

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

**CARACTÉRISATION DE LA DYNAMIQUE SAISONNIÈRE DE
L'HYDROLOGIE DES TOURBIÈRES MINÉROTROPES DU MOYEN-
NORD QUÉBÉCOIS, À L'AIDE DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE
MULTISPECTRALE À TRÈS HAUTE RÉOLUTION SPATIALE**

Par
Yann Dribault

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

Jury d'évaluation

Président du jury et
examineur interne

André St-Hilaire
INRS Centre Eau Terre Environnement

Examineur externe

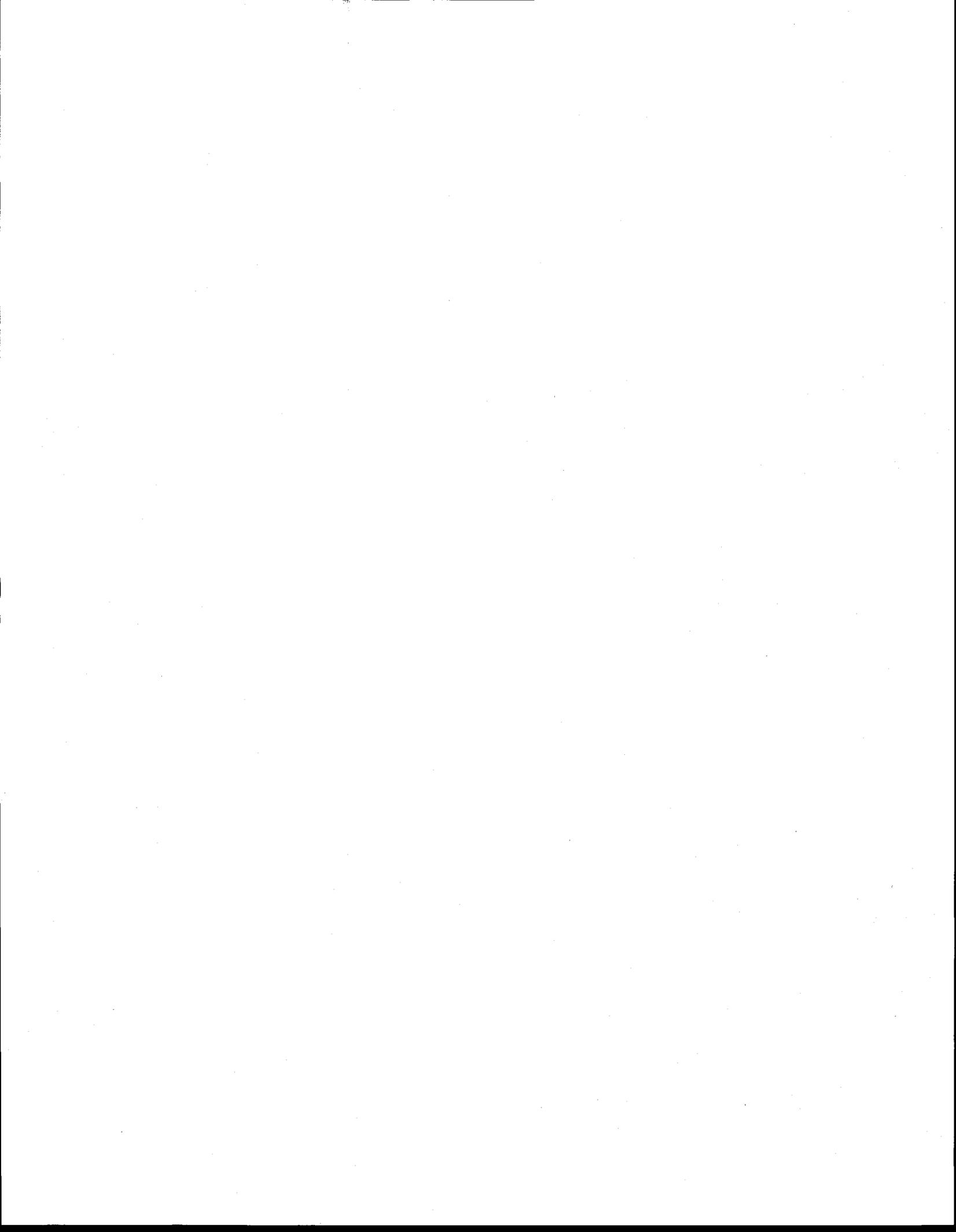
Jérôme Théau
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

Directeur de recherche

Karem Chokmani
INRS Centre Eau Terre Environnement

Codirectrice de recherche

Monique Bernier
INRS Centre Eau Terre Environnement

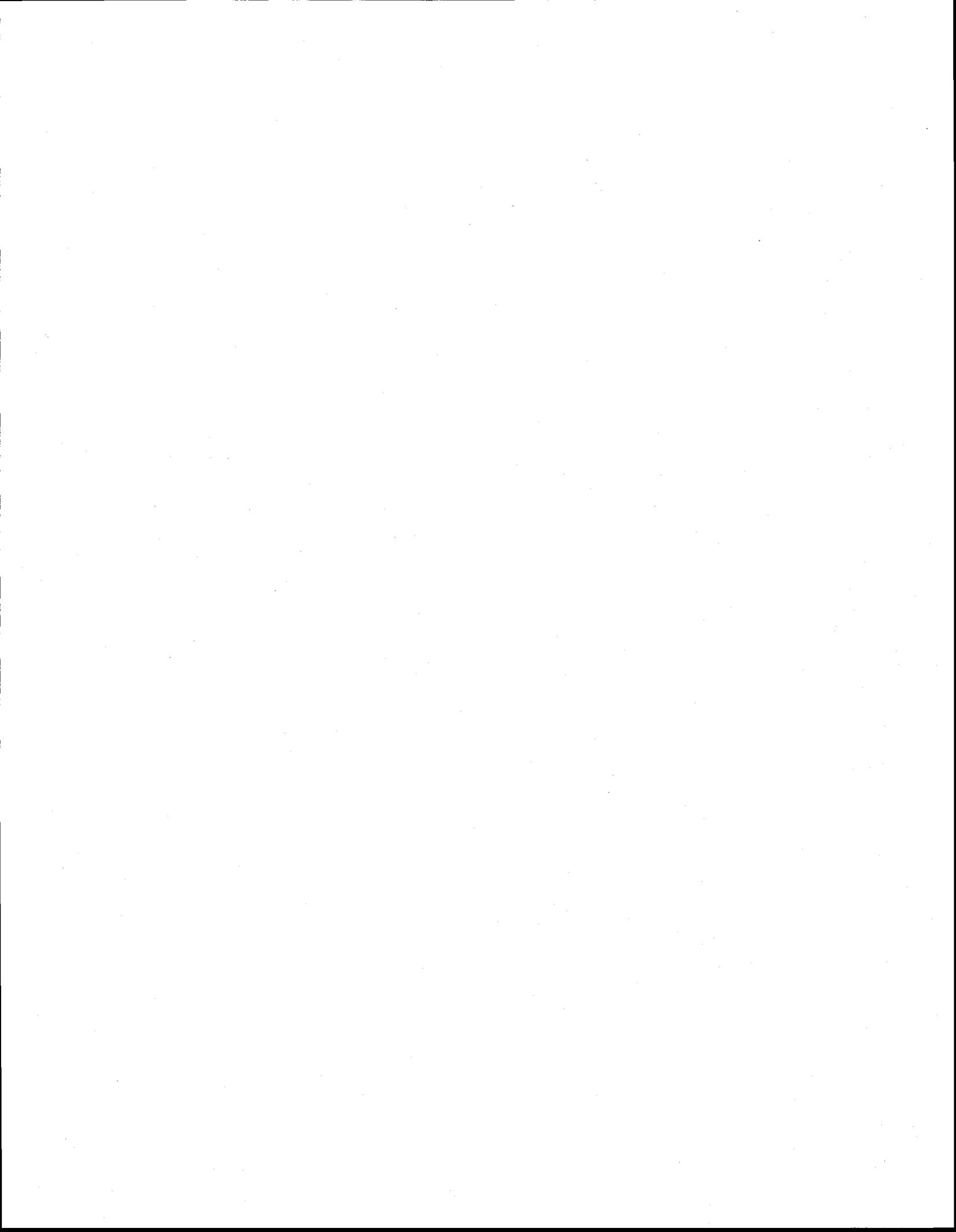


REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur, le professeur Karem Chokmani, de m'avoir fait confiance durant ces deux années, pour mener à bien ce projet de recherche. Les innombrables conseils techniques de Karem ont été cruciaux pour le bon déroulement de cette étude. Je le remercie également de m'avoir offert l'opportunité de présenter les résultats de mes recherches à l'assemblée générale EGU 2011 à Vienne. Merci à Monique Bernier pour avoir accepté de me co-diriger, en me conseillant sur l'élaboration des objectifs et de la méthodologie du projet, et en partageant de son temps pour réviser mon article et mon mémoire. Merci également au Centre d'études nordiques d'avoir accepté d'intégrer mon projet de recherche à son réseau de projets multidisciplinaires.

Merci à tous les étudiants en hydrologie, membres du projet sur les tourbières "Aqualyse", qui ont contribué de près à l'avancement de mon étude. Je pense notamment à Sandra Proulx Mc-Innis, Gwenael Carrer, Grégor Levrel, Noémie Cliche Trudeau, Marianne White. Je souhaite également remercier l'équipe du laboratoire de télédétection et plus particulièrement Maria Dissanska, Jimmy Poulin, Yves Gauthier et Charles Rioux-Boucher pour leur précieuse aide tout au long de mon étude. Merci également à Andrès Jacome et Jalal Kaldouhne pour leurs précieux conseils et leurs visions d'expérience. Merci aux étudiants du local 1307 toujours disponibles pour des discussions techniques ou plus humoristiques. Enfin, je remercie mes proches d'avoir cru en moi et supporté mes sauts d'humeur durant ces deux années et demie de travaux.

Je tiens également à remercier la compagnie Hydro-Québec et l'organisme CRSNG (Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada) qui ont financé le projet. Pour finir, je voudrais remercier mes examinateurs Jérôme Théau et André St-Hilaire, pour avoir accepté de réviser ce mémoire. Leurs commentaires m'ont permis de mieux expliquer mes travaux et mes résultats de recherche.



RÉSUMÉ

Le bassin versant de la rivière La Grande, à la Baie James (Québec, Canada) est un contributeur majeur à l'hydroélectricité dans la province. Les tourbières couvrent près de 20 % de l'environnement terrestre dans cette région. Leur comportement hydrologique est encore méconnu. La présente étude fait partie d'un projet pluridisciplinaire, visant à analyser les processus hydrologiques dans les tourbières minérotrophes (fens) du bassin versant, afin de fournir des outils de contrôle efficaces pour les gestionnaires de l'eau. La problématique spécifique à cette étude était de déterminer si la télédétection satellitaire à très haute résolution (THR) est ou non pertinente pour étudier la dynamique saisonnière de l'hydrologie dans les tourbières minérotrophes.

Pour ce faire, 10 images multispectrales fusionnées GeoEye-1 (avec une résolution nominale de 40 cm) ont été acquises au cours des saisons sans neige (mai à octobre) de 2009 et 2010, dans le secteur Laforge (54° 06 'N; 72° 30'W), centrées sur les sites d'étude. Il s'agit de deux tourbières, instrumentées pour un suivi hydrométéorologique en continu (niveau d'eau, débit, précipitation, température). Une procédure d'analyse orientée-objet semi-automatisée a été mise au point et appliquée. Cela consistait à segmenter l'image en objets en utilisant l'algorithme de segmentation multirésolution (MRIS) pour délimiter les structures internes des tourbières (aquatiques, semi-aquatiques, terrestres). Puis, les objets ont été étiquetés en utilisant un algorithme basé sur la logique floue. Ceci a permis par la suite de déterminer la proportion des structures aquatiques, semi-aquatiques et terrestres dans chacune des tourbières, ce qui était essentiel pour un suivi de la dynamique spatiotemporelle de l'hydrologie.

La précision globale de la classification des 10 images a été estimée à 82 %, en ce qui concerne la délimitation des structures internes des tourbières. Considérant la séparation des structures aquatiques, semi-aquatiques et terrestres, la précision globale atteint 92 %.

La série temporelle de la cartographie des structures internes des tourbières a démontré l'existence d'une dynamique spatiale intra-saisonnière importante des compartiments aquatiques et semi-aquatiques des tourbières à l'étude. L'amplitude de cette dynamique a été évaluée dans les deux tourbières. Dans la première tourbière, la variation spatiale observée correspond à une augmentation de 53 % des compartiments aquatiques et semi-aquatiques entre les conditions les

plus sèches (image du 23 juillet 2009) et les plus humides (18 mai 2010). Dans la seconde tourbière, la variation spatiale observée correspond à une augmentation de 17 % entre les conditions les plus sèches (image du 13 septembre 2009) et les plus humides (30 août 2010).

Enfin, il a été démontré qu'un lien existe entre la dynamique spatiale intra-saisonnière et le régime hydrologique des tourbières. Les débits et niveaux d'eau mesurés ont été comparés en considérant les deux saisons d'acquisition de données. Un modèle exponentiel a pu décrire la relation avec un coefficient de détermination de 0,63. En fait, à partir d'un seuil correspondant à un certain niveau d'eau et à un certain débit, le comportement hydrologique de la tourbière est modifié. Deux phases peuvent être distinguées. La première phase correspond à une augmentation rapide du niveau d'eau tandis que le débit reste faible ; elle est appelée la phase de stockage. La seconde phase est caractérisée par une forte augmentation du débit tandis que le niveau d'eau est déjà élevé et augmente peu. De l'eau est libérée de la tourbière ; la phase est dite de ruissellement. En observant les niveaux d'eau et débits correspondants aux dates des images satellitaires acquises, uniquement la phase de stockage a été couverte. Néanmoins, l'absence d'images acquises durant d'importants événements de ruissellement n'était pas un obstacle à l'observation d'une dynamique hydrologique saisonnière. L'ampleur de cette dynamique était importante durant la phase de stockage et semblait être liée à l'évolution du niveau d'eau. Un modèle linéaire a pu décrire la relation avec un coefficient de détermination entre 0,6 et 0,8. En outre, les pentes de régressions linéaires estimées sont environ deux fois plus importantes pour l'une des deux tourbières étudiées. Cela se traduit par une dynamique spatiale des compartiments aquatiques et semi-aquatiques plus faible dans la seconde tourbière. Les différentes valeurs de pentes seraient expliquées par les différences morphologiques (superficie, profondeur, contour des mares) des deux tourbières structurées. Cette étude a donc démontré la possibilité d'un suivi hydrologique des tourbières à la fois à l'échelle intra-saisonnière et à l'échelle locale. Les études antérieures se sont limitées à un suivi à échelle multi-décennale.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ.....	V
TABLE DES MATIÈRES	VII
Liste des tableaux	IX
Liste des figures.....	XI
PARTIE 1 : SYNTHÈSE	1
1 INTRODUCTION.....	3
1.1 Contexte.....	3
1.2 Problématique	3
1.3 Objectifs de la recherche.....	4
1.4 Structure du mémoire	5
2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	7
2.1 Tourbières.....	7
2.2 Hydrologie des tourbières	12
2.3 Télédétection des tourbières	14
3 MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	17
3.1 Sites à l'étude.....	17
3.2 Mesures hydrométéorologiques.....	17
3.3 Données satellitaires	19
3.4 Approche méthodologique.....	20
4 RESULTATS ET DISCUSSION	23
4.1 Classification des données satellitaires à l'aide de l'approche orientée-objet	23
4.2 Dynamique spatiale saisonnière des structures aquatiques et semi-aquatiques des tourbières minérotrophes.....	24
4.3 Dynamique spatiale saisonnière en relation avec le régime hydrologique des tourbières minérotrophes..	24
5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	27
PARTIE 2 : ARTICLE	29
AVANT-PROPOS	31
RÉSUMÉ.....	33
ABSTRACT	35

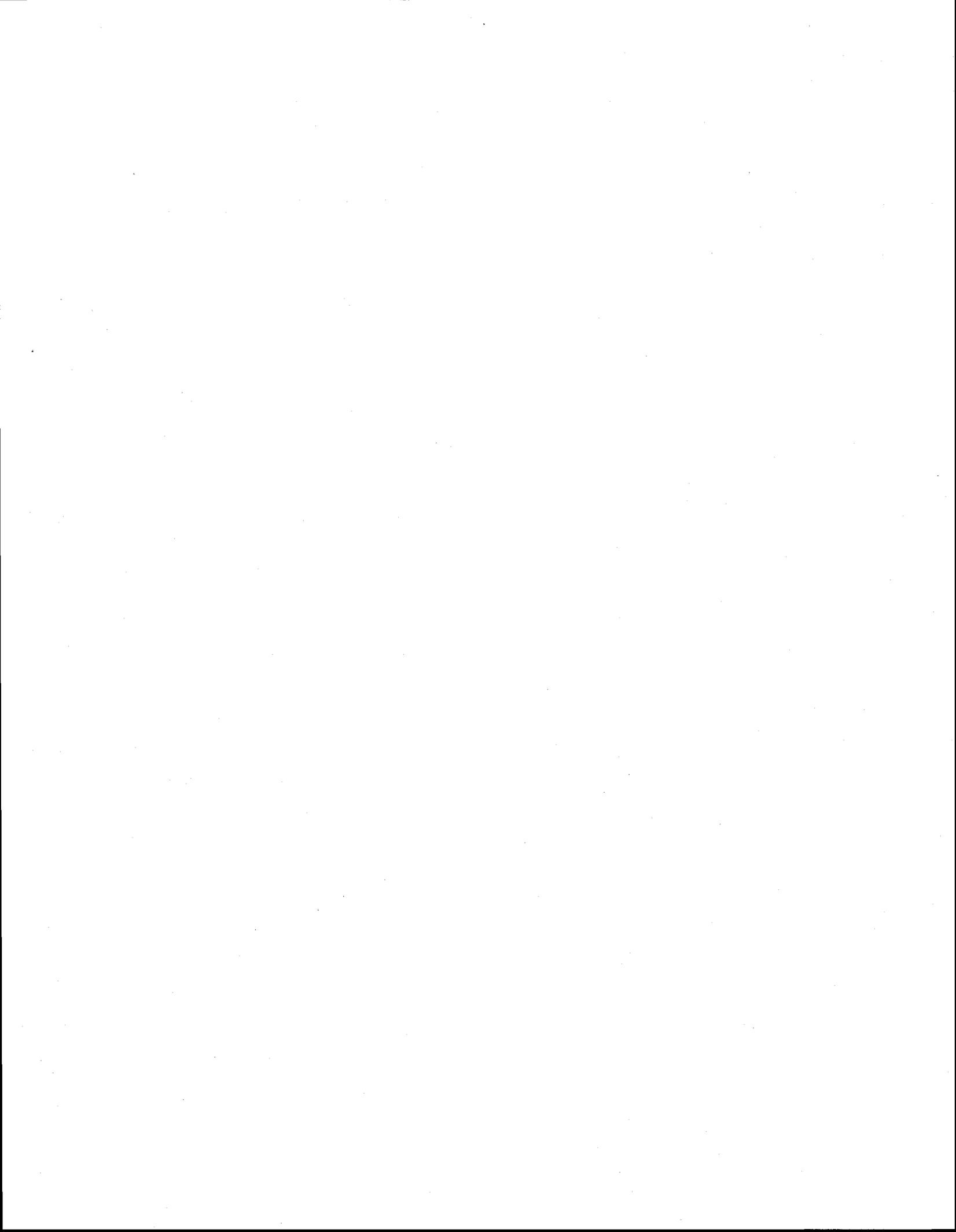
**MONITORING SEASONAL HYDROLOGICAL DYNAMICS OF MINEROTROPHIC PEATLANDS
USING MULTI-DATE GEOEYE-1 VERY HIGH RESOLUTION IMAGERY AND OBJECT-BASED
CLASSIFICATION.....37**

1	INTRODUCTION	39
2	MATERIAL AND METHODS	41
2.1	<i>Study area</i>	41
2.2	<i>Hydrometeorological measurements</i>	42
2.3	<i>Satellite imagery</i>	43
2.4	<i>Object-based image classification</i>	46
3	RESULTS AND DISCUSSION	51
3.1	<i>Object-based image classification</i>	51
3.2	<i>Seasonal spatial dynamics of aquatic and semi-aquatic structures in fens</i>	56
3.3	<i>Seasonal spatial dynamics in relation to the hydrological regime of fens</i>	60
4	CONCLUSIONS	67
5	ACKNOWLEDGMENTS	69
	RÉFÉRENCES	71
	ANNEXE A : REGLES DE CLASSIFICATION UTILISEES	77
	ANNEXE B : CLASSIFICATIONS FINALES DES 10 SOUS-IMAGES GEOEYE-1 : 4950 X 5330 PIXELS (2.5 KM X 2.7 KM).....	81
	ANNEXE C : SUIVI CARTOGRAPHIQUE DE LA COMPOSITION DES ZONES SATUREES DU SITE 1 ET DU SITE 2, ISSUES DES CLASSIFICATIONS FINALES DES 10 SOUS-IMAGES GEOEYE-1	93

LISTE DES TABLEAUX

PARTIE 2 : ARTICLE

TABLE 1	FEATURES OF THE ACQUIRED GEOEYE-1 IMAGES.....	44
TABLE 2	DESCRIPTION OF THE CLASSES USED IN THE OBJECT-BASED ANALYSIS.....	49
TABLE 3	CONFUSION MATRIX FOR 9 JUNE 2010 IMAGE COARSE-SCALE CLASSIFICATION (STEP 2), CONSIDERING THE ORIGINAL CLASSES OF THE VALIDATION OBJECTS.....	53
TABLE 4	CONFUSION MATRIX FOR 9 JUNE 2010 IMAGE COARSE-SCALE CLASSIFICATION (STEP 2), CONSIDERING THE ENVIRONMENTAL GROUPS OF THE VALIDATION OBJECTS.....	53
TABLE 5	CONFUSION MATRIX FOR FINE-SCALE CLASSIFICATION OF THE 10 IMAGES (STEP 8), CONSIDERING THE ORIGINAL CLASSES OF THE VALIDATION OBJECTS.....	55
TABLE 6	CONFUSION MATRIX FOR FINE-SCALE CLASSIFICATION OF THE 10 IMAGES (STEP 8), CONSIDERING THE HYDROLOGICAL GROUPS (AQUATIC, SEMI-AQUATIC, AND TERRESTRIAL) OF THE VALIDATION OBJECTS...	55



LISTE DES FIGURES

PARTIE 1 : SYNTHÈSE

FIGURE 1	CARTE DE REPARTITION DES PRINCIPAUX TYPES DE TOURBIERES AU QUEBEC-LABRADOR (TIRE DE : PAYETTE & ROCHEFORT, 2001).	10
FIGURE 2	VUE EN PLAN (A) ET EN COUPE (B) D'UNE TOURBIERE MINEROTROPHE STRUCTUREE. LES FLECHES INDIQUENT LE SENS DE L'ECOULEMENT (MODIFIE DE : PAYETTE & ROCHEFORT, 2001).	11
FIGURE 3	LES COMPOSANTES DE L'EQUATION DU BILAN HYDROLOGIQUE POUR UNE TOURBIERE MINEROTROPHE ET D'UNE TOURBIERE OMBROTROPHE. LE SOL MINERAL FIGURE EN GRIS, LA TOURBIERE FIGURE EN ORANGE (MODIFIE DE : RYDIN & JEGLUM, 2006).	12
FIGURE 4	LOCALISATION DES INSTRUMENTS UTILISES DANS L'ETUDE AU (A) SITE 1 (54°06'52''N, 72°30'02''O) ET (B) SITE 2 (54°06'41''N, 72°30'56''O).	18
FIGURE 5	MESURES HYDROMETEOROLOGIQUES DE TERRAIN : (A) STATION METEOROLOGIQUE ; (B) CANAUX TRAPEZOÏDAUX ACCOMPAGNES DE PUIITS, A L'EXUTOIRE DE LA TOURBIERE DU SITE 1 ; (C) SCHEMA D'UN PUIITS ENFONCE DANS LE SOL TOURBEUX ET EQUIPE AVEC UNE JAUGE A PRESSION HYDROSTATIQUE (LEVELOGGER) ; (D) SCHEMA D'UN PUIITS ENFONCE EN FOND DE MARE ET EQUIPE AVEC UNE JAUGE A PRESSION HYDROSTATIQUE.	18
FIGURE 6	REPOSE SPECTRALE DU CAPTEUR GEOEYE-1 (MODIFIE DE : GEOEYE, 2010).	20
FIGURE 7	APPROCHE METHODOLOGIQUE DE L'ETUDE	20
FIGURE 8	ORGANIGRAMME DES PRETRAITEMENTS DES 10 IMAGES GEOEYE-1.	21

PARTIE 2 : ARTICLE

FIGURE 1	LOCATION MAP OF THE TWO STUDY SITE WATERSHEDS IN THE JAMES BAY REGION, QUEBEC, CANADA. .	42
FIGURE 2	LOCATION OF THE INSTRUMENTS USED IN THE STUDY AT (A) SITE 1 (54°06'52''N, 72°30'02''W) AND (B) SITE 2 (54°06'41''N, 72°30'56''W).	43
FIGURE 3	GEOEYE-1 IMAGE ACQUISITIONS AND HYDROLOGICAL CONDITIONS DURING: (A) SPRING AND SUMMER 2009; (B) SPRING AND SUMMER 2010.	45
FIGURE 4	SCHEME OF THE OBJECT-BASED ANALYSIS PROCEDURE.....	47
FIGURE 5	COMPARISON BETWEEN (A) 23 JULY 2009 AND (B) 18 MAY 2010 RGB IMAGES (SUBSETS CENTRED ON SITE 1: 54°06'52''N, 72°30'02''W), AND THEIR RESPECTIVE FINE-SCALE CLASSIFICATIONS (STEP 8) (C-D). AREAS OF SUNGLINT AND OF MAJOR MISCLASSIFICATIONS ARE EXPANDED.	52
FIGURE 6	FALSE COLOURED COMPOSITE (NIR, RED, GREEN) OF TWO 3 AUGUST 2010 GEOEYE-1 SUBSETS CENTRED ON (A) SITE 1 (54°06'52''N, 72°30'02''W) AND (B) SITE 2 (54°06'41''N, 72°30'56''W). THE LOCATIONS OF THE RESPECTIVE SATURATED ZONES OF EACH FEN APPEAR IN (C-D).	57
FIGURE 7	AQUATIC, SEMI-AQUATIC, AND TERRESTRIAL PROPORTIONS OF THE SITE 1 SATURATED ZONE FOR EACH GEOEYE-1 IMAGE ACQUISITION DATE. THE TERM N/A REFERS TO MISSING DATA DUE TO THE PRESENCE OF CLOUDS OVER SITE 1.	58

FIGURE 8 COMPARISON BETWEEN (A) 23 JULY 2009 AND (B) 18 MAY 2010 GEOEYE-1 RGB IMAGES (SUBSETS CENTRED ON SITE 1: 54°06'52''N, 72°30'02''W), AND THE RESPECTIVE AQUATIC, SEMI-AQUATIC, AND TERRESTRIAL PROPORTIONS OF THE SITE 1 SATURATED ZONE (C-D). AREAS OF MAJOR CHANGE ARE ENCIRCLED IN RED. 58

FIGURE 9 AQUATIC, SEMI-AQUATIC, AND TERRESTRIAL PROPORTIONS OF THE SITE 2 SATURATED ZONE FOR EACH GEOEYE-1 IMAGE ACQUISITION DATE. THE TERM N/A REFERS TO MISSING DATA DUE TO THE PRESENCE OF CLOUDS OVER SITE 2. 59

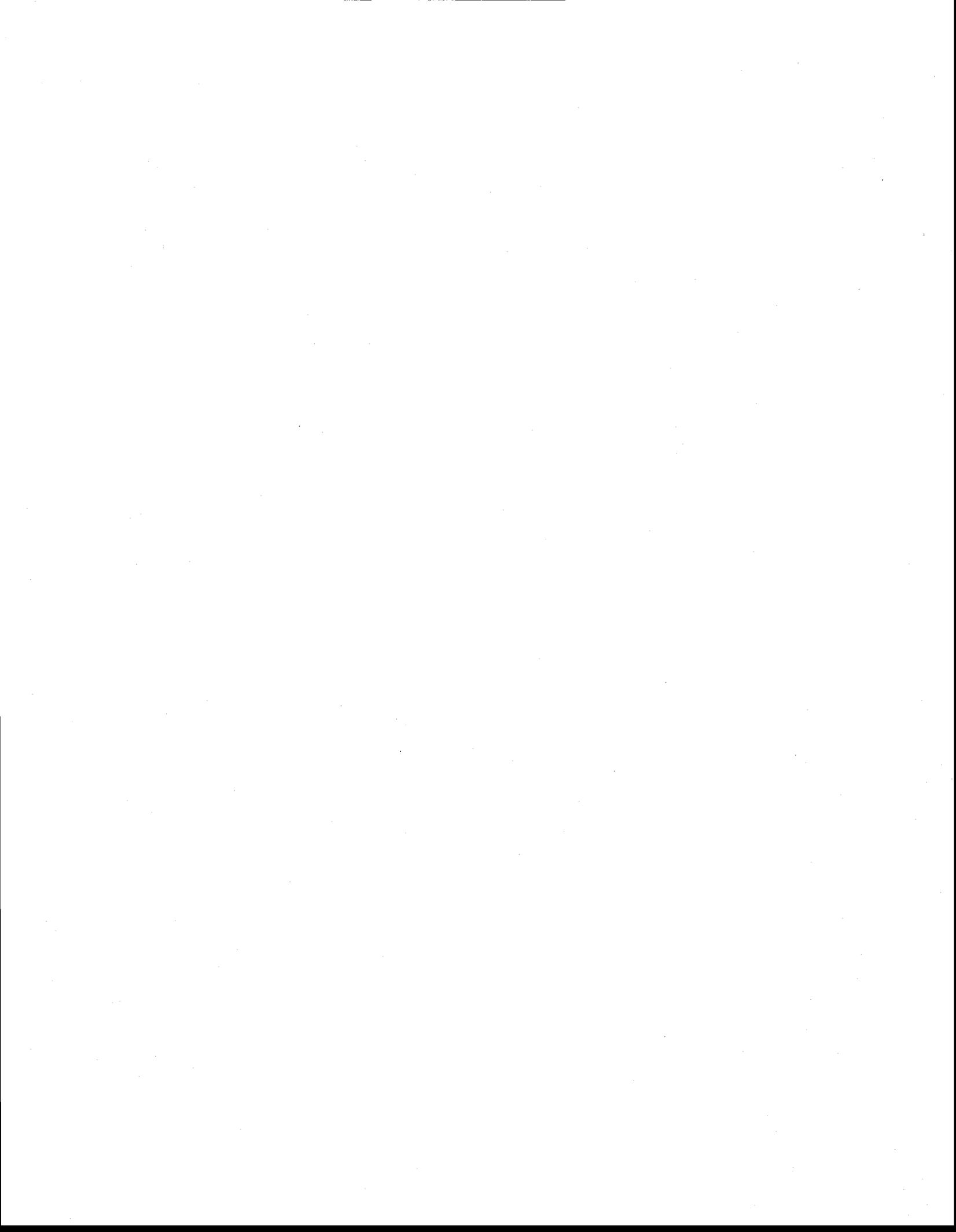
FIGURE 10 COMPARISON BETWEEN (A) 13 SEPTEMBER 2009 AND (B) 30 AUGUST 2010 GEOEYE-1 RGB IMAGES (SUBSETS CENTRED ON SITE 2: 54°06'41''N, 72°30'56''W), AND THE RESPECTIVE AQUATIC, SEMI-AQUATIC, AND TERRESTRIAL PROPORTIONS OF THE SITE 2 SATURATED ZONE (C-D). AREAS OF MAJOR CHANGE ARE ENCIRCLED IN RED. 59

FIGURE 11 DISCHARGE OF THE SITE 1 FEN IS RELATED TO THE WATER TABLE MEASURED AT WELL A. DISCHARGE AND WATER TABLE DATA WERE COLLECTED EVERY 15 MINUTES DURING THE 2009 AND 2010 SNOW-FREE SEASONS. THE RANGE OF MEASURED VALUES IS DISPLAYED IN PERCENTAGES, 100% CORRESPONDING TO THE MAXIMAL MEASURED VALUE (0% TO THE MINIMAL). BLACK DIAMONDS SHOW DISCHARGE AND WATER TABLE VALUES CORRESPONDING TO IMAGE ACQUISITIONS. 62

FIGURE 12 (A) WATER TABLE MEASURED AT WELL A COMPARED TO CORRESPONDING AQUATIC PROPORTION OF THE SITE 1 SATURATED ZONE (DERIVED FROM GEOEYE-1 IMAGE CLASSIFICATIONS). (B) WATER TABLE MEASURED AT WELL A COMPARED TO CORRESPONDING AQUATIC AND SEMI-AQUATIC PROPORTION OF THE SITE 1 SATURATED ZONE. THE RANGE OF MEASURED WATER TABLE VALUES IS DISPLAYED IN PERCENTAGES, 100% CORRESPONDING TO THE MAXIMAL WATER TABLE VALUE (0% TO THE MINIMAL). 64

FIGURE 13 (A) WATER LEVEL MEASURED AT WELL B COMPARED TO CORRESPONDING AQUATIC PROPORTION OF THE SITE 2 SATURATED ZONE (DERIVED FROM GEOEYE-1 IMAGE CLASSIFICATIONS). (B) WATER LEVEL MEASURED AT WELL B COMPARED TO CORRESPONDING AQUATIC AND SEMI-AQUATIC PROPORTION OF THE SITE 2 SATURATED ZONE. THE RANGE OF MEASURED WATER LEVELS IS DISPLAYED IN PERCENTAGES, 100% CORRESPONDING TO THE MAXIMAL WATER LEVEL VALUE (0% TO THE MINIMAL). 64

PARTIE 1 : SYNTHÈSE



1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

La productivité hydroélectrique du Québec dépend grandement des conditions hydrologiques du Moyen-Nord québécois. À lui seul, le complexe hydroélectrique de la rivière La Grande génère environ 40 % de l'électricité produite au Québec. Ces dernières décennies, des baisses inexplicables du niveau d'eau dans les réservoirs hydroélectriques ont suscité de nombreuses réflexions, notamment sur l'influence hydrologique méconnue des tourbières qui couvrent près de 20 % de l'environnement terrestre de la région (Tarnocai *et al.*, 2000). En effet, la nature particulière des tourbières peut provoquer un ralentissement et une diminution des apports en eau à l'aval dans les rivières et donc dans les réservoirs.

