inutile : λ_2 et λ_3 sont faibles et
- ✓ Si l'entropie (H) est élevée ($H > 0,7$), l'anisotropie (A) est utile pour distinguer deux zones différentes.

Elle décrit l'importance relative du mécanisme secondaire de diffusion par rapport au troisième mécanisme de diffusion (**Équation A14**). **A** tend vers 0 quand les deux mécanismes de diffusion sont égaux.

2.4.1.2.3 Angle α

L'angle α représente le type de mécanisme de diffusion dominant. Autrement-dit, il indique le mécanisme qui contribue le plus à la rétrodiffusion. Quand l'entropie est très faible, l'angle α donne de l'information sur la nature du mécanisme de diffusion dominante (surface, double réflexion ou volume). Il est mathématiquement défini (**Équation A15**). Lorsque les données sont polarisées, $N = 3$. L'angle α varie entre 0° (une diffusion sur une surface) et 90° (une diffusion par un dièdre) :

- ✓ Si $\alpha = 0$: le mécanisme est celui d'une diffusion de surface canonique.
- ✓ Si $\alpha = 45^\circ$: le mécanisme de diffusion anisotrope.
- ✓ Si $\alpha = 90^\circ$: le mécanisme de diffusion est celui d'un dièdre.

2.4.1.2.4 Angle α_1

À partir de la relation d'angle moyen α (**Équation A15**), on peut calculer les paramètres $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ sur les trois composantes des vecteurs propres de la matrice T. Le paramètre α_1 utilisé dans ces études de recherche, correspond à l'angle α associé au premier vecteur propre v_1 . Le paramètre α_1 est caractérisé par sa capacité à estimer l'humidité du sol (Daniel, 2009).

2.4.2 La surveillance de l'humidité du sol à partir des paramètres polarimétriques

Comme les systèmes micro-ondes actifs mesurent la constante diélectrique des sols, qui est directement liée à la teneur en eau, les recherches se sont rapidement portées sur le développement d'algorithmes pour l'estimation de l'humidité du sol (Ulaby *et al.*, 1986). Depuis le lancement d'Envisat (2002) et de RADARSAT-2 (2007), plusieurs recherches ont été effectuées pour exploiter la multipolarisation et la polarimétrie. Holah (2005) a réalisé sa thèse sur le *Potentiel des nouveaux capteurs radar multipolarisation et polarimétrique pour la caractérisation des états de surface en milieu agricole*. Cette étude avait comme objectifs principaux d'examiner la potentiel des images ASAR pour l'estimation de l'humidité et de la rugosité du sol en zones agricoles et d'évaluer la précision de l'estimation de l'humidité du sol en utilisant l'aspect multi-polarisation et multi-incidence du capteur ASAR. Les résultats obtenus au cours de cette thèse indiquent que le signal radar est plus sensible à l'humidité du sol en polarisation HH qu'en polarisation VV; la configuration optimale pour une meilleure estimation de l'humidité du sol, avec une influence minimale de la rugosité de surface, est l'utilisation des images ASAR à petites et moyennes incidences; le signal radar augmente linéairement avec l'humidité du sol mais quand ce dernier devient très humide (teneur en eau volumique > 35%), le signal n'augmente plus avec l'humidité et commence même à décroître (Holah, 2005); la sensibilité du signal radar à l'humidité diminue avec l'angle d'incidence. En général, le travail effectué confirme la capacité des images radar pour évaluer les paramètres de surface du sol.

En 2007, Touzi a publié dans le Journal Canadien de Télédétection sa recherche qui s'intitule *la caractérisation des milieux humides en utilisant la polarimétrie RADARSAT-2*. Pour se faire, il a développé une décomposition incohérente (Touzi) pour la décomposition invariante du signal radar diffusé par les milieux humides. La phase de la diffusion symétrique φ_{α_s} est utilisée pour une meilleure caractérisation des espèces en milieux humides. Selon Touzi (2007) ce paramètre φ_{α_s} rend possible la distinction entre les tourbières boisées dominées par des conifères et les forêts de feuillus des hautes terres durant la saison estivale. Elle permet aussi de distinguer les tourbières arbustives des tourbières minérotrophes.

En 2010, Bernier *et al.*, avait réalisé une étude sur *l'évaluation 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)*. Pour cela, ils ont étudié le comportement du signal radar en polarisations HH, HV, VH, VV, en fonction des

paramètres de surface (l'humidité et la rugosité du sol), afin de déterminer une relation entre eux. L'angle α est le paramètre le plus sensible à l'humidité du sol. Le paramètre polarimétrique anisotropie (A) ne montre aucune dépendance aux paramètres de surface.

Aubert (2012) a effectué une étude sur la *Caractérisation de l'état de surface des sols nus agricoles par imagerie radar TerraSAR-X*. Cette thèse était divisée en deux volets : (i) l'analyse de la sensibilité aux états de surface (EDS) du sol pour un signal en bande X du capteur TerraSAR-X à très hautes résolutions spatiale (1 m) et temporelle, et (ii) le développement d'une méthode permettant d'estimer et de cartographier l'humidité des sols nus agricoles. La comparaison de la sensibilité du capteur TerraSAR-X à celle des capteurs en bande C montre que le capteur TerraSAR-X est aussi bien adapté pour estimer et cartographier l'humidité du sol à des échelles spatiales fines (50 m²).

Jammali (2016) a réalisé un mémoire intitulé *L'analyse des signaux radars polarimétriques en bandes C et L pour le suivi de l'humidité du sol de sites forestiers*. L'objectif ultime de l'étude était l'évaluation du potentiel de données polarimétriques en bande L (UAVSAR) et C (RADARSAT-2) pour le suivi de l'humidité du sol dans les sites forestiers de SAMPVEX12 localisés au Manitoba (Canada). Les résultats ont montré qu'en bande L, les paramètres polarimétriques n'ont pas de valeur ajoutée par rapport aux signaux conventionnels multipolarisés d'amplitude. Par contre, en bande C, certains paramètres polarimétriques ont montré de meilleures relations significatives avec l'humidité du sol que les signaux conventionnels multipolarisés d'amplitude tels que les coefficients de corrélation ($\phi_{HHHV}, \phi_{VVHV}, \phi_{HHVV}$) ; l'entropie (H), l'anisotropie (A) et l'angle alpha extraits de la décomposition de Cloude-Pottier ; et les puissances de diffusion de surface (P_s), de double bond (P_d) extraites de la décomposition de Freeman-Durden.

2.5 Classification des données satellitaires radar à l'aide de l'approche orientée-objets

Les images numériques représentent un ensemble d'objets à la surface du sol. Ces derniers sont caractérisés par des signatures spectrales particulières. Parfois, il est difficile de distinguer entre les signatures spectrales des objets, on peut trouver des

signatures similaires pour des types d'objets différents, comme entre les différents types de végétation.

Il existe deux grandes familles de méthodes de classification : la méthode supervisée et la méthode non supervisée. Ces techniques se basent sur des algorithmes traditionnels tels qu'ISODATA, K-mean (K-moyenne) et le maximum de vraisemblance (Caloz, RÉGIS & Pointet, 2003b). Le principe de ces algorithmes réside dans l'analyse des propriétés spectrales d'un pixel à l'intérieur des zones d'utilisation. Ces techniques sont souvent utilisées pour une classification de l'occupation du sol en milieu agricole par exemple.

Pour des milieux complexes, les méthodes mentionnées au paragraphe précédent risquent d'être limitées. Elles ne sont pas souvent efficaces puisqu'elles ne permettent pas de distinguer entre la variabilité spectrale des objets, ce qui rend leur identification plus difficile entraînant des classifications d'une moindre précision. C'est dans ce sens que des méthodes de segmentation et de classification en se basant sur l'information des régions (groupes de pixels), ont été développées. Cette approche est appelée la classification orientée-objets (Caloz & Pointet, 2003a).

Cette approche comprend deux étapes principales, la segmentation et la classification.

2.5.1 Segmentation

L'étape préliminaire de la classification orientée-objets. C'est une étape qui consiste à créer des objets de forme et dimension similaire à partir du processus de fusionnement des pixels aux pixels voisins. Le fusionnement des pixels aux pixels voisins se fait par plusieurs paramètres qui assurent que les hétérogénéités spectrales et spatiales du groupe est minimale, afin de créer des objets de forme et dimension similaire (Benz *et al.*, 2004). Autrement dit, cette étape considère « chaque pixel comme un objet distinct et, par la suite, des paires d'objets sont fusionnés pour former des objets plus grands » (Hoang, 2014). Lors de la fusion de deux objets en un groupe, l'hétérogénéité f du nouvel objet est calculée suivant les équations **B1** et **B2** que l'on retrouve à l'annexe B (Flanders *et al.*, 2003, Lang *et al.*, 2006).

La segmentation multi-échelle (hiérarchique) peut aussi être effectuée dans le processus de la classification orientée-objets. Dans eCognition™, la hiérarchie image peut être

utilisée dans deux étapes du processus de traitement, soit la segmentation multi-échelle et l'établissement de classes. Cette hiérarchie permet de centrer notre intérêt seulement sur les zones d'entraînement et permet aussi aux sous-classes d'avoir les mêmes propriétés que leur classe mère. En analyse d'image numérique, on commence d'abord par une analyse avec une segmentation à résolution grossière, ensuite on utilise une segmentation plus fine sur les zones de l'image correspondant à des caractéristiques prédéfinies (Kropatsch & Bischof, 2001).

2.5.2 Classification de l'image

La technique de classification est appliquée juste après la segmentation des images, dont la nécessité d'une bonne connaissance de chaque type d'objets à classer par l'utilisateur. Deux types d'approches pour la classification des objets se distinguent, l'approche traditionnelle du plus proche voisin et l'approche d'appartenance (fonctions d'appartenance définies par l'utilisateur : fonctions statistiques). L'approche du plus proche voisin, peut être utilisée lorsque la classe est distinguée par un ou peu d'attributs et son exactitude est inférieure à celle produite par l'approche d'appartenance (Platt & Rapoza, 2008). Cette approche a souvent été utilisée dans des travaux de recherche en classification orientée-objets. Comme il est montré au tableau 4, il existe quatre groupes d'attributs d'objets que l'utilisateur peut utiliser (Baatz *et al.*, 2004): Attributs spectraux, texturaux, géométriques et contextuels.

Tableau 4 : Attributs utilisés lors de la classification orientée-objet.

Attributs spectraux	Attributs texturaux	Attributs géométriques	Attributs contextuels
Moyenne	Homogénéité	Superficie	Distance à l'objet 'x'
Écart-type	Dissimilarité	Largeur	Existence de l'objet 'x'
NDVI	Entropie	Périmètre	Contour relatif partagé avec l'objet 'x'
Brillance		Orientation	
Contraste			
Coloration			

Les attributs utilisés lors de la classification orientée-objets sont calculés suivant les équations présentées à l'Annexe B (Équations B3, B4, B5 et B6).

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les notions théoriques nécessaires à la compréhension de notre projet de recherche ont été brièvement introduites. Cette partie aide à mieux assimiler ce que sont les tourbières (l'écosystème tourbière) ainsi que leur formation, leurs types, leur hydrologie et leur télédétection. Ensuite, la télédétection micro-ondes actives a été définie ainsi que la polarimétrie. Les principales décompositions ont été discutées. Les décompositions polarimétriques permettent la séparation du rayonnement rétrodiffusé d'un diffuseur distribué (Dissanska *et al.*, 2010), comme le découplage des effets de l'humidité du sol et la rugosité de la surface sur le signal rétrodiffusé (Hajnsek *et al.*, 2003), et sa distribution le long de la dimension verticale de la structure du couvert végétal.

Plusieurs paramètres décrits à la **section 2.4** peuvent être utilisés comme données d'entrée (canaux) dans les procédures de classification.

Dans le cadre de cette étude, nous avons travaillé sur des paramètres polarimétriques qui sont sensibles à l'humidité du sol (Khaldoune, 2006, Lee & Pottier, 2009). Parmi ceux-ci, on cite : l'entropie (H), l'anisotropie (A), l'angle α et l'angle α_1 . Ces paramètres polarimétriques ont été utilisés en premier pour évaluer leur sensibilité à l'humidité du sol et ensuite pour la classification des structures internes des tourbières étudiées à l'aide d'une classification orientée-objets.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Introduction

Ce chapitre décrit l'approche adoptée pour atteindre les objectifs de ce travail de recherche. Les tourbières étudiées sont d'abord présentées. L'approche retenue pour évaluer l'efficacité des données polarimétriques RADARSAT-2 pour la surveillance de l'humidité des tourbières est ensuite introduite (objectif 1, section 3.3), incluant l'analyse du comportement de la rétrodiffusion à l'humidité du sol et l'analyse de la relation entre les paramètres polarimétriques et l'humidité du sol. Troisièmement, ce chapitre expose la démarche de la classification orientée-objets des images polarimétriques RADARSAT-2 (objectif 2, section, 3.4). Enfin, il présente l'approche suivie pour produire les cartes représentant les variations de l'humidité à la surface des tourbières entre 2009 et 2010 (objectif 3, section 3.5).

3.2 Zone d'étude

La zone d'étude est située à 15 km au sud du complexe hydroélectrique Laforge-1 (Figure 12). Deux tourbières (Abeille et Chenille) ont été choisies pour l'étude selon leur accessibilité, leur petite taille et la présence d'une proportion relativement élevée d'eau en surface et d'un exutoire unique (Figure 13) (Proulx-McInnis, 2010).

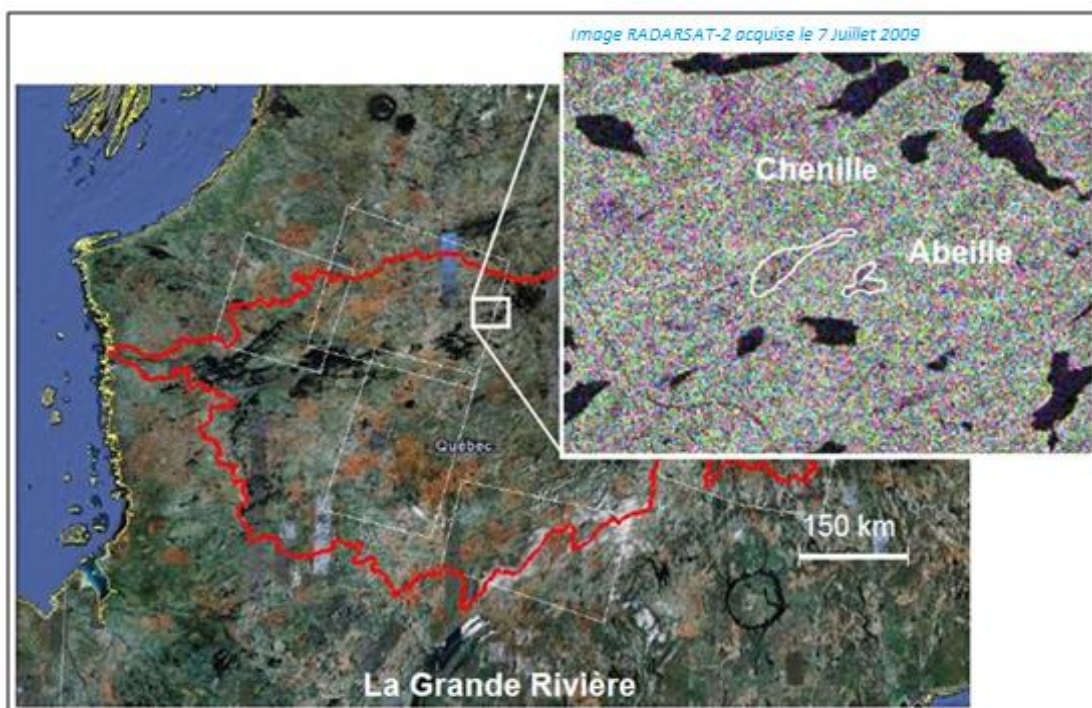


Figure 12 : La délimitation du bassin versant de La Grande Rivière ainsi qu'une image polarimétrique RADARSAT-2 de la zone étudiée localisant les deux tourbières Chenille et Abeille. © MDA.

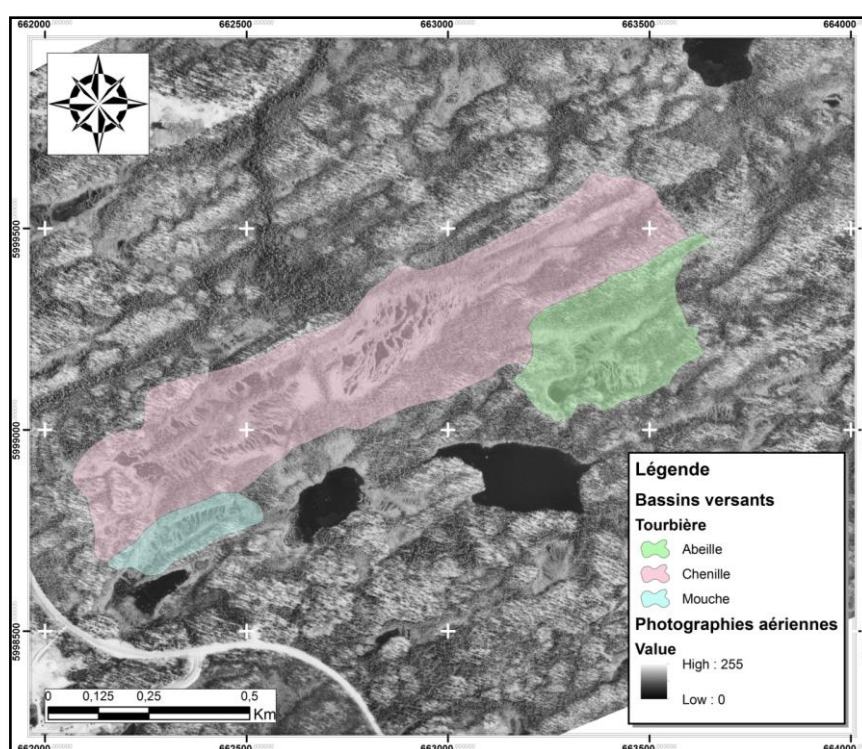


Figure 13 : Carte géo-référencée représentant les deux bassins versants de deux tourbières étudiées. À noter que l'on retrouve également le bassin versant d'une troisième tourbière (Mouche) qui n'a pas fait l'objet de ce mémoire.

Le bassin versant de la tourbière Abeille (Figures 14 et 15) a une superficie de 12,5 ha, et contient 72% de forêts boréales et 28% de tourbières minérotrophes (dont 31% d'enneigement). La tourbière est divisée en deux ailes, elle est modelée avec une succession de marres allongées et parallèles entre elles et perpendiculaires au sens de l'écoulement. La pente de surface moyenne de la tourbière a été estimée à 1,77% (Proulx-McInnis, 2010).



Figure 14 : Photographie de la tourbière Abeille (Tirée de (Carrer, 2014)).

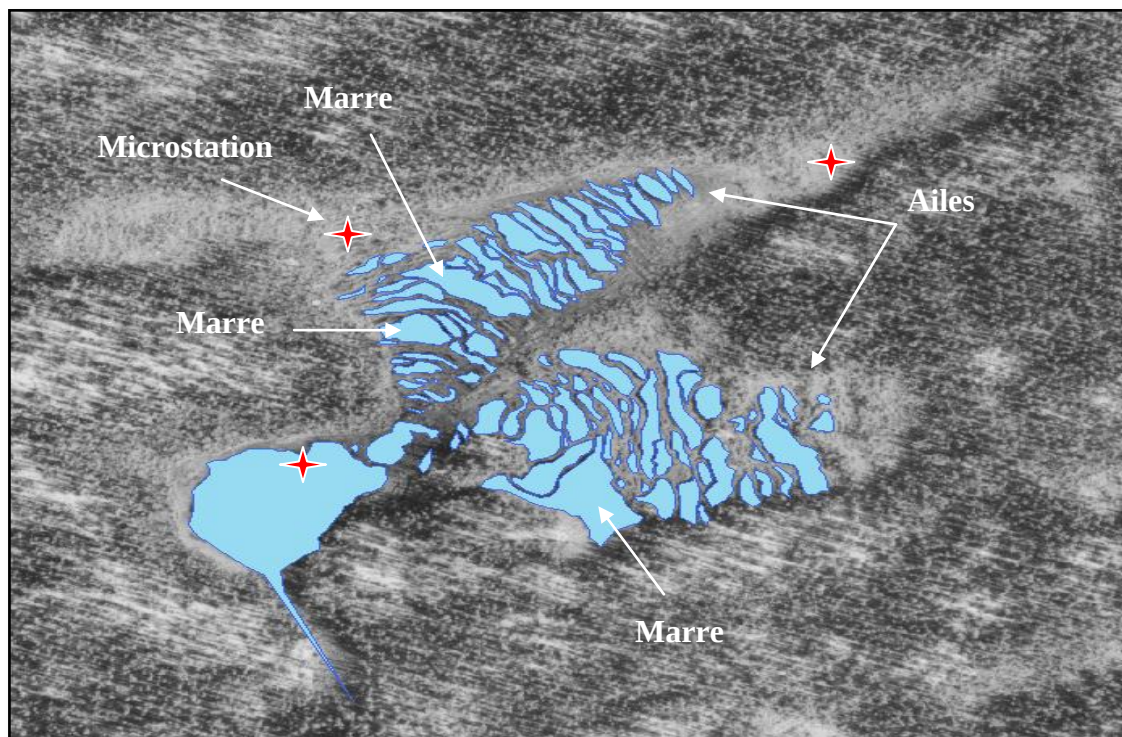


Figure 15 : Photographie aérienne où les marres de la tourbière Abeille sont mises en évidence ainsi que les trois micro-stations.

Le bassin versant de la tourbière Chenille (Figures 16 et 17) a une superficie de 3,7 ha. Il contient 49% de couvert forestier et 51% de tourbières. La tourbière est modelée par une seule aile, avec une succession de grandes marres et de crêtes étroites (Dribault, 2012). La pente moyenne de la surface de la tourbière a été estimée à 1,5%. Ce bassin est caractérisé par un exutoire unique avec une altitude de 437m au-dessus du niveau de la mer (Dribault, 2012).



Figure 16 : Image satellitaire optique haute résolution de la tourbière Chenille (Tirée de Google Maps le 7 janvier 2016).

