

Marc Girard

**La régénération naturelle d'écosystèmes fortement perturbés :
le cas d'une tourbière exploitée du Bas-Saint-Laurent (Québec)**

Mémoire
présenté
à la Faculté des études supérieures
de l'Université Laval
pour l'obtention
du grade de maître ès arts (M.A.)

Département de géographie
FACULTÉ DES LETTRES
UNIVERSITÉ LAVAL

Mai 2000

... à Fabienne, mon épouse, qui s'est beaucoup sacrifiée pour me permettre de vivre cette aventure.

Résumé

La tourbière de Cacouna (Bas-Saint-Laurent, Québec) a été exploitée à des fins horticoles entre 1942 et 1975 par la méthode artisanale de la coupe par blocs. Durant cette période, les activités de récolte se sont déroulées sur plus de 48% de la superficie du site et ont fait perdre 34% du volume initial de tourbe. Maintenant abandonnée depuis plus de 40 ans dans certains secteurs, la tourbière a été progressivement recolonisée par la végétation. Nous avons étudié la végétation et les caractéristiques abiotiques de la tourbière de Cacouna en 1997 dans le but de déterminer si cette tourbière est redevenue un écosystème tourbeux fonctionnel. L'histoire de l'exploitation a été reconstituée au moyen d'une analyse de photographies aériennes (1930-1995) et d'une analyse dendrochronologique qui ont été intégrées dans un système d'information géographique. Les ordinations canoniques partielles montrent que le contexte historique des activités d'extraction a presque autant d'importance (23% de la variation) que les variables abiotiques (27%) pour expliquer les patrons de recolonisation végétale. L'abandon d'un secteur au même moment que ses voisins et la présence d'une nappe phréatique près de la surface du sol créent un contexte favorable au retour des sphaignes. Un secteur laissé à l'abandon au sein d'une zone toujours exploitée a une nappe phréatique basse, ce qui favorise l'implantation des arbres. La recolonisation végétale naturelle de la zone exploitée de la tourbière de Cacouna a été rapide, mais cette tourbière n'est pas redevenue un écosystème accumulateur de tourbe : seulement 10% de la superficie du site est recouvert par les sphaignes. Il serait possible d'augmenter considérablement le couvert en sphaignes de la tourbière de Cacouna par des mesures hydrologiques simples telles que le blocage des canaux de drainage.



Marc Girard
étudiant gradué



Claude Lavoie
directeur



Marius Thériault
codirecteur

Remerciements

Ce travail de recherche est le fruit de mes efforts certes, mais sa réalisation fut en bonne partie possible grâce à l'entière collaboration que m'ont apportée plusieurs personnes. D'abord, je tiens à remercier Monsieur Claude Lavoie, mon directeur, pour la confiance dont il a fait preuve en m'offrant de poursuivre des études supérieures avec lui. Il m'a donné tout le soutien et l'encadrement nécessaire pour me permettre de réussir ce projet. Il y a aussi mon codirecteur, Monsieur Marius Thériault, qui m'a prodigué de judicieux conseils à chacune de nos rencontres. Il s'est rendu disponible et diligent autant que l'a été mon directeur. J'ai donc connu un encadrement fertile en recommandations qui s'est fait dans un esprit de saine collaboration. Monsieur Gilles Houle, professeur au Département de biologie de l'Université Laval, mérite également ma gratitude pour le temps qu'il a pris à lire, corriger et commenter ce mémoire.

Mes assistants, Stéphanie Pellerin, Steeve Pomerleau et Claudia Zimmermann, reçoivent toute ma gratitude pour m'avoir prêté main forte au cours des trois mois de labeur qui furent nécessaires pour récolter les données sur le terrain. Je remercie particulièrement Stéphanie, Steeve et Annie Saint-Louis pour m'avoir aidé au traitement des échantillons en laboratoire et à la saisie de l'information. Je remercie également le GRET (Groupe de recherche en écologie des tourbières) pour l'accès à son laboratoire lors de l'analyse des échantillons d'eau, ainsi que Monique Poulin et Bruno Drolet pour leur aide en analyses statistiques. Je dois aussi une fière chandelle à mes deux collègues Tim Van Seters et Grant Whitehead de l'Université de Waterloo pour leurs nombreuses questions sur la végétation de la tourbière de Cacouna qui m'ont fait réfléchir sur le lien à établir entre les communautés végétales et les propriétés hydrophysiques de ce milieu si particulier.

Je suis tout spécialement reconnaissant envers Messieurs Robert Gauthier et Claude Roy de l'Herbier Louis-Marie, pour m'avoir aidé à identifier les espèces de sphaignes, de lichens et de plantes vasculaires jusque-là inconnues à mes yeux.

Messieurs Daniel Borcard, du Département des sciences biologiques de l'Université de Montréal, et Martin Jean, du Centre Saint-Laurent, m'ont été d'un grand secours dans la compréhension de l'analyse multivariée par ordination.

Je remercie Monsieur Pierre Lemieux, informaticien au CRAD (Centre de recherche en aménagement et développement), pour son expertise en programmation et son support toujours très apprécié en informatique.

Je désire remercier le propriétaire de la tourbière de Cacouna, soit la compagnie Premier Horticulture ltée, pour m'avoir autorisé à travailler sur le site. Monsieur Bertrand Mailloux, employé chez Premier Horticulture ltée et ayant participé à la récolte manuelle de la tourbe, mérite ma reconnaissance pour m'avoir généreusement transmis son savoir sur les opérations qui se sont déroulées dans la tourbière de Cacouna.

Enfin, cette recherche aura été rendue possible grâce au support financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada et de même que de l'industrie canadienne de la tourbe horticole (Association canadienne de mousse de tourbe inc., Association des producteurs de tourbe du Québec inc., Compagnie de tourbe Fafard ltée, Fafard et frères ltée, La mousse acadienne, Premier Horticulture ltée, Tourbières Berger inc., Tourbières Lambert inc., SunGro Horticulture inc.).

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
1.0 INTRODUCTION	1
2.0 SITE D'ÉTUDE	6
3.0 MÉTHODES	11
3.1 ANALYSE HISTORIQUE	11
3.2 SÉLECTION DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE	12
3.3 ÉCHANTILLONNAGE	12
3.4 ANALYSE DES DONNÉES	14
4.0 RÉSULTATS	19
4.1 ÉVOLUTION DE LA SUPERFICIE DE LA TOURBIÈRE	19
4.2 HISTOIRE DE L'EXPLOITATION ET DE L'ABANDON DE LA TOURBIÈRE	19
4.3 ÉVOLUTION DE L'ÉPAISSEUR DU DÉPÔT DE TOURBE	20
4.4 CARACTÉRISTIQUES ABIOTIQUES DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE	22
4.4.1 MICROTOPOGRAPHIE	22
4.4.2 NAPPE PHRÉATIQUE	22
4.4.3 ACIDITÉ ET CONDUCTIVITÉ DE L'EAU	22
4.5 VÉGÉTATION DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE	23

4.6	ORDINATIONS	24
4.6.1	VÉGÉTATION DES TRANCHÉES ET ENVIRONNEMENT	24
4.6.2	VÉGÉTATION DES TRANCHÉES ET STRUCTURE SPATIO- HISTORIQUE	24
4.6.3	ESPÈCES ET ENVIRONNEMENT	27
4.6.4	ESPÈCES ET STRUCTURE SPATIO-HISTORIQUE	30
4.6.5	ESPÈCES, ENVIRONNEMENT ET STRUCTURE SPATIO- HISTORIQUE	31
4.6.6	ORDINATIONS CANONIQUES PARTIELLES	32
4.7	RELATION NAPPE PHRÉATIQUE - VÉGÉTATION	33
5.0	DISCUSSION	35
5.1	CACOUNA : UN SITE TRANSFORMÉ	35
5.2	CACOUNA : UNE TOURBIÈRE EN RÉGÉNÉRATION	37
5.3	CACOUNA : TEST DES HYPOTHÈSES	39
6.0	CONCLUSION	42
7.0	RÉFÉRENCES	44
	Annexe A : Variables abiotiques et spatio-historiques et relevés de végétation des tranchées échantillonnées dans la tourbière de Cacouna (étés 1997-1998)	52
	Annexe B : Les conséquences de la récolte manuelle de la tourbe	54
	Annexe C : A - Données intégrées dans le système d'information géographique (SIG)	55
	Annexe C : B - Schéma conceptuel du SIG	56
	Annexe D : Les éléments de terrain et l'utilisation du sol de la tourbière de Cacouna	57
	Annexe E : Recouvrement de la surface du sol par les sphaignes dans la zone exploitée de la tourbière de Cacouna	58
	Annexe F : Recouvrement de la surface du sol par les arbres dans la zone exploitée de la tourbière de Cacouna	59

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Histoire des perturbations ayant affecté la tourbière de Cacouna et du processus d'abandon des activités de récolte de tourbe	7
Figure 2 : Méthode artisanale de la coupe par blocs à la tourbière de l'Isle-Verte	9
Figure 3 : Répartition spatiale de l'épaisseur du dépôt de tourbe à la tourbière de Cacouna en 1946 et en 1998	21
Figure 4 : Graphique bidimensionnel de l'analyse canonique redressée situant les unes par rapport aux autres les tranchées de minage de la tourbière de Cacouna	25
Figure 5 : Graphique bidimensionnel de l'analyse canonique des correspondances indiquant la relation entre les espèces végétales recensées dans les tranchées de minage de la tourbière de Cacouna et les variables abiotiques	29
Figure 6 : Graphique bidimensionnel de l'analyse canonique des correspondances indiquant la relation entre les espèces végétales recensées dans les tranchées de minage de la tourbière de Cacouna et les variables spatio-historiques	31
Figure 7 : Niveau moyen de la nappe phréatique dans les tranchées de la tourbière de Cacouna et sous différents couverts de végétation au cours de l'été 1998	34

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Résultats de l'analyse des correspondances redressée et de l'analyse canonique des correspondances servant à étudier la recolonisation végétale naturelle de la tourbière de Cacouna	26
Tableau 2 : Coefficients de corrélation inter-set des variables abiotiques avec les deux premiers axes canoniques de l'analyse canonique redressée et pour les deux analyses canoniques des correspondances servant à étudier la recolonisation végétale naturelle de la tourbière de Cacouna	26
Tableau 3 : Coefficients de corrélation inter-set des variables spatio-historiques avec les deux premiers axes canoniques de l'analyse canonique redressée et pour les deux analyses canoniques des correspondances servant à étudier la recolonisation végétale naturelle de la tourbière de Cacouna	27
Tableau 4 : Influence respective des groupes de variables utilisées dans l'étude de la recolonisation végétale naturelle de la tourbière de Cacouna, déterminée grâce à la méthode de Borcard <i>et al.</i> (1992)	33
Tableau 5 : Analyse factorielle de la variance en mesures répétées du niveau de la nappe phréatique observé dans 84 puits de la tourbière de Cacouna regroupés en quatre classes selon la végétation qui entoure les puits	33
Tableau 6 : Test de comparaisons simples orthogonales entre les niveaux de la nappe phréatique	34

1.0 Introduction

Sous toutes les latitudes, la plupart des écosystèmes subissent des perturbations de nature anthropique qui affectent leur intégrité écologique. Si on connaît relativement bien comment les écosystèmes forestiers réagissent et se régénèrent après de telles perturbations (Foster *et al.* 1997; Fuller *et al.* 1998; Honnay *et al.* 1999), on sait peu de choses sur le potentiel de régénération des milieux humides après des perturbations sévères. En général, la composition végétale de ces milieux change selon la nature de la perturbation et l'intensité de l'utilisation des terres environnantes. Par exemple, dans les cités, la biodiversité des écosystèmes humides décroît de façon constante après leur encerclement par un tissu urbain, puisqu'ils sont fortement affectés par leur fragmentation, leur isolement et leur contamination par des matières polluantes (Grayson *et al.* 1999). En milieu agricole, le déboisement des rives d'un cours d'eau favorise un contingent d'espèces adaptées à croître sur un substrat instable, espèces absentes des rives qui ont gardé leur couverture forestière originelle (Stevens & Cummins 1999). D'autre part, le déboisement des terres entourant une tourbière peut se traduire par le rehaussement du niveau de la nappe phréatique de la tourbière, ce qui occasionne le remplacement de la végétation arbustive originelle par des espèces typiques des marécages (Bunting *et al.* 1998).

