Université du Québec
INRS-Eau, Terre et Environnement

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

Par
Marie-Josée Racine
(B.Sc. Géographie)

Mémoire présenté
pour l'obtention

du grade de Maîtrise ès sciences (M.Sc.) en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Examinateur externe	Benoît St-Onge Université du Québec à Montréal
Examinateur interne	André St-Hilaire INRS-Eau, Terre et Environnement
Directrice de recherche	Monique Bernier INRS-Eau, Terre et Environnement
Codirecteur de recherche	Taha B.M.J. Ouarda INRS-Eau, Terre et Environnement

© droits réservés de Marie-Josée Racine, 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

Résumé

Dans le cadre d'un projet de recherche sur le cycle du carbone dans les tourbières boréales, la télédétection radar a été utilisée avec l'objectif d'obtenir différentes informations sur ces milieux encore mal connus. Ce mémoire présente une étude pilote réalisée sur trois tourbières du bassin versant de la rivière La Grande (Québec, Canada). Sept images multi-temporelles acquises en mode Fin ont été analysées et comparées avec des données de terrain recueillies simultanément, dans le but de vérifier si la hauteur de la nappe phréatique et le contenu en eau volumique de la tourbe influencent le coefficient de rétrodiffusion. Un changement significatif de la hauteur de la nappe phréatique est observé pour les trois tourbières. Ce changement se reflète sur les images radar, là où les arbres sont petits et se trouvent en faible densité. Toutefois, un nombre plus important d'images en mode Fin devront être acquises afin de couvrir une plus grande variété de conditions hydrologiques et de mieux comprendre comment elles influencent le signal radar dans les tourbières. Une classification du maximum de vraisemblance basée sur les patrons morphologiques de surface des tourbières a également été réalisée à partir des images en mode Fin (filtrées et textures), puis comparée à une classification similaire effectuée à partir d'images (textures) multi-temporelles acquises en mode Standard. Les résultats de classification obtenus à partir des images en mode Fin, qui ont pourtant une meilleure résolution, sont moins bons que ceux d'une classification utilisant les images en mode Standard (35% vs. 59% de précision totale utilisant 10 classes et 37% vs. 74% de précision totale avec 4 classes). Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces résultats: (1) la plus grande quantité de chatoiement des images en mode Fin due au plus petit nombre de visée du capteur; (2) les images en mode Fin ont été acquises à des moments où les conditions au sol étaient similaires, ce qui n'était pas le cas pour les images en mode Standard; (3) les images en mode Fin n'avaient qu'une seule gamme d'angles d'incidence alors que celles en mode Standard en avaient deux et (4) les moins bons résultats de classification obtenus avec les textures qu'avec les images filtrées suggèrent que la meilleure combinaison de texture n'a pu être identifiée à l'aide des méthodes utilisées.

Marie-Josée Racine

Étudiant

Directeur de recherche

Avant-propos

Cette maîtrise s'insère dans un projet d'étude du cycle du carbone dans les tourbières boréales de la Baie James, situées plus précisément dans le bassin versant de la rivière La Grande. L'objectif initial était d'étudier le changement saisonnier de la dimension des mares des tourbières à partir d'images RADARSAT-1 acquises en mode Fin. Les images ont donc été acquises dans cet objectif. Cet objectif s'est avéré rapidement irréalisable pour l'unique raison que les changements saisonniers des mares sont minimes et que la résolution des images en mode Fin ne pouvait permettre un tel suivi. Une période de réflexion a suivi, écourtée par la campagne de terrain qui devait avoir lieu durant l'été 2003. Le maximum de données reliées à l'hydrologie des tourbières à l'étude ont donc été recueillies, n'ayant pas encore en tête l'objectif précis de la recherche. C'est par la suite que j'ai pu mieux définir mon sujet de recherche, après avoir approfondi les connaissances sur les images radar et leur application à l'hydrologie des tourbières, tout en tenant compte des limites des données obtenues lors de la campagne de terrain. C'est ainsi que cette maîtrise se veut finalement être une évaluation du potentiel des images acquises en mode Fin pour l'étude des tourbières boréales.

Le mémoire présenté est un mémoire par article et se divise en deux parties. La première présente une introduction aux tourbières et la contribution potentielle de la télédétection radar à l'étude du cycle du carbone dans ces milieux. Les objectifs de cette recherche sont ensuite présentés. Nous y présentons également un résumé des méthodes utilisées et des résultats obtenus. Dans la deuxième partie, on trouvera l'article soumis à la revue *Le Journal Canadien de Télédétection* une première fois en mai 2005 et une seconde fois, après correction, en novembre 2005.

« *Il n'y a dans le fond qu'une seule grande chose qui compte : vivre.*
Pour voir dans sa hutte ou en voyage le grand jour qui se lève et la lumière qui enveloppe le monde. »
Adage inuit.

« Le cœur de l'homme, lorsqu'il est coupé de la nature, devient dur. »
Adage amérindien.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice, la professeure Monique Bernier, pour m'avoir permis de participer à ce projet de recherche sur les tourbières boréales et d'aller en cet endroit grandiose qu'est la Baie James. Je la remercie aussi de m'avoir offert l'opportunité de présenter ma recherche à la conférence SPIE Europe. Merci au professeur Taha Ouarda pour avoir accepté de me co-diriger.

Merci à toute la belle équipe de recherche du projet sur les tourbières: la professeure Michelle Garneau de l'UQAM pour la mise en place du projet et pour le temps et l'énergie qu'elle a consacrés à sa bonne réalisation ainsi que sur un plan plus personnel pour ses conseils scientifiques et son soutien moral; le professeur Nigel Roulet de l'université McGill pour ses suggestions et pour le temps qu'il m'a consacré malgré son emploi du temps bien chargé; je suis vraiment reconnaissante envers Anne-Marie Demers avec qui j'ai eu la chance de collaborer, d'avoir des échanges très riches sur la télédétection et les tourbières, pour son support moral, son amitié et pour avoir accepté que je reprenne une partie de son projet; je remercie Nicola McEnroe pour son support moral et la correction de mon anglais; Karl Guillotte pour son aide sur le terrain et ses idées ingénieuses; Jay Ploss pour son aide lors de la deuxième campagne de terrain; Véronique Audy, Mélissa Collins, Jukka Turnunen et Éric Ménard pour leur sens de l'humour et leur bonne compagnie à la Baie James.

Merci aux gens de l'équipe du professeur Bernier, soit Mohammed Niang, Rébecca Filion, Marc Philippin et Yves Gauthier pour leur support technique et Karem Chokmani pour son encouragement et ses conseils. Je remercie aussi Véronique Jourdain de l'équipe du professeur Ouarda pour son support dans le traitement et l'analyse statistique de mes données terrain. Merci à Sébastien Duval, technicien à l'INRS-ETE, pour son aide lors de la calibration d'appareil en laboratoire.

Merci aux professeurs Ferdinand Bonn et Marcel Pouliot de l'Université de Sherbrooke pour avoir cru en moi. C'est eux qui m'ont supportée dans ma demande de bourse et pour mon entrée à la maîtrise à l'INRS. Merci au Fond Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) pour le financement de ma maîtrise.

Merci à monsieur Jean Landry, mon patron au conseil de bassin de la rivière Montmorency, de croire en moi et pour ses belles qualités humaines. C'est grâce à lui si j'ai réussi à traverser les derniers kilomètres à temps partiel.

Je remercie mes consoeurs et confrères de l'INRS-ETE, soit Laurent Bonnifait, Julie Corriveau, Claudie Beaulieu et Annick Michaud pour leur support et leur amitié. Merci aussi à mes consoeurs et confrères de géographie de l'Université de Sherbrooke, soit Karen Murphy, Guy Aubé, Nathalie Grimard, Laurie St-Onge, Alexandre Langlois et Valérie-Anne Bachand pour leur amitié et leur soutien. Merci à Audrey Tanguay et Catherine Simard pour notre belle amitié et à Karine Therrien pour les belles journées de ressourcement passées en plein air.

Muchas gracias au Pérou, aux Péruviens et à mon ami Jose Luis Ramirez Gastelu qui me permettent depuis les six dernières années de relativiser quand ça ne va pas bien et pour tous les beaux souvenirs qui me remplissent de joies immenses!

Je remercie mes parents ainsi que ma grand-mère qui ont toujours cru en moi et m'ont toujours encouragée. Je lance aussi un clin d'œil à mon grand-père, qui n'est plus de ce monde malheureusement, mais qui serait sûrement fière de cet accomplissement, si petit et inutile soit-il. Merci à l'homme de ma vie de m'avoir supporté jusqu'au bout et de croire en moi.

Table des matières

Tables des matières ..... **XIII**
Liste des figures ..... **XV**
Liste des tableaux ..... **XVII**

PREMIÈRE PARTIE : SYNTHÈSE **1**

CHAPITRE 1 INTRODUCTION **3**
1.1. Objectifs de la recherche 5
1.2. Présentation du mémoire 5
CHAPITRE 2 LES TOURBIÈRES ET LA TÉLÉDÉTECTION **7**
2.1. Introduction 7
2.2. Les tourbières 7
2.3. La télédétection radar des milieux humides 11
2.3.1. Le radar 11
2.3.2. La fréquence et les bandes radar 13
2.3.3. La polarisation 15
2.3.4. L'angle d'incidence 16
2.3.5. La résolution 16
2.3.6. La rugosité de surface 18
2.3.7. Le capteur RADARSAT-1 19
2.4. Le potentiel des images radar pour la télédétection des milieux humides 19
2.4.1. Le suivi des changements hydrologiques 20
2.4.2. La cartographie des milieux humides 22
CHAPITRE 3 MATÉRIEL ET MÉTHODES **25**
3.1. Introduction 25
3.2. Sites à l'étude 25
3.3. Méthodes 26
3.3.1. Campagnes de terrain 26
3.3.2. Traitement des données de terrain 27
3.3.3. Acquisition, traitement et analyses des images radar 28

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION 31
4.1. Introduction 31
4.2. Analyses statistiques des données de terrain 31
4.2.1. Analyse de la dynamique de la nappe phréatique des trois tourbières 31
4.2.2. La comparaison des moyennes des variables mesurées sur le terrain lors des passages de RADARSAT 32
4.2.3. Sommaire des résultats et discussion 34
4.3. Analyse du coefficient de rétrodiffusion 35
4.4. Classification 36
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 39
LISTE DES RÉFÉRENCES 41
ANNEXE A. CALIBRATION DU TDR 45
ANNEXE B. DONNÉES DE PRÉCIPITATION DES TROIS SITES À L'ÉTUDE 47

DEUXIÈME PARTIE : ARTICLE SCIENTIFIQUE 51

Liste des figures

Figure 2-1: Répartition des grandes tourbières au Québec (source : MRNFP, 2004) 8

Figure 2-2: Les composantes majeures du cycle du carbone dans les tourbières (Payette et Rochefort, 2001) 11

Figure 2-3: Le spectre électromagnétique (source: Henderson et Lewis, 1998) 12

Figure 2-4: Pénétration de différentes longueurs d'onde dans le sol selon son contenu en eau volumique (adapté de Ulaby *et al.*, 1982) 14

Figure 2-5: Composition d'une onde électromagnétique (Henderson et Lewis, 1998) 15

Figure 2-6 : Les angles d'incidence (adapté de RADARSAT International, 2005) 16

Figure 2-7: Les mécanismes de dispersion d'une onde radar (adapté de plusieurs sources) 18

Figure 2-8: Les différents modes d'acquisition du capteur RADARSAT-1 (RADARSAT International, 2005) 19

Figure 4-1: Hauteur de la nappe phréatique moyenne pour les trois tourbières lors des 8 semaines d'échantillonnage 32

Figure A-1 : Courbe de calibration du TDR 46

Figure B-1 : Précipitations (graphique du bas) et hauteur de nappe phréatique (graphique du haut) mesurées sur la période d'étude (été 2003) pour la tourbière LG-1 47

Figure B-2 : Précipitations (graphique du bas) et hauteur de nappe phréatique (graphique du haut) mesurées sur la période d'étude (été 2003) pour la tourbière LG-2 48

Figure B-3 : Précipitations (graphique du bas) et hauteur de nappe phréatique (graphique du haut) mesurées sur la période d'étude (été 2003) pour la tourbière LG-3 49

Liste des tableaux

Tableau 2-1: Facteurs influençant la quantité d'énergie retournée vers le capteur (Ulaby *et al.*, 1982 et RADARSAT International, 2005) 13

Tableau 2-2: Codes, fréquences et longueurs d'onde utilisés en télédétection radar ainsi que leur profondeur approximative de pénétration du sol (source: Bonn et Rochon, 2000; Henderson et Lewis, 1998) 14

Tableau 2-4: Paramètres des différents modes d'acquisition de RADARSAT-1 (adapté de RADARSAT International, 2005) 17

Tableau 4-1 : Statistiques du CEV mesurés lors des deux passages de RADARSAT 35

Première partie

Synthèse

CHAPITRE 1 Introduction

Il a été estimé que les milieux humides couvrent près de 15% de la superficie totale du Canada (NWWG, 1998) et que plus de 90% de ces derniers sont des tourbières à cause du climat nordique qui contrôle la productivité et la décomposition de la végétation (Cihlar et Tarnocai, 2000). En plus de représenter des composantes hydrologiques importantes à l'intérieur d'un bassin versant et un habitat faunique exceptionnel, les tourbières jouent un rôle important dans le cycle du carbone dû à la production et la séquestration de gaz à effets de serre, plus particulièrement le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4). Dans un contexte de réchauffement climatique, il est aujourd'hui difficile de savoir si ces écosystèmes agiront à titre de puit ou de source de carbone (Moore, Roulet et Waddington, 1998). Le cycle du carbone est influencé par la hauteur de la nappe phréatique, l'humidité du sol, la température et les caractéristiques de la végétation. La mesure et le suivi de ces paramètres peuvent parfois s'avérer coûteux et laborieux, étant donné l'accès difficile, voir même impossible à ces environnements souvent isolés et situés en région éloignée. La télédétection permet de palier ces limites reliées aux méthodes traditionnelles de terrain, en couvrant rapidement de vastes superficies à peu de frais. Contrairement aux images en visible, les images radar peuvent être acquises autant de jour que de nuit, indépendamment des conditions météorologiques. La fréquence d'acquisition du radar est aussi plus élevée que celle des capteurs optiques, ce qui a comme avantage de permettre un meilleur suivi du territoire. De plus, le radar est particulièrement sensible à l'humidité du sol, à la texture et à la structure de la végétation (Henderson et Lewis, 1998), ce qui présente un intérêt pour l'obtention d'informations nécessaires à l'étude de l'hydrologie et du cycle du carbone dans les tourbières (Mullins, Leconte et Protz, 1991; Roulet *et al.*, 1994; Brisco et Pultz, 1998 ; Takeuchi, Tamura et Yasuoka, 2001 ; Weimin et Chen, 2005).

Le suivi de l'hydrologie des milieux humides avec le radar n'a pas fait l'objet d'un grand nombre d'études. La plupart consistaient en un suivi des patrons d'inondation dans les milieux humides (Augusteijn et Warrender, 1998; Milne, Horn et Finlayson, 2000; Kandus *et al.*, 2002; Townsend, 2002 ; Töyrä *et al.*, 2002) et très peu ont concerné le suivi de l'humidité de surface ou encore la hauteur de la nappe phréatique (Murphy, Martini et Protz, 2000 ; Kasischke *et al.*, 2003). Contrairement à la majorité des études ayant porté sur le suivi de l'humidité du sol en région agricole, celles sur les milieux

humides ne présentaient pas de mesures de terrain afin de valider les observations faites avec les images radar (Murphy, Martini et Protz, 2000). Pour ce qui est de la cartographie des milieux humides, des résultats satisfaisants ont été obtenus en utilisant des images multi-temporelles ERS-1 (Wang *et al.,* 1998 ; Parmuchi *et al.*, 2002), des textures générées à partir d'une image RADARSDAT-1 acquises en mode Fin (Arzandeh et Wang, 2002) ou de textures obtenues à partir d'images RADARSAT-1 multi-temporelles acquises en mode Standard (S1 and S7) (Ghedira, 2002 ; Bernier *et al.*, 2003).

En 2002, débutait un projet de recherche pluridisciplinaire, intitulé « La dynamique du carbone dans les tourbières boréales », regroupant chercheurs et étudiants de plusieurs universités. Cette étude financée par le CRSNG et Hydro-Québec concernait plus particulièrement les tourbières situées dans le bassin versant de la rivière La Grande à la Baie James. L'étude comportait plusieurs volets abordés par les équipes de recherche, avec comme finalité leur intégration pour une compréhension globale des processus. Ainsi, plusieurs campagnes de terrain ont eu lieu dans le but d'étudier l'hydrologie des tourbières (INRS-ETE), les flux de carbones reliés aux différents biotopes (McGill), la dynamique de formation des mares (McGill), l'accumulation récente et à long terme de la tourbe (Université de Montréal et UQÀM), la caractérisation de la végétation (UQÀM), de la topographie du bassin (UQÀM) ainsi que des dépôts meubles sous-jacents (UQÀM). Un important travail de cartographie a aussi été réalisé: caractérisation des unités morphologiques de surface et des types de tourbières à l'aide de photographies aériennes pour le secteur de LG-1, LG-2 et LG-3 (Collins, 2005), classification des tourbières basée sur les patrons morphologiques de surface à l'aide d'images RADARSAT-1 et Landsat pour le secteur LG-2 (Demers, 2005) et finalement, classification des tourbières du bassin versant de la rivière La Grande, basée sur les espèces dominantes, à l'aide d'images satellites acquises dans le visible et l'infrarouge (Landsat). En dernier lieu, une modélisation du carbone pour la région de la rivière La Grande allait être réalisée à l'aide du modèle PCARS (Peatland Carbon Simulator).

Pour la classification des tourbières, Demers (2005) a utilisé des images du capteur RADARSAT-1 acquises en mode Standard, ayant une résolution d'environ 25 m. Ces images présentaient un potentiel pour la discrimination des tourbières boisées et ouvertes, de l'eau et des substrats minéraux. Par la suite, des images ont été acquises en mode Fin, ayant une résolution plus grande, d'environ 9 m. Il fallait donc vérifier si

ces images permettaient de mieux discriminer les tourbières que les images acquises en mode Standard. De plus, comme une étude de l'hydrologie des tourbières allait être réalisée simultanément avec l'acquisition des images, nous voulions vérifier si ces dernières permettaient de détecter les changements des conditions hydrologiques de ces milieux. Cela pourrait en effet grandement faciliter leur suivi en remplacement ou en complément des données de terrain.

1.1. Objectifs de la recherche

Dans le cadre de ce projet de recherche sur le cycle du carbone des tourbières boréales, nous avons voulu répondre à trois objectifs spécifiques, soit :

1) Déterminer si les images en mode Fin sont sensibles aux conditions hydrologiques des tourbières à l'étude. Le cycle du carbone étant grandement influencé par la hauteur de la nappe phréatique et l'humidité du sol, le suivi de ce paramètre est donc essentiel.

2) Vérifier si la plus grande résolution des images en mode Fin permet une meilleure classification du territoire que les images en mode Standard, en comparant avec les résultats de Demers (2005).

3) Mieux comprendre le régime hydrologique des tourbières à l'étude à l'aide des mesures qui allaient être récoltées sur le terrain. Une meilleure connaissance de ce paramètre est essentielle à la compréhension de la dynamique du cycle du carbone dans ces tourbières et à leur caractérisation.

1.2. Présentation du mémoire

Le mémoire débute par une présentation de la théorie concernant les tourbières et leurs caractéristiques, le cycle du carbone et la télédétection radar (chapitre 2). Les hypothèses de recherche seront aussi présentées. Dans le chapitre 3, nous discutons des sites à l'étude ainsi que des méthodes suivies pour la cueillette des données sur le terrain, l'analyse statistique de ces données, le traitement et l'analyse des images. Finalement, les résultats sont présentés et discutés (chapitre 4).

CHAPITRE 2 Les tourbières et la télédétection

2.1. Introduction

Ce chapitre se divise en deux parties. La première présente les milieux humides ainsi que les tourbières et leurs caractéristiques. Le cycle du carbone dans ces milieux sera aussi abordé. La deuxième partie consiste en une description générale du fonctionnement des mécanismes physiques qui interviennent lors de la formation d'une image radar et de son potentiel pour le suivi de l'humidité et la cartographie des tourbières, sur la base d'une revue de littérature.

2.2. Les tourbières

Un milieu humide se définit comme un site saturé d'eau ou inondé pendant une période suffisamment longue pour influencer, dans la mesure où elles sont présentes, les composantes sol et végétation. Les sols se développant dans ces conditions sont hydromorphes (minéraux ou organiques mal drainés), alors que la végétation se compose essentiellement d'espèces hydrophiles (tolérantes à de longues périodes d'inondations) ou du moins, tolérant des inondations périodiques (NWWG, 1998; UQCN, 2005). Ce sont donc des écosystèmes de transition entre les milieux terrestres et aquatiques. La province du Québec serait une des mieux pourvues en milieux humides au Canada (environ 9 % du territoire). Nous retrouvons les milieux humides plus particulièrement dans les zones au relief peu accidenté, soit au Lac St-Jean, en Abitibi, le long du St-Laurent, dans les basses terres du St-Laurent et à la Baie James (UQCN, 2005).

Les tourbières constituent un type de milieu humide. Elles se distinguent des autres milieux humides de par l'importante accumulation de matière organique, sur une profondeur d'au moins 40 cm (NWWG, 1998). 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 » (Payette et Rochefort, 2001). La Figure 2-1 illustre la localisation des grandes tourbières dans la province du Québec. Nous observons qu'elles se concentrent dans le secteur de la Baie James.

La formation des tourbières boréales aurait débuté après 7 000 ans BP, suite à la déglaciation et de la régression de la mer de Tyrrell (Vincent, 1977 ; Landry et Mercier, 1992). Les tourbières se divisent en deux catégories, soit les tourbières minérotrophes et ombrotrophes, en se basant sur des caractéristiques morphologiques, hydrologiques, chimiques et des espèces végétales indicatrices (Wright, Coffin et Aaseng, 1992).

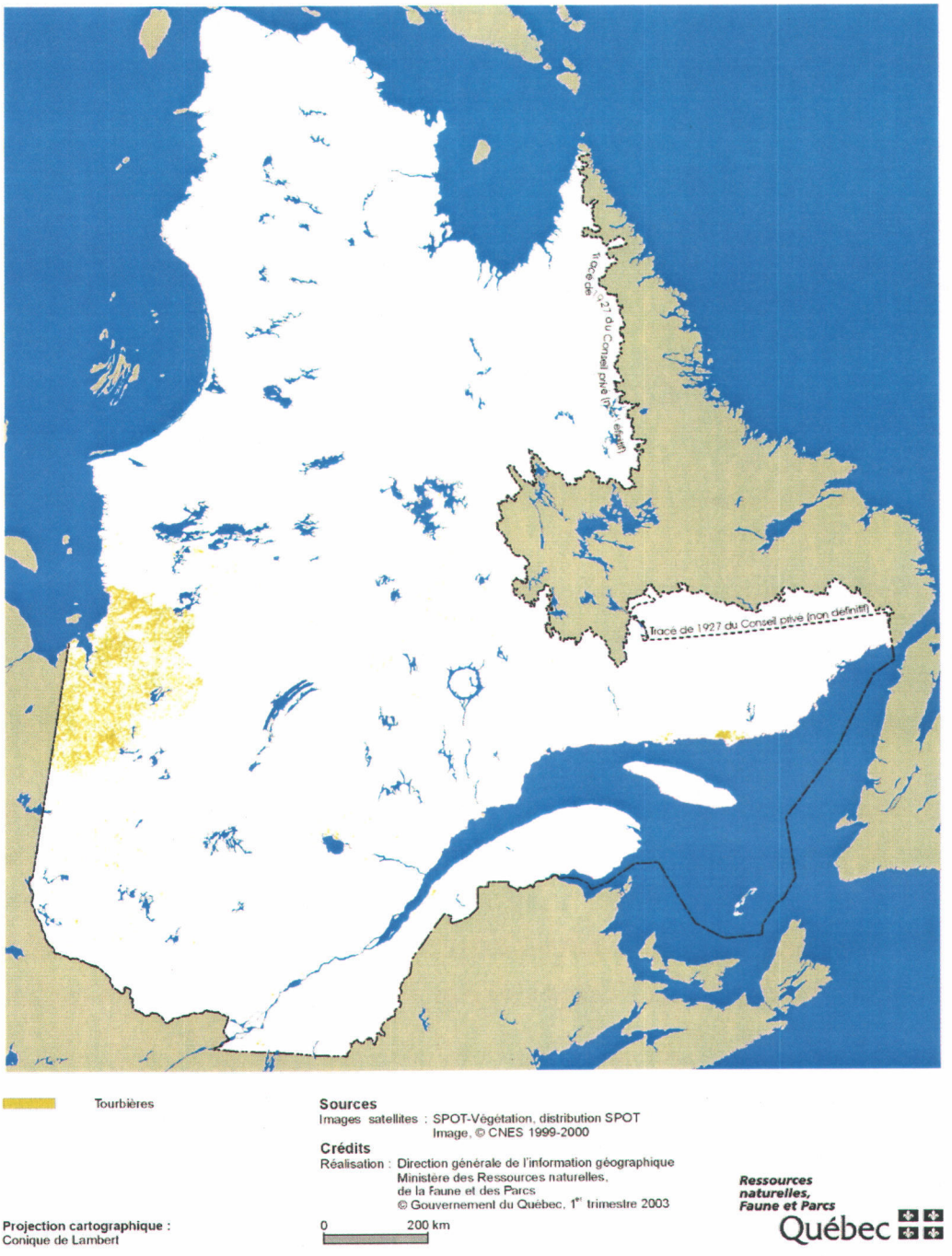


Figure 2-1: Répartition des grandes tourbières au Québec (source : MRNFP, 2004)

La première catégorie désigne les tourbières « recevant une quantité variable d'eau, à la fois des précipitations et des eaux de drainage du bassin chargées en éléments minéraux qui enrichissent le sol humide » (Payette et Rochefort, 2001). Même en période de sécheresse, le niveau de l'eau se situe généralement près de la surface et fluctue peu. « La tourbière minérotophe renferme une végétation diversifiée, généralement dominée par un couvert d'herbacées, notamment de cypéracées, ainsi que de bryophytes (en particulier les mousses brunes de la famille des Amblytegiaceae), d'arbustes et d'arbres » (Payette et Rochefort, 2001). Elles sont aussi appelées « fen ». Les tourbières ombrotrophes ne sont alimentées en eau que par les précipitations atmosphériques, desquelles provient également la seule source extérieure en éléments nutritifs. De ce fait, nous y retrouvons des espèces végétales différentes et moins variées, en comparaison avec les tourbières minérotrophes. Le milieu est généralement plus acide à cause de la prédominance de la sphaigne qui acidifie le milieu. La nappe phréatique souvent perchée et déconnectée du réseau d'eau souterraine en raison de l'accumulation de tourbe s'abaisse généralement de manière importante pendant l'été, puisque les pertes dues à l'évapotranspiration sont plus importantes que les apports des précipitations. Ces tourbières sont aussi désignées comme des « bog ». Il existe aussi des tourbières intermédiaires, ayant une végétation et des propriétés physiques et chimiques se situant entre celles des tourbières minérotrophes et ombrotrophes. La transformation d'une tourbière minérotrophe en tourbière ombrotrophe constitue une étape normale mais non obligatoire de son évolution. Il n'est pas encore déterminé si cette transition est déclenchée par des changements climatiques entraînant des conditions plus humides et plus fraîches ou par une succession écologique naturelle qui favorise une croissance continue de la tourbe par suite de l'empilement des matériaux détritiques tourbeux (Payette et Rocherfort, 2001).