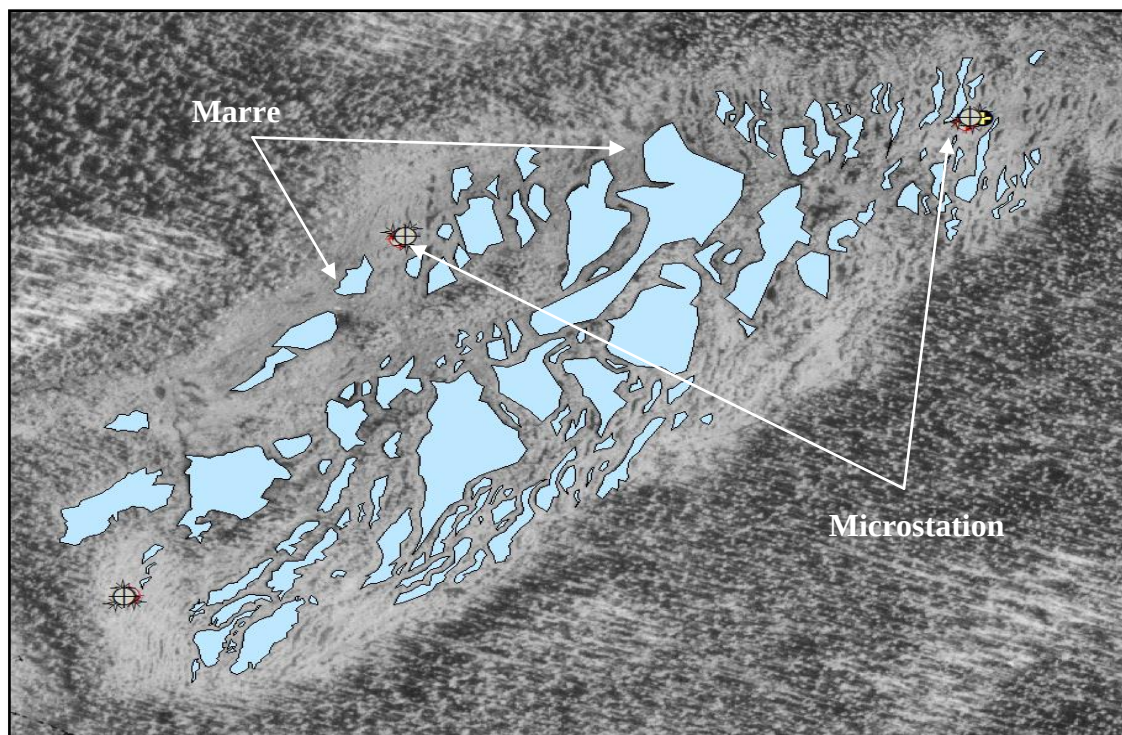


Figure 17 : Photographie aérienne où les marres de la tourbière Chenille sont mises en évidence ainsi que les trois micro-stations.

3.3 L'analyse de la relation entre les paramètres polarimétriques et les paramètres de surface (l'humidité du sol)

L'approche adoptée pour atteindre le premier objectif de cette étude est résumée dans la Figure 18 ci-dessous :

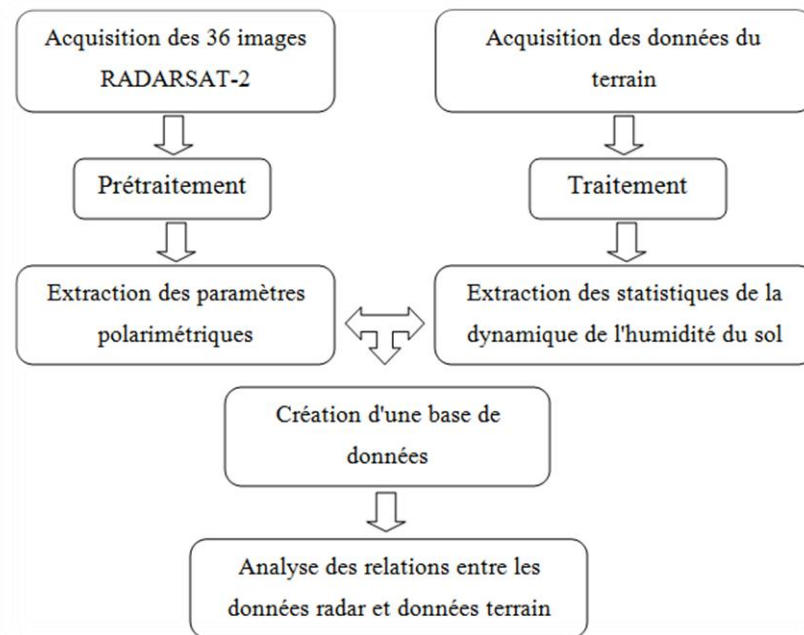


Figure 18 : Approche méthodologique pour atteindre le premier objectif de l'étude.

Comme il est montré à la **Figure 18**, la démarche suivie se réalise en trois étapes : le prétraitement des images après leur acquisition, l'extraction des paramètres polarimétriques et l'analyse des résultats. Pour ce faire, on disposait de 36 images polarimétriques RADARSAT-2 en bande C (5,4 GHz) acquises en mode Quad-Pol Fin (polarisation quadruple : HH, HV, VH, VV) sur deux saisons végétatives (mai à octobre 2009 et 2010), couvrant une scène de 25 km par 25 km, avec différents angles d'incidence (**FQ12** : de 31,5° à 32,9° ; **FQ16** : 35,6° à 37,0° et **FQ20** : 39,4° à 40,7°) et une dimension des pixels de **6,25 m**. Après l'acquisition des images, des prétraitements (étalonnage radiométrique, réduction du chatoiement (filtre Lee) et la correction géométrique) avaient été appliqués afin de les rendre superposables les uns aux autres en projection cartographique (Jacome *et al.*, 2013). Le logiciel PolSARpro™ (Agence Spatiale Européenne) avait été utilisé pour le traitement et l'extraction des données de la polarimétrie radar (Jacome *et al.*, 2013).

Comme le premier objectif est l'évaluation du potentiel des données polarimétriques pour une surveillance régulière de l'humidité de la surface, la rétrodiffusion et les paramètres polarimétriques de 5 images RADARSAT-2 ont été sélectionnées couvrant la période du 17 août au 17 septembre 2010. Cette période représente la phase de transition entre une saison chaude relativement sèche et une autre humide (Figure 19). Les mesures in situ de l'humidité du sol ont été réalisées à l'aide de sondes FDR

installées dans les deux tourbières (5 emplacements) dans le cadre du projet Aqualyse (Jacome *et al.*, 2013). Les sondes étaient placées 5 cm sous la surface du sol.

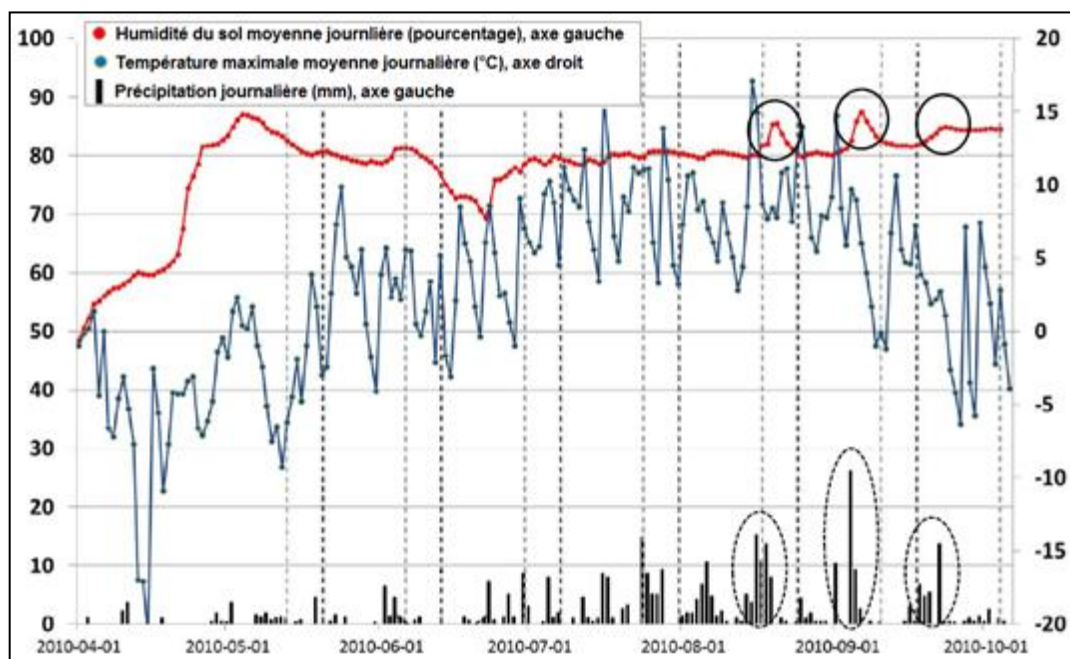


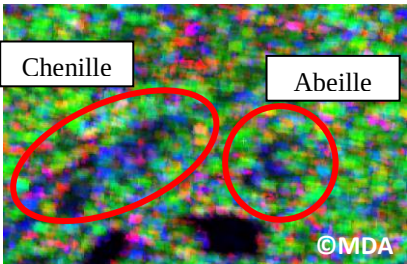
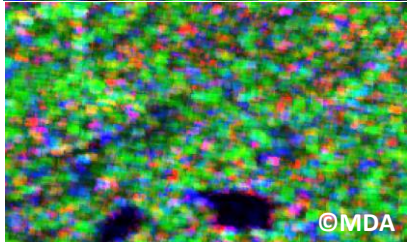
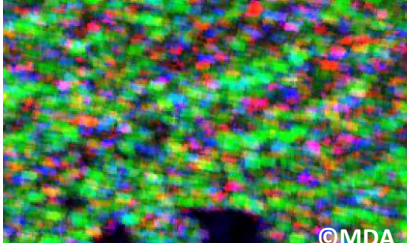
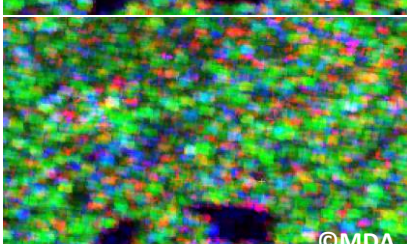
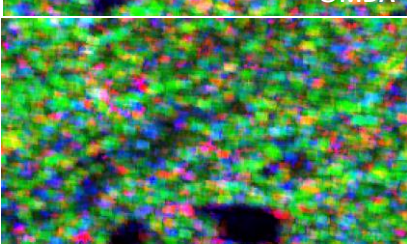
Figure 19 : Profil de l'humidité du sol et des précipitations par rapport à la température maximale pour l'année 2010 (modifié de (Jacome *et al.*, 2013)).

Le choix de ces cinq images revient à la base au manque de données d'humidité du sol pour les différentes dates pendant l'année 2009, soient pour 15 images. Un problème est survenu lors de la collecte de ces données. L'équipe qui était chargée de récupérer les mesures in situ, les avait supprimées accidentellement au lieu de les sauvegarder. Ensuite, l'ensemble des données pour les trois premières semaines du mois de mai a été éliminé, car c'est une période où les tourbières étaient complètement couvertes de neige. À cause de l'ensoleillement et des températures positives la neige était humide. Dans ce cas le signal radar en bande C est absorbé dans les 5 premiers centimètres du couvert neigeux (Bernier *et al.*, 1996), ce qui ne permet pas d'estimer l'humidité du sol ou de la végétation sous-jacents. À la quatrième semaine de mai, le processus de fonte du couvert nival est avancé, la neige semble plus humide durant cette période. Le sol dégèle et absorbe aussi l'eau de fonte comme le montre la figure 19, les mesures d'humidité de la surface de la tourbière augmentent de 40 % à 65 % du 21 mai au 30 mai.

Les plages d'angle d'incidence des 5 images varient selon les produits Fine Quad (FQ12, FQ16 et FQ20) acquis (Tableau 5). La résolution spatiale à l'azimut est de

l'ordre de 5,2 m × 7,6 m, et la dimension des pixels des images après la correction géométrique est de 6,25m. Ces images ont été fournies par l'Agence Spatiale Canadienne (ASC) dans le cadre du programme SOAR (Science and Operational Applications Research for RADARSAT-2). Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des images utilisées.

Tableau 5 : Tableau représentant les caractéristiques des images RADARSAT-2 utilisées.

Date d'acquisition	Composition colorée	Orbite	Produit	Angle d'incidence	Mode
	Rouge : Cloude_T33 Vert : DERD Bleu : Freeman_Odd				
17 Août 2010 ©MDA		Desc	FQ16	35,6° à 37,0°	Quad-Pol fin (HH, HV VH, VV)
24 août 2010		Desc	FQ20	39,4° à 40,7°	Quad-Pol fin (HH, HV VH, VV)
3 septembre 2010		Desc	FQ12	31,5° à 32,9°	Quad-Pol fin (HH, HV VH, VV)
10 septembre 2010		Desc	FQ16	35,6° à 37,0°	Quad-Pol fin (HH, HV VH, VV)
17 septembre 2010		Desc	FQ20	39,4° à 40,7°	Quad-Pol fin (HH, HV VH, VV)

Afin de réaliser l'objectif de ce travail, nous avons évalué avec précision la relation entre l'humidité de la surface et les paramètres polarimétriques, tout en explorant différentes méthodes d'analyse polarimétrique. Parmi ces méthodes, nous avons choisi la décomposition de Pauli et la décomposition de Cloude et de Pottier avec ses quatre paramètres soit l'entropie, l'anisotropie, l'angle α et l'angle α_1 . Le choix de ces décompositions a été basé sur trois raisons principales.

Dans un premier temps, les deux paramètres polarimétriques SERD et DERD sont définis comme un outil pour comparer l'importance relative des différents mécanismes de diffusion. Le paramètre DERD peut être comparé à l'**anisotropie** (A) provenant de la deuxième et de la troisième valeur propre de la matrice de cohérence [T]. Ensuite, le paramètre SERD devient utile lorsque les valeurs du paramètre polarimétrique **entropie** (H) sont grandes, afin de déterminer la nature et l'importance des différents mécanismes de diffusion. Les variations de SERD sont très sensibles à la rugosité de surface. En effet, la diffusion de surface domine le mécanisme de diffusion lorsqu'une surface est rugueuse, voire même sur des surfaces très rugueuses, tandis que les probabilités d'apparition du phénomène de double réflexion deviennent plus petites. Enfin, d'autres études ont évalué le potentiel de ces paramètres pour déterminer la rugosité ou l'humidité du sol (Dissanska *et al.*, 2010, Kurosu *et al.*, 1995).

Tableau 6 : Les décompositions polarimétriques calculées ainsi que leurs paramètres extraits des images RADARSAT-2.

Les décompositions polarimétriques calculées	Les paramètres extraits de la décomposition
Décomposition (H/A/α) Cloude et Pottier	Entropie
	Anisotropie
	Alpha
	Alpha-1
	SERD
	DERD
	T11 (Diffusion de surface)*
	T22 (Double réflexion)*
	C11 (Diffusion de surface)**
	C22 (Double bond)**
	C33 (Diffusion de volume)**
	Cloude T11
	Cloude T22
	Cloude T33

Freeman Durden	Freeman volume
	Freeman odd
Yamaguchi	Yamaguchi volume
	Yamaguchi odd
Van Zyl	Van Zyl volume
	Van Zyl odd

- * Éléments de la matrice de Cohérence [T] représentant des cibles pures. Il est lié directement aux propriétés physiques et géométriques du processus de diffusion.
- ** Éléments de la matrice de Covariance [C] représentant des cibles pures. Il est lié aux paramètres mesurables des mécanismes de diffusion.

Avant de s'embarquer dans l'étude du comportement des paramètres polarimétriques en fonction de l'humidité de la surface des tourbières, une analyse de la corrélation du coefficient de rétrodiffusion de chacune des polarisations à l'humidité de la surface a été effectuée afin de se familiariser avec ces images radar. Nous avons testé le comportement du signal radar rétrodiffusé en polarisation parallèle (HH et VV) comme en polarisation croisée (HV) aux variations de l'humidité de la surface des tourbières ainsi que les rapports de copolarisation et d'orthopolarisation (section 2.5.4) afin de trouver une sensibilité significative du coefficient de rétrodiffusion à l'humidité. Concernant l'étude de la sensibilité des paramètres polarimétriques à la teneur en eau, nous avons commencé par analyser la relation de chacun de ces paramètres pour les sondes FDR appartenant à chacune des zones étudiées (15 FDR) incluant toutes les dates. Néanmoins, cette démarche n'a pas montré de bons résultats (dispersion des points étudiés impliquant une faible corrélation). Ensuite, nous avons choisi de travailler avec la valeur moyenne de l'humidité du sol de chacune des zones d'étude plutôt qu'avec la valeur entière de l'ensemble des FDR. Ce qui nous a permis d'obtenir de meilleurs résultats, mais loin d'être comparables avec ceux des autres études (Aubert, 2012, Dissanska *et al.*, 2010, Holah, 2005). C'est dans ce sens, que nous avons poussé plus loin notre réflexion pour chercher la démarche adéquate afin de réaliser l'objectif de cette partie du projet. La démarche suivie pour étudier la relation des paramètres polarimétriques avec l'humidité de surface consiste à utiliser la valeur moyenne pour chacune des dates étudiées et la valeur moyenne de chaque paramètre polarimétrique pour chaque date. Les résultats seront discutés au chapitre 4. Afin de mieux cartographier les structures internes des tourbières, des photographies numériques à l'échelle du 20:000 ont été utilisées (Figures 21 et 22), puisque aucune images optiques à très haute résolution (<1m) avaient été acquises pour la période d'étude. Les

photographies aériennes utilisées datent de 1992. Elles ont été numérisées (pixel de 0,25 m) puis corrigées géométriquement et mosaïquées (Figure 20).

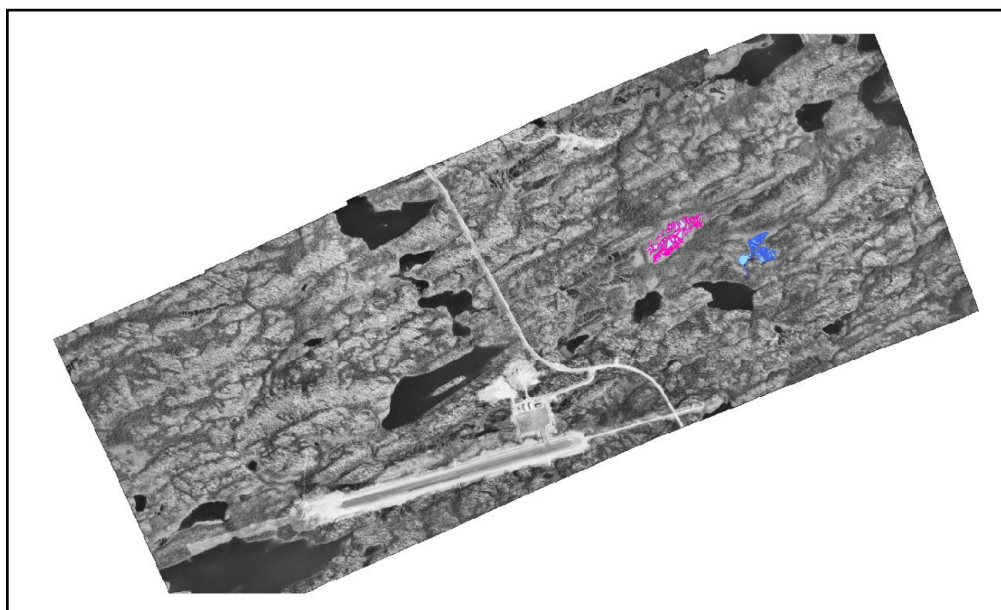


Figure 20 : Photographies aériennes datant de 1992 de la région d'étude d'une taille de (22738 pixels x13302 pixels). La dimension des pixels est de 0,25 m.
(**Rose** : Tourbière Chenille ; **Bleu** : Tourbière Abeille).

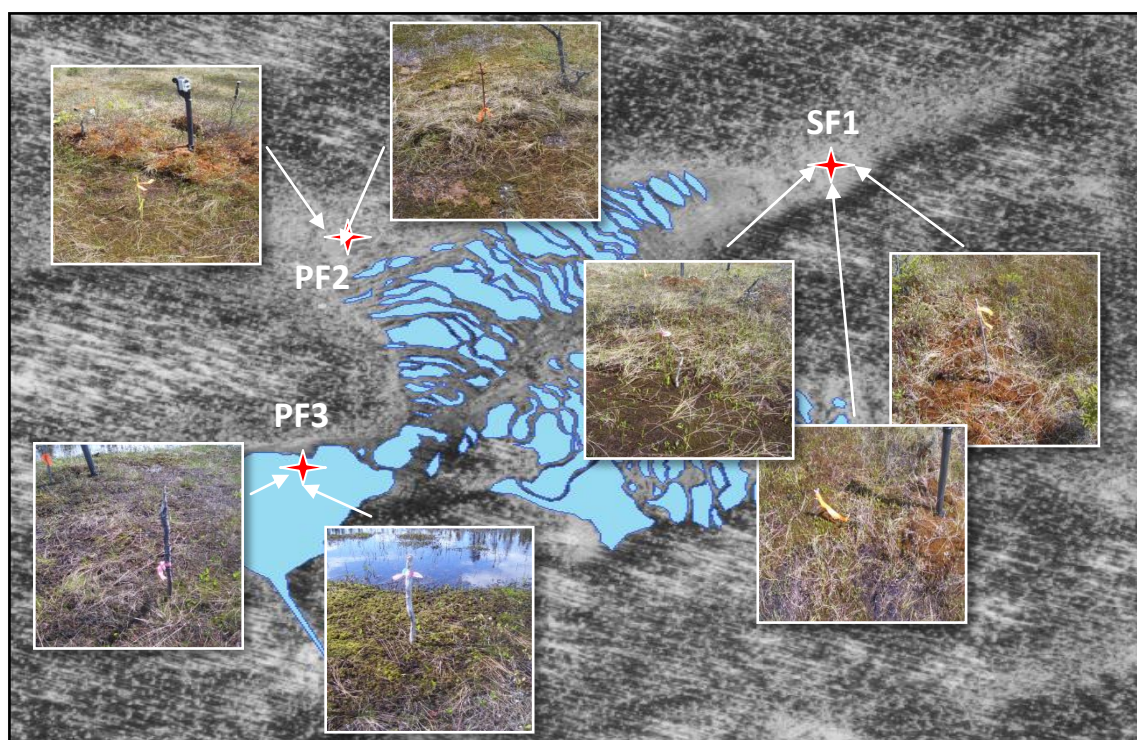


Figure 21 : La répartition de certaines photographies numériques in situ de la tourbière Abeille illustrant la couverture végétale près des sondes FDR.

