

**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

**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

par

Francis Gauthier
Alain N. Rousseau Ph.D. ing.
Monique Bernier Ph.D.
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 R901

ISBN 289146-528-8

Novembre 2006

ISBN 289146-528-8

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	VII
1. INTRODUCTION.....	1
2. APPROCHE PAR LA TÉLÉDÉTECTION.....	3
SITE D'ÉTUDE.....	3
MÉTHODOLOGIE.....	6
<i>L'image et les pré-traitements.....</i>	<i>6</i>
<i>Fusion d'image.....</i>	<i>7</i>
<i>La classification.....</i>	<i>11</i>
RÉSULTATS.....	12
DISCUSSION.....	19
<i>Télédéttection et connectivité.....</i>	<i>19</i>
<i>Les autres approches en télédéttection.....</i>	<i>19</i>
3. CONTEXTE ET APPROCHE HYDROLOGIQUE.....	25
SITE D'ÉTUDE.....	25
MÉTHODOLOGIE.....	27
<i>La nappe phréatique.....</i>	<i>27</i>
<i>Les modèles numériques d'élévation.....</i>	<i>29</i>
RÉSULTATS.....	29
DISCUSSION.....	31
<i>La nappe phréatique, stratigraphie et morphologie.....</i>	<i>31</i>
<i>Les modèles numériques d'élévation.....</i>	<i>31</i>
<i>Les traceurs et les autres approches.....</i>	<i>32</i>
4. CONCLUSION.....	35
5. REMERCIEMENTS.....	37
6. RÉFÉRENCES.....	39
ANNEXE 1.....	43
ANNEXE 2.....	45
ANNEXE 3.....	47
ANNEXE 4.....	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Cartes de localisation du bassin versant de la rivière Nécopastic.....	4
Figure 2. Carte des dépôts de surface et d'occupation du sol du bassin versant de la rivière Nécopastic.....	5
Figure 3. Schématisation de la fusion IHS (Zhang, 2002).	7
Figure 4. Diagramme de dispersion des valeurs de réflectance pour les fusions d'image RC.	9
Figure 5. Graphiques des spectres de réflectance des images multispectrales originales et fusionnées.	9
Figure 6. Composés couleurs d'intérêts.	10
Figure 7. Composés couleurs non conventionnelles.	11
Figure 8. Exemples choisis de divers types de spectres de réflectance.....	12
Figure 9. Résultats des classifications.	14
Figure 10. Résultats des classifications (zoom sur une portion du territoire).	15
Figure 11. Pourcentage de recouvrement des diverses classes pour les deux séries d'images retenues.	18
Figure 12. Cartes de localisation de la tourbière ombrotrophe à l'étude.	26
Figure 13. Cartes de localisation des puits.	28
Figure 14. Schéma des flux hydriques d'un bog (Ingram, 1981).....	28
Figure 15. Schéma technique d'un puits.	28
Figure 16. Modèles numériques d'élévation à partir des altitudes au sol des puits (à gauche – images en plan, à droite – images tridimensionnelles).	30
Figure 17. Modèles numériques d'élévation à partir de 1507 points d'altitudes (Tardif, à venir).	30
Figure 18. Schéma du flux d'écoulement dans une tourbière et sur sa marge (Ingram, 1981).	32
Figure 19a. Photos des sites d'enfouissement des puits.....	47
Figure 19b. Photos des sites d'enfouissement des puits.....	48
Figure 20 : L'algorithme de connexion.....	49
Figure 21 : Schéma du voisinage de Moore.....	49
Figure 22 : Résultat de l'algorithme de connexion limité aux pixels d'eau et de bog connecté....	49
Figure 23 : Résultat de l'algorithme de connexion incluant l'adjacence des pixels d'eau, de bog connecté et de fen	50
Figure 24 : Résultat de l'algorithme de connexion incluant l'adjacence des pixels d'eau, de bog connecté et de végétation riveraine.....	50
Figure 25 : Résultat de l'algorithme de connexion incluant l'adjacence des pixels d'eau, de bog connecté et de végétation riveraine.....	51
Figure 26 : Résultat de l'algorithme de connexion incluant l'adjacence des pixels d'eau, de bog connecté, de fen et de végétation riveraine.....	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Paramètres de l’image LANDSAT 7. (CCRS Earth Observation Catalogue, CEOCat).	6
Tableau 2. Liste d’abréviations fréquemment utilisées.....	7
Tableau 3. Caractéristique spectral du satellite Landsat 7	7
Tableau 4. Matrice de confusion et rapports de surface pour la classification ETM.	16
Tableau 5. Matrice de confusion et rapports de surface pour la classification Brovey.....	17
Tableau 6. Caractéristique générale des images de divers satellites.	20
Tableau 7. Exactitude pour différente classification (Ramanathan et al., 2004).....	21
Tableau 8. Hiérarchie des facteurs de contrôle du cycle de l’eau (Devito et al., 2005).....	23
Tableau 9. Informations sur les tiges et les rubans PVC voisins des puits à Simon Tardif.	43
Tableau 10. Informations sur les puits, les tiges et les rubans PVC.....	44
Tableau 11. Données du GPS Trimble (localisation, altitude et hauteur des puits).....	45
Tableau 12. Données du GPS Trimble (localisation, altitude et hauteur des puits) associées à M. Simon Tardif.	46

RÉSUMÉ

Cette étude préliminaire sur la connectivité hydraulique des tourbières ombrotrophes s'est effectuée sur le bassin versant (BV) de la rivière Nécopastic (LG-2, Baie de James, Québec, Canada). L'objectif premier de cette étude consistait à évaluer le potentiel des images Landsat-7 ETM+ pour classifier une image de la région et cibler les tourbières ombrotrophes (bogs). Une exactitude globale de 93% a été atteinte lors des classifications. Le pourcentage de couverture des bogs sur le BV de la Nécopastic a été établi à 40%. Une approche algorithmique par voisinage de Moore a été envisagée afin de déterminer les tourbières non-connectées au réseau de drainage de la rivière. La connectivité engendrée par cette fonction permettrait de relier les pixels de bog avec des pixels voisins d'eau, de fen ou de végétation riveraine. Il serait envisageable de déterminer la connectivité physique des tourbières ombrotrophes par ce procédé. Pour raffiner la classification, il a été suggéré d'améliorer la résolution des images et d'utiliser des méthodes de segmentations plus performantes de type orienté objet. Le potentiel des images radar à détecter l'humidité dans la tourbe a fait l'objet d'une revue de littérature.

Le second objectif de cette étude préliminaire consistait à revoir les diverses méthodes hydrologiques de mesure *in situ* afin de déterminer le degré de connexion d'une tourbière cible avec le réseau hydrographique de la Nécopastic. Des puits ont été installés en de nombreux endroits stratégiques de la tourbière afin de mesurer le niveau phréatique de la nappe. Il sera éventuellement possible d'estimer les directions d'écoulement des eaux dans ce bog à l'aide de *leveloggers*. Un modèle numérique d'élévation a permis de localiser les exutoires potentiels de la tourbière. Une revue de littérature a également permis de mettre à jour diverses méthodes ayant un potentiel d'application pour évaluer la connectivité des bogs. L'estimation de l'épaisseur de tourbe et l'évaluation de la morphologie sous la tourbière sont possibles grâce à des forages au carottier russe et au Géoradar. Le potentiel des traceurs isotopiques (δD et $\delta^{18}O$) et chimiques (NaBr) a également été évalué. La méthode s'est avérée adéquate pour déterminer le temps de résidence des eaux de pluie et souterraine dans la tourbe, les trajectoires d'écoulements et la provenance d'une eau. La mise en commun de ces données (mouvement hydrique, exutoire, niveau phréatique, relief sous la tourbe, provenance des eaux) devrait permettre de démontrer le degré de connectivité de la tourbière.

1. INTRODUCTION

Les tourbières sont des terres humides organiques contenant plus de 40 cm de tourbe sur laquelle croissent des sols organiques (Groupe de travail sur la classification des sols, 2002). L'une des plus importantes régions occupées par des tourbières est sans contredit les basses terres hudsoniennes et jamésiennes (Payette et Rochefort, 2001). Selon diverses estimations, les tourbières occuperaient 9 à 12 % des terres du Québec (Payette et Rochefort, 2001). Les processus hydrologiques résultant du climat et du relief déterminent généralement le type de tourbières rencontrées (Groupe de travail national sur les terres humides, 1997). Les systèmes ombrogènes (tourbières ombrotrophes ou bogs) sont caractérisés par un apport d'eau provenant exclusivement des précipitations. Leur nappe phréatique est située au-dessus de la nappe d'eau souterraine reliée aux terres minérales voisines. Ce phénomène fait de ces tourbières des lieux pauvres en nutriments (Groupe de travail national sur les terres humides, 1997). Les connaissances hydrologiques de ces systèmes sont également pauvres. Il est bien connu que la capacité de rétention d'eau des sphaignes est énorme. Suite à la fonte des neiges et à la recharge en eau des tourbières, la nappe phréatique affleure ce qui assure un intense ruissellement des eaux de surface et une pénétration d'eau de la surface vers les couches inférieures (Fraser et al., 2001; Payette et Rochefort, 2001). Par la suite, le niveau de la nappe diminue rapidement dans les tourbières ombrotrophes dû au drainage et à l'évapotranspiration. Le niveau de l'eau est maintenu dans les lags et près de la surface par l'afflux d'eau souterraine (Payette et Rochefort, 2001). Une telle situation se produit lorsque l'évapotranspiration excède les précipitations (Fraser et al., 2001). Durant ces périodes, les tourbières ombrotrophes agissent comme des éponges desséchées et tente de conserver leur eau par tension superficielle, ce qui assure un milieu de vie stable pour les mousses adaptées à ces milieux humides. La pluie étant la seule contribution en eau dans les bogs, une longue période sans pluie peu provoquer la cessation complète du ruissellement et parfois des écoulements hypodermiques (Payette et Rochefort, 2001). Ce phénomène peut provoquer la déconnexion de cette dernière du bassin hydrographique (Fraser et al., 2001).

Quelles tourbières sont les plus susceptibles d'avoir un tel comportement ? Est-ce qu'une période sèche engendrera la déconnexion automatique du bog de son réseau hydrographique ? Quelle doit être la durée de cette sécheresse? La capacité de rétention d'eau de la tourbe est-elle toujours suffisante pour maintenir la nappe phréatique affleurante sans concéder de perte? Dans un contexte de réchauffement climatique, les périodes probables de déconnexions seront-elles plus longues ? Est-ce que cette capacité de stockage des tourbières aura des conséquences sur les apports d'eau dans les bassins hydroélectriques d'Hydro-Québec ? Finalement, est-ce que ces fluctuations hydriques sont des sources d'erreurs dans les modèles de prévisions hydrologiques (HYDROTEL) du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) et du Centre Eau, Terre et Environnement de l'INRS (INRS – ETE) utilisés par Hydro-Québec?

C'est dans ce contexte qu'il convient de cibler les tourbières susceptibles d'isoler leurs eaux du réseau hydrographique. Les images du satellite Landsat-7 ETM+ et les techniques associées à la télédétection permettront d'analyser rapidement et à peu de frais la structure spatiale du vaste territoire de la Baie James. L'objectif premier de cette étude sera de classer le territoire et de cibler les tourbières ombrotrophes susceptible de stocker leurs eaux durant les périodes sèches. Il

est concevable que les tourbières physiquement adjacentes à des ramifications du réseau de drainage seront connectées au réseau hydrographique, tandis que les tourbières physiquement isolées auront plus de chance d'être exclues du réseau.

L'exploration de divers types d'images à résolution plus fine (Aster, Quickbird, Ikonos) fera également partie de cette étude. Il sera essentiel d'évaluer leur potentiel de segmentation du territoire et d'en comparer les capacités avec celles des images Landsat-7. Une brève incursion dans le domaine de la télédétection par l'utilisation d'image radar fera l'objet d'une revue de littérature. Il sera intéressant d'évaluer le potentiel de ces images pour détecter l'humidité de la tourbe.

Finalement, l'exploration de méthodes plus conventionnelles d'étude hydrologique sera inhérente. La détermination du niveau phréatique, du relief tourbeux et de la morphologie structurale sous-jacente sera envisagée et étudiée. Une bonne connaissance des écoulements internes dans les tourbières sera essentielle à l'atteinte des objectifs de cette étude préliminaire. Une revue de littérature sur l'utilisation de traceurs isotopiques et chimiques pour déterminer les temps de résidence et les trajectoires d'écoulement devra obligatoirement être effectuée.

2. APPROCHE PAR LA TÉLÉDÉTECTION

Site d'étude

La région retenue comme site d'étude est localisée en Jamésie dans le centre Ouest du Québec. Entre le réservoir LG-2 et la Baie de James, le bassin versant (BV) de la rivière Nécopastic a été sélectionné comme bassin expérimental par Hydro-Québec en 2003. Ce BV draine près de 240 km² de territoire au sud de la rivière La Grande (53,72°N, 78,22°O). Un territoire grossièrement centré sur ce bassin a été retenu pour effectuer cette étude (**figure 1**). Le territoire est principalement composé de tourbières ombrotrophes et de forêts ouvertes sur tourbe (Payette et Rochefort, 2001). Dans ce relief plutôt plat, les rares affleurements rocheux sont généralement couverts de forêts ouvertes sur lichen. L'épinette noire (*Picea mariana*) domine les îlots forestiers, mais elle partage de nombreux sites avec le mélèze laricin (*Larix laricina*). Ils sont également présents dans les tourbières, mais apparaissent régulièrement sous forme miniature (krummholz). La végétation des tourbières ombrotrophes est principalement composée de bryophytes, de lichens et d'éricacées. Les rares tourbières minérotrophes sont principalement composées de mousses brunes et d'herbacées (*Carex sp.*). Le BV de la rivière Nécopastic est principalement couvert de tourbes et de forêts ouvertes (**figure 2**). Les dépôts sous-jacents sont donc essentiellement composés de matières organiques décomposées, mais des dépôts de tills glaciaires, fluviaux, littoraux et marins (Mer de Tyrrell) constituent généralement la base de ces dépôts tourbeux (**figure 2**) (Payette et Rochefort, 2001 et Vincent, 1985).

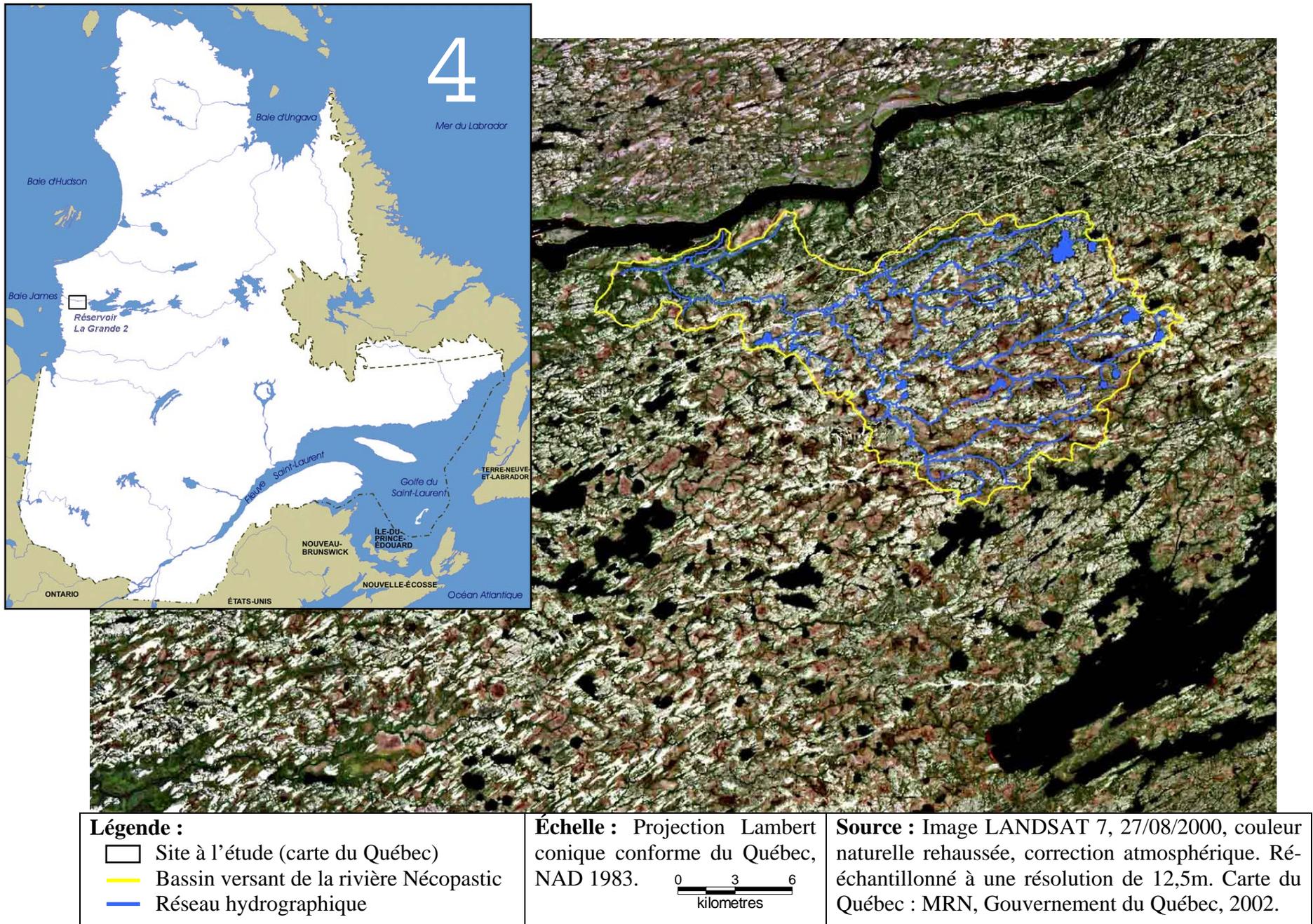
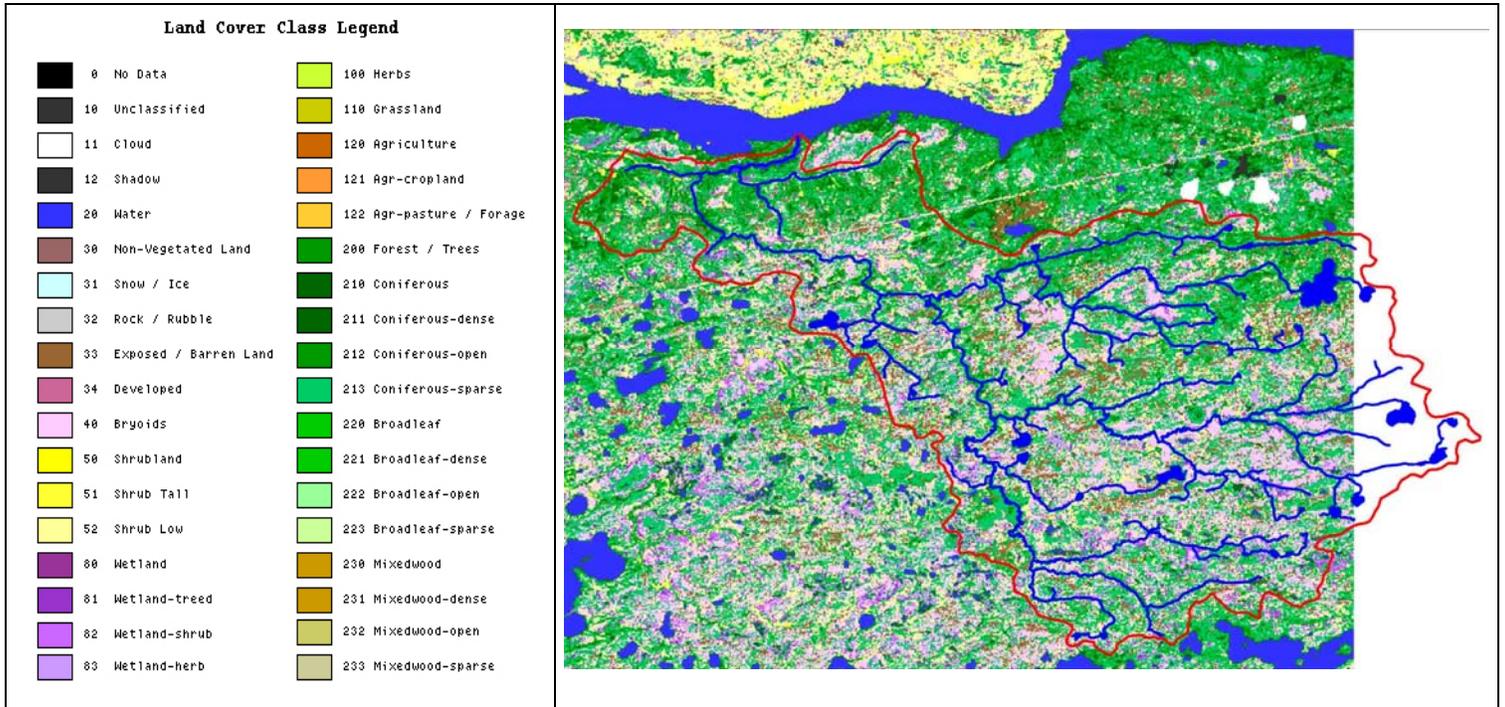
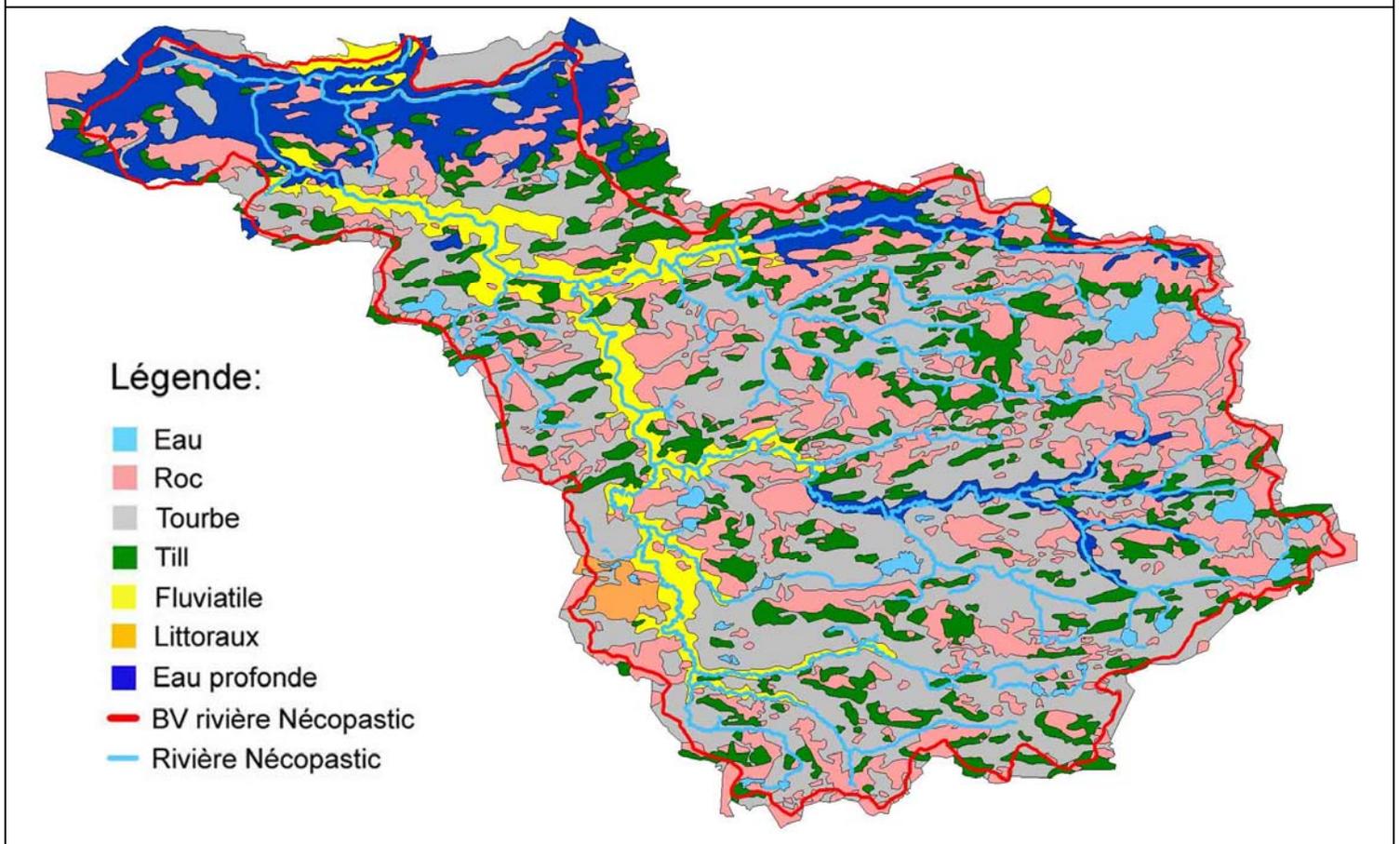