Les tourbières jouent un rôle primordial dans le cycle hydrologique, en plus de constituer des habitats fauniques riches. Tout comme les forêts, elles jouent un rôle important dans le cycle biogéochimique du carbone à une échelle planétaire. Elles fixent du carbone sous forme de dioxyde de carbone (CO_2) par la photosynthèse et en relâchent sous forme de CO_2 de par la respiration et la décomposition aérobie de la végétation (acrotelme) et sous forme de méthane (CH_4) de par la décomposition anaérobie (catotelme) de la végétation (Figure 2-2). Du carbone organique dissous, provenant du lessivage de la végétation en décomposition, est transporté dans l'eau. Les tourbières

naturelles constituent actuellement des puits de CO_2 puisque le rythme de décomposition de la tourbe est plus lent que la production de cette dernière. C'est pourquoi nous y retrouvons une couche importante de tourbe s'étant accumulée depuis des siècles. La présence limitée de l'oxygène dans les sols saturés et la température froide de ces latitudes sont deux facteurs qui limitent cette décomposition. Les tourbières auraient stocké l'équivalent de 100 ans de combustion fossile actuelle (Moore, Roulet et Waddington, 1998). À l'opposé, les conditions anaérobies favorisent la production de CH_4, dont la concentration atmosphérique aurait augmenté avec le développement des tourbières. En plus d'être influencé par la température et la présence d'oxygène pour la décomposition de la végétation, le cycle du carbone dans les tourbières dépend aussi de la structure de la végétation, de l'ensoleillement (photosynthèse), du contenu en eau du sol et de la hauteur de la nappe phréatique. Un réchauffement de la planète entraînerait une perturbation de l'hydrologie de ces milieux, par une évapotranspiration accrue ou des changements des patrons de précipitations, ainsi qu'une variation des températures, des communautés végétales, de l'arrivée de la fonte de neige ou de la première neige à l'hiver. À titre d'exemple, une diminution de la nappe phréatique de ces milieux aurait comme impact d'augmenter le contact de la tourbe avec l'air, donc de favoriser la décomposition aérobie, relâchant du CO_2 dans l'atmosphère et limitant les flux de CH_4. Dans le même sens, une augmentation de la nappe phréatique pourrait maintenir une quantité plus importante de tourbe en anaérobie, ayant pour conséquence la décomposition de tourbe provoquant l'émission de CH_4 dans l'atmosphère. Il est toutefois impossible de prévoir si les tourbières agiront à titre de puit ou de source de carbone (Moore, Roulet et Waddington, 1998). Plusieurs études et suivis à long terme sont nécessaires au raffinement des modèles de prédiction de l'impact des changements climatiques sur le cycle du carbone des tourbières (McLaghlin, 2004). C'est en quoi la télédétection radar peut jouer un rôle important.

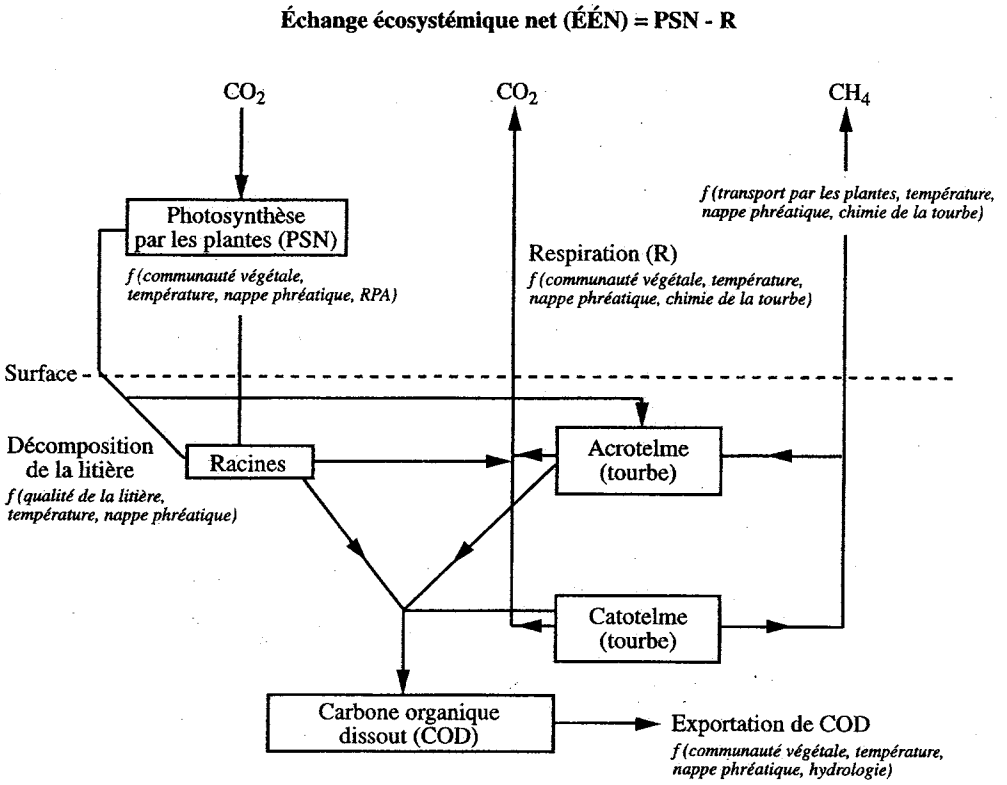


Figure 2-2: Les composantes majeures du cycle du carbone dans les tourbières (Payette et Rochefort, 2001)

2.3. La télédétection radar des milieux humides

2.3.1. Le radar

Le radar concerne une partie du spectre électromagnétique (Figure 2-3). La plus haute fréquence est le rayon gamma. Ensuite vient le rayon-x, puis l'ultraviolet. Après ce dernier vient le visible, suivi de l'infrarouge. La fréquence la plus basse est la radio, à l'intérieur de laquelle se situe le radar (longueur d'onde de 1m à 1 mm ou fréquence de 0,3 GHz à 300 GHz).

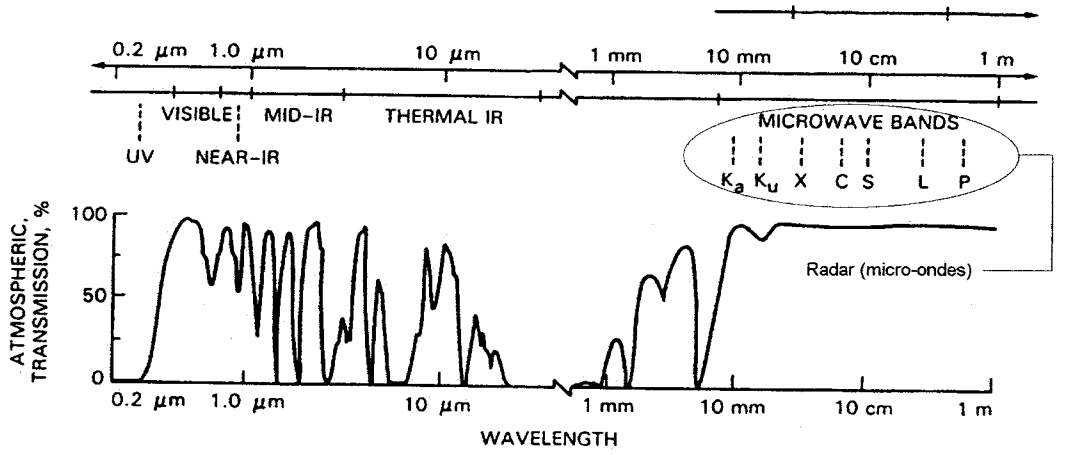


Figure 2-3: Le spectre électromagnétique (source: Henderson et Lewis, 1998)

Comparativement au visible, les ondes radar ont comme avantage d'être indépendantes des conditions météorologiques et d'illumination. Elles apportent aussi une information complémentaire, voir plus appropriée pour certaines applications, couvrant une partie du spectre différente du visible.

Le satellite radar (micro-ondes actives) transmet un signal électromagnétique, ce dernier interagit avec le terrain et une partie de l'énergie est retournée vers le capteur (phénomène de rétrodiffusion). Le capteur mesure le temps de retour et l'intensité du signal et compile ensuite cette information pour donner la valeur numérique (rétrodiffusion) de chaque pixel. Celle-ci dépend donc d'un ensemble de réactions liées à l'interaction du signal avec la surface terrestre correspondant au pixel. Les facteurs inhérents au système et à la cible qui influencent le retour du signal au capteur sont présentés au Tableau 2-1. Nous présentons ci-dessous quelques uns de ces paramètres afin de mieux comprendre comment les images radar disponibles pour cette étude interféreront avec les tourbières. Les images radar sont également caractérisées par la présence de chatoiement, ce dernier étant attribuable au fait que les irrégularités de la scène visée sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du capteur (Bonn et Rochon, 2000).

Les satellites fournissant actuellement des images radar sont ERS-2 (Europe), RADARSAT-1 (Canada) et ENVISAT (Europe). Ces derniers peuvent fournir des images

pour un même secteur à l'intérieur d'un cours laps de temps. Il existe aussi plusieurs capteurs aéroportés permettant l'acquisition d'images radar.

Tableau 2-1: Facteurs influençant la quantité d'énergie retournée vers le capteur (Ulaby *et al.*, 1982 et RADARSAT International, 2005)

Facteurs inhérents au capteur	Facteurs inhérents à la surface observée
La longueur d'onde ou la fréquence	La rugosité
La polarisation	L'humidité (propriétés diélectriques)
L'angle d'incidence	L'épaisseur ou le volume de la couverture (ex.: végétation)
La direction de la visée	La pente ou l'orientation du relief
L'angle d'orientation du satellite	
La résolution	

2.3.2. La fréquence et les bandes radar

Plusieurs longueurs d'onde sont utilisées en télédétection radar et sont représentées par des lettres (Tableau 2-2). La longueur d'onde (λ) peut aussi être traduite en fréquence (ν). La plupart des capteurs opèrent avec une seule bande (ex. ERS-1, RADARSAT-1) mais certains peuvent acquérir des images utilisant plusieurs bandes simultanément (ex. SIR-C/X-SAR). Une information différente sera obtenue selon la longueur d'onde utilisée. En effet, plus la longueur d'onde est grande (ex. bande L), plus elle aura la capacité de pénétrer la canopée ou le sol. Dans le même sens, une longueur d'onde courte (ex. bande X) sera plus sensible à la structure de la végétation et à la rugosité du sol. Il est important de noter que la pénétration dans le sol est fonction de la constante diélectrique, associée à la teneur en eau. Plus l'humidité du sol est élevée, plus la pénétration de l'onde sera limitée (Figure 2-4).

Tableau 2-2: Codes, fréquences et longueurs d'onde utilisés en télédétection radar ainsi que leur profondeur approximative de pénétration du sol (source: Bonn et Rochon, 2000; Henderson et 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 (J)	12,5-18	1,67-2,4	1
Ku (J)	18-27	1,1-1,67	1
Ka (Q)	27-40	0,75-1,1	1

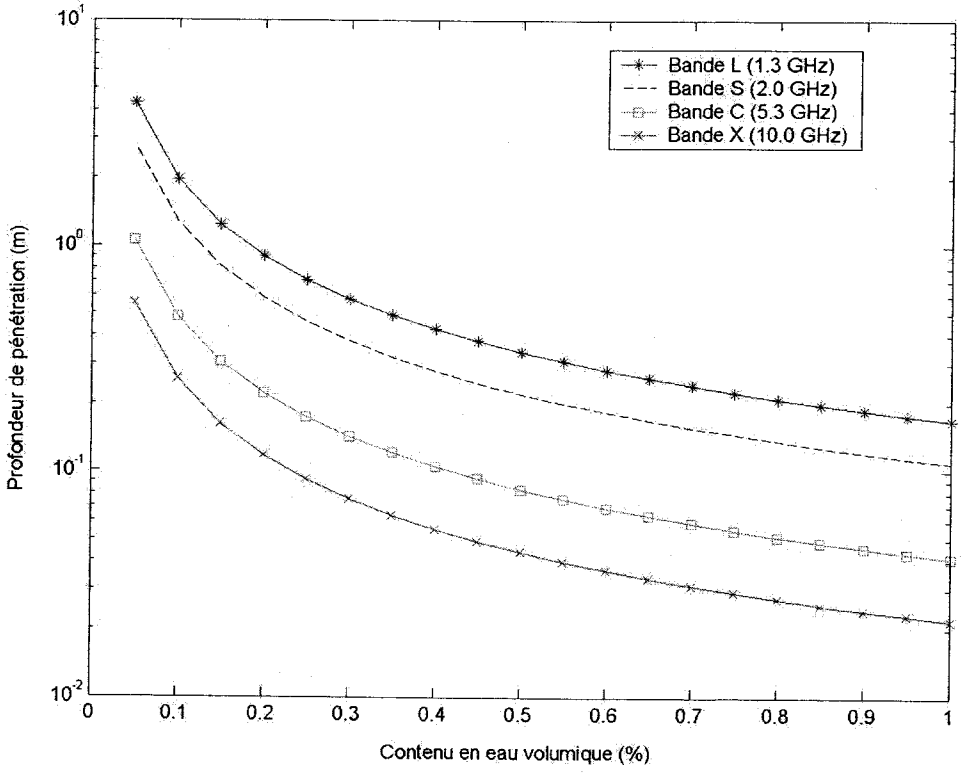


Figure 2-4: Pénétration de différentes longueurs d'onde dans le sol selon son contenu en eau volumique (adapté de Ulaby *et al.*, 1982)

2.3.3. La polarisation

Une onde électromagnétique est formée de trois vecteurs qui sont perpendiculaires entre eux : la direction de la propagation de l'onde, le champ magnétique et le champ électrique (Figure 2-5). La polarisation réfère à une caractéristique de l'onde électromagnétique, soit la manière dont la direction de vibration (le champ électrique) varie au cours de la propagation de l'onde (Bonn et Rochon, 2000). La polarisation peut être verticale (V) ou horizontale (H), selon que le champ électrique est parallèle à l'axe vertical (X) ou horizontal (Y). Comme les micro-ondes actives sont transmises et reçues, on parle alors d'une polarisation HH (transmission horizontale, réception horizontale) et VV (transmission verticale, réception verticale). Ces deux types de polarisation sont dits parallèles. Il existe aussi des ondes ayant une polarisation croisée, soit HV ou VH. La polarisation est un phénomène particulièrement important en télédétection radar puisqu'il permet d'obtenir diverses informations sur la nature de la surface observée. La polarisation VV par exemple présente un signal plus fort pour les cibles ayant une composante verticale, tel un champ de blé. Il est aussi à noter qu'une polarisation parallèle présente habituellement un retour de signal plus fort au capteur qu'une polarisation croisée.

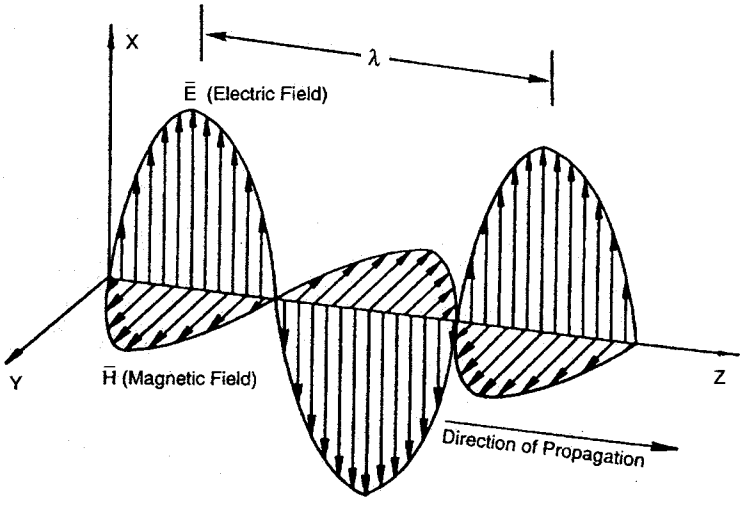


Figure 2-5: Composition d'une onde électromagnétique (Henderson et Lewis, 1998)

2.3.4. L'angle d'incidence

L'angle d'incidence fait référence à l'angle que fait un rayonnement incident avec la normale d'une surface déterminée (Bonn et Rochon, 2000). Plus l'angle d'incidence s'approche de la verticale (petit), plus il sera sensible à l'humidité du sol alors que plus il s'éloigne de la verticale (grand), plus il sera sensible à la structure de la végétation, à la rugosité du sol ainsi qu'à l'effet du relief (Ulaby *et al.*, 1982). De manière générale, une augmentation de l'angle d'incidence entraînera une diminution du signal radar. La Figure 2-6 illustre un petit angle d'incidence (A) et un grand angle d'incidence (B). Une attention toute particulière doit donc être de mise lors du choix du capteur ou du mode d'acquisition et lors de l'interprétation des résultats.

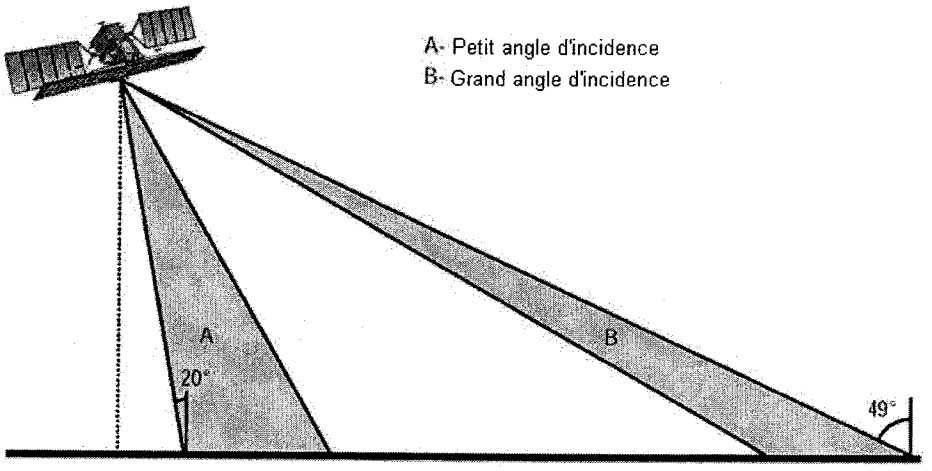


Figure 2-6 : Les angles d'incidence (adapté de RADARSAT International, 2005)

2.3.5. La résolution

Ce paramètre a une grande importance en télédétection. En effet, une résolution fine (ex. 1 m, 10 m, 15 m) permet d'obtenir une information différentes du territoire qu'une image ayant une résolution plus grossière (ex. 100 m, 1 km). À titre d'exemple, la cartographie d'une zone urbaine se fait à l'aide d'images ayant une résolution fine et couvrant un petit territoire alors que le suivi des courants marins s'effectue à l'aide d'images ayant une résolution plus grossière mais couvrant une plus grande superficie. Les images ayant une résolution fine permettent une meilleure discrimination des petites cibles. Cependant, le capteur effectue un petit nombre de visées du secteur d'intérêt et cela fait en sorte que ces images contiennent d'avantage de chatoiement que celle ayant

une résolution moins bonne, ayant été formée par la moyenne de plusieurs balayages. Le nombre de visée effectuée par le capteur pour les différents modes d'acquisition de RADARSAT-1 est indiqué dans le Tableau 2-3. Il peut être observé que les images en mode Fin (~9 m de résolution) sont formées à partir d'une seule visée, contrairement aux images en mode Scan Sar Wide (~100 m de résolution) produites à partir de 4 à 8 visées.

Tableau 2-3: Paramètres des différents modes d'acquisition de RADARSAT-1 (adapté de RADARSAT International, 2005)

Mode d'acquisition	Position	Plage de l'angle d'incidence (°)	Résolution: largeur x azimuth au sol (m)	Largeur de la fauchée (km)	Nombre de visée
Standard	S1	24-31	24 x 27	100	4
	S2	30-37	20 x 27		
	S3	34-40	25 x 27		
	S4	36-42	23 x 27		
	S5	41-46	22 x 27		
	S6	45-49	20 x 27		
	S7	39-42	19 x 27		
Fine	F1	37-41	8,3 x 8,4	50	1
	F2	39-42	7,9 x 8,4		
	F3	41-44	7,6 x 8,4		
	F4	43-46	7,3 x 8,4		
	F5	45-47	7,1 x 8,4		
Wide	W1	20-31	33 x 27	150	4
	W2	31-39	25 x 27		
	W3	39-45	21 x 27		
Extended Low	EL1	10-23	39 x 27	170	4
Extended High	EH1	49-52	18 x 27	75	4
	EH2	50-53	18 x 27		
	EH3	52-55	17 x 27		
	EH4	54-57	17 x 27		
	EH5	56-58	16 x 27		
	EH6	57-60	16 x 27		
ScanSAR Narrow	SNA	20-39	50 x 50	300	2 à 4
		20-39	50 x 50		
	SNB	31-46	50 x 50		
ScanSAR Wide	SWA	20-49	100 x 100	500	4 à 8
		20-49	100 x 100	500	
	SWB	20-46	100 x 100	450	

2.3.6. La rugosité de surface

La quantité d'énergie qui est retournée au capteur est fortement influencée par la rugosité de la surface. Ainsi, une surface lisse tel un lac calme engendra une réflexion spéculaire du signal incident (Figure 2-7a). La quantité d'énergie retournée au capteur sera minime, voir nulle, et le plan d'eau apparaîtra sous la forme d'une zone sombre sur l'image. Le signal réfléchi peut aussi faire un double bond et retourner en direction du capteur, ce qui entraînera un signal plus important (Figure 2-7b). Une surface rugueuse provoquera une dispersion aléatoire du signal (Figure 2-7c). La surface présentera une couleur plus claire sur l'image qu'un plan d'eau calme. Finalement, une onde peut être diffusée, comme lorsqu'elle atteint un arbre et se disperse entre les branches et le feuillage. Il s'agit de la dispersion volumique (Figure 2-7d). Une partie du signal retournera au capteur, donnant à la surface une couleur plus claire qu'un plan d'eau calme. Il est aussi à noter que la rugosité relative d'une surface par rapport à une onde radar dépend de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde (Bonn et Rochon, 2000).

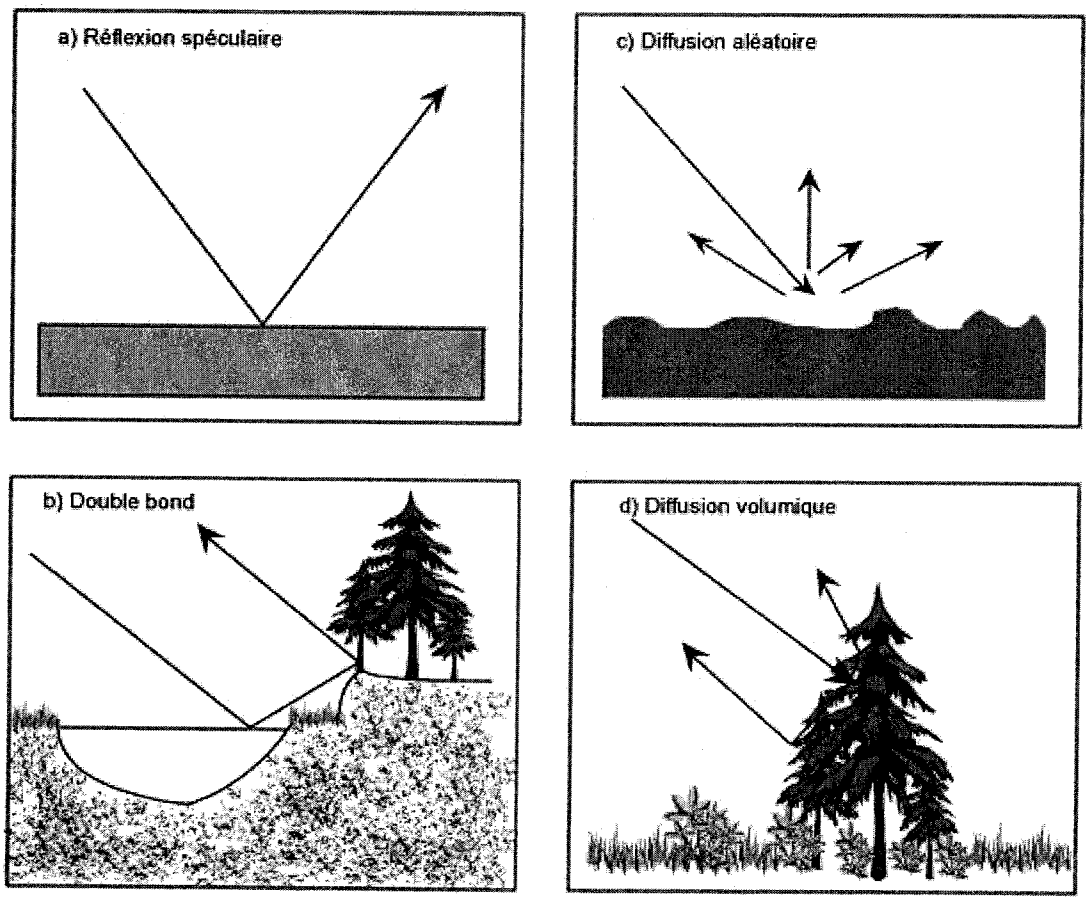


Figure 2-7: Les mécanismes de dispersion d'une onde radar (adapté de plusieurs sources)

2.3.7. Le capteur RADARSAT-1

Ce capteur canadien a été lancé en 1995. C'est un Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO, dit SAR en anglais : Synthetic Aperture Radar). Cette technologie permet d'avoir une résolution dans la direction du vol (azimut) suffisamment fine pour la plupart des applications de télédétection. RADARSAT-1 offre l'acquisition d'images dans différents modes, permettant de privilégier certains paramètres (angle d'incidence, résolution, largeur de fauchée, etc.). La Figure 2-8 permet de visualiser ces différents modes d'acquisition, tandis que le Tableau 2-3 contient toutes les informations reliées à ces modes d'acquisition. Le capteur permet d'acquérir des images ayant un angle d'incidence de 10° à 60° et une gamme de résolutions allant de ~9 m à 100 m. RADARSAT-1 possède cependant une seule bande (C : 5,3 GHz) et une seule polarisation (HH). Le satellite RADARSAT-2 qui sera lancé prochainement permettra l'acquisition d'images avec les polarisations HH, VV, VH ou HV.