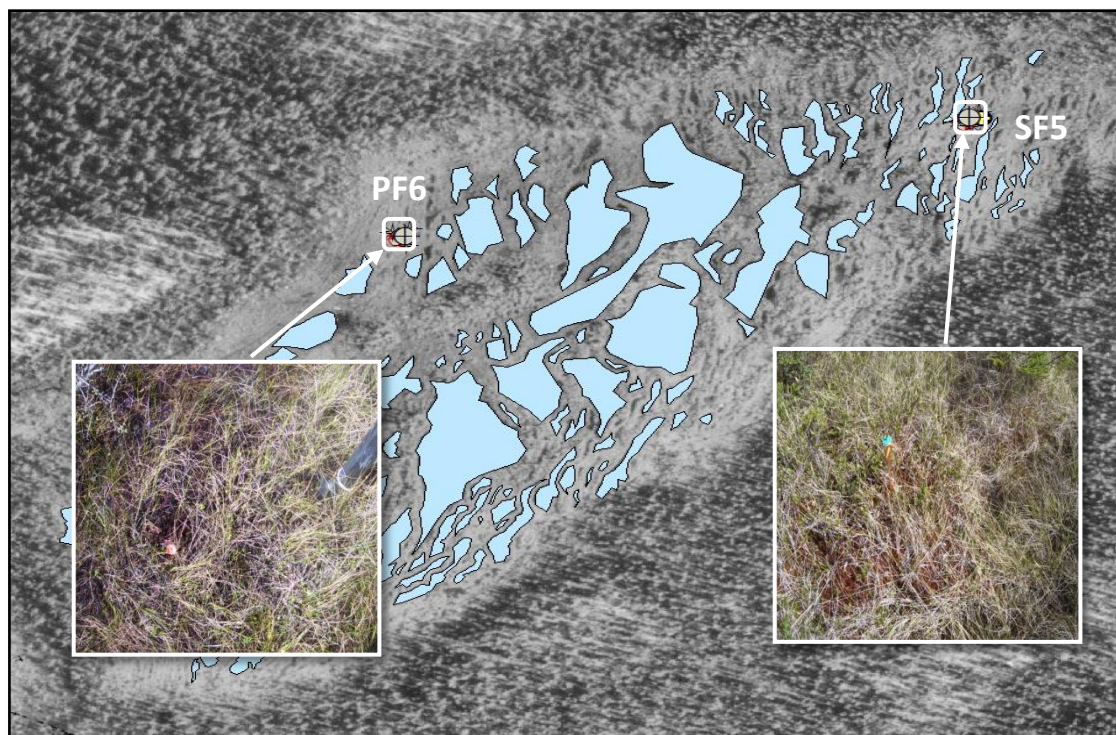


Figure 22 : Photographies numériques in situ illustrant la localisation des sondes FDR et la couverture végétale de la tourbière Chenille.

3.4 Classification orientée-objets des images polarimétriques RADARSAT-2

Pour réaliser le second objectif, une approche de classification orientée-objets pour deux images polarimétriques de RADARSAT-2 en mode Quad-Pol Fin (polarisation quadruple : HH, HV, VH, VV), datant du 17 août et du 17 septembre 2010, a été utilisée afin de caractériser les structures internes des tourbières du bassin de la Grande Rivière. Pour ces deux images, vingt paramètres polarimétriques ont été calculés (tableau 6), chaque paramètre représentant une pseudo-bande spectrale. Parmi ces pseudo-bandes, nous avons retenu trois paramètres polarimétriques : *Freeman_Volume*, *Cloude_T11* et *Angle α* (indiquant le mécanisme qui contribue le plus à la rétrodiffusion, ici la surface). Le choix de ces 3 paramètres qui ne proviennent pas de la même décomposition a été basé sur deux approches : une approche visuelle et une autre technique. Premièrement, nous avons testé visuellement l'efficacité de toutes les combinaisons possibles de trois pseudo-bandes à partir des vingt paramètres polarimétriques, et cette combinaison apparaissait plus efficace pour la délimitation des tourbières étudiées. Deuxièmement,

nous avons validé l'approche visuelle à l'aide des statistiques de la signature polarimétrique de nos classes.

En combinant ces trois paramètres, le logiciel eCognition™ affiche automatiquement une image couleur montrant en précision les frontières des tourbières. La classification orientée-objets est fondée sur un ensemble de relation hiérarchique entre les différents objets (Revillion, 2012).

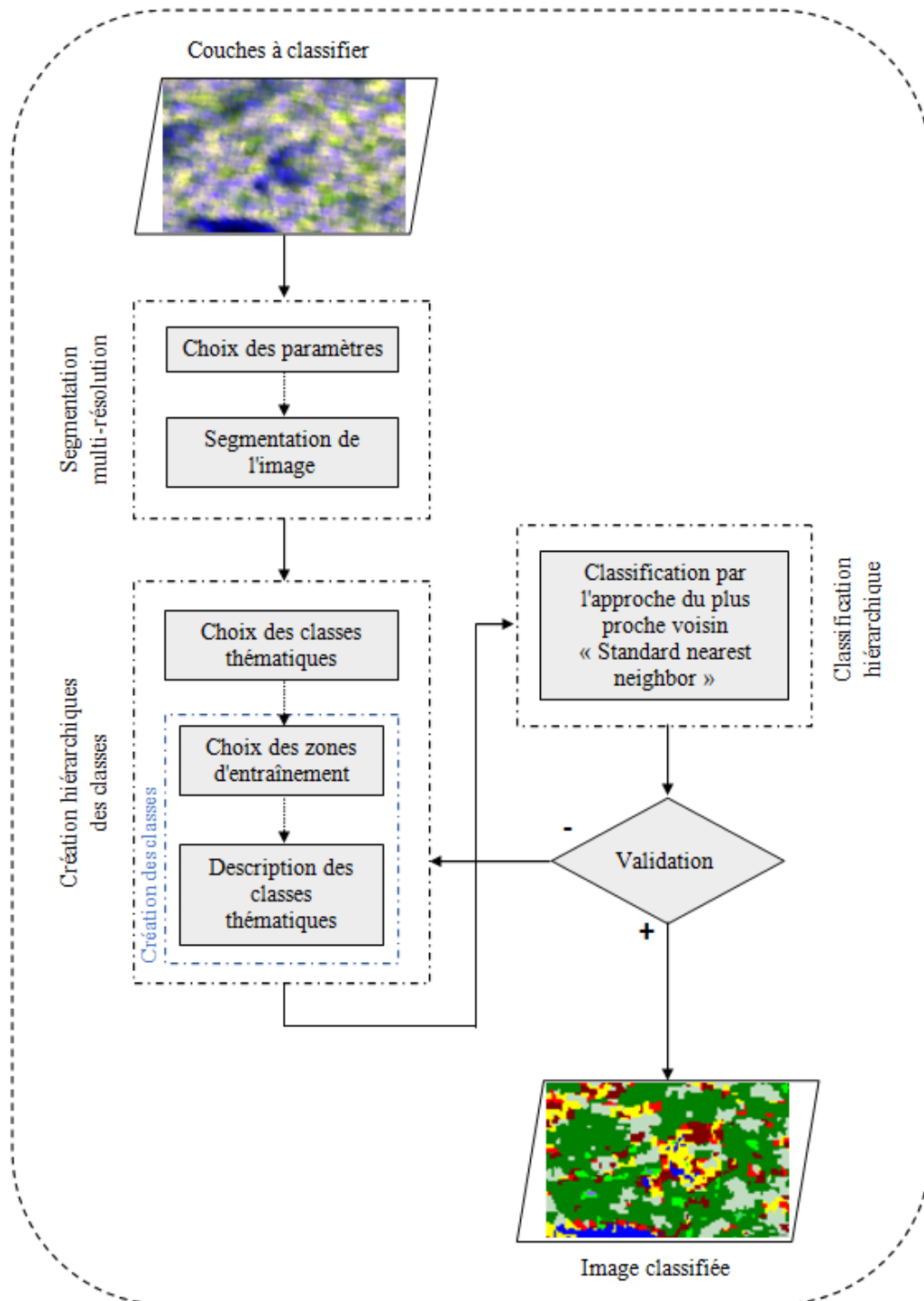


Figure 23 : Schéma représentant le processus de la classification orientée-objets.

3.4.1 Segmentation multi-résolution

Cette étape qui consiste à diviser l'image en régions (segments) homogènes a été réalisée par le logiciel eCognition. Ce dernier propose cinq algorithmes différents pour la segmentation (**Figure 24**). Pour notre cas d'étude, nous avons choisi d'utiliser l'algorithme de segmentation multi-résolution, qui est souvent utilisé pour classifier les milieux hétérogènes (Baatz & Schäpe, 2000), permet d'ajouter des informations supplémentaires afin d'identifier les objets d'utilisation et de les classifier en gardant la structure hiérarchique entre les segments (Rosenfeld, 2013).

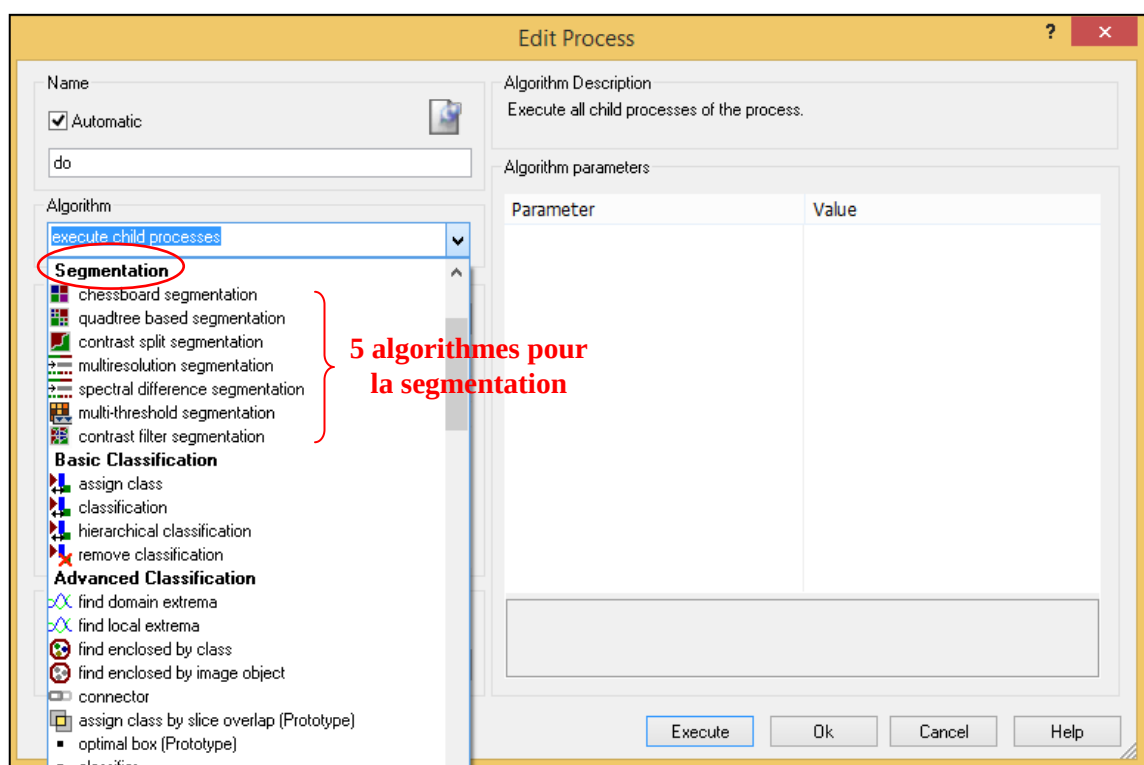


Figure 24 : Capture d'écran extraite du logiciel eCognition™ des différents types d'algorithmes de segmentation.

Afin de produire des régions homogènes, la procédure de segmentation a été effectuée en considérant les paramètres suivants (**Figure 25**) :

- le poids des bandes spectrales ;
- l'échelle d'observation et
- la composition du critère d'homogénéité.

3.4.1.1 *Le poids des bandes spectrales*

Ce paramètre consiste à définir le degré d'importance des bandes utilisées pour la segmentation. Les pseudo-bandes utilisées sont les paramètres (*Freeman_Vol*, *Cloude_T11* et l'angle α). Ces derniers ont produit des résultats intéressants lors de la phase de segmentation, par conséquent le poids attribué à chacun est de 1 (égaux).

3.4.1.2 *L'échelle d'observation*

L'échelle d'observation est considéré comme étant l'outil indispensable sur lequel se base la classification orientée-objets. La taille des objets doit être plus au moins comparable aux zones d'intérêt réelles afin de réussir une classification. Il consiste à déterminer l'hétérogénéité des régions de sortie de l'image. Nous avons choisi un paramètre d'échelle minimal égal à 1 puisque notre milieu d'étude est hétérogène - les tourbières étant caractérisées par un mélange des signatures spectrales.

3.4.1.3 *La composition du critère d'homogénéité*

La composition du critère d'homogénéité est séparée en deux paramètres distincts :

- critère de forme/couleur et
- critère de compacité/lissage.

Le premier critère désigne l'influence de la forme par rapport aux couleurs. Il prend une valeur entre 0 et 1, qui signifie le degré d'importance donnée à chacun des paramètres. Pour cette d'étude, une valeur du rapport Forme/couleur de 0,1 est donnée au paramètre de la forme (10% d'importance de la forme). Ce qui permet de dire que 90% est donnée à l'importance de la couleur.

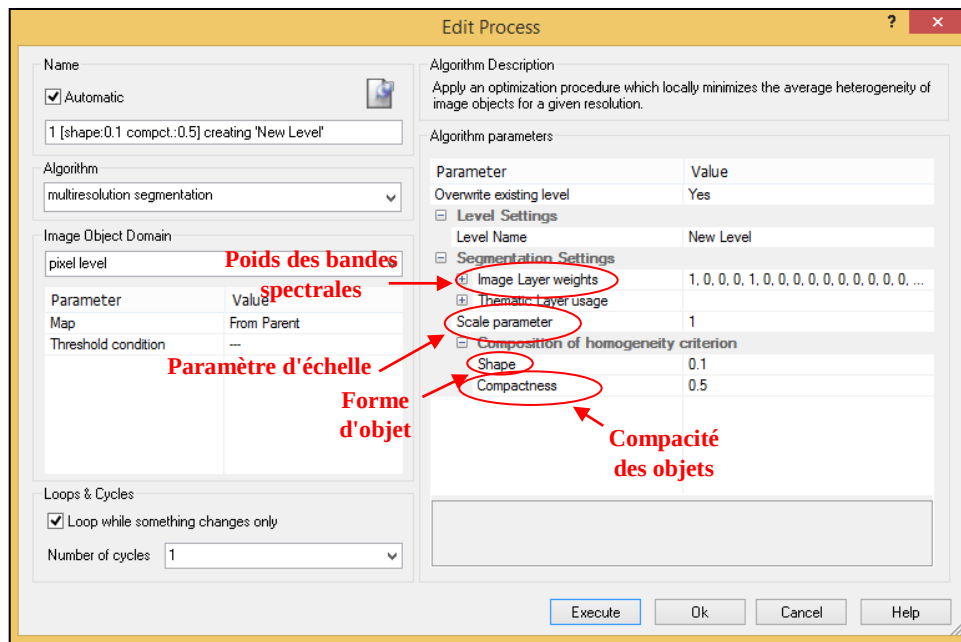


Figure 25 : Configuration de la segmentation d'image RADARSAT-2, capture d'écran extraite du logiciel eCognition™.

L'idée générale de cette étape consiste à segmenter l'image polarimétrique RADARSAT-2 en deux niveaux d'échelle :

- ✓ le niveau (Groupe) à grande échelle et
- ✓ le niveau (Classe) à petite échelle.

Après l'application des paramètres de segmentation multi-résolution choisis pour le niveau (Groupe), nous avons obtenu des segments de grande dimension représentant des zones hétérogènes qui sont bornés par d'autres zones homogènes telles que l'eau et les forêts de forte densité. Ensuite, le niveau (Classe) de segmentation est effectué seulement sur les zones où l'occupation du sol est complexe afin d'obtenir des objets plus homogènes.

3.4.2 Création hiérarchique des classes

Après la création des segments, la création hiérarchique des classes s'effectue. Afin de mieux comprendre l'algorithme de la classification qui sera utilisé, il est important de passer par la hiérarchie des classes. Cette étape apparaît très utile pour classifier des objets à différentes échelles tout en considérant leur description, leurs caractéristiques et les zones d'entraînement des classes (Hoang, 2014) (Figure 25). Avant d'appliquer le processus de la classification hiérarchique, il faut principalement créer une hiérarchie

des classes thématiques incluant les classes nécessaires pour la classification correspondant à chacun des deux niveaux (Figure 26). Pour le niveau (Groupe) de la segmentation, nous avons pu distinguer trois classes thématiques (Eau, Tourbe et Forêt) qui sont présentées au tableau 7.

Tableau 7 : Tableau représentant la description des classes trouvées à partir du premier niveau de segmentation de l'image RADARSAT-2.

Classes	Description
Eau	• Eau peu profonde, possibilité de présence de la végétation
Tourbe	• Mélange de pelouse et de l'eau, les bords des marres • Objets dominés par des sphaignes, la nappe phréatique près de la surface • Objets dominés par herbacés avec une possibilité de présence des sphaignes
Forêt	• Conifères • Bords de la forêt dominés par des arbustes et des conifères • Objets dominés par du lichen, Substrat minéral

Pour le niveau (Classe), nous avons pu définir sept classes thématiques correspondant aux trois groupes d'occupation du sol des tourbières étudiées (Eau, Tourbe et Forêt). Ces classes seront ensuite présentées au tableau 7. Pour la sélection des classes, nous nous sommes inspirées des classes définies par (Dribault, 2012) pour la classification d'images optiques.

Tableau 8 : Tableau représentant la description des classes utilisées pour le deuxième niveau de segmentation de l'image RADARSAT-2.

Groupes	Classes	Description	Photographies
Eau	Eau	Eau peu profonde, possibilité de présence de la végétation	
	Végétation et eau	Nappe phréatique à la surface, mélange de pelouse et de l'eau, les bords des marres	
	Végétation à faible hauteur	Objets dominés par des sphaignes, la nappe phréatique près de la surface	
Tourbe	Végétation plus haute	Objets dominés par herbacés avec une possibilité de présence des sphaignes	
	Forêt	Conifères	
	Bords de la forêt	Bords de la forêt dominés par des arbustes et des conifères	
Forêt	Lichen	Objets dominés par du lichen, Substrat minéral	

3.4.3 Sites d'entraînement

Les sites d'entraînement représentent des zones d'une image qui sont représentatives de chacune des classes de couverture terrestre que nous souhaitons définir. Ils sont utilisés pour « entraîner » l'algorithme de classification (le plus proche voisin) à reconnaître les différentes classes en fonction de leurs propriétés spectrales ou spatiales. Le principe de cet algorithme réside dans l'association de l'objet à la classe dont un de ses sites d'entraînement se trouve le plus proche de lui (Dissanska *et al.*, 2007). À ce stade de l'étude, nous avons défini 7 classes d'occupation du sol (Tableau 8). Les classes retenues sont :

- ✓ **Eau (E)**
- ✓ **Végétation et eau (VE)**
- ✓ **végétation à faible hauteur (VH)**
- ✓ **Végétation plus haute (VFH)**
- ✓ **Bords de la forêt (BF)**
- ✓ **Forêt (F)**
- ✓ **Lichen (L)**

Tableau 9 : Nombre de sites d'entraînement choisis pour chaque classe.

Classes	Nombre de sites d'entraînement	Description des classes
Eau	35	Eau peu profonde, possibilité de présence de la végétation
Végétation et eau	22	Nappe phréatique à la surface, mélange de pelouse et de l'eau, les bords des marres
Végétation à faible hauteur	21	Objets dominés par des sphaignes, la nappe phréatique près de la surface
Végétation plus haute	18	Objets dominés par herbacés avec une possibilité de présence des sphaignes
Forêt	22	Conifères
Bords de la forêt	21	Bords de la forêt dominés par des arbustes et des conifères
Lichen	24	Objets dominés par du lichen, Substrat minéral

3.4.4 Classification de l'image

Après avoir produit une hiérarchie des classes thématiques, nous avons choisi d'appliquer une classification hiérarchique. Cette une approche supervisée basée sur l'algorithme du plus proche voisin.

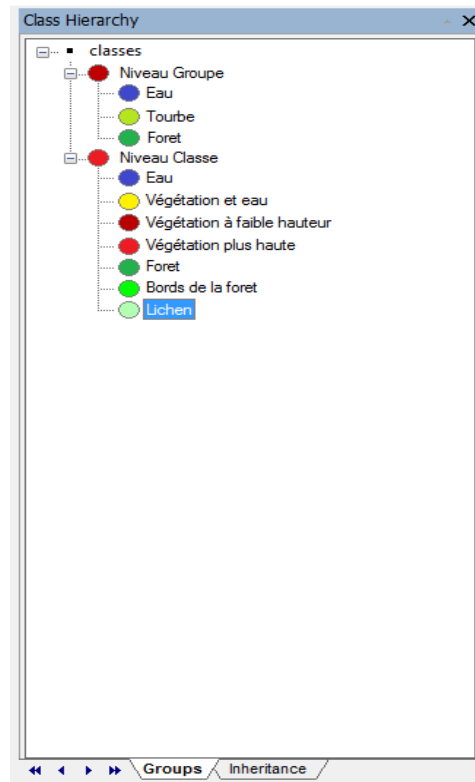


Figure 26 : Exemple d'hiérarchie des classes thématiques de niveau (Groupe) et niveau (Classe), capture d'écran extraite du logiciel eCognition™.

3.4.5 Validation de la classification

L'étape de validation est une étape primordiale dans le processus qualitatif d'une classification. Elle permet d'améliorer la qualité de la classification après avoir déterminé son degré de précision. Le principe de cette validation réside dans l'identification des sources d'erreur, à partir d'une matrice de confusion, afin de les rectifier et augmenter la fiabilité de la classification. Dans le cas présent, nous avons évalué la précision de nos résultats à l'aide de deux approches quantitatives. D'une part, la matrice de confusion qui compare les données de sortie par rapport aux données de références pour chaque site. D'autre part, la comparaison avec des images optiques classifiées d'une autre étude (Dribault, 2012).

3.5 Production de cartes de variations de l'humidité entre 2009 et 2010 à la surface des tourbières

Afin de mieux prédire, comprendre et étudier la dynamique hydrologique des tourbières, il est important de pouvoir comprendre les variations d'humidité du sol en surface (Bárdossy & Lehmann, 1998). Pour ce faire, et en vu d'obtenir un bon modèle de la variabilité spatiale de l'humidité de la surface du sol sur l'ensemble des tourbières étudiées, il faut choisir l'approche adéquate d'échantillonnage des sols pour améliorer la qualité des données acquises (Romshoo, 2004).

La réalisation des cartes d'humidité du sol en surface s'effectue dépendamment de deux aspects : la nature et les caractéristiques physico-chimiques du sol. Ces derniers ont un impact direct sur l'humidité du sol (Labrecque, 2011).

La cartographie de la variation spatiale de l'humidité à la surface du sol peut être exécutée selon deux approches : *l'approche discrète* ou *continue* (Heuvelink & Webster, 2001). Le principe de l'approche discrète réside dans la division de la zone étudiée en polygones de sols présentant le même pourcentage d'humidité (Labrecque, 2011, McBratney *et al.*, 2003). Par contre, l'approche continue, consiste à représenter la variation de l'humidité de la surface du sol en se basant sur des variables qui ont une relation directe ou indirecte avec l'humidité du sol (Ex. la télédétection) (Heuvelink & Webster, 2001, McBratney *et al.*, 2003). Dans le cas de notre étude, nous avons choisi d'adopter l'approche continue.

