

Université du Québec
Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

**CHANGEMENTS DE LA STRUCTURE SPATIALE DES TOURBIÈRES
DU COMPLEXE LAGRANDE DEPUIS CINQUANTE ANS OBSERVÉS
AU MOYEN D'IMAGES SATELLITAIRES PANCHROMATIQUES À TRÈS
HAUTE RÉOLUTION ET DE PHOTOS AÉRIENNES**

Par
Maria DISSANSKA

Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph.D)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation :

Examineur externe :	Michelle GARNEAU, UQAM
Examineur externe :	Richard FOURNIER, Université de Sherbrooke
Examineur interne :	Karem CHOKMANI, INRS-ETE
Directrice de thèse :	Monique BERNIER, INRS-ETE
Codirecteur de thèse :	Serge PAYETTE, Université Laval



À mon père



RÉSUMÉ

Plusieurs tourbières minérotrophes structurées du secteur nord-est du bassin versant de la rivière La Grande (Québec, Canada) montrent des signes de perturbation hydrologique récente. La dégradation de lanières de végétation, l'expansion des mares, la mort des arbres et des arbustes le long de leur bordure, et les médaillons de végétation au milieu de certains lacs suggèrent une hausse récente de la nappe phréatique régionale. Le processus de dégradation du couvert végétal dans les tourbières et leur transformation en écosystèmes aquatiques causés par l'augmentation du niveau d'eau a été nommé « aqualyse ».

Un des indices du phénomène d'aqualyse est le changement du rapport de l'étendue des compartiments terrestres et aquatiques des tourbières. Un changement de la structure des tourbières pourrait modifier leur régime d'écoulement et ainsi avoir un impact sur le cycle du carbone. Cependant, malgré la valeur écologique de tourbières, peu de données existent sur la couverture relative des mares et du couvert végétal et leur développement corrélatif au fil du temps. En raison de la longue période de temps pour l'initiation et le développement des mares, des observations directes sont rares et les informations disponibles proviennent de l'analyse stratigraphique et paléohydrologiques. Alors, une meilleure connaissance de la dynamique des tourbières contribuera à une prévision efficace des effets du changement climatique sur leur développement et le stockage d'eau et du carbone ainsi que sur leur apport d'eau dans les réservoirs hydroélectriques du bassin versant de la rivière La Grande.

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette thèse est de caractériser les changements de la structure spatiale des tourbières minérotrophes structurées du Complexe LaGrande depuis cinquante ans en précisant la répartition et l'étendue des compartiments terrestres et aquatiques à l'aide des images satellitaires panchromatiques à très haute résolution et des photos aériennes noir et blanc des années 1950.

Pour l'identification des tourbières structurées et de leurs différentes unités morphologiques (mares, lanières), une approche originale de classification des images satellitaires panchromatiques en très haute résolution a dû être développée afin de surmonter les limitations liées au traitement des images à très haute résolution et la résolution spectrale limitée des images panchromatique ainsi que la nature complexe des tourbières structurées.

La méthodologie développée est fondée sur une classification dite « basée objets » qui tient compte non seulement de la réflectance des objets mais aussi de l'information spatiale et contextuelle. Des bandes de texture ont été incorporées dans le processus de segmentation-classification comme des canaux supplémentaires

Les cartes détaillées produites à la première étape de ce projet doctoral ont permis d'évaluer l'état écologique actuel (en 2003, en 2006) et récent (en 1957) ainsi que le changement de la structure des tourbières minérotrophes structurées entre les dates mentionnées pour deux sites d'études (La Grande-3 et Laforge-1). Afin de mieux comprendre le phénomène d'aqualyse, les quatre aspects principaux de la détection des changements d'occupation du sol ont été abordés, notamment: 1) la détection; 2) l'étendue; 3) l'identification de la nature; et 4) les particularités spatiales du changement. Une analyse bi-temporelle de la morphométrie des mares a également été réalisée dans le but de mieux comprendre le développement de mares et, par conséquent, les conditions hydrologiques associées. Pour une meilleure interprétation des résultats, les données météorologiques précédant l'acquisition de l'image ont été prises en considération.

Les résultats montrent que la méthode semi-automatique de classification développée peut remplacer efficacement l'interprétation visuelle et la délimitation manuelle traditionnellement utilisées pour l'évaluation écologique des tourbières structurées sur des photos aériennes historiques ou des images satellitaires panchromatiques. Les tourbières sont détectées et délimitées avec une très haute précision. Leurs éléments structuraux sont également classifiés à un niveau satisfaisant. De plus, la procédure (i.e. l'ensemble de règles) développée s'est montrée robuste et efficace pour différents environnements du bassin versant (La Grande-3 et Laforge-1).

Les résultats montrent une expansion de surface pour la plupart de tourbières étudiées au détriment de la forêt environnante. Cela indique que la paludification était un processus actif au cours des 50 dernières années. L'expansion simultanée observée pour 36 de 40 tourbières minérotrophes structurées suggère que le climat est le facteur principal pour la paludification. Cependant, le changement dans les compartiments aquatiques et semi-aquatique est plus complexe et asynchrone dans les différentes parties de tourbières ainsi qu'entre les tourbières à proximité. La dynamique de ces compartiments semble spécifique pour chaque tourbière et est contrôlée par des facteurs autogènes qui influencent la rétention d'eau et le ruissellement dans les tourbières. La taille des tourbières ainsi que les caractéristiques du bassin versant (la superficie, le type du couvert végétal) ou les perturbations (ex. feu) ont également une

importance dans la réponse des tourbières structurées à court (événements pluvieux) et à long terme (changements climatiques). Ces résultats sont conformes à ceux d'autres études paléoécologiques et hydrologiques des tourbières structurées qui ont montré l'importance de leurs propres caractéristiques physiques sur leur réponse aux facteurs hydroclimatiques.

En prenant en considération l'augmentation des précipitations pour les régions nordiques, telle que prévue par les modèles climatiques, on peut s'attendre à ce que le phénomène d'aqualyse des tourbières qui possèdent déjà de grands compartiments aquatiques se poursuivre tandis que pour les autres, les paramètres allogènes et environnementaux vont jouer un rôle déterminant.



REMERCIEMENTS

Je souhaite d'abord exprimer ma gratitude à Madame Monique Bernier, la directrice de mes travaux, pour m'avoir intégrée dans son équipe, et pour sa confiance en moi. Je la remercie également pour m'avoir patiemment guidée, soutenue et encouragée tout au long de ce parcours. Je la remercie ainsi pour les belles opportunités qu'elle m'a offertes au cours de ces années.

Je suis également très reconnaissante envers M. Serge Payette, mon codirecteur de recherche, pour m'avoir transmis de manière très passionnante son savoir sur l'écologie des milieux humides durant les campagnes de terrain et pour toutes les suggestions judicieuses qu'il m'a données.

J'adresse mes remerciements à M. Karem Chokmani, professeur à l'INRS, pour les conseils précieux sur le plan scientifique ainsi que pour ses témoignages d'amitié.

Je tiens à souligner l'aide technique opportun et attentif de M. Yves Gauthier, M. Jimmy Poulin et Mme Lisa-Marie Pâquet, professionnels de recherche au laboratoire de télédétection de l'INRS.

Je remercie également les évaluateurs externes de la thèse, Mme Michelle Garneau, M. Richard Fournier, d'avoir accepté de consacrer du temps à la lecture et l'évaluation de ce travail.

Je tiens aussi à témoigner ma reconnaissance à Kim Huang Huong, Thomas Bergeron, Yann Dribault et Yannick Duguay, étudiants à l'INRS, qui ont participé à l'application de la méthode Delphi.

Il me faut souligner que les travaux présentés dans cette thèse ont été rendus possibles grâce au support financier d'Hydro-Québec, d'Ouranos et du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada.

Enfin j'exprime ma reconnaissance à mes parents pour leurs encouragements et surtout à ma petite famille pour m'avoir soutenue avec patience tout au long de mes études.



TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	V
REMERCIEMENTS.....	IX
TABLE DES MATIÈRES	XI
LISTE DES TABLEAUX	XV
LISTE DES FIGURES.....	XVII
PARTIE I	19
SYNTHÈSE	19
CHAPITRE 1: INTRODUCTION.....	3
1.1 CONTEXTE DU PROJET DE RECHERCHE.....	3
1.2 PROBLÉMATIQUE.....	3
1.3 HYPOTHÈSE DE RECHERCHE	5
1.4 OBJECTIFS	6
1.5 SITES D'ÉTUDE	6
1.6 APPORT DE LA RECHERCHE (CONTRIBUTION SCIENTIFIQUE)	9
1.7 PLAN DU DOCUMENT	11
CHAPITRE 2: REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	13
2.1 ÉCOLOGIE DES TOURBIÈRES.....	13
2.1.1 <i>Tourbières – aperçu général</i>	13
2.1.2 <i>Types de tourbières</i>	13
2.1.3 <i>Développement des tourbières</i>	15
2.1.4 <i>Changements climatiques et aqualyse</i>	18
2.2 SUIVI DES TOURBIÈRES PAR TÉLÉDÉTECTION.....	20
CHAPITRE 3: CLASSIFICATION BASÉE OBJET DES IMAGES SATELLITAIRES PANCHROMATIQUES EN TRÈS HAUTE RÉOLUTION.....	23
3.1 INTRODUCTION.....	23
3.2 MÉTHODE.....	24
3.2.1 <i>Données images</i>	24
3.2.2 <i>Prétraitement des images</i>	25
3.2.3 <i>Approche basée objet</i>	27
3.2.4 <i>Validation de la classification</i>	31
3.3 RÉSULTATS.....	31
3.4 CONCLUSION	35
CHAPITRE 4: ÉVALUATION DES CHANGEMENTS DE LA STRUCTURE SPATIALE DES TOURBIÈRES.....	37
4.1 INTRODUCTION.....	37
4.2 MÉTHODE.....	38
4.2.1 <i>Analyse du changement de superficies totale et aquatique des tourbières entre 1957 et 2003/2006</i>	39
4.2.2 <i>Méthode Delphi</i>	39
4.2.3 <i>Transition entre les classes</i>	40

4.2.4	<i>Analyse comparative de la morphométrie des mares entre 1957 et 2003/2006</i>	42
4.2.5	<i>Analyse des conditions météorologiques entre 1957 et 2003/2006</i>	43
4.3	RÉSULTATS	43
4.3.1	<i>Occupation du sol pour les deux sites d'étude : en 1957 et en 2003 pour La Grande-3:et en 1957 et en 2006 pour Laforge-1</i>	43
4.3.2	<i>Analyse de changement des superficies totale, aquatique et semi-aquatique des tourbières entre 1957 et 2003/2006</i>	45
4.3.3	<i>Méthode Delphi</i>	48
4.3.4	<i>Transition entre les classes</i>	49
4.3.5	<i>Analyse comparative de la morphométrie de mares entre 1957 et 2006</i>	50
4.4	DISCUSSION	56
4.5	CONCLUSION	63
	CHAPITRE 5: CONCLUSION	65
	PARTIE II	69
	ARTICLES	69
	AVANT-PROPOS	71
	CHAPITRE 6: OBJECT-BASED CLASSIFICATION OF VERY HIGH RESOLUTION PANCHROMATIC IMAGES FOR EVALUATING RECENT CHANGE IN THE STRUCTURE OF PATTERNED PEATLANDS	73
	RÉSUMÉ	75
	ABSTRACT	77
6.1	INTRODUCTION	79
6.2	METHODS	89
6.2.1	<i>Pre-processing</i>	89
6.2.2	<i>Object-based analysis</i>	92
6.2.3	<i>Accuracy assessment</i>	102
6.2.4	<i>Change detection</i>	103
6.3	RESULTS AND DISCUSSION	103
6.3.1	<i>Texture analysis</i>	103
6.3.2	<i>Object-based image analysis</i>	109
6.3.3	<i>Change detection</i>	121
6.4	CONCLUSION AND FUTURE WORKS	123
6.5	ACKNOWLEDGMENTS	124
	CHAPITRE 7: RECENT CHANGE IN THE STRUCTURE OF PATTERNED FENS IN THE LA GRANDE RIVER WATERSHED (NORTHERN QUEBEC) USING REMOTE SENSING TECHNIQUES	125
	ABSTRACT	127
	RÉSUMÉ	129
7.1	INTRODUCTION	131
7.2	MATERIALS AND METHODS	136
7.2.1	<i>Image Data</i>	136
7.2.2	<i>Image processing</i>	137
7.2.3	<i>Change detection</i>	142

7.3 RESULTS AND DISCUSSION	148
7.3.1 <i>Image classification</i>	148
7.3.2 <i>Change Analysis</i>	150
7.4 DISCUSSION	166
7.5 CONCLUSION	171
7.6 ACKNOWLEDGEMENTS	173
RÉFÉRENCES	175
ANNEXE 1 : LISTE DES TOURBIÈRES ÉTUDIÉES (LA GRANDE-3).....	185
ANNEXE 2 : LISTE DES TOURBIÈRES ÉTUDIÉES (LAFORGE-1).....	187



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 :	Paramètres de segmentation	28
Tableau 4.1 :	Occupation du sol pour les deux sites d'étude : en 1957 et en 2003 pour La Grande-3:et en 1957 et en 2006 pour Laforge-1	44
Tableau 4.2 :	Nombre des mares et des petites mares en 1957 et 2006	52
Table 6.1 :	Characteristics of the QuickBird images and aerial photographs of the two sites	88
Table 6.2 :	Description of all parameters used for the segmentation of the QuickBird images and the aerial photographs at levels M and L.....	95
Table 6.3A :	Class description, number of training samples, and attributes used in the classification for level M	98
Table 6.4 :	Resulting distance matrix (level M).....	107
Table 6.5 :	Confusion matrix for QuickBird classification (level M)	110
Table 6.6 :	Confusion matrix for QuickBird classification for four groups of classes (level M).....	111
Table 6.7 :	Confusion matrix for QuickBird classification (level L).	113
Table 6.8 :	Confusion matrix for QuickBird classification only for classes defined for peatlands (level L).....	114
Table 6.9 :	Confusion matrix for aerial photograph classification (level M).....	118
Table 6.10 :	Confusion matrix for aerial photographs classification for four groups of classes (level M)	119
Table 6.11 :	Confusion matrix for aerial photographs classification (level L).	120
Table 6.12 :	Land cover surface areas (m ²) for peatland T1 (circled area in Figure 6.7) in 1957 and 2003	121
Table 7.1:	Class description.....	140
Table 7.2 :	Class division in 3 principal compartments : aquatic, semi-aquatic and terrestrial.....	143
Table 7.3 :	Change classes	146
Table 7.4 :	Weather stations	147
Table 7.5 :	Confusion matrix for aerial photographs classification for 12 classes defined for peatlands (Level 1, Laforge-1 site)	149

Table 7.6 :	Confusion matrix for aerial photographs classification for three principal compartments (Level 1, Laforge-1 site).....	150
Table 7.7 :	Statistics summary from application of the Delphi technique.....	159
Table 7.8 :	Land cover change 1957 - 2006 for patterned peatlands F23 et F30	163

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 :	Localisation des deux sites d'études dans le bassin versant de la rivière La Grande (Québec, Canada).....	7
Figure 3.1 :	L'enchaînement des étapes de l'analyse basée objet	29
Figure 3.2 :	La classification d'image QuickBird pour une scène de la région de Laforge-1.....	33
Figure 3.3 :	La classification de l'année 1957 (photographies aériennes) et de 2006 (QuickBird) pour la zone encadrée sur la Figure 3.2 dans la région de Laforge-1.....	34
Figure 4.1 :	Création des objets multi-temporels présentant l'intersection entre les objets des classifications des images acquises aux deux dates comparées (1957 et 2006)	41
Figure 4.2 :	Dans les tourbières riches avec a) de végétation arbustive abondante ou b) dans les zones de transition entre les tourbières et la forêt environnante, certaines mares sont masquées et invisibles sur les images satellites panchromatiques et sur les photographies aériennes noir et blanc.....	47
Figure 4.3 :	Définition des mares	51
Figure 4.4 :	Démographie des mares et des petites mares	53
Figure 4.5 :	Relations allométriques entre a) le périmètre et la superficie des mares et des petites mares; et b) la largeur et la longueur des mares et des petites mares.....	54
Figure 6.1 :	Location of the two study sites within the La Grande River watershed in northern Quebec, Canada.....	86
Figure 6.2 :	QuickBird panchromatic image with superposed road ground control points (GCPs).....	90
Figure 6.3 :	Scheme of the multiresolution segmentation (levels 1-3) and the object-based classification.....	94
Figure 6.4 :	Omnidirectional semivariograms for the nine selected land cover types.....	105
Figure 6.5 :	Comparison between mean GLDV Entropy values for every object calculated in advance with chosen parameters by PCI Geomatica and the same texture measurements calculated for the same objects with Definiens Professional.	106
Figure 6.6 :	Enhancement of details by textural images combined with panchromatic image.....	108

Figure 6.7 :	Classification of a QuickBird (QB) subimage (2003) of the La Grande-3 sector.....	112
Figure 6.8 :	Classification details for the encircled peatland (T1) in Figure 7.....	115
Figure 6.9 :	Comparison between an aerial photographs mosaic from 1957, the corresponding QuickBird sub-scene from 2003, and their classifications of the T1 peatland.....	117
Figure 6.10 :	Area occupied by different land-cover classes in 1957 (in blue) and 2003 (in red) for the peatland (T1) shown in Figure 6.9.....	122
Figure 6.11 :	Precipitation data for 1957 and 2003 from Kuujjurapik A weather station.....	122
Figure 7.1 :	Degradation of the plant cover and pool expansion in patterned fens	131
Figure 7.2 :	Location of the two study sites within the La Grande River watershed in northern Quebec, Canada.....	135
Figure 7.3 :	Hierarchical organisation of the classes and segmentation-classification process	138
Figure 7.4 :	Surface area of a) peatland (S_{total}), b) aquatic compartment (S_{aqua}), c) semi-aquatic compartement ($S_{semiaqua}$) and d) terrestrial compartment (S_{terre}) in 1957 and 2006 for 30 fens in the Laforge-1 study site.....	151
Figure 7.5 :	Relative change in a) the surface area of 30 fens in the Laforge-1 study site (S), b) their aquatic (S_a) and c) semi-aquatic (S_{sa}) compartments according their size in 1957. The case d) shows the relative change of aquatic compartment of fens according the surface area of their aquatic compartment in 1957	153
Figure 7.6 :	Difference in peatland environment.....	154
Figure 7.7 :	Simultaneous change in aquatic (S_a) and semi-aquatic (S_{sa}) compartments of 30 patterned fens in the Laforge-1 study site	154
Figure 7.8 :	Proportion of three principal compartments for 30 fens (F1 – F30) in the Laforge-1 study site.	156
Figure 7.9 :	Correlation between area proportions of aquatic (S_a) and semi-aquatic (S_{sa}) compartments for 1957 and 2006.	157
Figure 7.10 :	Aerial photograph mosaic (1957), corresponding QuickBird subscene (2003) and their classifications for one of the fens (La Grande-3) used for application of the Delphi techniques.....	160
Figure 7.11 :	Transition between classes (“from-to” change detection) for 2 patterned fens.....	162
Figure 7.12 :	Land cover change maps for the peatland F30 (Laforge-1 study site) : A)	164

PARTIE I

**CHANGEMENTS DE LA STRUCTURE SPATIALE DES TOURBIÈRES
DU COMPLEXE LAGRANDE DEPUIS CINQUANTE ANS OBSERVÉS
AU MOYEN D'IMAGES SATELLITAIRES PANCHROMATIQUES À TRÈS
HAUTE RÉOLUTION ET DE PHOTOS AÉRIENNES**

SYNTHÈSE



CHAPITRE 1: INTRODUCTION

1.1 Contexte du projet de recherche

Le présente étude fait partie du projet multidisciplinaire « Aqualyse » des tourbières dans le Complexe LaGrande : une indication de forte hydraulicité » qui porte sur l'étude de l'état écologique et hydrologique des tourbières boréales, de leur dynamique récente et de leur contribution au bilan hydrologique du Complexe LaGrande dans le contexte des changements climatiques (Payette et al., 2004). Ce projet de recherche est réalisé en partenariat entre l'Institut national de recherche scientifique (INRS-ETE), l'Université Laval, l'Université du Québec à Montréal, Hydro-Québec et le Consortium Ouranos.

De manière plus spécifique, cette thèse de doctorat s'inscrit dans le premier volet du projet « Aqualyse » dont un des objectifs principaux est d'évaluer via la comparaison d'images satellitaires et de photographies aériennes i) l'état écologique actuel des tourbières en fonction de leur structure spatiale concernant l'étendue et la répartition des compartiment terrestres et aquatiques ainsi que ii) leur changement récent en mesurant les pertes et les gains de chaque compartiment dans l'espace et le temps.

1.2 Problématique

Dans le bassin versant de la rivière La Grande (Baie de James, Québec), les tourbières comptent parmi les écosystèmes les plus importants, soit environ 15 % de la superficie de la région (Tarnocai et al., 2000). Toutefois, malgré leur abondance, le rôle dans le cycle de l'eau, l'apport à l'alimentation des réservoirs hydroélectriques et la réponse des tourbières aux changements climatiques restent méconnus à l'échelle régionale. En effet, le bas niveau des réservoirs hydroélectriques du nord du Québec au cours des deux dernières décennies (Roy, 2004) et les écarts constatés entre les observations météorologiques et les réponses hydrologiques (mesurées et modélisées) soulèvent la question du rôle des tourbières dans le cycle hydrologique régional et de l'adaptation des modèles hydrologiques actuellement utilisés aux caractéristiques propres aux bassins versants nordiques.

Des nombreuses études ont montré que la présence des milieux humides dans les limites d'un bassin versant influence significativement le bilan hydrique de celui-ci (Quinton et al. 2003; Hayashi et al. 2004; Todd et al., 2006). De plus, la microtopographie des tourbières structurées influence la capacité de stockage et la réactivité de ces dernières aux précipitations (Price & Maloney, 1994; Glenn & Woo, 1997). Une étude comparative entre des tourbières ombrotrophes, des tourbières minérotrophes et des lacs (Tardif et al., 2009), réalisée dans le cadre du projet « Aqualyse », a montré que l'importance de la fraction de l'eau libre est un facteur majeur du contrôle de la dynamique hydrologique de ces bassins.

Un inventaire aérien récent effectué dans l'ensemble du Complexe LaGrande montre que plusieurs tourbières minérotrophes structurées sont davantage aquatiques que terrestres. Les signes de dégradation sont nombreux : l'envahissement des tourbières par des lacs voisins, la dégradation des lanières et l'agrandissement des mares, la mort des arbres et des arbustes le long de leur bordure, les médaillons de végétation au milieu des lacs. Ces indices suggèrent une hausse récente de la nappe phréatique régionale. Au cours des dernières décennies au Québec, à part du réchauffement observé de 0,2 °C à 0,4 °C par décennie, au Sud, une augmentation de la quantité totale de précipitations (neige et pluie) a été observée de même que du nombre de jours avec des précipitations de faible intensité. La quantité de neige a diminué dans le sud du Québec mais a augmenté dans le nord (Ouranos, 2010). Quelques études (Begin & Payette, 1988; Payette & Fillion, 1993; Payette & Delwaide, 2004) indiquent une hausse des niveaux lacustres au Nord du Québec pendant le XX^e siècle due à la hausse des précipitations. Cette tendance aurait affecté les tourbières du bassin versant de la rivière La Grande et pourrait être à l'origine de la dégradation de leur couvert végétal et leur transformation en écosystèmes aquatiques. Cette hypothèse est soutenue par les études dendrochronologiques (Arlen-Pouliot, 2009) et paléoécologiques (Loisel & Garneau, 2010) des tourbières boréales du bassin versant du Complexe LaGrande. Le processus de dégradation du couvert végétal et la transformation des tourbières minérotrophes structurées en écosystèmes aquatiques causés par l'augmentation du niveau d'eau a été nommé « Aqualyse » (Payette et al., 2004). Un tel changement de la structure des tourbières pourrait modifier le régime d'écoulement et, par conséquent, l'apport hydrique aux réservoirs hydroélectriques. De plus, une telle transformation pourrait avoir un impact sur le cycle du carbone des tourbières (absorption ou émission des gaz à effet de serre (CO₂ et CH₄) (Belyea, 2007) et, par conséquent, sur leur rôle dans le système climatique planétaire.

Un des indices du phénomène d'aqualyse est le changement du rapport de l'étendue des compartiments terrestres et aquatiques des tourbières. Cependant, malgré leur valeur écologique, il y a un manque de données sur l'état présent et les tendances récentes dans les tourbières du Canada. De plus, peu de données existent sur la couverture relative des mares et du couvert végétal et leur développement corrélatif au fil du temps. Les données disponibles proviennent principalement des études *in situ* des tourbières isolées. Cependant, cela limite la caractérisation appropriée de la dynamique spatiale du phénomène étudié. En conséquence, il existe un besoin croissant d'avoir un aperçu de l'état actuel et passé des tourbières minérotrophes structurées, ainsi que sur les tendances récentes de développement de leur structure. Une meilleure connaissance du développement de la structure de tourbières permettra une meilleure anticipation des impacts des changements climatiques.

Les vastes superficies occupées par les tourbières, leur éloignement et la difficulté d'y accéder sont toutes des conditions qui favorisent l'utilisation de la télédétection comme outil le plus approprié pour la caractérisation du phénomène d'aqualyse à l'échelle régionale. Afin d'estimer la variation temporelle de l'étendue des compartiments terrestres et aquatiques des tourbières, des images satellitaires à très haute résolution, soit 0,60m (QuickBird, panchromatique, 2003 et 2006), et des photos aériennes des années 1950 ont été utilisées. Pour bénéficier de la haute résolution spatiale des images panchromatiques, nous avons fait appel à une classification dite «basée objet» qui tient compte non seulement de la réflectance des objets mais aussi de toutes les autres informations spatiales et contextuelles de l'image.

Les connaissances acquises par cette étude peuvent servir pour l'adaptation des modèles hydrologiques utilisés aux spécificités des bassins versants nordiques afin d'assurer une planification adéquate de la production hydroélectrique face aux changements climatiques actuels et futurs.

1.3 Hypothèse de recherche

Dans ce contexte, l'hypothèse posée dans cette étude est que les tourbières du complexe La Grande sont en voie de dégradation depuis cinquante ans et se transforment progressivement en écosystèmes aquatiques par l'intermédiaire de l'augmentation du nombre et de la superficie des mares.

1.4 Objectifs

L'objectif principal de la thèse est de caractériser le changement de la structure spatiale des tourbières minérotrophes du Complexe La Grande depuis les cinquante dernières années, en précisant la répartition et l'étendue des compartiments terrestres et aquatiques à l'aide des images satellitaires panchromatiques à très haute résolution et des photos aériennes noir et blanc des années 1950.

Les objectifs spécifiques sont :

- a. Développer une méthodologie originale de classification basée objet des images panchromatiques en très haute résolution afin d'identifier et délimiter les tourbières structurées; et leurs unités morphologiques (mares, lanières)
- b. Caractériser la structure spatiale récente (1957) et actuelle (2003/2006) des tourbières minérotrophes structurées du bassin versant de La Grande en précisant la répartition et l'étendue des compartiments aquatique, semi-aquatique et terrestre;
- c. Détecter et interpréter les changements de la structure spatiale survenue entre les dates comparées.

1.5 Sites d'étude

Guidé par les différences hydro-climatiques et écologiques régionales, nous avons choisi deux sites d'études situés dans le bassin versant de la rivière La Grande (Québec, Canada): le premier se trouve près de l'aéroport du barrage hydroélectrique La Grande-3 (53°33'33"N, 76°15'19"O) et le deuxième se situe à l'est de la route vers le barrage hydroélectrique Laforge-1 (54°12'12"N, 72°19'10"O) (Figure 1.1). Le relief relativement plat, les dépôts de surface imperméables, le climat froid et la saison de croissance courte de ce bassin versant créent des conditions propices au développement des tourbières. La répartition des tourbières dans la région du bassin de la rivière La Grande suit un gradient d'ouest en est, en fonction des conditions climatiques, topographiques et géomorphologiques (Beaulieu-Audy et al., 2009). Le secteur ouest est principalement occupé par des tourbières ombrotrophes.

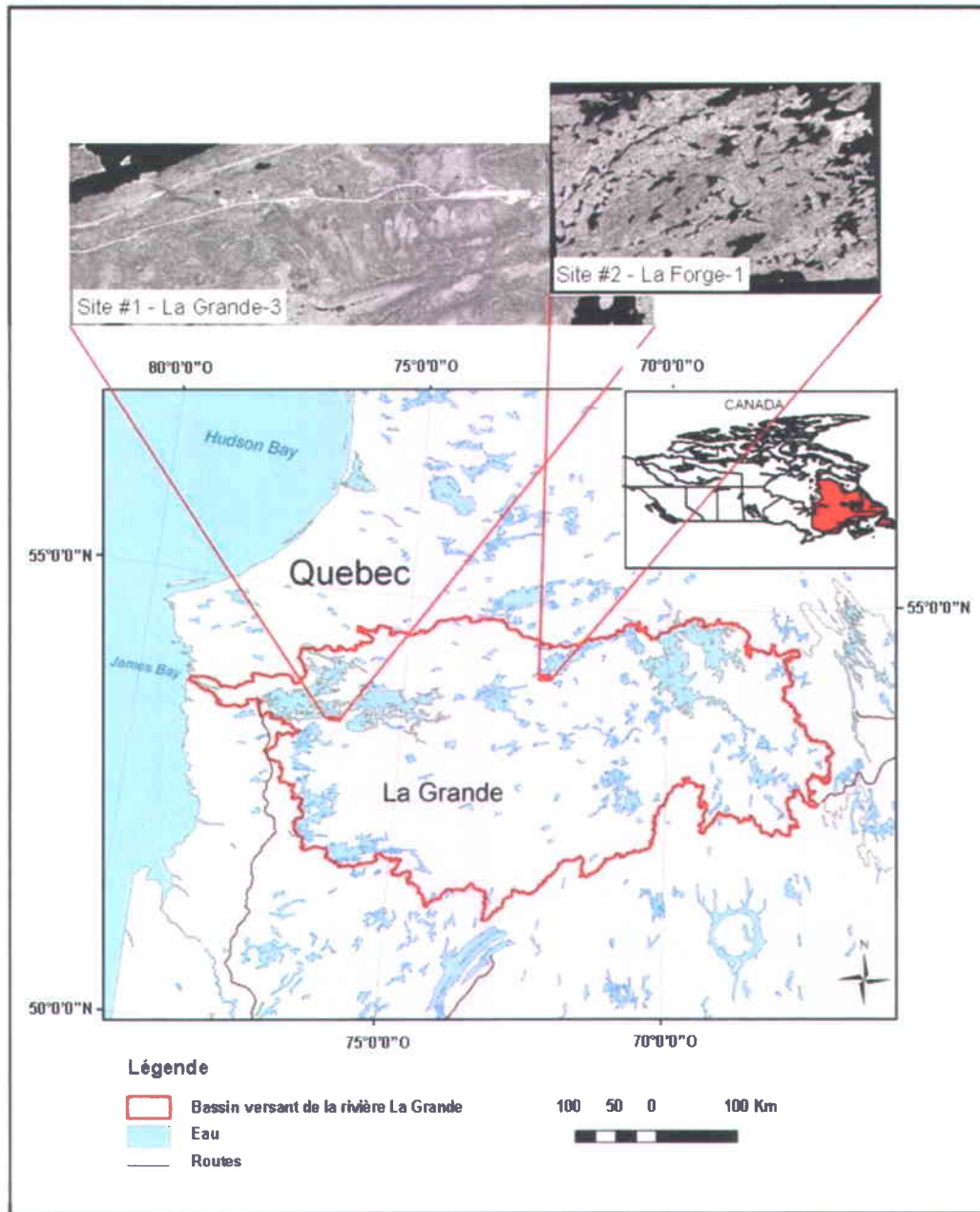


Figure 1.1 Localisation des deux sites d'études dans le bassin versant de la rivière La Grande (Québec, Canada). Le site #1 se trouve près de l'aéroport du barrage hydroélectrique La Grande-3 (53°33'33"N, 76°15'19"O) et le site #2 se situe à l'est de la route vers le barrage hydroélectrique Laforge-1 (54°12'12"N, 72°19'10"O).

Dans le secteur de LaGrande-3, à la limite des tourbières ombrotrophes, les tourbières en transition (ayant des caractéristiques autant des tourbières ombrotrophes que de tourbières minérotrophes) sont fréquentes (Beaulieu-Audy et al., 2009). Les tourbières minérotrophes structurées prennent de l'ampleur. Le relief est ondulé avec des collines rocheuses vers le nord. L'altitude moyenne est d'environ 220 m au dessus du niveau de la mer. Le climat est marqué par des étés frais et des hivers froids. La température moyenne annuelle est d'environ -3,5°C et le total des précipitations moyennes annuelles est d'environ 680 mm. La saison de croissance dure environ 130 jours (Bootsma et al. 2008). La végétation régionale est dominée par l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). La pessière à mousses est le type de forêt le plus important dans les dépressions, tandis que la pessière à lichens est répandue sur les hautes terres bien drainées.

Le deuxième site d'étude est localisé à environ 260 km à nord-est du premier, dans le secteur du réservoir Laforge-1. Ce secteur est caractérisé par une température moyenne annuelle relativement basse (environ -4,2 °C) et par des précipitations moyennes annuelles plus fortes (830 mm) que le secteur LaGrande-3. La saison de croissance est également plus courte et se rapproche de 120 jours (Bootsma et al. 2008). L'altitude moyenne du site est d'environ 445 m au dessus du niveau de la mer. Il abrite une diversité de collines rocheuses, de petits lacs et de tourbières minérotrophes structurées étroites et interconnectés d'orientation est-ouest. Ces tourbières sont principalement pauvres, le couvert végétal est dominé par les cypéracées et les sphaignes. Elles sont caractérisées par un gradient microtopographique bien développé où les mares étroites et peu profondes, perpendiculaires à la pente prévalent. Cependant, plusieurs de ces tourbières englobent des grandes mares avec des traces des lanières dégradées et submergées qui suggèrent une coalescence récente. Le relief plus accentué et l'écoulement permanent de l'eau traversant ces tourbières, enrichie en minéraux provenant des sols des collines voisines, retarde ou même empêche leur développement en tourbières ombrotrophes (Kuhry et al. 1993). La pessière à lichens est le type de forêt dominant sur les collines proéminentes autour des tourbières.

1.6 Apport de la recherche (contribution scientifique)

Les résultats de la présente recherche ont été résumés dans deux articles et un compte-rendu de conférence. Le premier de ces articles porte sur la méthodologie de la classification basée objet des images panchromatiques à très haute résolution. Il est publié dans le Journal Canadien de Télédétection. Le deuxième article se concentre sur l'analyse du changement récent de la structure spatiale des tourbières minérotrophes structurées. Le compte-rendu de conférence résume également quelques-uns des résultats principaux sur le changement de la structure des tourbières minérotrophes structurées.

1. Dissanska, M., Bernier, M. & Payette, S., (...). Recent change in the structure of patterned fens in the La Grande River watershed (Northern Quebec) using remote sensing techniques. *Ecoscience*, sera soumis en automne 2012.
2. Dissanska, M., Bernier, M. & Payette, S. (2011). Assessment of the recent change in the structure of patterned fens in the La Grande River watershed using remote sensing techniques. Proceedings of the first joint meeting of the Canadian Quaternary Association (CANQUA) and the Canadian Chapter of the International Association of Hydrogeologists (IAH-CNC) GeoHydro 2011: Water and Earth: The junction of Quaternary Geoscience and Hydrogeology, Quebec, 28 - 31 August 2011.
3. Dissanska, M., Bernier, M. & Payette, S., (2009). Object-based classification of very high resolution panchromatic images for evaluating recent change in the structure of patterned peatlands. *Can. J. Remote Sens. / J. Can. Télédétection* 35(2): 189-215.

Certains des résultats de cette recherche ont fait l'objet de communications orales ou ont été présentés sous forme d'affiches :

Présentations orales:

1. Dissanska, M., Chokmani, K., Bernier, M., Garneau, M., Rousseau, A. N. & Payette, S. (2008). Suivi écohydrologique des tourbières du bassin versant de la rivière La Grande à l'aide de télédétection. 76e Congrès de l'ACFAS, Colloque « Écohydrologie des milieux humides nordiques », Québec, 5 - 9 mai 2008.

2. Dissanska, M., Bernier, M. & Payette, S. (2008). Évolution de la structure spatiale des tourbières du Complexe La Grande depuis 50 ans: Volet télédétection/ Study of spatiotemporal development of peatlands in the La Grande River watershed using remote sensing. 15e colloque annuel du GRET: Évènement tourbières 2008, Québec, 19 - 20 février 2008.
3. Dissanska, M., Bernier, M. & Payette, S. (2007). State of peatland aqualysis in the area of the hydroelectrical Complex LaGrande: Preliminary results. 8th International ACUNS Student Conference on Northern Studies, Saskatoon, 18 - 21 October 2007.
4. Dissanska, M., Bernier, M., Payette, S. & Schäfer, E. (2007). État de l'aqualyse des tourbières du bassin versant de la rivière La Grande: Résultats préliminaires. XXVII Colloque CEN, 1-2 février 2007, Québec.
5. Dissanska, M., Bernier, M. & Payette, S. (2006). Étude de l'évolution de la structure spatiale des tourbières du Complexe La Grande depuis cinquante ans, à l'aide des images satellitaires et des photos aériennes. Journée des Sciences de la Terre et de l'Environnement 21 Avril 2006, Québec.

Communications par affiche:

1. Dissanska, M., Arlen-Pouliot, Y., Bernier, M., Payette, S., Garneau, M., Saint-Hilaire, A., Chokmani, K. (2008). Aqualyse des tourbières structurées du bassin versant de La Grande Rivière : analyses stratigraphique, dendrochronologique et spatio-temporelle. 3e Symposium scientifique (Ouranos) sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, 19-20 novembre 2008, Montréal
2. Dissanska, M., Bernier, M. & Payette, S. (2007). Study of peatland aqualysis in the area of the hydroelectrical Complex La Grande using satellite panchromatic images of very high resolution. CRSS/ASPRS Specialty Conference "Our common borders-Safety, Security and the Environment through Remote Sensing", 28 October -3 November 2007, Ottawa
3. Dissanska, M., Schäfer, E., Chokmani, K., Bernier, M. & Payette, S. (2006) État de l'aqualyse des tourbières de la région de La Grande: Résultats préliminaires. 2e Symposium scientifique (Ouranos) " Climatologie et adaptation à l'échelle régionale", 2-3 novembre 2006, Montréal

1.7 Plan du document

Ce document contient deux parties. La première partie est une synthèse de la thèse. Elle est divisée en six chapitres. Le premier chapitre définit le contexte général du projet, l'hypothèse de la recherche et les objectifs du doctorat. Le deuxième chapitre traite des caractéristiques générales des tourbières et leur fonctionnement ainsi que l'état des connaissances sur la télédétection de tourbières. Les trois chapitres suivants présentent la méthodologie utilisée pour la réalisation des objectifs fixés et les résultats obtenus. Le troisième chapitre est une synthèse de la méthode utilisée pour la classification basée objet des images satellitaires panchromatiques en très haute résolution. Le quatrième chapitre résume l'analyse du changement de la structure spatiale des tourbières. Le chapitre 5 conclue en discutant des résultats obtenus et des perspectives de recherche.

La partie II inclut les deux articles qui résument les résultats et les interprétations issues du projet doctoral. Les annexes contiennent les listes des tourbières pour chaque site d'étude et leurs caractéristiques dans le cadre de cette recherche.



CHAPITRE 2: REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Écologie des tourbières

Dans le but de mieux comprendre le phénomène d'aqualyse et d'interpréter correctement les résultats de notre étude, ce chapitre résume les caractéristiques générales des tourbières comme le type, la structure, les différents facteurs influençant le développement des tourbières boréales et leur réponse éventuelle aux changements climatiques.

2.1.1 Tourbières – aperçu général

Les tourbières sont des milieux humides organiques, où la nappe phréatique se trouve près, au niveau, ou au-dessus de la surface, en permanence ou assez long temps. Elles comprennent une accumulation de plus de 40 cm de tourbe sur laquelle croit une végétation adaptée aux sols saturés d'eau (Groupe de travail national sur les terres humides, 1997). L'accumulation de tourbe est la résultante d'un taux de production de matière organique par les organismes vivants supérieur au taux de décomposition (Moore & Bellamy, 1974; Damman, 1979; Payette & Rochefort, 2001). La décomposition lente de restes végétaux est généralement associée aux régions boréales et subarctiques, où les conditions fraîches et humides et la saison de croissance assez courte sont propices au développement des tourbières (Gore, 1983; Kuhry et al., 1993).

2.1.2 Types de tourbières

Les tourbières se divisent en deux catégories principales, soit les tourbières minérotrophes (fen) et les tourbières ombrotrophes (bog). Ces deux catégories se différencient par leurs caractéristiques morphologiques, hydrologiques, chimiques et écologiques (Zoltai & Pollett, 1983; Zoltai & Vitt, 1995; Payette & Rochefort, 2001).

Les tourbières ombrotrophes sont alimentées essentiellement par les précipitations atmosphériques, le brouillard et l'eau de fonte. Cela implique qu'elles ne se trouvent qu'aux endroits mal drainés où les précipitations dépassent l'évaporation pendant la saison de croissance (Price et al., 1991). C'est une condition importante qui limite leur répartition géographique. Le substrat tourbeux et l'eau circulant dans les tourbières ombrotrophes sont très acides, le pH est généralement inférieur à 5,0 (Payette & Rochefort, 2001). Ces conditions favorisent une végétation dominée par des sphaignes acidiphiles (*Sphagnum fuscum*, *Sphagnum magellanicum*, *Sphagnum angustifolium*, *Sphagnum cuspidatum*), plusieurs éricacées

(*Kalmia angustifolia*, *Rhododendron groenlandicum*, *Andromeda glaucophylla*, *Chamaedaphne calyculata*) et quelques cypéracées (Buteau et al., 1994). L'épinette noire et les lichens (*Cladonia spp.*) occupent les buttes plus sèches des tourbières ombrotrophes.

Les tourbières minérotrophes bénéficient des précipitations et des apports en eaux provenant des sols minéraux environnants. Par conséquent, elles sont plus oxygénées et plus riches en nutriments. Habituellement, la nappe phréatique affleure ou se trouve à quelques centimètres sous la surface. La tourbe en profondeur est beaucoup plus décomposée que celle des tourbières ombrotrophes. Les tourbières minérotrophes ont un pH plus élevé que celui des tourbières ombrotrophes. Le tapis végétal des tourbières minérotrophes varie selon l'état trophique de celles-ci. Les fens plus pauvres en éléments nutritifs sont colonisés par plusieurs espèces de sphaignes. Les parties plus humides des fens plus riches sont constituées généralement de plantes herbacées du genre *Carex* et de certaines bryophytes (*Campylium stellatum*, *Scorpidium scorpioides*, *Sphagnum warnstorffii*). Les arbustes (*Myrica gale*, *Betula glandulosa*) et les arbres, surtout le mélèze laricin (*Larix laricina*), colonisent les buttes ou les surfaces plus sèches.

Ces principaux types des tourbières peuvent être également subdivisées en fonction du couvert végétal, de la morphologie de surface, de la proximité de plans d'eau et de la topographie du bassin (Groupe de travail national sur les terres humides, 1997). Les tourbières structurées, par exemple, représentent une catégorie particulière. Plusieurs tourbières minérotrophes et ombrotrophes montrent, en effet, une forte hétérogénéité topographique (buttes-dépressions ou mares-lanières) (Foster et al. 1983). Les tourbières structurées sont caractérisées par des crêtes de tourbe, basses et étroites, en alternance avec des dépressions humides et des mares, perpendiculaires à la direction du drainage (Groupe de travail national sur les terres humides, 1997). Il existe un gradient microtopographique de la végétation entre les buttes et les dépressions qui est caractérisé par un changement dans la composition, l'abondance ou la croissance d'espèces végétales. Cette succession est contrôlée par différents facteurs physiques, chimiques ou biologiques, notamment, le niveau de la nappe phréatique, le contenu en nutriments et la différence de production et de décomposition entre les différentes unités morphologiques (Payette & Rochefort, 2001).

2.1.3 Développement des tourbières

Les tourbières sont des écosystèmes dynamiques, constamment en changement, en croissance ou en dégradation (Moore & Bellamy, 1974; Zoltai & Pollett, 1983). Cependant, grâce à leurs caractéristiques uniques, elles peuvent modifier leur environnement et se maintenir assez longtemps sous différentes conditions climatiques (Zoltai & Vitt, 1995; Belyea & Clymo, 2001).

2.1.3.1 Formation et évolution

En général, les tourbières se forment soit par paludification (transformation des habitats terrestres en tourbières), soit par comblement (entourbement des lacs peu profonds ou des plans d'eau), soit par une alternance de ces deux processus selon la topographie, l'hydrologie du site ou les conditions climatiques (Payette, 2005). Des études stratigraphiques révèlent que la paludification est le processus le plus fréquent de formation des tourbières en Amérique du Nord (Janssens et al., 1992; Payette, 2005). Au Québec nordique, la formation des tourbières a débuté il y a environ 7000 ans BP, et varie selon l'époque de déglaciation des terres, les particularités du bassin versant et les conditions climatiques (Payette, 1984; Payette & Rochefort, 2001). L'accumulation de la tourbe est la résultante d'un taux de production primaire excédant le taux de décomposition (Charman, 2002). La décomposition lente de la tourbe dans les tourbières nordiques résulte d'un bilan hydrique positif, de conditions anoxiques au sein de la colonne de tourbe, des basses températures et de la résistance à la décomposition de certaines espèces végétales.

L'analyse stratigraphique des tourbières suggère qu'une des voies préférentielles du développement des tourbières est la transformation des tourbières minérotrophes en tourbières ombrotrophes (Kuhry et al., 1993). Suite à l'accumulation progressive de la tourbe, la surface des tourbières minérotrophes ne reçoit plus d'apports minéraux en provenance des sols avoisinants et sous-jacents, et elles se transforment alors en tourbières ombrotrophes. Cette transition est accompagnée de changements hydrologiques, chimiques et floristiques (Moore & Bellamy, 1974; Glaser et al., 2004). À cause de l'arrêt des apports minéraux, le pH diminue et la surface des tourbières s'acidifie rapidement.

Cette transition rapide explique la distribution bimodale du pH et du nombre relativement faible de tourbières intermédiaires (ou mixte) ayant des caractéristiques autant des tourbières ombrotrophes que des tourbières minérotrophes. Les tourbières intermédiaires sont fréquentes dans la région de La Grande-3 (Beaulieu-Audy et al., 2009) près de la limite nordique des tourbières ombrotrophes.

2.1.3.2 Facteurs influençant le développement des tourbières

Les facteurs autogènes (d'origine interne à l'écosystème) et allogènes (externes – climat, hydrologie régionale, approvisionnement en nutriments, topographie, perturbations naturelles ou anthropiques) contrôlent le développement des tourbières en interagissant constamment (Damman, 1979; Kuhry et al., 1993; Charman, 2002).

Les facteurs allogènes comme des conditions climatiques favorables et une topographie qui assurent un excès hydrique et une nappe phréatique fluctuante sont les facteurs pré-requis pour l'initiation des tourbières (Payette & Rochefort, 2001). En effet, la répartition actuelle des tourbières indique que les paramètres climatiques jouent un rôle important au moins dans leur formation (Damman, 1979; Zoltai & Pollett, 1983; Halsey et al., 1998; Price, 2001). Cependant, la tendance générale dans la succession des tourbières des fens riches, aux fens pauvres et aux tourbières ombrotrophes suggère une forte influence des facteurs autogènes (accumulation de la tourbe, changements chimiques comme l'oligotrophication et l'acidification) (Kuhry et al., 1993).

Les processus hydrologiques, géochimiques et écologiques sont cruciaux pour l'existence et la maintenance des tourbières (Glaser, 1992; Vitt, 1994; Damman, 1995; Zoltai et al. 1995). Ces processus sont interdépendants. Les facteurs abiotiques comme le régime hydrologique et les éléments chimiques dissous, interagissent avec les processus biotiques pour créer une végétation caractéristique (Zoltai & Vitt, 1995). L'hydrologie joue un rôle très important dans leur développement en contrôlant les processus physiques, chimiques et biologiques de ces milieux (Ivanov, 1981; Price, 2001). En effet, la profondeur de la nappe phréatique est un facteur clé dans l'évolution des tourbières, car elle influence la production de même que le taux de décomposition de la matière organique, le transport des nutriments et la répartition des végétaux (Belyea, 1999; Hilbert et al., 2000). De son côté, les processus hydrologiques sont dictés par les facteurs du climat et du paysage (la géologie, la topographie), qui contrôlent la nature et l'amplitude des flux de l'eau et des nutriments dissous.

2.1.3.3 Développement du microrelief

Comme il a été mentionné dans la section 2.1.2, une grande partie des tourbières nordiques (boréales et subarctiques) affiche une surface structurée, caractérisée par une alternance de lanières végétales (ou buttes) et des petites mares, des dépressions humides végétalisées ainsi que de grandes mares de forme variable. Dans la région du réservoir hydroélectrique Laforge-1, où se situe l'un des nos sites d'étude, les fens structurés sont très répandus. Ces structures se forment sur une faible pente (moins de 1 %) qui permet à l'eau de circuler librement à travers la tourbière par infiltration et par drainage de surface. Si la pente est plus prononcée, les mares sont plus étroites et, au contraire, elles sont plus larges si la pente est plus faible (Zoltai & Pollett, 1983). Plusieurs hypothèses liées à l'aspect biotique, à l'activité périglaciaire ou à l'influence de la gravité ont été proposées pour expliquer l'origine de cette structure particulière (Moore & Bellamy, 1974; Foster et al., 1983; Seppälä & Koutaniemi, 1985; Payette & Rochefort, 2001). Cependant, la plupart des chercheurs appuient l'hypothèse du développement secondaire de la microtopographie attribué aux facteurs biotiques (accumulation différentielle de la tourbe) qui pourrait être amplifié par des mécanismes physiques (Foster et al., 1983; Foster & Fritz, 1987; Belyea & Lancaster, 2002). Ce mécanisme de rétroaction positive ne suffit pas pour expliquer toute la régularité spatiale des microformes observée chez les tourbières structurées, notamment l'alternance des lanières de tourbe, basses et étroites, avec des dépressions humides et des mares, perpendiculaires à la direction du drainage. Le patron caractéristique de ces tourbières est associé à la pente de la surface et l'accumulation d'eau de surface en amont de buttes qui inhibe la croissance de plantes et affecte par conséquent la distribution de futures buttes (Rietkerk et al., 2004).

Quelques études montrent que les mares se forment quelques milliers d'années après que la tourbe ait commencé à s'accumuler (Foster et al. 1983; Foster & Fritz, 1987; Foster & Wright, 1990; Karofeld, 1998; Belyea & Lancaster, 2002). La formation asynchrone et la profondeur variable des mares seraient des faits appuyant l'hypothèse de l'origine autogène de la microtopographie (Foster & Wright, 1990; Karofeld, 1998). Cependant, comme pour les autres types des tourbières, la répartition géographique des tourbières structurées suggère que les conditions climatiques (les précipitations, la température, la longueur de la saison de croissance) jouent un rôle déterminant (Payette & Rochefort, 2001).

Une fois formées, avec un surface aquatique libre de végétation, les mares s'agrandissent et s'approfondissent par l'activité biologique - mécanisme de rétroaction positive qui accentue les petites différences initiales dans le taux d'accumulation de la tourbe (Belyea & Clymo, 2001). Ce processus s'amplifie par l'activité bactérienne, l'action de l'eau (aqualyse), celle du gel/dégel (Foster et al., 1983) ou par le détachement de la tourbe inondée à cause de l'accumulation des bulles de CH₄ (Karofeld, 1998; Scott et al., 1999). Les patrons de surface persistent au même endroit pendant des siècles en augmentant ou contractant en fonction des conditions hydrologiques (Barber, 1981; Ivanov, 1981; Belyea & Clymo, 2001). Selon Belyea & Clymo (2001), la stabilité de la structure dépend du taux d'accumulation de la tourbe et de la profondeur de la nappe phréatique. La probabilité de l'inversion (comblement des mares avec de l'eau libre par la végétation) est très faible, sauf dans le cas d'un drainage catastrophique causé par la coalescence de deux mares et la baisse consécutive du niveau d'eau de la mare qui se trouve plus haut ou à cause du drainage par des canaux souterrains (Belyea, 2007). De façon générale, avec le développement de la tourbière, le compartiment aquatique augmente et celui du couvert végétal diminue (Foster & Fritz, 1987; Karofeld, 1998). Selon Belyea (2007), la proportion de compartiment aquatique et terrestre dans les conditions de stabilité du système (cas où les conditions écologiques nécessaires pour l'existence du couvert végétal et l'accumulation de la tourbe soient assurées) est limité par le gradient de la surface (Belyea, 2007). Les résultats de Belyea (2007) montrent également l'indépendance de l'abondance des mares avec les variables climatiques. Néanmoins, une étude de la dynamique des mares des tourbières du bassin versant de la rivière La Grande (Collins, 2005) montre que celles-ci sont très sensibles aux variations des conditions météorologiques.

2.1.4 Changements climatiques et aqualyse

Les tourbières sont des écosystèmes intermédiaires entre les systèmes terrestres et les systèmes aquatiques et elles sont susceptibles d'être vulnérables aux changements climatiques. En effet, le fonctionnement, la distribution et le type des tourbières sont fortement dépendants du climat. Toutefois, leur réponse aux changements climatiques reste contradictoire.

Les tourbières ont montré la résilience face aux changements climatiques qui se sont produits dans le passé. Toutefois, l'ampleur des changements climatiques futurs prévus et les événements extrêmes peuvent pousser de nombreuses tourbières au-delà de leur seuil d'adaptation (Parish et al., 2008).

La forte dépendance des tourbières ombrotrophes aux précipitations suggère qu'elles seront plus sensibles au réchauffement et à l'augmentation des précipitations prévus dans les prochaines décennies (Glaser & Janssens, 1986; Charman, 2002).