Les tourbières, qui figurent parmi les écosystèmes humides les plus répandus dans l'hémisphère boréal (Rubec 1996), font aussi l'objet de perturbations importantes *in situ*, notamment à des fins industrielles. Dans l'Est de l'Amérique du Nord, les tourbières ombrotrophes sont exploitées par l'industrie de la tourbe horticole depuis le milieu des années 1930 (Fortin & Lechasseur 1993). Le drainage des tourbières et l'extraction de la

tourbe endommagent sévèrement la structure du milieu et perturbent tout le fonctionnement de l'écosystème (Wheeler & Shaw 1995; Rochefort & Bastien 1998). Les superficies exploitées sont exemptes d'acrotelme (Rochefort *et al.* 1997), structure végétale composée essentiellement d'un tapis dense de sphaignes vivantes et qui est un élément essentiel pour maintenir en permanence la nappe phréatique près de la surface du sol (Ingram 1978; Ivanov 1981; Damman 1986; Price 1996). Pour sa part, la tourbe de sphaignes décomposées qui constitue le catotelme, est profondément altéré et son épaisseur fortement réduite (Buttler *et al.* 1998). Les tourbières ne sont pas exploitées jusqu'à l'épuisement du dépôt tourbeux. La tourbe de moindre qualité, souvent très décomposée, est laissée sur place. Cette tourbe peut atteindre une épaisseur de plusieurs mètres dans certains cas, et c'est sur ce substrat que la recolonisation végétale s'effectue après l'abandon des activités d'exploitation. Cette recolonisation se fait dans un environnement hostile, surtout pour les sphaignes : faible humidité à la surface du sol, action importante des agents d'érosion et des processus périglaciaires, absence d'un réservoir de graines viables, etc. (Schouwenaars 1993; Heathwaite 1994; Salonen 1994; Price 1997, 1998). La recolonisation végétale qui s'amorce à partir de la tourbe à nu n'évolue donc pas toujours vers le rétablissement d'une végétation typique des tourbières ombrotrophes (Grosvernier 1997).

Au Canada, la plus grande concentration de tourbières exploitées puis abandonnées se situe dans la région du Bas-Saint-Laurent, au Québec (Famous *et al.* 1991). Un inventaire des tourbières abandonnées réalisé dans cette région (Rochefort & Quinty 1996) a montré que même si la recolonisation végétale s'est déroulée avec succès sur certains sites, la végétation se compose surtout d'espèces envahissantes peu apparentées aux milieux tourbeux, d'arbustes de la famille des éricacées ou encore de communautés végétales

dominées par des espèces arborescentes (Lavoie & Rochefort 1996; Lavoie & Saint-Louis 1999; Bérubé & Lavoie 2000). La présence de la sphaigne, principal taxon producteur de tourbe et plante typique des tourbières ombrotrophes, est marginale.

Au Canada, les industriels de la tourbe, de concert avec les gouvernements, ont opté pour la restauration des tourbières abandonnées afin de donner à leurs activités une perspective de développement durable (Canadian Sphagnum Peat Moss Association 1990; Gouvernement du Canada 1991, 1994; Hood 1992, 1997; Lynch-Stewart 1992). Cette volonté s'est manifestée par la production d'un guide de restauration des tourbières qui suggère aux industriels une méthode pour favoriser le retour des sites abandonnés en écosystèmes tourbeux fonctionnels (Quinty & Rochefort 1997a). Les techniques de restauration se fondent sur le résultat d'expériences réalisées en serres (Campeau & Rochefort 1996) et sur le terrain (Rochefort *et al.* 1995; Bugnon *et al.* 1997; Ferland & Rochefort 1997; Quinty & Rochefort 1997b; Price *et al.* 1998). On ignore néanmoins si les méthodes seront efficaces à moyen ou long terme. Une des façons d'améliorer les techniques de restauration et de s'assurer de leur pérennité est de planifier une approche intégrée associant les méthodes actives de restauration aux processus naturels de régénération des sites. En effet, dans certains cas, les communautés végétales présentes sur les sites tourbeux abandonnés ressemblent fortement à ce que l'on trouve dans les tourbières non perturbées (Lavoie & Rochefort 1996). Notre étude vise donc, à l'aide d'une méthode d'analyse simple, à identifier les caractéristiques-clés favorisant la recolonisation végétale naturelle d'une tourbière abandonnée.

La diversité des patrons végétaux que l'on trouve dans les tourbières abandonnées, résultat d'une succession secondaire multi-directionnelle, est souvent étudiée en relation avec les variables environnementales du milieu (Green 1983; Smart *et al.* 1989; Salonen 1990, 1994; Salonen *et al.* 1992; Joosten 1992; Poschlod 1995; Buttler *et al.* 1996; Grosvernier 1997). Cependant, l'historique des interventions humaines est rarement considéré comme facteur pouvant influencer la recolonisation des surfaces perturbées. La description des activités de récolte sert parfois à expliquer les changements physico-chimiques observés dans le milieu (Elling & Knighton 1984; Smart *et al.* 1986; Gratton & Grenier 1992; Maltby 1992; Meade 1992; Lavoie & Rochefort 1996). La durée de l'exploitation sert également à évaluer l'intensité de la perturbation (Jonsson-Ninniss & Middleton 1991; Famous *et al.* 1991; Grosvernier *et al.* 1997a), mais elle ne fait pas réellement partie d'un modèle d'analyse permettant d'estimer sa véritable influence sur la régénération du site. Quelle est l'importance des facteurs historiques comparée à celle des facteurs abiotiques dans le processus de recolonisation végétale? Nous avons voulu tester l'hypothèse que les facteurs historiques (durée de l'exploitation, patrons d'abandon) ont une influence toute aussi grande sur la recolonisation végétale postexploitation des tourbières que les facteurs hydrologiques ou microtopographiques. De façon plus précise, nous avons supposé que la recolonisation végétale d'une section de tourbière abandonnée est d'autant meilleure (c'est-à-dire avec un bon couvert de sphaignes) :

- 1) que la superficie d'un secteur abandonné au sein de la zone exploitée est grande, et qu'il est abandonné en même temps que les secteurs voisins. La poursuite de l'exploitation dans les secteurs voisins favorise le maintien de la nappe phréatique à un niveau bas, ce qui empêche les sphaignes de recoloniser la section à l'abandon;

- 2) que la nappe phréatique du secteur se trouve près de la surface du sol au cours de la majeure partie de la saison estivale, favorisant ainsi la croissance des sphaignes;
- 3) que le secteur a une microtopographie irrégulière (alternance de tranchées de minage et de terre-pleins) minimisant l'action des agents d'érosion éolienne.

2.0 Site d'étude

La tourbière choisie pour cette étude est celle de Cacouna (Bas-Saint-Laurent, Québec), puisque ses patrons de recolonisation végétale sont représentatifs de la situation qui prévaut dans l'ensemble des tourbières abandonnées du Québec (Lavoie & Rochefort 1996, Robert *et al.* 1999). Cette tourbière fut exploitée pendant plus de 30 ans et 70% de la zone d'extraction fut perturbée par la méthode artisanale de la coupe par blocs. Notre analyse se concentre sur cette partie de la tourbière puisque c'est là que la recolonisation végétale naturelle connaît le plus de succès et est la plus diversifiée.

La tourbière ombrotrophe de Cacouna (47° 53' N., 69° 27' O.) a une superficie totale de 172 ha et gît à 83 m d'altitude au pied d'un coteau (Figure 1). Elle se trouve dans la région des terres humides du bas boréal (Groupe national de travail sur les terres humides 1988), à 10 km au nord-est de Rivière-du-Loup et à 6 km de la rive sud du fleuve Saint-Laurent. Dans cette région, les tourbières bombées se sont développées dans les petites dépressions (<3 000 ha) et sur les surfaces planes mal drainées (Lavoie & Rochefort 1996). Les dépôts de tourbe reposent sur de l'argile marine. Leur épaisseur peut atteindre 10 m à certains endroits (Gauthier & Grandtner 1975). Les données climatiques de la station météorologique de Saint-Arsène, la plus proche (2 km) du site étudié, indiquent que la température annuelle moyenne est de 3°C, la température moyenne du mois le plus froid (janvier) est de -12°C et celle du mois le plus chaud (juillet) est de 18°C. La moyenne des précipitations annuelles totales est de 924 mm, dont 27% tombent sous forme de neige (Environment Canada 1993).

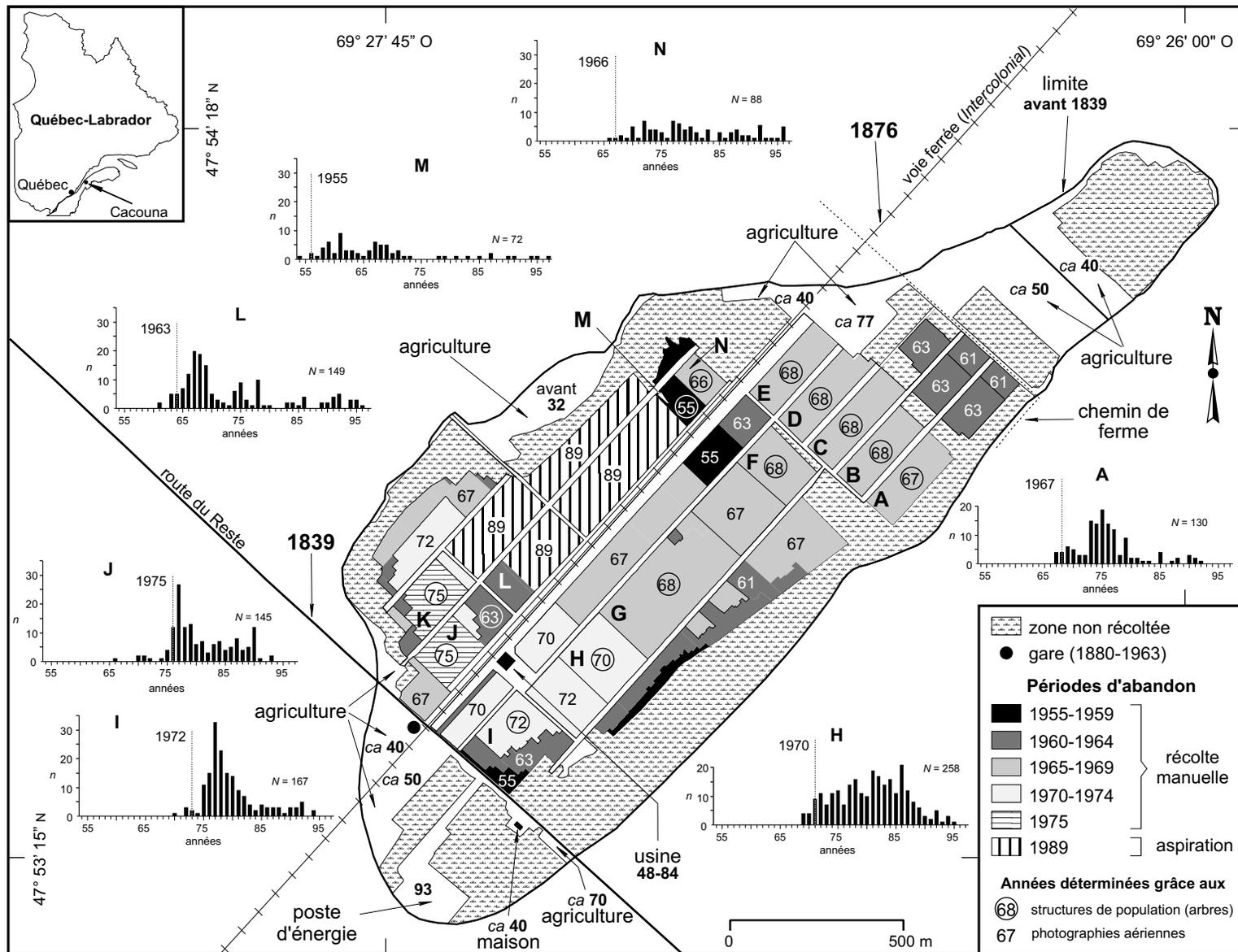


Figure 1. Histoire des perturbations ayant affecté la tourbière de Cacouna et du processus d'abandon des activités de récolte de tourbe. Pour les perturbations, une flèche indique l'emplacement de la surface tourbeuse perdue, le type de perturbation en cause et l'année au cours de laquelle l'activité perturbatrice a probablement eu lieu (seuls les deux derniers chiffres de l'année sont indiqués pour le 20^e siècle). La zone exploitée est divisée en secteurs classés selon la période d'abandon. Une lettre identifie les secteurs qui ont été échantillonnés. La reconstitution du processus d'abandon a été réalisée grâce à l'analyse des photographies aériennes et aux structures de populations d'arbres (toutes espèces confondues). En comparant les structures de populations avec les dates d'abandon de certains secteurs (J et K) fournies par des employés ayant travaillé dans la tourbière, on a constaté que 99% des individus arborescents que l'on trouve dans les tranchées se sont installés dans les années qui ont suivi l'abandon définitif des activités de récolte de tourbe. Il suffit donc de déterminer l'année à partir de laquelle 99% des arbres se sont installés pour trouver l'année approximative de l'abandon d'un secteur. Les structures de populations de certains secteurs ont été ajoutées à la figure pour illustrer cette méthode de datation. Le pointillé vertical sur chaque histogramme indique l'année à partir de laquelle 99% des arbres se sont installés. L'année d'abandon, aussi indiquée sur les histogrammes, correspond à l'année qui précède le pointillé.