À l'aide du logiciel PolSARpro™, nous avons pu créer notre modèle d'humidité du sol en surface pour l'ensemble des tourbières étudiées en se basant sur le paramètre polarimétrique Alpha-1 (α_1). Ce dernier est reconnu par sa forte sensibilité aux variations de l'humidité du sol et cela a été confirmé pour les tourbières par nos résultats (section 4.1.2). Après avoir déterminé la relation entre le paramètre polarimétrique Alpha-1 (α_1) et l'humidité de surface pour une profondeur de 5 cm, nous l'avons exploité ensuite pour la production des cartes représentant les variations de l'humidité à la surface des tourbières étudiées.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté les approches détaillées afin d'atteindre chacun des objectifs fixés ainsi que les données radar et terrain utilisées pour estimer l'humidité de surface des tourbières à partir des paramètres polarimétriques. Ensuite, les principales étapes de la classification orientée-objets des images polarimétriques RADARSAT-2, ont été discutées. Enfin, nous avons présenté le processus de production des cartes représentant les variations de l'humidité à la surface des tourbières étudiées.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Introduction

Ce chapitre introduit les résultats sur l'étude de la relation entre les données polarimétriques RADARSAT-2 et l'humidité de surface des tourbières et la précision des résultats de classification des tourbières à partir des images RADARSAT-2 en polarisation quadruple. Ce chapitre présente également l'élaboration des cartes des variations de l'humidité en surface de l'ensemble des tourbières étudiées.

4.2 Évaluation du potentiel des données polarimétriques pour la surveillance de l'humidité

Dans cette partie, nous présenterons l'analyse des résultats obtenus. Cette analyse nous permettra d'évaluer le potentiel des données polarimétriques RADARSAT-2 pour la surveillance de l'humidité de surface des tourbières. Par la suite, nous allons souvent utiliser les termes PF et SF qui ont été définies comme des zones inondées d'une façon permanente et saisonnière respectivement. En plus, les milieux ASF1, APF2 et APF3 appartiennent à la tourbière A indiquant la tourbière Abeille, tandis que BSF5 et BPF6 appartiennent à la tourbière B, représentant la tourbière Chenille.

4.1.1 Comportement de la rétrodiffusion en fonction de l'humidité

Le comportement de la rétrodiffusion du signal radar σ° en polarisation quadruple (HH, HV, VH et VV) ainsi que celui des rapports de co-polarisation et d'ortho-polarisation ont été étudiés en fonction de l'humidité du sol.

Comme le montre l'**Annexe C (Tableau 12)**, les valeurs M_v indiquent la valeur moyenne de l'humidité de surface, sur une profondeur de 5cm, calculée le jour d'acquisition des images polarimétriques qui sont en orbite descendante. Des valeurs minimales d'humidité de l'ordre de 18,2 % et 32,6 % ont été observées pour les milieux

APF3 et BPF6 respectivement. Cette différence est due à la topographie de la surface de la tourbière (pente). En effet, l'humidité est relativement plus importante en bas de la pente, et elle diminue plus on se dirige vers l'amont (section 2.1.4). Dans notre cas d'étude, le milieu APF3 se trouve dans une zone où la tourbière Abeille est en pente (hauteur d'élévation de 15 m par rapport au bas de la pente). Pour mieux visualiser ces résultats (Tableau 12), nous avons choisi de les convertir en graphique (Figure 27).

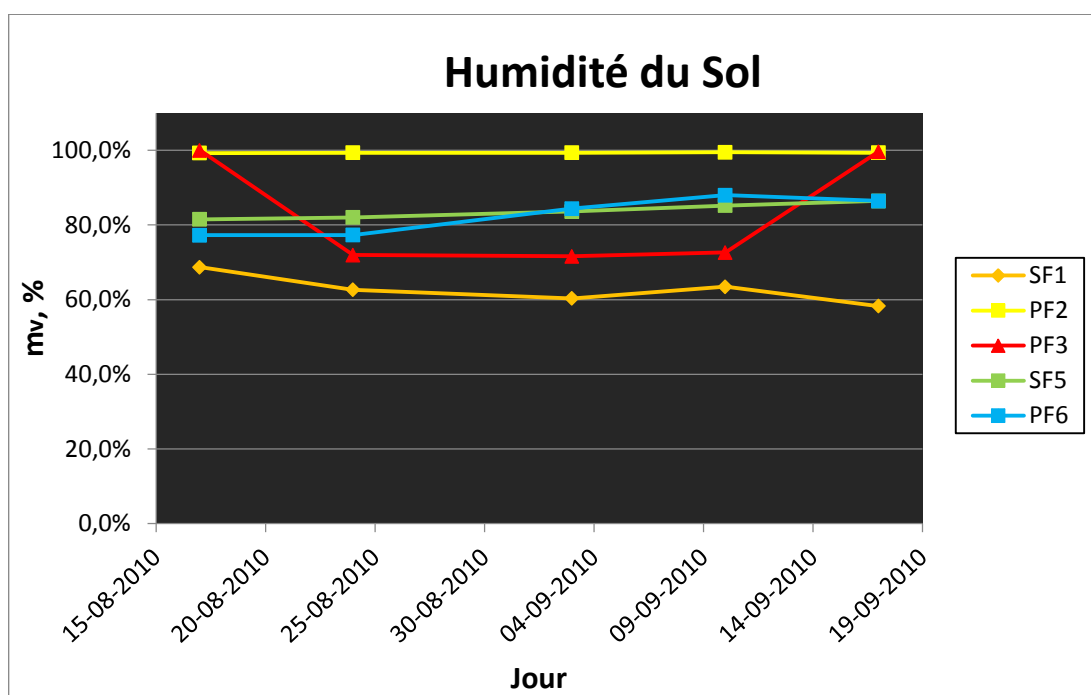


Figure 27 : L'évolution de l'humidité du sol pour les sites étudiés du 17/08/2010 au 17/09/2010.

Comme il est montré à la **Figure 27**, durant la période d'étude, soit du 17 août 2010 au 17 septembre 2010, la moyenne de l'humidité du sol en surface entre les zones des tourbières étudiées pour une date donnée est de l'ordre de 80%. L'évolution de l'humidité en surface varie avec le temps selon les structures internes de la tourbière. Les zones d'étude APF2, APF3 et BPF6, qui représentent les zones inondées d'une façon permanente, ont une humidité plus élevée par rapport à ASF1 et BSF5 (zones inondées d'une façon saisonnière). L'humidité à ASF1 est plus faible par rapport aux autres zones, car elle comprend une structure terrestre, et est caractérisée par un mélange d'eau et d'herbacés avec une dominance de ces derniers. APF3 diminue avec le temps d'une teneur en eau d'environ 100% à une teneur de 72,6% et remonte à sa valeur maximale. Pour ce faire, les hypothèses raisonnables suivantes peuvent être considérées :

(i) Le phénomène de l'écoulement hypodermique et souterrain et leurs mécanismes qui sont probablement mis en cause. L'écoulement peut affecter d'une façon directe ou indirecte les tourbières, un premier impact direct est l'abaissement du niveau de la nappe phréatique (Braekke, 1983, Lieffers & Rothwell, 1987, Stewart & Lance, 1991). (ii) Les fluctuations de la nappe phréatique jouent également un rôle très important dans l'évolution du niveau de la nappe. Plus l'écoulement se fait d'une façon continue, plus la position de la nappe phréatique fluctue (Holden *et al.*, 2006, Price *et al.*, 2003, Rothwell *et al.*, 1996, Roulet & Moore, 1995, Silins & Rothwell, 1999, Van Seters & Price, 2002). Donc, la nappe phréatique descend plus bas dans le profil de tourbe en période de sécheresse, et en période de pluie, la nappe phréatique remonte. (iii) Dans la couche supérieure de la tourbe (dix premiers centimètres), l'humidité peut diminuer de 20 à 29% en fonction de la distance du canal de drainage (Prevost *et al.*, 1997, Strack *et al.*, 2008). Par exemple, à une distance minime du canal de drainage ($\sim 10\text{m}$), la teneur en eau dans la partie superficielle de la tourbe peut passer de 100% avant le drainage à 71% après le drainage. Ces hypothèses demanderaient évidemment à être validées par des observations complémentaires avec les données de terrain.

Si nous analysons l'évolution de l'humidité dans les structures internes aquatiques (APF2 et APF3) seulement pour le site A, nous constatons un pourcentage moyen stable de 99,4% pour APF2, tandis qu'une augmentation significative du pourcentage de la teneur en eau de l'ordre de 27,4% pour APF3 durant la période d'étude pour atteindre sa valeur maximale de 99,7%. Si nous incluons également les structures internes terrestres (ASF1) dans l'analyse, on déduit alors une légère diminution de 10% entre les mêmes dates. Concernant le site B, particulièrement les structures internes aquatiques BPF6 et semi-aquatiques BSF5, on obtient une augmentation progressive durant la période étudiée.

La rétrodiffusion des hyperfréquences est variable en fonction de la constante diélectrique d'un sol. La constante diélectrique de l'eau est de l'ordre de 80, elle est vingt fois plus grande que celle d'un sol sec (Henderson & Lewis, 1998). Le signal radar rétrodiffusé par le sol dépend de sa teneur en eau. Une zone humide, et suite à sa quantité d'eau retenue, absorbera une partie du signal radar émis, et par la suite cette zone apparaîtra alors plus claire qu'une zone sèche. La rétrodiffusion n'est pas considérée comme un paramètre nécessaire et suffisant pour l'estimation de l'humidité d'une surface; plusieurs paramètres peuvent modifier le signal de rétrodiffusion. En

effet, la rétrodiffusion peut être influencée par l'interférence des autres paramètres de surface (la rugosité du sol, le couvert végétal) avec le signal radar. La polarisation est aussi considérée comme un paramètre clé, pour maximiser l'estimation de l'humidité du sol. Une onde ayant une polarisation horizontale présente une meilleure pénétration d'un couvert végétal ayant des structures verticales qu'une onde ayant une polarisation verticale.

De la même manière et pour mieux visualiser les résultats présentés au **Tableau 13 (Annexe C)**, nous avons choisi de les convertir en graphique (Figure 28) :

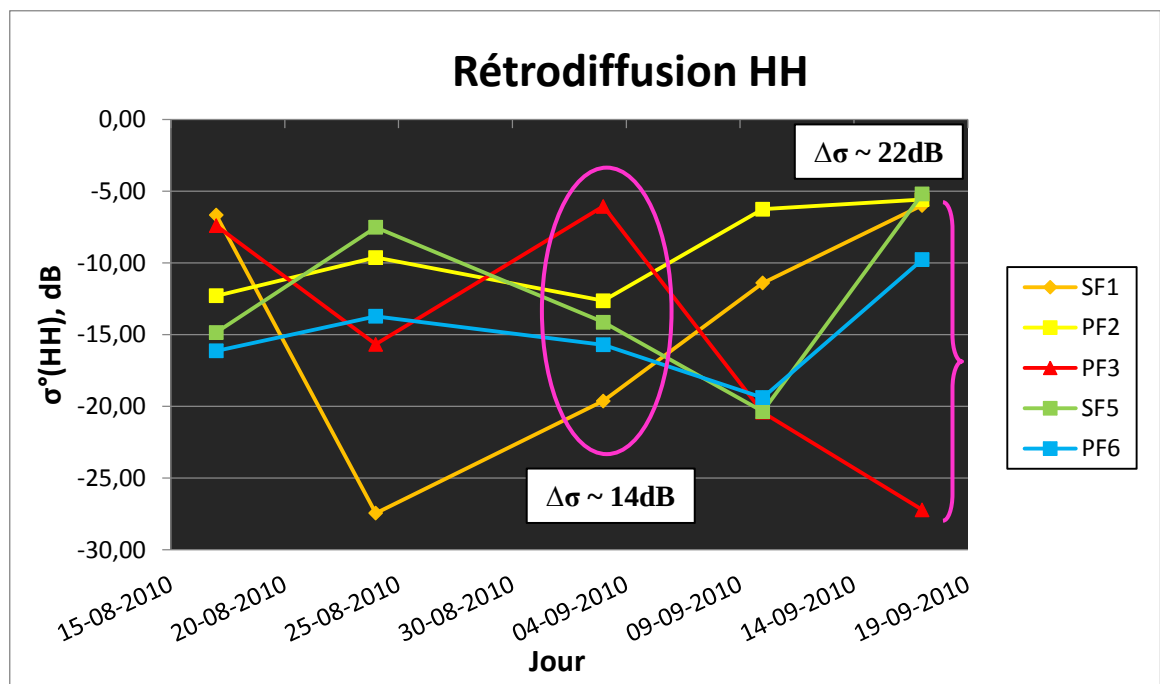


Figure 28 : L'évolution du coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH pour les zones étudiées du 17 août 2010 au 17 septembre 2010.

Comme il est montré aux deux figures (**Figures 28 et 29**), le coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH et HV a des hauts et des bas au cours du temps. Le signal en polarisation HH et HV n'indique pas une tendance claire durant la période d'étude.

On peut voir à la Figure 28 une variation du signal en polarisation HH de l'ordre de 14dB entre les cinq zones étudiées pour une date donnée (le 3 septembre 2010). Cette différence peut être expliquée par la nature et la topographie de la tourbière. Aussi, la variation temporelle de la rétrodiffusion HV est d'environ 11dB pour les mêmes zones d'étude.

Nous avons remarqué que le coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH pour ASF1 est plus élevé pour le 17 septembre 2010, même si l'humidité mesurée dans ASF1 à la même date est plus basse que les autres zones étudiées, ce qui est probablement expliqué par l'influence de certains paramètres qui seront discutés dans les prochains paragraphes.

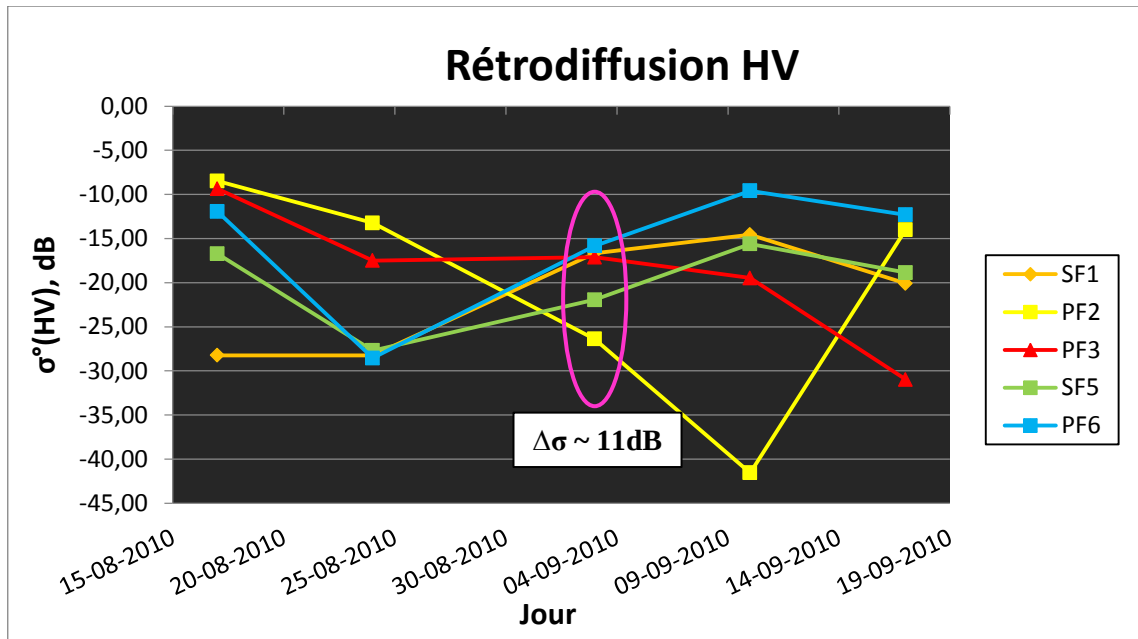


Figure 29 : L'évolution du coefficient de rétrodiffusion en polarisation HV pour les zones étudiées du 17 août 2010 au 17 septembre 2010.

Les deux figures en **Annexe D (Figure 39 et 40)** montrent la dépendance temporelle du signal rétrodiffusé en polarisation HH et en polarisation HV à l'humidité pour les deux tourbières étudiées. Malgré la forte dynamique de l'humidité ($\Delta m_v \sim 80\%$), une faible corrélation a été observée, qui est de l'ordre de 0,43 et 0,23 pour le signal en polarisation parallèle HH et en polarisation croisée HV respectivement.

Cette faible corrélation peut être expliquée par plusieurs hypothèses telles que : (i) la configuration radar (angles d'incidence variant de 30 à 40 degrés entre les modes FQ12, FQ16 et FQ20), (ii) l'action local du drainage, (iii) la variation de la couverture végétale et (iv) les caractéristiques de la surface (nature, rugosité, humidité). Ces hypothèses demeurent logiques mais elles doivent être validées d'une façon empirique. Ajoutant à cela, l'effet de la pluie sur le signal radar. En effet, une altération au niveau du signal rétrodiffusé entre deux dates ne serait pas uniquement due aux changements saisonniers de l'humidité associés aux mouvements de la nappe phréatique, mais plus précisément à

l'humidité de la tourbe affectée par la pluie. Autrement dit, une précipitation qui surviendrait un moment avant ou durant le passage du capteur va humidifier la végétation et brouiller la surface des mares (augmenter la rugosité) et donc avoir un impact sur la rétrodiffusion. Nous avons noté des précipitations mesurées à la tourbière Abeille en 2010. Des précipitations de l'ordre de 6,6 mm de pluie ont été mesurées de 00h à 5h, soit juste peu avant le passage du capteur à 5h pour chacune des cinq dates d'études. Malgré ces faibles précipitations, ce paramètre peut causer des modifications à l'intensité de la rétrodiffusion et biaiser les résultats. Cette discussion nous permet de déclarer que le coefficient de rétrodiffusion en polarisation quadruple (HH, HV, VH et VV) reste un paramètre limité pour estimer l'humidité de surface des tourbières.

La variabilité temporelle de la rétrodiffusion en polarisation parallèle HH entre les zones étudiées est ~ 3 à 7dB (**Annexe D, Figure 39**). Cette variation est probablement due à plusieurs facteurs, tels que la couverture végétale, la présence des arbustes et l'épaisseur de la tourbe pour chaque zone d'étude. Comme ces hypothèses paraissent compatibles avec la théorie, il sera intéressant de les valider en se basant sur des mesures *in situ*. Les dates du 24/08/2010 et 17/09/2010 ont été prises avec le même angle d'incidence FQ20 ($[39,4^\circ - 40,7^\circ]$), ce qui explique leur tendance (Bonn, 1996). En effet, l'angle d'incidence, qui fait référence à l'angle que fait un rayonnement incident avec la normale d'une surface déterminée, joue un rôle majeur dans le changement temporel de la rétrodiffusion. Dans la plupart des cas, une augmentation de l'angle d'incidence implique une diminution relative de la sensibilité du signal radar. De même, plus la plage d'angles d'incidence est élevée, plus le signal radar sera sensible à la rugosité du sol et non pas à l'humidité de la surface (Rochon & Bonn, 1992).

Les images polarimétriques en mode Fin de RADARSAT-2, à cause de la longueur d'onde du radar (5,5 cm $\sim$ 5,405 GHz) et de son angle d'incidence élevé ($[31,5^\circ - 40,7^\circ]$), seraient peu sensibles à l'humidité de la surface et aux fluctuations de la nappe phréatique des tourbières. En effet, le rayonnement des hyperfréquences émis par RADARSAT-2 ne pénétrerait pas la tourbe plus de 7 cm lorsque sa teneur en eau volumique est importante ($> 60\%$) (Tableau 7 et Figure 39). Des angles d'incidence inférieures à 30° seraient préférables pour la surveillance et la détection de l'humidité du sol des tourbières (Labrecque, 2011), mais elles ne sont pas disponibles en mode fin pour RADARSAT-2.

Dans le cas présent, les résultats ont montré une faible sensibilité de la rétrodiffusion à l'humidité de la surface des tourbières. Afin de mieux comprendre cette faible sensibilité, nous avons choisi de pousser nos analyses plus loin en étudiant le comportement du signal rétrodiffusé pour chacune des zones d'étude (**Figure 44**).

Les deux figures en Annexe D (**Figures 42 et 43**) montrent de faibles corrélations : 0,17 et 0,19 pour chacun des rapports HH/VV et HH/HV respectivement. Ces corrélations sont comparables à celles entre la rétrodiffusion en polarisation HV et l'humidité de la surface. Les rapports de co-polarisation (HH/VV) et d'orthopolarisation (HH/HV) n'apparaissent pas aussi efficaces pour l'estimation de l'humidité du sol que les données en polarisations HH, bien qu'ils aient montré de bons résultats pour d'autres études (Dissanska *et al.*, 2010, Jammali, 2016) afin de réduire les effets de la rugosité du sol, du couvert végétal ainsi que l'effet du relief pour des données acquises à des plages d'angles d'incidence plus petites. Comme il est illustré à la **Figure 43**, la zone APF2 montre une forte sensibilité à l'humidité du sol en surface avec un coefficient de détermination $\sim 0,73$, ce qui correspond à une corrélation de 0,85. Cela s'explique par le fait que la zone APF2 était une zone inondée de façon permanente, le couvert végétal était bas et peu dense, ce qui aurait facilité l'interaction du signal avec la tourbe. Cependant, le signal radar rétrodiffusé a montré une faible sensibilité à l'humidité en surface pour les zones APF3 et BPF6, les arbustes et la végétation à moyen hauteur qui dominaient ces structures aquatiques peuvent être mis en cause. Cette faible corrélation peut aussi être expliquée par le nombre limité des mesures pour chaque zone étudiée.

4.1.2 La relation des paramètres polarimétriques avec l'humidité

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus de l'étude de la relation des paramètres polarimétriques et le paramètre de surface (Humidité).

Le **tableau 14 (Annexe C)** résume certains paramètres polarimétriques extraits de la décomposition H/A/ α . Les paramètres **H**, **A** et **α** représentent l'entropie, l'anisotropie et l'angle alpha respectivement.

L'entropie **H**, un paramètre qui détermine le caractère aléatoire de la diffusion, varie remarquablement entre les dates de l'étude, elle diminue constamment dans le temps (et parfois augmente). L'entropie **H** est supérieur à 0,7 pour toutes les dates sauf pour la

date de 3 septembre 2010. L'anisotropie **A** est un paramètre polarimétrique complémentaire à l'entropie, elle donne des informations supplémentaires sur les mécanismes de diffusion secondaires lorsque l'entropie **H** > 0,7. L'anisotropie **A** est stable pour toutes les dates. L'angle α , un paramètre qui indique le type de la diffusion dominante, est inférieur à 45° pour toutes les dates. Ce qui permet d'affirmer que le type de diffusion dominante est bien la diffusion de surface.

