

**ÉTUDE DE LA CONNECTIVITÉ PHYSIQUE
DES TOURBIÈRES AU RÉSEAU
HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT
DE LA GRANDE RIVIÈRE À L'AIDE D'UNE
CLASSIFICATION ORIENTÉE OBJET
D'IMAGES LANDSAT-7 ETM+**

Rapport de recherche No R927

Mars 2007

**ÉTUDE DE LA CONNECTIVITÉ PHYSIQUE DES TOURBIÈRES AU
RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA GRANDE
RIVIÈRE À L'AIDE D'UNE CLASSIFICATION ORIENTÉE OBJET
D'IMAGES LANDSAT-7 ETM+**

Rapport de recherche

Projet CRSNG-RDC (Ouranos)
Adaptation du modèle hydrologique HYDROTEL au milieu boréal québécois

par

Maria Dissanska
Monique Bernier Ph.D.
Alain N. Rousseau Ph.D. ing.
Karem Chokmani Ph.D.
Sylvain Jutras Ph.D. ing.f.

Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE
490, rue de la Couronne, Québec (Québec), G1K 9A9

Rapport de recherche No R927

ISBN 978-2-89146-539-7

Avril 2007

ISBN 978-2-89146-539-7

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	VII
LEXIQUE	IX
1. INTRODUCTION	1
1.1. HYDROLOGIE DES TOURBIÈRES	1
1.2. TÉLÉDÉTECTION	2
1.3. OBJECTIF PRINCIPAL	3
2. MATÉRIEL ET MÉTHODE	5
2.1. LE SECTEUR D'ÉTUDE	5
2.2. LES DONNÉES UTILISÉES	8
2.2.1. <i>Composition de la mosaïque d'image</i>	8
2.3. PRÉTRAITEMENT DES IMAGES	9
2.4. ANALYSE ORIENTÉE-OBJET DES IMAGES	12
2.4.1. <i>Segmentation</i>	12
2.4.2. <i>Classification</i>	14
2.4.2.1 Classification Niveau H.....	17
2.4.2.2 Classification Niveau B.....	17
2.4.2.3 Classification Niveau M.....	19
2.5. ÉVALUATION DES RÉSULTATS	21
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION	23
3.1. CLASSIFICATION DE LA SOUS-IMAGE DU SECTEUR LG-3	23
3.2. CLASSIFICATION DU SOUS-BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE NÉCOPASTIC	25
3.3. RÉSULTATS DE LA VALIDATION	28
3.4. CONNECTIVITÉ PHYSIQUE DES TOURBIÈRES OMBROTROPHES	37
3.5. PROBLÈMES RENCONTRÉS	40
4. CONCLUSION	41
REMERCIEMENTS	43
RÉFÉRENCES	45
ANNEXE	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Délimitation du bassin versant de La Grande rivière.....	6
Figure 2. Sous-image du secteur LG-3.....	7
Figure 3. Sous-image du sous-bassin versant de la rivière Nécopastic.....	7
Figure 4. Mosaïque d'images Landsat-7 ETM+ couvrant le secteur d'étude.....	8
Figure 5. Composée couleur TCP de la sous-image du secteur LG-3.....	10
Figure 6. Composée couleur « Tasseled Cap » de la sous-image du secteur LG-3.....	11
Figure 7. Voisinage diagonal du pixel. (Tiré de « eCognition User's Guide »).....	13
Figure 8. Paramètres de segmentation du Niveau 3 (level 3) et du Niveau 1 (level 1).....	14
Figure 9. Description de la classe « Niveau B ».....	16
Figure 10. Schéma de la méthode.....	16
Figure 11. Localisation des sites d'entraînement de la sous-image du secteur LG-3.....	18
Figure 12. Description de la classe « Fen » du niveau plus fin (Niveau B).....	19
Figure 13. Description typique des classes au Niveau M.....	20
Figure 14. La description de la classe « Bog connecté ».....	20
Figure 15. Classification orientée-objet de la sous-image du secteur LG-3 (Niveau H).....	23
Figure 16. Classification orientée-objet de la sous-image du secteur LG-3 (Niveau M).....	24
Figure 17. Classification orientée-objet de la zone A (sous-image du secteur LG-3; Niveau M).....	24
Figure 18. Classification orientée-objet de la zone B (sous-image du secteur LG-3; Niveau M).....	25
Figure 19. Classification orientée-objet du sous-bassin de la rivière Nécopastic (Niveau H).....	26
Figure 20. Classification orientée-objet du sous-bassin de la rivière Nécopastic (Niveau M).....	26
Figure 21. Classification orientée-objet du sous-bassin de la rivière Nécopastic (Groupes d'occupation du sol).....	27
Figure 22. La distribution des sites d'entraînement pour les classes « Chenal/Fen riverain » et « Forêt_régénération ».....	27
Figure 23. Dans eCognition, le rapport Longueur/Largeur est approximé en utilisant une boîte enveloppe.....	28
Figure 24. Espace spectral 2D.....	30
Figure 25. Les valeurs moyennes des fonctions d'appartenance pour les classes du Niveau B.....	31
Figure 26. Résultats des classifications par les approches « orientée-objet » et « par pixel » sur le sous-bassin versant de la rivière Nécopastic.....	32
Figure 27. Zones faiblement minérotrophes (M - zones en rose-rouge) sur la pente des tourbières ombrotrophes (TO - zones en vert-gris pâle).....	37
Figure 28. Photos et images QuickBird (A – écoulement de surface, B – chenal/fen riverain).....	38
Figure 29. Sites potentiels de connectivité physique.....	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Liste des images Landsat-7 ETM+ utilisées.....	8
Tableau 2. Caractéristiques du capteur Landsat-7 ETM+.....	9
Tableau 3. Nombre de sites d'entraînement choisis pour chaque classe au Niveau B.....	18
Tableau 4. Matrice de confusion – Niveau M.....	29
Tableau 5. Comparaison des superficies des classes thématiques obtenues par l'approche « orientée-objet » avec celles de l'approche « par pixel » effectuée par Gauthier <i>et al.</i> 2006 de la région du bassin versant de la rivière Nécopastic.....	33
Tableau 6. Matrice de coïncidence - présente la répartition des classes de Gauthier <i>et al.</i> , (2006) (en pourcentage de tous les pixels occupés par la classe correspondante) dans les classes de cette étude et vice-versa.....	34

RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude était d'évaluer la connectivité physique des tourbières boréales au réseau hydrographique afin de mieux comprendre le cycle hydrologique du bassin versant de La Grande rivière et par conséquent de mieux anticiper leur apport aux réservoirs hydroélectriques. Ce rapport émane d'un mini-projet réalisé dans le cadre des études de troisième cycle de Maria Dissanska et il contribue au projet « Adaptation du modèle hydrologique distribué HYDROTEL au milieu boréal québécois », dont le titulaire est Alain N. Rousseau. Un des objectifs de ce projet est de mieux comprendre le rôle des zones humides dans le cycle hydrologique et d'intégrer ces connaissances au modèle HYDROTEL dans le cadre d'une application en milieu boréal (49e au 55e parallèle). Dans le cadre de la réalisation de cette étude, l'accent a porté sur la détermination de l'occupation du sol à partir d'images Landsat-7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) et plus particulièrement l'identification des tourbières minérotrophes et des tourbières ombrotrophes à l'aide de l'analyse d'images satellites multispectrales. Afin de classifier les images et d'établir la connectivité des tourbières boréales au réseau hydrographique, une approche orientée objet a été appliquée où les caractéristiques spectrales de chaque type d'occupation du sol ainsi que les caractéristiques contextuelles (comme la proximité, l'adjacence, *etc.*) ont été exploitées. Les résultats de cette étude pourraient être mis à profits dans la définition des unités de calcul (dénommé UHRH, pour unité hydrologique relativement homogène) d'HYDROTEL. Rappelons que l'élaboration des UHRH se fait à l'aide du système d'information géographique PHYSITEL.

LEXIQUE

B :	Bande spectrale bleue;
B/IV/IH :	« Brilliance /« Indice de la verdure »/ «Indice de l'humidité »;
CASI :	Compact Airborne Spectrographic Imager;
CIR :	Pellicule couleur infrarouge;
CP :	Composante Principale;
ETM+ :	Enhanced Thematic Mapper Plus (Capteur à bord du satellite LANDSAT-7);
FT :	Forêt sur tourbe;
HYDROTEL :	Modèle hydrologique distribué;
IKONOS :	Le satellite Ikonos, lancé en septembre 1999, acquiert des images noir et blanc à 1 m de résolution et des images couleurs (4 bandes) à 4 m de résolution;
LCC :	Projection Conique Conforme de Lambert;
LG :	Région du réservoir hydroélectrique LaGrande-1, -2 ou 3;
M :	Zone minérotrophe;
MIR :	Bande spectrale moyenne infrarouge;
MSP :	Image multispectrale;
NDVI :	Normalized Difference Vegetation Index (indice de végétation par différence normalisée);
PIR :	Bande spectrale proche infrarouge;
PM :	Partie minérotrophe dans les limites d'une tourbière ombrotrophe;
PHYSITEL :	Système d'information géographique pour la modélisation hydrologique distribuée par sous-bassin versant
QuickBird :	Satellite de DigitalGlobe qui offre la résolution la plus élevée actuellement disponible pour les satellites commerciaux (des images multispectrales à 2,4 m de résolution et des images panchromatiques à 0,61 m de résolution);
R :	Bande spectrale rouge;
RVB :	Canaux rouge-vert-bleu;
SPOT :	Satellite Pour l'Observation de la Terre;
TA :	Tourbière arbustive ou partie d'une tourbière arbustive;
TCP :	Transformation en composantes principales;
TO :	Tourbière ombrotrophe;
UHRH :	Unité hydrologique relativement homogène;
V :	Bande spectrale verte;
VIR :	Partie visible et infrarouge du spectre électromagnétique.

1. INTRODUCTION

Malgré les tendances régionales à la hausse des précipitations moyennes annuelles, le niveau des réservoirs hydroélectriques du nord du Québec est demeuré bas au cours des deux dernières décennies (Roy, 2004). Les écarts constatés entre les observations météorologiques et la réponse hydrologique (mesurée et modélisée) soulèvent la question de l'adaptation des modèles hydrologiques actuellement utilisés aux spécificités des bassins versants nordiques. Dans le bassin versant de La Grande rivière, les tourbières représentent un type d'écosystème dominant; leur représentation est évaluée à près de 20% du territoire d'après la classification de Tarnocai *et al.* (2000). Le comportement hydrologique de ces milieux humides est complexe et il diffère grandement de celui caractérisant les sols minéraux. Toutefois, leur apport à l'alimentation des réservoirs hydroélectriques reste méconnu à l'échelle régionale. Dans le contexte des changements climatiques, il est nécessaire de mieux comprendre leur comportement hydrologique (l'écoulement et le stockage) afin d'assurer une planification adéquate de la production hydroélectrique.

1.1. Hydrologie des tourbières

Les tourbières sont des milieux humides caractérisés par une accumulation de plus de 40 cm de tourbe (Groupe de travail national sur les terres humides, 1997). L'hydrologie est le facteur le plus important qui contrôle les processus physiques, chimiques et biologiques de ces milieux. Les tourbières se divisent en deux catégories, soit les tourbières minérotrophes et les tourbières ombrotrophes, en se basant sur des caractéristiques morphologiques, hydrologiques, chimiques et des espèces végétales indicatrices (Payette et Rochefort, 2005). Les tourbières ombrotrophes sont alimentées essentiellement par les précipitations et généralement pauvres en nutriments. Elles sont caractérisées par des nappes perchées. Les tourbières minérotrophes bénéficient des précipitations et des apports du réseau de drainage et sont plus riches en nutriments. La nappe est directement influencée par la topographie.

Bullock et Acreman (2003) ont résumé certaines affirmations basées sur un grand nombre de publications (169 publications) concernant le comportement hydrologique des milieux humides. Selon leur conclusion, la plupart de ces publications affirment que les milieux humides réduisent ou retardent le ruissellement ainsi qu'ils évaporent plus que les autres types d'occupation du sol. La présence des milieux humides dans les limites d'un bassin versant influence fortement le bilan hydrique de celui-ci en augmentant l'évaporation moyenne annuelle et en réduisant le ruissellement moyen. De fortes variations saisonnières de l'écoulement caractérisent les tourbières; elles montrent généralement leurs débits maximaux au printemps tandis que l'écoulement peut être nul lors de longues périodes sans pluie et à fort ensoleillement au cours de l'été. L'étude de Todd *et al.* (2006) démontre qu'il y a une variation saisonnière dans la contribution hydrologique de 15 sous-bassins dominés par des milieux humides. Avec l'avancement de l'été, ces sous-bassins sont déconnectés hydrauliquement du réseau de drainage. Lors d'événements pluvieux isolés leur ruissellement est retenu par les chenaux de drainage éphémères où l'eau est perdue par l'évaporation ou l'infiltration. Selon Zeeb et Hemond (1998),

l'hétérogénéité du substrat peut avoir une influence importante sur la magnitude et la direction d'écoulement, sur le degré de saturation du sol, sur la réponse de tourbières aux conditions météorologiques sèches ou humides.

On présume souvent que les tourbières ombrotrophes sont issues de l'accumulation lente de matière organique dans des cuvettes imperméables où aucune issue n'est possible pour l'eau. De tels cas pourraient causer des problèmes au niveau de la modélisation hydrologique puisque ces portions de territoires, physiquement déconnectées du réseau hydrographique, ne devraient pas contribuer à l'écoulement (voir aucun lien hydraulique). Il est important ici de différencier les concepts de connectivité physique et de connectivité hydrologique ou hydraulique. Ce dernier réfère à la variation saisonnière des écoulements pouvant causer une cession des apports d'une tourbière lors de période sèche; ce phénomène est décrit comme une déconnection hydraulique. Ce concept est identifiable par des mesures de débits effectués sur le terrain ou par l'évaluation d'un bilan hydrologique et il n'en sera plus question dans ce rapport.

Tel qu'illustré par Quinton *et al.* (2003) et Hayashi *et al.* (2004), certaines tourbières, en présence de pergélisol discontinu, affectent de manière substantielle l'écoulement de surface. Leurs travaux, exécutés sur cinq petits sous-bassins de la rivière Mackenzie, démontrent que le ruissellement annuel a : (i) une corrélation positive avec la densité de drainage, la pente du bassin et le pourcentage de l'occupation du bassin par les tourbières minérotrophes et (ii) une corrélation négative avec le pourcentage du bassin couvert par des tourbières ombrotrophes. L'isolement physique de plusieurs tourbières ombrotrophes entourées de pergélisol a été noté et a contribué à la description du concept de connectivité physique.

1.2. Télédétection

Récemment, l'étude du comportement hydrique des tourbières s'est avérée d'une grande importance pour les suivis écologiques, pour la modélisation hydrologique, le bilan du carbone et ainsi que pour la modélisation de l'impact des changements climatiques sur ces milieux humides. La modélisation des processus hydrologiques des tourbières exige une bonne base de données physiographiques. Mais il est difficile et coûteux de colliger une base de données sur une zone extensive comme celle d'un bassin versant. Souvent l'étude du comportement hydrique des tourbières est faite à une échelle plus restreinte. Comme la végétation des tourbières est sensible aux conditions hydrologiques, il est supposé que sa répartition pourrait servir comme indicateur de celles-ci. Les données extensives et simultanées représentant l'état de la végétation pourraient être fournies par la télédétection. En effet, les images satellitaires sont utilisées souvent dans les études hydrologiques des tourbières. Ozesmi (2002) présente une revue des capteurs et des techniques de classification exploités le plus souvent pour les études écologiques et hydrologiques des milieux humides. Le plus souvent on utilise des images optiques et infrarouge (VIR) (Quinton *et al.* 2003), des images RADAR (Bernier *et al.*, 2003, Racine *et al.* 2005) ou une combinaison des deux (Sugumaran *et al.* 2004; Töyrä *et al.*, 2005). Certaines études portent sur l'application de la télédétection à la connectivité hydrologique des tourbières (Mouchot *et al.*, 1991; Pietroniro *et al.*, 1999, Töyrä *et al.*, 2005). En particulier, une étude de la connectivité physique des tourbières ombrotrophes du sous-bassin versant de la rivière Nécopastic a été réalisé récemment à l'INRS-ETE (Gauthier *et al.*, 2006). Des images Landsat-7 ETM+ fusionnées et ré-

échantillonnées à une résolution de 12,5 m ont été utilisées et une classification supervisée selon le maximum de vraisemblance a été appliquée. L'exactitude globale de la classification obtenue par cette étude est de 93%.

1.3. Objectif principal

Dans la suite de ces travaux sur l'analyse de la connectivité physique des tourbières au réseau hydrographique du sous-bassin versant de la rivière Nécopastic, l'objectif de la présente étude est de développer une approche orientée-objet pour la classification des images Landsat-7 ETM+ afin de cartographier les différents types de tourbières boréales et d'analyser leur connectivité physique.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Pour l'accomplissement de l'objectif de cette étude, l'accent a été mis sur les caractéristiques spectrales de chaque type d'occupation du sol d'intérêt (par exemple, les indices de la végétation tel que le NDVI ont été intégrés dans la classification) ainsi que sur les caractéristiques contextuelles (comme la proximité, l'adjacence, etc.). L'approche orientée-objet a été développée sur une sous-image du bassin versant de La Grande rivière (LG-3) à l'aide d'une méthode à trois étapes : le prétraitement des images, la classification et l'analyse des résultats. Le choix d'utiliser cette sous-image pour le développement de l'approche orientée-objet a été fait pour les raisons suivantes : d'abord, le secteur LG-3 concerné par la sous-image a été survolé à l'été 2006 par l'auteure principale en plus d'avoir été visité sur le terrain. De plus, nous disposons d'images QuickBird multispectrales et panchromatiques à très haute résolution (2,84 m et 0.61 m de résolution respectivement) qui nous ont aidés à interpréter les images LANDSAT-7 ETM+. Le développement de l'approche orientée-objet a ainsi bénéficié de la grande expertise acquise par l'auteure principale quand à la détermination des classes d'occupation. L'approche a ensuite été appliquée sur le bassin versant de la rivière Nécopastic. Les résultats obtenus ont ensuite été comparés la classification par pixel effectuée par Gauthier *et al.* (2006), ce qui constitue une évaluation de la qualité de la classification.

2.1. Le secteur d'étude

Le bassin versant de La Grande rivière longe le parallèle 53° 40' de latitude nord et draine une superficie considérable de 97 600 km² (Figure 1). La Grande rivière, d'une longueur de 893 km, prend sa source dans le plateau central du Nord-du-Québec à l'extrémité est du bassin et coule en direction ouest, pour aller se déverser dans la Baie de James¹. Le relief varie de plaine ondulée avec d'abondantes surfaces rocheuses dénudées à proximité des côtes de la Baie de James à un haut plateau compartimenté en blocs de collines, dépressions et petits plateaux ondulés vers l'est.

L'assise géologique est essentiellement constituée de tonalite et de gneiss. Les dépôts glaciaires entrecoupés d'affleurements rocheux recouvrent les collines, Les parties hautes laissent pointer de nombreux affleurements rocheux, sur lesquels s'accrochent des sables et graviers. Les sites bien drainés dans le secteur aval sont couverts surtout par des pessières à épinette noire et lichens tandis que dans le secteur amont la toundra forestière commence à prendre de l'importance. Les argiles marines et les tourbières comblent les dépressions².