La tourbière est perturbée une première fois en 1839 (Figure 1) par la construction d'une route (Lebel 1975). Vers 1850, l'écosystème est complètement isolé au sein d'une plaine agricole. En 1876, la construction d'un chemin de fer, l'*Intercolonial*, coupe la tourbière en deux parties (Fortin & Lechasseur 1993). Le chemin de fer brise alors tout lien hydrologique entre les parties, puisque la tourbe a été enlevée jusqu'au sol minéral à l'emplacement de la voie ferrée et remplacée par un ballast de gravier (Van Seters 1999).

En 1940, la compagnie *Allied Peat Moss Ltd.* de New York achète la tourbière de Cacouna et crée une filiale du nom de *Belle Peat Moss Inc.* pour l'exploiter à des fins horticoles (Dionne 1975). L'extraction de la tourbe qui servira à la composition de terreaux se fait au moyen de la coupe par blocs de 1942 à 1975. La récolte manuelle de la tourbe consiste à découper, à l'aide d'une bêche, des blocs de tourbe (35 x 20 x 15 cm) qu'on dépose sur les surfaces adjacentes non récoltées (Figure 2). Pour extraire les blocs, l'ouvrier creuse une tranchée d'environ un mètre de profondeur sur une longueur prédéterminée mais variable. La tranchée s'élargit chaque fois que l'ouvrier parvient à son extrémité et qu'il doit recommencer une nouvelle ligne de coupe. Les débris végétaux qui nuisent au travail de récolte sont déposés au centre de la tranchée lorsque celle-ci devient assez large pour les recevoir. La progression des travaux finit par faire disparaître complètement les terre-pleins qui séparent deux tranchées adjacentes. On recommence alors le même procédé dans la couche de tourbe sous-jacente et ainsi de suite. Plusieurs facteurs influencent le moment d'abandon d'un secteur de coupe. Dans la majorité des cas, la faible qualité de la tourbe justifie l'arrêt des travaux, surtout lorsqu'on atteint les couches les plus décomposées du substrat tourbeux. Dans d'autres cas, la présence de troncs d'arbres enfouis dans la tourbe ou



Figure 2. Méthode artisanale de la coupe par blocs à la tourbière de l'Isle-Verte, à 18 km à l'est de la tourbière de Cacouna. On distingue nettement la tranchée de minage et les deux terre-pleins adjacents où sont empilés les blocs de tourbe (photographie extraite de Risi *et al.* 1953).

la trop grande quantité de débris végétaux accumulés dans la tranchée entraînent la fin des activités d'extraction.

À Cacouna, 15 hommes découpent la tourbe en 1942. Le nombre de travailleurs passe à 200 en 1946. En 1948, une usine est construite près de la voie ferrée pour transformer, emballer, puis expédier les ballots de tourbe vers les marchés américains. Elle restera en opération jusqu'en 1984, traitant uniquement, à partir de 1975, de la tourbe en provenance des tourbières voisines (Bureau de recherche sur l'industrie de la tourbe dans l'Est du Québec 1984).

Aujourd'hui, la tourbière se divise en quatre parties (Figure 1) : *sud-ouest* (10 ha), isolée des autres sections par une route secondaire, *nord-est* (14 ha), encerclée par des terres agricoles et isolée du reste de la tourbière par un chemin de ferme, *nord-ouest* (49 ha) et *sud-*

est (99 ha), séparées l'une de l'autre par le chemin de fer. Un réseau de drains secondaires partiellement en opération quadrille la zone d'extraction et se relie à trois canaux principaux qui évacuent toujours une partie du contenu en eau de la tourbière (Van Seters 1999).

3.0 Méthodes

3.1 ANALYSE HISTORIQUE

Un ensemble de documents historiques permet de faire une reconstitution précise des perturbations qui ont affecté la tourbière de Cacouna au cours des 19^e et 20^e siècles. On peut puiser dans les ouvrages de Bouchette (1832), Robert (1965), Lebel (1975), Dionne (1975) et Fortin & Lechasseur (1993) des informations sur l'histoire socio-économique de la région du Bas-Saint-Laurent. Les dossiers du Bureau de la recherche sur l'industrie de la tourbe dans l'Est du Québec (1979, 1984) et le rapport de Girard (1947) contiennent plusieurs détails sur l'exploitation de la tourbière de Cacouna. Treize photographies aériennes (1932, 1948, 1961, 1963, 1970, 1973, 1974, 1978, 1979, 1983, 1986, 1991 et 1995) couvrent la tourbière. Sur les photographies, les signes d'une exploitation active sont évidents : tranchées de minage en expansion, empilements de blocs de tourbe et abris pour la tourbe. Toutes les photographies ont été numérisées, corrigées pour minimiser les distorsions géométriques à l'aide du logiciel Geographic Transformer™ et insérées au sein d'un système d'information géographique (SIG) grâce au logiciel MapInfo Professionnal®. L'épaisseur du dépôt de tourbe de l'ensemble du site a aussi fait l'objet d'une cartographie en 1946 (Drolet 1946). L'épaisseur du dépôt a été mesurée en appliquant sur le site une grille de 70 points d'échantillonnage distancés les uns des autres de 150 m. Une analyse comparative du dépôt de tourbe a été réalisée en rééchantillonnant les mêmes sites (mesure de l'épaisseur du dépôt en enfonçant une tige métallique dans la tourbe jusqu'au sol minéral sous-jacent) au cours de l'été 1998. Cette opération a permis de réaliser, au moyen de la

méthode d'interpolation par krigeage avec le logiciel Surfer[®], la carte de l'épaisseur du dépôt de tourbe au tout début de l'exploitation du site et plusieurs années après la fin de celle-ci.

3.2 SÉLECTION DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE

La zone exploitée dans la tourbière de Cacouna est très vaste. Elle comporte 511 tranchées et 445 terre-pleins. Comme nous ne pouvions échantillonner l'ensemble de ces tranchées et terre-pleins, nous nous sommes concentrés sur les tranchées où les patrons de recolonisation végétale sont particulièrement diversifiés (Lavoie & Rochefort 1996). Toutes les tranchées de la tourbière ont été visitées pour identifier 14 secteurs homogènes quant à leur structure de végétation (importance du couvert en sphaignes et en arbres) et leur microtopographie (présence/absence des terre-pleins). Deux tranchées par secteur ont été sélectionnées au hasard pour échantillonnage, exception faite de deux secteurs où seulement une tranchée fut choisie en raison du petit nombre de tranchées présentes ($n = 5$). Nous avons donc échantillonné un grand total de 26 tranchées de minage.

3.3 ÉCHANTILLONNAGE

Dans les tranchées sélectionnées, la végétation fut recensée au cours de l'été 1997 à l'aide de la méthode du relevé ponctuel (Floyd & Anderson 1987; Bonham 1989; Lavoie & Rochefort 1996). Six lignes également espacées ont été disposées dans le sens de la longueur des tranchées. La présence de toutes les espèces de plantes vasculaires, de mousses, de sphaignes, d'hépatiques et de lichens couvrant un point d'une taille réduite (diamètre : 1 cm) a été noté à tous les 2 m le long de chaque ligne. Les lignes numérotées 1, 3, 5 ou 2, 4, 6 (un des deux groupes choisi au hasard) ont été utilisées pour échantillonner les arbres. L'individu arborescent situé le plus près d'un point d'échantillonnage disposé à tous les 4 m

le long des lignes choisies et à l'intérieur d'un rayon de 4 m, a été échantillonné. Une section transversale de la tige a été prélevée à la hauteur du collet. Ces sections transversales sont utiles, car il est rare que les arbres s'installent dans une tranchée de minage lors de l'exploitation de celle-ci. Par contre, ils envahissent de façon massive les tranchées au cours des deux ou trois années qui suivent l'abandon. En conséquence, la structure d'âge des populations arborescentes présentes dans les tranchées de minage fournissent des indications sur l'année d'abandon des tranchées (Lavoie & Rochefort 1996). En laboratoire, chaque section transversale a été sablée au papier fin pour permettre le comptage des cernes annuels de croissance et ainsi déterminer l'âge de l'arbre sur lequel l'échantillon de bois a été prélevé.

L'élévation relative d'un point d'échantillonnage placé à tous les 10 m le long des bordures (lignes 1 et 6) et du centre de la tranchée a été mesurée en utilisant un niveau d'arpentage. L'épaisseur du dépôt de tourbe a été mesurée à tous les 10 m le long d'une ligne située au centre de la tranchée. Le niveau de la nappe phréatique a été suivi grâce à un réseau de puits creusés au centre et à chaque extrémité des tranchées. Un échantillon d'eau a été prélevé le 31 juillet 1997 dans chacun des puits pour déterminer les valeurs de pH et de conductivité spécifique. En laboratoire, le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre et la conductivité spécifique avec un conductivimètre dont la valeur fut ajustée à 20°C et corrigée pour éliminer l'effet des ions hydrogène $[H^+]$ attribuable aux différences de pH (Sjörs 1950). Le niveau de la nappe phréatique a été mesuré sur une base hebdomadaire au cours de l'été 1998 (du 19 mai au 28 août). Toutes les données prélevées dans ce travail ont été spatialisées et incorporées au sein du SIG.

La nomenclature utilisée est celle de Scoggan (1978-1979) pour les plantes vasculaires, Anderson, Crum & Buck (1990) pour les mousses, Anderson (1990) pour les sphaignes, Stotler & Crandall-Stotler (1977) pour les hépatiques et Esslinger & Egan (1995) pour les lichens. L'association des espèces à un régime trophique et hydrique particulier a été effectuée grâce aux travaux de Gauthier & Grandtner (1975), Gauthier (1980) et Gérardin *et al.* (1984).

3.4 ANALYSES DES DONNÉES

Trois ensembles de données ont été conçus pour étudier la relation entre la végétation, l'environnement et les composantes spatiales et historiques des sites. Les données relatives à chacun des thèmes sont rassemblées en un tableau (matrice de données) composé de j colonnes (j stations d'échantillonnage) et de i lignes (i variables descriptives; ex. : espèces présentes dans le relevé). La matrice sur la végétation comporte 26 sites d'échantillonnage (tranchées) où ont été inventoriées toutes les espèces de plantes vasculaires et invasculaires. Pour chaque espèce dans chaque site, la proportion d'apparition (rapport entre le nombre de points d'échantillonnage où l'espèce est présente et le nombre total de points d'échantillonnage dans la tranchée) a été calculée. Les variables du milieu qui composent la matrice environnementale sont, pour chaque tranchée : 1) le rapport entre la largeur de la tranchée et la largeur moyenne des deux terre-pleins adjacents, 2) la pente moyenne, 3) l'importance du bombement central, soit la différence moyenne d'élévation entre la surface du sol au centre de la tranchée et la surface du sol aux bordures, 4) l'épaisseur moyenne de la tourbe, 5) le pH moyen de l'eau, 6) la conductivité spécifique moyenne de l'eau, 7) le niveau moyen de la nappe phréatique du puits creusé au centre de la tranchée

(une valeur négative indiquant un niveau d'eau sous la surface du sol) et 8) la fluctuation de la nappe phréatique, soit l'écart-type des mesures hebdomadaires du niveau d'eau du puits situé au centre de la tranchée. Pour sa part, la matrice constituée des données spatiales et historiques (matrice spatio-historique) est formée 1) de la position (en mètre) du centroïde des tranchées sur l'axe longitudinal (ouest-est), 2) de la position (en mètre) du centroïde des tranchées sur l'axe latitudinal (sud-nord), 3) de la durée de l'exploitation des tranchées, 4) du temps écoulé depuis l'abandon des activités d'extraction et 5) du nombre de secteurs adjacents toujours en exploitation au moment de l'abandon.

L'influence des conditions environnementales et du contexte spatial et historique sur la répartition et l'abondance des espèces végétales a été analysée grâce aux analyses canoniques redressées (ACR) et des correspondances (ACC). Ces techniques d'analyses multivariées respectent le concept de la réponse unimodale (courbe de Gauss) des espèces face aux conditions du milieu (ter Braak 1986). La pertinence d'utiliser conjointement l'ACR et l'ACC est décrite par Økland (1990) et Borcard *et al.* (1992). On utilise d'abord l'ACR, qui est une méthode indirecte d'analyse de gradients, afin d'identifier les principaux assemblages végétaux. On raffine ensuite le travail grâce à l'ACC pour déterminer la répartition des espèces le long de gradients environnementaux formés de la combinaison linéaire des variables de l'habitat (ter Braak 1987; ter Braak & Prentice 1988). L'ACC réduit la multidimensionnalité des données à deux ou trois axes principaux le long desquels la dispersion de l'amplitude écologique des espèces est maximisée (ter Braak 1987). Un graphique bidimensionnel illustre la relation qui existe entre la végétation et son environnement : les points représentent les espèces ou les stations d'échantillonnage, alors

que les vecteurs symbolisent les variables mesurées sur le terrain. La direction et la longueur des vecteurs révèlent la composition et l'importance des gradients.