Selon des études publiées (Hajnsek *et al.*, 2003), l'entropie **H** et l'angle alpha α sont deux paramètres appropriés pour l'estimation de l'humidité du sol, tandis que l'anisotropie est indépendante de l'humidité. Le paramètre α_1 est aussi utilisé en vue de sa sensibilité à l'humidité du sol (Dissanska *et al.*, 2010). Nous avons analysé la sensibilité des paramètres polarimétriques **H**, **A**, α et α_1 à l'humidité de la surface des tourbières.

Comme il était mentionné dans la partie méthodologique de ce mémoire, nous nous sommes basés dans cette étude sur la moyenne de l'humidité du sol des cinq points pour les cinq dates d'étude (5 images polarimétriques de l'année 2010) représentés dans les figures ci-dessous.

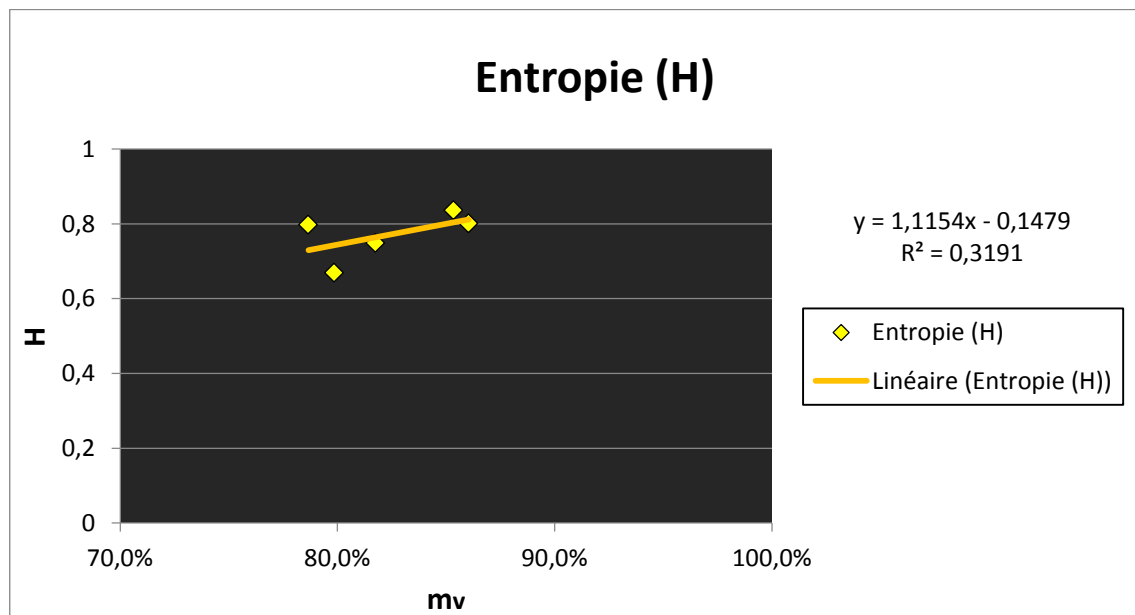


Figure 30 : Corrélation entre l'entropie (H) extrait des images RADARSAT-2 acquises entre le 17 août et le 17 septembre 2010 et l'humidité du sol.

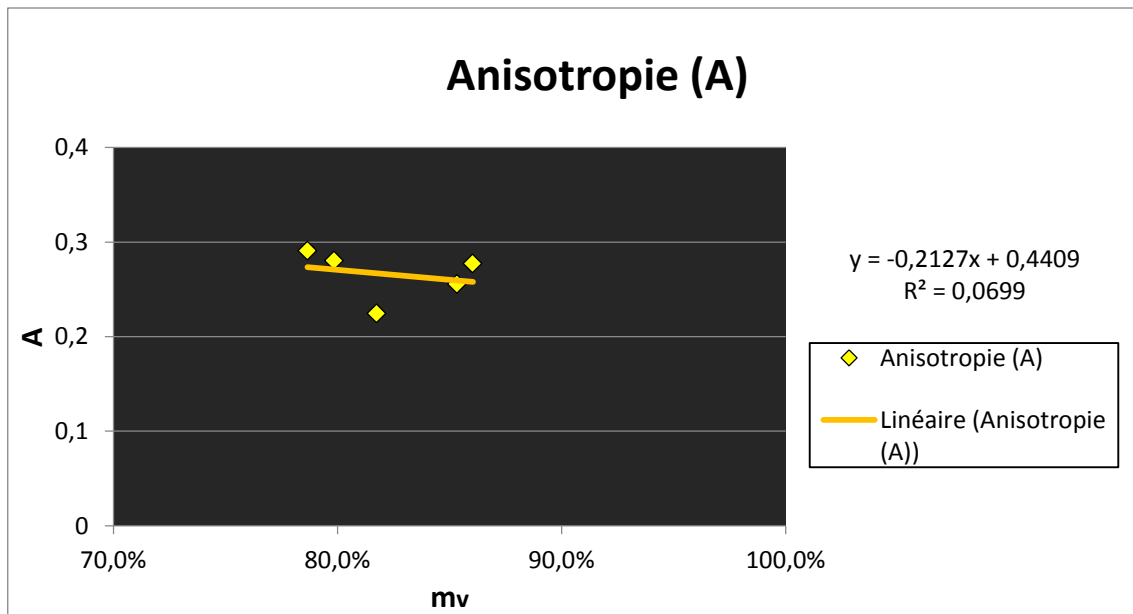


Figure 31 : Corrélation entre l'anisotropie (A) extrait des images RADARSAT-2 acquises entre le 17 août et le 17 septembre 2010 et l'humidité du sol.

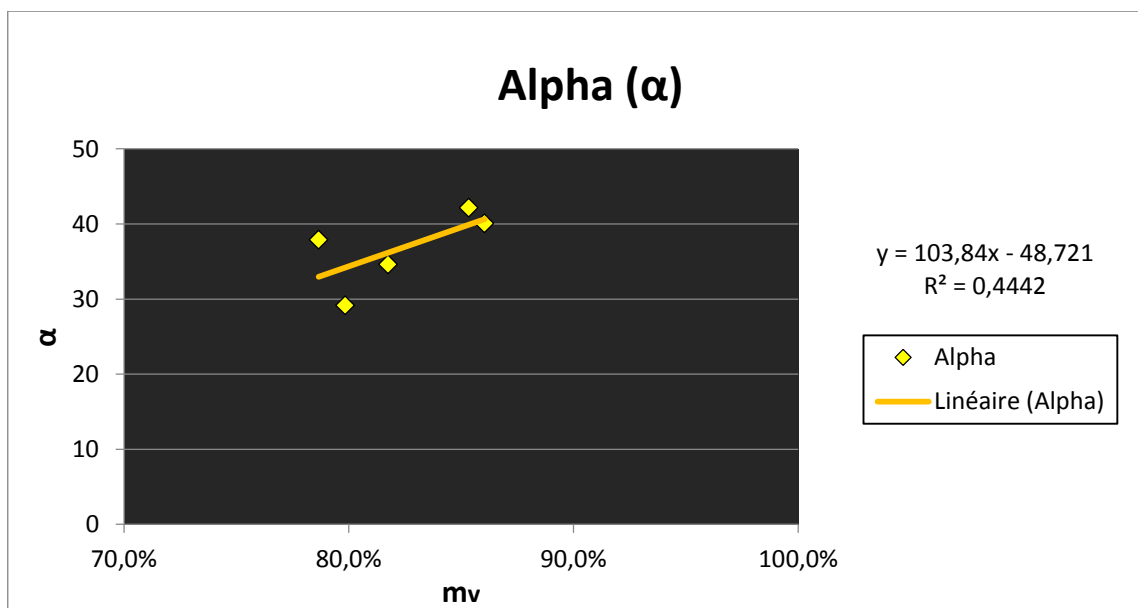


Figure 32 : Corrélation entre l'angle alpha (α) extrait des images RADARSAT-2 acquises entre le 17 août et le 17 septembre 2010 et l'humidité du sol.

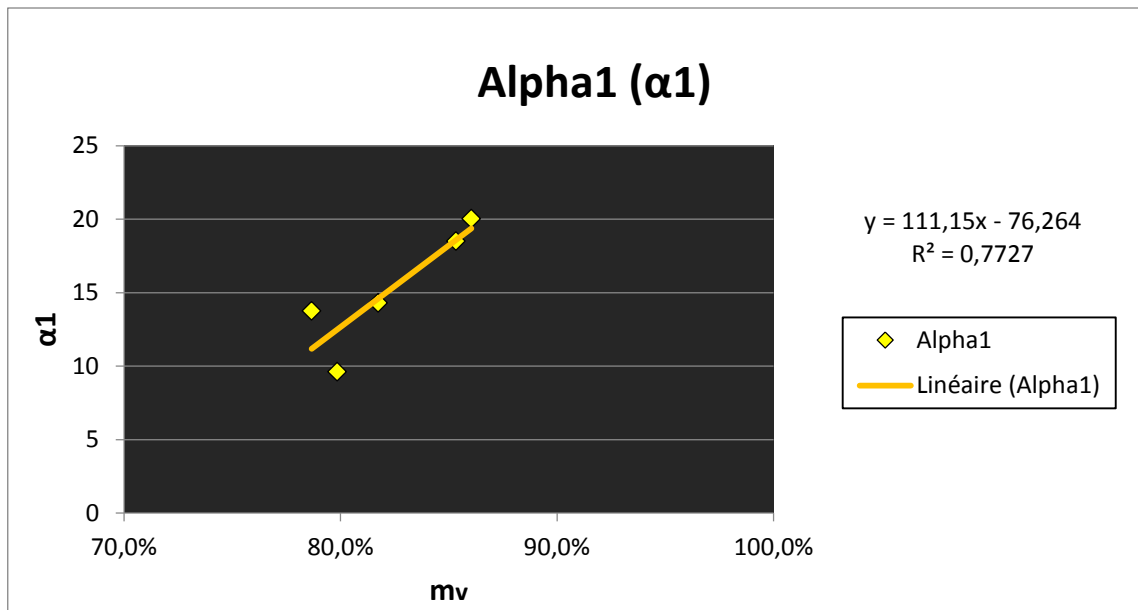


Figure 33 : Corrélation entre l'angle alpha-1 (α_1) extrait des images RADARSAT-2 acquises entre le 17 août et le 17 septembre 2010 et l'humidité du sol.

Les résultats démontrent que le paramètre polarimétrique α_1 est le paramètre le plus dépendant de l'humidité de la surface des tourbières. Comme il est illustré à la **Figure 33**, il a un coefficient de détermination R^2 de 0,77, ce qui correspond à une forte corrélation de $\sim 0,88$. Comme ce paramètre a une pente très forte de 111,15, cela prouve que α_1 est aussi un paramètre très sensible même si les images ont été acquises avec des angles d'incidence variant de 32 à 39°. D'autres études sont aussi arrivées à la même conclusion tant en milieu agricole (Daniel, 2009, Dissanska *et al.*, 2010) qu'en milieu naturel. Les autres paramètres, particulièrement **H** et **α** ont un coefficient de détermination $R^2 > 0,44$. l'anisotropie **A** montre une indépendance à l'humidité de la surface, ce qui est était attendue (Hajnsek *et al.*, 2003).

4.3 Classification orientée-objets des images polarimétriques RADARSAT-2

Cette partie présente les résultats de la classification des tourbières du bassin La Grande à partir des images polarimétriques RADARSAT-2.

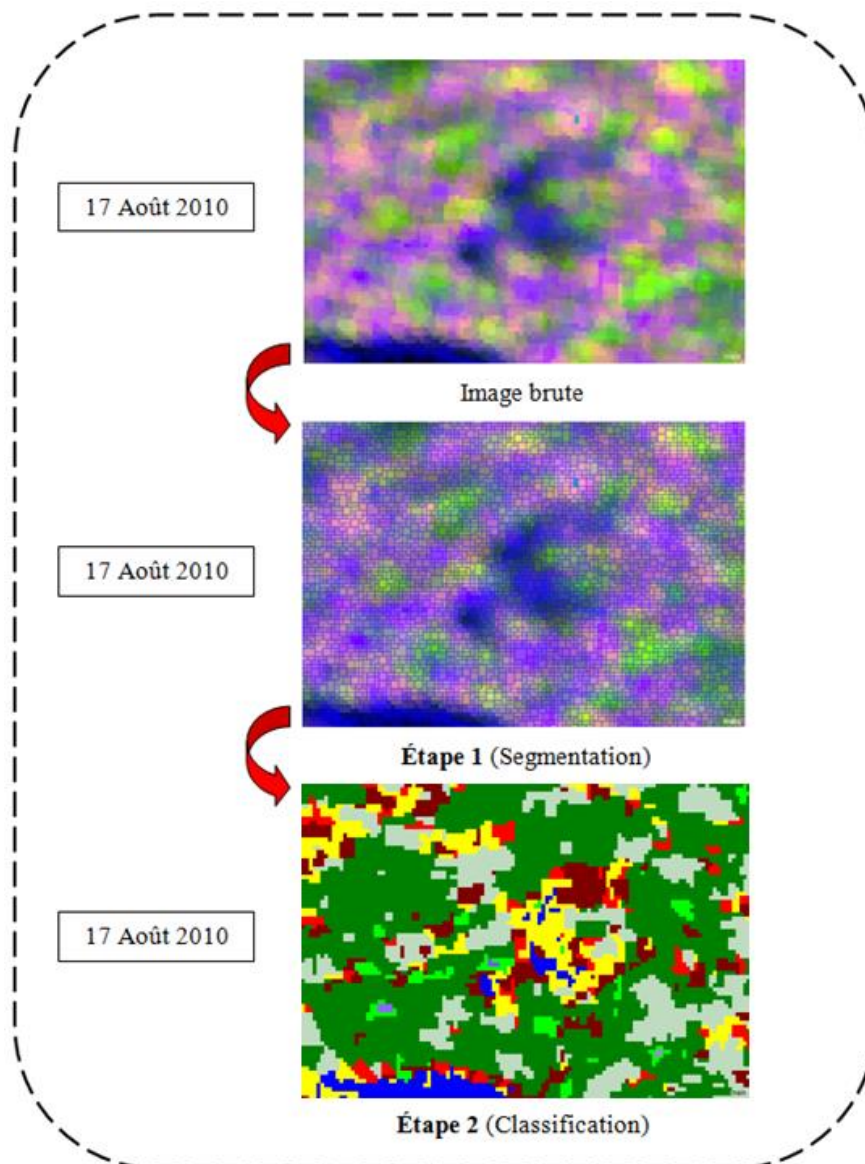


Figure 34 : Schéma représentant la procédure de la classification orientée-objets.

Une image polarimétrique RADARSAT-2, qui englobe les deux tourbières étudiées, les classes utilisées pour la classification et sa classification à fine échelle, est introduite à la **Figure 35**. Ce sont deux tourbières différentes avec des caractéristiques distinctes. En comparant, les résultats de classifications d'images optiques de très haute résolution (Dribault, 2012), une bonne délimitation des deux tourbières a été observée. La plupart des erreurs sont apparues sur la partie intérieure des deux tourbières. La résolution plus grossière des images RADARSAT-2 utilisée, l'hétérogénéité de la structure des tourbières et les classes intermédiaires peuvent être mises en cause. Lors de la création des zones d'entraînements, nous avons trouvé des difficultés pour séparer les classes entre elles, parce que la plupart des segments contenaient au moins deux classes. La classe « Végétation et eau » a remplacé la classe « Eau ».

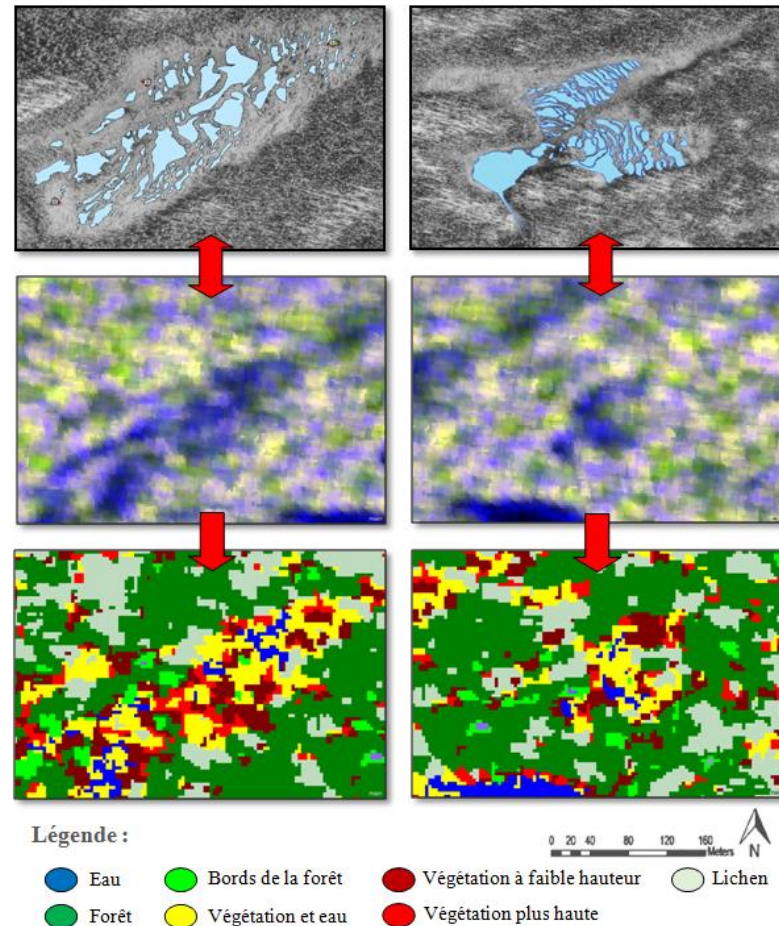


Figure 35 : Image représentant l'image polarimétrique RADARSAT-2 pour la date du 17/08/2010 et sa classification orientée-objets.

La précision de la classification peut être influencée par plusieurs facteurs tels que la qualité de la segmentation, le choix des sites d'entraînement, le degré de séparabilité des classes, etc. Les résultats de la classification ont été validés à l'aide des résultats de la classification de (Dribault, 2012) faite à partir d'images optiques de haute résolution. La matrice de confusion a été exploitée en tant qu'outil statistique pour évaluer le degré de fiabilité des résultats obtenus. Afin d'évaluer la qualité de séparabilité des classes, nous nous sommes basés sur la méthode d'identification des sources d'erreur entre les classes. Les résultats sont présentés au **Tableau 10**.

Tableau 10 : La matrice de confusion pour la classification du niveau (Classe), dérivée des images RADARSAT-2.

Validation								
Classification	E*	VE*	VH*	VFH*	BF*	F*	L*	Sum
E*	34	1	0	0	0	0	0	35
VE*	1	21	0	0	0	0	0	22
VH*	0	0	19	2	0	0	0	21
VFH*	0	0	2	15	1	0	0	18
BF*	0	0	0	1	18	3	0	22
F*	0	0	0	0	3	18	0	21
L*	0	0	0	0	0	0	24	24
Sum	35	22	21	18	22	21	24	163
Précision du producteur (%)	0,97	0,95	0,90	0,83	0,82	0,86	1	
Précision de l'utilisateur (%)	0,97	0,95	0,90	0,83	0,82	0,86	1	
Précision globale	0,91							
Kappa	0,91							

* E : Eau, VE : Végétation et Eau, VH : Végétation plus haute, VFH : Végétation à faible hauteur, BF : Bords de la forêt, F : Forêt et L : Lichen.

La matrice de confusion montre que le degré de séparabilité global de nos classes est de l'ordre de 91%. La majorité des erreurs de classification figurant dans cette première matrice ne sont pas pertinentes. Cela garantit une bonne qualité de classification de notre image RADARSAT-2. En comparant les images radar classifiées de nos tourbières avec la classification orientée-objets effectuée sur les mêmes tourbières à l'aide des images optiques (Figure 36) (Dribault, 2012), on constate que nos tourbières, sont correctement classifiées et sont bien délimitées (Figure 36). La faible résolution spatiale de l'imagerie RADARSAT-2 ne nous a pas permis de séparer efficacement les structures internes des tourbières. Cependant, l'information polarimétrique a été efficace pour la délimitation des tourbières étudiées.

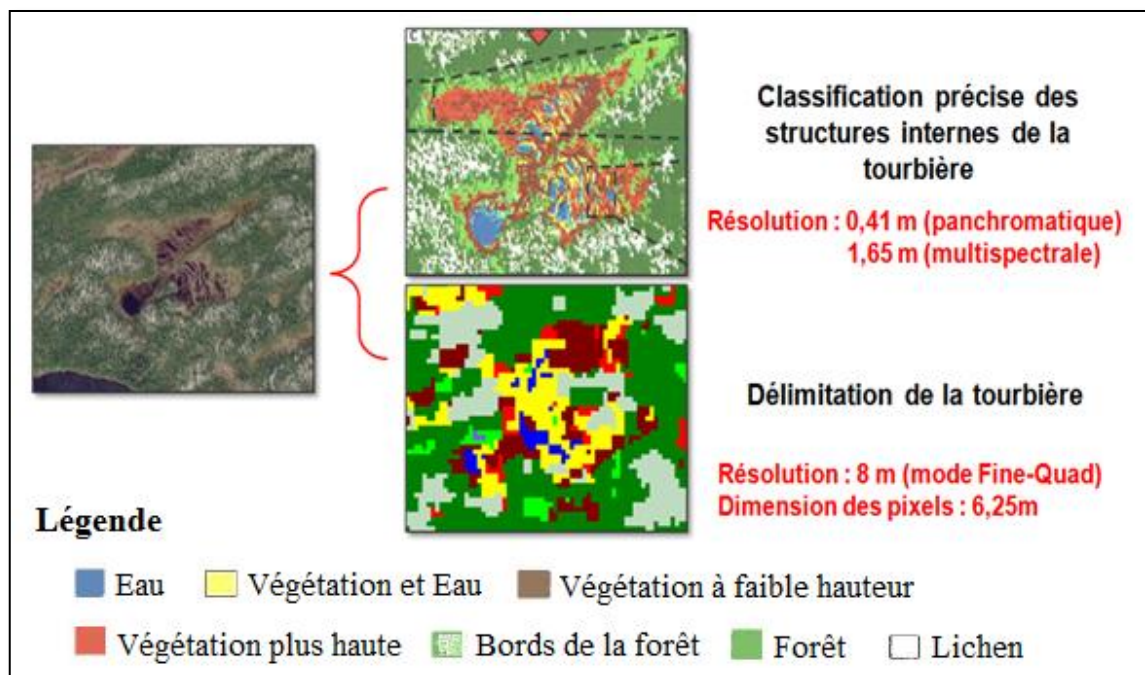


Figure 36 : Comparaison entre la classification orientée-objets d'une image optique (Haut) et une autre polarimétrique (Bas) pour la tourbière Abeille.