Le relief relativement plat, les dépôts de surface imperméable, le climat froid et la saison de croissance courte, typiques pour cette région, créent des conditions propices au développement de tourbières. La répartition des tourbières dans la région du bassin de La Grande rivière suit un gradient d'ouest en est en fonction des conditions climatiques, topographiques et géomorphologiques (Tarnocai *et al.*, 2000). Le secteur à l'ouest est principalement occupé par

¹ (<http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/learningresources/facts/rivers.html#bay>)

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

des tourbières ombrotrophes. Plus à l'est, la couverture boisée de bogs disparaît et est remplacée par des mares concomitantes des buttes. Cette transformation est reliée à un niveau de la nappe phréatique plus élevée (bilan hydrique positif causé par une diminution de l'évapotranspiration et une augmentation des précipitations) qui limite la croissance des arbres et favorise la formation des mares (Glasser et Janssen, 1986).

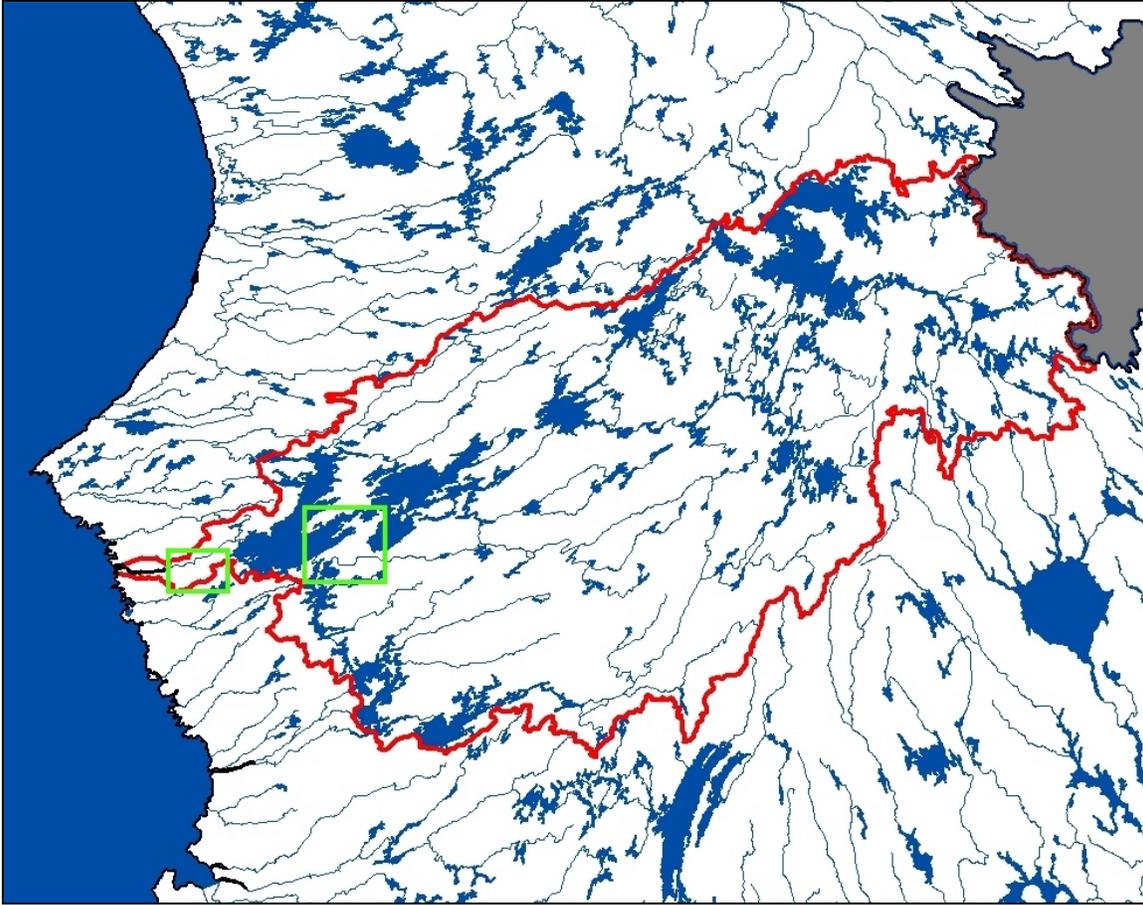


Figure 1. Délimitation du bassin versant de La Grande rivière.
(Les rectangles verts représentent les sous-images des figures 2 et 3)

Sur la sous-image englobant le secteur de la centrale hydroélectrique LG-3 (Figure 2), les tourbières en transition (ayant des caractéristiques typique des tourbières ombrotrophes et minérotrophes) sont fréquentes (Garneau, 2004), alors que le trait marquant de la partie est du bassin versant de La Grande rivière (la région du réservoir hydroélectrique La Forge-1) est une multitude de petits lacs et des tourbières minérotrophes structurées et interconnectés. Le relief plus accentué et l'écoulement permanent d'eau, enrichie en minéraux des collines voisines, traversant ces tourbières a retardé ou même empêché son développement en tourbières ombrotrophes dominées par *Sphagnum spp.* (Kuhry *et al.*, 1993). Plus à l'ouest du bassin de La Grande rivière, là où se situe le bassin versant de la rivière Nécopastic (Figure 3), les tourbières ombrotrophes dominent largement le paysage. La détection et la quantification de ces particularités du paysage sont très importantes, car elles pourraient exercer un contrôle fort sur le régime hydrologique (Pietroniro *et al.* 2005).

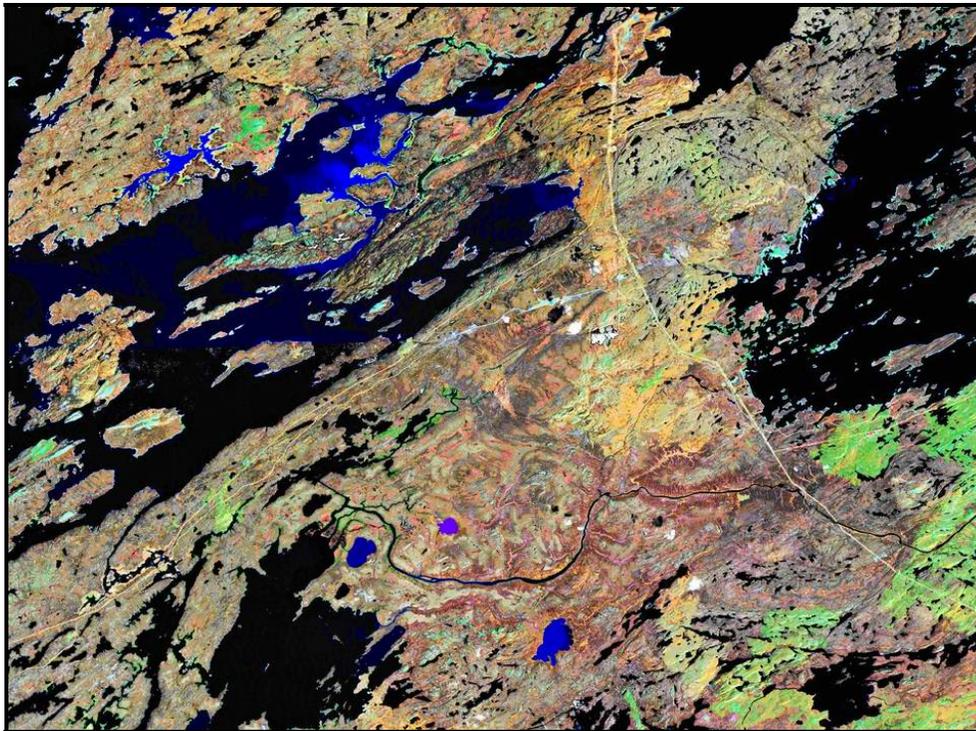


Figure 2. Sous-image du secteur LG-3
(Source : Landsat-7 ETM+; composée couleur RVB – PIR/MIR/V).

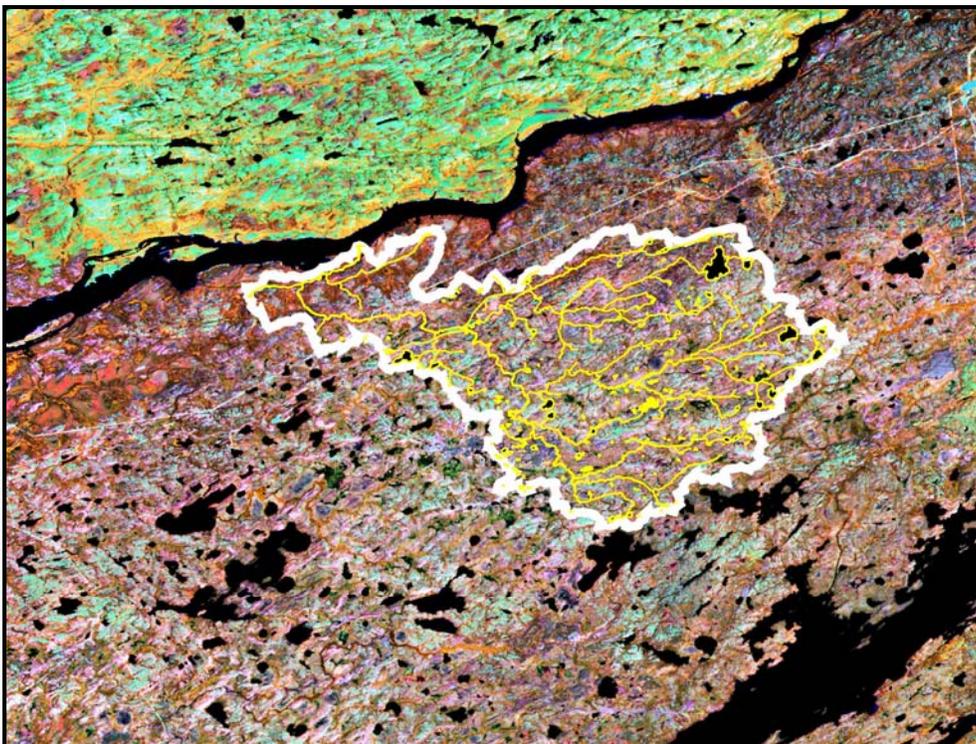


Figure 3. Sous-image du sous-bassin versant de la rivière Nécopastic
(Source : Landsat-7 ETM+; composée couleur RVB – PIR/MIR/V).

2.2. Les données utilisées

2.2.1. Composition de la mosaïque d'image

Pour la réalisation de cette étude, des images Landsat-7 ETM+ ont été utilisées (Tableau 1) afin de construire une mosaïque complète de la partie aval du bassin versant de La Grande rivière (Figure 4). Les deux sous-images utilisées dans le cadre de cette étude, soit celle du secteur LG-3 pour le développement de l'approche orientée-objet et celle du sous-bassin de la rivière Nécopastic, ont été prises à même la mosaïque d'image. L'avantage de ce type d'images est leur disponibilité, leur relativement grande couverture (183 km x 170 km) et l'ajout d'une bande panchromatique (résolution 15 m). La bande thermique n'a pas été utilisée à cause de sa faible résolution spatiale (60 m). Les images choisies ont été acquises durant la période correspondant au développement de la végétation et quand le niveau de nappe phréatique est supposé être au plus bas (juillet - août). Le tableau 2 présente les principales caractéristiques du capteur utilisé.

Tableau 1. Liste des images Landsat-7 ETM+ utilisées.

Ligne d'orbite /rangée	Date d'acquisition	Centre de scène	Couverture nuageuse (%)
18/22	20 août 2000; 15:51:24 GMT	54°30'00'' N; 75°31'44'' O	0
18/23	20 août 2000; 15:51:48 GMT	53°06'00'' N; 76°12'47'' O	10
19/22	29 juillet 2001; 15:55:45 GMT	54°30'00'' N; 77°05'42'' O	0
19/23	27 août 2000; 15:57:54 GMT	53°06'00'' N; 77°45'45'' O	20

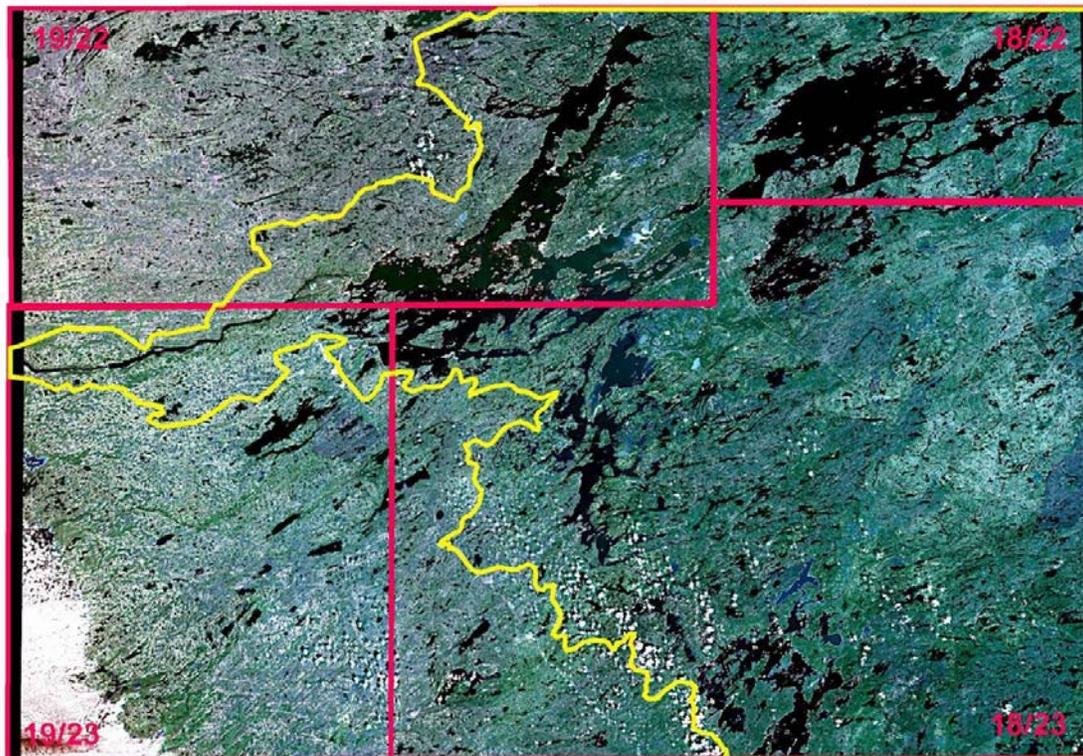


Figure 4. Mosaïque d'images Landsat-7 ETM+ couvrant le secteur d'étude.
(Composée couleur RVB – PIR/MIR/V)

Tableau 2. Caractéristiques du capteur Landsat-7 ETM+.

N° de bande Landsat 7	Emplacement spectral	Longueur d'onde [μm]	Résolution (Dimension du pixel en m)
1	Bleu-vert	0,450 – 0,515	30
2	Vert	0,525 – 0,605	30
3	Rouge	0,630 – 0,690	30
4	Infrarouge (PIR)	0,750 – 0,900	30
5	Infrarouge moyen I (MIR)	1,550 – 1,750	30
6	Infrarouge thermique	10,40 – 12,50	60
7	Infrarouge moyen II	2,090 – 2,350	30
8	Panchromatique	0,520 – 0,900	15

2.3. Prétraitement des images

Les images 18/22, 18/23, 19/22 ont été téléchargées de la base de données GéoGratis (Tableau 1). Elles sont orthorectifiées et en projection Lambert Conformal Conic (LCC). L'image 19/23 du 27 août 2000 a été orthorectifiée par « Géolocation ». Comme elle était en projection UTM et avait la résolution 25 m pour les bandes multispectrales et 12,5 m pour la bande panchromatique, nous l'avons reprojétée en LCC et aux résolutions respectives de 30 m pour MSP et de 15 m pour la bande panchromatique.

Le signal lumineux mesuré par le capteur satellitaire est toujours transformé par l'atmosphère terrestre. Afin d'éliminer les effets de l'atmosphère et de l'illumination solaire, les images ont été corrigées en appliquant l'algorithme ATCOR2. Ce traitement tient compte du climat régional, de l'altitude, de l'heure et de la date de prise d'image et il transforme les valeurs numériques de niveau de gris en réflectance de la surface. La réflectance est un paramètre caractéristique pour chaque cible et cette correction nous permet de créer une mosaïque d'images prises à des dates différentes, et de développer une méthode robuste et transférable. Une mosaïque de quatre images multispectrales, préparée par Karem Chokmani, a été utilisée. Dans le cadre de ce projet, une mosaïque de bandes panchromatiques des mêmes images a été préparée et ajustée afin d'améliorer la détection des limites réels des objets sur la terre et par conséquent, la précision globale de la classification des images.

Après la correction atmosphérique, une transformation en composantes principales (TCP) a été tentée. L'objectif de cette transformation est de produire une composition colorée combinant les trois premières composantes principales afin de faciliter le choix des sites d'entraînement et de diminuer les bandes spectrales utilisées. La TCP consiste à trouver un nouveau système d'axes porteur d'informations spectrales non corrélées entre elles. La direction des axes du nouveau système est donnée par les variances maximales des luminances observées (Caloz et Colet, 2001). Chaque nouvel axe est une combinaison linéaire des axes initiaux. Généralement, les trois premières composantes d'une TCP appliquée sur une image ETM+ de Landsat contiennent 96 à 99% des informations présentes dans les six bandes originales. Donc, en conservant seulement les trois premières composantes principales, on aura un gain de 50% de volume de mémoire. Cette transformation a été réalisée à l'aide du logiciel PCI Geomatica (procédure PCA).

Cependant, la TCP n'a pas a priori un sens thématique (interprétation dans un sens biophysique décrivant les états de la végétation et du sol) puisque seule la maximisation de la variance guide la construction du système. Alors, une transformation « Tasseled Cap » (Crist *et al.*, 1986) a été également effectuée (PCI Geomatica, procédure TASSEL), où les directions des nouveaux axes correspondent à « Brillance », « Indice de la verdure » et « Indice de l'humidité ». La « Brillance » est une mesure de la réflectance totale, « l'indice de la verdure » exprime le contraste entre la réflectance dans PIR et la partie visible du spectre électromagnétique et donc est une mesure de la présence et la densité de la végétation photosynthétiquement active (verte). « L'indice de l'humidité », c'est le contraste entre la réflectance dans le MIR et le PIR et représente l'humidité du sol. Les composés couleur TCP et « Tasseled Cap » sur une partie de la région LG-3 sont présentés aux figures 5 et 6.