Les ordinations ont été réalisées avec le logiciel CANOCO (ter Braak & Šmilauer 1998). Les données ont été transformées en utilisant l'option sous-pondération des espèces rares afin de réduire l'influence excessive de ces plantes (Hill & Gauch 1980). La mise à l'échelle des graphiques bidimensionnels a été effectuée avec l'option double projection, laquelle convient mieux aux petits gradients (ter Braak et Šmilauer 1998). La signification statistique de chaque ordination a été évaluée à l'aide d'un test de permutation de type Monte Carlo (ter Braak 1990).

Les influences respectives de l'environnement et du contexte spatio-historique sur la répartition et l'abondance des espèces végétales ont été évaluées en appliquant la méthode de Borcard *et al.* (1992). Cette méthode affine l'ACC afin de fractionner la variation écologique totale en composantes indépendantes, soit la composante environnementale, la composante spatio-historique et la composante non déterminée par les variables explorées. En outre, elle permet non seulement de déterminer la contribution respective de chaque composante, mais aussi d'évaluer la proportion de la variation issue de l'interaction entre les composantes. La méthode consiste à utiliser les valeurs propres canoniques produites par CANOCO lors de deux ordinations régulières (espèces vs variables abiotiques et espèces vs variables spatio-historiques) et lors de deux ordinations partielles. Dans le cas des ordinations partielles, on essaie, dans un premier temps, de déterminer l'influence pure des variables de l'environnement en retranchant l'effet des variables spatio-historiques, et, dans un deuxième temps, de déterminer l'influence pure des variables spatio-historiques en retranchant l'effet

des variables de l'environnement. Les valeurs propres canoniques issues de ces ordinations sont ensuite transformées en pourcentage de la variation totale des espèces en divisant la somme de toutes les valeurs propres par le coefficient d'inertie totale (Borcard *et al.* 1992; Jean & Bouchard 1993). Il est alors possible de déterminer l'influence respective des ensembles de variables sur la végétation.

Finalement, puisque dans les tourbières abandonnées, le niveau de la nappe phréatique semble être un facteur-clé pour expliquer la répartition des espèces végétales (Fisher *et al.* 1996; Lavoie & Rochefort 1996), nous avons analysé son effet avec plus de précision en regroupant tous les puits en quatre classes selon la végétation entourant ces derniers (rayon de 10 m autour du trou). Pour cette analyse, seuls les sphaignes et les arbres ont été considérés. En effet, il s'agit des groupements végétaux qui manifestent le plus de disparités dans leur répartition spatiale (au sein même d'une tranchée et dans l'ensemble de la tourbière) et qui sont les plus sujets à réagir aux fluctuations du niveau de la nappe phréatique (Ivanov 1981; Foster & Glaser 1986; Lavoie & Rochefort 1996).

Les données de végétation et la position exacte des puits ayant été spatialisées au sein du SIG, nous avons pu déterminer avec précision la proportion d'apparition des sphaignes et des arbres (toutes espèces confondues) autour des puits. Les classes au sein desquelles les puits ont été regroupés sont les suivantes : S = puits où >25% des points d'échantillonnage dans un rayon de 10 m sont recouverts de sphaignes mais où <25% des points sont recouverts d'arbres, SA = puits entourés de >25% de sphaignes et >25% d'arbres, A = puits entourés de <25% de sphaignes et >25% d'arbres et E = puits entourés de <25% de

sphaignes et <25% d'arbres (donc où on ne trouve, pour l'essentiel, que des éricacées arbustives).

Les données sur les niveaux de la nappe phréatique ont été traitées grâce à une analyse factorielle de variance en mesures répétées à l'aide de la procédure MIXED du progiciel SAS (SAS Institute Inc. 1999). Une matrice de corrélation autorégressive d'ordre 1 [AR(1)], qui permet de tenir compte de l'effet de l'autocorrélation temporelle, a été utilisée comme modèle d'analyse. Des comparaisons simples orthogonales, appelées tests de contrastes (Steel & Torrie 1960), ont ensuite été effectuées pour déterminer quel(s) groupe(s) de puits diffère(nt) de façon significative des autres.

4.0 Résultats

4.1 ÉVOLUTION DE LA SUPERFICIE DE LA TOURBIÈRE

Les photographies aériennes, les données historiques et le SIG permettent de déterminer avec une grande exactitude les pertes de superficies de la tourbière à la suite d'une multitude d'activités humaines (Figure 1). En 1839, la tourbière de Cacouna a une superficie de 210,6 ha. Cette même année, la construction d'une route lui enlève 0,9 ha. La construction du chemin de fer en 1876 retranche 3,4 ha additionnels. Une gare ferroviaire érigée en 1880 sur la tourbière occupe pour sa part 0,4 ha. Entre 1839 et 1932, la tourbière perd aussi 5,3 ha en superficie au profit de l'agriculture. De 1932 à 1963, la superficie de la tourbière diminue de 19,5 ha à cause de la transformation de certains secteurs en terres agricoles. Entre 1963 et 1995, la surface de la tourbière est réduite de 8,9 ha. Les terres agricoles grugent alors 5,1 ha additionnels, les terrains résidentiels 0,6 ha, et un poste de transmission électrique installé en 1993 dans la partie sud-ouest prélève 3,2 ha. En 1995, la superficie de la tourbière de Cacouna n'est plus que de 172,2 ha, soit 82% de la superficie originale.

4.2 HISTOIRE DE L'EXPLOITATION ET DE L'ABANDON DE LA TOURBIÈRE

Les activités de récolte de la tourbe prennent leur essor au début des années 1940 par le dragage d'un tributaire de la Petite-Rivière-du-Loup qui draine la marge sud de la tourbière et par le creusage d'un canal principal sur sa bordure nord-ouest. L'exploitation de la tourbe s'amorce en 1942 sur les secteurs voisins du site de l'usine, pour atteindre un maximum (102,8 ha) au cours des années 1950. En 1947, un troisième drain principal est creusé au centre de la tourbière suivant un axe nord-ouest - sud-est. L'analyse détaillée des

photographies aériennes et des structures de population d'arbres (Figure 1) révèlent que des secteurs se trouvant en bordure de la zone exploitée, et quelques uns isolés au centre, sont abandonnés entre 1955 et 1964. Par la suite, c'est par grands blocs que l'abandon s'effectue entre 1965 et 1975. La séquence des abandons présente un patron concentrique, des extrémités de la zone exploitée vers l'usine, à l'exception de certains secteurs (ex. : L et M) qui ont été abandonnés au milieu de surfaces toujours en exploitation. En 1970, la récolte ne se fait plus que sur 21% de la superficie exploitée lors de son extension maximale, soit dans les secteurs situés à proximité de l'usine où la tourbe est encore fibrique et son transport facile. L'extraction manuelle de la tourbe se termine en 1975 avec l'abandon des deux derniers secteurs (J et K) encore en exploitation.

4.3 ÉVOLUTION DE L'ÉPAISSEUR DU DÉPÔT DE TOURBE

La comparaison du relevé sur le dépôt de tourbe de 1946 avec celui de 1998 (Figure 3) révèle que la tourbière de Cacouna a perdu le tiers (34%) de son volume initial de tourbe suite aux activités de récolte et à la subsidence (affaissement du dépôt de tourbe consécutif à son drainage et à son oxydation). Les pertes de volume sont réparties inégalement dans la tourbière. En 1946, l'épaisseur maximale du dépôt de tourbe se trouvait dans le secteur sud-ouest, soit au voisinage de l'ancien site de l'usine, alors que c'est dans le secteur nord-est de la zone d'extraction qu'elle se situe en 1998. En fait, on a récolté plus de tourbe dans les secteurs voisins de l'usine qu'ailleurs.

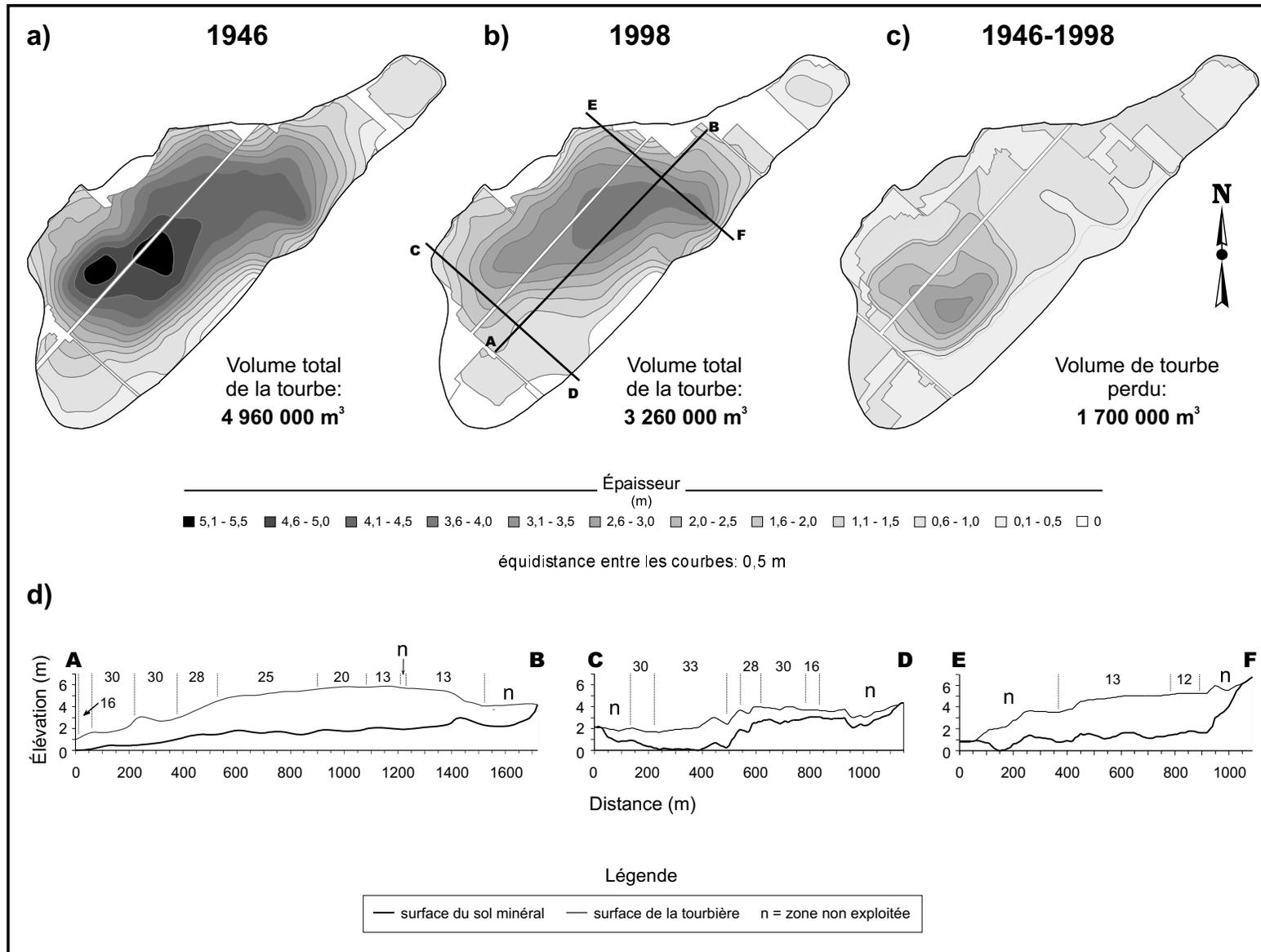


Figure 3. Répartition spatiale de l'épaisseur du dépôt de tourbe à la tourbière de Cacouna en 1946 (d'après Drolet 1946) et en 1998 (a et b). La répartition spatiale de l'épaisseur du dépôt de tourbe perdue entre les deux périodes est aussi illustrée (c). Les profils topographiques de la surface de la tourbière et de la surface du sol minéral sous-jacent (en 1998) sont indiqués (d) pour plusieurs transects (A-B, C-D et E-F) dont la position exacte se trouve sur la Figure 3b. Les chiffres au-dessus des profils indiquent la durée (en années) de l'exploitation des secteurs traversés par les transects, ces secteurs étant délimités par des traits verticaux.

4.4 CARACTÉRISTIQUES ABIOTIQUES DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE

4.4.1 MICROTOPOGRAPHIE

Dans les secteurs D, E et F (Figure 1), les terre-pleins ont été entièrement récoltés. La surface du sol est plane, quoique le profil légèrement convexe du centre des anciennes tranchées soit encore visible. Dans les autres secteurs, des terre-pleins de largeur variable sont toujours présents et le centre des tranchées est en général surélevé par rapport aux bordures (surtout dans le secteur G), sauf dans les secteurs L et M où les surfaces échantillonnées ont un profil légèrement concave (déprimé au centre).