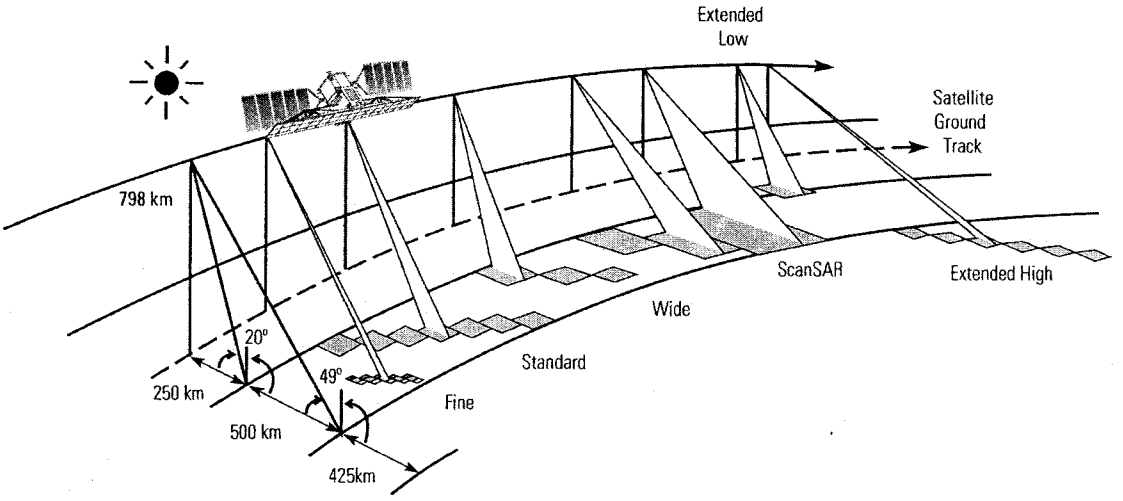


Figure 2-8: Les différents modes d'acquisition du capteur RADARSAT-1 (RADARSAT International, 2005)

2.4. Le potentiel des images radar pour la télédétection des milieux humides

Au cours de la dernière décennie, nous avons vu un intérêt sans cesse croissant pour la télédétection comme un outil d'étude des milieux humides (Ozesmi and Bauer, 2002). Les utilisations de la télédétection se sont surtout concentrées sur la cartographie de ces

milieux ainsi que sur le suivi de leur hydrologie. Cette section présente le potentiel des images radar et plus particulièrement du mode Fin pour le suivi de l'hydrologie et la cartographie de tourbières boréales, en s'appuyant sur la théorie précédemment vue et sur une revue de littérature.

2.4.1. Le suivi des changements hydrologiques

La rétrodiffusion des micro-ondes est influencée par la constante diélectrique du sol, qui fait référence à la réponse d'un corps placé dans un champ électrique. La constante diélectrique de l'eau s'élève à 80, alors qu'elle n'est que de 3 à 5 pour un sol sec (Henderson *et al.*, 1998). Ainsi, la rétrodiffusion du sol augmente avec son contenu en eau. Un sol humide apparaîtra donc plus clair qu'un sol sec. La relation entre le signal radar et l'humidité du sol n'est cependant pas directe, puisque le couvert végétal et la rugosité du sol interfèrent aussi avec l'onde. Certains paramètres peuvent maximiser la mesure de l'humidité du sol. En effet, les grandes longueurs d'onde (ex. bande L) permettent de pénétrer le couvert végétal et le sol plus profondément que les petites longueurs d'onde (ex. bande X) (voir la section 2.3.3) et sont moins sensibles à la rugosité du sol. Une onde ayant une polarisation HH présente une meilleure pénétration de la végétation qu'une onde ayant une polarisation VV (voir la section 2.3.3). Les angles d'incidence plus petits sont moins sensibles à la végétation et à la rugosité du sol (voir la section 2.3.4) et plus sensibles à l'humidité.

Plusieurs études ont porté sur la quantification de l'humidité du sol à partir d'images radar. Ces études visaient, à titre d'exemple, à détecter les problèmes de drainage dans les champs et le développement et la validation de modèles d'humidité des sols (Henderson *et al.*, 1998). La quantification de ce paramètre s'est effectuée via des modèles empiriques, tel la régression entre l'humidité du sol mesurée sur le terrain et la rétrodiffusion radar ou encore à l'aide de modèles semi empiriques et mécanistes (Pietroniro et Leconte, 2005). Les modèles empiriques sont ceux qui ont été le plus utilisés. Ils ont cependant comme désavantage de ne pas pouvoir être transposés d'un site d'étude à l'autre. Les modèles semi empiriques ou mécanistes peuvent être appliquées à une variété de surfaces mais il n'existe cependant pas d'algorithme permettant des simulations pour des capteurs ayant une seule bande ou encore une seule polarisation (Pietroniro et Leconte, 2005). En ce qui concerne plus spécifiquement les milieux humides et les tourbières, l'utilisation du radar pour leur suivi hydrologique

n'a fait l'objet que d'un nombre limité d'études. La plupart d'entre elles portaient sur le suivi des patrons d'inondation dans les milieux non tourbeux (Augusteijn et Warrender, 1998; Milne, Horn et Finlayson, 2000; Kandus *et al.*, 2002; Townsend, 2002 ; Töyrä *et al.*, 2002). Contrairement aux études ayant porté sur la détection et le suivi de l'humidité en milieu agricole à l'aide du radar, les recherches ayant les mêmes objectifs pour les milieux humides ne présentaient pas de mesures sur le terrain afin de comparer ces dernières au signal radar (Murphy, Martini et Protz, 2000).

Les images RADARSAT acquises en mode Fin ne seraient pas sensibles à l'humidité du sol et aux fluctuations de la nappe phréatique des tourbières puisque la longueur d'onde de RADARSAT-1 (5,7cm) ne pénétrerait pas la tourbe plus de 1 cm lorsque le contenu en eau volumique est élevé (>40%) (voir la section 02.3.3) et à cause de l'angle d'incidence important (>30°), qui est moins adéquat que des angles d'incidences plus petits pour la détection et le suivi de l'humidité du sol (voir la section 2.3.4). Cependant, Kasischke *et al.* (2003) ont étudié l'effet des patrons hydrologiques de milieux humides au sud de la Floride sur des images ERS-2 (bande C, polarisation VV, 30 m de résolution) et ont observé que le coefficient de rétrodiffusion était positivement corrélé à l'humidité du sol mesurée sur le terrain, en dépit d'un contenu en eau volumique élevé (minimum de 40%). Dans le même sens, Murphy *et al.* (2001) ont utilisé des images RADARSAT-1 multi-temporelles acquises en mode Standard (S1-S7) pour le suivi de milieux humides subarctiques. Ils ont conclu que les changements saisonniers de l'humidité du sol des sites à l'étude influençaient d'avantage le coefficient de rétrodiffusion radar que l'angle d'incidence utilisé. Ainsi, même si la théorie indique que le mode Fin ne serait pas sensible à l'humidité du sol dans ces milieux, des résultats expérimentaux utilisant le radar y apportent quelques nuances. Tout d'abord, les deux études mentionnées ont porté sur des milieux où le couvert végétal était bas ou encore peu dense, ce qui aurait facilité l'interaction du signal avec le sol, surtout dans l'étude de Murphy *et al.* (2001), utilisant entre autres des images radar acquises en mode S7 (39°-42°), ayant un angle d'incidence similaire à celui du mode F4 utilisé dans cette étude (43°-46°). De plus, la longueur d'onde du capteur ERS-2, utilisé dans l'étude de Kasischke *et al.* (2003), qui est la même que le capteur RADARSAT-1, n'a pas posé de problème quant à la détection de l'humidité du sol, malgré le contenu en eau volumique élevé de ce dernier.

Hypothèse #1

Nous croyons qu'en dépit de leurs limites théoriques, les images en mode Fin seraient sensibles aux changements hydrologiques (humidité de surface) des tourbières à l'étude, là où la végétation est basse et peu dense.

2.4.2. La cartographie des milieux humides

Le radar est sensible à la rugosité du sol et à la physionomie de la végétation. Ainsi, une cartographie de l'occupation du territoire basée sur les patrons morphologiques de surfaces est susceptible d'être réalisable avec les images radar. Les images en mode Fin présentent des angles d'incidence élevés, ce qui maximiserait la sensibilité du signal à la structure de la végétation et à la rugosité du sol. Plusieurs études ont démontré l'utilité du radar pour la cartographie des milieux humides. En effet, nous observons l'atteinte d'une précision totale de classification élevée, découlant d'une capacité du radar à discriminer les différentes occupations du territoire, incluant les différents types de milieux humides. Wang *et al.* (1998) ont obtenu une précision totale de la classification (maximum de vraisemblance) supérieure à 80% en utilisant une combinaison d'images filtrées du capteur ERS-1 acquises en mai, juin, août et octobre. Trois classes majeures avaient été définies dans l'étude: marais à quenouilles, marais à phragmites et marécage. Ghedira (2002) a effectué une classification du maximum de vraisemblance en utilisant quatre occupations du sol (milieu forestier, milieu humide arbustif, milieu humide moyennement arboré et milieu humide fortement arboré). Cette classification a donné une précision totale de 70% en utilisant trois textures moyennes générées à partir de trois images RADARSAT-1 acquises en mode S7 (4 février, 13 avril et 31 mai). L'auteur a d'ailleurs obtenu de meilleurs résultats de classification en utilisant un réseau de neurones (82% de précision totale) puisque ce dernier ne prend pas en compte la distribution des classes. Ghedira mentionnait que la distribution de ces classes n'était pas toujours normale, ce qui expliquerait les moins bons résultats de classification obtenus en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. Ensuite, Arzandeh et Wang (2002) ont obtenu une précision totale de 71% avec huit occupations du sol (marais à quenouilles, marais à phragmites, marécage, prairie, forêt, milieu urbain, agriculture et eau) et de 88% avec deux classes (milieux humides vs. non milieu humide) en utilisant la combinaison des textures moyenne, homogénéité, contraste et écart-type dérivées d'une seule image RADARSAT-1 acquise en mode F1 datant du 31

août. Bernier *et al.* (2003) observaient que l'utilisation d'une seule image de texture (moyenne) aidait à discriminer les tourbières naturelles de celles qui sont exploitées alors que trois images RADARSAT brutes (modes S1 et S7) permettaient seulement la distinction des tourbières des autres occupations du sol. La précision totale obtenue par les auteurs atteignait 84% en utilisant trois textures et 53% en ayant six images brutes avec la méthode du maximum de vraisemblance. En 1999, le Service Canadien de la faune région du Québec initiait un projet visant à produire un Atlas de conservation des milieux humides de la vallée du St-Laurent. Des images RADARSAT-1 (82% en mode Fin et 18% en mode Standard) avaient été acquises lors des crues printanières afin de délimiter les sols humides des sols secs (Environnement Canada, 2005). Ce travail a permis de démontrer la grande valeur de ces images lorsque utilisées en complément aux images Landsat-TM pour la cartographie des terres humides (Marineau, 2004). Suite à cela, un projet de plus grande envergure a été amorcé, soit la cartographie de l'ensemble des terres humides du Canada. Des images RADARSAT-1 acquises avec différents angles d'incidence, résolutions et dates ont été utilisées (Marineau, 2004). Dans le cadre de l'étude du cycle du carbone dans les tourbières boréales, la classification du maximum de vraisemblance réalisée par Demers (2005) a permis d'obtenir une précision totale atteignant 74% pour quatre classes (tourbière boisée, tourbière ouverte, eau et minéral) en utilisant quatre textures dérivées de trois images RADARSAT acquises en mode S1 et S7.

Hypothèse #2

La théorie relate le potentiel des propriétés physiques des images en mode Fin (longueur d'onde et angle d'incidence) pour la cartographie des types d'occupation du sol en milieu boréal. De plus, plusieurs études ont démontré le potentiel du radar pour la cartographie des milieux humides. Nous croyons qu'en plus de donner de bons résultats de classification, les images en mode Fin permettront d'obtenir une classification plus détaillée des unités morphologiques des tourbières boréales que celle réalisée par Demers (2005) puisque la résolution de ces images est supérieure à celles acquises en mode Standard (9 m vs. 25 m).

CHAPITRE 3 Matériel et méthodes

3.1. Introduction

Ce chapitre traitera des sites à l'étude, des méthodes suivies pour la prise de données sur le terrain et de leurs traitements, ainsi que de l'acquisition, la correction et l'analyse des images. Il est à noter que la cueillette de données sur le terrain ainsi que l'acquisition, le traitement et l'analyse des images n'ont pas été détaillés puisqu'une bonne description en a été faite dans l'article scientifique (deuxième partie du mémoire). Les méthodes utilisées pour les traitements statistiques des données de terrain sont, pour leur part, décrites de manière exhaustive puisque le sujet n'a été qu'effleuré dans l'article.

3.2. Sites à l'étude

Dans le cadre du projet d'étude du cycle du carbone dans les tourbières boréales, trois tourbières ont été choisies par l'équipe de recherche dans les secteurs de La Grande-1, La Grande-2 et La Grande-3 (53.6°N, 76.1°O; 53.9°N, 78.8°O et 53.7°N, 77.7°O respectivement). Plusieurs critères ont conduit à ces choix, dont la représentativité des tourbières des trois secteurs, l'accessibilité aux sites et la réponse aux besoins de recherche de l'équipe. Ces secteurs se trouvent dans le basin versant de la rivière La Grande (Figure 1 de l'article) dans la province de Québec. Cette région connaît des précipitations moyennes annuelles d'environ 650 mm et une température moyenne annuelle d'environ -3,5°C. Le type végétal dominant est la pessière à lichen. Le bassin versant de la rivière La Grande se situe dans le Bouclier canadien, plus particulièrement dans la province géologique du Lac Supérieur, composée de roches archéennes (environ 2,5 milliards d'années). Il s'agit de roches volcaniques, intrusives et sédimentaires fortement métamorphisée en gneiss et granite. Les dépôts de surfaces sont surtout d'origine marine (mer de Tyrrell) et glacio-lacustre. La fonte finale de l'inlandsis aurait eu lieu entre 7 000 BP et 6 500 BP. Lors du retrait de la calotte glaciaire, la mer de Tyrrell aurait graduellement envahi plusieurs dizaines de kilomètres à l'intérieur des terres, rejoignant une cote d'environ 315 m au dessus du niveau moyen actuel des mers. La transgression marine a suivi de près le retrait final des glaces. C'est

par la suite que les tourbières boréales auraient entamé leur développement (Payette et Rochefort, 2001).

La classification des trois tourbières à l'étude s'est basée sur diverses observations réalisées par l'équipe de recherche. La tourbière de La Grande-1 (LG-1) est définie comme minérotrophe riche (fen riche) et couvre une superficie de 20 ha. La végétation qu'on y trouve est composée de bryophytes brunes (e.x. D*repanocladus)*, d'espèces de cypéracées (e.g. *Carex* spp.) et de quelques mélèzes (*Larix laricina*). Quelques parties de cette tourbière sont couvertes de petites mares structurées. La tourbière de La Grande-2 (LG-2) a été identifiée comme étant une tourbière ombrotrophe (bog). Elle est bombée en son centre (dôme) et couvre une superficie d'environ 215 ha. La végétation qu'on y trouve se compose majoritairement de bryophytes (e.x. *Sphagnum angustifolium, S. rubellum* et *S. papillosum*), lichens, éricacées (e.g. *Ledum groenlandicum* et C*hamaedaphne calyculata)*, épinette noire (*Picea mariana*), mélèze et de quelques espèces de cypéracées (e.g. *Carex* spp.). La surface de cette tourbière est dominée par des mares larges, profondes et organisées de manière concentrique. La tourbière de La Grande-3 (LG-3) est identifiée comme intermédiaire (fen pauvre) et couvre une superficie de 90 ha. La végétation qu'on y retrouve s'apparente à celle de LG-2, excepté que l'épinette noire est plus dominante. Les mares sont de petite taille et peu profondes et sont pour la plus part comblées par la végétation. Les trois tourbières présentent un dépôt de tourbe sous-jacent allant de 1m à 4,5 m.

3.3. Méthodes

3.3.1. Campagnes de terrain

Deux campagnes de terrain d'un mois ont été réalisées en 2003, correspondant à la fonte de la neige au printemps, où la hauteur de la nappe phréatique des tourbières est généralement à son maximum, et à la fin de l'été où la nappe phréatique est à son plus bas en raison du drainage et des pertes attribuables à l'évapotranspiration (Payette et Rochefort, 2001). La hauteur de la nappe phréatique (HNP) par rapport à la surface a été prise sur une base hebdomadaire. Le contenu en eau volumique (CEV) de la tourbe a été mesuré simultanément avec les passages du satellite. Pour plus de détails concernant la manière dont ces mesures ont été prises, le lecteur peut se référer à la section « material and methods » de l'article.

3.3.2. Traitement des données de terrain

L'analyse statistique des données de terrain avait deux objectifs :

1. Savoir s'il existe une différence significative de la HNP mesurée lors des passages de RADARSAT-1. La même chose a été faite pour le CEV. Si une différence significative était observée, il devenait alors possible d'aller plus loin dans l'analyse du signal radar afin de déterminer s'il était sensible à ces changements de condition (objectif 1).
2. Analyser la dynamique de la HNP des trois tourbières à l'étude (objectif 3).

Il est important de noter qu'aucune analyse spatiale n'a été réalisée à partir des données recueillies sur le terrain et ce, pour les raisons suivantes : (1) Tout d'abord, celle-ci n'apporterait rien par rapport au premier objectif de cette étude, soit l'évaluation de la sensibilité du radar aux changements hydrologiques des tourbières à l'étude. En effet, la végétation influence aussi le signal radar. Or, la seule manière d'identifier l'effet d'un changement hydrologique sur les images radar est de faire une différence d'images acquises pour un même secteur à des dates différentes. Comme la végétation ne change pas à l'échelle d'une saison végétative, une différence dans le signal est interprétée comme étant liée au changement des conditions hydrologiques de la tourbière. (2) Une analyse spatiale aurait pu apporter une information facilitant l'atteinte du 3^{e} objectif de l'étude, soit la compréhension du régime hydrologique des trois tourbières à l'étude mais la méthode suivie pour la prise de données sur le terrain rendait cela impossible. Tout d'abord, la HNP a été mesurée par rapport à la surface (ex. : 10 cm sous la surface). Cela signifie que certaines mesures ont été prises sur une butte de végétation (*hummock*) et d'autres, dans des dépressions (*hollow*). Il devient alors évident que la HNP est plus profonde si elle est mesurée sur la butte que lorsqu'elle est prise dans une dépression. Pour cette raison, il est impossible de comparer les hauteurs de nappe phréatique entre elles afin d'y analyser une quelconque tendance spatiale. Seule une analyse temporelle pouvait en être tirée, comparant la variation d'une même mesure dans le temps. Ensuite, la valeur du CEV changeait drastiquement selon qu'elle était prise sur une butte (~15%) ou dans une dépression (~90%). Ainsi, neuf valeurs prises à l'intérieur d'une superficie de 81m^2 pour chaque point des transects pouvaient présenter une variabilité importante. Une analyse spatiale de ces données était donc impossible.

Le test T de Student apparié permet de tester l'égalité des moyennes de deux échantillons ayant été pris au même endroit à deux dates différentes (Hines, 1990). Pour l'utiliser, il faut s'assurer que chacun des échantillons soit distribué selon une loi normale. Le test de Wilcoxon est privilégié si cette condition n'est pas rencontrée. Les données ont été tracées sur papier normal afin de vérifier leur distribution. Les données sont représentées graphiquement le long d'une droite théorique d'une distribution normale. Si les points de l'échantillon suivent approximativement cette droite, nous pouvons conclure qu'ils se distribuent selon la loi normale. Un éloignement des points de cette droite démontre une distribution qui n'est pas normale.

3.3.3. Acquisition, traitement et analyses des images radar

Un total de sept images radar ont été acquises en 2002 et 2003 en mode F4 pour cette étude. Les dates d'acquisition se trouvent dans le Tableau 1 de l'article. Leurs angles d'incidence varient de 43° à 46°, leur résolution est d'environ 9 m et elles couvrent une superficie de 50 km x 50 km. Les images ont été corrigées radiométriquement par le Canadian Data Processing Facility (CDPF) et géométriquement en utilisant la méthode du modèle pour RADARSAT et la méthode polynomiale. Le lecteur pourra se référer à la section « Radiometric and geometric corrections » de l'article pour plus de détails.

Ensuite, une analyse du coefficient de rétrodiffusion a été réalisée, selon que les analyses statistiques nous révélaient qu'il y avait un changement significatif de la HNP ou du CEV d'un passage du satellite à l'autre pour une même tourbière. L'utilisation d'une méthode de comparaison d'images, soit le ratio, allait nous permettre de vérifier si ces changements influencent le signal radar (objectif 1). Cette méthode donne de l'information sur la magnitude des changements du signal, en divisant les valeurs d'intensité, pixel par pixel (Rignot et van Zyl, 1993). Il a été démontré que cette méthode de comparaison d'images présente des limites lorsqu'elle est employée sur des images ayant une quantité importante de chatoiement (voir la section « Radar backscatter coefficient analysis » dans l'article). Il aurait fallu compléter cette analyse avec une seconde méthode de comparaison d'images, soit la décorrélation du chatoiement, permettant de déterminer si le changement du signal est du à la modification de la structure ou des propriétés diélectriques de la surface observée, ou encore à la variabilité du chatoiement (le lecteur pourra se référer à l'article de Rignot et van Zyl (1993) pour plus de détails). Cependant, cette méthode n'était pas disponible avec PCI. Ainsi, les résultats observés en utilisant la méthode du ratio seule doivent donc être

analysés de manière qualitative et non quantitative. À titre comparatif, un test de Student apparié est réalisé sur les pixels couvrant les tourbières sur les images radar, afin de voir si le signal d'une date à l'autre est significativement différent. Il est important de mentionner qu'une corrélation entre la HNP ou le CEV avec le signal radar aurait inclus l'effet de la végétation sur le signal radar. De plus, comme les mesures sont très variables à l'intérieur d'une petite superficie, il est difficile de faire quelconque comparaison entre les données de terrain et le signal radar. Finalement, la répartition spatiale des mesures n'était pas adéquate pour une comparaison avec la rétrodiffusion radar. En effet, le radar contient beaucoup de chatoiement, donc une comparaison de la valeur d'un seul pixel avec les données de terrain correspondantes n'était pas valable statistiquement. Pour ce faire, il aurait fallu faire la moyenne de la valeur de plusieurs pixels et ainsi couvrir une superficie largement supérieure à celle couverte par seulement quelques points d'échantillonnage.

Dans le but de répondre à l'objectif 2 de la thèse, soit de comparer le potentiel des images acquises en mode Fin avec celui des images en mode Standard pour la classification des tourbières, la méthode de Demers (2005) a été reprise et adaptée à notre étude. Il est à noter que la classification a été réalisée dans les deux cas pour le secteur de LG-2. Demers avait défini un ensemble de classes basé sur des patrons morphologiques de surface (Figure 3 de l'article). Une quinzaine de classes avaient été utilisées lors de la classification ainsi qu'un regroupement de ces 15 classes en 10, puis en 4. Dans notre étude, une classification a été réalisée utilisant 10 et 4 classes (Tableau 2 de l'article). Une brève description des dix classes se trouve à la Figure 4 de l'article. Les lecteurs qui seront intéressés à plus de détails concernant la définition des classes et à leurs espèces dominantes peuvent se référer à l'étude de Demers (2005). Le nombre de pixels composant les sites d'apprentissage et de test se trouvent dans le Tableau 3 de l'article. La Figure 2 de l'article décrit les différentes étapes suivies pour la classification. Une classification du Maximum de vraisemblance (CMV) a été réalisée à partir des images filtrées et de textures dérivées des images brutes. Le lecteur peut se référer aux sections « Speckle noise reduction » et « Texture analysis » de l'article pour des détails concernant le choix du filtre et la grandeur de la fenêtre d'auscultation utilisée ainsi que les différentes textures générées. Une analyse de séparabilité des classes a été réalisée dans le but de voir s'il était possible d'éliminer une ou deux images brutes afin de réduire le nombre de paramètres d'entrée pour la classification. Si aucune image

brute ne pouvait être éliminée, le nombre de textures (18) était réduit à 12 (maximum possible pour l'outil Channel Selection de PCI) en retenant les moins corrélées. L'outil Channel Selection a permis, à partir de ces 12 textures restantes, de conserver les meilleures combinaisons de 2, 3 ou 4 textures. L'évaluation de la réussite des classifications s'est effectuée à l'aide des matrices de confusion et de la précision totale. Le choix de ces deux méthodes est justifié dans l'article à la section « Accuracy assessment of the classification results ».