Les classes « Eau » et « Lichen » sont bien identifiées puisque leurs caractéristiques spectrales étaient faciles à distinguer. Cependant, il existe une confusion entre les classes « Eau » et « Végétation et eau ». Ces résultats indiquent une faible erreur, ce qui signifie que la majorité des classes sont identifiées avec précision.

4.4 Production de cartes représentant les variations de l'humidité à la surface des tourbières entre 2009 et 2010

Dans ce volet, nous exposerons les résultats obtenus de la production des cartes des variations de l'humidité du sol à la surface des tourbières étudiées entre l'année 2009 et 2010.

Afin de mieux comprendre la relation entre la variation temporelle hydrologique de la tourbière Abeille et les images aériennes du sol, nous avons produit des images pseudo-couleurs de l'humidité de la surface du sol à l'échelle du pixel radar.

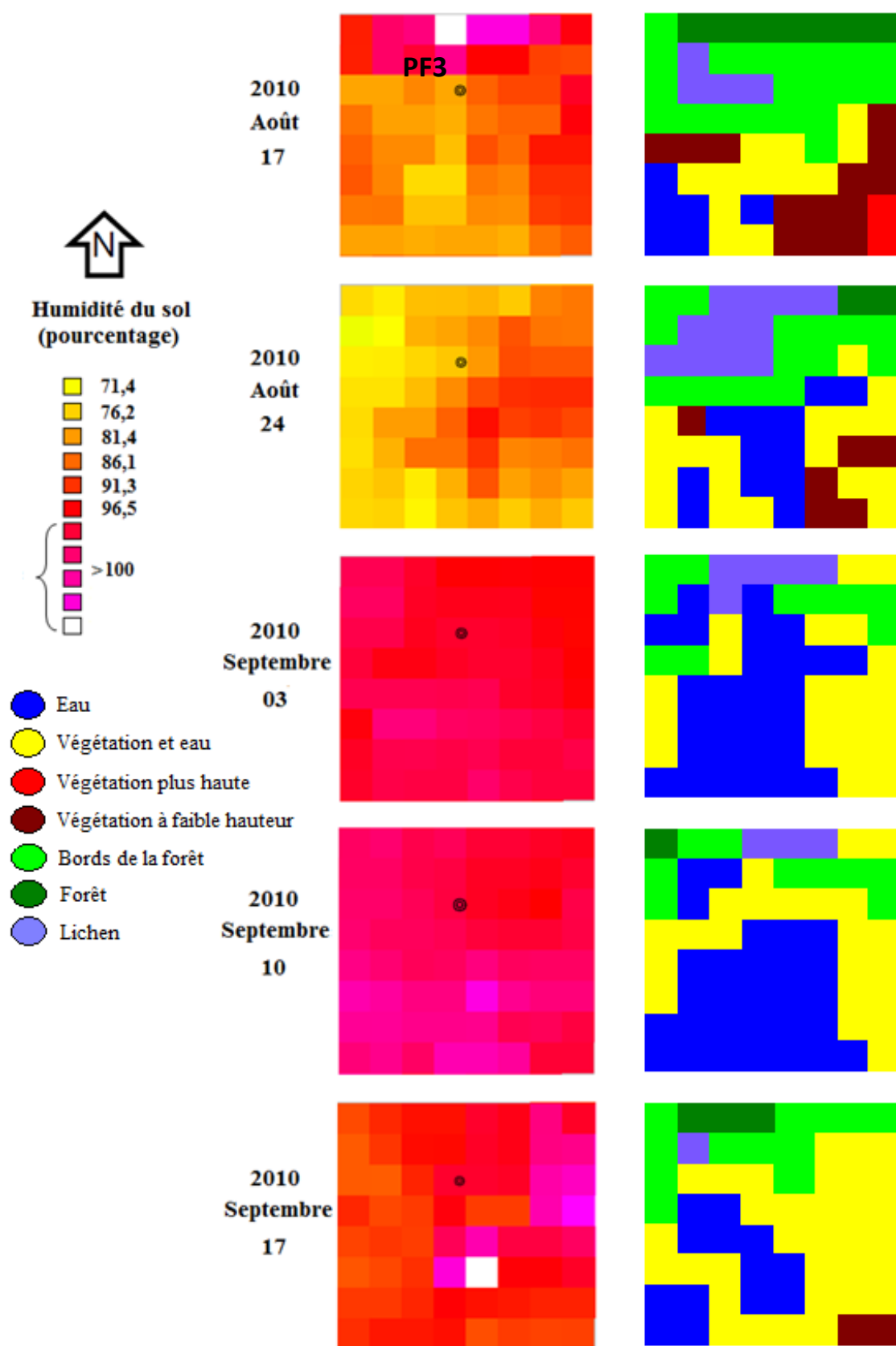


Figure 37 : Cartographie de la variation de l'humidité de surface (gauche), ainsi que la classification de l'occupation du sol (droite) pour la zone APF3 de la tourbière Abeille et pour la période entre août et septembre 2010.

Les images classifiées de la figure ci-dessus représentent l'évolution temporelle du bassin principal à la tourbière Abeille (PF3) au cours des cinq dates d'acquisition de 2010, ainsi que la représentation pseudo-couleur du pourcentage d'humidité de la surface des tourbières pour les dates correspondantes. À noter que nous avons essayé de présenter, à l'aide du logiciel PCI Geomatica™, les valeurs de l'humidité du sol en surface dans les pixels en intervalles égaux ([70-75], [75-80], [80-85], etc.). Malheureusement cela reste irréalisable à cause de la configuration du logiciel qui se limite à ce niveau d'analyse. Dans les deux premières classifications nous remarquons que la plupart du paysage est dominé par un mélange d'eau et de végétation. Sur la seconde, la classe eau peu profonde occupe plus d'espace sur les bords de la marre. Pour la troisième classification (3 septembre), la zone humide s'élargit et présente un niveau d'eau maximum au niveau de la marre principale (l'humidité de surface augmente jusqu'à 100%), comme en témoigne l'humidité de surface mesurée augmente de 76% à 100% du 17 août au 3 septembre. Les images classifiées des 10 et 17 septembre montrent une diminution du niveau d'eau de la marre principale, cela est probablement expliqué par l'atteinte de la zone humide à une période stable dans la dynamique hydrologique des tourbières (Figure 19).

Comme il est montré à la **Figure 37**, le suivi des cartes produites entre le 24 août et le 3 septembre montre une augmentation d'environ 28 % de la teneur en eau dans la zone étudiée (APF3 atteint la limite de saturation). Cette évolution concorde à l'augmentation des précipitations et la diminution de la température moyenne de l'air durant cette période (Figure 19).

4.4.1 Validation croisée du modèle

Le processus de validation croisée a été appliqué afin d'estimer la précision de notre modèle prédictif et dans le but d'établir sa validité. Ce processus représente un outil d'analyse standard et une fonctionnalité importante quand il s'agit de développer et d'optimiser des modèles d'exploration de données. Le modèle est de type empirique calibré pour estimer l'humidité du sol en surface à partir du paramètre polarimétrique Alpha-1 (α_1) d'image SAR. Afin d'évaluer la performance de ce modèle, il reste intéressant qu'il sera validé dans les futures études de recherche. Vu la taille réduite de la base de calibration, il a été décidé d'utiliser la méthode de validation croisée "leave-

one-out". Cette méthode implique l'utilisation d'une seule observation de l'échantillon original comme données de validation, et les observations restantes comme données de formation (Jacome *et al.*, 2013). Ceci est répété de telle sorte que chaque donnée mesurée d'humidité du sol de surface dans l'échantillon est utilisée une fois comme données de validation.

Au total, 5 dates ont été utilisées : 2 pour août 2010 et 3 pour septembre 2010. Les statistiques de biais (erreur systématique) et d'erreur quadratique moyenne (RMSE) ont été calculées à partir de la méthode de validation croisée.

Tableau 11 : Distribution des erreurs de l'humidité de surface du sol pour chaque date d'étude et pour l'ensemble des tourbières étudiées.

Date	Humidité de surface du sol (Pourcentage)			
	Mesurée (M)	Estimée (E)	Différence	Différence ²
17/08/2010	85,4	85,2	-0,2	0,0
24/08/2010	78,6	82,0	3,4	11,7
03/09/2010	79,8	74,7	-5,1	26,4
10/09/2010	81,7	81,4	-0,3	0,1
17/09/2010	86,0	87,5	1,5	2,2
Somme	411,5	410,7	-0,8	40,5

L'intervalle du pourcentage d'erreur de nos résultats varie entre 0 à 5 % (**tableau 11**). Les valeurs d'humidité mesurées sont quasi-identiques à celles estimées. Cela indique une bonne qualité d'estimation du paramètre polarimétrique alpha-1 (α_1) à l'humidité de la surface des tourbières. Pour mieux visualiser les résultats affichés au tableau 11, nous avons choisi de les convertir en graphique (Figure 43).

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (xe_k - xm_k)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (xe_k - xm_k)^2}$$

Où xe_k et xm_k sont l'humidité de surface estimées et mesurées, respectivement, n est le nombre de données (5 dates ont été utilisées dans cette étude).

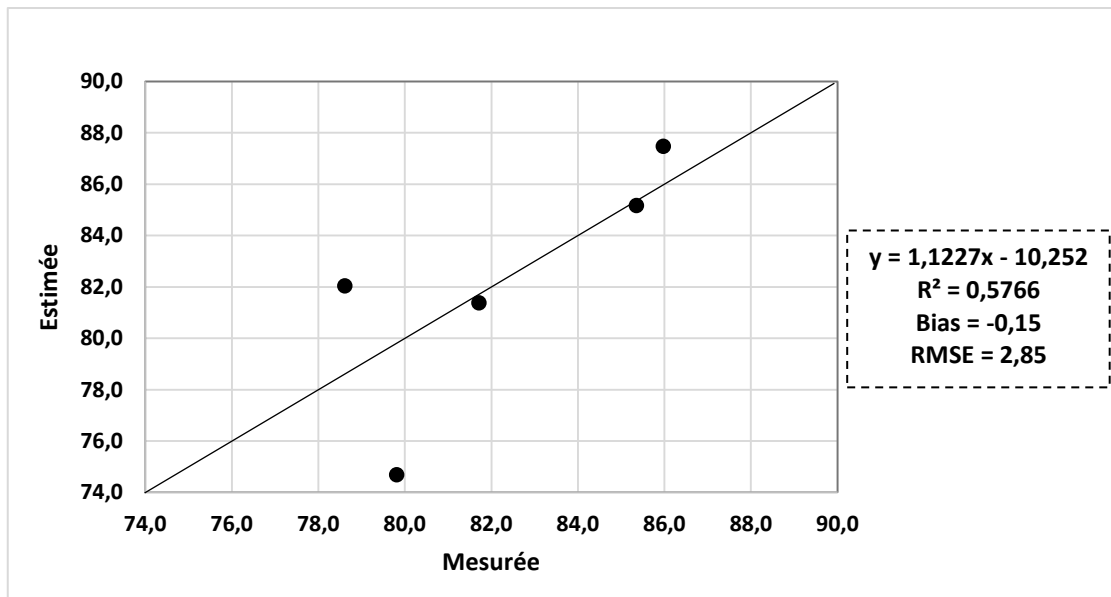


Figure 38 : Distribution des erreurs de l'humidité du sol pour l'ensemble des tourbières étudiées.

Le modèle a été développé en combinant la moyenne de l'humidité du sol en surface des cinq sites d'étude pour les cinq dates (2 pour août 2010 et 3 pour septembre 2010).

Les résultats de la validation-croisée ont été satisfaisants avec un $R^2 = 0,58$ démontrant que le modèle est capable d'expliquer d'environ 60% de la variance de l'humidité en surface. Le Biais négatif indique qu'il y a une tendance à sous-estimer l'humidité en surface, ainsi qu'un écart minimal de l'ordre de 2,85 de la variance interne du modèle a été calculé démontrant la bonne estimation du modèle à l'humidité en surface des tourbières étudiées. La robustesse du modèle a aussi été confirmée par le graphique des estimations mesurées en fonction de celles estimées (Figure 38) montrant une bonne distribution du nuage de points par rapport à la diagonale 1:1.

La distribution des erreurs dans les tourbières étudiées (Figure 38), montre une estimation relative de l'humidité en surface et il est aussi à noter que l'intervalle des changements de l'humidité dans les zones inondées de façon permanente (PF) est plus petit que ceux de celles inondées de façon saisonnière (Jacome *et al.*, 2013). Ces résultats nous permettent alors de valider l'utilité des cartes de variations de l'humidité obtenues.

Le comportement différentiel entre les zones inondées de façon saisonnière (SF) et les zones inondées de façon permanente (PF) peut être expliqué par la texture de la couverture végétale. Les zones de PF des tourbières gardent des conditions d'humidité

plus saturées et stables au cours de la saison de croissance, avec un couvert végétal et une nappe phréatique proche de la surface, qui peut être liée à une réponse de rétrodiffusion plus homogène. Les zones (SF), en tant qu'élément éco-hydrologique transitoire entre les structures internes aquatiques et terrestres, ont une hauteur de la nappe plus profonde et des sols moins saturés, ce qui permet le développement d'une végétation plus structurée (arbustes).

4.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté les résultats obtenus de l'évaluation du potentiel des données polarimétriques RADARSAT-2 pour la surveillance de l'humidité de tourbières boréales (objectif 1). Les résultats concernant cet objectif ont montré une forte sensibilité du paramètre polarimétrique α_1 à l'humidité de la surface des tourbières avec un coefficient de corrélation de l'ordre de 0,88. Ensuite, la classification de l'occupation du sol des structures internes des tourbières des images polarimétriques RADARSAT-2 (objectif 2) a été présentée. Nous pouvons en conclure que les images polarimétriques RADARSAT-2 permettent une bonne délimitation des milieux humides, notamment les tourbières. Enfin, nous avons présenté les cartes des variations de l'humidité de la surface des tourbières étudiées (objectif 3). Ces cartes avaient comme fin d'afficher l'évolution de l'humidité en surface dans les structures internes des tourbières. À l'aide de la validation croisée, le modèle obtenu est capable d'expliquer un pourcentage de 60% de la variance de l'humidité en surface ($R^2 = 0,58$), ainsi qu'une estimation relative de l'humidité à la surface des tourbières étudiées. La robustesse a été validée par la **Figure 38** (bonne distribution du nuage de points par rapport à la droite qui passe par l'origine).

CHAPITRE 5

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'objectif principal de ce mémoire, qui était d'évaluer le potentiel des données polarimétriques RADARSAT-2 pour le suivi de l'humidité de la surface des tourbières du bassin de La Grande Rivière (Québec, Canada), a été atteint. Pour ce faire, nous avons divisé l'étude en trois parties. L'évaluation de la sensibilité des paramètres polarimétriques à l'humidité de la surface du sol dans la région du bassin versant La Grande Rivière à partir d'images RADARSAT-2; la classification orientée-objets d'images polarimétriques permettant de délimiter avec précision les structures internes des tourbières (aquatiques, semi-aquatiques et terrestres); la production de cartes représentant les variations de l'humidité à la surface des tourbières entre août et septembre 2010.

Nous avons commencé le projet par la recherche d'une relation entre les données polarimétriques et l'humidité. Les paramètres polarimétriques **H**, **A**, l'angle α et α_1 ont été évalués. En premier lieu, il faut énoncer la dominance quasi-totale de la diffusion de surface, expliquée par une valeur inférieure à 45° de l'angle α pendant toute la période d'étude. Le paramètre α_1 a indiqué une forte sensibilité à l'humidité à la surface des tourbières avec un coefficient de corrélation de l'ordre de 0.88, tandis que l'anisotropie (**A**) est indépendante de l'humidité du sol.

En outre, nous avons étudié le comportement du signal radar dans chacune des polarisations en fonction de l'humidité. Une forte dynamique de l'humidité de la surface des tourbières a été observée, pendant la période d'étude. Une faible dépendance du signal radar en polarisation HH, HV, ou du rapport HH/HV à l'humidité a été montrée (0.19, 0.05 et 0.04 sont les coefficients de détermination respectif du signal). Afin d'analyser cette faible dépendance, une étude du comportement du signal rétrodiffusé pour chacune des zones a été nécessaire. Les résultats ont montré une forte dépendance du signal rétrodiffusé en polarisation parallèle HH à l'humidité au site APF2, avec une corrélation de $\sim 0,85$. Tandis que, APF3 et BPF6 ont une faible dépendance de l'humidité à cause de la présence de végétation à moyenne hauteur qui domine ces zones qui sont inondées tout au long de l'année.

Pour la deuxième partie de l'étude, et afin de délimiter les structures internes des tourbières (aquatiques, semi aquatiques et terrestres), une approche de classification orientée-objets a été mis en place et appliquée aux images RADARSAT-2 pour les deux tourbières A et B situées dans le bassin versant de La Grande Rivière. Cette approche nous a fourni des résultats satisfaisant et une bonne qualité de classification (séparabilité générale de 91%) pour la délimitation des tourbières.

Le dernier objectif de ce projet de recherche était de produire une cartographie numérique de l'humidité à la surface des tourbières étudiées à l'aide du suivi spatio-temporel de la teneur en eau des sols exécuté à partir des données polarimétriques obtenues du RADARSAT-2. Pour se faire, une validation du modèle numérique de l'humidité du sol à la surface des tourbières obtenues à l'aide de la validation croisée a été établie, après avoir établie et validée la relation entre le paramètre polarimétrique Alpha-1 (α_1) et l'humidité de la surface des tourbières. Les résultats de la validation-croisée ont montré que le modèle résultant était capable d'expliquer 60% de la variance de l'humidité en surface ($R^2 = 0,58$). Le Biais et le RMSE (écart de la variance interne du modèle) ont aussi été calculés indiquant qu'il y avait une estimation relative du modèle à l'humidité en surface des tourbières étudiées.

Cette étude a été conduite sur deux sites expérimentaux (Abeille et Chenille). Il serait intéressant de répéter l'expérience sur d'autres tourbières en utilisant les variations spatiales de leurs structures aquatiques et semi-aquatiques extraites à partir des images des nouveaux satellites SAR (Sentinel-1A et Sentinel-1B). Ces satellites ayant un cycle de 12 jours permettrait une couverture des tourbières à tous les six jours au minimum. La future mission RADARSAT constellation avec trois satellites suivant la même orbite et offrant aussi la polarimétrie présentera une étape fondamentale vers le développement des approches opérationnelles de suivi éco-hydrologique des tourbières structurées. Cette multiplication de satellites permettra de mieux connaître la distribution spatiale de l'humidité des surfaces ainsi que sa variation temporelle par rapport à RADARSAT-2.

Finalement, il est important de souligner que tous les objectifs de ce projet de recherche ont été atteints.

RÉFÉRENCES

- Aubert M (2012) *Caractérisation de l'état de surface des sols nus agricoles par imagerie radar TerraSAR-X*. Thèse de doctorat (L'institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), Montpellier. 222 p.
- Baatz M, Benz U, Dehghani S, Heynen M, Holtje A, Hofmann P, Lingenfelder I, Mimler M, Sohlbach M & Weber M (2004) eCognition Professional User Guide, version 4.0. *Definiens Imaging GmbH. Definiens, München, Germany*.
- Baatz M & Schäpe A (2000) Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII* 58:12-23.
- Bárdossy & Lehmann W (1998) Spatial distribution of soil moisture in a small catchment. Part 1: geostatistical analysis. *Journal of Hydrology* 206(1):1-15.
- Bartsch A, Kidd RA, Pathe C, Scipal K & Wagner W (2007) Satellite radar imagery for monitoring inland wetlands in boreal and sub-arctic environments. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 17(3):305-317.
- Benz UC, Hofmann P, Willhauck G, Lingenfelder I & Heynen M (2004) Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing* 58(3):239-258.
- Bernier M, Dedieu J & Dugay Y (2016) Caractérisation de la neige par imagerie radar polarimétrique (bande C) dans les Alpes. *Land Surface Remote Sensing in Continental Hydrology* vol. 4:pp. 139-176.
- Bernier M, Gauthier Y & Dedieu J-P (1996) Interprétation d'une image radar du satellite ERS-1 prise en période de fonte au Québec: Illustration du phénomène de diffusion dans les hyperfréquences. *Photo interprétation* 34(1):3-11.
- Bonn F, Rochon G (1996) *Précis de télédétection: Applications thématiques*. Sillery: Presses de l'Université du Québec, 648 p.
- Braekke FH (1983) Water table levels at different drainage intensities on deep peat in northern Norway. *Forest Ecology and Management* 5(3):169-192.

- Caloz & Pointet A (2003) Analyse comparative de la classification contextuelle et du maximum de vraisemblance: synthèse et cas d'étude. *Télédétection* 3(2-3):4.
- Campbell-Renaud É (2014) *L'exploitation des tourbières dans une perspective de développement durable*. Mémoire de maîtrise en sciences de l'environnement (Université de Sherbrooke). 85 p.
- Carrer G (2014) *Dynamique des écoulements et du stockage d'eau d'un petit bassin versant boréal influencé par une tourbière minérotrophe aqualysée des Hautes-terres de la baie de James, Québec, Canada*. Mémoire de maîtrise en sciences de l'eau (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique). 320 p.
- Carter V (1986) An overview of the hydrologic concerns related to wetlands in the United States. *Canadian Journal of Botany* 64(2):364-374.
- CCT (2013) *Centre canadien de télédétection : Notions fondamentales de télédétection*. Gouvernement du Canada), www.mcan.gc.ca/sciences-terre/geomatique (Consulté le 23 septembre 2015)
- Charman D (2002) *Peatlands and environmental change*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, UK . 312 p
- Cloude & Pottier E (1996) A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34(2):498-518.
- Daniel S (2009) *Analyse d'images SAR polarimétriques aéroportées pour l'estimation de paramètres bio-physiques des sols agricoles*. Thèse de doctorat en traitement du signal et télécommunication (Université Rennes 1). 199 p
- Dissanska M (2012) *Changement de la structure spatiale des tourbières du complexe Lagrange depuis cinquante ans observés au moyen d'images satellitaires panchromatiques à très haute résolution et de photos aériennes*. Thèse de doctorat en sciences de l'eau. (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique). 159 p
- Dissanska M, Bernier M, Rousseau AN, Chokmani K & Jutras S (2007) *Étude de la connectivité physique des tourbières au réseau hydrographique du bassin*

versant de La Grande Rivière à l'aide d'une classification orientée objet d'images Landsat-7 ETM+. No R927. INRS-ETE, 49 p.

Dissanska M, Paniconi C & 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). No R1194 (Institut national de la recherche scientifique). 73 p.

Dribault Y (2012) *Caractérisation de la dynamique saisonnière de l'hydrologie des tourbières minérotrophes du Moyen-Nord québécois, à l'aide de l'imagerie satellitaire multispectrale à très haute résolution spatiale.* Mémoire de maîtrise en sciences de l'eau (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique). 116 p.