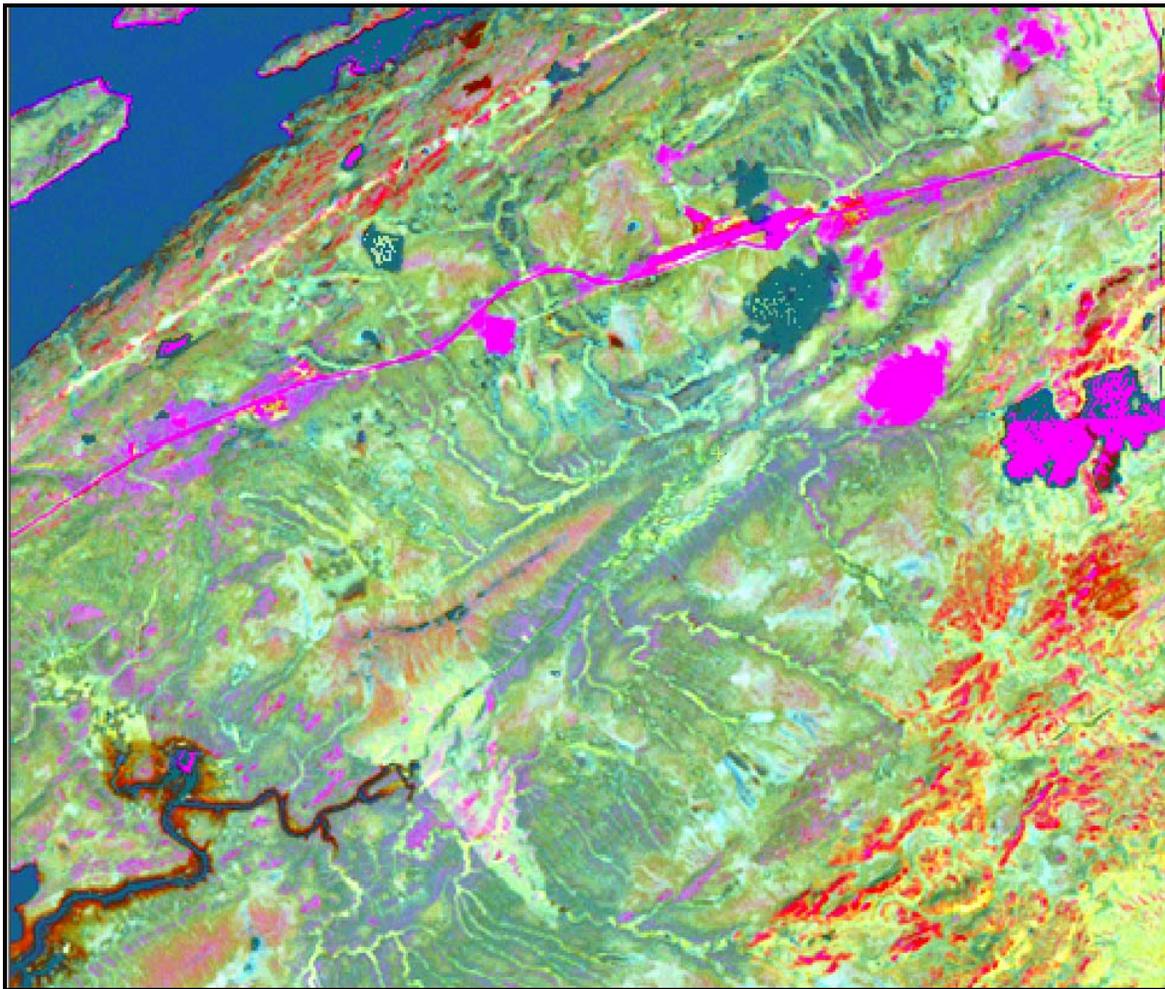


Figure 5. Composée couleur TCP de la sous-image du secteur LG-3 (Canaux RVB – CP1/CP2/CP3).

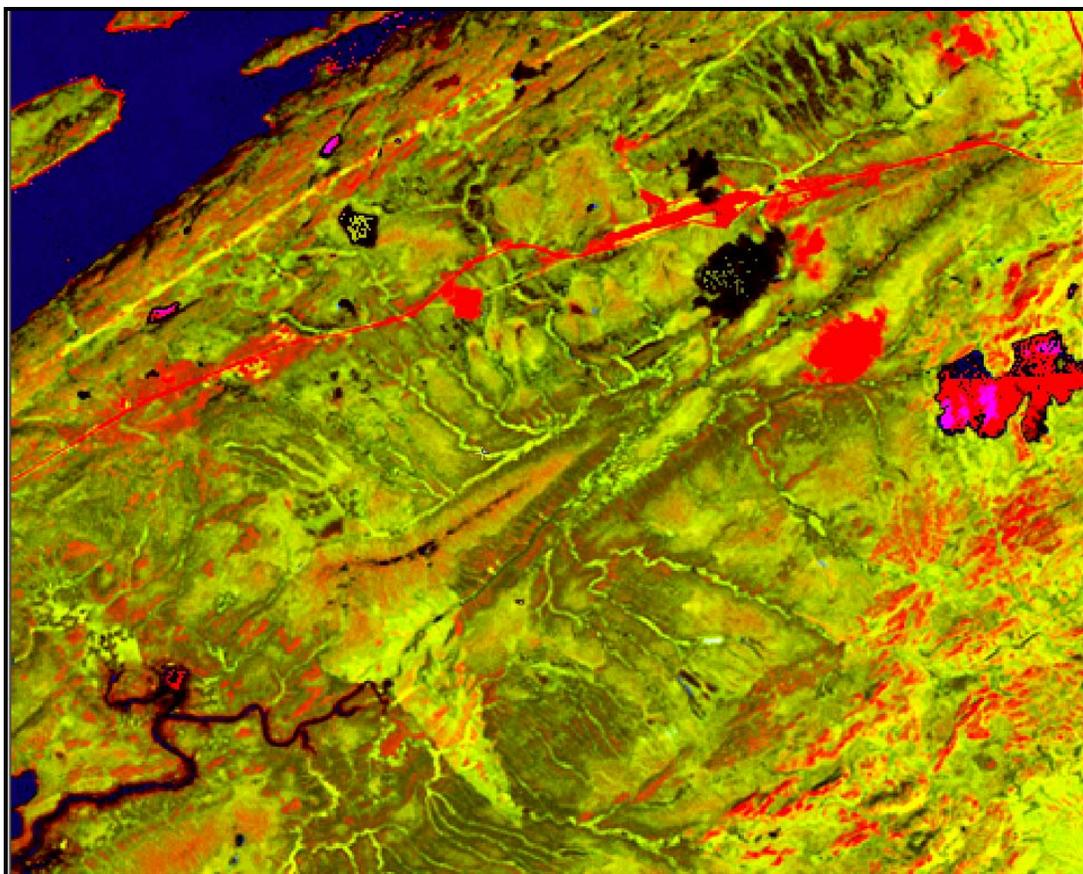


Figure 6. Composée couleur « Tasseled Cap » de la sous-image du secteur LG-3 (Canaux RVB – B/IV/IH).

Comme la distinction et l'interprétation de certaines classes étaient difficiles à partir de ces images composées, nous avons poursuivi le traitement en utilisant toutes les bandes spectrales et certains indices (calculés à partir d'une combinaison simple ou complexe de bandes spectrales). Les végétaux présentent une faible réflectance dans le bleu (B), la réflectance dans le vert (V) est plus élevée et traduit des propriétés discriminantes pour les végétaux, mais ces deux bandes sont plus influencées par les conditions atmosphériques. La végétation absorbe fortement le rayonnement solaire en bande rouge (R) et, au contraire, dans la bande PIR elle offre une réflectance élevée. Les propriétés spectrales des mousses brunes, des Sphaignes et du lichen diffèrent de celles de végétaux vasculaires. À cause de leur contenu élevé en eau, la réflectance dans le PIR et le MIR des mousses est en général plus faible que celle des plantes vasculaires. Dans ces bandes, la réflectance du lichen est plus élevée que celle des mousses brunes (typique pour les tourbières minérotrophes), des Sphaignes, même des plantes vasculaires à cause de son tissu sec (Bubier *et al.*, 1997). Le rayonnement dans le PIR est complètement absorbé par l'eau, ce qui permet de bien délimiter les bassins d'eau. La bande MIR du capteur ETM+ est très sensible à l'humidité des sols et au contenu en eau des végétaux. De plus, dans le MIR, les roches ont une réflectance élevée. Les combinaisons de différentes bandes spectrales, appelées « indices », offrent donc de bonnes propriétés discriminantes des objets au sol.

2.4. Analyse orientée-objet des images

L'information de base de l'image numérique est une luminance spectrale, donc le problème est de produire des classes spectrales relativement homogènes susceptibles de s'interpréter en classes thématiques. Pour être capable d'étudier la connectivité des tourbières, il est nécessaire de chercher des caractéristiques supplémentaires à la réflectance et d'exploiter le deuxième niveau d'information contenu dans une image, soit le contexte spatial du pixel. Alors, notre objectif exige une autre approche de classification que celle « par pixel » et nous faisons appel à une classification orientée-objet, implantée dans le logiciel eCognition, qui tient compte non seulement du ton (réflectance) mais aussi d'autres informations spatiales comme le voisinage des objets sur l'image, la texture, etc. La différence principale par rapport au traitement d'image traditionnelle est que l'unité de base de l'analyse orientée objet est un groupe de pixels ayant des caractéristiques spectrales semblables (« l'objet ») et non le pixel isolé. Le bénéfice de la classification orientée objet est que ceux-ci contiennent plus d'information que celle fournis par les pixels d'une image. Comme complément d'information spectrale, chaque objet contient de l'information pour sa forme, sa dimension, sa texture, ses sous-objets et le contexte des objets qui l'entourent. Les attributs spectraux et spatiaux sont utilisés pour associer l'objet à une classe spécifique. Cette approche a été utilisée avec succès pour la délimitation des milieux humides à partir des images Landsat (Hurd *et al.*, 2006), d'image SPOT 5 (Hubert-Moy *et al.*, 2006), de photos aériennes CIR (Burnett *et al.*, 2003), de Landsat-7 ETM+, photos aériennes CIR et CASI (Sugumaran *et al.* 2004), d'images à très haute résolution IKONOS (May *et al.*, 2003) ainsi pour l'étude de connectivité des systèmes naturelles (Ivits *et al.*, 2002). Les avantages de cette approche repose sur l'information supplémentaire, la classification est plus robuste, le nombre des unités à classifier est réduit (pixels versus objets) et l'effet « sel et poivre » est éliminé ou diminué selon l'échelle de segmentation choisie (Hurd *et al.*, 2006).

2.4.1. Segmentation

Le premier pas consiste à identifier les objets désirés sur l'image. Cela a été fait par une segmentation multirésolution qui est incluse dans le logiciel eCognition (Baatz et Schäpe, 2000). Le but est de diviser l'image en des objets homogènes en utilisant des paramètres comme l'échelle, la couleur, la forme, le lissage et la compacité. L'échelle est un paramètre abstrait qui détermine l'hétérogénéité maximale permise pour les objets résultants. La variation de ce paramètre influence la taille des objets – ainsi, les objets plus hétérogènes seront de plus petite taille que les objets plus homogènes. Selon les paramètres choisis, les pixels sont fusionnés dans les objets adéquats qui ont une hétérogénéité similaire. Dans eCognition, trois critères d'hétérogénéité sont calculés: la couleur (1) et les facteurs de forme, dont le lissage (2) qui poli les bords des objets et la compacité (3) qui aide à délimiter les objets plus compacts (surtout dans les zones urbaines). En général, on utilise un mélange de ces trois critères. Dans la plupart des cas, la couleur reliée à l'information spectrale est la plus importante (particulièrement pour les systèmes naturels) pour la création des objets raisonnables du point de vue de l'interprétation visuelle. Toutefois, les facteurs de forme peuvent optimiser la séparation des objets - un certain degré de « l'homogénéité » de la forme améliore la qualité des objets extraits en évitant les structures fractales de ceux-ci. La segmentation multirésolution, implantée dans le logiciel eCognition, permet une création d'objets à différente résolution (dimension) simultanément sur une même image selon les préférences spécifiques de l'utilisateur. Cette particularité de la

segmentation permet de mieux adapter la classification d'images à la diversité, à la complexité et à la structure hiérarchique des écosystèmes naturelles. La segmentation a été appliquée à deux niveaux - Niveau 3 et Niveau 1. Pour la discrimination des objets du Niveau 3, nous avons utilisé seulement les bandes multispectrales et à toutes les bandes nous avons donné des pondérations égales. Une échelle plus grosse (50) a été appliquée, la pondération donnée à la couleur est 90%, à la forme 10% et pour préciser la forme, nous avons choisis un rapport 50/50 entre la compacité et le lissage. Au Niveau 3 nous voulions délimiter les nuages, les ombres, les brûlis, les plus grands plans d'eau et les routes de la surface végétale, alors qu'au Niveau 1 nous cherchions plus de détails afin d'être capable de détecter les chenaux dont la largeur est de l'ordre du pixel. Il faut noter, que dans le même but, nous avons appliqué une segmentation où le voisinage diagonal des pixels (8 voisins) est permis (par défaut – 4 pixels), c'est-à-dire que les objets, qui ont des caractéristiques semblables avec leurs voisins du coin, seront réunis dans un seul objet (Figure 7).

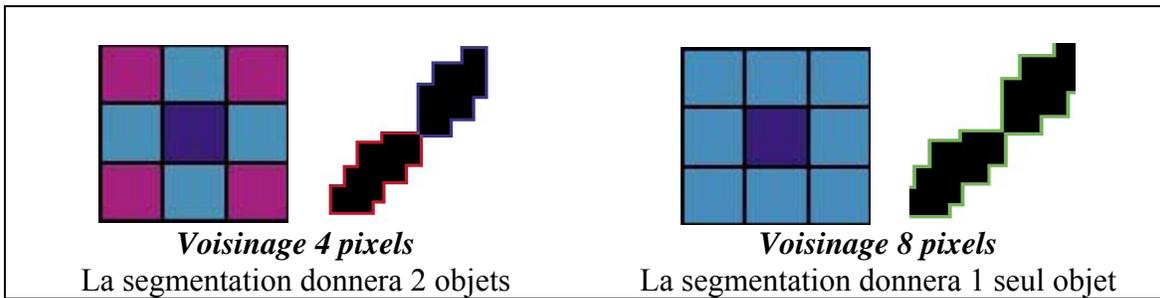


Figure 7. Voisinage diagonal du pixel. (Tiré de « eCognition User's Guide »)

Pour la segmentation du Niveau 1, nous avons utilisé toutes les bandes multispectrales ainsi que la bande panchromatique et la couche de NDVI. Une plus grande pondération (3) a été donnée à la bande PIR étant donné sa sensibilité au type de végétation vasculaire/non vasculaire. Plus la pondération assignée à une bande spectrale est importante, plus les informations de cette bande vont être utilisées durant le processus de segmentation. À ce niveau, nous avons jugé adéquate une valeur d'échelle 5, une pondération 90% pour la couleur (10% pour la forme) et 90% pour le lissage de la forme, ce qui a produit des objets très fins, qui représentent les différentes sub-unités (ex, buttes, mares) dans les écosystèmes naturelles. Le but était de détecter ces détails, car ils reflètent les conditions hydrologiques et nutritives dans les écosystèmes.

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) a été calculé pour chaque pixel à partir des bandes spectrales PIR et R des images MSP afin d'être capable d'utiliser cette information pour la segmentation, c'est-à-dire pour la création des objets. Cet indice est sensible à la végétation photosynthétiquement actives et, comme Gauthier *et al.* (2006) l'ont signalé, la végétation riveraine (classe «Fen riverain B », classe « Chenal M ») ont un NDVI très élevé. En effet, la chlorophylle (pigment vert) absorbe le rayonnement incident de la partie visible du rouge du spectre électromagnétique, alors que la structure de feuilles et la teneur en eau sont responsables des valeurs élevées de la réflectance dans le PIR.

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R}$$

ρ_{PIR} , réflectance dans le PIR

ρ_R , réflectance dans le R

En effet, il n'existe pas de règles précises pour le choix des paramètres. Comme il a été mentionné, ce choix dépend surtout des objectifs spécifiques de l'étude. Les détails sur les paramètres de segmentation choisis sont présentés à la Figure 8. La qualité de la segmentation est cruciale pour l'obtention de bons résultats de classification. Après la segmentation, les objets peuvent être classifiés.

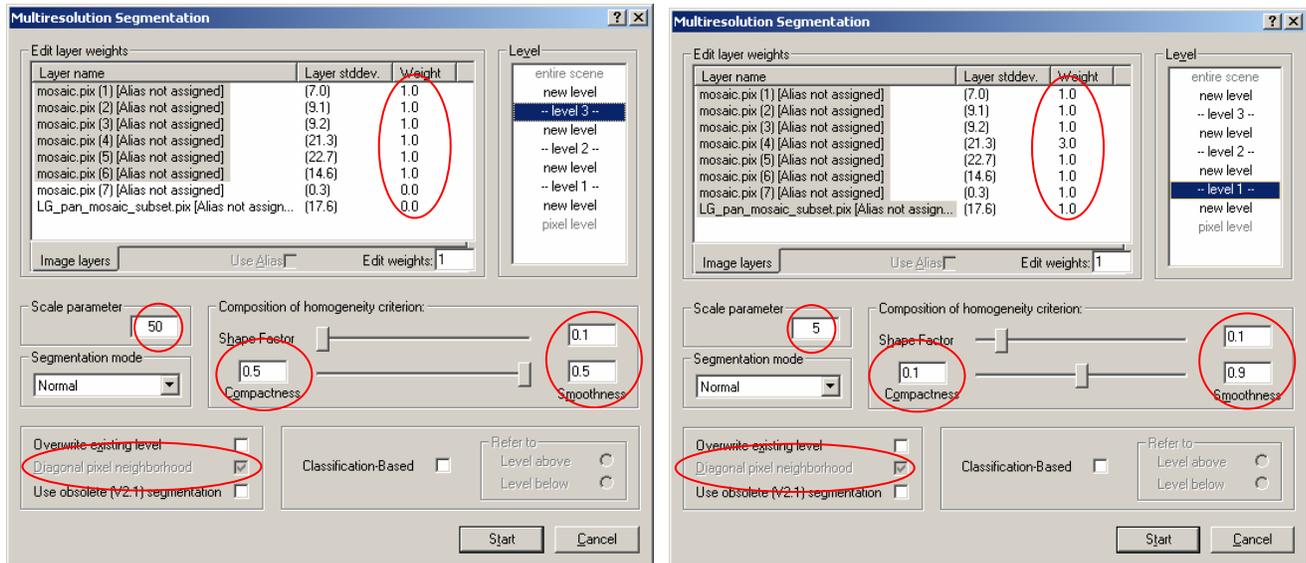


Figure 8. Paramètres de segmentation du Niveau 3 (level 3) et du Niveau 1 (level 1).

2.4.2. Classification

La classification - c'est un processus d'association d'un objet à une classe si ses caractéristiques correspondent à la description (les propriétés typiques) de la classe. Les tourbières sont des écosystèmes transitionnels entre les systèmes terrestres et aquatiques. L'identification des tourbières sur les images satellitaires n'est donc pas une tâche triviale, car elles sont caractérisées par un mélange des signatures de l'eau, de la végétation et du sol et par des frontières graduelles (changement graduel de la végétation, des conditions hydriques et du sol). Dans eCognition la classification des objets est basée sur la théorie de « logique floue ». L'idée de la logique floue est d'appliquer la perception humaine en manière mathématique dans les classificateurs. Les fonctions d'appartenance, basées sur la logique floue, estiment le degré d'association (une valeur entre 0 et 1) de certains objets aux certaines caractéristiques d'une classe donnée. Contrairement aux approches traditionnelles de classification basées sur la logique binaire, l'utilisation de la logique floue nous permet d'intégrer différentes caractéristiques dans la description des classes par des opérateurs logiques et d'estimer l'association possible des objets aux autres classes et de cette manière d'améliorer sa délimitation des autres types d'occupation du sol.

La stratégie de base est de construire une hiérarchie des classes thématiques selon les liens mutuels et sémantiques entre eux. En effet, c'est très utile pour diminuer la complexité dans la description des classes - par exemple : le groupement en une seule classe sémantique de classes aussi différentes par rapport à leurs caractéristiques. Le résultat de la classification est un réseau

des objets classifiés avec des caractéristiques et des liens horizontaux (entre les voisins) et verticaux (entre les objets des différents niveaux de l'hierarchie) bien définies.