Figure 1. Cartes de localisation du bassin versant de la rivière Nécopastic.

2. Approche par la télédétection



Occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Nécopastic (EOSD, 2006).



Dépôts de surface sur le bassin versant de la rivière Nécopastic (Vincent, 1985).

Figure 2. Carte des dépôts de surface et d'occupation du sol du bassin versant de la rivière Nécopastic

Méthodologie

L'image et les pré-traitements

Une image Landsat 7 multispectrale datant du 20 août 2000 a été utilisée pour effectuer les classifications (**tableau 1**). D'une résolution spatiale de 30m x 30m, toutes les bandes spectrales de l'image originale ont été rééchantillonnées à 12,5 mètres pour superposer la bande panchromatique qui avait déjà été rééchantillonnée à cette résolution (originellement de 15m x 15m). Il importe de mentionner que la bande thermique n'a pas été utilisée. Le logiciel Geomatica10 de PCI Geomatics a été employé durant toutes les étapes de traitement et de pré-traitement. Pour des questions pratiques, l'image a été reprojctée selon la projection conique conforme de Lambert (LCC). Pour réduire les temps de traitements, l'image a été coupée et approximativement centrée sur le bassin versant de la rivière Nécopastic (**figure 1**). Une correction atmosphérique a également été effectuée en fonction de la position géographique du centre de l'image, de l'altitude moyenne et du climat régissant cette région (**tableau 1**). Plusieurs composés couleurs ont été testés afin de mieux visualiser les diverses entités spatiales. Les figures 6 et 7 présentent les meilleurs d'entre eux. Les contrastes ont été rehaussés suivant l'algorithme adaptatif fourni par le logiciel. L'indice de végétation (NDVI) a également été calculé et utilisé à des fins d'interprétation et de classification. Il a été calculé comme suit dans le *rastor calculator* de Geomatica10 :

$$NDVI = (100 * (PIR - R / PIR + R))$$

Voici une courte liste des étapes de pré-traitement :

- 1- UTM reprojcté en LCC
- 2- Correction atmosphérique
- 3- Reprojection à 12,5m
- 4- « Clipping »
- 5- NDVI

Tableau 1. Paramètres de l'image
LANDSAT 7. (CCRS Earth
Observation Catalogue, CEOCat).

Sat : 7 Sens : ETM+ P/R : 19/23 Cyc : 32 AOS&LOS : 155328 160522 RevNum : 7282 Date : 2000-AUG-27 15 :57 :54 Center : 53°06'00''N, 77°45'45''W Cloud : 2232 %cloud : 20 Statn : GATN Hdtid : GA420025 Scene Time : 2000-AUG-27: 15 :57 :54.240 Mean height : 0,2 km
--

Le tableau 2 présente une liste des abréviations fréquemment utilisées dans ce chapitre du rapport :

Tableau 2. Liste d'abréviations fréquemment utilisées.

tm1 = bleu = B
tm2 = vert = V ou G
tm3 = rouge = R
tm4 = proche infrarouge = PIR
tm5 = infrarouge moyen = MIR
tm6 = infrarouge thermique = TIR (non utilisé)
tm7 = infrarouge lointain = FIR
PAN = bande panchromatique
RGB = composé couleur naturelle = rouge-vert-bleu dans leur canal couleur respectif
Foresterie (composé couleur) = PIR dans le rouge, MIR dans le vert et R dans le bleu
ETM = image originale sans fusion
RC = fusion avec le <i>rastor calculator</i> de Geomatica10
Brovey = fusion avec la méthode Brovey

Fusion d'image

Plusieurs méthodes de fusion des bandes tm avec la bande panchromatique ont été tentées. La méthode de transformations des bandes bleue, verte et rouge (RGB) en intensité, teinte et saturation (IHS) comporte certaines lacunes. En effet, la méthode génère de la distorsion spectrale (Choi, 2006; Zhang, 2002; Liu, 2000; Carper et al., 1990). La figure 3 présente une abstraction du fonctionnement de cette transformation. Un second problème survient avec les images Landsat lors de la fusion des bandes dans

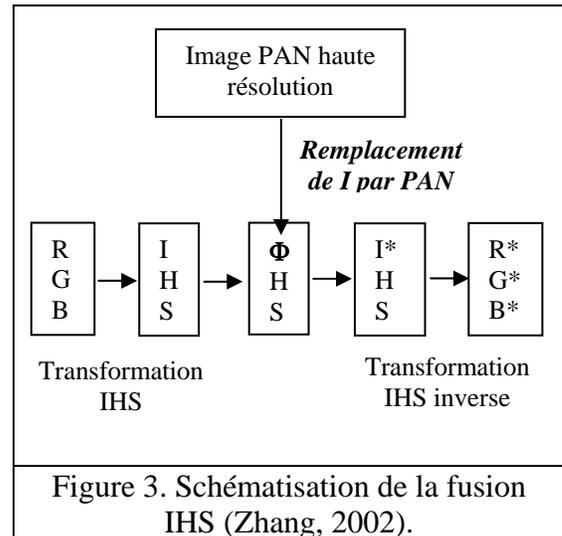
Numéro de bande (tm et etm+)	Résolution spectrale (µm)
1	0,45 à 0,515
2	0,525 à 0,605
3	0,63 à 0,69
4	0,75 à 0,90
5	1,55 à 1,75
6	10,40 à 12,50
7	2,09 à 2,35
PAN	0,52 à 0,90

les longueurs d'onde du visible (RGB) avec la bande

panchromatique. La bande tm1 (bleu) n'étant pas incluse dans le domaine spectral du capteur panchromatique, des distorsions spectrales supplémentaires sont générées (**tableau 3**). Le même phénomène s'observe pour les images SPOT. La transformation s'applique donc mieux aux images IKONOS ou Quickbird (Choi, 2006; Zhang, 2002; Liu, 2000; Carper et al., 1990). Pour contrer ces effets, Carper et al. (1990) proposent de remplacer l'intensité (I) non pas par la bande panchromatique directement, mais avec une variable substitutive (V) selon l'équation suivante :

$$V = (2PAN + PIR) / 3$$

Cette solution est applicable pour les images SPOT où la bande panchromatique couvre totalement la bande verte, rouge et partiellement la bande du proche infrarouge (Caloz et Collet, 2001). Il est donc difficile de l'appliquer sur les images Landsat. Les tentatives n'ont pas été très



concluantes. Pour les images Landsat, Choi (2006) propose une méthode simple de remplacement de l'intensité par la fonction suivante :

$$I_{new} = (PAN + I) / 2.$$

D'autres variantes sont également proposées par ce même auteur, mais les résultats ne sont pas convaincants.

Une méthode simple a donc été développée à partir de simple calcul dans le calculateur de matrice (*rastor calculator ou RC*) du logiciel Geomatica10. La bande panchromatique a simplement été proportionnellement multipliée aux bandes incluses dans son domaine spectral (**tableau 3**). Voici les calculs effectués :

$$\begin{aligned} tm2 = vert & \quad \text{donc } V = tm2 * PAN * 0.211 \text{ (représente 21,1\% du domaine spectral PAN)} \\ tm3 = rouge & \quad \text{donc } R = tm3 * PAN * 0.158 \text{ (représente 15,8\% du domaine spectral PAN)} \\ tm4 = PIR & \quad \text{donc } PIR = tm4 * PAN * 0.395 \text{ (représente 39,5\% du domaine spectral PAN)} \end{aligned}$$

Pour les autres bandes, les diagrammes de dispersion des valeurs de réflectance ont été générés et les équations linéaires correspondant aux meilleurs facteurs de corrélation ont été conservées (**figure 4**). Ces équations ont été incluses dans le calcul des bandes à fusionner tel que défini par ces équations :

$$\begin{aligned} tm1 = bleu & \quad \text{donc } B = 0,71 * V - 3,73 \text{ où } V = tm2 * PAN * 0.211 \\ tm5 = MIR & \quad \text{donc } MIR = 0,79 * PIR + 6,78 \text{ où } PIR = tm4 * PAN * 0.395 \\ tm7 = FIR & \quad \text{donc } FIR = 1,15 * R + 10,45 \text{ où } R = tm3 * PAN * 0.158 \end{aligned}$$

Les résultats de cette méthode sont présentés aux figures 6 et 7. Des distorsions spectrales sont également visibles, mais les proportions sont nettement meilleurs qu'avec les autres méthodes (**figure 5**).

La transformations de Brovey a également été testée pour fusionner les bandes tm à la bande panchromatique (Gillespie et al., 1987 dans Liu, 2000). La méthode est simple et s'applique individuellement sur chaque bande. Il suffit de multiplier chaque bande par la bande panchromatique qui a préalablement été divisé par l'intensité (I) défini comme suit :

$$\begin{aligned} & \text{Exemple avec la bande } tm1 \text{ (bleu = } B) \\ B_{fuse} & = B * PAN / I \text{ où } I = (R + G + B) / 3 \end{aligned}$$

La figure 5 montre l'efficacité de la technique par la similarité proportionnelle du spectre avec l'image originale (ETM). Les résultats de cette méthode sont présentés aux figures 6 et 7.

Finalement Geomatica10 offre un algorithme de fusion (*pansharpening*) adaptable à plusieurs types d'images, mais la version 10 éducative ne permet pas cette fonctionnalité. La fonction utilise la méthode décrite par Zhang (2002). Elle n'intègre malheureusement pas les bandes en-dehors du domaine spectral de la bande panchromatique. Cette méthode a été tentée sur ces bandes sans grand succès. Les fusions de Brovey et du RC satisfont les besoins encourus dans le cadre de la présente étude.

2. Approche par la télédétection

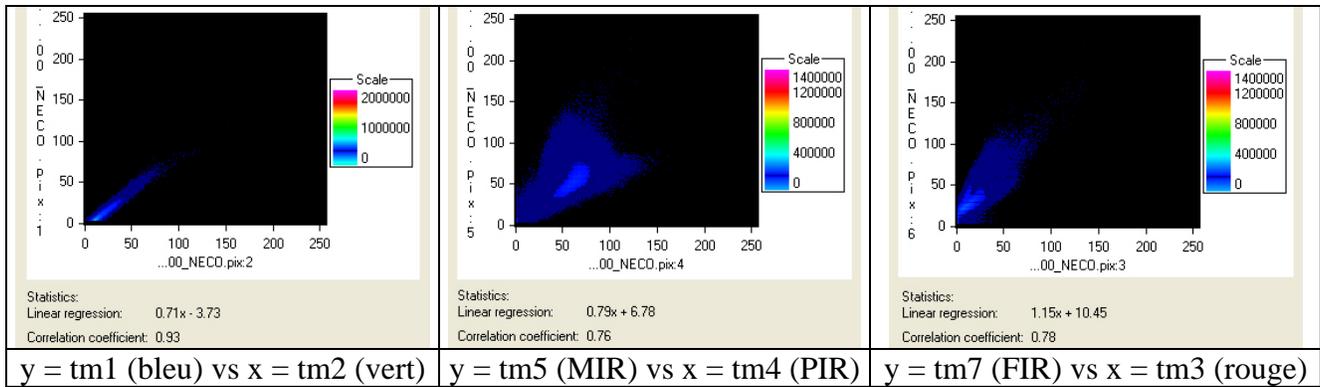


Figure 4. Diagramme de dispersion des valeurs de réflectance pour les fusions d'image RC.

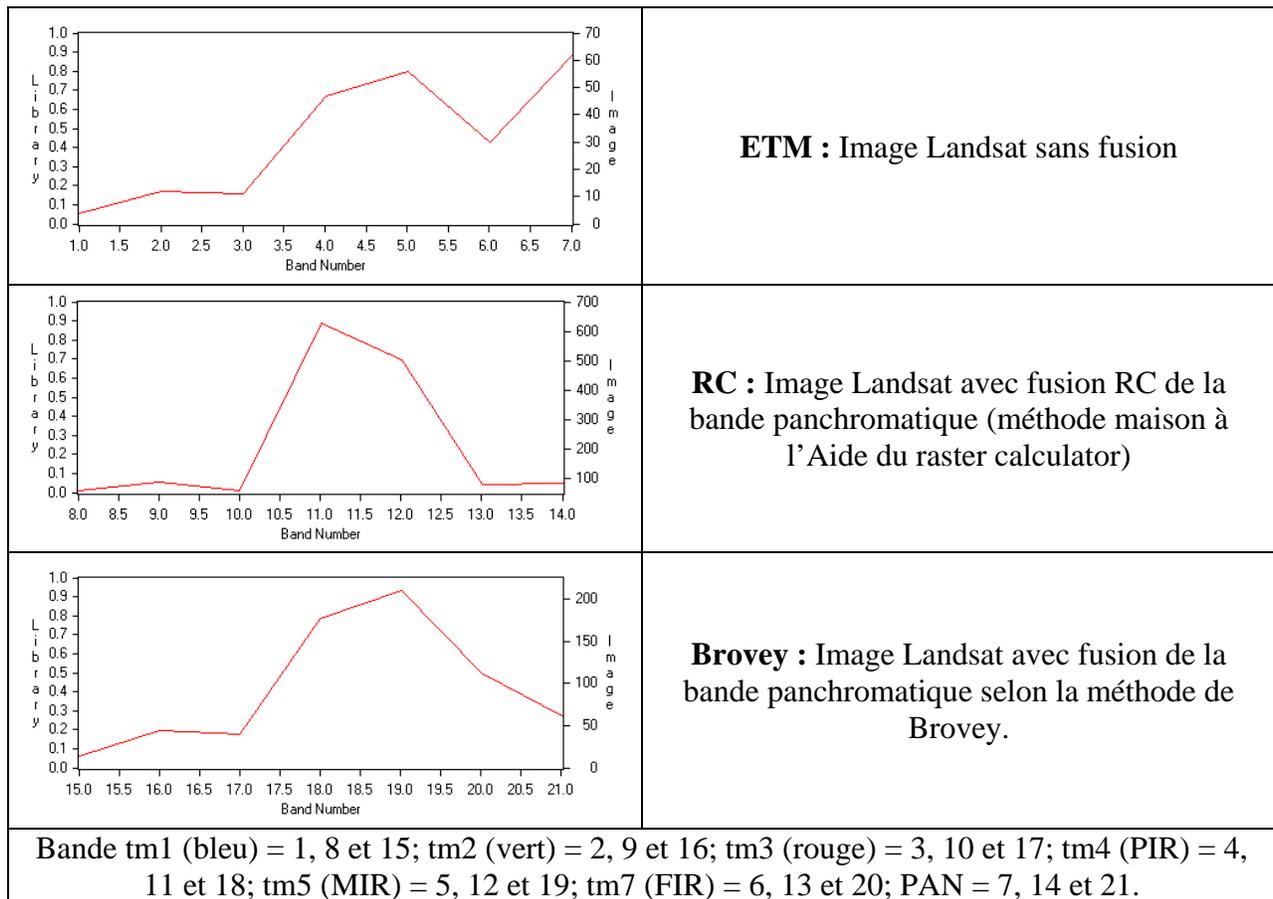


Figure 5. Graphiques des spectres de réflectance des images multispectrales originales et fusionnées.