4.4.2 NAPPE PHRÉATIQUE

Le niveau de la nappe phréatique se situe toujours sous la surface du sol et est très variable à l'échelle de la zone exploitée et entre les tranchées appartenant à un même secteur (Annexe A). Les tranchées avec une nappe très près de la surface du sol (en moyenne : <30 cm) se situent dans les secteurs D, F et J. Les tranchées avec les nappes phréatiques les plus éloignées de la surface du sol (en moyenne : >50 cm) se situent dans les secteurs C, G, H, L et M. D'autre part, c'est dans le secteur I que la nappe d'eau a fluctué le plus au cours de la saison estivale 1998 (écart-type : 14,0-15,6 cm), alors qu'elle fut la plus stable (écart-type : 7,0-9,4 cm) dans les secteurs L et M.

4.4.3 ACIDITÉ ET CONDUCTIVITÉ DE L'EAU

Les échantillons d'eau prélevés dans les puits en position centrale dans chaque tranchée révèlent que les valeurs de pH les plus élevées (4,5-5,1) se trouvent dans les secteurs H, I et J (donc, au sud-ouest de la tourbière), alors que les pH les plus acides (3,5-

3,7) ont été mesurés dans les secteurs D, E, F, K et M (en général, au nord-est de la tourbière). La conductivité spécifique est faible (28-42 μS) dans les secteurs D et F, moyenne (40-102 μS) dans les secteurs B, C, E, K, L, M et N, élevée (112-138 μS) dans les secteurs A, I, J et la tranchée no 1 du secteur H, et très élevée (185 μS) dans la tranchée no 2 du secteur H (Annexe A).

4.5 VÉGÉTATION DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE

Si on exclut les éricacées arbustives qui sont très abondantes partout, les sphaignes dominant (groupe végétal avec le plus fort recouvrement) dans les secteurs D, F et J. Les sphaignes et les arbres co-dominent dans les secteurs A, E, H et I, alors que les arbres dominant seuls les secteurs B, C, L, M et N (Annexe A). Chez les sphaignes, *Sphagnum capillifolium* est de loin la principale espèce recensée. On la trouve partout où le genre est présent, mais ce bryophyte occupe surtout les secteurs A, D, E, H, I et J avec une proportion d'apparition >20% dans la plupart des cas, et les secteurs F et G avec une proportion de 11-18%. Une autre sphaigne, *Sphagnum magellanicum*, deuxième espèce en importance, se trouve principalement dans les secteurs H, I et J. Pour leur part, *Sphagnum fallax* est surtout présente dans le secteur J, et *Sphagnum rubellum*, dans le secteur D. Une espèce particulière, *Sphagnum lindbergii*, dont l'aire de répartition est beaucoup plus nordique (R. Gauthier, comm. pers.), est présente dans le secteur D. Elle constitue un cas de dissémination sur une très longue distance, peut-être favorisé par l'abandon des tourbières exploitées (Soro *et al.* 1999). Chez les arbres, c'est le mélèze laricin (*Larix laricina*) qui est l'espèce arborescente dominante des secteurs L (proportion d'apparition >60%), I (>34%) et J (>13%), alors que le pin gris (*Pinus banksiana*) se trouve essentiellement dans les secteurs M (>60%) et N

(>42%). Pour sa part, l'épinette noire (*Picea mariana*) domine dans les secteurs A, B et E (>12%). Les bouleaux (*Betula* spp.) sont particulièrement abondants dans le secteur L (>27%).

4.6 ORDINATIONS

4.6.1 VÉGÉTATION DES TRANCHÉES ET ENVIRONNEMENT

Le graphique bidimensionnel de l'ACR (Figure 4) montre que c'est surtout l'axe 1 qui permet de distinguer entre elles les tranchées au niveau de leur structure de végétation. Les tranchées riches en sphaignes (S) se situent à gauche du graphique, celles où les sphaignes et les arbres co-dominent (SA) se trouvent au centre, alors que les tranchées boisées (A) sont à droite. Les variables abiotiques sont fortement reliées aux deux premiers axes (Tableaux 1 et 2). En particulier, les variables *niveau de la nappe phréatique* et *importance du bombement central* montrent une forte corrélation négative avec l'axe 1. Il importe à cet égard de rappeler que les valeurs de niveau de la nappe phréatique qui ont été incorporées dans le modèle ont toutes un signe négatif signifiant leur position sous la surface du sol. La variable *épaisseur du dépôt de tourbe* est corrélée négativement avec l'axe 2. Les variables *pH* et *conductivité spécifique* sont positivement corrélées avec l'axe 2.

4.6.2 VÉGÉTATION DES TRANCHÉES ET STRUCTURE SPATIO-HISTORIQUE

Sur le même graphique de l'ACR (Figure 4), l'axe 1 distingue assez bien les périodes d'abandon des sites. Les tranchées abandonnées il y a longtemps (avant 1965) se trouvent à la droite du graphique, alors que les sites à l'abandon depuis une plus courte période de temps (1975) se trouvent plutôt à gauche. Cependant, c'est l'axe 2 qui contribue le mieux à

distinguer les tranchées abandonnées entre 1965 et 1969 des tranchées abandonnées entre 1970 et 1974. Les variables spatio-historiques sont fortement associées aux deux premiers axes de l'ordination (Tableaux 1 et 3). Les variables *nombre de secteurs voisins en exploitation* et *durée de l'abandon* sont positivement corrélées avec l'axe 1, alors que les variables *position des sites (X et Y)* et *durée de l'exploitation* sont corrélées respectivement de façon négative et positive avec l'axe 2.

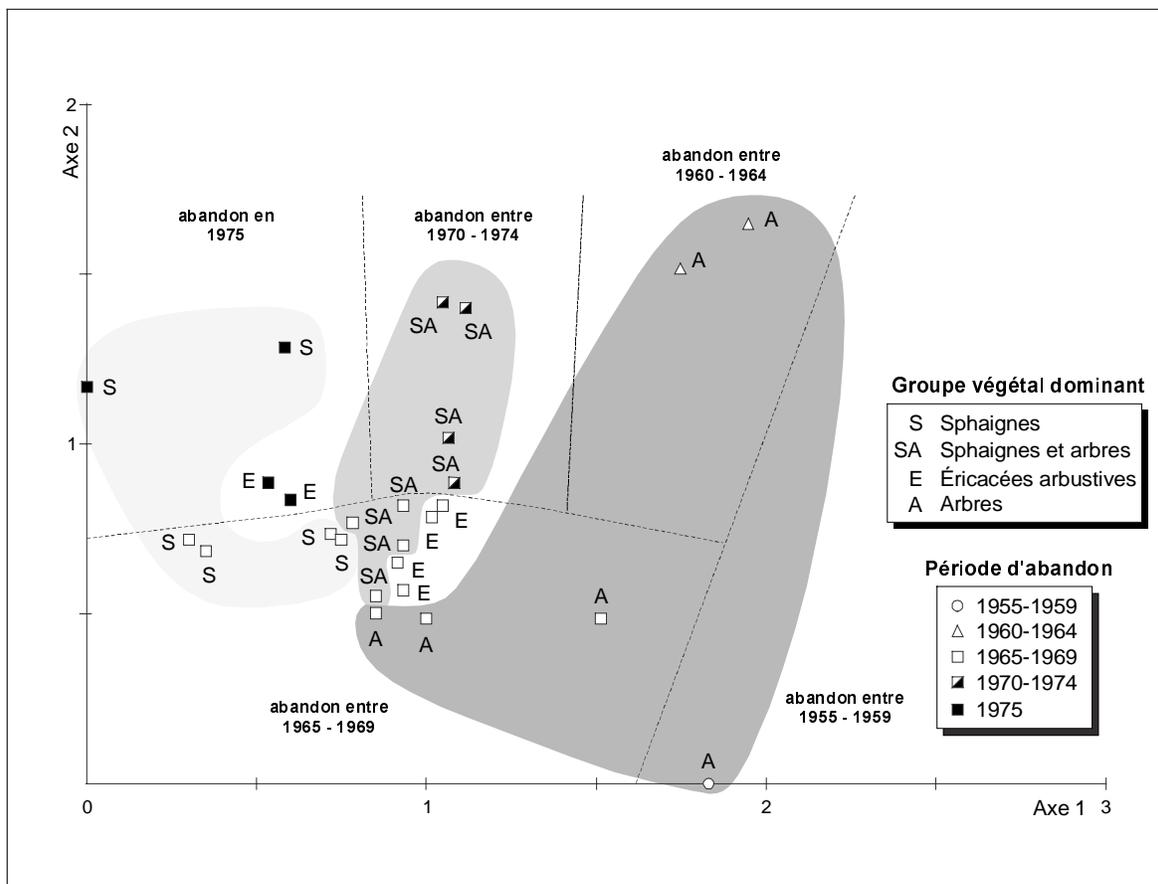


Figure 4. Graphique bidimensionnel de l'analyse canonique redressée (ACR) situant les unes par rapport aux autres les tranchées de minage de la tourbière de Cacouna. Le groupe végétal dominant des tranchées est identifié par un symbole alphabétique. Les tranchées appartenant à un même groupe sont encerclées, à l'exclusion des tranchées où on trouve peu d'arbres et de sphaignes (tranchées dominées uniquement par les éricacées arbustives). La période d'abandon des tranchées est représentée par un symbole géométrique et les regroupements sont séparés par des lignes pointillées.

Tableau 1. Résultats de l'analyse des correspondances redressée (ACR) et de l'analyse canonique des correspondances (ACC) servant à étudier la recolonisation végétale naturelle de la tourbière de Cacouna : valeur-propres et coefficients de corrélation associés à chacun des axes, pourcentages cumulatifs de la variance pour les deux premiers axes et tests de signification statistique de type Monte-Carlo pour le premier axe et l'ensemble du modèle d'analyse. On analyse en premier lieu la relation qui existe entre 1) la végétation et les variables abiotiques et 2) la végétation et les variables spatio-historiques. En second lieu, on étudie la relation qui existe entre 1) la végétation et les variables abiotiques moins l'effet des variables spatio-historiques et 2) la végétation et les variables spatio-historiques moins l'influence des variables abiotiques.

Analyses de la végétation	Valeur-propres		Coefficients de corrélation		% de la variance		Tests de signification	
	Axe 1	Axe 2	Axe 1	Axe 2	Axe 1	Axe 2	Axe 1	modèle
<i>variables abiotiques</i>								
ACR	0,21	0,12	0,92	0,71	38,2	56,2		
ACC	0,18	0,13	0,93	0,91	40,2	68,5	$P = 0,015^*$	$P = 0,005^*$
<i>variables spatio-historiques</i>								
ACR	0,21	0,12	0,82	0,86	33,7	62,1		
ACC	0,16	0,14	0,92	0,91	39,9	75,2	$P = 0,005^*$	$P = 0,005^*$
<i>variables abiotiques - spatio-historiques</i>								
ACC	0,08	0,06	0,87	0,81	35,6	63,2	$P = 0,18$	$P = 0,01^*$
<i>variables spatio-historiques - abiotiques</i>								
ACC	0,09	0,05	0,86	0,81	47,7	75,3	$P = 0,015^*$	$P = 0,005^*$

* significatif à $P < 0,05$

Tableau 2. Coefficients de corrélation inter-set des variables abiotiques avec les deux premiers axes canoniques de l'analyse canonique redressée et pour les deux analyses canoniques des correspondances servant à étudier la recolonisation végétale naturelle de la tourbière de Cacouna.