En complément de l'information spectrale des sept bandes utilisées et le NDVI calculé, les indices suivants ont été calculés pour chaque objet (au lieu que pour chaque pixel) et ont servi pour favoriser la différenciation des classes :

- Indice de la végétation

$$RVI = \frac{\rho_{PIR}}{\rho_R}$$

ρ_{PIR} , réflectance dans le proche infrarouge
 ρ_R , réflectance dans le rouge

- Indices personnalisés

$$R_{B/R} = 100 * \frac{\rho_B}{\rho_R}$$

ρ_B , réflectance dans le bleu
 ρ_R , réflectance dans le rouge

$$R_{V/R} = 100 * \frac{\rho_V}{\rho_R}$$

ρ_V , réflectance dans le vert
 ρ_R , réflectance dans le rouge

$$R_{B/V} = 100 * \frac{\rho_B}{\rho_V}$$

ρ_B , réflectance dans le bleu
 ρ_V , réflectance dans le vert

$$R_{PIR/MIR} = 100 * \frac{\rho_{PIR}}{\rho_{MIR}}$$

ρ_{PIR} , réflectance dans le proche infrarouge
 ρ_{MIR} , réflectance dans le moyen infrarouge

$$R_{MIR/V} = 100 * \frac{\rho_{MIR}}{\rho_V}$$

ρ_{MIR} , réflectance dans le moyen infrarouge
 ρ_V , réflectance dans le vert

Il est bénéfique d'avoir de l'information additionnelle pour la classification des objets, mais il devient difficile de choisir les attributs les plus significatifs pour leur classification. Notre choix d'attributs a été assisté par les outils « Feature View » et « Feature space optimisation » intégrés dans le logiciel. De plus, pour garder la hiérarchie des classes transparente, nous avons introduit trois classes abstraites « Niveau H », « Niveau B » et « Niveau M » qui sont caractérisées seulement avec le numéro du niveau de segmentation auquel elles seront définies. Cette condition limite l'application de leurs classes-enfants seulement aux objets appartenant au niveau de segmentation correspondant. La figure 9 présente la description de ces classes. Cela va dire que

les sous-classes de Niveau H seront appliquées uniquement sur les objets du niveau de segmentation plus grossier, le Niveau 3, tandis que les classes de Niveau M sur les objets du niveau intermédiaire. Les classes de Niveau B vont fonctionner seulement sur les objets du Niveau 1. La figure 10 résume l'approche appliquée.

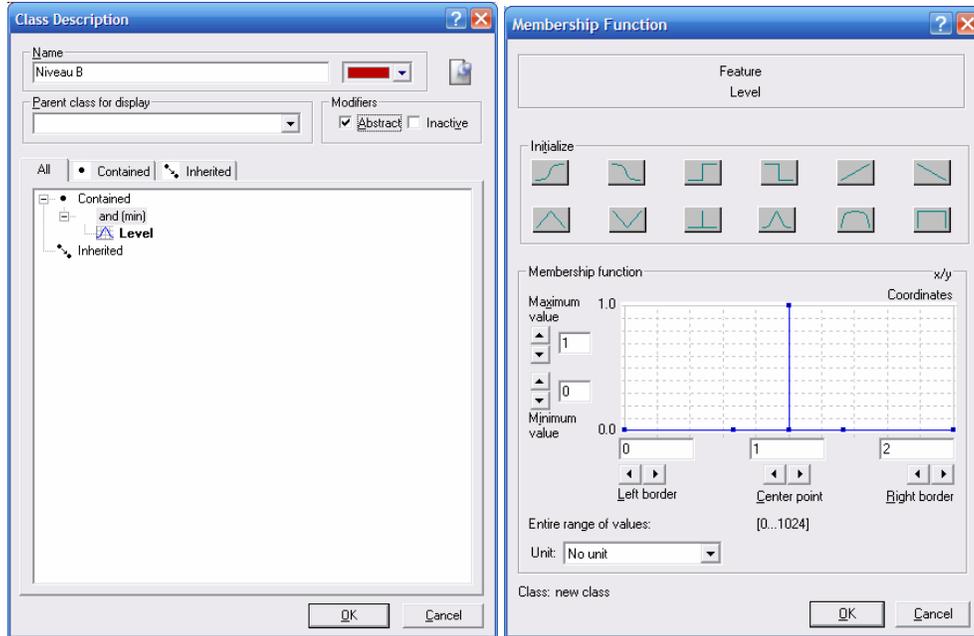


Figure 9. Description de la classe « Niveau B » qui assure la classification des objets du Niveau 1 selon les règles définies pour les classes uniquement de ce niveau. (La description des classes « Niveau H » et « Niveau M » est analogue)

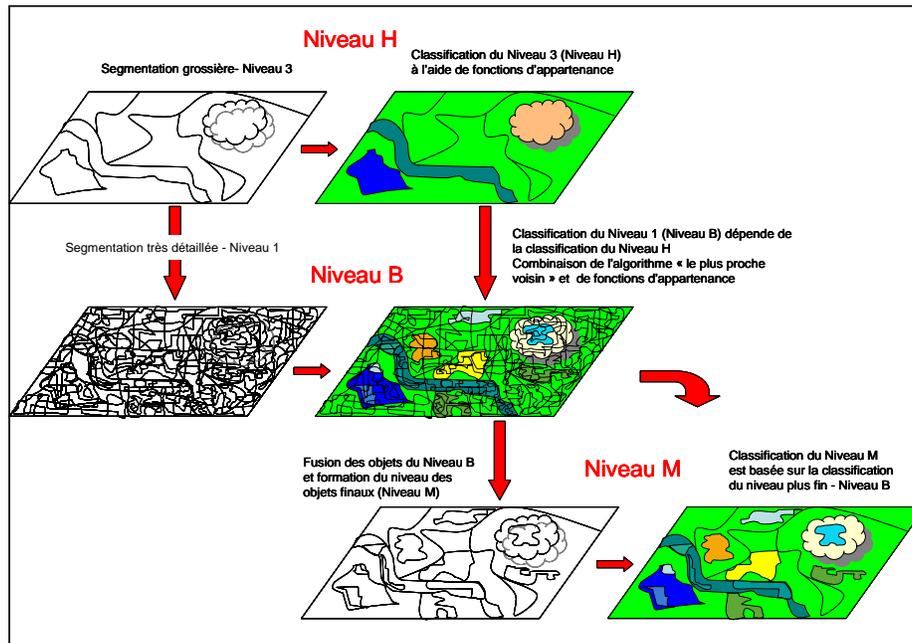


Figure 10. Schéma de la méthode

2.4.2.1 Classification Niveau H

Pour la classification des objets au Niveau H, nous avons utilisé uniquement des fonctions d'appartenance en utilisant certaines propriétés des objets qui les caractérisent mieux. Cette approche est préférable parce qu'elle permet plus de contrôle sur le processus de la classification. Au niveau H nous avons défini huit classes : Eau libre, Eau turbide, Nuage, Ombre, Route, Sable, Brûlis et Terre. L'utilisation de fonctions d'appartenance exige une connaissance *a priori* de certaines propriétés des classes. Par exemple, NDVI est négatif pour l'eau libre (lac) à cause de sa faible activité chlorophyllienne, mais il est plus élevé pour les rivières. Les résultats de la classification de ce niveau nous ont aidés à effectuer une classification plus détaillée des objets à plus petite échelle (Niveau B). En effet, la classification du Niveau H a joué un rôle de masque. Ensuite, nous avons cherché les classes végétation au Niveau B uniquement dans les objets classifiés comme Terre ou Brûlis au niveau H.

Les ombres et l'eau peu profonde (ou turbide) ont parfois des caractéristiques spectrales semblable sur les images. Malgré que les ombres soient, en effet, une atténuation du signal d'objets au dessous, le rapport des bandes spectrales est sauvegardé. Par conséquent, le NDVI est plus élevé (entre 0,1 et 0,85) pour les objets végétation sous l'ombre, lorsque le NDVI de l'eau est moins de 0,2. Toutefois, cette condition n'élimine pas toute la confusion. Pour éviter une sous- ou surestimation des objets de la classe «EAU», une condition contextuelle supplémentaire pour la classe ombre a été ajoutée - avoir des objets classifiés comme « Nuages » à une distance < 2000 m. Tous les objets qui ont une valeur d'appartenance de moins de 0,1 pour les classes « Eau libre », « Eau turbide », « Nuage », « Ombre », « Route », « Sable », « Brûlis » sont classifiés dans la classe « Terre ».

2.4.2.2. Classification Niveau B

Au Niveau B chaque classe a été délimitée en combinant des fonctions d'appartenance et des règles associées à l'algorithme « le plus proche voisin » en utilisant des sites d'entraînement. Les sites d'entraînement (généralement de petites surfaces faisant partie des objets de certaines classes ou des objets entiers), sont utilisés pour «entraîner» l'algorithme de classification à reconnaître les différentes classes en fonction de leurs propriétés spectrales ou spatiales. Pour un thème en particulier, les sites d'entraînement doivent être représentatifs de toute la variabilité du thème observé sur l'image. Selon l'algorithme « le plus proche voisin », l'objet est associé à la classe dont un de ses sites d'entraînement se trouve le plus proche de lui. À ce niveau, nous avons défini 20 classes d'occupation du sol (tableau 3).

Tableau 3. Nombre de sites d'entraînement choisis pour chaque classe au Niveau B

Classe Niveau B	Nombre de sites d'entraînement	Description des classes
Bog	656	Tourbière ombrotrophe- faible densité d'arbres, dominance de Sphaignes
Bog à mares	243	Tourbière ombrotrophe – forte densité de mares
Fen	262	Tourbière minérotrophe- dominée par une végétation herbacée
Fen à mares	184	Tourbière minérotrophe– forte densité de mares
Fen riverain	1059	Tourbière minérotrophe bordant les ruisseaux permanents ou intermittents
Tourbière arbustive	97	Tourbière ombrotrophe – moyenne densité d'arbustes et d'arbres
Forêt sur tourbe	77	Forêt sur tourbe dominée par l'épinette noire
Forêt ouverte sur minéral	272	Forêt dominée par l'épinette noire et du lichen
Forêt régénération	278	Forêt en forte croissance
Forêt dense	99	Forêt sur minéral – forte densité
Brûlis	371	Sol dénudé après le feu
Roches	141	Affleurement rocheux
Eau	216	Lacs, rivières, réservoirs
Cours d'eau	93	Petits cours d'eau dont la largeur est ≤ 15 m
Milieu humide	155	Milieus humides autres que les tourbières, souvent au bord de l'eau

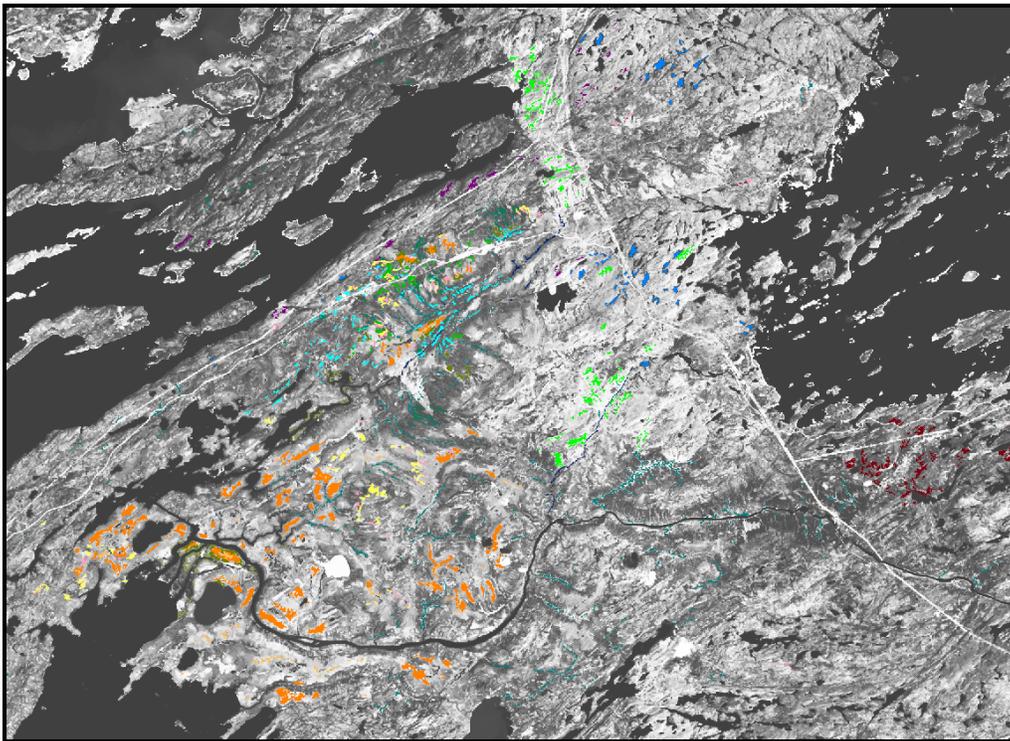


Figure 11. Localisation des sites d'entraînement de la sous-image du secteur LG-3.

La figure 12 démontre les caractéristiques jugées adéquates pour définir l'espace multidimensionnelle dans laquelle fonctionne l'algorithme « le plus proche voisin ». À ce niveau, les fonctions d'appartenance servent à lier les objets à la classification de ses super-objets au Niveau H.

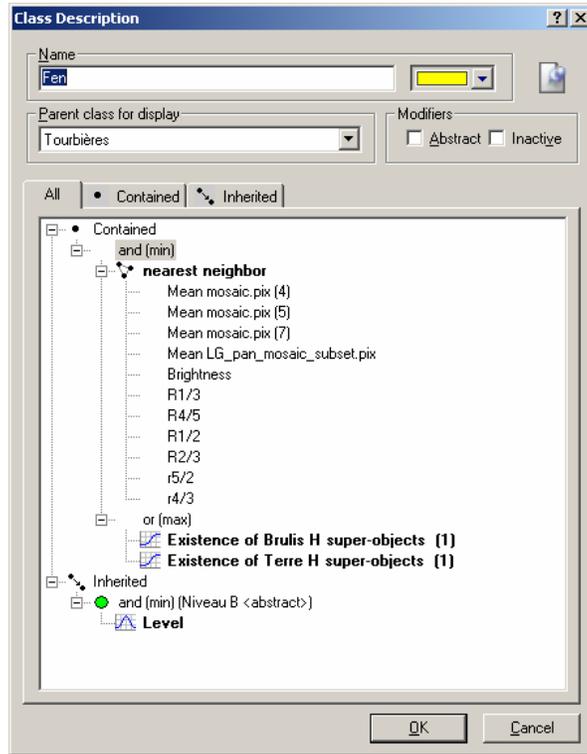


Figure 12. Description de la classe « Fen » du niveau plus fin (Niveau B).

2.4.2.3. Classification Niveau M

Ensuite, une segmentation basée sur les résultats de la classification du Niveau B a été effectuée où les objets voisins d'une même classe au Niveau B ont été fusionnés pour former des objets finaux. De cette manière, un nouveau niveau (Niveau M) des objets a été créé où la taille des objets est intermédiaire aux tailles respectives des Niveau 3 et Niveau 1. À ce niveau la classification est fondée sur les liens verticaux et horizontaux des objets. En effet, les objets sont classifiés selon sa classification au niveau inférieur, le Niveau B. La figure 11 illustre la description typique de la plupart des classes du Niveau M. Par exemple, un objet du Niveau M sera classifié comme « Fen M » si ses sous-objets au Niveau B appartiennent à la classe « Fen ».

À ce niveau aussi la connectivité des tourbières ombrotrophes a été établie. Tel que présenté à la figure 12, pour qu'un objet soit classifié comme « Bog connecté », il faut qu'il soit voisin au moins d'un objet des classes « Eau M », « Fen M », « Fen à mares M » ou « Chenal M » et que ses sous-objets soient des classes « Bog » ou « Bog à mares ». Les objets de classe « Bog isolé » ont été décrits de la même manière sauf qu'ils ne doivent pas avoir de voisins de classes mentionnées ci-dessus.

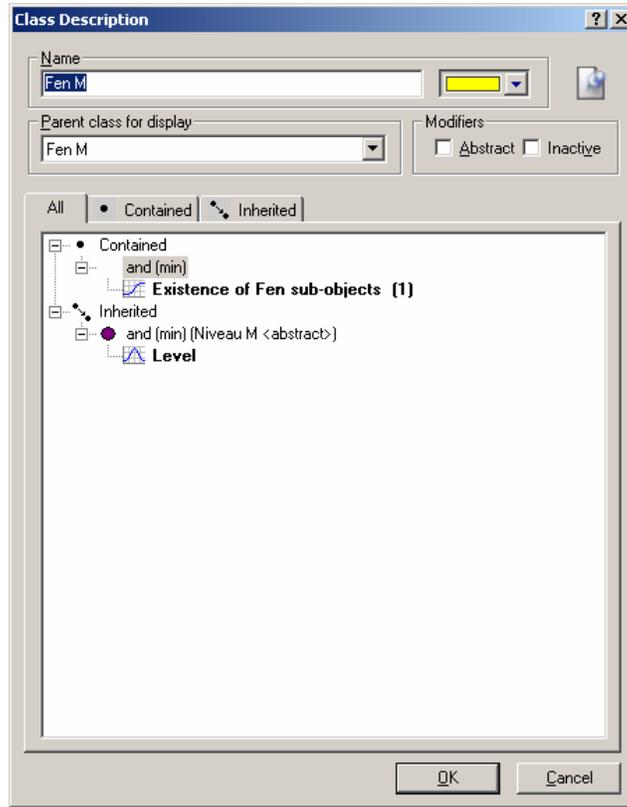


Figure 13. Description typique des classes au Niveau M

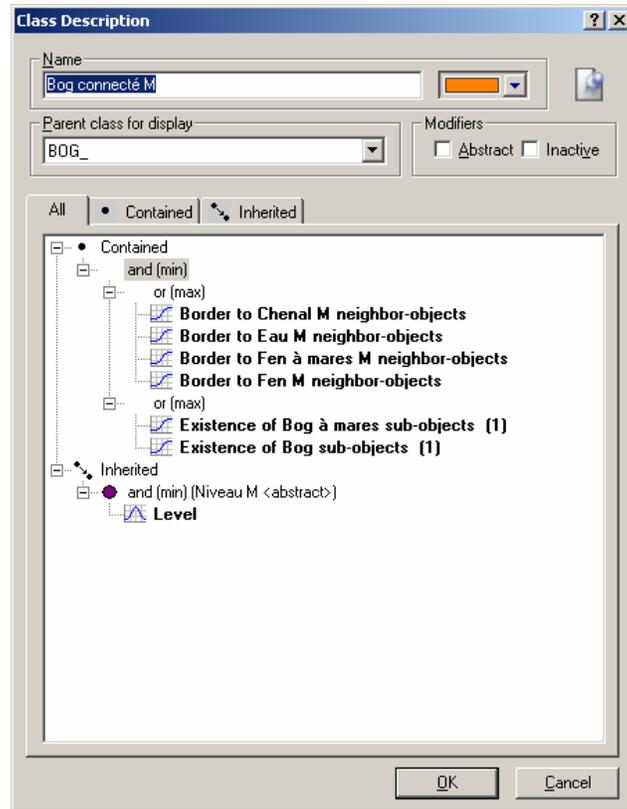


Figure 14. La description de la classe « Bog connecté »

Ici nous avons défini 15 classes :

1. Autre – groupement des classes « Nuage » et « Ombre »
2. Eau – regroupe « Eau libre B », « Eau B » et « Cours d'eau B »
3. Bog connecté
4. Bog isolé
5. Fen
6. Tourbière à mares – groupement de « Fen à mares B » et de « Bog à mares B »
7. Tourbière arbustive
8. Forêt sur tourbe
9. Forêt sur minéral
10. Forêt régénération
11. Forêt dense
12. Chenal
13. Milieu humide – autre que les bog et les fen
14. Minéral – regroupe les classes « Roche B », « Route B » et « Sable »
15. Brûlis

Il faut noter que la plupart des bogs à mares sont classifiés comme « Fen à mares ». Peut-être l'eau est dominante dans la signature de ces objets. Nous avons tenté d'éviter cette confusion en utilisant les liens mutuels entre les objets classifiés : si l'un objet classifié comme « Fen à mares » était entouré plus de 50% par des « Bog » et/ou « Bog à mares », il deviendrait « Bog à mares ». Cependant, en appliquant cette condition en partie à des fens à mares situés entre deux bogs, celles-ci seraient classifiées comme « Bog à mares ». Alors, nous avons jugé adéquat de grouper les classes « Fen à mares » et « Bog à mares » dans une seule classe « Tourbière à mares ».