Selon différents scénarios de simulation des Modèles de Circulation Générale (MCG) pour le nord du Québec, une hausse de la température de 4 °C à 5 °C en hiver et de 2 °C à 3°C en été est envisagée. Une telle augmentation de la température aura comme effet la réduction de la période de gel et une augmentation du taux d'évaporation et d'évapotranspiration. Ces pertes en eau devraient être compensées par une hausse considérable des précipitations d'environ 10 à 20 % en hiver et 5 à 10 % en été (DesJarlais et al., 2004). Cependant, il est difficile de prédire quelle sera la réponse précise des tourbières boréales à un tel changement, à cause de l'équilibre fragile entre les précipitations et l'évaporation qui contrôle leur développement et de la réponse différentielle des espèces végétales (Moore et al., 1998; Weltzin et al., 2000; Talbot et al., 2010).

La plupart des études portant sur l'influence des changements climatiques sur le développement de tourbières prévoient une baisse de la nappe phréatique en réponse à une hausse des températures (Rouse, 1998; IPCC, 2001; Strack et al., 2006; Tarnocai, 2006). Par contre, les résultats des analyses dendrochronologiques des arbres riverains aujourd'hui ennoyés en permanence (Begin & Payette, 1988; Payette & Fillion, 1993; Payette & Delwaide, 2004) indiquent que pendant le XX^e siècle le niveau des lacs du nord du Québec a augmenté par rapport à celui du XIX^e grâce à la hausse des précipitations de neige. Les études dendrochronologiques (Arlen-Pouliot, 2009) et paléoécologiques (Loisel & Garneau, 2010; Van Bellen & Garneau, 2011) des tourbières boréales du bassin versant du Complexe La Grande ont révélé aussi une tendance vers des conditions plus humides durant le dernier siècle. La dégradation avancée du couvert végétal des tourbières minérotrophes et la formation de grands lacs peu profonds avec des médaillons de tourbe au centre des lacs observées durant les inventaires aériens effectués à l'été 2005 et 2006 suggèrent que les conditions climatiques plus humides pourraient être à l'origine de cette dégradation (aqualyse).

Certaines études menées au sud du Labrador et à l'est du Québec signalent un phénomène similaire (Foster et al., 1983; Engstrom, 1984). Selon Foster et al. (1983), la dégradation par l'activité bactérienne et par l'inondation et la coalescence consécutive sont les raisons principales de ce phénomène.

Malgré leur fragilité apparente, les tourbières persistent pendant des milliers d'années grâce à leur capacité d'autorégulation et de modification de leur environnement pour maintenir leur propre fonctionnement. L'existence des tourbières est une preuve claire qu'elles ont été un puits de carbone grâce à un taux de productivité excédant la décomposition pendant des milliers d'années (Waddington & Roulet, 2000). Ces écosystèmes uniques couvrent moins de 3 % de la surface de la Terre, mais elles ont accumulé environ un tiers du carbone stocké dans le sol, soit 547 Pg¹ C (Yu et al., 2010). Comme le montrent plusieurs études, le bilan du carbone est en fort lien avec la position de la nappe phréatique (Pellerin & Lavoie, 2003; Belyea & Malmer, 2004; Pelletier et al., 2007). Tout changement à long terme de la position de la nappe phréatique affectera le bilan du carbone. Des conditions plus humides conduiraient à une baisse de séquestration ou même à une perte du carbone stocké (Waddington & Roulet, 2000; Pelletier et al., 2011). Vu l'importance de ces écosystèmes dans le cycle du carbone et, par conséquent, leur rôle dans le système climatique planétaire, il est important de mieux comprendre la réponse des tourbières aux changements climatiques récents.

2.2 Suivi des tourbières par télédétection

La généralisation des résultats des études écologiques ou hydrologiques *in situ* particulières à un site donné est un défi qui peut être relevé par la télédétection. Les données relatives à l'état actuel et passé de la végétation, de l'humidité du sol et de la structure des tourbières, pourraient être fournies par la télédétection.

En effet, les images satellitaires sont souvent utilisées dans les études écologiques et hydrologiques des tourbières (Töyrä et al., 2001; Quinton et al., 2003; Racine et al., 2005). Compte tenu de la résolution spatiale des capteurs, l'étude des tourbières a surtout concerné les aspects liés à l'identification, l'inventaire et la classification des principaux types. Comme les milieux humides sont des systèmes complexes et hétérogènes, l'automatisation de leur cartographie représente un défi technologique. Différentes techniques ont été proposées pour relever ce défi. Une revue explicite des capteurs et des techniques de classification exploitées le plus fréquemment pour les études écologiques et hydrologiques des milieux humides a été présentée par Ozesmi & Bauer (2002), Poulin et al. (2002) et Fournier et al. (2007).

Avec le lancement des capteurs à très haute résolution (SPOT 5, Ikonos, QuickBird), le problème de l'hétérogénéité des tourbières a pris de l'ampleur car chaque pixel de l'image peut avoir une signature particulière. Les méthodes traditionnelles de classification s'avèrent

¹ P = 10¹⁵

inefficaces pour une délimitation automatique des tourbières (Dechka et al., 2002). Des méthodes plus sophistiquées dites basées objet explorant le contexte spatial du pixel, ont été développées (Burnett & Blaschke, 2003). La différence principale par rapport au traitement traditionnel d'image est que l'unité de base de l'analyse basée objet est un groupe de pixels ayant des caractéristiques spectrales semblables (« l'objet ») et non le pixel isolé. Le bénéfice de la classification basée objet est que les objets contiennent plus d'information que celle fournie par les pixels isolés. Comme complément à l'information spectrale, chaque objet contient de l'information sur sa forme, sa dimension, sa texture, ses sous-objets et super-objets, ainsi que sur le contexte des objets qui l'entourent. Contrairement à l'analyse « par pixel », qui s'appuie sur la statistique des pixels, la méthode basée objet se fonde sur la caractéristique structurale des objets et leur relation spatiale et fonctionnelle (Guindon, 1997). La classification basée objet a donné des résultats prometteurs (Sugumaran et al., 2004 ; Hubert-Moy et al., 2006; Dissanska et al., 2007; Grenier et al., 2007). Burnett et al. (2003) ont proposé une organisation hiérarchique des objets segmentés qui permet une meilleure exploitation des liens contextuels entre les différentes unités des tourbières. Les limites floues des tourbières et le mélange des signatures de l'eau, du sol et de la végétation dans les pixels empêchent la classification précise des images. L'intégration de la logique floue dans les classificateurs améliore la détection des zones de transition (Chiu & Couloigner, 2006).

L'exploitation de la variation spatiale (texture) de l'image est devenue un aspect important dans l'analyse et la classification des images à très haute résolution (Chiu & Couloigner, 2004; Chiu & Couloigner, 2006). Plusieurs études ont montré que la précision dans la classification des images s'améliore en combinant la texture et l'information contextuelle avec les données spectrales (Dedieu et al., 1997; He & Collet, 1999; Franklin et al., 2001; Coburn & Roberts, 2004; Tso & Olsen, 2004).

Les photos aériennes restent une source d'information précieuse pour des études historiques de la dynamique des écosystèmes grâce à la résolution spatiale qu'elles offrent (Pellerin & Lavoie, 2003). Elles sont souvent utilisées pour l'évaluation des changements spatiaux et temporels de différents types de milieux humides (Hefner & Storrs, 1994; Dahl, 2000; Pellerin & Lavoie, 2003; Huckle et al., 2004) ainsi que pour le suivi de petits bassins d'eau comme les petites mares printanières (Lathrop et al., 2005) et les étangs thermokarstiques (Yoshikawa & Hinzman, 2003). L'analyse des photos aériennes s'effectue habituellement par photointerprétation.

Toutefois, le processus de photointerpretation est très laborieux, chronophage et dépend de l'expérience et de la formation de l'interprète (Hefner & Storrs, 1994). Par exemple, la dynamique récente des mares de trois tourbières du bassin versant de la rivière La Grande a été étudiée par photointerprétation (Collins, 2005). La méthode d'extraction de paramètres des mares n'étant pas automatisée, la subjectivité de l'interprétation pourrait avoir biaisé les résultats.

Dans la suite de ces travaux sur la dynamique récente des mares, le premier objectif de la présente étude est de développer une approche automatisée en vue de connaître le changement récent des compartiments terrestres et aquatiques à l'aide de photos aériennes noir et blanc et d'images satellitaires panchromatiques à très haute résolution.

CHAPITRE 3: CLASSIFICATION BASÉE OBJET DES IMAGES SATELLITAIRES PANCHROMATIQUES EN TRÈS HAUTE RÉSOLUTION

3.1 Introduction

Compte tenu de la petite taille des éléments microtopographiques des tourbières minérotrophes structurées (parfois le diamètre des mares et la largeur des lanières est moins de 1 m), des images à très haute résolution spatiale et une méthode appropriée de traitement sont nécessaires pour la réalisation de la présente étude. Le choix de la plus vieille image disponible pour cette région se limite aux photographies aériennes noir et blanc de 1957. Pour l'étude de l'état actuel des tourbières, nous avons sélectionné des images en bande panchromatique du satellite QuickBird. Au début de cette recherche, le satellite QuickBird fournissait des images à la plus haute résolution disponible pour des satellites commerciaux, notamment 60 cm de résolution en mode panchromatique. Cependant, l'information spectrale des images panchromatiques est assez limitée malgré leur haute résolution spatiale. Donc, pour être capable de bénéficier de la haute résolution spatiale de ces images, il est nécessaire de chercher des caractéristiques autres que celle de la réflectance spectrale et d'exploiter le contexte spatial du pixel.

Alors, afin de surmonter les limitations liées au traitement des images à très haute résolution, la première étape de ce travail consistait au développement d'une méthode de classification basée objet des images à très haute résolution spatiale pour l'identification des tourbières structurées et de leurs différentes unités morphologiques (mares, lanières). Cette méthode devait être applicable tant sur des images numériques satellitaires que sur des photographies aériennes d'archive. Pour cette raison, juste la bande panchromatique des images QuickBird a été utilisée. Le présent chapitre résume la méthode semi-automatique développée pour la classification des images satellitaires panchromatiques à très haute résolution spatiale et des photos aériennes noir et blanc. Une description détaillée de cette méthodologie a déjà été publiée (Dissanska et al., 2009).

3.2 Méthode

Afin d'extraire l'information sur l'état récent et passé des tourbières minérotrophes, une classification basée objet a été appliquée. Avant la classification des images, un traitement initial sur les données a été effectué afin de corriger les distorsions géométriques causées par la courbure de la Terre et sa rotation, l'altitude, la vitesse et le comportement de la plate-forme, le relief à la surface, etc. Compte tenu que notre étude était limitée uniquement à une seule bande spectrale (panchromatique des images QuickBird et monochromatique des photos aériennes noir et blanc), nous avons exploité l'information texturale pour la segmentation des images satellitaires et comme critère supplémentaire de séparabilité des classes. Dans les sections suivantes, les principes généraux du traitement des images sont présentés. Une description détaillée pour chaque étape de traitement et paramètres utilisés (correction géométrique, analyse de texture, segmentation, hiérarchie des classes, attributs utilisés pour la classification, validation de la classification) est donnée dans (Dissanska et al., 2009) et (Dissanska et al., 2011)

3.2.1 Données images

Dirigé par une faible disponibilité des photos aériennes et la nécessité d'une résolution appropriée à nos objectifs, nous avons utilisé trois images panchromatiques QuickBird (deux images pour La Grande-3 site (acquises le 12 et 17 août 2003, résolution 0,60 m), une image pour Laforge-1 site (acquise le 2 septembre 2006, résolution 0.60 m) et 8 photos aériennes noir et blanc (4 photos pour chaque site d'étude - La Grande-3, échelle 1:60 000, acquises le 25 juin 1957 et Laforge-1, échelle 1:40000, acquises le 25 juin 1957). Les photos aériennes proviennent de la Photothèque nationale de l'air. Elles ont été agrandies et numérisées par la compagnie Hauts-Monts Inc. La photographie argentique ne peut être grossie à une échelle donnée sans tenir compte de la granularité de l'émulsion qui devient un facteur limitant. Dans notre cas, il s'est avéré plus approprié de numériser et de grossir les photos aériennes à l'échelle 1 : 60 000 à 1815 dpi, ce qui donne une résolution de pixel à 0,84 m au sol qui est relativement comparable à celle des images QuickBird. Les photos pour la région Laforge-1 étant à l'échelle 1 : 40 000 ont été numérisées à 1215 dpi pour obtenir une résolution au sol égale à 0,84 m.

Comme des données auxiliaires pour la correction géométrique, nous avons utilisé un modèle numérique d'altitude (MNA) de résolution de 50 m, le relevé GPS (Global positioning system) de la route de Radisson à Brisay (précision de > 5 m) ainsi que deux orthoimages Landsat-7 ETM+ (panchromatique, résolution de 15 m) et une image SPOT-5 (panchromatique, résolution de 2,5 m). De nombreuses photographies numériques obliques et des photographies acquises lors de survols en hélicoptère et des campagnes de terrain (mai 2005 et août 2006) ont également été utilisées pour l'étalonnage et la validation de la méthode. Les bandes multispectrales des images QuickBird (résolution de 2.40 m) ont été ainsi utilisées pour soutenir l'interprétation de l'échantillon aléatoire d'objets aléatoires utilisés pour la validation, car elles offrent une meilleure distinction entre les milieux tourbeux et les hautes terres. Plus de détails sur les images et les données auxiliaires utilisées sont fournis dans Dissanska et al. (2009).

3.2.2 Prétraitement des images

3.2.2.1 Corrections géométriques

Les images QuickBird utilisées sont en mode standard, ce qui signifie que les calibrations radiométriques, les corrections des distorsions dues aux détecteurs ainsi que les corrections géométriques selon une projection cartographique donnée à l'aide d'un MNA assez grossier ont été faites par le fournisseur d'images (DigitalGlobe). Cependant, les images QuickBird avaient un décalage considérable avec les points de contrôle au sol (Figure 6.2, dans Dissanska et al. (2009)). Afin d'obtenir une correction adéquate, nous avons appliqué une transformation polynomiale de premier ordre en utilisant les points de contrôle de la route Radisson – Brisay, orthoimages Landsat-7 ETM+ (bande panchromatique, résolution 15 m, région La Grande-3) ou SPOT 5 (bande panchromatique, résolution de 2,5 m, région Laforge-1). L'orthorectification de l'image SPOT 5 a été produite à partir de l'orthoimage LANDSAT-7 ETM+ et les points de contrôle de la route Radisson – Brisay. Les photos aériennes ont été corrigées à l'aide de la méthode photogrammétrique en utilisant les paramètres de la caméra, le MNA et les points de contrôle provenant des images QuickBird géoréférencées, Landsat-7 ETM+ (région La Grande-3) ou SPOT 5 (région Laforge-1). Pour le calcul de la nouvelle valeur du pixel dans sa nouvelle position, nous avons appliqué la convolution cubique. Toutes les images ont été géoréférencées en projection UTM (Universal Transverse Mercator), la zone 18 Nord, dans le système de référence géodésique NAD83 (North American Datum de 1983)

Après la correction géométrique, les deux images QuickBird pour le site de La Grande-3 ont été mosaïquées. Pour la création de la mosaïque une normalisation radiométrique (« color balance ») a été appliquée afin d'éliminer les différences dues à l'angle de visée (7° et 12°) ou les conditions météo précédant leur acquisition. Les photographies aériennes orthorectifiées ont été utilisées pour créer deux mosaïques couvrant les deux sites d'étude. Cependant, il est important de noter que, malgré que l'erreur quadratique moyenne des photographies orthorectifiées soit < 1 pixel (0,82 m et 0,64 m en directions X et Y respectivement), le décalage entre les photos aériennes et QuickBird à certains points de contrôles indépendants (ICPs) est considérable (de l'ordre de 15 m). Comme résultat, les cartes produites à partir des images des deux dates différentes (photos aériennes – 1957, QuickBird – 2003 (La grande-3), 2006 (Laforge-1)) ne sont pas parfaitement calées et la comparaison directe de ces cartes était impossible. Afin de remédier à ce problème, les sous-scènes de la mosaïque de photographies aériennes contenant des tourbières individuelles et la classification de cette zone ont en outre été recalées à la zone correspondante d'images QuickBird.

3.2.2.2 Analyse de texture

Pour l'analyse de texture nous avons appliqué une méthode statistique basée sur la matrice de co-occurrence GLCM (Grey level co-occurrence matrix) introduite par (Haralick et al., 1973). Les statistiques sont basées sur les fréquences d'apparence des niveaux de gris dans une fenêtre glissante. La taille de fenêtre est un paramètre crucial et son choix dépend de la taille des objets traités et de la résolution d'image. Cependant, il n'y a pas de fenêtre de taille unique qui pourrait bien caractériser la gamme de textures et classes du couvert terrestre présent sur une image donnée (Coburn & Roberts, 2004). Une assez grande fenêtre pourrait capter plus d'une catégorie d'occupation du sol et cela va détériorer la détection des caractéristiques uniques à chacune des classes. Une taille plus petite de la fenêtre permet de garder la variance assez basse et maximiser la séparabilité des classes. De plus, la petite taille de la fenêtre pourrait jouer le rôle de filtre « passe haut » (c.-à-d. accentue les zones de forte variations de luminosité comme les contours) pour les zones transitionnelles comme celles entre les mares et les lanières. La taille optimale pour l'analyse de texture a été établie en explorant les semivariogrammes omnidirectionnels de 9 classes structurales présentes sur les images (forêt_lichen, forêt_dense, forêt_tourbe, fen, fen_petites_mares, fen_mares, bog, bog_mares, brûlis/roche_végétation). Nous avons retenu une taille de fenêtre de 5x5 pixels pour QuickBird et 3x3 pixels pour des photos aériennes comme étant la plus appropriée pour l'analyse de texture. Le nombre de niveaux de gris influence aussi l'image finale. Le nombre de niveau de gris a été réduit en appliquant une égalisation d'histogramme de manière à attribuer à chaque

niveau de gris la même probabilité (Haralick et al., 1973). Nous avons choisi respectivement 32 et 16 niveaux de gris pour les images QuickBird et les photos aériennes. La différence des paramètres choisis pour l'analyse de texture reflète la différence dans leur résolution et la dynamique des niveaux de gris (16 bits pour QuickBird et 8 bits pour les photos aériennes numérisées). Pour notre étude, nous avons utilisé 7 mesures de texture basées directement sur GLCM (GLCM Homogénéité, GLCM Moyen, GLCM Entropie, GLCM Second Angulaire Moment, Inverse Différence) ou sur le GLDV (Grey level difference vector), dérivé de GLCM (GLDV Entropie, GLDV Second Angulaire Moment). Ces mesures de texture ont été choisis car elles ont permis de ressortir les milieux tourbeux et de rehausser les éléments de leur structure (Figure 6; dans Dissanska et al. (2009)). La combinaison des paramètres choisis est plus performante pour la délimitation des tourbières que le calcul des mêmes indices de texture par eCognition (Figure 6.5 et Tableau 6.4; dans Dissanska et al. (2009)). De plus, grâce à ces images de texture, l'interprétation et le choix des sites d'entraînement sont facilités. Les images texturales créées ont été intégrées comme des bandes supplémentaires dans le processus de la classification basée objet des images.

3.2.3 Approche basée objet

L'approche basée objet est fondée sur une segmentation de l'image qui crée des polygones ou des « objets » ayant des pixels homogènes. Ces « objets » sont les unités de base pour le traitement ultérieur. Pour la segmentation et la classification des images, le logiciel eCognition (Definiens) a été utilisé. Nous avons appliqué une segmentation multi-échelle (Batz & Schape, 2000), implantée dans le logiciel eCognition, qui permet une création d'objets à différente échelle simultanément sur une même image. Le changement de l'échelle d'analyse permet aux différentes structures d'émerger (Woodcock & Strahler, 1987; Benson & MacKenzie, 1995). La stratégie de base est donc de modéliser les structures d'intérêt (dans notre cas – les tourbières structurées) en construisant une hiérarchie des classes thématiques selon les liens mutuels et sémantiques entre eux. Afin de décrire précisément les objets d'intérêt, une connaissance a priori des ces objets est indispensable. Pour tenir compte de la diversité, de la complexité et de la structure hiérarchique des tourbières structurées, nous avons appliqué une segmentation multi-échelle et une classification hiérarchique à 4 niveaux. Le choix des paramètres de segmentation (échelle, couleur, forme) pour les Niveau 2 (intermédiaire) et Niveau 1 (le plus fin) a été guidé par le but ultime de délimiter les tourbières et leurs éléments structuraux. Pour déterminer les paramètres de segmentation pour les images QuickBird plusieurs essais ont été réalisés. Toutefois, compte tenu de la différence dans la résolution spatiale et radiométrique de

deux types d'images, pour les paramètres d'échelle utilisés pour la segmentation des photographies aériennes, certaine proportionnalité a été recherchée aux ceux utilisés pour l'image QuickBird. Les bandes utilisés pour la segmentation de chaque niveau ont été choisis visuellement : nous avons choisi la combinaison de bandes (spectrales et texturales) qui permet mieux ressortir les classes d'intérêt pour chaque niveau. Les mêmes bandes ont été utilisées pour la segmentation des photographies aériennes. Les paramètres de segmentation pour les deux sites d'études et pour les deux types d'images sont résumés dans le Tableau 3.1. Les classes définies pour caractériser les tourbières pour les deux niveaux de segmentation suivent un gradient de l'humidité (Niveau 1, Niveau 2) ou la densité des mares (Niveau 2). La description de classes est présentée dans le Tableau 7.1

Tableau 3.1 Paramètres de segmentation

Niveau	Site	Paramètre d'échelle		Couleur		Forme (Compacité/ Lissage)		Bandes	
		QB	PhA	QB	PhA	QB	PhA	QB	PhA
2	LG3	50	30	0,7	0,9	0,7/0,3	0,7/0,3	Panchromatique GLCM moyenne GLCM entropie GLDV second moment angulaire Inverse différence	
	LA1	20	30	0,7	0,9	0,7/0,3	0,7/0,3		
1	LG3	10	6	0,9	0,9	0,7/0,3	0,7/0,3	Panchromatique GLDV entropie GLDV second moment angulaire Inverse différence	
	LA1	6	6	0,9	0,9	0,7/0,3	0,7/0,3		

Le processus commence (étape 1, Figure 3.1) par une segmentation à une échelle intermédiaire (Niveau 2) où l'objectif était d'identifier les milieux tourbeux (tourbe, tourbe saturée, tourbe structurée) et les plus grands plans d'eau (lacs, mares plus grandes, eau-végétation) des autres types d'occupation du sol (forêt, route, gravier). Ensuite, l'image a été segmentée à une échelle plus fine (étape 2) afin de délimiter les différents éléments structuraux à l'intérieur des tourbières. Le processus continue avec la classification des objets du Niveau 2 (étape 3). Cette séquence permet d'utiliser, pour la classification des objets de ce niveau, des caractéristiques basées sur la densité et la direction des sous-objets. À l'étape 4, les objets adjacents du même groupe sémantique sont fusionnés. Ainsi, tous les objets d'une tourbière donnée ou d'un plan d'eau sont réunis dans des objets plus gros (Niveau 3).

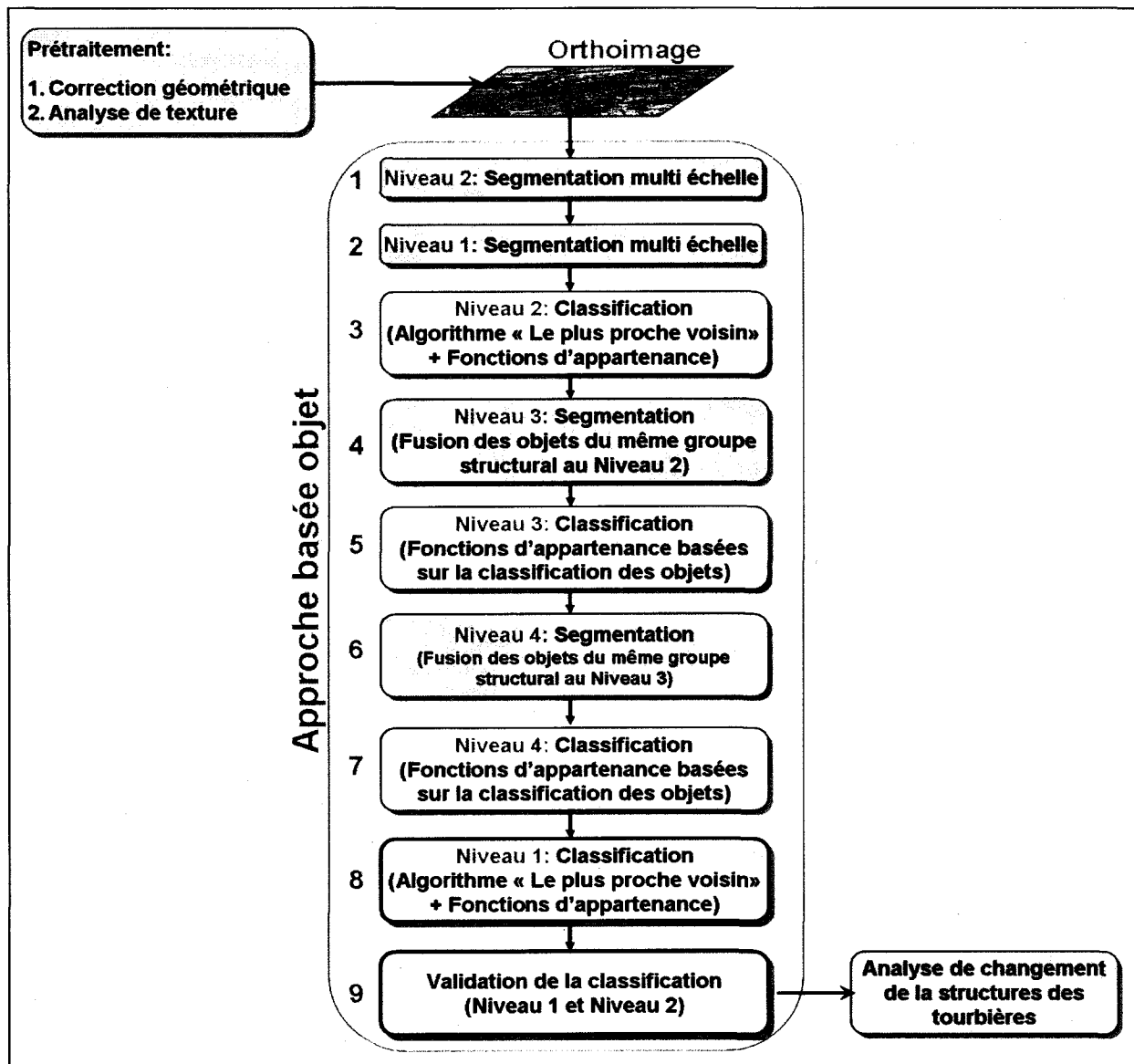


Figure 3.1 L'enchaînement des étapes de l'analyse basée objet

Après leur classification (étape 5) basée uniquement sur la classification de leurs sous-objets et sur les relations avec leurs voisins, un 4^{ème} niveau a été créé (étape 6). Au 4^{ème} niveau, les polygones créés correspondent aux tourbières entières incluant les compartiments aquatiques et les parties à plus haute densité d'arbres qui font partie de la tourbière (classifiée comme « Forêt sur tourbe » au Niveau 2 et comme « Forêt dans la tourbière » au Niveau 3). À ce niveau, trois classes sont définies (étape 7) – « Tourbières », « Eau » et « Autre ». Une fois délimitées, les tourbières peuvent être classifiées en détail (étape 8). Au niveau plus fin, 12 classes ont été définies décrivant différentes unités morphologiques des tourbières (tourbe

sèche, tourbe, tourbe saturée, lanière, lanière saturée, médaillon de végétation, petite mare, végétation – eau, eau – végétation, eau peu profonde, eau profonde, arbre). Afin qu'un objet de Niveau 1 soit attribué à l'une de ces 12 classes, il doit être un sous-objet des classes « Tourbière » ou « Eau » de Niveau 4. Trois autres classes (lichen, forêt, affleurement) du Niveau 1, décrivent les environnements adjacents des tourbières et ont été attribuées uniquement aux sous-objets de la classe « Autre » de Niveau 4. Une telle exploitation des liens horizontaux (entre les voisins) et verticaux (entre super- et sous-objets) permet de réduire la confusion entre les classes.

La délimitation des tourbières et leurs éléments structuraux sur les images satellitaires n'est pas une tâche facile, car ils sont caractérisés par un changement graduel de la végétation et des conditions hydriques. La classification appliquée dans la présente étude est basée sur la « logique floue » (Zadeh, 1965), implantée dans le logiciel eCognition. Contrairement aux approches traditionnelles de classification basées sur la logique binaire, la logique floue permet d'intégrer différentes caractéristiques (ex. spectrales et contextuelles) dans la description des classes par des opérateurs logiques et d'estimer l'association possible des objets aux autres classes en améliorant de cette manière la classification des objets. Comme classificateurs, nous avons utilisé soit l'algorithme « Le plus proche voisin » (l'objet est associé à la classe dont un de ses sites d'entraînement se trouve le plus proche de lui), soit des fonctions d'appartenance décrivant les propriétés spécifiques des objets à l'étude (surtout des relations contextuelles) ou soit une combinaison des ces deux approches. Les sites représentatifs pour chaque classe, choisis à l'aide de photographies numériques obliques et des photographies prises au sol, ont été utilisés pour l'apprentissage de l'algorithme « Le plus proche voisin ». Ainsi, l'approche basée objet permet d'appliquer différentes stratégies de classification simultanément sur différentes parties d'une image. Dans notre cas, par exemple, l'eau profonde est classifiée simplement à l'aide d'une fonction d'appartenance qui joue un rôle de seuil. En même temps, pour les autres classes du même niveau, nous utilisons des descriptions beaucoup plus complexes. Les descriptions détaillées des règles de classification pour chaque classe de Niveau 2 et Niveau 1 sont présentées dans les Tableau 6,3A et Tableau 6.3B, respectivement. Le choix d'attributs a été assisté par les outils « Feature View » et « Feature space optimisation » intégrés dans le logiciel. Le premier des ces outils permet de visualiser les attribues des objets et de choisir ceux qui sont susceptibles de distinguer les class, tandis que le deuxième, notamment « Feature space optimisation », calcule la meilleure combinaison d'attributs afin que la séparabilité des classes soit optimale,

3.2.4 Validation de la classification

La qualité de la classification basée objet dépend de la qualité de la segmentation et de la description adéquate des classes d'intérêt. Par conséquent, nous avons d'abord évalué la qualité de la segmentation par une inspection visuelle des images classifiées. Un nombre élevé d'objets mal classés serait une indication de choix inapproprié des paramètres de segmentation. Les objets à proximité des tourbières ont été soigneusement inspectés et certains objets ont été manuellement modifiés avant la classification finale. Ensuite, la validation de la classification (étape 9, Figure 3.1) a été effectuée à l'aide d'une méthode statistique traditionnelle comme la matrice de confusion. Compte tenu du petit nombre de sites de référence (vérité terrain), nous avons utilisé comme sites de référence des objets sélectionnés aléatoirement pour chaque classe à partir des images classifiées. Ensuite, ces objets ont été visuellement interprétés et associés à la classe jugée la plus appropriée. Le nombre optimal d'objets utilisés pour la validation a été déterminé en se basant sur la distribution multivariée (Congalton & Green, 1999).

3.3 Résultats

Comme résultat du traitement décrit ci-dessus, 4 cartes d'occupation du territoire ont été produites (2 cartes pour 2 dates différentes pour chaque site d'études : 1957 et 2003 pour La Grande-3, et 1957 et 2006 pour Laforge-1). La classification finale d'une scène de la région de Laforge-1 est montrée à la Figure 3.2. La zone encadrée en rouge est présentée dans un plan plus rapproché sur la Figure 3.3. Les cartes d'occupation du territoire récentes (2003, 2006) pour les deux sites d'étude (La Grande-3, Laforge-1) sont incluses dans l'Annexe I. La précision globale de la classification pour les 4 cartes au Niveau 2 varie respectivement entre 88 % et 95 % pour La Grande-3 (photographie aériennes) et Laforge-1 (QuickBird). La validation de la classification montre une haute précision du producteur pour le groupe de classes des tourbières - entre 92 % (La Grande-3, QuickBird) et 98 % (Laforge-1, QuickBird). Ce résultat indique une faible erreur d'omission d'objets associés aux tourbières (entre 2 et 8 %), ce qui signifie que les tourbières sont bien détectées et délimitées. L'erreur de classification est principalement attribuable à la classification de certains objets de la classe « Tourbe structurée » comme objets « Forêt sur tourbe ». Toutefois, l'erreur de commission est plus élevée et varie entre 10 % (Laforge-1, QuickBird) et 26 % (La Grande-3, photographie aériennes). Néanmoins, cette erreur n'affecte pas l'estimation de la superficie dans les tourbières réelles car elle est associée aux objets des classes « Lichen », « Forêt-lichen » et « Roche/Gravel » incorrectement classifiés comme des objets « Tourbe », « Tourbe sèche ». La

classification de brûlis a été aussi souvent confondue avec les objets de classe « Tourbe » ou « Tourbe saturée ». Par conséquent, pour éliminer cette confusion, les objets de classe « Brûlis » ont été classifiés manuellement. Il est important de noter que pour les besoins de la présente étude, aucune différence n'a été faite entre les tourbières minérotrophes et ombrotrophes. Leur signature spectrale et texturale sont très similaires sur les images panchromatiques. Ainsi, les classes définies sont applicables aux deux types de tourbières. Cependant, une distinction de ces types pourrait être faite au Niveau 4, en utilisant la disposition spatiale et les dimensions des sous-objets au Niveau 1.

Pour le niveau le plus fin (Niveau 1) qui sépare l'image en 15 classes la précision globale varie entre 72 % (La Grande-3, photographies aériennes) et 83 % (Laforge-1, QuickBird). La plus grande source de confusion provient des objets de classes « Forêt » ou « Lichen » classifiés comme des objets des tourbières. Cette erreur de classification est un résultat de la propagation de l'erreur du Niveau 2 à cause de relations entre les classes de différents niveaux. Pour la site de Laforge-1, ce problème a été atténué par les modifications apportées au Niveau 3 décrites dans Dissanska et al., 2011. Cette erreur n'a pas d'incidence sur les tourbières elles-mêmes. Les principales confusions dans les tourbières sont entre les classes « Tourbe » et « Lanière », « Lanière saturée » et « Végétation-eau », « Lanière saturée » et « Tourbe saturée » ainsi qu'entre « Végétation-eau » et « Petite mare ». Ces confusions sont explicables par les caractéristiques spectrales et texturales très similaires des ces classes. La seule différence est dans les relations avec des objets voisins (frontière avec des objets du groupe « Eau » ou « Tourbière »). Par contre, plusieurs objets mal segmentés, incluant de petites mares étroites et des parties de lanières, sont également classés comme « Végétation-eau ». De plus, plusieurs petits objets (1-2 pixels) identifiés comme « Arbres » ont été classifiés comme « Eau-végétation » ou « Végétation-eau ». Il existe aussi une certaine confusion entre les classes aquatiques, notamment « Eau profonde », « Eau peu profonde » et « Eau-végétation ».

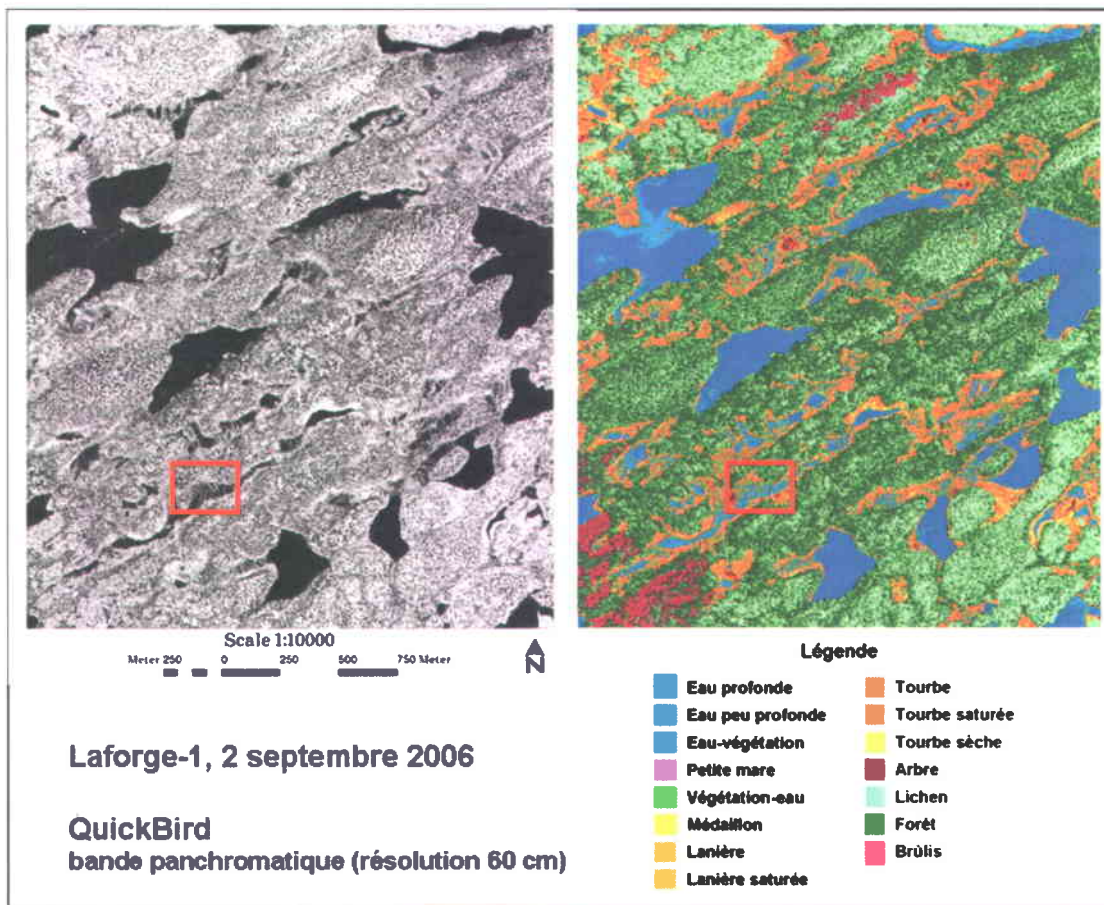


Figure 3.2 La classification d'image QuickBird pour une scène de la région de Laforge-1. La zone encadrée en rouge est présentée dans un plan plus rapproché à la figure suivante.

Comme résultats de toutes ces confusions rencontrées, la précision d'usager dans les classes individuelles varie entre 52 % et 100 %. La plus faible précision est pour la classe « Végétation-eau » (Laforge-1, photographie aériennes) et la plus grande est pour la classe « Tourbe sèche » (La Grande-3, QuickBird).

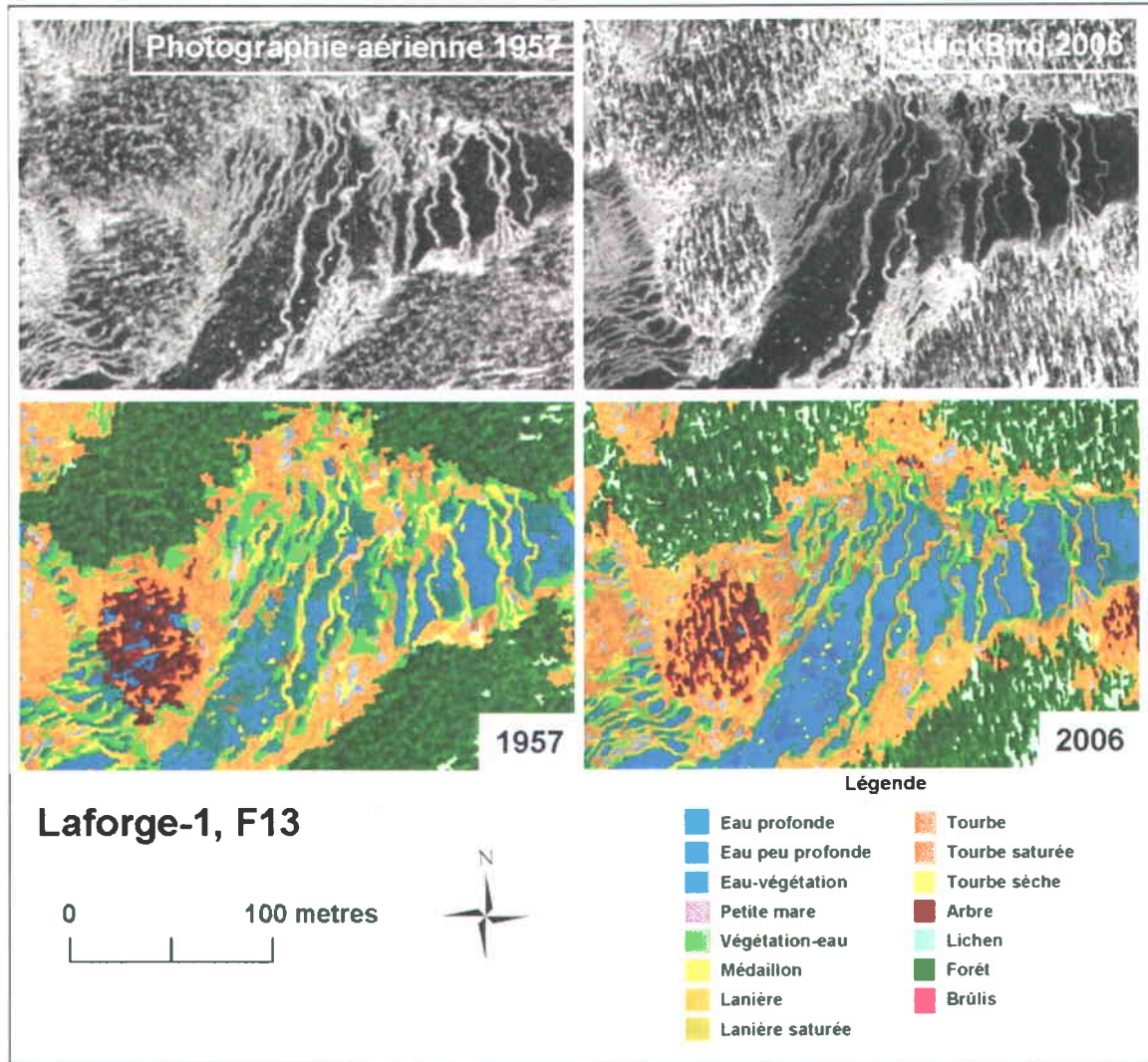


Figure 3.3 La classification de l'année 1957 (photographies aériennes) et de 2006 (QuickBird) pour la zone encadrée sur la Figure 3.2 dans la région de Laforge-1.

Certaines des confusions mentionnées sont acceptables pour l'analyse du changement de la structure des tourbières décrit dans le chapitre suivant, parce que les classes confondues font partie du même compartiment (ex. les classes « Tourbe » et « Lanière », compartiment « terrestre »). Par contre, les confusions entre les classes des deux compartiments différents, comme, par exemple, dans le cas « Eau-végétation » et « Lanière saturée » provoquent une interprétation erronée du changement de la structure des tourbières.

Compte tenu de confusions entre les classes mentionnées ci-dessus et du fait que la précision de détection du changement par l'approche de post-classification appliquée par la suite est fortement dépendante de la précision de classification des images comparées, les 12 classes qui caractérisent les tourbières au niveau le plus fin ont été regroupées (Tableau 7.1). Les classes ont été divisées en trois groupes : compartiments aquatique, semi-aquatique et terrestre. Le compartiment aquatique rassemble les classes couvertes en eau en permanence durant la saison de croissance. Ce regroupement permet d'éliminer les fausses alertes de changement (ex. « Tourbe » et « Lanière »). Comme résultat, la précision globale (niveau 1, 3 compartiments) varie entre 89 % (QuickBird, La Grande – 3) et 93 %. La précision d'utilisateur varie entre 84 % et 98 %, La précision de producteur varie entre 84 % et 97 %.

3.4 Conclusion

Les résultats montrent que la méthode de classification basée objet des images panchromatiques à très haute résolution spatiale, développée dans le cadre de l'étude doctorale, détecte et délimite les tourbières structurées avec une très grande précision (de 88 % à 95 % précision globale). Les éléments structuraux de ces écosystèmes complexes sont également délimités et classifiés à un niveau satisfaisant (précision globale 72 – 83 %). Cependant, compte tenu de la confusion entre les classes à l'intérieur des tourbières et dans le but de mieux analyser le changement de leur structure, les classes ont été regroupées en trois compartiments, soient aquatique, semi-aquatique et terrestre. Ainsi, la précision globale devient > 89 %, ce qui assure une précision satisfaisante pour l'application par la suite d'une approche « post-classification » de détection du changement.

Les résultats montrent aussi que la procédure de classification (classe hiérarchie, description de classes) est facilement applicable à différents types d'images panchromatiques (photographies aériennes et images QuickBird) ainsi que aux différents environnements du bassin (La Grande-3 et Laforge-1).

Ainsi, la méthode semi-automatique de classification basée objet des images panchromatiques à très haute résolution développée peut remplacer efficacement l'interprétation visuelle et la délimitation manuelle traditionnellement utilisées pour l'évaluation écologique des tourbières structurées sur des photos aériennes historiques ou des images satellitaires panchromatiques.

CHAPITRE 4:

ÉVALUATION DES CHANGEMENTS DE LA STRUCTURE SPATIALE DES TOURBIÈRES

4.1 Introduction

Le développement de la microtopographie des tourbières structurées est un processus complexe, multidirectionnel et souvent asynchrone dans les différentes parties d'une seule tourbière (Foster & Fritz, 1987; Karofeld, 1998). Le couvert végétal des tourbières est très sensible aux changements environnementaux. L'altération des conditions écologiques est principalement due aux changements de conditions hydrologiques, notamment le changement du niveau de la nappe phréatique, l'amplitude de ses fluctuations ainsi que le changement de la composition chimique de l'eau. Le changement de ces facteurs fondamentaux provoque des changements dans la composition du couvert végétal et dans le taux d'accumulation de la tourbe. À son tour, ces changements provoquent une chaîne de transformations des propriétés physiques de la tourbe et modifient le microrelief des tourbières. Au cours du développement des tourbières structurées, les microformes peuvent se contracter ou s'élargir pour s'adapter aux fluctuations de l'humidité de surface (Barber, 1981). En général, ces processus sont relativement lents et leur vitesse est déterminée par le taux d'accumulation de la tourbe (Ivanov, 1981). Selon (Ivanov, 1981), le rapport entre les superficies de compartiment aquatique et terrestre des tourbières est un paramètre important pour la stabilité de tourbières structurées. Le changement de ce rapport pourrait fournir au système la résilience aux changements hydrologiques en assurant une invariabilité du niveau de la nappe phréatique (Ivanov, 1981; Barber, 1981). Cependant, dans certaines conditions, comme les changements climatiques ou les influences externes (anthropiques, feu, etc.), l'incapacité à maintenir le niveau de la nappe phréatique près de la surface dans les limites des fluctuations à long terme admissibles par la végétation, conduit à la dégradation du couvert végétal de la tourbière (Ivanov, 1981).

De son côté, la modification des conditions hydrologique locales peut être due aux changements climatiques ainsi qu'à l'évolution de la morphologie de la surface et des propriétés de la tourbe indépendamment des changements climatiques.

Cependant, lorsque les images satellitaires sont utilisées pour l'étude de la dynamique de la structure des tourbières, il faut prendre en considération que les changements observés entre les deux dates pourraient également être un reflet de la différence dans les conditions d'humidité de surface causée par les conditions météorologiques précédant l'acquisition des images ou par la différence saisonnière naturelle entre les deux dates d'acquisition.

Afin d'élucider l'état écologique actuel (2003, 2006) et passé (1957) concernant l'étendue des compartiment terrestre et aquatique de tourbières minérotrophes structurées du bassin versant de la rivière La Grande, ainsi que leur changement récent (les derniers 50 ans), nous avons utilisé les cartes détaillées d'occupation du sol pour les dates mentionnées, créées pour les deux sites d'étude, soient La Grande-3 et Laforge-1. Dans l'intention de mieux interpréter les résultats des changements détectés, une analyse des données météorologiques a été également effectuée.

4.2 Méthode

Pour l'analyse du changement de la structure de tourbières minérotrophes structurées entre les deux dates, nous avons appliqué l'approche de « post-classification ». Cette approche est basée sur les statistiques de l'évolution des classes en différentes dates, extraites des images classifiées. D'une part, la technique de détection de changement par post-classification est préférable dans les cas où les moyens d'observations (dans notre cas, des photos argentiques et des images satellitaires à très haute résolution QuickBird) et les conditions des prise de vue (les conditions d'ensoleillement, de transmission atmosphérique, les angles de prise de vue, etc.) ne sont pas les mêmes, car elle permet d'atténuer les facteurs de modification de la luminance intervenant indépendamment de la scène observée (Mas, 1999; Coppin et al., 2004). Un autre avantage de cette technique est qu'elle permet non seulement de repérer et de mettre en évidence le changement, mais aussi de quantifier et de comprendre la nature du changement d'état d'un objet ou d'un phénomène à partir d'observations à différents instants (Jensen, 2005). Néanmoins, l'inconvénient principal de comparaison post-classification est le cumul des erreurs de classification de chacune des images comparées.

De manière plus précise, nous avons abordé les quatre aspects principaux de la détection des changements d'occupation du sol (Macleod & Congalton, 1998) soit 1) détecter les changements qui ont eu lieu, 2) mesurer l'étendue du changement (c.-à-d., mesurer les surfaces affectées), 3) identifier la nature du changement et 4) évaluer la particularités spatiales du changement.

4.2.1 Analyse du changement de superficies totale et aquatique des tourbières entre 1957 et 2003/2006

Afin de détecter les changements et d'évaluer leur étendue, nous avons comparé les superficies occupées par les différents compartiments (terrestre, semi-aquatique et aquatique) ainsi que leur rapport à partir des cartes pour les deux dates et pour les deux sites d'études.

4.2.2 Méthode Delphi

Des données « vérité terrain » historiques concernant la superficie des compartiments aquatiques des tourbières étudiées ne sont pas disponibles. À cause d'un problème technique avec l'instrument (Trimble 5800 RTK GPS) lors de la campagne de terrain, de données « vérité terrain » actuelles ne sont pas disponibles également. Afin de remédier à cette situation, pour valider les estimations des superficies extraites des images classifiées et pour établir un seuil de changement significatif, nous avons utilisé la méthode Delphi. Cette technique a été utilisée pour la prévision ou la validation dans des différents champs de recherche quand il y a une connaissance incomplète d'un problème ou des phénomènes (Skulmoski et al., 2007). La technique Delphi est un processus itératif basé sur le consensus des experts (Linstone & Turoff, 1975). Nous avons appliqué la technique Delphi basée sur l'estimation par photointerprètes des superficies totales et aquatiques de deux tourbières minérotrophes structurées (une pour chaque site d'étude) à deux tours. Ainsi, sept experts en télédétection des ressources en eau ont été approchés pour créer des polygones afin de 1) délimiter deux tourbières sélectionnées sur l'image QuickBird et la mosaïque de photos aériennes et 2) délimiter les mares à l'intérieur de ces deux tourbières. Afin de faciliter la délimitation, nous avons sélectionné deux tourbières (LG3 – 54°11'14"N, 72°22'58"O; LA1 – 53°34'22"N, 76°15'56",O) bien circonscrites par la forêt et avec des mares bien définies. L'estimation des superficies respectives obtenues des images classifiées a été comparée avec les estimations des photointerprètes. Les variations des estimations de photointerprètes ont servi à déterminer la marge d'erreur relative (défini comme la moitié de l'intervalle de confiance exprimé en pourcentage de la superficie moyenne). Le changement de superficie pour les deux dates est considéré comme significatif s'il dépasse la marge d'erreur relative. Ce seuil a été appliqué aux estimations des superficies des tourbières et leur compartiment aquatique correspondant à partir de photographies aériennes classifiées en vue d'atténuer les effets possibles dues à la différence de résolutions spatiale et spectrale des deux types d'images, notamment les images QuickBird et les photographies aériennes, ainsi que l'effet des ombres.

4.2.3 Transition entre les classes

Afin d'identifier la nature du changement, nous avons étudié la transition mutuelle au fil du temps entre les classes pour deux tourbières (F23 et F30). La tourbière F23 a été choisie car elle est la tourbière ayant la plus grande augmentation (23,5 %) de la superficie aquatique en 2006. La tourbière F30 a été choisie car elle montre des signes de forte dégradation de leur couvert végétal renfermant deux grands lacs. Les deux tourbières sont de taille > 2 ha. La tourbière F30 est présentée dans la Figure 7.12. La précision de l'orthorectification des images à comparer a une influence considérable sur la précision des changements détectés. Par conséquent, comme le décalage entre les cartes de deux dates différentes en certains points est significatif (Dissanska et al., 2009), les sous-scènes de mosaïque des photographies aériennes contenant les tourbières individuelles et leur classification ont été recalées une autre fois à la zone correspondante d'images QuickBird. Nous avons appliqué une transformation polynomiale d'ordre 1 où la forme de l'image originale est conservée. L'erreur moyenne quadratique (RMSE) entre les coordonnées des points d'intérêt (GCP – ground control points) et leur estimation varie entre 0,08 et 0,33 pixels en utilisant respectivement 9 et 16 points de contrôle pour les deux tourbières analysées. Le rééchantillonnage des images a été réalisé à l'aide de la méthode du plus proche voisin afin de ne pas altérer la valeur des pixels des images classifiées.

Ensuite, les images classifiées ont été superposées afin de comparer les changements de l'occupation du sol intervenus entre les deux dates. Cette analyse a été réalisée à l'aide de l'outil « Accuracy assessment » du logiciel eCognition. Pour chaque site d'étude, la classification de la mosaïque des photos aériennes a été introduite comme un TTA masque (Training and test area mask, c.-à-d. image de référence) dans le projet. Ensuite, la classification de chaque pixel de l'image QuickBird classifiée a été comparée avec la classification de la zone couverte par ce pixel sur le TTA masque. Dans ce cas, la matrice de confusion résultante joue le rôle d'une matrice de contingence.