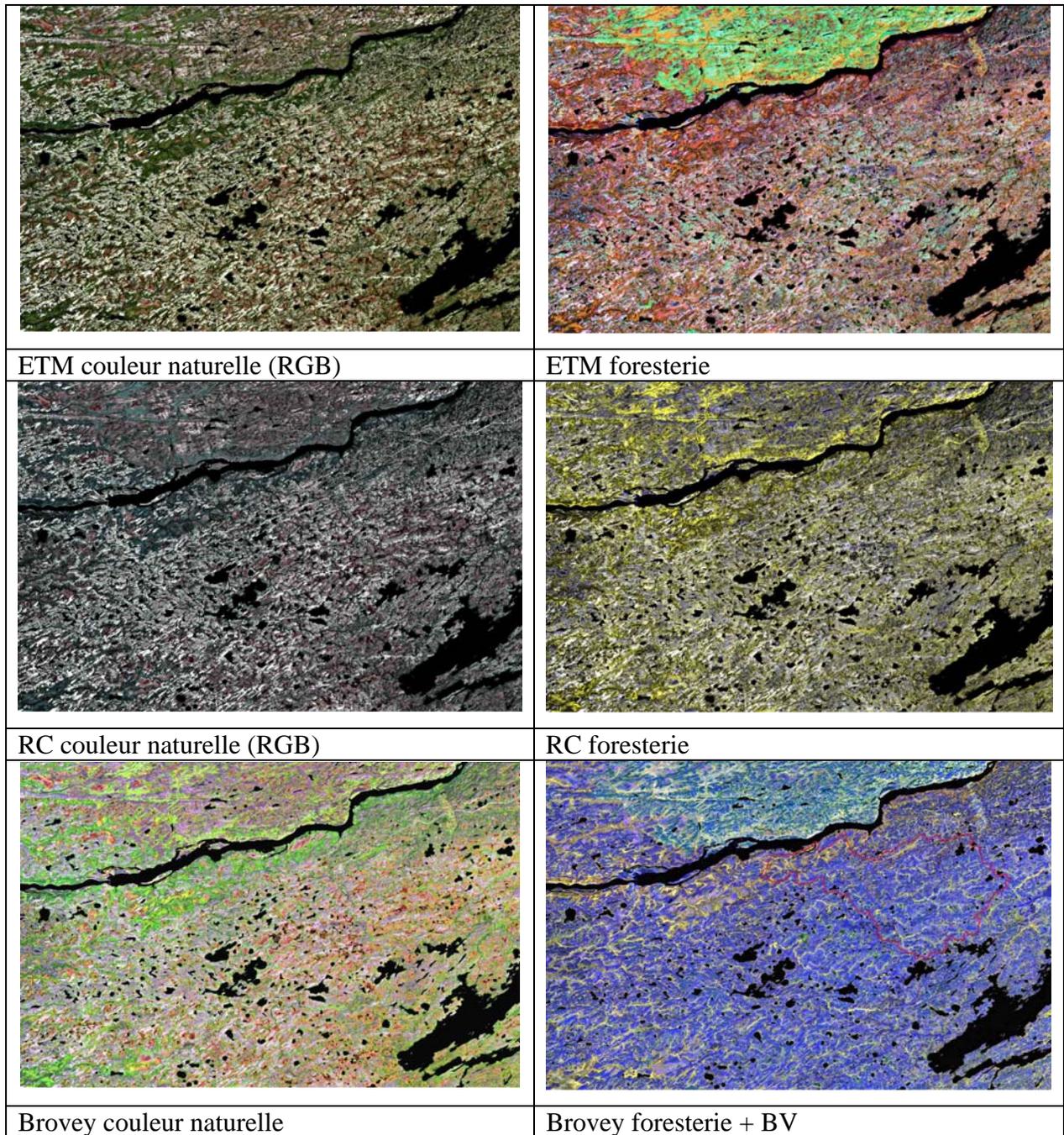


Figure 6. Composés couleurs d'intérêts.

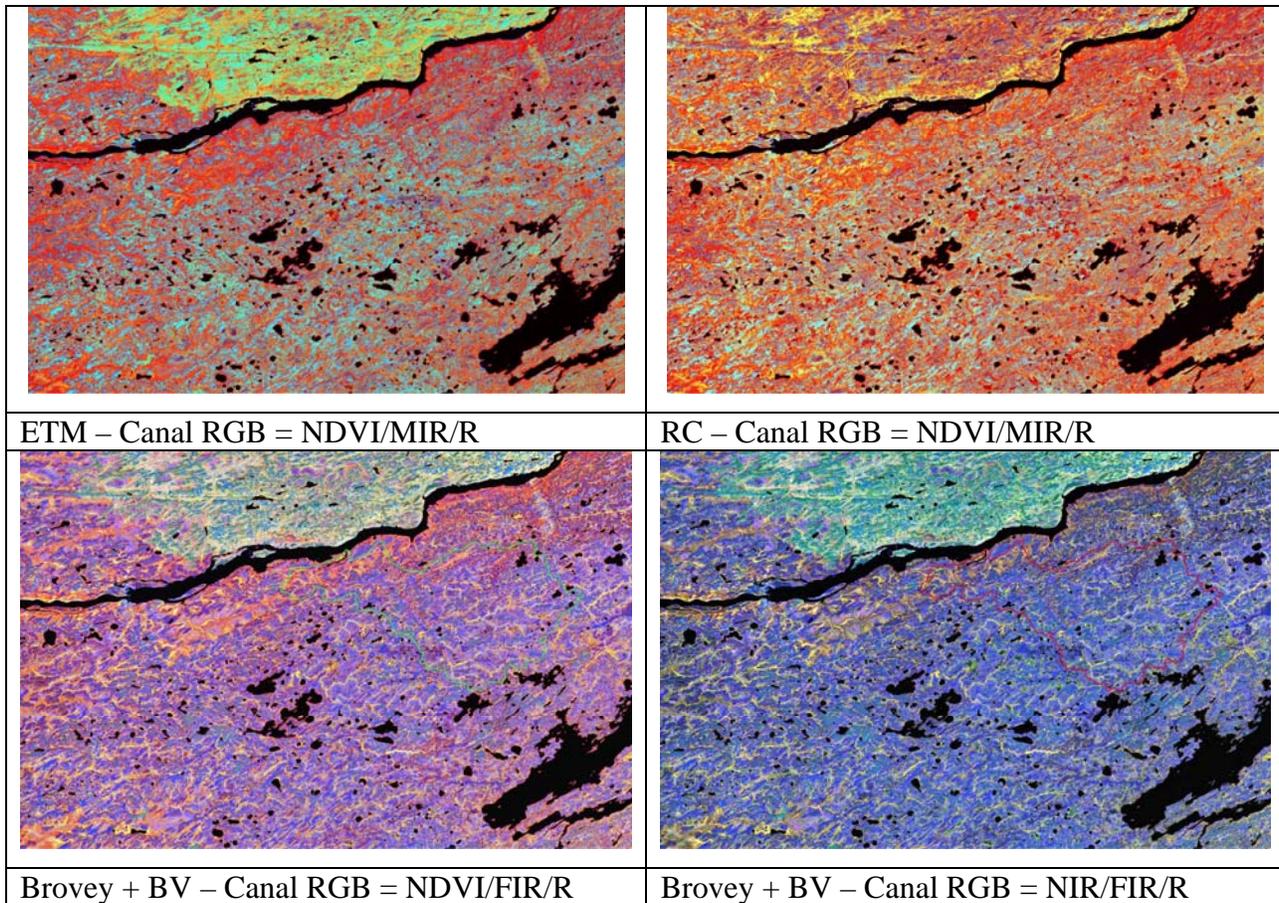


Figure 7. Composés couleurs non conventionnelles.

La classification

Une première classification non-supervisée a d’abord été effectuée afin de comparer les connaissances du terrain avec les classes suggérées par ce premier traitement. Ensuite des sites d’entraînement et de validation ont été déterminés. Afin de simplifier l’interprétation, de minimiser les erreurs et en fonction du but premier de cette étude (connectivité des tourbières ombrotrophes au réseau hydrographique) sept classes ont été définies. L’eau devait évidemment faire partie de ces classes. Malheureusement, la résolution spectrale des images Landsat (30m ou 12,5m après fusion) ne permet pas la visualisation de la plupart des cours d’eau de la région qui s’élargisse rarement au-dessus du mètre. Les fens se distinguent bien des bogs par leur végétation herbacée dominante et leurs mares d’eau omniprésente. Ces deux derniers formant chacun une classe a part entière. La forêt est également bien visible et distinctive. La végétation riveraine dominée par les feuillus (*Alnus crispa* et *A. rugosa*) ressort nettement mieux que toutes autres classes dans le PIR et sous le NDVI. C’est un élément important du paysage puisqu’il permet de cibler les exutoires potentiels des tourbières. Pour cette raison, une classe propre lui a été attribuée. Les affleurements rocheux, les berges sableuses, les routes ont été rassemblés sous la catégorie affleurement. Ils constituent la classe minérale (affleurement) malgré qu’il soit possible de séparer les routes et les berges des affleurements rocheux qui sont généralement couvert de lichen. Les brûlis forment la dernière classe. Il est parfois difficile de différencier un brûlis ancien avec une forêt intacte. Les classifications supervisées ont été effectuées selon le

maximum de vraisemblance avec toutes les bandes disponibles (incluant le NDVI et excluant la bande panchromatique puisqu'elle est déjà intégrée dans les données fusionnées). La technique s'appuie sur des principes statistiques de probabilité d'occurrence ce qui fait d'elle l'une des meilleures méthodes de classification à ce jour (Caloz et Collet, 2001).

Les sites de validation ont été choisis par interprétation visuelle des divers composés couleurs de l'image multispectrale Landsat-7. Pour enrichir l'interprétation, les spectres de réflectance de divers peuplements, espèces de plantes et natures de substrat (mousses brunes, lichens, conifères, feuillus, roches) ont également été analysés (**figure 8**) (Bryant et al., 2003; Clark et al., 2003; Bubier et al., 1997). De plus, les données de terrain de M. Garneau et son équipe (2004) ont servi à interpréter et cibler plusieurs tourbières (fens et bogs) et forêts (forêts sur tourbe, forêts sur lichen) de la région. La superposition du réseau hydrographique sur les images assurèrent également une meilleure localisation et interprétation des sites à valider.

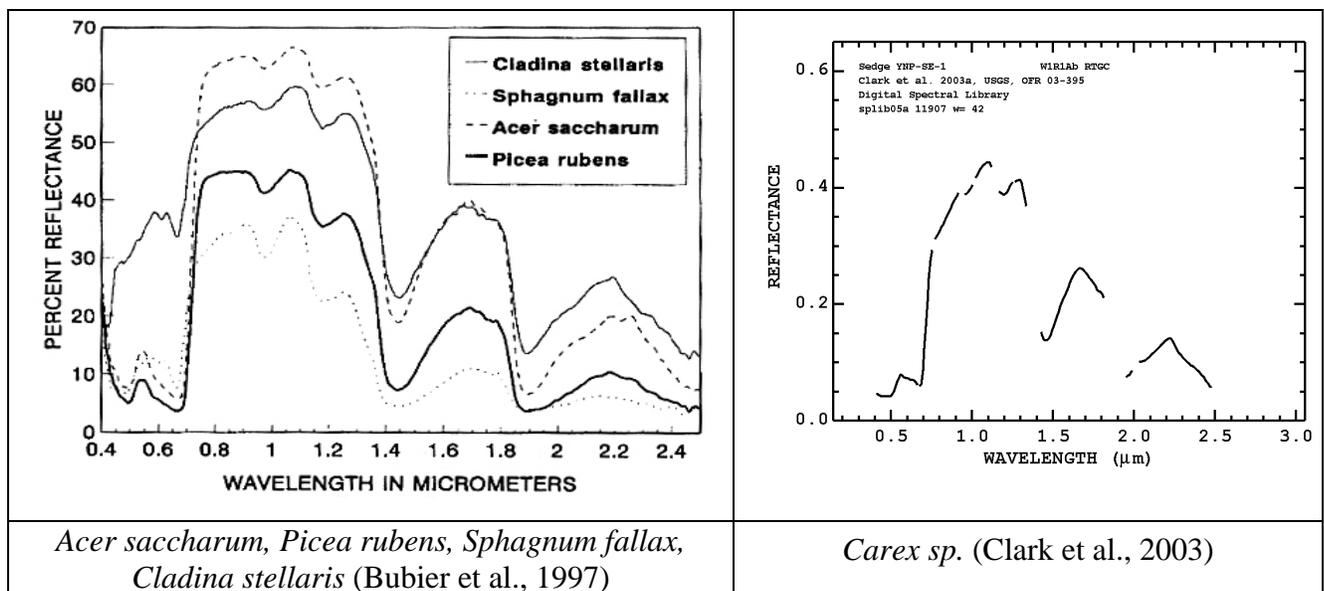


Figure 8. Exemples choisis de divers types de spectres de réflectance.

Résultats

Il est premièrement important de mentionner que la classification à partir des images fusionnées selon la méthode du *rastor calculator* (RC) n'est pas présentée. Les résultats étant inférieurs aux deux autres séries d'images. La figure 9 montre les résultats des deux classifications retenues, ainsi que les résultats filtrés à l'aide d'un filtre modal de 5x5 pour lisser l'image et éliminer les effets de chatoulements peu représentatifs de la réalité. La figure 10 présente un zoom sur les classifications de la figure 9. Il est visuellement possible de constater que les deux classifications sont comparables. Les classes d'eau, des fens, des bogs, de brûlis et d'affleurement sont très similaires. La différence réside principalement entre la classe de forêt et de végétation riveraine. La résolution plus fine des images fusionnées par la méthode de Brovey génère de fine bande de végétation permettant de localiser les ruisseaux avec précision. La classification de l'image originale tend à exagérer ces bandes de végétation, ce qui est peu réaliste (voir la photo en page couverture). En effet, la bande de feuillus le long des cours d'eau est mince et généralement suivi

de forêt de conifère sur tourbe et ensuite de tourbière. La rivière Nécopastic n'est évidemment pas classifiée dans la classe eau puisqu'elle s'élargie rarement au-delà de cinq mètres. Il est néanmoins possible de discerner sa trajectoire, ainsi que celle de ces petits affluents par les bandes de végétation riveraine. Le tableau 4 et le tableau 5 présente les matrices de confusion et les résultats statistiques reliés aux deux classifications retenues. Finalement, la figure 11 montre, sous forme de diagramme, les pourcentages de recouvrement de chacune des classes sur le BV de la Nécopastic. Suite à ces résultats, il est possible de constater qu'il y a confusion évidente entre la forêt et la végétation riveraine. Les fens se confondent parfois avec ces deux types de végétation, mais il demeure qu'ils sont bien classifiés 90% du temps. La classification des autres classes semble exacte dans plus de 92% des cas pour les deux classifications. Selon les deux classifications, les bogs couvrent entre 40 et 42% du BV de la Nécopastic. La proportion de végétation riveraine est plus faible pour la classification de Brovey et la forêt recouvre une plus grande proportion du territoire. Cette dernière affirmation est en accord avec ce qui a été observé sur les figures 9 et 10. La proportion de fens est plus grande pour cette classification (Brovey). D'après les images aériennes photointerprétées du BV de la rivière Nécopastic, les données de terrain de M. Garneau et son équipe (2004) et ce qui est visuellement observé sur les images Landsat-7, ce pourcentage de recouvrement par les fens semble davantage correspondre à la réalité. Cette dernière classification semble donc mieux représenter la réalité que la classification effectuée à partir des images non-fusionnées. Il est cependant impossible d'affirmer que la classification est significativement plus efficace sous cette nouvelle résolution. Visuellement, il semble qu'elle soit meilleure et plus précise. Par contre, les exactitudes moyenne et globale sont respectivement plus faibles de 1,37% et 0,44% pour la classification dite de Brovey. Il est possible qu'une plus fine résolution engendre une augmentation du chatoiement ce qui a pour effet de multiplier le nombre de pixels possiblement mal classifiés à l'intérieur d'un site de validation ou d'un territoire donné. Le filtrage de l'image classifiée devient donc indispensable pour minimiser ces effets trompeurs.

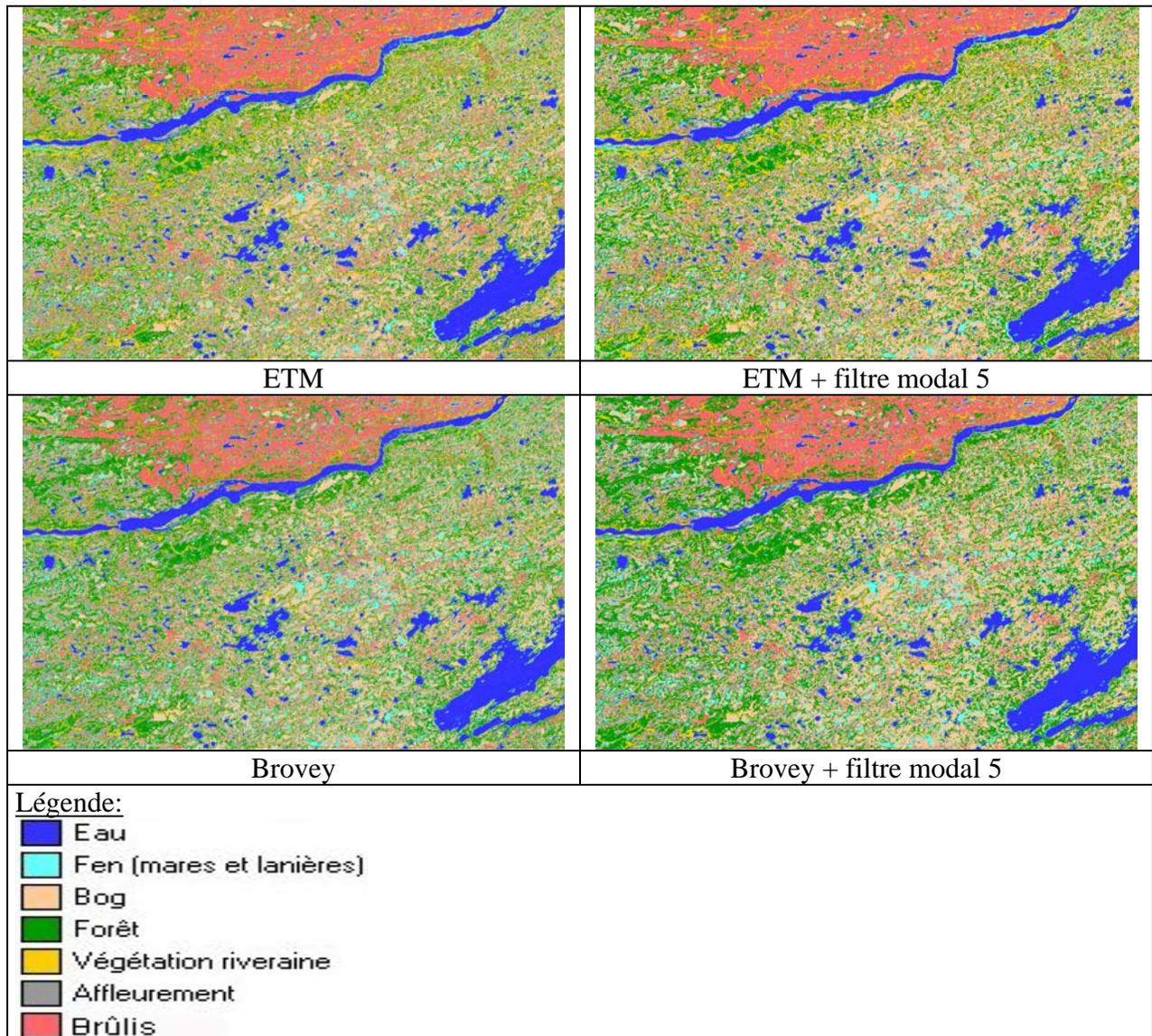


Figure 9. Résultats des classifications.