2.5. Évaluation des résultats

La précision de la classification peut être affectée par de nombreux facteurs comme la qualité de la segmentation, le degré de séparabilité des classes, le choix de sites d'entraînement, *etc.* En fin du traitement des images, les résultats de la classification ont été validés à l'aide des données terrain acquises pendant la campagne de 2004 conduite par l'équipe de Mme Michelle Garneau (Garneau, 2004). La matrice de confusion a été exploitée en tant qu'outil statistique pour évaluer le taux de confiance des résultats obtenus (surtout pour les fens et bogs).

Pour évaluer la précision de la classification, les statistiques suivantes ont été calculées :

- Le taux de succès global est la proportion de tous les objets de référence classifiés correctement. Toutefois, c'est une mesure grossière car elle ne donne pas d'information sur la qualité de la classification des classes individuelles.
- La précision de producteur estime la probabilité de sites de référence d'une classe donnée d'être correctement classifiés. C'est, donc, la proportion des objets de référence d'une classe donnée correctement classifiés par rapport à tous les objets de référence de cette

classe. Cette statistique est une mesure de la qualité de la production, c'est-à-dire la correspondance entre la classification effectuée et la classification de référence.

- La précision d'utilisateur est la proportion de tous les objets de référence d'une classe donnée correctement classifiés par rapport à tous les objets classifiés comme une classe donnée. Cette mesure statistique donne de l'information à propos de la probabilité d'un objet classifié comme « Classe X » d'être vraiment de « Classe X ».

Également, une analyse de la qualité de la classification a été effectuée en utilisant les valeurs moyennes d'appartenance. Dans eCognition la classification des objets est basée sur la logique floue et les objets classifiés peuvent appartenir à plus d'une classe. La valeur d'appartenance (entre 0 et 1) est plus élevée si la différence entre les sites d'entraînement et l'objet à classifier est plus petite.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Classification de la sous-image du secteur LG-3

Les figures qui suivent représentent les résultats de la classification par l'approche orientée-objet pour la sous-image du secteur LG-3 d'après le niveau H (Figure 15) et le niveau M (Figure 16).

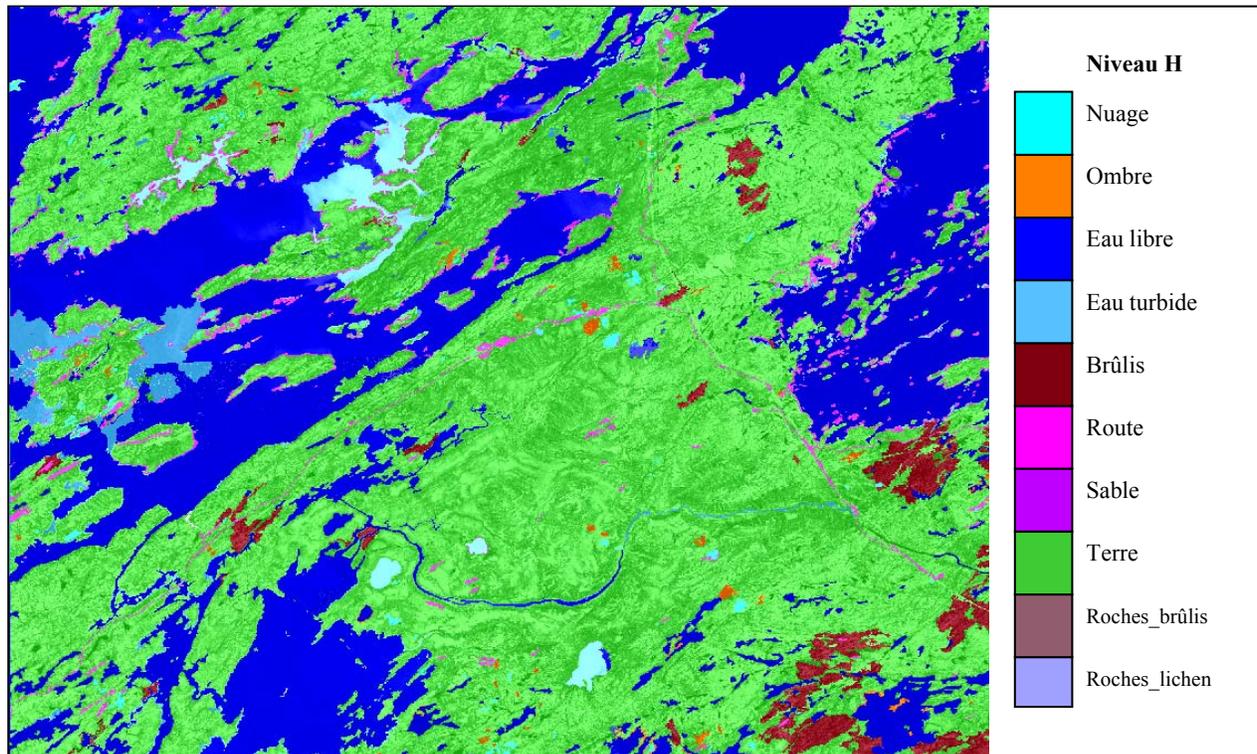


Figure 15. Classification orientée-objet de la sous-image du secteur LG-3 (Niveau H).

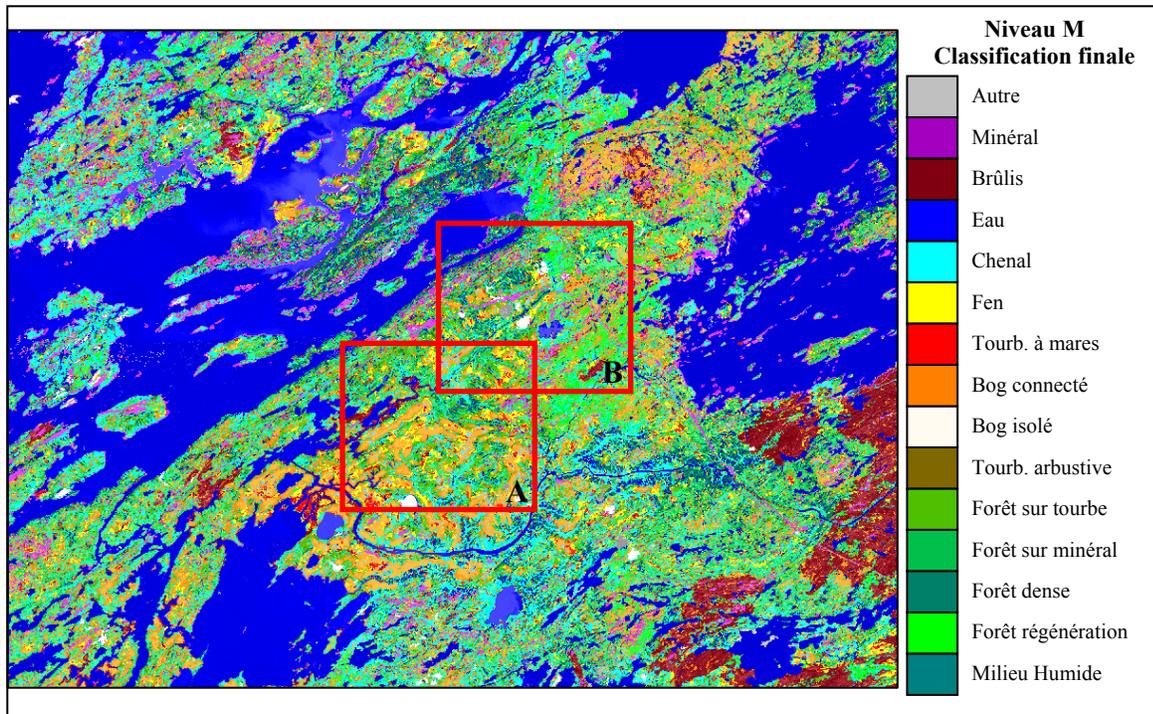


Figure 16. Classification orientée-objet de la sous-image du secteur LG-3 (Niveau M).

Les figures suivantes présentent un agrandissement des zones A (Figure 17) et B (Figure 18) apparaissant sur la figure 16.

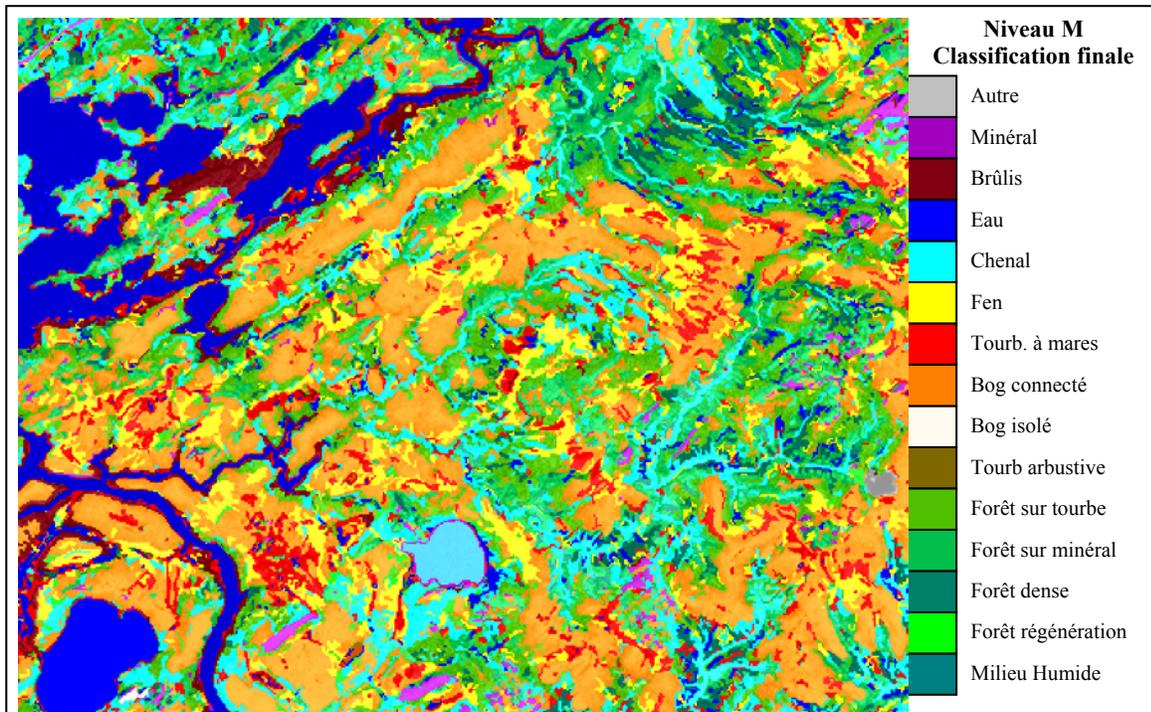


Figure 17. Classification orientée-objet de la zone A (sous-image du secteur LG-3; Niveau M).

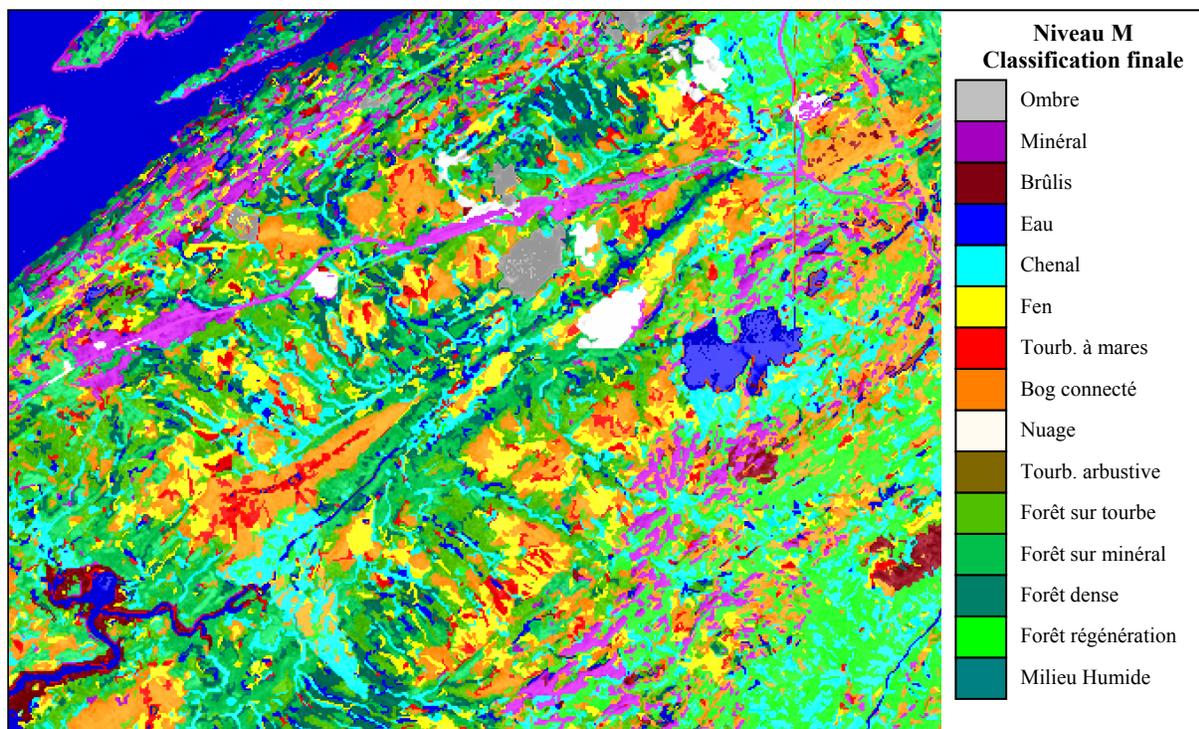


Figure 18. Classification orientée-objet de la zone B (sous-image du secteur LG-3; Niveau M).

3.2. Classification du sous-bassin versant de la rivière Nécopastic

Une inspection de la classification du Niveau H a révélé que pour certaines régions (ex. sous-bassin versant de la rivière Nécopastic) les nuages plus transparents se confondent avec les affleurements rocheux. Alors deux classes additionnelles ont été ajoutées :

- Roches_brûlis,
- Roches_lichen.

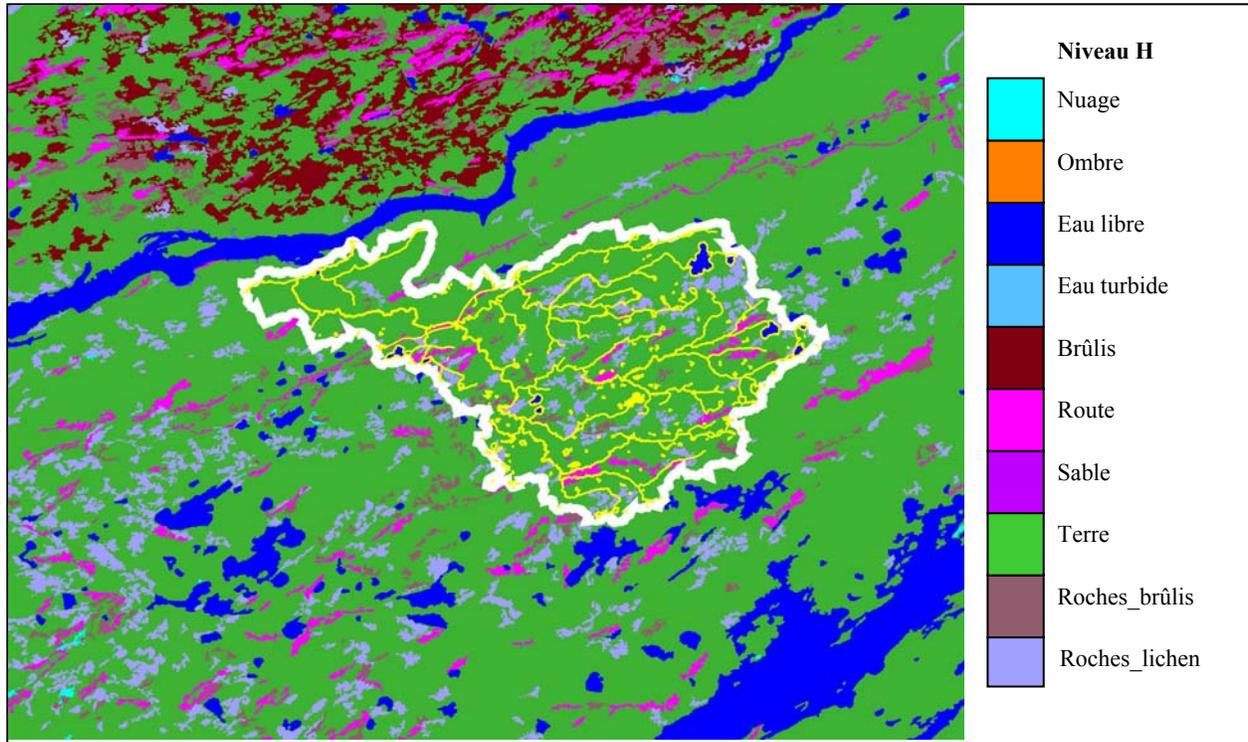


Figure 19. Classification orientée-objet du sous-bassin de la rivière Nécopastic (Niveau H).

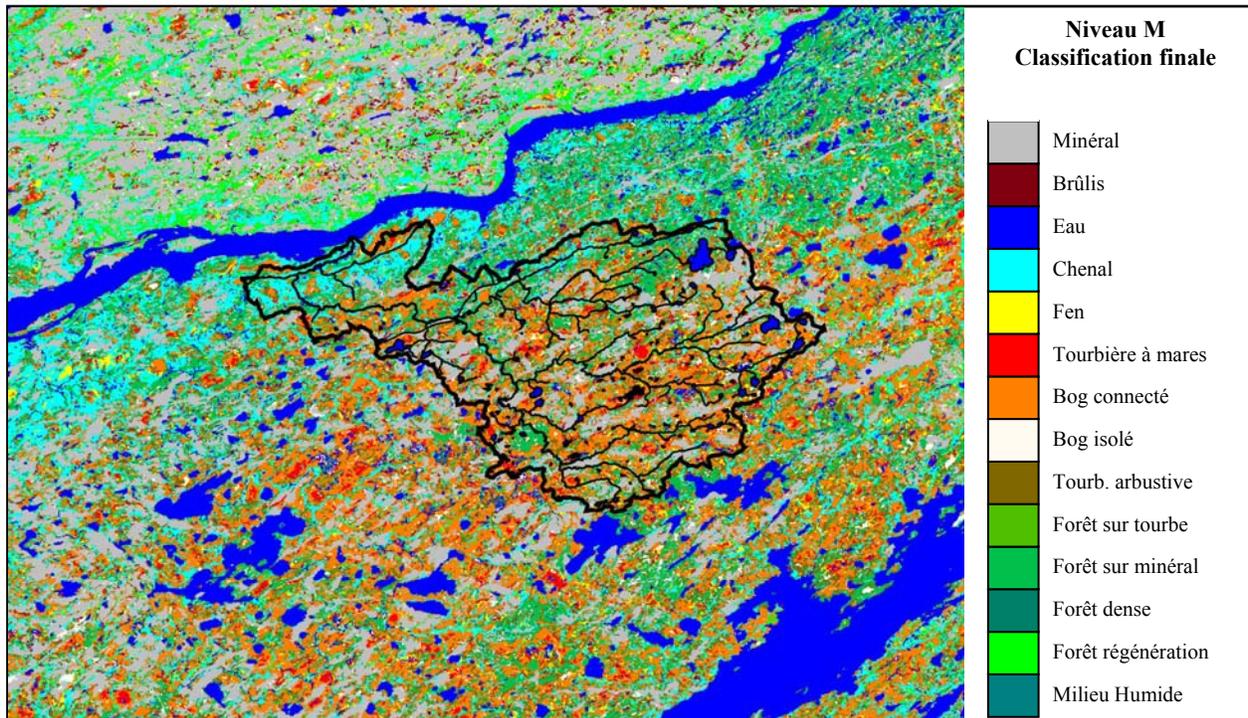


Figure 20. Classification orientée-objet du sous-bassin de la rivière Nécopastic (Niveau M).