CHAPITRE 4 Résultats et discussion

4.1. Introduction

Les résultats issus de l'analyse des images (analyse du coefficient de rétrodiffusion et classification) seront peu détaillés dans cette section puisqu'ils ont déjà été approfondis dans l'article. En revanche, les résultats des analyses statistiques des données de terrain sont présentés de manière exhaustive puisque cela n'a pas été fait dans l'article. Une analyse générale de la dynamique de la hauteur de la nappe phréatique des trois tourbières est présentée, avant d'aborder la comparaison des moyennes. Les données de précipitations mesurées sur les trois sites sont présentées à l'Annexe B.

4.2. Analyses statistiques des données de terrain

4.2.1. Analyse de la dynamique de la nappe phréatique des trois tourbières

Nous observons à partir de la Figure 4-1 que la moyenne de la HNP présente le même patron pour les trois tourbières à l'étude (il est à noter que les écarts-types n'ont pas été ajoutés à cette figure puisqu'ils se chevauchaient, ce qui en rendait la lecture difficile. Nous pouvons cependant mentionner qu'ils vont de 2,38 à 5,11 à LG-1, de 8,27 à 9,66 à LG-2 et de 3,37 à 5,84 à LG-3). En effet, elles étaient hautes au printemps, lors de la fonte de la neige et plus basses au début de la deuxième campagne de terrain, après une longue période d'évapotranspiration et de précipitations peu abondantes. Elles ont augmenté au cours des deux dernières semaines d'août, suite à des précipitations plus importantes pour LG-3, ou suite à la diminution de la quantité d'eau perdue par évapotranspiration pour une même quantité de pluie pour LG-2 (voir Annexe B). La tourbière de LG-1 était celle ayant la nappe phréatique la plus haute tout au long des campagnes de terrain. Cela peut s'expliquer par son régime hydrologique. En effet, ce fen riche serait connecté et par le fait même influencé par les eaux souterraines régionales. C'est aussi pour cette raison que la variabilité temporelle de la HNP est la plus faible des trois tourbières, avec une amplitude ($|HNP_{max}-HNP_{min}|$) de 10,27 cm. Le bog de La Grande-2 présentait la nappe phréatique la plus basse. Dans une tourbière ombrotrophe, le régime hydrologique est déconnecté des eaux souterraines régionales, ce qui facilite l'abaissement de la nappe phréatique observé suivant une période sans

précipitation significative. Cela se traduit aussi par la variabilité temporelle de la HNP qui est importante, avec une amplitude de 12,80 cm. Le fen pauvre de La Grande-3 aurait un régime hydrologique se situant entre celui des tourbières de LG-1 et LG-2 puisqu'il n'est pas totalement connecté ou déconnecté des eaux souterraines régionales. La variabilité temporelle de la nappe phréatique de cette tourbière se situe aussi entre celles de LG-1 et LG-2, avec une amplitude de 10,52 cm.

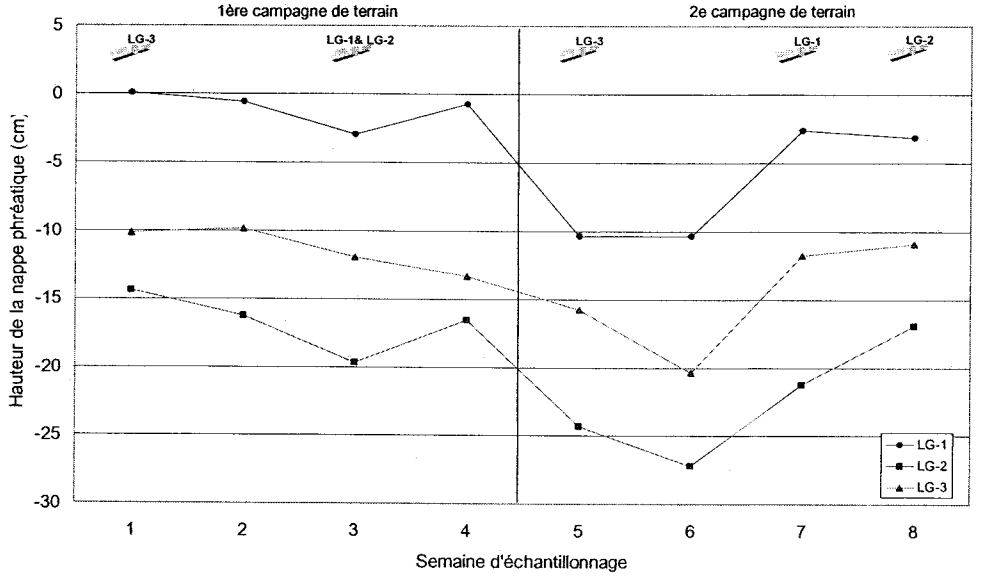


Figure 4-1: Hauteur de la nappe phréatique moyenne pour les trois tourbières lors des 8 semaines d'échantillonnage

Il est à noter que les moyennes de la hauteur de la nappe phréatique des trois tourbières doivent être comparées avec précaution. En effet, la variabilité intra-tourbière de la hauteur de la nappe phréatique est élevée, du fait qu'elle a été mesurée à la fois sur des buttes et des dépressions. De plus, les précipitations varient d'un site à l'autre (voir Annexe B), ce qui implique une différence de comportement hydrologique entre les tourbières.

4.2.2. La comparaison des moyennes des variables mesurées sur le terrain lors des passages de RADARSAT

La hauteur de la nappe phréatique (HNP)

- La distribution

Les deux séries d'échantillons présentent une distribution normale.

- La comparaison des moyennes des échantillons (test T de Student apparié)

En faisant un test T de Student apparié, nous posons les deux hypothèses suivantes :

H_0 : les moyennes de HNP lors des deux passages de RADARSAT-1 sont égales.

H_1 : les moyennes de HNP lors des deux passages de RADARSAT-1 sont différentes.

Où le seuil du test est 5 %.

- LG-1

Le test T de Student apparié donne une erreur de première espèce inférieure à 5% (p = 0.9%). Nous pouvons donc rejeter l'hypothèse H_o. Les moyennes de HNP lors des deux passages de RADARSAT-1 sont donc significativement différentes.

- LG-2

Nous obtenons une erreur de première espèce inférieure à 5% (p = 0.9%). Nous pouvons rejeter l'hypothèse H_o. Les moyennes de HNP lors des deux passages de RADARSAT-1 sont donc significativement différentes.

- LG-3

Une erreur de première espèce inférieure à 5% est obtenue (p = 10^{-17} %), nous permettant de rejeter l'hypothèse H_0 et d'affirmer que la moyenne de la HNP mesurée lors du premier passage de RADARSAT-1 est significativement différente de celle prise lors du second passage du satellite.

Le contenu en eau volumique de la tourbe (CEV)

- La distribution

Les échantillons de CEV présentent une distribution normale.

- La comparaison des moyennes

Nous appliquons le test T de Student apparié afin de comparer les moyennes. Voici les hypothèses que nous posons :

H_0 : les CEV lors des deux passages de RADARSAT-1 sont égaux.
H_1 : les CEV lors des deux passages de RADARSAT-1 sont différents.

Où le seuil du test est 5 %.

- LG-1

Nous obtenons une erreur de première espèce supérieure à 5% (p = 30%), ce qui nous empêche de rejeter l'hypothèse H_0. Nous pouvons ainsi affirmer que le CEV moyen est égal pour les deux dates d'échantillonnage.

- LG-2

Nous obtenons une erreur de première espèce supérieure à 5% (p = 91%), ce qui nous empêche de rejeter l'hypothèse H_0. Nous pouvons ainsi affirmer que le CEV moyen est égal pour les deux dates d'échantillonnage.

- LG-3

Le TDR ne fonctionnait pas lors du premier passage de RADARSAT au dessus de la tourbière de LG-3.

4.2.3. Sommaire des résultats et discussion

La dynamique de la HNP traduit bien la nature des trois tourbières à l'étude. Le fen riche de LG-1 serait encore connecté aux eaux souterraines régionales, se traduisant par une nappe phréatique élevée et fluctuant peu dans le temps. Le bog de LG-2, quant à lui, serait isolé des eaux souterraines régionales, ayant une nappe phréatique basse et variant considérablement de la fonte de la neige à la fin de l'été. Le fen pauvre de transition de LG-3 serait ni totalement connecté ou déconnecté des eaux souterraines régionales, se traduisant par une nappe phréatique ni profonde, ni affleurante, variant de manière modérée.

La comparaison des moyennes des échantillons nous indique que la hauteur de la nappe phréatique change de manière significative pour les trois tourbières, d'un passage du capteur à l'autre, avec un changement particulièrement important pour la tourbière de

LG-3 (de -9.3 à -15.7 cm). Étrangement, ce n'est pas le cas pour le contenu en eau volumique mesuré à LG-1 et LG-2. Cela s'explique par la prédominance de la variabilité spatiale sur la variation temporelle des mesures. Nous observons en effet dans le Tableau 4-1 que les moyennes des échantillons varient peu d'une date à l'autre alors que les écarts-types sont élevés et que les écarts entre les valeurs minimales et maximales sont importants.

Tableau 4-1 : Statistiques du CEV mesurés lors des deux passages de RADARSAT

Tourbière	Date 1		Date 2		Date 2 - Date 1			
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Min	Max
LG-1	0.64	0.20	0.67	0.21	0.03	0.19	-0.63	0.70
LG-2	0.42	0.22	0.42	0.27	-0.01	0.10	-0.44	0.52

Finalement, comme l'humidité du sol, susceptible d'influencer le signal radar, est potentiellement liée à la hauteur de la nappe phréatique, une analyse du changement du signal par la méthode du ratio a été réalisée en premier lieu pour la tourbière de LG-3. Pour fin de comparaison, la procédure a été répétée pour la tourbière de LG-1 dont le changement du niveau de nappe phréatique d'une date à l'autre, quoique faible (de -1.3 à -2.3 cm), se produit près de la surface, contrairement à LG-2 (>16 cm).

4.3. Analyse du coefficient de rétrodiffusion

La méthode de comparaison d'images appliquée aux tourbières de LG-1 et LG-3 (ratio) a permis de constater qu'il existe une différence de signal là où le couvert végétal est peu dense et dispersé (voir les Figures 8 a) et b) de l'article). Pour plus de détails, le lecteur est invité à se référer à la section « Backscatter coefficient analysis » de l'article. Cette observation qualitative est logique, étant donné l'angle d'incidence de ces images qui fait en sorte que l'onde interagit davantage avec la végétation qu'avec le sol, et du fait que la longueur d'onde ne permet pas une pénétration de la canopée. Il est à noter que les pixels couvrant les tourbières sont significativement différents d'une image à l'autre. En effet, en appliquant un test T de Student apparié (distribution normale), les erreurs de première espèce obtenues sont inférieure à 5%, soit de $5{,}2*10^{-11}$% et de $6{,}8*10^{-28}$% pour les tourbières de LG-1 et LG-3 respectivement, ce qui vient appuyer les changements de signal observés en utilisant la méthode de comparaison d'images ratio. Cette dernière, rappelons-le, n'est pas optimale pour les images radar présentant une quantité importante de chatoiement (Rignot et van Zyl, 1993). La méthode de décorrélation du chatoiement, si elle avait été disponible dans PCI, aurait permis de

compléter et d'approfondir les analyses des résultats obtenues avec la méthode du ratio. De plus, la comparaison d'images n'a pu être que réalisée sur quatre images, ce qui est limité pour en tirer des véritables conclusions. Finalement, étant donné la sensibilité du signal radar à la surface du sol, une précipitation qui surviendrait un peu avant ou pendant le passage du capteur viendrait biaiser les résultats, c'est-à-dire qu'un changement de signal entre deux dates ne serait pas nécessairement dû aux changements saisonniers de l'humidité de surface liés aux fluctuations de la nappe phréatiques mais plutôt à l'humidité de surface altérée par la pluie. Dans notre cas, la mesure des précipitations à la tourbière de LG-1 a pris fin avant le deuxième passage de RADARSAT (Figure B-1), ne permettant pas de connaître l'impact potentiel de ce facteur sur le signal radar. Pour ce qui est de la tourbière de LG-3, un total de 1,5 mm de pluie est tombé de 20h à 23h, soit juste avant le passage du capteur à 23h08 (Figure B-3, Jour julien 223). Quoique ces précipitations soient faibles, ce paramètre a peut-être eu un impact sur le signal radar. Il n'y a cependant pas moyen de le vérifier. Il est donc difficile d'affirmer que le changement observé du signal est lié uniquement à la différence significative de la hauteur de la nappe phréatique et par ricochet, de l'humidité de surface de la tourbière.

4.4. Classification

L'analyse de séparabilité des classes n'a pas permis d'éliminer une image parmi les trois disponibles pour la classification du secteur de LG-2. Comme illustré à la Figure 7 de l'article, la combinaison des trois images, qu'elles soient brutes, filtrées ou encore sous forme de texture dérivée, entraînait systématiquement une séparabilité des classes légèrement meilleure. Toujours d'après cette figure, nous observons que la texture moyenne présente une meilleure séparabilité moyenne des classes, comparativement aux images filtrées ou brutes. Pour cette raison, il était attendu que de meilleurs résultats de classifications soient obtenus avec les textures. De par l'analyse de corrélation des textures, nous avons vu qu'elles étaient pour la plupart très corrélées entre elles. Cela s'explique de par le fait que l'acquisition des images, malgré la différence des dates, s'est produite lors de conditions au sol similaires. Cela se reflète dans la corrélation élevée entre les textures mais aussi dans les signatures des classes qui sont similaires d'une date à l'autre (Figure 6 de l'article).

La classification réalisée à partir des trois images filtrées (filtre Kuan 5 x 5) a donné une précision totale de 36,28% (10 classes) et 48,22% (4 classes). Le lecteur peut se référer au Tableau 5 de l'article afin de consulter les matrices de confusion. La plupart des pixels ont été mal classifiés, mis à part pour la classe « Eau ». La classification utilisant 4 utilisations du sol présentait moins de confusion entre les classes. La classification réalisée à partir de la meilleure combinaison de textures a donné une précision totale de 34,83% (10 classes) et 36,62% (4 classes) utilisant les images en mode Fin et une précision totale de 56,52% (10 classes) et 74% utilisant des images en mode Standard (Demers, 2005). Le lecteur peut se référer aux matrices de confusion aux Tableaux 8 et 9 de l'article. Plusieurs observations ont été faites (sections « Classification using 10 classes» et «Classification using 4 classes » dans l'article) mais la plus importante est sans doute que les images en mode Fin présentent d'avantage de confusion entre les classes que les images en mode Standard.

Étonnamment, les classifications utilisant les textures apportent de moins bons résultats que les images filtrées, malgré le fait que ces dernières présentaient une séparabilité des classes inférieure à celle de la texture moyenne.

Il est clair que les images en mode Fin acquises pour cette étude à la fin du printemps et à l'été sont moins appropriées pour la classification des tourbières boréales que la série multi-temporelle d'images en mode Standard (précision totale de la classification inférieure et un plus grand nombre de pixels mal classés). Nous croyons que plusieurs facteurs ont influencé ces résultats. Tout d'abord, les conditions au sol ont été similaires (période estivale sèche) lors de l'acquisition des images en mode Fin, ne permettant pas une bonne discrimination entre les milieux tourbeux et non-tourbeux. De plus, l'utilisation d'un seul angle d'incidence a probablement limité la discrimination entre les classes, telle la forêt sur minéral et la tourbière boisée. L'onde n'aurait pas la capacité de rejoindre le sol lorsque la végétation est dense et haute. Dans son étude, Demers utilisait deux gammes d'angles d'incidence en utilisant le mode S1 et S7 (20°-27° et 45°-49°). Le mode S1 aurait permis de pénétrer d'avantage la canopée. Les images en mode Fin comportent davantage de chatoiement que les images en mode Standard, donc une distribution s'éloignant d'avantage de la normalité, ce qui aurait pu limiter les performances du CMV. Les meilleurs résultats de classification obtenus avec des images filtrées, malgré le fait que la séparabilité des classes avec ces images était inférieure, soulèvent un doute quand à la méthode utilisée, qui consistait en une

première sélection selon la corrélation entre les textures puis qui utilisant l'outil Channel Selection dans PCI. Nous croyons que la similarité entre les textures (corrélation élevée) n'a pas permis le choix de la combinaison optimale.

CHAPITRE 5 Conclusion et recommandations

Le premier objectif de cette étude, soit de valider la sensibilité des images en mode Fin aux conditions hydrologiques des tourbières, a été partiellement atteint. En effet, le nombre limité d'images acquises, l'occurrence d'une petite précipitation avant le deuxième passage du capteur pour un des secteurs, le manque de données de précipitations et l'impossibilité d'utiliser la méthode de décorrélation du chatoiement en complémentarité avec la méthode ratio pour la détection du changement, ont constitué des limites importantes dans cette étude. Il semble toutefois que les images en mode Fin soient sensibles aux changements hydrologiques des tourbières, où la végétation est basse et peu dense. Cette observation vient confirmer l'hypothèse #1, soit que les images en mode Fin seraient sensibles aux changements hydrologiques des tourbières à l'étude, malgré leurs limites théoriques. Des études supplémentaires sont nécessaires pour appuyer davantage cette hypothèse, en utilisant un nombre plus grand d'images tout le long de l'année, des données de précipitations complètes et une méthode de comparaison d'images en complémentarité, soit la décorrélation du chatoiement.

Le deuxième objectif, soit de vérifier si la plus grande résolution des images en mode Fin permettait une meilleure classification des tourbières boréales que des images en mode Standard, a été partiellement atteint. De moins bons résultats de classification ont été obtenus avec les images en mode Fin mais ne nous permettent cependant pas d'affirmer que ces dernières sont moins performantes pour ce genre de classification. En effet, la différence dans les dates d'acquisition et conditions au sol ainsi que l'utilisation de deux gammes d'angles d'incidence en mode Standard limitent la comparaison de ces deux types d'images utilisées. Une étude plus approfondie utilisant un nombre plus important d'images en mode Fin acquises dans diverses conditions pourrait nous permettre de creuser la question. Ainsi, l'hypothèse #2 ne peut pas être validée puisqu'il est impossible d'affirmer que les images en mode Fin permettent une meilleure classification que les images en mode Standard.

Le troisième objectif de cette étude a été partiellement atteint. Grâce aux mesures collectées sur le terrain, nous avons pu mieux comprendre le régime hydrologique des trois tourbières à l'étude et confirmer leur classification (bog, fen) qui avait été réalisée par l'équipe de recherche. Cependant, compte tenu des précipitations qui varient d'un

site à l'autre, une étude à long terme serait nécessaire afin de valider les tendances observées et de caractériser précisément le comportement hydrologique de chaque tourbière.

Finalement, cette expérience nous permet de formuler quelques recommandations qui pourront être utiles à de futures études visant des objectifs similaires. Pour le suivi hydrologique des tourbières, nous suggérons une campagne de terrain plus longue (du début de la fonte des neiges à l'automne) et sur plusieurs années et non interrompue, afin d'obtenir un portrait complet des changements de la hauteur de la nappe phréatique.

Concernant l'étude de la sensibilité des images radar aux conditions hydrologiques des tourbières, le contenu en eau volumique semble être un paramètre difficile à évaluer pour ces milieux étant donnée sa grande variabilité spatiale. La hauteur de la nappe phréatique devrait donc être privilégiée. Un suivi des précipitations s'avère aussi très important puisque ce paramètre peut jouer un rôle non négligeable sur l'humidité du sol. Finalement, la méthode de comparaison d'images de décorrélation du chatoiement devrait être utilisée en complémentarité avec la méthode du ratio.

Pour la classification des tourbières, nous proposons: (1) une importante campagne de terrain pour caractériser les différentes occupations du territoire et les localiser à l'aide d'un GPS afin d'obtenir de meilleurs sites d'apprentissage et (2) l'inclusion de classes supplémentaires pour les milieux humides qui ne sont pas des tourbières (3) la méthode des réseaux de neurones, malgré que plus longue et complexe, devrait être considérée pour la cartographie des tourbières boréales avec les images radar.

Comme l'objectif final du volet cartographique de cette étude sur le cycle du carbone sera d'obtenir une classification précise des fens et bogs pour la simulation des flux de carbone, les images radar acquises en polarisation croisée devraient être prises en compte. En effet, ce type d'image a démontré une meilleure discrimination des milieux humides que les images acquises avec une onde parallèle (HH ou VV) (Baghdadi *et al.*, 2001 and Bourgeau-Chavez *et al.*, 2001). RADARSAT-2, une fois en fonction, offrira cette possibilité. De plus, les images radar en bande L (30 cm) des satellites ALOS (2006) et HYDROS (en projet) devront faire l'objet d'études afin d'évaluer leur potentiel pour cette application (meilleure pénétration de l'onde radar au travers du couvert forestier et dans le sol organique).

LISTE DES RÉFÉRENCES

ARZANDEH, S. et J. Wang. 2002. « Texture evaluation of RADARSAT imagery for wetland mapping ». Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 28, pp.653-666.

AUGUSTEIJN, M.F. et C.E. Warrender. 1998. « Wetland classification using optical and radar data and neural network classification ». International Journal of Remote Sensing, vol. 19, pp.1545-1560.

BAGHDADI, N., M. Bernier, R. Gauthier et I. Neeson. 2001. « Evaluation of C-band SAR data for wetlands mapping ». International Journal of Remote Sensing, vol. 22, pp. 71-89.

BERNIER, M., H. Ghedira, Y. Gauthier, R. Magagi, R. Filion, D. De Sève, T. Ouarda, J.-P. Villeneuve et P. Buteau. 2003. « Détection et classification de tourbières ombrotrophes du Québec à partir d'images RADARSAT-1 ». Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 29, pp.88-98.

BONN, F. et G. Rochon. 2000. Précis de télédétection, Volume 1, Principes et méthodes. Sainte-Foy : Presses de l'université du Québec, 485 p.

BOURGEAU-CHAVEZ, L.L., E.S. Kasischke, S.M. Brunzell, J.P. Mudd, K.B. Smith et A.L. Frick. 2001. « Analysis of space-borne SAR data for wetland mapping in Virginia riparian ecosystems ». International Journal of Remote Sensing, vol. 2, pp. 3665-3689.

BRISCO, B. et T. Pultz. 1998. « Wetland mapping and monitoring with RADARSAT». In Proceeding of the 20th Canadian Symposium on Remote Sensing (Calgary, Alberta, 11 au 14 mai 1998).

CIHLAR, J. et C. Tarnocai. 2000. « Wetlands of Canada and Climate Change: Observation Strategy and Baseline Data, Report of a Workshop », Ottawa, 63 p.

COLLINS, M. 2005. « Les tourbières de la Baie James : suivi historique des unités morphologiques de surface et changements climatiques ». Mémoire de maîtrise, en préparation, Montréal, Université du Québec à Montréal.

DEMERS, A.-M. 2005 « Classification des tourbières boréales à l'aide d'images RADARSAT-1 pour une portion du bassin versant de la rivière La Grande, Baie James, Québec ». Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec à Montréal, 283 p.

ENVIRONNEMENT CANADA. 2005.
http://www.qc.ec.gc.ca/faune/atlasterreshumides/html/methode_class_f.html

GHEDIRA, H. 2002. « Utilisation des réseaux de neurones pour la cartographie des milieux humides à partir d'une série temporelle d'images RADARSAT-1 ». Thèse de doctorat, Québec, Institut national de la recherche scientifique- Eau, 184 p.

HENDERSON, F.M. et A.J. Lewis. 1998. Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing, Third Edition, Volume 2. New York: Jonh Wiley & sons, Inc., 811 p.

HINES, W.W. 1990. Probability and statistics in engineering and management science. New York: Jonh Wiley & sons, Inc.

KANDUS, P., H. Karszenbaum, T. Pultz, G. Parmuchi et J. Bava. 2002. « Influence of flood conditions and vegetation status on the radar backscatter of wetland ecosystems. » Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 27, pp. 651-662.

KASISCHKE, E.S., K.B. Smith, L.L. Bourgeau-Chavez, E.A. Romanowicz, S. Brunzell, et C.J. Richardson. 2003. « Effects of seasonal hydrologic patterns in south Florida wetlands on radar backscatter measured from ERS-2 SAR imagery». Remote Sensing of Environment, vol. 88, pp. 423-441.

LANDRY, B. et M. Mercier. 1992. Notions de géologie, 3e édition. Montréal : Modulo Éditeur, 565 p.

MARINEAU, K. 2004. Cartographie des milieux humides au Québec par le Service canadien de la faune, région du Québec. Union québécoise pour la conservation de la nature. www.uqcn.qc.ca

MCLAGHLIN, J. 2004. Carbon Assessment in boreal wetlands of Ontario, Forest Research Information Paper No. 158. Sault Sainte-Marie: Ontario Ministry of Natural Resources, 79 p.

MILNE, A.K., G. Horn et M. Finlayson. 2000. « Monitoring wetlands inundation patterns using RADARSAT multitemporal data». Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 26, pp. 133-142.

MINISTÈRE DES RESSOUCES NATURELLES, DE LA FAUNE ET DES PARCS. 2004. www.mrnfp.gouv.qc.ca

MOORE, T.R., N.T. Roulet et J.M. Waddington. 1998. « Uncertainty in predicting the effect of climatic change on the carbon cycling of canadian peatlands ». Climatic Change, vol. 40, pp. 229-245.

MULLINS, D.W., R. Leconte et R. Protz. 1991. « Estimation of northern wetlands production using remote sensing techniques ». In Proceedings of the 14th Canadian Symposium on Remote Sensing (Calgary, Alberta, 6 au 10 mai 1991), pp. 244-247.