Variables abiotiques	ACR		ACC		ACC	
	Corrélations passives		sans covariable		avec les variables spatio-historiques comme covariables	
	Axe 1	Axe 2	Axe 1	Axe 2	Axe 1	Axe 2
pH	0,138	0,457	0,198	0,690	-0,618	0,250
conductivité spécifique	0,166	0,435	0,225	0,641	-0,488	0,459
niveau de la nappe phréatique	-0,777	0,104	-0,750	0,400	0,374	0,539
fluctuation de la nappe phréatique	-0,075	-0,230	-0,094	-0,058	-0,579	-0,203
épaisseur du dépôt de tourbe	0,021	-0,550	-0,060	-0,796	0,639	-0,172
importance du bombement central	-0,516	-0,234	-0,547	-0,152	0,083	-0,087
superficie du secteur	-0,134	-0,017	-0,159	-0,127	0,422	-0,351

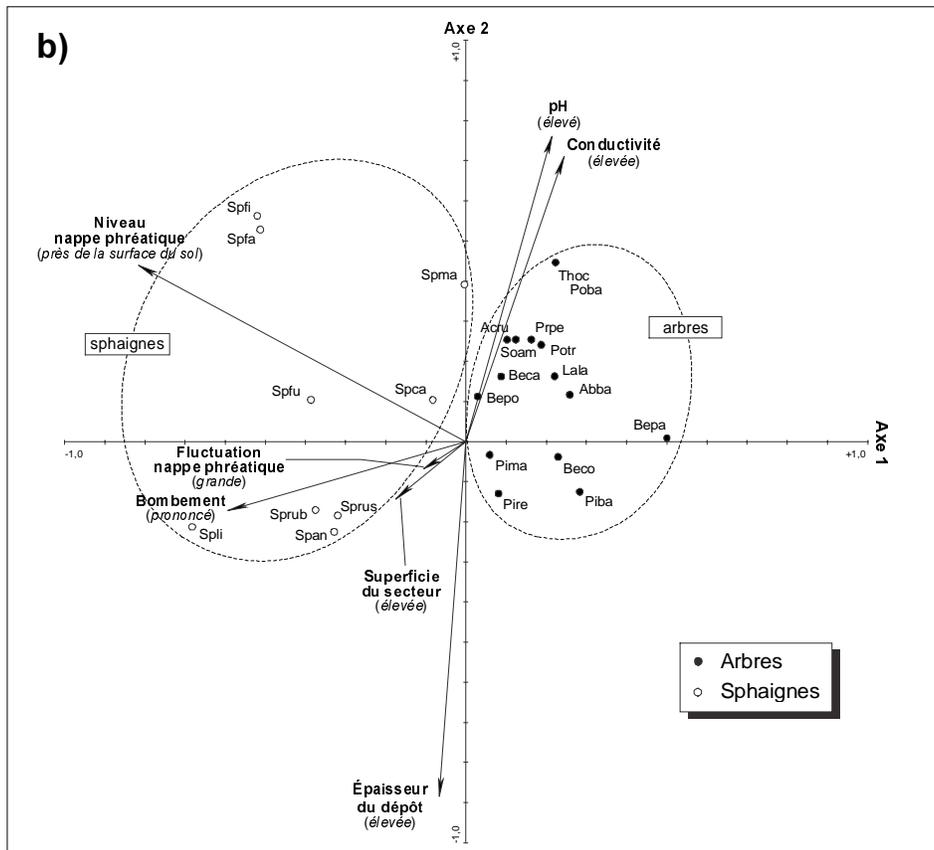
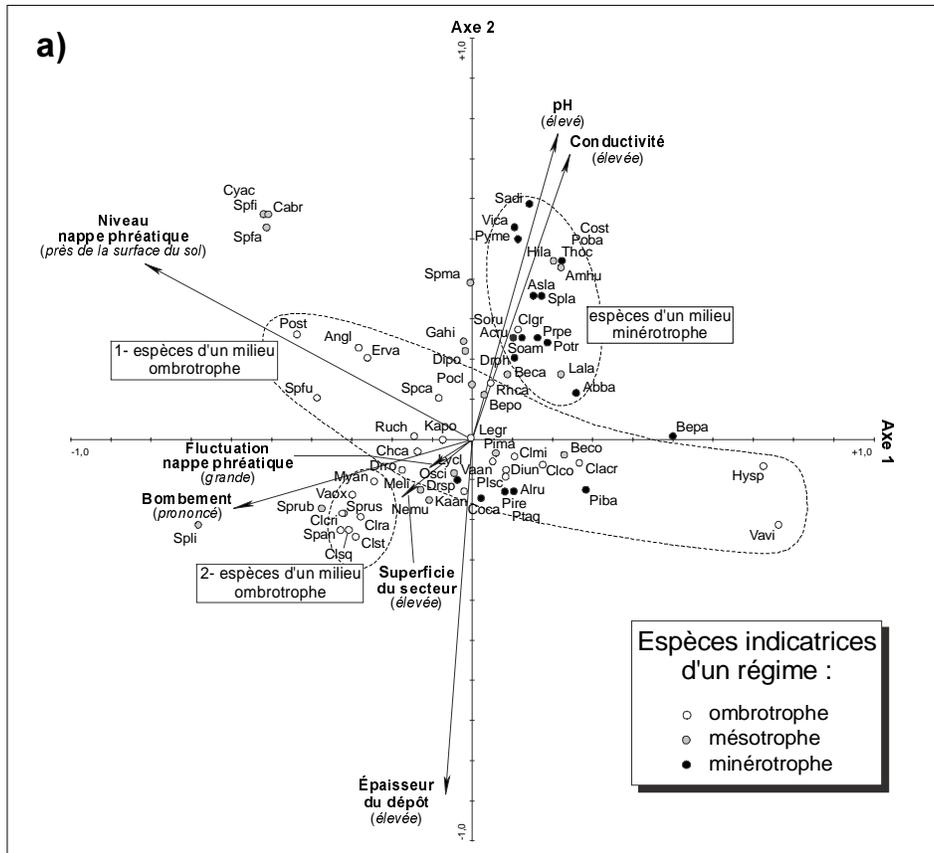
Tableau 3. Coefficients de corrélation inter-set des variables spatio-historiques avec les deux premiers axes canoniques de l'analyse canonique redressée et pour les deux analyses canoniques des correspondances servant à étudier la recolonisation végétale naturelle de la tourbière de Cacouna.

Variables spatio-historiques	ACR		ACC		ACC	
	Corrélations passives		sans covariable		avec les variables environnementales comme covariables	
	Axe 1	Axe 2	Axe 1	Axe 2	Axe 1	Axe 2
Position X (sur l'axe ouest-est)	-0,146	-0,711	-0,512	0,638	0,409	-0,603
Position Y (sur l'axe sud-nord)	-0,031	-0,776	-0,347	0,773	0,621	-0,020
Durée de l'exploitation	-0,219	0,713	0,111	-0,846	-0,635	0,066
Durée de l'abandon	0,703	-0,345	0,511	0,743	0,489	0,316
Secteurs voisins en exploitation	0,713	0,301	0,807	0,166	-0,476	0,066

4.6.3 ESPÈCES ET ENVIRONNEMENT

L'ACC réalisée avec les espèces végétales et les variables environnementales produit une ordination (Figure 5; Tableau 2) qui distribue les espèces de façon similaire à celle produite par l'ACR pour les tranchées. Il est remarquable de constater que l'on distingue très bien le groupe des sphaignes (à gauche du graphique bidimensionnel) du groupe des espèces arborescentes (à droite). C'est essentiellement un gradient du niveau de la nappe phréatique (axe 1) qui est à l'origine de cette distinction. Les espèces indicatrices d'un milieu minérotrophe se trouvent pour la plupart confinées dans la portion supérieure du graphique, à l'opposé des espèces indicatrices d'un milieu ombrotrophe. C'est l'axe 2 (un gradient de l'épaisseur du dépôt de tourbe, du taux d'acidité et de la conductivité spécifique de l'eau) qui est responsable de cette distinction. De plus, les espèces ombrotrophes se divisent en deux sous-ensembles : un premier groupe d'espèces se concentre le long du gradient du niveau de la nappe phréatique, alors que le deuxième groupe est constitué d'espèces qui sont présentes dans les tranchées avec un fort bombement central de la surface.

Figure 5. Graphique bidimensionnel de l'analyse canonique des correspondances (ACC) indiquant la relation entre les espèces végétales recensées dans les tranchées de minage de la tourbière de Cacouna et les variables abiotiques (a). Les espèces indicatrices d'un régime ombrotrophe, mésotrophe ou minérotrophe sont indiquées par un symbole particulier. Deux sous-ensembles ont été constitués pour distinguer les sphaignes des arbres (b). Les espèces végétales sont nommées par un acronyme formé des deux ou trois premières lettres du genre et de l'espèce. **Arbres** : Abba = *Abies balsamea*, Acru = *Acer rubrum*, Beca = *Betula xcaerulea*, Beco = *Betula cordifolia*, Bepa = *Betula papyrifera*, Bepo = *Betula populifolia*, Lala = *Larix laricina*, Piba = *Pinus banksiana*, Pima = *Picea mariana*, Pire = *Pinus resinosa*, Poba = *Populus balsamifera*, Potr = *Populus tremuloïdes*, Prpe = *Prunus pensylvanica*, Soam = *Sorbus americana*, Thoc = *Thuja occidentalis*. **Arbustes** : Alru = *Alnus rugosa*, Amhu = *Amelanchier humilis*, Angl = *Andromeda glaucophylla*, Chca = *Chamaedaphne calyculata*, Cost = *Cornus stolonifera*, Gahi = *Gaultheria hispidula*, Kaan = *Kalmia angustifolia*, Kapo = *Kalmia polifolia*, Legr = *Ledum groenlandicum*, Nemu = *Nemopanthus mucronata*, Pyme = *Pyrus melanocarpa*, Rhca = *Rhododendron canadense*, Sadi = *Salix discolor*, Spla = *Spiraea latifolia*, Vaan = *Vaccinium angustifolium*, Vica = *Viburnum cassinoïdes*. **Herbacées** : Asla = *Aster lanceolatus*, Cabr = *Carex brunnescens*, Coca = *Cornus canadensis*, Cyac = *Cypripedium acaule*, Drro = *Drosera rotundifolia*, Drph = *Dryopteris phegopteris*, Drsp = *Dryopteris spinulosa*, Erva = *Eriophorum vaginatum*, Hila = *Hieracium lachenalii*, Lycl = *Lycopodium clavatum*, Meli = *Melampyrum lineare*, Osci = *Osmunda cinnamomea*, Pocl = *Polypodium clavatum*, Ptaq = *Pteridium aquilinum*, Ruch = *Rubus chamaemorus*, Soru = *Solidago rugosa*, Vaox = *Vaccinium oxycoccos*, Vavi = *Vaccinium vitis-idae*. **Hépatique** : Myan = *Mylia anomala*. **Lichens** : Clco = *Cladonia conocraea*, Clacr = *Cladonia crispata*, Clcri = *Cladonia cristatella*, Clgr = *Cladonia gracilis*, Clmi = *Cladina mitis*, Clra = *Cladina rangiferina*, Clsq = *Cladonia squamosa*, Clst = *Cladina stella*. **Mousses** : Dipo = *Dicranum polysetum*, Diun = *Dicranum undulatum*, Hysp = *Hylocomium splendens*, Plsc = *Pleurozium schreberi*, Post = *Polytrichum strictum*. **Sphaignes** : Span = *Sphagnum angustifolium*, Spca = *Sphagnum capillifolium*, Spfa = *Sphagnum fallax*, Spfi = *Sphagnum fimbriatum*, Spfu = *Sphagnum fuscum*, Spli = *Sphagnum lindbergii*, Spma = *Sphagnum magellanicum*, Sprub = *Sphagnum rubellum*, Sprus = *Sphagnum russowii*.



Les valeurs propres des deux premiers axes pour les deux types d'analyse (ACR et ACC) sont relativement semblables (Tableau 1), montrant ainsi la stabilité du modèle. L'axe 1 est toujours négativement corrélé avec les variables abiotiques *niveau de la nappe phréatique* et *importance du bombement central* (Tableau 2). Les variables *pH* et *conductivité spécifique* sont positivement corrélées avec l'axe 2 et la variable *épaisseur du dépôt de tourbe* est négativement corrélée avec ce même axe.

4.6.4 ESPÈCES ET STRUCTURE SPATIO-HISTORIQUE

L'ACC réalisée avec les espèces végétales et les variables spatio-historiques produit une ordination qui lui est propre (Figure 6). Les espèces minérotrophes des habitats humides ont tendance à se regrouper là où la durée de l'exploitation a été longue, soit au sud-ouest de la tourbière de Cacouna. En général, on trouve les espèces ombrotrophes des habitats humides dans les secteurs plus récemment abandonnés et qui étaient entourés de peu de secteurs en exploitation au moment de leur abandon. Les espèces ombrotrophes des milieux secs, essentiellement des lichens, se trouvent dans la portion supérieure du graphique, donc dans les secteurs où la durée de l'exploitation fut courte et la période d'abandon plus longue. Selon l'ACC, l'axe 1 est surtout influencé par le *nombre de secteurs voisins en exploitation* au moment de l'abandon mais aussi par la durée d'abandon et la *position x* (Tableau 3), alors que l'axe 2 est principalement influencé par la *durée de l'exploitation* et par la *position x* et *y* (donc l'espace) autant que par la *durée de l'abandon*.

4.6.5 ESPÈCES, ENVIRONNEMENT ET STRUCTURE SPATIO-HISTORIQUE

Les ACC partielles, effectuées en utilisant à la fois les variables environnementales et spatio-historiques (chaque groupe de variables étant utilisé à tour de rôle comme covariables), indiquent que les deux groupes de données s'influencent de façon mutuelle.