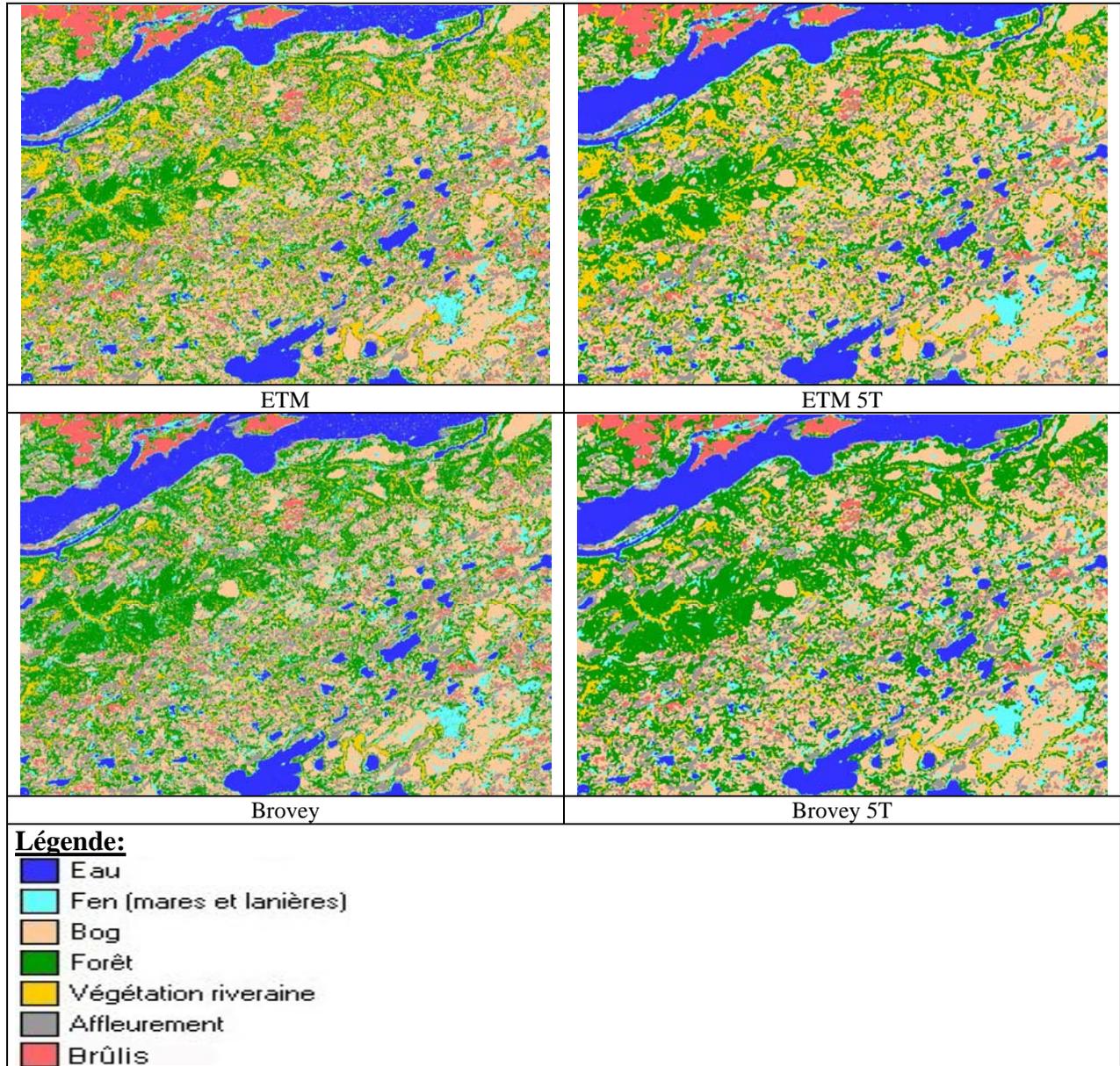


Figure 10. Résultats des classifications (zoom sur une portion du territoire).

Tableau 4. Matrice de confusion et rapports de surface pour la classification ETM.

Matrice de confusion (image totale)

Classes	Pixels	Eau	Fen (mares et lanières)	Bog	Forêt	Végétation riveraine	Affleurement	Brûlis
Eau	36134	99,30	0,70	0	0	0	0	0
Fen (mares et lanières)	6000	0,78	90,02	0,10	3,97	3,62	0	1,52
Bog	5340	0	0,17	95,64	1,50	0	2,51	0,19
Forêt	7341	0	1,20	0,84	67,54	29,97	0	0,45
Végétation riveraine	4908	0	1,55	0,39	9,41	87,73	0	0,92
Affleurement	1144	0	0	0,35	0	0	99,21	0,44
Brûlis	13640	0,04	1,02	0,30	0,75	0,84	0,56	96,48

Exactitude moyenne 90,85%

Exactitude globale 93,88%

Rapport de surface (image totale)

Classes	Aire (%)	Pixel	Aire (m2)	Aire (km2)
Eau	8,23	1316562	205712813	205,713
Fen (mares et lanières)	6,91	1104565	172588281	172,588
Bog	28,65	4580416	715690000	715,690
Forêt	22,49	3595315	561767969	561,768
Végétation riveraine	10,36	1656161	258775156	258,775
Affleurement	8,63	1380131	215645469	215,645
Brûlis	14,73	2355350	368023438	368,023
Total	100	15988500	2498203125	2498,203

Rapport de surface (BV Nécopastic)

Classes	Aire (%)	Pixel	Aire (m2)	Aire (km2)
Eau	1,75	26630	4160938	4,161
Fen (mares et lanières)	6,72	102406	16000938	16,001
Bog	43,37	661197	103312031	103,312
Forêt	23,61	359997	56249531	56,250
Végétation riveraine	9,04	137838	21537188	21,537
Affleurement	8,66	132036	20630625	20,631
Brûlis	6,85	104495	16327344	16,327
Total	100	1524599	238218594	238,219

2. Approche par la télédétection

Tableau 5. Matrice de confusion et rapports de surface pour la classification Brovey.

Matrice de confusion (Image totale)

Classes	Pixels	Eau	Fen (mares et lanières)	Bog	Forêt	Végétation riveraine	Affleurement	Brûlis
Eau	36134	99,27	0,46	0	0	0	0,27	0
Fen (mares et lanières)	6000	0,55	87,33	0,10	5,97	4,32	0,30	1,43
Bog	5340	0	1,33	95,37	1,70	0	1,48	0,11
Forêt	7341	0	1,74	0,82	87,74	9,60	0	0,10
Végétation riveraine	4908	0	1,65	0,31	30,83	67,07	0,06	0,08
Affleurement	1144	0	0	0,79	0	0	97,47	1,75
Brûlis	13640	0,04	3,71	0,39	1,69	1,70	0,37	92,10

Exactitude moyenne 89.48%

Exactitude globale 93.44%

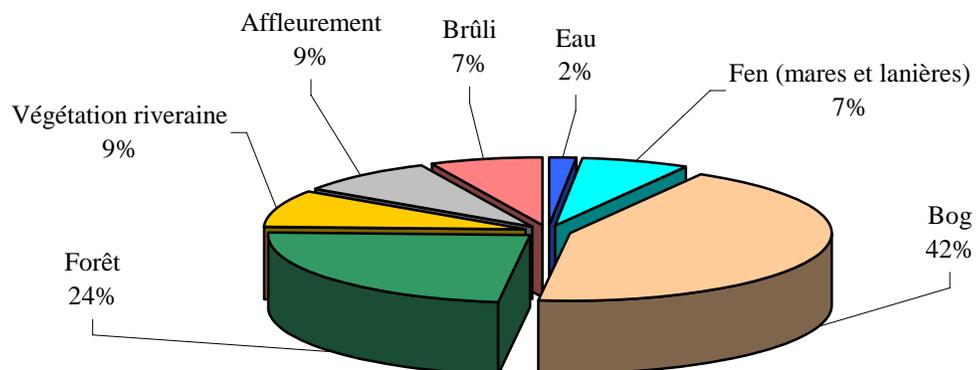
Rapport de surface (image totale)

Classes	Aire (%)	Pixel	Aire (m2)	Aire (km2)
Eau	8,16	1304039	203756094	203,756
Fen (mares et lanières)	9,97	1594704	249172500	249,173
Bog	27,09	4330586	676654063	676,654
Forêt	26,54	4242680	662918750	662,919
Végétation riveraine	6,51	1040635	162599219	162,599
Affleurement	9,05	1446777	226058906	226,059
Brûlis	12,69	2029079	317043594	317,044
Total	100	15988500	2498203125	2498,203

Rapport de surface (BV Nécopastic)

Classes	Aire (%)	Pixel	Aire (m2)	Aire (km2)
Eau	1,70	25878	4043438	4,043
Fen (mares et lanières)	10,65	162439	25381094	25,381
Bog	40,97	624583	97591094	97,591
Forêt	26,23	399840	62475000	62,475
Végétation riveraine	5,50	83832	13098750	13,099
Affleurement	8,83	134665	21041406	21,041
Brûlis	6,12	93362	14587813	14,588
Total	100	1524599	238218594	238,219

Pourcentage de recouvrement des diverses classes dans le bassin versant de la rivière Nécopastic (Maximum de vraisemblance - ETM).



Pourcentage de recouvrement des diverses classes dans le bassin versant de la rivière Nécopastic (Maximum de vraisemblance - Brovey).

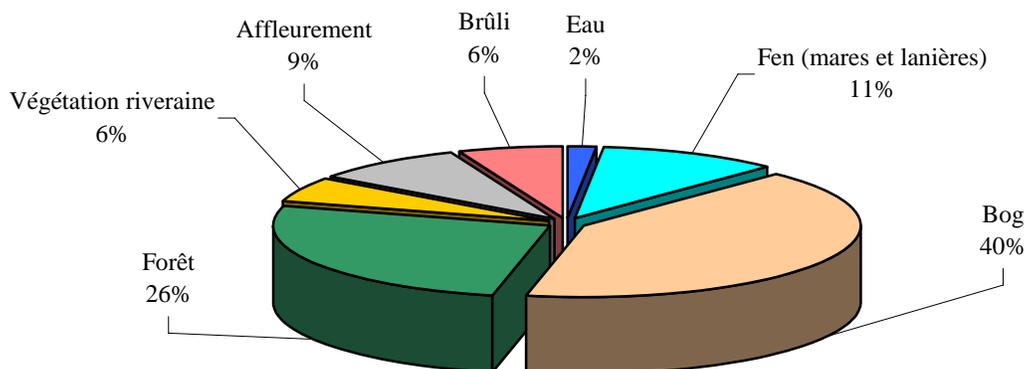


Figure 11. Pourcentage de recouvrement des diverses classes pour les deux séries d'images retenues.

Discussion

Télédétection et connectivité

À la lueur de ces classifications, il incombe de discuter des possibilités de générer des images de la connectivité des tourbières au réseau hydrographique de la rivière Nécopastic. Quinton et al. (2003) propose une méthode simple. Il suggère de prendre tous les pixels classifiés comme eau et fen, et les regrouper dans une classe « connecté au réseau » par exemple. Il suffit ensuite de générer un algorithme qui évalue le voisinage (voisinage de Moore = 8 pixels) de chaque pixel classé comme un bog. Si un pixel de la classe « connecté au réseau » est retrouvé dans ce voisinage, le pixel central (bog) sera considéré comme appartenant à cette nouvelle classe. Après plusieurs itérations, les pixels isolés seront classifiés comme « non-connecté au réseau ». Dans le cas présent, il serait possible d'inclure préalablement la végétation riveraine dans la classe « connecté au réseau ». Afin d'améliorer la méthode, il serait possible de superposer et d'ajouter le réseau hydrographique en format matriciel, d'inclure ces nouveaux pixels dans la classe eau et les connecter au réseau. En raffinant ainsi le réseau hydrographique (peu visible sur les images Landsat par manque de finesse dans la résolution), le modèle serait certainement plus représentatif de la réalité. Les classes de forêt, brûlis et affleurement devraient être laissées comme tel afin de strictement évaluer la connectivité des tourbières ombrotrophes (Annexe 4). En connectant ces trois classes, il est évident que tous les pixels de bog seront connectés. L'équipe de Quinton et al. (2003) ont utilisé des images Ikonos de haute résolution spatiale (4m x 4m). Ils affirment que l'augmentation de la résolution d'une image Landsat (30m x 30m) vers une image Ikonos (4m x 4m) n'a pas changé considérablement l'estimation des portions connectées du territoire. Il semblait pourtant évident qu'avec une résolution de 12,5 mètres l'approximation serait grande et le niveau de connectivité réelle serait peu significatif. Quoi qu'il en soit, la connectivité observée avec une telle procédure est physique et non hydraulique. En effet, même avec des images de haute résolution, la connectivité observée demeure superficielle. Les écoulements de surface seront possiblement bien évalués, mais dans le cas des tourbières où l'écoulement s'effectue principalement dans les couches sous-jacentes (Payette et Rochefort, 2001), le modèle serait biaisé. Il est aussi connu que les apports d'eau épisodiques (pluies) dans les tourbières ombrotrophes génèrent des sorties d'eau également épisodiques (Payette et Rochefort, 2001). Il est donc contraignant d'évaluer la connectivité de ces tourbières à l'aide d'image satellite lorsque l'écoulement de surface survient essentiellement après de fortes précipitations ou suite à la fonte des neiges.

Les autres approches en télédétection

Une première approche à considérer pour l'amélioration de la résolution des images serait l'acquisition de nouvelles images. Le tableau 6 présente un aperçu des images disponibles, leurs résolutions, leurs fauchées et leurs coûts approximatifs. Le prix des images varie substantiellement en fonction des caractéristiques demandées (angle de visée, correction atmosphérique, orthorectification). Elles permettraient probablement de mieux cibler les exutoires potentiels des tourbières ombrotrophes tout en raffinant la qualité de la classification et en précisant le pourcentage du BV qui est possiblement déconnecté. Les résultats de

classification de Ramanathan et al. (2004) suggèrent qu'une image hyper-spectrale de haute résolution spatiale a été nécessaire pour identifier les communautés végétales. Ces images leurs ont permis d'accroître l'efficacité de leurs classifications. Rappelons par contre que Quinton et al. (2003) ont démontré que l'utilisation des images à haute résolution du satellite Ikonos n'a pas amélioré significativement le modèle de connectivité dans leur région d'étude. Rappelons également qu'une série de quatre images Quickbird serait nécessaire pour couvrir la totalité du BV de la rivière Nécopastic et six dans le cas d'images Ikonos. Rappelons finalement que peu importe la finesse de la résolution de l'image, seule la connectivité physique des tourbières pourra être observée.

Tableau 6. Caractéristique générale des images de divers satellites.

Caractéristiques	Quickbird	Ikonos	Spot 5	Aster
Résolution	N&B 61m Couleur 2,44m	N&B 1m Couleur 4m	N&B 2,5m et 5m Couleur 5m et 10m	Couleur 15m
Fauchée	16,5 km	11 km	60 à 120 km	60 km
Coût approximatif	4000 à 6000 \$US	2400 à 4000 \$US	2400 à 5400 Euro	80 \$US

Dans un deuxième ordre d'idée et d'après les recherches de Racine et al. (2005), il semble que les images Radar ont le potentiel de pénétrer les sols tourbeux sur quelques centimètres permettant de détecter les changements hydrologiques à l'intérieur des tourbières où la végétation est basse et de faible densité. En effet, ils ont observé des changements dans le signal de retour des ondes radar de la bande C sous des conditions hydrologiques extrêmes. Une faible variation du niveau de la nappe phréatique ne serait pas suffisant pour détecter des changements au niveau de l'humidité de surface. Par contre, la différence entre une nappe phréatique affleurante suite à la fonte des neiges et un niveau estival minimal engendrerait un important changement hydrologique dans les premiers centimètres de la tourbe aisément détectable sur les images radar. De tels changements et une telle méthode peuvent s'avérer intéressants pour détecter les tourbières et estimer les moments où le niveau de la nappe phréatique serait suffisamment bas pour que la tourbière soit déconnectée du réseau hydrographique. L'effet d'une pluie, même faible, avant le passage du satellite peut malheureusement être suffisant pour humidifier la surface du sol tourbeux et induire une augmentation de la réflectivité des ondes radar menant à des possibles erreurs d'interprétation (Ulaby et al., 1982 par Racine et al., 2005). Le potentiel des images radar permet également de classier et détecter les tourbières ombrotrophes (Bernier et al., 2003; Baghdadi et al., 1999). La production d'images de texture à partir des images radar permet la séparation des tourbières des autres types d'occupation du sol (Bernier et al., 2003). La méthode semble toutefois moins efficace qu'avec les images multispectrales normalement utilisées pour la classification et la cartographie des tourbières (Seuthé et Buteau, 1994; Service de la cartographie et Service géologique de Québec, 1989).

Depuis peu de temps, il existe une technique de classification plus performante et mieux adaptée à la complexité des espaces naturelles. La classification orientée objet proposée par Definiens (e-cognition) permet de classier et cartographier des images selon une multitude de critères non-disponibles dans les logiciels typiques de traitement d'image. En plus des critères de séparabilité basés sur la ressemblance spectrale des pixels avec une classe donnée, ce logiciel permet de séparer les classes selon des critères de forme, de taille, de frontière commune et bien d'autres spécificités. M. Karem Chokmani et Mme Maria Dissanska travaillent présentement sur le traitement d'image de la région à l'étude en vue de classier avec plus de précision les entités

surfaciques du territoire. Cette classification ne permettra pas de déterminer la connectivité hydraulique des tourbières ombrotrophes, mais raffinera certainement celles présentées dans ce rapport et permettra de mieux cibler les tourbières susceptibles de se déconnecter du réseau hydrographique. Ramanathan et al. (2004) ont étudié diverses méthodes de classification et concluent que la plus efficace provient d'une approche orientée objet à l'aide d'images hyperspectrales de haute résolution. Ils ont également obtenu de bons résultats avec cette approche, mais avec des images Landsat fusionnées avec la bande panchromatique de 15 mètres de résolution (**tableau 7**).

Tableau 7. Exactitude pour différente classification (Ramanathan et al., 2004).

	CIR 1 m O-O	CIR 1 m ISO- DATA	CIR 1 m Max- Like	LSAT 15 m ISO- DATA	LSAT 15 m Max- Like	LSAT 15 m Pan O-O	LSAT 15 m Seasonal Matrix	LSAT 30 m O-O	HYPER- SPECTRAL CASI 60 cm O-O	HYPER- SPECTRAL CASI 60 cm S.A.M.
Overall Accuracy	69.6	79.2	57.9	59.7	64.0	90.7	67.3	73.9	91.7	88.4
Wetland Producers Accuracy	66.0	60.0	75.0	62.2	70.0	73.7	77.78	58.8	94.6	67.7
Wetland Users Accuracy	66.7	75.0	36.0	46.0	63.6	66.7	46.67	50.0	86.7	58.46
Kappa	0.649	0.79	0.49	0.530	0.552	0.888	0.622	0.667	0.904	0.845

O-O: Object-Oriented Classifier
 ISODATA: Unsupervised Classification, 120 Initial Classes
 Max-Like: Maximum Likelihood Algorithm
 S.A.M.: Spectral Angle Mapper Algorithm

Les modèles numériques d'élévation sont régulièrement utilisés pour modéliser les directions d'écoulement dans les bassins hydrographiques. Les courbes de niveau peuvent être utilisées pour générer ces modèles. La région étudiée présente un relief relativement plat car moins de 150 mètres d'écart existe entre le point le plus bas et le plus haut. Les cartes les plus précises de la région présentent la topographie à l'aide de courbe de niveau aux 20 mètres. Compte tenu que la variabilité d'altitude dans plusieurs tourbières et ses exutoires varie de moins de 20 mètres, le modèle serait incapable d'identifier efficacement les directions d'écoulement. Des modèles peuvent également être générés à partir des photographies aériennes. Pour couvrir le BV de la rivière Nécopastic, 188 photographies au 1 :10 000 sont nécessaires. La numérisation des images coûte entre six et huit dollars l'image et un stagiaire géomaticien serait nécessaire pour assembler, sous la forme d'une mosaïque, la série de photo. La résolution spatiale des images numérisées serait d'environ 43 centimètres. Cette mosaïque pourrait probablement être utilisée à des fins de classification à partir d'images de texture ou encore à l'aide d'une approche orientée objet. Pour générer un modèle numérique d'altitude, un minimum de quatre points d'altitude serait nécessaire par image. Une campagne de terrain serait donc nécessaire. La précision du modèle serait inférieure au mètre. Il serait également possible de générer un modèle numérique d'élévation de précision décimétrique à partir d'imagerie LiDAR, mais le coût avoisinerait les 300 000 dollars. De plus, les modèles générés par le LiDAR ne sont pas sans artefact, surtout dans les régions

boisées (Meng et al., 2006). Ils insistent également sur le fait que l'élimination de ces artefacts diminue la précision du modèle. Un modèle précis serait certainement un atout précieux, mais il serait convenable de penser que l'écoulement des eaux d'un BV n'est pas simplement régi par la topographie. La surface topographique d'une tourbière n'est pas une exacte représentation de la topographie des dépôts sous-jacents et encore moins de la roche mère (Ingram, 1983). Le tableau 8, tiré de Devito et al. (2005), tente de hiérarchiser les principaux facteurs de contrôle du cycle de l'eau.

Tableau 8. Hiérarchie des facteurs de contrôle du cycle de l'eau (Devito et al., 2005).