Dans le but de caractériser les particularités spatiales du changement et d'interpréter correctement le changement de la structure des tourbières minérotrophes structurées, nous avons également produit des cartes de changement de l'occupation du sol pour les tourbières F23 et F30. Les cartes du changement ont été produites par l'approche basée objet à l'aide du logiciel eCognition. Les deux images classifiées de deux dates d'intérêt (1957 et 2006) ont été importées comme deux couches et, ensuite, segmentées (« Multiresolution Segmentation », Scale = 0). Comme le présente la Figure 4.1, les objets créés présentent l'intersection entre les

objets des classifications des images acquises aux deux dates comparées, lorsqu'il y a un changement entre les classes (valeur numérique) sur deux images préalablement classifiées. Pour la classification des changements, huit cas ont été définis afin de détecter les différents aspects de transition (modification ou conversion) survenus entre les deux dates (Tableau 7.2). Dans le cas « sans changement », les objets sont associés au même compartiment entre les deux dates, c.-à-d. que il n'y a pas de passage entre les différents compartiments. Dans les cas 2, 3 et 4, il s'agit de passage entre les différents compartiments (conversion) vers des conditions plus humides. Les cas 7 et 8 représentent l'expansion ou la contraction en 2006, c.-à-d. que les objets faisant partie de cette classe se retrouvent hors de limite de la tourbière en 1957 et 2006 respectivement. Le cas 6 correspond aux modifications intervenues à l'intérieur d'un même compartiment, notamment le compartiment aquatique.

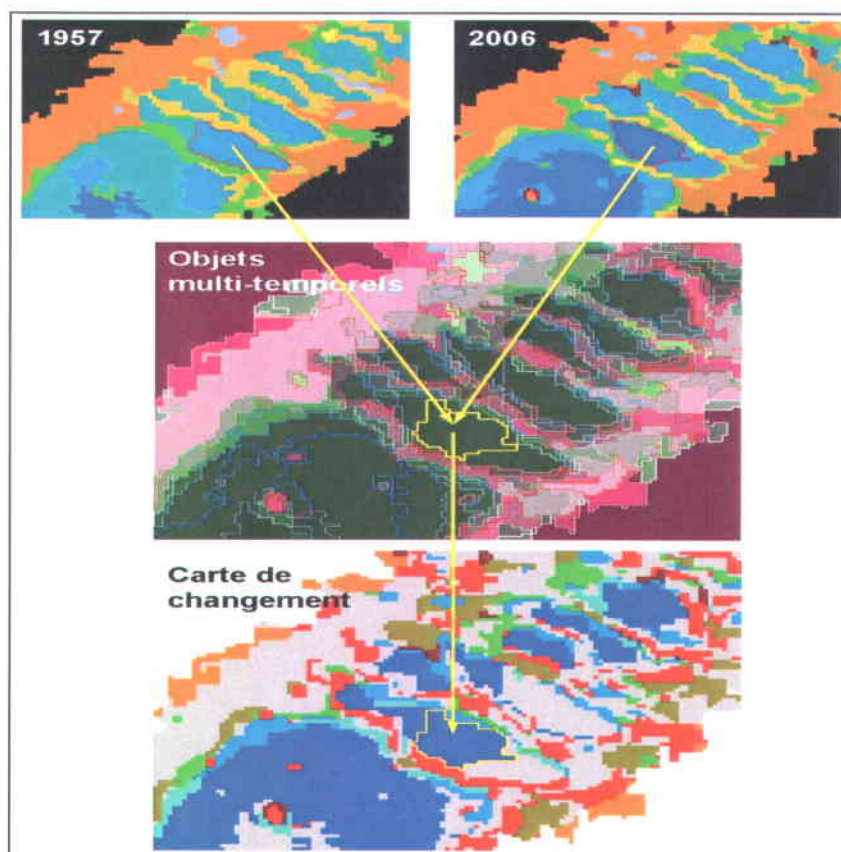


Figure 4.1 Création des objets multi-temporels présentant l'intersection entre les objets des classifications des images acquises aux deux dates comparées (1957 et 2006)

4.2.4 Analyse comparative de la morphométrie des mares entre 1957 et 2003/2006

La forme, la taille et la disposition des mares des tourbières structurées varient avec les conditions hydrologiques locales (Ivanov, 1981; Belyea & Lancaster, 2002). L'analyse comparative multitemporelle de la morphométrie (analyse quantitative de la taille et de la forme) de mares peut fournir un aperçu du développement des mares et, donc, des conditions hydrologiques associées. Pour l'analyse du changement des mares entre les deux dates étudiées, inspiré de l'étude de (Belyea & Lancaster, 2002) et de (White, 2011), nous avons utilisé l'information suivante :

- a. l'information démographique, c.-à-d. la distribution de fréquence de la taille des mares, et des petites mares pour les deux dates (1957 et 2006);
- b. la morphométrie des mares pour la plus grande tourbière (F30) pour les deux dates (1957 et 2006).

Les relations allométriques entre les paramètres morphométriques sont un outil pratique pour les études de croissance relative qui est largement utilisée en biologie (Niklas, 1994) mais aussi pour des études de morphométrie des lacs (Hamilton et al., 1991; Trainor & Church, 1996). Les relations le plus souvent utilisées sont basées sur la fonction de puissance :

$$Y = \beta X^\alpha \qquad \text{Eq. 4.1}$$

où l'exposant α (i.e, la pente de la régression, scaling factor) décrit l'effet de changement relative entre deux paramètres morphométriques de mares (X et Y) et β est un coefficient empirique.

Comme paramètres morphométriques nous avons utilisé la longueur, la largeur, le périmètre et la superficie de celles-ci tel qu'estimé par eCognition. Dans le cas où la forme des mares change avec la taille, l'exposant α sera différent de celui prédit par la similitude géométrique (hypothèse nulle – isométrie, c.-à-d. le changement proportionnel de la forme avec la taille). Pour les X et Y qui ont la même dimension (ex. la longueur et la largeur), la forme géométrique est conservée (isométrie est atteint) lorsque $\alpha = 1$. Selon les relations géométriques standards, le périmètre $P \sim l$ et la superficie $S \sim l^2$, où l est la longueur linéaire. Par conséquent, $P \sim S^{1/2}$. Alors, l'isométrie est atteinte dans le cas où $\alpha = 1/2$.

4.2.5 Analyse des conditions météorologiques entre 1957 et 2003/2006

Lorsqu'une détection des changements est effectuée, afin de traduire correctement les résultats des changements détectés, les variables environnementales (comme les précipitations et l'humidité du sol) devraient être prises en considération (Jensen, 2005). Par conséquent, dans l'intention de séparer l'effet des paramètres environnementaux précédant l'acquisition des images de celui dû à la propre évolution des tourbières minérotrophes structurées, une analyse des données météorologiques disponibles pour 1957, 2003 et 2006 des quatre stations (Tableau 7.4) situées le plus près de sites d'études a été effectuée. Les données de 4 stations ont été téléchargées de la banque de données météorologiques d'Environnement Canada.

4.3 Résultats

4.3.1 Occupation du sol pour les deux sites d'étude : en 1957 et en 2003 pour La Grande-3:et en 1957 et en 2006 pour Laforge-1

La superficie totale couverte par l'image classifiée pour le site d'étude La Grande-3 est de 9888 ha. La superficie de la zone utilisée pour la présente recherche pour la région de Laforge-1 est de 1759 ha. Les cartes créées indiquent qu'environ deux tiers (66 – 72,4 %) du territoire des deux sites d'étude sont couverts par la forêt (Tableau 4.1). Toutefois, la proportion de la forêt pour le site Laforge-1 en 1957 était plus basse (57,8 %). La raison de cette plus faible valeur est due au feu de forêt des années 50. Par conséquent, les zones passées au feu font partie du groupe Autre (16,6 %) qui avait donc une proportion d'environ quatre fois plus élevée en 1957 qu'en 2006. Une diminution (~ 6 %) de la superficie occupée par la forêt a été observée en 2003 pour le site La Grande-3. Une partie de cette diminution est due à l'inondation d'une partie du territoire pour la création du réservoir hydroélectrique La Grande-3. La construction de la route et de l'aéroport sont aussi la cause de la diminution de la superficie de la forêt et de l'augmentation de celle de la classe Autre.

Comme résultat de l'inondation du territoire, la proportion de l'eau était plus élevée en 2003 d'environ 2 %. Une partie de cette augmentation pourrait aussi être due à la formation des étangs associée à la dégradation du pergélisol. Par contre, une partie des étangs observés en 1957, étaient en 2003 comblés par la tourbe. Pour le site Laforge-1, la proportion de l'eau reste sans changement significatif.

La partie du territoire allouée aux tourbières est plus élevée pour la région de La Grande-3 où les tourbières couvrent ~ 24 %. Pour le site Laforge-1, les tourbières couvrent environ 20 % du territoire. On observe pour les deux sites d'étude un accroissement d'environ 3 % de la

superficie couverte par les tourbières. Une partie de ce changement peut être expliqué par la croissance des tourbières au détriment de la forêt ainsi que par le comblement des mares thermocarstiques observées (surtout pour le site La Grande-3). Cependant, comme il était discuté dans le chapitre 3, la superficie totale occupée par les tourbières sur le site de La Grande-3 pourrait être légèrement surestimée à cause de la classification incorrecte de certaines zones exploitées pour la construction des infrastructures (route, aéroport) et, ensuite revégétalisées.

Tableau 4.1 Occupation du sol pour les deux sites d'étude : en 1957 et en 2003 pour La Grande-3 et en 1957 et en 2006 pour Laforge-1

Superficie (%)		
La Grande -3	1957	2003
Tourbière	21,8	24
Eau ^{a,b}	3,7 (4,8)	5,7 (6,8)
Forêt	72,4	66
Autre	2,1	4,3
Laforge -1	1957	2006
	17,6	
Tourbière		20
Eau	9,0 (14,2)	9,1 (14,1)
Forêt	57,8	67
Autre	16,6	3,9

- a. Les chiffres sans parenthèses indique la superficie de l'eau identifiée sur les images hors de limites des tourbières, notamment les lacs, les rivières, le réservoir (pour le site La Grande-3)
- b. Les chiffres dans les parenthèses indiquent la superficie totale de l'eau libre identifiée sur les images, incluant l'eau renfermée dans les tourbières, les lacs, les rivières et le réservoir (pour le site La Grande-3)

L'eau (rivières, lacs) couvre environ 9 % du territoire de Laforge-1. Cette proportion passe à 14 % si on prend en considération l'eau contenue dans les tourbières. Alors, l'eau renfermée dans les tourbières représente un tiers de la superficie de l'eau pour le site Laforge-1. Cependant, il faut mentionner que certains lacs dont plus de 55 % de la rive est en contact avec de la tourbe sont classifiés comme faisant partie de la tourbière elle-même.

La proportion d'eau (lacs, rivières) pour le site La Grande-3 en 2003 est de 5,7 %. En incluant l'eau renfermée dans les tourbières, cette proportion s'élève à 6,8 %. Donc, l'eau renfermée dans les tourbières représente environ 16 % de la superficie totale couverte par l'eau. Les résultats indiquent aussi que la proportion d'eau renfermée dans les tourbières est plus élevée pour le site de Laforge-1. Cependant, il faut mentionné que le site La Grande-3 est dominé par les tourbières mixte (ou en transition) avec faible densité de mares avec de l'eau libre.

4.3.2 Analyse de changement des superficies totale, aquatique et semi-aquatique des tourbières entre 1957 et 2003/2006

Pour l'analyse du changement de la structure spatiale (proportion des compartiments aquatique, semi-aquatique et terrestre) des tourbières minérotrophes structurées depuis 50 ans, dix tourbières de la région de La Grande-3 et 30 tourbières de la région de Laforge-1 ont été étudiées. Les listes des tourbières étudiées pour les deux sites d'étude, incluant l'information sur leur position géographique et la superficie des compartiments aquatiques, semi-aquatiques ainsi que leur superficie totale pour les deux dates d'observation correspondantes, sont présentées dans l'Annexe I (La Grande-3 site) et l'Annexe II (Laforge-1 site). La superficie des tourbières étudiées varie de 0,1 ha à 20,6 ha. La superficie totale de la plupart des celles-ci (pour 36 sur 40 dont huit pour la région de La Grande-3 et 28 pour la région de Laforge-1) a augmenté par rapport à celle en 1957 au détriment de la forêt environnante. L'expansion des tourbières a eu lieu généralement dans la direction longitudinale (amont et aval) des tourbières ou dans les zones latérales où des petits ruisseaux entrent ou sortent des tourbières. Ce changement est principalement associé à la densité décroissante des arbres dans les zones voisines au cours des 50 dernières années et, par conséquent, leur classification comme des objets de tourbières.

La superficie des petites tourbières (< 2 ha) a connu une croissance relative beaucoup plus prononcée que des tourbières > 2 ha qui montrent une croissance relative moyenne d'environ 10 %. (Figure 7.5a). Pour certaines tourbières, la forte expansion est due à la fusion avec les dépressions tourbeuses situées à la proximité suite à la transformation de l'étroite bande de forêt qui les sépare.

La surface des compartiments aquatiques de 24 des 40 (sept tourbières pour La grande-3 site et 17 tourbières pour Laforge-1 site) tourbières étudiées a également augmenté. Cependant, il n'y a pas de tendance claire qui se dégage dans l'évolution des compartiments aquatiques entre les deux dates (Figure 7.5b). Il semble que les compartiments aquatiques des tourbières < 2 ha ont subi des changements relatifs plus prononcés dans les deux directions – positif

(augmentation) et négatif (diminution). Par contre, la surface des compartiments aquatiques de 9 des 12 plus grandes tourbières (> 2 ha) a augmenté en 2006. Les variations du changement relatif des compartiments aquatiques sont plus grandes chez les tourbières dont la superficie du compartiment aquatique $S_a < 0,5$ ha, tandis que la surface des compartiments aquatiques pour 8 des 10 tourbières qui ont $S_a > 0,5$ ha a augmenté en 2006 (Figure 7.5d).

La superficie des compartiments semi-aquatiques pour la plupart (13 des 16) des tourbières < 2 ha a diminué en 2006 (Figure 7.4c). La superficie du compartiment semi-aquatique a augmenté pour 11 des 30 tourbières minérotrophes de Laforge-1 site. De ces 30 tourbières, neuf tourbières montrent une augmentation simultanée de la superficie de leurs compartiment aquatique et semi-aquatique, tandis que 11 tourbières montrent une diminution simultanée de la superficie de leurs compartiment aquatique et semi-aquatique (Figure 7.7). Par contre, huit tourbières ont connu une augmentation de la superficie de leur compartiment aquatique et une diminution de la superficie de leur compartiment semi-aquatique. Pour la région de La Grande-3, six des dix tourbières montrent une augmentation de la superficie de leur compartiment semi-aquatique. Pour cinq de ces tourbières, l'augmentation de la superficie du compartiment semi-aquatique est simultanée avec l'augmentation de la superficie du compartiment aquatique.

La proportion des compartiments aquatique et semi-aquatique pour chaque tourbière ainsi que leur changement entre les deux dates a également été examiné. Le degré d'aqualyse (la proportion du compartiment aquatique, S_a/S [%]) obtenu à partir des images classifiées varie entre 1,1 et 49,6 % en 1957 et 2,2 % et 46,9 % en 2006 (Figure 7.8). Le degré d'aqualyse des tourbières < 2 ha varie de 1,1 % jusqu'à 37 % avec une moyenne de $16,3 \pm 10,8$ % en 1957 et de $14,3 \pm 9,2$ % en 2006. En général, le taux d'aqualyse de tourbières > 2 ha est supérieur à 20 % mais ne dépasse pas 50 % avec une moyenne de $25,5 \pm 12,3$ % en 1957 et de $24,6 \pm 11,4$ % en 2006. Pour le site de La Grande-3, le degré d'aqualyse est plus faible et varie entre 0,5 % et 17,8 % en 1957 et 3,8 % et 26,8 % en 2003.

Il doit être également noté que, dans les tourbières riches avec de végétation arbustive abondante ou dans les zones de transition entre les tourbières et la forêt (Figure 4.2), certaines mares sont masquées et invisibles sur les images satellites panchromatiques et sur les photographies aériennes noir et blanc. En outre, dans l'estimation de la superficie du compartiment aquatique nous n'avons pas inclus les objets de la classe "Végétation-eau" qui pourrait contenir aussi des petites mares peu profondes. Ainsi, nos résultats peuvent sous-estimer le degré réel de l'aqualyse.

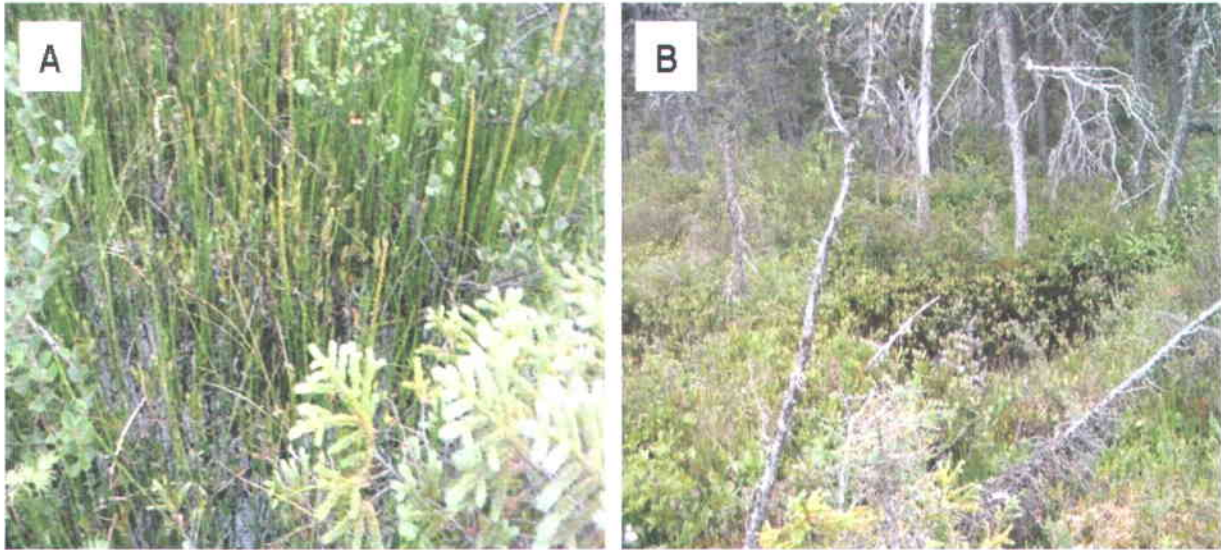


Figure 4.2 : Dans les tourbières riches avec a) de végétation arbustive abondante ou b) dans les zones de transition entre les tourbières et la forêt environnante, certaines mares sont masquées et invisibles sur les images satellites panchromatiques et sur les photographies aériennes noir et blanc

Le taux d'aqualyse était plus élevé en 1957 qu'en 2006 chez 20 des 30 tourbières de la région de Laforge-1 (Figure 7.8C). Cependant, il n'y a pas une différence marquée dans le changement de taux d'aqualyse selon la taille des tourbières. Par contre, les cinq tourbières (F8, F21, F27, F28 et F29) situées à proximité des zones brûlées montrent la plus grande différence avec le degré d'aqualyse actuelle (2006).

La proportion du compartiment semi-aquatique (S_{sa}/S [%]) varie entre 18,7 et 62,3 % (avec une moyenne de $32,1 \pm 8,8$ %) en 1957 et 3,5 % et 45 % (avec une moyenne de $24,6 \pm 10,1$ %) en 2006 (Figure 7.8). La proportion du compartiment semi-aquatique chez 21 des 30 tourbières de la région de Laforge-1 (Figure 7.8C) a également diminuée en 2006. La variation du changement de la proportion du compartiment semi-aquatique est plus grande pour les tourbières < 2 ha (F1 à F16). Nos résultats montrent aussi qu'il n'existe pas de corrélation entre la proportion du compartiment aquatique et la proportion du compartiment semi-aquatique (Figure 7.9). Pour le site de La Grande-3, la proportion du compartiment semi-aquatique varie entre 11,1 % et 42,8 % en 1957 et 29,1 % et 43,3 % en 2003.

4.3.3 Méthode Delphi

Les résultats de la technique Delphi basée sur les estimations de la superficie du compartiment aquatique et de la superficie totale de deux tourbières structurées montrent que, en général, la superficie des tourbières estimée à partir des images classifiées est dans les limites de l'intervalle de confiance à 95 % à l'exception de la superficie de la tourbière de La Grande-3 site, obtenue à partir de l'image QuickBird (Tableau 7.6 Chapitre 7 et Figure 2 (Dissanska et al., 2011)). La superficie des groupes des classes aquatiques «Eau profonde», «Eau peu profonde», «Eau-végétation» pour La Grande-3 site et «Eau profonde», «Eau peu profonde», «Eau-végétation» et «Petite mare» pour Laforge-1 site, sont plus proches de l'intervalle de confiance à 95 % pour les compartiments aquatiques. Ce résultat vient confirmer notre choix de séparation des classes faisant partie du compartiment aquatique comme il été décrit au Tableau 7.1.

À part de servir pour la validation des estimations de superficie à partir des images classifiées, la technique Delphi a permis de déterminer un seuil à partir duquel le changement de superficie des tourbières et leur compartiment aquatique est considéré comme significatif. Comme seuil pour le changement significatif de superficie des tourbières et leur compartiment aquatique, nous avons jugé adéquat un changement de 10 % et 15 % de leur superficie respective entre les deux dates étudiées. Ces chiffres correspondent au maximum des marges d'erreur relatives des estimations des superficies respectives réalisées par les photointerprètes (Tableau 7.6). Les grandes variations dans les estimations de superficies faites par les photointerprètes montrent que la photointerprétation et la délimitation manuelle, utilisées traditionnellement pour l'analyse des images panchromatiques et photographies aériennes noir et blanc, sont très subjectives et dépendent de l'expérience et de la perception des experts. Bien que la nature des erreurs dans l'estimation des superficies à partir des images classifiées soit différente, le seuil a été appliqué aux estimations des superficies des tourbières et leur compartiment aquatique correspondants à partir de photographies aériennes classifiées en vue d'atténuer les effets possibles dus à la différence de résolutions spatiale et spectrale de deux types d'images, notamment les images QuickBird et les photographies aériennes, ainsi que l'effet des ombres. La croissance de la superficie aquatique de seulement 13 sur 40 tourbières dépasse le seuil établi (six tourbières pour la région de LaGrande-3 et sept tourbières pour la région de Laforge-1). Le changement de la superficie totale des 21 sur 40 tourbières étudiées dépasse le seuil de 10 % (quatre tourbières pour la région de La Grande-3 et 17 tourbières pour la région de Laforge-1).

4.3.4 Transition entre les classes

Afin d'identifier la nature du changement, nous avons étudié la transition mutuelle au fil du temps entre les classes pour deux tourbières : F23 (la plus grande augmentation de la superficie du compartiment aquatique) et F30 (la plus grande tourbière) de la région de Laforge-1 (Figure 7.4). En général, les pixels classifiés en 2006 comme « Eau profonde » ont été classifiés sur la mosaïque de photographies aériennes comme « Eau plus profonde » (58,3 % pour F23 et 82,5 % pour F30) et comme « Eau-végétation » (36,1 % pour F23 et 12,1 % pour F30) (Figure 7.11). Les pixels de classe « Eau peu profonde » en 2006 ont été classifiés en 1957 principalement comme « Eau peu profonde » (33,9 % pour F23 et 46,9 % pour F30) et « Eau-végétation » (49,5 % pour F23 et 40,4 % pour F30). Ces transitions entre les classes aquatiques indiquent soit que le niveau d'eau a augmenté ou que les mares existantes soient devenues plus profondes. D'autre part, environ 50 % des pixels classifiés en 2006 comme « Eau-végétation » sont classifiés comme des classes terrestres en 1957. Cette transformation suggère aussi une hausse du niveau d'eau et l'expansion du compartiment aquatique.

Afin de visualiser les particularités spatiales du changement, des cartes de changement de l'occupation du sol pour les tourbières F23 et F30 ont été produites. L'étude de l'évolution des unités d'occupation du sol est fondée sur huit cas. Comme le montrent les cartes produites, le changement n'est pas unidirectionnel et varie dans les différentes sections de la tourbière. A titre d'exemple, la carte d'occupation du sol pour la tourbière F30 est illustrée sur la Figure 7.12. La cartographie du changement de l'occupation du sol entre 1957 et 2006 a révélé que 40,4 % de la superficie pour F23 et 50,7 % pour F30 n'ont pas changé (sans tenir compte de la modification entre les classes du même compartiment, (ex. cas Aquatique (1957) → Plus aquatique (2006))). Les détails pour les principales transformations pour les deux tourbières (F23 et F30) sont résumés au Tableau 7.7.

Cependant, pour le but de cette étude, les modifications entre les classes du compartiment aquatique, notamment la transition Aquatique (1957) → Plus aquatique (2006), ont été pris en compte, car elles sont un indicateur de la hausse du niveau d'eau ou de l'approfondissement des mares. Comme le montre la Figure 7.12B, plusieurs objets des classes « Aquatiques » dans les grandes mares ont subi une transition vers une classe « Plus aquatique ». Cette transformation a été estimée à 8,7 % de la superficie pour F23 et à 10,4 % de la superficie pour F30. Il est intéressant de noter que ces changements ont lieu surtout dans les petits lacs formés à l'intérieur des tourbières ainsi que dans certaines parties des plus grandes mares tandis que les autres parties aquatiques des mêmes mares ne montrent pas de changement.

Les résultats montrent une prédominance de la conversion vers des conditions plus humides (Terrestre (1957) → Semi-aquatique (2006), Semi-aquatique (1957) → Aquatique (2006), Terrestre → Aquatique (2006)) pour les deux tourbières (Tableau 7.7). En effet, plusieurs objets de classes terrestres (« Tourbe », « Lanière ») en 1957 situés aux alentours des mares sont devenus semi-aquatiques (« Végétation-eau ») ou aquatiques (« Eau-végétation », « Eau peu profonde », « Eau profonde ») en 2006. Des petites mares ont apparu dans les zones qui étaient terrestres en 1957 et qui sont devenues plus humides en 2006.

Avec les signes évidents de la dégradation du couvert végétal, la restauration et ré-végétation de lanières dégradées se produit aussi (cas « Dry », Tableau 7.7). Cependant, ce sont des cas rares. Dans la plupart des cas, il s'agit des dépressions humides (objets de classe « Végétation-eau ») qui sont devenues plus sèches.

4.3.5 Analyse comparative de la morphométrie de mares entre 1957 et 2006

Comme le montre la Figure 4.3A, les mares sont représentées par plusieurs objets de classes « Eau profonde », « Eau peu profonde », « Eau-végétation », « Végétation-eau » et « Petite mare ». Il s'est avéré donc pratique pour l'analyse de la morphométrie de mares de fusionner les objets en contact des classes mentionnées afin de définir les mares (Figure 4.3, cas B et C). Compte tenu du fait que la classe « Végétation-eau » représente à la fois les bordures de mares et les dépressions humides, la fusion des objets de cette classe (Figure 4.3, cas C) avec les objets des autres classes aquatiques (« Eau profonde », « Eau peu profonde », « Eau-végétation » et « Petite mare ») forme des objets très complexes (mares connectées).

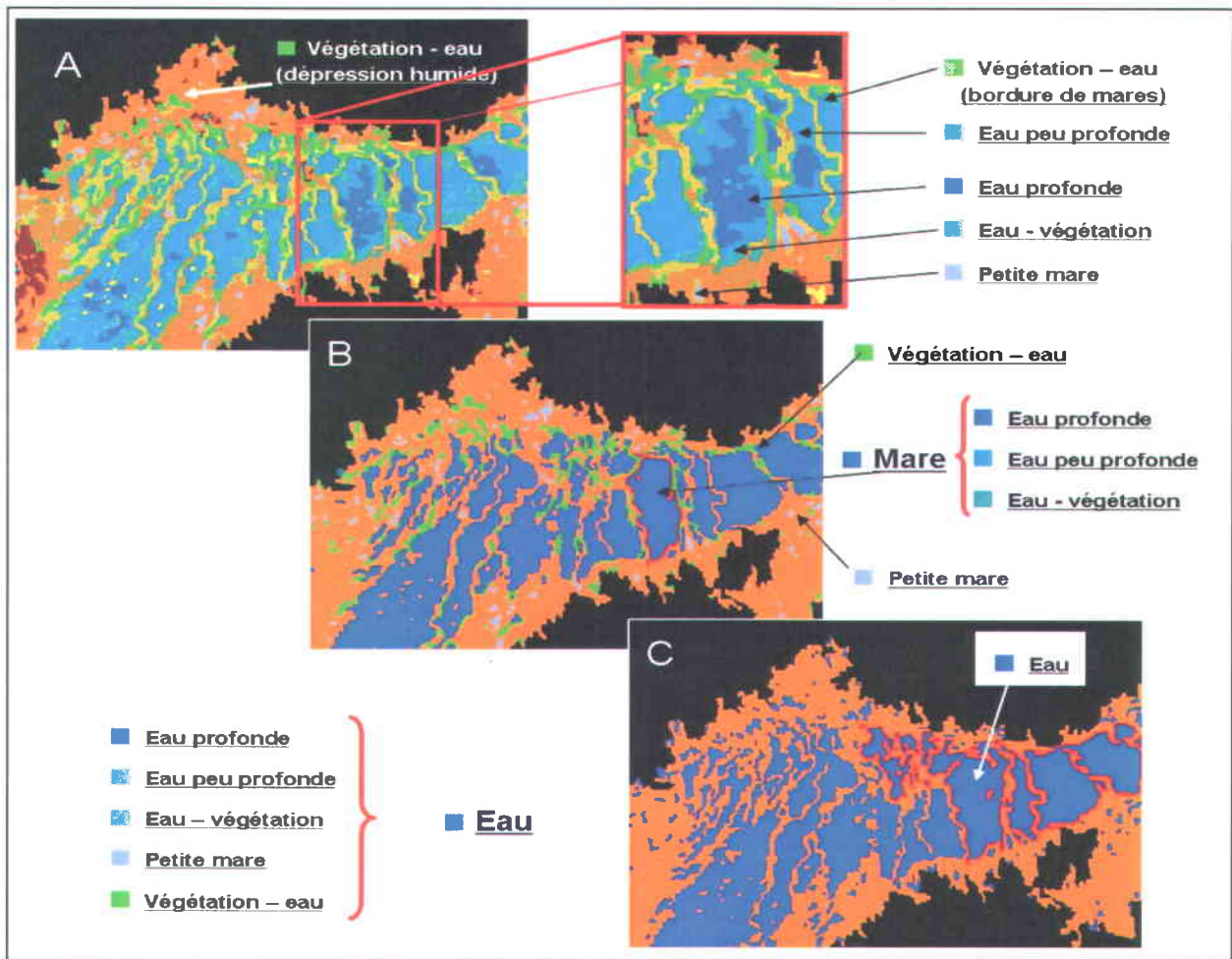


Figure 4.3 Définition des mares. A) Les mares sont représentées par plusieurs objets de classes « Eau profonde », « Eau peu profonde », « Eau-végétation », « Végétation-eau » et « Petite mare »; B) Les mares sont définies par la fusion des classes (« Eau profonde », « Eau peu profonde », « Eau-végétation »); C) Mares connectées - les formes des mares devient très complexes suite à la fusion des objets de classe « Végétation-eau » avec les objets des autres classes aquatiques (« Eau profonde », « Eau peu profonde », « Eau-végétation » et « Petite mare »).

Alors, l'analyse de la morphométrie des mares est basée sur le cas B, où les mares sont définies par la fusion des classes (« Eau profonde », « Eau peu profonde », « Eau-végétation »). Les objets de classes « Petite mares » ont été analysés séparément, car ils sont plus susceptibles de changement. Le nombre et la superficie des mares et des petites mares sont donnés au Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Nombre des mares et des petites mares en 1957 et 2006

Classe	1957		2006	
	N	S, m ²	N	S, m ²
Mares	294	36896,5	283	40200,2
Petites mares	217	2956,5	415	2803,8

En 2006, le nombre de mares a diminué d'environ 4 % par rapport à l'année 1957. Par contre, la superficie totale des mares en 2006 est plus élevée qu'en 1957. Le Tableau 4.2 montre aussi une hausse considérable du nombre de « Petites mares » pour 2006. En revanche, la superficie totale de ces objets a diminué. Afin de clarifier ce résultat, une analyse de la distribution de fréquences de taille des mares, des petites mares pour les deux dates (1957 et 2006) a été réalisée. La distribution de fréquences de taille des mares et des petites mares pour les deux dates (1957 et 2006) a été représenté graphiquement à l'aide d'une « pyramide des tailles » en analogie avec des pyramides des âges (Figure 4.4). La forme de la pyramide (Figure 4.4B) dépend de 4 principaux processus :

- a. la formation des nouvelles mares ou des petites mares ;
- b. l'évolution de la taille;
- c. la disparition des mares ou des petites mares (due à la coalescence des mares ou à l'assèchement et la recolonisation par la végétation);
- d. la transition entre les classes.

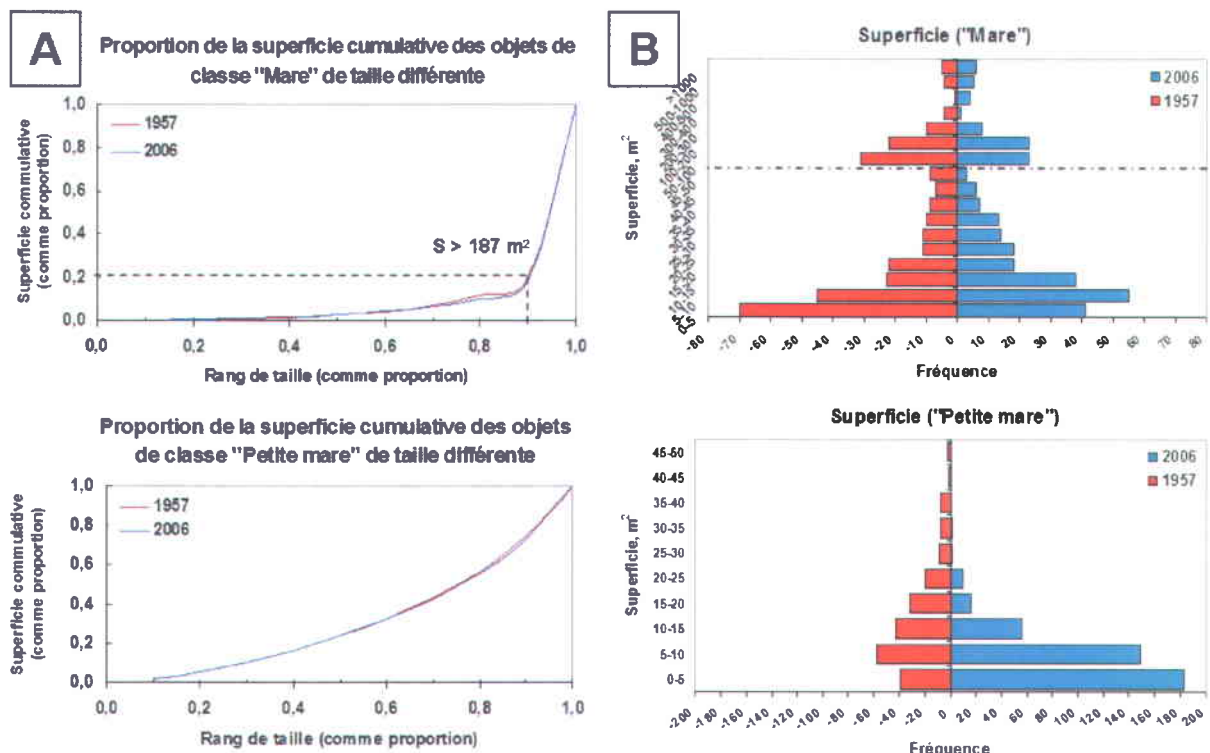


Figure 4.4 Démographie des mares et des petites mares : A) proportion de la superficie cumulative des mares et des petites mares de taille différente et B) distribution de fréquences de taille des mares et des petites pour les deux dates (1957 et 2006). La ligne pointillée marque le changement de la largeur de l'intervalle de l'histogramme.

La Figure 4.4B montre que la distribution de taille des mares et des petites mares est positivement asymétrique avec une dominance des objets de petite taille. La taille des mares varie de $0,7 \text{ m}^2$ jusqu'à $11967,7 \text{ m}^2$ (en 1957) et $12483,2 \text{ m}^2$ (en 2006). Les grandes mares sont peu nombreuses mais représentent une proportion considérable de la superficie totale. Plus de 80 % de la superficie des mares est concentré dans le dernier décile de la distribution, c.-à-d., dans les mares avec $S > 187 \text{ m}^2$ (Figure 4.4A). Le nombre de mares de petite taille ($< 5 \text{ m}^2$) était plus élevé en 1957, tandis qu'en 2006 la mode de la distribution des mares selon leur taille est déplacée vers l'intervalle de taille entre 5 et 10 m^2 . Les mares sont plus nombreuses aussi dans les intervalles intermédiaires de la taille (entre 10 et 40 m^2). Par contre, la médiane de la distribution est identique pour les deux dates ($\sim 17 \text{ m}^2$). Par conséquent, le changement dans la distribution pourrait être interprété comme le résultat de l'expansion des mares soit par la dégradation de la végétation qui les entoure ou soit par la coalescence avec les mares voisines.

L'allure en « J » inversé de l'histogramme pour la classe « Petites mares » en 2006 (Figure 4.4B), est associée à la hausse considérable du nombre d'objets de petite taille (< 5 m²). Cette hausse pourrait être liée à la formation de nouvelles petites mares.

Le processus de l'aqualyse des tourbières ne se traduit pas uniquement par un changement de la taille mais également par un changement de la forme de mares dû à leur expansion et la coalescence et leur transformation en petits lacs. En quête des signes d'un tel changement, nous avons examiné les relations entre certains paramètres morphométriques des mares et des petites mares qui déterminent, notamment les relations allométriques entre le périmètre et la superficie, ainsi que la largeur et la longueur (Figure 4.5).

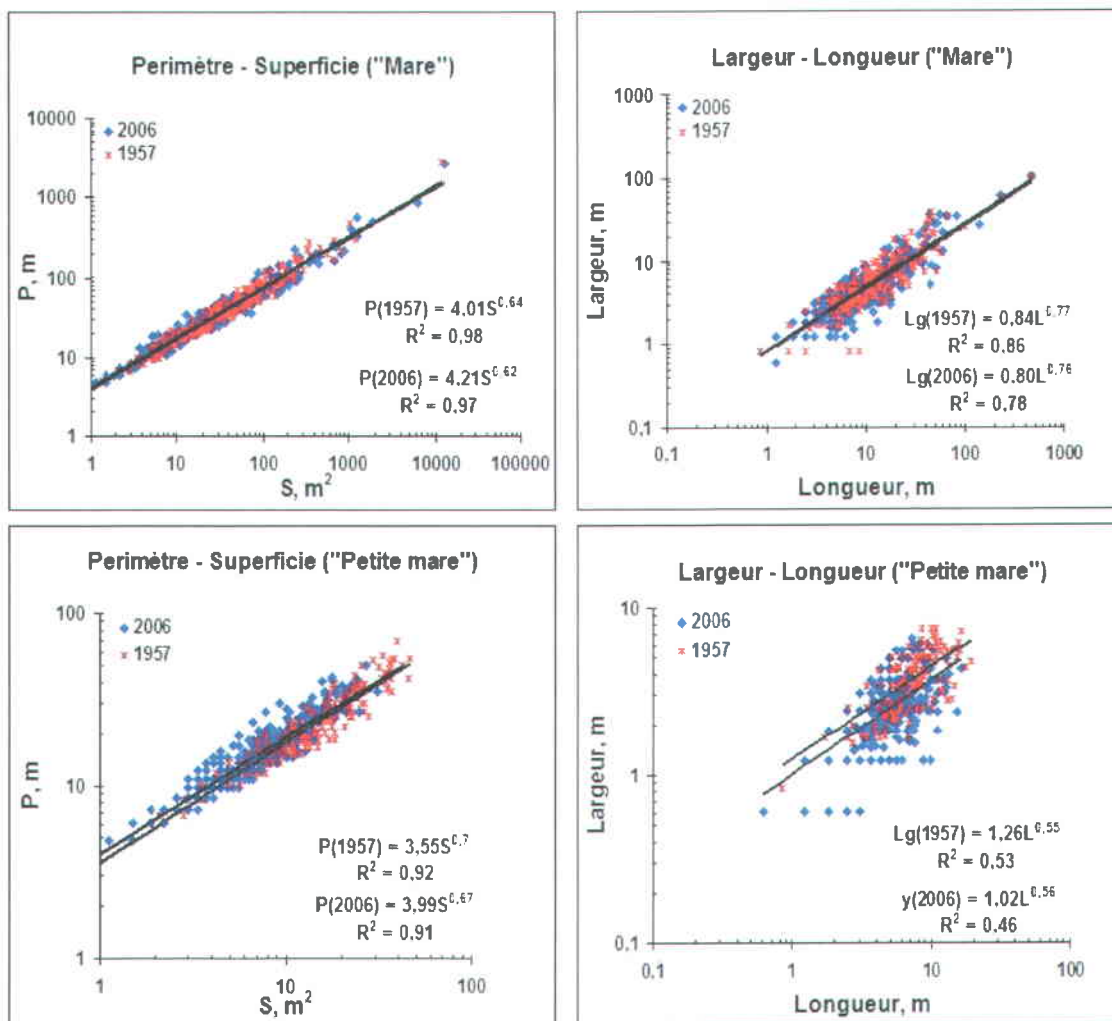


Figure 4.5 Relations allométriques entre a) le périmètre et la superficie des mares et des petites mares; et b) la largeur et la longueur des mares et des petites mares.

Comme le montre la Figure 4.5A, la relation entre le périmètre et la superficie (relation taille - forme) est très forte pour les deux groupes d'objets (mares, petites mares) avec un coefficient de détermination R^2 entre 0,91 et 0,98. On remarque aussi que pour les deux types d'objets (mares, petites mares) l'exposant $\alpha > 0,5$, ce qui signifie qu'il y a une déviation de la similitude géométrique ($\alpha = 0,5$). Donc, la forme géométrique des objets n'est pas conservée avec leur croissance (allométrie) et, par conséquent, les plus grands objets ont une forme plus allongée ou plus complexe. La situation est la même pour la relation « largeur – longueur » (Figure 4.5B), où l'hypothèse de similitude géométrique (conservation de la forme avec le changement de la taille) prévoit $\alpha = 1$, tandis que $\alpha < 1$ pour les deux types d'objets. Donc, les plus grands objets (mares, petites mares) ont une forme plus allongée. Par contre, le coefficient de détermination R^2 est plus faible surtout pour les « Petites mares ».

Il faut noter que la déviation de la relation « périmètre-superficie » de l'isométrie ($\alpha = 0,5$) est plus faible pour les objets du groupe « Mares », avec $\alpha = 0,62$ en 2006 et $\alpha = 0,64$ en 1957. La déviation de la relation « largeur-longueur » de l'isométrie ($\alpha = 1$) pour les objets du groupe « Mares » est aussi plus faible, avec $\alpha = 0,76$ en 2006 et $\alpha = 0,77$ en 1957. Ces résultats suggèrent que la forme des « Mares » (mares bien définie et plus profonde) change avec la taille avec un taux plus faible que celui des « Petites mares ». Donc, la tendance générale est que les « Petites mares » s'allongent avec la croissance de leur taille. Le plus faible taux de changement pourrait être dû aux formes plus carrées des grandes mares résultant de la dégradation des lanières et de la coalescence des mares voisines.

Par contre, la différence de l'exposant des deux relations pour 1957 et 2006 pour les deux groupes d'objets est assez minime (plus petite que l'erreur d'estimation de l'exposant α) et, donc, aucune conclusion ne pourrait être faite sur le changement de la forme entre les deux dates.

Il est intéressant de mentionner que le taux de croissance relative du périmètre par rapport à la superficie que nous avons obtenue pour les « Mares », notamment $\alpha_{LSR} = 0,64$ (1957) et $\alpha_{LSR} = 0,62$ (2006), est très similaire à celle obtenue par (Belyea & Lancaster, 2002), pour la relation allométrique « périmètre–superficie » caractérisant les mares d'une tourbière ombrotrophe clairement visible sur la photographie aérienne, soit $\alpha_{RMA} = 0,62$.

Le lien entre α_{LSR} (LSR – least square regression) et α_{RMA} (RMA – reduced major axis regression) est donné par l'équation suivante (Niklas, 1994) :

$$\alpha_{RMA} = \alpha_{LSR} / R \quad \text{Eq. 4.2}$$

où R est le coefficient de la corrélation. Donc, l'exposant α_{LSR} transformé en α_{RMA} pour 1957 et 2006 devient 0,65 et 0,63 respectivement. Quant aux exposants caractérisant la relation « largeur–longueur » pour les « Mares », ils sont aussi très similaires à celui obtenu par (Belyea & Lancaster, 2002). Transformé en α_{RMA} , le taux de croissance relative de la largeur par rapport de la longueur des « Mares » devient 0,83 et 0,86 pour 1957 et 2006 respectivement, tandis que celui obtenue par (Belyea & Lancaster, 2002) est de 0,83. Ce résultat suggère que la forme de mares permanentes (plus profondes et bien définie par leur contour) des tourbières minérotrophes change avec la croissance de leur taille de la même manière que pour les tourbières ombrotrophes. Cela nous fait penser à une similitude des processus qui contrôlent le développement des mares dans les deux principaux types de tourbières.

4.4 Discussion

La méthode de post-classification de détection de changement appliquée a permis de détecter et de mettre en évidence les changements dans la structure de tourbières et d'en estimer l'ampleur, la nature et les particularités spatiales. De plus, une analyse démographique, reliée au nombre et la taille des mares, ainsi que une analyse morphométrique, reliée à la forme de mares, ont été appliquées afin de répondre à la question principale de cette étude, concernant la dégradation de la structure interne des tourbières depuis 50 ans et leur évolution vers des écosystèmes aquatiques due à une augmentation de l'hydraulicité dans la région du bassin versant de la rivière La Grande.

Tout d'abord, il faut mentionné que la haute précision de classification des images, qui varie entre 89 % et 93 %, assure une précision > 79 % pour la détection du changement entre les classes d'occupation du sol qui est, en effet le produit de précisions des cartes comparées (Mas, 1999; Coppin et al., 2004). Ainsi, les résultats de la méthode Delphi ont montré que les estimations de la superficie du compartiment aquatique et de la superficie totale de deux tourbières étudiées estimées à partir des images classifiées est comparable à celles obtenues à l'aide de photointerprétation.

Expansion des tourbières

Comme le montre l'analyse de changement de la superficie totale des tourbières, la plupart des tourbières pour les deux sites d'études sont en expansion. La transition de la forêt en tourbière est un signe du changement graduel des conditions de drainage du sol entourant les tourbières. Cela indique que la paludification a été un processus actif au cours des 50 dernières années. La paludification est un processus nécessitant un bilan hydrologique positif dû soit à une augmentation des apports en eau (précipitations, les eaux de ruissellement, etc.) ou soit par une diminution des sorties (évapotranspiration, écoulement des eaux de ruissellement) (Charman, 2002). La paludification des sols pourrait être le résultat des facteurs allogènes (climat, géomorphologie) et/ou autogène (accumulation locale de la tourbe) (Payette & Rochefort, 2001). Toutefois, l'expansion simultanée observée pour 36 de 40 tourbières minérotrophes structurées suggère que le climat est le facteur principal qui favorise un bilan hydrologique positif durant la période d'étude.

Comme le montrent les études de Begin & Payette (1988), Payette & Fillion (1993) et Payette & Delwaide (2004), XX^e siècle est marqué par une hausse de l'hydraulicité (hausse du niveau des lacs et des rivières) au nord du Québec due à la hausse des précipitations de neige. De plus, dans la région de La Grande-3, plusieurs signes de dégradation récente du pergélisol (affaissement du sol, arbres penchés, formation des étangs) ont été observés lors de survols et sur les images utilisées pour la présente étude. Plusieurs études signalent une fonte accélérée du pergélisol dans les zones à pergélisol discontinue et sporadique (Payette et al., 1976; Allard & K.-Seguin, 1987; Payette et al., 2004; Camill, 2005; Vallée & Payette, 2007; Thibault & Payette, 2009; Smith, 2011). La fonte du pergélisol pourrait avoir un effet sur l'hydrologie régionale (Les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010) et, ainsi, être à l'origine de ce bilan hydrologique positif. De son côté, la fonte du pergélisol est un résultat du réchauffement du climat et des modifications du régime de précipitations redevables à des hivers plus neigeux (Payette et al., 2004; Vallée & Payette, 2007).

Changement de compartiments aquatiques et semi-aquatiques

Contrairement aux changements de la superficie totale de tourbières, la tendance dans l'évolution des compartiments aquatiques et semi-aquatiques entre les deux dates n'est pas si évidente. Nos résultats indiquent que les changements structuraux soient relativement plus importants sur les petites tourbières < 2 ha. Les superficies des compartiments aquatiques peuvent augmenter ou diminuer. Le changement relatif élevé de la superficie de compartiments aquatiques est associé aux tourbières ayant un très petit nombre de mares avec de l'eau libre

(objets des classes « Eau profonde », « Eau peu profonde », « Eau-végétation » et « Petite mare ») et, par conséquent, l'apparition ou la disparition de quelques nouveaux objets de ces classes à entraîner un changement marqué.

La plupart des grandes tourbières (> 2 ha) montre une augmentation de la superficie des compartiments aquatiques. Ces résultats suggèrent que la tendance de dégradation du couvert végétal est plus soutenue dans les tourbières qui avaient déjà des mares de grande taille.

L'analyse de transition entre les classes pour deux de ces grandes tourbières (F23 et F30) a montré une prédominance de la conversion vers des conditions plus humides. Des plusieurs objets de classes terrestres (« Tourbe », « Lanière ») en 1957 situés aux alentours des mares sont devenus semi-aquatiques (« Végétation-eau ») ou aquatiques (« Eau-végétation », « Eau peu profonde », « Eau profonde ») en 2006. En effet, environ 50 % des pixels classifiés en 2006 comme « Eau-végétation » sont classifiés comme des classes terrestres en 1957. Cette transformation suggère une hausse du niveau d'eau et l'expansion du compartiment aquatique soit par l'expansion des mares existantes ou par la formation de nouvelles mares). Les modifications entre les classes du compartiment aquatique (Aquatique (1957) – Plus aquatique (2006)) indiquent aussi soit une hausse du niveau d'eau, soit un approfondissement des mares existantes.

Changement du nombre et de la forme de mares

De plus, comme le montre l'analyse démographique des mares pour la tourbière F30, le nombre de mares de petite taille a augmenté considérablement. Ces mares ont apparu dans les zones qui étaient terrestres en 1957 et qui sont devenues plus humides en 2006 (Figure 7.12).

D'autre part, le processus de l'aqualyse des tourbières ne se traduit pas uniquement par un changement de la taille mais également par un changement de la forme de mares dû à leur expansion et la coalescence et leur transformation en petits lacs. Comme le montre le Tableau 4.1, en 2006, le nombre de « Mares » a diminué d'environ 4 % par rapport à l'année 1957. Cette diminution pourrait être due à la coalescence des mares ou à la transition vers une autre classe. Par contre, la superficie totale des « Mares » en 2006 est plus élevée qu'en 1957, ce qui vient d'appuyer la suggestion de coalescence entre certaines mares et la transition des objets d'autres classes vers le groupe « Mares ». Cependant, les relations entre certains paramètres morphométriques des mares et des petites mares qui déterminent, notamment les relations allométriques entre le périmètre et la superficie, ainsi que la largeur et la longueur n'ont pas montré un changement significatif de la forme des mares.

Toutefois, les changements observés entre les deux dates pourraient être un reflet de la différence dans les conditions d'humidité de surface causée par les conditions météorologiques précédentes l'acquisition des images ou par la différence saisonnière naturelle entre les deux dates d'acquisition. En général, le niveau d'eau et l'état de saturation du sol des tourbières peuvent varier considérablement au sein d'une période donnée de l'année ou entre les années sans être associé aux changements réels de la structure des tourbières. Dans le cas de précipitations précédents l'acquisition des images, une hausse du niveau de l'eau est attendue. Comme le montre l'étude de (Dribault et al., 2012), la majorité des changements hydrologiques de surface dû aux précipitations intervient en bordure des mares principales et au niveau des mares temporaires. Dans ce contexte, il est important de noter que les modifications entre les classes du compartiment aquatique mentionnées ci-dessus ont lieu surtout dans les petits lacs formés à l'intérieur des tourbières ainsi que dans certaines parties des plus grandes mares tandis que les autres parties aquatiques (en périphérie) des mêmes mares ne montrent pas de changement. Ce résultat suggère qu'il s'agit plutôt d'un approfondissement de certaines parties des mares que d'une hausse générale du niveau d'eau dans les mares comme dans le cas des précipitations.

Si l'on prend en considération les résultats de l'étude de Waddington & Roulet (2000) concernant le flux de carbone de mares, il est donc naturel de s'attendre à ce que les mares continuent de s'approfondir. Les auteurs ont même estimé un taux de 3,5 mm par année de perte de la tourbe dans les mares de la tourbière témoin, ce qui correspond à environ 17,5 cm d'approfondissement des mares existantes pour une période de 50 ans.

Comme le montrent les cartes produites, le changement n'est pas unidirectionnel et varie dans les différentes sections de la tourbière. Avec les signes évidents de la dégradation du couvert végétal, la restauration et revégétation de lanières dégradées se produit aussi (cas « Dry », Tableau 7.7). Cependant, ce sont des cas rares. Dans la plupart des cas, il s'agit des dépressions humides (objets de classe « Végétation-eau ») qui sont devenues plus sèches. Les résultats montrent que la superficie du compartiment semi-aquatique pour plupart des tourbières étudiées (19 sur 30 tourbières de la région de Laforge-1 et 5 sur 10 pour la région de La Grande-3) a diminué en 2006. Comme le montre la figure 7.8, une partie de cette diminution est due à la transition entre les compartiments semi-aquatique et aquatique, mais il s'agit principalement d'une transition entre les compartiments semi-aquatique et terrestre qui est plus évidente pour les tourbières < 2 ha (F1 à F16).