Un projet pluridisciplinaire nommé « Aqualyse » a donc été élaboré par une équipe de chercheurs possédant différentes expertises, en collaboration avec la compagnie Hydro-Québec et l'organisme CRSNG (Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada). Il visait à mieux appréhender les processus hydrologiques existants dans les tourbières minérotrophes fortement aqualysées (i.e. une grande proportion de la tourbière est aquatique) du bassin versant de la rivière La Grande. L'objectif ultime du projet était de fournir des outils de modélisation du comportement hydrologique des tourbières minérotrophes aux gestionnaires des ouvrages hydroélectriques. Différentes études ont alors été réalisées, utilisant de nombreuses techniques dont celle du suivi hydrologique par télédétection.

1.2 Problématique

L'existence d'une variation saisonnière majeure dans la contribution hydrologique de bassins versants occupés par les milieux humides a déjà été démontrée (Todd *et al.*, 2006). Ces bassins versants montrent généralement leur pointe de ruissellement durant la saison de fonte de la neige, tandis que pendant l'été, ils contribuent peu ou pas du tout à l'écoulement de surface (Tardif *et al.*, 2009). Lors d'événements pluvieux isolés, le ruissellement peut être ralenti par les tourbières, notamment à cause de leurs structures : alternance de mares et de lanières végétalisées (Price *et al.*, 1990). Ces structures provoquent également une hausse de l'évapotranspiration et de la

capacité de stockage d'eau (Price & Maloney, 1994). Pour pouvoir observer et étudier les changements hydrologiques dans les tourbières, l'usage de la télédétection a été envisagé. En effet de nombreux travaux ont utilisé cette technique afin de cartographier les milieux humides (Bernier *et al.*, 2003, Ghedira, 2002, Grenier *et al.*, 2007) mais aussi afin de suivre à très haute résolution leur évolution hydrologique à l'échelle multidécennale (Collins, 2005, Dissanska *et al.*, 2009). L'usage de la télédétection à très haute résolution spatiale pourrait être une alternative intéressante à l'instrumentation terrain des tourbières afin d'effectuer le suivi ainsi que la modélisation des changements hydrologiques y survenant. Cette technique novatrice s'appliquerait avec d'autant plus de pertinence dans les bassins versants dominés par les tourbières structurées et situés dans des secteurs reculés tels que la région de la rivière La Grande. Ceci devrait être réalisé à une échelle saisonnière, pour laquelle les fluctuations hydrologiques sont majeures (Todd *et al.*, 2006). Par conséquent, une approche spatialisée et basée sur la télédétection satellitaire multispectrale à très haute résolution est proposée afin de suivre et de mieux comprendre la dynamique saisonnière de l'hydrologie des tourbières minérotrophes du bassin versant de la rivière La Grande.

1.3 Objectifs de la recherche

Cette étude avait trois objectifs :

- 1) Déterminer si la télédétection satellitaire multispectrale à très haute résolution (THR) permet de délimiter avec précision les structures internes des tourbières (aquatiques, semi-aquatiques, terrestres).
- 2) Vérifier l'existence d'une dynamique spatiale saisonnière des structures aquatiques et semi-aquatiques des fens structurés avec l'imagerie THR et établir l'ampleur de cette dynamique.
- 3) Déterminer si la dynamique observée peut expliquer le régime hydrologique des tourbières minérotrophes.

1.4 Structure du mémoire

Le mémoire est composé de deux parties distinctes. La première, dénommée « synthèse » est un résumé de la contribution scientifique du candidat. La seconde partie dénommée « article » est une copie de l'article scientifique qui a été soumis pour une publication dans la revue Remote Sensing. Viennent ensuite les références regroupées de la synthèse et de l'article, puis les annexes du projet.

Dans la première partie, une revue de littérature (chapitre 2) est présentée et se divise en trois sections. La première présente les tourbières ainsi que leurs caractéristiques. Le comportement hydrologique de ces milieux est abordé dans la seconde section. Enfin, les méthodes de télédétection utilisées pour effectuer le suivi hydrologique de ces milieux sont résumées dans la troisième section. Par la suite, le chapitre 3 intitulé « matériel et méthodes » expose succinctement les sites étudiés, les mesures hydrométéorologiques effectuées, les données satellitaires acquises et l'analyse orientée-objet mise au point et appliquée dans le cadre de ce projet de maîtrise. Les détails sont à lire dans le chapitre 2 de l'article. Le chapitre 4 de la synthèse intitulé « résultats et discussion » présente un résumé des principaux résultats obtenus à partir des analyses produites tout au long du projet de recherche, et un résumé de la discussion s'y rapportant. Les détails figurent dans le chapitre 3 de l'article mais aussi dans les annexes du mémoire. Enfin, un dernier chapitre intitulé « conclusions et recommandations » clôture la synthèse.



2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Tourbières

2.1.1 Définition

Les milieux humides sont des terres où l'eau s'accumule à la surface du sol pendant une période assez longue pour permettre le développement du sol et la vie de types de collectivités végétales et animales adaptées aux conditions de saturation (NWWG, 1997). Les tourbières sont une catégorie spécifique des milieux humides. Les tourbières se dissocient des autres milieux humides par l'importante de l'accumulation de matière organique, sur une profondeur d'au moins 40 cm (NWWG, 1997). Selon Payette et al. (2001), les tourbières sont « un milieu à drainage variable où le processus d'accumulation organique prévaut sur les processus de décomposition et d'humidification, peu importe la composition botanique des restes végétaux ».

2.1.2 Typologie

Les tourbières peuvent être divisées en deux catégories, les tourbières ombrotrophes (ou bogs) et les tourbières minérotrophes (ou fens). Cette distinction est basée sur des caractéristiques morphologiques, hydrologiques, chimiques et sur des espèces de plantes indicatrices (Payette & Rochefort, 2001).

Les tourbières ombrotrophes ne sont alimentées en eau que par les précipitations atmosphériques, desquelles provient également la seule source extérieure en éléments nutritifs (Charman, 2002, Payette & Rochefort, 2001). Elles sont caractérisées par une nappe phréatique perchée au-dessus de la nappe d'eau souterraine. Ainsi, l'eau présente dans les bogs est acide ($3,5 < \text{pH} < 4,6$) et très pauvre en éléments minéraux (conductivité $< 80 \mu\text{S}/\text{cm}$) car isolée des eaux minérotrophes souterraines. Les bogs sont dominés par les sphaignes (*Sphagnum angustifolium*, *Sphagnum fuscum*, *Sphagnum magellanicum*...), souvent accompagnées d'éricacées arbustives (*Andromeda glaucophylla*, *Kalmia augustifolia*...) et d'arbres (mélèze : *Larix laricina* ; épinette noire : *Picea mariana*) (MDDEP, 2006, NWWG, 1997).

Les tourbières minérotrophes reçoivent une quantité variable d'eau, à la fois des précipitations et des eaux de drainage du bassin chargées en éléments minéraux qui enrichissent le sol humide

(Charman, 2002, Payette & Rochefort, 2001). Ainsi, une connexion hydrologique existe avec le réseau de drainage de la région. L'eau présente dans les fens est relativement acide ($4,6 < \text{pH} < 7,5$) et riche en éléments minéraux (conductivité $> 80 \mu\text{S}/\text{cm}$). Les tourbières minérotrophes sont caractérisées par une végétation plus diversifiée et plus « riche » que celle des tourbières ombrotrophes (Seuthé & Buteau, 1994). Le couvert arborescent est composé principalement d'épinettes noires et de mélèzes. Les couverts herbacé et muscinal sont dominés par diverses cypéracées (*Carex limosa*, *Carex livida*...) et par des mousses brunes (*Scorpidium scorpioides*, *Campylium stellatum*, *Tomenthypnum nitens*...) en alternance avec les sphaignes (*Sphagnum flexussum*, *Sphagnum fallax*...) de milieu minérotrophe (MDDEP, 2006, NWWG, 1997).

Il existe aussi des tourbières intermédiaires, ayant une végétation et des propriétés physiques et chimiques se situant entre celles des tourbières minérotrophes et ombrotrophes. Leur représentation géographique est très faible car le changement de pH est rapide lors de l'évolution d'une tourbière minérotrophe vers une tourbière ombrotrophe (Payette & Rochefort, 2001). De plus, les systèmes de classification des tourbières sont variables et ne font pas nécessairement consensus parmi les spécialistes (Charman, 2002).

2.1.3 Formation

L'initiation d'une tourbière repose essentiellement sur la mise en place de conditions favorables à l'accumulation de la tourbe, c'est-à-dire où la quantité de matière végétale produite est supérieure à la quantité de matière végétale décomposée (Charman, 2002, Payette & Rochefort, 2001). Le développement des tourbières est influencé par deux types de facteurs : (1) les facteurs allogènes, donc externes à l'écosystème, principalement d'origine climatique et (2) les facteurs autogènes, donc internes à l'écosystème, tels que la topographie et l'hydrologie (Payette & Rochefort, 2001).

Deux processus principaux sont à l'origine de la formation des tourbières. Le premier processus est la paludification, qui provoque une transformation des habitats terrestres en tourbières. Il peut intervenir par croissance de la tourbière et remontée de la nappe phréatique, par pédogénèse, ou par des actions anthropogéniques. Le processus alternatif est le comblement, donc l'entourbement des lacs peu profonds ou des plans d'eau. Les deux processus peuvent intervenir simultanément dans un même site, selon la topographie et l'hydrologie du site (Payette &

Rocheport, 2001). Des études stratigraphiques ont démontré que la paludification était le processus le plus fréquent de formation des tourbières en Amérique du Nord (Payette & Rocheport, 2001). Le comblement des plans d'eau est un phénomène demandant des conditions très particulières et entourant des espaces circonscrits (Payette & Rocheport, 2001).

Le début de l'entourbement dans les régions nordiques, au nord du 52^e parallèle, s'est fait attendre par rapport au Québec méridional et au Nord-Ouest Canadien, à cause de la déglaciation tardive (Payette & Rocheport, 2001). La formation des tourbières boréales et subarctiques a débuté après 7000 ans BP. La principale période d'entourbement a duré quelque 2000 à 2500 ans, de 6000 à 3800 BP. Après 3800 BP, la croissance des tourbières a fortement diminué, car la plupart des sites propices à l'entourbement étaient déjà occupés (Payette, 1984).

2.1.4 Répartition

Les milieux humides couvrent près de 15 % de la superficie totale du Canada (NWWG, 1997). Plus de 90 % de ces derniers sont des tourbières (Tarnocai, 1998), considérant le climat nordique qui contrôle la productivité et la décomposition de la végétation (Cihlar & Tarnocai, 2000). Au Québec, l'étendue des tourbières est d'environ 12 millions d'hectares (Tarnocai, 1984). Le Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec poursuit un programme d'inventaire systématique ayant pour objectif principal d'assurer une meilleure gestion de la ressource-tourbe (Seuthé & Buteau, 1994). Les tourbières sont situées dans les zones au relief peu accidenté, notamment au Lac Saint-Jean, à la Baie James, en Abitibi et dans les basses terres du fleuve Saint-Laurent (UQCN, 1994). La répartition des principaux types de tourbières au Québec-Labrador est indiquée à la figure 1.

L'influence du climat s'observe par une répartition nord-sud de différents types de tourbières : alors que les tourbières du sud sont principalement ombrotrophes et bombées, elles sont remplacées par des fens structurés vers le nord et ensuite par des tourbières à pergélisol (Glaser & Janssens, 1986). Les tourbières structurées sont essentiellement confinées dans les zones subarctiques et arctiques ainsi que dans les zones maritimes et alpines de la zone mi-tempérée, ce qui confirme que les conditions climatiques jouent un rôle dans la mise en place des motifs de surface. Il existe aussi un gradient longitudinal qui influence la répartition des tourbières. Il est cependant moins marqué que le gradient latitudinal. Par exemple, dans la région du bassin

versant de la rivière La Grande, il est présent et dû aux conditions climatiques, topographiques et géomorphologiques. On retrouve essentiellement des tourbières ombrotrophes aux abords de la Baie de James. Plus à l'est, le climat étant plus rigoureux et l'altitude plus élevée, les tourbières minérotrophes dominent (Payette & Rochefort, 2001).

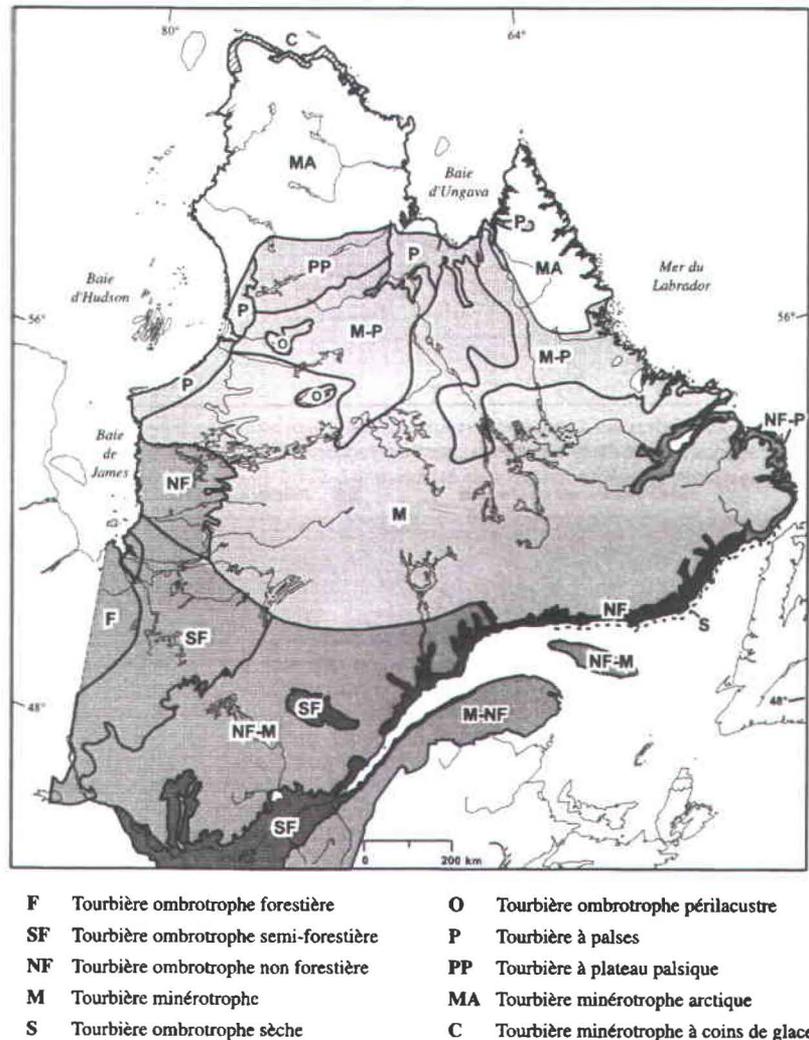


Figure 1 Carte de répartition des principaux types de tourbières au Québec-Labrador (tiré de : Payette & Rochefort, 2001).

2.1.5 Structure interne

Les tourbières présentent une structure interne différente selon la zone géographique, le degré d'enneigement et le degré de minérotrophie de la tourbière. Dans le cadre du présent projet, la région d'étude, située dans le bassin versant de la rivière La Grande (Baie James, Qc), est dominée par les tourbières minérotrophes structurées. Celles-ci se forment sur les terrains en

pente et se caractérisent par des crêtes tourbeuses (« lanières ») étroites qui surplombent, d'à peine quelques décimètres des mares d'eau libre ou des dépressions remplies par la végétation (« flarks ») (NWWG, 1997) (Charman, 2002, Payette & Rochefort, 2001). Les lanières se forment perpendiculairement à l'écoulement de surface ; elles font de petits barrages qui empêchent l'écoulement de l'eau. Cela produit un modelé de pente descendante en gradins d'une dépression ou d'une lanière à une autre (figure 2). La configuration et l'espacement des lanières semblent être reliés au degré de la pente : les lanières sont plus rapprochées dans les pentes escarpées, et plus éloignées et moins bien définies dans les pentes plus douces (NWWG, 1997, Zoltaï & Pollett, 1983).



Figure 2 Vue en plan (a) et en coupe (b) d'une tourbière minérotrophe structurée. Les flèches indiquent le sens de l'écoulement (modifié de : Payette & Rochefort, 2001).

Les environnements terrestres d'une tourbière minérotrophe ne correspondent pas forcément à des lanières. La structuration mares-lanières n'apparaît souvent que dans certaines parties de la tourbière. On peut plus généralement séparer les environnements terrestres en zones à platières basses, à platières surélevées ou à buttes. Les platières basses sont situées au niveau ou sous le niveau moyen de la nappe. Les platières surélevées se trouvent entre 0 et 15 cm au-dessus du niveau moyen de la nappe, alors que les zones de buttes se trouvent à plus de 15 cm au-dessus du niveau moyen de la nappe (Levrel & Rousseau, 2010). Ces micro-habitats, aussi appelés « biotopes », sont colonisés par des assemblages végétaux distincts reflétant généralement la prévalence de conditions d'humidité, d'acidité et trophiques très différents selon la nature du biotope. Quelques études montrent que le pH et les concentrations des éléments nutritifs et des minéraux sont plus forts dans les dépressions que sur les buttes (Payette & Rochefort, 2001).

2.2 Hydrologie des tourbières

Pour étudier efficacement le comportement hydrologique d'une tourbière, son bilan hydrologique peut être calculé. Il prend en compte les apports, les sorties et le stockage d'eau dans la tourbière selon la formule suivante :

$$P + ER + ES = ET + SR + SS \pm \Delta S \quad (1)$$

Où P est la précipitation, ER l'entrée par ruissellement, ES l'entrée souterraine, ET l'évapotranspiration, SR la sortie par ruissellement, SS la sortie souterraine et ΔS la variation de stockage (Carter, 1986). La précipitation est le total de la pluie ou neige entrante dans le système. L'entrée par ruissellement inclut les ruissellements en nappe ou sous forme de canaux entrant dans le système. L'entrée souterraine représente la part de débit sous la surface entrant dans le système. L'évapotranspiration est la quantité d'eau transférée depuis la surface terrestre (incluant le sol, l'eau et la végétation) jusqu'à l'atmosphère par évaporation et transpiration combinées. La sortie par ruissellement inclut les ruissellements en nappe ou sous forme de canaux sortant du système. La sortie souterraine représente la part de débit sous la surface sortant du système. Le stockage est le volume total d'eau contenu dans une tourbière. La variation de stockage, ΔS , est un changement en volume d'eau reflété par une montée ou baisse du niveau d'eau (Rydin & Jeglum, 2006). Contrairement aux tourbières minérotrophes, les tourbières ombrotrophes ont certains termes du bilan hydrologique qui peuvent être supprimés car il n'y a aucune entrée souterraine ni entrée par ruissellement (figure 3).

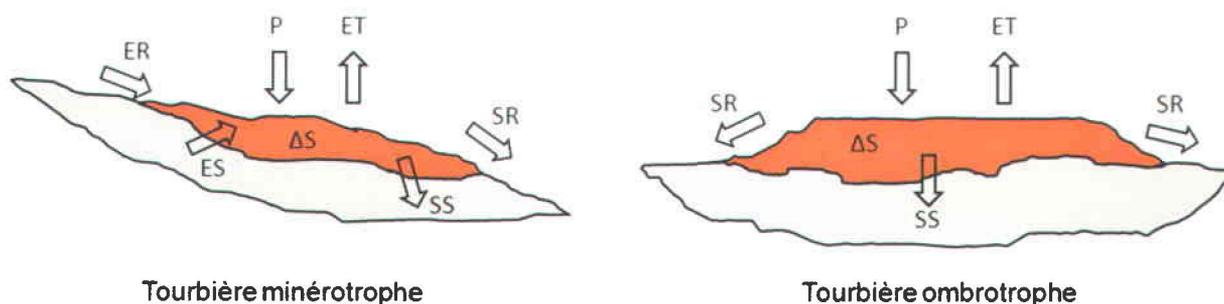


Figure 3 Les composantes de l'équation du bilan hydrologique pour une tourbière minérotrophe et d'une tourbière ombrotrophe. Le sol minéral figure en gris, la tourbière figure en orange (modifié de : Rydin & Jeglum, 2006).

La réponse hydrologique des tourbières aux précipitations est différente de celle des sols minéraux. L'absence de relief, de canaux bien définis, et les nappes d'eau peu profondes font que les tourbières se comportent comme des réservoirs peu profonds non régulés. Quand la nappe phréatique est basse, davantage de précipitation peut être absorbée par les couches hautes de la tourbe avant qu'il n'y ait ruissellement (Rydin & Jeglum, 2006). La conductivité hydraulique (K), qui décrit la perméabilité de la tourbe, est forte à la surface de la tourbière et proche de celle-ci (acrotelme). La majorité du transit hydraulique se fait donc dans l'acrotelme, et horizontalement. Sous la surface, la vitesse d'écoulement va diminuer de façon drastique, ceci est dû à la résistance du matériel en décomposition dans le catotelme (Rydin & Jeglum, 2006).

Les tourbières structurées s'avèrent très efficaces pour retenir l'eau (Price *et al.*, 1990) qui est emmagasinée temporairement dans des mares non reliées directement entre elles. L'eau doit s'infiltrer dans la matrice tourbeuse des lanières, ce qui ralentit les réponses de ruissellement et favorise les pertes par évapotranspiration. Quinton & Roulet (1998) affirment que l'hydrologie des tourbières structurées peut se résumer en deux phases : la phase connectée et la phase déconnectée. La phase déconnectée correspond à un état « sec » de la tourbière, à une période de stockage d'eau dans la tourbière avec très peu de ruissellement généré. Les mares sont alors déconnectées hydrologiquement. Au contraire, la phase connectée correspond à un état « humide » de la tourbière, à une période de fort ruissellement d'eau dans la tourbière. Les mares sont alors connectées hydrologiquement. Le temps de concentration varie très fortement selon l'état hydrologique (sec ou humide). Si l'état est sec alors le temps de concentration est plus élevé car le stockage augmente. Si l'état est humide, alors le temps de concentration est moins élevé car le stockage est déjà maximal (Kvaerner & Klove, 2008). Dans une étude récente du projet « Aqualyse », le bilan hydrologique (saison sans neige de 2009) d'une tourbière minérotrophe structurée de la région de la Baie James a été effectué (Proulx-McInnis, 2010). Il a été alors observé que durant la saison sans neige, le comportement hydrologique de la tourbière est très variable. La fin du printemps et le début de l'été assèchent les tourbières, en raison d'une forte évapotranspiration et de faibles précipitations, ce qui implique une phase de déconnection hydrologique des mares. La fin de l'été humidifie les tourbières à cause d'abondantes précipitations et d'une faible évapotranspiration, on observe alors des phases répétées de connection hydrologique des mares (pointes de ruissellement). D'autre part, en général, dans les environnements boréaux, la fonte printanière constitue l'épisode hydrologique annuel principal

des tourbières minérotrophes (Payette & Rochefort, 2001, Tardif *et al.*, 2009). On suppose alors une forte connection hydrologique des mares. Cependant, la période de fonte n'a pas été couverte par l'étude.

Le comportement hydrologique des tourbières a pu être modélisé dans différentes études. Par exemple, un modèle spécifiquement adapté à l'écoulement des tourbières, appelé PHIM, a été développé par (Brooks *et al.*, 1995). Par la suite, il a été comparé au modèle hydrologique pré-existant HYDROTEL (Jutras *et al.*, 2009) puis adopté au regard des meilleurs résultats obtenus. PHIM inclut une description de la structure verticale des sols organiques et une relation liant le débit à la profondeur de la nappe phréatique. Les deux phases de connection/déconnection hydrologique sont modélisées séparément. Autre exemple, un modèle simplifié en parallélépipède a été présenté dans l'étude de Kvaerner & Klove (2008). Le modèle a été établi pour prévoir les débits de sortie en fonction du débit d'entrée dans une tourbière minérotrophe boréale. Il est également conseillé dans cette étude de modéliser séparément les périodes de faibles et forts ruissellements.

2.3 Télédétection des tourbières

2.3.1 Capteurs et applications

Compte tenu de la limitation de la résolution spatiale des capteurs par le passé, les premières études sur les tourbières ont surtout concerné leur identification, leur inventaire, leur classification (Horgan & Critchley, 1989, Stove, 1983). Ozesmi *et al.* (2002) ont présenté une revue des capteurs et des techniques de classification exploités. Ces travaux de classification de milieux humides couvrent de grands territoires, mais à relativement faible résolution spatiale (20 m à 80 m). La télédétection optique (Landsat-7 ETM+) et la télédétection radar (RADARSAT-1) ont été fréquemment utilisées pour cartographier et inventorier les tourbières au Québec (Bernier *et al.*, 2003, Ghedira, 2002, Grenier *et al.*, 2007, Poulin *et al.*, 2002). La technique de classification par maximum de vraisemblance était très utilisée. Plus récemment, le satellite optique Spot 4 doté d'une meilleure résolution spatiale (10 m panchromatique, 20 m multispectral), a été exploité après fusion des canaux multispectraux et panchromatique, afin de réaliser une classification orientée-objet cartographiant de manière plus détaillée les milieux humides de la région de la rivière Eastmain au Québec (Grenier *et al.*, 2008). Également, des

données LiDAR et une image Ikonos d'une résolution spatiale très intéressante (1 m panchromatique, 4 m multispectral) ont été combinées, après fusion des canaux multispectraux et panchromatique, afin de cartographier les milieux humides de l'état du Wisconsin aux États-Unis (Maxa & Bolstad, 2009).

Au-delà de la cartographie des tourbières se dressait la problématique du suivi hydrologique de ces milieux par télédétection. En effet, malgré les mesures précieuses fournies dans les zones à hydrologie canalisée, seuls les satellites peuvent fournir des mesures hydrologiques sur de vastes zones humides où le flux diffus l'emporte. Certains travaux ont utilisé la technologie radar pour réaliser des études portant sur l'hydrologie des tourbières (Racine *et al.*, 2005). D'autres travaux, étudiant notamment la connectivité hydrologique entre les tourbières, ont exploité des capteurs (e.g. Landsat-7 ETM+) dans le domaine de l'optique et de l'infrarouge (Dissanska *et al.*, 2007, Gauthier *et al.*, 2006, Quinton *et al.*, 2003). Il a été notamment conclu que les tourbières minérotrophes sont davantage connectées hydrologiquement que les tourbières ombrotrophes. Il est également préconisé d'utiliser de meilleures résolutions spatiales et la technique de classification orientée-objet, afin d'étudier plus efficacement cette connectivité hydrologique. D'autre part, l'utilisation de satellites à multiples résolutions spatiales pour caractériser l'état hydrologique d'une tourbière en fonction des propriétés des sphaignes dans l'infrarouge a été envisagée par Harris *et al.* (2009). Ainsi, il a été démontré que plus l'échelle spatiale utilisée augmentait, plus il devenait plus difficile de lier le changement d'humidité des sphaignes aux indices spectraux des satellites.

2.3.2 Potentiel des images à très haute résolution spatiale pour le suivi hydrologique des tourbières

Dans une étude réalisée par Collins (2005), des photographies aériennes ont été utilisées pour étudier la dynamique récente des mares des tourbières du bassin versant de la rivière La Grande, ceci à une échelle de 25 années (1977-2003). Les résultats ont montré la viabilité du suivi hydrologique des tourbières par photographies aériennes. De plus, il a été démontré que les mares des tourbières étaient très sensibles aux conditions climatiques, leur forme et leur superficie variant avec le climat. Les paramètres des mares n'étaient cependant pas extraits d'après une classification automatique mais plutôt manuellement par l'expert (Collins, 2005).

Une autre étude, réalisée par Dissanska et al. (2009), à l'aide d'images Quickbird (canal panchromatique ; résolution spatiale de 0,6 m) et d'images aériennes, a permis un suivi des changements hydrologiques survenus en 50 ans (1957-2007) dans les tourbières minérotrophes du bassin versant de la rivière La Grande. Une classification orientée-objet semi-automatisée a été développée, permettant notamment de délimiter les structures aquatiques et semi-aquatiques de chacune des tourbières. Les résultats de classification furent prometteurs (81 % de précision sur les structures internes aux tourbières). Concernant les images à très haute résolution spatiale, cette technique de classification est pertinente et de plus en plus fréquente, les pixels étant très nombreux et leurs valeurs ayant une très forte hétérogénéité spatiale. Ainsi, de nombreuses études ont permis de cartographier des milieux humides en exploitant des images à très haute résolution spatiale et la technique de classification orientée-objet (Cao *et al.*, 2007, Civco *et al.*, 2008, Halabisky *et al.*, 2011, Hubert-Moy *et al.*, 2006, Zong *et al.*, 2010).

Les tourbières canadiennes ne sont pas les seuls milieux humides, objet d'une étude hydrologique grâce à des images à très haute résolution spatiale. Par exemple, des données multispectrales Quickbird (résolution spatiale de 2,4 m) et des données hydrologiques (précipitations et niveaux d'eau) ont été utilisées pour établir la dynamique spatiotemporelle des mares d'un milieu humide sénégalais. Un modèle a été créé pour connaître la hauteur d'eau des mares et leur surface en fonction des précipitations (Soti *et al.*, 2010). White & Lewis (2011) ont exploité plusieurs images multispectrales Quickbird, afin de surveiller la distribution spatiale et la dynamique inter-annuelle des milieux humides du grand bassin artésien australien. Des indices NDVI ont été calculés à partir de ces images et une détection de changement a été appliquée. La méthode s'est avérée efficace pour suivre la sensibilité de la superficie des milieux humides au printemps, à des changements de débits des sources au printemps en raison d'extractions d'eau souterraine d'origine anthropique.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 Sites à l'étude

Dans le cadre de ce projet d'étude, deux tourbières ont été choisies dans un secteur au milieu du bassin versant de la rivière La Grande (secteur Laforge), dans la région de la Baie James au Québec (article, chapitre 2). La région connaît des précipitations moyennes annuelles d'environ 830 mm et une température moyenne annuelle d'environ $-4,2^{\circ}\text{C}$. Le bassin versant de la rivière La Grande est situé dans le Bouclier canadien. Les dépôts de surface sont surtout d'origine glacio-lacustre (Payette & Rochefort, 2001). Le secteur d'étude est situé à 15 km au sud de l'aménagement hydroélectrique Laforge-1. Trois tourbières facilement accessibles faisaient alors l'objet d'études hydrologiques et écologiques depuis l'été 2008, dans le cadre du projet pluridisciplinaire « Aqualyse » (Levrel & Rousseau, 2010, Proulx-McInnis, 2010). Deux de ces trois tourbières ont été choisies pour l'étude car elles étaient de plus petite taille, avec une proportion relativement élevée d'eau en surface et un exutoire unique. Le bassin versant de la tourbière du premier site (figure 4.a) a une superficie de 12.1 ha. La tourbière est séparée en deux ailes et structurée avec une succession de mares allongées et de lanières étroites. L'eau circulant dans cette tourbière aboutit à une grande mare proche de l'exutoire, situé au sud-ouest de la tourbière (Proulx-McInnis, 2010). Le bassin versant de la tourbière du second site (figure 4.b) a une superficie de 3.7 ha. La tourbière est structurée avec une succession de mares larges et de lanières étroites, le long d'une seule aile. L'eau circulant dans cette tourbière aboutit à un unique exutoire, situé à l'est de la tourbière.

3.2 Mesures hydrométéorologiques

De multiples mesures hydrométéorologiques ont été effectuées sur les deux sites d'études. Ces mesures ne concernaient pas uniquement ce projet, mais plutôt un ensemble de projets de recherche en hydrologie des tourbières boréales. Les instruments utilisés dans le cadre de l'étude sont localisés à la figure 4. Une station météorologique (mesurant la température de l'air, la pression atmosphérique et les précipitations) et des canaux trapézoïdaux (mesurant les débits à l'exutoire) ont pu être installés sur la tourbière principale de notre étude (site 1), ainsi que des

puits équipés de jauges à pression hydrostatique et enfoncés dans le sol tourbeux jusqu'à la nappe phréatique pour en mesurer sa fluctuation verticale (figure 5). D'autres puits, équipés de jauges à pression hydrostatique ont également été installés, dans des mares de la deuxième tourbière objet de l'étude (figure 5). Tous les puits n'ont pas été utilisés dans notre étude car de nombreuses données étaient manquantes pour certains puits lors de longues périodes pendant les saisons sans neige 2009 et 2010.

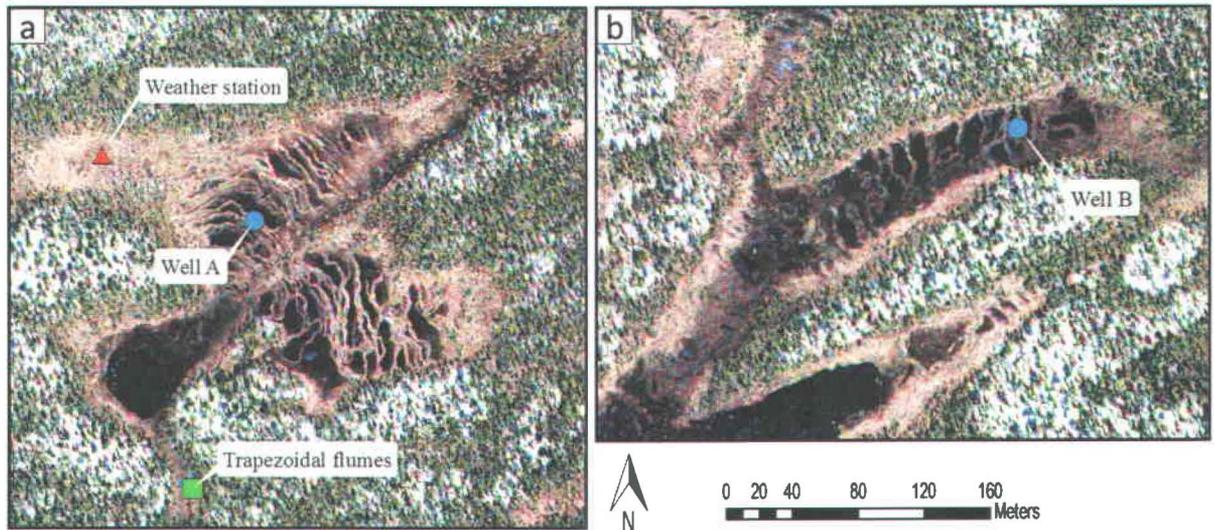


Figure 4 Localisation des instruments utilisés dans l'étude au (a) site 1 ($54^{\circ}06'52''N$, $72^{\circ}30'02''O$) et (b) site 2 ($54^{\circ}06'41''N$, $72^{\circ}30'56''O$).