MURPHY, M., I.P. Martini et R. Protz. 2000. « Seasonal changes in subarctic wetlands and river ice breakup detectable on RADARSAT images, Southern Hudson Bay lowland, Ontario, Canada ». Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 27, pp.143-158.

OZESMI, S.L. et M. Bauer. 2002. « Satellite remote sensing of wetlands ». Wetlands Ecology and Management, vol. 10, pp. 381-402.

PARMUCHI, M.G., H. Karzenbaum et P. Kandus. 2002. « Mapping wetlands using multi-temporal RADARSAT-1 data and a decision-based classifier ». Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 28, pp. 175-186.

PAYETTE, S. et L. Rochefort. 2001. Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Québec : Les Presses de l'Université Laval. 621 p.

PIETRONIRO, A. et R. Leconte. 2005. « A review of Canadian remote sensing and hydrology, 1999-2003 ». Hydrological Processes, vol. 19, pp. 285-301.

RADARSAT INTERNATIONAL. 2005. www.rsi.ca

RIGNOT, E.J.M. et J.J. Jakob. 1993. « Change detection techniques for ERS-1 SAR data ». IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 31, pp. 896-906.

ROULET, N.T., A. Jano, C.A. Kelly, L.F. Klinger, T.R. Moore, R. Protz, J.A. Ritter et W.R. Rouse. 1994. « The role of Hudson Bay Lowland as a source of atmospheric methane ». Journal of Geophysical Research, vol. 99, pp. 1439-1454.

SOKOL, J., H. McNairn, T.J. Pultz, R. Touzi et C. Linvingstone. 1998. « Monitoring wetland hydrology with airborne polarimetric radar ». In Procceding of the 20th canadian symposium on remote sensing (Calgary, Alberta, 11 au 14 mai 1998).

TAKEUCHI, W., M. Tamura et Y. Yasuoka. 2001. « Estimation of methane emission from West Siberian wetland by scaling technique between NOAA AVHRR and SPOT HRV ». Remote Sensing of Environment, vol. 85, pp. 21-29.

THE NATIONAL WETLAND WORKING GROUP. 1998. The Canadian Wetland Classification System, Second Edition. Waterloo: Wetlands Research Centre, 68 p.

TOWNSEND, P.A. 2002. « Relationships between forest structure and the detection of flood inundation in forested wetland unsing C-band SAR ». International Journal of Remote Sensing, vol. 23, pp. 443-460.

TÖYRÄ, J., A. Pietroniro, L.W. Martz et T.D. Prowse. 2002. « A Multi-Sensor Approach to Wetland Flood Monitoring ». Hydrological Processes, vol. 16, pp. 1569-1581.

ULABY, F.T., R.K. Moore et A.D. Kung. 1982. Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Volume II, Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1064 p.

UNION QUÉBÉCOISE POUR LA CONSERVATION DE LA NATURE. 2005. www.uqcn.qc.ca

VINCENT, J.-S. 1977. Le quaternaire récent de la région du cours inférieur de la grande rivière, Québec. Ottawa : Commission géologique du Canada, 20 p.

WANG, J., J. Shang, B. Brisco et R.J. Brown. 1998. « Evaluation of multidate ERS-1 and multispectral LANDSAT imagery for wetland detection in southern Ontario ». Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 24, pp. 60-69.

WEIMIN, J. et M. Chen. 2005. « Distribution of soil carbon stocks in Canada's forest and wetlands simulated based on drainage class, topography and remotely sensed vegetation parameters ». Hydrological Processes, vol. 19, pp. 77-94.

WRIGHT, H.E., B.A. Coffin et N.E. Aaseng. 1992. The Patterned peatlands of northern Minnesota. Minneapolis : University of Minnesota Press, 327 p.

ANNEXE A. Calibration du TDR

Le contenu en eau volumique (CEV) du sol a été mesuré à l'aide d'un TDR (Time Domain Reflectometry) de modèle HydroSense de la compagnie Campbell Scientific, Inc. Celui-ci comporte une sonde de 12 cm de longueur. La période de l'onde est directement reliée à la constante diélectrique du sol. Plus la période augmente, plus le contenu en eau du sol est élevé. Le CEV (en %) obtenu avec la sonde de 12 cm couvre le volume d'un cylindre de 5 cm de rayon et de 15 cm de hauteur (1178 cm^3). Cet appareil est calibré pour un sol agricole. Comme la tourbe possède un contenu en matière organique plus important, nous avons dû établir une courbe de calibrage, c'est-à-dire corréler les mesures de CEV données par le TDR avec les valeurs déterminées en laboratoire. Pour ce faire, nous avons pris trois échantillons de 10 cm x 15 cm à la tourbière de LG-1 et LG-2, en s'assurant d'avoir une diversité végétale. Les échantillons ont ensuite été mis dans des sacs hermétiques, emmenés au laboratoire et gardés au réfrigérateur (T = 4 °C) jusqu'à leur analyse.

Les échantillons ont ensuite été placés dans un contenant hermétique et saturé en eau. Une première mesure de CEV a été prise ainsi que le poids. Ensuite, la tourbe a été mise au four à une température de 45 °C pour une période de 24 h. Une autre mesure de CEV et le poids ont été pris. Cette démarche a été suivie pendant environ trois semaines, afin d'avoir plusieurs mesures.

L'équation suivante est utilisée afin de calculer le CEV (cm^3 d'eau par cm^3 de sol) en laboratoire.

$$CEV = Da \cdot CEG$$

où Da est la densité apparente;

CEG le contenu en eau gravimétrique de l'échantillon.

La densité apparente est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$Da = \frac{Ps}{V}$$

où Ps est le poids sec (g);

V le volume (cm^3) de l'échantillon.

Le contenu en eau gravimétrique (CEG) se calcule ainsi :

$$CEG = \frac{Pm - Ps}{Ps}$$

où Pm est le poids mouillé (g) de l'échantillon.

Il semble que le TDR surestime les valeurs réelles de CEV supérieures à 35 % et sous-estime celles inférieures à cette même valeur. L'équation de calibration est ainsi obtenue pour l'ensemble des six échantillons, avec une polynomiale d'ordre 2 et un R^2 de 0,92 (Figure A-1) :

$$Y = 0{,}9096X^3 - 1{,}3511X^2 + 1{,}1797X + 0{,}0736$$

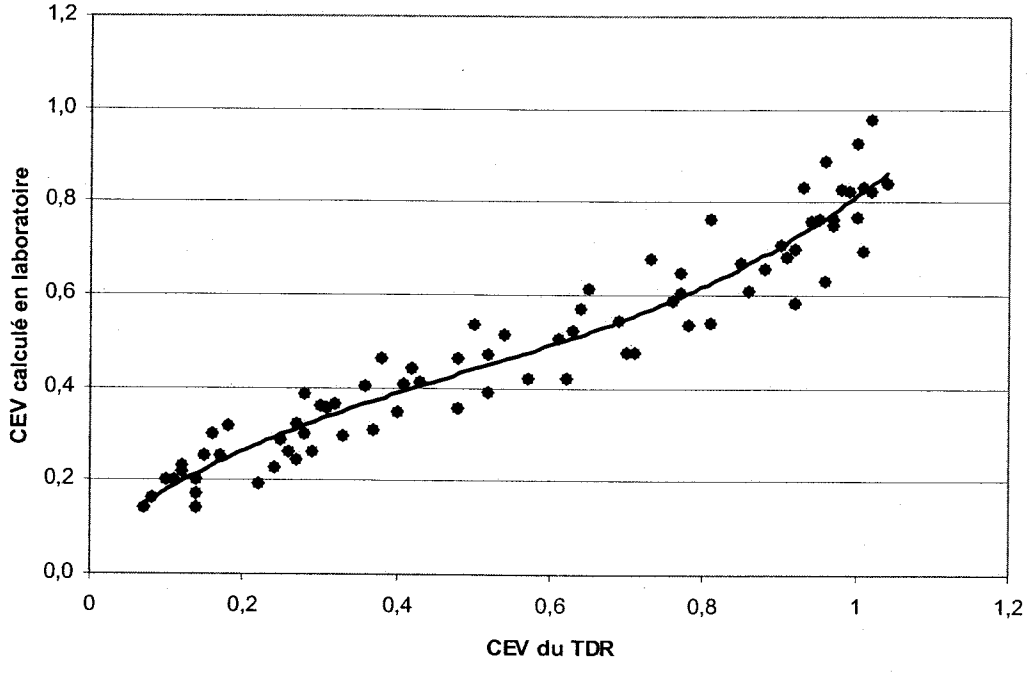


Figure A-1 : Courbe de calibration du TDR

ANNEXE B. Données de précipitation des trois sites à l'étude

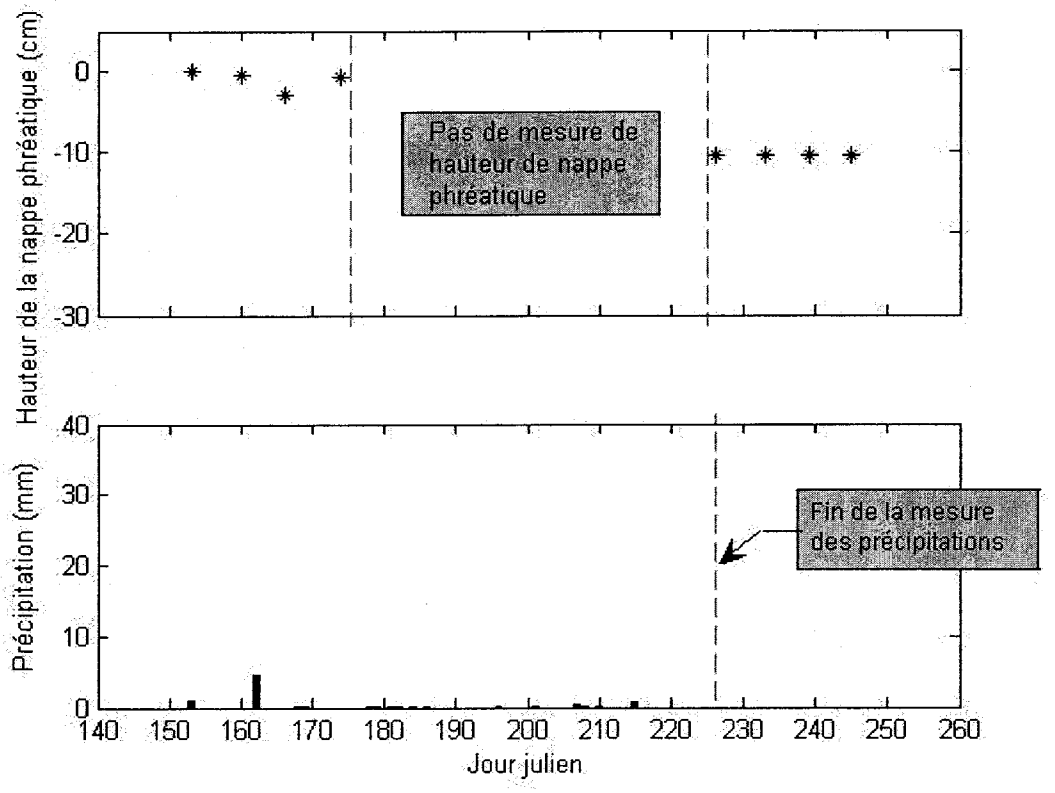


Figure B-1 : Précipitations (graphique du bas) et hauteur de nappe phréatique (graphique du haut) mesurées sur la période d'étude (été 2003) pour la tourbière LG-1

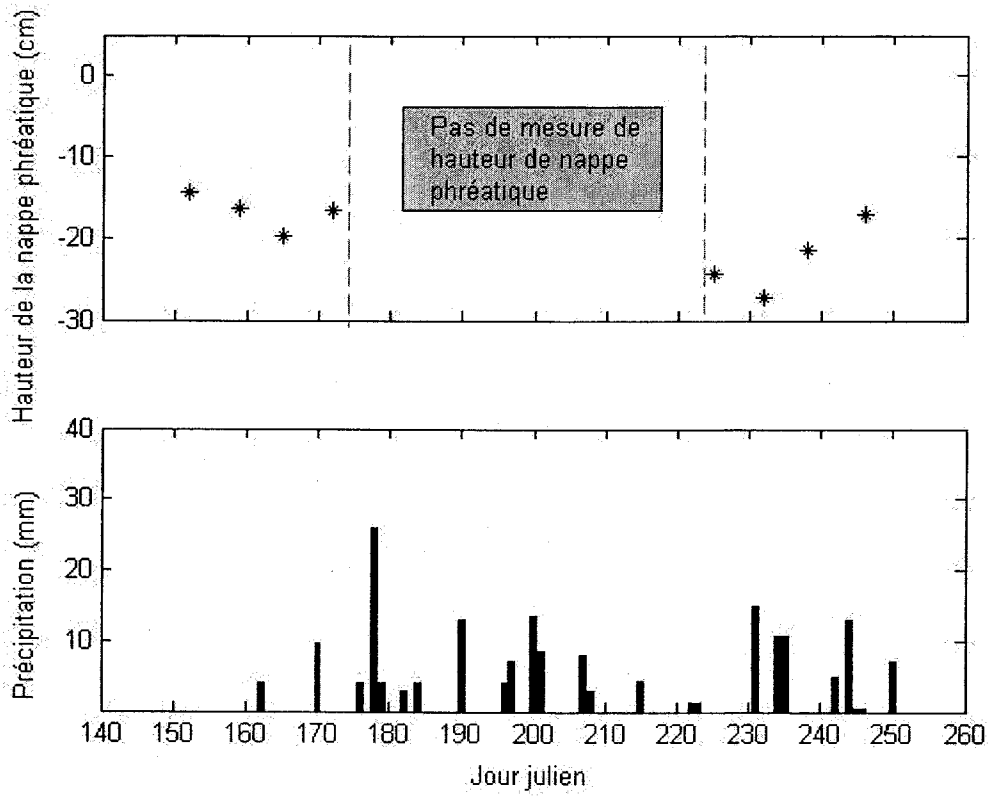


Figure B-2 : Précipitations (graphique du bas) et hauteur de nappe phréatique (graphique du haut) mesurées sur la période d'étude (été 2003) pour la tourbière LG-2

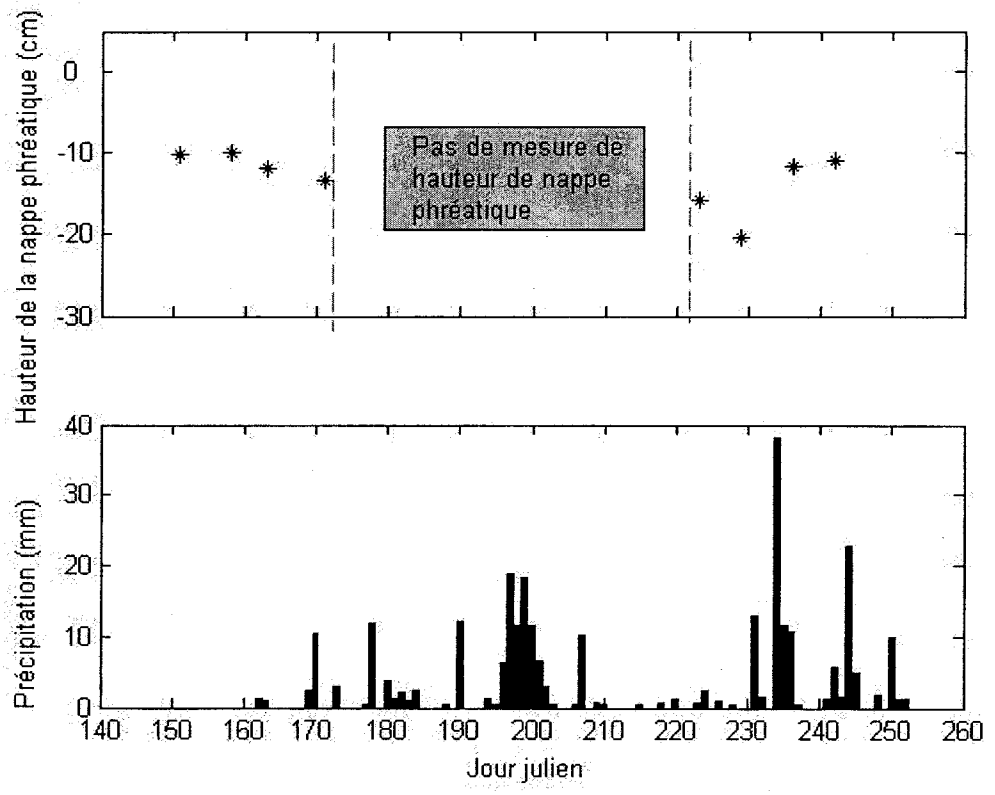


Figure B-3 : Précipitations (graphique du bas) et hauteur de nappe phréatique (graphique du haut) mesurées sur la période d'étude (été 2003) pour la tourbière LG-3

Deuxième partie

Article scientifique

Avant-propos

L'article a paru en décembre 2005.

La contribution des auteurs de l'article s'établit comme suit :

Marie-Josée Racine :
- définition du sujet de recherche et des objectifs;
- prise de données sur le terrain;
- traitement des images radar;
- traitement statistique des données terrain;
- analyses des données et interprétation des résultats;
- rédaction de la synthèse et de l'article.

Monique Bernier :
- contribution à la définition des hypothèses, aux analyses des données terrain, des images et à l'interprétation des résultats;
- révision de l'article.

Taha Ouarda:
- sélection des méthodes statistiques et contributions à l'analyse des résultats;
- révision de l'article.

Evaluation of RADARSAT-1 image acquired in Fine-mode for the study of boreal peatlands – A case study in James Bay, Canada

Research article

Marie-Josée Racine*, Monique Bernier and Taha Ouarda

Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE), Université du Québec, 490, rue de la Couronne, Québec, Canada, G1K 9A9

* Corresponding author

Phone : +1 418 821-7056

Fax : +1 418 821-7081

E-mail : mjracine@rivieremontmorency.com

RESUME

Dans le cadre d'une étude sur le cycle du carbone dans les tourbières boréales, la télédétection radar a été utilisée avec l'objectif d'obtenir différentes informations sur ces milieux encore mal connus. Cet article présente une étude pilote réalisée sur trois tourbières du bassin versant de la rivière La Grande (Québec, Canada). Sept images multi-temporelles acquises en mode Fin ont été analysées et comparées avec des données de terrain recueillies simultanément, dans le but de vérifier si les conditions hydrologiques des tourbières influencent le signal radar. Les changements hydrologiques observés sur le terrain se reflètent sur les images radar, là où les arbres sont petits et se trouvent en faible densité. Une classification du Maximum de vraisemblance basée sur les patrons morphologiques de surface des tourbières a également été réalisée à partir des images en mode Fin (filtrées et textures), puis comparée à une classification similaire effectuée à partir d'images de textures multi-temporelles acquises en mode Standard. Les résultats de classification obtenus à partir des images en mode Fin sont moins bons que ceux d'une classification utilisant les images en mode Standard, malgré leur meilleure résolution (35% vs. 59% de précision totale utilisant 10 classes et 37% vs. 74% de précision totale ayant 4 classes).

Mots-clefs: RADARSAT-1, tourbière boréale, mode Fin, classification, nappe phréatique, humidité du sol, cycle du carbone.

ABSTRACT

As part of a wider study of carbon cycling in boreal peatlands, radar remote sensing was used with the objective of obtaining diverse environmental information related to these areas. This paper presents a case study of three peatlands located into the La Grande river watershed (Québec, Canada). An analysis of multi-temporal Fine-mode RADARSAT-1 images was carried out, with the support of collected field data, to verify if hydrological conditions influence radar backscatter coefficients. Hydrological conditions changes are reflected in radar backscatter coefficient for areas having low and sparse trees. A maximum likelihood classification (MLC) on speckle filtered images and textures is also carried out, evaluated and compared with a similar classification procedure on Standard-mode images. MLC using textures generated from multi-temporal Fine-mode images brought poorer results than a similar classification using multi-temporal Standard-mode textural images (35% vs. 59% of overall accuracy using 10 classes and of 37% vs. 74% of overall accuracy using 4 classes).

Keywords: RADARSAT-1, boreal peatland, Fine-mode, classification, water table, soil moisture, carbon cycle.

Introduction

It is estimated that wetlands cover 15% of Canada's land area (NWWG, 1997) and over 90% of these wetlands are peat forming due to the northern climate controls on productivity and decomposition (Cihlar and Tarnocai, 2000). Peatlands represent important component in a watershed, and also play a significant role in global carbon cycling because of the sequestration and production of greenhouse gases, particularly carbon dioxide and methane (Gorham, 1991; Moore *et al.*, 1998; Frolking, S. *et al.*, 2002; Cihlar and Tarnocai, 2000; Roulet, N.T., 2000; Payette, S. and Rochefort, L., 2001). Carbon cycling is influenced by many factors, such as water table position, soil moisture, air temperature and also vegetation characteristics. It is currently highly uncertain whether peatlands will act as future sinks or sources of greenhouse gases in a global warming context (Moore *et al.*, 1998).

There has been an increasing interest in the past decade for the use of remote sensing as a tool for mapping wetlands and monitoring their hydrology (Ozesmi and Bauer, 2002). Compared to visible images, radar data can be acquired during day and night, independently of meteorological conditions. Moreover, radar is particularly sensitive to soil moisture, soil texture and vegetation (Henderson and Lewis, 1998), which can therefore give useful information for carbon cycling studies (Mullins *et al.*, 1991; Brisco and Pultz, 1998).

In 2002, a study of carbon cycling in boreal peatlands was initiated (Garneau *et al.*, 2001). RADARSAT data were acquired with the objectives of mapping peatlands biotopes and monitoring their hydrology for modeling purposes. Images were acquired both in Standard and Fine-mode. A first step concerned the development of a mapping

method for peatlands biotopes using Standard-mode images (Demers, 2005). A second step, which includes our study, consisted in using the same method with higher resolution Fine-mode images, with the objective of refining mapping results and also to evaluate their potential for monitoring seasonal hydrological changes in peatlands.

The literature shows that good classifications (wetland vegetation classes and biotopes, wetland type, wetland discrimination from other land uses) have been obtained using multi-temporal ERS-1 data (Wang *et al.,* 1998; Parmuchi *et al.* 2002) with textures created either from one RADARSAT-1 image acquired in Fine-mode (Arzandeh and Wang, 2002) or from multi-temporal RADARSAT-1 images in Standard-mode (S1 and S7) (Ghedira, 2002; Bernier *et al.*, 2003 and Demers, 2005). Therefore, multi-temporal RADARSAT-1 images acquired in Fine-mode present a potential for peatland discrimination based on morphological patterns (e.g.: strings, pools and vegetation) due to their shallow incidence angle (>40°) and fine resolution (~9 m).

Monitoring of wetlands' hydrological changes with radar has not been the subject of considerable research. Most studies consisted in monitoring flood patterns (Augusteijn and Warrender, 1998; Milne *et al.* 2000; Kandus *et al.*, 2001; Townsend, 2002 and Töyrä *et al.*, 2002). At our knowledge, very few studies conducted on wetlands included a comparison of field measurements with radar signal (Kasischke *et al.,* 2003). According to their physical parameters, RADARSAT images acquired in Fine-mode would not be sensitive to soil moisture and water table fluctuations. Indeed, the high incidence angles (> 30°) would be less adequate than steeper incidence angles to monitor changes in volumetric water content because of the interaction with vegetation. Also, RADARSAT wavelength (C-band : 5,7 cm) would not allow the signal to penetrate the peat more than 1 cm at high volumetric water content (> 40%) (Henderson and Lewis, 1998). However,

experimental results obtained using radar brought nuances. Murphy *et al.* (2001) used multi-temporal RADARSAT-1 data acquired in Standard-mode (S1-S7) to monitor seasonal changes (soil moisture, vegetation, snow cover) in subarctic wetlands. It was concluded that changes in wetland soil moisture influenced the backscatter coefficient more than incidence angles do. Similarly, Kasischke *et al.* (2003) studied the effects of hydrological patterns in south Florida wetlands on ERS-2 SAR imagery (C-band, VV polarisation) and observed that the backscatter coefficient was positively correlated to measured soil moisture, for volumetric water content higher than 40%. It is important to note that these two studies were conducted over wetlands having low and sparse vegetation, which facilitated the interaction of the signal with the ground. Therefore, even tough the physical parameters (incidence angle and wave length) of the Fine-mode indicate that it would not be adapted to monitor changes of soil moisture in boreal peatlands, experience shows that such images can nevertheless be sensitive to soil moisture changes in conditions of low and sparse vegetation.

This study had two objectives: (1) evaluate the potential of multi-temporal Fine-mode images for boreal peatland mapping as compared to Standard-mode (2) determine if peatland hydrological condition influence radar backscatter coefficient (σ^o) of RADARSAT images acquired in Fine-mode by comparing radar response to field measurements.

Study sites

As part of a wider study of carbon cycling in boreal peatlands (Garneau *et al.*, 2001), three peatlands were selected from La Grande-1, La Grande-2 and La Grande-3 sectors (53,6°N, 76,1°W; 53,9°N, 78,8°W and 53,7°N, 77,7°W respectively), which are located in the La Grande river watershed (figure 1), Quebec, Canada. The peatland of La Grande -1

(LG-1) is classified as a rich fen and covers an area of 20 ha. The vegetation found is mostly composed of brown bryophytes (e.g. D*repanocladus)*, sedge species (e.g. *Carex* spp.) and sparse larch (*Larix laricina*). Some parts of that peatland are covered by small patterned pools. La Grande-2 (LG-2) peatland is classified as a raised bog covering an area of 215 ha. The vegetation found is mostly composed of bryophytes (e.g. *Sphagnum angustifolium, S. rubellum and S. papillosum*), lichens, ericaceous (e.g. *Ledum groenlandicum* and C*hamaedaphne calyculata)*, black spruce (*Picea mariana*), larch and some sedges species (e.g. *Carex* spp.). Standing dead tamarack are common in the driest parts of the peatland. The bog surface is dominated by large, deep pools arranged concentrically. The La Grande-3 (LG-3) peatland is classified as a transitional poor fen and covers an area of 90 ha. The vegetation observed is similar to the LG-2 peatland, except that black spruce is more dominant. Pools are small and shallow and are mostly being infilled by vegetation. The three peatlands are underlain by 1 m to 4.5 m of peat.