Il faut mentionner qu'une partie des transitions observées sont attribuables aux imperfections du recalage de cartes comparées dans certaines sections (Figure 7.12(i)). Cet effet est plus perceptible dans les zones à lanières et se manifeste par des transitions des superficies quasi-équivalentes dans les deux sens. Donc, on pourrait admettre que les valeurs de 12,4 % (F23) et de 13,3% (F30), correspondant aux superficies ayant subi une transition vers des conditions plus sèches (cas « Dry », Tableau 7.8), comme la limite supérieure des erreurs dues au recalage de deux cartes. Cependant, en réalité, cette erreur est beaucoup plus faible et est associée avec certaines zones dans les tourbières.

Aqualyse et climat

L'analyse des données de précipitations (Figure 7.13) pour les stations météorologiques les plus proches montre que l'acquisition d'images QuickBird pour le site de La Grande-3 a été précédée par de faibles précipitations dans la première partie (1-17) d'août 2003. Les précipitations en juillet 2003 sont proches de la normale pour la région (La Grande Rivière A). Cependant, l'été 2006 a été très pluvieux. Bien que la somme de précipitations pour une période d'un mois précédant l'acquisition des photographies aériennes (du 26 mai 1957 au 25 juin 1957, $P = 110$ mm) est comparable à la somme de précipitations pour le même intervalle de temps (à partir de 3 août au 2 septembre 2006, $P = 103$ mm) précédant l'acquisition de l'image QuickBird pour le site de Laforge-1, très probablement, les conditions humides en juillet 2006 ont influencé la position du niveau d'eau. Cependant, il est possible qu'en 1957 la tourbe ait été également saturée car les photos aériennes ont été prises juste après la fonte des neiges qui dans ces régions se produit généralement en mai (G. Carrer, comm. pers.). Comme le montre la Figure 7.13A, l'hiver 1956-1957 était plus froid et avec moins de précipitations de neige que la normale pour cette région. Par contre, il semble que la fonte de neige était tardive car la température moyenne ($T_{\text{mai}} = -1,1^{\circ}\text{C}$) en mai était sous la valeur normale ($T_n = 1,8^{\circ}\text{C}$).

Ainsi, il est possible que les conditions plus fraîches et humides (fonte de neige + précipitations + plus faible taux d'évapotranspiration) au moment de l'acquisition des photos en 1957 soient responsables pour la proportion plus élevée du compartiment semi-aquatique pour la plupart de tourbières.

Alors, compte tenu des variables environnementales (précipitations et température), on pourrait supposer que l'augmentation de la superficie des compartiments aquatique et semi-aquatique ainsi que l'approfondissement des mares observés en 2003 (La Grande-3) et en 2006 (Laforge-1) soient plutôt le résultat de développement propre à chacune de tourbières.

En général, dans le cas des changements hydrologiques provoqués par le climat ou les conditions météorologiques précédant l'acquisition des images, une certaine similitude de réponse des tourbières est attendue à cause de corrélation positive entre le niveau d'eau et la superficie des compartiments aquatique et semi-aquatique (Dribault et al., 2012). Toutefois, sans égard à l'origine de forçage de changements observés, la réponse des tourbières étudiées est assez complexe et spécifique pour chacune.

Il semble que le développement des compartiments aquatiques et semi-aquatiques ainsi que leur réaction hydrologique à court terme (ex. aux précipitations), est contrôlé par des facteurs qui influencent la rétention d'eau et le ruissellement dans les tourbières.

Nos résultats sont conformes à ceux d'autres études paléoécologiques et hydrologiques des tourbières structurées qui ont démontré l'importance de leurs propres caractéristiques sur leur réponse aux facteurs hydroclimatiques. Les études paléoécologiques (Foster & Fritz, 1987; Foster & Wright, 1990; Karofeld, 1998; Charman, 2002; Loisel & Garneau, 2010; Tremblay, 2010) des tourbières structurées ont démontré l'hétérogénéité et la complexité de la réponse spatiale et temporelle de tourbières face à des conditions changeantes. Leurs études montrent qu'il existe une variabilité d'un site à l'autre et que la formation des mares n'est pas synchrone et qu'elle est initiée par des facteurs locaux qui diffèrent d'une tourbière à l'autre.

Les résultats de l'étude de White (2011), basés sur la morphométrie et la répartition des mares dans 24 tourbières minérotrophes de la région de réservoir hydroélectrique Laforge-1 pointent dans le même sens. En effet, l'analyse de paramètres susceptibles d'influencer le développement de la structure de surface des tourbières, effectué par l'auteure, montre que l'aqualyse est un phénomène complexe régi par plusieurs facteurs tels la superficie du bassin versant, la pente, la structure de la tourbière et l'épaisseur de tourbe de la tourbière.

L'hétérogénéité du substrat peut avoir une influence importante sur l'amplitude et la direction d'écoulement, sur le degré de saturation du sol, sur la réponse de tourbières aux conditions météorologiques sèches ou humides (Zeeb & Hemond, 1998). La pente, la microtopographie inégale, la présence de nombreuses mares ainsi que la géométrie du système tourbeux (Price & Maloney, 1994; Quinton & Roulet, 1998; Price, 2001) jouent un rôle important dans leur comportement hydrologique. La fraction superficielle d'eau libre ainsi que les dimensions et la disposition des mares influencent aussi directement la rétention d'eau et le ruissellement (Tardif et al., 2009).

Les travaux des Dribault et al. (2012) ont montré que la dynamique du niveau d'eau et la dynamique spatiale saisonnière des structures aquatique et semi-aquatique associée peut varier le long d'une même tourbière minérotrophe ainsi que entre les tourbières voisines. De plus, les auteurs ont rapporté une plus faible dynamique spatiale des compartiments aquatiques et semi-aquatiques pour la tourbière qui est dominée par des grandes mares bien définies. Ce résultat pourrait expliquer la variabilité plus élevée dans le changement de la superficie des compartiments aquatiques et semi-aquatiques que nous avons observée chez les tourbières < 2 ha où la proportion des mares aux contours lâches est beaucoup plus importante. La présence des mares à contour lâche suggère une dynamique spatiale des compartiments aquatiques et semi-aquatiques plus marquée car avec la hausse de la nappe phréatique, l'eau se répand rapidement à la surface de la tourbière (White, 2011).

À part de la microtopographie (la proportion, la profondeur, la taille et la disposition spatiale des mares existants), d'autres facteurs comme le gradient de surface (Belyea, 2007), les propriétés hydrauliques de la tourbe, ainsi que l'assemblage de la végétation et la croissance de la tourbe peuvent interagir sur le comportement hydrologique des tourbières. Le type et la répartition de la végétation affectent l'interception, l'évapotranspiration, la porosité de la tourbe, l'albédo (Ingram, 1983). Comme l'indiquent nos résultats, la superficie des tourbières ainsi que les paramètres environnants (topographie, densité des forêts, zones brûlées) pourraient également influencer la distribution de l'eau dans les tourbières. C'est le cas des cinq tourbières (F8, F21, F27, F28 et F29) situées à proximité des zones brûlées qui montrent la plus grande différence avec le degré d'aqualyse actuelle (2006). Ce résultat est principalement dû à l'augmentation de leur surface au cours des 50 dernières années. La surface des compartiments aquatiques des fens F8, F21 et F28 était également plus grande en 1957. Il est important de noter que, contrairement à la tendance principale pour le reste de tourbières, la superficie de la classe «Eau profonde» pour les cinq tourbières a été plus élevée en 1957 qu'en 2006. Ce résultat suggère que les récents feux pourraient provoquer une hausse de la nappe phréatique dans les tourbières à proximité et, par conséquent, une expansion rapide des celles-ci vers les zones déboisées par le feu. La déforestation des collines adjacentes due au feu est associée à une diminution de l'évapotranspiration et de l'interception par la végétation et à une augmentation du ruissellement de surface comme résultat, permettant à une partie plus importante des eaux de ruissellement d'atteindre les tourbières à proximité (Charman, 2002).

La localisation des tourbières dans les limites des bassins versants (Ingram, 1983; Roulet & Woo, 1988; Quinton & Roulet, 1998; Todd et al., 2006) influencent également leur réponse

hydrologique. Lavoie et al. (2011) ont énoncé l'hypothèse que les petites tourbières situées en tête de bassin et/ou au sein de petits bassins versants sont très sensibles aux changements hydroclimatiques. Il est possible aussi que les plus grandes tourbières soient plus résilientes (ont une plus grande inertie) aux changements hydroclimatiques que les tourbières de taille plus petite. Il est donc raisonnable de penser que tous les facteurs influençant la réaction hydrologique à court terme (aux précipitations) seraient également responsables pour la réponse variable des tourbières structurées aux changements hydroclimatiques.

4.5 Conclusion

À l'aide de cartes détaillées produites à la première étape de ce projet doctoral, nous avons évalué l'état écologique actuel et les tendances récentes (les derniers 50 ans) chez les tourbières de deux sites d'étude concernant la couverture relative des mares et du couvert végétal et leur développement corrélatif au fil du temps. Ces résultats montrent que la méthode de classification basée objets des images panchromatiques développée permet de détecter les changements et, d'estimer leur étendue, la nature et les particularités spatiales. La méthode est aussi précise que la photo-interprétation pour évaluer les superficies et elle est plus objective, efficace et rapide.

Cette étude fournit également quelques idées sur le développement récent et la sensibilité des tourbières minérotrophes structurées du bassin versant de la rivière La Grande aux paramètres environnementaux.

Nos principaux résultats sont résumés ci-dessous :

1. La superficie de la majorité des tourbières a augmenté ce qui suggère que la paludification est un processus actif depuis 50 ans.
2. Les changements structuraux sont relativement plus importants sur les petites tourbières < 2 ha. Les superficies des compartiments aquatiques peuvent augmenter (+) ou diminuer (-).
3. Les tourbières > 2 ha montre une augmentation de la superficie des compartiments aquatiques et donc une dégradation soutenue entre les dates d'observation.
4. Le changement de la distribution de taille de mares indique une expansion de mares soit par dégradation de la végétation qui les entoure ou soit par la coalescence avec les mares voisines.

5. Les paramètres environnant les tourbières (topographie, densité des forêts, zones brûlées) influencent la distribution spatiale et temporelle de l'eau dans les tourbières.

Néanmoins, la période de temps couverte par cette étude (50 ans) est trop réduite pour conclure à l'intensification récente du phénomène d'aqualyse.

CHAPITRE 5: CONCLUSION

Cette thèse de doctorat visait la caractérisation des changements de la structure spatiale des tourbières minérotrophes structurées du Complexe LaGrande au cours d'une période de 50 ans en précisant la répartition et l'étendue des compartiments terrestres et aquatiques à l'aide des images satellitaires panchromatiques à très haute résolution et des photos aériennes noir et blanc des années 1950.

Afin d'atteindre l'objectif principal de cette étude, le développement d'une approche originale de classification des photos aériennes et des images satellitaires panchromatiques en très haute résolution spatiale était primordial (Objectif spécifique A). Compte tenu de la haute résolution des images panchromatiques et leur résolution spectrale limitée ainsi que la nature complexe des tourbières structurées, l'accent a été mis sur l'information texturale et contextuelle. Ainsi, la méthodologie développée est fondée sur une classification dite « basée objets » qui tient compte non seulement de la réflectance des objets mais aussi de toutes les autres informations spatiales et contextuelles de l'image. De plus, des bandes de texture ont été incorporées dans le processus de segmentation-classification comme des canaux supplémentaires. C'est un élément clé dans le processus de traitement des images qui a contribué à améliorer la précision de la classification. L'intégration de connaissances contextuelles dans l'ensemble des règles de classification (rule set) a également apporté des améliorations dans la classification de ces écosystèmes complexes.

Les résultats montrent que cette méthode semi-automatique de classification peut remplacer efficacement l'interprétation visuelle et la délimitation manuelle traditionnellement utilisées pour l'évaluation écologique des tourbières structurées sur des photos aériennes historiques ou des images satellitaires panchromatiques. Les tourbières sont détectées et délimitées avec une très haute précision. Leurs éléments structuraux sont également délimités et classifiés à un niveau satisfaisant (précision globale 72 – 83 %). De plus, l'ensemble de règles utilisé pour la classification (rule set) s'est montré robuste et efficace pour différents environnements du bassin versant (La Grande-3 et Laforge-1).

Les cartes détaillées produites à la première étape de ce projet ont permis de réaliser le deuxième objectif spécifique (Objectif spécifique B) qui consistait à caractériser la structure spatiale récente (1957) et actuelle (2003/2006) des tourbières minérotrophes structurées du bassin versant de La Grande en précisant la répartition et l'étendue des compartiments aquatique, semi-aquatique et terrestre;

Par la suite, l'objectif spécifique C, soit détecter et interpréter les changements de la structure spatiale des tourbières survenue entre les dates comparées, a été atteint. Afin de mieux comprendre le phénomène d'aqualyse, les quatre aspects principaux de la détection des changements d'occupation du sol ont été abordés, notamment: 1) la détection, 2) l'étendue, 3) l'identification de la nature et 4) les particularités spatiales du changement. Tout d'abord, pour détecter les changements et évaluer leur étendue, nous avons comparé les superficies occupées par les différents compartiments (terrestre, semi-aquatique et aquatique) ainsi que leur rapport. Afin d'identifier la nature du changement, nous avons étudié la transition mutuelle au fil du temps entre les classes. Pour caractériser les particularités spatiales du changement et interpréter correctement le changement de la structure des tourbières, nous avons produit des cartes de changement de l'occupation du sol pour deux tourbières spécifiques. Une analyse bi-temporelle de la démographie et de la morphométrie des mares a également été réalisée dans le but de mieux comprendre le développement de mares et, par conséquent, les conditions hydrologiques associées. Enfin, dans l'intention de mieux interpréter les résultats des changements détectés et comprendre leur réponse éventuelle aux changements climatiques, les données météorologiques précédant l'acquisition des images ont été prises en considération.

Les résultats de cette étude ont montré la performance de la méthode développée pour l'analyse des images panchromatiques à très haute résolution pour obtenir des informations utiles concernant l'état et l'évolution des milieux tourbeux. Une attention particulière a été réservée aux traitements préliminaires (l'orthorectification des images, l'analyse de texture) car la qualité des analyses ultérieures y dépend. Compte tenu de la confusion entre des classes à l'intérieur des tourbières, certaines précautions, comme le regroupement de classes, ont été prises pour l'analyse du changement de leur structure.

La méthode développée a permis de détecter les changements structuraux de 40 tourbières depuis 50 ans et de montrer la complexité des processus. Les résultats dans cette thèse n'ont pas confirmé ou infirmé l'hypothèse posée à savoir que les tourbières du complexe La Grande soient en voie de dégradation depuis cinquante ans et qu'elles se transforment progressivement

en écosystèmes aquatiques par l'intermédiaire de l'augmentation du nombre et de la superficie des mares. En effet, le développement des compartiments aquatiques et semi-aquatiques des tourbières structurées est un processus complexe, multidirectionnel et souvent asynchrone dans les différentes parties d'une seule tourbière. De plus, la période de temps couverte par cette étude (50 ans) est trop réduite pour conclure à l'intensification récente du phénomène d'aqualyse.

Il semble que les mares ne se forment pas en réponse directe du climat. Leur formation et leur développement sont plutôt un résultat de l'interaction entre le climat et les caractéristiques physiques et hydrologiques des tourbières qui influencent la rétention d'eau et le ruissellement dans les tourbières. La taille des tourbières ainsi que les caractéristiques du bassin versant (la superficie, le type du couvert végétal) ou les perturbations (ex. feu) ont également une importance dans la réponse des tourbières structurées à court (événements pluvieux) et à long terme (changements climatiques). Ces résultats sont conformes aux résultats d'autres études paléoécologiques et hydrologiques des tourbières structurées qui ont montré l'importance de leurs propres caractéristiques physiques sur leur réponse aux facteurs hydroclimatiques.

Les connaissances acquises par cette étude peuvent servir pour l'adaptation des modèles hydrologiques utilisés aux spécificités des bassins versants nordiques afin d'assurer une planification adéquate de la production hydroélectrique face aux changements climatiques actuels et futurs.

La méthode de classification développée ici pourra aussi servir à étudier la dynamique saisonnière des tourbières. En effet, compte tenu de la variation saisonnière de l'humidité du sol, un suivi de la dynamique saisonnière hydrologique par des images multitemporelles à très haute résolution accompagnées par des données météorologiques précises (prises par une station météo locale) et des données hydrologiques in situ permettrait de séparer l'effet de facteurs temporels (ex. les précipitations) sur les changements observés des mares de celui associés à la lente évolution des tourbières minérotrophes structurées.

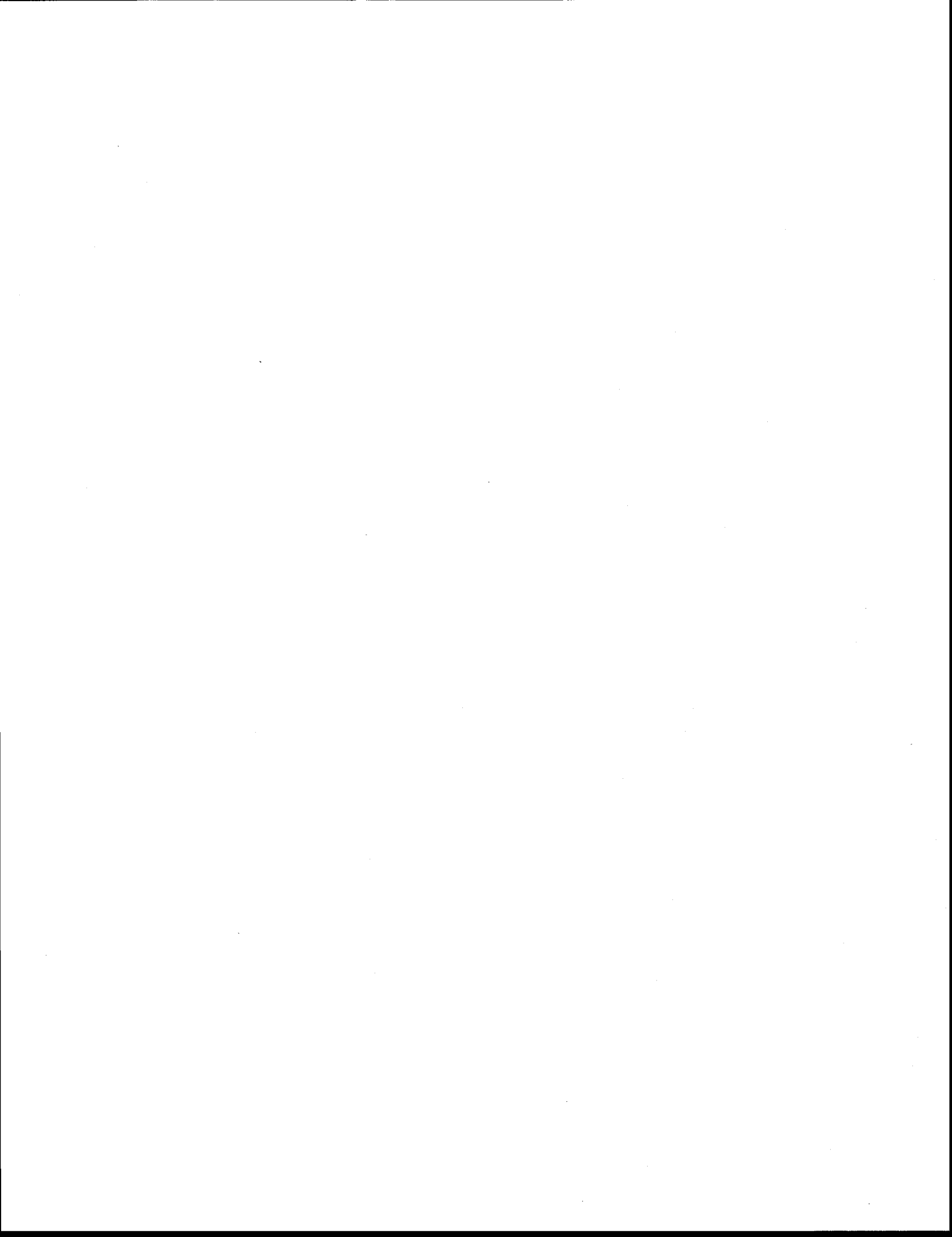
Compte tenu de l'effet de l'hétérogénéité spatiale de tourbières structurées sur la dynamique des gaz à effet de serre (Waddington & Roulet, 2000; Pelletier et al., 2007), la méthode de cartographie détaillée proposée par cette étude pourrait être également utilisée pour une meilleure estimation et suivi de ces émissions. Enfin, la méthode peut aussi s'adapter aux images multispectrales (Dribault et al., 2012) et à d'autres milieux écologiques.



PARTIE II

**CHANGEMENTS DE LA STRUCTURE SPATIALE DES TOURBIÈRES
DU COMPLEXE LAGRANDE DEPUIS CINQUANTE ANS OBSERVÉS
AU MOYEN D'IMAGES SATELLITAIRES PANCHROMATIQUES À TRÈS
HAUTE RÉOLUTION ET DE PHOTOS AÉRIENNES**

ARTICLES



AVANT-PROPOS

Le premier article intitulé « Object-based classification of very high resolution panchromatic images for evaluating recent change in the structure of patterned peatlands » a été publié en 2009 dans le Journal Canadien de Télédétection (Volume 35, Issue 2).

Le deuxième article intitulé « Recent change in the structure of patterned fens in the La Grande River watershed (Northern Quebec) using remote sensing techniques » sera soumis pour publication dans le journal *Ecoscience* en automne 2012.

La contribution des auteurs des articles s'établit comme suit :

Maria Dissanska :

- Définition du sujet et des objectifs
- Développement de la méthodologie de traitement des images
- Traitement des images
- Analyse des données et l'interprétation des résultats
- Rédaction et révision des articles

Monique Bernier :

- Transfert des connaissances sur les techniques de télédétection, aide à la définition du sujet et des objectifs, des choix méthodologiques et de l'analyse des résultats.
- Révision des articles

Serge Payette

- Transfert des connaissances sur l'écologie de tourbières
- Révision des articles



CHAPITRE 6: OBJECT-BASED CLASSIFICATION OF VERY HIGH RESOLUTION PANCHROMATIC IMAGES FOR EVALUATING RECENT CHANGE IN THE STRUCTURE OF PATTERNED PEATLANDS

Maria Dissanska, Monique Bernier and Serge Payette

Maria Dissanska

Institut national de la recherche Scientifique - Centre Eau Terre et Environnement, Université du Québec, 490 rue de la Couronne, Québec, Canada, G1K 9A9

maria.dissanska@ete.inrs.ca

Monique Bernier

Institut national de la recherche Scientifique - Centre Eau Terre et Environnement, Université du Québec, 490 rue de la Couronne, Québec, Canada, G1K 9A9

Monique_Bernier@ete.inrs.ca

Serge Payette

Université Laval, Département de Biologie, Pavillon Alexandre-Vachon, 1030, avenue des Sciences-Humaines, Quebec (Quebec) CANADA, G1V 0A6

Serge.Payette@bio.ulaval.ca



RÉSUMÉ

Un inventaire aérien préliminaire effectué dans l'ensemble du complexe hydroélectrique La Grande (Baie de James, Québec) montre de nombreux signes de dégradation du compartiment terrestre (végétal) des fens structurés et sa transformation en compartiment aquatique. Ce processus de transformation des tourbières est appelé aqualyse. L'objectif principal de cette étude est de fournir information sur l'état actuel et récent (les dernières cinquante ans) de tourbières structurées, concernant leurs compartiments aquatiques et terrestres, et d'évaluer le changement en utilisant la télédétection. Dans cet article, nous présentons une méthode basée objet semi-automatique de classification d'image panchromatique QuickBird. L'accent est mis sur l'information contextuelle. Nous avons aussi intégré des images texturales, calculées d'avance, comme information supplémentaire dans le processus de segmentation et de classification. La validation de la classification de l'image QuickBird montre que la méthode proposée peut détecter les milieux tourbeux avec une précision du producteur de 95% et une précision de l'utilisateur de 88%. L'exactitude de classification globale dans les tourbières est de 81%. Le même schéma robuste de classification a été appliqué à la mosaïque de photos aériennes de 1957. La classification d'image QuickBird et de photos aériennes nous a servi à évaluer l'évolution de la structure spatiale de tourbières structurées de la région La Grande-3 les 50 dernières années. L'analyse montre clairement une augmentation de la surface des classes aquatiques seulement chez deux des sept tourbières étudiées. Afin de confirmer notre hypothèse d'aqualyse active, nous devons aussi analyser les images d'autres régions du complexe hydroélectrique La Grande où l'aqualyse semble plus prononcée.

Mots clé : tourbières, classification basée objet, photographies aériennes noir et blanc, images QuickBird, analyse textural, segmentation multi-échelle



ABSTRACT

An airphoto survey carried out at the La Grande hydroelectrical complex (James Bay, Quebec) revealed numerous signs of degradation of patterned fens, with a decrease in terrestrial vegetation and increase in ponds, a process known as aqualysis. The principal goal of this study is to provide information on the present and past (the last 50 years) state of patterned peatlands, associated with the pattern of the aquatic and terrestrial compartments, and to evaluate their changing cover using remote sensing techniques. In this paper, we present a semi-automated object-based method for QuickBird panchromatic image classification. The method emphasizes on contextual information. We have also integrated texture images calculated in advance as supplementary data layers in the process of segmentation and classification. The validation of QuickBird image classification shows that the proposed method can delineate peatlands with 95% producer's accuracy and 88% user's accuracy. The overall classification accuracy in the peatlands is 81%. The same robust technique was applied to the aerial photographs taken in 1957. The classification of QuickBird images and aerial photographs was used to assess the structural development of patterned peatlands in the La Grande-3 sector over the last 50 years. The analysis shows an increase of aquatic areas only for two out of seven studied peatlands. To confirm our hypothesis of active aqualysis, additional image analysis is required from other areas of the La Grande hydroelectrical complex where the aqualysis process is more pronounced.

Keywords: peatlands, object-based classification, airborne panchromatic photographs, QuickBird images, textural analysis, multiresolution segmentation



6.1 Introduction

The low water levels of the hydroelectric reservoirs of the La Grande River watershed (James Bay, northern Quebec) over the last two decades (DesJarlais et al., 2004) and deviations noted between the meteorological records and the hydrological responses (measured and modelled) raised the question of the role of peatlands in the regional hydrological cycle. In the La Grande River watershed, peatlands are among the most widespread ecosystems, occupying more than 20% of the land surface. However, their role in the water cycle, their contribution in the recharge of hydroelectric reservoirs, and their response to changing climatic conditions remain unknown.

Most studies on the influence of climate change on peatland development predict a decrease of groundwater in response to warming (IPCC, 2001). On the other hand, tree-ring-dated trees submerged in lakes indicate that lake levels in northern Quebec increased during the 20th century compared with those during the 19th century, in close association with greater snow precipitation (Begin & Payette, 1988; Payette & Fillion, 1993; Payette & Delwaide, 2004). Rising lake levels at the regional scale were probably echoed in the hydrology of the peatlands distributed in the La Grande River watershed. Foster et al. (1983) reported that field observations of patterned fens and raised bogs in southern Labrador and eastern Quebec show abundant evidence of pool enlargement and deepening and formation of large shallow ponds with mineral bottoms. Such phenomena were observed by Engstrom (1984) in southeastern Labrador. An aerial survey carried out in 2003 in the La Grande River watershed also showed that many patterned fens were dominated by all-sized ponds with large tracks of inundated strings (terrestrial vegetation). Signs of damaged peatland vegetation by waterlogging are numerous, including peatland invasion by nearby lakes, string degradation and pool enlargement, vegetation patches in the middle of shallow lakes, and tree and shrub mortality. This process of degradation of terrestrial vegetation and its transformation into pools or ponds due to waterlogging has been named aqualysis.

Need of patterned peatland structure research

Ridge-pool patterning affects water balance of peatlands through spatial variation in surface and peat characteristics. Patterning influences the release of incoming water by overland flow, subsurface flow, and evapotranspiration (Belyea, 2007). Thus, the observed transformation of terrestrial compartment into pools might modify the water budget of peatlands and, consequently, might affect the water balance of the La Grande River watershed. Moreover, peatlands are defined as saturated organic land with water standing long enough at the surface to promote the development of hydrophyllous vegetation and biological activity adapted to a wet

environment (National Wetlands Working Group, 1997; Payette & Rochefort, 2001). Typically, peatland ecosystems contain more than 40 cm of peat deposits, which represents a considerable carbon reservoir. The absorption and emission of greenhouse gases (CO₂, CH₄) are controlled by the position of the water table (Moore et al., 1998) and therefore vary between different morphological units (pools, ridges, hummocks, mud bottom hollows) of patterned peatlands (Belyea & Malmer, 2004; Pelletier et al., 2007). The changing ratio between the aquatic and terrestrial compartments in peatlands could then cause a change in the carbon balance of peatlands and thus induce a climatic feedback.

Despite their ecological value, there is a lack of data regarding the status and trends of Canadian wetlands (Milton & Hélie, 2003; Dahl & Watmough, 2007). Moreover, few data exist on the relative cover of pools and terrestrial vegetation and their concurrent development over time (Foster et al., 1983; Foster & Fritz, 1987; Foster & Wright, 1990; Karofeld, 1998; Belyea & Lancaster, 2002; Belyea, 2007). Existing data have been mainly acquired from ground surveys conducted over small areas. This could be a constraint for adequate characterization of the spatial dynamics of studied phenomena. As a result, there is an increased need to obtain an accurate picture of the present and past status of patterned peatlands and their recent developmental trends. The large areas occupied by peatlands, as well as their remoteness and limited accessibility, suggest remote sensing as one of the most suitable tools for generalization of ongoing paleohydrologic, stratigraphic and dendrochronologic *in situ* studies of peatland aqualysis. In this connection, the principal goal of our study is to evaluate the present and past (the last 50 years) state of patterned peatlands and its change, based on the proportion of the aquatic and terrestrial compartments, using remote sensing techniques. Further, the results will be used for assessment of the La Grande River patterned peatland sensitivity to climate change. This information could be useful for adequate planning of hydroelectrical production in the La Grande River hydroelectrical complex in the context of the climate change. In this paper, we describe the semi-automated and robust object-based method applied for the analysis of recent peatland structure change using very high resolution (VHR) panchromatic images.

Taking into account the small size of the structural elements of fen peatlands, as small as 1m wide pools (Belyea, 2007) and strings, VHR images and an appropriate method for their processing are needed. The choice of the oldest (1957) available imagery for this region is limited to black and white aerial photographs. Consequently, for the study of the current status of peatlands, we have selected the panchromatic band of QuickBird images. The QuickBird images have the highest spatial resolution currently available on the market (0.60 m for the

panchromatic band). However, the increase of spatial resolution is associated with the increase of image heterogeneity. Moreover, the spectral information of panchromatic images is rather limited despite their high spatial resolution. To take advantage of the high spatial resolution of these images, it is therefore necessary to seek characteristics other than reflectance and to exploit the second level of information contained in an image, i.e. the spatial context of the pixel. Consequently, to fulfill our objectives, an object-based classification approach (Burnett & Blaschke, 2003) was applied, which focuses on textural and contextual information.

Remote sensing of peatlands

Remotely sensed images are often used in ecological and hydrological studies of peatlands (Töyrä et al., 2001; Quinton et al., 2003), and most studies have focused on the inventory of peatlands. Because peatlands are complex systems where pixels are often a mixture of water, bare peat, and vegetation, their mapping is a major challenge. Ozesmi & Bauer (2002); Poulin et al. (2002) and Fournier et al. (2007) proposed exhaustive reviews on remote sensing of wetlands and various techniques exploited to improve their classification. Fournier et al. (2007) summarized the main classification methods for mapping wetlands and described several related problems like the complex spatial arrangement of some wetland classes and their spatial and temporal variability.

Aerial photographs remain an invaluable source of information for historical studies of ecosystem dynamics because of their high spatial resolution (Pellerin & Lavoie, 2003). They are often used for assessment of spatial and temporal changes of different wetland types (Hefner & Storrs, 1994; Dahl, 2000; Huckle et al., 2004) and for monitoring of small water bodies (Yoshikawa & Hinzman, 2003; Lathrop et al., 2005). Gillmer et al. (1980) have used high-resolution aerial photographs (1:20.000) to delineate pools as small as 5 meters across as a means of adjusting the count of surface water features derived from medium-resolution Landsat imagery. For identification of vernal pools, Lathrop et al. (2005) used colour infrared (CIR) images because they allow better distinction between standing water bodies and vegetation. The visual identification of vernal pools was based on size, shape, colour and texture. The accuracy assessment showed that, using 1m resolution imagery, the minimum detectable size of pools is on the order of 0.02 ha in size or about 50 m in perimeter. The detection and mapping of smaller pools were possible, but errors of omission and commission were higher. Moreover, as the main objective of Lathrop et al. (2005) was to identify and map pool location, only the centroid point locations were digitized; their boundaries were not digitized because the process is more time consuming.

Traditionally, the analysis of older aerial photographs is performed by photointerpretation. The recent mapping of Quebec metropolitan wetlands was also based on photointerpretation of high-resolution aerial photographs and QuickBird images (Kirby & Beaulieu, 2006). The authors were able to identify wetlands as small as 0.03 ha on the 1:8000 colour orthophotos and 0.1 ha on the QuickBird images. Wetlands were identified with accuracy of 93%. Most of reported errors were related to the distinction between fens and bogs, or between marshes and shallow water. However, the process of photointerpretation is labour-intensive and time-consuming because human intervention is required to retrace lines once during the photographic interpretation process, once during area measurement, and lastly for comparing these area estimates to quantify land cover - land use change (Dahl, 2000). The procedure is dependent on the experience and training of the photointerpreters (Hefner & Storrs, 1994).

The recent dynamics of peatland pools in the La Grande River watershed was also studied using aerial photographs (Collins, 2005). The author studied three peatlands. The result shows that peatland pools are very sensitive to climate conditions and respond easily to their change. However, the method applied for extracting pool parameters was not automated but assisted by the analyst. As a further step to this work, our study aims at developing a semi-automated approach for assessing the spatiotemporal development of terrestrial and aquatic compartments in patterned peatlands based on VHR panchromatic images.

Computer-based high resolution aerial image understanding systems have been largely limited to narrow military applications focused on airport and suburban scenes (Guindon, 1997). Most existing image-processing algorithms used by the civilian remote sensing community have been developed for analysis of medium to low spatial resolution (10-1000 m) images. There exist few studies exploiting traditional per-pixel approaches for automated analysis of VHR images. (Dechka et al., 2002) applied traditional supervised and unsupervised classification techniques on derived Ikonos image data. They reported an accuracy of about 47% as a result of high variability of wetland plant communities. The higher spatial resolution reduces the problem of mixed pixels, but the internal class variability increases. By adapting classes to the dominant plant communities, the overall accuracy has been improved (84.4%). Their results also show that combination of multitemporal images with texture image had the highest accuracy (95.9%). (Yohay & Ronen, 1998) compared two classification approaches of panchromatic aerial photographs: a standard maximum-likelihood supervised classification and a modification of supervised classification, which takes into account not only spectral characteristics of pixels but also their spatial arrangement. As a result, they obtained higher accuracy for the neighbourhood

classifier. Fuller et al. (2006) also tested automated approaches (supervised and unsupervised classifications) to identify the wetlands areas from Ikonos multispectral pan-sharpened satellite images. These approaches alone did not yield accurate results. To ensure accurate wetland boundaries, Fuller et al. manually digitized the final wetland map. Therefore, with increased spatial resolution, traditional pixel-based classification methods proved to be ineffective for the automatic extraction of features because they are based only on spectral values of pixels and do not take into consideration the pixel context (Guindon, 2000; Coburn & Roberts, 2004).

Texture analysis

Exploitation of spatial variation (image texture) becomes an important aspect in VHR image classification procedures. Texture analysis has often been used as an additional tool for wetland mapping (Bernier et al., 2003; Chiu & Couloigner, 2004). Many studies show that a combining texture and contextual information with spectral data significantly increases classification accuracy (Dedieu et al., 1997; He & Collet, 1999; Franklin et al., 2001; Coburn & Roberts, 2004; Tso & Olsen, 2004). Combining spectral and spatial features better resembles human image interpretation. There are several methods for texture quantification. The statistical method based on the grey level co-occurrence matrix (GLCM) (Haralick et al., 1973) is the most common method used in remote sensing. The statistics are based on the relationships of pairs of pixel values in a neighbourhood and their frequencies of appearance in a moving window. The size of the moving window is a crucial parameter in texture analysis, and its choice depends on the size of analyzed features and image resolution. However, there is no single window size that could adequately characterize the range of textural properties for an entire image and all land cover classes (Coburn & Roberts, 2004). Often the window size is chosen by trial-and-error method to satisfy study purposes. Several studies exploited data-driven window size based on experimental variograms (Jakomulska & Clarke, 2000; Durrieu et al., 2005). Others have tested incorporation of texture measures into multispectral data for improvement of wetland classification (Coburn & Roberts, 2004; Chiu & Couloigner, 2004). The results of these studies indicate that the incorporation of texture measure improves image classification and that data-driven window size is a factor contributing to classification accuracy.

Object-based image analysis

The increasing availability of VHR data from satellites such as SPOT-5, Ikonos and QuickBird has led to the development of more sophisticated object-based methods for image analysis, exploiting the spatial context of the pixel. The principal difference with the traditional pixel-based image processing is that the basic unit of the object-based analysis is an "object" or "segment",

i.e., a group of adjacent pixels. The main advantage of the object-based classification is that objects contain more information than a single pixel. In addition to spectral properties, each object contains information on its shape, dimension, texture, subobjects, and superobjects and on the context of the objects that surround it. These spectral and spatial attributes are then used to assign the object to a specific class. In contrast to pixel-based analysis, which relies on pixel statistics, object-based image understanding relies on knowledge of structural characteristics of physical objects and their spatial and functional relationships (Guindon, 1997). This approach mimics the human interpretation of images, as it tends to generalize images into homogeneous patches by incorporating spectral and spatial information.

The object-based classification has shown promising results in peatland classification (May et al., 2003; Sugumaran et al., 2004 ; Hubert-Moy et al., 2006; Grenier et al., 2007; Dissanska et al., 2007). Burnett et al. (2003) proposed a hierarchical organization of segmented objects that allows the best exploitation of contextual relations between various peatland units. Burnett et al. used CIR aerial photographs to delineate pool complex expansion and forest encroachment. The fuzzy boundaries of peatlands and the mixture of water, barren ground, and vegetation signatures in the pixels impede the accurate image classification. The integration of fuzzy logic in classifiers improves the detection of transitional zones (Chiu & Couloigner, 2006). All these new classification concepts are integrated into Definiens Professional software (formerly eCognition) (Benz et al., 2004).

Recent research focused on discrimination of structural stages in riparian and adjacent forest ecosystems (Johansen et al., 2007). The authors applied texture analysis on a VHR multispectral QuickBird image based on variogram-driven optimal window size. Subsequently, they performed an object-based classification using four different combinations of spectral and derived textural bands. Their results show a 2-19% increase in classification accuracy for the majority of vegetation structural classes when using both the spectral and textural image bands in the segmentation and classification process. Halounova (2004) has also integrated the texture images in an object-based classification process of black and white aerial orthophotographs.

There are different techniques available for change detection. We have adopted a postclassification comparison. In fact, only the latter attempts to provide understandable information on the type of change (Jensen, 2005). On the other hand, object-based image analysis raises some methodological challenges to standard change detection and accuracy assessment techniques (Blaschke, 2005). In standard postclassification change detection, the

two coregistered maps are compared on a pixel-by-pixel basis using a change detection matrix. However, when comparing objects, the problem is more complex because the objects may undergo not only thematic changes but also geometric changes (size and form). The identification of the same objects in two datasets then becomes difficult and could be complicated by misregistration errors.

To overcome limitations related to automatic processing of VHR panchromatic images and based on previous research results, we propose a semi-automated object-based method for QuickBird panchromatic image classification. The method focuses on textural and contextual information. The same robust technique was applied to the aerial photographs taken in 1957. The QuickBird data image was used to establish a baseline for patterned peatland status, from which a retrospective analysis of data from earlier aerial photographs was performed.

Study sites

The study sites are located in the La Grande River watershed (James Bay, Quebec). Relatively flat relief, impermeable surface deposits, cold climatic conditions, and a short growth season, typical for this region (Mortsch, 1990), create propitious conditions for peatland development. The peatland distribution follows a west-east gradient of climatic, topographic and geomorphologic conditions (Tarnocai et al., 2000; Payette & Rochefort, 2001). The western part of the catchment is generally occupied by bog peatlands. They are gradually replaced by mixed peatlands and patterned fen peatlands in the eastern part. Two study sites were chosen based on hydroclimatic and regional ecological characteristics (Figure 6.1):

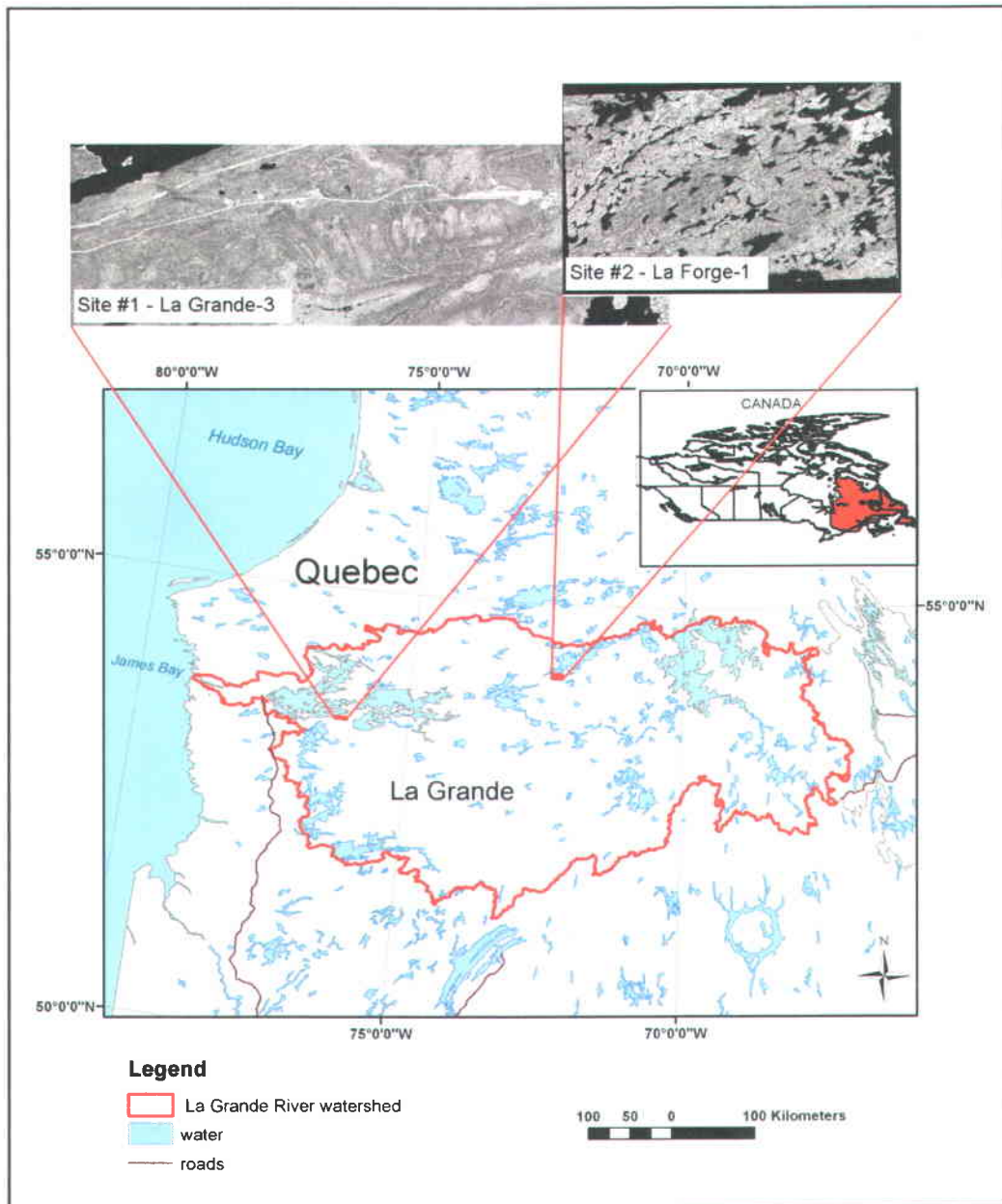


Figure 6.1 Location of the two study sites within the La Grande River watershed in northern Quebec, Canada

Site 1 (53°33' 33" N, 76°15' 19" W; near the La Grande-3 airport) is located at the northeastern limit of bog distribution where transitional (or mixed) peatlands, i.e. peatlands having both characteristics of both bogs and fens, and patterned fens are frequent. The relief is undulated, with rocky uplands towards the north. The mean elevation is about 220 m above sea level (asl).

The boreal climate of site 1 is marked by cool summers and cold winters. The mean annual temperature is about -3.5°C , and total annual precipitation is approximately 680 mm. The growth season lasts approximately 130 days (Bootsma & Ballard, 1997). The regional vegetation is dominated by open forest communities with black spruce (*Picea mariana*) as the dominant tree species. Spruce-moss stands are the most important forest type in depressions, whereas lichen -black spruce woodlands are distributed on well-drained uplands².

Site 2 ($54^{\circ}12' 12''$ N, $72^{\circ}19' 10''$ W; east of the road towards the Laforge-1 reservoir is in the eastern part of the La Grande River catchment. The mean elevation is about 445 m asl. The site harbours a diversity of rocky hills, small lakes and interconnected, narrow patterned fens. It is characterized by a relatively low mean annual temperature (about -4.2°C) and higher mean annual precipitation (830 mm) than that of site 1. The growth season also is shorter and approximates 120 days (Bootsma & Ballard, 1997). Lichen-black spruce woodlands prevail.

Image data

Recent (2003, 2006) very high resolution panchromatic QuickBird images and aerial photographs taken in 1957 were selected for this study. The optimal period recommended for the identification and effective mapping of peatlands from photography ranges from mid-July to the end of August (Jacques & Hamel, 1982). During this period most plant species reach maturity and ground water is at its lowest level. However, aerial photographs for this period of the year are not always available, particularly when looking for surveys dating back to 50 years.

For the site 1 area, four aerial photographs (National Air Photo Library, NAPL) at a scale of 1:60,000 from June 25, 1957, were used. Four aerial photographs (NAPL) at a scale of 1:40,000 and taken on the same date were used for site 2 (Table 6.1). The 1:60,000 scale photographs were digitized at 1815 dpi, which gives a pixel resolution of 0.84 m on the ground, i.e., a resolution relatively comparable with that of the QuickBird images. The 1:40,000 photos were digitized at 1215 dpi to obtain the same resolution on the ground of 0.84 m.

Two panchromatic QuickBird images (0.60 m resolution, with common cover on the ground; 16.7 km x 5.8 km) acquired on 12 and 17 August 2003 were used for site 1. Another QuickBird image (multispectral and panchromatic) was obtained for site 2 in September 2006. The characteristics of these images are listed in Table 6.1. The QuickBird images are in standard mode. Multispectral QuickBird images are also used to support the interpretation of random validation objects because the peatlands and uplands are easy distinguishable in these images.

²(http://www.mddep.gouv.qc.ca/biodiversite/aires_protegees/provinces/partie4h.htm)

As auxiliary data for geometric corrections we used a 50 m resolution digital elevation model (DEM), extracted from the 1:250,000 scale cartographic layers (National Topographic Data Base, Natural Resources Canada). Global Positioning System (GPS) measurements of the road from Radisson to Brisay were carried out by VIASAT Geotechnologies and INRS-ETE in the autumn 2003 based on a LoKTor system. Data in postprocessing give a precision of ≥ 5 m. We also used LANDSAT-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) (orthoimage, panchromatic band, resolution 15 m, path 18, row 22, acquisition date: 20 August 2000, and path 16, row 22, acquisition date: 22 August 2000, GeoBase, Natural Resources Canada) and SPOT-5 imagery (panchromatic band, resolution 2.5 m, processing level 1A, date of acquisition: 12 September 2003, Spot Image).

Table 6.1 Characteristics of the QuickBird images and aerial photographs of the two sites

Image	Ground coverage ^a	Date of acquisition	Spatial resolution	Spectral resolution (nm)
Site 1 : La Grande 3 QuickBird (standard product)	53°34'59''N, 76°23'17''W (northwest corner);	12 August 2003	0.60 m;	Panchromatic, 450 – 900; multispectral blue (B): 450 – 520; multispectral green (G): 520 – 600; multispectral red (R): 630 – 690; multispectral infrared (IR): 760 – 900.
	53°32'05''N, 76°07'23''W (southwest corner); 16.7 km x 5.8 km ²	17 August 2003	2.40 m	
NAPL aerial photographs A15640-133 to A15640-136	53°37'26''N, 76°25'44''W (northwest corner); 53°29'39''N, 76°00'20''W, (southwest corner); 14 km x 14 km ²	25 June 1957	1 : 60 000 digitized at 1815 dpi to give pixel resolution on ground of 0.84 m	Panchromatic, 450 – 900;
Site 2 : Laforge 1 QuickBird (standard product)	54°14'26''N, 72°25'13''W (northwest corner);	2 September 2006	0.60 m;	Panchromatic, 450 – 900; multispectral blue (B): 450 – 520; multispectral green (G): 520 – 600; multispectral red (R): 630 – 690; multispectral infrared (IR): 760 – 900.
	54°09'57''N, 72°13'08''W (southwest corner); 13.4 km x 7.8 km ²		2.40 m	
NAPL aerial photographs A15640-146 to A15640-149	54°14'28''N, 72°23'31''W (northwest corner); 54°9'53''N, 72°10'14''W, (southwest corner); 9.3 km x 9.3 km ²	25 June 1957	1 : 40 000 digitized at 1210 dpi to give pixel resolution on ground of 0.84 m	Panchromatic, 450 – 900;

^a All images were georeferenced to the universal transverse Mercator (UTM) coordinate system, Zone 18 north, North American Datum for 1983 (N AD83)

Numerical oblique aerial photographs and ground-truth photographs acquired during a helicopter and field surveys in June 2002, May 2005 and August 2006 were also used for calibration and validation of the method. We used weather data for the analysis and interpretation of obtained results (National Climate Data and Information Archive, Environment Canada).

6.2 Methods

The method was developed for QuickBird images. The same processing was applied thereafter to the aerial photographs but with slight variations in parameters according to image specificity.

6.2.1 Pre-processing

6.2.1.1 Geometric correction

All images were georeferenced to the Universal Transverse Mercator (UTM) coordinate system, Zone 18 north, North American Datum for 1983 (NAD83). As mentioned in the previous section, QuickBird images are in standard mode, which means that they were geometrically processed and mapped to a cartographic projection by the image supplier (DigitalGlobe). The geometric processing has been done using spacecraft parameters and coarse DEM to take topography into account. However, as shown in Figure 6.2A, positioning of the image compared to the road ground control points (GCPs) is not accurate. To correct this error, we have applied a simple first-order polynomial transformation, considering the relatively flat relief and the destroyed original geometry of the image (satellite - sensor - ground) by the first geometric correction (Volpe F., 2003). The geometric correction of the images was done using PCI Geomatica. The GCPs of the road Radisson-Brisay (precision 5 m) were used to establish the relationship between the raw image and the ground. However, all the points are concentrated on a line that passes through the center of the image. To obtain an adequate coregistration, the remainder of the points distributed relatively homogeneously was chosen from a LANDSAT-7 ETM+ image. As GCP we have selected the centers of small lakes or high-contrast features identifiable on two images. The total number of GCPs used is 33, resulting in an average root mean square (RMS) error of 1.24 m in X and of 1.07 m in Y. We applied the cubic convolution for the calculation of the new value of the pixel in its new position. The final image thus is contrasted with more details (Toutin, 2004). The corrected QuickBird image with superimposed road GCPs is presented in Figure 6.2B.

For the correction of the second QuickBird image (Laforge-1), we used a panchromatic SPOT-5 orthoimage. For the orthorectification of the SPOT5 image, a three-dimensional (3D) rigorous

method was applied by using the orbit parameters, GCPs of the road Radisson to Brisay, LANDSAT-7 ETM+ orthoimage, and DEM. The RMS residuals obtained with 17 GCPs are 2.17 m and 2.82 m for the X and Y coordinates, respectively.

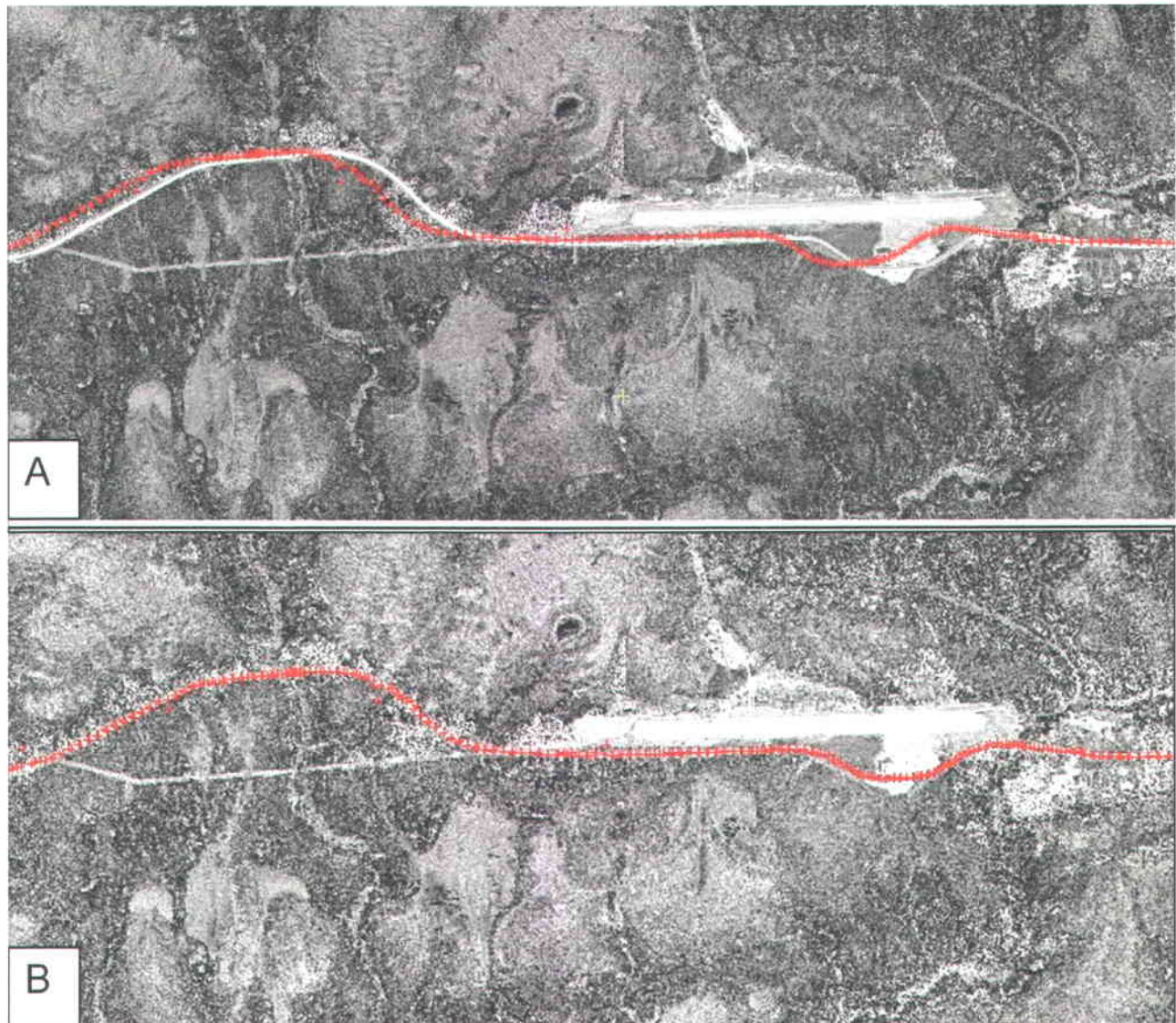


Figure 6.2 QuickBird panchromatic image with superposed road ground control points (GCPs). (A) before geometric correction, and (B) after geometric correction.