Filion R (2015) *Cartographie régionale de l'humidité des sols en milieu semi-aride avec l'utilisation d'images satellitaires.* Thèse de doctorat en sciences de l'eau (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique). 246 p.

Flanders D, Hall-Beyer M & Pereverzoff J (2003) Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut block delineation and feature extraction. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29(4):441-452.

Fournier RA, Grenier M, Lavoie A & Hélie R (2007) Towards a strategy to implement the Canadian Wetland Inventory using satellite remote sensing. *Canadian Journal of Remote Sensing* 33(sup1):S1-S16.

Gaglione D, Clemente C, Pallotta L, Proudler I, De Maio A & Soraghan JJ (2014) Krogager decomposition and Pseudo-Zernike moments for polarimetric distributed ATR. *Sensor Signal Processing for Defence (SSPD), 2014.* IEEE, p 1-5.

Garneau M (2012) Rapport annuel d'avancement d'activités Année 2011-2012. Université du Québec à Montréal. 31 p

Gosselin G (2013) *L'utilisation de la polarimétrie radar et de la décomposition de Touzi pour la caractérisation et la classification des physiologies végétales des milieux humides: le cas du lac Saint-Pierre.* Thèse doctorale. Université de Montréal. 346 p.

- Hajnsek I, Pottier E & Cloude SR (2003) Inversion of surface parameters from polarimetric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(4):727-744.
- Henderson & Lewis AJ (1998) *Principles and applications of imaging radar. Manual of remote sensing, volume 2*. John Wiley and sons, Somerset, NJ (United States). 896 p.
- Heuvelink G & Webster R (2001) Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma* 100(3):269-301.
- Hoang KH (2014) *Cartographie de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière C  u (Vietnam) au moyen d'images optiques et SAR en support à la modélisation hydrologique*. Thèse de doctorat en sciences de l'eau (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique). 244 p.
- Holah N (2005) *Potentiel des nouveaux capteurs radar multi-polarisation et polarimétrique pour la caractérisation des   tats de surface en milieu agricole*. Thèse de doctorat en sciences de l'univers (Université d'Orléans). 248 p.
- Holden J, Evans M, Burt T & Horton M (2006) Impact of land drainage on peatland hydrology. *Journal of Environmental Quality* 35(5):1764-1778.
- Jacome A, Bernier M, Chokmani K, Gauthier Y, Poulin J & De Sève D (2013) *Monitoring volumetric surface soil moisture content at the La Grande basin boreal wetland by radar multi polarization data*. *Remote Sensing* 5(10):4919-4941.
- Jammali S (2016) *Analyse des signaux radars polarimétriques en bandes C et L pour le suivi de l'humidité du sol de sites forestiers*. Mémoire de maîtrise en sciences géographiques (Université de Sherbrooke). 103 p.
- Jasinski J & Payette S (2005) The creation of alternative stable states in the southern boreal forest, Quebec, Canada. *Ecological Monographs* 75(4):561-583.
- Josten H & Clarke D (2002) Wise use of mires and peatlands: Background and principles including a framework for decision making. International Mire Conservation Group. *International Peat Society, Jyväskylä* 304.
- Khaldoune J (2006) *Développement d'une méthode de mesure et de cartographie du gel du sol en milieu agricole à l'échelle d'un bassin versant à partir d'images radar*

monopolarisées (RADARSAT-1), multipolarisées (ENVISAT) et polarimétriques (RADARSAT-2/CONVAIR-580). Thèse de doctorat en sciences de l'eau (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique). 267 p.

Kropatsch & Bischof H (2001) *Digital image analysis: selected techniques and applications*. Springer Science & Business Media,

Kurosu T, Fujita M & Chiba K (1995) Monitoring of rice crop growth from space using the ERS-1 C-band SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33(4):1092-1096.

Labrecque K (2011) *Cartographie numérique de l'humidité de surface des sols à l'échelle de la parcelle agricole à l'aide de la télédétection et de la prospection électrique*. Mémoire de maîtrise en sciences de l'eau (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique). 92 p.

Lang S, Jekel T, Hölbling D, Schöpfer E, Prinz T, Kloyber E & Blaschke T (2006) *Where the grass is greener—mapping of urban green structures according to relative importance in the eyes of the citizens. First Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Urban Remote Sensing*. Humboldt-Universität zu Berlin. 8 p.

Lee & Pottier E (2009) *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*. CRC press. Boca Raton. 422 p.

Lieffers V & Rothwell R (1987) Effects of drainage on substrate temperature and phenology of some trees and shrubs in an Alberta peatland. *Canadian Journal of Forest Research* 17(2):97-104.

McBratney AB, Santos MM & Minasny B (2003) On digital soil mapping. *Geoderma* 117(1):3-52.

Moore T, Roulet N & Waddington J (1998) Uncertainty in predicting the effect of climatic change on the carbon cycling of Canadian peatlands. *Climatic change* 40(2):229-245.

Nait CA & Aichouche BA (2009) *Classification des images radar polarimétriques selon les mécanismes de rétrodiffusion par les supports à vaste marge*. Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF, Algérie. Université des sciences et de la technologie de Houari Boumediene). 6 p.

- Normand M (1991) *Perspectives offertes par la télédétection radar dans le domaine de l'état hydrique des sols*. La télédétection Radar, 2es journées télédétection. Caractérisation et suivi des milieux terrestres en milieux arides et tropicaux, ORSTOM, Bondy, p. 4-6.
- Ouattara T (2002) *Modélisation de l'érosion hydrique en milieu semi-aride de forte énergie de relief à partir de données de télédétection application à la Bolivie*. Thèse de doctorat en télédétection (Université de Sherbrooke). 194 p.
- Ouranos (2016) *Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques*. Gouvernement du Canada), <https://www.ouranos.ca/> (Consulté le 22 septembre 2015)
- Payette & Rochefort L (2001) *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Presses Université Laval, Québec. 621 p.
- Payette S (2012) Rapport annuel d'avancement d'activités Année 2011-2012. Université du Québec à Montréal. 31 p.
- Platt & Rapoza L (2008) An Evaluation of an Object-Oriented Paradigm for Land Use/Land Cover Classification*. *The Professional Geographer* 60(1):87-100.
- Prevost M, Belleau P & Plamondon AP (1997) Substrate conditions in a treed peatland: responses to drainage. *Ecoscience* 4(4):543-554.
- Price J, Heathwaite A & Baird A (2003) Hydrological processes in abandoned and restored peatlands: an overview of management approaches. *Wetlands Ecology and Management* 11(1-2):65-83.
- Proulx-McInnis S (2010) *Caractérisations hydrologique, topographique et géomorphologique d'un bassin versant incluant une tourbière minérotrophe fortement aqualisée, Baie-de-James, Québec*. Mémoire de maîtrise en sciences de l'eau (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique). 185 p.
- Racine M-J (2005) *Évaluation d'images RADARSAT-1 acquises en mode fin pour l'étude de tourbières boréales: application aux tourbières du bassin versant de la rivière La Grande, Québec, Canada*. Mémoire de maîtrise en sciences de l'eau (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique). 72 p.

- Revillion C (2012) Rapport annuel d'avancement des d'activités Année 2011-2012. *Méthodologie pour la classification orientée-objet de l'occupation du sol des petites Antilles*. Institut de recherche pour le développement. 11 p.
- Rochon & Bonn F (1992) Précis de télédétection. Volume 1. Principes et méthodes. *Presses de l'Université du Québec*.
- Romshoo SA (2004) Geostatistical analysis of soil moisture measurements and remotely sensed data at different spatial scales. *Environmental Geology* 45(3):339-349.
- Rosenfeld A (2013) *Multiresolution image processing and analysis*. Springer Science & Business Media. University of Maryland. 388 p.
- Rothwell R, Silins U & Hillman G (1996) The effects of drainage on substrate water content at several forested Alberta peatlands. *Canadian Journal of Forest Research* 26(1):53-62.
- Roulet & Moore T (1995) The effect of forestry drainage practices on the emission of methane from northern peatlands. *Canadian Journal of Forest Research* 25(3):491-499.
- Rydin H & Jeglum J (2006) *The Biology of Peatlands*. Oxford Univsity. Press, New York. p 343.
- Silins U & Rothwell R (1999) Spatial patterns of aerobic limit depth and oxygen diffusion rate at two peatlands drained for forestry in Alberta. *Canadian Journal of Forest Research* 29(1):53-61.
- Stewart AJ & Lance AN (1991) Effects of moor-draining on the hydrology and vegetation of northern Pennine blanket bog. *Journal of Applied Ecology*:1105-1117.
- Strack M, Waddington J, Bourbonniere R, Buckton E, Shaw K, Whittington P & Price J (2008) Effect of water table drawdown on peatland dissolved organic carbon export and dynamics. *Hydrological Processes* 22(17):3373-3385.
- Tardif S (2010) *Hydrologie comparative des tourbières et des lacs de la Baie de James dans un contexte d'aqualyse*. Thèse de doctorat en sciences de l'eau (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique). 134 p.

- Tarnocai, C., Kettles, I. M., & Lacelle, B. (2011). Peatlands of Canada. Geological Survey of Canada, Open File 6551. Natural Resources Canada : Ottawa, ON. Vol. 10.
- Ulaby, Moore RK & Fung AK (1982) Microwave remote sensing, vol. 2. *Reading, MA, Artech House*.
- Ulaby, Moore RK & Fung AK (1986) Microwave remote sensing active and passive-volume III: from theory to applications. Addison-Wesley Publishing Company, Advanced Book Program/World Science Division. Californie. 2162 p.
- Van Seters TE & Price JS (2002) Towards a conceptual model of hydrological change on an abandoned cutover bog, Quebec. *Hydrological Processes* 16(10):1965-1981.

Les images polarimétriques SAR

La matrice S est appelée la matrice de diffusion, elle décrit comment la diffusion transforme le champ électrique de l'onde incidente au champ électrique de l'onde diffusée et ses composantes représentent les propriétés de diffusion d'une cible.

Décomposition de Pauli

$$S = \begin{pmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} + \gamma \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \alpha[S]_a + \beta[S]_b + \gamma[S]_c \quad (A1)$$

Avec :

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{hh} + S_{vv}) \quad (A2)$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{hh} - S_{vv}) \quad (A3)$$

$$\gamma = \sqrt{2}(S_{hv}) \quad (A4)$$

De (8), (9) et (10), on obtient :

$$SPAN = |S_{hh}|^2 + |S_{vv}|^2 + 2|S_{hv}|^2 = |\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2 \quad (A5)$$

Décomposition de Krogager

$$[S_{(h,v)}] = e^{j\varphi} \left\{ e^{j\varphi_s} K_s \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + K_d \begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{pmatrix} + K_h e^{\pm j2\theta} \begin{pmatrix} 1 & \pm j \\ \pm j & 1 \end{pmatrix} \right\} \quad (A6)$$

$$[S_{(r,l)}] = \begin{pmatrix} S_{rr} & S_{rl} \\ S_{lr} & S_{ll} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |S_{rr}|e^{j\varphi_{rr}} & |S_{rl}|e^{j\varphi_{rl}} \\ |S_{rl}|e^{j\varphi_{rl}} & |S_{ll}|e^{j(\varphi_{rr}+\pi)} \end{pmatrix} \quad (A7)$$

$$[S_{(r,l)}] = e^{j\varphi} \left\{ e^{j\varphi_s} K_s \begin{pmatrix} 0 & j \\ j & 0 \end{pmatrix} + K_d \begin{pmatrix} e^{j2\theta} & 0 \\ 0 & -e^{j2\theta} \end{pmatrix} + K_h \begin{pmatrix} e^{j2\theta} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right\} \quad (A8)$$

Avec :

$$K_s = |S_{rl}|$$

$$K_d = \min(|S_{rr}|, |S_{ll}|)$$

$$K_h = \text{abs}(|S_{rr}| - |S_{ll}|)$$

Décomposition de Cameron

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_{\text{réciproque}} + \mathbf{S}_{\text{non-réciproque}}$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{A} (\cos \tau \mathbf{S}_{\text{Sym}}^{\text{Max}} + \sin \tau \mathbf{S}_{\text{Sym}}^{\text{Min}}) \cos \theta + \mathbf{S}_{\text{non-réciproque}} \sin \theta \quad (\text{A9})$$

Avec :

τ : L'angle d'orientation ;

θ : L'angle d'ellipticité ;

$\mathbf{S}_{\text{Sym}}^{\text{Max}}$: La matrice des composantes symétriques maximales et

$\mathbf{S}_{\text{Sym}}^{\text{Min}}$: La matrice des composantes symétriques minimales.

Décomposition de Freeman-Durden

$$[\mathbf{T}] = \begin{pmatrix} 2\mathbf{A}_0 & \mathbf{C} - \mathbf{jD} & \mathbf{H} + \mathbf{jG} \\ \mathbf{C} + \mathbf{jD} & \mathbf{B}_0 + \mathbf{B} & \mathbf{E} + \mathbf{jF} \\ \mathbf{H} - \mathbf{jG} & \mathbf{E} - \mathbf{jF} & \mathbf{B}_0 - \mathbf{B} \end{pmatrix} \quad (\text{A10})$$

$$[\mathbf{T}] = [\mathbf{T}_S] + [\mathbf{T}_D] + [\mathbf{T}_V] \quad (\text{A11})$$

Avec :

$[\mathbf{T}_S]$: Matrice de diffusion de surface

$$[\mathbf{T}_S] = f_S \begin{pmatrix} |\beta + 1|^2 & (\beta + 1)(\beta - 1)^* & 0 \\ (\beta + 1)^*(\beta - 1) & |\beta - 1|^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{Où } f_S = |R_V|^2 \text{ et } \beta = \frac{R_H}{R_V}$$

$[\mathbf{T}_D]$: Matrice de diffusion de double réflexion

$$[\mathbf{T}_D] = f_D \begin{pmatrix} |\alpha - 1|^2 & (\alpha - 1)(\alpha + 1)^* & 0 \\ (\alpha - 1)^*(\alpha + 1) & |\alpha + 1|^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Où $f_D = |R_{GV}R_{TV}|^2 \text{ et } \alpha = \frac{R_{GH}R_{TH}}{R_{GV}R_{TV}}$

$[\mathbf{T}_V]$: Matrice de diffusion de volume

$$[\mathbf{T}_V] = \frac{f_V}{3} \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

Décomposition de Cloude-Pottier

$$[\mathbf{T}] = [\mathbf{v}][\boldsymbol{\lambda}][\mathbf{v}]^T = \sum_{k=1}^3 \lambda_k \vec{v} \vec{v}^T \quad (\text{A12})$$

Avec :

$[\mathbf{v}]$: La matrice des vecteurs propres associées à $[\mathbf{T}]$ et

$[\boldsymbol{\lambda}]$: La matrice des valeurs propres associées à $[\mathbf{T}]$.

$$H = -\sum_{i=1}^3 P_i \log_3 P_i \quad \text{Avec } 0 \leq H \leq 1 \quad (\text{A13})$$

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad \text{Avec } 0 \leq A \leq 1 \quad (\text{A14})$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^N P_i \alpha_i \quad (\text{A15})$$

ANNEXE B

Segmentation

$$f = W_{couleur} \cdot \Delta h_{couleur} + W_{forme} \cdot \Delta h_{forme} \quad (B1)$$

Avec

$W_{couleur}$, W_{forme} représentent le poids des propriétés spectrales et de la forme. Leur somme est égale à 1.

$\Delta h_{couleur}$ représente l'hétérogénéité du couleur qui est calculée pour une bande c ayant le poids W_c , comme suit

$$\Delta h_{couleur} = \sum_c W_c (n_{objet} \cdot \sigma_{c,objet} - (n_{obj1} \cdot \sigma_{c,obj1} + n_{obj2} \cdot \sigma_{c,obj2})) \quad (B2)$$

Avec :

Le poids W_c est défini par l'utilisateur.

n : représente le nombre de pixels contenus dans un objet.

σ : désigne l'écart-type de la valeur spectrale c du groupe et des objets.

Classification orientée-objets

La moyenne est calculée selon l'équation suivante :

$$\bar{C}_L = \frac{1}{n} \sum_i^n C_{Li} \quad (B3)$$

Où :

C_L : la moyenne.

C_{Li} : les valeurs de tous les pixels composant l'objet.

n : le nombre des pixels.

L'écart-type est calculé comme suit :

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (C_{Li} - \bar{C}_L)^2} \quad (B4)$$

La brillance est calculée comme suit :

$$b = \frac{1}{n_L} \sum_i^{n_L} \bar{C}_i \quad (B5)$$

Avec :

n_L : le nombre des bandes.

$\bar{C}_i$: la moyenne de toutes les bandes.

La coloration ou l'indice de coloration est calculé suivant l'équation ci-dessous :

$$C = \frac{(R-B)}{R} \quad (\text{B6})$$

Avec :

R : la réponse spectrale de la bande rouge ; **B** : la réponse spectrale de la bande bleue.

ANNEXE C

Évaluation du potentiel des données polarimétriques pour la surveillance de l'humidité à la surface du sol

Tableau 12 : Données de terrain de l'humidité de la surface du sol pour chacune des tourbières du 17 août au 17 septembre 2010.

Données de Terrain						
D/M/Y	Tourbière	Milieu	FDR	Humidité du Sol (Mv)	Mv Moy/Milieu	Mv Moy
17/08/2010	A	SF1	1	35,6%	68,7%	85,3%
			2	70,9%		
			3	99,6%		
		PF2	1	97,8%	99,3%	
			2	100,0%		
			3	100,0%		
		PF3	1	100,0%	100,0%	
			2	100,0%		
			3	100,0%		
	B	SF5	1	71,1%	81,5%	
			2	96,3%		
			3	77,1%		
		PF6	1	100,0%	77,3%	
			2	32,8%		
			3	99,0%		
24/08/2010	A	SF1	1	36,3%	62,6%	78,7%
			2	53,0%		
			3	98,6%		
		PF2	1	98,1%	99,4%	

		PF3	2	100,0%	72,0%		
			3	100,0%			
			1	100,0%			
			2	18,0%			
			3	97,9%			
		B	SF5	1	69,6%		82,0%
				2	96,6%		
				3	79,9%		
			PF6	1	100,0%		77,3%
				2	32,1%		
				3	99,9%		
03/09/2010	A		SF1	1	34,6%	60,3%	79,9%
				2	47,7%		
		3		98,7%			
		PF2	1	98,1%	99,4%		
			2	100,0%			
			3	100,0%			
		PF3	1	100,0%	71,6%		
			2	18,2%			
			3	96,6%			
	B	SF5	1	69,6%	83,6%		
			2	100,0%			
			3	81,2%			
		PF6	1	100,0%	84,4%		
			2	53,2%			
			3	99,9%			
10/09/2010	A	SF1	1	36,2%	63,5%	81,8%	
			2	55,2%			

		PF2	3	99,0%	99,5%			
			1	98,4%				
				2			100,0%	
				3			100,0%	
		PF3	1	100,0%	72,6%			
			2	18,3%				
			3	99,6%				
		B	SF5	1	69,8%		85,2%	
				2	100,0%			
				3	85,8%			
			PF6	1	100,0%		88,0%	
				2	64,1%			
	3			99,9%				
	17/09/2010	A	SF1	1	32,9%		58,3%	86,0%
				2	42,9%			
3				99,0%				
PF2			1	98,1%	99,4%			
			2	100,0%				
			3	100,0%				
PF3			1	100,0%	99,7%			
			2	100,0%				
			3	99,0%				
B		SF5	1	71,0%	86,5%			
			2	100,0%				
			3	88,4%				
		PF6	1	100,0%	86,5%			
			2	59,4%				
			3	100,0%				

Tableau 13 : Résultats des mesures de l'humidité de la surface du sol ainsi que coefficients de rétrodiffusion pour chacune des tourbières du 17/08/2010 au 17/09/2010.