Table I. Hierarchical classification to generalize the dominant controls on water cycling and indices to define effective HRUs. The specified order (i.e. A to E) should be followed to develop a conceptual framework to determine the dominance of specific components of the hydrologic cycle and to determine the scale of interaction (e.g. local to regional) that should be considered. R = runoff, P = precipitation

Factor	Range of factor		Scale
A Climate	Dry, arid to sub-humid ($P < PET$)	Wet, humid ($P > PET$)	Continental to local
	<ul style="list-style-type: none"> • R poorly correlated with P • storage or uptake dominates • tendency for vertical flow 	<ul style="list-style-type: none"> • R closely correlated with P • runoff dominates • tendency for lateral flow 	
B Bedrock geology	Permeable bedrock	Impermeable bedrock	Continental to regional
	<ul style="list-style-type: none"> • intermediate to regional flow systems • lack of topographic control on direction of local flow • vertical flow dominates in surface substrate 	<ul style="list-style-type: none"> • characterized by local to intermediate flow systems • topographic control on direction of local flow • lateral flow dominates in surface substrate 	
	Bedrock slope perpendicular to land surface	Bedrock slope parallel to land surface	
	<ul style="list-style-type: none"> • complex watershed boundaries • regional aquifer definition needed to determine flow direction 	<ul style="list-style-type: none"> • simple watershed boundaries 	
C Surficial geology	Deep substrates	Shallow substrates	Regional to local
	<ul style="list-style-type: none"> • intermediate to regional flow 	<ul style="list-style-type: none"> • local flow most probable (but see bedrock geology) 	
	Coarse texture	Finer texture	
	<ul style="list-style-type: none"> • vertical flow • deeper subsurface flow 	<ul style="list-style-type: none"> • lateral flow • depression storage and/or surface and shallow subsurface flow 	
	Spatially heterogeneous deposits	Spatially homogeneous deposits	
	<ul style="list-style-type: none"> • complex groundwater flow systems • groundwater flow modelling important 	<ul style="list-style-type: none"> • simple groundwater flow systems • surface flow modelling important 	
D Soil type and depth	Upland mineral soils	Lowland organic soils	Local to regional
	<ul style="list-style-type: none"> • subsurface flow dominates • slow flow generation (matrix flow) 	<ul style="list-style-type: none"> • return flow and surface overland flow pathways dominate • quick flow generation (return flow saturation overland flow) 	
	Storage	Storage	
	<ul style="list-style-type: none"> • deeper soils with large water storage potential 	<ul style="list-style-type: none"> • shallower soils with small water storage potential • lower specific yield of organic soils and compression leads to surface saturation 	
	Transpiration	Transpiration	
	<ul style="list-style-type: none"> • deep roots access stored water • $P \approx AET$ during dry periods 	<ul style="list-style-type: none"> • shallower roots limit access to stored water • $AET < PET$ during dry periods 	
E Topography and drainage network	Gentle slopes	Steep slopes	Local to regional
	<ul style="list-style-type: none"> • disorganized, inefficient drainage network • large groundwater recharge • small, variable runoff yield 	<ul style="list-style-type: none"> • organized, efficient drainage network • small groundwater recharge • large, uniform runoff yield 	

3. CONTEXTE ET APPROCHE HYDROLOGIQUE

Site d'étude

L'étude du comportement hydrique des tourbières ombrotrophes doit se faire à une échelle plus restreinte. L'échelle du bassin versant étant trop grande pour caractériser la dynamique hydrologique à l'intérieur des tourbières et le but étant de déterminer si les tourbières ombrotrophes sont susceptibles de se déconnecter du réseau hydrologique durant une période de l'année. Il a donc été convenu de choisir un bog à la forme et aux caractéristiques les plus typiques. Pour maximiser les chances d'observer une déconnexion, la tourbière se doit d'être isolée, mais doit également être en activité et élevée (*raised bog*). Elle devait également être facile d'accès et idéalement munie d'une station météo. Le bog choisi est relativement plat quoique légèrement bombé. Il est localisé sur le BV de la rivière Nécopastic à une centaine de mètres d'une route carrossable (**figure 12**). Il possède un diamètre avoisinant les 500 mètres. La surface du bog ne s'élève pas au-dessus du terrain environnant et est partiellement de niveau. Il n'a pas de parois abruptes de tourbe marginale et n'est pas directement voisin d'un plan d'eau. Sa surface est plutôt plane et est isolée par un faible relief en marge. L'épaisseur de tourbe est plus grande au centre qu'en bordure. Il possède quelques arbres de faibles tailles (*Picea mariana* et *Larix laricina*) distribués parcimonieusement. Il est majoritairement recouvert de sphaignes et d'éricacées. Certaines buttes moins soumises aux fluctuations de la nappe phréatique sont recouvertes de lichens (*Cladina sp.*). Des laggs plus ou moins bien définis sont visibles sur au moins deux de ces marges (Nord et Ouest). Ils sont caractérisés par une végétation plus minérotrophes (mousses brunes, *carex* et graminées). Un petit ruisseau exutoire est bien visible près de sa limite orientale. La rivière Nécopastic, séparée par un léger tertre, s'écoule à une centaine de mètre au sud. Selon le système de classification des terres humides du Canada (Groupe de travail national sur les terres humides, 1997), la tourbière choisie serait probablement un bog de bassin. De plus, une station météo est positionnée en son centre (53,685N; 78,137O).

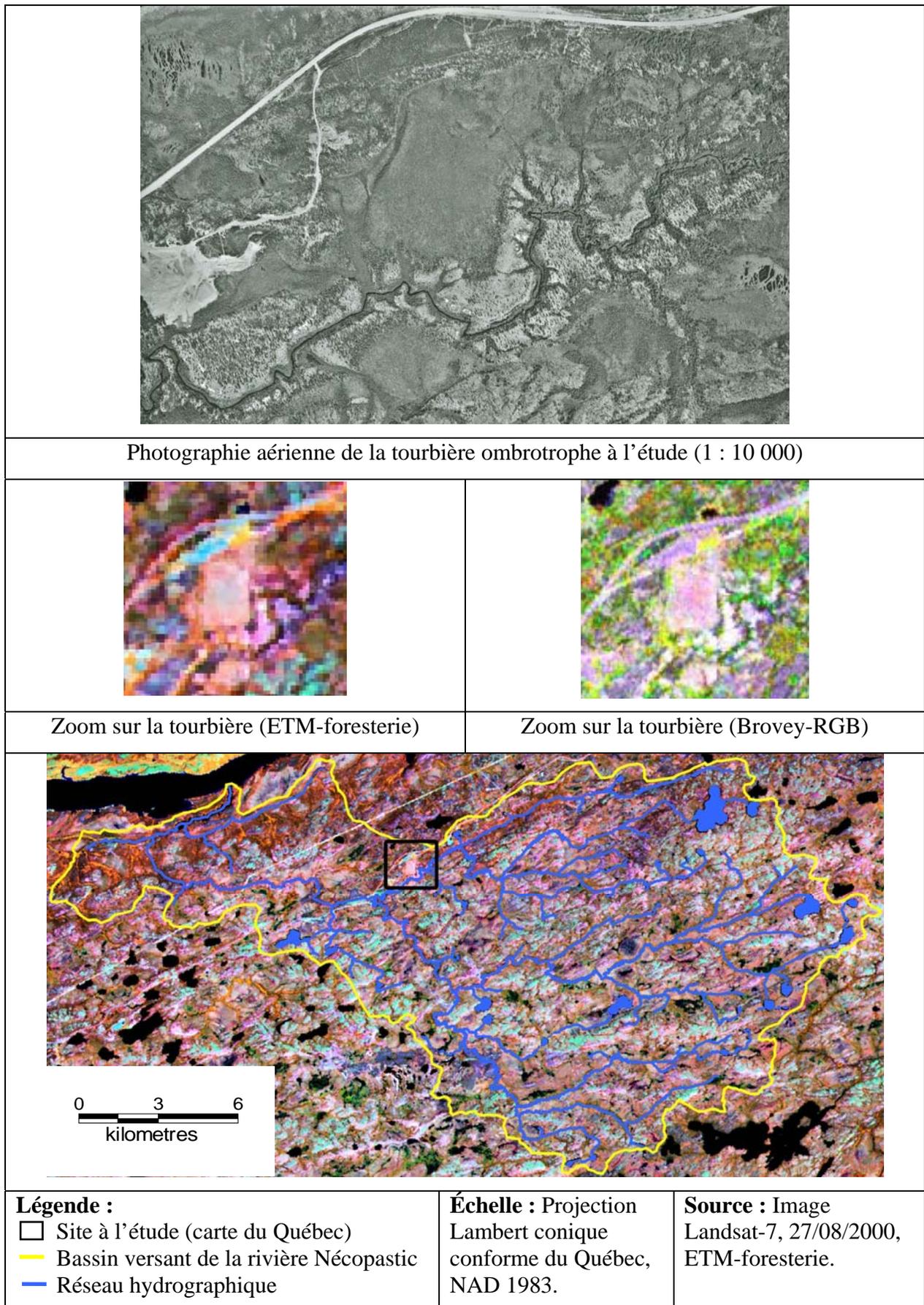


Figure 12. Cartes de localisation de la tourbière ombrotrophe à l'étude.

Méthodologie

La nappe phréatique

L'absence de ruissellement de surface sur la tourbière ombrotrophe à l'étude ne permet aucune mesure directe d'écoulement. Pour démontrer la possibilité d'une déconnexion du système tourbeux du réseau hydrographique, il est nécessaire de connaître le niveau de la nappe phréatique en plusieurs endroits. L'installation de puits piézométriques est donc essentielle pour mesurer le niveau phréatique. La figure 13 localise les puits de ce projet (points rouges, F1 à F15), mais également ceux de M. Simon Tardif (à venir) (points noirs, S1 à S17). La station météo de ce dernier est également localisée sur cette figure (point noir, SM). Les puits F1, F2, F3, F14 et F15 sont localisés, selon nos prédictions, sur la marge de l'exutoire principal. Les puits F7 à F11 ciblent l'exutoire considéré comme secondaire. Les autres puits associés à ce projet ont été installés en périphérie de la tourbière. La figure 14, tiré de Ingram (1981), schématise relativement bien les flux d'eau prédit de la tourbière à l'étude. Cette dernière figure explique l'emplacement choisi des puits F1 à F15. Des tuyaux d'ABS de 1,5 pouces de diamètre et de 4 pieds de longueur ont été utilisés comme puits. Une terrière a été utilisée pour faciliter l'insertion des tuyaux dans la tourbe. Des trous de 1/8 de pouces ont été percés sur les trois premiers pieds et demi du tuyau afin de permettre l'entrée d'eau. Un capuchon de taille adéquate a également été collé à cette extrémité et un bas de nylon recouvrait cette première section afin d'éviter toute intrusion nuisible de particule fine. Un trou de 1/2 pouce a été pratiqué à l'autre extrémité afin d'y insérer une barre de fer garantissant un retrait facile du puits en cas de besoin ou après utilisation (**figure 15**). Le positionnement de chaque puits a initialement été effectué à l'aide d'un GPS eTrex de Garmin. Pour plus de précision, ils ont ensuite été localisés à l'aide d'un GPS-RTK 5800 de Trimble. L'altitude au sol de ces puits a également été enregistrée ainsi que l'altitude au sommet des puits. Cinq Solinst LEVELLOGGER sont en opération dans les puits S1 à S5, quatre supplémentaires devraient être ajoutés d'ici l'automne 2006. Pour le moment, une méthode économique de mesure de la hauteur maximale de la nappe phréatique a été utilisée en parallèle. Des tuteurs de bambou (importés de Chine par la compagnie Quest Plastics Limited) de quatre pieds de longueur ont été installés dans chaque puits F et directement dans la tourbe adjacente à tous les puits. Ces tiges ont été recouvertes de rubans PVC de marque Nasco, Titan et Kappri de couleur blanc, vert, jaune ou rouge. La méthode se base sur la décoloration du PVC dans les milieux anoxiques aux conditions réductrices (Clymo, 1965). Cette condition étant présente sous le niveau phréatique de la nappe, le PVC se décolorera sous cette limite (Navrátilová et Hájek, 2005). Cette expérience se base premièrement sur la méthode de Belyea (1999), mais également de Booth et al. (2005) et Navrátilová et Hájek (2005). Selon ces auteurs, le niveau phréatique maximal devrait correspondre à la limite de décoloration du ruban PVC. Les figures 18A et 18B à l'annexe 3 rassemblent les photos prises de chacun des sites ainsi qu'une photo de l'exutoire principal, un agrandissement sur un puits et le bambou associé.

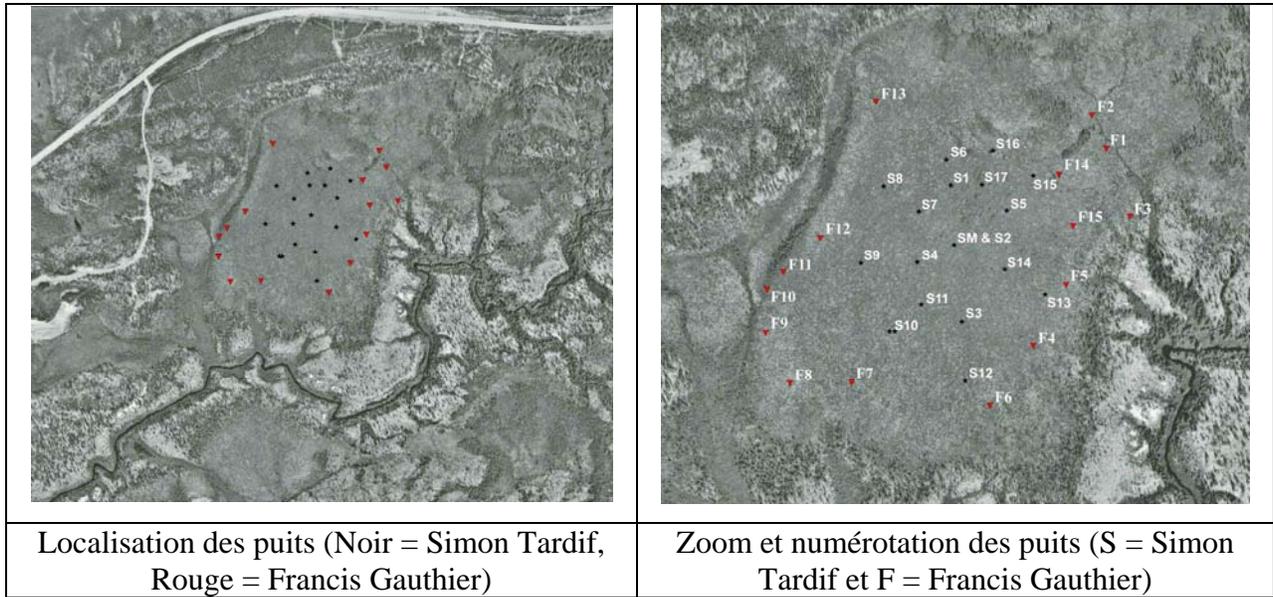


Figure 13. Cartes de localisation des puits.

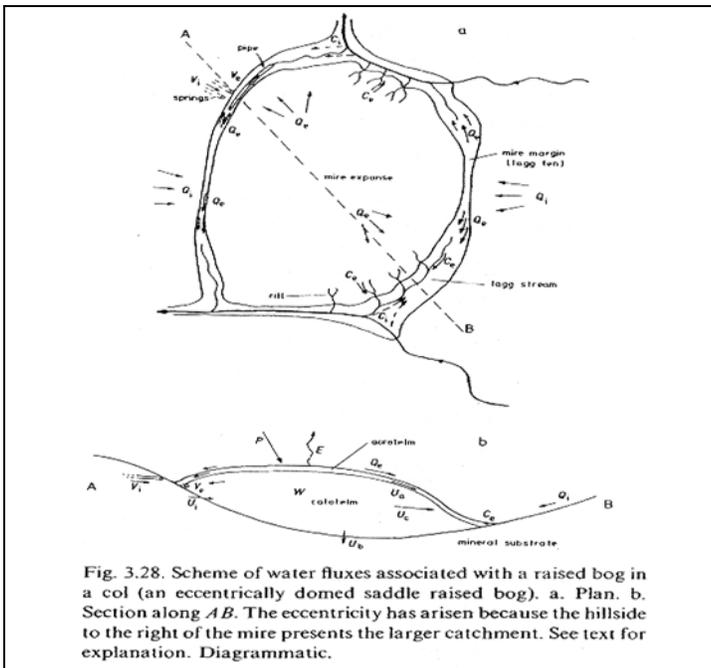


Fig. 3.28. Scheme of water fluxes associated with a raised bog in a col (an eccentrically domed saddle raised bog). a. Plan. b. Section along *AB*. The eccentricity has arisen because the hillside to the right of the mire presents the larger catchment. See text for explanation. Diagrammatic.

Figure 14. Schéma des flux hydriques d'un bog (Ingram, 1981).

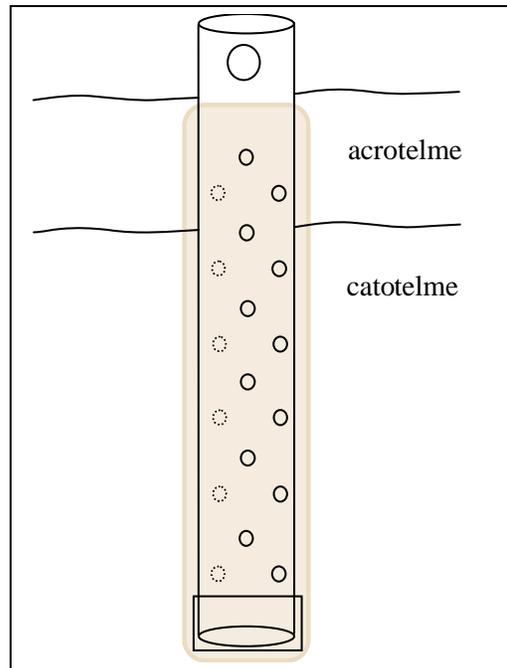


Figure 15. Schéma technique d'un puits.

Les modèles numériques d'élévation

Des modèles numériques d'élévation ont été générés à partir des mesures d'altitude au sol des puits piézométriques. Le logiciel SIGIS (SIGISCO Inc.) a été utilisé pour concevoir ces modèles. Un premier modèle a été produit par une interpolation par surface de tendance en utilisant un modèle de régression cubique. Le second modèle a été généré selon une interpolation par moyenne pondérée selon l'inverse de la distance. Les paramètres suivants : $w = 12$ et $p = 3$ ont été utilisés dans les équations suivantes :

$$Z_o = S(w_i z_i) / S w_i = \text{point à estimer}$$

où

z_i = points d'échantillonnage à l'intérieur de la zone d'influence

$w_i = 1/d_{i-o}^p$ = poids relié à la distance

$d_{i-o} = \text{SQRT} ((X_o - X_i)^2 + (y_o - y_i)^2)$ = distance du point i au point o

Le modèle fourni par M. Simon Tardif (à venir) a été conçu à l'aide de l'extension Vertical Mapper de MapInfo. L'interpolation a été effectuée à partir de 1507 points GPS de haute précision aléatoirement répartis sur la surface de la tourbière. La méthode du plus proche voisin a été utilisée pour générer ce modèle. Il importe de mentionner que ces résultats sont préliminaires, sujets à des changements ultérieurs et ne devraient être utilisés qu'à des fins informatives.

Résultats

Aucun résultat n'est encore disponible sur les données des *levelloggers* ou de la décoloration du PVC sous condition réductrice. Les tableaux 9 à 12 aux annexes 1 et 2 regroupent toutes les données nécessaires à l'éventuel interprétation des résultats concernant ces deux méthodes.

Les figures 15 et 16 présente les résultats d'interpolation pour l'élaboration des modèles numériques d'élévation. Les couleurs chaudes représentent les altitudes les plus élevées tandis que les couleurs froides sont les altitudes les plus basses. Les points affichés sont les altitudes au sol des puits présentées dans les tableaux 11 et 12 de l'annexe 2.

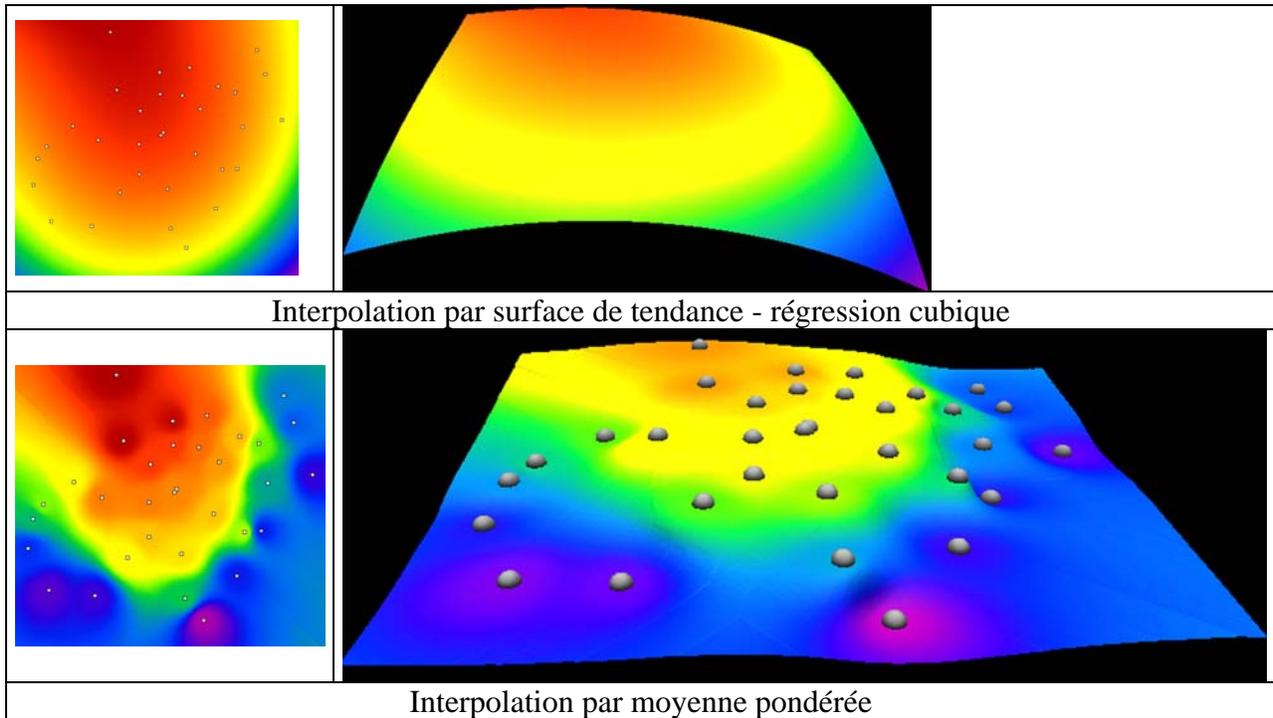


Figure 16. Modèles numériques d'élévation à partir des altitudes au sol des puits (à gauche – images en plan, à droite – images tridimensionnelles).