The aerial photographs were corrected using camera parameters, GCPs and the DEM. The georeferenced image QuickBird, created in the previous step, was used as source for GCPs. Considering the difficulty in identifying GCPs because of lack of easily identifiable points in the natural environment and of the time lag between the air photographs and the satellite image, the tie points (TCPs) clearly identifiable on two or several aerial photographs were used. TCPs

allow the mathematical model to determine how the four photographs are orientated each one with respect to the others and to extend the correction to the surfaces where there are no control points. A total of nine GCPs and 13 TCPs were used to calculate the model. A mosaic was then produced from the four orthorectified photographs. The RMS error of geocorrected aerial photographs is less than 1 pixel (0.82 m and 0.64 m for X and Y coordinates, respectively); however the deviation of some independent control points (ICP) in comparison with their position in QuickBird is on the order of 15 m. Considering that QuickBird images are in standard mode and the low accuracy of the available auxiliary data (GCPs and DEM) used for the geometric correction, distortions between GCPs are not entirely eliminated.

6.2.1.2 Texture processing

We have applied the texture analysis based on GLCM and have integrated texture images as supplementary data layers in an object-based classification. The texture measures as homogeneity, contrast, entropy, second angular moment or correlation are widely used for remote sensing imagery analysis (Baraldi & Parmiggiani, 1995). However, the spectral and spatial resolution of images and the characteristics of sensed objects (dimension, shape, and distribution) define the relevance of texture measures to be used (Kayitakire et al., 2006). For our study, we used seven texture measures computed directly from GLCM (homogeneity, GLCM mean, GLCM entropy, GLCM second angular moment, inverse difference) or from a grey level difference vector (GLDV) which was derived from GLCM (GLDV entropy, GLDV second angular moment). Different combinations of these texture measures, assuring the best separability of classes, were used for further image classification. The choice of these combinations was assisted by the “feature space optimisation” tool of Definiens Professional software. For the calculation of texture measures, we used PCI Geomatics software (procedure TEX). The semivariogram information was used to determine the optimal window size, based on information on the spatial structure of vegetation. The pixel digital numbers are considered as a function of geographic location, i.e. regionalized variable. The experimental semi-variogram measures half of the average squared difference between values $z(x_\alpha)$ and $z(x_\alpha+h)$ of paired pixels separated by a given lag h (Eq. 6.1) (Curran & Atkinson, 1999):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [z(x_\alpha) - z(x_\alpha + h)]^2 \quad \text{Eq. 6.1}$$

where $N(\mathbf{h})$ is the number of considered pixels pairs, and \mathbf{h} is a vector that represents the distance between pixels in a particular direction. Since the sill of semivariograms provides information on the variability of pixels values, the range indicates the distance beyond which there is no spatial dependence of pixels and is associated with the size of the elements within the scene. Semivariograms for three representative subsets of nine land cover types (forest_lichen, dense forest, forest_peat, fen, fen_little pools, fen_pools, bog, bog_pools and burned vegetation/rock vegetation) were examined to determine the appropriate window size for texture analysis. The semivariograms were calculated for 80 pixels x80 pixels subsets, representing each structural class considered. As the orientation of pools in each peatland is dependant of local drainage, we computed the variogram without specifying direction to be able to spread the texture measures over the entire imaged area independently from pattern orientation specific for each ecosystem. Due to the small pixel size (0.60 m) of the QuickBird image, the graphs of semivariograms are very close to continuous data models. Therefore, modeling was not used to fit the semivariance curves and the ranges for different structural classes were estimated directly from experimental semi-variograms as a distance at which the semi-variogram first flattened (Johansen et al., 2007).

The number of grey levels also influences the final image. Usually, it is advised to reduce the number of grey levels by applying a histogram equalization to allocate the same probability to each grey level (Haralick et al., 1973). For the QuickBird image and aerial photographs we have chosen 32 and 16 grey levels, respectively. The difference in parameters for aerial photographs and QuickBird images reflects the difference in their resolution and dynamics of grey levels (16 bits for QuickBird and 8 bits for aerial photographs). The distance between pixels, used in texture calculation, was fixed at 1, taking into account the small window size. The average of all four directions (0°, 45°, 90°, 135°) between pixels was computed. The texture images were implemented like additional bands for further segmentation and classification.

6.2.2 Object-based analysis

Image segmentation and object-based classification were performed using Definiens Professional software. We divided the images into 12 subimages because of the limited processing power of computers available and the confined memory allocated by the software. The segmentation and classification strategy was developed on one QuickBird subimage and consequently applied to the remaining 11 subimages. The same strategy was applied on all subimages of the mosaic of aerial photographs. The overall scheme of the object-based processing is shown in Figure 6.3.

6.2.2.1 Segmentation

For better adaptation of the image classification to the diversity, complexity, and the hierarchical structure of the natural ecosystems, we have applied a multiresolution segmentation (Baatz & Schape, 2000) at three levels. First, we performed segmentation at the intermediate scale (Figure 6.3 - Step 1, level 2.). This step is aimed to delineate peatlands or parts of peatlands (peat, saturated peat, structured peat) and the largest water bodies (lakes, large pools) from the other types of land cover (forests, roads, outcrops). Small structural elements (e.g. strings, small pools) were extracted at a lower level (Figure 6.3 - Step 2, level 1).

For delimitation of the objects at level 2, we used the panchromatic band in combination with the following texture bands: GLCM mean, GLCM entropy, GLDV second angular moment, and inverse difference. An equal weight was given to all bands. The choice of image layers was guided by the variance of the layer and visual assessment of different combinations of layers using the layer-mixing tool. The process of segmentation is controlled by the scale parameter, which is an abstract parameter determining the threshold of object heterogeneity in selected bands. This criterion of homogeneity is a combination of the colour and the factors of form such as smoothing and compactness (Baatz et al., 2004). The values applied to represent the scale parameter are 50 for QuickBird images and 30 for aerial photographs. Weight of 70% and 30% are given to the colour and form, respectively. To specify the form, we have selected a relationship of 70 to 30 between compactness and smoothing.

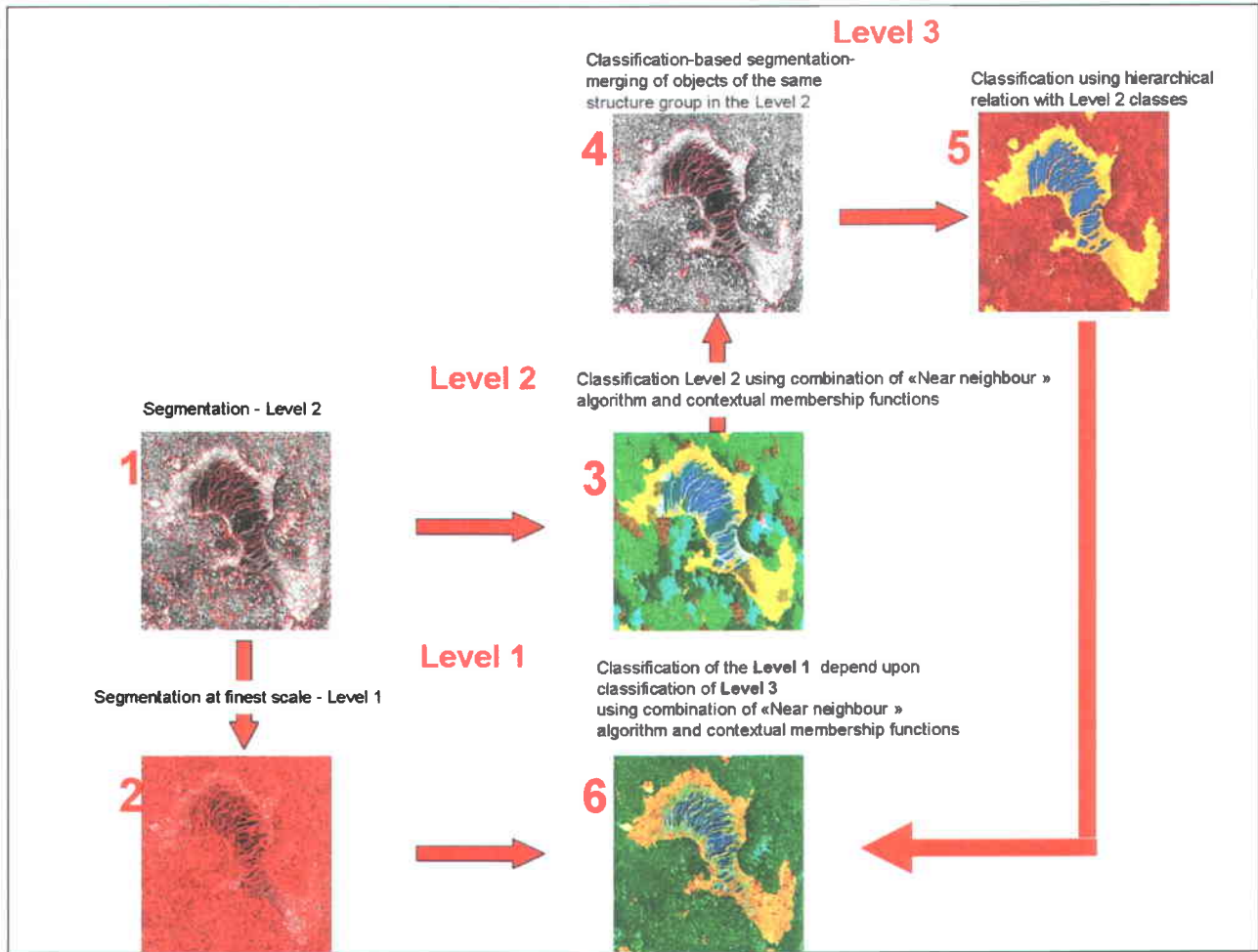


Figure 6.3 Scheme of the multiresolution segmentation (levels 1-3) and the object-based classification.

For level 1 segmentation, where details within peatland limits are considered, we combined the panchromatic band with the following three texture bands: GLDV second angular momentum, GLDV entropy, and inverse difference. These bands are very effective for delimitation of pools, vegetation, and transitional zones. At this level, we considered 10 to be an adequate value for the QuickBird scale parameter and six for the aerial photographs, with weight of 90% for the colour, and 10% for the form. However, the same ratio as at level 2 was applied between compactness and smoothing of the form. The selected segmentation parameters are summarized in Table 6.2.

Table 6.2 Description of all parameters used for the segmentation of the QuickBird images and the aerial photographs at levels M and L.

Bands	Scale parameter		Colour		Compactness	
	QuickBird	Airphotos	QuickBird	Airphotos	QuickBird	Airphotos
Level 2 (Level M) Panchromatic; GLCM mean; GLCM entropy; GLDV angular second moment; inverse difference	50	30	0.7	0.9	0.7	0.7
Level 1 (Level L) Panchromatic; GLDV entropy; GLDV angular second moment; inverse difference	10	6	0.9	0.9	0.7	0.7

The level 3 objects were created by merging of the classified objects belonging to a common structural group at level 2. As a result, we have obtained the contours of entire peatlands or peatland complex separated from other land cover types.

6.2.2.2 Classification

The classification of objects is based on fuzzy logic, which enables us to integrate various features in the description of classes by logical operators. The selection of features was assisted by analysis of separability of the compared classes (Feature space optimisation and Feature view tools of Definiens Professional). An *a priori* expert knowledge is essential for the accurate description of the classes. We have simultaneously applied various strategies of classification to different parts of a single image using either the nearest neighbour algorithm, the membership functions, describing a specific property of the objects, or a combination of these two classifiers. For example, deep water was classified simply using a function of membership, which played a role of threshold. At the same time, for the other classes of the same level, we used much more complex descriptions. The information on features used is presented in Table 6.3.

We used a hierarchical classification scheme according to mutual and semantic relations between classes. To keep the class hierarchy transparent, three abstract classes were introduced: level H (High), level M (Middle) and level L (Low). These classes are characterized only by the number of segmentation level to which they are defined. This condition limits the application of their child classes only to the objects belonging to the corresponding level of segmentation. It means that subclasses of level L will be applied only to objects of the finest

level of segmentation (level 1), and classes of level M will be applied to the objects of the intermediate level of segmentation (level 2). The classes of Level H will act only on the objects of Level 3.

Classification at Level M

At level M, the main goal was to delimit land covers being part of a peatland (peat, saturated peat, structured peat, water-vegetation and dry peat) from the other types of land cover like water, road, gravel, forest, forest on mineral, forest on peat, forest-lichen, lichen and "Rock". Therefore, 14 classes were defined at this level. The five classes defined for peatlands correspond to different moisture content or different pool densities. It is important to note that, at this stage of the study, no difference was made between fens and bogs. Their spectral signatures and small-scale structures in the black and white images are very similar. The distinction between these two peatland types is difficult even with multispectral images (Grenier et al., 2007). A distinction of these types could be done only on level H after classification of the more detailed level L, using the spatial arrangement and dimensions of subobjects from level L.

Thus, the defined classes are applicable on both peatland types. For the classification of the objects (Figure 6.3 – Step 3, level 2), we used a combination of the nearest neighbour algorithm and membership functions. Most of the features used for the definition of nearest neighbour algorithm feature space at this level refer to the spectral information, density, and direction of subobjects. The representative samples for each basic class were used for training the nearest neighbour algorithm. As training sites, we have chosen the objects that can be interpreted easily. The choice was assisted by ground truth photographs (June 2002, May 2005, August 2006). The membership functions used describe the contextual relations between the objects of a given class with their neighbours. Table 6.3A contains detailed description of all classes defined for this level, the number of training samples, attributes used for definition of the nearest neighbour algorithm, and membership functions with their intervals.

Classification at level H

A segmentation based on the results of the classification at level M was applied where the neighbour objects of the same structure group of level M classes are merged to form objects at level H (Figure 6.3 – Step 4, level 3). Therefore, three groups of classes were defined: (1) water (water, water-vegetation); (2) other (rock, gravel, road, forest, forest on mineral, forest on peat, forest-lichen, lichen); and (3) peatland (peatland, saturated peatland, structured peatland, dry peat). In this manner, we joined together all the objects belonging to an ecological unit (i.e., a peatland). This grouping reduced the number of classes to three, namely water, other, and

peatland. For their classification (Figure 6.3 – Step 5, level 3), we used only a class-related feature (Existence of sub-objects) of the corresponding group at level M.

Classification at level L

At this level, 14 classes were defined, with 11 classes describing different morphological units in patterned peatlands (peat, dry peat, saturated peat, string, saturated string, island, vegetation_water, water_vegetation, shallow water, deep water, tree) and only three classes describing the environment surrounding peatlands (rock-gravel, lichen, forest (any type)). Classification at this finest level was done by combining nearest neighbour classifier with membership functions. Nearest neighbour classifier was “trained” by collecting representative samples of each class throughout the image. The membership functions were used to bind description of classes at this level with the classification at level H. Therefore, the classification at level H was used as a mask (Figure 6.3 – Step 6, level 1).

Table 6.3A Class description, number of training samples, and attributes used in the classification for level M




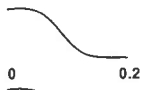







Class	Description	Samples	Attributes used in the classification		
			Membership Functions	Nearest Neighbour	
Water	Lakes, rivers, big pools		Mean (Pan)		
Water_Vegetation	Objects covered with more than 50 % water: big pools and fine strings or shallow water.	83	Rel. border to "Forest_Lichen"		<ul style="list-style-type: none"> • Mean Pan • Mean GLDV Entropy • Standard Deviation Pan • Standard Deviation GLCM Entropy • Avg. Mean diff to neighbours of sub-objects Pan • Avg. Mean diff to neighbours of sub-objects GLDV Sec Ang Moment • Density • Direction of sub-objects: mean • Density of sub_objects: mean
			Rel. border to "Peatland" group		
Forest_Lichen	Open forest on mineral substrate, understorey: lichen	79	Rel. border to "Water_Vegetation"		
			Rel. border to "Peatland" group		
Forest	Coniferous Forest (Black spruce), mean density	97	Rel. border to "Water_Vegetation"		
			Rel. border to "Structured Peat"		
Forest on Peat	Spruce-moss stands, bryophytes under storey	132	Rel. border to "Water_Vegetation"		
			Rel. border to "Structured Peat"		
Saturated Peat	Peat, water table near or at surface	86	Rel. border to "Peatland" group		
Peat	Peatland object, dominated by shrubs, herbaceous or/and bryophyte vegetation	241	Border to "Road"		

Table 6.3A (concluded)

Class	Description	Samples	Attributes used in the classification		
			Membership Functions	Nearest Neighbour	
Structured Peat	Succession of strings and pools, predominance of terrestrial component (> 50%)	73	Rel. border to "Forest_Lichen"		<ul style="list-style-type: none"> • Mean Pan • Mean GLDV Entropy • Standard Deviation Pan • Standard Deviation GLCM Entropy • Mean of sub-objects : stdev(Pan) • Mean of sub-objects : stdev(GLDV Entropy)
			Or Border to "Water" group		
			Rel. border to "Peat"		
Forest on Mineral	Coniferous Forest (Black spruce), high density	124	Rel. border to "Water_Vegetation"		<ul style="list-style-type: none"> • Avg. Mean diff to neighbors of sub-objects Pan • Avg. Mean diff to neighbors of sub-objects GLCM Sec Ang Moment
			Rel. border to "Structured Peat"		
Rock	Bare surface or with low density of vegetation cover	121	Rel. border to "Water_Vegetation"		<ul style="list-style-type: none"> • Density • Direction of sub-objects : mean • Density of sub-objects : mean
			Rel. border to "Structured Peat"		
Dry Peat	Peatland segments dominated by Sphagnum or/and herbaceous vegetation; high reflectance, high homogeneity	107	Border to "Road"		<ul style="list-style-type: none"> • Mean Pan • Mean GLDV Entropy • Standard Deviation Pan • Standard Deviation GLCM Entropy • Avg. Mean diff to neighbours of sub-objects Pan • Avg. Mean diff to neighbours of sub-objects GLCM Sec Ang Moment • Density • Direction of sub-objects : mean • Density of sub-objects : mean
			Border to "Rock/Gravel"		
			Rel. border to "Lichen"		
			Rel. border to "Forest_Lichen"		
Lichen	Mineral substrate, covered by lichen	91	Or Border to "Forest"		
			Border to "Forest_Lichen"		
Gravel	Artificial or natural bare surface, gravel	72	Rel. border to "Dry Peat"		
			Rel. border to "Peat"		
Road	Bare surface, mainly well pressed gravel	23	Mean (Pan)		
			Length/Width		

For example, at level L, an object will be classified like string if its superobject at level H is a peatland. Also, to classify an object at level L, like rock-gravel for example, its superobject at level H must be of the class other. As another example, an object at level L will be classified vegetation_water if it has characteristics similar to those of the corresponding training sites and if its superobject at level H is not of the class other. Such an organization of the horizontal (between neighbours) and vertical (between superobjects and subobjects) relations enables us to reduce confusion between classes. The details on classes, number of samples, and features used for classification at this level are presented in Table 6.3B.

Table 6.3B Class description, number of training samples, and attributes used in the classification for level L




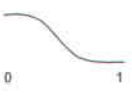
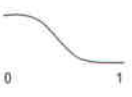

Class	Description	Samples	Attributes used in the classification		
			Membership Functions	Nearest Neighbour	
Rock /Gravel	Artificial or natural bare surface: roads, gravel, rocks	66	Or Existence of super objects "Rock"		<ul style="list-style-type: none"> • Mean (Pan) • Mean (GLCM Homogeneity) • Mean (GLDV Entropy) • Mean (Inverse Difference)
			Existence of super objects "Other"		
Lichen	Mineral substrate, covered by lichen	46	Existence of super objects "Other"		
			Forest	All types of vegetation out of peatlands	
Shallow Water	Water, free of vegetation, depth ?26 – 40 cm	32			Existence of super objects "Other"
			Rel. border to "Forest"		
Deep Water	Water, free of vegetation, depth > 40 cm	17	Rel. border to "Forest"		
			Or Existence of super object "Water"		

Table 6.3B (concluded)

Class	Description	Samples	Attributes used in the classification	
			Membership Functions	Nearest Neighbour
Dry Peat	Peatland segments dominated by Sphagnum or/ and herbaceous vegetation; high reflectance, high homogeneity	68	Existence of super objects "Other"	<ul style="list-style-type: none"> • Mean (Pan) • Mean (GLCM Homogeneity) • Mean (GLDV Entropy) • Mean (Inverse Difference) • Length/Width
Peat	Peatland object, dominated by shrubs, herbaceous or/and bryophyte vegetation	176	Existence of super objects "Other"	
Saturated Peat	Peatland, water table near surface	140	Existence of super objects "Other"	
Island	Patch of vegetation in the pools	34	Existence of super objects "Other"	
			Rel. border to "Water" group	
String	String of vegetation, depth of water table > 10 cm	84	Existence of super objects "Other"	
			Rel. border to "Water" group	
Saturated String	String of vegetation, water table at the surface	149	Existence of super objects "Other"	
			Border to "Water" group	
Vegetation_Water	Objects with more than 50 % vegetation cover, generally on the edge of the pools, or pools with dense cover of vegetation. depth <10 cm	152	Existence of super objects "Other"	
Water_Vegetation	Objects with less than 50 % vegetation cover or pools with low density vegetation cover, depth ?10 – 25 cm	169	Existence of super objects "Other"	
Tree	Picea Mariana, Larix Laricina, height > 1 m	94	Existence of super objects Peat	

6.2.3 Accuracy assessment

Since the quality of classification depends on segmentation quality and an accurate knowledge-based description of studied objects, we have first evaluated the quality of segmentation by visual assessment of classified images. Objects near peatlands were carefully inspected, and several objects were manually modified before final classification. The presence of a high number of wrongly classified objects due to poor segmentation will be an indication of inappropriate choice of segmentation parameters. For the validation of the classifications, we used a traditional statistical method (confusion matrix). However, since ground truth data are not available for our old aerial photographs, as reference data we have selected objects from the produced thematic map on the basis of stratified random sampling. Further, these objects were visually interpreted in accordance with the classification scheme used for production of the map. To do this, we exported classified objects for all 12 subscenes in a geographical information system (ArcGIS) and merged them. An equal number of objects from each class (strata) was randomly selected over all study area using Hawth's analysis tools. The optimal sample size for validation was determined from an equation based on multivariate distribution (Congalton & Green, 1999):

$$N = \frac{B\Pi_i(1 - \Pi_i)}{b_i^2} \quad \text{Eq. 6.2}$$

where Π_i is the proportion of a population in the i th class out of k classes that has the proportion closest to 50%, b_i is the desired precision for this class, B is the upper $(\alpha/k) \times 100^{\text{th}}$ percentile of the chi square (χ^2) distribution with one degree of freedom, and k is the number of classes. Given an expected accuracy of 95%, an allowable error of 5%, proportions of dominant classes for each level (level 2 - 28.7%, level 1 - 63.8%), and corresponding number of classes equal to 14 (level 2, level 1), the optimal number of objects to be validated was estimated to be 50 for level 2 and 60 for level 1. For the aerial photographs, the optimal sample size is 60 objects for each segmentation level (level 2: 13 classes, proportion of dominant class 33.4%; level 1: 14 classes, proportion of dominant class 66.1%). The classification of the QuickBird image was validated in the same manner. However, the interpretation of object was facilitated by land cover information obtained from ground truth photographs and oblique aerial photographs. Producer's accuracy, user's accuracy, overall accuracy, and Kappa-coefficient of agreement were calculated from the confusion matrix.

6.2.4 Change detection

Postclassification change detection was applied as the final step. The main aim was to detect the expansion or contraction of aquatic compartment, which could have important implication for the water and carbon cycles. We compared the areas occupied by different classes (level L) on QuickBird images and those obtained from aerial photographs within the limits of individual separated peatlands. The polygons of peatlands within which the comparison was made were exported from level H. Considering the small size of some objects (some strings are 1-2 pixels wide) and errors in image coregistration, no “from-to” change information was extracted at this stage. This information would be useful for understanding the process of degradation. However, to have an idea for transition between classes, those were regrouped in two different manners (cases A and B). Case A divides classes into two groups: aquatic (deep water, shallow water and water_vegetation) and wide terrestrial, which includes all other eight classes defined for peatlands (dry peat, peat, saturated peat, string, saturated string, vegetation_water, island, and tree). Case B adds the classes vegetation_water and saturated string to the group aquatic to form the group wide aquatic. The rest of the classes form the terrestrial group.

6.3 Results and discussion

6.3.1 Texture analysis

The semivariograms for three representative subsets (A, B, C) of nine land cover types (forest_lichen, dense forest, forest_peat, fen, fen_little pools, fen_pools, bog, bog_pools, and burned vegetation-rock vegetation) are presented in Figure 6.4. They have different behaviour due to variations in structural patterns. However, the range of semivariograms for more of the presented land cover types varies between 3 and 7 pixels. The fens and burned vegetation subsets reveal lower sill due to relatively homogenous distribution of vegetation. The range is about 3 pixels and could be associated with hummock dimensions or size of isolated trees in burned sites. The forest_lichen, patterned bog subsets and fen with large pools have the highest sill, which represents the sharpest contrast between structural elements within subsets. The range of forest_lichen is higher and reflects the larger canopy gaps, longer shadows and contrasting lichen understorey. The ranges for bog and bog_pools are also higher, indicating larger structural elements (ridges and pools). The ranges for dense forest and forest_peat are about 5 pixels, which could be related to the tree crowns. The range for fen_little pools is 3-5 pixels and could be interpreted as the width of pools and strings.

Therefore, for the texture analysis we considered a window of 5 x 5 pixels for QuickBird and 3x3 pixels for aerial photographs to be the most appropriate for delimitation of peatlands from other types of land cover and for enhancement of details of the peatland structure. A smaller window size allows the variance to be kept low enough to maximize the separability of classes (Chiu & Couloigner, 2004). Moreover, the small size of the window could play the role of high-pass filter for transitional zones like those between pools and thin strings. A rather large window could capture more than one category of land cover and, as result, would reduce the detection of unique characteristics of each class.

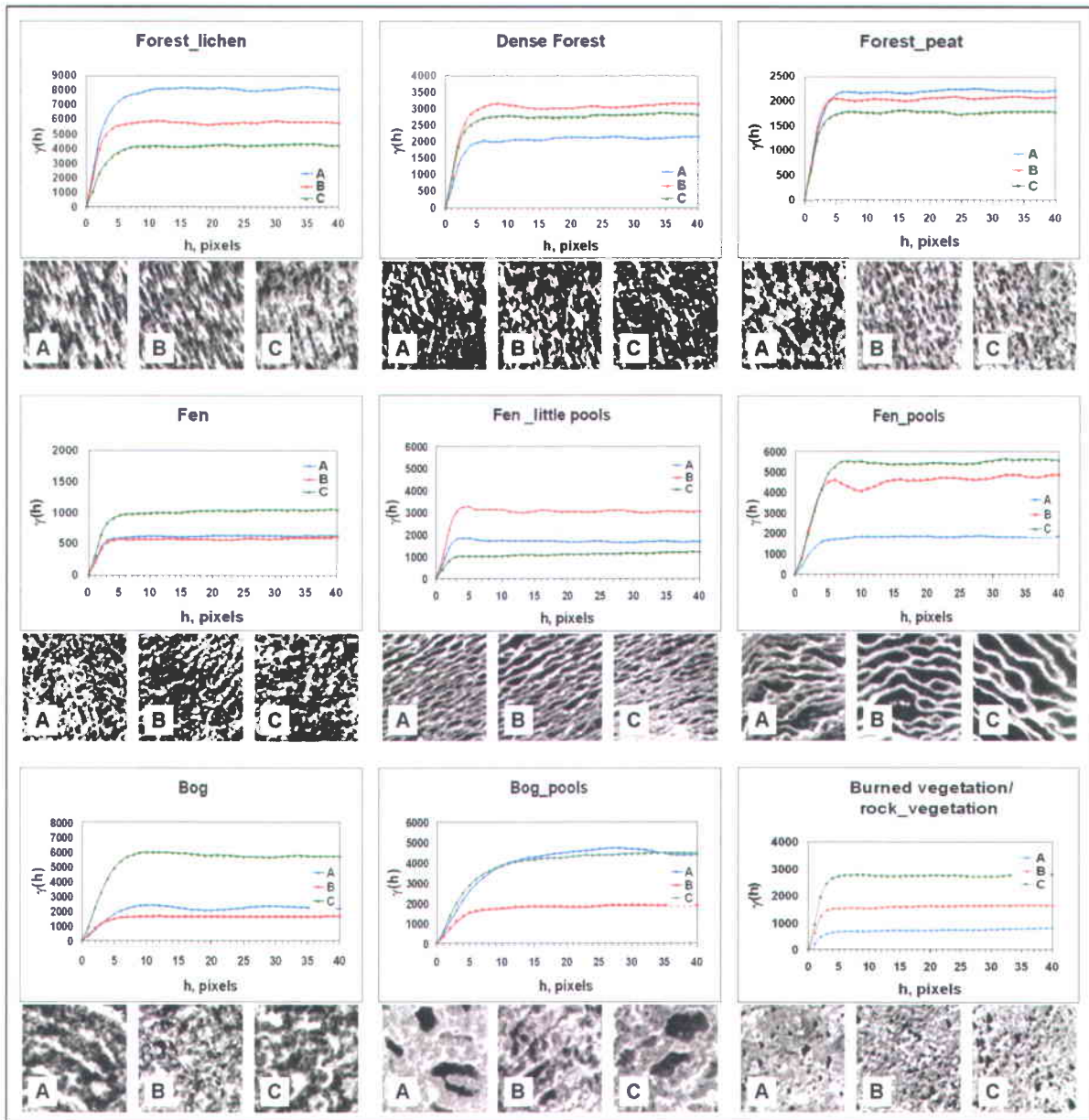


Figure 6.4 Omnidirectional semivariograms for the nine selected land cover types. Three representative cases (A, B, and C) are presented for each land cover type

As seen in Figure 6.5, the combination of selected texture parameters allow peatlands to protrude, whereas the calculation of the same texture characteristics by Definiens Professional seems less powerful for the delimitation of peatlands. The principal difference is that we used a moving window of 5 x 5 pixels and 32 grey levels for the texture analysis, while in Definiens Professional the texture measures were calculated for all pixels within the object and the

number of grey levels is 256. Another confirmation of usefulness of integration of the preliminary calculated texture bands in the object-based analysis is the better separation of classes with features based on texture calculated primarily using pixel-based approach. In fact, the distance matrix calculated for the classification features (level M) and the matrix calculated for the optimal features combination based on texture measures computed in Definiens Professional have been compared by subtracting one from the other. The optimal combination was obtained using the "feature space optimisation" tool of Definiens Professional. The result is presented in Table 6.4. The predominance of positive values indicates that the separation is better with features based on texture measurements previously estimated using a pixel-based approach. Moreover, due to these texture images, some details were enhanced (Figure 6.6) and, consequently, image interpretation and choice of training sites were facilitated.

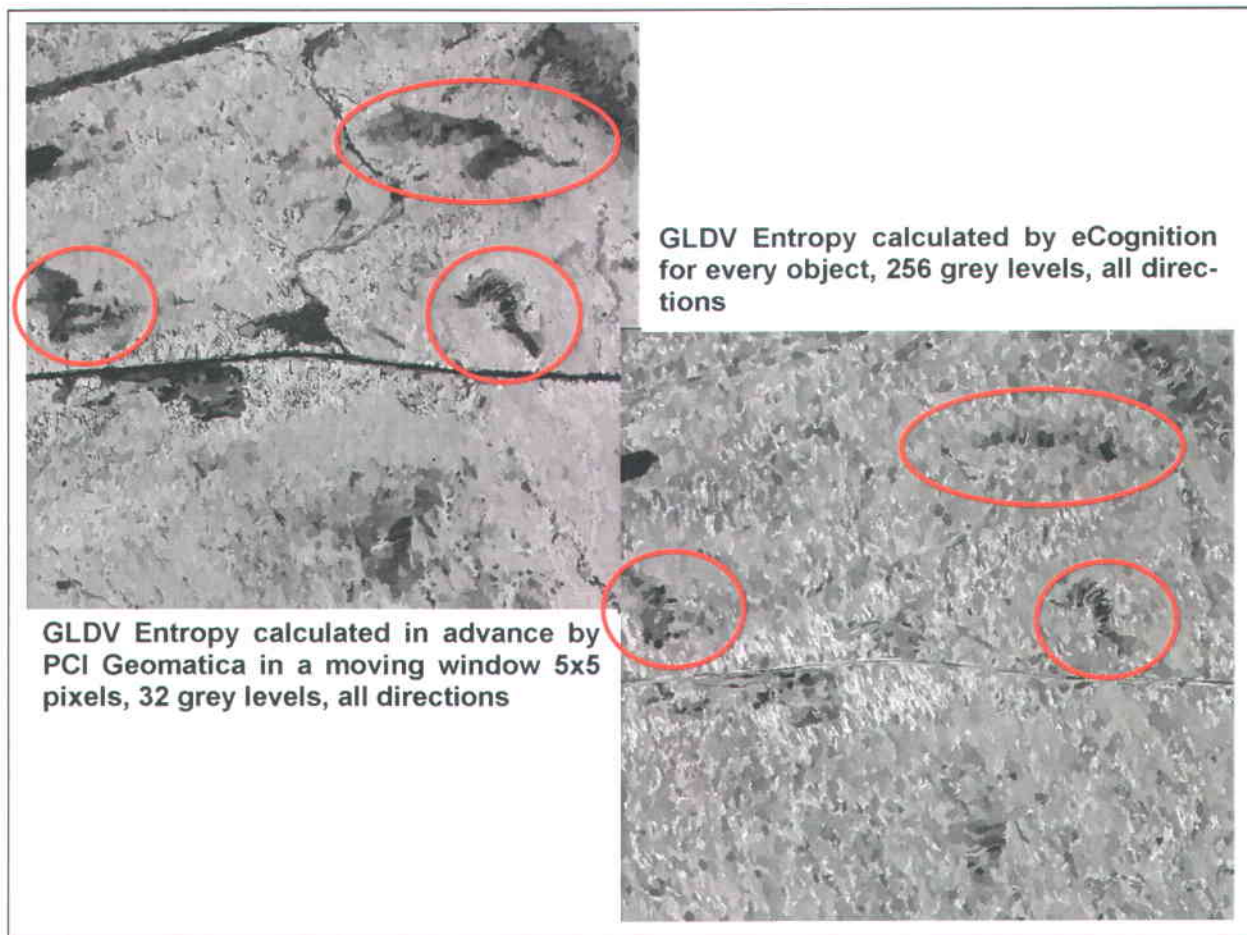


Figure 6.5 Comparison between mean GLDV Entropy values for every object calculated in advance with chosen parameters by PCI Geomatica and the same texture measurements calculated for the same objects with Definiens Professional.

Table 6.4 Resulting distance matrix (level M)

Class	Class												
	W	W_V	StrP	SatP	Peat	D_P	F_P	F	F_M	F_L	L	G	Rd
W	0,00	1,21	-0,49	-0,91	1,36	-1,46	0,49	-0,04	0,14	-1,88	-4,69	-2,34	2,75
W_V	1,21	0,00	0,34	1,77	0,90	0,16	1,67	1,37	0,28	0,57	-2,72	2,51	8,36
StrP	-0,49	0,34	0,00	0,25	-0,15	1,03	0,10	0,10	-0,16	0,40	1,06	5,76	13,43
SatP	-0,91	1,77	0,25	0,00	-0,16	0,95	0,06	0,14	-0,66	0,34	1,31	6,10	15,71
P	1,36	0,90	-0,15	-0,16	0,00	0,63	0,00	0,07	0,01	0,28	0,85	5,09	13,88
D_P	-1,46	0,16	1,03	0,95	0,63	0,00	1,61	2,19	0,21	2,00	0,39	2,20	12,19
F_P	0,49	1,67	0,10	0,06	0,00	1,61	0,00	-0,10	0,35	0,22	2,61	8,16	17,04
F	-0,04	1,37	0,10	0,14	0,07	2,19	-0,10	0,00	0,21	-0,01	2,50	9,11	16,91
F_M	0,14	0,28	-0,16	-0,66	0,01	0,21	0,35	0,21	0,00	0,11	-0,39	4,23	14,85
F_L	-1,88	0,57	0,40	0,34	0,28	2,00	0,22	-0,01	0,11	0,00	1,86	9,99	18,37
L	-4,69	-2,72	1,06	1,31	0,85	0,39	2,61	2,50	-0,39	1,86	0,00	2,77	9,95
G	-2,34	2,51	5,76	6,10	5,09	2,20	8,16	9,11	4,23	9,99	2,77	0,00	4,35
Rd	2,75	8,36	13,43	15,71	13,88	12,19	17,04	16,91	14,85	18,37	9,95	4,35	0,00

Note: _D_P, dry peat; F, forest; F_L, forest_lichen; F_M, forest on mineral; F_P, forest on peat; G, gravel; L, lichen; P, peat; Rd, road; SatP, saturated peat; StrP, structured peat; W, water; W_V, water_vegetation;

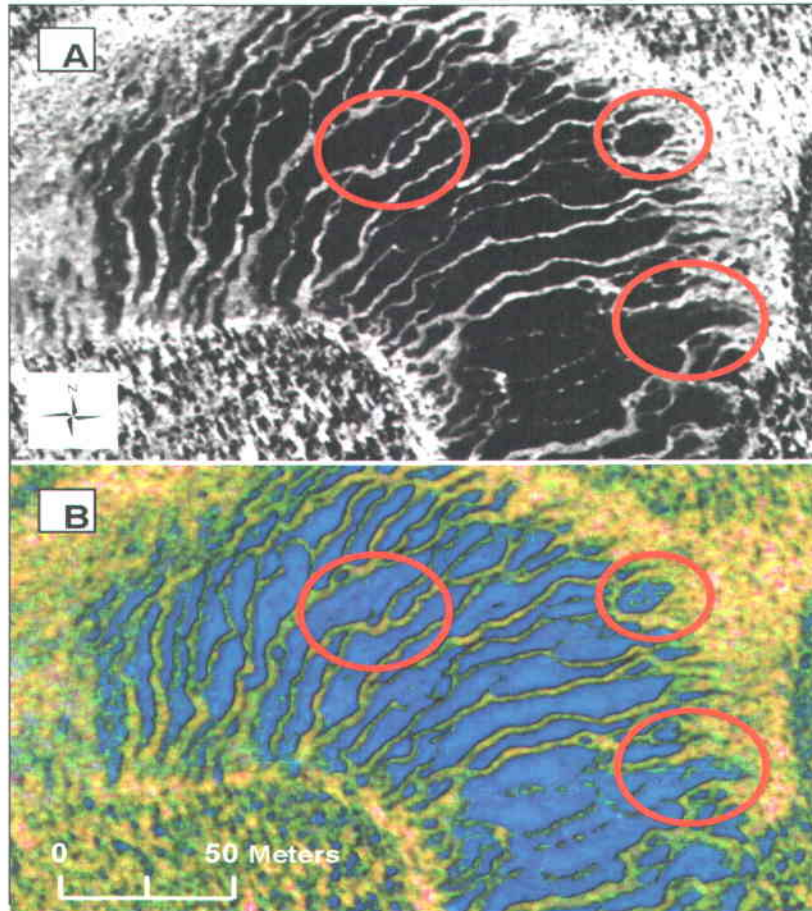


Figure 6.6 Enhancement of details by textural images combined with panchromatic image. (A) QuickBird panchromatic image (7 August 2003). (B) Red-green-blue (RGB) composed colour image: red (GLCM mean), green (Pan, GLCM entropy, GLDV angular momentum), blue (inverse difference), linear enhancement.

6.3.2 Object-based image analysis

6.3.2.1 Result evaluation

The quality of the segmentation is crucial for obtaining reliable classification results. According to visual inspection of the segmented image, objects in the landscape are generally accurately delineated. The number of poorly classified objects due to segmentation is low, which indicates that segmentation parameters are optimal for the defined thematic classes.

Figure 6.7 shows the classification of one subset of a QuickBird image. The real peatlands are well delimited from other land cover types. However, there are some misclassifications. Table 6.5 presents the QuickBird level M confusion matrix for study site 1. The most important problem is associated with classification of objects (level M) interpreted as gravel but misclassified as peat (two objects), structured peat (three objects), and dry peat" (four objects) and objects of the class forest on peat misclassified as saturated peat" (three objects) and peat (two objects). Also, three objects of class forest are misclassified as structured peat. Several objects of the classes lichen and forest_lichen are misclassified as dry peat due to their high reflectance and high homogeneity. These misclassifications are important because they cause the errors propagation on the lower level due to topological link between the objects. The contextual relations could also provoke problems because some contextual rules of an erroneous classified object could force the nearby objects to be classified erroneously. For example, an object of class forest erroneously classified as structured peat impedes the correct classification of its neighbours as forest. However, these rules work well in peatlands.

As the main aim of the level M classification is to separate peatland objects from other land cover types, the misclassifications between classes of the same group like forest classes (forest, forest on mineral, forest on peat, forest_lichen, and lichen) or mineral soil classes (road, gravel and rock) are not important for us. Therefore, we reduced the number of classes to four (water, peatland, forest, and mineral) by regrouping them. The class peatland is formed by objects of the classes peat, structured peat, saturated peat, dry peat, and water_vegetation. The new class forest contains the classes forest, forest on mineral, forest on peat, forest_lichen, and lichen. The class mineral regroups the classes road, gravel, and rock. The new class water consists of all the objects of the old class water. The resulting confusion matrix is presented in the Table 6.6. The level M classification overall accuracy becomes 92%, the producer's accuracy for the group of peatland objects becomes 95%, and corresponding user's accuracy is 88%.

Table 6.5 Confusion matrix for QuickBird classification (level M)

User Class	Reference Class														Sum
	W	W_V	StrP	SatP	P	D_P	F_P	F	F_M	F_L	L	G	Rk	Rd	
W	47	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	50
W_V	1	42	3	2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	50
StrP	0	1	36	1	1	0	0	3	4	1	0	3	0	0	50
SatP	0	0	1	44	1	0	3	0	1	0	0	0	0	0	50
P	0	0	0	3	40	1	2	0	0	0	1	2	1	0	50
D_P	0	0	0	0	3	40	0	0	0	1	2	4	0	0	50
F_P	0	0	0	2	1	0	35	3	0	8	0	0	1	0	50
F	0	0	0	1	0	0	4	42	1	2	0	0	0	0	50
F_M	1	0	0	0	0	0	0	5	44	0	0	0	0	0	50
F_L	0	0	1	0	0	0	1	1	0	43	3	0	1	0	50
L	0	0	0	0	0	1	0	0	0	5	42	2	0	0	50
G	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	2	37	3	4	50
Rk	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	2	45	0	50
Rd	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	13	2	32	50
Sum	49	44	41	53	49	45	46	54	53	61	53	63	53	36	700
Producer's accuracy	0,96	0,95	0,88	0,83	0,82	0,89	0,76	0,78	0,83	0,70	0,79	0,59	0,85	0,89	
User's accuracy	0,94	0,84	0,72	0,88	0,80	0,80	0,70	0,84	0,88	0,86	0,84	0,74	0,90	0,64	
Kappa Per Class	0,94	0,83	0,70	0,87	0,78	0,79	0,68	0,83	0,87	0,85	0,83	0,71	0,89	0,62	
Overall Accuracy	0,81														
Kappa	0,80														

Note: D_P, dry peat; F, forest; F_L, forest_lichen; F_M, forest on mineral; F_P, forest on peat; G, gravel; L, lichen; P, peat; Rd, road; Rk, rock; SatP, saturated peat; StrP, structured peat; W, water; W_V, water_vegetation

Figure 6.8 displays in more details the finest classification level of one studied peatland. The visual correspondence between classification and the oblique photograph is very good. Table 6.7 gives the level L (lower level) classification confusion matrix. Many objects from typical peatland classes are classified as forest. Few objects interpreted as rock-gravel or lichen are also classified as dry peat or peat. These misclassifications are the consequence of error propagation due to class-related features in this level which are associated with objects erroneously classified as peatland at higher level.

Table 6.6 Confusion matrix for QuickBird classification for four groups of classes (level M)

User class	Reference Class				Sum
	Water	Peatland	Forest	Mineral	
Water	47	1	2	0	50
Peat	1	220	19	10	250
Forest	1	6	239	4	250
Mineral	0	5	7	138	150
Sum	49	232	267	152	700
Producer's accuracy	0,96	0,95	0,90	0,91	
User's accuracy	0,94	0,88	0,96	0,92	
Kappa Per Class	0,94	0,82	0,93	0,90	
Overall Accuracy	0,92				
Kappa	0,88				

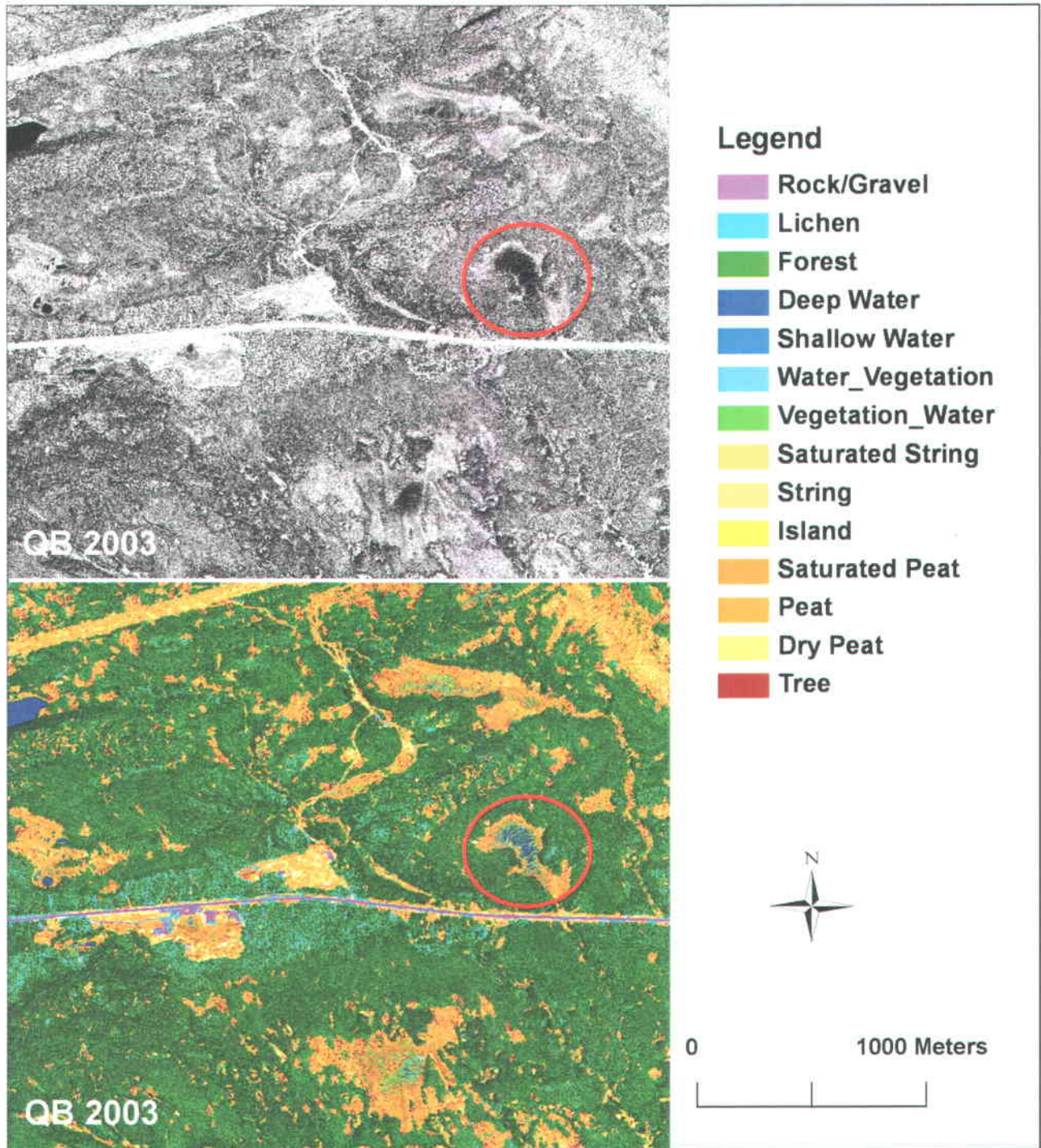


Figure 6.7 Classification of a QuickBird (QB) subimage (2003) of the La Grande-3 sector. The trans-taiga road crosses the image in the center. The encircled peatland is identified as T1.

Table 6.7 Confusion matrix for QuickBird classification (level L).

User Class	Reference Class														Sum
	R/G	L	F	D_W	S_W	W_V	V_W	SatS	S	I	SatP	P	D_P	T	
R/G	58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	60
L	2	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	60
F	0	0	56	0	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	60
D_W	0	0	0	59	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60
S_W	0	0	2	2	51	3	0	0	0	0	0	0	0	2	60
W_V	0	0	14	0	1	29	2	4	0	2	0	0	0	8	60
V_W	0	0	16	0	0	2	30	2	0	0	1	1	0	8	60
SatS	0	0	13	0	0	2	9	26	0	0	8	2	0	0	60
S	2	3	12	0	0	0	2	1	24	2	2	12	0	0	60
I	0	1	20	0	0	2	2	1	0	24	3	7	0	0	60
SatP	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	55	4	0	0	60
P	3	2	1	0	0	1	0	0	0	1	2	50	0	0	60
D_P	9	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	60
T	0	0	6	0	0	1	2	0	0	0	2	0	0	49	60
Sum	74	65	141	61	53	42	48	34	24	29	73	79	50	67	840
Producer's accuracy	0,78	0,86	0,40	0,97	0,96	0,69	0,63	0,76	1,00	0,83	0,75	0,63	0,96	0,73	
User's accuracy	0,97	0,93	0,93	0,98	0,85	0,48	0,50	0,43	0,40	0,40	0,92	0,83	0,80	0,82	
Kappa Per Class	0,96	0,93	0,92	0,98	0,84	0,46	0,47	0,41	0,38	0,38	0,91	0,82	0,79	0,80	
Overall Accuracy	0,73														
Kappa	0,71														

Note: D_P, dry peat; D_W, deep water; F, forest; I, island; L, lichen; R/G, rock-gravel, S, string; SatS, satyrated string; S_W, shallow water; T, tree, V_W, vegetation-water; W_V, water_vegetation

However, for further change detection study, it is important to assess the classification accuracy in real peatlands. Thus, we excluded the three nonpeatland classes (rock-gravel, lichen, and forest) from the confusion matrix presented in Table 6.8. The overall accuracy is 81%. The main confusion is between peat and string. This confusion is natural because these classes have same spectral and textural characteristics. The only difference is that string must have more then 30% relative border to neighbours from the water semantic group (deep water, shallow water, water_vegetation, or vegetation_water).

The problem is similar between peat and island. Their spectral and textural characteristics are similar, but island must have more than 85% relative border to objects of the semantic group water. Peat class has no such limitation. Those confusions are acceptable because, in the further analysis of peatland structure change, these classes are all part of the same peatland compartment (terrestrial).

Table 6.8 Confusion matrix for QuickBird classification only for classes defined for peatlands (level L).