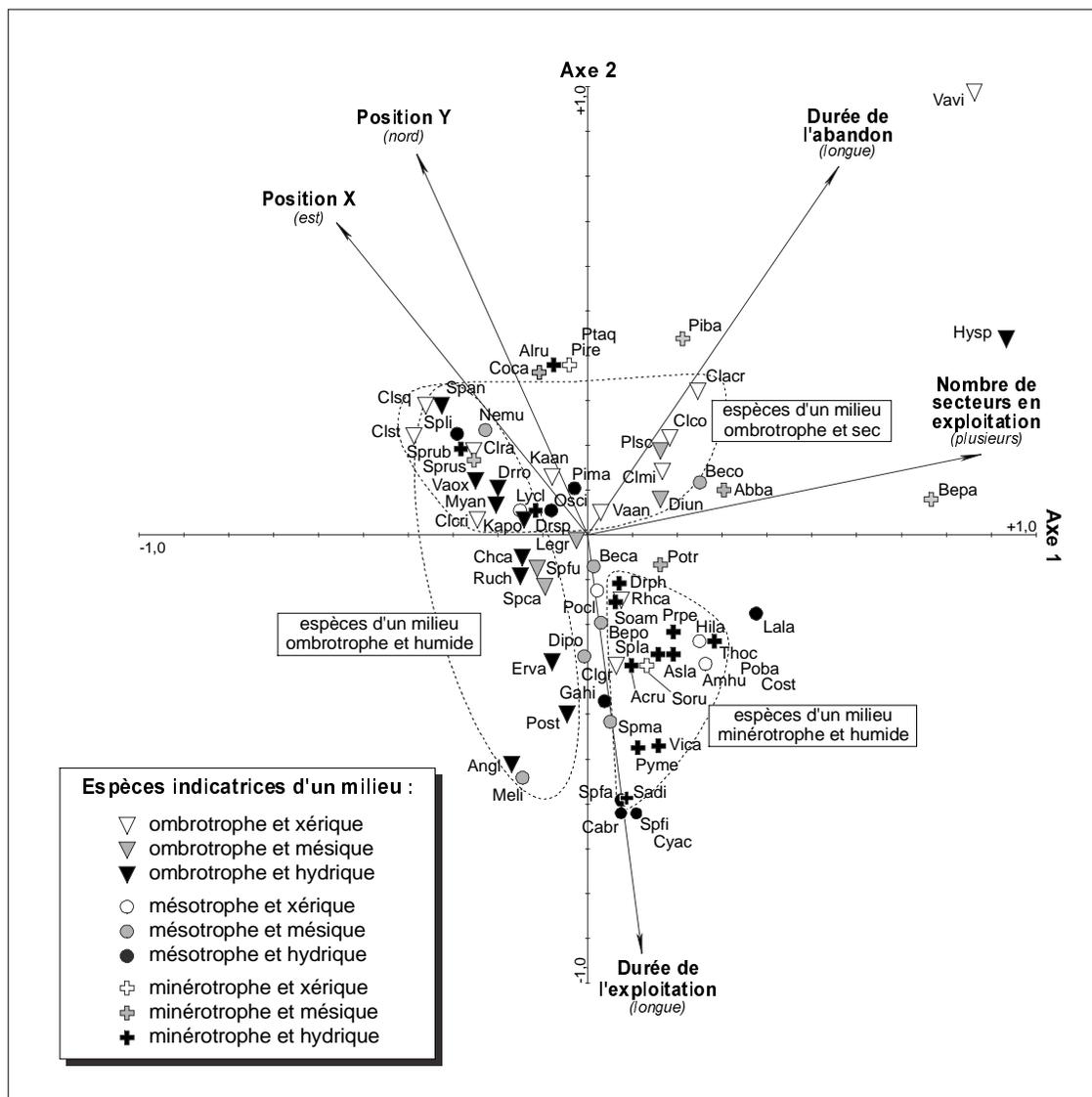


Figure 6. Graphique bidimensionnel de l'analyse canonique des correspondances (ACC) indiquant la relation entre les espèces végétales recensées dans les tranchées de minage de la tourbière de Cacouna et les variables spatio-historiques. Les préférences de chaque espèce pour un régime trophique particulier et pour une certaine humidité du milieu sont indiquées. Voir Figure 5 pour les acronymes des espèces.

Cette influence s'observe par un changement de la valeur et du signe des coefficients de corrélation associés aux variables (Tableaux 2 et 3). Par exemple, dans la relation entre la végétation et les variables abiotiques, après avoir soustrait l'effet des variables spatio-historiques (Tableau 2), l'axe 1 est influencé par l'*épaisseur du dépôt de tourbe*, le *pH*, la *conductivité spécifique* et les *fluctuations de la nappe phréatique*. Pour sa part, l'axe 2 est surtout influencé par le *niveau de la nappe phréatique*. Dans la relation pure entre la végétation et les variables spatio-historiques (Tableau 3), l'axe 1 est principalement influencé par la *durée de l'exploitation* et par la *position* même des secteurs au sein de la tourbière (axe sud-nord). L'axe 2 est surtout influencé par la *position* des secteurs au sein de la tourbière (axe ouest-est).

4.6.6 ORDINATIONS CANONIQUES PARTIELLES

Les ordinations canoniques partielles, réalisées afin d'évaluer l'influence respective des deux ensembles de variables exploratoires (abiotiques et spatio-historiques) sur la végétation, montrent que la variation totale expliquée par cette analyse est de 74,8% (Tableau 4). Les variables abiotiques et spatio-historiques expliquent respectivement 27,0% et 22,7% de la variation. L'interaction entre les deux groupes de variables explique 25,1% de la variation. Les tests de permutation de type Monte Carlo ($P < 0,05$) montrent que la variation expliquée est significative pour chacun des modèles d'analyse utilisés (Tableau 1). Cependant, l'ordination visant à déterminer l'influence pure des variables abiotiques sur les espèces végétales montre que cette relation n'est pas significative ($P > 0,05$) pour l'axe 1, alors qu'elle l'est ($P < 0,01$) pour l'ensemble du modèle.

4.7 RELATION NAPPE PHRÉATIQUE - VÉGÉTATION

L'analyse factorielle de la variance en mesures répétées indique qu'une différence significative du niveau de la nappe phréatique existe parmi les classes de végétation tout le long de la période de temps considérée (Tableau 5). Elle indique aussi qu'il y a autocorrélation temporelle dans les enregistrements hebdomadaires. Le test des contrastes révèle que c'est le niveau de nappe phréatique observé sous un couvert de sphaignes qui est significativement différent de celui mesuré sous les autres classes de végétation (Figure 7; Tableau 6).

Tableau 4. Influence respective des groupes de variables utilisées dans l'étude sur la recolonisation végétale naturelle de la tourbière de Cacouna, déterminée grâce à la méthode de Borcard *et al.* (1992).

Variables	variation (%)	addition (%)
a) variables abiotiques	27,0	27,0
b) variables spatio-historiques	22,7	49,7
c) interaction entre les variables abiotiques et les variables spatio-historiques	25,1	74,8
d) source de variation non déterminée	25,2	100,0

Tableau 5. Analyse factorielle de la variance en mesures répétées du niveau de la nappe phréatique observé dans 84 puits de la tourbière de Cacouna regroupés en quatre classes selon la végétation qui entoure les puits.

Variable dépendante : *niveau de la nappe phréatique*

Source de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	F calculé de type III	Pr > F
classe de végétation	3	80	11,15	0,0001*
semaine (temps)	15	1200	379,73	0,0001*
temps x végétation	45	1200	3,25	0,0001*
Total	63	2480		

* significatif à $P < 0,05$

Tableau 6. Test de comparaisons simples orthogonales entre les niveaux de la nappe phréatique enregistrés dans les quatre classes suivantes : S = puits où >25% des points d'échantillonnage dans un rayon de 10 m autour du puits sont recouverts de sphaignes mais où <25% des points sont recouverts d'arbres, SA = puits entourés de >25% de sphaignes et >25% d'arbres, A = puits entourés de <25% de sphaignes et >25% d'arbres et E = puits entourés de <25% de sphaignes et <25% d'arbres (donc où on ne trouve, pour l'essentiel, que des éricacées arbustives).

Contrastes	Degrés de liberté	Somme des carrés	F calculé	Pr > F
S vs autres	1	80	18,00	0,0001*
SA vs E+A	1	80	3,03	0,0853
E vs A	1	80	3,29	0,0736

* significatif à $P < 0,05$

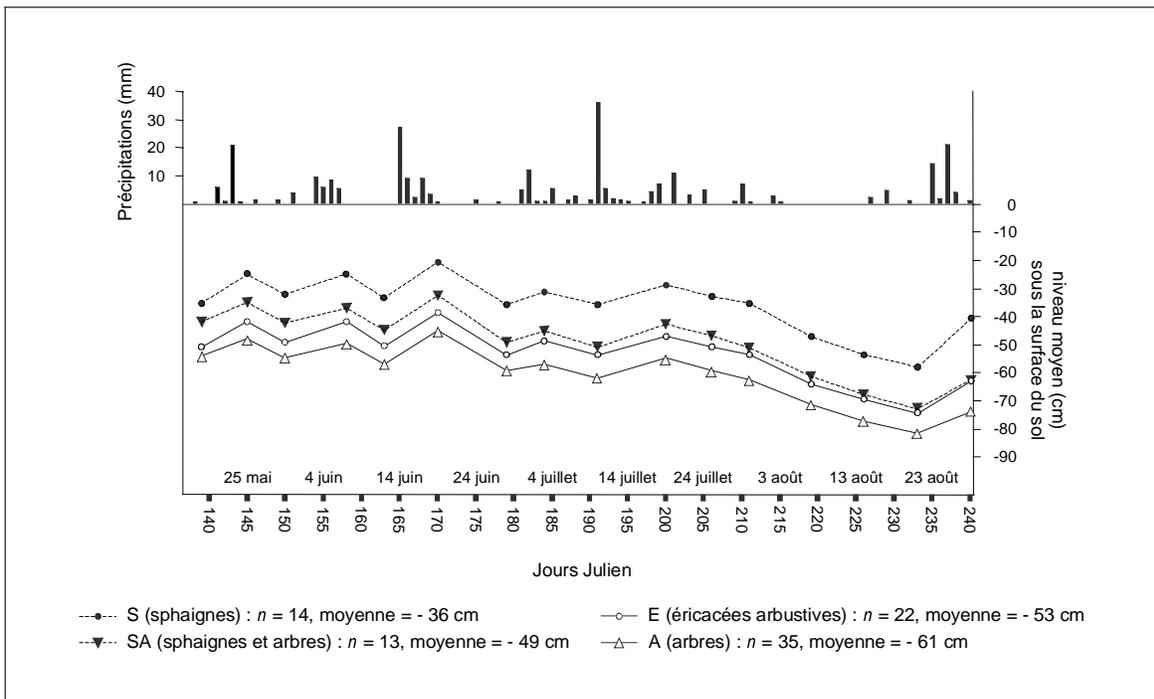


Figure 7. Niveau moyen de la nappe phréatique dans les tranchées de la tourbière de Cacouna et sous différents couverts de végétation au cours de l'été 1998. Les puits qui ont permis le suivi du niveau de la nappe ont été regroupés en quatre classes selon la structure de la végétation les entourant: S = puits où >25% des points d'échantillonnage dans un rayon de 10 m autour du puits sont recouverts de sphaignes mais où <25% des points sont recouverts d'arbres, SA = puits entourés de >25% de sphaignes et >25% d'arbres, A = puits entourés de <25% de sphaignes et >25% d'arbres et E = puits entourés de <25% de sphaignes et <25% d'arbres (donc où on ne trouve, pour l'essentiel, que des éricacées arbustives). Le nombre de puits dans chaque classe et la valeur moyenne du niveau de la nappe phréatique pour l'ensemble de la saison estivale 1998 sont indiqués. Les données de précipitations sont issues du travail de Van Seters (1999).

5.0 Discussion

5.1 CACOUNA : UN SITE TRANSFORMÉ

La tourbière de Cacouna a été passablement perturbée au cours des deux derniers siècles, mais on peut supposer que la perte de sa fonction écologique fondamentale (accumulation de tourbe) ne s'est réalisée qu'à partir du début des activités d'exploitation intensives, soit au cours des années 1940. Au 19^e siècle, la construction d'une route et d'une voie ferrée ont morcelé la tourbière et l'extension des terres agricoles a réduit sa superficie. Ces perturbations ont sans doute eu une certaine influence sur le régime hydrologique de la tourbière (Van Seters 1999), mais des données paléoécologiques indiquent que, malgré tout, la couverture végétale du site n'a pas été modifiée de façon substantielle à cette époque (Pellerin & Lavoie 2000). La tourbière était recouverte d'un tapis de sphaignes vivantes, et donc le processus d'accumulation de la tourbe devait être encore actif.

Les perturbations ayant véritablement porté atteinte à l'intégrité écologique de la tourbière de Cacouna ont débuté en 1940. D'abord, le creusage de drains a permis d'abaisser le niveau de la nappe phréatique, ce qui, en asséchant la surface du sol, a favorisé l'afforestation de certains secteurs de la tourbière (Pellerin & Lavoie 2000). Ensuite, les mineurs ont atteint les couches plus décomposées du dépôt de tourbe qui présentent une plus grande masse volumique et une plus faible capacité de rétention d'eau (Price 1996), ce qui a accentué les variations du niveau de la nappe phréatique (Schouwenaars 1993) et a augmenté la tension hydrique à la surface du sol. De telles conditions sont particulièrement peu favorables au rétablissement éventuel des sphaignes (LaRose *et al.* 1997; Van Seters 1999). Vidée d'une partie de son contenu en eau, la tourbe s'est asséchée, ce qui a favorisé la

compaction et l'oxydation du dépôt (Schothorst 1977). Le résultat de ce processus est l'affaissement de l'ensemble du dépôt tourbeux (Van Seters 1999).