Material and methods

Image acquisition and processing

Seven images were acquired on different dates during spring and summer 2002 and 2003 with RADARSAT-1 (C-band, HH polarization) in Fine-mode (F4) (table 1). The acquisition periods correspond to the spring flush for vegetation, when water table and soil moisture are usually high, and to the end of the summer, when water table and soil moisture are lower. Fine-mode images cover an area of ~ 50 km x 50 km and they have a ground resolution of ~ 9 m. Their incidence angles vary from 43° to 46°.

Radiometric and geometric corrections

Data produced by the Canadian Data Processing Facility (CDPF) were calibrated. The extraction of digital numbers (DN) from the calibrated data was carried out in 32 bits and converted to 16 bits unsigned to reduce treatment time. Some methods available with PCI Geomatica software were tested in order to geometrically correct the images, such as the satellite orbital model for RADARSAT, Toutain and polynomial (PCl Geomatics, 2004). The best result was obtained using the specific model for RADARSAT. Images were geometrically corrected to Lambert conic conform system using between 16 and 22 ground control points, with cumulative mean root square error (RMSE) within 1.5 pixels. For that purpose, cartographic sheets at 1: 250 000 and 1: 50 000 scales with a digital elevation model at 1: 250 000 scale were used. The RADARSAT images were re-sampled at 8 m resolution by Nearest Neighbor resampling method. It was considered very important to get the best geometric correction to obtain a perfect overlap of each image covering the three sectors. However, this was found to be extremely difficult due to three main reasons: (a) the image features were more precise than the vectors at 1: 250 000 scale, (b) vectors at 1: 50 000 scale were not available for the entire territory and (c) there were limited or no fixed control points, such as road intersections. It was evaluated that some areas presented an offset of 1 pixel. For the change detection method needs (see "Radar backscatter coefficient analysis" section), a second correction was made with the polynomial method (second order) for subsets of the three peatlands areas. Subsets were geometrically corrected to Universal Transverse Mercator system (zones 18 and 19) using between 17 and 25 ground control points established with the vectors at a 1:50 000 scale, with cumulative RMSE within 1.25 pixels. The subsets were re-sampled once again at 8 m resolution by Nearest Neighbor resampling method. No offset was observed.

Classification

As part of the same research project on carbon cycling in boreal peatlands, a primary classification was conducted over LG-2 sector using multi-date RADARSAT-1 images acquired in Standard-mode (Demers, 2005). The methodology developed was used in order to compare classifications resulting from Fine-mode and Standard-mode images. As presented in figure 2, a first step consisted in evaluating if some images could be eliminated based on classes separability. Two methods were available in PCI software: Bhattacharrya distance (Jeffries-Matusita distance) and Transformed divergence. The Bhattacharrya distance method was retained for that study because it has been shown to offers advantages when the data are normally distributed (Richards, 1986). Values close to 0 indicate a low degree of separability, while those approaching 2 indicate a high degree of separability. For each remaining image, textures were generated (see "Texture analysis" section). The Channel selection tool available with PCI Geomatics allows the best textures combinations to be found based on the classes signature discrimination using criteria related to dissimilarity between two classes. Note that the Average transformed divergence algorithm was retained for our analysis. It is based on the exponential of the divergence (Mahalanobis distance), and reduces the dominance of classes which have the highest divergence (PCI Geomatics, 2004). The Channel selection tool does not allow entering more than 12 textures at a time. For that reason, a correlation coefficient between all textures from all dates was calculated in order to keep the least correlated ones and therefore extract a maximum of information. This method was preferred to a principal component analysis (PCA) as Demers (2005) showed the latter to be unsatisfying. After that, the maximum likelihood classifier (MLC) was employed because it is widely used for wetland classification and it generally gives better results than the minimum distance

to means or parallel piped classifiers since data are taken into account (Ozesmi and Bauer, 2002). Classifications were carried out on filtered images as well as on the best texture combination (see "Speckle noise reduction" and "Texture analysis" sections). Figure 3 shows the origin of classification and figure 4 gives a brief description of each class. For more detailed information, refer to Demers (2005). The classes that were defined by Demers originated from three general land uses (organic substrat, mineral substrat and water), that were subdivided into more land uses based on morphological patterns. Indeed, radar is sensitive to texture and soil moisture and a Fen vs. bog discrimination based on vegetation types would have needed the use of images acquired in visible and a field work component for validation (e.g.: Poulin *et al.*, 2002 and Thomas *et al.*, 2002). A total of 15 classes were first used by Demers (deep water, turbid water, forested peatland, strings and pools, stringed peatland, pool high density, pool low density, uniform peatland, forest low density, forest medium density, forest high density, post fire regeneration zone, natural bear surface, entropic bare surface and other). Demers obtained unsatisfying classification results using those 15 initial classes with radar. Some of those 15 classes were re-grouped into 10 classes (water, forested peatland, strings and pools, stringed peatland, pool high density, pool low density, uniform peatland, forest on mineral, bare surface and other). The 10 classes were also re-grouped into 4 classes (table 2) to see if peatlands could be distinguished from mineral areas. Training and testing sites were generated from aerial photograph interpretation because no field work could be carried out. Table 3 presents the number of pixels for training and testing sites, which was judged to be largely sufficient, according to Tso and Mather (2001). Note that a mode filter was passed over classified images in order to reduce lonely pixels. The window size was established at 7 x 7 pixels as a 5 x 5 window left too much noise.

Speckle noise reduction

The detection of terrain features in radar imagery is limited by the presence of speckle (Ozesmi and Bauer, 2002), Indeed, it was fundamental to apply speckle-reduction filters on the raw images prior to classification. Adaptive filters were explored in this study since they are more efficient than non-adaptive filters (e.g.: Mean) in preserving subtle image information (Tso and Mather, 2001). As proposed by Wakebayashi and Arai (1996), some adaptive filters (Lee, Kuan, Frost, enhanced Lee, enhanced Frost and Gamma) were compared in order to keep the one that retains the mean of DN values of raw data and brings the standard deviation down to a minimum level. Window sizes of 3x3, 5x5, 7x7, 9x9, 11x11, 13x13 and 15 x15 pixels were compared to ascertain which one provided the optimum image details whilst suppressing the speckle.

Texture analysis

Grey level co-occurrence matrix (GLCM) texture measures have been used previously for wetland classification (Garneau *et al.*, 2001; Arzandeh and Wang, 2002 and Ghedira, 2002 and Demers, 2005) and it was observed that it brought comparable or better classification results than using speckle filtered images. Six GLCM texture measures were retained for this study: 1) homogeneity 2) contrast 3) mean 4) standard deviation 5) angular second moment and 6) correlation. Note that textures were created from raw images and not from speckle filtered images to keep textural information (Arzandeh and Wang, 2002). The choice of window size is important as it has to take into account the area covered by each class to avoid confusion or overlap between them (Ghedira, 2002). Referring to Ulaby *et al.* (1982), the window size should not trespass the size of the smallest feature to be classified. The size of the osculating window was established at

15x15 because the smallest features to be classified were evaluated to cover an area of 15 625 m^2.

Accuracy assessment of the classification results

Error matrices were used (Congalton, 1991) and completed by overall accuracy percentage in order to assess the accuracy of the classifications. The confusion matrix allows to evaluate how much of each testing site was actually classified as being in the class that it was meant to represent (PCI Geomatics, 2004). The overall accuracy is the mean of the accuracies for each class weighted by the proportion of test samples for that class in the total testing set (PCI Geomatics, 2004).

Radar backscatter coefficient analysis

The objective of this analysis was to verify if the peatland hydrological conditions influenced radar signal. DNs were first converted into backscatter coefficient σ^o (dB). If significant changes in hydrological conditions are observed (see "Water table and soil moisture dynamics" section), a change detection analysis over raw images was done. As incidence angles are the same, a variation in radar signal from one date to another would be interpreted as a sensitivity of radar to hydrological conditions. Changes in vegetation may influence the signal (volume scattering) but we observed that leaves were already out at the end of May 2003. Also, vegetation grows very slowly in peatlands (Payette S. and Rochefort, L., 2001). For those reasons, vegetation is not thought to have a noticeable impact on radar signal.

The ratio change detection technique is calculated by dividing the intensity values, pixel per pixel (Rignot and van Zyl, 1993). However, the use of this method is limited by the presence of speckle. Images acquired in Fine-mode present a one look process, which implies an important amount of speckle. As an example, a detection of a 6 dB change

would present a probability of error close to 35% (Rignot and van Zyl, 1993). The decorrelation of speckle would have completed the ratio method, as it identifies if speckle play a role in an observed change. Unfortunately, that change detection method was not available with PCI Geomatica software. Indeed, we decided to use the ratio method alone in order to get a qualitative evaluation of changes between images. A Kuan filter with a 5 x 5 window was passed over the resulting image from the ratio in order to reduce speckle noise.

Field campaigns

Two field campaigns were conducted during the months of June and August 2003 in each peatland. They were planned to fit with RADARSAT overpasses, except for the year 2002, where no field campaign was possible. Water table position, relative to the peatland surface, was monitored on a weekly basis (and also corresponded to RADARSAT overpasses) using perforated PVC pipes with a 1.25 inch diameter. A total of 17, 48 and 37 pipes were installed every 50 m on LG-1, LG-2 and LG-3 peatlands respectively, forming two transects (figure 5). Note that those transects were not defined specifically for this study but for the whole research project. Soil moisture (volumetric water content (VWC)) was obtained using a Time Domain Reflectometor (TDR) with 12 cm probes. Note that the TDR was calibrated in the laboratory for peat soil. A quadrat of 81 m^2 was installed around each PVC pipe with the objective of taking systematic measurements of soil moisture across the peatland surface. The quadrat was subdivided into nine equal area squares and one sample point was located in the centre of each square. Two series of soil moisture measurements were carried out at the same location on each peatland, corresponding to RADARSAT overpasses. The main pools' edges were

traced using a global positioning system (GPS). Note that a global precision of ~ 3 m was obtained for GPS points using a post-calibration algorithm from the Ministère des Ressourses Naturelles, de la Faune et des Parcs. Precipitation measurements were obtained from two Hydro-Québec meteorological stations located respectively at 16 km and 13 km from LG-2 and LG-3 peatlands. There was no meteorological station in the LG-1 sector so a portable station was installed and precipitation was measured using a tipping bucket type rain gauge (0.9 mm pulse) and recorded by a data logger.

Statistical analysis of the water table and soil moisture dynamics

The main objective of this analysis was to see if the mean of recorded variables were significantly different between sampling periods, in order to help radar backscatter coefficient interpretation. The paired Student *t*-test was used for that purpose.

Results and discussion

Classification

Filtered images

The Kuan filter was chosen because it conserved the DN mean the closest to the raw data and gave the smallest standard deviation among all the filters tested. The 3x3 window showed the most detailed features but kept an important amount of speckle. The 5x5 window induced a loss of details compared to the 3x3 window but had less speckle. The 7x7 and larger windows smoothed the images and eliminated more speckle but the loss of detail was too important. Indeed, the 5x5 window was retained for further analysis.

Overall accuracy obtained from filtered images using 10 classes reached 36,28%. Classification using 4 land uses presented better results with an overall accuracy of

48,22%. Error matrices resulting from the classification using 10 land uses (table 5a) showed that most pixels have been misclassified, except for the class Water. Error matrices resulting from the classification using 4 land uses (table 5b) presented less confusion between classes. The most important confusion was observed for Mineral class with Opened peatland and Forested peatland. Indeed, speckle filtered images do not allow the distinction of peatlands from mineral areas.

Textures

We first compared class signature and separability of the raw images acquired on three different dates to verify if we could eliminate one or more of them. Class separability was also compared for filtered images and mean textures. The figure 6 illustrates class signatures (10 and 4 land uses) from the three raw images and it can be observed that it was not significantly different from one acquisition date to another. This could be explained by the similarity of vegetation structure (the three images were acquired between June and August) and by comparable soil moisture due to similar meteorological conditions (low or no rain before the satellite overpass). The figure 7 presents the mean class separability (10 and 4 land uses) using 1, 2 or 3 raw or filtered images, or textures. We observed that the three images acquired on different dates presented similar class separability and that the combination of three dates slightly improved it. Also, it could be observed that textures brought better class separability than raw or filtered images, which justifies the classification using textures. Classification over filtered image will also be conducted for comparison purpose.

As no raw image could be eliminated, six textures were generated for each one. As shown in table 6, textures were found to be all highly correlated, which is not surprising considering the similarity in class signature and separability between images. As Channel

Selection tool only accepts 12 textures to be entered, we retained the least correlated ones (August 15^{tth}, 2002: contrast, angular second moment and correlation; June 16th, 2003: contrast, mean, standard deviation and correlation; September 3rd, 2003: homogeneity, contrast, mean, angular second moment and correlation). The six optimal textures combinations obtained with the Channel Selection algorithm are presented in table 7. In most cases, the use of 4 textures did not give better classification results than using 2 or 3.

Classification using 10 classes

The classification using 2 textures (correlation and standard deviation from June 16th 2003) was considered to be the best because it was the one showing the less unclassified pixels (NULL). It was not surprising to get the best results using textures from only one acquisition date, knowing that the three dates did not seem to bring differences in signal. The overall accuracy reached 34,8%. As seen in the confusion matrix presented in table 8a, Fine-mode images present an important amount of misclassified pixels for all classes except for water. The worst misclassification cases were found to be for Pools low density, Strings and pools, and bare surface classes, having less than 20% of well classified pixels.

Demers (2005) obtained an overall accuracy of 56,5% and also observed misclassification of pixels (table 8b). However, this was less important than what was seen with Fine-mode images. The worst misclassifications were found for Pools high density and bare surface classes, presenting less than 36% of well classified pixels.

Comparing the two classifications, similarities could be observed: (1) Bare surface land use is the one presenting the most misclassified pixels and (2) Confusion between classes were observed for the same land uses : Pools high density and Strings and pools, Forested peatland and forest on mineral, and Stringed peatland and Uniform peatland. However,

Standard-mode images allow better discrimination of all land uses, except water. Note also that Pools low density class is particularly well discriminated using Standard-mode images, which is not the case for Fine-mode images. Bare surface and Other classes, for both acquisition modes, present confusion with different land uses. Fine-mode shows confusion with more classes than Standard-mode. Finally, more unclassified pixels were obtained using Standard-mode images.

Classification using 4 classes

The retained textures combination was the one using 4 textures (Contrast, Angular second moment and Correlation from August 15th, 2002 and Homogeneity from September 3rd, 2003), because it presented better class discrimination, although the number of unclassified pixels was a little higher. The overall accuracy reached 36,6%. The highest confusion was found for Mineral class, having only 6,8% of pixels that were well classified and presenting confusion with all other classes, except Water (table 9a). Note that 17,8% of pixels were not classified (NULL). Opened peatland class showed confusion with forested peatland. Water is the only class, like seen previously with the 10 land uses data set, having no confusion with other classes.

Demers (2005) obtained an overall classification accuracy of 74%. In that case, grouping 10 land uses to 4 substantially improved classification results. The highest confusion was also found for Mineral class, having 61,5% of well classified pixels, presenting confusion with Forested peatland (table 9b). Radar signal might not be able to distinguish soil type (peat or mineral) under canopy. Almost no confusion was found for other classes, although more pixels were unclassified. Standard-mode allows a better peatland discrimination compared to Fine-mode. Note that the classification using Standard-mode

led to more unclassified pixels for water due to a coarser spatial resolution (25 m vs 8 m).

Discussion

The comparison of results obtained with Fine and Standard-mode showed that classifications were poorer with Fine-mode, although a 3 times better geometric resolution. As an example, it is surprising to find that the classes Pools low density and Strings and pools were not better discriminated using Fine-mode. Indeed, a 9 m ground resolution should have led to better detect those morphological patterns, since most of pools cover a larger area than a single pixel. This may be explained by the lower radiometric resolution of Fine-mode data (1 look versus 4 looks), increasing the amount of speckle (Congalton, 1991). Also, Standard-mode images were acquired on dates (February 26th 2002 and August 12th and 18th of 2002) that presented different ground conditions (Demers, 2005), which was not the case for Fine-mode. Moreover, Demers (2005) had images presenting different ranges of incidence angle (S1: 20°-27° and S7: 45°-49°), which may have led to better discrimination of soil moisture under denser canopy.

Using 10 classes, filtered images gave slightly better results than textures (overall accuracy of 36,3% vs. 34,8%). Overall classification accuracy obtained with 4 classes was also better using speckle filtered images than textures (48% vs. 36,6%). Those results are surprising considering that class separability was higher for textures. These observations suggest that the method followed for selecting the optimal combination of textures may not be suited to the images used in this study. As Demers (2005) previously used the same method with Standard-mode images and obtained good classification results, it leads us believe that the similarity in class signatures from Fine-mode images

due to comparable ground conditions may have led the Channel Selection tool not to be efficient. As the PCA did not bring good classification results and as Channel selection is the only tool available in PCI software, the use of more performing tools should be investigated.

Moreover, we observe that better classification results were previously obtained in studies using various RADARSAT data. Indeed, Arzandeh and Wang (2002) obtained an overall classification accuracy of 71% with 8 classes (cattail marsh, phragmites marsh, swamp, tall grass prairie, upland forest, built-up area, agriculture, and water) and of 88% with 2 classes (wetland vs. non-wetland) using a combination of mean, homogeneity, contrast and standard deviation textures derived from one image acquired in Fine-mode (F1) on August 31st. The discrimination of wetlands from other land uses may have been favoured by the presence of standing water in these environments, which was not the case in our study. Also, Ghedira (2002) used a MLC classification with 4 land uses (forest, shrub wetland, highly forested wetland, and medium forested wetland). He obtained an overall classification accuracy of 70% using 3 mean textures generated from 3 images acquired in Standard-mode (S7) (February 4th, April 13th and May 31st). The acquisition periods (different ground conditions) may have helped to obtain good wetlands discrimination. It should be noted that Ghedira (2002) obtained better classification results (overall accuracy of 82%) using neuronal network method because it does not take into account classes distribution. Ghedira (2002) mentioned that the classes distribution was not always normal, which explains the lower results using MLC method. Moreover, Bernier *et al.* (2003) observed that the use of one texture (mean) helped to discriminate peatlands from other land uses, as well as natural peatlands from harvested ones. The overall accuracy reached 84% using three textures obtained from images acquired in Standard-

mode (S1 and S7), with the MLC method. However, this is not the case in our study, which is probably due to the use of a single range of incidence angle (F4).

Water table and soil moisture dynamics

Table 4 presents the mean values of water table height and VWC measured at the same time as the two satellite overpasses. A significant difference in mean water table height between spring and late summer was observed for all three peatlands, this difference being very important for LG-3 (6.4 cm). The little change in water table height of LG-1 and LG-2 is certainly not sufficient to induce a detectable change in surface moisture conditions. Regarding VWC, there was no significant difference for LG-1 and LG-2 (VWC was not measured at the first date for LG-3). This could be explained by the spatial variability of that parameter which is more important than its temporal variability.

Backscatter coefficient analysis

The ratio change detection method was first applied to LG-3 as it presented the most important change in water table height. LG-1 was also analyzed for comparison as the water table was near the surface, although it changed of only 1 cm. LG-2 was not considered for change detection as the water table drop (1,8 cm on average) occurred mainly at 15 cm below the surface. Positive and negative signal changes may reflect the increase and the decrease of soil moisture, respectively. No signal change can be due to unchanged soil moisture or to the impossibility for the signal to reach the ground.

Regarding LG-3, it was expected to find mostly positive signal change as water table drop (see table 10a) may have led to lower soil moisture. The figure 8a illustrates the image obtained from the ratio between the images acquired on May 31st 2003 and August 11th 2003. We noted that the signal did not change for most sampling sites (60%). There was

also more negative than positive changes (28% and 12% respectively). However, when comparing that image with vegetation descriptions acquired along the transects and pictures taken at each point, it was observed that the signal changes are located in areas where black spruces are small and sparse or absent. On the other hand, no signal change was noticeable where black spruce buckets were dense and dominant. This indicates that areas of low density vegetation may have allowed the signal to reach the ground and re-emit information back to the sensor. Information was obtained from these low density vegetation areas, with regards to soil moisture, despite the large incidence angle and the small penetration depth of the signal in high VWC (mean of 44% during the second satellite overpass). Note that LG-3 sector received 1,5 mm of rain three hours before the satellite overpass. Wet branches, leaves and stems are very reflective and induce volume scattering and high backscatter (Ulaby, 1982). However, it seems that this small precipitation did not have an impact on radar signal as the latter did not change for most sampling sites. This may be explained by the time at which RADARSAT overpasses occurred (11:08 p.m. GMT), as vegetation was possibly covered by dew. Unfortunately, dew point was not provided with other meteorological data so we cannot confirm this hypothesis. Regarding LG-1, the figure 8b shows the image obtained from the ratio between the images acquired on June 23rd and August 27th of 2003. We observe that transect points mainly presented unchanged signal (38%), which can be explained by the low mean decrease in water table height (table 10b). Surprisingly, we also found an important proportion of positive signal change (30%) that may be due to numerous sampling sites (32%) characterized by a raise in water table (table 10b). Note that vegetation is low and trees are sparse all along the transects. Consequently, the signal may have reached the ground and detected soil moisture. Precipitations monitoring

stopped before the second RADARSAT overpass at LG-1. Therefore, we cannot conclude that the signal changes observed are exclusively linked to the peatland hydrological conditions.

Regarding pools, the overlap of main pools edges to the ratio image over LG-1 and LG-3 peatlands (Figure 8a and 8b) shows positive signal change, no signal change, and, more surprisingly, negative change. Positive change may be due to the observed drying out of the shallowest pools caused by the decrease of water level. Indeed, vegetation standing in water may cause corner reflection (Murphy *et al.*, 2001) and saturated or dry vegetation is more reflective than a water surface. It was also observed that deep pools were shrinking of few centimetres as the water table dropped. However, those changes are smaller than what the resolution of the captor allow to detect. This may explain that no signal change was observed in some areas. In the other hand, no negative changes (signal decrease) should be observed for pools as no features has a lower signal than water. This highlights the limits of such spatial analysis of signal changes and leads to consider these results with caution.

The observations made over LG-1 and especially LG-3 peatlands vegetated areas agree with Kasischke *et al.* (2003) who studied the effects of hydrological patterns in south Florida wetlands on ERS-2 SAR imagery (C-band). They observed that backscatter coefficients were positively correlated to field measurements of soil moisture even for VWC values higher than 40%. They also mentioned that forested wetlands with a dense canopy were not retained for their study because previous studies showed that they could not be monitored with ERS SAR for hydrological changes. As Fine-mode has incidence angles higher than ERS-2 (43-46° vs. 23°), it is certainly even more sensitive to vegetation and not able to detect soil moisture under a dense canopy. In the same way, Murphy *et al.*

(2001) used multi-temporal RADARSAT-1 data acquired in Standard-mode (S1-S7) to monitor subarctic wetlands. It was concluded that backscatter coefficient is more influenced by seasonal changes in wetland soil moisture than by incidence angle. These results indicate that radar would be sensitive to soil moisture conditions, independently of incidence angle, if wetlands present sparse and low vegetation.

Summary, recommendations and further work

The first objective of this study consisted in comparing a MLC classification of boreal peatlands using textures derived from multi-temporal Fine-mode images with a similar classification procedure over the same area, using textures obtained from multi-temporal images acquired in Standard-mode. The Fine-mode led to poorer classification results, having more misclassified pixels. Those results may be due to : (1) the presence of more speckle on Fine-mode images (due to the lower number of looks); (2) the similar ground conditions when Fine-mode images were acquired (late spring and summer), which was not the case for Standard-mode images (summer and winter); (3) the unique range of incidence angles of Fine-mode, which may have limited detecting soil under dense canopy, contrary to Standard-mode images which have two ranges of incidence angle; and (4) the better classification results obtained using speckle filtered images, although presenting lower class separability than texture, suggest that the method followed to obtained the best texture combination may not be optimal with similar class separability. Thus, we cannot conclude that Fine-mode is less adapted for boreal peatland mapping than Standard-mode. More studies need to be done using more Fine-mode images acquired during different ground conditions and seasons.

The second objective of this study was to define if changes in water table position and soil moisture had an effect on radar signal of images acquired in Fine-mode. No significant change in mean volumetric water content was observed due to its high spatial variability. However, significant change in water table height over time was observed for all sectors and more particularly at LG-3. The ratio change detection method applied over LG-1 and LG-3 peatland, although not well adapted to images having a low number of look(s), shows a difference in signal for areas presenting sparse and low spruces or no trees. This indicates that Fine-mode images, although having theoretical limitations (low incidence angle and a wavelength that would not penetrate the surface more than 1 cm for high soil moisture conditions), are sensitive to changes in hydrological conditions of peatlands, where vegetation is low and sparse. However, this is not the case for other areas (high or dense vegetation, pools). Obviously, more studies need to be done, using the speckle decorrelation in complement to the ratio method, and more Fine-mode images acquired in different hydrological conditions, to better understand how the signal is influenced by soil moisture changes.

From this study, we suggest for peatlands cartography : (1) a wide field study to characterise different land uses and to locate them with a GPS; (2) the acquisition of more images through the year to make sure to have a set of images that have been taken during different peatlands hydrological conditions; and (3) the integration of more classes from other wetland types. Concerning hydrological monitoring, we suggest : (1) a longer and continuous field campaign with the objective of having a complete overview of the water table changes over time; (2) the acquisition of more than three radar images and a simultaneous water table height monitoring in order to understand how hydrological conditions influence radar backscattering.

Finally, radar images acquired with cross-polarization should be taken into account as it showed better wetland discrimination than HH or VV polarization (Baghdadi *et al.*, 2001 and Bourgeau-Chavez *et al.*, 2001). RADARSAT-2, once launched, will provide this possibility. Furthermore, L-band radar images (30 cm), like the ones which will be available on the ALOS (2006) and HYDROS (planned) satellites, would certainly perform better for this specific application.