Figure 5 Mesures hydrométéorologiques de terrain : (a) Station météorologique ; (b) Canaux trapézoïdaux accompagnés de puits, à l'exutoire de la tourbière du site 1 ; (c) Schéma d'un puits enfoncé dans le sol tourbeux et équipé avec une jauge à pression hydrostatique (levellogger) ; (d) Schéma d'un puits enfoncé en fond de mare et équipé avec une jauge à pression hydrostatique.

3.3 Données satellitaires

Un total de 10 images GeoEye-1 ont été acquises en 2009 et 2010 pour cette étude. Les dates d'acquisition et les caractéristiques propres à chaque image se trouvent dans le tableau 1.

GeoEye-1 au moment de son lancement était le satellite commercial (hors usage militaire) ayant la plus haute résolution. En effet, le capteur recueille des images avec une résolution de 0,41 m pour le canal panchromatique (noir et blanc) et de 1,65 m pour les canaux multispectraux. NOAA demande à la compagnie GeoEye de ré-échantillonner les images à 0,50 m de résolution pour une utilisation commerciale. En raison de son altitude, de son orbite héliosynchrone, de son champ de vision et de sa très haute résolution, GeoEye-1 peut revoir n'importe quel point sur terre au minimum tous les trois jours (en fonction de l'angle de visée demandé). 98 minutes lui sont nécessaires pour aller de pôle à pôle (GeoEye, 2011). Les caractéristiques de ce capteur étaient donc adéquates pour réaliser un suivi, à très haute résolution spatiale, spectrale (figure 6) et temporelle, de l'hydrologie dans les tourbières structurées du bassin versant de la rivière La Grande.

Tableau 1 Caractéristiques des 10 images GeoEye-1 acquises.

GeoEye-1 images features	2009					2010				
	June 20 th	July 23 rd	August 8 th	Sept. 5 th	Sept. 13 th	May 18 th	June 9 th	June 28 th	August 3 rd	August 30 th
Ground coverage (km)	7.9 x 7.7	7.9 x 7.7	7.9 x 7.7	7.9 x 7.7	7.9 x 7.7	7.9 x 7.7	8.0 x 8.0	7.9 x 7.7	7.9 x 7.7	8.0 x 8.0
Sensor tilt (°)	16.69	28.42	7.95	25.67	14.87	27.54	15.51	10.37	26.93	17.94
Nominal collection azimuth (°)	303.54	338.17	170.00	306.89	265.75	225.28	277.69	317.95	244.80	25.08
Solar zenith angle (°)	31.38	34.94	39.51	47.82	50.95	35.13	31.95	32.01	37.52	46.41
Solar azimuth angle (°)	164.13	163.95	159.61	171.00	169.69	165.37	163.56	159.67	164.01	162.10
Clouds coverage (%)	0	40	3	44	0	62	0	31	31	9

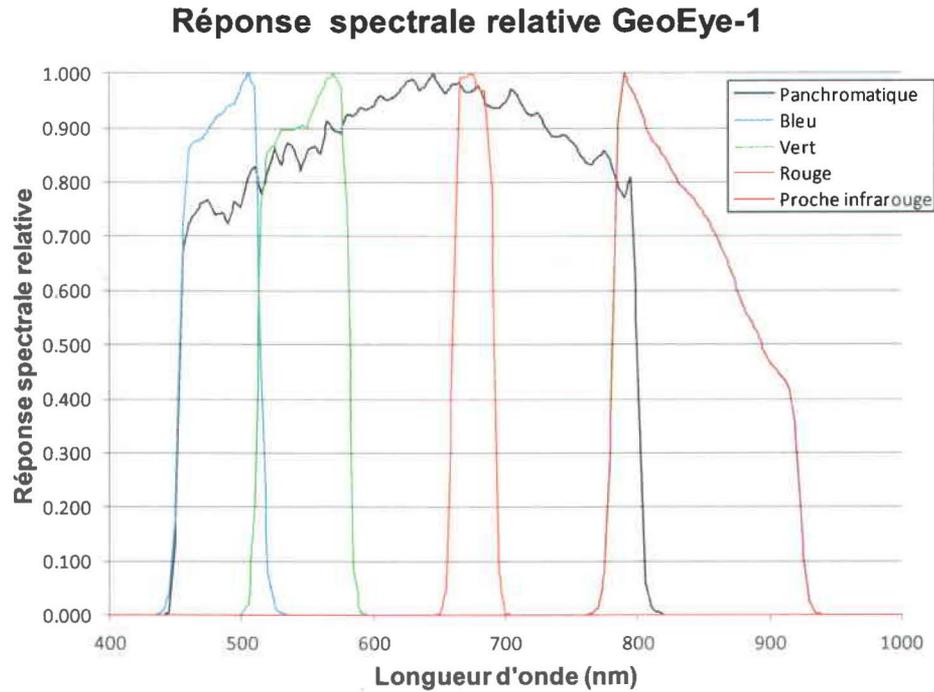


Figure 6 Réponse spectrale du capteur GeoEye-1 (modifié de : GeoEye, 2010).

3.4 Approche méthodologique

L'approche méthodologique de cette étude est résumée dans la figure 7 ci-dessous.

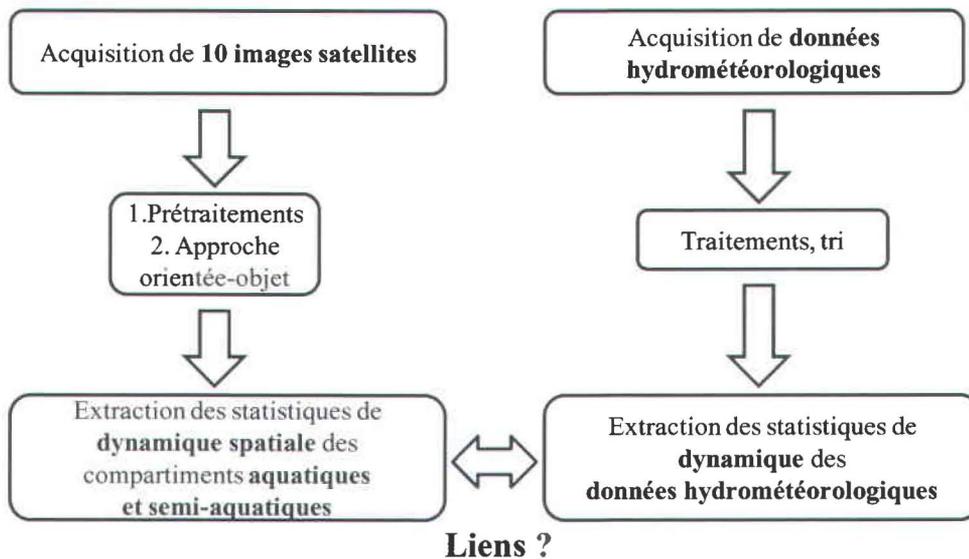


Figure 7 Approche méthodologique de l'étude

3.4.1 Pré-traitements

La chaîne des pré-traitements est présentée dans la figure 8. Les images ont été corrigées géométriquement et radiométriquement. L'impact de l'ordre de ces corrections est discuté dans l'étude de Xu & Wu (2012). De plus, l'algorithme « Pansharp » du logiciel de traitement d'images PCI Geomatics® a été utilisé pour fusionner les canaux optiques et proche-infrarouge avec le canal panchromatique, doté d'une meilleure résolution. Enfin, les images ont été normalisées par rapport aux effets de l'atmosphère sur les valeurs des pixels. Cette étape aurait pu être évitée, considérant que chacune des images a finalement été indépendamment classifiée, à partir de sites d'entraînement propres à l'image concernée (Song et al., 2001). Le lecteur pourra se référer au chapitre 2 de l'article pour davantage de renseignements.

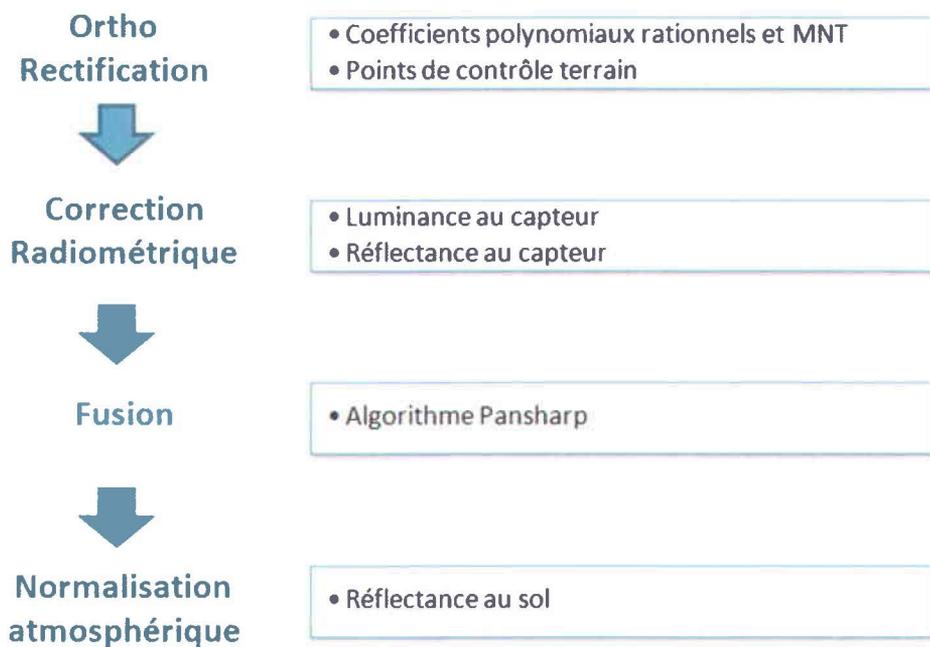


Figure 8 Organigramme des prétraitements des 10 images GeoEye-1.

3.4.2 Approche orientée-objet

Le but était de classifier de la manière la plus précise possible les deux tourbières étudiées, et d'y détecter la proportion des compartiments aquatiques, semi-aquatiques, ce pour chaque image GeoEye-1. Ainsi, il a été choisi d'adapter aux images multispectrales GeoEye-1 la méthode de classification orientée-objet élaborée dans une étude antérieure afin de classifier des tourbières à

partir d'images panchromatiques (Dissanska *et al.*, 2009). L'approche orientée-objet est commune pour les images à très haute résolution qui sont des images contenant une très grande quantité d'informations, ayant pour effet de produire une grande variabilité dans les signatures spectrales des pixels. Les techniques traditionnelles de traitement d'image pixel à pixel peuvent alors s'avérer insuffisantes et risquent de produire des résultats peu cohérents (Chokmani *et al.*, 2008). L'approche orientée-objet a été sélectionnée car elle utilise non seulement l'information spectrale contenue dans l'image mais aussi l'information spatiale, par exemple la forme des objets identifiés ou le contexte de voisinage de ces objets (Dissanska *et al.*, 2009). L'utilisation de la logique floue par l'intermédiaire des fonctions d'appartenance permet alors de discriminer plus précisément les objets en fonction des classes définies. L'approche orientée-objet a montré des résultats prometteurs concernant les milieux humides (Dissanska *et al.*, 2009, Hubert-Moy *et al.*, 2006). Elle comporte deux étapes: la segmentation (découper l'image en objets homogènes) et la classification (donner une étiquette à chaque objet). La méthodologie de classification a été implantée dans le logiciel de traitement d'image eCognition version 8.64.0® (Trimble, 2010). Pour de plus amples détails à propos de la procédure implantée, le lecteur pourra se référer au chapitre 2 de l'article.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Classification des données satellitaires à l'aide de l'approche orientée-objet

Pour chacune des 10 images GeoEye-1 prétraitées, une sous-image de 2,5 km par 2,7 km a été classifiée à l'aide de la procédure décrite dans le chapitre 2 de l'article. Les bandes bleu, vert, rouge, et infrarouge ont été exploitées pour la discrimination des classes (voir Annexe A). Les pseudo-bandes d'intensité, de saturation, de proportion de bleu, vert, et rouge ainsi que d'indice de chlorophylle ont également été utilisées (voir annexe A). D'autre part, le canal NDVI et l'analyse de textures n'ont pas donné de résultats encourageants pour la classification. La signature spectrale de la bande panchromatique ne recouvrant pas la majorité de la signature spectrale du proche infrarouge, la fusion a pu provoquer des imprécisions sur ce calcul NDVI. De plus, les environnements humides sont des milieux très complexes, et les objets créés par la segmentation présentent une gamme de valeur de texture très étendue, même si ils font partie d'une même classe. Cependant, il est vrai que l'eau se distingue bien de la forêt par la texture, mais ces classes étaient déjà très bien distinguées avec les bandes d'origine.

Les règles spatiales et spectrales utilisées pour les classifications figurent en annexe (annexe A). Les cartes de classification orientée-objet finales des 10 sous-images figurent également en annexe (annexe B). La précision globale associée à ces cartes de classification finales est de 82 %, avec un coefficient Kappa de 79 %. Si l'on considère des regroupements de classes, en fonction du degré de saturation hydrologique des classes (aquatique, semi-aquatique, terrestre), on obtient alors une précision globale de 92 % et un coefficient Kappa de 83 %. Ces résultats sont présentés sous forme de matrices dans le chapitre 3 de l'article. Des exemples de confusion de classes sont également présentés dans ce chapitre (bords de tourbières, absence de verdure sur la végétation due à la saison). La majorité de ces confusions n'affectent pas la zone saturée (article, chapitre 3). Ainsi, les résultats avec de bonnes précisions obtenues sont d'une grande importance pour la suite de l'étude, car ils permettent alors une évaluation précise de la dynamique spatiale de l'hydrologie.

4.2 Dynamique spatiale saisonnière des structures aquatiques et semi-aquatiques des tourbières minérotrophes

Afin de suivre l'évolution de l'hydrologie dans chaque tourbière, la zone concernée y a été délimitée. Cette zone dite saturée comprend à la fois des compartiments aquatiques, semi-aquatiques et terrestres. Elle est affectée par la présence d'eau à la surface ou proche de la surface (<10 cm de profondeur), ce qui influence la composition du couvert végétal. Les localisations des zones saturées des deux tourbières étudiées sont indiquées à la figure 6 de l'article. Les compositions des zones saturées de ces tourbières, issues des classifications finales, figurent en annexe. On a ainsi pu observer qu'il existe une dynamique spatiale dans la zone saturée, et ce, à l'échelle saisonnière (saisons sans neige 2009 et 2010). Concernant le site 1, si l'on analyse l'évolution des compartiments aquatiques seulement, on obtient une augmentation du pourcentage aquatique de 78 % entre les conditions les plus sèches (23 juillet 2009) et les plus humides (18 mai 2010) observées. Si on inclut également les compartiments semi-aquatiques dans l'analyse, on obtient alors une augmentation de 53 % entre les mêmes dates. Considérant le site 2, les augmentations sont moins significatives entre les conditions les plus sèches (13 septembre 2009) et les plus humides (30 août 2010) observées. Ceci est vérifiable en prenant en compte les compartiments semi-aquatiques (35 % d'augmentation) ou non (17 % d'augmentation). Malheureusement, des nuages étaient présents au-dessus du site 2 le 23 juillet 2009 et le 18 mai 2010, dates des conditions les plus sèches et les plus humides observées sur le site 1. L'amplitude de la dynamique spatiale saisonnière ne peut donc pas être directement comparée entre les deux sites. D'autre part, il a été observé que la dynamique spatiale saisonnière est relativement hétérogène dans la zone saturée de la tourbière (chapitre 3 de l'article et annexe C). La majorité des changements hydrologiques de surface intervient en bordure de certaines mares principales mais aussi au niveau des mares temporaires.

4.3 Dynamique spatiale saisonnière en relation avec le régime hydrologique des tourbières minérotrophes

L'évolution du niveau de nappe mesuré dans la tourbière du site 1 a été comparée à l'évolution du débit mesuré à l'exutoire de cette tourbière (article, figure 11). Le niveau de nappe est une mesure ponctuelle contrairement à la mesure débit qui intègre le ruissellement de tout le bassin

versant. Cependant, l'hypothèse d'une relative homogénéité de l'évolution du niveau d'eau au sein d'une même tourbière a été émise. Une relation exponentielle attendue, connaissant le régime spécifique des tourbières, a été observée entre les valeurs mesurées de niveau de nappe et de débit (article, figure 11). Un coefficient de détermination de 0,63 caractérisant cette relation a été obtenu. Deux phases ont pu alors être distinguées. La première phase correspond à une augmentation rapide du niveau d'eau tandis que le débit reste faible ; elle est appelée la phase de stockage. La seconde phase est caractérisée par une forte augmentation du débit tandis que le niveau d'eau est déjà élevé et n'augmente pas fortement. De l'eau est libérée de la tourbière ; la phase est dite de ruissellement. En fait, à partir d'un seuil correspondant à un certain niveau d'eau et à un certain débit, le comportement hydrologique de la tourbière est modifié (article, chapitre 3). Le seuil entre les deux phases est un indicateur très précieux dans une perspective de modélisation puisque les modèles doivent utiliser des paramètres distincts pour les deux phases de régime. En observant les niveaux d'eau et débits correspondants aux dates des données satellitaires acquises, uniquement la phase de stockage a été couverte (article, figure 11). Néanmoins, l'absence d'images acquises durant d'importants événements de ruissellement n'était pas un obstacle à l'observation d'une dynamique hydrologique saisonnière. L'ampleur de cette dynamique était importante durant la phase de stockage et semblait être liée à l'évolution du niveau d'eau.

L'évolution des niveaux d'eau mesurés a ensuite été comparée à la variation spatiale des compartiments aquatiques et semi-aquatiques. Ainsi, pour chaque date d'acquisition d'une image satellitaire, les proportions aquatiques et semi-aquatiques de la zone saturée de chacune des tourbières étudiées ont été considérés, ainsi que les niveaux d'eau mesurés correspondants. Les compartiments aquatiques de la zone saturée auraient pu être choisis comme les seuls indicateurs de la dynamique spatiale hydrologique. Cependant, les compartiments semi-aquatiques ont également été considérés, car ils jouent un rôle majeur dans cette dynamique. Concernant la zone saturée de la première tourbière, un modèle linéaire a pu décrire de manière efficace la relation, avec un coefficient de détermination de 0,61 si les compartiments aquatiques étaient seulement considérés, et de 0,70 si les compartiments semi-aquatiques étaient également considérés (article, figure 12). De la même manière, concernant la zone saturée de la seconde tourbière, des coefficients de 0,77 et 0,78 ont été respectivement obtenus avec une relation établie linéairement (article, figure 13). La corrélation était dans tous les cas positive, i.e. une augmentation des

proportions aquatiques et semi-aquatiques de la zone saturée impliquait une augmentation du niveau d'eau. Cependant, les niveaux d'eau sont des mesures locales, et les résultats dérivés des classifications décrivent toute la zone saturée des tourbières. La dynamique du niveau d'eau peut varier le long d'une même tourbière minérotrophe. Cela peut expliquer les valeurs des coefficients de détermination qui ne dépassent jamais 0,8. D'autre part, dans la zone saturée de la première tourbière, le niveau d'eau analysé était un niveau de nappe souterraine (sous le sol tourbeux). Au contraire, dans la zone saturée de la seconde tourbière, le niveau d'eau analysé était un niveau de mare (à la surface libre). Les statistiques dérivées des classifications indiquent des variations hydrologiques à la surface de la tourbière, et devraient donc être mieux corrélées avec l'évolution des niveaux de mare qu'avec celle des niveaux de nappe souterraine. La différence de localisation de la mesure pourrait donc expliquer la meilleure corrélation obtenue pour la seconde tourbière (article, chapitre 3). De plus, les pentes des régressions linéaires obtenues sont apparues deux fois plus importantes dans le cas de la seconde tourbière (article, figure 13) que dans le cas de la première tourbière (article, figure 12). Ceci reflète une plus faible dynamique spatiale des compartiments aquatiques et semi-aquatiques dans la zone saturée de la seconde tourbière. Les différences morphologiques des deux tourbières structurées pourraient expliquer cet écart (article, chapitre 3). Ainsi, la superficie des mares, leur profondeur et leur contour pourraient être des paramètres déterminant l'ampleur de la dynamique spatiale des compartiments aquatiques et semi-aquatiques. Pour mieux comprendre quels paramètres influencent l'ampleur de cette dynamique, davantage de tourbières avec des caractéristiques morphologiques très différentes devraient être étudiées dans le futur.

5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le but de ce présent travail était d'étudier la dynamique saisonnière hydrologique des tourbières minérotrophes (fens) à l'aide de l'imagerie multi-temporelle à très haute résolution GeoEye-1. Ceci dans l'optique de résoudre les questions suivantes: "Est-il possible de délimiter et classifier les structures internes aux tourbières à l'aide des images multispectrales à très haute résolution ?"; "Existe-t-il une dynamique saisonnière dans les structures aquatiques et semi-aquatiques des fens structurés et peut-on la quantifier avec ces images ?"; et "Peut-on mettre en lien la dynamique observée avec le régime hydrologique des fens ?".

À ces fins, une approche de classification orientée-objet a été mise au point et appliquée à 10 images GeoEye-1 acquises au cours des saisons sans neige de 2009 et 2010, couvrant deux fens (site 1 et site 2) situés dans le bassin versant de la rivière La Grande (54°N, Québec, Canada). En outre, ces fens ont été instrumentés en 2009 pour une surveillance hydrométéorologique continue.

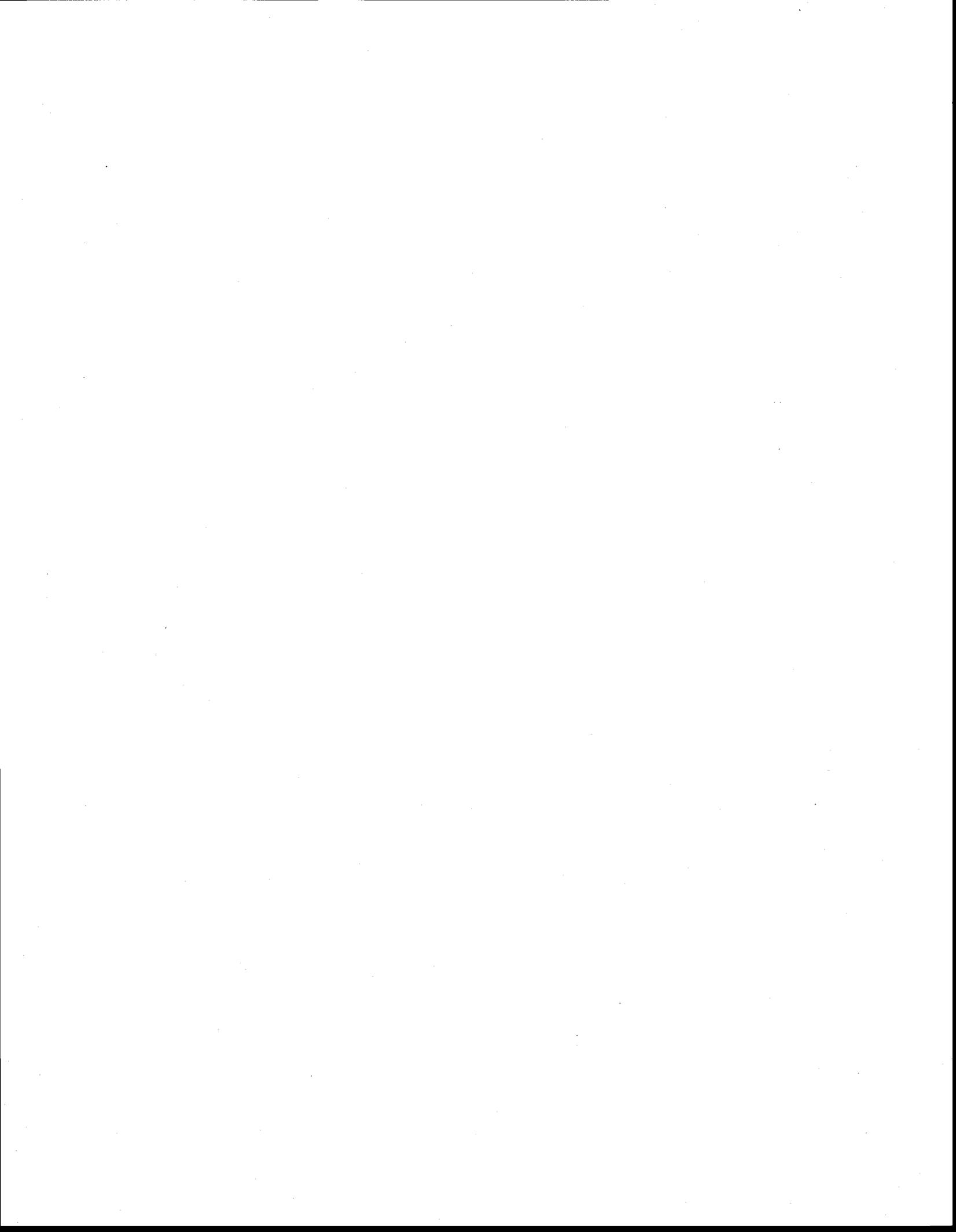
La méthode de classification orientée-objet a donné un niveau satisfaisant de précision à la fois pour la délimitation des tourbières (précision globale de 93 %) et pour la distinction des structures internes des tourbières (précision globale de 82 %). La richesse spectrale et la résolution spatiale de l'imagerie GeoEye-1 fusionnée a permis de discriminer efficacement les différentes caractéristiques éco-hydrologiques d'un milieu aussi complexe que celui des tourbières. L'information multispectrale a notamment été déterminante pour séparer les classes aquatiques, semi-aquatiques et terrestres. En effet, la présence de végétation et le degré de saturation influençaient grandement la réponse spectrale de ces bandes.

Par ailleurs, la série temporelle de la cartographie des structures internes des tourbières a permis de démontrer l'existence d'une dynamique spatiale intra-saisonnière importante dans les compartiments aquatiques et semi-aquatiques des tourbières à l'étude (site 1 : 53 % de variation ; site 2 : 17 % de variation). Il s'est avéré que l'amplitude de la dynamique dépendait des caractéristiques morphologiques des fens. La dynamique spatiale est plus forte si les contours de mares sont lâches que s'ils sont bien définis. Même si les 10 images ont été acquises en conditions de faible débit, la quasi-totalité de la dynamique saisonnière des compartiments aquatiques et semi-aquatiques a été captée par l'imagerie.

La dynamique spatiale observée par imagerie était étroitement liée à l'évolution des niveaux d'eau mesurés. En effet, lorsqu'on analyse la relation entre niveau d'eau et débit dans une tourbière, on observe deux régimes hydrologiques distincts. Le régime de stockage d'eau, pour lequel une augmentation forte du niveau d'eau de la tourbière ne se traduit pas par une augmentation significative du débit à l'exutoire. Lors de cette phase, l'étendue spatiale des compartiments aquatiques et semi-aquatiques, extraite de l'imagerie, augmente fortement. À partir d'un certain seuil, on assiste à une augmentation forte du débit qui ne se traduit pas par une augmentation significative du niveau d'eau. Dans ce régime hydrologique dit de ruissellement, l'étendue spatiale des compartiments aquatiques et semi-aquatiques ne devrait alors pas augmenter beaucoup. Ainsi, trouver le seuil de changement de régime par imagerie satellite permettrait de déterminer la capacité de stockage d'un fen. Cela est d'une grande importance pour la compréhension et la modélisation de l'hydrologie des tourbières structurées. Cette étude a donc démontré la possibilité d'un suivi hydrologique des tourbières à la fois à l'échelle intra-saisonnière et à l'échelle locale. Les études antérieures se sont limitées à un suivi à échelle multi-décennale.

Ce travail a été conduit sur deux sites expérimentaux seulement. Il serait intéressant de répéter l'expérience sur d'autres tourbières présentant un gradient de structuration morphologique. Ceci permettrait de quantifier la capacité de stockage et de détecter la position du seuil de changement de régime hydrologique, à partir des variations spatiales des structures aquatiques et semi-aquatiques extraites par imagerie VHR multispectrale. Dans ce cas, il faudrait veiller à mesurer le débit à l'exutoire de chacune des tourbières (dans la présente étude, seul un exutoire de fen avait été instrumenté). De plus, les mesures de niveaux de nappe doivent être positionnées dans les secteurs stratégiques où la dynamique spatiale hydrologique est importante, par exemple dans les mares à contours lâches. Les sites pourraient être identifiés et choisis de façon adéquate à l'aide de l'imagerie. En somme, cette étude constitue une étape primordiale vers le développement d'approches opérationnelles de suivi hydrologique des tourbières structurées à l'aide de l'imagerie VHR multispectrale à très haute résolution. Sa vue synoptique fournirait ainsi un complément ou même une alternative à l'instrumentation terrain des tourbières, surtout dans les zones éloignées.

PARTIE 2 : ARTICLE



AVANT-PROPOS

L'article a été soumis pour une publication dans la revue suisse Remote Sensing dont MDPI est l'éditeur. Cette revue « code source libre » est disponible en ligne à l'adresse suivante : <http://www.mdpi.com/journal/remotesensing>

Yann Dribault :

- Définition du sujet et des objectifs
- Développement de la méthodologie
- Traitement des données
- Analyse des données et interprétation des résultats
- Écriture et révision de l'article

Karem Chokmani :

- Aide à la définition du sujet et des objectifs
- Aide au développement de la méthodologie
- Aide à l'interprétation des résultats
- Révision de l'article

Monique Bernier :

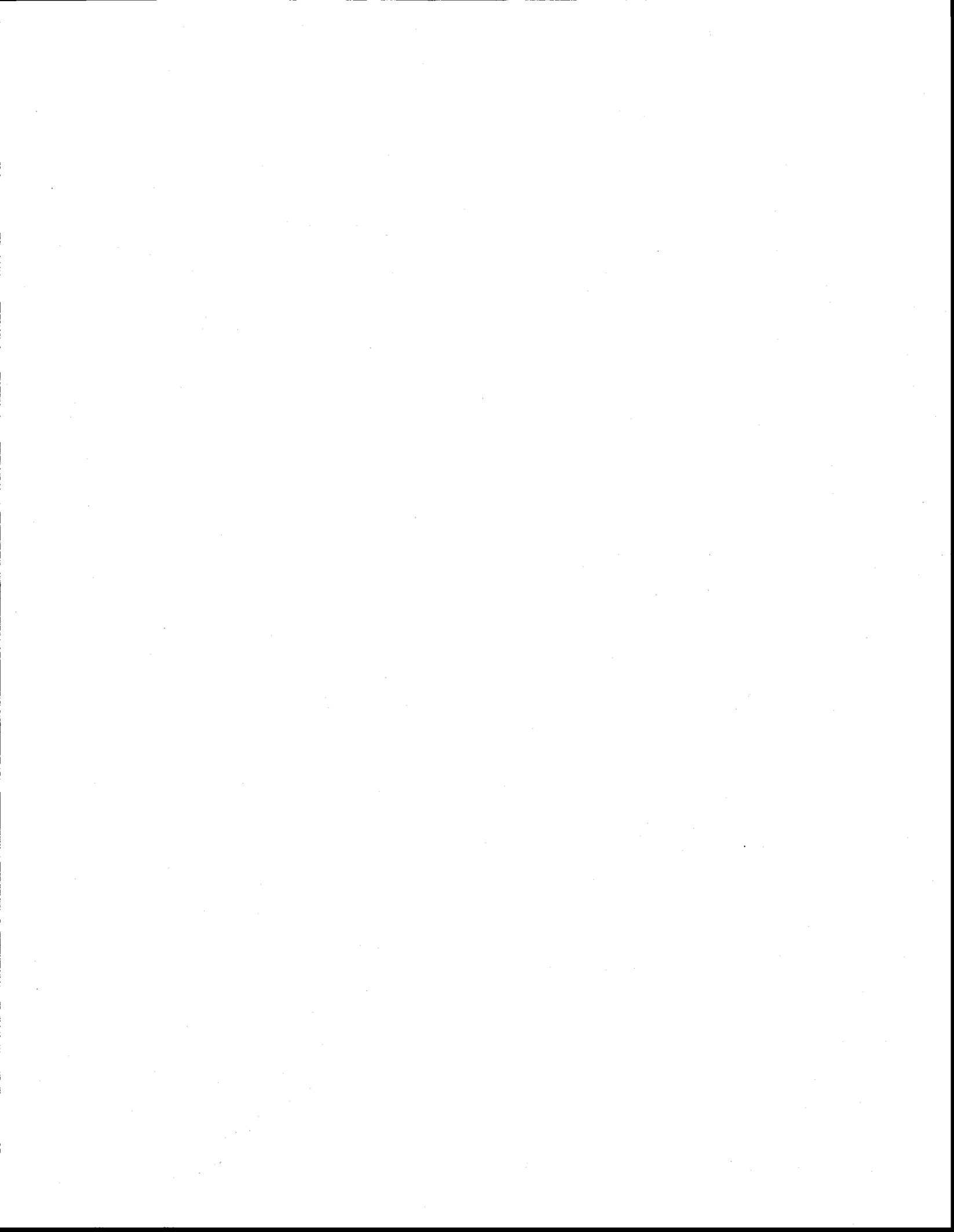
- Aide à la définition du sujet et des objectifs
- Aide au développement de la méthodologie
- Révision de l'article



RÉSUMÉ

Le bassin versant de la rivière La Grande à la Baie James (54°N, Québec, Canada) est un contributeur majeur à l'hydroélectricité dans la province du Québec. Les tourbières couvrent près de 20 % de l'environnement terrestre dans cette région. Leur comportement hydrologique est encore méconnu. La présente étude fait partie d'un projet pluridisciplinaire, visant à analyser les processus hydrologiques dans les tourbières minérotrophes (fens) du bassin versant, afin de fournir des outils de contrôle efficaces pour les gestionnaires de l'eau. L'objectif de cette étude est d'exploiter la télédétection satellitaire à très haute résolution (THR) pour étudier la dynamique saisonnière de l'hydrologie dans les fens. 10 images multispectrales fusionnées GeoEye-1 (avec une résolution nominale de 40 cm) ont été acquises au cours des saisons sans neige (mai à octobre) de 2009 et 2010, dans le secteur Laforge (N54° 06 ' ; W72° 30'), centrées sur les sites d'étude. Il s'agit de deux tourbières, instrumentées pour un suivi hydrométéorologique en continu (niveau d'eau, débit, précipitation, température de l'air). Une procédure d'analyse orientée-objet semi-automatisée a été mise au point et appliquée. Cela consistait à segmenter l'image en objets en utilisant l'algorithme de segmentation multirésolution (MRIS) pour délimiter les structures internes des tourbières (aquatiques, semi-aquatiques, terrestres). Puis, les objets ont été étiquetés en utilisant un algorithme basé sur la logique floue. La précision globale de la classification des 10 images a été estimée à 82 %. La série temporelle de la cartographie des structures internes des tourbières a démontré l'existence d'une dynamique spatiale intra-saisonnière importante des compartiments aquatiques et semi-aquatiques des tourbières à l'étude. Il s'est avéré que l'amplitude de la dynamique dépendait des caractéristiques morphologiques des fens. La dynamique spatiale observée a été également fortement reliée à l'évolution des niveaux d'eau mesurés.