User Class	Reference Class											Sum
	D_W	S_W	W_V	V_W	SatS	S	I	SatP	P	D_P	T	
D_W	59	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60
S_W	2	51	3	0	0	0	0	0	0	0	2	58
W_V	0	1	29	2	4	0	2	0	0	0	8	46
V_W	0	0	2	30	2	0	0	1	1	0	8	44
SatS	0	0	2	9	26	0	0	8	2	0	0	47
S	0	0	0	2	1	24	2	2	12	0	0	43
I	0	0	2	2	1	0	24	3	7	0	0	39
SatP	0	0	0	0	0	0	0	55	4	0	0	59
P	0	0	1	0	0	0	1	2	50	0	0	54
D_P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	48
T	0	0	1	2	0	0	0	2	0	0	49	54
Sum	61	53	40	47	34	24	29	73	76	48	67	552
Producer's accuracy	0,97	0,96	0,73	0,64	0,76	1,00	0,83	0,75	0,66	1,00	0,73	
User's accuracy	0,98	0,88	0,63	0,68	0,55	0,56	0,62	0,93	0,93	1,00	0,91	
Kappa Per Class	0,98	0,87	0,60	0,65	0,52	0,54	0,59	0,92	0,91	1,00	0,89	
Overall Accuracy	0,81											
Kappa	0,79											

Note: D_P, dry peat; D_W, deep water; I, island; S, string; SatS, saturated string; S_W, shallow water; T, tree, V_W, vegetation-water; W_V, water_vegetation

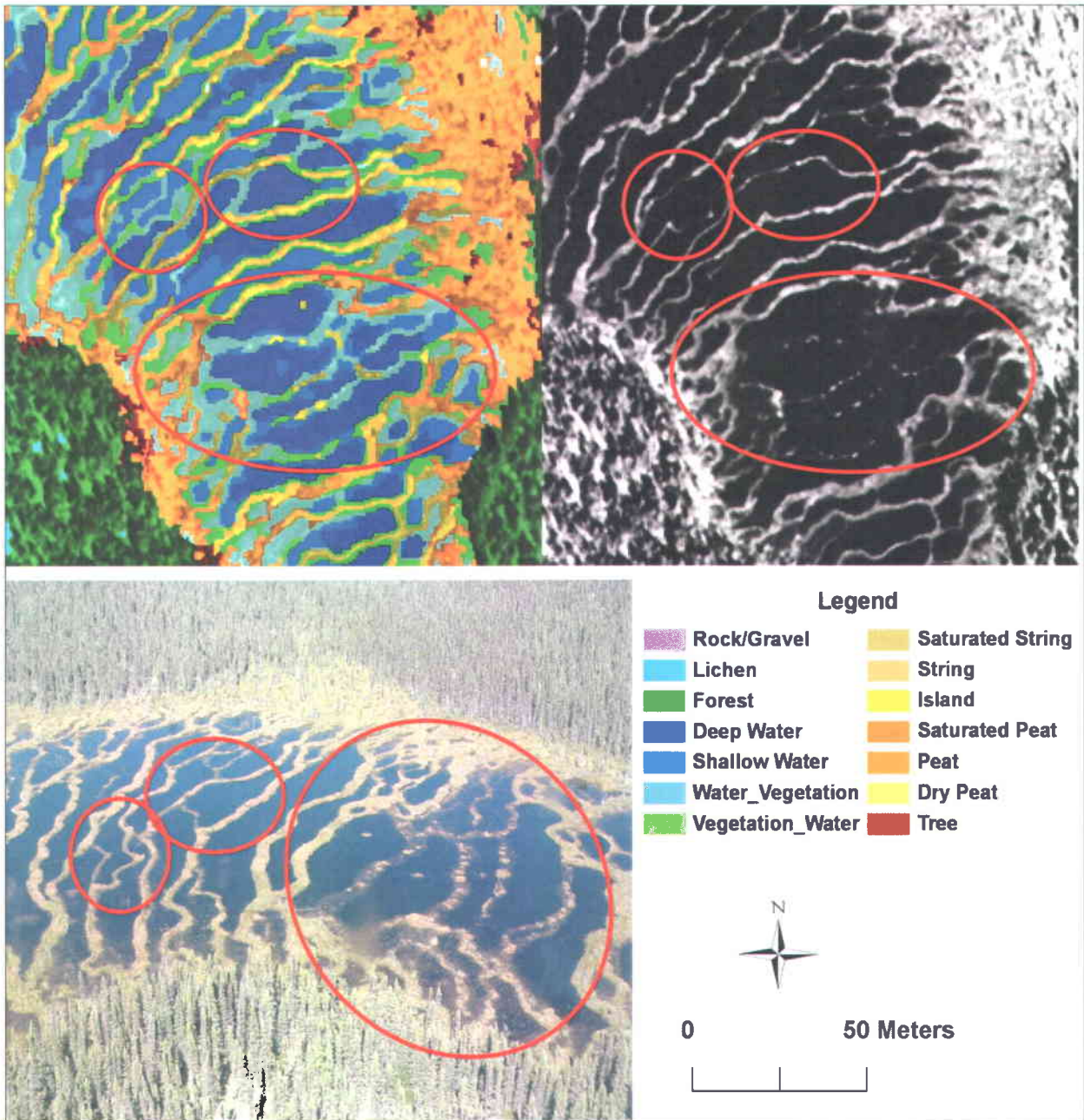


Figure 6.8 Classification details for the encircled peatland (T1) in Figure 7. The three encircled areas show the remains of saturated strings that cannot be seen in the panchromatic image (right) but appear in the classification (left) in light blue (water_vegetation class) and in the aerial colour photograph (bottom).

The confusion between `vegetation_water` and `saturated string` is also high, again because their spectral and spatial characteristics are very similar. The principal difference between them is that the objects of class `saturated string` must have a border to semantic group `water`. The class `vegetation_water` has no such limitation. For example, it could delineate the shallow pools surrounded by peat objects. There is also some confusion between `saturated string` and `saturated peat` classes. Several objects interpreted as `saturated string` are classified as `vegetation_water` or `water_vegetation`, mainly because of the width of strings, which is less than 60 cm (ground observations). As a result, strings are not well segmented, and objects are mix of water and vegetation.

Another frequent misclassification is related to objects interpreted as tree but classified as `vegetation_water`, `water_vegetation`, or `shallow water`. In general, these are small objects (1-2 pixels).

The same approach was applied to the aerial photograph mosaic. The comparison between a QuickBird image, an aerial photograph mosaic, and their classifications for one subscene is presented in Figure 6.9. Table 6.9 gives the levels M confusion matrix for the aerial photograph mosaic.

Many misclassifications are associated with `saturated peat`, `structured peat`, and the forest classes `forest on peat`, `forest`, and `forest_lichen`. There is also confusion between `dry peat` objects and `lichen` and `rock`. Several objects classified as `peat` are interpreted as `forest_lichen`.

After grouping the classes in a manner similar to that for the QuickBird image (Table 6.10), the overall accuracy became 88% and the producer's and user's accuracy for the peatland class became 98% and 74%, respectively. This result indicates a low omission error, which is important for our further study of peatland structure evolution. The higher commission error does not affect the area measures in real peatlands.

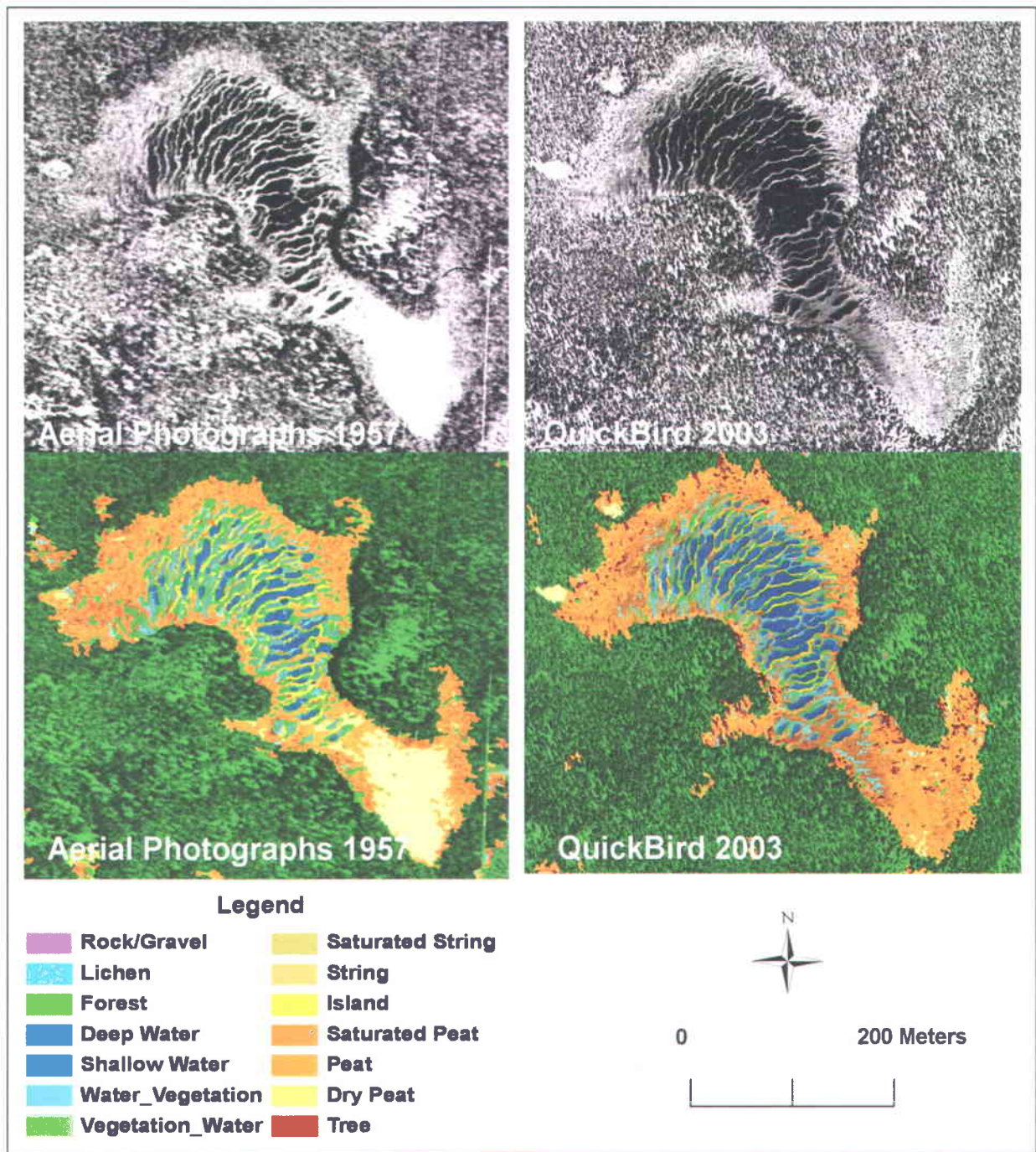


Figure 6.9 Comparison between an aerial photographs mosaic from 1957, the corresponding QuickBird sub-scene from 2003, and their classifications of the T1 peatland

Table 6.9 Confusion matrix for aerial photograph classification (level M)

User Class	Reference Class													Sum
	W	W_V	StrP	SatP	P	D_P	F_P	F	F_M	F_L	L	G	Rk	
W	58	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	60
W_V	0	44	3	0	0	0	4	6	2	1	0	0	0	60
StrP	0	0	36	1	8	0	7	4	0	2	0	2	0	60
SatP	0	0	0	38	2	0	7	4	1	5	1	2	0	60
P	0	0	0	0	50	0	1	0	0	6	2	1	0	60
D_P	0	0	0	0	0	40	0	0	0	3	8	1	8	60
F_P	0	0	0	1	0	0	53	2	1	3	0	0	0	60
F	0	0	0	0	0	0	0	57	3	0	0	0	0	60
F_M	0	1	0	0	0	0	0	2	57	0	0	0	0	60
F_L	0	0	0	0	0	0	1	0	0	55	4	0	0	60
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	57	0	2	60
G	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	54	0	60
Rk	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	3	1	54	60
Sum	58	45	39	40	63	40	74	75	66	80	75	61	64	780
Producer's accuracy	1,00	0,98	0,92	0,95	0,79	1,00	0,72	0,76	0,86	0,69	0,76	0,89	0,84	
User's accuracy	0,97	0,73	0,60	0,63	0,83	0,67	0,88	0,95	0,95	0,92	0,95	0,90	0,90	
Kappa Per Class	0,96	0,72	0,58	0,61	0,82	0,65	0,87	0,94	0,95	0,91	0,94	0,89	0,89	
Overall Accuracy	0,84													
Kappa	0,82													

Note: D_P, dry peat; F, forest; F_L, forest_lichen; F_M, forest on mineral; F_P, forest on peat; G, gravel; L, lichen; P, peat; Rk, rock; SatP, saturated peat; StrP, structured peat; W, water; W_V, water_vegetation

Table 6.10 Confusion matrix for aerial photographs classification for four groups of classes (level M)

User class	Reference Class				Sum
	Water	Peatland	Forest	Mineral	
Water	58	0	2	0	60
Peat	0	222	64	14	300
Forest	0	2	296	2	300
Mineral	0	3	8	109	120
Sum	58	227	370	125	780
Producer's accuracy	1,00	0,98	0,80	0,87	
User's accuracy	0,97	0,74	0,99	0,91	
Kappa Per Class	0,96	0,63	0,97	0,89	
Overall Accuracy	0,88				
Kappa	0,82				

As can be seen from the confusion matrix at the finest level of aerial photograph classification (Table 6.11), the misclassification problems encountered are similar to those of the finest level QuickBird Image classification (Table 6.7). As a result, the classification accuracies for the two types of imagery are very similar. This similarity indicates the robustness of the proposed method for VHR panchromatic image classification.

Table 6.11 Confusion matrix for aerial photographs classification (level L).

User Class	Reference Class														Sum
	R/G	L	F	D_W	S_W	W_V	V_W	SatS	S	I	SatP	P	D_P	T	
R/G	55	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	60
L	2	57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	60
F	0	0	59	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	60
D_W	0	0	0	58	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60
S_W	0	0	6	5	45	3	0	0	0	0	0	0	0	1	60
W_V	0	0	12	1	4	36	0	0	0	1	0	2	0	4	60
V_W	0	0	17	0	0	2	32	1	0	1	1	1	1	4	60
SatS	0	0	9	0	0	2	11	31	0	0	3	2	0	2	60
S	1	2	15	0	0	0	0	1	23	1	0	17	0	0	60
I	0	0	22	0	0	2	2	2	3	21	0	8	0	0	60
SatP	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	52	4	0	0	60
P	0	4	6	0	0	0	0	0	0	0	2	48	0	0	60
D_P	10	11	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	35	0	60
T	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	4	2	0	51	60
Sum	68	76	153	64	51	46	48	35	26	24	62	87	38	62	840
Producer's accuracy	0,81	0,75	0,39	0,91	0,88	0,78	0,67	0,89	0,88	0,88	0,84	0,55	0,92	0,82	
User's accuracy	0,92	0,95	0,98	0,97	0,75	0,60	0,53	0,52	0,38	0,35	0,87	0,80	0,58	0,85	
Kappa Per Class	0,91	0,95	0,98	0,96	0,73	0,58	0,51	0,50	0,36	0,33	0,86	0,78	0,56	0,84	
Overall Accuracy	0,72														
Kappa	0,70														

Note: D_P, dry peat; D_W, deep water; F, forest; I, island; L, lichen; R/G, rock-gravel, S, string; SatS, satyrated string; S_W, shallow water; T, tree, V_W, vegetation-water; W_V, water_vegetation

6.3.3 Change detection

Areas occupied by different classes were compared to assess the development of terrestrial and aquatic compartments of peatlands. Figure 6.10 shows the areas occupied by each class in the peatland shown in Figure 6.9. An increase in the aquatic compartment (deep water, shallow water, and water_vegetation) of 0.6 ha (8.4%) was computed (Table 6.12 case A). However, there is no significant change in the extent of the group wide aquatic (Table 6.12 case B), which could be explained by mutual transition between classes within this group. Objects classified as dry peat in 1957 are generally classified as peat, saturated peat, or vegetation_water in 2003, which suggests increased moisture at the soil surface.

Table 6.12 Land cover surface areas (m²) for peatland T1 (circled area in Figure 6.7) in 1957 and 2003

Compartment	1957	2003
Case A		
Aquatic	12 108.9 (17.9)	18 084.4 (26.2)
Wide terrestrial	55 791.8 (82.2)	50 991.8 (73.8)
Total area	67 900.7	69 076.3
Case B		
Wide aquatic	24713.7 (36.4)	25 805.5 (37.4)
Terrestrial	43 187.0 (63.6)	43 270.8
Total area	67 900.7	69 076.3

Note: The values in parentheses give the percent of the total area.

Aquatic includes the deep water, shallow water, and water_vegetation classes; wide terrestrial includes the dry peat, peat, saturated peat, string, saturated string, vegetation_water, island, and tree classes; wide aquatic includes the deep water, shallow water, water_vegetation, vegetation_water, and saturated string classes; and terrestrial includes the dry peat, peat, saturated peat, string, island, and tree classes;

The analysis of weather records from the nearest meteorological station with data for both 1957 and 2003 years (Kuujjurapik A) shows very low precipitation in July and in the first part (1 to 17) of August 2003 preceding QuickBird image acquisition (Figure 6.11). The precipitation for both July and August 2003 are about 60 % lower than normal quantity for this weather station (Figure 6.11). Thus, the observed increase in moisture does not seem to be related to the instant weather conditions or particularly wet seasonal situation. The decreasing tendency in aerial extent of the class dry peat is common for all studied peatlands. However, the analysis reveals

a net increase of aquatic areas only for two out of the seven studied peatlands (La Grande 3 sector). Then, to validate our hypothesis of active aqualysis, we have to analyze images from the Laforge 1 sector, where aqualysis seems more pronounced.

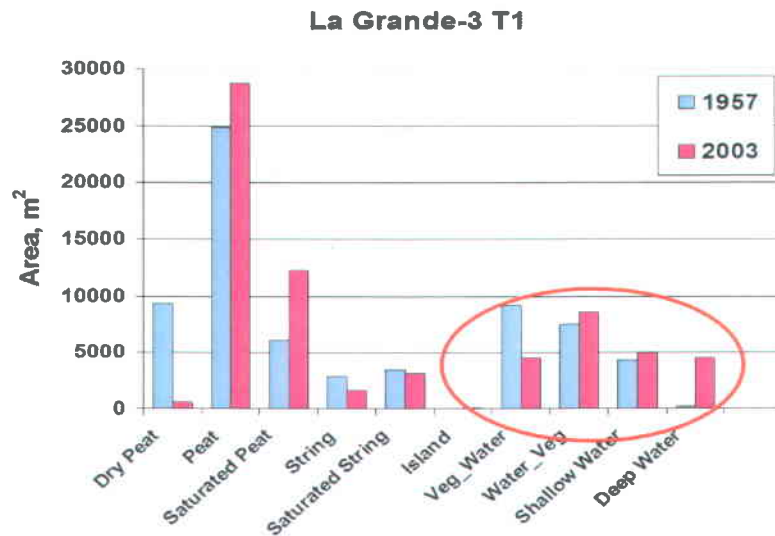


Figure 6.10 Area occupied by different land-cover classes in 1957 (in blue) and 2003 (in red) for the peatland (T1) shown in Figure 6.9

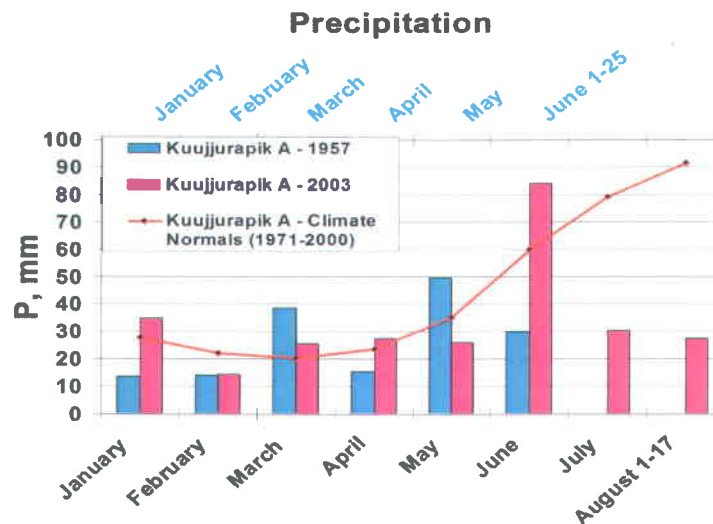


Figure 6.11 Precipitation data for 1957 and 2003 from Kuujjurapik A weather station

6.4 Conclusion and future works

We presented an object-based classification approach to extract information from very high resolution (VHR) panchromatic QuickBird satellite images as a basis for an analysis of peatland surface structure. The proposed knowledge-based integration of fuzzy logic and texture images in classifiers proves to be very useful for detection and delineation of transitional zones like peatlands and their structural components. The hierarchical organization of segmented objects allows the best exploitation of the contextual relations between various units of peatlands. Even with some limitations related to the contextual relations, the object-based approach is a good solution for a semi-automatic and accurate VHR panchromatic images classification. The classification schema developed for the QuickBird image was easily applied to the historical aerial photographs. The classification accuracy for both imagery types is very similar, which indicates the robustness of the proposed method. Thus, the traditional visual interpretation of aerial photographs for ecological assessment of peatlands has been successfully replaced by a proposed semi-automatic "peatland logic".

The QuickBird image and the aerial photograph classifications help us to assess the structural development of patterned peatlands in the La Grande 3 sector over the last 50 years. The analysis shows an increase in aquatic areas only for two out of seven studied peatlands. At this time, however, no final conclusion concerning peatland analysis can be drawn because only seven peatlands were analyzed. Analysis of Laforge 1 sector images will also be realized in the near future.

Moreover, the influence of geometric corrections on the classification results will be quantified. The validation of pool area measurements obtained from image classification will be realized using high-precision GPS. The error associated with geometric correction on pool area measurements will be estimated by comparing areas obtained from classification of two superposed aerial photographs. The final step will be to correlate the spatiotemporal development of the peatland structure with weather data to check the influence of recent changing climatic conditions on peatland structure.

6.5 Acknowledgments

This study was carried out within the framework of the Boreal Peatlands Aqualysis Project. The authors gratefully acknowledge Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), Consortium Ouranos, and Hydro-Quebec for financial support. We would also like to thank Yves Gauthier and Lisa-Marie Pâquet for their technical support. Professor Karem Chokmani of INRS-ETE is thanked for valuable discussions. The constructive comments from the reviewers are very much appreciated.

CHAPITRE 7: RECENT CHANGE IN THE STRUCTURE OF PATTERNED FENS IN THE LA GRANDE RIVER WATERSHED (NORTHERN QUEBEC) USING REMOTE SENSING TECHNIQUES

Maria Dissanska, Monique Bernier and Serge Payette

Maria Dissanska

Institut national de la recherche Scientifique - Centre Eau Terre et Environnement, Université du Québec, 490 rue de la Couronne, Québec, Canada, G1K 9A9

maria.dissanska@ete.inrs.ca

Monique Bernier

Institut national de la recherche Scientifique - Centre Eau Terre et Environnement, Université du Québec, 490 rue de la Couronne, Québec, Canada, G1K 9A9

Monique_Bernier@ete.inrs.ca

Serge Payette

Université Laval, Département de Biologie, Pavillon Alexandre-Vachon, 1030, avenue des Sciences-Humaines, Quebec (Quebec) CANADA, G1V 0A6

Serge.Payette@bio.ulaval.ca



ABSTRACT

Many patterned fens in the La Grande River watershed (Québec, Canada) are in advanced stage of degradation of the vegetation cover and its transformation into shallow pools due to water logging. Such change in ridge-pool patterning of fen peatlands could alter their hydrology and greenhouse gas exchange. In order to assess the recent change of pool and vegetation cover of patterned fens for two study sites of the La Grande River watershed (La Grande-3 sector, 1957→2003; and Laforge-1 sector, 1957→2006), we applied a semi-automated object-based method for classification of very high resolution QuickBird panchromatic images and black and white aerial photographs. The results show surface expansion for 36 out of 40 studied peatlands. However, the change in aquatic and semi-aquatic compartments is more complex and asynchronous in different parts of the same peatland as well as between nearby peatlands. The results suggest that the short and long term dynamics of these compartments is specific for each patterned fen and is controlled by autogenic factors that influence water retention and runoff in peatlands. The peatland area and the environmental parameters (e.g. topography, dense forests, burned areas) could also influence the distribution of water in peatlands. The aquatic compartments of small fens (< 2 ha) show more pronounced changes in both directions – increase and decrease of their surface area. However, the surface of aquatic compartments for 9 of the 12 largest peatlands (> 2 ha) increased in 2006. Most of patterned fens having large aquatic compartments ($S_a > 0,5$ ha) in 1957 show a tendency to further degradation of their vegetation cover. Considering the weather data preceding image acquisition, it might be supposed that the observed increase in the area of aquatic and semi-aquatic compartments in 2003 and 2006 is a result of their evolution in the persistent wet conditions. The synchronous increase of total peatland area through paludification also supports this hypothesis.

Keywords: Patterned fens, object-based classification, airborne black and white photographs, QuickBird panchromatic images, change detection



RÉSUMÉ

Plusieurs tourbières minérotrophes structurées du bassin versant de la rivière La Grande (Québec, Canada) sont dans un état de dégradation avancée de leur couvert végétal et se transforment en écosystèmes aquatiques due à une hausse récente de la nappe phréatique. Un tel changement de la structure des tourbières pourrait modifier leur régime d'écoulement et ainsi avoir un impact sur le cycle du carbone. Afin d'évaluer le changement récent de la structure des tourbières minérotrophes structurées, concernant l'étendue des compartiments terrestres et aquatiques, pour deux sites du bassin versant de la rivière La Grande (La Grande-3 secteur, 1957→2003 et Laforge-1 secteur, 1957→2006), nous avons appliqué une méthode semi-automatique de classification basée objet des images panchromatiques à très haute résolution QuickBird et des photos aériennes noir et blanc. Les résultats montrent une expansion de surface pour 36 des 40 tourbières étudiées. Cependant, le changement dans les compartiments aquatiques et semi-aquatique est plus complexe et asynchrone dans les différentes parties de tourbières ainsi qu'entre les tourbières à proximité. Les résultats suggèrent que la dynamique de ces compartiments est spécifique pour chaque tourbière et est contrôlée par des facteurs autogènes qui influencent la rétention d'eau et le ruissellement dans les tourbières. La superficie de tourbières et les paramètres environnementaux (par exemple la topographie, des forêts denses, zones brûlées) pourrait également influencer la distribution de l'eau dans les tourbières. Les compartiments aquatiques de petite tourbières (<2 ha) montrent des changements plus prononcés dans les deux directions - augmentation ou diminution de leur surface. Toutefois, la surface des compartiments aquatiques pour 9 des 12 les plus grandes tourbières (> 2 ha) a augmenté en 2006. La plupart des tourbières minérotrophe structurées ayant des compartiments aquatiques de grande taille ($S_a > 0,5$ ha) en 1957 montrent une tendance à la dégradation continue de leur couvert végétal en 2006. Compte tenu des données météorologiques précédant l'acquisition d'images, on peut supposer que l'expansion de compartiments aquatiques et semi-aquatiques en 2003 et 2006 est un résultat de leur évolution dans les conditions humides persistantes. L'augmentation synchrone de la superficie totale de tourbières par paludification appuie également cette hypothèse.

Mots-clés: tourbières minérotrophes structurées, classification basée objet, photo aériennes noir et blanc, image panchromatique, QuickBird, détection de changements



7.1 Introduction

Many patterned fens in the La Grande River watershed (Quebec, Canada) show signs of recent hydrologic disturbance. Tree and shrub mortality on the border of pools, string degradation and pool enlargement as well as vegetation patches in the middle of shallow lakes (Figure 7.1) suggest a recent long-lasting rise of the water table. The process of degradation of the vegetation cover in peatlands and its transformation into pools or shallow ponds due to waterlogging has been named “aqualysis” (Arlen-Pouliot, 2009). Such phenomenon was also reported by Engstrom (1984) for south-eastern Labrador.

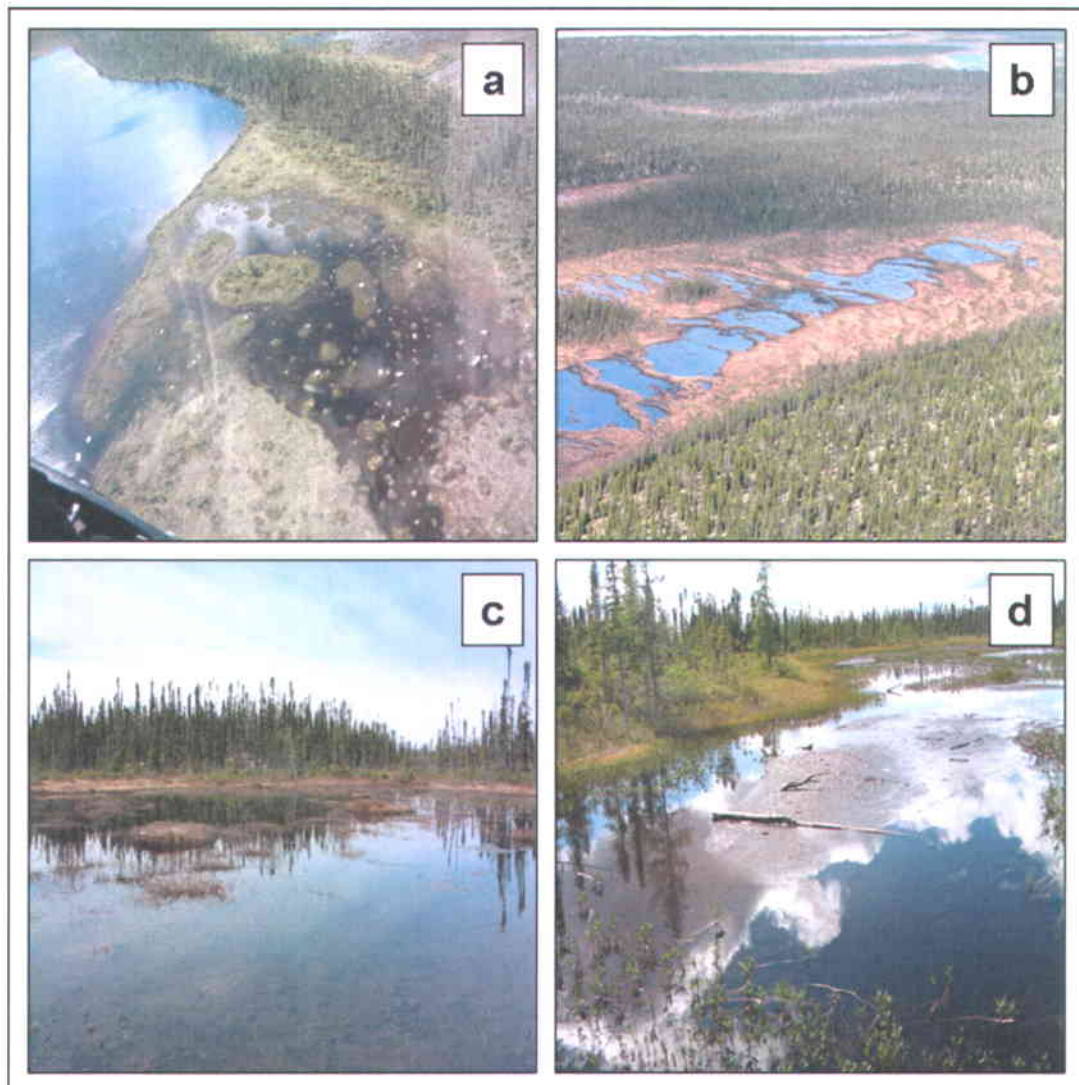


Figure 7.1 Degradation of the plant cover and pool expansion in patterned fens. The signs of degradation suggest a recent rise of the water table: a) peatland invasion by nearby lakes; b) string degradation, pool enlargement; c) vegetation patches in the middle of shallow lakes, and d) tree and shrub mortality.

One important indication of the aqualysis phenomenon is the changing ratio between the surface occupied by the terrestrial (ridge or string vegetation) and the aquatic compartments of fen peatlands. Despite their ecological value, little data exist on the relative cover of pools and vegetation at different time scales. Due to the long period of time for initiation and development of fen pools, direct observations are scarce and available information comes from stratigraphic and paleohydrological analysis.

The microtopography of patterned peatlands plays an essential role in their hydrological behaviour (Belyea, 2007). A recent comparative study of bogs, fens and lakes (Tardif et al., 2009) demonstrated the importance of the fraction of free water as a major factor controlling the hydrological dynamics of peatlands. Any change in the ratio between the aquatic and terrestrial compartments of peatlands could modify their hydrology (response to precipitation events, water storage, fluxes and evaporation) (Price & Maloney, 1994; Glenn & Woo, 1997; Tardif et al., 2009) and could affect water inflow for the recharge of hydroelectric reservoirs of the La Grande watershed.

Peatlands are among the most important carbon stores in the world, which implies an essential role in the global climate system (Gorham, 1991; Kuhry, 2004; Parish et al., 2008). Spatial and temporal variations in peatland microforms (pools, ridges, hummocks, mud bottoms, hollows) could influence also greenhouse gas (CO₂, CH₄) exchange as it is controlled by the position of the water table (Moore et al., 1998; Belyea & Malmer, 2004; Pelletier et al., 2007; McEnroe et al., 2009; Cliche-Trudeau et al., 2012). Given the importance of these unique ecosystems in the carbon cycle and their role in the global climate system, it is necessary to better understand their response to recent and anticipated climate change.

The climate is one of the key factors for the inception, distribution and development of peatlands. The strong relationship between climate and peatland development suggests that projected warming and precipitation increase in northern regions will exert a major influence on peatland ecosystems (IPCC, 2007). Although the significant advances in the understanding of peatland processes have been made, the ecohydrological response of peatlands to climate change is still uncertain, because of the delicate balance between precipitation and evaporation which controls their development and the differential response of plant species to climate forcing (Talbot et al., 2010). Most studies on the impact of climate change on peatland development predict a lower water table in response to warming (IPCC, 2001).

However, the observed impact of aqualysis occurring in patterned fens of the La Grande River watershed is evidence for a recent rise of the water table. This observation is consistent with a trend toward wetter conditions in northern Quebec since the nineteenth century according to tree-ring analysis (Begin & Payette, 1988).

Over the last decade significant efforts have been made for the understanding of peatland dynamics (Arlen-Pouliot, 2009), carbon balance (Pelletier et al., 2007; Cliche-Trudeau et al., 2012) and hydrological role of peatlands (Dissanska et al., 2007; Tardif et al., 2009) in the La Grande River watershed in order to predict the effects of climate change on their development and potential water and carbon storage as well as on their water inflow to the hydroelectrical reservoirs of the La Grande River watershed. Better understandings of peatland dynamics will contribute to successful modelling and forecast of peatland inflow which is of great importance for the adequate electricity production management of the La Grande River Complex where up to 50% of the province's hydroelectricity is generated.

As a part of these efforts, the aim of this study is to document potential recent changes of pool and vegetation cover of patterned fens in the La Grande River catchment using remote sensing techniques. We have applied an object-based classification on recent (2003, 2006) very high resolution (VHR) panchromatic QuickBird images (spatial resolution 60 cm) and on black-and-white historical (1957) aerial photographs (spatial resolution 84 cm) to create detailed land-cover maps for two study sites (La Grande-3 and Laforge-1) (Dissanska et al., 2009). The object-based classification has shown promising results in peatland classification (May et al., 2003; Sugumaran et al., 2004 ; Hubert-Moy et al., 2006; Gr enier et al., 2007; Dissanska et al., 2007; Grenier et al., 2008). Burnett et al (2003) proposed a hierarchical organization of segmented objects that allows the best exploitation of contextual relations between various peatland units. Burnett et al. used colour infrared aerial photographs (CIR) to delineate pool complex expansion and forest encroachment. The fuzzy boundaries of peatlands and the mixture of water, barren ground, and vegetation signatures in the pixels impede the accurate image classification. The integration of fuzzy logic in classifiers improves the detection of transitional zones (Chiu & Couloigner, 2006). All these classification concepts are integrated into eCognition software (Benz et al., 2004). To evaluate the change in the structure of patterned fens (i.e, expansion or contraction of the aquatic compartment, the nature of the change as well the spatial particularities of the change) occurring between the two observation dates, we applied "post-classification" change detection method. For better interpretation of the results, the weather data preceding the image acquisition were taken in consideration.

Study sites

Two study sites located in the La Grande River watershed (Quebec, Canada) were selected on hydroclimatic and ecological criteria (Figure 7.2). The first site is located near the La Grande-3 airport (53°33'33"N, 76°15'19"W), where mixed peatlands (peatlands having characteristics of both bogs and fens) and patterned fens are widespread. The relief is composed of undulated rocky uplands toward the north. The mean local elevation is about 220 m above sea level (ASL). The mean annual temperature approximates -3,5°C, and total annual precipitation is 680 mm. The growing season lasts about 130 days (Bootsma & Ballard, 1997). The regional vegetation cover is dominated by black spruce (*Picea mariana*) – lichen woodlands. Black spruce-moss stands are distributed in wet depressions, whereas well-drained uplands are occupied by open lichen - spruce and lichen - jack pine (*Pinus banksiana*) forest stands.

The second study site is located approximately 260 km northeast of the first one, in the area of the Laforge-1 reservoir (54°12'12"N, 72°19'10"W). The mean altitude of the site is approximately 445 m ASL. The characteristic features of this site are the numerous rocky hills, the small lakes as well as the narrow and interconnected patterned fens. The mean annual temperature is lower (about -4.2 ° C) than that of the La Grande-3 site whereas total annual precipitation is far greater (830 mm). The growing season is shorter, i.e., about 120 days (Bootsma & Ballard, 1997). Open lichen - spruce forests are dominant on all well-drained soils of the area.

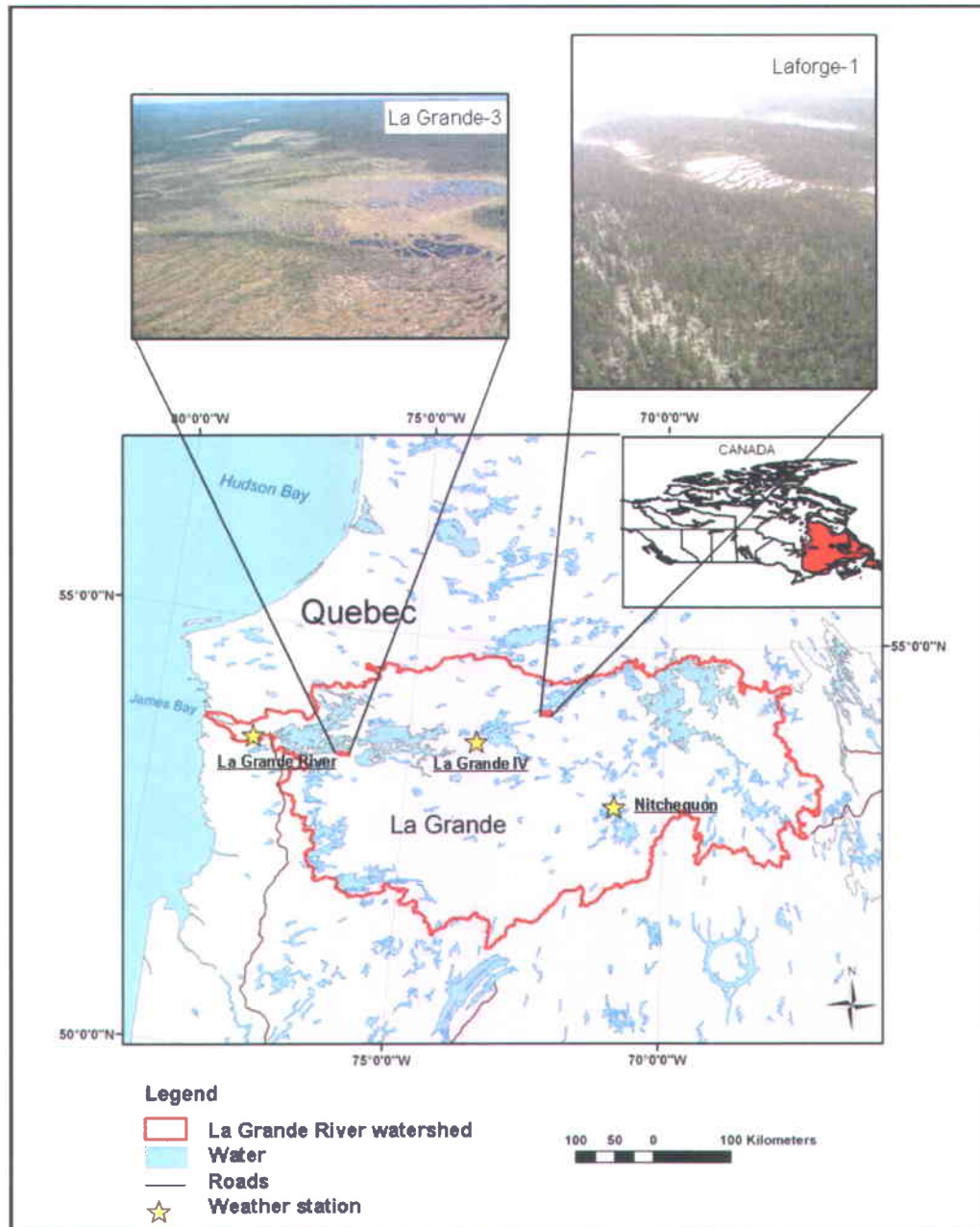


Figure 7.2 Location of the two study sites within the La Grande River watershed in northern Quebec, Canada. The site #1 is located near the La Grande-3 airport (53°33'33"N, 76°15'19"W). The site #2 is located approximately 260 km northeast of the first one, in the area of the Laforge-1 reservoir (54°12'12"N, 72°19'10"W)

7.2 Materials and methods

The remote sensing is one of the most suitable tools to provide simultaneous pictures of large areas occupied by peatlands, despite their remoteness and limited accessibility. Given the small size of microtopographic elements of patterned fens, for the realisation of this project, very high spatial resolution (VHR) images and an appropriate method of treatment are needed.

The aerial photographs are often used to assess spatiotemporal changes of wetlands and for monitoring small water bodies due to their high spatial resolution (Lathrop et al., 2005). However, the analysis of older black-and-white aerial photographs is usually performed by visual photointerpretation and manual delineation of objects of interest. This approach is quite subjective and depends on the knowledge and perception of interpreters. With higher spatial resolution, the significant amount of details increases the heterogeneity in land cover classes (high intra-class variability) and reduces separability between them (low inter-class variability). The traditional pixel-based approaches of image classification (algorithms based on the single pixel value) yield low accuracy results (Dechka et al., 2002; Fuller et al., 2006). Moreover, the spectral information of panchromatic images is quite limited despite their high spatial resolution.

To overcome the limitations related to image processing and to benefit from the VHR of panchromatic images and black-and-white historic aerial photographs, we have integrated texture and contextual information in a semi-automated object-based method (Benz et al., 2004) for classification of these images. A detailed description for each step of image processing and used parameters (i.e. geometric correction, texture analysis, segmentation, class hierarchy, class attributes, classification validation) has already been published (Dissanska et al. 2009). In this paper accent was put on the change detection analysis based on the classified images.

7.2.1 Image Data

We used three very high resolution panchromatic QuickBird images (two images for La Grande-3 study site, acquired on 12 and 17 August 2003; and one image for Laforge-1 study site acquired on 2 September 2006, resolution 0.60 m) and eight black-and-white aerial photographs (4 photos for each study site - La Grande-3, scale 1:60 000 and Laforge-1, scale 1:40 000, acquired on 25 June 1957, National Air Photo Library). The aerial photographs were digitized at 1815 dpi (La Grande-3) and at 1210 dpi (Laforge-1) in order to obtain pixel size (0.84 m) close to the resolution of panchromatic QuickBird images. All images were georeferenced to the Universal Transverse Mercator (UTM) coordinate system, Zone 18 North, North American Datum 1983 (NAD83). After the geometric correction, the two QuickBird images for the La

Grande-3 region were mosaicked. For the creation of the mosaic, a radiometric normalization ("color balance") was applied in order to eliminate the differences in the viewing angles (7 ° and 12 °) and in the weather condition preceding image acquisition. The orthorectified aerial photographs were used to create two mosaics covering the two study sites.

As auxiliary data for geometric correction, we used a digital elevation model (DEM) resolution of 50 m, the GPS (Global positioning system) data of the road Radisson-Brisay (accuracy > 5 m) and two orthoimages Landsat-7 ETM + (panchromatic resolution of 15 m) and a SPOT-5 (panchromatic, 2.5 m resolution) images. Numerous oblique digital photographs and ground photographs acquired during helicopter overflights and field campaigns (June 2002, May 2005, August 2006) were used for calibration and validation of the method. The spectral bands of the QuickBird images (resolution 2.40 m) were also used to support the interpretation of random objects used for validation because they offer a clearer distinction between peatlands and uplands.

7.2.2 Image processing

Prior to image classification, an initial treatment of the images has been applied in order to correct geometric distortions caused by the Earth's curvature and its rotation, altitude, speed and behaviour of the platform, the relief surface, etc. Because of the high spatial resolution but limited spectral resolution of panchromatic images and black-and-white aerial photographs, the image texture became an important aspect in image classification procedure. We applied a texture analysis based on grey level co-occurrence matrix (GLCM) (Haralick et al., 1973). The created texture images (homogeneity, GLCM mean, GLCM entropy, GLCM second angular moment, inverse difference, GLDV entropy and GLDV second angular moment) were integrated as supplementary data layers in the process of an object-based image classification.

To take into account the diversity, complexity and hierarchical structure of patterned fens, a multi-scale segmentation and hierarchical classification (Baatz & Schape, 2000) at 4 levels were applied. A multi-scale segmentation, implemented in the eCognition software, allows creation of objects at different scales simultaneously on a single image. The change in the scale of analysis allows different structures to emerge (Woodcock et al. 1987). The basic strategy was therefore to model the structures of interest (in our case – patterned fens) by constructing a hierarchy of thematic classes based on mutual and semantic links between them. To describe precisely the objects of interest, a priori knowledge of these objects is essential. The scheme of the hierarchical class organisation and process of segmentation classification is presented in Figure 7.3.

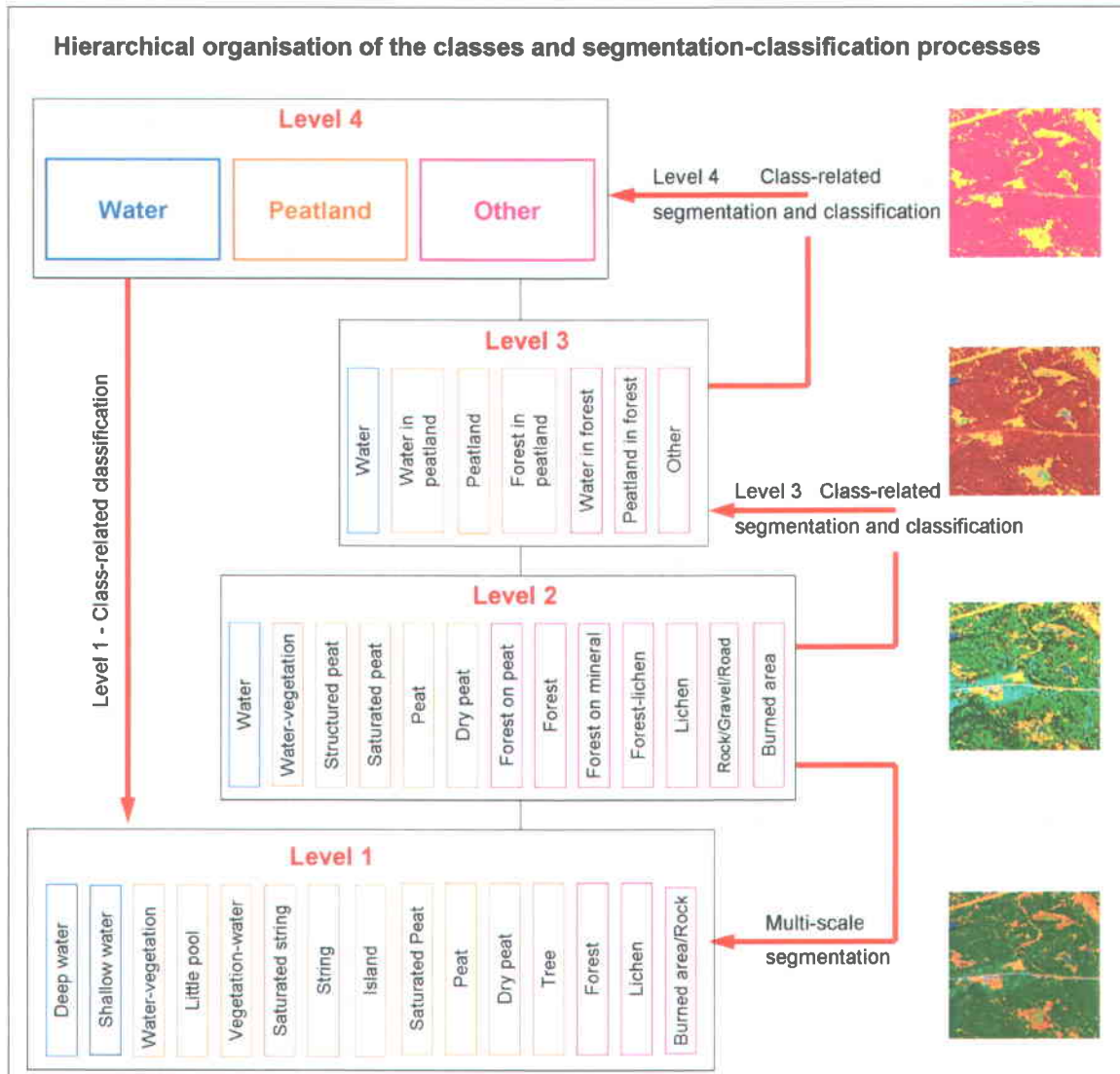


Figure 7.3 Hierarchical organisation of the classes and segmentation-classification process. The different colors (blue, orange and magenta) represent the belonging of classes to the corresponding structural groups: “Water”, “Peatland” and “Other”.

The segmentation-classification process starts with a segmentation and classification of the images on an intermediate scale (Step 1, Level 2). The main goal at this level was to delimit land cover classes (dry peat, peat, saturated peat, structured peat and water-vegetation) of peatlands from the other types of land cover like lakes (water), forest on peat, forest on mineral, lichen woodland, lichen, road, gravels, and rock outcrops. The process continues with the image segmentation at finest scale (Step 2, Level 1) in order to delineate different structural elements within peatlands. Then, the classification of objects at Level 2 was applied (Step 3). This sequence of steps allows using for the classification of objects at Level 2 features based on the density and direction of sub-objects (i.e. objects of Level 1). At the Level 3 (broadest









differentiation), all adjacent objects belonging to the same semantic group (Peatland, Water, Other) were merged in larger objects. At this level, the objects classified as “water” or “forest” being part of the peatland have been also identified (Step 4, Level 3). The next step (Step 5, Level 4) was to merge these “water” and “forest” bodies with the surrounding them peatland object and thus to form the entire peatland or peatland complex. Once delimited, the peatland were classified in details (Step 6, Level 1). At the finer level, 12 classes were defined describing different morphological units of peatlands (dry peat, peat, saturated peat, string, saturated string, island, vegetation-water, water-vegetation, little pool, shallow water, deep water, tree). These classes were attributed only to the sub-objects of the objects classified as “Peatland” or “Water” at Level 4. Another 3 classes describing adjacent environments of peatlands (i.e. lichen, forest (any type) and outcrops) were attributed to the subobjects of the class « Other » (level 4). Such use of horizontal (between neighbors) and vertical links (between super-and sub-objects) allowed to reduce the confusion between classes. The description of classes for Level 1 is given in Table 7.1.

We have simultaneously applied various strategies for classification of different classes, using either the nearest neighbor algorithm, the membership functions, describing a specific property of the objects (mainly contextual relationships), or their combination. The quality of object-based classification depends on the segmentation quality and adequate description of classes of interest. Therefore, we first assessed the quality of segmentation by visual inspection of classified images. Objects near the peatlands have been carefully inspected and some objects have been manually modified before the final classification. Then, validation of the classification was performed using a statistical method as the traditional confusion matrix. As the reference sites (ground truth) data are limited or inexistent (for 1957), we used as reference sites randomly selected objects for each class from the classified images. Subsequently, these objects were visually interpreted and associated with the class considered to be most appropriate. The optimal number of objects used for validation was determined based on the multivariate distribution (Congalton & Green, 1999). More details on image processing are given in Dissanska et al. (2009).

Table 7.1 Class description

	Class	Description
Deep Water		<p>Lakes, large pools</p> <p>Water, free of vegetation, depth > 40 cm</p>
Shallow Water		<p>Lakes, pools</p> <p>Water, free of vegetation, depth ≈ 26 – 40 cm</p>
Water_Vegetation		<p>Objects with less than 50 % vegetation cover or pools with low density vegetation cover, depth ≈ 10 – 25 cm</p>
Little Pool		<p>Small shallow pools surrounded by peat objects</p>
Vegetation_Water		<p>Objects with more than 50 % vegetation cover, generally on the edge of the pools, or pools with dense cover of vegetation, depth < 10 cm</p>
Saturated String		<p>String of vegetation, water table at the surface</p>
String		<p>String of vegetation, depth of water table > 10 cm</p>

Table 7.1. : (concluded)

	Class	Description
Island		Patch of vegetation in the pools
Saturated Peat		Objects dominated by Sphagnum, water table near surface
Peat		Hummock, lawn Objects dominated by ericaceous shrubs, herbaceous or/and bryophyte vegetation Deep water table
Dry Peat		Peatland segments dominated by Sphagnum or/ and herbaceous vegetation; high reflectance, high homogeneity
Tree		Picea mariana, Larix laricina, height > 1 m
Forest		All types of vegetation out of peatlands
Rock /Gravel		Artificial or natural bare surface: roads, gravel, rocks
Lichen		Mineral substrate, covered by lichen

7.2.3 Change detection

The change in the structure of patterned fens (i.e, expansion or contraction of the aquatic compartment, the nature of the change as well the spatial particularities of the change), occurring between the two observation dates (1957 and 2003 for LaGrande-3 site; 1957 and 2006 for Laforge-1 site), was evaluated by applying “post-classification” change detection method. The post-classification change detection method was found to be less sensitive to radiometric variations between the scenes (Mas, 1999; Coppin et al., 2004). Thus, it is more appropriate when dealing with different type of images/sensors (in our case, silver-halide photographs and VHR satellite panchromatic images QuickBird) and the conditions during image acquisition (solar illuminations conditions, atmospheric transmission, view angles, vegetation phenology, etc.). Another advantage of this technique is that it allows not only to identify the change, but also could provide information on the nature of the change (Jensen, 2005). Nevertheless, the main drawback of post-classification comparison is that the accuracy of the change detection is a product of the accuracies of each individual classification (Mas, 1999).

Post-classification comparison allowed us to address the four main aspects of land cover change detection (Macleod et al. 1998): 1) detect changes that have occurred, 2) measure the extent of the change (i.e, measure the affected areas), 3) identify the nature of change, and 4) evaluate the spatial characteristics of change.