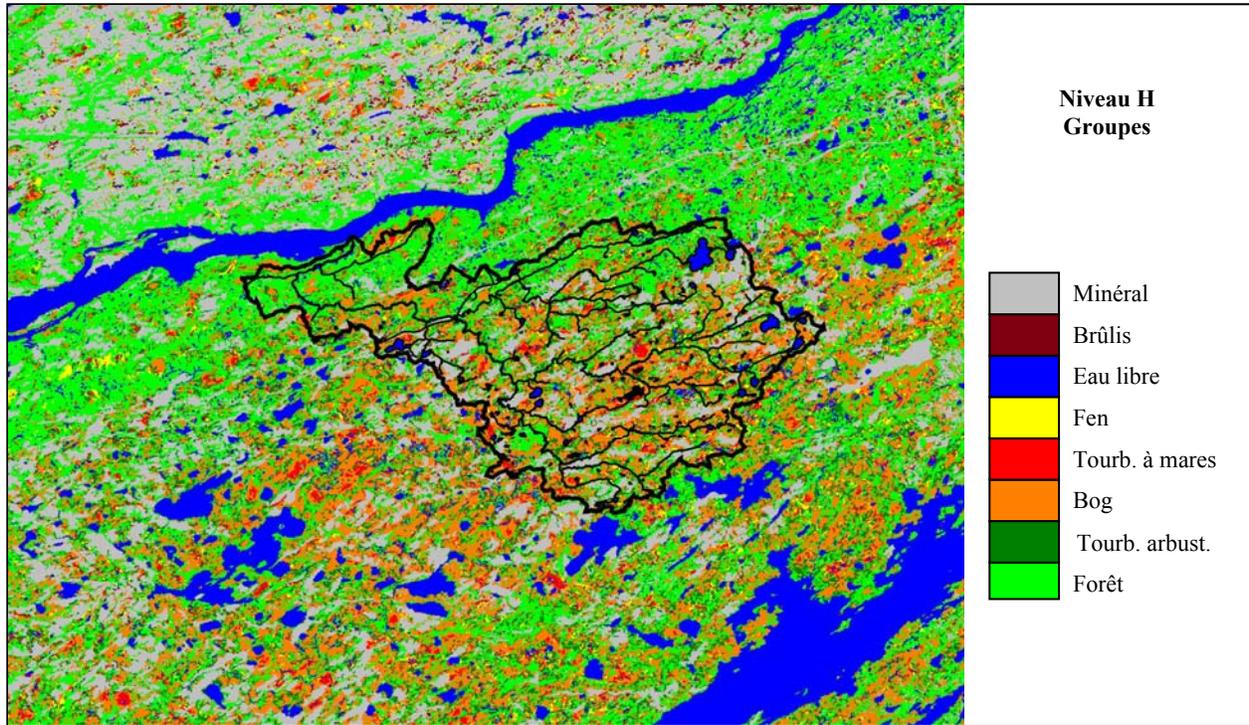


Figure 21. Classification orientée-objet du sous-bassin de la rivière Nécopastic (Groupes d'occupation du sol).

Une certaine confusion a été observée entre les classes « Chenal/Fen riverain » et « Forêt régénération » (Figure 22), peut-être à cause des espèces végétales communes (surtout des feuillus) qui les dominent.

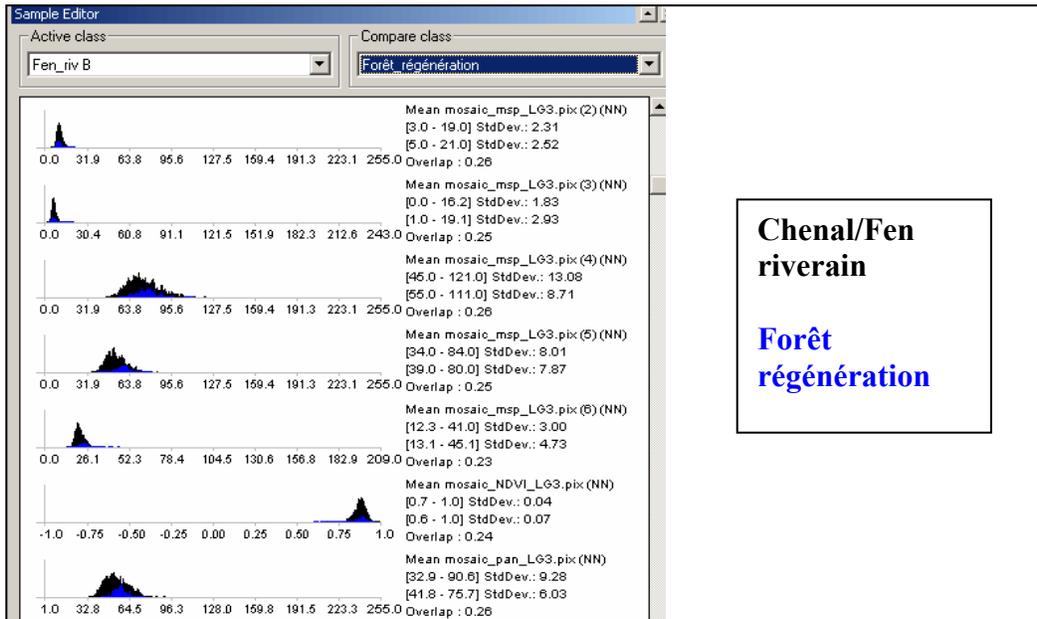


Figure 22. La distribution des sites d'entraînement pour les classes « Chenal/Fen riverain » et « Forêt régénération ». Les deux classes se confondent dans toutes les bandes spectrales.

Pour améliorer la détection des chenaux, nous avons essayé d'exploiter le rapport longueur/largeur des objets. Toutefois, cette caractéristique ne représente pas bien les propriétés des objets qui nous intéressent car dans eCognition ce rapport est approximé en utilisant une boîte enveloppe (Figure 23). Alors, une piste à explorer c'est l'estimation de ce rapport à l'aide du squelette des objets.

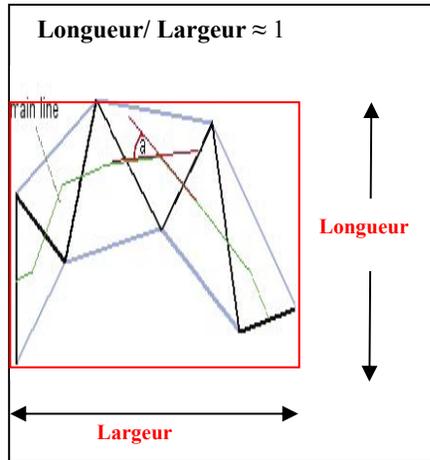


Figure 23. Dans eCognition, le rapport Longueur/Largeur est approximé en utilisant une boîte enveloppe

3.3. Résultats de la validation

En comparant la classification orientée-objet effectuée sur le sous-bassin versant de la rivière Nécopastic avec les observations terrain, on constate que la plupart des tourbières, soit bog ou fen, sont correctement classifiées. Pour la validation de la classification, 60 sites de référence ont été utilisés, dont 48 sont des tourbières (25 bog et 23 fen). Comme le montre la matrice de confusion (Tableau 4), 20 des 25 bogs sont classifiés comme bog et 2 comme fen et 21 des 23 fens sont classifiés comme fen.

3. Résultats et discussion

Tableau 4. Matrice de confusion – Niveau M

Classe d'usager Classe de référence	Bog	Fen	Brûlis	Minéral	Végétation riveraine	Forêt sur tourbe	Forêt sur minéral	Somme
Bog	20					1		21
Fen	2	21				1		24
Brûlis			1					1
Minéral	1			3				4
Végétation riveraine	2	1			1			4
Forêt sur tourbe						3		3
Forêt sur minéral		1					1	2
non classifiée							1	1
Somme	25	23	1	3	1	5	2	60
OMISSION	20%	9%	0%	0%	0%	40%	50%	
SUCCES	80%	91%	100%	100%	100%	60%	50%	

** Taux de succès global de 83%

La confusion est toutefois naturelle, en ce sens qu'elle se produit généralement entre deux classes voisines (ex. fen, bog ou forêt sur tourbe, végétation riveraine - regroupant les fens riverains et d'autres types de milieux humides. Un site de validation défini comme bog est classifié comme « Minéral » peut-être à cause d'une présence élevée de lichen à ce site. Ces dernières affirmations sont en accord avec ce qui est observé sur le diagramme 2D de l'espace spectrale (Figure 24).

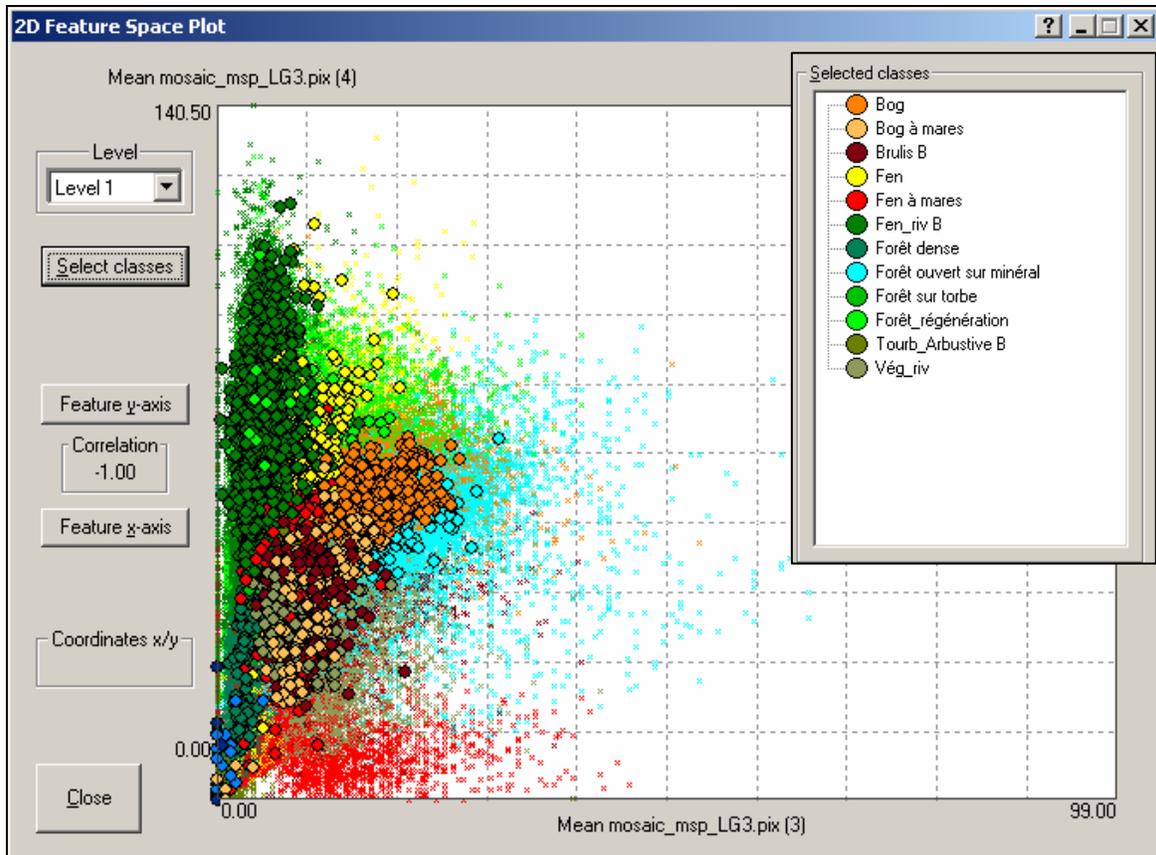


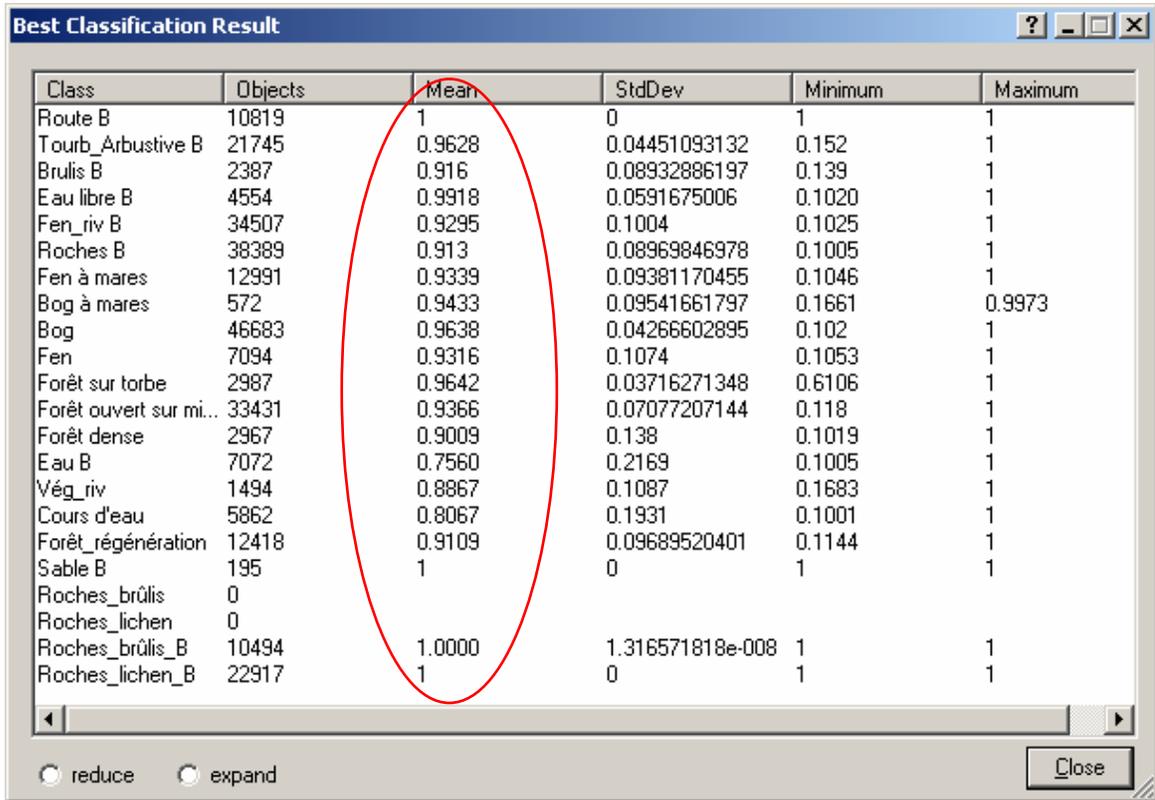
Figure 24. Espace spectral 2D.

(Abscisse – valeur moyenne de chaque objet dans la bande spectrale rouge (R), Ordonnée - valeur moyenne de chaque objet dans la bande spectrale proche infrarouge (PIR))

Le taux de succès global est défini par le rapport entre la proportion de prédictions correctes (située sur la diagonale de la matrice) et le nombre total des sites de référence (60). Comme le montre le Tableau 4, à ce stade préliminaire, le taux de succès global (de 83%,) est une mesure grossière. Il faudra donc, ajouter des sites de référence d'autres sources que Garneau (2004). Par contre, la précision de producteur pour les bogs et les fens a été calculée – 80% pour les bogs et 91 % pour les fens. La précision d'utilisateur est estimée à 95% pour les bogs et à 87.5% pour les fens.

Comme il a été mentionné précédemment, dans eCognition les objets pourraient appartenir à plus d'une seule classe. L'objet est donc assigné à la classe qui a la valeur d'appartenance la plus élevée. L'analyse de la classification montre que les valeurs moyennes d'appartenance (entre 0 et 1) des objets à une classe donnée sont en général très élevées pour la plupart des classes (Figure 25), c'est-à-dire que la différence entre les sites d'entraînement et l'objet à classer est très petite. Cela signifie que les attributs des objets sont bien adéquats au moins par classe.

3. Résultats et discussion



The screenshot shows a window titled "Best Classification Result" with a table of classification statistics. The table has six columns: Class, Objects, Mean, StdDev, Minimum, and Maximum. The 'Mean' column is circled in red. The table lists 20 different classes with their corresponding object counts, mean values, standard deviations, minimums, and maximums.

Class	Objects	Mean	StdDev	Minimum	Maximum
Route B	10819	1	0	1	1
Tourb_Arbustive B	21745	0.9628	0.04451093132	0.152	1
Brulis B	2387	0.916	0.08932886197	0.139	1
Eau libre B	4554	0.9918	0.0591675006	0.1020	1
Fen_riv B	34507	0.9295	0.1004	0.1025	1
Roches B	38389	0.913	0.08969846978	0.1005	1
Fen à mares	12991	0.9339	0.09381170455	0.1046	1
Bog à mares	572	0.9433	0.09541661797	0.1661	0.9973
Bog	46683	0.9638	0.04266602895	0.102	1
Fen	7094	0.9316	0.1074	0.1053	1
Forêt sur torbe	2987	0.9642	0.03716271348	0.6106	1
Forêt ouvert sur mi...	33431	0.9366	0.07077207144	0.118	1
Forêt dense	2967	0.9009	0.138	0.1019	1
Eau B	7072	0.7560	0.2169	0.1005	1
Vég_riv	1494	0.8867	0.1087	0.1683	1
Cours d'eau	5862	0.8067	0.1931	0.1001	1
Forêt_régénération	12418	0.9109	0.09689520401	0.1144	1
Sable B	195	1	0	1	1
Roches_brûlis	0				
Roches_lichen	0				
Roches_brûlis_B	10494	1.0000	1.316571818e-008	1	1
Roches_lichen_B	22917	1	0	1	1

Figure 25. Les valeurs moyennes des fonctions d'appartenance pour les classes du Niveau B

Une comparaison de superficies de classes thématiques obtenues par l'approche « orientée-objet » avec celles « par pixel » effectuée par Gauthier *et al.* (2006) de la région du bassin versant de la rivière Nécopastic a été effectuée (Figure 26). Les résultats de cette comparaison sont présentés dans le tableau 5.