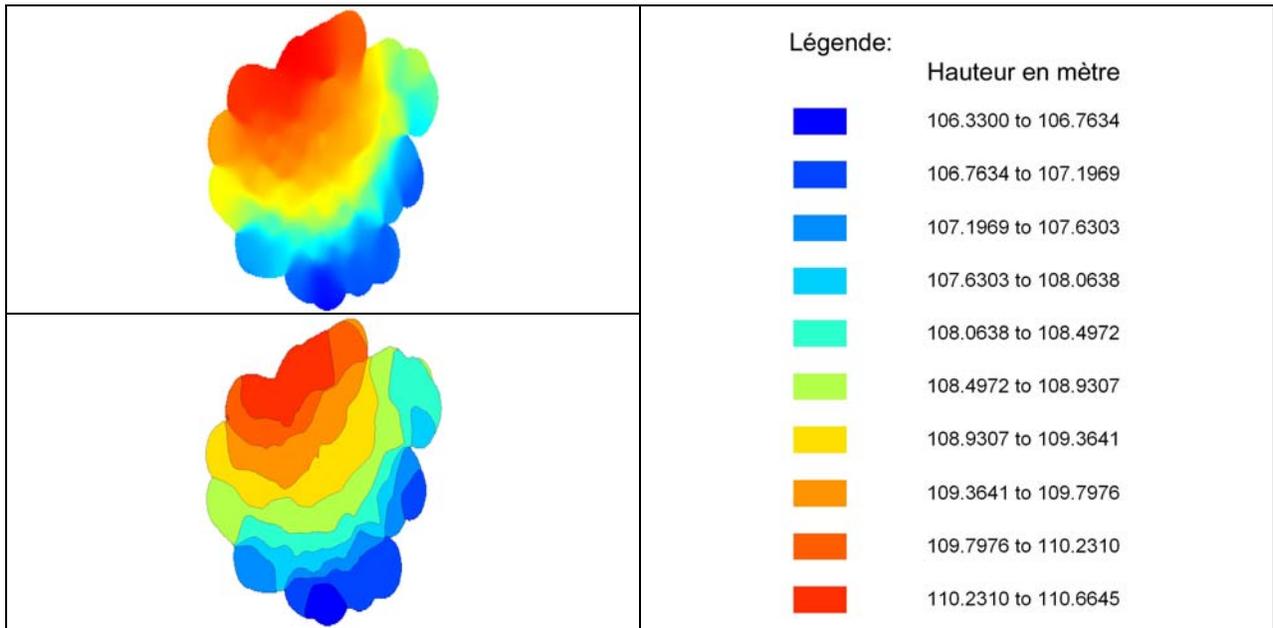


Figure 17. Modèles numériques d'élévation à partir de 1507 points d'altitudes (Tardif, à venir).

Discussion

La nappe phréatique, stratigraphie et morphologie

L'intérêt de connaître le niveau phréatique de la nappe en plusieurs endroits sur une tourbière ombrotrophe permettrait de parfaire les connaissances concernant le comportement hydrologique à l'intérieur des bogs. Il est connu que le relief topographique du niveau phréatique est une force directrice des écoulements souterrains (Hornberger et al., 1998). La méthode de Mooser et al. (2004) devrait permettre de modéliser les directions d'écoulement à l'intérieur de la tourbière. Pour ce faire, des données précises d'élévation du niveau phréatique seront nécessaires. La méthode par décoloration du PVC sera inutilisable pour générer un tel modèle, mais les *levelloggers* assureront une précision adéquate pour l'appliquer. La méthode consiste à tracer des courbes équipotentielles (isohyètes) à partir des altitudes de la nappe phréatique (Mazor, 2004). Il suffit ensuite de diriger les écoulements vers les niveaux les plus bas. Cette méthode aurait pour intérêt de mieux connaître la direction des écoulements et ainsi mieux cibler les principaux exutoires. Des mesures répétées du niveau phréatique devront être effectuées et présentées dans un hydrographe afin de mieux comprendre l'évolution temporelle des écoulements dans le bog. Les rubans en PVC fixé sur les tuteurs en bambou adjacents aux puits contenant des *levelloggers* permettront de préciser et vérifier la méthode. Les bambous des puits F aideront à déterminer lesquels d'entre eux sont réellement localisés en marge d'exutoire. Ils pourront ensuite recevoir des *levelloggers*. Des mesures de conductivité hydraulique et des tests de pompage seront nécessaires pour évaluer avec précision les vitesses d'écoulement à l'intérieur de la tourbière (Mazor, 2004). Mme Carrier, dans son mémoire de maîtrise (2003), a testé plusieurs de ces méthodes. Elle a pu générer une carte piézométrique à partir des niveaux phréatiques. Des forages au carottier russe et des sondages au GPR lui ont permis d'évaluer l'épaisseur de la tourbe. Elle a donc généré des modèles morphologiques de surface et de sous-surface de la tourbière Beauséjour au Nouveau-Brunswick. L'utilisation de cette méthode pour évaluer le relief sous la tourbe serait d'une grande utilité pour la présente étude. Les exutoires se dévoileraient inévitablement. Une couverture complète en marge de la tourbière serait nécessaire. En connaissant les directions d'écoulement, la localisation précise des exutoires et les niveaux phréatiques, il devrait être possible de déterminer le niveau de connexion de la tourbière avec le réseau hydrographique. De plus, les données météorologiques de la station météo et les études hydrologiques de M. Tardif (à venir) devraient également permettre de raffiner les connaissances concernant l'hydrologie de la tourbière. À l'aide de ces résultats, il devrait finalement être possible d'évaluer les périodes de connexion et de déconnexion de cette tourbière ombrotrophe du réseau hydrographique de la rivière Nécopastic.

Les modèles numériques d'élévation

Il est bien connu que dans les régions de faible relief, mais particulièrement dans les territoires couverts de tourbière, la topographie n'est pas le principal facteur qui détermine les écoulements hydrologiques (Devito et al., 2005 et Ingram, 1981). Le tableau 8, tiré de Devito et al. (2005), renseigne sur les divers facteurs contrôlant le cycle de l'eau. La capacité de rétention d'eau de la tourbe, le relief topographique du niveau phréatique, la topographie des dépôts sous-jacents, la composition lithologique et granulométrique de la surface d'accueil de la tourbe sont tous des

facteurs à évaluer avec minutie (Devito et al., 2005; Hornberger et al., 1998; Ingram, 1981). Les modèles numériques d'élévation pourront éventuellement être couplés aux données morphologiques du relief sous-jacent (forage et GPR), mais également aux données d'écoulements de l'eau associées au niveau de la nappe phréatique dans la tourbière. A priori, il semblait évident que le point culminant de la tourbière ombrotrophe à l'étude se situait sous la station météo et le puits S2, soit au centre de la tourbière. Les modèles ont démenti cette hypothèse et ont confirmé que le point culminant du bog se trouve plutôt sur la marge septentrionale de la tourbière. Il serait simple de croire que l'exutoire principal se trouve probablement au sud de la tourbière. En effet, la nappe phréatique semblait affleurer dans ce secteur de la tourbière. Par contre, le relief séparant la tourbière de la rivière Nécopastic à cet endroit semble néanmoins favoriser un écoulement vers l'un des deux exutoires ciblés ou les deux. Malgré une position plus élevée, ces exutoires (à l'est et l'ouest de la tourbière) sont probablement les principaux lieux de perte d'eau de la tourbière.

Une évaluation de l'épaisseur de la tourbe permettrait d'estimer la topographie sous-jacente (forage et GPR) qui est probablement davantage responsable des fuites d'eau de cette tourbière. Les figures 14 et 18, tirées de Ingram (1981), schématisent parfaitement les écoulements prévus sur et dans la tourbière à l'étude. Suite à plusieurs forages à l'aide d'une terrière (installation des puits), il a été convenu que la tourbière croissait sur des dépôts de limon-argileux (probablement une résultante de l'ancienne mer de Tyrrell et des dépôts lacustres subséquents) (Payette et Rochefort, 2001). Des études plus approfondies seraient évidemment nécessaires afin de valider cette hypothèse. Les argiles étant relativement imperméables, il est possible que la topographie engendrée par ces dépôts soit un facteur déterminant la localisation des exutoires.

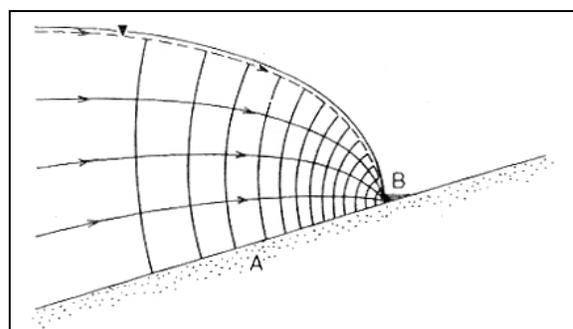


Fig. 3.30. Sketch of flow net in a vertical radial section through the marginal slope and lag of a raised bog abutting against a rising slope of relatively impermeable mineral strata. A. B is the lag fen at the mire margin; ∇ is the water table; the flow lines are arrowed; the isopotentials crossing them are spaced at equal increments of potential. Diagrammatic and with exaggerated vertical scale.

Figure 18. Schéma du flux d'écoulement dans une tourbière et sur sa marge (Ingram, 1981).

Les traceurs et les autres approches

L'utilisation de traceurs isotopiques stables comme indicateurs de connectivité de la tourbière ombrotrophe devrait être un complément potentiel aux méthodes hydrologiques présentées précédemment. Une bonne connaissance hydrométéorologique de la tourbière à l'étude serait utile avant d'effectuer ce type d'analyse chimique. Un isotope fréquemment utilisé pour évaluer les écoulements souterrains et les temps de résidence est l' ^{18}O . Il est fréquemment couplé à l'isotope d'hydrogène, le deuterium (^2H ou D) (Mazor, 2004). La méthode se base sur la variabilité temporelle de ces deux isotopes dans les précipitations (Rodgers, 2005). Les résultats sont normalisés par rapport au Standard moyen de l'eau océanique (Vienna – Standard Mean Ocean Water – SMOW) et sont rapportés en partie pour mille (‰) de variation par rapport à ce standard (δD et $\delta^{18}\text{O}$). La composition isotopique de l'eau est déterminée à l'aide de spectromètre de masse. Ainsi les eaux avec une plus grande concentration de D ou ^{18}O que SMOW auront un δD ou $\delta^{18}\text{O}$ positif et les eaux avec une plus faible concentration prendront des

valeurs de delta négatives. Pour mettre en œuvre la méthode, il importe d'enregistrer la composition isotopique des précipitations de la région à l'étude. Ces données permettront de générer la ligne locale des eaux pluviales (Local Meteoric Line – LMWL). Cette ligne de référence est variable à travers le monde et s'utilise comme ligne de référence pour la compréhension, l'interprétation et le suivi des mouvements et des origines des eaux souterraines. Pour de plus amples détails sur la méthode, il est possible de se référer à l'ouvrage de Mazor (2004). Une première analyse de l'acidité, de la composition isotopique et cationique des eaux de la tourbière à diverses profondeurs, des ruisseaux exutoires et de la rivière Nécopastic en amont et en aval de la tourbière serait primordiale avant d'élaborer un plan d'échantillonnage rigoureux. Par la suite, des échantillons d'eau de pluie, de la tourbière, des ruisseaux exutoires et de la rivière Nécopastic devraient être récupérés simultanément et à intervalle régulier afin de suivre l'évolution isotopique de ces eaux. Suite aux traitements de ces données, il devrait être possible de retracer les eaux de la tourbière dans les eaux des exutoires, mais également dans les eaux de la rivière Nécopastic. Le délai enregistré devrait permettre de mesurer le temps de résidence des eaux de pluie dans la tourbière. Rodgers et al. (2005) ont enregistré des temps de résidence variant de 0,4 à 0,8 ans dans les sols tourbeux du BV de Feugh dans le Nord-Est de l'Écosse. Hayashi et al. (2004) ont étudié la connexion hydrologique des fens, des bogs plats et des bogs de plateaux par l'identification chimique et la caractérisation isotopique de leurs eaux. La composition isotopique et la conductivité électrique enregistrées durant les périodes de forte pluie étaient similaires dans un fen de chenal et dans les lacs en amont. Durant les périodes de faibles précipitations, la composition chimique et isotopique du fen a changé pour celle des couches actives des bogs de plateaux environnants. La déconnexion hydrologique de ce fen du bassin de drainage de la rivière Scotty Creek (Territoire du Nord-Ouest) montre le potentiel de la méthode. Suite à ces exemples, la déconnexion de la tourbière sera certainement détectable dans les eaux des exutoires et de la rivière Nécopastic par un changement isotopique et chimique de leurs eaux. Il sera ainsi possible d'envisager une période de déconnexion et de la quantifier.

Fraser et al. (2001) ont observé des périodes de recharge (flux de la surface vers les couches profondes de la tourbière) et de décharge (montée des eaux des couches profondes vers la surface) à l'intérieur d'un bog près d'Ottawa. Les précipitations printanières abondantes rechargeaient la tourbière en eau. Durant les périodes estivales de faibles précipitations ils ont constaté que la tourbière se déchargeait de ses eaux. Durant les périodes de décharge la tourbière agirait comme une éponge et attirerait les eaux souterraines environnantes vers la surface. Ils ont enregistré une augmentation de la conductivité électrique et de la concentration en cations durant ces périodes. À l'opposé, lorsque la tourbière se recharge, la concentration cationique et la conductivité électrique décroissent. La méthode utilisée par ces derniers ne devrait pas être négligée et pourrait servir de complément à l'étude des concentrations isotopiques. Il est possible qu'il y ait une corrélation entre les périodes de décharge et les périodes de déconnexion.

Une autre avenue intéressante afin de démontrer la connexion – déconnexion de la tourbière réside dans le suivi d'indicateur chimique stable et soluble injecté dans le sol de la tourbière. L'exemple de Reeve (2002) est intéressant et mériterait approfondissement. Il a injecté 40 litres de bromure de sodium (NaBr) dans une tourbière du Maine au États-Unis. Il a ensuite suivi le déplacement du panache de la solution saline à l'aide de prélèvement d'échantillon d'eau souterraine et de mesure de résistivité électrique. Il affirme que le taux de migration de la solution saline est beaucoup plus lent que la vitesse d'écoulement des eaux souterraines causé par l'adsorption de la matrice de diffusion. L'exploration de divers traceurs chimiques se déplaçant à

un rythme équivalent aux écoulements souterrains est certainement envisageable et d'intérêt pour l'étude de la connectivité des tourbières ombrotrophes.

4. CONCLUSION

Les conclusions suivantes peuvent être envisagées suite aux résultats de la classification et de la discussion sur les diverses méthodes associées à la télédétection :

1- L'utilisation du NDVI pour interpréter les entités spatiales, en particulier les bandes de végétations adjacentes aux chenaux, s'est avérée un atout précieux. Son utilisation a également amélioré les résultats des classifications.

2- Le meilleur composé couleur pour interpréter les entités spatiales est celui utilisé en foresterie (PIR en rouge – MIR en vert – Rouge en bleu).

3- Les techniques utilisées pour fusionner les bandes de résolution grossière de l'image multispectrale Landsat-7 avec la bande panchromatique se sont avérées suffisantes.

4- Les résultats de la classification avec l'image multispectrale Landsat-7 non-fusionnée et fusionnée se sont avérés aussi efficaces pour cibler les tourbières ombrotrophes (exactitude globale légèrement supérieure à 93%).

5- La classification avec l'image fusionnée a permis de mieux cibler la végétation riveraine des chenaux.

6- Selon les résultats des classifications, 40% du BV de la rivière Nécopastic accueillent des tourbières ombrotrophes.

7- La connectivité hydraulique des tourbières ombrotrophes n'a pu être établi à partir des méthodes associées à la télédétection.

Suite à cette étude préliminaire les propositions suivantes devraient être considérées :

1- Améliorer les techniques de fusion d'images.

2- Tenter des classifications avec des images à plus fine résolution (Maria Dissanska).

3- Tenter des classifications orientées objets (Maria Dissanska et Karem Chokmani).

4- Séparer la classe des forêts en deux classes : forêt sur tourbe et forêt sur lichen.

5- Procéder à la connexion physique (voisinage de pixel) des bogs avec les pixels de classes végétation riveraine et eau (Annexe 4).

6- Évaluer le potentiel des images radars à détecter l'humidité du sol et tenter de corrélérer ces données avec les relevés pluviométriques afin d'estimer les niveaux phréatiques.

7- L'assemblage (mosaïque) des photographies aériennes du BV de la rivière Nécopastic serait à envisager.

Les conclusions et suggestions suivantes peuvent être envisagées suite à la discussion sur les diverses approches et techniques utilisées en hydrologie :

- 1- Les modèles numériques d'élévation ont montré la morphologie superficielle de la tourbière.
- 2- Estimer l'épaisseur de tourbe à l'aide de forage au carottier russe et/ou par Géoradar afin de cibler avec précision les exutoires.
- 3- L'installation rapide de *levelloggers* pour mesurer les niveaux phréatiques.
http://www.envisupply.com/equipment/solinst_levellogger_gold.htm (595\$)
- 4- Explorer davantage les possibilités d'utilisation des traceurs chimiques et isotopiques (δD et $\delta^{18}O$).

5. REMERCIEMENTS

Un sincère remerciement à M. Yves Gauthier, Mme Lisa-Marie Pâquet et M. Stéphane Savary pour leur support technique. Une attention particulière à Mme Kristell Dever pour son support moral. Merci à toute l'équipe des laboratoires d'hydrologie et de télédétection de l'INRS, mais également aux membres du CEN et en particulier M. Étienne Boucher pour sa contribution de photographies aériennes. J'aimerais également remercier Simon Tardif de Ouranos pour son aide généreuse et ses brillantes idées. Le stage a été financé par l'intermédiaire du CRSNG et leur programme de bourse de recherche pour les étudiants de premier cycle (BRPC).