7.2.3.1 Analysis of the change in the total, aquatic and semi-aquatic surface areas

First, we compared areas occupied by different compartments (aquatic, semi-aquatic and terrestrial) as well as their proportions from the maps for two dates for both study sites produced in the previous step. Given the confusion between some of the classes and the fact that the accuracy of change detection by post-classification approach is highly dependent on the classification accuracy of each of compared images, the classes were combined in 3 principal compartments : aquatic, semi-aquatic and terrestrial (Table 7.2). The aquatic compartment includes the classes covered with water permanently during the growing season. This grouping helps to eliminate false alarms of change (e.g. as between “Peat” and “String”).

Table 7.2 Class division in 3 principal compartments : aquatic, semi-aquatic and terrestrial

Compartment		
Aquatic	Semi-aquatic	Terrestrial
Deep water	Saturated peat	Peat
Shallow water	Saturated string	String
Water-vegetation	Vegetated Island	Dry peat
Little pool	Vegetation-Water	Tree

7.2.3.2 Delphi method

Because ground truth data for surface area of terrestrial and aquatic compartments is not available (especially for 1957), we used the Delphi method to compare the area extracted from the classified images to the areas obtained by traditional photointerpretation, The Delphi technique is an iterative process based on the expert consensus (Linstone & Turoff, 1975). This technique has been used for forecasting or validation in different research fields when there is incomplete knowledge about a problem or phenomena (Skulmoski et al., 2007). In our case, we applied a two-round Delphi techniques based on expert estimation of the surface area of two patterned fens (one for each study site) and their corresponding aquatic compartments. In order to facilitate interpretation, we selected two patterned fens with well-defined pools and well circumscribed by forest. In the first round, we asked 7 experts in remote sensing of water resources to create polygons in order to 1) delineate the chosen peatlands on the QuickBird image and on the aerial photograph mosaic and to 2) delineate pools inside the selected fens on the QuickBird image and on the aerial photographs mosaic. In the second round, the experts who had extreme estimates were invited to review their polygons. Due to the time the process takes, no more rounds were initiated.

Based on experts' estimates, we have also established a threshold of area change. The variation of experts' estimates was used to compute a confidence interval for the surface area estimates. The 95% confidence interval for the surface area (**A**) was estimated as:

$$\left[\bar{A} - t \frac{S}{\sqrt{N-1}}, \bar{A} + t \frac{S}{\sqrt{N-1}} \right], \quad \text{Eq. 7.1}$$

where \bar{A} is the mean of the area estimates by experts, S is the standard deviation and $t = 2.447$ for 6 ($N-1$) degree of freedom. The change of surface area for two dates is considered as significant if it exceeds the relative margin of error. The relative margin of error is the absolute margin of error (the half of the width of the confidence interval) defined as a percent of the mean of the experts' estimates of the surface area \bar{A} : $\left(t \frac{S}{\sqrt{N-1}} \right) * 100\% / \bar{A}$. This threshold was

applied to the surface area estimates from classified aerial photographs in order to attenuate possible effects due to shadow or difference in spectral and spatial resolution of QuickBird images and aerial photographs.

7.2.3.3 Transition between classes (“from-to” change detection)

To identify the nature of the change, we also studied the mutual transition over time between classes (“from-to” change detection) for two fens (F23 and F30, Laforge-1). The fen F23 was selected because it has shown the highest increase of the area of its aquatic compartment (23,5 %). The fen F30 was selected because it had already shown signs of high degradation of its vegetation cover containing two large shallow lakes. The two fens have area > 2 ha. The F30 is presented in the Figure 7.12.

The accuracy of the orthorectification of the compared images has considerable influence on the accuracy of the detected changes. Consequently, as the maps from two different dates were not perfectly co-registered (Dissanska et al., 2009), the sub-scenes of the aerial photograph mosaic containing individual peatlands and their corresponding classifications were additionally co-registered to the corresponding zone of QuickBird images. We have applied a polynomial transformation of first order where the shape of the original image is preserved. The root mean square error (RMSE) vary between 0.08 and 0.33 pixels using 9 and 16 control points respectively for the two studied fens (F23 - the fen with the largest increase in the area of aquatic compartment and F30 - the largest fen). Resampling of images was performed using the nearest neighbour method in order to avoid alter the pixel values of classified images.

Then, the classified images were superimposed to compare changes in land use occurred between the two dates. This analysis was carried out using the "Accuracy assessment" tool of the eCognition software. In this case, the resulting confusion matrix acts as a coincidence matrix.

7.2.3.4 Spatial characteristics of the change

With the intention to better characterize the spatial particularities of the observed change and to interpret correctly the change in the structure occurred between two dates (i.e. 1957 and 2006), we have also produced change maps for patterned peatlands F23 and F30. The change maps were produced by object-based approach using eCognition software. The two classified images of two dates of interest have been imported as two layers and then segmented ("Multiresolution Segmentation," Scale = 0). Created objects were the intersection between objects of classified images, when there was a change between classes (numerical value) of two previously classified images. For change's classification, 8 cases were defined to detect different aspects of transition (modification or conversion) occurring between the two observation dates (Table 7.3). In the case "no change", the objects were associated with the same compartment between the two dates, i.e. there was no transition between compartments. In cases 2, 3 and 4, there was a transition between different compartments (conversion) to wetter conditions. Cases 7 and 8 showed the expansion or contraction in 2006, i.e. objects belonging to this class were found outside peatland's limit in 1957 and 2006 respectively. Case 6 corresponds to changes (modifications) made within the aquatic compartment.

Table 7.3 Change classes

Class		Description
1	No change	Objects belonging to the same compartments in 1957 and in 2006 : Terrestrial (1957) <-> Terrestrial (2006) Semi-aquatic (1957) <-> Semi-aquatic (2006) Aquatic (1957) <-> Aquatic (2006)
2	Terrestrial (1957) → Aquatic (2006)	Objects belonging to the terrestrial compartment in 1957 which were become objects of the aquatic compartment in 2006
3	Terrestrial (1957) → Semi-aquatic (2006)	Objects belonging to the terrestrial compartment in 1957 which were become objects of the semi-aquatic compartment in 2006
4	Semi-aquatic (1957) → Aquatic(2006)	Objects belonging to the semi-aquatic compartment in 1957 which were become objects of the aquatic compartment in 2006
5	Dry (2006)	Transition to dryer conditions <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aquatic (1957) <-> Terrestrial (2006) ▪ Semi-aquatic (1957) <-> Terrestrial (2006) ▪ Aquatic (1957) <-> Semi-aquatic(2006)
6	Aquatic (1957) → More aquatic (2006)	Objects bilonging to the aquatic compartment in 1957 which were become more deeper in 2006 : <ul style="list-style-type: none"> • Water-vegetation → Shallow water • Water-vegetation → Deep water • Shallow water → Deep water • Little pool → Water-vegetation • Little pool → Shallow water • Little pool → Deep water
7	Expansion_2006	Objets situated in 2006 out of the peatland's 1957 limits
8	Contraction_2006	Objets situated in 1957 out of the peatland's 2006 limits

7.2.3.5 Weather data

For better interpretation of the detected change, the weather data (i.e. precipitation and temperature) available for 1957, 2003, and 2006 from the 4 nearest weather stations (Table 7.4) were taken in consideration. Weather data were downloaded from National Climate Data and Information Archive (Environment Canada).

Table 7.4 Weather stations

Station	Coordinates	Period of operation
Nitchequon	53°12'N 70°54'W Altitude 536,10 m	1953 - 1985
La Grande Rivière A	53°38'N 77°42'W Altitude 194,80 m	1976 - 2005
La Grande IV	53°45'N 73°41'W Altitude 306,30 m	2005 - 2012
La Grande IV A	53°45'26"N 73°40'45"W Altitude 306,30 m	1985 - 2012

7.3 Results and discussion

7.3.1 Image classification

The overall accuracy of applied object-based classification at a medium level (Level 2) varies between 88% (La Grande-3, aerial photographs) and 95% (Laforge-1 site, QuickBird). The real peatlands are well distinguished from the other land cover classes with low omission error (2 – 8%) for peatland objects. The principal misclassification was due to classification of some peat objects (mainly structured peat) as forest object ("Forest on peat"). However, the commission error (objects improperly included in particular class) for peat objects were higher and varied between 10 % to 26 % for Laforge-1 (QuickBird image) and La Grande-3 (aerial photographs) sites, respectively. Nonetheless, the higher commission error did not affect the estimation of surface area in real peatlands as this error is mainly due to classification of objects of classes "Lichen", "Forest-lichen", "Rock", and "Gravel" as "Peat" or "Dry peat".

For the finest level (Level 1) which segregated the image scene in 15 land cover classes, the overall accuracy varied between 72 % and 83 % (La Grande-3, aerial photographs and Laforge-1, QuickBird image, respectively). The largest source of confusion was the forest or lichen objects classified as peatland objects. These misclassifications resulted from propagation of erroneously classified objects at the medium scale (Level 2) due to class-related features used in class description. However, this misclassification did not affect real peatlands and for the assessment of the classification accuracy in real peatlands the three non-peatland classes (i.e. forest, lichen and burned area/rock) were excluded from the confusion matrix. Thus, the overall accuracy rose to 80 % and 86 % (La Grande-3, aerial photographs and Laforge-1, QuickBird image, respectively). More frequent misclassification problems were between classes "Peat" and "String", "Peat" and "Island" as well as between classes "Saturated string" and "Vegetation-water", or "Vegetation-water" and "Little pool". Some of these confusions are natural because these classes have very close spectral and textural characteristics. Many objects not properly segmented, including small narrow pools and strings, were also classified as "Vegetation-water". Many objects interpreted as tree are classified as "Shallow water", "Water-vegetation", "Little pool" or "Vegetation-water". In general, these are very small objects (1 – 2 pixels). As example, Table 7.5.presents the confusion matrix for aerial photographs classification (Level 1, Laforge-1 site).

Table 7.5 Confusion matrix for aerial photographs classification for 12 classes defined for peatlands (Level 1, Laforge-1 site)

User Class	Reference Class												
	DW	SW	WV	LP	VW	I	SatS	SatP	S	P	DP	T	Sum
DW	59	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60
SW	1	54	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	60
WV	0	3	41	3	2	1	3	0	0	0	0	3	56
LP	0	0	2	39	3	0	0	1	0	0	0	4	49
VW	0	0	2	4	41	1	7	1	0	0	0	3	59
I	0	0	1	0	2	37	1	2	0	4	0	0	47
SatS	0	0	2	0	3	1	41	1	1	1	0	0	50
SatP	0	0	0	0	0	0	0	52	0	3	0	0	55
S	0	0	0	0	1	1	1	2	40	11	0	0	56
P	0	0	0	0	0	2	0	2	2	52	0	0	58
DP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	54	0	55
T	0	0	1	2	1	0	0	1	0	0	0	51	56
Sum	60	58	51	48	53	43	53	62	43	72	54	64	661
Producer	0,98	0,93	0,80	0,81	0,77	0,86	0,77	0,84	0,93	0,72	1,00	0,80	
User	0,98	0,90	0,73	0,80	0,69	0,79	0,82	0,95	0,71	0,90	0,98	0,91	
Kappa Per Class	0,98	0,89	0,71	0,78	0,67	0,77	0,80	0,94	0,69	0,88	0,98	0,90	
Overall Accuracy	0,85												
Kappa	0,84												

Note 1: DW – Deep Water, SW – Shallow Water, WV – Water-Vegetation, LP – Little pool, VW – Vegetation-Water, SatS – Saturated String, S – String, I – Island, SatP – Saturated Peat, P – Peat, DP – Dry Peat, T – Tree

Note 2: Blue color indicates the classes forming aquatic compartment;
 Green color indicates the classes forming semi-aquatic compartment;
 Yellow color indicates the classes forming terrestrial compartment;

For the purposes of the change detection analysis, and in order to eliminate false alarms of change (e.g. as between “Peat” and “String”), the classes are regrouped in 3 principal compartments: aquatic, semi-aquatic and terrestrial. The resulting confusion matrix for aerial photographs classification (Level 1, Laforge-1 site) for three principal compartments is presented in Table 7.6. The overall accuracy becomes 92%, the producer’s and user’s accuracy vary between 90% and 94%.

Misclassification problems and classification accuracies at finest scale level are very similar for both types of images (QuickBird and aerial photographs) and for both regions

Table 7.6 Confusion matrix for aerial photographs classification for three principal compartments (Level 1, Laforge-1 site)

User Class	Reference Class			Sum
	Aquatic	Semi-aquatic	Terrestrial	
Aquatic	205	10	10	225
Semi-aquatic	9	190	12	211
Terrestrial	3	11	211	225
Sum	217	211	233	661
Producer's accuracy	0,94	0,90	0,91	
User's accuracy	0,91	0,90	0,94	
Kappa Per Class	0,87	0,85	0,90	
Overall Accuracy	0,92			
Kappa	0,89			

7.3.2 Change Analysis

7.3.2.1 Analysis of the change in the total, aquatic and semi-aquatic surface area between 1957 and 2003/2006

We have analysed the change of the surface structure (proportion of aquatic, semi-aquatic and terrestrial compartments) for ten patterned fens in the region of La Grande-3 and 30 patterned fens in the region of Laforge-1 respectively. The peatland area of studied peatlands ranges from 0.1 ha to 20.6 ha. The total area for most of peatlands (8 for La Grande-3 region and 28 for Laforge-1 region) has increased compared to their surface area in 1957. Figure 7.4a shows the peatlands area in 1957 and 2006 for Laforge-1 region. The peatlands expansion occurs mainly in the longitudinal direction (upstream and downstream) of fens or in the lateral areas where small streams enter or leave the peatlands. This change is associated with the decreasing density of trees in nearby areas during the last 50 years and, therefore, their classification as objects of peatlands.

Figure 7.5a shows the relative expansion of 30 fens from Laforge-1 site, where ΔS is the difference of the peatland area in 1957 and 2006 relative to their area S in 1957. The area of small peatlands ($S < 2$ ha) has undergone much more pronounced relative increase ($\Delta S/S$) than those > 2 ha which shows a mean relative expansion of about 10%. For some peatlands, the expansion is due to the merging with nearby peat depressions following the transformation of the narrow forest strip between them in peat soil. The red points in Figure 7.5 correspond to fens that are in direct contact with the burned areas.

The green points in Figure 7.5 correspond to fens that are situated in the more accentuated region and are surrounded by covered by sparse vegetation hills (Figure 7.6A).

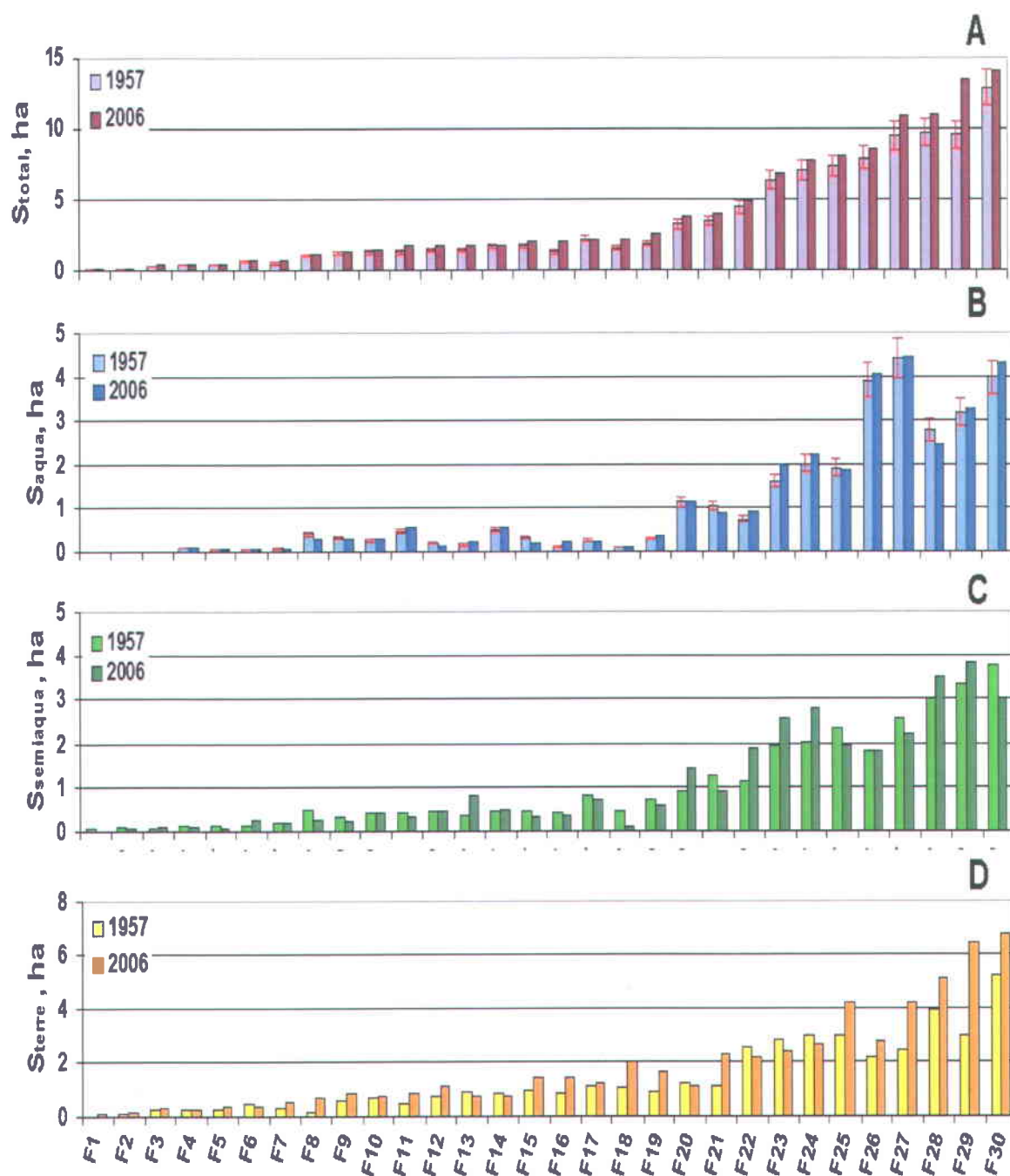


Figure 7.4 Surface area of a) peatland (S_{total}), b) aquatic compartment (S_{aqua}), c) semi-aquatic compartment ($S_{semiaqua}$) and d) terrestrial compartment (S_{terre}) in 1957 and 2006 for 30 fens in the Laforge-1 study site. The error bars in a) and b) indicates 10 % and 15% thresholds for the entire fen area and their aquatic compartments respectively as described in the Delphi method paragraph

The surface area of aquatic compartments for 24 peatlands (seven peatlands from the La Grande-3 study site and 17 peatlands for Laforge-1 study site) has also increased. Figure 7.4b shows the area of aquatic compartment in 1957 and 2006 for Laforge-1 region. However, as shown in Figure 7.5b, there is no clear trend in the relative change of the area of aquatic compartments ($\Delta S_a/S_a$) between the two dates. It seems that aquatic compartments of small fens (< 2 ha) underwent more pronounced changes in both directions - positive (increase) and negative (decrease). Nevertheless, the surface of aquatic compartments for 9 of the 12 largest peatlands (> 2 ha) increased in 2006. Figure 7.5d shows that variation of the relative change in aquatic compartments are larger in patterned fens whose area of the aquatic compartment $S_a < 0.5$ ha, while the surface of aquatic compartments for 8 out of 10 peatlands with $S_a > 0.5$ ha has increased in 2006.

The area of semi-aquatic compartment increased for 11 out of 30 patterned fens from Laforge-1 site (Figure 7.4c). The area of semi-aquatic compartments for most (13 of 16) patterned fens with $S < 2$ ha declined in 2006 (Figure 7.5c). From the 30 studied fens, only, 9 fens show a simultaneous increase in the size of their aquatic and semi-aquatic compartments, whereas 11 fens show a simultaneous decrease in the area of their aquatic and semi-aquatic compartments (Figure 7.7). Another 8 patterned fens have undergone an increase in the area of their aquatic compartment and a decrease in the area of their semi-aquatic compartment. For La Grande-3 region, six out of ten studied fens show increase in the area of their semi-aquatic compartment. For five of them, the increase in the area of the semi-aquatic compartment is simultaneous with increase of their aquatic compartment.

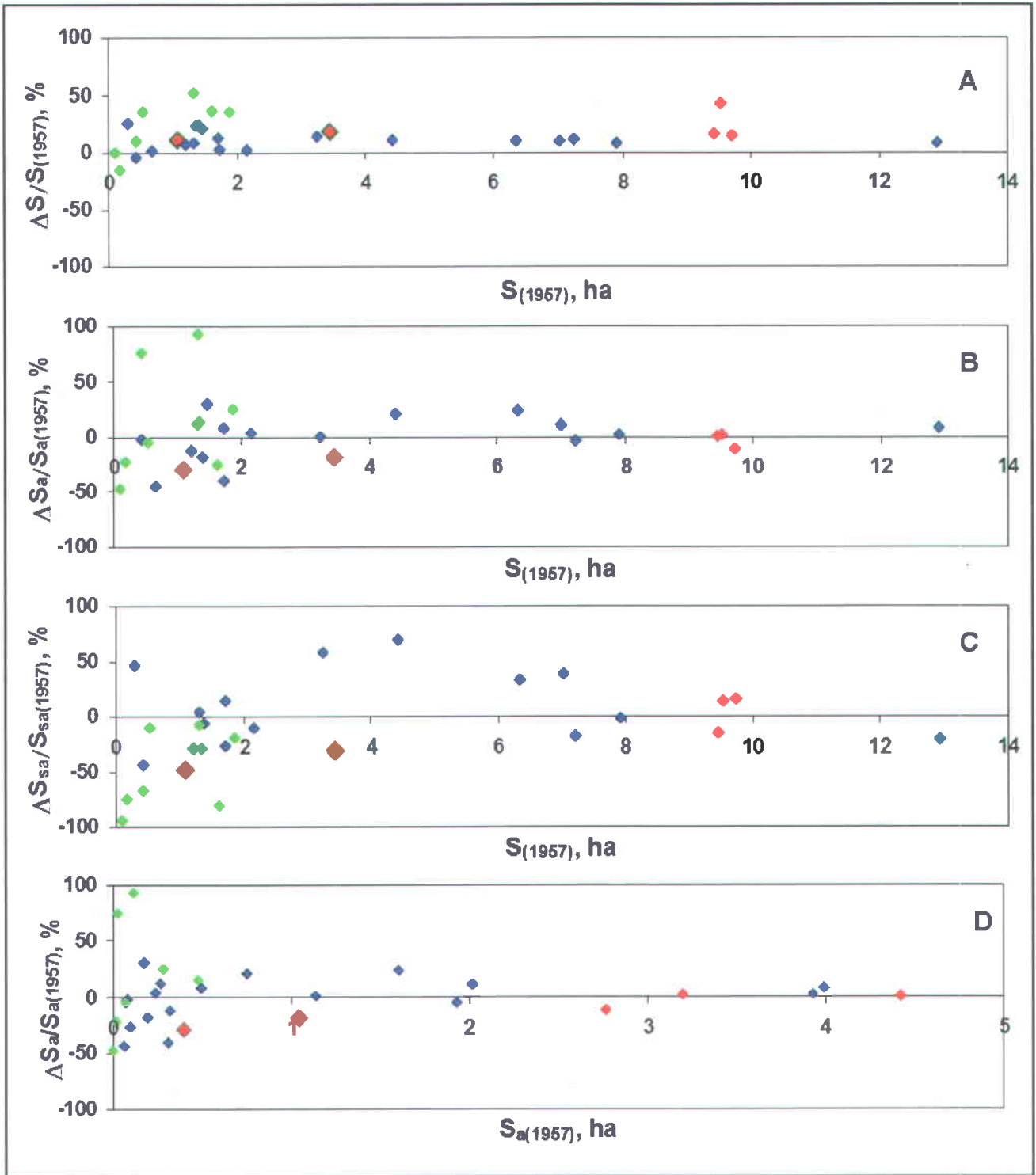


Figure 7.5 Relative change in a) the surface area of 30 fens in the Laforge-1 study site (S), b) their aquatic (S_a) and c) semi-aquatic (S_{sa}) compartments according their size in 1957. The case d) shows the relative change of aquatic compartment of fens according the surface area of their aquatic compartment in 1957. The 5 red points indicate the peatlands (F8, F21, F27, F28 et F29) in direct contact to the burned zones. The green points correspond to fens that are situated in the more accentuated region and are surrounded by covered by sparse vegetation hills.

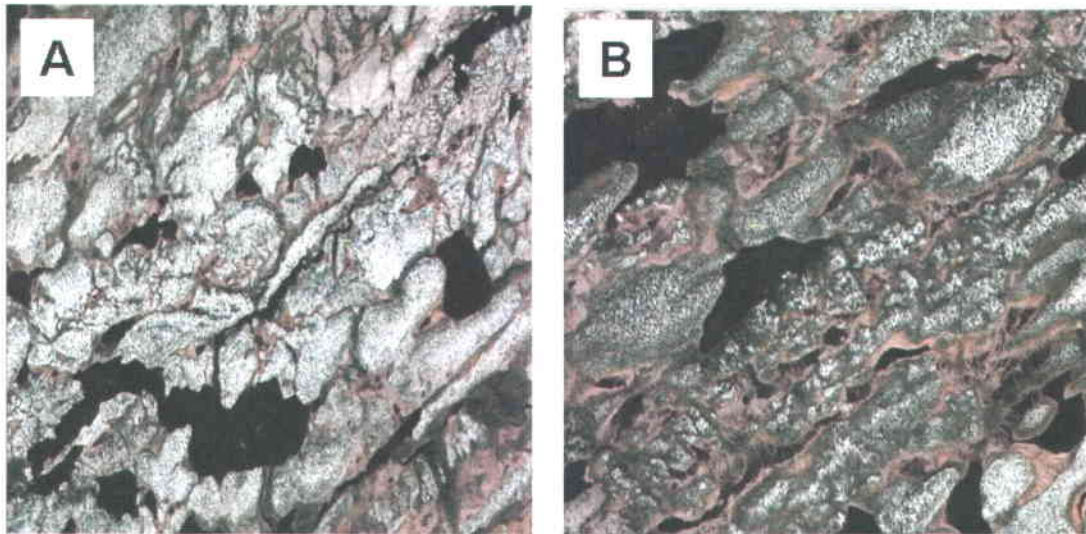


Figure 7.6 Difference in peatland environment: (a) more accentuated region, peatlands are small and surrounded by hills covered by sparse vegetation; and (b) large patterned peatlands are situated in the sectors with low variation in relief, the vegetation on surrounding uplands is denser

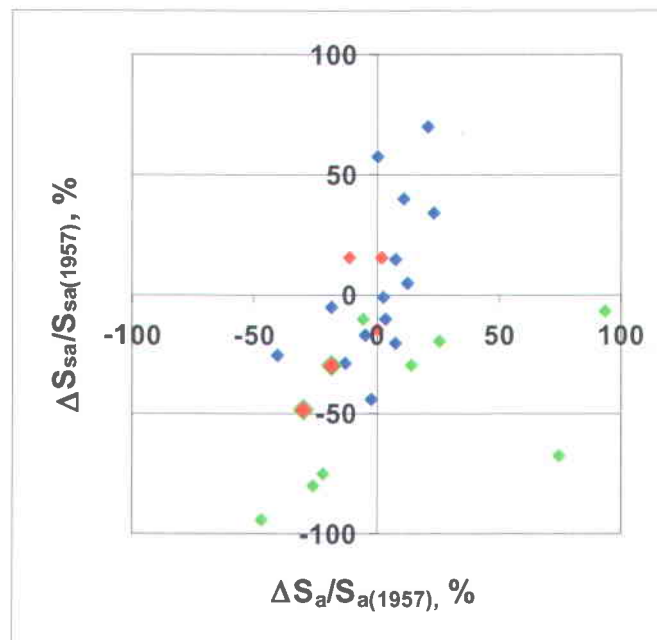


Figure 7.7 Simultaneous change in aquatic (S_a) and semi-aquatic (S_{sa}) compartments of 30 patterned fens in the Laforge-1 study site. The 5 red points indicate the peatlands (F8, F21, F27, F28 et F29) in direct contact to the burned zones. The green points correspond to fens that are situated in the more accentuated region and are surrounded by covered by sparse vegetation hills.

The proportions of the aquatic and semi-aquatic compartments for each fen and their change between the two observed dates were also examined. The degree of aqualys (the proportion of the aquatic compartment, S_a/S [%]) obtained from the classified images varies between 1.1% and 49.6 % in 1957 and 2.2 % and 46.9 % in 2006 (Figure 7.8A and Figure 7.8B). The degree of aqualys of peatlands with $S < 2$ ha ranged from 1.1 % to 37 % with an average of 16.3 ± 10.8 % in 1957 and 14.3 ± 9.2 % in 2006. In general, the degree of aqualys for fens > 2 ha is higher than 20 % but does not exceed 50 % with an average of 25.5 ± 12.3 % in 1957 and 24.6 ± 11.4 % in 2006. For La Grande-3 study site, the degree of aqualys is lower and varies between 0.5 % and 17.8 % in 1957 and 3.8 % and 26.8 % in 2003.

It should also be noted that often in rich fens with abundant shrub vegetation or in transition zones between peatlands and surrounding forest, some pools are hidden and not visible on the satellite images and the panchromatic black and white aerial photographs. In addition, in estimation of the area of aquatic compartments we have not included objects of class "Vegetation-water" which could also contain small shallow pools. Thus, our results may underestimate the actual degree of aqualys.

The degree of aqualys was higher in 1957 than in 2006 for 20 out of the 30 patterned fens in the region of Laforge-1 (Figure 7.8C). However, there is not any trend in the change of the degree of aqualys with the size of the peatlands. Nevertheless, the five peatlands (F8, F21, F27, F28 and F29) located near the burned areas show the greatest difference with the current level of aqualys (2006).

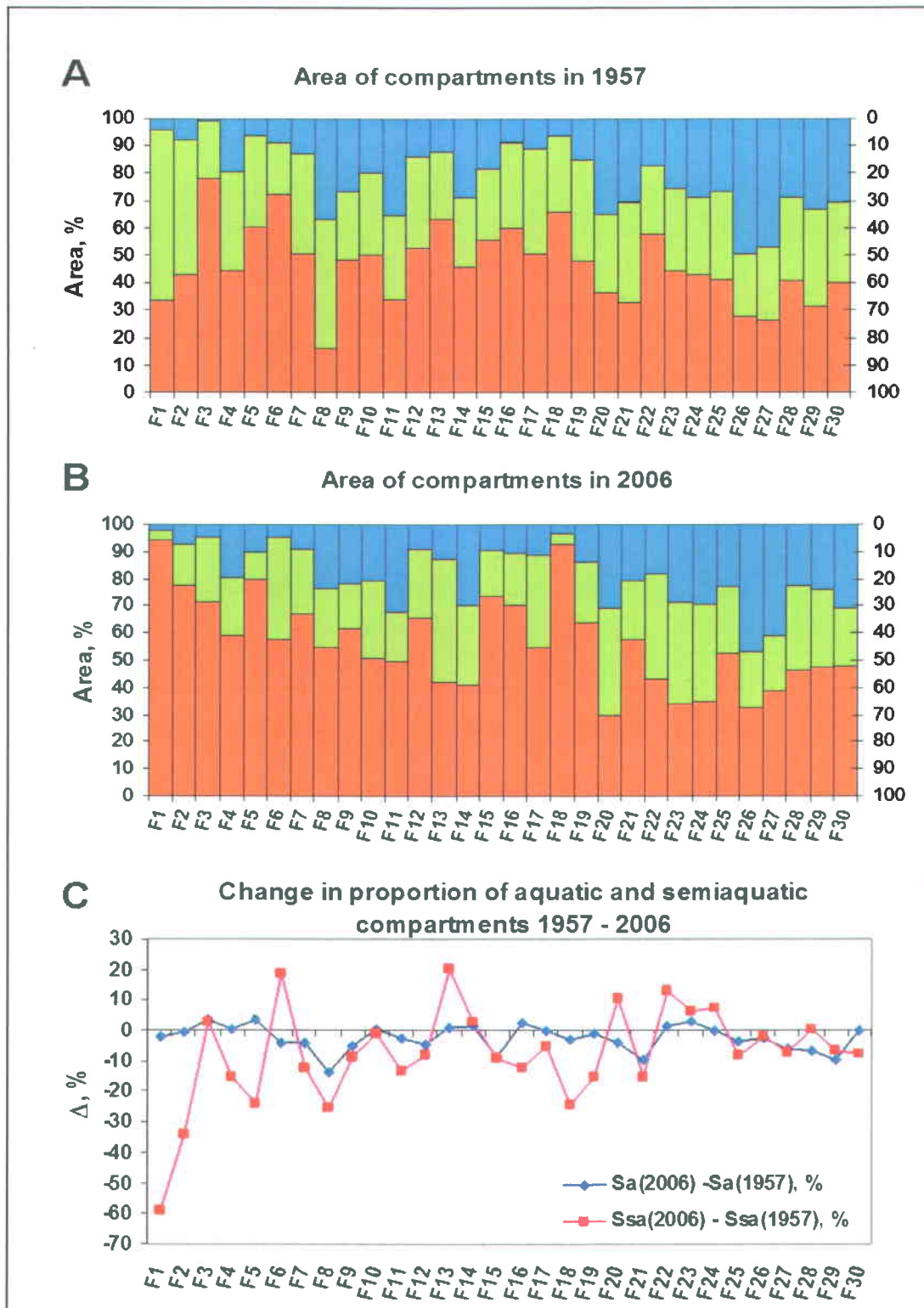


Figure 7.8 Proportion of three principal compartments for 30 fens (F1 - F30) in the Laforge-1 study site in a) 1957, b) 2006 and c) change in proportion of aquatic and semi-aquatic compartments between 1957 and 2006. The data are ranged according size of the fens.

The proportion of semi-aquatic compartments (S_{sa}/S [%]) varies between 18.7% and 62.3% (with an average of $32.1 \pm 8.8\%$) in 1957 and 3.5% and 45% (with an average of $24.6 \pm 10.1\%$) in 2006 (Figure 7.8A and Figure 7.8B). The proportion of semi-aquatic compartment for 21 out of the 30 patterned fens in the region of Laforge-1 also decreased in 2006 (Figure 7.8C). The variation of the change in the proportion of semi-aquatic compartment is larger for peatlands < 2 ha (F1 to F16). Our results also show that there is no correlation between the proportion of the aquatic compartment and the proportion of semi-aquatic compartment (Figure 7.9).

For La Grande-3 study site, the proportion of semi-aquatic compartments varies between 11.1% and 42.8% in 1957 and 29.1% and 43.3% in 2003. The proportion of semi-aquatic compartments for five out of ten studied peatlands has increased.

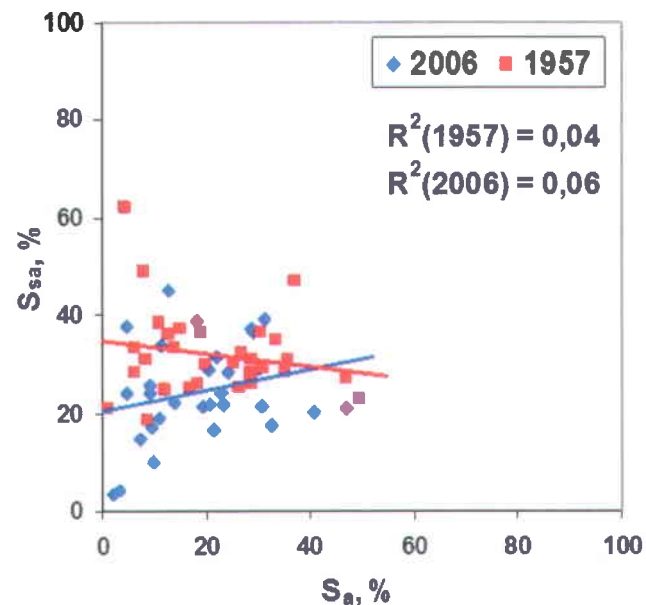


Figure 7.9 Correlation between area proportions of aquatic (S_a) and semi-aquatic (S_{sa}) compartments for 1957 and 2006.

7.3.2.2 Delphi method

The results of the two-round Delphi technique based on experts' estimations of the areas of two patterned fens and their corresponding aquatic compartments are shown in Table 7.7. In general, peatland area estimated from classified images is in the limits of the 95 % confidence interval. Only peatland's area obtained from QuickBird image for the La Grande-3 fen, presented in the Figure 7.10, is slightly over this interval. As it is obvious from Table 7.7, areas of the groups of aquatic classes (1) and (3) for the La Grande-3 and Laforge-1 sites, respectively, were closer to the 95% confidence interval for the area of aquatic compartment. The groups (1) and (3) include the objects of aquatic classes "Deep water", "Shallow water" and "Water-vegetation", and objects of classes "Deep water", "Shallow water", "Water-vegetation" and "Little pool", respectively.

There was no significant difference between the mean of peatland area in 1957 and 2003 as well as between aquatic compartments for the same period for the La Grande-3 peatland. This is also the case for the aquatic compartments for the Laforge-1 peatland (Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$). Only the means of the total area of the Laforge-1 peatland for two dates (1957 and 2006) are significantly different ($p < 0.05$). Both relative margin of error of peatland area estimated from aerial photograph mosaic and relative margin of error of area of aquatic compartment estimated from QuickBird images are higher (Table 7.7). Thus, the corresponding maximum to relative margin of error of 10% for total peatland area and 15% for the area of aquatic compartment were accepted as threshold for real change. The change of the aquatic compartment area for only 13 of all 40 studied peatlands exceeds the 15% threshold (i.e. six peatlands for La Grande-3 study site and seven peatlands for Laforge-1 study site, respectively). The change of the total area for 21 of all 37 patterned fens exceeds also the accepted threshold of 10% (i.e. four peatlands for La Grande-3 study site and 17 peatlands for Laforge-1 study site, respectively)

However, even if the difference between aquatic compartments in 1957 and 2003 for the La Grande-3 fen is not significant, the recent formation of pools (classified as "Water-vegetation") was detected on the QuickBird image (2003). The new pools are also present on the aerial color photograph taken in 2006. This result is supported by tree-ring study of Arlen-Pouliot (2009) done in the same fen. Arlen-Pouliot (2009) reported recent (last 100 years) high mortality of trees in this zone of new pools (encircled zone on Figure 7.10) due to higher water levels.

Table 7.7 Statistics summary from application of the Delphi technique

La Grande - 3				
	S_{total} (1957), ha	S_{total} (2003), ha	S_{aqua} (1957), ha	S_{aqua} (2003), ha
Min	5.70	6.24	1.18	1.26
Mean	6.59	6.56	1.46	1.68
Median	6.55	6.56	1.49	1.72
Max	7.29	6.92	1.64	1.97
Stddev	0.50	0.22	0.17	0.25
Confidence interval ($\alpha = 0.05$, N=6, t=2.44)	[6.05, 7.13]	[6.33, 6.8]	[1.28, 1.65]	[1.42, 1.95]
Margin of error	0.54	0.24	0.18	0.27
Relative margin of error	8.21%	3.58%	12.51%	15.87%
Classification estimates	6.79	6.91	(1) 1.21 (2) 2.13	(1) 1.81 (2) 2.26

Laforge - 1				
	S_{total} (1957), ha	S_{total} (2006), ha	S_{aqua} (1957), ha	S_{aqua} (2006), ha
Min	1.30	1.48	0.47	0.43
Mean	1.42	1.61	0.51	0.55
Median	1.34	1.62	0.52	0.55
Max	1.63	1.70	0.55	0.61
Stddev	0.14	0.08	0.03	0.06
Confidence interval ($\alpha = 0.05$, N=6, t=2.44)	[1.28, 1.57]	[1.52, 1.7]	[0.49, 0.54]	[0.48, 0.61]
Margin of error	0.15	0.09	0.03	0.07
Relative margin of error	10.37%	5.61%	5.51%	12.34%
Classification estimates	1.34	1.66	(1) 0.44 (3) 0.48 (4) 0.61	(1) 0.51 (3) 0.54 (4) 0.65

Notes: (1) includes the area of objects of classes "Deep water", Shallow water" and "Water-vegetation";
 (2) includes the area of objects of classes "Deep water", Shallow water", "Water-vegetation" and "Vegetation-water";
 (3) includes the area of objects of classes "Deep water", Shallow water" and "Little pool";
 (4) includes the area of objects of classes "Deep water", Shallow water", "Water-vegetation", "Little pool" and "Vegetation-water";

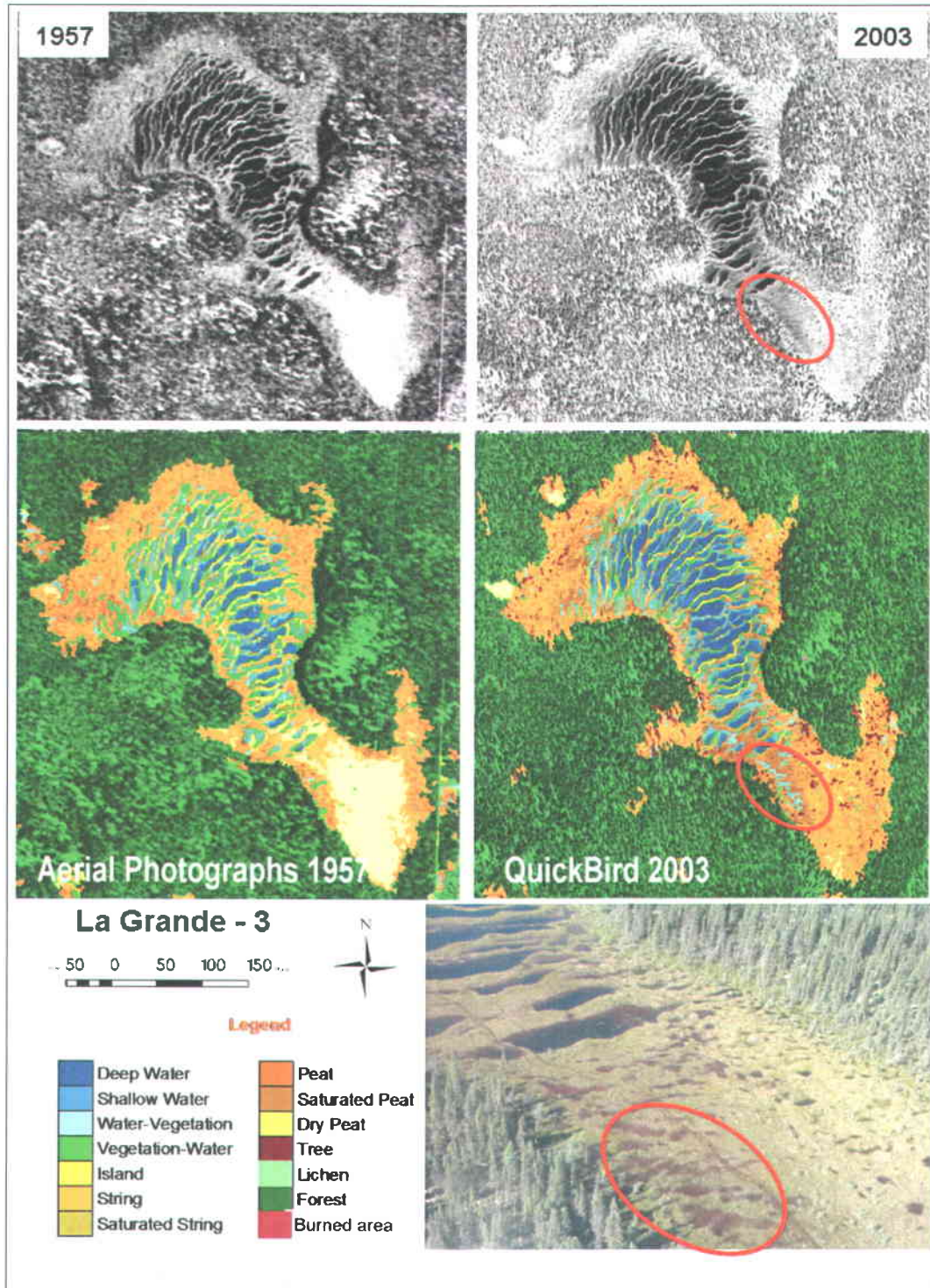


Figure 7.10 Aerial photograph mosaic (1957), corresponding QuickBird subscene (2003) and their classifications for one of the fens (La Grande-3) used for application of the Delphi techniques. The area encircled in red shows a zone of recently formed pools.

7.3.2.3 Transition between classes (“from-to” change detection)

Relative transition between classes over time for two peatlands, F23 and F30, is shown in Figure 7.11. Each column on the graphics represents the proportion of classes in 1957 which form the class in 2006.

In general, the pixels classified in 2006 as "Deep water" (the first column in the graphics) were classified on aerial photographs mosaic mainly as "Shallow water" (58.3% for F23 and 82.5 % for F30) and as "Water-vegetation" (36.1 % for F23 and 12.1 % for F30). The pixels of class "Shallow water" in 2006 were classified in 1957 as "Shallow water" (33.9% for F23 and 46.9% for F30) and as "Water-vegetation" (49.5 % for F23 and 40.4% for F30). About 50% of pixels classified in 2006 as "Water-vegetation" in 2006 were classified as terrestrial classes in 1957. More than 90% of the pixel of the class "Little pool" in 2006 was also classified as classes belonging to the semi-aquatic or terrestrial compartments

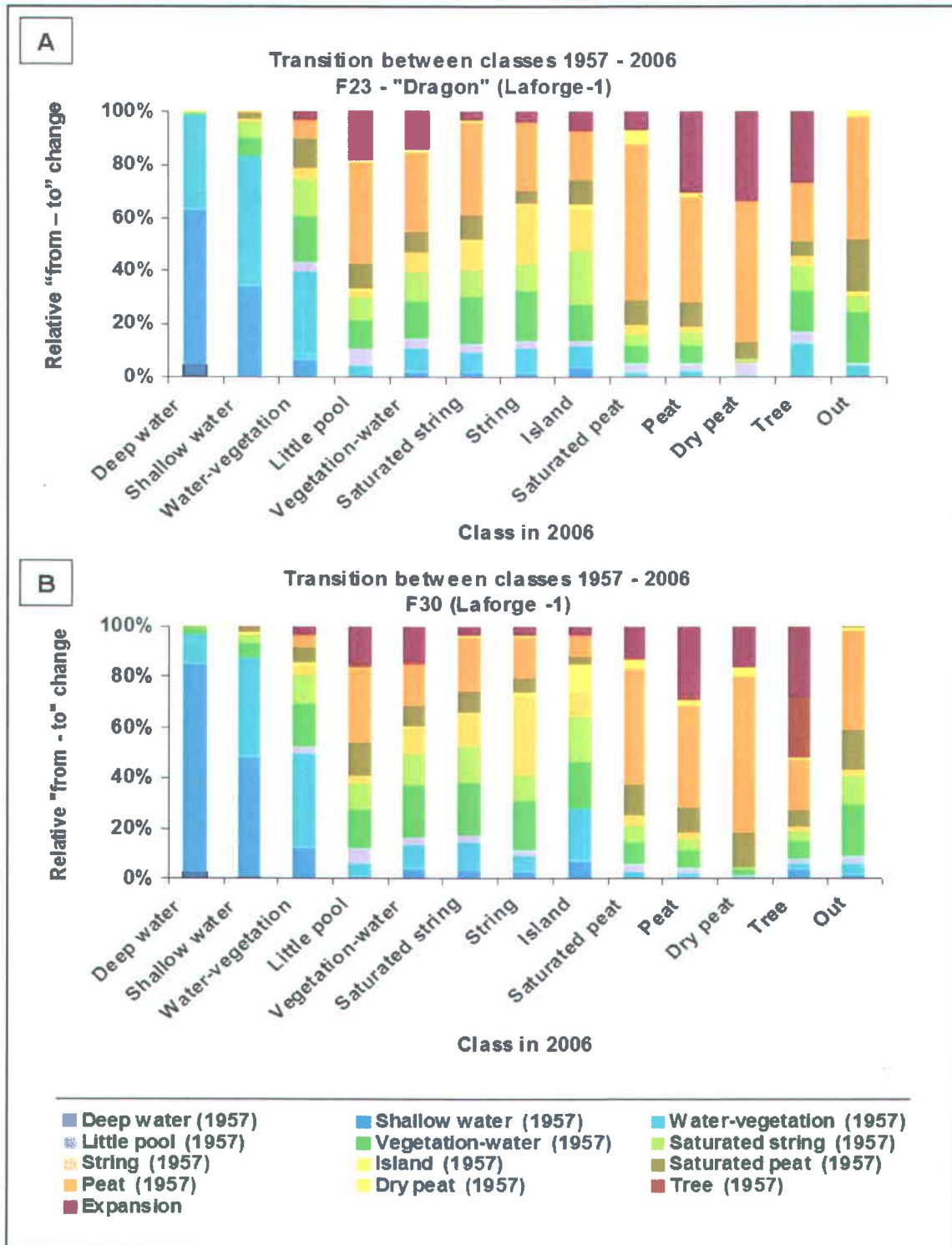


Figure 7.11 Transition between classes ("from-to" change detection) for 2 patterned fens a) F23 - which area of the aquatic compartment have increased over the 10 % threshold for the last 50 years and b) F30 - the largest patterned fen. Each column on the graphics represents the proportion of classes in 1957 which form the class in 2006.n

7.3.2.4 Spatial characteristics of the change

To visualize the spatial characteristics of change, land cover change map for two peatlands (F23 and F30) were produced. The land cover change information is resumed in Table 7.8. The change map for the largest patterned fen (F30) is presented in Figure 7.12. Taking in account only the conversion between 3 principal compartments (aquatic, semi-aquatic and terrestrial), 40.4% of the surface area for F23 (not illustrated) and 50.7% of the surface area for F30 did not undergo any change (without taking in consideration the modifications between the classes of the same compartment – e.g. case “Aquatic (1957) → More water (2006)”).

Table 7.8 Land cover change 1957 - 2006 for patterned peatlands F23 et F30

Change class	F23 Area (%)	F30 Area (%)
No change	31,7	40,3
Terrestrial (1957) → Semi-aquatic (2006)	19,8	10,9
Semi-aquatic (1957) → Aquatic (2006)	7,0	5,2
Aquatic (1957) → More aquatic (2006)	8,7	10,4
Terrestrial (1957) → Aquatic (2006)	2,7	1,5
Dry 2006	12,4	13,3
Expansion 2006	13,0	12,9
Contraction 2006	4,8	5,6

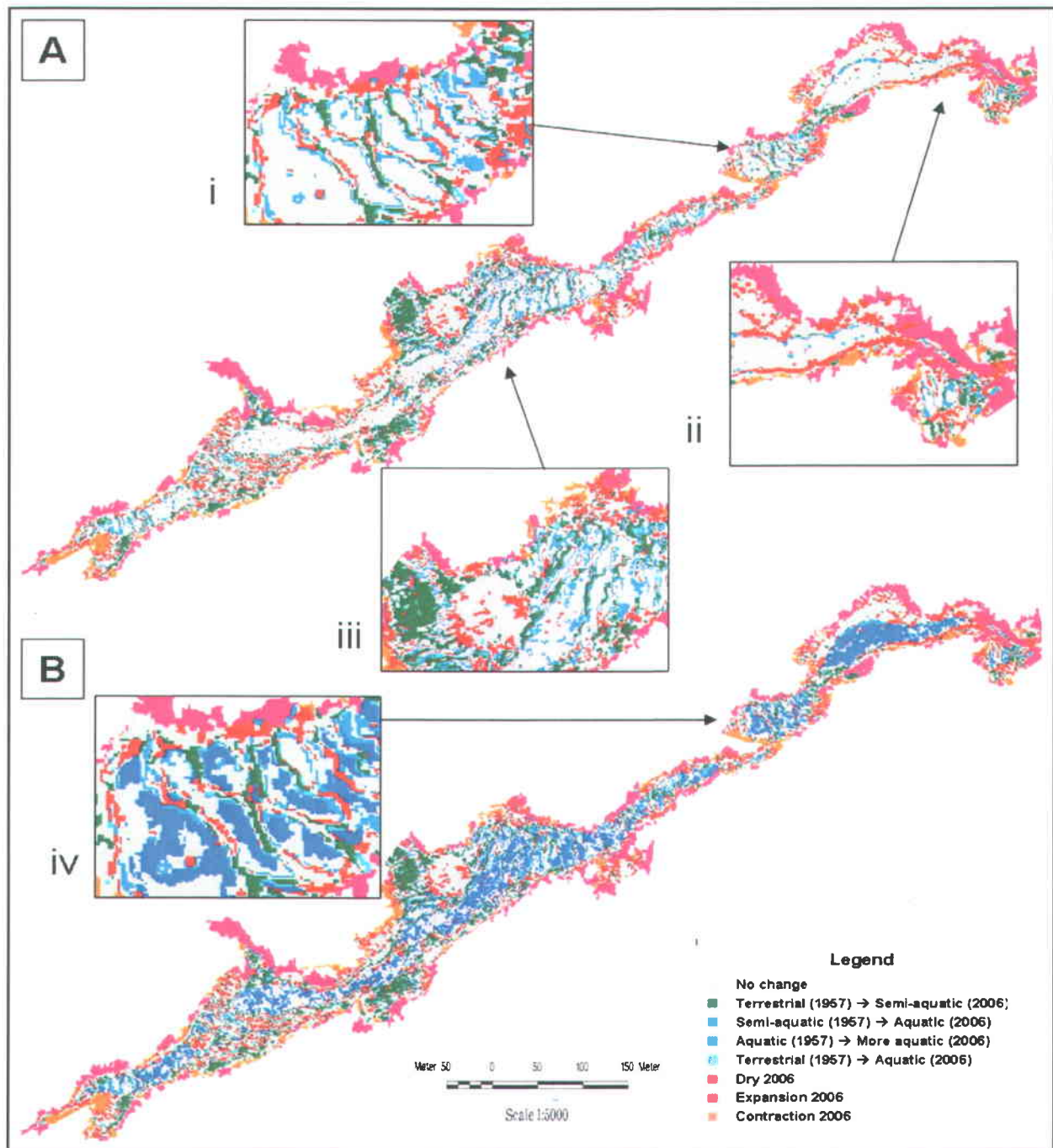


Figure 7.12 Land cover change maps for the peatland F30 (Laforge-1 study site) : A) the land cover conversions between the 3 principal compartments; B) the transition of objects of the aquatic compartment to "more aquatic" conditions (higher water table or more profound); i) in some sections, the observed transitions are due to imperfect coregistration of compared land cover maps; ii) peatlands expansion occurs mainly in the longitudinal direction (upstream and downstream) of fens or in the lateral areas where small streams enter or leave the peatlands; iii) some parts of the fens shows the predominance of the conversion to wetter conditions; iv) some parts of the larger pools underwent a transition to a class "More aquatic". while other parts of the same pools showed no change

However, for the purpose of this study, the changes between the classes of the aquatic compartment, including the transition Aquatic (1957) → More aquatic (2006), were taken into account because they are an indicator of higher water level or deepening of the pools. As shown in Figure 7.12B for the largest fen (F30), many objects of "Aquatic" classes in the large pools underwent a transition to a class "More aquatic". This transformation has been estimated at 8.7% of the surface area for F23 and 10.4% of the surface area for F30. These changes occurred mainly in small lakes formed within peatlands as well as in some parts of larger pools while other parts of the same aquatic pools showed no change (Figure 7.12B iv).