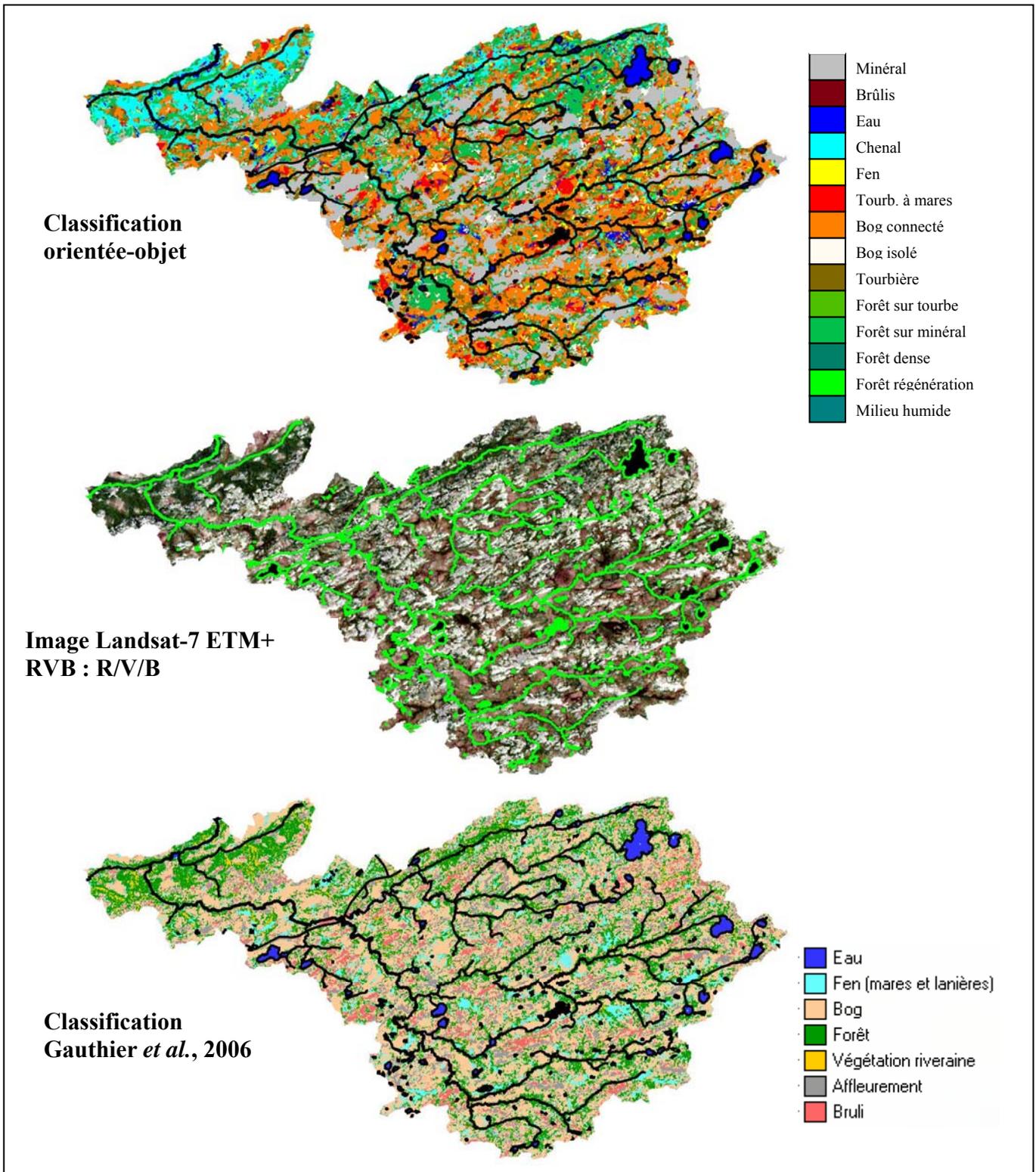


Figure 26. Résultats des classifications par les approches « orientée-objet » et « par pixel » sur le sous-bassin versant de la rivière Nécopastic.

3. Résultats et discussion

Tableau 5. Comparaison des superficies des classes thématiques obtenues par l'approche « orientée-objet » avec celles de l'approche « par pixel » effectuée par Gauthier *et al.* 2006 de la région du bassin versant de la rivière Nécopastic.

Classification Gautier <i>et al.</i> , 2006 (pp)			Classification orientée-objet (oo)					
Classe	Superficie		Classe	Superficie		Groupe	Superficie	
	km ²	%		km ²	%		km ²	%
Eau	4,07	1,72	Eau	11,47	4,85	Eau	11,47	4,85
Fen (mares et lanières)	25,63	10,84	Fen	6,53	2,76	Fen	6,53	2,76
Bog	98,35	41,59	Bog isolé	3,25	1,38	Bog	63,61	26,90
Forêt	60,65	25,65	Bog connecté	60,36	25,52	Tourbière à mares	13,6	5,75
Végétation riveraine	12,53	5,30	Bog à mares	2,85	1,21	Milieu humide	1,00	0,42
Affleurement	20,67	8,74	Fen à mares	10,75	4,55	Tourbière arbustive	30,07	12,71
Bruli	14,58	6,16	Milieu humide	1,00	0,42	Forêt	37,85	16,01
			Tourbière arbustive	30,07	12,71	Chenal(Vég. Riv)	31,59	13,36
			Forêt sur minéral	31,10	13,15	Minéral	39,63	16,76
			Forêt sur tourbe	2,98	1,26	non classifié	1,11	0,47
			Forêt régénération	1,69	0,71			
			Forêt dense	2,08	0,88			
			Chenal	31,59	13,36			
			Minéral	39,63	16,76			
			non classifié	1,11	0,47			
Total	236,47	100,00	Total	236,48	100,00	Total	236,48	100,00

Tableau 6. Matrice de coïncidence - présente la répartition des classes de Gauthier *et al.*, (2006) (en pourcentage de tous les pixels occupés par la classe correspondante) dans les classes de cette étude et vice-versa.

Par pixel (pp)	Orientée objet (oo)															
	Eau	Fen	Fen à mares	Milieu humide	Bog isolé	Bog connecté	Bog à mares	Tourb. arbustive	Forêt sur tourbe	Forêt sur minéral	Forêt dense	Forêt régénération	Chenal (vég. riverains)	Minéral	Brûlis	
Eau	35 99	0 0	0 1	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	100
Fen (mares et lanières)	36 16	9 2	43 18	90 4	7 1	5 11	38 4	10 12	20 2	14 16	18 1	6 0	4 5	3 4	0 0	96
Bog	0 0	11 1	20 2	0 0	70 2	71 44	44 1	45 14	1 0	49 15	46 1	4 0	6 2	42 17	0 0	98
Forêt	10 2	71 8	29 5	4 0	9 1	12 12	15 1	38 19	62 3	19 10	23 1	48 1	68 35	3 2	0 0	100
Végétation riveraine	18 16	9 5	5 4	2 0	0 0	0 0	1 0	2 5	16 4	1 3	11 2	39 5	21 53	0 1	0 0	98
Affleurement	1 0	0 0	0 0	0 0	8 1	8 22	0 0	1 2	0 0	11 17	0 0	0 0	0 0	29 56	0 0	98
Brûlis	0 0	0 0	1 1	4 0	5 1	4 16	1 0	3 7	1 0	6 12	2 0	3 0	0 1	22 60	0 0	98
	100	100	98	100	99	100	99	99	99	100	100	100	99	99	0	

Les indices « pp » et « oo » ont été attribués aux classes pour concrétiser les deux approches, soient « par pixel » et « orientée-objet ». Il faut noter que la classification orientée-objet est plus détaillée et elle a deux fois plus de classes que celle de Gauthier *et al* (2006), soient 14 et 7 classes respectivement. Alors, un regroupement des classes est nécessaire afin d'être capable de les comparer plus adéquatement. Certaines conclusions ont été retirées des résultats présentés dans le tableau 5 :

- Le fait le plus remarquable est le manque d'objets classifiés comme « brûlis » par la classification orientée-objet. Si l'on regroupe la classe « Affleurement –pp » et la classe « Brûlis –pp » en considérant que ce sont des sols minéraux qui sont passés récemment au feu et actuellement devraient être de sols minéraux nus, on aurait 14.9%. Cette valeur est comparable avec le pourcentage obtenu pour la classe « Minéral –oo », soit 16,8%.
- Pour comparer la superficie de bogs, les classes « Bog isolé –oo », « Bog connecté –oo », « Bog à mares –oo » et « Tourbière arbustive –oo » ont été regroupés. La superficie totale de ce regroupement fait 40.8%. Il semble qu'il y ait une bonne concordance avec la superficie de la classe « Bog –pp » (41.6 %) obtenue par l'approche « par pixel ».
- Un certain désaccord a été observé entre la classe « Fen –pp » (10.8%) et le regroupement « Fen –oo »- « Fen à mares –oo »- « Milieu humide –oo » (8.7%). De plus, comme il a été mentionné (paragraphe §3.4.2.3.), une partie des bogs à mares est classé aussi comme « Fen à mares –oo », ce qui va dire que le désaccord augmenterait.
- La superficie de classe « Eau » estimée par la classification orientée-objet, soit 4.9%, est plus de deux fois plus grande (1.7%) que celle « par pixel ».
- Le regroupement des classes « Forêt sur minéral –oo »-« Forêt sur tourbe –oo »-« Forêt régénération »-« Forêt dense » a une superficie de 16%, qui est significativement plus petite que celle estimée pour la classe « Forêt –pp », soit 25.7%. Comme il a été noté à la section §4.3., une certaine confusion a été observée entre les classes « Chenal -oo/Fen riveraine -oo » et « Forêt régénération », ce qui pourrait être attribuable aux espèces végétales communes (surtout des feuillus) qui les dominent.
- Par contre, la superficie de la classe « Végétation riverain –pp » (5.3%) est significativement plus petite que celle de la classe correspondante « Chenal –oo », soit 13.4%.

Pour éclaircir les principaux conflits, une comparaison directe pixel par pixel entre les deux matrices de classification a été effectuée à l'aide de la procédure MAT (PCI Geomatica). Des statistiques pour chaque combinaison unique entre les classes des deux approches ont été calculées et une matrice de coïncidence (Tableau 6) a été construite.

Selon cette matrice 99% des pixels de classe « Eau –pp » se retrouve dans 35% de la classe « Eau –oo ». D'autre 36% de la classe « Eau –oo » se retrouve dans la classe « Fen –pp », 18% dans la classe « Végétation riveraine –pp » et 10% - dans la « Forêt –pp ». Cependant, les pixels de la classe « Fen –pp » sont plus dispersés entre les classes orienté-objet correspondantes – 18% dans la classe « Fen à mares –oo », 16% dans la classe « Eau –oo », 16% dans la « Forêt sur minéral –oo », 12% dans la « Tourbière arbustive –oo », 11% dans le « Bog connecté –oo ». Si l'on regarde plus en détail la répartition de la classe « Fen à mares –oo », on constate que 43% coïncide avec la classe « Fen – pp », 20% avec classe « Bog –pp », 29% avec la classe « Forêt – pp » et 5% dans la « Végétation riveraine ». Le désaccord est plus grand pour la classe « Fen –

oo » : 71% se retrouve dans la classe « Forêt –pp », 11% dans la classe « Bog –pp », 9% dans la classe « Fen –pp » et 9% dans la classe « Végétation riveraine –pp ». La plupart des pixels de la classe « Milieu humide –oo », soit 90%, se retrouve dans la classe « Fen –pp ».

Dans le cas de classe « Bog –pp », on remarque que du total, 61% des pixels se retrouve dans le regroupement « Bog isolé –oo »-« Bog connecté –oo »-« Bog à mares »-« Tourbière arbustive ». Par contre, 71% des pixels de la classe « Bog connecté –oo » se retrouve dans la classe « Bog –pp », 12% dans la « Forêt –pp », 5% dans la classe « Fen –pp » et le reste dans la classe « Affleurement –pp » et dans la classe « Brûlis –pp ». Les pixels de la classe « Bog isolé –oo » sont repartis de manière semblable.

Au niveau de la classe « Bog à mares -oo », 44% des pixels coïncide avec la classe « Bog –pp », 38% avec la classe « Fen –pp » et 15% avec la classe « Forêt –pp ».

La plupart de pixels classés « Tourbière arbustive –oo » se retrouve dans les classes « Bog –pp » et « Forêt –pp », soient 45% et 38% respectivement. De plus, 10% sont classifiés comme « Fen –pp ». Vu la nature transitionnelle de cette classe, on considère cette répartition naturelle.

La classe « Forêt –pp » a aussi une répartition dispersée : 35% des pixels se retrouve dans la classe « Chenal –oo », 19% dans la classe « Tourbière arbustive –oo », 12% dans la classe « Bog connecté –oo », 10% dans « Forêt sur minéral –oo », 8% dans « Fen –oo ». Par contre, 62% des pixels de la classe « Forêt sur tourbe –oo » se retrouve dans la classe « Forêt –pp ». La répartition des pixels de la classe « Forêt régénération –oo » se retrouve généralement dans les classes « Forêt –pp » et « Végétation riveraine –pp », c'est-à-dire 48% et 39% respectivement. Par contre, la plus grande partie des pixels des classes « Forêt sur minéral –oo » et « Forêt dense –oo » se retrouve dans la classe « Bog –pp », c'est-à-dire 49% et 46% respectivement, et 19% et 23% respectivement - dans la classe « Forêt –pp ».

Dans le cas de la classe « Végétation riverain –pp, 56% des pixels coïncide avec 21% de la classe « Chenal –oo ». Toutefois, une grande partie (68%) de la classe « Chenal –oo » se retrouve comme « Forêt –pp ».

La classe « Minéral- oo » se retrouve généralement dans le regroupement « Affleurement –pp »-« Brûlis –pp », c'est-à-dire 51% et 42%. Si l'on regarde plus en détails les classes « Affleurement –pp » et « Brûlis –pp », on constatera que 56% et 60% respectivement de pixels de ces classes sont classé comme « Minéral –oo », une partie, soit 22% et 16%, comme « Bog connecté –oo », et 17% et 12% - comme « Forêt sur minéral –oo ».

En résumé, malgré la concordance visuelle (figure 26), la comparaison directe des deux matrices de classification révèle de nombreuses confusions. Tous ces désaccords suggèrent une différence entre les définitions des classes et, par conséquent, du choix des sites d'entraînement. Alors, pour être capable d'estimer et de comparer l'efficacité de ces deux approches, il est nécessaire d'unifier les classes et les sites d'entraînement et de validation.

3.4. Connectivité physique des tourbières ombrotrophes

Selon les critères de connectivité physique posés, la plupart des tourbières ombrotrophes (95%) sont classifiées comme connectées, c'est-à-dire qu'elles sont en contact avec un objet classifié comme « Eau », « Fen », « Fen à mares » ou « Chenal » (« Fen riverain »).

Ce résultat pourrait être expliqué avec le fait que le lagg³ des tourbières ombrotrophes est plus minérotrophe et est dominé par une végétation typique pour les fens. De plus, il est évident de la Figure 27, la pente faible des tourbières ombrotrophes convexes et l'inondation extensive de marges pendant la fonte de neige créent une zone faiblement minérotrophe sur la pente de celles-ci (Damman, 1977, Glaser et Janssens, 1986). Comme Payette et Rochefort (2005) ont signalé, une tourbière n'est jamais totalement minérotrophe ou ombrotrophe ; la proportion de chaque unité peut varier d'une tourbière à l'autre selon le régime hydrique et nutritif prédominant.

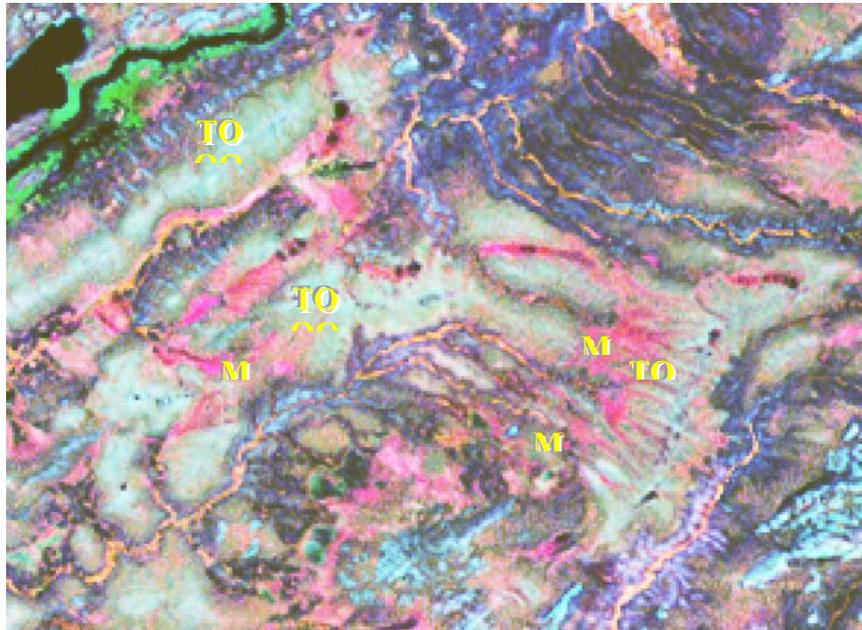


Figure 27. Zones faiblement minérotrophes (M - zones en rose-rouge) sur la pente des tourbières ombrotrophes (TO - zones en vert-gris pâle).

(Source : Image Landsat-7 ETM+ ; composé couleur RVB – PIR/MIR/R)

Toutefois, il n'est pas possible d'affirmer que la connectivité physique, observée dans un seul moment isolé à l'aide d'une image Landsat-7 ETM+, représente la connectivité hydrologique des tourbières ombrotrophes sans d'abord effectuer des études simultanées sur le terrain. Même sur les images à très haute résolution, on ne peut pas établir la connectivité hydrologique sans l'étude supplémentaire sur le terrain. La figure 28 présente un écoulement de surface (A) et un chenal/fen

³ Lagg – terme d'origine suédoise signifie une unité morphogénétique, localisée à la périphérie des tourbières, au contact des dépôts minéraux. Le lagg forme une zone tourbeuse minérotrophe faisant la transition avec les terrains adjacents. Il se caractérise généralement par une couverture de tourbe mince où circulent les eaux de drainage en provenance des sols minéraux et de la zone ombrotrophe (Payette et Rochefort, 2005).

riverain (B) et les images respectives QuickBird multispectrales de ces deux sites. Il est difficile de percevoir ces écoulements même près de la surface, mais ils sont bien distinctifs sur les images satellitaires.

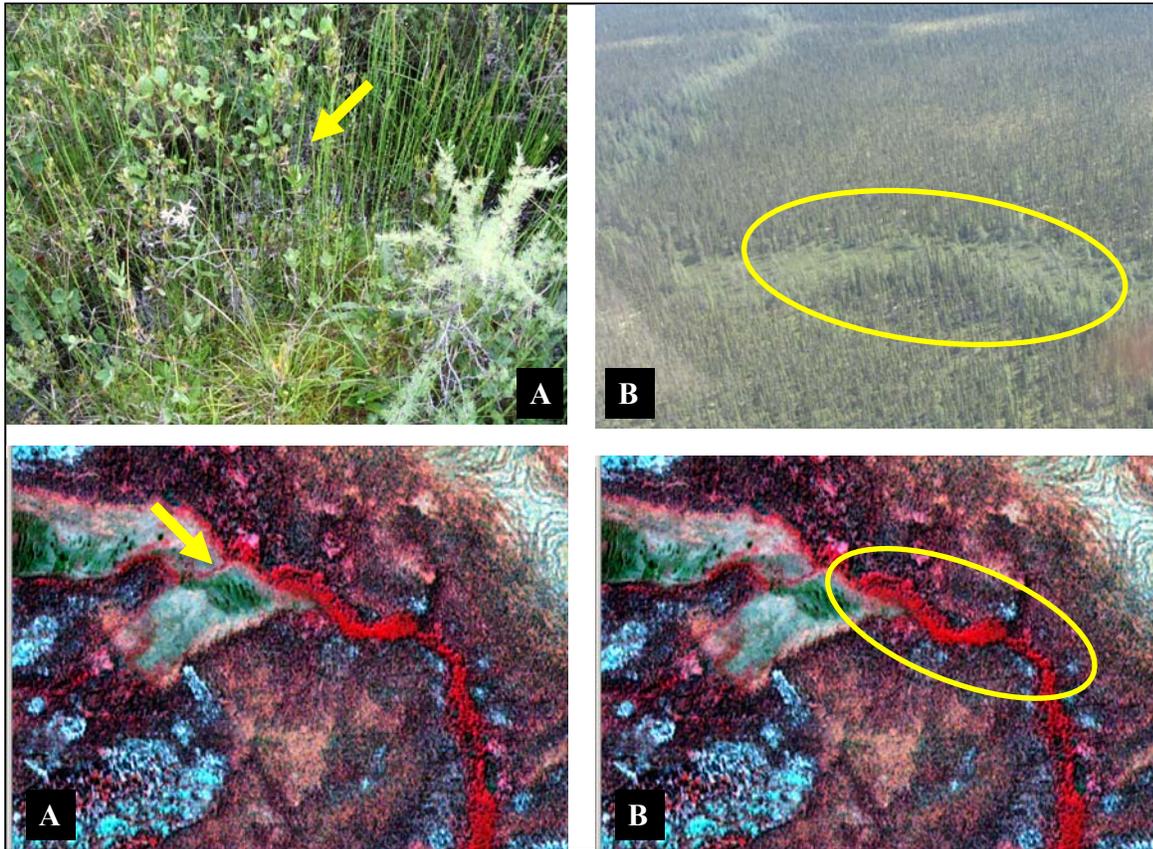


Figure 28. Photos et images QuickBird (A – écoulement de surface, B – chenal/fen riverain).