Acknowledgements

This research was funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC/RCE program) and Hydro-Québec. The first author got a graduate studies grant from the Fond Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT). The authors would like to thank Anne-Marie Demers for her collaboration, Michelle Garneau (UQAM) for her advice and research support, Alain Tremblay (Hydro-Québec) for the logistic support, Nigel Roulet (McGill) for his precious suggestions regarding the field work and Karl Guillotte (INRS-ETE) for field assistance. We also thank anonymous reviewers of this manuscript.

References

Arzandeh, S. and Wang, J. 2002. Texture evaluation of RADARSAT imagery for wetland mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, pp. 653-666.

Augusteijn, M.F. and Warrender, C.E. 1998. Wetland classification using optical and radar data and neural network classification. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, pp. 1545-1560.

Baghdadi, N., Bernier, M., Gauthier, R. and Neeson, I. 200. Evaluation of C-band SAR data for wetlands mapping. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22, pp. 71-89.

Bernier, M., Ghedira, H., Gauthier, Y., Magagi, R., Filion, R., De Sève, D, Ouarda, T., Villeneuve, J.-P., and Buteau, P. 2003. Détection et classification de tourbières ombrotrophes du Québec à partir d'images RADARSAT-1. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, pp. 88-98.

Bourgeau-Chavez, L L, Kasischke, E S., Brunzell, S. M., Mudd, J. P., Smith, K. B. and Frick, A. 2001. Analysis of space-borne SAR data for wetland mapping in Virginia riparian ecosystems. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 2, pp. 3665-3689.

Brisco, B. and Pultz, T. 1998. Wetland mapping and monitoring with RADARSAT. *Proceedings of the 20th Canadian Symposium on Remote Sensing,* Calgary, Alberta, May 11th-14th.

Cihlar, J. and Tarnocai, C. 2000. Wetlands of Canada and Climate Change: Observation Strategy and Baseline Data, Report of a Workshop, Ottawa, January 24th-25th, 63 p.

Congalton, R.G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 37, pp. 35-46.

Demers, A.-M. 2005. *Classification des tourbières boréales à l'aide d'images*

RADARSAT-1 pour une portion du bassin versant de la rivière La Grande, Baie James, Québec. M.Sc. Thesis in Geography. Université du Québec à Montréal, Montréal, 283 p.

Frolking, S., Roulet, N.T., Moore, T.R., Lafleur, P.M., Bubier, J.L. and Crill, P.M. 2002. Modeling seasonal to annual carbon balance of Mer Bleue Bog, Ontario, Canada. *Global biogeochemical cycles*, Vol.16, pp. 4-21.

Garneau, M., Bernier, M., Warner, B.G., Ménard, É. Gauthier, Y., Kettles, I., Bourque, A., Lam, K.-H., and Paradis, S. 2001. *Évaluation de l'impact du changement climatique sur les écosystèmes tourbeux du Québec septentrional*, Final report No R-594, INRS-ETE et Ressources naturelles Canada (Fond d'Action au Changement Climatique- Projet A279), 58 p.

Ghedira, H. 2002. *Utilisation des réseaux de neurones pour la cartographie des milieux humides à partir d'une série temporelle d'images RADARSAT-1.* Ph.D thesis in Water sciences. INRS-Eau, Sainte-Foy, 184 p.

Gorham, E. 1991. Northern peatlands; Role in the carbon cycle and probable response to climatic warming. *Ecological Applications*, Vol. 1, pp. 182-195.

Henderson, F.M. and Lewis, A.J. (Editors). 1998. *Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing, Third Edition, Volume 2.* Jonh Wiley & sons, Inc., New York, 811 p.

Kandus, P., Karszenbaum, H., Pultz, T., Parmuchi, G. and Bava, J. 2001. Influence of flood conditions and vegetation status on the radar backscatter of wetland ecosystems. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, pp. 651-662.

Kasischke, E.S., Smith, K.B., Bourgeau-Chavez, L.L., Romanowicz, E.A., Brunzell, S., and Richardson, C.J. 2003. Effects of seasonal hydrologic patterns in south Florida wetlands on radar backscatter measured from ERS-2 SAR imagery. *Remote Sensing of*

Environment, Vol. 88, pp. 423-441.

Milne, A.K., Horn, G. and Finlayson, M. 2000. Monitoring wetlands inundation patterns using RADARSAT multitemporal data, *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, pp. 133-142.

Moore, T.R., Roulet, N.T. and Waddington, J.M. 1998. Uncertainty in predicting the effect of climatic change on the carbon cycling of canadian peatlands. *Climatic Change*, Vol. 40, pp. 229-245.

Mullins, D.W., Leconte, R. and Protz, R. 1991. Estimation of northern wetlands production using remote sensing techniques. *Proceedings of the 14th Canadian Symposium on Remote Sensing,* Calgary, Alberta, May 6th-10th, pp. 244-247.

Murphy, M., Martini, I.P., and Protz, R. 2001. Seasonal changes in subarctic wetlands and river ice breakup detectable on RADARSAT images, Southern Hudson Bay lowland, Ontario, Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, pp. 143-158.

The National Wetlands Working Group. 1998. *The Canadian Wetland Classification System.* Wetlands Research Center, Waterloo, 68 p.

Ozesmi, S.L. and Bauer, M. 2002. Satellite remote sensing of wetlands", *Wetlands Ecology and Management*, Vol. 10, pp. 381-402.

Parmuchi, M.G., Karzenbaum, H., and Kandus, P. 2002. Mapping wetlands using multi-temporal RADARSAT-1 data and a decision-based classifier. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, pp. 175-186.

Payette, S. and Rochefort, L. 2001. *Écologie des tourbières du Québec-Labrador.* Les Presses de l'Université Laval, Sainte-Foy, 621 p.

PCI Geomatics. 2004. *Geomatica 9 (technical specifications).*

Poulin, M., Careau, D., Rochefort, L. and Desrochers, A. 2002. From satellite imagery to

peatland vegetation diversity : how reliable are habitat maps ?. *Conservation Ecology*, Vol. 6. ART. 16.

Richards, J.A. (Editor). 1986. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer-Verlag, New York.

Rignot, Eric J.M. and van Zyl, Jakob, J. 1993. Change detection techniques for ERS-1 SAR data. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 31, pp. 896-906.

Roulet, N.T. 2000. Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto protocol : prospects and significance for Canada. *Wetlands*, Vol. 20, pp. 605-615.

Thomas, V., Treitz, P., Jelinski, D., Miller, J., Lafleur, P. and McCaughey, J.H. 2002. Image classification of a northern peatland complex using spectral and plant community data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 84, pp. 83-99.

Townsend, P.A. 2002. Relationships between forest structure and the detection of flood inundation in forested wetland unsing C-band SAR. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, pp. 443-460.

Töyrä, J., Pietroniro, A., Martz, L.W. and Prowse, T.D. 2002. A Multi-Sensor Approach to Wetland Flood Monitoring. *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 1569-1581.

Tso, B. and Mather, P.M. (Editors). 2001. *Classification methods for remotely sensed data.* Taylor and Francis, New York, 332 p.

Ulaby, F.T., Moore, R.K., and Fung, A.K. (Editors). 1982. *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Volume II, Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory.* Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 607 p.

Wakebayashi, H. and Arai, K. 1996. A new method for speckle noise reduction (CST filter). *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 22, pp. 190-197.

Wang, J., Shang, J., Brisco, B., and Brown, R.J. 1998. Evaluation of multidate ERS-1 and

multispectral LANDSAT imagery for wetland detection in southern Ontario. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, pp. 60-69.

Table 1. Image acquisition information

Year	Peatland	Acquisition date	Orbit
2002	La Grande-2	August 15th	Ascendant
2003	La Grande-1	June 23rd	Ascendant
		August 27th	Ascendant
	La Grande-2	June 16th	Ascendant
		September 3rd	Ascendant
	La Grande-3	May 31st	Descendant
		August 11th	Descendant

Table 2. Two sets of land uses defined for classifications

10 land uses	4 land uses
Pools low density	Opened peatland
Pools high density	
Pools and strings	
Stringed peatland	
Uniform peatland	
Forested peatland	Forested peatland
Water	Water
Forest on mineral	Mineral
Bare surface	
Other	

Table 3. Number of pixels composing training (Tr) and testing (Te) sites

Nb of classes	Classes	Number of Pixels (Tr)	Number of Pixels (Te)
10	Pools low density	3 121	4 305
	Pools high density	3 156	4 589
	Forested peatland	3 319	3 635
	Pools and strings	5 261	7 178
	String peatland	3 659	5 163
	Uniform peatland	6 620	7 017
	Water	15 397	21 017
	Forest on mineral	17 510	22 024
	Bare surface	16 645	25 231
	Other	19 433	23 925
4	Opened peatland	21 817	28 252
	Forested peatland	3 319	3 635
	Water	15 397	21 017
	Mineral	53 588	71 180

Table 4. Mean values of volumetric water content (VWC) and water table height monitored at the same time as RADARSAT-1 overpasses, for the three peatlands

Peatland	RADARSAT-1 overpasses (2003)	Water table height (cm)		VWC (%)	
		Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
LG-1	June 23th	-1,29 *	2,38	63	20
	August 27th	-2,31	5,11	65	21
LG-2	June 16th	-18,36 *	9,33	44	22
	September 3rd	-16,57	8,49	42	27
LG-3	May 31st	-9,28 *	4,52	n/a	n/a
	August 11th	-15,68	4,74	44	27

* Significantly different (paired *t*-test)

Table 5. Error matrix of MLC classification over speckle filtered images where a) = 10 land uses b) = 4 land uses.

a)

	NULL	PLD	PHD	FP	S&P	S	U	W	F	BS	O	TOTAL
PLD	0	63,4	3	0	4,1	10	**14,4**	0	0,2	0,5	4,3	100
PHD	0	**44,6**	33,8	0,3	6,8	4,4	4,9	0	0,3	1	3,9	100
FP	0,5	0,3	0	56,7	0	**15,3**	8,4	0	12,2	2,9	3,7	100
S&P	0	**33,8**	**15,2**	4,6	5,5	**19,3**	**13,1**	0,1	0,9	1,1	6,4	100
S	0	**15,4**	0	**14,6**	0,6	34,3	**23,3**	0	5,4	0,2	6,3	100
U	0	**27,1**	0	9,3	2,1	**24,6**	28	0	5,1	0,4	3,4	100
W	0,1	0	6,9	0	0	0	0	92,5	0	0,5	0	100
F	0,5	2,1	0	**38,4**	0,2	**22,9**	**14,3**	0	10,3	6	5,3	100
BS	5,9	**12,3**	**41,7**	9,6	1,7	**9,8**	7,7	0,1	3,1	4,9	3,2	100
O	0,4	10	2,4	**18,4**	2,5	17	5,8	0	5,6	4,4	33,5	100

Overall accuracy = 33,38%

PLD: Pools low density
PHD: Pools high density
FP: Forested peatland
S&P: Strings and pools
S: Stringed peatland
U: Uniform peatland
W: Water
F: Forest
BS: Bare surface
O: Other

b)

	NULL	OP	FP	W	M	TOTAL
OP	0	82,7	16,1	0	1,3	100
FP	0	1,9	97,6	0	0,5	100
W	0,2	0	0	96,4	3,5	100
O	3,2	35,9	43,1	0	17,8	100

Overall accuracy = 48,22%

OP: Opened peatland
FP: Forested peatland
W: Water
M: Miner

Table 6. Correlation between textures generated for LG-2 sector

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1,00																	
2	-0,94	1,00																
3	-0,92	0,94	1,00															
4	-0,95	0,96	0,93	1,00														
5	0,98	-0,91	-0,91	-0,95	1,00													
6	**-0,06**	**0,01**	**0,04**	**0,25**	**-0,15**	1,00												
7	0,97	-0,92	-0,93	-0,95	0,97	**-0,11**	1,00											
8	-0,90	0,91	0,93	0,91	-0,89	**0,10**	-0,95	1,00										
9	-0,89	0,91	0,96	0,90	-0,87	**0,04**	-0,92	0,95	1,00									
10	-0,92	0,92	0,91	0,96	-0,93	**0,23**	-0,96	0,96	0,92	1,00								
11	0,96	-0,91	-0,91	-0,95	0,97	**-0,16**	0,98	-0,91	-0,89	-0,95	1,00							
12	**-0,16**	**0,17**	**0,08**	**0,30**	**-0,21**	**0,56**	**-0,13**	**0,10**	**0,07**	**0,33**	**-0,22**	**1,00**						
13	0,94	-0,90	-0,90	-0,91	0,95	**-0,09**	0,94	-0,88	-0,87	-0,90	0,94	**-0,14**	1,00					
14	-0,91	0,92	0,92	0,92	-0,90	**0,11**	-0,91	0,89	0,89	0,90	-0,90	**0,17**	-0,93	1,00				
15	-0,91	0,93	0,99	0,92	-0,89	**0,04**	-0,92	0,92	0,96	0,90	-0,89	**0,09**	-0,90	0,92	1,00			
16	-0,94	0,93	0,92	0,97	-0,94	**0,22**	-0,94	0,90	0,89	0,95	-0,94	**0,30**	-0,93	0,96	0,92	1,00		
17	0,93	-0,87	-0,87	-0,90	0,95	**-0,13**	0,93	-0,86	-0,84	-0,89	0,94	**-0,18**	0,96	-0,89	-0,87	-0,93	1,00	
18	**-0,08**	**0,09**	**0,04**	**0,20**	**-0,12**	**0,43**	**-0,08**	**0,08**	**0,04**	**0,21**	**-0,13**	**0,53**	**0,01**	**-0,05**	**0,05**	**0,21**	**-0,11**	**1,00**

1: Homogeneity - August 15th, 2002
2: Contrast - August 15th, 2002
3: Mean - August 15th, 2002
4: Standard deviation - August 15th, 2002
5: Second angular moment - August 15th, 2002
6: Correlation - August 15th, 2002
7: Homogeneity - June 16th, 2003
8: Contrast - June 16th, 2003
9: Mean - June 16th, 2003
10: Standard deviation - June 16th, 2003
11: Second angular moment - June 16th, 2003
12: Correlation - June 16th, 2003
13: Homogeneity - September 3rd, 2003
14: Contrast - September 3rd, 2003
15: Mean - September 3rd, 2003
16: Standard deviation - September 3rd, 2003
17: Second angular moment - September 3rd, 2003
18: Correlation - September 3rd, 2003

Table 7. Optimal textures combination found with Channel Selection tool

Nb of land uses	# channels	Textures											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	2						✓	✓					
10	3						✓	✓	✓				
	4						✓	✓	✓				✓
	2			✓					✓				
4	3	✓		✓					✓				
	4	✓	✓	✓					✓				

1: August 15th, 2002: contrast
2: August 15th, 2002: angular second moment
3: August 15th, 2002: correlation
4: June 16th, 2003: contrast
5: June 16th, 2003: mean
6: June 16th, 2003: standard deviation
7: June 16th, 2003: correlation
8: September 3rd, 2003: homogeneity
9: September 3rd, 2003: contrast
10: September 3rd, 2003: mean
11: September 3rd, 2003: angular second moment
12: September 3rd, 2003: correlation

Table 8. Error matrix of MLC classification using the best combination of textural images with 10 land uses where a) = Fine-mode (Contrast and Correlation from June 16th, 2003) and b) = Standard-mode (Contrast from August 18th, 2002 (S7) and mean from February 26th, 2002 (S7), August 12th, 2002 (S1) and August 18th, 2002 (S7)).

a)

	NULL	PLD	PHD	FP	S&P	S	U	W	F	BS	O	TOTAL
PLD	0	6,6	0	**9,4**	6,3	**23,1**	**33,2**	0	5,7	0	**15,7**	100
PHD	0	10,2	20,9	2,3	**33,2**	4,9	7,9	0	10,9	8,9	0,7	100
FP	0	5,1	0	44,4	0,8	16,2	6,6	0	**26,3**	0,5	0,1	100
S&P	0	8,6	17	**16**	14,5	11,2	**21,8**	0	6,5	1,7	2,6	100
S	0	6,8	0	**17,4**	3,8	29,3	**30,9**	0	7	0,4	4,5	100
U	0	5,7	0	**23,1**	2,4	**34,2**	24,8	0	5,3	0	4,5	100
W	5	0	0,3	0	0	0	0	94,7	0	0	0	100
F	0,2	3,9	0,1	**39,8**	1,7	**14,7**	11,9	0	21,8	5,5	0,3	100
BS	**15,2**	2,5	**14,8**	7,4	12,2	6,2	8,9	0	5,5	13	**14,3**	100
O	0,1	5	0,9	**16,8**	2,9	7,4	**14,2**	0	13,7	5,3	33,8	100

Overall accuracy = 34,83%

b)

	NULL	PLD	PHD	FP	S&P	S	U	W	F	BS	O	TOTAL
PLD	0,2	81,7	7,1	0	3,5	1,3	6,2	0	0	0	0	100
PHD	0,7	**30,7**	35	0	**32,9**	0	0,2	0	0	0,5	0	100
FP	4,4	0	0	73,1	0	0	**9,6**	0	**8,6**	0,8	3,5	100
S&P	2	**23,3**	8,2	0,1	45,2	6,8	11,3	0	0,1	3,1	0	100
S	2,9	4,8	0,2	9,5	0,7	44,8	**37**	0	0,2	0	0	100
U	1,7	**18,7**	0,2	4,6	5,1	**28,6**	39,9	0	0,2	0,9	0	100
W	**11,9**	0	0	0	0	0	0	88	0	0,1	0	100
F	0	0	0	**16,8**	0	0	0	0	69,2	5,6	8,4	100
BS	**31,1**	0	7,4	5,9	0	0	1,6	0,1	**22,1**	30	1,8	100
O	3	0	0	4,7	0	0	0	0	**26,5**	7,5	58,3	100

(Demers, 2005)

Overall accuracy = 59,24%

PLD: Pools low density
PHD: Pools high density
FP : Forested peatland
S&P: Strings and pools
S: Stringed peatland
U : Uniform peatland
W : Water
F : Forest on mineral
BS : Bare surface
O : Other

Table 9. Error matrix of MLC classification using the best combination of textural images with 4 land uses where a) = Fine-mode (Contrast, Angular second moment and Correlation from August 15th, 2002 and Homogeneity from September, 3rd, 2003) and b) = Standard-mode (Contrast from August 18th, 2002 (S7) and mean from February 26th, 2002 (S7), August 12th, 2002 (S1) and August 18th, 2002 (S7)).

a)

	NULL	OP	FP	W	M	TOTAL
OP	1,4	61,7	**34,8**	0	2,1	100
FP	0,9	**13,3**	82,1	0	3,7	100
W	4	0	0	96	0	100
M	**17,8**	**25,1**	**50,3**	0	6,8	100

Overall accuracy = 36,62%

b)

	NULL	OP	FP	W	M	TOTAL
OP	3,1	91	5,4	0	0,6	100
FP	4,1	5,7	82,7	0	**7,5**	100
W	**12,2**	0	0	87,8	0	100
M	**17,6**	0,7	**21,1**	0	60,5	100

(Demers, 2005)

Overall accuracy = 74,02%

OP: Opened peatland
FP: Forested peatland
W: Water
M: Mineral

Table 10. a) Water table height measured at each transect points over LG-3 peatland at the same time as RADARSAT overpasses (May 31st and August 11th of 2003).

Transect	Transect point	Water table height (cm)		Increase or decrease	Change (cm)
		May 31st	August 11th		
T1	1	n/a	n/a	n/a	n/a
	2	n/a	n/a	n/a	n/a
	3	n/a	n/a	n/a	n/a
	4	-6	-15	↓	9
	5	-2,5	-11	↓	8,5
	6	-7,5	-9,5	↓	2
	7	-9	-16	↓	7
	8	-12	-18	↓	6
	9	-1,5	-8,5	↓	7
	10	-7	-12,5	↓	5,5
	11	-2,5	-9	↓	6,5
	12	-20	-21	↓	1
	13	-7	-13	↓	6
	14	-5,5	-13	↓	7,5
	15	-7	-11	↓	4
	16	-10,5	-15	↓	4,5
	17	-12	-16	↓	4
	18	-7	-10	↓	3
	19	-11	-13	↓	2
	20	-10,5	-17,5	↓	7
	21	-8	-17	↓	9
	22	-8	-16,5	↓	8,5
	23	-7	-17,5	↓	10,5
T2	1	-10	-18,5	↓	8,5
	2	-18	-26	↓	8
	3	-17	-23	↓	6
	4	-11	-19	↓	8
	5	-13	-20,5	↓	7,5
	6	-6	-14	↓	8
	7	-12	-19	↓	7
	8	-17	-25	↓	8
	9	-11	-18	↓	7
	10	-9,5	-15	↓	5,5
	11	0	-9	↓	9
	12	-11,5	-17	↓	5,5
	13	-6	-14	↓	8
	14	-12	-15	↓	3
Mean		-9,28	-15,68	↓	6,40

b) Water table height measured at each transect points over LG-1 peatland at the same time as RADARSAT overpasses (June 23rd and August 27th of 2003).

Transect	Transect point	Water table height (cm)		Increase or decrease	Change (cm)
		June 23rd	August 27th		
T1	1	-9,5	-14	↓	4,5
	2	-3	-6	↓	3
	3	-1,5	-2,5	↓	1
	4	-0,5	-4,5	↓	4
	5	-1	0	↑	1
	6	-3	-9	↓	6
	7	-7,5	-12	↓	4,5
	8	2,5	1	↑	1,5
	9	-1	1,5	↓	2,5
	10	1,5	0	↓	1,5
	11	-1	-2,5	↓	1,5
	12	-0,5	1	↑	1,5
	13	-0,5	-2,5	↓	2
	14	4	2,5	↑	1,5
	15	1	-1	↓	2
	16	1	1	=	0
	17	-2	-3	↓	1
T2	1	-4	-2,5	↑	1,5
	2	-3,5	-3,5	=	0
	3	-4	-1,5	↑	2,5
	4	-4	-3,5	↑	0,5
	5	-1,5	-4	↓	2,5
	6	-0,5	0	↑	0,5
	7	-3	-5	↓	2
	8	3	5	↑	2
	9	1,5	0	↓	1,5
	10	1	3	↑	2
	11	0	-1	↓	1
	12	0	-3,5	↓	3,5
	13	1	1,5	↑	0,5
	14	-1,5	-4,5	↓	3
	15	-7,5	-11	↓	3,5
	16	1	0	↓	1
	17	0,5	0	↓	0,5
	18	-2,5	-0,5	↑	2
Mean		-1,29	-2,31	↓	1,97

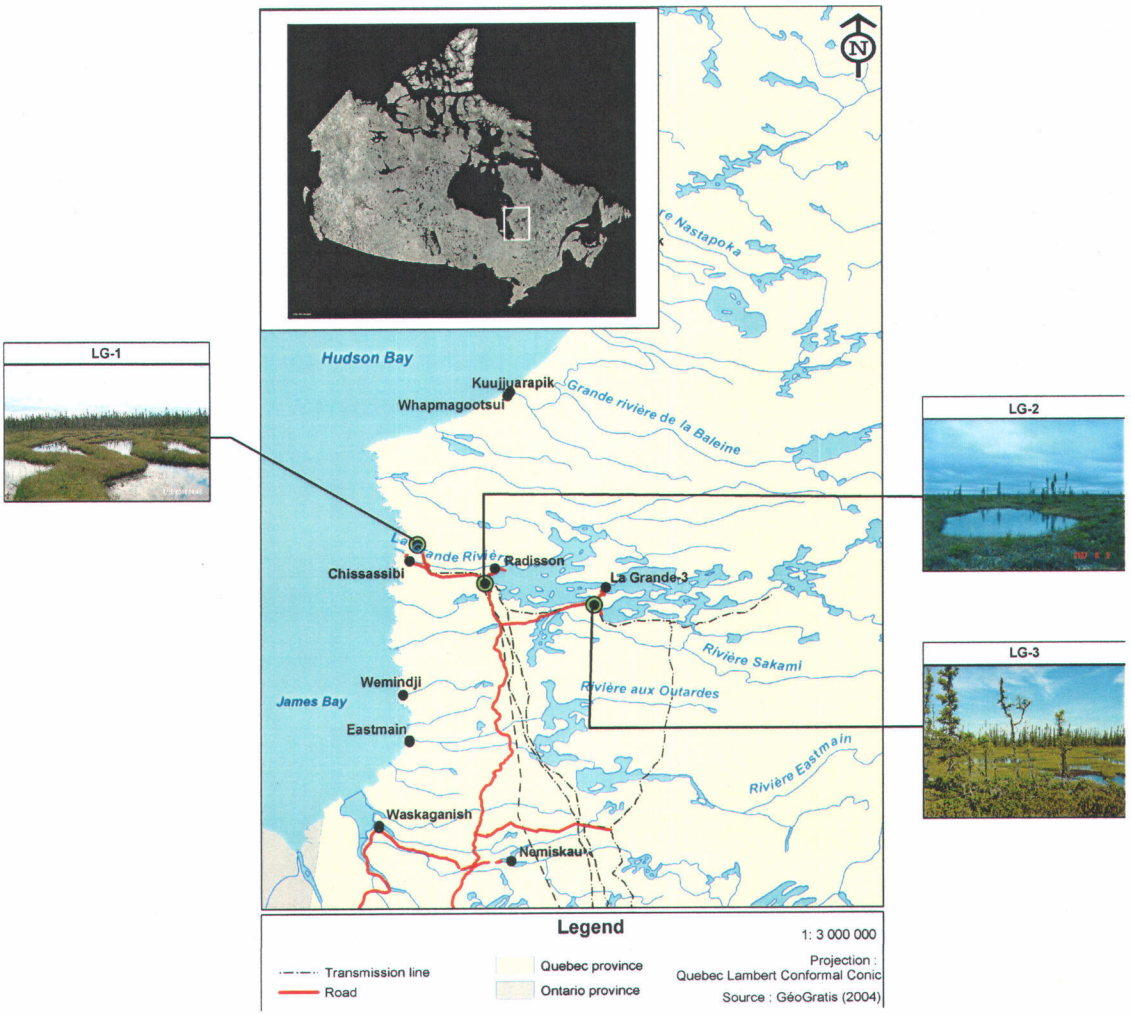


Figure 1. Location map of the three study sites, La Grande River watershed, Quebec, Canada.