Mots-clés : télédétection ; tourbière ; fen ; hydrologie ; GeoEye ; haute résolution ; niveau d'eau ; débit ; analyse orientée-objet



ABSTRACT

The La Grande River watershed, located in the James Bay region (54°N, Quebec, Canada), is a major contributor to the production of hydroelectricity in the province of Quebec. Peatlands cover up to 20% of the terrestrial environment in this region. Their hydrological behaviour is not well understood. The present study is part of a multidisciplinary project which aimed at analyzing the hydrological processes in these minerotrophic peatlands (fens) in order to provide effective monitoring tools to water managers. The objective of this study was to use VHR remote sensing data to understand the seasonal dynamics of the hydrology in fens. A series of 10 multispectral pan-sharpened GeoEye-1 images (with a spatial resolution of 40 cm) were acquired during the snow-free season (May to October) of 2009 and 2010, centred on two study sites in the Laforge sector (N54° 06'; W72° 30'). These are two fens instrumented for continuous hydrometeorological monitoring (water level, discharge, precipitation, air temperature). An object-based classification procedure was set up and applied. It consisted in segmentating the imagery into objects using the multiresolution segmentation algorithm (MRIS) to delineate internal structures in the peatlands (aquatic, semi-aquatic, and terrestrial). Then, the objects were labeled using fuzzy logic based algorithm. The overall classification accuracy of the 10 images was assessed to be 82%. The time series of the internal peatlands structures mapping demonstrated the existence of an important intra-seasonal spatial dynamics in the aquatic and semi-aquatic compartments of the peatlands under study. It turned out that the dynamics amplitude depended on the morphological features of the fens. The observed spatial dynamics was also closely related to the evolution of the measured water levels.

Keywords: remote sensing; peatland; fen; hydrology; GeoEye; multispectral; high resolution; water level; discharge; object-based analysis.



MONITORING SEASONAL HYDROLOGICAL DYNAMICS OF MINEROTROPHIC PEATLANDS USING MULTI-DATE GEOEYE-1 VERY HIGH RESOLUTION IMAGERY AND OBJECT-BASED CLASSIFICATION

Yann Dribault ^{1,2,*}, Karem Chokmani ¹ and Monique Bernier ^{1,2}

¹ INRS, Centre Eau Terre Environnement, 490 rue de la Couronne, Québec (QC, Canada), G1K 9A9

² CEN, Centre d'Études Nordiques, Pavillon Abitibi-Price, 2405, rue de la Terrasse, Local 1202, Université Laval, Québec (QC, Canada), G1V 0A6

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: yann.dribault@ete.inrs.ca



1 INTRODUCTION

Hydroelectricity production in the province of Quebec is highly dependent on the hydrological conditions of the Mid-Northern region. The hydroelectric complex on the La Grande River covers a watershed of more than 177,000 km² (Hydro-Québec, 2001). The eight dams currently present on this river alone generate around 40% of the hydroelectricity in Quebec (MRNF, 2006). Since 1985, the water levels in these reservoirs have varied dramatically for reasons not currently understood (Roy, 2004). One hypothesis involves variations in the storage of water by peatlands, which are strongly represented in the watershed.

Peatlands, characterized by an accumulation of over 40 cm of peat (NWWG, 1997), represent over 90% of Canadian wetlands (Waddington et al., 2009). They occupy about 20% of the terrestrial environment of the watershed of the La Grande River (Tarnocai et al., 2000). In this region, peatlands are mostly patterned, with alternating pools and vegetated strings. Previous studies have demonstrated that this fine-scale topography strongly influences the water balance of the peatland by reducing or delaying runoff, leading to the temporary storage of water in pools (Price et al., 1990), and by increasing evapotranspiration and water storage capacity (Price & Maloney, 1994). The buffer effect of peatlands (both bogs and fens) is inversely proportional to the water table level (Clerc, 2009, Price & Waddington, 2000, Quinton & Roulet, 1998). Strong seasonal variations of flow characterize peatlands. They generally show their maximum flows during the snow melt season, while the flow can be zero during long dry periods during the summer (Tardif et al., 2009).

In the past decade, there has been increasing interest in the use of remote sensing science to map wetlands and monitor their hydrological changes (Ozesmi & Bauer, 2002). However, wetlands are inherently difficult to map: their boundaries exist along a wetland/upland continuum, and they are subject to regular changes in inundation that result in complex assemblages of vegetation and habitat types (Rokitnicki-Wojcik et al., 2011).

Originally, studies focused on the discrimination and classification of wetlands due to the limited spatial resolution of optical and radar sensors (10–30m) (Bernier et al., 2003, Ghedira, 2002, Grenier et al., 2007). More recently, remote sensors (LANDSAT, RADARSAT...) have been used to study ecological and hydrological aspects of wetlands (Dissanska et al., 2007, Gómez-

Rodríguez et al., 2010, Quinton et al., 2003, Racine et al., 2005, Töyrä & Pietroniro, 2005). Aerial photographs were recently used to study the dynamics of peatland pools in the La Grande River watershed at a multi-decadal scale (Collins, 2005). The results showed that these pools are very sensitive to climate conditions, their size varying according to climate change.

The emergence of new satellite sensors providing very high spatial resolution images (VHR) has raised new hopes for environmental and urban monitoring (Dissanska et al., 2009, Moskal et al., 2011, Novack et al., 2011). These images provide an attractive alternative to aerial photographs due to short satellite return intervals and digital data formats easily integrated into geographic information systems (Ozesmi & Bauer, 2002). Recent studies have shown that VHR imagery is suitable for the detailed mapping of temporary water bodies at a local scale (Dissanska et al., 2009, Soti et al., 2010). Dissanska et al. (2009) developed a semi-automated approach for assessing the spatiotemporal development of terrestrial and aquatic compartments in patterned peatlands of the La Grande River watershed based on very high resolution panchromatic images. This study, which operated at a multi-decadal scale (1957–2006), proposed a robust method of classification with an overall accuracy of 81% that was able to detect significant changes in the aquatic areas of the studied peatlands.

These studies suggest that VHR multispectral imagery might be a good tool for monitoring the hydrological behaviour of patterned fens, with the help of an object-based classification approach including specific rulesets. Our study covered two seasons (2009 and 2010) and involved comparison of imagery-derived statistics (through classification) with in-situ hydrometric measurements. The results should help water managers to better model the specific hydrological regime of fens.

This study had three objectives: (1) Test the potential of VHR multispectral images to delineate and classify the internal structures in peatlands. (2) Use VHR imagery to verify the existence of seasonal dynamics of aquatic and semi-aquatic structures in patterned fens and quantify this dynamics. (3) Determine if the observed dynamics can explain the hydrological regime of fens.

2 MATERIAL AND METHODS

2.1 Study area

The study area is located in the middle part of the La Grande River watershed in the James Bay region (Quebec, Canada), 15 kilometres south of the Laforge 1 hydroelectric dam (Figure 1). The region is characterized by a relatively flat relief. Woodlands with lichen and black spruce, lakes, and patterned fens prevail in the landscape. Climatic conditions are subarctic, with temperatures that range from -35°C (January) to $+20^{\circ}\text{C}$ (July), a mean annual temperature about -4.2°C , and mean annual precipitation around 830 mm. The growing season is about 119 days long (Bootsma & Ballard, 2008). Two sub-basins were chosen based on their high proportion of water surface on the fens, their relatively easy access from the road, their small size, and their well-defined boundaries (Proulx-McInnis, 2010).

The site 1 watershed ($54^{\circ}06'52''\text{N}$, $72^{\circ}30'02''\text{W}$) has an area of 12.1 ha. This catchment area (Figure 1) was determined by a digital elevation model created from a grid of DGPS surveyed points (Proulx-McInnis, 2010). The watershed contains a fen (31%) and a section of forest-covered land (69%). The fen, split into two wings, is patterned with a succession of elongated pools and narrow ridges that eventually discharge into a larger pool near the outlet (Proulx-McInnis, 2010). The main slope of the fen was estimated to 1.45% (Proulx-McInnis, 2010). The fen is connected to a lake downstream by a single outlet with an elevation of 439 m above sea level.

The site 2 watershed ($54^{\circ}06'41''\text{N}$, $72^{\circ}30'56''\text{W}$) has an area of 3.7 ha (Figure 1). The watershed contains a fen (51%) and a section of forest-covered land (49%). The fen is patterned mostly with a succession of wide pools and narrow ridges, along a single wing. The main slope of the fen was estimated to 1.5%. The western part of the fen is connected to a lake upstream. The eastern part of the fen is connected to a lake downstream by a single outlet with an elevation of 437 m above sea level.

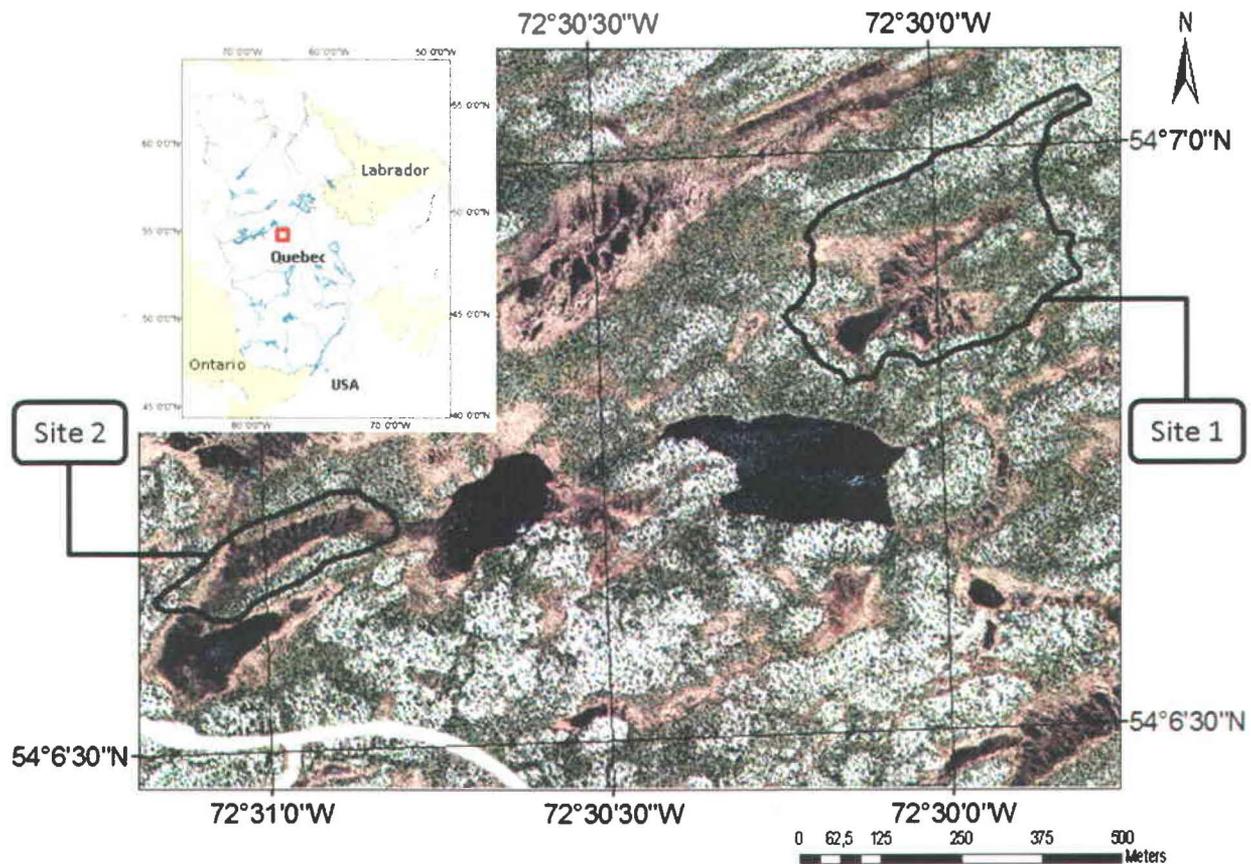


Figure 1 Location map of the two study site watersheds in the James Bay region, Quebec, Canada.

2.2 Hydrometeorological measurements

Wells equipped with hydrostatic pressure gauges were installed on sites 1 and 2 in 2009 (Figure 2). The wells were made of PVC pipe with slots along the entire length. Water level data were collected every 15 minutes by the hydrostatic pressure gauges (levelloggers, Solinst, model 3001, accuracy ± 0.3 cm, <http://www.solinst.com/>). On site 1, well A was installed in a saturated ridge. On site 2, well B was installed in a pool. The measurements were corrected for atmospheric pressure. To do this, a barometer from a weather station installed at site 1 was used (Campbell Scientific, 61205 V, R.M. Young, accuracy ± 0.5 hPa, <http://www.campbellsci.ca/>). Temperature and precipitation were also measured by this weather station (Figure 2).

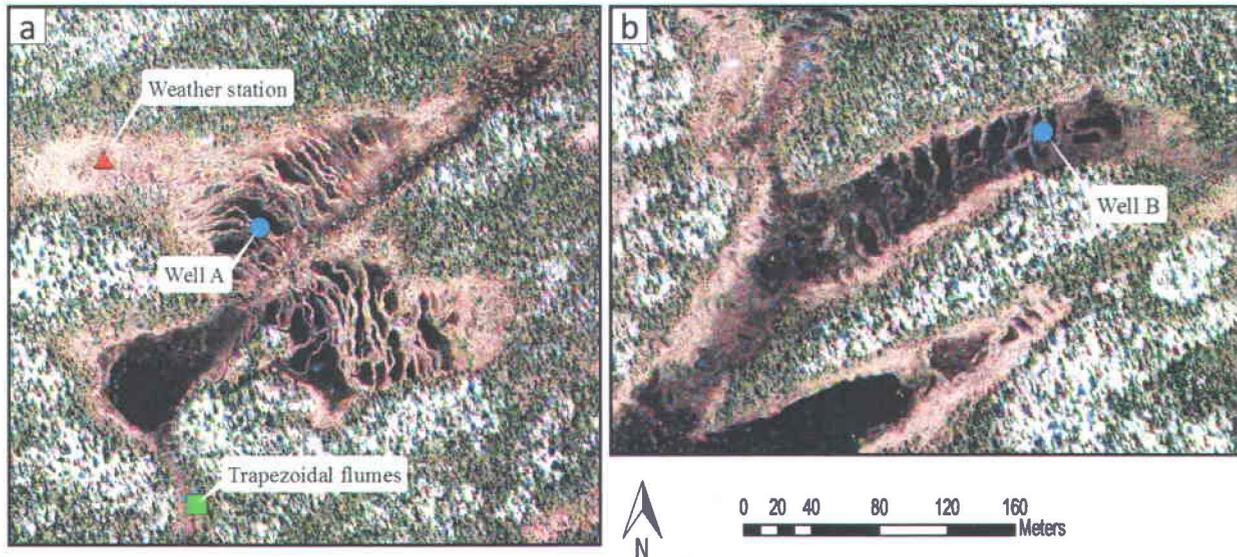


Figure 2 Location of the instruments used in the study at (a) site 1 ($54^{\circ}06'52''\text{N}$, $72^{\circ}30'02''\text{W}$) and (b) site 2 ($54^{\circ}06'41''\text{N}$, $72^{\circ}30'56''\text{W}$).

Two trapezoidal flumes (TRACOM, Large 60° V and SRCRC 12" 45° V models, accuracy $\pm 0.1\%$, <http://www.tracomfrp.com/flumes.htm>) were installed in 2008 at the outlet of site 1 (Figure 2). Water flows to the outlet between two rock bands that define a 15-metre-wide corridor. A small weir was installed to ensure that the surface flow passed through a single outlet. A large flume was installed at the outlet of the weir to measure flood flows (1.4–220 L/s). A smaller flume was set 2 metres downstream. It provided higher accuracy recording of the majority of seasonal flow (0.06–9.8 L/s). Both flumes were equipped with a stilling well. The water level in the well was measured every 15 minutes. Measurements were corrected for atmospheric pressure. The water levels were then transformed into flows (L/s) using rating curves supplied by the manufacturer (Proulx-McInnis, 2010).

2.3 Satellite imagery

2.3.1 Acquisition

To study the seasonal dynamics of the hydrology of the fens, 10 VHR multispectral satellite images were acquired during spring and summer 2009 and 2010 (Table 1). These images were recorded by the GeoEye-1 (GeoEye, Inc) satellite sensor, providing panchromatic spatial

resolution of 0.41 m (0.5 m pixel resampling) and RGB/NIR spatial resolution of 1.65 m (2 m pixel resampling). Due to the frequent cloud cover in the study area, only 4 images out of the 10 were without a significant presence of clouds.

Table 1 Features of the acquired GeoEye-1 images.

GeoEye-1 images features	2009					2010				
	June 20 th	July 23 rd	August 8 th	Sept. 5 th	Sept. 13 th	May 18 th	June 9 th	June 28 th	August 3 rd	August 30 th
Ground coverage (km)	7.9 x 7.7	7.9 x 7.7	7.9 x 7.7	7.9 x 7.7	7.9 x 7.7	7.9 x 7.7	8.0 x 8.0	7.9 x 7.7	7.9 x 7.7	8.0 x 8.0
Sensor tilt (°)	16.69	28.42	7.95	25.67	14.87	27.54	15.51	10.37	26.93	17.94
Nominal collection azimuth (°)	303.54	338.17	170.00	306.89	265.75	225.28	277.69	317.95	244.80	25.08
Solar zenith angle (°)	31.38	34.94	39.51	47.82	50.95	35.13	31.95	32.01	37.52	46.41
Solar azimuth angle (°)	164.13	163.95	159.61	171.00	169.69	165.37	163.56	159.67	164.01	162.10
Clouds coverage (%)	0	40	3	44	0	62	0	31	31	9

Our first priority was to obtain images capturing the widest possible range of hydrological conditions, i.e. both very low and very high discharge events. This would have enabled us to cover the majority of the seasonal hydrological dynamics in the fens. However, we were unable to acquire images during periods of high discharge (Figure 3). Two major reasons explained this: cloud cover usually remains high when the discharge response to precipitation occurs (a few hours after the precipitation event), and the frequency and duration of high discharges are relatively low (Figure 3).

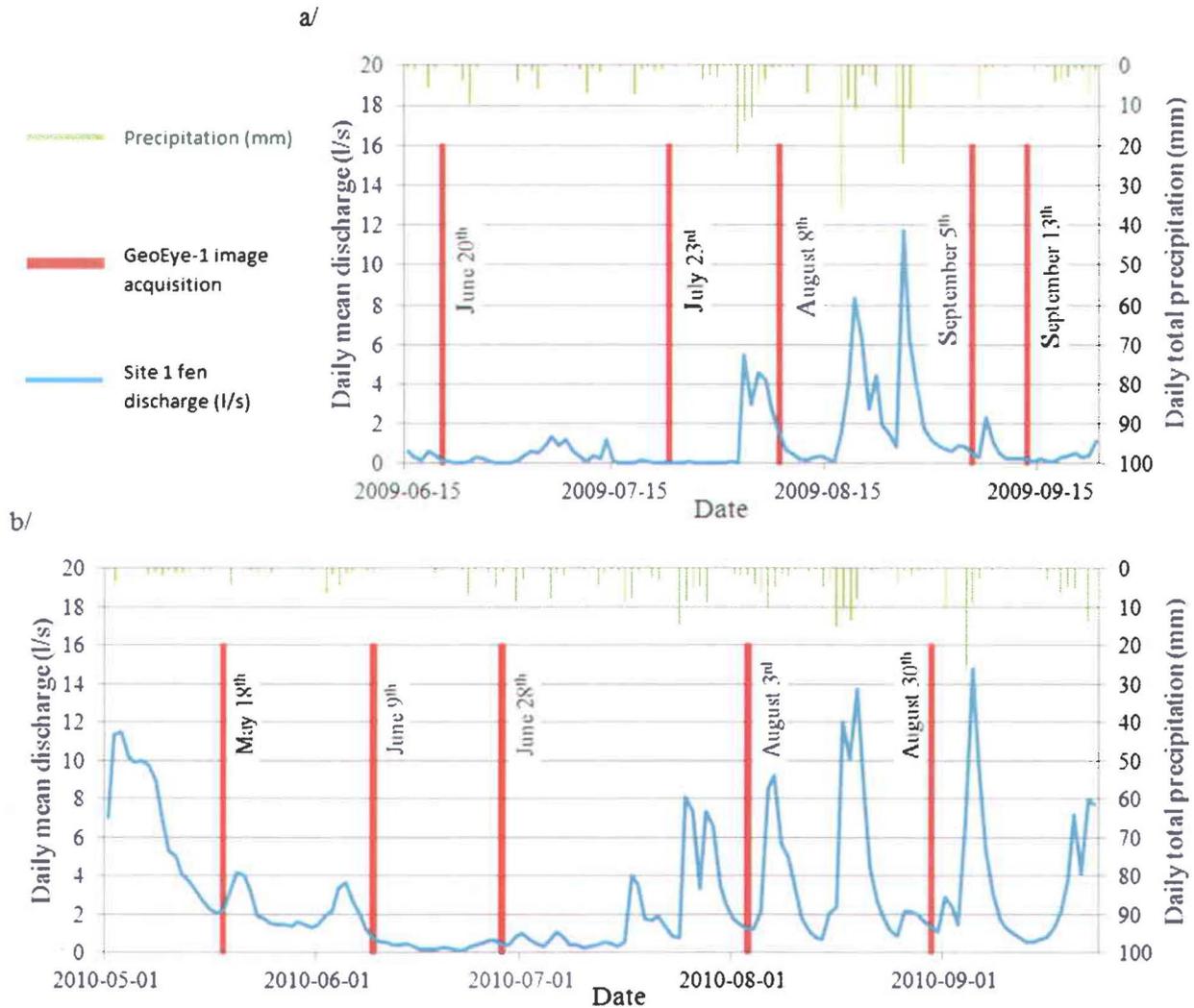


Figure 3 GeoEye-1 image acquisitions and hydrological conditions during: (a) spring and summer 2009; (b) spring and summer 2010.

2.3.2 Preprocessing

The 10 images were georeferenced in the Universal Transverse Mercator (UTM) coordinate system, Zone 18 north, North American Datum for 1983 (NAD83). Every image was supplied with a mathematical model of the image geometry in the form of rational polynomial coefficients (RPC). Images were orthorectified using these RPCs and a DEM of the area at 1/50000 scale, supplied by Geobase (<http://www.geobase.ca>). Two accurate 3D ground control points were added to each image to improve orthorectification. This led to an accuracy of about a pixel size for each image channel, 0.5 m and 2 m for the panchromatic and multispectral channels respectively.

After these geometric corrections, radiometric calibrations were performed to standardize each image. First, digital number (DN) values were converted to at-sensor radiances using prelaunch gain and offset coefficients (Schowegerdt, 1997). Then, at-sensor radiances were converted to at-sensor reflectances using the acquisition geometry considering the following guide (Krause, 2005).

The panchromatic (0.5 m pixel resolution) and multispectral (2 m pixel resolution) channels of the images were then fused using the PCI Geomatics® pan-sharpening algorithm (Zhang, 2002). This algorithm was used because it produces good results without changing the statistical parameters of the original images (Nikolakopoulos, 2004). The resulting “pan-sharpened” images retained the spectral features of the low resolution multispectral image while integrating the spatial details of the high resolution panchromatic image (0.5 m pixel resolution).

Many parameters (e.g. visibility, atmosphere composition) are needed to perform an absolute atmospheric correction of the satellite imagery to obtain surface reflectances from at-sensor reflectances. Unfortunately, we did not have the requisite data for these images. Thus, a multiple-date image normalization using regression was performed between a reference image and the remaining images (Jensen, 2005).

2.4 Object-based image classification

2.4.1 Procedure

An object-based classification procedure was set up and applied to delineate internal structures in the peatlands (aquatic, semi-aquatic, and terrestrial) using VHR multispectral imagery. This would enable the seasonal spatial evolution of the hydrology of the fens to be monitored. An approach by region (object-based image analysis) (Blaschke et al., 2008) was chosen because it uses not only the spectral information contained in the image but also spatial and topological information. The procedure was inspired by the semi-automated approach developed by Dissanska et al. (2009) using panchromatic images at a multi-decadal scale.

The eCognition 8.64.0® software was used to build the procedure. A hierarchical approach was utilized to enable better adaptation to the diversity, complexity, and patterned structure of the natural ecosystems (Grenier et al., 2008). First, a coarse-scale analysis was performed on a

reference image (9 June 2010) to delineate the major landscape units. A fine-scale analysis was then performed on the 10 images to create a classification map of the study sites. The scheme of the object-based analysis procedure is presented in Figure 4.

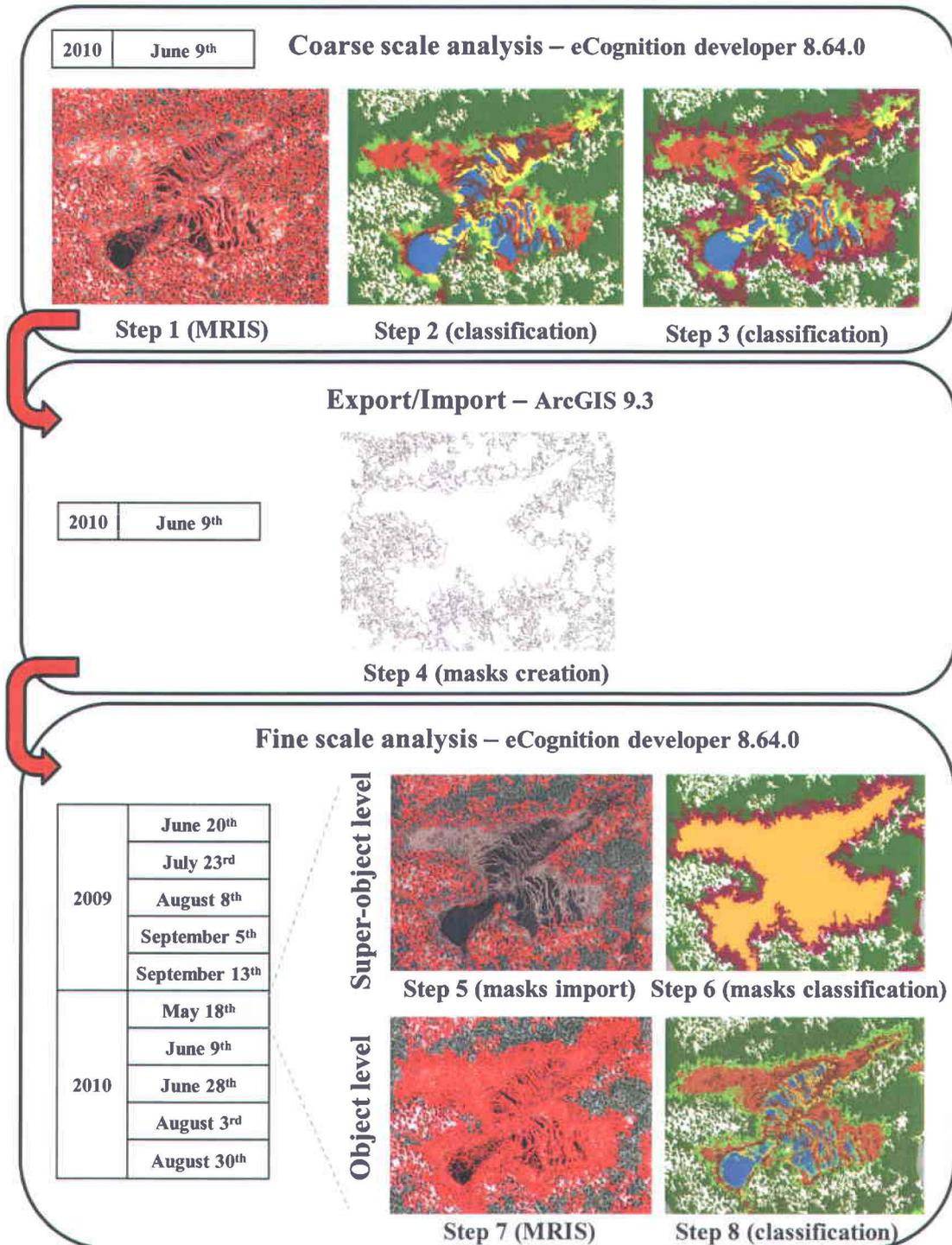


Figure 4 Scheme of the object-based analysis procedure.

Multiresolution segmentation (MRIS) (Benz et al., 2004) was used in the study. MRIS is a region-growing segmentation algorithm that groups adjacent pixels to create objects (polygons) that later will be assigned to a class. These groupings are based on the internal heterogeneity criteria of the resulting objects, which cannot exceed a user-defined scale parameter. Higher values for the scale parameter result in larger image objects, and smaller values result in smaller ones (Trimble, 2010). The first and second principal component (PC) bands derived from the pan-sharpened imagery were used as input bands in the segmentation process. A weight was assigned to both input bands, reflecting the amount of variance of the initial four bands contained in the derived PC bands, i.e. more than 80% for PC1 and less than 15% for PC2. Regarding the coarse-scale analysis, a high scale parameter value of 30 was chosen to delineate the major landscape units (forest, water, peat...). To create homogeneous objects within the scene, weights of 90% for colour and 10% for shape were used. This ratio was chosen because natural environments, with no specific shape, were being monitored. To specify the shape, a relationship of 70 to 30 between compactness and smoothness was selected. We expected that this segmentation would provide a good distinction between peatlands and forests. Regarding the fine-scale analysis, a scale parameter of 10 was chosen to precisely delineate the internal structures of peatlands. The same ratios as those used in the coarse-scale analysis were applied between the shape and colour parameters and between the compactness and smoothness parameters.

Eco-hydrological classes were defined (Table 2), based on literature (Dissanska et al., 2009, Levrel & Rousseau, 2010, Payette & Rochefort, 2001, Waddington et al., 2010) and knowledge of the field. Once classes are defined, classification rules have to be determined. Membership functions and the nearest neighbour algorithm are the main classification tools used in the eCognition software (Trimble, 2010). The nearest neighbour algorithm needs training sites. To improve separation between the defined classes by adding meaningful features in the nearest neighbour classification process, bands were derived from the pan-sharpened images. First, Intensity–Hue–Saturation (IHS) transformation of the RGB channels was undertaken (Mitrakis et al., 2008). Then the following band ratios and indices were calculated: Ratioblue ($\text{Blue}/(\text{Blue}+\text{Green}+\text{Red})$) (Grenier et al., 2008), Chlorophyll Index ($((\text{Red}/\text{Green})-1)$) (Harris & Bryant, 2009), and NDVI index ($((\text{NIR}-\text{Red})/(\text{NIR}+\text{Red}))$) (Tuxen et al., 2008). Textures, often used as an additional tool for wetland mapping, were also calculated (Bernier et al., 2003,

Dissanska et al., 2009). However, tests of these features showed that the NDVI and textures channels did not provide any improvement in the discrimination of classes.

Table 2 Description of the classes used in the object-based analysis.

Group	Class	Description	Picture	Group	Class	Description	Picture
WATER	Water (coarse scale analysis only)	Lake, river and pool objects		PEAT	Upper lawn	Lawn objects dominated by herbaceous and possible presence of sphagnum and bryophytes, deep water table	
	Open water (fine scale analysis only)	Lake, river and big pool objects, high water depth			Hummock and forest edge	1) Hummock objects dominated by Sphagnum, bryophytes and ericaceous shrubs, deep water table	
	Shallow water (fine scale analysis only)	1) Pool objects, possible presence of vegetation, low water depth			2) Forest edge objects dominated by shrubs and conifers, deep water table		
PEAT	Lawn and water	1) Pools edge objects, mix of lawn and water, water table at surface		FOREST	Forest	Forest objects dominated by conifers	
		2) Flark objects, water table at surface			Lichen	Mineral substrate objects, covered by lichen	
	Low lawn	1) Lawn objects dominated by sphagnum with possible presence of herbaceous, water table near surface		OTHER	Other	Cloud, road, gravel and rock objects	

2.4.2 Classification accuracy assessment

Classification accuracy assessment requires two phases: collection of field data and comparison of mapped conditions with known conditions (Barrette et al., 2000). During the field campaigns of summer 2009 and 2010, many geolocated ground-truth photographs were acquired, providing

precious land-cover information. However, the greenness of vegetation and the hydrological conditions in the study area change rapidly during the season. So, the photo-interpretation of the GeoEye-1 imagery was a good alternative to provide a good indication of the true nature of classified objects. It was possible to identify any segmented objects with good confidence since the resolution of GeoEye-1 imagery is sufficient.