6. RÉFÉRENCES

- Belyea, L.R., 1999. Technical Report: A novel indicator of reducing conditions and water-table depth in mires. *Functional Ecology*, **13**: 431-434.
- Booth, R.K., Hotchkiss, S.C. et Wilcox, D.A., 2005. Discoloration of polyvinyl chloride (PVC) tape as a proxy for water-table depth in peatlands: validation and assessment of seasonal variability. *Functional Ecology*, **19**: 1040-1047.
- Bryant, R.G. et Baird, A.J., 2003. The spectral behaviour of Sphagnum canopies under varying hydrological conditions. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. 3 : 1134.
- Bubier, J.L., Barrett, N.R. et Crill, P.M., 1997. Spectral reflectance measurements of boreal wetland and forest mosses. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No. D24 : 29,483-29,494.
- Carrier, C., 2003. Étude de l'interaction entre le système d'écoulement local d'une tourbière ombrotrophe et le système d'écoulement des eaux souterraines régionales dans le sud-est du Nouveau-Brunswick : caractérisation et modélisation hydrogéologiques. Mémoire de maîtrise. Département de géographie, Faculté de foresterie et géomatique, Université Laval.
- Caloz, R. et Collet, C., 2001. Précis de télédétection. Volume 3. Traitements numériques d'images de télédétection. Presses de l'Université du Québec. Agence universitaire de la Francophonie. 386 pages.
- Carper, W.J., Lillesand, T.M., et Kiefer, R.W., 1990. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 56, No. 4 : 459-467.
- Choi, M., 2006. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 44, No. 6 : 1672-1682.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Wise, R., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Kokaly, R.F. and Sutley, S.J., 2003. USGS Digital Spectral Library splib05a, *U.S. Geological Survey, Open File Report 03-395*. <http://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr-03-395/datatable.html>
- Clymo, R.S., 1965. Experiments on Breakdown of Sphagnum in Two Bogs. *The Journal of Ecology*, Vol. 53, No. 3 : 747-758.
- Devito, K., Creed, I., Gan, T., Mendoza, C., Petrone, R., Silins, U. et Smerdon, B., 2005. A framework for broad-scale classification of hydrologic response units on the Boreal Plain: is topography the last thing to consider? *Hydrological Processes*. **19**: 1705 – 1714.
- Earth Observation for Sustainable Development of Forests (EOSD), 2006. http://www.pfc.cfs.nrcan.gc.ca/eosd/index_e.html
- Fraser, C.J.D., Roulet, N.T. et Lafleur, M., 2001. Groundwater flow patterns in a large peatland. *Journal of Hydrology*, **246**: 142-154.
- Garneau, M. et collaborateur, 2004. Données phytosociologiques, physiographiques, écologiques et géographiques de plus de 150 sites de tourbières potentielles de la Baie James, été 2004. Département de géographie, UQAM. Donnée non-publiée.

- 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>
- Groupe de travail sur la classification des sols. 2002. Le système canadien de classification des sols (SCCS). 3^e édition. Direction générale de la recherche, Ministère de l'Agriculture et de l'Agro-Alimentaire du Canada. Publication 1646. Ottawa, ON. 196 pages.
- Hayashi, M., Quinton, W.L., Pietroniro, A. et Gibson, J.J., 2004. Hydrologic functions of wetlands in a discontinuous permafrost basin indicated by isotopic and chemical signatures. *Journal of Hydrology*, **296**: 81-97.
- Hornberger, G.M., Raffensperger, J.P., Wiberg, P.L. et Eshleman, K.N., 1998. Elements of Physical Hydrology. The Johns Hopkins University Press. 316 pages.
- Ingram, H.A.P., 1981. Chapter 3: Hydrology. Tiré de : Mires: Swamp, Bog, Fen and Moor. Ecosystems of the World. Gore, A.J.P. Elsevier Scientific Publishing Co., 1983.
- Liu, J.G., 2000. Evaluation of Landsat-7 ETM+ Panchromatic Band for Image Fusion with Multispectral Bands. *Natural Resources Research*, Vol. 9, No. 4 : 269-276.
- Mazor, E., 2004. Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology, Third Edition. Marcel Dekker, Inc. New-York – Basel. 352 pages.
- Meng, F.-R., Castonguay, M., Ogilvie, J., Murphy, P. et Arp, P., 2006. Developing a GIS-based flow-channel and wet-areas mapping framework for precision forestry planning. Faculty of Forestry and Environmental Management, University of New-Brunswick, Canada.
- Mouser, P.J., Hession, W.C., Rizzo, D.M. et Gotelli, N.J., 2004. Hydrology and Geostatistics of a Vermont, USA Kettlehole Peatland. *Journal of Hydrology*, **xx**: 1-17.
- Navrátilová, J. et Hájek, M., 2005. Recording relative water table depth using PVC tape discolouration : Advantage and constraints in fens. *Applied Vegetation Science*, **8**: 21-26.
- Payette, S. et Rochefort, L., 2001. Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Les Presses de l'Université Laval, 2^e tirage 2005. 621 pages.
- Reeve, A., 2002. The migration of a sodium bromide tracer in a large Maine peatland. Denver Annual Meeting (October 27-30, 2002). Session and paper No. 186-2.
- Rodgers, P., Soulsby, C., Waldron, S. et Tetzlaff, D., 2005. Using stable isotope tracers to identify hydrological flow paths, residence times and landscape controls in a mesoscale catchment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, **2**: 1-35.
- Service de la cartographie et Service géologique de Québec, 1989. Tourbières et télédétection : Inventaire des tourbières du Québec septentrional. Ministère de l'Énergie et des Ressources et le Centre de télédétection du Québec, Québec, 4 pages.
- Seuthé, C. et Buteau, P., 1994. Chapitre 5. Les tourbières au Québec : une ressource importante à connaître et à protéger. Tiré de : Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone. Sous la direction de Ferdinand Bonn et collaborateurs. Les Presses de l'Université du Québec en collaboration avec l'Agence de coopération culturelle et technique. 596 pages.

- Sugumaran, R., Harken, J. et Gerjevic, J., 2004. Using Remote Sensing Data to Study Wetland Dynamics in Iowa. Iowa Space Grant (Seed) Final Technical Report. Departement of Geography, University of Northern Iowa, Cedar Falls, IA – 50614. 17 pages.
- Tardif, S., à venir (doctorat en cours). Hydrologie comparative des tourbières minérotrophes, ombrotrophes et des lacs de la Baie de James. INRS – Eau, Terre et Environnement.
- Vincent, J.S., 1985. Géologie des formations en surface, Radisson, Québec. Commission géologique du Canada, cartes série "A", 1591A.
- Zhang, Y., 2002. A new automatic approach for effectively fusing Landsat 7 as well as IKONOS images. IEEE/IGARSS'02, Toronto, Canada, June 24-28.
- Zhang, Y., 2002. Problems in the fusion of commercial high-resolution satellite as well as Landsat 7 images and initial solutions. ISPRS, Vol. 34, Part 4, "GeoSpatial Theory, Processing and Applications", Ottawa.

ANNEXE 1

Tableau 9. Informations sur les tiges et les rubans PVC voisins des puits à Simon Tardif.

# Puits	Rubans adjacents**		Hauteur (cm)*
	C / M	C / M	
SIM-01	R / C	J / K	18,0
SIM-02	J / K	R / T	23,5
SIM-03	V / N	J / K	29,0
SIM-04	V / N	R / T	22,0
SIM-05	R / C	J / T	28,0
SIM-06	J / C	R / T	36,0
SIM-07	V / N	J / C	31,0
SIM-08	J / T	R / C	28,0
SIM-09	V / N	B / K	21,0
SIM-10	V / N	J / T	26,0
SIM-11	J / C	R / T	26,0
SIM-12	V / N	B / K	59,0
SIM-13	-----	-----	-----
SIM-14	-----	-----	-----
SIM-15	-----	-----	-----
SIM-16	V / N	J / C	30,0
SIM-17	R / T	B / K	32,0

* Hauteur = distance entre le sommet de la tige et la surface tourbeuse (sol).

** C = couleur: Rouge (R), Vert (V), Jaune (J) ou Blanc (B).

M = marque: Titan (T), Nasco (N) ou Kapri (K ou C).

Connectivité physique des tourbières du bassin versant de la rivière Nécopastic

Tableau 10. Informations sur les puits, les tiges et les rubans PVC.

# Puits	# GPS eTrex	# GPS Trimble ¹	Localisation UTM zone 18U ²		Altitude (m) ²	Rubans puits ³		Hauteur (cm) ⁴	Rubans adjacents ³		Hauteur (cm) ⁵	Commentaire
			Nord	Est		C / M	C / M		C / M	C / M		
PON-01	372	PON1S et T	689259	5952367	107	V / N	R / T	14,5	V / N	R / T	38,0	Exutoire principal supposé (de l'autre côté de la petite ligne d'arbre, très près du ruisseau, hors tourbière)
PON-02	371	PON2S et T	689240	5952409	107	R / C	J / T	24,0	R / T	J / C	37,5	Exutoire principal supposé (très près du ruisseau)
PON-03	374	PON3S et T	689300	5952274	108	B / K	J / T	25,5	J / C	R / T	34,0	Butte en marge de l'exutoire principal, près du ruisseau, hors tourbière, forêt sur lichen
PON-04	376	PON4S et T	689193	5952108	105	V / R	R / C	42,0	J / K	R / T	45,0	Exutoire possible, mais tertiaire (moins bien défini)
PON-05	375	PON5S et T	689207	5952179	105	J / K	R / T	47,0	B / K	J / T	57,0	En marge de l'exutoire tertiaire, près du chemin pour jauger ruisseau exutoire
PON-06	377	PON6S et T	689131	5952025	101	J / T	R / C	42,0	B / K	R / C	59,0	En marge de l'exutoire tertiaire
PON-07	361	PON7S et T	688956	5952055	101	V / N	R / T	20,0	J / C	R / T	36,0	Zone humide, faible possibilité d'exutoire
PON-08	362	PON8S et T	688879	5952052	113	R / C	J / T	16,0	B / K	V / N	20,0	Zone sèche, petit dôme probable
PON-09	363	PON9S et T	688837	5952121	110	R / C	J / T	17,0	J / K	V / N	54,0	En marge de l'exutoire secondaire
PON-10	364	PON10S et T	688839	5952171	103	V / N	B / K	7,0	B / K	R / T	18,0	Exutoire probable, secondaire (bien défini)
PON-11	365	PON11S et T	688852	5952199	106	J / K	V / N	24,0	J / K	R / C	24,0	En marge de l'exutoire secondaire, en face de colline
PON-12	366	PON12S et T	688902	5952241	107	R / C	J / T	23,0	J / T	V / N	24,0	En face de colline, mi-chemin entre exutoire secondaire et gravière
PON-13	367	PON13S et T	688955	5952418	108	J / K	V / N	13,0	R / T	J / C	15,0	En face de colline, près de la gravière
PON-14	368	PON14S et T	689203	5952327	106	B / K	V / N	26,0	J / K	R / T	24,0	Exutoire principal supposé (environ 40m du ruisseau)
PON-15	369	PON15S et T	689224	5952266	106	R / T	J / C	24,0	J / T	R / T	23,5	En marge de l'exutoire principal, même hauteur de PON-03 par rapport au ruisseau, mais dans les limites de la tourbière

1) # d'entrée dans le GPS Trimble, S = localisation et altitude des puits au sol et T = localisation et altitude sur le dessus des puits (top).

2) Ces données proviennent du GPS Etrex. La précision oscille généralement entre 3 et 6 mètres.

3) C = couleur: Rouge (R), Vert (V), Jaune (J) ou Blanc (B).

M = marque: Titan (T), Nasco (N) ou Kapri (K ou C).

4) Hauteur = distance entre le dessus du puits et la surface tourbeuse (sol).

5) Hauteur = distance entre le sommet de la tige et la surface tourbeuse (sol).

N.B. : la distance entre la tige et le dessus du puits est généralement négligeable puisque nulle.

ANNEXE 2

Tableau 11. Données du GPS Trimble (localisation, altitude et hauteur des puits).

#	# GPS Trimble	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Hauteur puit (m)	Hauteur puit (cm)
F1	pon1s	-78,133931134	53,685688649	107,343	0,161	16,1
F1	pon1t	-78,133931168	53,685689084	107,504		
F2	pon2s	-78,134200463	53,686087880	107,515	0,272	27,2
F2	pon2t	-78,134199826	53,686088314	107,787		
F3	pon3s	-78,133395876	53,684919735	106,826	0,312	31,2
F3	pon3t	-78,133395285	53,684919860	107,138		
F4	pon4s	-78,135179115	53,683369278	106,989	0,437	43,7
F4	pon4t	-78,135178990	53,683368995	107,426		
F5	pon5s	-78,134618603	53,684060239	106,990	0,508	50,8
F5	pon5t	-78,134618968	53,684059459	107,498		
F6	pon6s	-78,135970140	53,682680302	106,289	0,464	46,4
F6	pon6t	-78,135968700	53,682679491	106,753		
F7	pon7s	-78,138715910	53,682981694	106,771	0,205	20,5
F7	pon7t	-78,138716908	53,682981765	106,976		
F8	pon8s	-78,139880681	53,683025906	106,672	0,170	17,0
F8	pon8t	-78,139880249	53,683026214	106,842		
F9	pon9s	-78,140446820	53,683637503	107,088	0,189	18,9
F9	pon9t	-78,140446583	53,683637572	107,277		
F10	pon10s	-78,140354411	53,684084531	107,861	0,081	8,1
F10	pon10t	-78,140353810	53,684085369	107,942		
F11	pon11s	-78,140113065	53,684299147	108,237	0,271	27,1
F11	pon11t	-78,140112859	53,684298744	108,508		
F12	pon12s	-78,139377703	53,684659342	108,599	0,223	22,3
F12	pon12t	-78,139376775	53,684658942	108,822		
F13	pon13s	-78,138430591	53,686285343	110,109	0,125	12,5
F13	pon13t	-78,138431236	53,686285388	110,234		
F14	pon14s	-78,134770162	53,685351267	108,191	0,259	25,9
F14	pon14t	-78,134770533	53,685350989	108,450		
F15	pon15s	-78,134515822	53,684771980	107,725	0,267	26,7
F15	pon15t	-78,134516841	53,684772705	107,992		

Tableau 12. Données du GPS Trimble (localisation, altitude et hauteur des puits) associées à M. Simon Tardif.

#	# GPS Trimble*	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Hauteur puit (m)	Hauteur puit (cm)
SM	meteo	-78,136789076	53,684621845	109,289	-----	-----
S1	p1sol	-78,136924911	53,685270376	109,735	0,288	28,8
S1	p1top	-78,136925278	53,685270880	110,023		
S2	p2sol	-78,136839899	53,684566928	109,285	0,267	26,7
S2	p2 top	-78,136786490	53,684577162	109,552		
S3	p3sol	-78,136590840	53,683662257	108,767	0,937	93,7
S3	p3top	-78,136592371	53,683661862	109,704		
S4	p4sol	-78,137471032	53,684405060	109,350	0,175	17,5
S4	p4top	-78,137470957	53,684404947	109,525		
S5	p5sol	-78,135754794	53,685046075	109,185	0,287	28,7
S5	p5top	-78,135756050	53,685045808	109,472		
S6	p6sol	-78,136958960	53,685634130	110,013	0,536	53,6
S6	p6top	-78,136959410	53,685634998	110,549		
S7	p7sol	-78,137470039	53,684971580	109,737	0,618	61,8
S7	p7top	-78,137468678	53,684971465	110,355		
S8	p8sol	-78,138172500	53,685307084	110,068	0,424	42,4
S8	p8top	-78,138172148	53,685306838	110,492		
S9	p9sol	-78,138643906	53,684440653	109,351	0,594	59,4
S9	p9top	-78,138644719	53,684441087	109,945		
S10	p10sol	-78,137949787	53,683566075	108,594	0,802	80,2
S10	p10top	-78,137950117	53,683565547	109,396		
S11	p11sol	-78,137424039	53,683893935	108,922	0,813	81,3
S11	p11top	-78,137422704	53,683894137	109,735		
S12	p12sol	-78,136457100	53,682998680	107,955	1,531	153,1
S12	p12top	-78,136455369	53,682997824	109,487		
S12	p12top2	-78,136455613	53,682999730	109,486		
S13	p13sol	-78,135040607	53,684033294	108,341	1,299	129,9
S13	p13top	-78,135039017	53,684033717	109,640		
S14	p14sol	-78,135826992	53,684283765	108,922	0,741	74,1
S14	p14top	-78,135826719	53,684283118	109,663		
S15	p15sol	-78,135273170	53,685445752	108,974	0,648	64,8
S15	p15top	-78,135272371	53,685445547	109,622		
S16	p16sol	-78,136108783	53,685740533	109,545	0,622	62,2
S16	p16top	-78,136109861	53,685740629	110,167		
S17	p17sol	-78,136284529	53,685258752	109,455	0,441	44,1
S17	p17sol2	-78,136284376	53,685259403	109,455		
S17	p17top	-78,136285523	53,685259406	109,896		

* Aux points #12 et 17 les secondes données (p12top2 et p17sol2) ont été retenues dans le calcul des hauteurs.

ANNEXE 3

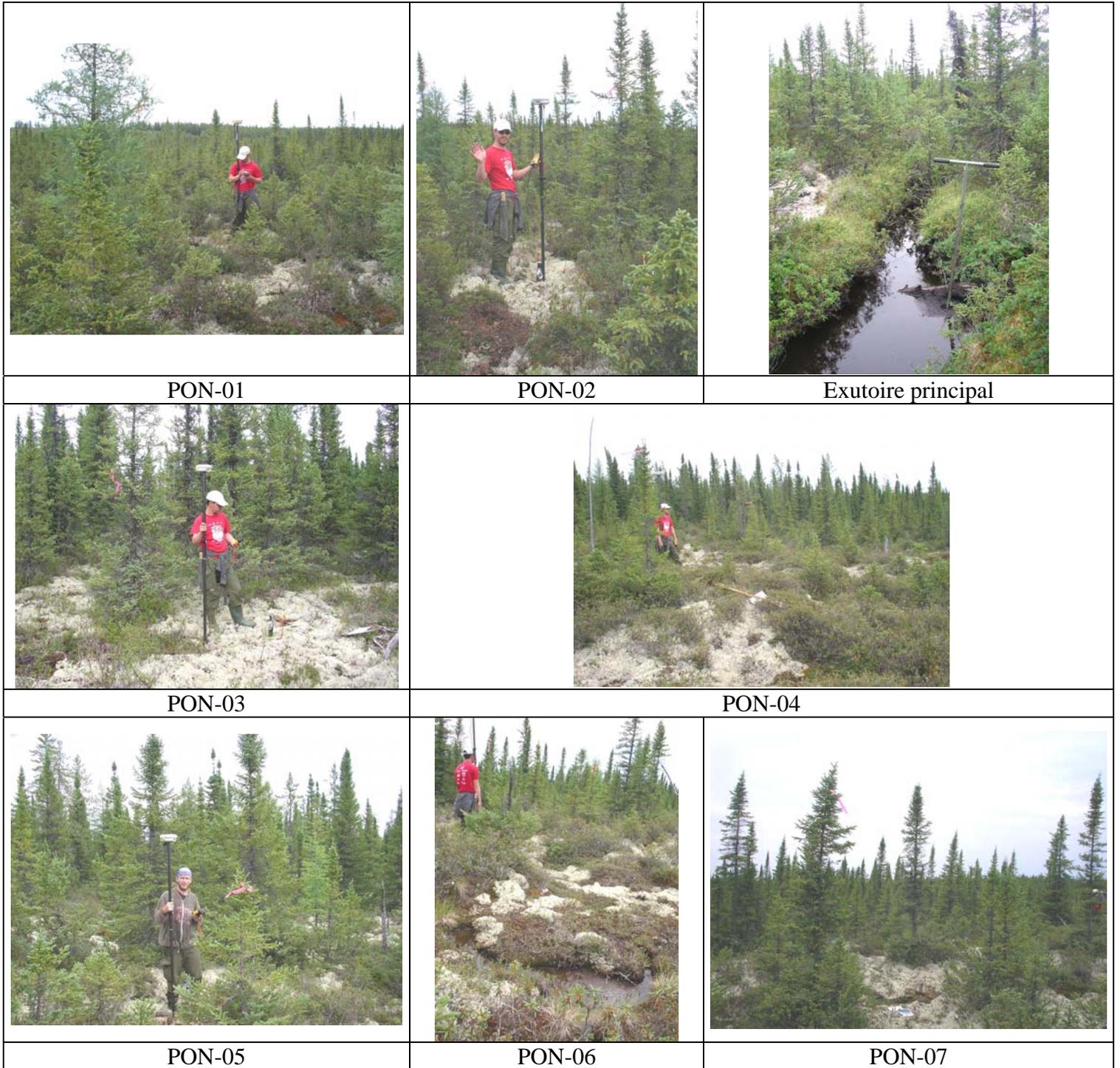


Figure 19a. Photos des sites d'enfouissement des puits.