Données de Terrain							C. de rétrodiffusion [dB]			Rapport (σ°)	
D/M/Y	Tourbière	Milieu	FDR	Humidité du Sol (Mv)	Mv Moy/Milieu	Mv Moy	σ°(VV)	σ°(HH)	σ°(HV)	HH/HV	HH/VV
17/08/2010	A	SF1	1	35,6%	68,7%	85,3%	-16,29	-6,67	-28,24	0,24	0,41
			2	70,9%			-16,29	-6,67	-28,24	0,24	0,41
			3	99,6%			-16,29	-6,67	-28,24	0,24	0,41
		PF2	1	97,8%	99,3%		-11,13	-12,28	-8,48	1,45	1,10
			2	100,0%			-11,13	-12,28	-8,48	1,45	1,10
			3	100,0%			-11,13	-12,28	-8,48	1,45	1,10
		PF3	1	100,0%	100,0%		-12,97	-7,39	-9,36	0,79	0,57
			2	100,0%			-12,97	-7,39	-9,36	0,79	0,57
			3	100,0%			-12,97	-7,39	-9,36	0,79	0,57
	B	SF5	1	71,1%	81,5%		-9,39	-14,84	-16,72	0,89	1,58
			2	96,3%			-9,39	-14,84	-16,72	0,89	1,58
			3	77,1%			-9,39	-14,84	-16,72	0,89	1,58
		PF6	1	100,0%	77,3%		-16,20	-16,13	-11,92	1,35	1,00
			2	32,8%			-16,20	-16,13	-11,92	1,35	1,00
			3	99,0%			-16,20	-16,13	-11,92	1,35	1,00
24/08/2010	A	SF1	1	36,3%	62,6%	78,7%	-25,23	-27,45	-28,24	0,97	1,09
			2	53,0%			-25,23	-27,45	-28,24	0,97	1,09
			3	98,6%			-25,23	-27,45	-28,24	0,97	1,09
		PF2	1	98,1%	99,4%		-3,93	-9,63	-13,23	0,73	2,45
			2	100,0%			-3,93	-9,63	-13,23	0,73	2,45
			3	100,0%			-3,93	-9,63	-13,23	0,73	2,45
		PF3	1	100,0%	72,0%		-14,35	-15,67	-17,50	0,90	1,09
			2	18,0%			-14,35	-15,67	-17,50	0,90	1,09

			3	97,9%			-14,35	-15,67	-17,50	0,90	1,09	
	B	SF5	1	69,6%		82,0%		-6,13	-7,51	-27,70	0,27	1,22
			2	96,6%				-6,13	-7,51	-27,70	0,27	1,22
			3	79,9%				-6,13	-7,51	-27,70	0,27	1,22
			1	100,0%			77,3%		-13,43	-13,72	-28,54	0,48
		2	32,1%			-13,43		-13,72	-28,54	0,48	1,02	
		3	99,9%			-13,43		-13,72	-28,54	0,48	1,02	
		PF6										
03/09/2010	A	SF1	1	34,6%	60,3%		-12,64	-19,63	-16,66	1,18	1,55	
			2	47,7%			-12,64	-19,63	-16,66	1,18	1,55	
			3	98,7%			-12,64	-19,63	-16,66	1,18	1,55	
		PF2	1	98,1%	99,4%		-19,87	-12,64	-26,38	0,48	0,64	
			2	100,0%			-19,87	-12,64	-26,38	0,48	0,64	
			3	100,0%			-19,87	-12,64	-26,38	0,48	0,64	
		PF3	1	100,0%	71,6%		-17,96	-6,04	-17,12	0,35	0,34	
			2	18,2%			-17,96	-6,04	-17,12	0,35	0,34	
			3	96,6%			-17,96	-6,04	-17,12	0,35	0,34	
		B	SF5	1	69,6%	83,6%		-13,83	-14,13	-21,94	0,64	1,02
				2	100,0%			-13,83	-14,13	-21,94	0,64	1,02
				3	81,2%			-13,83	-14,13	-21,94	0,64	1,02
	PF6		1	100,0%	84,4%		-6,37	-15,70	-15,83	0,99	2,47	
			2	53,2%			-6,37	-15,70	-15,83	0,99	2,47	
			3	99,9%			-6,37	-15,70	-15,83	0,99	2,47	
	10/09/2010	A	SF1	1	36,2%	63,5%		-9,52	-11,39	-14,55	0,78	1,20
				2	55,2%			-9,52	-11,39	-14,55	0,78	1,20
				3	99,0%			-9,52	-11,39	-14,55	0,78	1,20
			PF2	1	98,4%	99,5%		-7,02	-6,25	-41,55	0,15	0,89
2				100,0%			-7,02	-6,25	-41,55	0,15	0,89	
3				100,0%			-7,02	-6,25	-41,55	0,15	0,89	

		PF3	1	100,0%	72,6%		-28,54	-20,41	-19,47	1,05	0,72			
			2	18,3%			-28,54	-20,41	-19,47	1,05	0,72			
			3	99,6%			-28,54	-20,41	-19,47	1,05	0,72			
	B	SF5	1	69,8%	85,2%		-17,88	-20,36	-15,61	1,30	1,14			
			2	100,0%			-17,88	-20,36	-15,61	1,30	1,14			
			3	85,8%			-17,88	-20,36	-15,61	1,30	1,14			
		PF6	1	100,0%	88,0%		-17,40	-19,39	-9,58	2,02	1,11			
			2	64,1%			-17,40	-19,39	-9,58	2,02	1,11			
			3	99,9%			-17,40	-19,39	-9,58	2,02	1,11			
		17/09/2010	A	SF1	1		32,9%	58,3%	86,0%	-8,44	-5,98	-20,09	0,30	0,71
					2		42,9%			-8,44	-5,98	-20,09	0,30	0,71
					3		99,0%			-8,44	-5,98	-20,09	0,30	0,71
PF2	1			98,1%	99,4%	-4,35	-5,58	-13,99		0,40	1,28			
	2			100,0%		-4,35	-5,58	-13,99		0,40	1,28			
	3			100,0%		-4,35	-5,58	-13,99		0,40	1,28			
PF3	1			100,0%	99,7%	-15,11	-27,21	-30,97		0,88	1,80			
	2			100,0%		-15,11	-27,21	-30,97		0,88	1,80			
	3			99,0%		-15,11	-27,21	-30,97		0,88	1,80			
B	SF5		1	71,0%	86,5%	-11,08	-5,19	-18,86		0,28	0,47			
			2	100,0%		-11,08	-5,19	-18,86		0,28	0,47			
			3	88,4%		-11,08	-5,19	-18,86		0,28	0,47			
	PF6	1	100,0%	86,5%	-10,62	-9,77	-12,31	0,79	0,92					
		2	59,4%		-10,62	-9,77	-12,31	0,79	0,92					
		3	100,0%		-10,62	-9,77	-12,31	0,79	0,92					

Tableau 14 : Données terrains de l'humidité de la surface du sol et les paramètres polarimétriques extraits des images RADARSAT-2.

Données de Terrain				Paramètres polarimétriques				Paramètres polarimétriques (moyenne)			
D/M/Y	Peatland	Landscape	FDR	Entropie (H)	Anisotropie (A)	Alpha	Alpha-1	Entropie (H)	Anisotropie (A)	Alpha	Alpha-1
17/08/2010	A	SF1	1	0,884	0,138	42,257	14,720	0,836	0,2558	42,1578	18,514
			2	0,884	0,138	42,257	14,720				
			3	0,884	0,138	42,257	14,720				
		PF2	1	0,797	0,287	37,803	14,153				
			2	0,797	0,287	37,803	14,153				
			3	0,797	0,287	37,803	14,153				
		PF3	1	0,914	0,408	47,349	12,135				
			2	0,914	0,408	47,349	12,135				
			3	0,914	0,408	47,349	12,135				
	B	SF5	1	0,769	0,343	42,481	29,675				
			2	0,769	0,343	42,481	29,675				
			3	0,769	0,343	42,481	29,675				
		PF6	1	0,816	0,103	40,899	21,887				
			2	0,816	0,103	40,899	21,887				
			3	0,816	0,103	40,899	21,887				
24/08/2010	A	SF1	1	0,641	0,330	30,219	14,087	0,7972	0,2908	37,8938	13,7702
			2	0,641	0,330	30,219	14,087				
			3	0,641	0,330	30,219	14,087				
		PF2	1	0,813	0,157	37,050	11,510				
			2	0,813	0,157	37,050	11,510				
			3	0,813	0,157	37,050	11,510				
		PF3	1	0,891	0,414	45,170	15,002				
			2	0,891	0,414	45,170	15,002				

	B	SF5	3	0,891	0,414	45,170	15,002				
			1	0,877	0,346	44,805	20,546				
			2	0,877	0,346	44,805	20,546				
			3	0,877	0,346	44,805	20,546				
		PF6	1	0,764	0,207	32,225	7,706				
			2	0,764	0,207	32,225	7,706				
			3	0,764	0,207	32,225	7,706				
03/09/2010	A	SF1	1	0,443	0,203	15,340	4,114	0,6692	0,2804	29,137	9,6154
			2	0,443	0,203	15,340	4,114				
			3	0,443	0,203	15,340	4,114				
		PF2	1	0,627	0,343	28,169	11,941				
			2	0,627	0,343	28,169	11,941				
			3	0,627	0,343	28,169	11,941				
		PF3	1	0,730	0,256	32,028	10,986				
			2	0,730	0,256	32,028	10,986				
			3	0,730	0,256	32,028	10,986				
	B	SF5	1	0,714	0,363	33,024	13,123				
			2	0,714	0,363	33,024	13,123				
			3	0,714	0,363	33,024	13,123				
		PF6	1	0,832	0,237	37,124	7,913				
			2	0,832	0,237	37,124	7,913				
			3	0,832	0,237	37,124	7,913				
10/09/2010	A	SF1	1	0,748	0,341	33,805	11,147	0,7486	0,2246	34,6218	14,3108
			2	0,748	0,341	33,805	11,147				
			3	0,748	0,341	33,805	11,147				
		PF2	1	0,740	0,078	34,621	15,812				
			2	0,740	0,078	34,621	15,812				
			3	0,740	0,078	34,621	15,812				

		PF3	1	0,727	0,261	31,428	10,103				
			2	0,727	0,261	31,428	10,103				
			3	0,727	0,261	31,428	10,103				
	B	SF5	1	0,745	0,081	34,317	14,838				
			2	0,745	0,081	34,317	14,838				
			3	0,745	0,081	34,317	14,838				
		PF6	1	0,783	0,362	38,938	19,654				
			2	0,783	0,362	38,938	19,654				
			3	0,783	0,362	38,938	19,654				
17/09/2010	A	SF1	1	0,703	0,119	34,124	16,983	0,8012	0,2774	40,0424	20,0416
			2	0,703	0,119	34,124	16,983				
			3	0,703	0,119	34,124	16,983				
		PF2	1	0,866	0,237	42,971	19,889				
			2	0,866	0,237	42,971	19,889				
			3	0,866	0,237	42,971	19,889				
		PF3	1	0,791	0,371	40,667	23,218				
			2	0,791	0,371	40,667	23,218				
			3	0,791	0,371	40,667	23,218				
	B	SF5	1	0,844	0,275	41,223	17,173				
			2	0,844	0,275	41,223	17,173				
			3	0,844	0,275	41,223	17,173				
		PF6	1	0,802	0,385	41,227	22,945				
			2	0,802	0,385	41,227	22,945				
			3	0,802	0,385	41,227	22,945				

ANNEXE D

Comportement de la rétrodiffusion en fonction de l'humidité

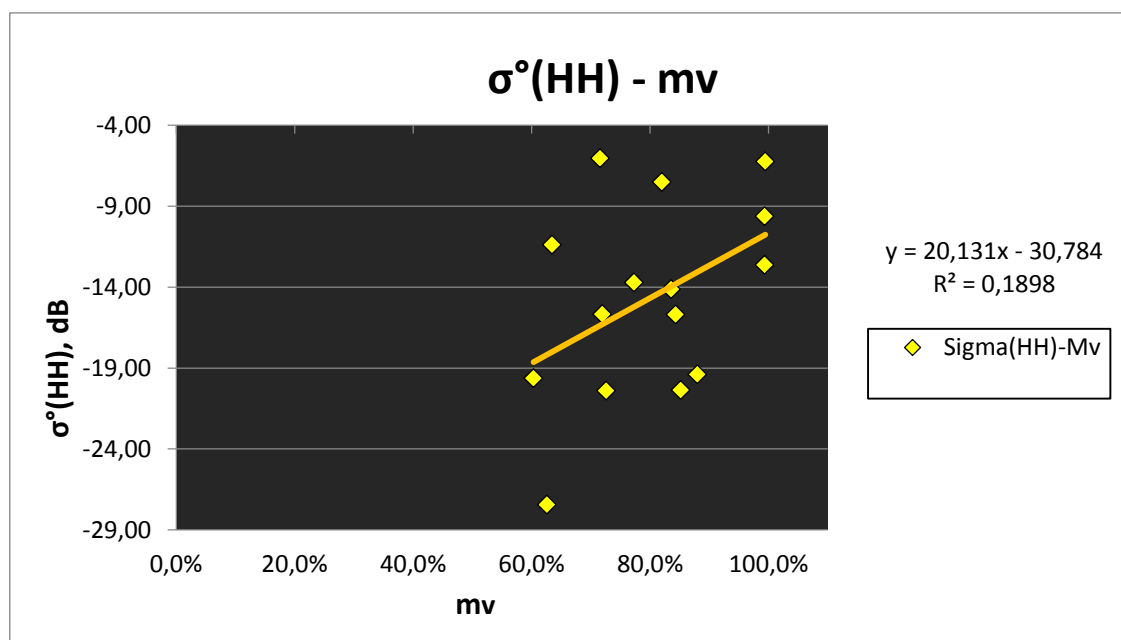


Figure 39 : Dépendance du signal rétrodiffusé en polarisation HH à l'humidité du sol pour les tourbières étudiées et les dates d'étude.

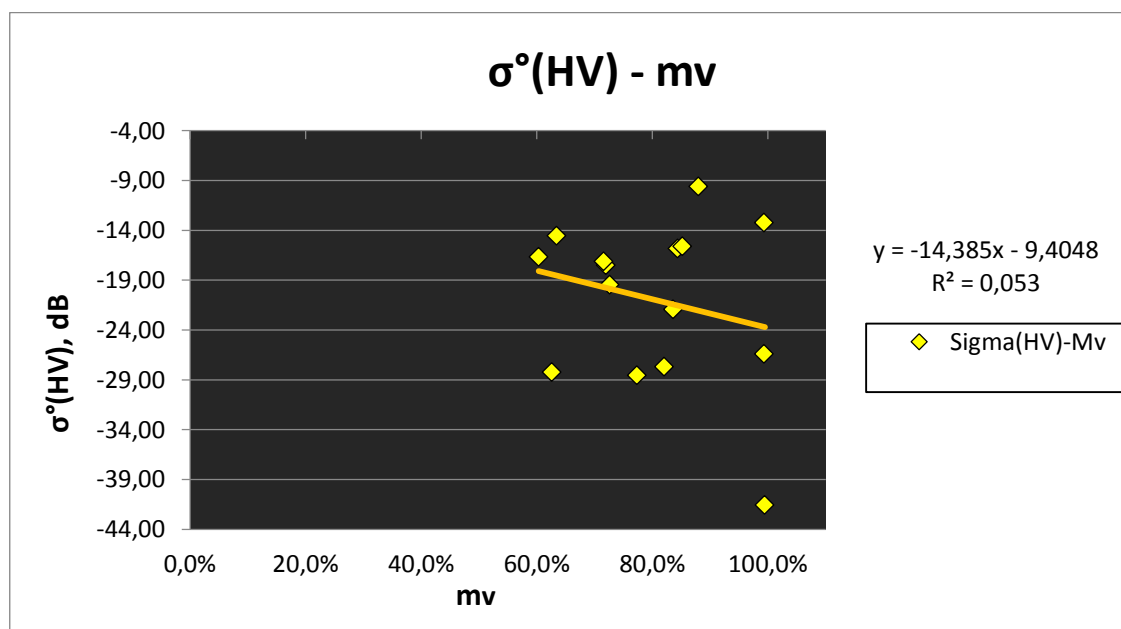


Figure 40 : Dépendance du signal rétrodiffusé en polarisation HV à l'humidité du sol.

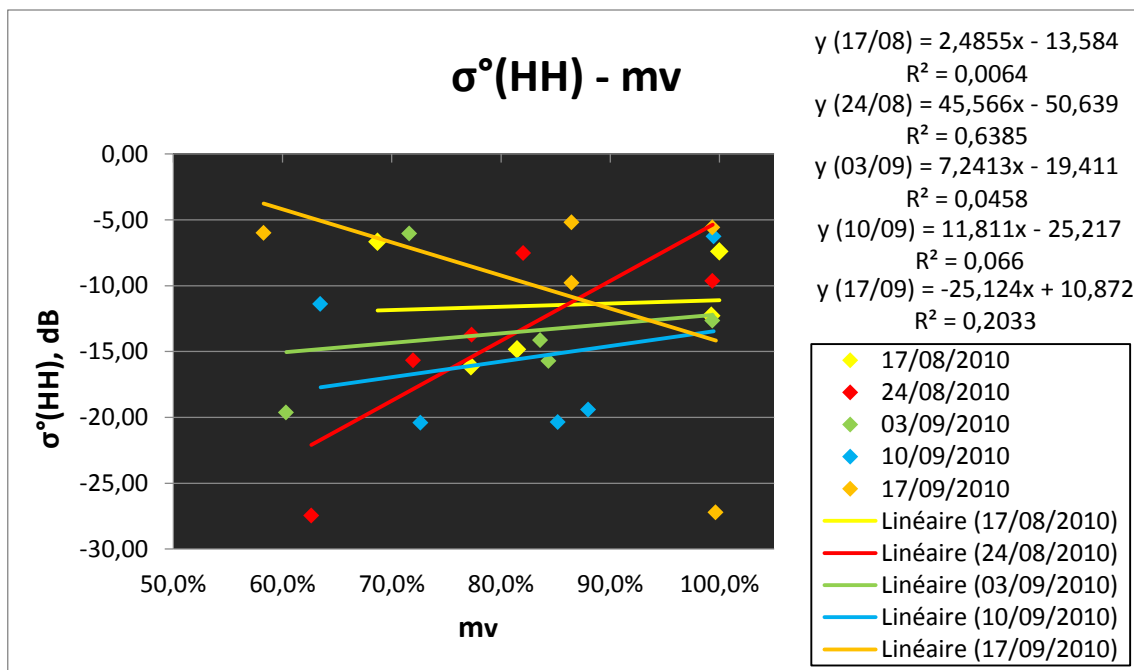


Figure 41 : Dépendance du signal rétrodiffusé en polarisation HH à l'humidité du sol pour les dates d'étude.

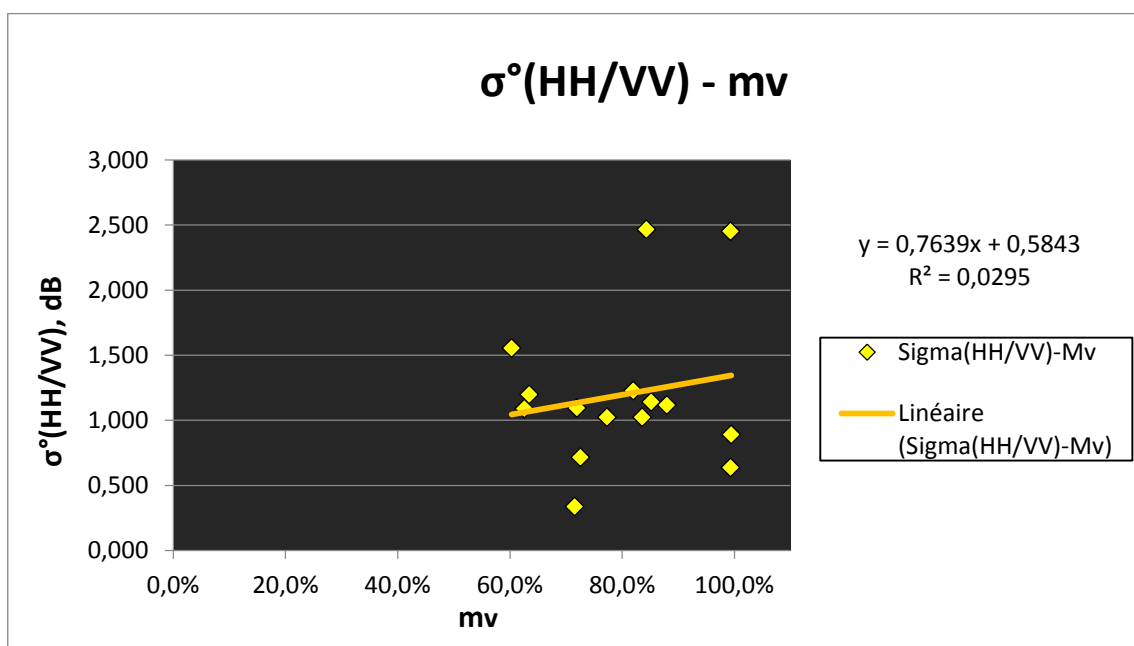


Figure 42 : Dépendance du rapport de copolarisation $\sigma^\circ(\text{HH}/\text{VV})$ à l'humidité du sol.

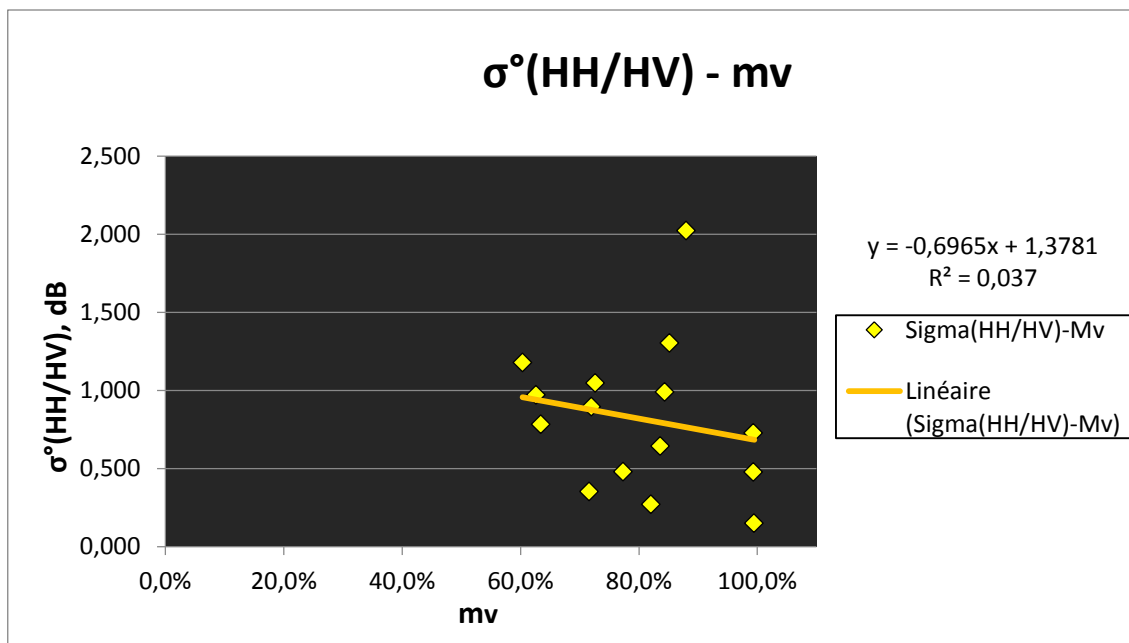


Figure 43 : Dépendance du rapport d'orthopolarisation $\sigma^\circ(\text{HH}/\text{HV})$ à l'humidité du sol.

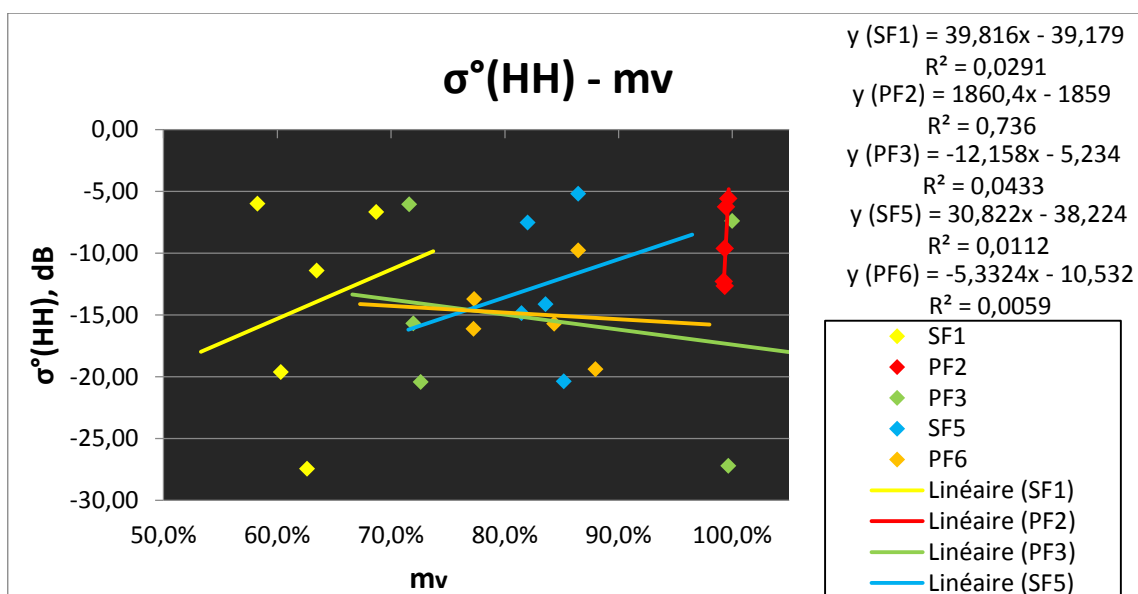


Figure 44 : Dépendance du signal rétrodiffusé en polarisation HH à l'humidité du sol pour les tourbières étudiées.