Validation of the classifications was concluded using a traditional statistical method (confusion matrix). The matrices summarized errors of omission (producer's accuracy) and commission (user's accuracy) per class. Overall accuracy and Kappa coefficient of agreement were also calculated. The validation set was created following the method suggested by Congalton & Green (1999). The samples (objects) used were randomly distributed across the entire classification map derived from all the satellite images. A stratified random sampling procedure was chosen to ensure an equal proportion of validation samples (objects) in each class. An equation based on multinomial distribution determined the sample size (N) required to accurately assess classification (Congalton & Green, 1999):

$$N = \frac{B \prod_i (1 - \prod_i)}{b_i^2} \quad (1)$$

where \prod_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 $(\alpha/k) \times 100$ th percentile of the chi square (χ^2) distribution with one degree of freedom, α is the confidence interval and k is the number of classes.

A desired precision of 95% was defined. Eight classes were evaluated in Step 2 and Step 8. The dominant classes were "forest" (43%) in Step 2 and "dry lawn" (22%) in Step 8. With these parameter values, the optimal number of validation samples to obtain was 93 (Step 2) and 65 (Step 8) for each class.

Once the validation set was defined, objects were labelled considering the photo-interpretation of the objects ground-truth. Then, these labels were compared to the ones obtained by the classifications of the concerned GeoEye-1 image. In this way, this procedure ensured the objectivity of the classification accuracy assessment.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Object-based image classification

Two GeoEye-1 image subsets centred on site 1 are shown in Figure 5 with their respective fine-scale classifications. These subsets were chosen because the hydrological conditions (in particular, the discharge values) they recorded differed greatly. The white and grey zones in the 23 July 2009 image were caused by sunglint, which separated the “shallow water” and the “lawn and water” from the other environments (Figure 5-a,c). Visual correspondence between the two classifications and the two RGB images was very good. Most of the errors appeared on the border of the site 1 fen (caused by non-restrictive rule sets applied to the “transition” class), where they had no effect on the results of the hydrological study (Figure 5-a,b,c,d). Misclassifications appeared also on the 18 May 2010 image due to the phenological stage of shrub vegetation. Many hummocks were classified as “upper lawn” or “low lawn”, (Figure 5-b,d) since shrubs on these hummocks were not green at this season and discriminant features were based on greenness indices.

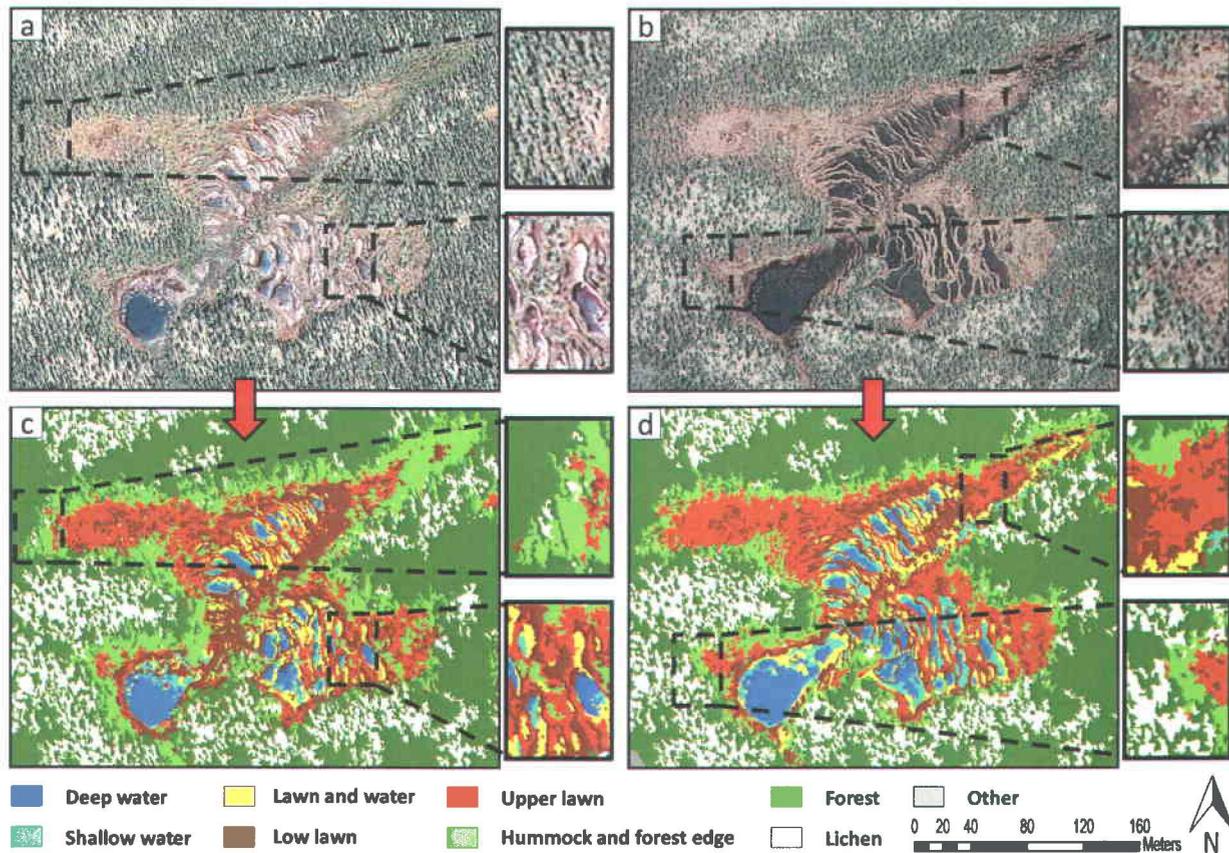


Figure 5 Comparison between (a) 23 July 2009 and (b) 18 May 2010 RGB images (subsets centred on site 1: 54°06'52"N, 72°30'02"W), and their respective fine-scale classifications (Step 8) (c-d). Areas of sunglint and of major misclassifications are expanded.

Classification accuracy was assessed with the confusion matrix method. The classification accuracy results of the 9 June 2010 image (coarse scale - Step 2), used as the reference image, are given in Table 3 and Table 4. The confusion matrix in Table 3 shows the accuracy results of the original classes, while the matrix in Table 4 shows the accuracy results of environmental groupings (Table 2) of the original classes. The overall accuracy of the original classes was 86% and the Kappa coefficient was 84% (Table 3). The majority of misclassifications appearing in this first matrix were not relevant. The confusion matrix based on environmental groupings gave better results, showing an overall accuracy of 93% and a Kappa coefficient of 90%. This ensured high accuracies for the subsequent fine classifications of all 10 images, avoiding most of the error propagation due to class-related hierarchical features. The most important issue was confusion between objects in the FOREST group and objects in the PEAT group (32 out of 554 objects in these groups). To manage this imperfect delineation of peatlands, a “transition” class

was created (coarse scale - Step 3) after the first classification of the 9 June 2010 image. The transition area was then reclassified at a finer scale (Step 8) as either forest or peatland.

Table 3 Confusion matrix for 9 June 2010 image coarse-scale classification (Step 2), considering the original classes of the validation objects.

Classification	Validation								Sum
	W	LW	LL	UL	HF	F	L	O	
W	81	9	0	0	0	3	0	0	93
LW	3	57	6	0	12	15	0	0	93
LL	0	2	67	1	18	4	0	1	93
UL	0	0	1	87	2	0	3	0	93
HF	0	1	3	1	86	1	1	0	93
F	0	1	0	0	5	87	0	0	93
L	0	0	0	0	2	6	85	0	93
O	0	0	0	0	0	1	1	91	93
Sum	84	70	77	89	125	117	90	92	744
Producer's accuracy	0.96	0.81	0.87	0.98	0.69	0.74	0.94	0.99	
User's accuracy	0.87	0.61	0.72	0.94	0.92	0.94	0.91	0.98	
Overall accuracy	0.86								
Kappa	0.84								

W, water; LW, lawn and water; LL, low lawn; UL, upper lawn; HF, hummock and forest edge; F, forest; L, lichen

Table 4 Confusion matrix for 9 June 2010 image coarse-scale classification (Step 2), considering the environmental groups of the validation objects.

Classification	Validation				Sum
	WATER	PEAT	FOREST	OTHER	
WATER	81	9	3	0	93
PEAT	3	344	24	1	372
FOREST	0	8	178	0	186
OTHER	0	0	2	91	93
Sum	84	361	207	92	744
Producer's accuracy	0.96	0.95	0.86	0.99	
User's accuracy	0.87	0.92	0.96	0.98	
Overall accuracy	0.93				
Kappa	0.9				

The fine-scale classification accuracy results of the 10 images (Step 8) are given in Table 5 and Table 6. Table 5 shows the accuracy results of the original classes. Table 6 shows those of

hydrological groupings of the original classes. The groupings were functions of the saturation degree (aquatic, semi-aquatic, terrestrial) of the classes. These groupings were very helpful for monitoring the seasonal spatial dynamics of the hydrology at the study sites. The “open water” and “shallow water” classes were included in the AQUATIC group, the “lawn and water” class was included in the SEMI-AQUATIC group, and the remaining classes were included in the TERRESTRIAL group.

The classifications of the original classes had an overall accuracy of 82% and a kappa coefficient of 79% (Table 5). This high level of accuracy indicates the robustness of the specific object-based rulesets developed in order to investigate the hydrological dynamics at an intra-seasonal scale with multispectral imagery. The “open water”, “upper lawn”, and “lichen” classes were well-classified since their spectral features were easily distinguishable. However, some significant confusion can be observed between the other classes. The producer’s accuracies of the “forest” and “hummock and forest edge” classes were under 70%. Moreover, the user’s accuracies of the “shallow water”, “lawn and water”, and “low lawn” classes were under 75%. Since the transition area between peatland and forest was reclassified at a fine scale, it was considered in the confusion matrices. This transition area is a highly heterogeneous environment (containing peat, shrubs, trees, and their shadows) with non-restrictive applied rule sets. Thus, very small objects were generated, which sometimes caused classification problems. For example, objects corresponding to tree shadows were easily misclassified as “shallow water” since they were spectrally homogeneous and dark.

The accuracy results of the hydrological groupings were higher, with an overall accuracy of 92% and a kappa coefficient of 83% (Table 6). The accuracy of the SEMI-AQUATIC group was lower than those of the AQUATIC and TERRESTRIAL groups. This can be explained by the nature of the SEMI-AQUATIC group, which was created from a single class and represents a transitory environment. The producer’s accuracies of the AQUATIC and SEMI-AQUATIC groups were 97% and 84%, respectively. These results indicate a low level of omission error, which means that the majority of the aquatic and semi-aquatic compartments of the peatlands were detected effectively in the satellite images. Such accuracies were necessary in order to study the spatial dynamics of these compartments (see Section 3.2). The user’s accuracies of the AQUATIC and SEMI-AQUATIC groups were 87% and 64%, respectively. These results indicate a higher level of commission error, leading to overestimation of the area of the aquatic

and semi-aquatic compartments. A significant number of TERRESTRIAL objects were misclassified as SEMI-AQUATIC (216 objects) or AQUATIC objects (116 objects). These TERRESTRIAL objects were most often “forest” or “hummock and forest edge” objects (Table 5). The overestimation of the area of the aquatic and semi-aquatic compartments was not critical for our further study of the spatial dynamics of these compartments. Indeed, the heterogeneous environment of the transition area, where most of the confusion appeared, remains outside the limits of the later defined saturation area (see Section 3.2).

Table 5 Confusion matrix for fine-scale classification of the 10 images (Step 8), considering the original classes of the validation objects.

Classification	Validation								Sum
	OW	SW	LW	LL	UL	HF	F	L	
OW	601	36	3	2	0	0	8	0	650
SW	10	482	52	7	3	9	86	1	650
LW	2	19	413	18	6	70	113	9	650
LL	0	1	12	470	7	81	72	7	650
UL	0	0	3	13	522	44	14	54	650
HF	0	0	2	13	4	566	55	10	650
F	3	5	6	1	0	24	610	1	650
L	0	0	0	0	8	22	18	602	650
Sum	616	543	491	524	550	816	976	684	5200
Producer's accuracy	0.98	0.89	0.84	0.9	0.95	0.69	0.63	0.88	
User's accuracy	0.92	0.74	0.64	0.72	0.8	0.87	0.94	0.93	
Overall accuracy	0.82								
Kappa	0.79								

OW, open water; SW, shallow water; LW, lawn and water; LL, low lawn; UL, upper lawn; HF, hummock and forest edge; F, forest; L, lichen

Table 6 Confusion matrix for fine-scale classification of the 10 images (Step 8), considering the hydrological groups (aquatic, semi-aquatic, and terrestrial) of the validation objects.

Classification	Validation			Sum
	AQUATIC	SEMI-AQUATIC	TERRESTRIAL	
AQUATIC	1129	55	116	1300
SEMI-AQUATIC	21	413	216	650
TERRESTRIAL	9	23	3218	3250
Sum	1159	491	3550	5200
Producer's accuracy	0.97	0.84	0.91	
User's accuracy	0.87	0.64	0.99	
Overall accuracy	0.92			
Kappa	0.83			

3.2 Seasonal spatial dynamics of aquatic and semi-aquatic structures in fens

In order to study the evolution of the hydrology of the peatlands, the saturated zone was delineated for both peatlands. This zone includes the terrestrial, semi-aquatic, and aquatic compartments, which are spatially dynamic. The saturated zone is affected by the presence of water at or near the surface (< 10 cm deep), which influences the composition of its vegetation cover (Payette & Rochefort, 2001). The following classes were considered as saturated: “low lawn”, “lawn and water”, “shallow water”, and “deep water”. The 3 August 2010 classification map was chosen to delineate the saturated zone in both fens under study. This map was chosen because green vegetation (high contrast with saturated peat) and wet conditions enabled precise delineation of the saturated zone (Figure 6).

Within the site 1 saturated zone, the aquatic (“open water” and “shallow water” classes), semi-aquatic (“lawn and water” class), and terrestrial proportions were calculated from the 10 image classifications; these proportions are shown in Figure 7. The results demonstrate the existence of significant seasonal spatial dynamics of the compartments. The aquatic proportion of the saturated zone varied between 18% at the driest conditions observed (23 July 2009: no precipitation, snowmelt ended, high evapotranspiration rate) and 32% at the wettest period observed (18 May 2010: snowmelt, low evapotranspiration rate), corresponding to an increase of 78%. The increase in the combined aquatic and semi-aquatic proportions of the saturated zone was 53% (from 32% to 49%). As shown in Figure 8 (encircled features), between the driest and the wettest conditions observed, strong spatial dynamics occurred upstream of the largest pool at the outlet of the site 1 fen. The north-eastern part of the fen (upstream) was also subject to significant spatial dynamics, with temporary pools appearing on the 18 May 2010 image.

Within the site 2 saturated zone, significant seasonal spatial dynamics of the compartments was also noticed (Figure 9), but of smaller magnitude. Unfortunately, there were clouds over site 2 on 23 July 2009 and 18 May 2010, the respective dates on which the driest and the wettest conditions were observed at site 1. Thus, the amplitude of the seasonal spatial dynamics cannot be directly compared between the two sites. The aquatic proportion of the site 2 saturated zone varied between 31% at the driest conditions observed (13 September 2009: no precipitation, snowmelt ended) and 42% at the wettest period observed (30 August 2010: precipitation, low

evapotranspiration rate), corresponding to an increase of 35%. The increase in the combined aquatic and semi-aquatic proportions of the saturated zone was 17% (from 52% to 61%). As shown in Figure 10 (encircled features), between the driest and the wettest conditions observed, strong spatial dynamics occurred on the edges of some of the main pools. The eastern part of the fen (downstream) was also subject to significant spatial dynamics, with temporary pools appearing on the 30 August 2010 image.

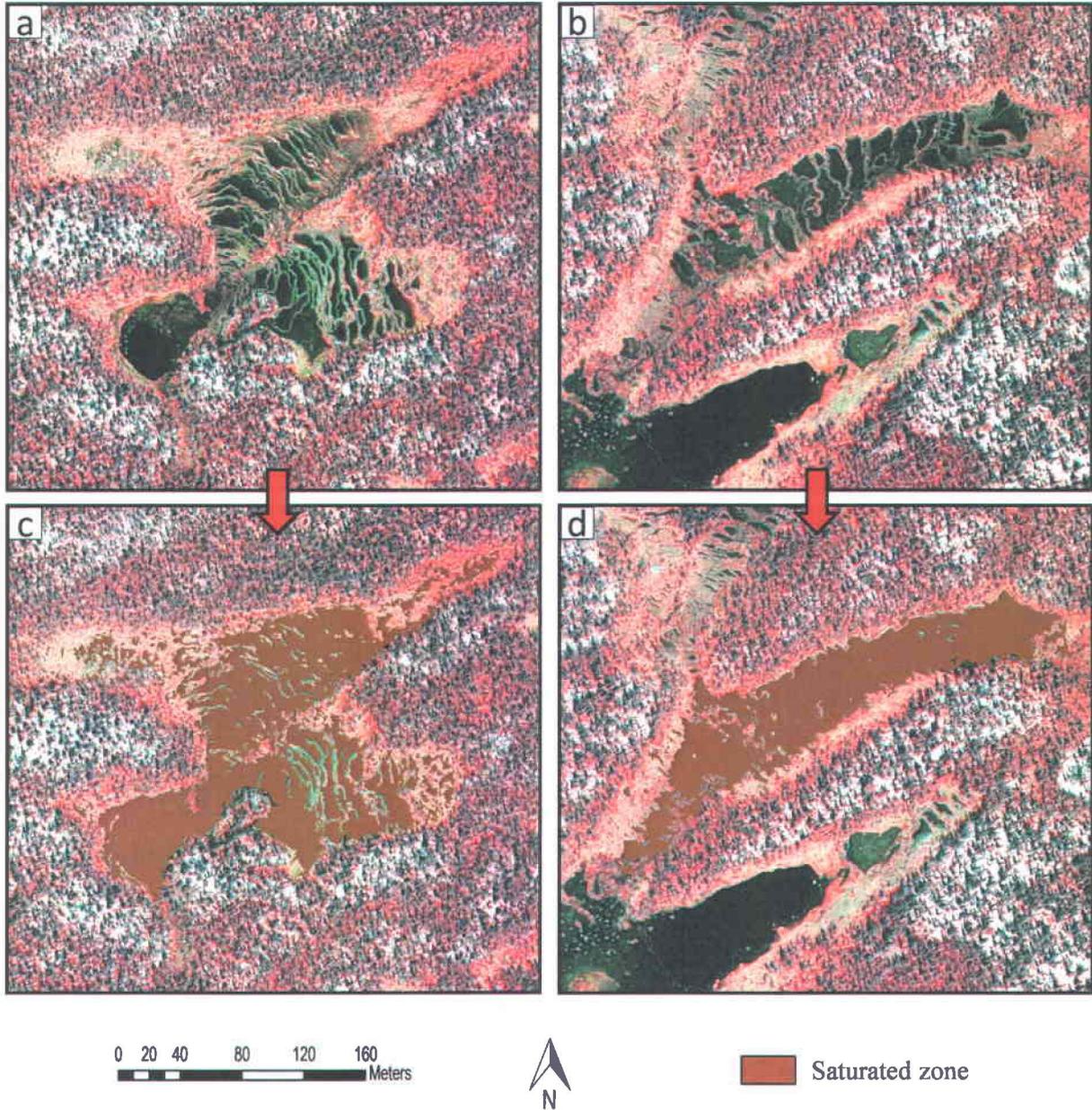


Figure 6 False coloured composite (NIR, Red, Green) of two 3 August 2010 GeoEye-1 subsets centred on (a) site 1 ($54^{\circ}06'52''\text{N}$, $72^{\circ}30'02''\text{W}$) and (b) site 2 ($54^{\circ}06'41''\text{N}$, $72^{\circ}30'56''\text{W}$). The locations of the respective saturated zones of each fen appear in (c-d).

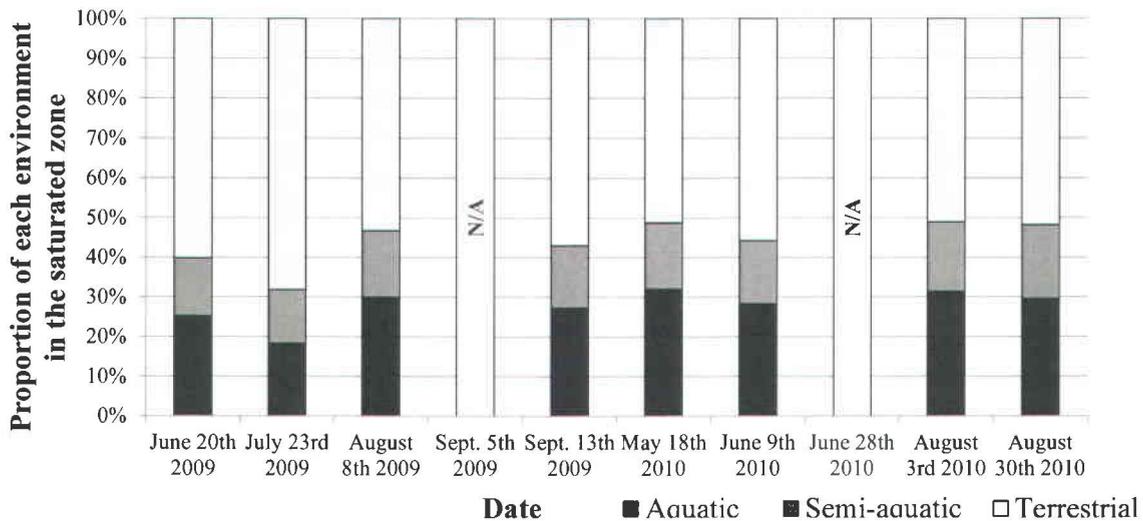


Figure 7 Aquatic, semi-aquatic, and terrestrial proportions of the site 1 saturated zone for each GeoEye-1 image acquisition date. The term N/A refers to missing data due to the presence of clouds over site 1.

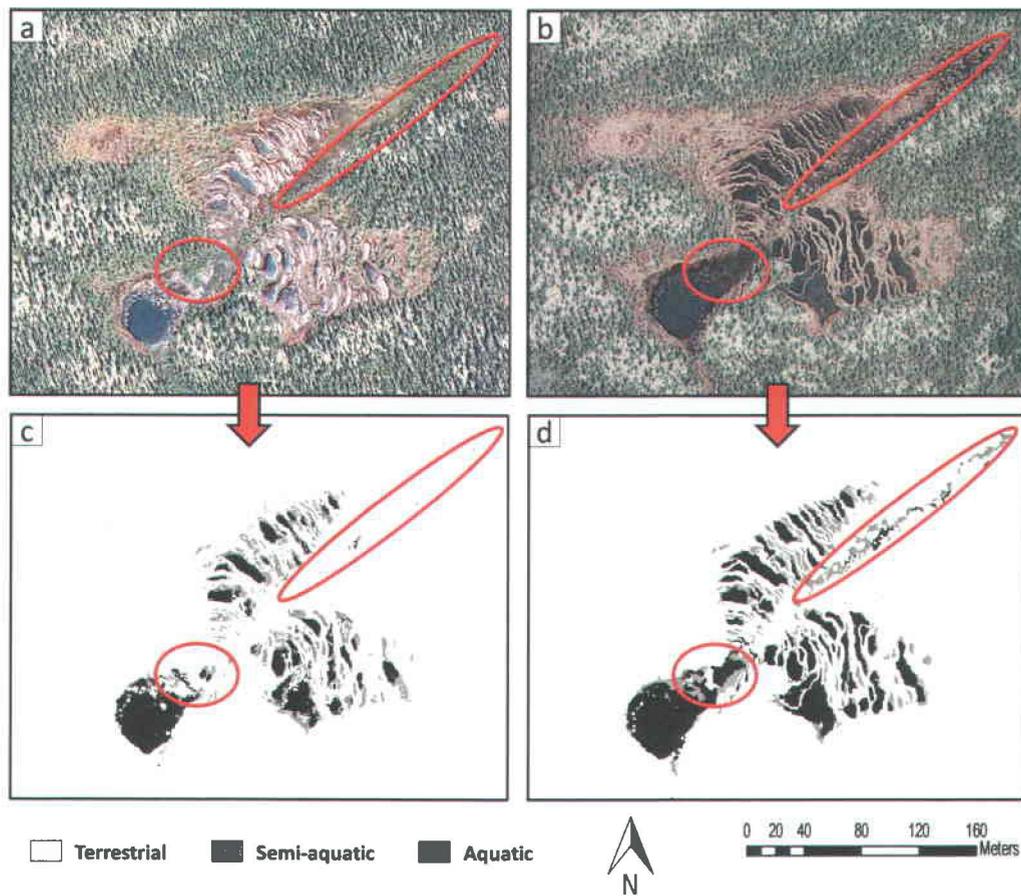


Figure 8 Comparison between (a) 23 July 2009 and (b) 18 May 2010 GeoEye-1 RGB images (subsets centred on site 1: 54°06'52''N, 72°30'02''W), and the respective aquatic, semi-aquatic, and terrestrial proportions of the site 1 saturated zone (c-d). Areas of major change are encircled in red.

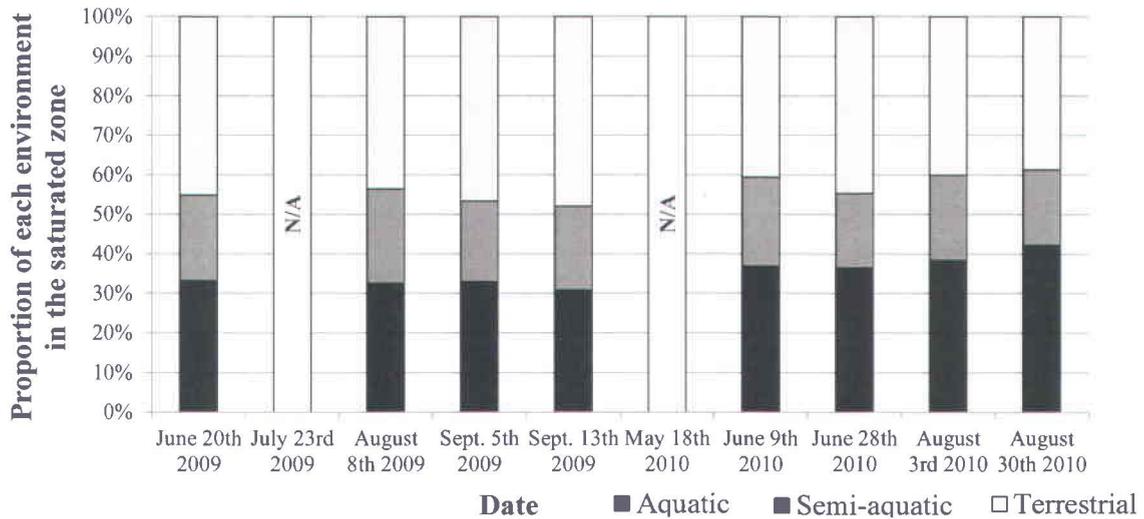


Figure 9 Aquatic, semi-aquatic, and terrestrial proportions of the site 2 saturated zone for each GeoEye-1 image acquisition date. The term N/A refers to missing data due to the presence of clouds over site 2.

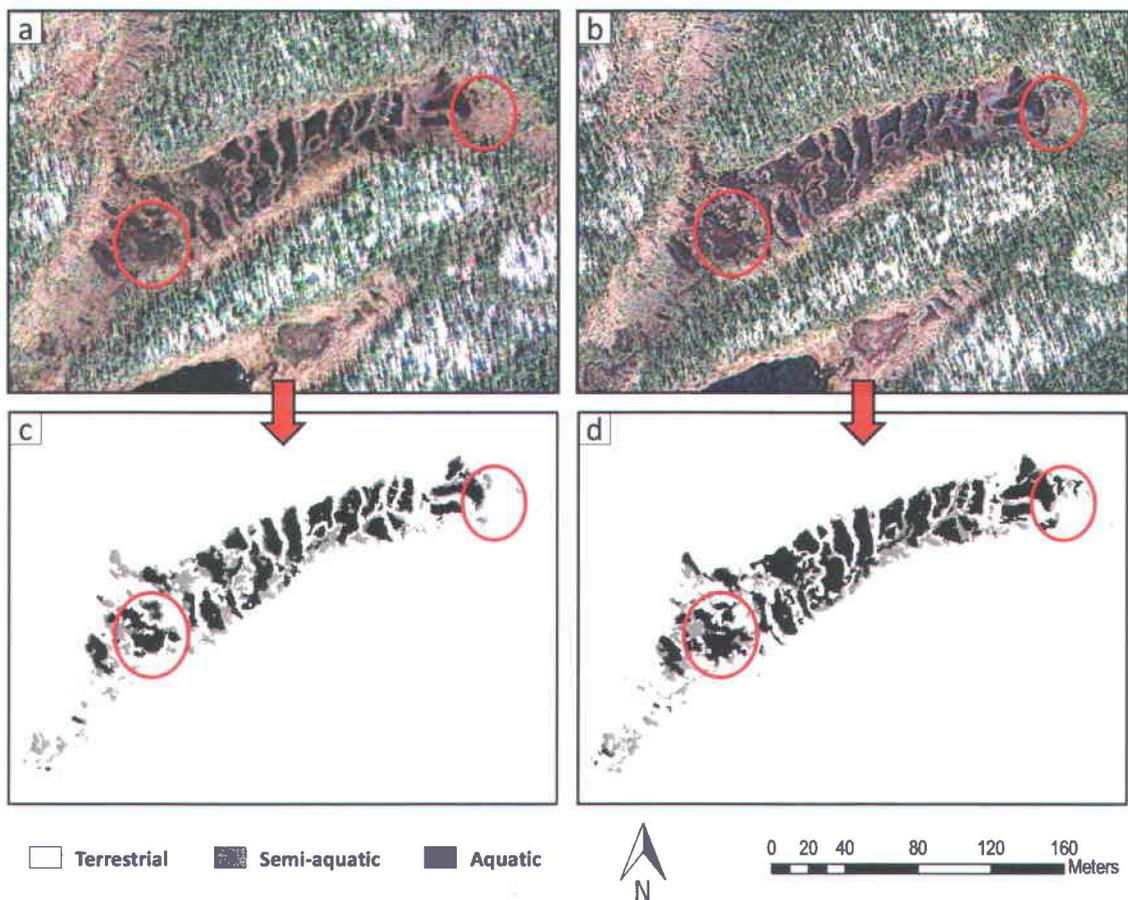


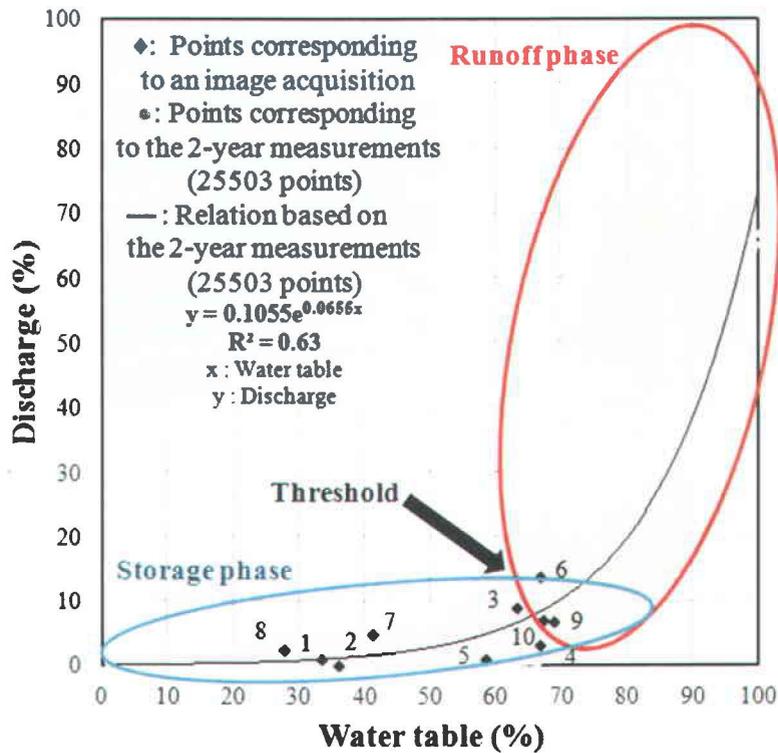
Figure 10 Comparison between (a) 13 September 2009 and (b) 30 August 2010 GeoEye-1 RGB images (subsets centred on site 2: 54°06'41''N, 72°30'56''W), and the respective aquatic, semi-aquatic, and terrestrial proportions of the site 2 saturated zone (c-d). Areas of major change are encircled in red.

3.3 Seasonal spatial dynamics in relation to the hydrological regime of fens

Figure 11 shows the relationship between the water table level measured at well A and the discharge measured at the outlet of the site 1 fen. The water table data are of course derived from a local measurement, whereas discharge measure is the consequence of runoff in the whole fen watershed. We assumed, however, that water table changes were relatively homogeneous throughout each site. On Figure 11, each point corresponds to a pair of water table and discharge measurements taken at 15-minute intervals during the 2009 and 2010 snow-free seasons. The range of measured values is displayed in percentages to facilitate comparison with subsequent graphs. These percentages were calculated relative to the maximal water table and discharge values during the two-year period.

An exponential relation was found between water table and discharge values, similar to the one reported in previous hydrological studies on patterned peatlands (Clerc, 2009, Jutras et al., 2009, Quinton & Roulet, 1998), with a coefficient of determination of 0.63. Two phases can be distinguished in the evolution of discharge values relative to the water table. In the first phase, the water table rises rapidly but discharge remains low. For example, the water level may equal 60% of the maximal measured water level while the corresponding discharge is equal to only 5% of the maximal measured discharge. In this phase, the incoming water contributes to an increase in the water level in the fen but not to a significant evolution of the discharge: it is a storage phase. In the second phase, the water level is already high and does not increase much but there is a sharp increase in discharge from the fen: this phase is a runoff phase. For the purposes of modeling this regime, it is particularly important to identify the threshold on the relation where the regime phase changes. Since heavy rainfall can lead to heavy runoff in one phase and no runoff in the other phase, successful modeling of hydrological behaviour in fens hinges on distinction of the two phases (Jutras et al., 2009). However, water table values often vary as much as 30% for a given value of discharge. This high dispersion of water table values may be explained by a hysteresis effect (Clerc, 2009, Weiss et al., 2006). Depending on whether the runoff significantly increases or significantly decreases, the relation between water table and discharge reacts slightly differently. This creates some uncertainties for modeling of the regime phases and thus needs to be considered.