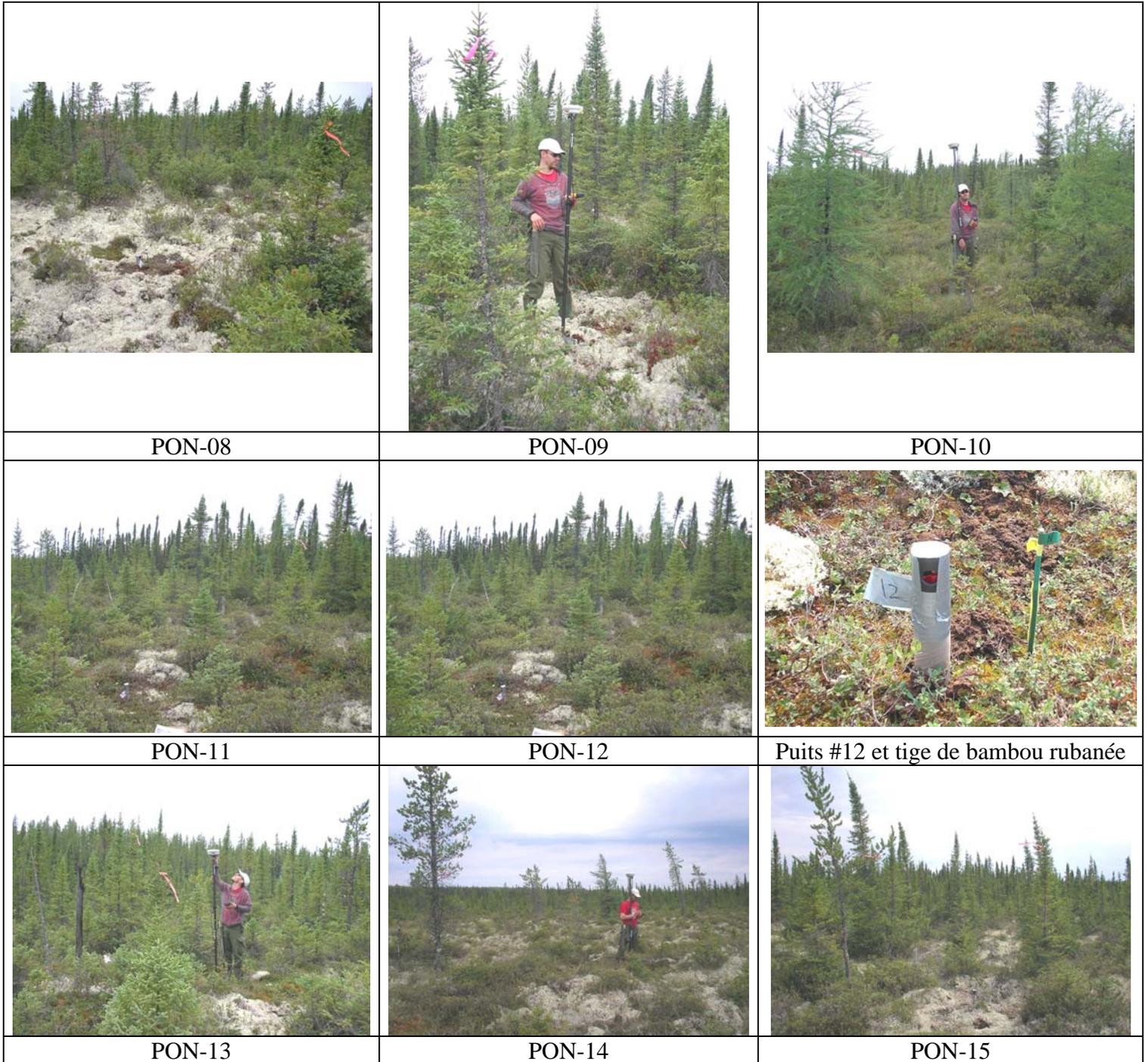
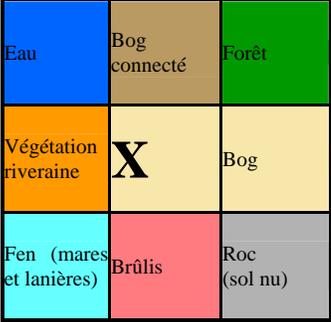


Figure 19b. Photos des sites d'enfouissement des puits.

ANNEXE 4

<ol style="list-style-type: none"> 1. Si le pixel central est un bog 2. Parcourir son voisinage (de Moore = 8 cellules) 3. Si l'un des pixels dans ce voisinage est de l'eau ou un pixel de bog connecté ou un pixel de végétation riveraine ou un pixel de fen (selon les essais, voir les résultats) 4. Le pixel central devient un pixel de bog connecté 5. Ainsi de suite jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de pixels de bog à transformer 	 <p>Figure 21 : Schéma du voisinage de Moore</p>
<p>Figure 20 : L'algorithme de connexion</p>	<p>Figure 21 : Schéma du voisinage de Moore</p>

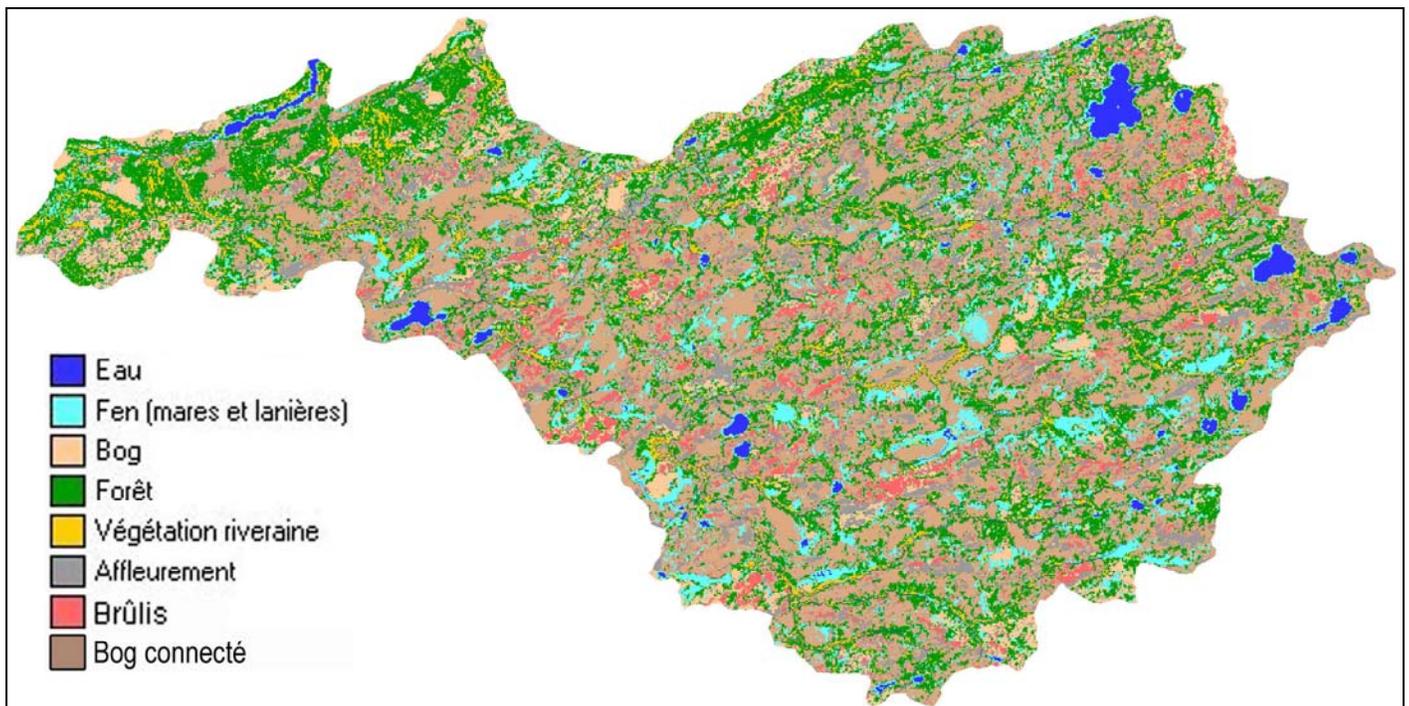


Figure 22 : Résultat de l'algorithme de connexion limité aux pixels d'eau et de bog connecté

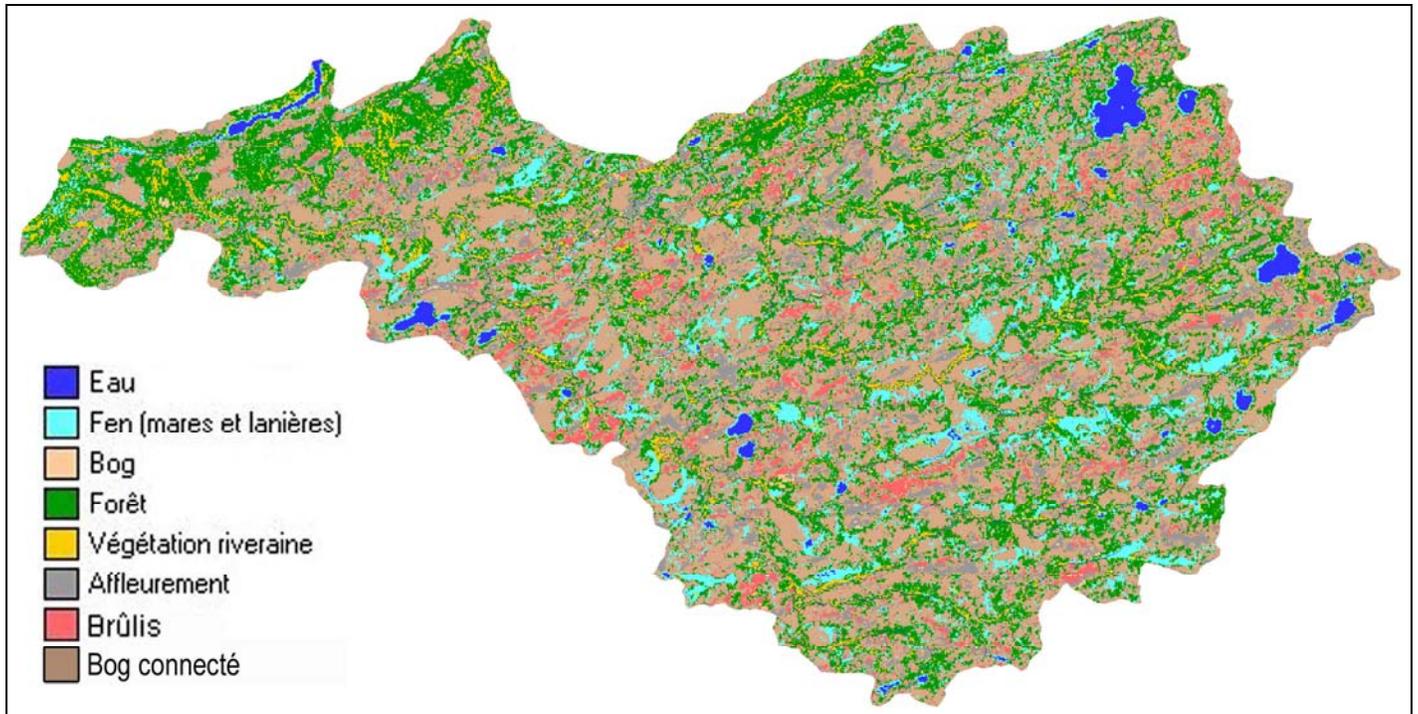


Figure 23 : Résultat de l'algorithme de connexion incluant l'adjacence des pixels d'eau, de bog connecté et de fen

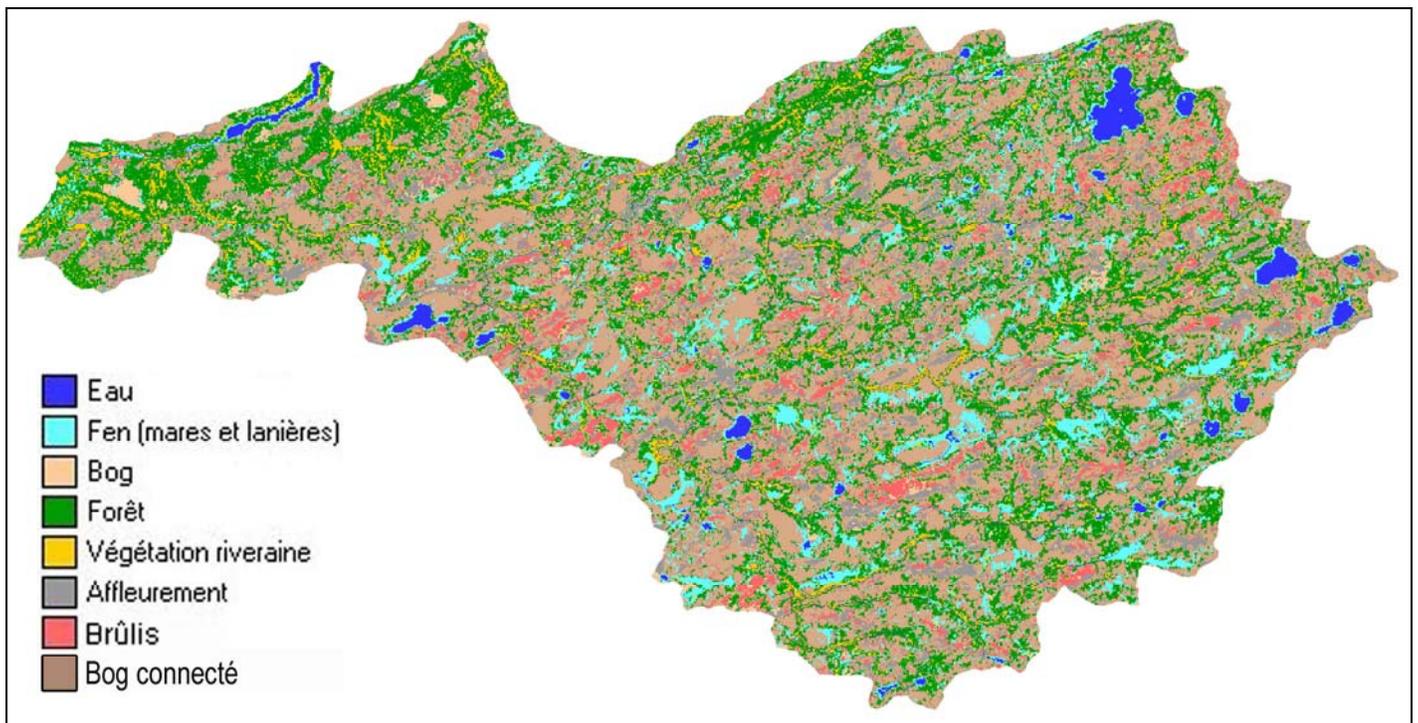


Figure 24 : Résultat de l'algorithme de connexion incluant l'adjacence des pixels d'eau, de bog connecté et de végétation riveraine

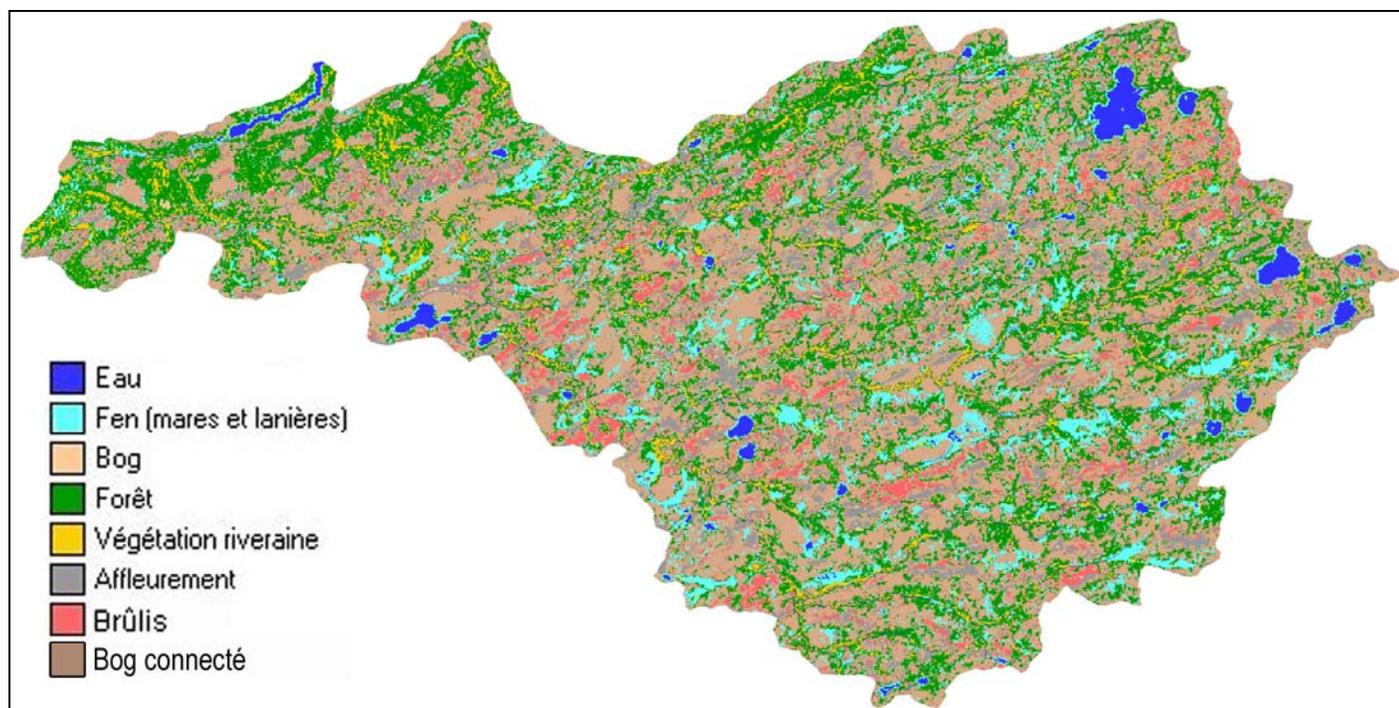


Figure 25 : Résultat de l'algorithme de connexion incluant l'adjacence des pixels d'eau, de bog connecté et de végétation riveraine

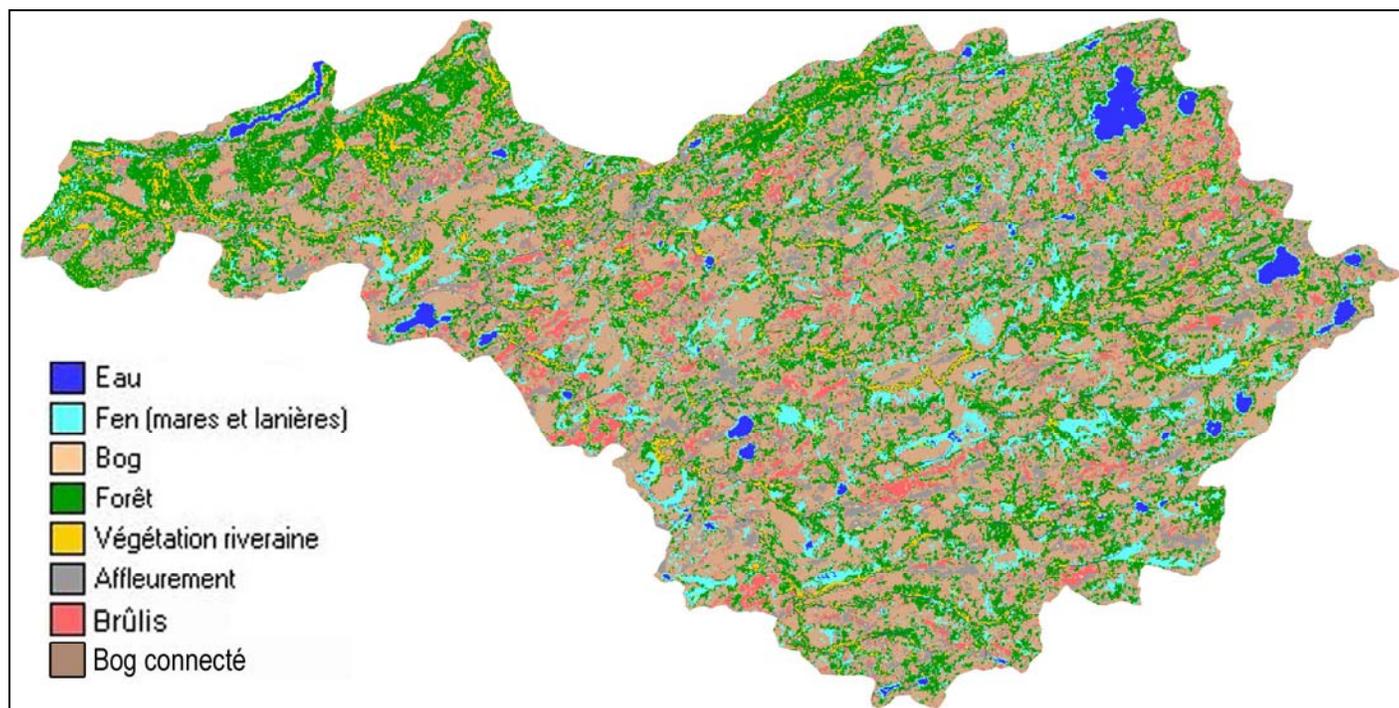


Figure 26 : Résultat de l'algorithme de connexion incluant l'adjacence des pixels d'eau, de bog connecté, de fen et de végétation riveraine