The Table 7.8 put in evidence the predominance of the conversion to wetter conditions (Terrestrial (1957) → Semi-aquatic (2006), Semi-Aquatic (1957) → Aquatic (2006), Terrestrial → Aquatic (2006)). In total, 29.5% of the area of F23 and 17.6% of the area of F30 has become wetter. In fact, many objects from terrestrial classes in 1957 ("Peat", "String") located around pools have become semi-aquatic ("Vegetation-water") or aquatic ("Water-vegetation", "Shallow water", "Deep water") in 2006. Small pools have appeared in areas that were terrestrial in 1957 which has become wetter in 2006.

Nevertheless, 12.4% of the surface area of F23 and 13.3% of the surface area of F30 have undergone a reverse transformation and became drier. As shown in Figure 7.12A and Figure 7.12B), along with the obvious signs of degradation of vegetation cover in the patterned fen F30, restoration and re-vegetation of degraded strings also occurs. However, such cases are rare. In most cases, these are the wet depressions (objects of class "Vegetation-water") that have become drier.

7.4 Discussion

The applied post-classification change detection method allowed to detect and highlight the changes in the structure of peatlands and to estimate their amplitude, nature and spatial features. It must be mentioned that the high accuracy of image classification, which varies between 89 % and 93 %, ensures accuracy > 79 % for the detection of the changes in three principal compartments. In fact, the change-detection accuracy is the product of the accuracies of the two compared maps (Mas, 1999; Coppin et al., 2004). Moreover, the results of the Delphi method have shown that our estimates of the surface area of both aquatic compartments and total area of fens are comparable to those obtained using photointerpretation.

Change in the total surface area

Analysis of change in the total peatland area has shown that most fens are expanding. The transition from forest to peatland is a sign of the gradual change in drainage conditions of the soil surrounding fens. This indicates that the paludification was an active process during the past 50 years. Paludification is a process requiring a positive water balance due to either an increase in water inputs (precipitation, runoff inputs, etc.) or by a decrease in outputs (evapotranspiration, runoff flow) (Charman, 2002). Paludification of the soil could be result of allogenic (e.g. climate, geomorphology) and/or autogenic factors (e.g. local peat accumulation) (Payette & Rochefort, 2001). However, the simultaneous expansion observed in 36 of 40 patterned fens suggests that climate is the main factor that promotes a positive water balance during the study period.

As shown by (Begin & Payette, 1988), the XXth century in northern Quebec was marked by an increase in wetness (increase in the water level of lakes and rivers) due to increased snowfall. In addition, in the region of La Grande-3 study site, several signs of recent permafrost degradation (subsidence of the ground surface, leaning trees, ponds formation) were observed during region overflights and on the images used for this study.

Several studies have reported an accelerated permafrost thaw in the zones of discontinuous and sporadic permafrost (Payette et al., 1976; Allard & K.-Seguin, 1987; Payette et al., 2004; Camill, 2005; Vallée & Payette, 2007; Thibault & Payette, 2009; Smith, 2011).

Melting permafrost could also affect regional hydrology (Les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010) and thus be in the origin of the positive water balance. For its part, the melting permafrost is a result of global warming and changes in precipitation regime due to increased snowfall (Payette et al., 2004; Vallée & Payette, 2007).

Change in the surface of the aquatic and semi-aquatic compartments

Unlike the changes in the total area of peatlands, the trend in the evolution of aquatic and semi-aquatic compartments was not so obvious. Our results indicate that structural changes were relatively more important in small fens < 2 ha. The areas of aquatic compartments could increase or decrease. The high relative change of the area of aquatic compartments was associated with the fens having very small number of pools with open water (objects of classes "Deep water", "Shallow water", "Water-vegetation" and "Little pool") and, therefore, the appearance or disappearance of some new objects of these classes produce high relative change.

Most large peatlands (> 2 ha) showed an increase in the area of the aquatic compartments. These results suggest that the trend of degradation of the vegetation cover is preserved in peatlands which already had large pools. The analysis of transition between classes for two of these large peatlands (F23 and F30) showed a predominance of conversion to more moist conditions. Many objects from terrestrial classes ("Peat", "String") in 1957 located around the pools have become semi-aquatic ("Vegetation-water") or aquatic ("Water-vegetation", "Shallow water", "Deep water") in 2006. In fact, about 50 % of pixels classified in 2006 as "Water-vegetation" are classified as terrestrial classes in 1957. This transformation suggests an increase in the water level and the expansion of the aquatic compartment either by the expansion of existing pools or by the formation of new pools. Moreover, more than 90% of the pixel of the class "Little pool" in 2006 was also classified as classes belonging to the semi-aquatic or terrestrial compartments. This transformation also suggests deepening of existing wet depressions as well as formation of new pools. The modifications between classes of the aquatic compartment (Aquatic (1957) - More aquatic (2006)) also indicate an increase in the water level or a deepening of existing pools.

However, the changes observed between the two dates could be a reflection of the difference in surface moisture conditions caused by weather conditions preceding image acquisition or by the natural seasonal difference between the two acquisition dates. In general, the water level and soil moisture status of peatlands can vary widely within a given period of the year or between years without being associated with real changes in the structure of peatlands. In the case of

precipitation preceding image acquisition, an increase in water level is expected. As it was shown by Dribault et al. (2012), the majority of surface hydrological changes due to rainfall have occurred along edges of the main pools and in temporary pools. In this context, it is important to note that the changes between the classes of the aquatic compartment discussed above occurred mainly in small lakes formed within peatlands as well as in some parts of larger pools while other parts (in the periphery) of the same pools showed no change (Figure 7.12B). This result suggests that it is rather the result of a deepening of pools than a general rise in the water level in pools due to precipitation.

Taking into account the results of Waddington & Roulet (2000) concerning the pools' carbon fluxes, it is natural to expect that pools continue to deepen. The authors estimated the rate of peat loss of about 3.5 mm per year in the pools, which corresponds to about 17.5 cm deepening of existing pools for a period of 50 years.

As shown in Figure 7.12A, the change is not unidirectional and varies in the different sections of the peatland. Along with the obvious signs of degradation of vegetation cover, restoration and re-vegetation of degraded strings also occurred (case « Dry », Table 7.7). However, such cases are rare. In most cases, these are the wet depressions (objects of class "Vegetation-water", semi-aquatic compartment) that have become drier. The results show that the area of the semi-aquatic compartment for most peatlands (19 of 30 peatlands for study area Laforge-1 and five of 10 in the region of La Grande-3 study site) decreased in 2006. As shown in Figure 7.8, part of this decrease is due to the transition between semi-aquatic and aquatic compartments, but it is principally due to the transition between semi-aquatic and terrestrial compartments, which is more evident for fens < 2 ha (F1 to F16).

It should be mentioned that some of the observed transitions are due to imperfect co-registration of compared land cover maps in some sections (Figure 7.12A(i)). This effect is most noticeable in areas with thin strings and is manifested by shifts with almost equivalent area in both directions. So we could assume that the values of 12.4 % (F23) and 13.3 % (F30), corresponding to the areas having undergone a transition to drier conditions, as the upper limit of errors due to co-registration of two maps. However, in reality, this error is much smaller and is associated only with certain areas in peatlands.

Aqualysis and climate

The analysis of precipitation data from the nearest weather stations shows that QuickBird image acquisition for the La Grande-3 site was preceded by low precipitation in the first part (1-17) of August 2003 (Figure 7.13B). Precipitations in July 2003 are close to the normal for the region (La Grande Rivière A). However, 2006 summer was very rainy. Although the one month sum of precipitation (from 26 May 1957 to 25 June 1957, $P = 110$ mm) preceding the acquisition of the aerial photographs is comparable with the one month sum of precipitation (from 3 August to 2 September 2006, $P = 103$ mm) preceding the acquisition of QuickBird image for Laforge-1 site, most probably wet conditions in July 2006 have influenced water table position. Nevertheless, it is possible that peat soil in 1957 was also saturated as the aerial photos were taken just after snowmelt which in these regions occurs typically in May (G. Carrer, pers. comm.). The 1956-1957 winter was colder and with less snow precipitation than normal for this region (Nitchequon). Nevertheless, it seems that snow melt was delayed because the average temperature in May ($T_{\text{May}} = -1.1$ ° C) was below the normal value ($T_n = 1.8$ ° C).

Thus, it is possible that the cooler and wetter conditions (rainfall + snowmelt + low evapotranspiration rate) in the moment of aerial photographs acquisition in 1957 are responsible for the higher proportion of semi-aquatic compartment for most of patterned fens.

Therefore, considering the environmental variables (precipitation, temperature) it might be supposed that the increase in the area of aquatic and semi-aquatic compartments as well as the deepening of pools observed in 2003 and in 2006 was rather the result of peatland's development specific for each one of them.

In general, in the case of hydrological changes caused by climate or weather conditions preceding image acquisition, a similarity in peatlands response is expected because of the positive correlation between water level and area of the aquatic and semi-aquatic compartments Dribault et al. (2012). However, regardless of the origin of forcing of the observed changes, the response of studied peatlands is complex and specific to each one. It seems that the development of the aquatic and semi-aquatic compartments of patterned fens as well as their short term hydrologic response (e.g. to the precipitation events), is controlled by factors that influence water retention and runoff of the peatlands.

The results of this study are consistent with the results from other paleoecological and hydrological studies of patterned peatlands that demonstrated the importance of peatland's characteristics on their response to hydroclimatic factors. Paleoecological studies (Foster et al.

1987; Foster et al. 1990; Karofeld, 1998; Charman, 2002; Loisel et al. 2010; Tremblay, 2010). of patterned peatlands have demonstrated the heterogeneity and complexity of the spatial and temporal response of peatlands in the changing conditions. Their studies show that there is variability from one site to another and the formation of pools is not synchronous, and was initiated by local factors that differ from one peatland to another.

The results of White (2011), based on the morphometry and pools distribution in 24 fens in the region of Laforge-1 hydroelectric reservoir are pointing in the same direction. The analysis of parameters that influence the development of the surface structure of peatlands, conducted by the author, shows that aqualysis is a complex phenomenon governed by several factors such as drainage area, slope, peatland structure and the thickness of the peat mouse.

The heterogeneity of the substrate can have a significant influence on the magnitude and direction of flow, the degree of soil saturation, the response of peatlands to dry or wet weather (Zeeb & Hemond, 1998). The slope, irregular microtopography, the presence of numerous pools and the geometry of the fen system play an important role in their hydrological behaviour (Price & Maloney, 1994). The fraction of the free water as well as the size and the disposition of the pools also influences directly the water retention and runoff (Tardif et al., 2009).

Dribault et al. (2012) have shown that the dynamics of water level and associated spatial seasonal dynamic of aquatic and semi-aquatic structures may vary along a single fen as well as between neighbor fens. In addition, the authors reported a lower spatial dynamics of aquatic and semi-aquatic compartments in the fens dominated by large well-defined pools (with sharp outline). This result could explain the higher variability in the change of the area of aquatic and semi-aquatic compartments observed in the fens < 2 ha where the proportion of the shallow pools with loose outlines is more important. The presence of pools with loose outline suggests a greater spatial dynamics of the aquatic and semi-aquatic compartments with rising of the water level, because the incoming water spreads rapidly on the surface of the peatland (White, 2011).

Apart from microtopography (proportion, depth, size and spatial arrangement of existing pools), other factors such as the surface gradient (Belyea, 2007), the peat,hydraulic properties as well as the vegetation assemblage and peat accumulation can interact on the hydrological behavior of peatlands. The type and distribution of vegetation affect the interception, the evapotranspiration, the peat porosity as well as the albedo (Ingram, 1983). As indicated by our results, the peatland area and the surrounding parameters (topography, dense forests, burned areas) could also influence water distribution in peatlands. This is the case of five peatlands (F8, F21, F27, F28 and F29) located near the burned areas that show the greatest degree of

difference with the current analysis (2006). This is mainly due to the increase of their surface during the last 50 years. The area of the aquatic compartments for patterned fens F8, F21 and F28 was also higher in 1957. It is important to note that unlike the main trend for the rest of patterned fens, the area of the class "Deep water" for the five peatland was higher in 1957 than in 2006. This result suggests that the recent fires could cause a rise in the water table in nearby peatlands and, subsequently, lead to their rapid expansion to the areas deforested by fire. Post-fire deforestation of the adjacent hills is associated with a decrease in evapotranspiration and interception by vegetation which result in an increase of the surface runoff, allowing most of the moisture to reach the nearby peatlands (Charman, 2002). Fire disturbance has a marked impact on snow distribution of nearby peatlands and could influence the amplitude of water level change (Payette & Delwaide, 2004).

The location of peatland within the watersheds also influences their hydrological response (Ingram, 1983). Lavoie et al. (2011) have stated the hypothesis that small bogs located in the headwaters and/or in small watersheds are very sensitive to hydroclimatic changes. It is also possible that the larger bogs are more resilient (have greater inertia) to hydroclimatic changes than smaller ones.

It is therefore reasonable to assume that all factors influencing the hydrological response in the short term (e.g. precipitation events) would also be responsible for the variable response of patterned peatlands to climate change.

7.5 Conclusion

The main goal of this study was to evaluate the recent change in the structure (based on the proportion of the aquatic and terrestrial compartments) of patterned fens in the La Grande River watershed using remote sensing techniques. An object-based multi-scale classification on recent (2003, 2006) VHR panchromatic QuickBird images and historical (1957) black and white aerial photographs was applied in order to create detailed land-cover maps for two study sites (La Grande-3 and Laforge-1) in northern Quebec. The object-based approach used in this study proved to be very effective for the semi-automated delineation of patterned peatlands and the detailed classification of their structure on the VHR panchromatic images and black-and-white aerial photographs. The method could successfully replace the traditional visual interpretation and manual delineation of peatlands on the monochromatic images.

The post-classification change analysis of classified images revealed a synchronous expansion of most of the studied patterned fens. This result suggests that climate-driven paludification has

been an active process during the last 50 years in the two study sites. However, the change in aquatic and semi-aquatic compartments is more complex, multidirectional and often asynchronous in different parts of the same peatland as well as between nearby peatlands. The aquatic compartments of small fens (< 2 ha) show more pronounced changes in both directions - positive (increase) and negative (decrease). Nevertheless, the surface of aquatic compartments for most of the largest peatlands (> 2 ha) increased in 2006. More over, most of patterned fens (8 out of 10) having large aquatic compartments ($S_a > 0,5$ ha) show a tendency to further degradation of the vegetation cover (i.e. increase of the area of the aquatic compartment).

Considering the environmental variables (precipitation, temperature) it might be supposed that the increase in the area of aquatic and semi-aquatic compartments as well as the deepening of pools observed in 2003 and in 2006 was rather the result of peatland's development specific for each one of them. It seems that pool's formation and development is not a direct response to the hydroclimatic change but rather result of the interaction between climate and the physical and hydrological characteristics of peatland that influence water retention and runoff. The peatland size and the environmental parameters (e.g. topography, dense forests, and burned areas) could also influence the distribution of water in peatlands.

The developed method has allowed to detect structural changes in 40 patterned fens since 50 years and showed the complexity of the process. The results have not confirmed or denied the assumption made on recent (the last 50 years) degradation of the vegetation cover of the patterned fens in the La Grande complex and their gradually transformation into aquatic ecosystems. In addition, the time period covered by this study (50 years) is too short to conclude on recent intensification of the aqualysis phenomenon. However, the detailed classification of the studied fens provided an overview of the state of aqualysis on regional scale. The results of this study could be the base for further more detailed analysis of the hydrological reaction of peatlands and the role of their characteristics.

7.6 Acknowledgements

We would like to thank Yves Gauthier, Jimmy Poulin, Yann Dribault, Yannick Duguay, Thomas Bergeron and Kim Huang Huong, all from the Institut National de la Recherche Scientifique, to participate in application of Delphi method as experts of remote sensing of water resources. Professor Karem Chokmani (INRS-ETE) is also thanked for valuable discussions. This research was realised with financial support of the Natural Sciences and Engineering Research Council, Consortium Ouranos and Hydro-Quebec and is contribution to the Boreal Peatland Aqualysis Project.



RÉFÉRENCES

- Allard M & K.-Seguin M (1987) Le pergélisol au Québec nordique: bilan et perspectives. *Géographie physique et Quaternaire*. 41(1): 141-152.
- Arlen-Pouliot Y (2009) *Développement holocène et dynamique récente des tourbières minérotrophes structurées du haut-boreal québécois*. Thèse de doctorat (Université Laval, Québec). 126 p <http://www.erudit.org/these/liste.html?src=Laval&typeIndex=facetteLettreNomAuteur&lettre=A&page=2>.
- Baatz M, Benz U, Dehghani S, Heynen M, Höltje A, Hofmann P, Lingenfelder I, Mimler M, Sohlbach M, Weber M & Willhauck G (2004) *eCognition User Guide 4*. www.definiens-imaging.com (consulté le 2 février 2005)
- Baatz M & Schape A (2000) Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT Symposium*. (Salzburg) Strobl J & Blaschke T (Édit.) Herbert Wichmann Verlag, Salzburg, p. 12-23.
- Baraldi A & Parmiggiani F (1995) An investigation of the textural characteristics associated with grey-level cooccurrence matrix statistical parameters. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 33(2): 293-304.
- Barber KE (1981) *Peat stratigraphy and climate change: a paleoecological test of the theory of cyclic bog regeneration*, Balkema, Rotterdam. 219 p.
- Beaulieu-Audy V, Garneau M, Richard PJH & Asnong H (2009) Holocene palaeoecological reconstruction of three boreal peatlands in the La Grande Riviere region, Quebec, Canada. *The Holocene*. 19(3): 459-476.
- Begin Y & Payette S (1988) Dendroecological evidence of lake-level changes during the last three centuries in subarctic Quebec. *Quaternary Research*. 30(2): 210-220.
- Belyea LR (1999) A novel indicator of reducing conditions and water-table depth in mires. *Functional Ecology*. 13(3): 431-434.
- Belyea LR & Clymo RS (2001) Feedback control of the rate of peat formation. *Proceedings of the Royal Society of London: Series B - Biological Sciences*. 268(1473): 1315-1321.
- Belyea LR & Lancaster J (2002) Inferring landscape dynamics of pools from scaling relationships and spatial patterns. *Journal of Ecology*. 90(2): 223-234.
- Belyea LR & Malmer N (2004) Carbon sequestration in peatland: patterns and mechanisms of response to climate change. *Global Change Biology*. 10(7): 1043-1052.
- Belyea LR (2007) Climatic and topographic limits to the abundance of bog pools. *Hydrological processes*. 21(5): 675-687.
- Benson BJ & MacKenzie MD (1995) Effects of sensor spatial resolution on landscape structure parameters. *Landscape Ecology*. 10(2): 113-120.
- Benz U, Hofmann P, Willhauck G, Lingenfelder I & Heynen M (2004) Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 58: 239-258.

- Bernier M, Ghedira H, Gautier Y, Magagi R, Filion R, De Seve D, Ouarda T, Villeneuve J-P & Buteau P (2003) Détection et classification de tourbières ombrotrophes du Québec à partir d'images RADARSAT-1. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 29(1): 88-98.
- Blaschke T (2005) Towards a framework for change detection based on image objects. *Göttinger Geographische Abhandlungen*, Erasmi S, Cyffka B & Kappas M (Édit.), Göttingen. p. 1-9.
- Bootsma A & Ballard M (1997) *A national ecological framework for Canada. Appendix 1: Canadian ecodistrict climate normals 1961-1990 overview*. Agriculture and Agri-Food Canada, http://sis.agr.gc.ca/cansis/nsdb/ecostrat/climate_normals_1961-90_compilation.html (consulté le 11 juin 2008)
- Burnett C, Aaviksoo K, Lang S, Langanke T & Blaschke T (2003) An Object-based Methodology for Mapping Mires Using High Resolution Imagery. *Ecohydrological Processes In Northern Wetlands*. (Tallinn) Järvet A & Lode E (Édit.), p. 239-244.
- Burnett C & Blaschke T (2003) A multi-scale segmentation / object relationship modelling methodology for landscape analysis. *Ecological Modelling*. 168(3): 233-249.
- Buteau P, Dignard N & P. Grondin (1994) *Système de classification des milieux humides du Québec*. MB 94-01, Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles du Québec
- Camill P (2005) Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late-20th century climate warming. *Climatic Change*. 68: 135-152.
- Charman D (2002) *Peatlands and environmental change*, John Wiley and Sons, West Sussex, England. 301 p.
- Chiu W-Y & Couloigner I (2004) Evaluation of incorporating texture into wetland mapping from multispectral images. *EARSel eProceedings*, p. 363-371.
- Chiu W-Y & Couloigner I (2006) Modified fuzzy c-means classification technique for mapping vague wetlands using Landsat ETM+ imagery. *Hydrological Processes*. 20(17): 3623-3634.
- Cliche-Trudeau N, Garneau M & Pelletier L (2012) Methane fluxes from a patterned fen of the northeastern part of the La Grande river watershed, James Bay, Canada. *Biogeochemistry*. published online
- Coburn CA & Roberts ACB (2004) A Multiscale Texture Analysis Procedure for Improved Forest Stand Classification. *International Journal of Remote Sensing*. 25(20): 4287-4308.
- Collins M (2005) *Caractérisation des tourbières et suivi historique des unités morphologiques de surface en lien avec le climat dans le bassin versant de la Rivière La Grande au Québec*. Mémoire de maîtrise (Université du Québec à Montréal, Montréal).
- Congalton RG & Green K (1999) *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*, CRC Press, Boca Raton, Florida. 137 p.
- Coppin P, Jonckheere I, Nackaerts K & Muys B (2004) Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*. 25(9): 1565-1596.
- Curran P & Atkinson PM (1999) Issues of scale and optimal pixel size. In *Spatial Statistics for Remote Sensing*, Stein A, van der Meer F & Gorte B (Édit.) Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. p. 57-81.

- Dahl TE (2000) *Status and trends of wetlands in the conterminous United States 1986 to 1997*. U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington, D. C., 82 p.
- Dahl TE & Watmough MD (2007) Current approaches to wetland status and trends monitoring in prairie Canada and the continental United States of America. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 33(Suppl. 1): S17-S27
- Damman A (1979) Geographic patterns in peatland development in eastern North America. *Dans: Proceedings of the International Symposium on Classification of Peat and Peatlands*. International Peat Society. (Hyytiäinen, Finland), p. 42-57.
- Dechka JA, Franklin SE, Watmough MD, Bennett RP & Ingstrup DW (2002) Classification of wetland habitat and vegetation communities using multitemporal Ikonos Imagery in southern Saskatchewan. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 28(5): 679-685.
- Dedieu J-P, Kerkache R, Borbicchia F & Pella H (1997) Apport des informations de texture en télédétection pour l'étude de l'occupation des sols. *Revue de Géographie Alpine*. 3: 9-26.
- DesJarlais C, Bourque A, Décoste R, Demers C, Deschamps P & Lam K.-H. (2004) S'adapter aux changements climatiques. ISBN 2-923292-00-6, Ouranos (Édit.) Ouranos, Montreal, 83 p.
- Dissanska M, Bernier M & Payette S (2009) Object-based classification of very high resolution panchromatic images for evaluating recent change in the structure of patterned peatlands. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 35(2): 189-215.
- Dissanska M, Bernier M & Payette S (2011a) Assessment of the recent change in the structure of patterned fens in the La Grande River watershed using remote sensing techniques. *Proceedings of the first joint meeting of the Canadian Quaternary Association (CANQUA) and the Canadian Chapter of the International Association of Hydrogeologists (IAH-CNC) GeoHydro 2011: Water and earth: The junction of Quaternary Geoscience and Hydrogeology*. (Québec, 29-31 août 2011)
- Dissanska M, Bernier M, Rousseau AN, Chokmani K & Jutras S (2007) *Étude de la connectivité physique des tourbières au réseau hydrographique du bassin versant de la Grande Rivière à l'aide d'une classification orientée objet d'images Landsat-7 ETM+*. Rapport de recherche No R927, INRS-ETE, Québec
- Dribault Y, Chokmani K & Bernier M (2012) Monitoring seasonal hydrological dynamics of minerotrophic peatlands using multi-date GeoEye-1 very high resolution imagery and object-based classification. *Remote Sensing*. 4: 1887-1912.
- Durrieu M, Ruiz LA & Balaguer A (2005) Analysis of geostatistical parameters for texture classification of satellite images. *Global Developments in Environmental Earth Observation from Space, 25 th Symposium of EARSeL*. (Porto, Portugal, 6-11 June 2005)
- Engstrom DR (1984) Lake development in the boreal peatlands of southeastern Labrador, Canada. *Arctic and Alpine Research*. 16(4): 447-452.
- Foster DR & Fritz SC (1987) Mire Development, Pool Formation and Landscape Progresses on Patterned Fens in Dalarna, Central Sweden. *The Journal of Ecology*. 75(2): 409-437.
- Foster DR, King GA, Glaser PH & Wright Jr. HE (1983) Origin of string patterns in boreal peatlands. *Nature*. 306: 256-258.

- Foster DR & Wright HE (1990) Role of Ecosystem Development and Climate Change in Bog Formation in Central Sweden. *Ecology*. 71(2): 450-463.
- Fournier RA, Grenier M, Lavoie A & Hélie R (2007) Towards a strategy to implement the Canadian Wetland Inventory using satellite remote sensing. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 33(Suppl. 1): s1-s16
- Franklin SE, Wulder MA & Gerylo GR (2001) Texture analysis of IKONOS panchromatic data for Douglas-fir forest age class separability in British Columbia. *International Journal of Remote Sensing*. 22(13): 2676-2632.
- Fuller LM, Morgan TR & Aichele SS (2006) *Wetland Delineation with IKONOS High-Resolution Satellite imagery, Fort Custer Training Center, Buttle Creek, Michigan, 2005*. Scientific Investigations Report 2006-5051, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 8 p.
- Gillmer DS, Work EAJ, Colwell JE & Rebel DL (1980) Enumeration of prairie wetlands with Landsat and aircraft data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 46: 631-634.
- Glaser PH, Hansen BCS, Siegel DI, Reeve AS & Morin PJ (2004) Rates, pathways and drivers for peatland development in the Hudson Bay Lowlands, northern Ontario, Canada. *Journal of Ecology*. 92: 1036-1053.
- Glaser PH & Janssens JA (1986) Raised bogs in eastern North America: transitions in landforms and gross stratigraphy. *Canadian Journal of Botany*. 64: 395-415.
- Glenn MS & Woo M-K (1997) Spring and summer hydrology of a valley-bottom wetland, Ellesmere Island, Northwest Territories, Canada. *Wetlands*. 17(2): 321-329.
- Gore AJP (1983) *Ecosystems of the world. Mires: swamp, bog, fen and moor*, Elsevier, Amsterdam.
- Gorham E (1991) Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*. 1(2): 182-195.
- Grenier M, Demers A-M, Labrecque S, Benoit M, Fournier RA & Drolet B (2007) An object-based method to map wetland using RADARSAT-1 and Landsat ETM images: test case on two sites in Quebec, Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 33(Suppl.1): S28-245.
- Grenier M, Labrecque S, Garneau M & Tremblay A (2008) Object-based classification of a SPOT-4 image for mapping wetlands in the context of greenhouse gases emissions: the case of the Eastmain region, Québec, Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 34(S2): S398-413.
- Groupe de travail national sur les terres humides (1997) *Système de classification des terres humides du Canada*, Université de Waterloo, Waterloo (Ontario).
- Guindon B (1997) Computer-Based Aerial Image Understanding: A Review and Assessment of its Application to Planimetric Information Extraction from Very High Resolution Satellite Images. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 23(1): 38-47.
- Guindon B (2000) Combining Diverse Spectral, Spatial and Contextual Attributes in Segment-Based Image Classification. *Proceedings of the ASPRS 2000 Annual Conference*. (Washington, D.C)

- Halounova L (2004) The automatic classification of B&W aerial photos. *XX th ISPRS Congress "Geo-Imagery Bridging Continents"*. (Istanbul, Turkey, 12-23 July 2004)
- Halsey LA, Vitt DH & Bauer IE (1998) Peatland initiation during the Holocene in continental Western Canada. *Climatic Change*. 40: 315-342.
- Hamilton SK, Melack JM, Goodchild MF & Lewis JrWM (1991) Estimation of the fractal dimension of terrain from lake size distributions. In *Lowland Floodplain Rivers: Geomorphological Perspectives*. Carling PA & Petts GE (Édit.) Wiley & Sons Ltd, p. 145-163.
- Haralick RM, Shanmugam K & Dinstein I (1973) Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. SMC-3(6): 610-621.
- He H & Collet C (1999) Combining spectral and textural features for multispectral image classification with artificial neural networks. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. (Valladolid, Spain, 3-4 June 1999)
- Hefner Jm & Storrs CG (1994) Classification and inventory of wetlands in the Southern Appalachian Region. *Water, Air, & Soil Pollution*. 77(3-4): 209-216.
- Hilbert DH, Roulet N & Moore T (2000) Modelling and analysis of peatlands as dynamical systems. *Journal of Ecology*. 88: 230-242.
- Hubert-Moy L, Michel K, Corpetti T & Clément B (2006) Object-oriented mapping and analysis of wetlands using SPOT 5 data. *IGARSS 2006 IEEE International*. (Denver, USA, 31 July - 04 August)
- Huckle JM, Marrs RH & Potter JA (2004) Spatial and temporal changes in salt marsh distribution in the Dee estuary, NW England, determined from aerial photographs. *Wetlands Ecology and Management*. 12: 483-498.
- Ingram HAP (1983) Hydrology. In *Ecosystems of the world, 4A. Mires: Swamp, Bog, Fen and Moor*, Gore A.J.P. (Édit.) Elsevier, Amsterdam. p. 67-158.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M. & Miller HL (Édit.) Cambridge University Press, New York, NY, USA, 996 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001) *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ & White KS (Édit.) Cambridge University Press, New York, N.Y., U.S.A, 1032 p.
- Ivanov KE (1981) *Water movement in mirelands (transl. by Thomson, A. & Ingram, H. A. P.)*, Academic Press, London.
- Jacques D & Hamel C (1982) *Système de classification des terres humides du Québec*. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Québec, Canada, 131 p.
- Jakomulska A & Clarke KC (2000) Variogram derived measures of textural image classification. *Proceedings of the Third European Conference on Geostatistics for Environmental Applications geoENV2000*. (Avignon, France, 22-24 November) Monestiez P, Allard D & Froidevaux R (Édit.) Kluwer Academic Publisher, p. 181-202.

- Janssens JA, Hansen BCS, Glaser PH & Whitlock C (1992) Development of Raised-Bog Complex, Chapter 13. *In: The patterned peatlands of Minnesota*. University of Minnesota Press, p. 189-203.
- Jensen JR (2005) *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*, 3rd edn. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA. 526 p.
- Johansen K, Coops NC, Gergel S & Stange Y (2007) Application of high spatial resolution satellite imagery for riparian and forest ecosystem classification. *Remote Sensing of Environment*. 110: 29-44.
- Karofeld E (1998) The dynamics of the formation and development of hollows in raised bogs in Estonia. *The Holocene*. 8(6): 697-704.
- Kayitakire F, Hamel C & Defourny P (2006) Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*. 102: 390-401.
- Kirby J & Beaulieu J (2006) *Rapport méthodologique de la cartographie des milieux humides du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec*. No. Q2006-2f, Canards Illimités, Québec, 40 p.
- Kuhry P (2004) Wetlands, peat deposits and climate change. *Proceedings of the Advanced Course IRISEN II (Integrated Regional Impact Studies in the European North: Basic Issues, Methodologies and Regional Climate Modelling - II)*. (Abisko, Sweden) Lange MA & Poszig D (Édit.) University of Münster, Münster, p. 229-235.
- Kuhry P, Nicholson BJ, Gignac LD, Vitt DH & Bayley SE (1993) Development of *Sphagnum*-dominated peatlands in boreal continental Canada. *Canadian Journal of Botany*. 71: 10-22.
- Lathrop RG, Montesano P, Tesauro J & Zarate B (2005) Statewide mapping and assessment of vernal pools: A New Jersey case study. *Journal of Environmental Management*. 76(3): 230-238.
- Lavoie M, Pellerin S & Larocque M (2011) Holocene dynamics of two temperate peatlands: paleohydrological implications. *GeoHydro 2011. Joint meeting of the Canadian Quaternary Association and the Canadian Chapter of the International Association of Hydrogeologists*. (Quebec, 29-31 août 2011)
- Les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada (2010) La glace dans l'ensemble des biomes. *Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010*. Conseils canadiens des ministres des ressources, Ottawa, (Ont.), 148 p.
- Linstone HA & Turoff M (1975) *The Delphi Method: Techniques and Applications*, Addison-Wesley, Boston. 620 p.
- Loisel J & Garneau M (2010) Late Holocene paleoecohydrology and carbon accumulation estimates from two boreal peat bogs in eastern Canada: Potential and limits of multi-proxy archives. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 291: 493-533.
- Macleod RD & Congalton RG (1998) A quantitative comparison of change-detection algorithms for monitoring eelgrass from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 64: 207-216.
- Mas J-F (1999) Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*. 20(1): 139-152.

- May D, Wang J, Kovacs JM & Muter M (2003) Mapping wetland extent using IKONOS Satellite Imagery of the O'Donnell Point Region, Georgian Bay, Ontario. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 25th Canadian Symposium on Remote Sensing*. (Montreal, Quebec, 14-17 October 2003) CASI, Ottawa, Ontario
- McEnroe NA, Roulet NT, Moore TR & Garneau M (2009) Do pool surface area and depth control CO₂ and CH₄ fluxes from an ombrotrophic raised bog, James Bay, Canada? *Journal of Geophysical Research (Biogeosciences)*. 114(1): 9 pp.
- Milton GR & Hélie R (2003) Chapter 3: Wetland Inventory and Monitoring: Partnering to Provide A National Coverage. In: *Wetlands Stewardship in Canada*, Clayton D. & Rubec A (Édit.). North American Conservation Council (Canada), Ottawa, Canada.
- Moore PD & Bellamy DJ (1974) *Peatlands*, Elek Scientific Books Ltd, London.
- Moore TR, Roulet NT & Waddington JM (1998) Uncertainty in predicting the effect of climatic change on the carbon cycling of Canadian peatlands. *Climatic Change*. 40(2): 229-245.
- Mortsch L (1990) *Terres humides boréales et sub-arctiques de l'est canadien: un document de référence*. Service de l'environnement atmosphérique, Toronto, Ontario, 189 p.
- Niklas KJ (1994) *Plant allometry: The scaling of form and process.*, University of Chicago Press, Chicago.
- Ouranos (2010) *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. DesJarlais C, Allard M, Bélanger D, Blondlot A, Bouffard A, Bourque A, Chaumont D, Gosselin P, Houle D, Larrivée C, Lease N, Pham AT, Roy R, Savard J-P, Turcotte R. & Villeneuve C (Édit.) Ouranos, Montréal, 128 p.
- Ozesmi SL & Bauer ME (2002) Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands ecology and Management*. 10: 381-402.
- Parish F, Sirin A, Charman D, Joosten H, Minayeva T, Silvius M & Stringer L (2008) *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate change*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur & Wetlands International, Wageningen
- Payette S (1984) Peat inception and climatic change in Northern Quebec. *Climatic changes on a yearly to millennial basis*, Mörner NA & Carlen W (Édit.) Reidel Publishers, Dordrech, Nitherlands.
- Payette S (2005) Les principaux types de tourbières. Dans *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*, Payette S & Rochefort L (Édit.) 2 edn. Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada. p. 39-89.
- Payette S & Delwaide A (2004) Dynamics of Subarctic wetland forests over the past 1500 years. *Ecological Monographs*. 74 (3): 373-391.
- Payette S, Delwaide A, Caccianiga M & Beauchemin M (2004) Accelerated thawing of subarctic peatland permafrost over the last 50 years. *Geophysical Research Letters*. 31(L18208)
- Payette S & Filion L (1993) Holocene water-level fluctuations of a subarctic lake at the tree line in northern Quebec. *Boreas*. 22: 7-14.
- Payette S, Garneau M, Bernier M & St-Hilaire A (2004) *Aqualyse des tourbières du complexe LaGande et changements climatiques*. Proposition de recherche.
- Payette S & Rochefort L (2001) *Écologie des tourbières du Québec-Labrador.*, Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada. 621 p.






- Payette S, Samson H & Lagarec D (1976) The evolution of permafrost in the taiga and forest-tundra. Western Québec-labrador peninsula. *Canadian Journal of Forest Research*. 6: 203-220.
- Pellerin S & Lavoie C (2003) Reconstructing the recent dynamics of mires using a multitechnique approach. *Journal of Ecology*. 91: 1008-1021.
- Pelletier L, Garneau M & Moore TR (2011) Variation in CO₂ exchange over three summers at microform scale in a boreal bog, Eastmain region, Québec, Canada. *Journal of Geographical Research*. 116: G03019
- Pelletier L, Moore T, Roulet N, Garneau M & Beaulieu-Audy V (2007) Methane fluxes from three peatlands in the La Grande Riviere Watershed, James Bay lowland, Canada. *Journal of geophysical research*. 112: 1-12.
- Poulin M, Careau D, Rochefort L & Desrocher A (2002) From Satellite imagery to peatland vegetation diversity: How reliable are habitats maps? *Conservation Ecology*. 6(2): 16
- Price JS (2001) L'hydrologie. Dans *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*, Payette S & Rochefort L (Édit.) Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada. p. 141-158.
- Price JS & Maloney DA (1994) Hydrology of a patterned bog-fen complex in southeastern Labrador, Canada. *Nordic Hydrology*. 25: 313-330.
- Price J. S., Maloney DA & Downey FG (1991) Peatlands of the Lake Melville coastal plain, Labrador. *Northern Hydrology Selected Perspectives: Proc. of the Northern Hydrology Symposium*. (Saskatoon, SK, Canada, 10-12 July 1990) National Hydrology Research Institute, p.293-302.
- Quinton WL, Hayashi M & Pietroniro A (2003) Connectivity and storage functions of channel fens and flat bogs in northern basins. *Hydrological Processes*. 17: 3665-3684.
- Quinton WL & Roulet NT (1998) Spring and summer runoff hydrology of a subarctic patterned wetland. *Arctic and Alpine Research*. 30(3): 285-294.
- Racine M-J, Bernier M & Ouarda T (2005) Evaluation of RADARSAT-1 images acquired in fine mode for the study of boreal peatlands: a case study in James Bay, Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 31(6): 450-467.
- Rietkerk M, Dekker SC, Wassen MJ, Verkroost AWM & Bierkens MFP (2004) A Putative Mechanism for Bog Patterning. *The American Naturalist*. 163(5): 699-708.
- Roulet NT & Woo MK (1988) Runoff generation in a low Arctic drainage basin. *Journal of Hydrology*. 101: 213-226.
- Rouse WR (1998) A water balance model for a subarctic sedge fen and its application to climate change. *Climatic Change*. 38: 207-234.
- Roy R (2004) Impacts des changements climatiques sur la disponibilité des ressources hydriques. *Symposium Ouranos*. (Montréal)
- Scott KJ, Kelly CA & Rudd JWM (1999) The importance of floating peat to methane fluxes from flooded peatlands. *Biogeochemistry*. 47: 187-202.
- Seppälä M & Koutaniemi L (1985) Formation of a string and pool topography as expressed by morphology, stratigraphy and current processes on a mire in Kuusamo, Finland. *BOREAS*. 14: 287-309.
- Skulmoski GJ, Hartman FT & Krahn J (2007) The Delphi method for graduate research. *Journal of Information Technology Education*. 6(2): 1-20.

- Smith S (2011) *Tendances relatives aux conditions du pergélisol et à l'écologie dans le nord du Canada. Biodiversité canadienne: état et tendances des écosystèmes en 2010*. Rapport technique thématique no 9, Conseils canadiens des ministres des ressources, Ottawa, (Ont.), 23 p.
- Strack M, Waller MF & Waddington JM (2006) Sedge succession and peatland methane dynamics: A potential feedback to climate change. *Ecosystems*. 9: 278-287.
- Sugumaran R, Harken J & Gerjevic J (2004) *Using Remote Sensing Data to Study Wetland Dynamics in Iowa*. Iowa Space Grant (Seed) Final Technical Report. IA-50614, Department of Geography, University of Northern Iowa, Cedar Falls, 17 p.
- Talbot J, Richard PJH, Roulet NT & Booth RT (2010) Assessing long-term hydrological and ecological responses to drainage in a raised bog using paleoecology and a hydrosequence. *Journal of Vegetation Science*. 21: 143-156.
- Tardif S, St-Hilaire A, Roy R, Bernier M & Payette S (2009) Statistical properties of hydrographs in minerotrophic fens and small lakes in mid-latitude Quebec, Canada. *Canadian Water Resources Journal*. 34(4): 365-380.
- Tarnocai C (2006) The effect of climate change on carbon in Canadian peatlands. *Global and Planetary Change*. 53: 222-232.
- Tarnocai C, Kettles IM & Lacelle B (2000) Peatlands of Canada. Open File 3834, (digital database), Geological Survey of Canada, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario
- Thibault S & Payette S (2009) Recent permafrost degradation in bogs of the James Bay area, northern Québec, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*. 20: 383-389.
- Todd AK, Buttle JM & Taylor CH (2006) Hydrologic dynamics and linkages in a wetland-dominated basin. *Journal of Hydrologic*. 319: 15-35.
- Toutin T (2004) Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*. 25(10): 1893-1924.
- Töyrä J, Pietroniro A & Martz L (2001) Multisensor hydrologic assessment of a freshwater wetland. *Remote Sensing of Environment*. 75: 162-173.
- Trainor K & Church M (1996) *Lake morphometry assessment and characterisation*. Final report, University of British Columbia, Department of Geography, Vancouver, B.C., 45 p.
- Tremblay L (2010) *Reconstitution paléoécologique du développement des mares dans deux tourbières minérotrophes structurées du Québec subarctique*. Mémoire de maîtrise (Université de Québec à Montréal, Montréal). 148 p.
- Tso B & Olsen RC (2004) Scene classification using combined spectral, textural and contextual information. *Proceedings of SPIE " Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral and Ultraspectral Imagery X"*. (Orlando, FL, USA, 12 April 2004) Shen SS & Lewis PE (Édit.), p.135-146.
- Vallée S & Payette S (2007) Collapse of permafrost mounds along a subarctic river over the last 100 years (northern Québec). *Geomorphology*. 90: 162-170.
- Van Bellen S & Garneau M (2011) Long-term increasing water levels in subarctic fens of the Laforge region, Quebec: timing and potential driving factors . *Proceedings of the first joint meeting of the Canadian Quaternary Association (CANQUA) and the Canadian Chapter of the International Association of Hydrogeologists (IAH-CNC) GeoHydro 2011: Water and Earth: The junction of Quaternary Geoscience and Hydrogeology*. (Quebec, 29-31 août 2011)



- Volpe F. (2003) Geometrical Processing of QuickBird High Resolution Satellite Data. *ISPRS Hannover Workshop. High Resolution Mapping from Space*. (Hannover, Germany, 6-8 October 2003)
- Waddington JM & Roulet NT (2000) Carbon balance of boreal patterned peatland. *Global Change Biology*. 6: 87-97.
- Weltzin JF, Pastor J, Harth C, Bridgham SD, Updegraff K & Chapin C (2000) Response of bog and fen plant communities to warming and water-table manipulations. *Ecology*. 81(12): 3464-3478.
- White M (2011) *Modèle de développement des tourbières minérotrophes aqualysées du Haut-Boréal québécois*. Mémoire de maîtrise (Université Laval, Québec). 77 p.
- Woodcock CE & Strahler A (1987) The Factor of Scale in Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment*. 21: 311-332.
- Yohay C & Ronen K (1998) Computerized classification of Mediterranean vegetation using panchromatic aerial photographs. *Journal of Vegetation Science*. 9: 445-454.
- Yoshikawa K & Hinzman LD (2003) Shrinking Thermokarst Ponds and Groundwater Dynamics in Discontinuous Permafrost near Council, Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes*. 14: 151-160.
- Yu Z, Loisel J, Brosseau DP, Beilman DW & Hunt SJ (2010) Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophysical Research Letters*. 37: L13402
- Zadeh LA (1965) Fuzzy sets. *Information and Control*. 8(3): 338-353.
- Zeeb P & Hemond HF (1998) Hydrologic response of a wetland to change moisture conditions: modeling effects of soil heterogeneity. *Climatic Change*. 40: 211-227.
- Zoltai SC & Pollett FC (1983) Wetlands in Canada: Their classification, distribution and use. *Ecosystems of the world. Mires: Swamp, bog, fen and moor. B. Regional studies*. Gore AJP (Édit.) Elsevier, Amsterdam. p. 245-268.
- Zoltai SC & Vitt DH (1995) Canadian wetlands: Environmental gradients and classification. *Vegetatio*. 118: 131-137.







ANNEXE 1 : LISTE DES TOURBIÈRES ÉTUDIÉES (LA GRANDE-3)







Id	Tourbière	Location	Année	Superficie				
				Aquatique		Semi-aquatique		Total
				ha	%	ha	%	ha
LG3-1		53°34'23``N 76°15'58``O Altitude 227 m	1957	1,21	17,8	1,87	27,6	6,79
			2003	1,81	26,2	2,00	29,0	6,91
LG3-2		53°34'47``N 76°16'15``O Altitude 239 m	1957	0,75	6,5	2,45	21,4	11,44
			2003	0,77	5,5	6,00	42,4	14,14
LG3-3		53°34'18``N 76°17'50``O Altitude 242 m	1957	0,54	7,0	0,99	13,0	7,63
			2003	0,52	6,8	2,39	31,5	7,58
LG3-4		53°33'45``N 76°16'22``O Altitude 223 m	1957	0,38	2,6	2,98	20,5	14,53
			2003	1,14	7,5	5,65	37,5	15,06
LG3-5		53°33'05``N 76°17'00``O Altitude 212 m	1957	0,47	5,4	2,32	26,5	8,75
			2003	1,15	11,9	4,18	43,3	9,65







Id	Tourbière	Location	Année	Superficie				
				Aquatique		Semi-aquatique		Total
				ha	%	ha	%	ha
LG3-6		53°32'45``N 76°17'00``O Altitude 208 m	1957	2,71	13,2	8,85	42,8	20,66
			2003	3,24	15,7	8,80	42,8	20,58
LG3-7		53°34'52``N 76°08'15``O Altitude 224 m	1957	2,73	14,4	5,92	31,3	18,91
			2003	2,35	11,9	5,63	28,4	19,84
LG3-8		53°35'00``N 76°08'59``O Altitude 226 m	1957	1,01	14,1	2,76	38,3	7,21
			2003	0,38	5,1	2,19	29,7	7,36
LG3-9		53°34'58``N 76°09'16``O Altitude 227 m	1957	0,02	0,5	0,94	27,6	3,38
			2003	0,15	3,8	0,63	16,2	3,85
LG3-10		53°32'34``N 76°22'56``O Altitude 196 m	1957	0,07	1,5	0,51	11,1	4,56
			2003	0,24	4,0	1,75	29,0	6,01







ANNEXE 2 : LISTE DES TOURBIÈRES ÉTUDIÉES (LAFORGE-1)


Id	Tourbière	Location	Année	Superficie				
				Aquatique		Semi-aquatique		Total
				ha	%	ha	%	ha
LA1-1		54°11'21``N 72°22'02``O Altitude 446 m	1957	0,004	4,3	0,061	62,3	0,10
			2006	0,002	2,2	0,003	3,5	0,10
LA1-2		54°11'25``N 72°22'16``O Altitude 443 m	1957	0,014	8,0	0,089	49,1	0,18
			2006	0,011	7,4	0,023	14,9	0,15
LA1-3		54°12'13``N 72°20'43``O Altitude 435 m	1957	0,004	1,1	0,065	20,8	0,31
			2006	0,018	4,7	0,094	24,2	0,39
LA1-4		54°12'05,5``N 72°20'23,3``O Altitude 440 m	1957	0,082	19,0	0,158	36,6	0,43
			2006	0,081	19,5	0,088	21,3	0,41
LA1-5		54°11'20``N 72°22'51``O Altitude 437 m	1957	0,026	6,3	0,142	33,6	0,42
			2006	0,046	10,0	0,046	10,0	0,46

Id	Tourbière	Location	Année	Superficie				
				Aquatique		Semi-aquatique		Total
				ha	%	ha	%	ha
LA1-6		54°12'12" N 72°20'53" O Altitude 436 m	1957	0,058	8,8	0,124	18,7	0,66
			2006	0,033	4,9	0,251	37,7	0,67
LA1-7		54°11'14" N 72°21'34" O Altitude 436 m	1957	0,069	12,9	0,193	36,3	0,53
			2006	0,065	9,0	0,174	24,1	0,72
LA1-8		54°11'32" N 72°19'44" O Altitude 432 m	1957	0,396	37,0	0,504	47,1	1,07
			2003	0,279	23,4	0,260	21,8	1,19
LA1-9		54°11'59" N 72°21'04" O Altitude 437 m	1957	0,317	26,4	0,303	25,2	1,20
			2006	0,277	21,7	0,214	16,8	1,28
LA1-10		54°11'40" N 72°20'24" O Altitude 439 m	1957	0,261	19,8	0,396	30,1	1,32
			2006	0,294	20,5	0,415	28,9	1,44
LA1-11		54°11'14" N 72°22'59" O Altitude 438 m	1957	0,475	35,3	0,417	31,0	1,34
			2006	0,543	32,6	0,295	17,7	1,66

Id	Tourbière	Location	Année	Superficie				
				Aquatique		Semi-aquatique		Total
				ha	%	ha	%	ha
LA1-12		54°12'32``N 72°21'04``O Altitude 432 m	1957	0,192	13,8	0,469	33,6	1,39
			2006	0,157	9,1	0,444	25,6	1,73
LA1-13		54°12'16``N 72°20'54``O Altitude 431 m	1957	0,176	12,1	0,359	24,8	1,45
			2006	0,228	13,0	0,790	45,0	1,76
LA1-14		54°11'50``N 72°20'48``O Altitude 441 m	1957	0,489	28,4	0,447	26,0	1,72
			2006	0,527	29,9	0,512	29,1	1,76
LA1-15		54°11'38``N 72°20'40``O Altitude 442 m	1957	0,311	18,2	0,444	26,0	1,71
			2006	0,186	9,6	0,330	17,1	1,93
LA1-16		54°10'16``N 72°21'37``O Altitude 423 m	1957	0,111	8,5	0,410	31,3	1,31
			2006	0,215	10,8	0,381	19,2	1,99
LA1-17		54°12'36``N 72°19'24``O Altitude 436 m	1957	0,238	11,1	0,828	38,5	2,15
			2006	0,248	11,3	0,740	33,7	2,20

Id	Tourbière	Location	Année	Superficie				
				Aquatique		Semi-aquatique		Total
				ha	%	ha	%	ha
LA1-18		54°11'14``N 72°22'32``O Altitude 440 m	1957	0,099	6,2	0,457	28,4	1,61
			2006	0,074	3,3	0,092	4,2	2,20
LA1-19		54°11'29``N 72°21'57``O Altitude 440 m	1957	0,279	14,9	0,699	37,4	1,87
			2006	0,350	13,9	0,564	22,3	2,52
LA1-20		54°11'56``N 72°21'01``O Altitude 436 m	1957	1,135	35,1	0,920	28,4	3,23
			2006	1,139	31,0	1,447	39,3	3,68
LA1-21		54°10'29``N 72°21'41``O Altitude 424 m	1957	1,042	30,3	1,263	36,7	3,44
			2006	0,848	20,9	0,883	21,7	4,06
LA1-22		54°12'23``N 72°20'29``O Altitude 434 m	1957	0,748	16,9	1,125	25,5	4,42
			2006	0,901	18,3	1,908	38,7	4,92
LA1-23		54°12'18``N 72°20'02``O Altitude 439 m	1957	1,602	25,3	1,927	30,4	6,33
			2006	1,979	28,6	2,581	37,3	6,92

Id	Tourbière	Location	Année	Superficie				
				Aquatique		Semi-aquatique		Total
				ha	%	ha	%	ha
LA1-24		54°12'00``N 72°20'23``O Altitude 441 m	1957	2,016	28,7	2,005	28,6	7,01
			2006	2,232	29,0	2,800	36,4	7,69
LA1-25		54°12'00``N 72°19'45``O Altitude 441 m	1957	1,928	26,7	2,322	32,1	7,23
			2006	1,845	23,0	1,931	24,1	8,01
LA1-26		54°12'30``N 72°19'52``O Altitude 434 m	1957	3,923	49,6	1,813	22,9	7,91
			2006	4,023	46,9	1,787	20,8	8,57
LA1-27		54°11'51``N 72°19'44``O Altitude 437 m	1957	4,417	46,8	2,573	27,2	9,44
			2006	4,432	40,7	2,199	20,2	10,88
LA1-28		54°12'41``N 72°19'52``O Altitude 434 m	1957	2,762	28,4	3,022	31,1	9,72
			2006	2,448	22,1	3,501	31,6	11,06
LA1-29		54°12'46``N 72°20'28``O Altitude 433 m	1957	3,192	33,5	3,340	35,1	9,53
			2006	3,266	24,1	3,848	28,4	13,56

Id	Tourbière	Location	Année	Superficie				
				Aquatique		Semi-aquatique		Total
				ha	%	ha	%	ha
LA1-30		54°11'50``N 72°20'33``O Altitude 440 m	1957	3,986	30,9	3,770	29,2	12,91
			2006	4,307	30,7	3,006	21,4	14,03