In-situ hydrometric measurements taken at the same time as the satellite images used in this project are highlighted in Figure 11. The GeoEye-1 images were acquired during varying hydrological conditions, at the beginning and the end of the storage phase. Among the acquired images, the driest hydrological conditions (corresponding to the beginning of the storage phase) occurred on 20 June 2009, 23 July 2009, 28 June 2010, and 9 June 2010. The dry hydrological conditions on these dates resulted from the long duration of the day and high temperatures experienced during the months of June and July (Bootsma & Ballard, 2008). These conditions imply a higher evapotranspiration rate in peatlands. By this time of year, the snowmelt had also ended. The remaining 6 images were acquired during wetter hydrological conditions corresponding to the end of the storage phase. These images were acquired in May, August, and September 2009 and 2010. In May, the snowmelt often produces wet hydrological conditions in peatlands (Glenn & Woo, 1997). In August and September, the days shorten and mean temperature falls (Bootsma & Ballard, 2008), causing a relatively low evapotranspiration rate (Payette & Rochefort, 2001). Unfortunately, for reasons explained in section 2.3.1 no image was acquired during the runoff phase. Nevertheless, as seen in section 3.2, our satellite image classifications showed that the seasonal spatial dynamics of aquatic and semi-aquatic structures in the fens was substantial. The lack of images of high discharge events was not an obstacle to observation of the seasonal hydrological dynamics. These dynamics were considerable during the storage phase and seemed to be related to the evolution of the water level.



1: June 20th 2009 3: August 8th 2009 5: Sept. 13th 2009 7: June 9th 2010 9: Aug. 3rd 2010
 2: July 23rd 2009 4: Sept. 5th 2009 6: May 18th 2010 8: June 28th 2010 10: Aug. 30th 2010

Figure 11 Discharge of the site 1 fen is related to the water table measured at well A. Discharge and water table data were collected every 15 minutes during the 2009 and 2010 snow-free seasons. The range of measured values is displayed in percentages, 100% corresponding to the maximal measured value (0% to the minimal). Black diamonds show discharge and water table values corresponding to image acquisitions.

In the following analysis, links between the evolution of the measured water levels and the spatial dynamics of the aquatic and semi-aquatic compartments were assessed. The aquatic compartments of the saturated zone could have been chosen as the only indicators of the spatial dynamics of the hydrology of the sites. We chose to include the semi-aquatic compartments as well, as they play an integral part in these dynamics. We must remain cautious about this inclusion, however, since the results of the last confusion matrix (Table 9) showed that the SEMI-AQUATIC group was less precisely classified than the other groups.

Figure 12 shows the water table variation measured in site 1 compared to the spatial variation of the aquatic and semi-aquatic compartments within site 1 (derived from eight GeoEye-1 classifications). Linear correlations were established in all cases. Over 60% of the water table variation was explained by the spatial variation of the aquatic and semi-aquatic compartments.

These correlations were significant with a p-value < 0.05 . The slope of the linear functions was always positive. This implies that higher “aquatic” and “aquatic and semi-aquatic” proportions of the saturated zone indicate a higher water table. This result enabled us to validate once more the precision of the performed classifications and their relevance for tracking real hydrological variations.

However, as noted above, the water table data are derived from a local measurement (a single point), while the classification-derived results describe the whole saturated zone of the fen. The dynamics of the water table can vary at different locations in a single fen. This may explain why the points differ so much from the linear model on some dates (20 June 2009, 9 June 2010). The uncertainties associated to the classification-derived results (see Section 3.1) and to the field measurements could also be an explanation.

Figure 13 shows the water level variation measured in site 2 compared to the spatial variation of the aquatic and semi-aquatic compartments within site 2 (derived from eight GeoEye-1 classifications). Linear correlations were established in all cases. Over 75% of the water level variation was explained by the spatial variation of the aquatic and semi-aquatic compartments. These correlations were significant with a p-value < 0.05 . The slope of the linear functions was always positive. As for the site 1 fen, this relation implies that higher “aquatic” and “aquatic and semi-aquatic” proportions of the saturated zone indicate a higher water level. This result also enabled us to validate the precision of the performed classifications and their relevance for tracking real hydrological variations.

There was a significant difference between the R^2 values of the water levels measured in well A and those measured in well B. R^2 was always lower in the first case than in the second case. This difference may be explained by the different types of measurements made. Groundwater level (under the lawn surface) was measured at well A, whereas open water level (at the pool surface) was measured at well B. The statistics derived from the classifications were related to hydrological variations at the surface of the fen and should therefore be better correlated with the evolution of pool water levels than with that of groundwater levels.

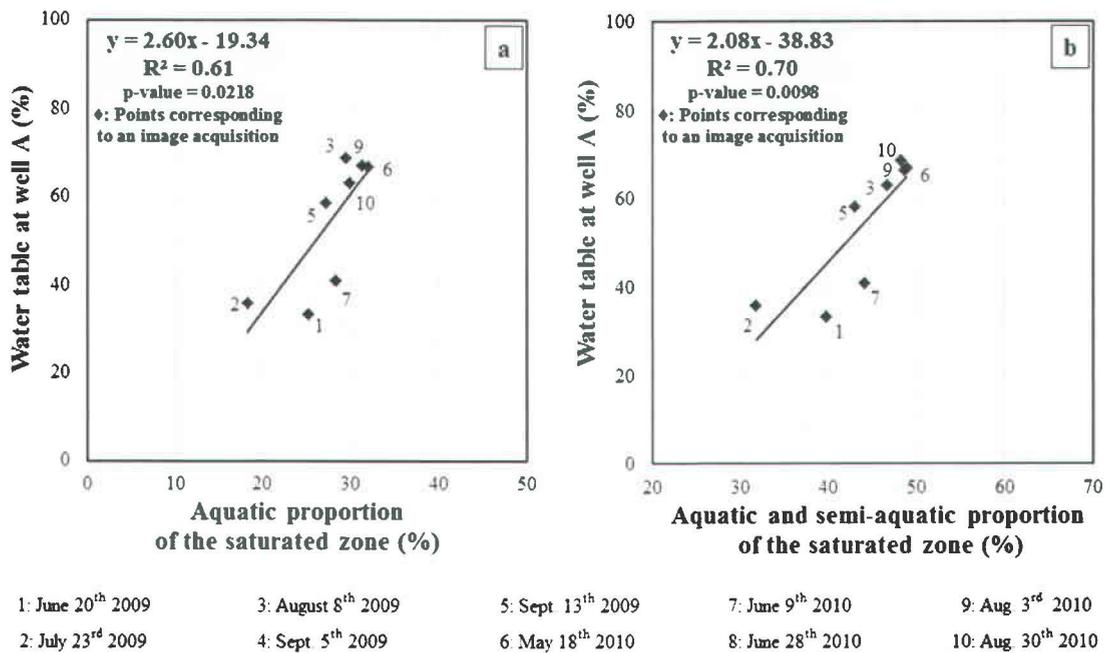


Figure 12 (a) Water table measured at well A compared to corresponding aquatic proportion of the site 1 saturated zone (derived from GeoEye-1 image classifications). (b) Water table measured at well A compared to corresponding aquatic and semi-aquatic proportion of the site 1 saturated zone. The range of measured water table values is displayed in percentages, 100% corresponding to the maximal water table value (0% to the minimal).

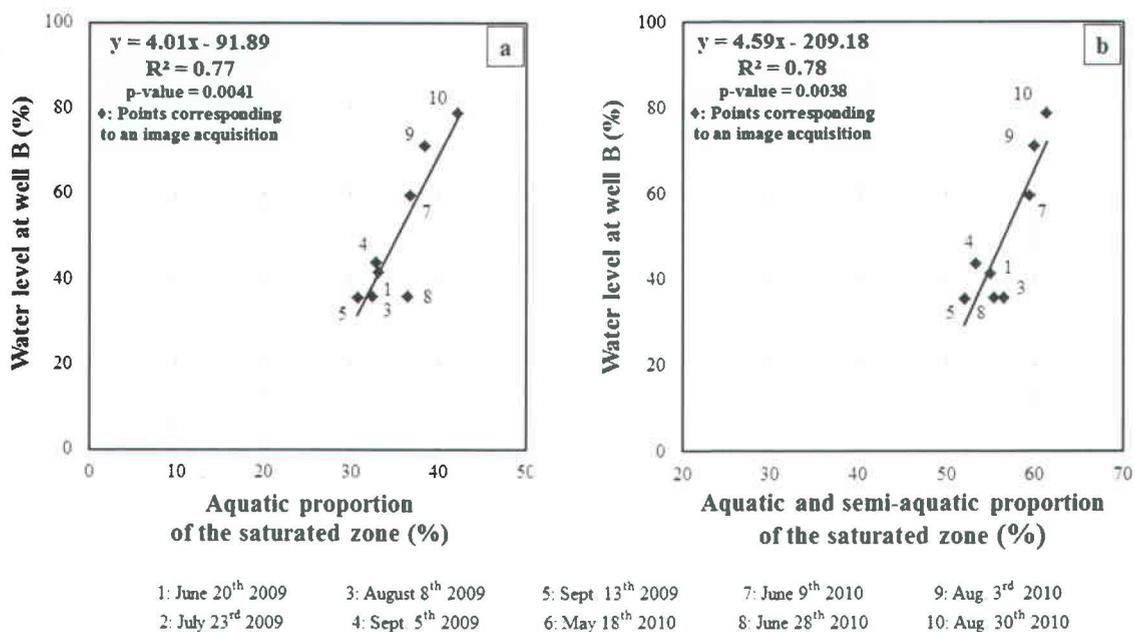
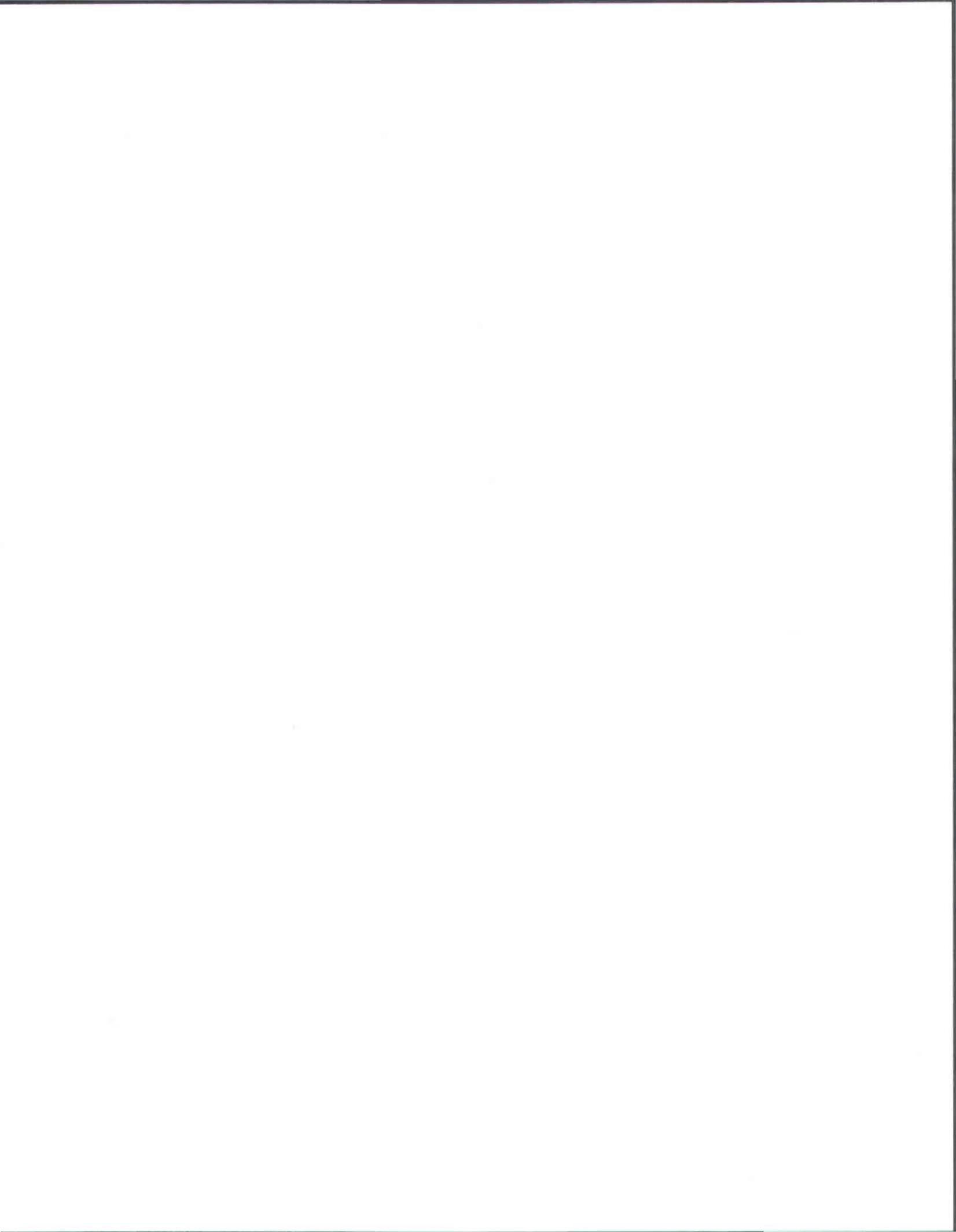


Figure 13 (a) Water level measured at well B compared to corresponding aquatic proportion of the site 2 saturated zone (derived from GeoEye-1 image classifications). (b) Water level measured at well B compared to corresponding aquatic and semi-aquatic proportion of the site 2 saturated zone. The range of measured water levels is displayed in percentages, 100% corresponding to the maximal water level value (0% to the minimal).

The slopes of the linear relations in Figure 13 (site 2 fen) are around two times steeper than those in Figure 12 (site 1 fen), reflecting weaker spatial dynamics of the aquatic and semi-aquatic compartments in the site 2 fen. The internal structures of the fens undoubtedly influence these slopes. Morphological features such as pool area, pool depth, and pool outlines provide some indication of the structure of the peatland (M. White, 2011). We hypothesize that well-defined pool outlines, which are composed of an abrupt and firm strip of vegetation of *Carex*, indicate insignificant spatial dynamics in the aquatic and semi-aquatic compartments. Loose outlines, which are rather flat and composed of sphagnum, suggest major spatial dynamics in the aquatic and semi-aquatic compartments. In the latter case, the incoming water cannot be stored vertically in the pool, so it spreads horizontally, which explains why the aquatic and semi-aquatic spatial dynamics appear in the imagery. To assess this hypothesis, a comparison between the pools of the two sites was made. The pools are generally large on site 2 (Figure 10), whereas the proportion of large and small pools is more balanced on site 1 (Figure 8). White (2011) found a positive correlation between pool area and pool depth. The same study also found that pools with a sharp contour were significantly larger than those with a loose outline (M. White, 2011). Overall, small pools tended to be shallow and to have a loose outline, while large pools tended to be deep and to have a sharp outline. Our hypothesis suggests that these characteristics should lead to stronger aquatic and semi-aquatic spatial dynamics at site 1 than at site 2. However, the strong dynamics observed at site 1 were caused by more than just the presence of small pools with loose outlines. As noted above, a very large pool near the outlet of the site 1 fen also made major contributions (Figure 8). Water tends to be stored downslope in the fen (M. White, 2011). Large amounts of water coming irregularly from the two wings of the fen induced the strong spatial dynamics upstream of the pool. To better understand the degree to which various morphological parameters (pool area, depth, outlines) influence the magnitude of increases in the proportion of aquatic and semi-aquatic compartments, more sites with very different morphological features should be monitored in the future.



4 CONCLUSIONS

The aim of this work was to investigate the seasonal hydrological dynamics of minerotrophic peatlands (fens) with the help of multi-date GeoEye-1 VHR imagery. This was done in order to answer the following questions: “Is it possible to delineate and classify the internal structures of peatlands with the help of VHR multispectral images?”; “Is there a seasonal dynamics of aquatic and semi-aquatic structures in patterned fens and can it be quantified with these images?”; and “Can the observed dynamics be linked with the hydrological regime of fens?”.

For these purposes, an object-based classification approach was set up and applied to 10 GeoEye-1 images acquired during the snow-free seasons of 2009 and 2010 over two fens (site 1 and 2) located in the La Grande river basin (54°N, Quebec, Canada). In addition, these fens were instrumented in 2009 for a continuous hydrometeorological monitoring.

The object-based classification approach provided a satisfactory level of accuracy both for the delineation of peatlands (overall accuracy of 93%) and for the distinction of the internal structures of peatlands (overall accuracy of 82%). Spectral quality and spatial resolution of GeoEye-1 fused imagery allowed discriminating efficiently the ecohydrological features in a complex peatlands environment. The multispectral data has been particularly critical to separate aquatic, semi-aquatic and terrestrial classes. Indeed, the vegetation presence and the saturation degree greatly influenced the spectral response of these bands.

Moreover, the time series of the internal peatlands structures mapping has demonstrated the existence of an important intra-seasonal spatial dynamics in the aquatic and semi-aquatic compartments of the peatlands under study (site 1: 53% of variation; site 2: 17% of variation). It turned out that the dynamics amplitude depended on the morphological features of the fens. The spatial dynamics is stronger if pools outlines are loose than if they are well-defined. Even if the 10 images were acquired during low-flow conditions, almost all of the intra-seasonal dynamics of the aquatic and semi-aquatic compartments was captured by the imagery.

The observed spatial dynamics was closely related to the evolution of the measured water levels. Indeed, when analysing the relation between peatland water level and discharge, two distinct hydrological regimes are observed. The first is the storage phase for which high increase of the

peatland water level does not result in significant increase of the outlet discharge. During this phase, spatial extent of the aquatic and semi-aquatic compartments extracted from the imagery highly increases. From a certain threshold, there is high increase of the discharge which does not result in significant increase of the water level. During this runoff phase, spatial extent of aquatic and semi-aquatic compartments should not increase much. Thus, finding the threshold of regime change by satellite imagery would allow determining the storage capacity of a fen. This is of great importance for understanding and modeling the hydrology of patterned peatlands. This study has demonstrated the possibility of a hydrological monitoring of peatlands at both intra-seasonal and local scale. Previous studies were limited to a hydrological monitoring at multi-decadal scale.

This work was conducted over only two experimental sites. It would be interesting to repeat the experience on other peatlands with a morphological structuration gradient. This would enable quantifying the storage capacity and detect the position of the threshold of hydrological regime change, from the spatial variations of aquatic and semi-aquatic structures extracted from VHR multispectral imagery. In this case, care should be taken to measure the flow at the outlet of each fen (in the present study, only one fen outlet was instrumented). In addition, water table measurements should be located in strategic areas where spatial hydrological dynamics is important, for example in pools with loose outlines. Sites could be identified and selected adequately using imagery. In the end, this study is a primordial stage towards the development of operational approaches of hydrological monitoring in patterned fens using VHR multispectral imagery. Its synoptic view provides a complement or even an alternative to peatlands field instrumentation, especially in remote areas.

5 ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and Hydro-Quebec as part of the project “Ecohydrology in highly aqualysed fens of La Grande River watershed”. The authors would like to gratefully acknowledge them for their financial support. The authors wish also to thank G. Carrer, S. Proulx-McInnis, N. Cliche Trudeau, G. Levrel, M. White, M. Dissanska, A. Jacome, J. Poulin, and Y. Gauthier for their assistance. Finally, the authors are grateful for the hydrological data provided by the INRS hydrology team.



RÉFÉRENCES

- Barrette J, August P & Golet F (2000) Accuracy assessment of wetland boundary delineation using aerial photography and digital orthophotography. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 66(4):409-416.
- Benz UC, Hoffman P, Willhauck G, Lingenfelder I & Heynen M (2004) Multi-Resolution, Object-Oriented Fuzzy Analysis of Remote Sensing Data for GIS-Ready Information. *SPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 58:239-258.
- Bernier M, Ghedira H, Gauthier Y, Magagi R, Filion R, De Seve D, Ouarda T, Villeneuve JP & Buteau P (2003) Remote sensing and classification bogs in Quebec using RADARSAT-1 images. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29(1):88-98.
- Blaschke T, Lang S & Hay GJ (2008) Chapter 1.4 Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA): A new name for a new discipline. *Object-Based Image Analysis. Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications*, Springer-Verlag (Édit.).
- Bootsma A & Ballard M (2008) *A national ecological framework for Canada. Appendix 1 : Canadian ecodistrict climate normals 1961-1990 overview.*, <http://sis.agr.gc.ca/cansis/nsdb/ecostrat/district/climate.html> (Consulté le 10 Octobre 2011)
- Brooks KN, Lu S.-Y. & McAdams T.V.W. (1995) *User manual for the Peatland Hydrologic Impact Model (PHIM). Version 4.0.* Department of Forest Resources, College of Natural Resources, University of Minnesota. 150 p.
- Cao M, Liu G & Zhang X (2007) An object-oriented approach to map wetland vegetation: A case study of Yellow River Delta. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2007.* (Barcelona, 23 - 28 June 2007), p 4585-4587.
- Carter V (1986) An overview of the hydrologic concerns related to wetlands in the United States. *Canadian Journal of Botany* 64(2):364-374.
- Charman DJ (2002) *Peatlands and environmental change.* Rexdale, Ont., Chichester. 301 p.
- Chokmani K, Pâquet LM & Gauthier Y (2008) Télédétection de l'écoulement de surface provenant d'amas au champ et enclos d'hivernage. (INRS-ETE, Québec), p 52.
- Cihlar J & Tarnocai C (2000) Wetlands of Canada and Climate Change : Observation Strategy and Baseline Data. *Rapport d'un atelier.* (Ottawa, 24 et 25 janvier 2000), p 63.
- Civco DL, Gilmore MS, Wilson EH, Barrett N, Prisloe S, Hurd JD & Chadwick C (2008) Multitemporal spectroradiometry-guided object-oriented classification of salt marsh vegetation. *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology VIII.* (Cardiff, Wales, 5-18 September 2008).
- Clerc C (2009) *Suivi de la nappe, de la recharge et de l'écoulement à l'aide de méthodes in situ afin de comprendre la dynamique de tourbières ombrotrophes de la région de la Baie de James.* (INRS-ETE, Québec). 238 p.

- 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*. (Université du Québec à Montréal, Montréal). 165 p.
- Congalton RG & Green K (1999) *Assessing the accuracy of remotely sensed data : principles and practices*. Boca Raton, FL
- 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, 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+. in *Rapport de recherche INRS*, p 1-63.
- Gauthier F, Rousseau AN, Bernier M, Chokmani K & Jutras S (2006) *Connectivité physique des tourbières du bassin versant de la rivière Nécopastic à l'aide d'image Landsat-7 ETM+ et exploration de méthodes in-situ pour évaluer la connectivité hydraulique. LG-2, Baie James, Canada. Rapport de recherche N° R901*. INRS, Québec, Canada. http://www.ouranos.ca/media/publication/Documents/Gauthier_et_al_2006_Rapport.pdf
- GeoEye (2011) *Collecting Images with GeoEye-1.*, <http://www.geoeye.com/GeoEye101/satellite-imagery/collection-method.aspx> (Consulté le 4 novembre 2011)
- Ghedira H (2002) *Utilisation des réseaux de neurones pour la cartographie des milieux humides à partir d'une série temporelle d'images RADARSAT-1*. (INRS-ETE, Sainte-Foy).
- Glaser PH & Janssens JA (1986) Raised bogs in eastern North America: transitions in landforms and gross stratigraphy. *Canadian Journal of Botany* 64(2):395-415.
- Glenn M & Woo M-k (1997) Spring and summer hydrology of a valley-bottom wetland, Ellesmere Island, Northwest Territories, Canada. *Wetlands* 17(2):321-329.
- Gómez-Rodríguez C, Bustamante J & Díaz-Paniagua C (2010) Evidence of Hydroperiod Shortening in a Preserved System of Temporary Ponds. *Remote Sensing* 2(6):1439-1462.
- Grenier M, Demers AM, 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:S28-S45.
- 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(SUPPL. 2).
- Halabisky M, Moskal LM & Hall SA (2011) Object-based classification of semi-arid wetlands. *Journal of Applied Remote Sensing* 5(1).
- Harris A & Bryant RG (2009) A multi-scale remote sensing approach for monitoring northern peatland hydrology: Present possibilities and future challenges. *Journal of Environmental Management* 90(7):2178-2188.

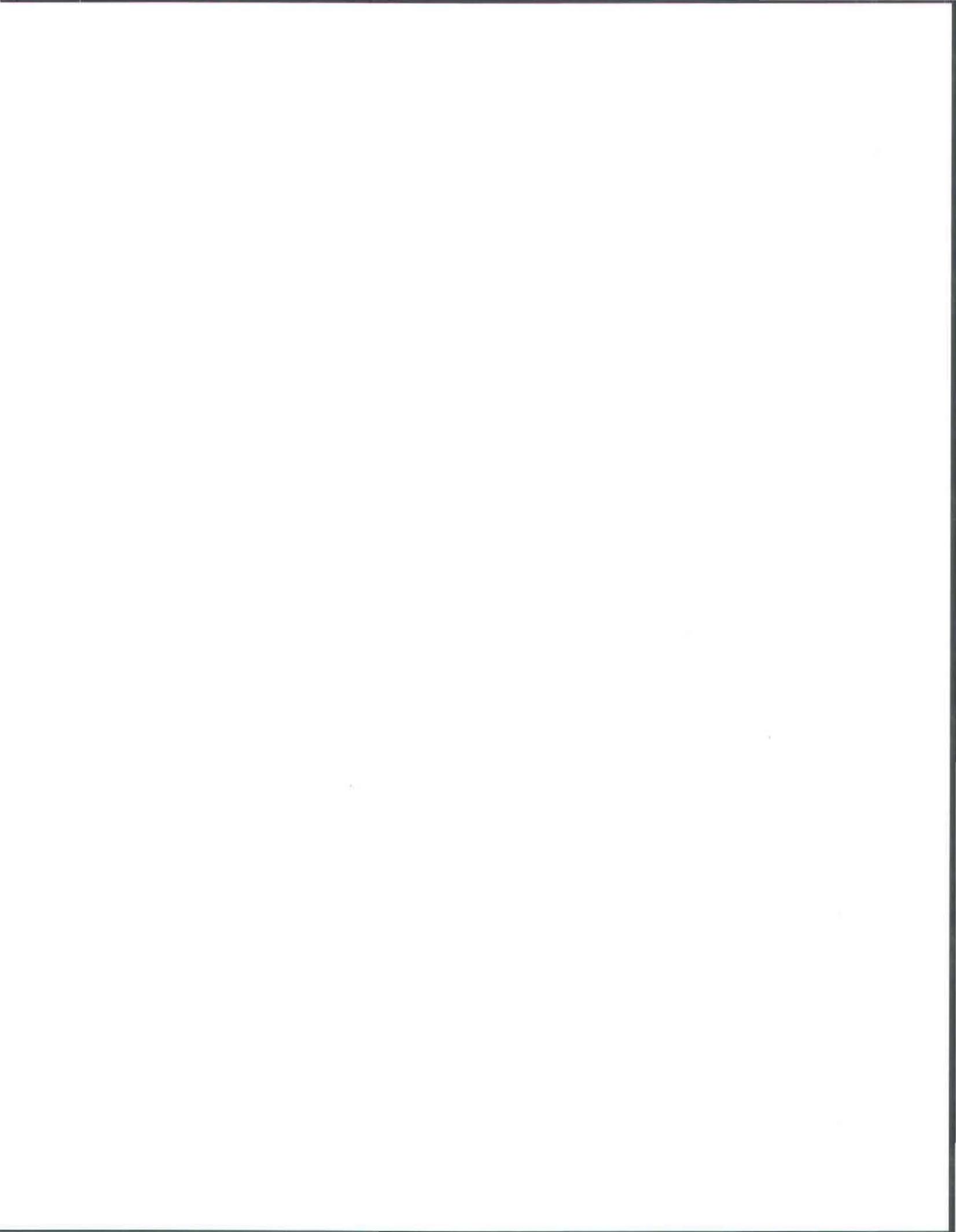
- Horgan GW & Critchley MF (1989) The use of Thematic Mapper imagery for peatland mapping and mineral exploration in Ireland. *Monitoring the Earth's environment. Proc. workshop on Earthnet pilot project on Landsat TM applications, Frascati, 1987*:91-97.
- Hubert-Moy L, Michel K, Corpetti T & Clément B (2006) Object-oriented mapping and analysis of wetlands using SPOT 5 data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. p 3447-3450.
- Hydro-Québec (2001) *Complexe hydroélectrique La Grande.*, http://www.hydroquebec.com/developpementdurable/documentation/pdf/poissons/fiche_12.pdf (Consulté le 12 Août 2011)
- Jensen JR (2005) Chapter 6: Remote Sensing atmospheric correction. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective, Third Edition*. p 526.
- Jutras S, Rousseau AN & Clerc Cm (2009) Implementation of a Peatland-Specific Water Budget Algorithm in HYDROTEL. *Canadian Water Resources Journal* 34(4):349-364.
- Krause K (2005) *Radiometric use of QuickBird imagery*. DigitalGlobe, Longmont), http://www.digitalglobe.com/downloads/QuickBird_technote_raduse_v1.pdf (Consulté le 12 Août 2011)
- Kvaerner J & Klove B (2008) Generation and regulation of summer runoff in a boreal flat fen. *J. Hydrol.* 360(1-4):15-30.
- Levrel G & Rousseau AN (2010) Étalonnage des sondes FDR (Frequency Domain Reflectometry) sur les cinq premiers centimètres des sols et des couverts de bryophytes de deux tourbières du milieu boréal Québécois. (INRS-ETE, Québec City), p 1-315.
- Maxa M & Bolstad P (2009) Mapping northern wetlands with high resolution satellite images and lidar. *Wetlands* 29(1):248-260.
- MDDEP (2006) *Identification et délimitation des écosystèmes aquatiques, humides et riverains*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec. 13 p.
- Mitrakis NE, Topaloglou CA, Alexandridis TK, Theocharis JB & Zalidis GC (2008) A novel self-organizing neuro-fuzzy multilayered classifier for land cover classification of a VHR image. *International Journal of Remote Sensing* 29(14):4061-4087.
- Moskal LM, Styers DM & Halabisky M (2011) Monitoring Urban Tree Cover Using Object-Based Image Analysis and Public Domain Remotely Sensed Data. *Remote Sensing* 3(10):2243-2262.
- MRNF (2006) *La stratégie énergétique du Québec 2006-2015.*, <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/energie/strategie/strategie-energetique-2006-2015.pdf> (Consulté le 13 Septembre 2011)
- Nikolakopoulos KG (2004) Pansharp vs Wavelet vs PCA fusion technique for use with Landsat ETM panchromatic and multispectral data. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. p 30-40.
- Novack T, Esch T, Kux H & Stilla U (2011) Machine Learning Comparison between WorldView-2 and QuickBird-2-Simulated Imagery Regarding Object-Based Urban Land Cover Classification. *Remote Sensing* 3(10):2263-2282.

- NWWG (1997) *The Canadian wetlands classification system, second edition*. The National wetlands working group. Wetlands Research Centre, Waterloo, Ont. 68 p.
- Ozesmi SL & Bauer ME (2002) Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands Ecology and Management* 10(5):381-402.
- Payette S (1984) Peat inception and climatic change in Northern Quebec. *Climatic changes on a yearly to millennial basis*, Reidel Publishers, Dordrech. p 173-180.
- Payette S & Rochefort L (2001) *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Québec City, Que. 621 p.
- Poulin M, Careau D, Rochefort L & Desrochers A (2002) From Satellite Imagery to Peatland Vegetation Diversity: How Reliable Are Habitat Maps? *Conservation Ecology* 6(2):16.
- Price JS & Maloney DA (1994) *Hydrology of a patterned bog-fen complex in Southeastern Labrador, Canada*. Nordic Association for Hydrology, Lyngby, Denmark.
- Price JS, Maloney DA & Downey FG (1990) Peatlands of the Lake Melville Coastal Plain, Labrador. *Northern Hydrology: Selected Perspectives*:293-302.
- Price JS & Waddington JM (2000) Advances in Canadian wetland hydrology and biogeochemistry. *Hydrological Processes* 14(9):1579-1589.
- Proulx-McInnis S (2010) *Caractérisations hydrologique, topographique et géomorphologique d'un bassin versant incluant une tourbière minérotrophe fortement aqualysée, Baie-de-James, Québec*. (INRS-ETE, Québec City). 175 p.
- Quinton WL, Hayashi M & Pietroniro A (2003) Connectivity and storage functions of channel fens and flat bogs in northern basins. *Hydrological Processes* 17(18):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 MJ, 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.
- Rokitnicki-Wojcik D, Wei AH & Chow-Fraser P (2011) Transferability of object-based rule sets for mapping coastal high marsh habitat among different regions in Georgian Bay, Canada. *Wetlands Ecology and Management* 19(3):223-236.
- Roy R (2004) *S'adapter aux changements climatiques : La production d'hydroélectricité.*, http://www.ouranos.ca/fr/pdf/ouranos_sadapterauxcc_fr.pdf (Consulté le 5 Octobre 2011)
- Rydin H & Jeglum JK (2006) *The Biology of Peatlands*. Oxford. 354 p.
- Schowegerdt RA (1997) *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing-Second Ed.* American Press, San Diego.
- Seuthé C & Buteau P (1994) Chapitre 5 : Les tourbières au Québec : une ressource importante à connaître et à protéger *Téledétection de l'environnement dans l'espace francophone*, Les Presses de l'Université du Québec en collaboration avec l'Agence de coopération culturelle et technique. p 596.