Comme Becker (2005) mentionne, dans les environnements humides, les caractéristiques de la surface sont des indicateurs fiables de l'eau souterraine. La figure 29 présente des sites potentiels de connectivité hydrologique. En effet, la végétation et plus particulièrement les bryophytes sont très sensibles aux changements des conditions hydrologiques. Il existe un certain lien entre sa répartition, son humidité volumique, l'humidité de la surface et près de la surface, la position de la nappe phréatique et ce qu'on pourrait voir sur les images. Une telle étude a été menée par Haris *et al.* (2006), Bryant et Baird (2003), Jackson *et al.*, (2004). Alors, pour établir ces liens, on a besoin d'images multi-temporelles et des études hydrologiques terrestres simultanées. Une fois que ces liens seront établis pour quelques tourbières, il sera possible d'en extrapoler les résultats aux autres tourbières du bassin versant.

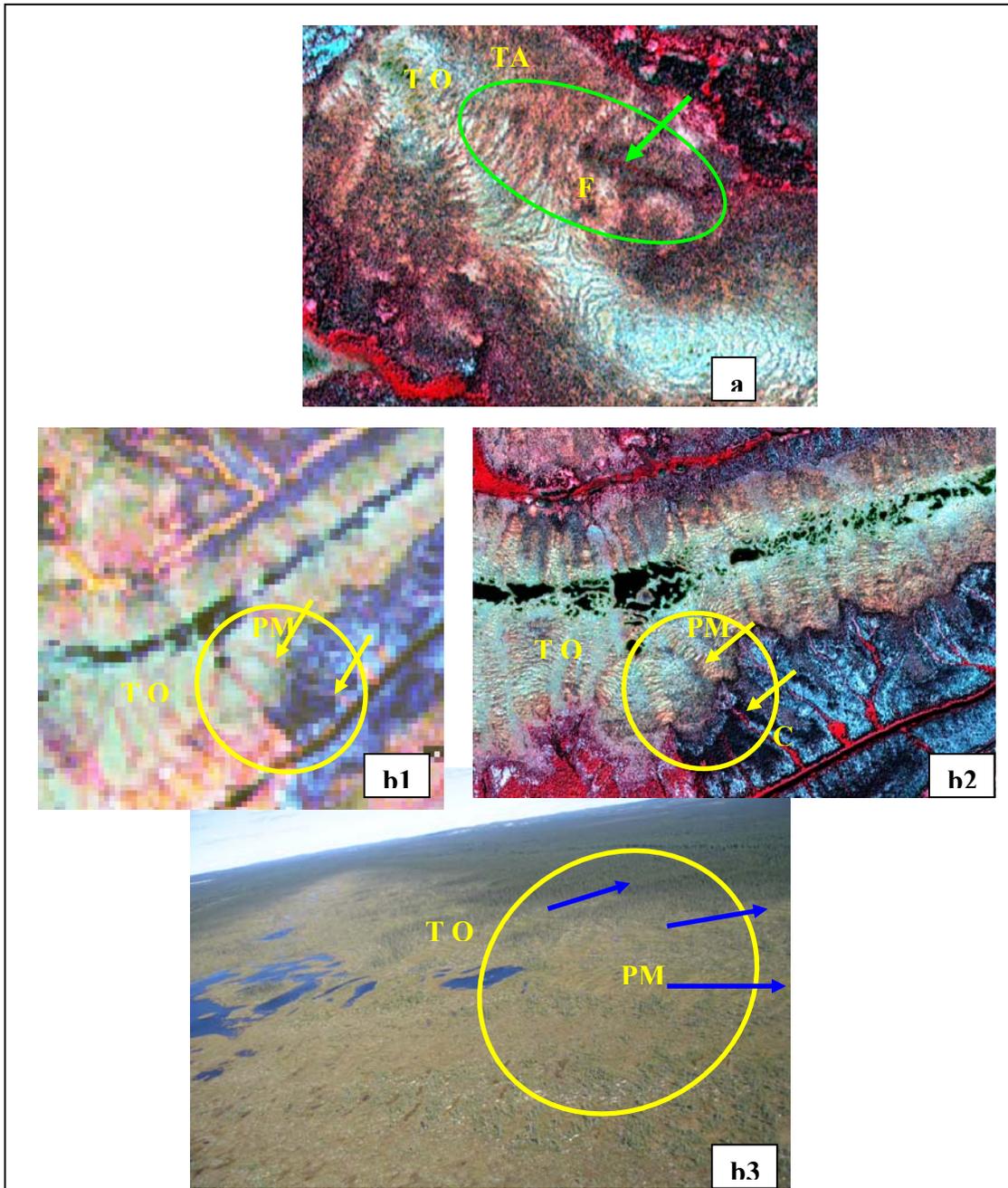


Figure 29. Sites potentiels de connectivité physique. (a) Image QuickBird d'une tourbière ombrotrophe. L'écoulement est plus évident dans la partie plus arborée (FT), ce qui suggère un écoulement sous la surface dans la tourbière ombrotrophe (TO); (b1) Image Landsat-7 ETM+ d'une tourbière ombrotrophe. Les parties en rose dans les limites de la tourbière ombrotrophe (TO) sont des parties plus humides et enrichies en minéraux (PM), ce qui signifie que ce sont les endroits où l'écoulement converge; (b2) Image multispectrale QuickBird du même site que (b1) – évidemment cette image est plus sensible pour les zones d'évacuation des eau (C) hors les limites de la tourbière et moins sensible que l'image Landsat-7 ETM+ pour les zones PM car le capteur QuickBird ne dispose pas de bande dans le MIR ; (b3) la vue aérienne du même site que (b1) et (b2).

3.5. Problèmes rencontrés

L'approche orientée-objet et les méthodes hiérarchiques de segmentation et de classification sont des techniques de travail efficaces pour se débrouiller avec la complexité des écosystèmes naturels. Toutefois, certains problèmes ont été rencontrés lors de l'application de cette approche :

- La petite échelle de segmentation au Niveau B permet de très bien délimiter des éléments fins du paysage (comme les chenaux), mais cela crée un grand nombre de segments ce qui ralentit beaucoup le traitement des images.
- Malgré que certaines classes comme bog, forêt sur tourbe, etc. dans les différentes bio-régions montrent certaines similarités spectrales ou spatiales, il faut faire attention au contexte qui change. Par exemple, dans les limites du bassin versant de La Grande rivière, de l'ouest à l'est, le paysage change; la forêt devient de plus en plus ouverte et le lichen prend de l'importance. Un tel changement pourrait détériorer le résultat de la segmentation et par conséquent la classification, si l'on applique les mêmes paramètres d'homogénéité.
- De plus, le fait d'avoir développé la méthode de classification sur le secteur LG-3 pour ensuite l'appliquer sur le sous-bassin de la Rivière Nécopastic pourrait avoir été la source de problèmes à cause de l'apparition de nouveaux types d'occupation du sol qui n'étaient pas pris en considération lors du développement de la méthode.

4. CONCLUSION

Une approche orientée-objet a été développée et appliquée sur différentes sous-images d'une mosaïque Landsat-7 ETM+ couvrant la partie aval du bassin versant de La Grande rivière. La méthode proposée permet de discriminer assez bien les milieux tourbeux des milieux non-tourbeux. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude montrent que la précision de la délimitation et de la classification des deux principaux types de tourbières est satisfaisante (80 % pour les bogs et 91 % pour les fens). De plus, la précision de l'usager a été estimée à 95% pour les bogs et à 87.5% pour les fens.. L'approche développée est prometteuse, et elle est facilement applicable sur d'autres scènes de la mosaïque.

L'approche orientée objet réalisé dans eCognition a quelques avantages par rapport à l'approche classique « par pixel »:

1. Intégration de bandes spectrales à différentes résolutions dans le processus de segmentation et de classification sans fusion préliminaire;
2. Utilisation de l'information spatiale directement sans traitement supplémentaire des images;
3. La classification des objets est basée sur la théorie de la « logique floue». Étant donné que les tourbières sont des écosystèmes transitoires entre les systèmes aquatiques et terrestres, cela nous a permis de mieux les délimiter qu'avec la logique binaire traditionnelle;
4. Diminution (ou élimination selon l'échelle de segmentation) de l'effet « sel-poivre » dans la classification.

Les résultats de cette étude seront utiles à la détermination des occupations du territoire sur le bassin versant de La Grande rivière. Puisque le comportement hydrologique des tourbières est très différent de celui observé dans les écosystèmes caractérisés par des sols minéraux, l'importance d'identifier précisément la localisation et la représentation de chaque type d'occupation est sans équivoque. L'adaptation d'un modèle hydrologique distribué tel qu'HYDROTEL au milieu Nord-boréal bénéficiera sans aucun doute du développement de cette approche de classification. De plus, les résultats de cette étude pourraient être mis à profits dans la définition des unités de calcul d'HYDROTEL (dénommé UHRH, pour unité hydrologique relativement homogène) fait à l'aide du système d'information géographique PHYSITEL (Turcotte *et al.*, 2001 ; Royer *et al.*, 2006).

Toutefois, peu importe l'approche utilisée, l'étude de la connectivité physique à un instant donné à l'aide des images Landsat-7 ETM+ représente surtout la connectivité physique (proximité) avec des objets des classes « Eau », « Fen », « Fen à mares » et « Fen riverain » et pas obligatoirement la connectivité hydrologique des tourbières ombrotrophes. Il est donc essentiel pour les études futures utilisant la télédétection d'utiliser des images multitemporelles et multispectrales à plus haute résolution spatiale en conjonction avec des études de terrain simultanées. Il faudra aussi porter une plus grande attention aux caractéristiques spectrales et spatiales internes des tourbières

et chercher un lien entre ces caractéristiques et le comportement hydrologique des tourbières. Un protocole de travaux futurs est proposé dans l'annexe 1.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier sincèrement Mme Lisa-Marie Pâquet et M. Yves Gauthier pour leur support technique.

RÉFÉRENCES

- Baatz, M., Schape, A., (2000) Multiresolution Segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation, In Strobl, J. and Blaschke, T. (Eds.), *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XI. Beiträge zum AGIT – Symposium*, Salzburg 1990.http://www.definiens-imaging.com/documents/publications/baatz_FP_12.pdf dernière consultation 25 Août 2006
- Becker, M., (2006). Potential for Satellite Remote Sensing of Ground Water. *Ground Water*. **44**(2) pp. 306-318.
- Bernier, M., H. Ghedira, Y. Gautier, R. Magagi, R. Filion, D. De Seve, T. Ouarda, J.-P. Villeneuve, P. Buteau (2003). Détection et classification de tourbières ombrotrophes du Québec à partir d'images RADARSAT-1, *Can. J. Remote Sensing*, **29**, No.1, pp. 88-98.
- Bryant, R. G., A.J. Baird, (2003). The spectral behavior of Sphagnum canopies under varying hydrological conditions, *Geophys. Res. Lett.*, **30**(3), 1134
- Bubier, J., B. Rock, P. Crill, (1997) Spectral reflectance measurements of boreal wetland and forest mosses. *Journal of Geophysical Research*, vol. **102** (D24), pp. 29,483-29,494.
- Burnett, C., K. Aaviksoo, S. Lang, T. Langanke, T. Blaschke, (2003). An Object-based Methodology for Mapping Mires using High Resolution Imagery. Presented at: *Ecohydrological Processes In Northern Wetlands*, Tallinn, 30 June- 4 July, 2003
- Bullock, A. & M. Acreman, (2003). The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences*, **7**(3) : 358-389.
- Caloz, R., C. Collet (2001). Précis de Télédétection: Traitements Numériques d'images de télédétection. AUF, Presses de l'Université du Québec, vol. 3.
- Crist, E. P., R. Laurin, C. Cicone, (1986). Vegetation and soils information contained in Thematic Mapper data. *Proceedings of IGARSS'86 Symposium*, Paris, pp. 1465-70.
- Damman, A.W.H. 1979. Geographic patterns in peatland development in eastern North America, pp. 42-57. In *Proceedings of the International Symposium on Classification of Peat and Peatlands*. International Peat Society, Helsinki.
- Definiens Imaging, eCognition User Guide for Version 4 (2004). Munich, Germany. URL:<http://www.definiens-imaging.com/> <http://www.definiens-imaging.com/down/trial.htm> dernière consultation 25 Août 2006
- Garneau, M., (2004) Données phytosociologiques, physiographiques, écologiques et géographiques de plus de 150 sites de tourbières potentielles de la Baie James, été 2004. Rapport interne, UQAM, Département de géographie
- Gauthier, F., A.N. Rousseau, M. Bernier, K. Chokmani, S. Jutras (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 No R901, Novembre 2006, INRS, Québec, Canada
- Glasser, P. H., J. A. Janssens, (1986). Raised bogs in eastern North America: Transitions in landforms and gross stratigraphy. *Canadian Journal of Botany*, 64: 395-415.
- Groupe de travail national sur les terres humides, 1997. *Système de classification des terres humides du Canada*. Deuxième édition (Française). Édité par Warner, B.G. et Rubec, C.D.A. Le Centre de recherche sur les terres humides, Université de Waterloo, Waterloo (Ontario).76 pages.
<http://www.uwwrc.net/web/wetlandsrc/cat/books/books-1053313151236>
- Haris, A., R. J. Bryant, A. J. Baird, (2006). Mapping the effects of water stress on Sphagnum: Preliminary observations using airborne remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 100: 363- 378.
- Hayashi, M., W. Quinton, A. Pietroniro, J. J. Gibson, (2004). Hydrologic functions of wetlands in a discontinuous permafrost basin indicated by isotopic and chemical signatures. *J. of Hydrology*, 296: 81-97.
- Hubert-Moy, L., K. Michel, T. Corpetti, B. Clément. (2006) Object-oriented mapping and analysis of wetlands using SPOT 5 data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '06, 2006 IEEE International*, Denver, USA, Août 2006
- Hurd, J., D. Civeco, M. Gilmore, S. Prisløe, E. Wilson. (2006) Tidal wetland classification from Landsat imagery using an integrated pixel-based and object-based classification approach. *ASPRS 2006 Annual Conference*, Reno, Nevada, May 1-5,2006
- Ivits, E., B. Koch, T. Blaschke, L. Waser, (2002). Landscape connectivity studies on segmentation based classification and manual interpretation of remote sensing data. *eCognition User Meeting*, Octobre 2002, München
- Jackson, T., D. Chen, M. Cosh, F., Li, M. Anderson, C. Walthall, P. Doriaswamy, E. Hunt, (2004). Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment*, 92: 475-482
- Kuhry, P., B.J. Nicholson, L.D. Gignac, D.H. Vitt, S.E. Bayley. 1993. "Development of Sphagnum-dominated peatlands in boreal continental Canada". *Canadian Journal of Botany*, 71: 10-22.
- May, D., J. Wang, J. Kovacs, M. Muter, (2003). Mapping Wetland Extent Using IKONOS Satellite Imagery of the O'Donnell Point Region, Georgian Bay, Ontario. *Proc. 25th Canadian Symp. Remote Sensing*
- Mouchot, M. C., T. Alföldi, D. De Lisle, G. McCullough. (1991). Monitoring the Water Bodies of the Mackenzie Delta by Remote Sensing Methods. *ARCTIC*, Vol. 44, Supp.1, pp. 21-28
- Ozesmi, S. L., M. E. Bauer, (2002). Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands ecology and Management*, 10: 381-402

- Payette, S., M. Garneau, M. Bernier, A. Saint-Hilaire, (2004) « Aqualyse des tourbières du complexe LaGande et changements climatiques », proposition de recherche
- Payette, S., L. Rochefort, (2005). *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*, 2^e tirage. Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada.
- Pietronero, A., Prowse, T., D. L. Peters, (1999). Hydrologic assessment of an inland freshwater delta using multi-temporal satellite remote sensing. *Hydrological Processes*, **13**: 2483-2498
- Pietronero, A., J. Töyrä, (2005). Remote Sensing of Water and Soil Moisture, In *Remote Sensing in Northern Hydrology: Measuring Environmental Change*, AGU, Geophysical Monograph 163, pp. 119-142.
- Quinton, WL, M Hayashi, A Pietroniro, (2003) *Hydrological Processes*, **17**: 3665-3684 DOI: 10.1002/hyp. 1369.
- Racine M.-J., M. Bernier, T. Ouarda, (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**, No 6, pp. 450-467
- Rousseau, A., (2004) Adaptation du Modèle Hydrologique Distribué HYDROTEL au Milieu Boréal Québécois , proposition de recherche
- Roy, R., (2004) *Symposium Ouranos*, Montréal, 9-10 juin 2004
- Royer, A., A.N. Rousseau, J.-P. Fortin, R. Turcotte, (2006). PHYSITEL, un SIG pour la mise en place de modèles hydrologiques. Affiche présentée dans le cadre du *Deuxième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale*, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada
- Sugumaran, R., J. Harken, J. Gerjevic, (2004). Using Remote Sensing Data to Study Wetland Dynamics in Iowa. Iowa Space Grant (Seed) Final Technical Report. Department of Geography, University of Northern Iowa, Cedar Falls, IA-50614
- Tarnocai, C., I.M. Kettles. B. Lacelle, (2000) Peatlands of Canada. Geological Survey of Canada, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario, Open File 3834, (digital database).
- Todd, A. K., Buttle, J. M., C. H. Taylor, (2006). Hydrologic dynamics and linkages in a wetland-dominated basin. *Journal of Hydrology*, **319**: 15-35
- Töyrä, J., Pietroniro, A., L. Martz (2001). Multisensor Hydrologic Assessment of a Freshwater Wetland, *Remote Sensing of Environment*, **75**: 162-173
- Töyrä, J., A. Pietroniro, (2005). Towards operational monitoring of a northern wetland using geomatics-based techniques, *Remote Sensing of Environment*, **97**: 174-191
- Turcotte, R., J.-P. Fortin, A. N. Rousseau, S. Massicotte, J.-P. Villeneuve, (2001). Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, **240**: 225-242.
- Zeeb, P., (1998). Hydrologic response of a wetland to change moisture conditions: modeling effects of soil heterogeneity. *Climatic Change*, **40**: 211-227.

ANNEXE

Protocole de travaux futurs

1. Validation de la classification;
2. Cibler les exutoires potentiels de quelques tourbières ombrotrophes déjà à l'étude à l'aide des images multispectrales et installer les instruments nécessaires pour détecter et mesurer les écoulements de surface et hypodermique;
3. Acquisition d'images Landsat-7 ETM+ au printemps et durant le mois d'août de quelques tourbières ombrotrophes déjà à l'étude;
4. Mesurer sur le terrain, simultanément avec le passage du satellite, l'humidité volumique de la végétation aux endroits ciblés et aux endroits voisins hors des limites de la tourbière, l'humidité de la surface et près de la surface, la position de la nappe phréatique.
5. Corréler ces mesures avec la réponse spectrale observée sur les images multispectrales.
6. Valider les résultats sur une autre tourbière étudiée selon les liens trouvés à l'étape 5, prévoir l'état de la tourbière et comparer cette prévision avec les mesures sur le terrain.