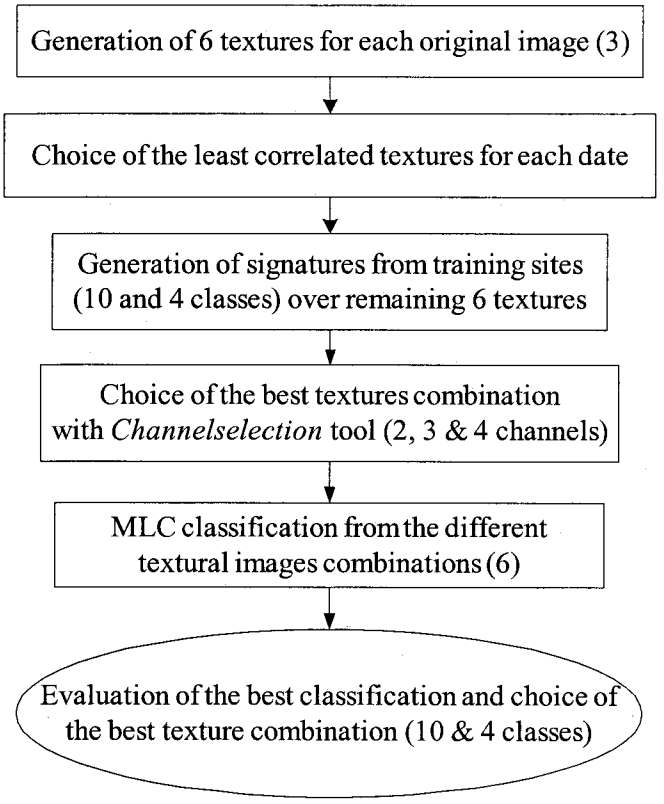


Figure 2. Method followed for MLC classification using textures.

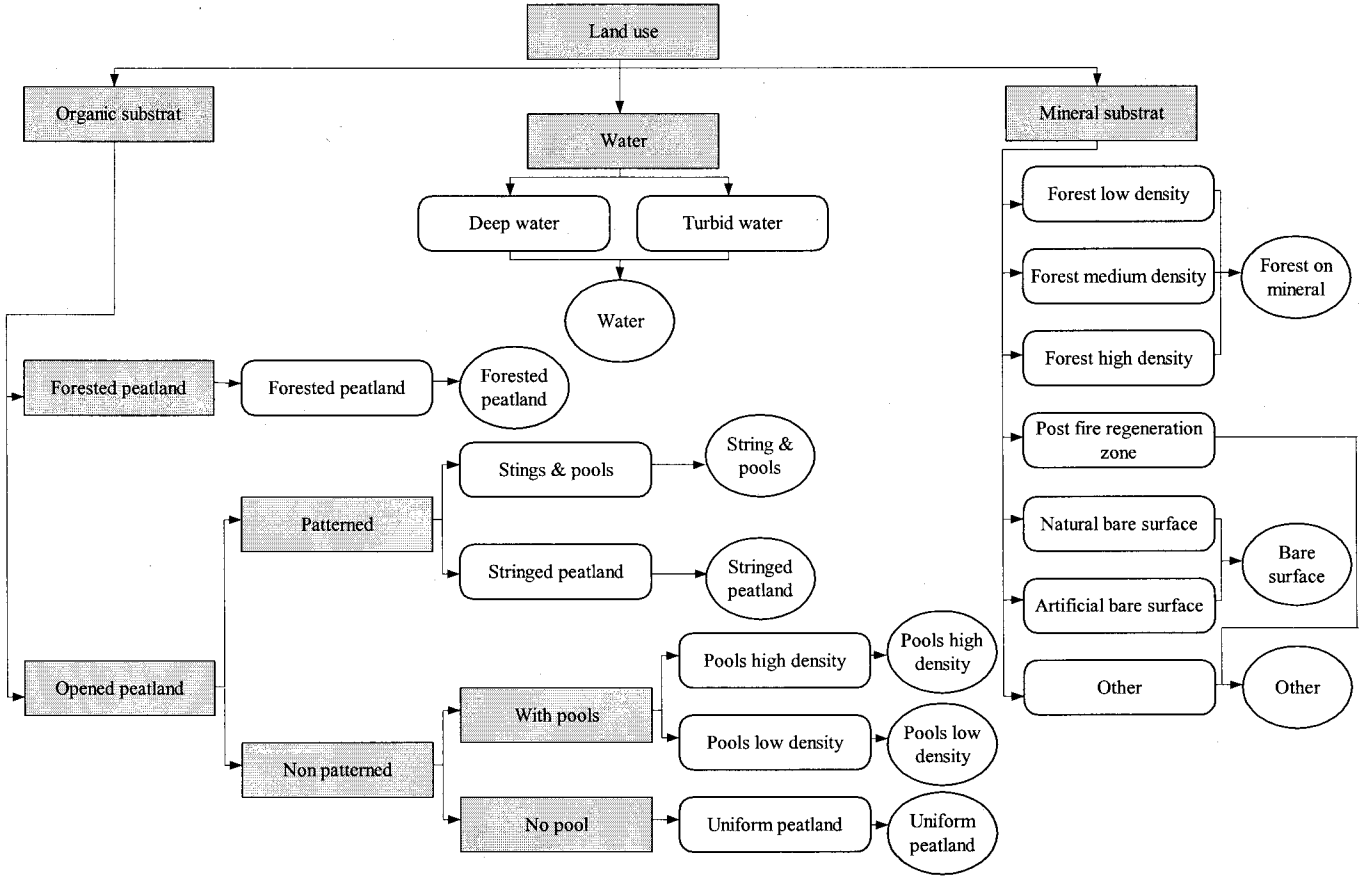


Figure 3. Classification scheme: rounded rectangles = 15 original classes and ellipses = 10 classes used in that study (Adapted from Demers, 2005).

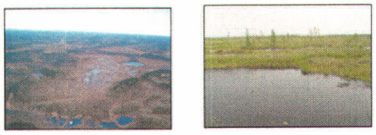
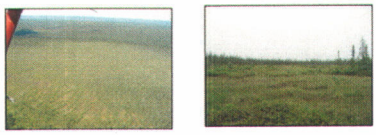
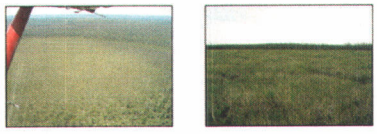
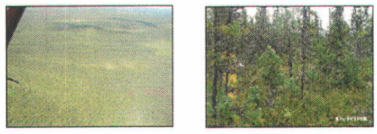
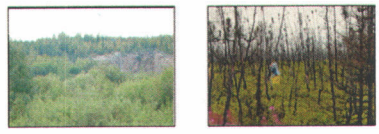
Classes	Description	Pictures
Pools low density	Peatland covered by 25% to 50% of pools, with varing forms and sizes, with a dept >1 m, separated by hummocks and vegetation plateaus	
Pools high density	Peatland composed of more than 51% of pools, with varing forms and sizes, with a dept >1 m, separated by hummocks and vegetation plateaus	
Strings & pools	Succession of strings and pools that are well or poorly patterned. Pools are generally shallow (< 50 cm).	
Stringed peatland	Alternation of srtings and vegetated hollows.	
Uniform peatland	Peatland dominated by shrubs and herbaceous vegetation. Sometimes threes and pools are present (<25%).	
Forested peatland	Peatlands covered by more than 25% of threes.	
Water	Water found outside of peatlands (lakes, rivers and reservoirs)	
Forest on mineral	Forest (>25%) covering mineral substrat	
Bare surface	Artifical or natural bare surface: roads and buildings, glacial deposits and rocks, sometimes covered by vegetation (<25%).	
Other	Mineral areas covered by deciduous threes and shrubs. Found on river banks and areas that have been perturbated by human. Also includes post fire regeneration zones.	

Figure 4. Description of the 10 classes used (Adapted form Demers 2005).

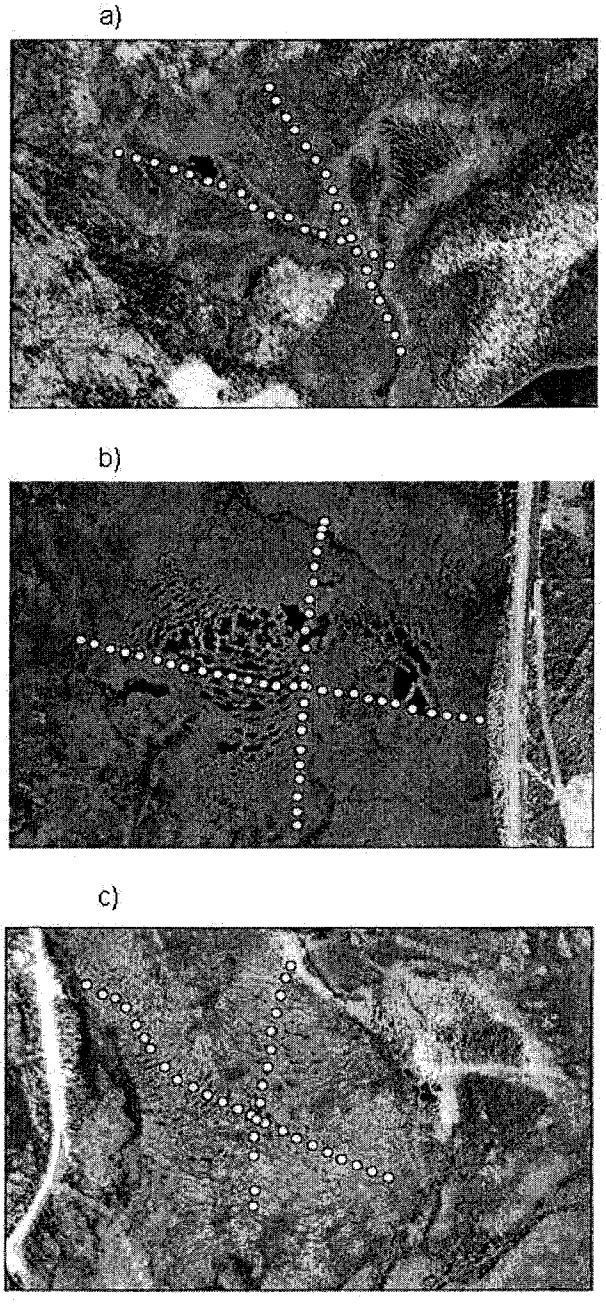
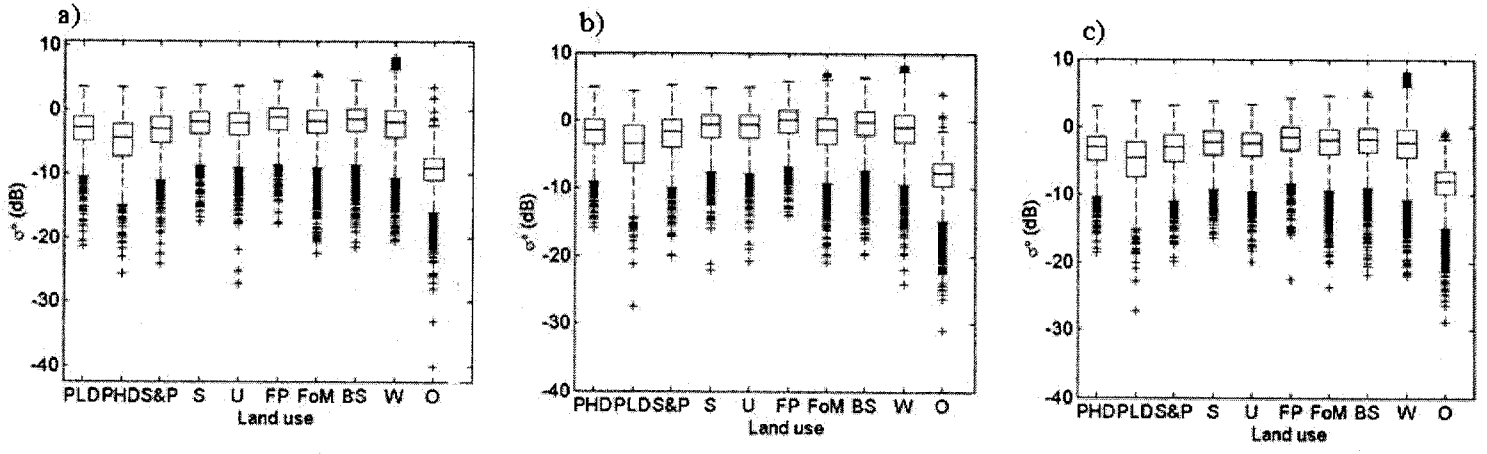


Figure 5. Location of transects within each peatland: a) LG-1 peatland, b) LG-2 peatland and c) LG-3 peatland (Source: Hydro-Québec, 1982).



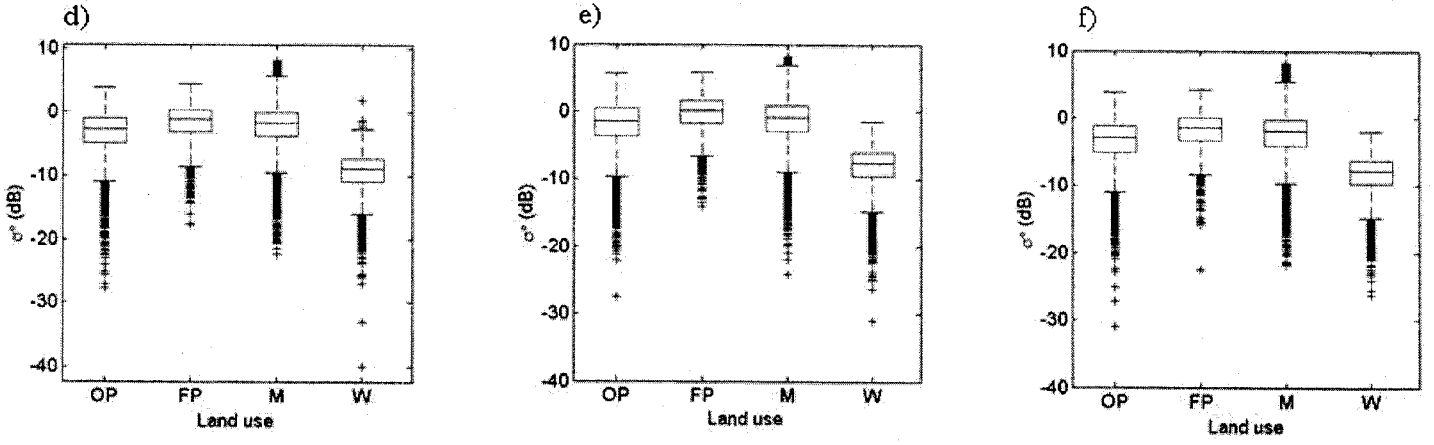


Figure 6. Mean radar backscattering (dB) of pixels composing training areas (10 land uses : a), b) and c) & 4 land uses : d), e) and f)) for the three acquisition dates (a) and d) : August 15th, 2002, b) and e) : June 16th, 2003 and c) and f) : September 3rd, 2003).

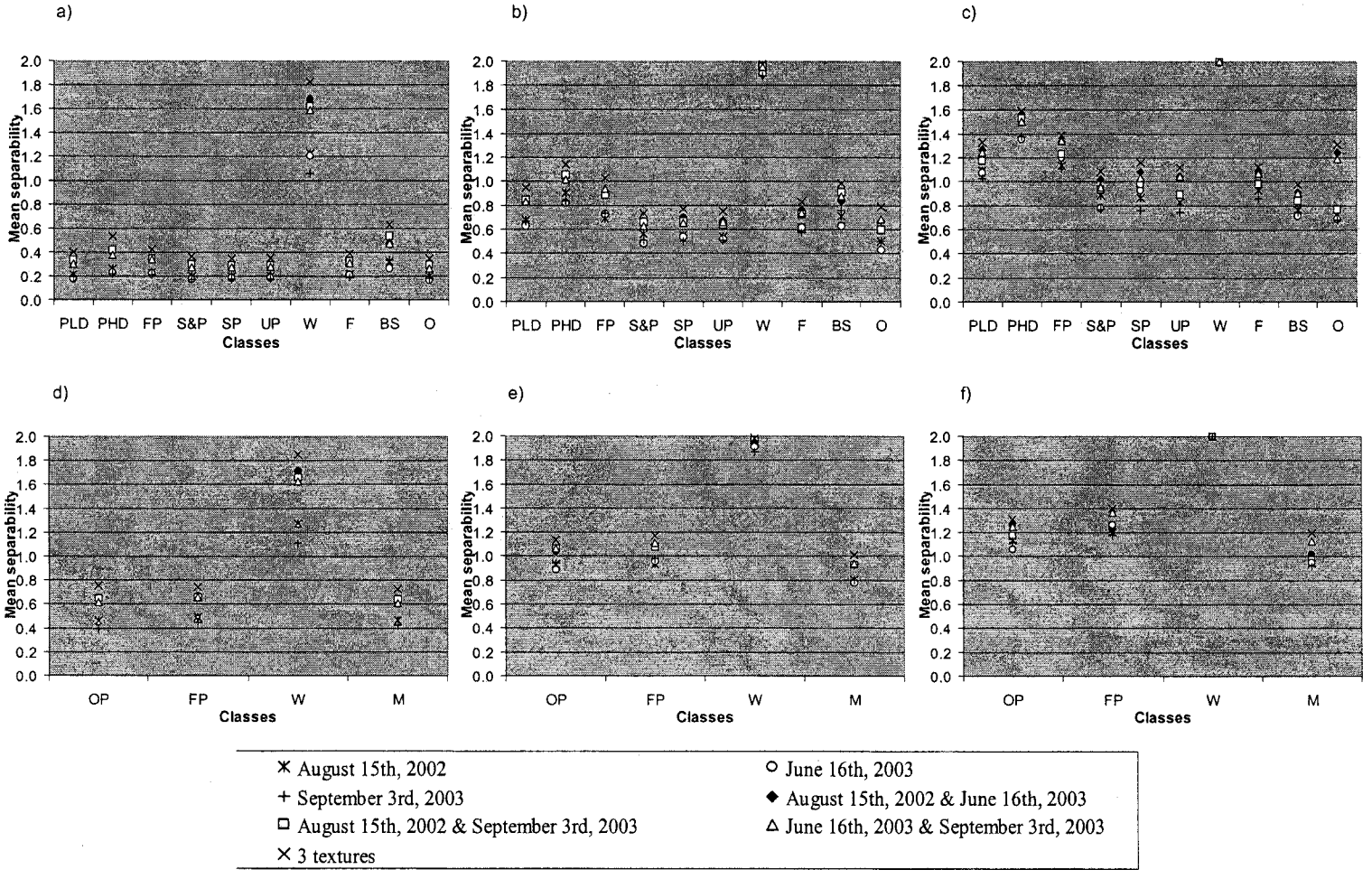
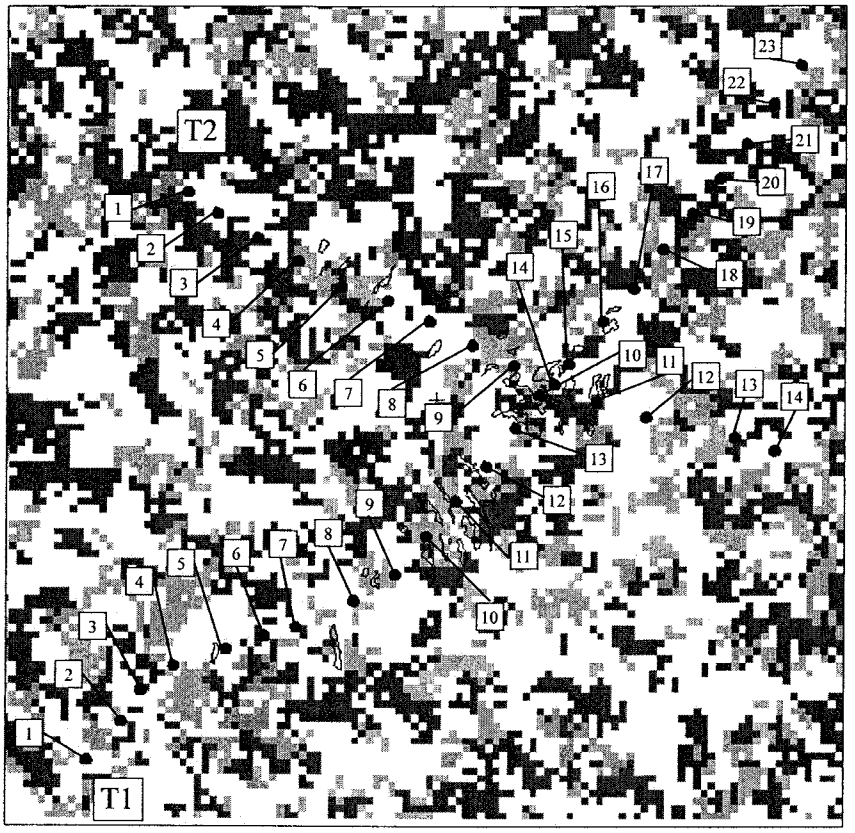


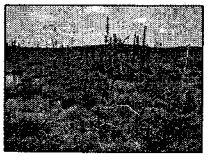
Figure 7. Mean separability between classes using the Bhattacharrya distance: a), b) and c) : 10 land uses (PLD : Pools low density, PHD : Pools high density, S&P : Stings and pools, SP : Stringed peatland, UP : Uniform peatland, FP : Forested peatland, W : water, F : Forest on mineral, BS : Bare surface, O : Other) and d), e) and f) : 4 land uses (OP : Opened peatland, FP : Forested peatland, W : Water and M : Mineral); a) and d) : raw images, b) and e : filtered images and c) and f) : texture mean.



No change (<2 dB) Negative changes Positive changes • Transect point Pools edges

Dense tree cover (T2-7)

Low shrubs and sparse trees (T1-11)



Low shrubs (T1-13)

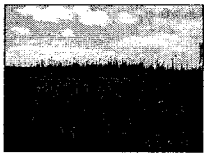


Figure 8. a) Image (dB) resulting from a change detection using the ratio method over LG-3 peatland using images acquired on May 31st and August 11th of 2003.

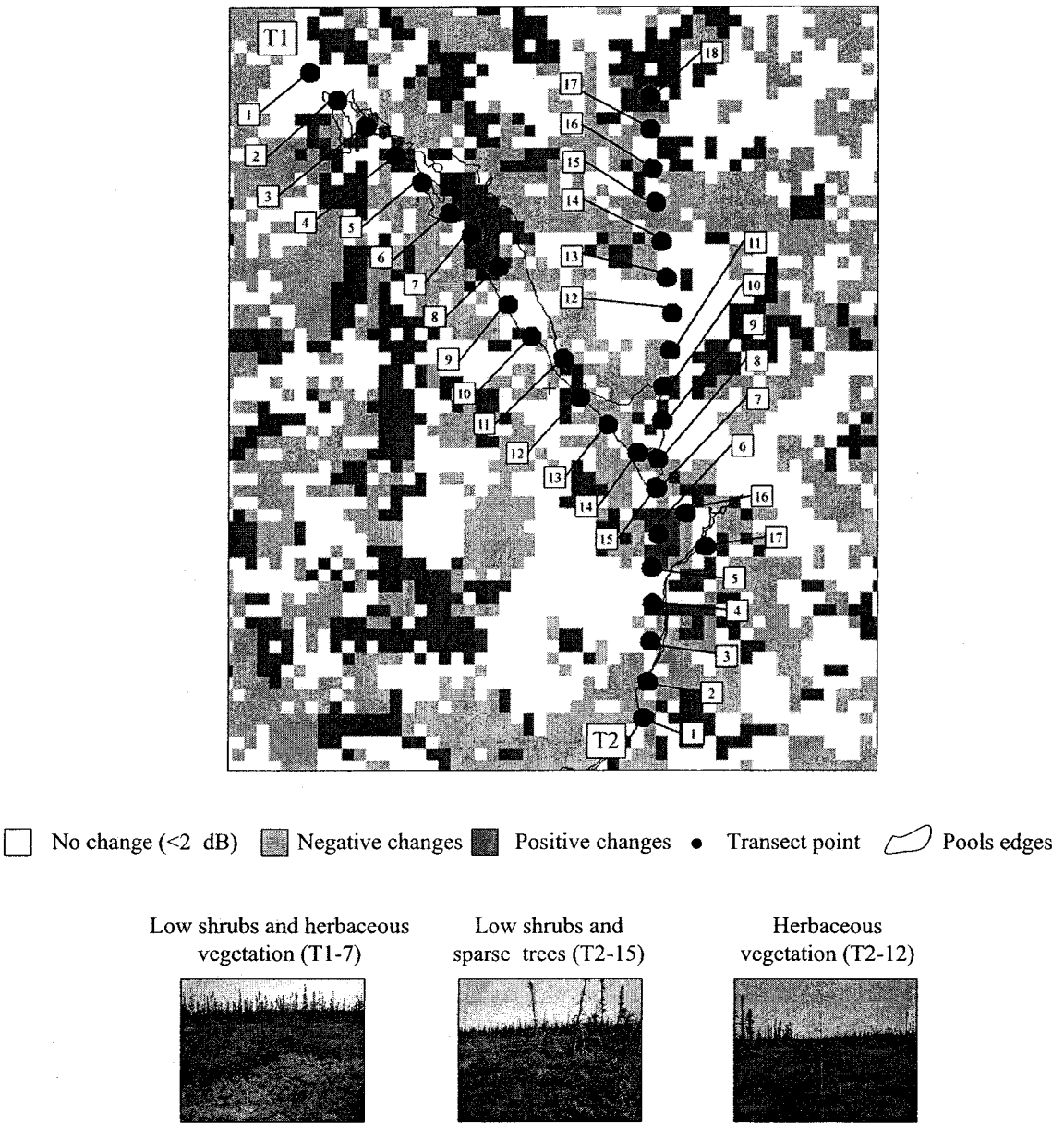


Figure 8. b) Image (dB) resulting from a change detection using the ratio method over LG-1 peatland using images acquired on June 23rd and August 27th of 2003.