- Song C, Woodcock CE, Seto KC, Lenney MP & Macomber SA (2001) Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment* 75(2):230-244.
- Soti V, Puech C, Lo Seen D, Bertran A, Vignolles C, Mondet B, Dessay N & Tran A (2010) The potential for remote sensing and hydrologic modelling to assess the spatio-temporal dynamics of ponds in the Ferlo Region (Senegal). *Hydrology and Earth System Sciences* 14(8):1449-1464.
- Stove GC (1983) The current use of remote-sensing data in peat, soil, land-cover and crop inventories in Scotland. *The study of the ocean and the land surface from satellites*:271-281.
- 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):365-379.
- Tarnocai C (1984) *Peat resources of Canada*. National Research Council of Canada, Peat Energy Program, National Research Council of Canada No. 24140. 17 p.
- Tarnocai C (1998) *The amount of organic carbon in various soil orders and ecological provinces in Canada*. Crc Press-Taylor & Francis Group, Boca Raton. 81-92 p.
- Tarnocai C, Kettles IM & Lacelle B (2000) *Peatlands of Canada Map*. Geological Survey of Canada, Open File 3834, Scale 1: 6 500 000 (map), Ottawa.
- Todd AK, Buttle JM & Taylor CH (2006) Hydrologic dynamics and linkages in a wetland-dominated basin. *J. Hydrol.* 319(1-4):15-35.
- Töyrä J & Pietroniro A (2005) Towards operational monitoring of a northern wetland using geomatics-based techniques. *Remote Sensing of Environment* 97(2):174-191.
- Trimble (2010) eCognition 8.64.0 User Guide. (Trimble Germany GmbH, München, Germany), p 1-250.
- Tuxen KA, Schile LM, Kelly M & Siegel SW (2008) Vegetation Colonization in a Restoring Tidal Marsh: A Remote Sensing Approach. *Restoration Ecology* 16(2):313-323.
- UQCN (1994) *Guide des milieux humides*. Union Québécoise pour la conservation de la nature.
- Waddington JM, Kellner E, Strack M & Price JS (2010) Differential peat deformation, compressibility, and water storage between peatland microforms: Implications for ecosystem function and development. *Water Resources Research* 46(7):W07538.
- Waddington JM, Quinton WL, Price JS & Lafleur PM (2009) Advances in canadian peatland hydrology, 2003-2007. *Canadian Water Resources Journal* 34(2):139-148.
- Weiss R, Shurpali NJ, Sallantaus T, Laiho R, Laine J & Alm J (2006) Simulation of water table level and peat temperatures in boreal peatlands. *Ecological Modelling* 192(3-4):441-456.
- White DC & Lewis MM (2011) A new approach to monitoring spatial distribution and dynamics of wetlands and associated flows of Australian Great Artesian Basin springs using Quick Bird satellite imagery. *J. Hydrol.* 408(1-2):140-152.

- White M (2011) *Modèle de développement des tourbières minérotrophes aqualysées du Haut-Boréal québécois*. (Université Laval, Québec). 77 p.
- Xu J & Wu Z (2012) Research on Geometric and Radiometric Correction Order and Its Impact for Remote Sensing Image. *XXII Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. (Melbourne Convention and Exhibition Centre, Australia, 25 August-1 September 2012).
- Zhang Y (2002) A new automatic approach for effectively fusing Landsat-7 as well as IKONOS images. *IEEE International Geosciences Remote Sensing Symposium*. p 2429–2243.
- Zoltaï 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 Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Zong W, Zhou Y, Lin W & Zhou Q (2010) The method study of extraction of tidal marsh vegetation based on object-oriented in Chongming Dongtan national nature reserve, Shanghai. *3rd International Congress on Image and Signal Processing*. (Yantai, 16 -18 October 2010), p 2265-2268.

ANNEXE A : REGLES DE CLASSIFICATION UTILISEES



Valable pour la classification à échelle grossière (Image du 9 Juin 2010 seulement)

Classe	Groupe	Règles de classification	
		Fonction d'appartenance (règle spatiale)	Algorithme plus proche voisin (règle spectrale)
Eau	EAU	B.R à FORÊT \neq 1	Moyenne Bleu Moyenne Vert Moyenne Rouge
Platière et eau	TOURBE	B.R à FORÊT \neq 1	Moyenne Proche Infrarouge Moyenne Intensité
Platière basse	TOURBE	B.R à FORÊT \neq 1	Moyenne ProportionBleu Moyenne ProportionVert Moyenne ProportionRouge
Platière surélevée	TOURBE	B.R à FORÊT \neq 1	
Butte et bordure forestière	TOURBE	B.R à FORÊT \neq 1	Moyenne Vert Moyenne Rouge Moyenne Intensité
Lichen	FORÊT	B.R à TOURBE \neq 1 B.R À EAU \neq 1	Moyenne Saturation Moyenne ProportionVert Moyenne ProportionRouge
Forêt	FORÊT	B.R à TOURBE \neq 1 B.R À EAU \neq 1	Moyenne de l'indice de Chlorophylle Écart-type Vert
Other	OTHER	Recouvrement de la couche thématique = 1	/

B.R à classe : Bordure relative ... $B.R \in [0,1]$.

Pourcentage de la frontière de l'objet partagé avec le(s) objet(s) voisin(s) d'une classe donnée.

Si B.R à classe (ou groupe) = 1 alors l'objet à l'étude est totalement entouré de cette classe.

Si B.R à classe (ou groupe) = 0 alors l'objet à l'étude n'est pas en contact avec cette classe.

Moyenne bande : réfère à la moyenne des valeurs de pixel contenues dans l'objet, pour la bande donnée (e.g. Bleu)

Écart-type bande : réfère à l'écart-type des valeurs de pixel contenues dans l'objet, pour la bande donnée (e.g. Vert)

Valable pour la classification à échelle fine (10 images)

		Règles de classification		
Classe	Groupe	Fonction d'appartenance (règle spatiale)		Algorithme plus proche voisin (règles spectrales)
		Existence du super objet "Tourbière"	Existence du super objet "Transition"	
Eau libre	EAU	B.R à FORÊT \neq 1	B.R à TOURBE ou EAU \neq 0	
		B.R à Butte et bordure forestière = 0	B.R à FORÊT \neq 1	
Eau peu profonde	EAU	B.R à FORÊT \neq 1	B.R à TOURBE ou EAU \neq 0	Moyenne Bleu
		B.R à Butte et bordure forestière = 0	B.R à FORÊT \neq 1	Moyenne Vert
				Moyenne Rouge
Platière et eau	TOURBE	B.R à FORÊT \neq 1	B.R à TOURBE ou EAU \neq 0	Moyenne Proche Infrarouge
			B.R à FORÊT \neq 1	Moyenne Intensité
Platière basse	TOURBE		B.R à TOURBE ou EAU \neq 0	Moyenne ProportionBleu
		B.R à FORÊT \neq 1	B.R à FORÊT \neq 1	Moyenne ProportionVert
Platière surélevée	TOURBE		B.R à TOURBE ou EAU \neq 0	
		B.R à FORÊT \neq 1	B.R à FORÊT \neq 1	
Butte et bordure forestière	TOURBE	B.R à FORÊT \neq 1	B.R à TOURBE ou EAU \neq 0	Moyenne Vert
			B.R à FORÊT \neq 1	Moyenne Rouge
		B.R à EAU \neq 1	B.R à EAU \neq 1	Moyenne Intensité
Lichen	FORÊT			Moyenne Saturation
		B.R à FORÊT \neq 0	B.R à EAU = 0	Moyenne ProportionVert
		B.R à EAU = 0		Moyenne ProportionRouge
Forêt	FORÊT	B.R à FORÊT \neq 0	/	Moyenne de l'indice de Chlorophylle
				Écart-type Vert

B.R à classe : Bordure relative ... B.R \in [0,1]. Pourcentage de la frontière de l'objet partagé avec le(s) objet(s) voisin(s) d'une classe donnée.

Si B.R à classe (ou groupe) = 1 alors l'objet à l'étude est totalement entouré de cette classe.

Si B.R à classe (ou groupe) = 0 alors l'objet à l'étude n'est pas en contact avec cette classe.

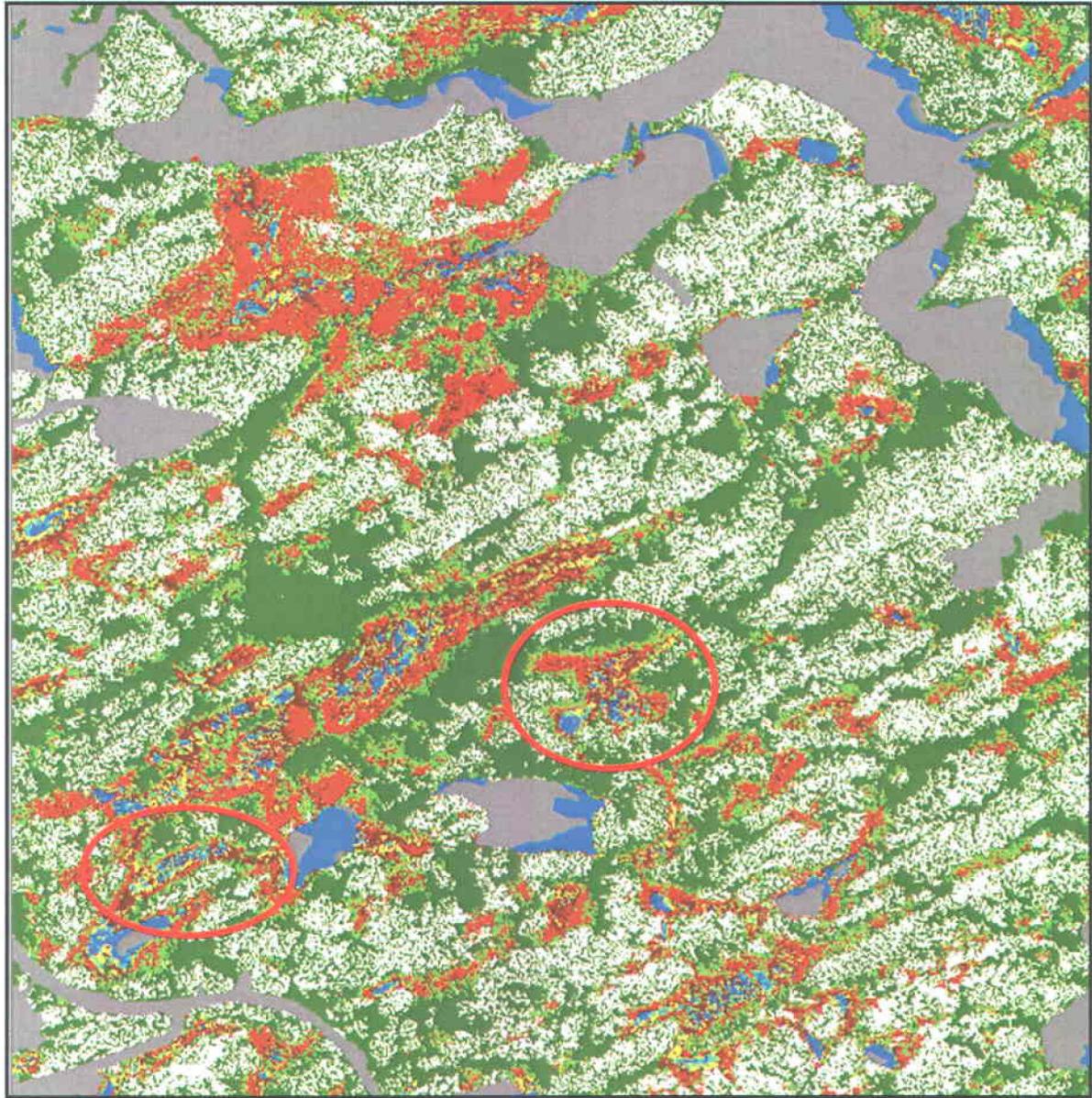
Moyenne bande : réfère à la moyenne des valeurs de pixel contenues dans l'objet, pour la bande donnée (e.g. Bleu)

Écart-type bande : réfère à l'écart-type des valeurs de pixel contenues dans l'objet, pour la bande donnée (e.g. Vert)

**ANNEXE B : CLASSIFICATIONS FINALES DES 10 SOUS-
IMAGES GEOEYE-1 : 4950 X 5330 PIXELS (2.5 KM X 2.7 KM)**

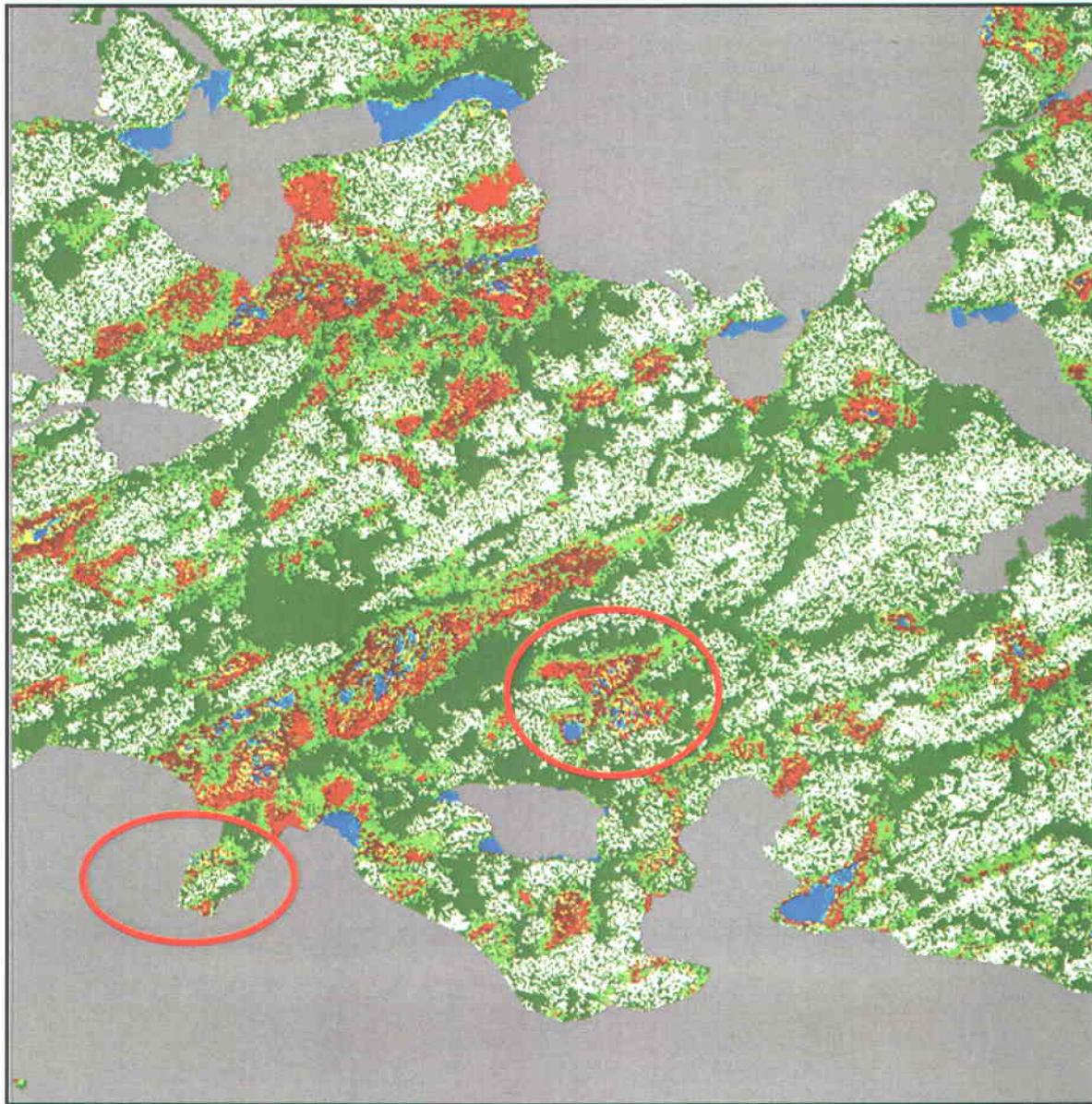


20 juin 2009



Note : les deux tourbières objets de l'étude sont encadrées en rouge

23 juillet 2009

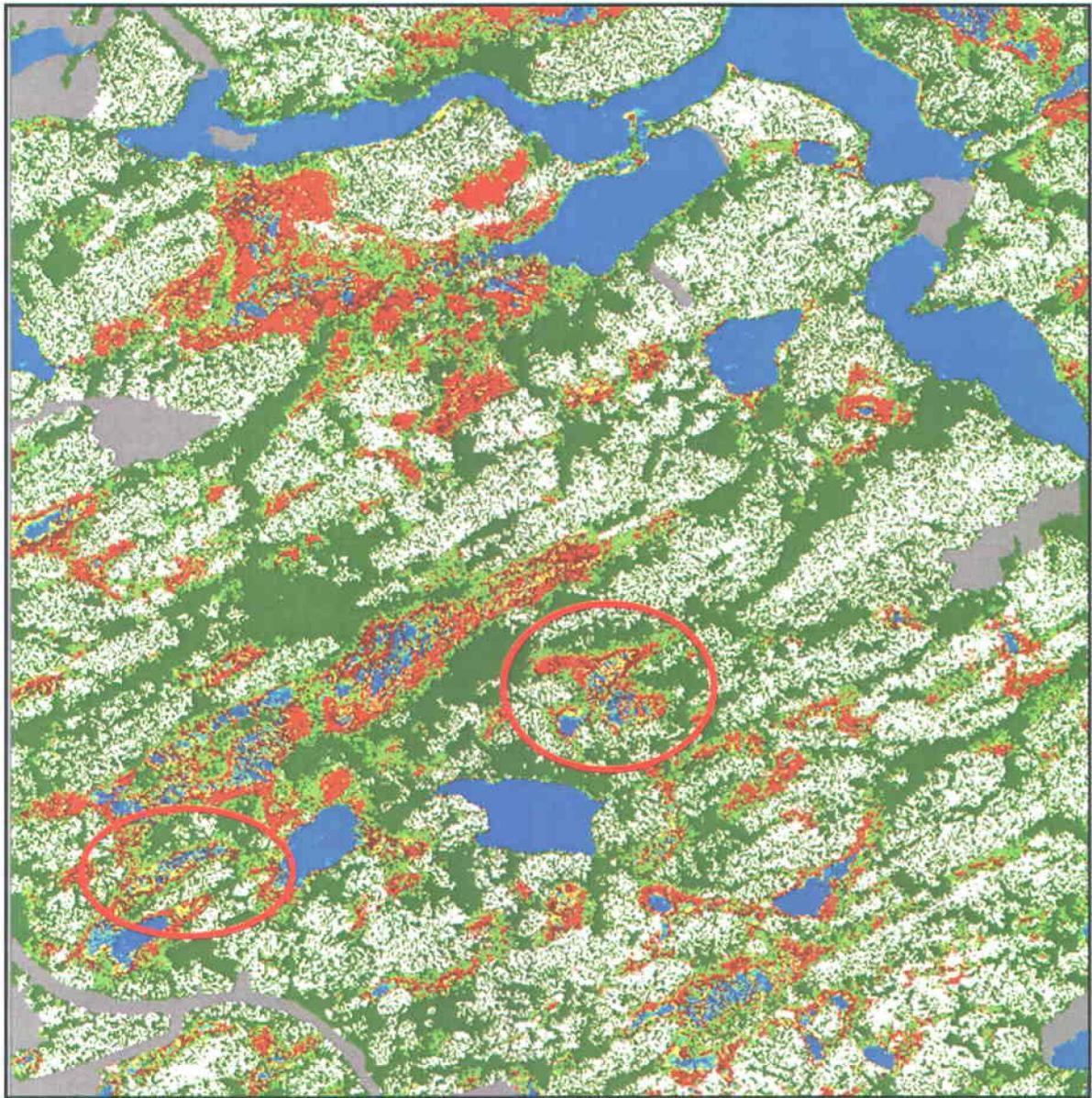


1000 m

- | | | | | |
|--|---|---|--|---|
|  Eau profonde |  Platière et eau |  Platière surélevée |  Forêt |  Autre |
|  Eau peu profonde |  Platière basse |  Butte et bordure forestière |  Lichen | |

Note : les deux tourbières objets de l'étude sont encerclées en rouge

8 août 2009

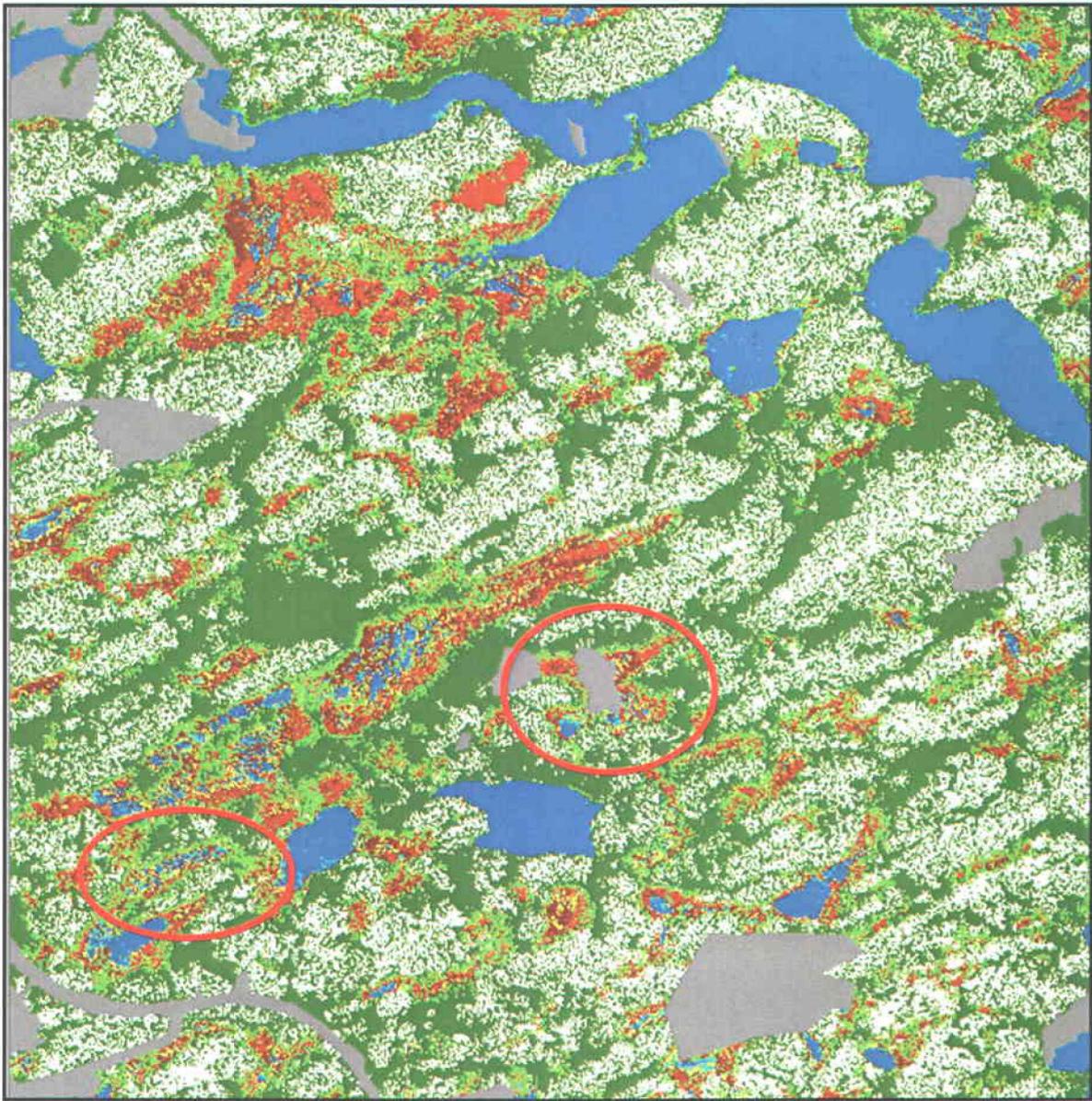


1000 m

- | | | | | |
|------------------|-----------------|-----------------------------|--------|-------|
| Eau profonde | Platière et eau | Platière surélevée | Forêt | Autre |
| Eau peu profonde | Platière basse | Butte et bordure forestière | Lichen | |

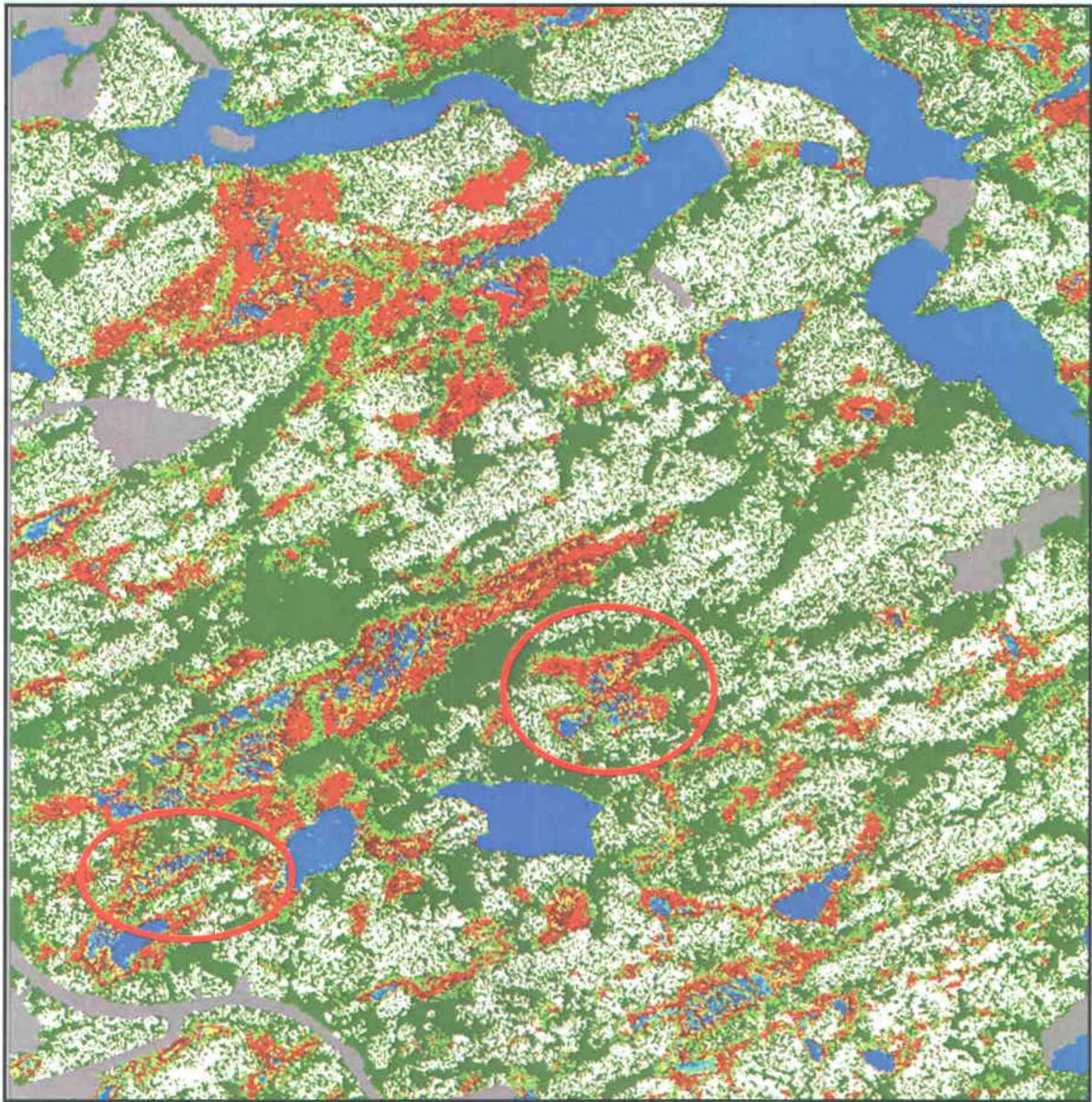
Note : les deux tourbières objets de l'étude sont encadrées en rouge

5 septembre 2009



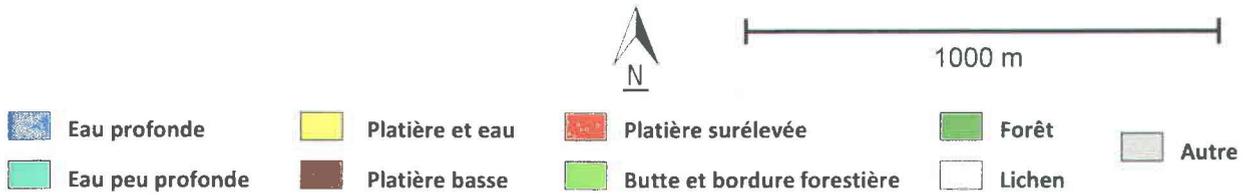
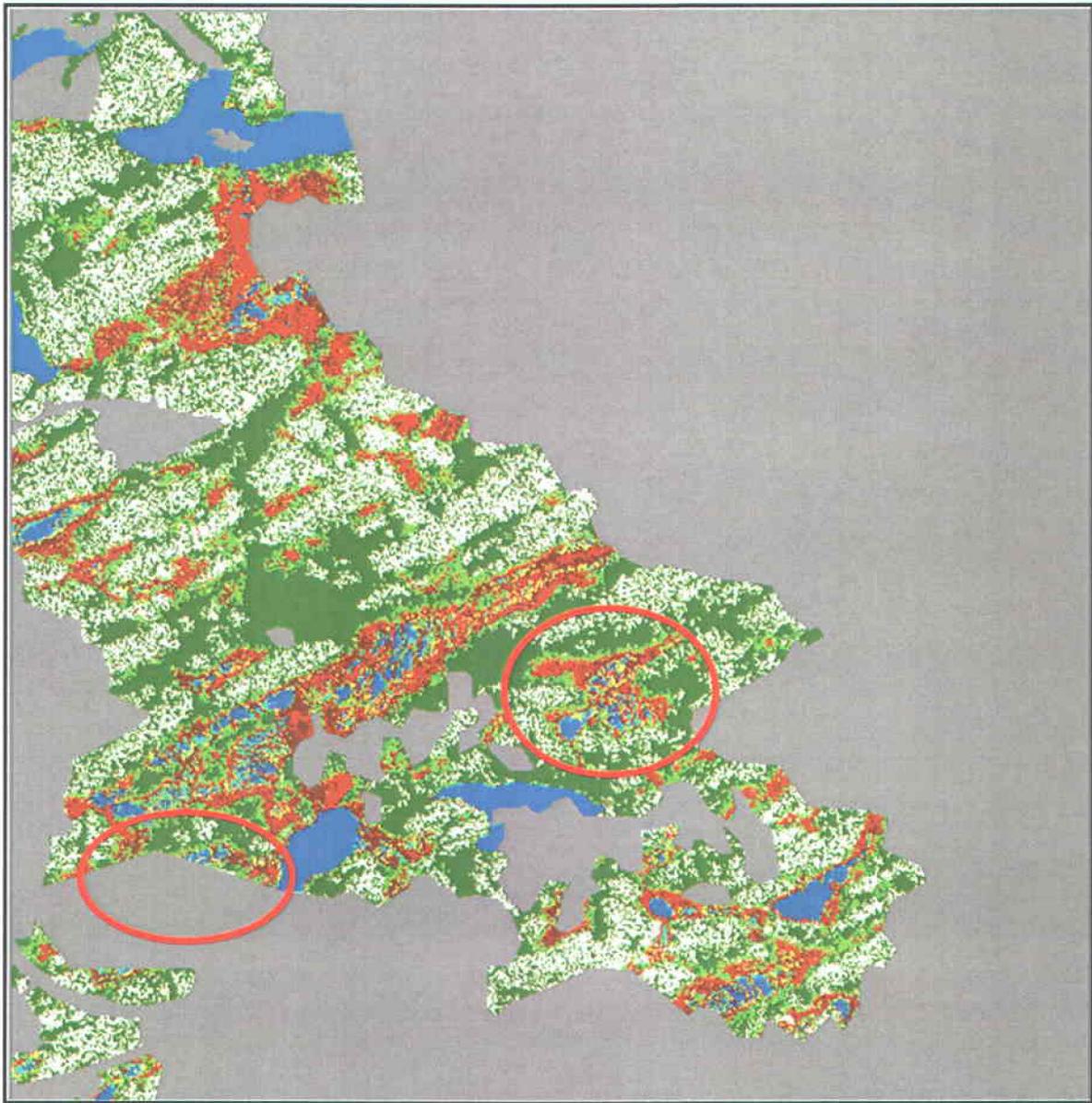
Note : les deux tourbières objets de l'étude sont encerclées en rouge

13 septembre 2009



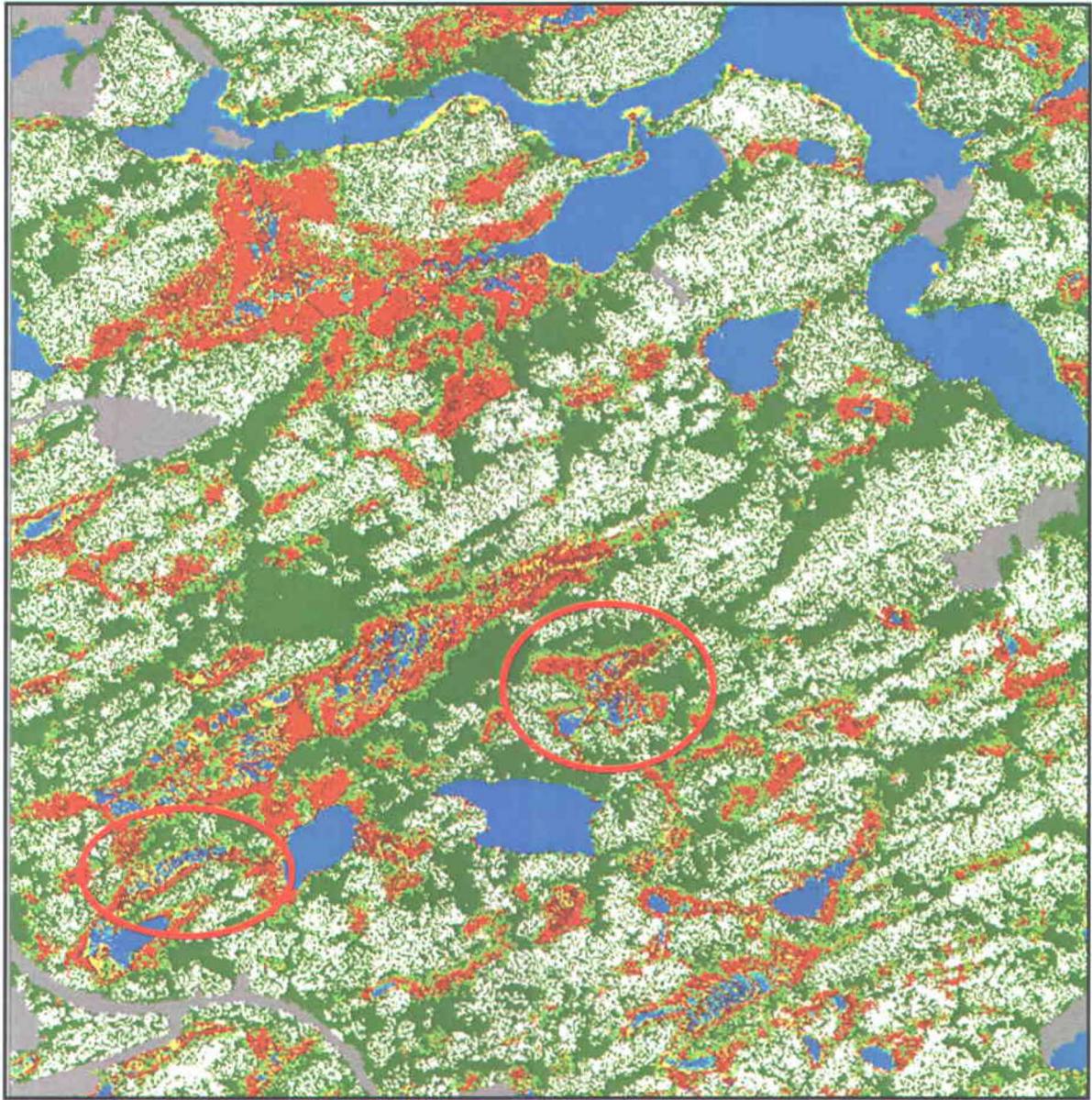
Note : les deux tourbières objets de l'étude sont encerclées en rouge

18 mai 2010



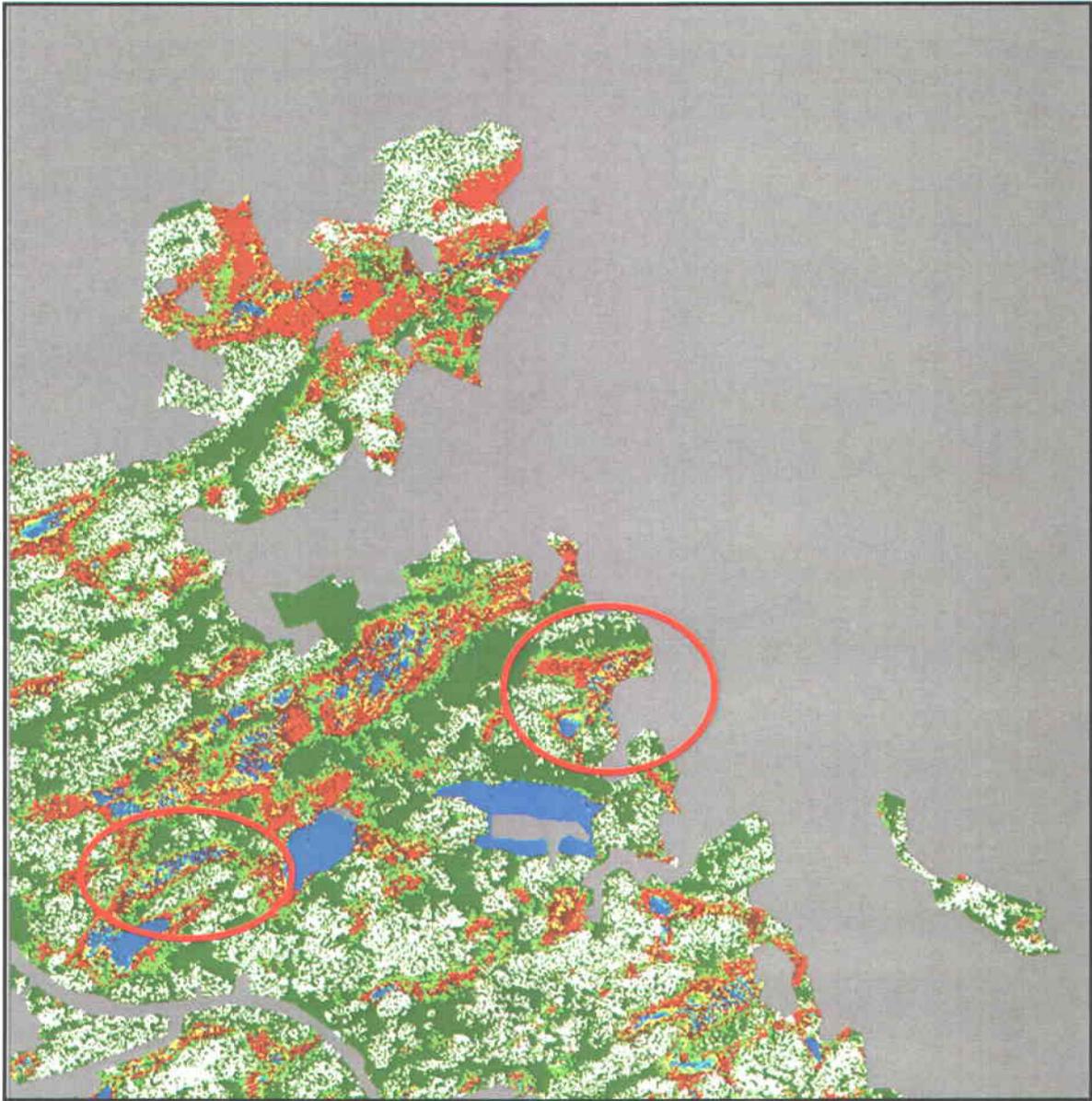
Note : les deux tourbières objets de l'étude sont encerclées en rouge

9 juin 2010



Note : les deux tourbières objets de l'étude sont encerclées en rouge

28 juin 2010

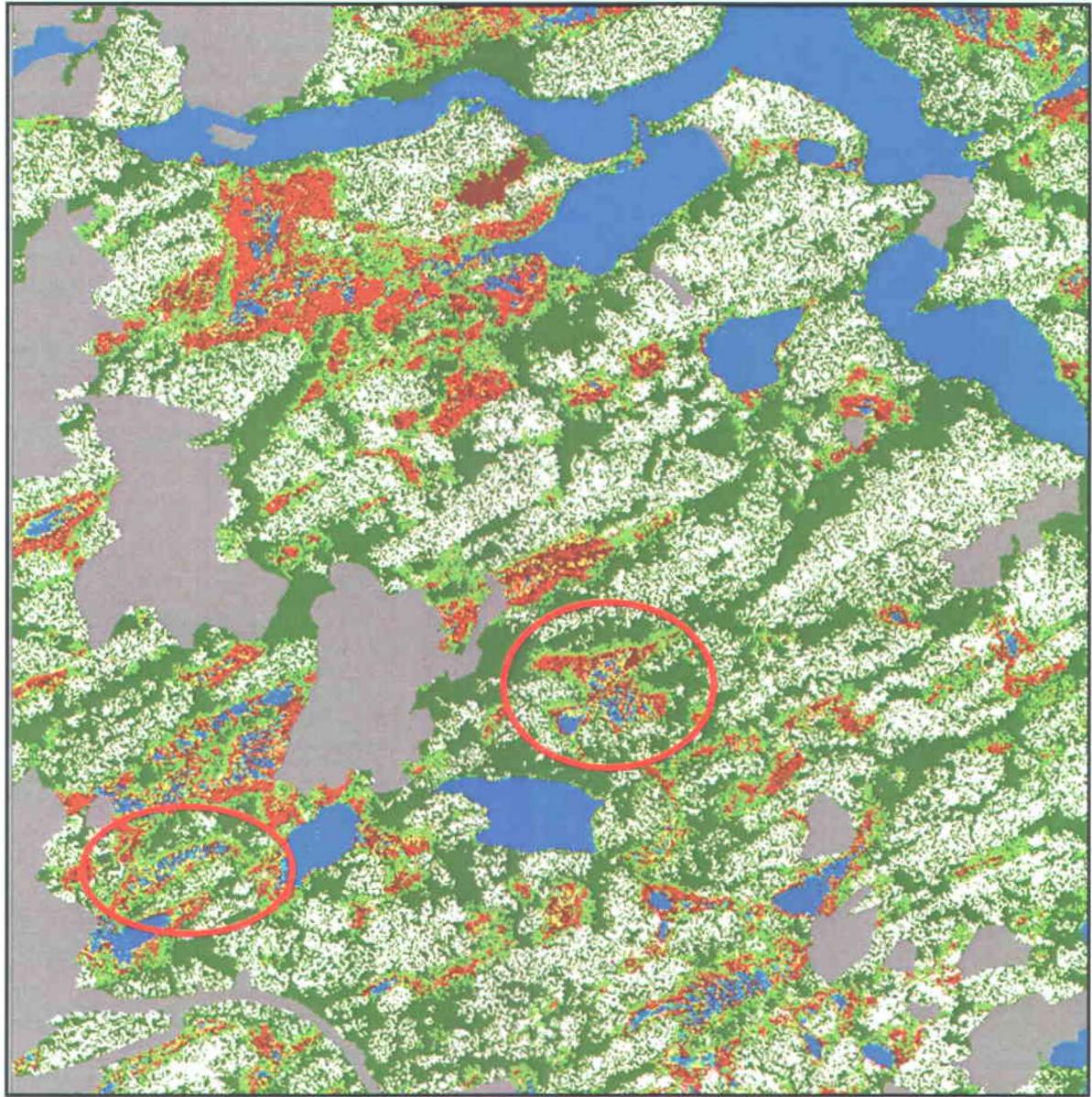


1000 m

- | | | | | |
|--|---|---|--|---|
|  Eau profonde |  Platière et eau |  Platière surélevée |  Forêt |  Autre |
|  Eau peu profonde |  Platière basse |  Butte et bordure forestière |  Lichen | |

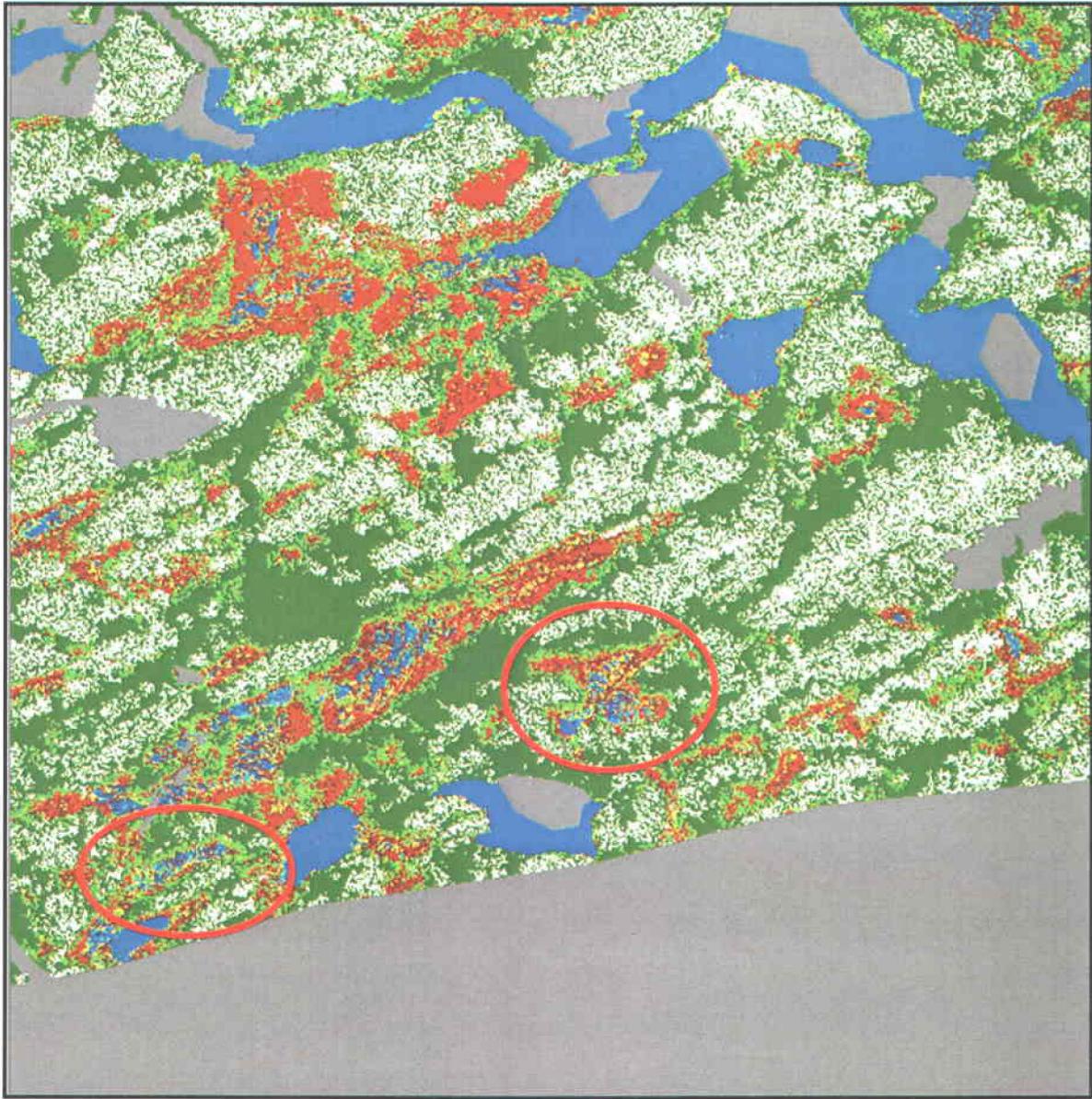
Note : les deux tourbières objets de l'étude sont encerclées en rouge

3 août 2010



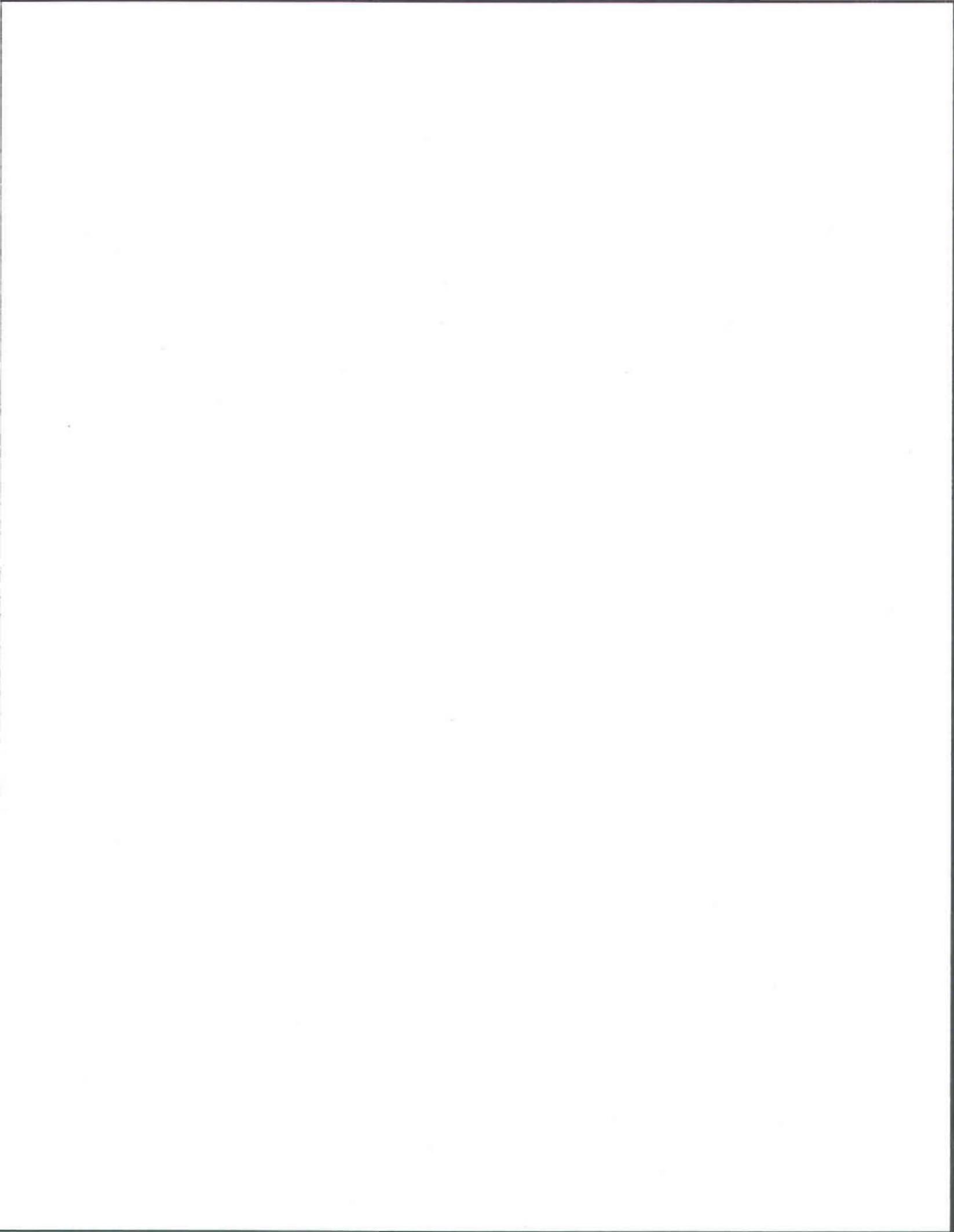
Note : les deux tourbières objets de l'étude sont encerclées en rouge

30 août 2010



Note : les deux tourbières objets de l'étude sont encerclées en rouge

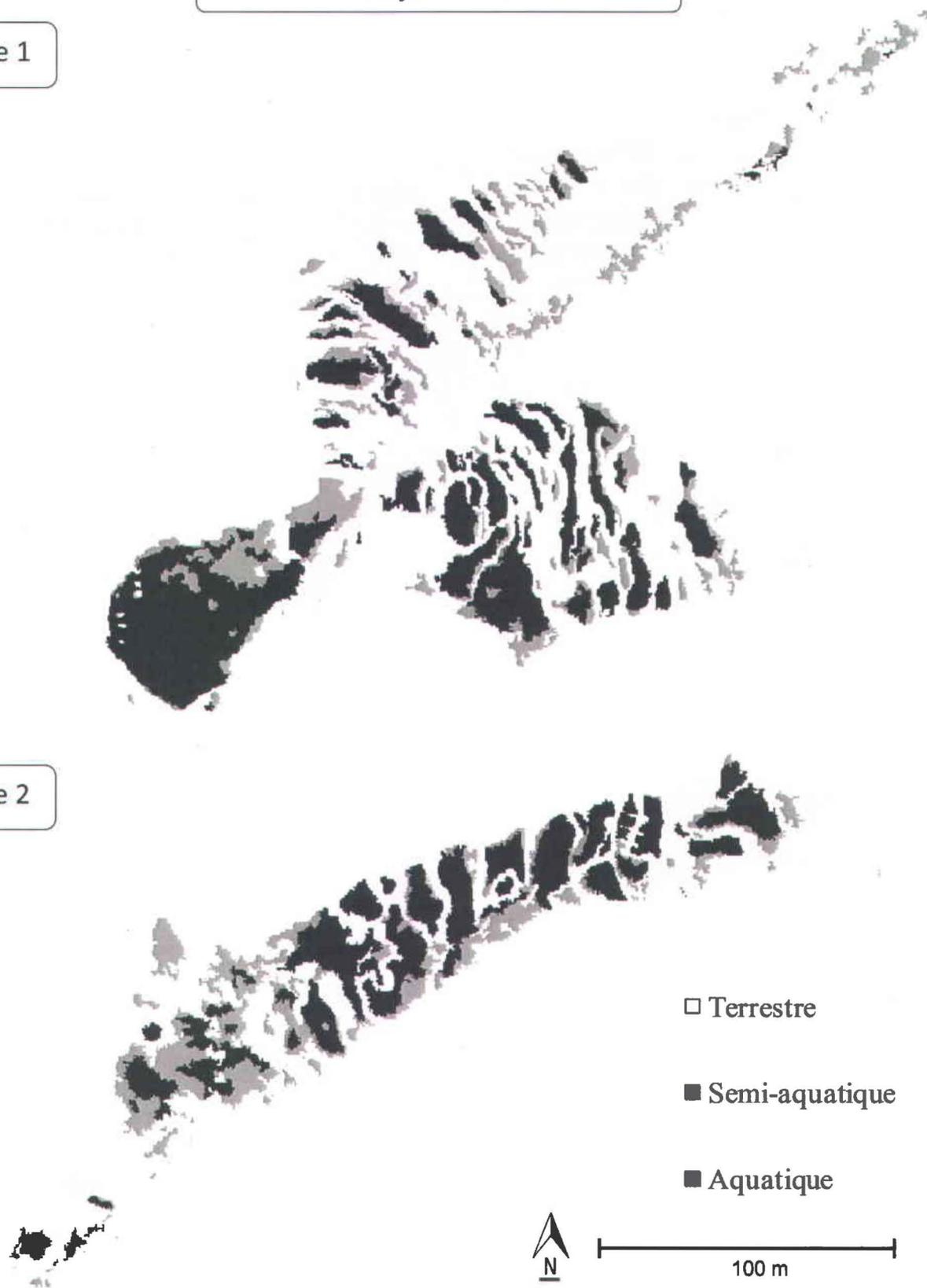
**ANNEXE C : SUIVI CARTOGRAPHIQUE DE LA
COMPOSITION DES ZONES SATUREES DU SITE 1 ET DU
SITE 2, ISSUES DES CLASSIFICATIONS FINALES DES 10
SOUS-IMAGES GEOEYE-1**



20 juin 2009

Site 1

Site 2



23 juillet 2009

Site 1



Site 2

Pas de données car présence de nuages

□ Terrestre

■ Semi-aquatique

■ Aquatique

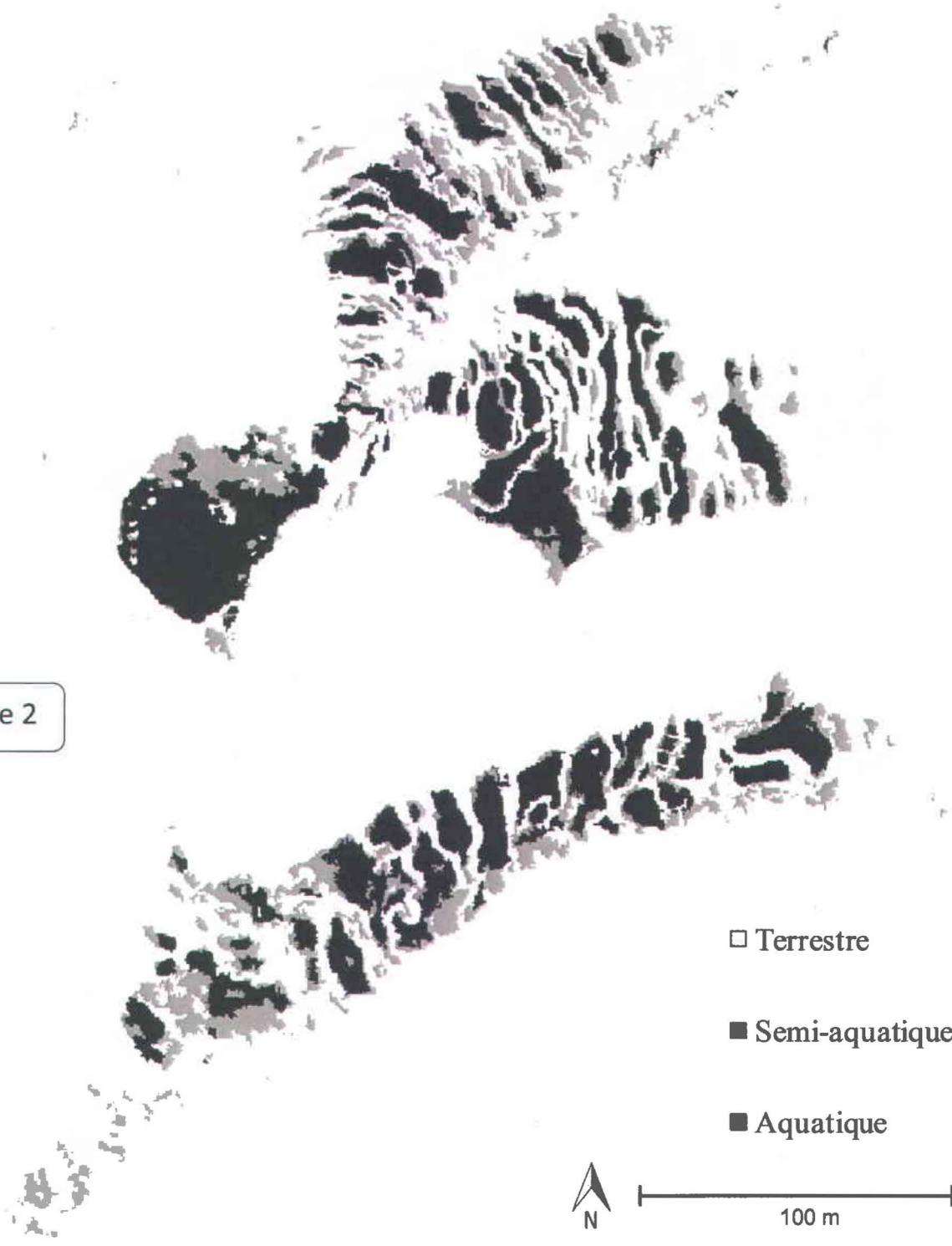


100 m

8 août 2009

Site 1

Site 2



5 septembre 2009

Site 1

Pas de données car présence de nuages

Site 2



13 septembre 2009

Site 1

Site 2

- Terrestre
- Semi-aquatique
- Aquatique



100 m

18 mai 2010

Site 1



Site 2

Pas de données car présence de nuages

□ Terrestre

■ Semi-aquatique

■ Aquatique

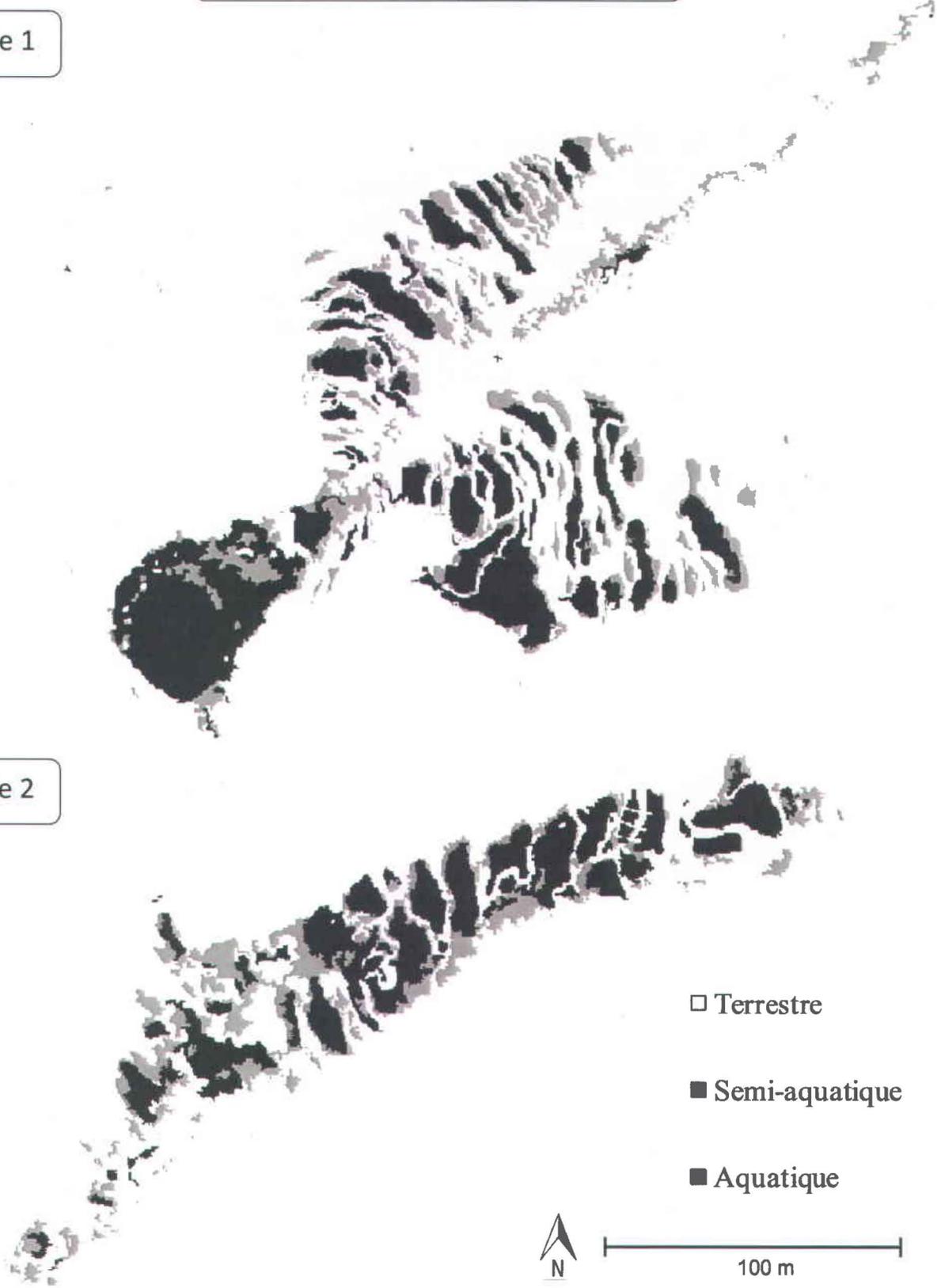


100 m

9 juin 2010

Site 1

Site 2



□ Terrestre

■ Semi-aquatique

■ Aquatique



100 m

28 juin 2010

Site 1

Pas de données car présence de nuages

Site 2



3 août 2010

Site 1

Site 2

□ Terrestre

■ Semi-aquatique

■ Aquatique

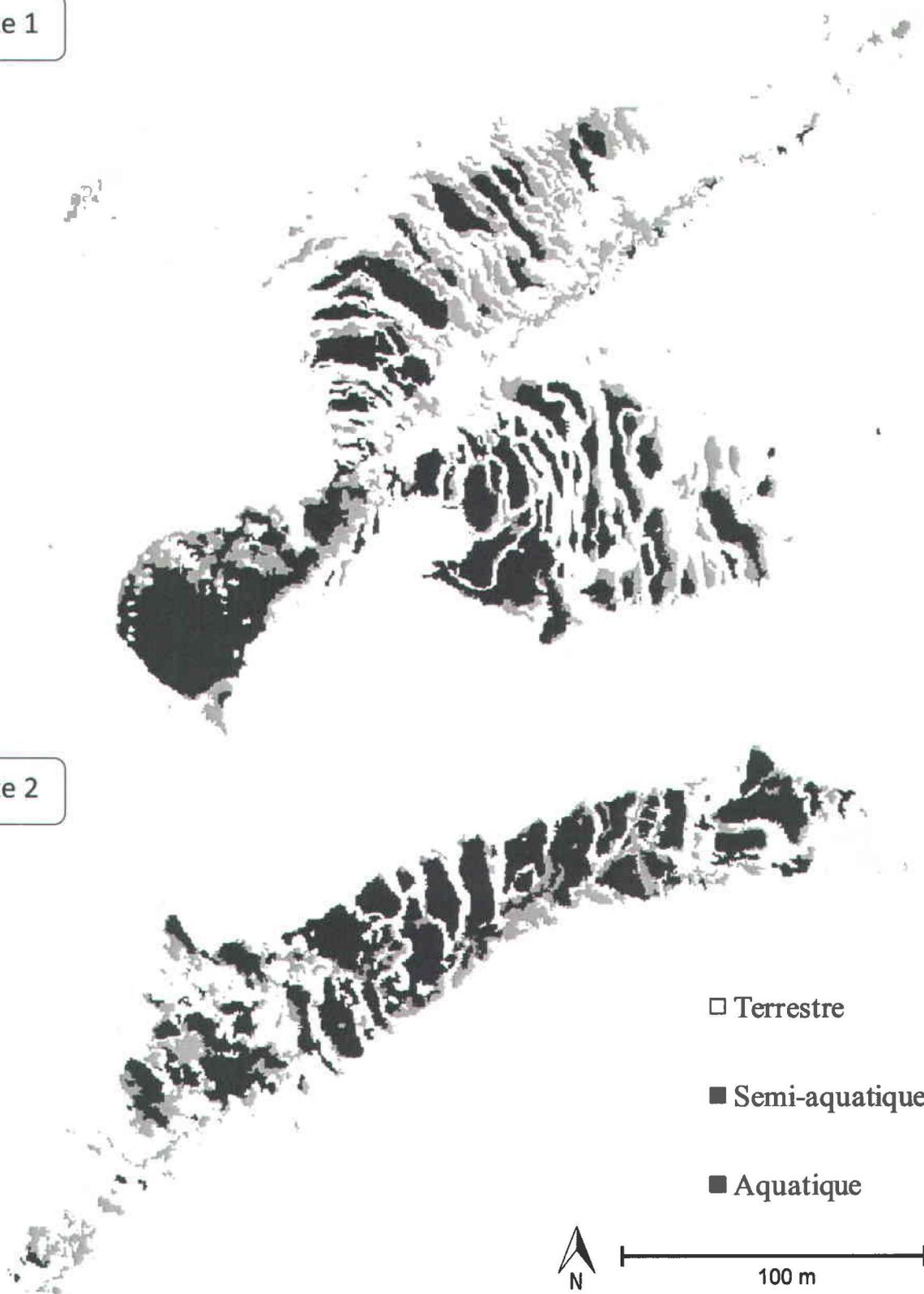


100 m

30 août 2010

Site 1

Site 2



□ Terrestre

■ Semi-aquatique

■ Aquatique



100 m