Les différents secteurs de la tourbière n'ont pas tous été affectés de la même façon par les activités d'extraction de la tourbe. Par exemple, les secteurs situés au sud-ouest de la tourbière ont été exploités sur une plus longue période de temps, ce qui a eu pour résultat de modifier complètement le profil de la tourbière. Dans ces secteurs, le dépôt de tourbe plus mince favorise l'apport de bases et de cations dans l'eau, élevant ainsi les valeurs de pH et de conductivité spécifique. À l'opposé, les secteurs situés au nord-est, qui ont été exploités sur une période de temps beaucoup plus courte, ont un dépôt de tourbe résiduel plus épais qui isole toujours la surface de la tourbière du sol minéral sous jacent. Les valeurs de pH et de conductivité spécifique y sont alors moins élevées.

Les secteurs exploités présentent une microtopographie (alternance de tranchées de minage et de terre-pleins) dont la configuration et la dimension des éléments résiduels témoignent de l'état d'avancement des travaux au moment de l'abandon. La présence de terre-pleins indique que les travaux ont cessé avant qu'une couche de tourbe ne soit complètement récoltée. La largeur des terre-pleins révèle la progression des travaux au moment de l'abandon. Une absence de terre-plein signifie qu'une couche de tourbe d'une épaisseur d'environ 90 cm a été enlevée sur l'ensemble de la superficie d'un secteur. Cependant, une configuration similaire du système tranchées - terre-pleins entre différents secteurs exploités n'indique pas nécessairement que la même quantité ou le même nombre de couches de tourbe a été prélevé. Pour évaluer le nombre de couches, on doit comparer l'épaisseur du dépôt de tourbe résiduel du secteur à celle présente avant exploitation. Il est

toutefois très difficile de déterminer dans quelle proportion la couche de tourbe perdue est redevable aux activités d'extraction de la tourbe ou au processus d'affaissement. Pour sa part, le bombement central de la surface des tranchées de minage est le résultat de l'accumulation des débris végétaux déposés pendant la période d'extraction. Comme on le verra plus loin, la microtopographie particulière de la majeure partie du site de Cacouna influence à des degrés divers la nature de la recolonisation végétale postexploitation.

Le niveau moyen de la nappe phréatique d'un secteur est fonction de sa position relative par rapport au système général d'écoulement des eaux à la surface de la tourbière et de l'efficacité du drainage local à tous les niveaux hiérarchiques du réseau (Van Seters 1999). Les secteurs qui se trouvent au centre de la zone exploitée sont au sommet de la pente d'écoulement et ont une grande quantité de canaux de drainage qui dirigent l'eau vers les drains secondaires qui eux-mêmes l'expulsent dans le sens ouest-est (secteurs au centre) ou sud-nord (secteurs à l'est). Ceci explique en partie pourquoi les secteurs localisés aux extrémités de la tourbière sont ceux où le niveau de la nappe phréatique se situe le plus près de la surface du sol (Van Seters 1999).

5.2 CACOUNA : UNE TOURBIÈRE EN RÉGÉNÉRATION

Si la quasi-totalité du site de Cacouna a été recolonisée de façon massive par les éricacées arbustives, il n'en est pas de même pour les sphaignes et les arbres. Ces plantes ont une importance cruciale dans le processus de régénération d'une tourbière ombrotrophe : les sphaignes sont responsables de l'acidification du milieu, de la stabilisation du niveau de la nappe phréatique et de l'accumulation de la tourbe (van Breemen 1995), alors que les arbres peuvent contribuer à assécher le milieu et empêcher l'installation des sphaignes (Laine *et al.*

1995). Les secteurs où l'on observe une bonne recolonisation végétale par les sphaignes (sans les arbres) sont ceux où la nappe phréatique se situe près de la surface du sol (en moyenne, à moins de 35 cm de la surface) au cours de la saison estivale et où le bombement central des tranchées n'est pas trop prononcé (<25 cm). Ce sont aussi les secteurs qui ont été abandonnés en même temps que la plupart des secteurs voisins. Évidemment, les sphaignes contribuent sans doute elles-mêmes à maintenir élevé le niveau de la nappe phréatique, mais on peut présumer qu'un haut niveau d'eau dans les tranchées nouvellement abandonnées est le facteur crucial qui permet le retour rapide d'une végétation dominée par les sphaignes, ce qui n'est d'ailleurs guère surprenant (Lavoie & Rochefort 1996). Toutefois, il semble qu'il soit plus facile de restaurer un niveau d'eau élevé dans les tranchées d'un secteur si les secteurs voisins sont abandonnés au même moment. L'abandon d'une vaste superficie de tourbière contribuerait, par le manque d'entretien d'une plus grande partie du réseau de drainage, à rehausser de façon plus importante le niveau de la nappe phréatique dans les années qui suivent l'abandon. Enfin, une tranchée avec une surface plane favoriserait une répartition plus égale de l'eau à la surface du sol, et donc l'établissement des sphaignes dans l'ensemble de la tranchée. Les ordinations montrent que des tranchées avec un bombement central prononcé peuvent contenir beaucoup de sphaignes, mais ces dernières se concentrent alors en bordure des tranchées puisque le centre bombé est beaucoup trop sec.

Les secteurs boisés sans sphaigne sont, pour la plupart, ceux où la nappe phréatique est basse (en moyenne, à plus de 60 cm de la surface) et qui ont été abandonnés de façon isolée au cours de la période d'exploitation de la tourbière. Encore une fois, les arbres contribuent certainement à maintenir bas le niveau de la nappe phréatique d'un secteur en pompant du sol une importante quantité d'eau pour assurer leur survie (Heikurainen & Päivänen 1970),

mais on peut présumer qu'un bas niveau d'eau dans les tranchées nouvellement abandonnées est le facteur crucial qui favorise l'afforestation d'un site. Le cas du secteur L est particulièrement informatif à cet égard : il a été abandonné en 1963, alors que les secteurs voisins ont été abandonnés entre 1975 et 1989. Le drainage toujours efficace des secteurs J et K et de la section aspirée (à l'époque, un secteur de coupe par blocs) a probablement contribué à maintenir sec le secteur L au cours des années 1960, favorisant ainsi l'établissement d'un mélèzin dense. Ceci expliquerait aussi pourquoi la recolonisation végétale du secteur L diffère autant de celle du secteur J voisin, largement dominé par les sphaignes.

Les autres espèces végétales se distribuent au sein de la zone exploitée selon un gradient du niveau de la nappe phréatique, du pH et de la conductivité spécifique de l'eau. Les exceptions à cette règle sont souvent reliées à un recensement local où d'autres facteurs peuvent être mis en cause. C'est le cas pour des espèces telles *Cornus canadensis*, *Dryopteris spinulosa* et *Pteridium aquilinum* qui préfèrent des habitats secs et forestiers (Smart *et al.* 1986) et que l'on a effectivement recensé dans un secteur boisé ou dans un îlot forestier. La présence des lichens dans certains secteurs se fait à la faveur d'un bombement prononcé de la surface du sol qui permet à ces plantes de s'établir sur des microhabitats plus secs.

5.3 CACOUNA : TEST DES HYPOTHÈSES

L'analyse écologique et historique de la tourbière de Cacouna permet de confirmer ou d'infirmer les hypothèses de départ. La recolonisation végétale d'une section de tourbière exploitée par la méthode de la coupe par blocs :

- 1) est fortement influencée par l'histoire de l'exploitation du site (qui elle même influence les paramètres physico-chimiques déterminant pour la survie des végétaux) et par le contexte d'abandon (le fait qu'un secteur soit abandonné au même moment que les secteurs voisins);
- 2) est fortement influencée par le niveau de la nappe phréatique au moment de l'abandon, un niveau élevé favorisant le retour des sphaignes alors qu'un niveau bas favorisera plutôt l'implantation des arbres;
- 3) ne semble guère influencé par la présence de terre-pleins, des secteurs avec (secteur J) ou sans (secteur D) terre-pleins pouvant avoir une couverture abondante en sphaignes.

Quelle est l'importance des facteurs historiques comparée à celle des facteurs abiotiques dans le processus de recolonisation végétale? À cette question, les ordinations canoniques partielles montrent que le contexte historique des activités d'extraction a presque autant d'importance (23% de la variation) que les variables abiotiques (27%) pour expliquer les patrons de recolonisation végétale. En fait, comme souligné ci-haut, les activités de récolte et le processus d'abandon des sites influencent fortement les variables abiotiques déterminantes pour la survie des végétaux. En conséquence, dans le cas d'un écosystème aussi perturbé que celui de la tourbière de Cacouna, il est très important de procéder à une reconstitution historique détaillée du site si l'on veut comprendre toutes les facettes de la régénération naturelle du milieu.

Van Seters (1999), qui a étudié le bilan hydrologique de la tourbière de Cacouna, considère pour sa part que les facteurs qui influencent la répartition spatiale des patrons

végétaux sont, par ordre d'importance : 1) le niveau de la nappe phréatique, qui est fonction de la position topographique relative du site, de l'écoulement souterrain de l'eau, de la proximité des canaux de drainage et de leur efficacité à drainer le site, 2) la constitution du substrat de tourbe résiduel, c'est-à-dire son épaisseur, sa masse volumique, sa conductivité hydraulique et sa capacité de rétention de l'eau, 3) la présence d'une source de graines voisine, particulièrement pour les arbres et 4) le moment et la durée de l'abandon d'un site exploité. Cette interprétation du phénomène de recolonisation végétale correspond en gros à celle développée dans ce travail, mais l'approche historique permet de raffiner de façon substantielle l'analyse dans son ensemble.

Van Seters (1999) a émis de sérieuses réserves quant à l'estimation de Schouwenaars (1993) sur la profondeur de la nappe phréatique (40 cm sous la surface du sol) au-delà de laquelle les sphaignes en surface ne peuvent plus survivre. Le suivi du niveau de la nappe phréatique dans la tourbière de Cacouna montre qu'au cours de l'été 1998, le niveau moyen de la nappe phréatique dans les puits entourés d'arbres et de sphaignes a été de 49 cm sous la surface du sol, ce qui est plus bas que la limite de 40 cm avancée par Schouwenaars (1993). Ou bien cette valeur de 40 cm a peu de fondements, ou bien, une fois établies, les sphaignes peuvent tolérer de bas niveaux de nappe phréatique sur une période plus ou moins prolongée (Rydin & McDonald 1985; Grosvernier *et al.* 1997b).

6.0 Conclusion

Cette étude confirme le diagnostic de Lavoie & Rochefort (1996) sur l'état de la régénération de la tourbière de Cacouna : même après l'abandon de certains secteurs depuis plus de 20 ans, la tourbière n'est pas redevenue un écosystème tourbeux fonctionnel dans la mesure où le principal végétal accumulateur de tourbe (la sphaigne) ne s'est pas réimplanté dans la majeure partie du site. Malgré cela, il est remarquable de constater qu'une végétation typique des environnements tourbeux s'est réimplantée avec succès dans la très grande majorité des tranchées de minage, et ce, même si la tourbière a subi une perturbation très sévère pendant plus d'une trentaine d'années. En fait, la vitesse avec laquelle la recolonisation végétale s'est effectuée après la perturbation est plutôt impressionnante. À l'opposé, la lenteur de la recolonisation végétale des sites tourbeux qui ont été exploités de façon mécanique (aspirateurs) montre qu'un certain seuil critique (probablement de nature hydrologique) est dépassé dans ces sites, non seulement pour les sphaignes mais aussi pour les plantes vasculaires (Bérubé & Lavoie 2000). L'identification de ce seuil est la prochaine étape qui permettra aux personnes en charge de la restauration des tourbières de mener à bien leurs actions.

Ce travail, ainsi que celui de Van Seters (1999), montrent qu'il est possible de restaurer le couvert en sphaignes d'une tourbière exploitée par la coupe par blocs. En fait, il serait possible d'augmenter considérablement le couvert de sphaignes de la tourbière de Cacouna par des mesures hydrologiques simples (blocage des canaux de drainage). De telles mesures permettraient de parachever un travail déjà fort bien orchestré par la nature. Finalement, une meilleure planification des travaux (séquence d'abandon des sites) dans les

tourbières exploitées permettrait sans doute d'éviter la colonisation massive de certains secteurs par les arbres. Les tourbières ouvertes étant de nos jours particulièrement rares dans la région du Bas-Saint-Laurent à cause de l'exploitation industrielle des tourbières (Desaulniers 2000), le maintien de ce type d'écosystème au niveau régional revêt une importance toute particulière.

7.0 Références

- Anderson, L.E. (1990) A checklist of *Sphagnum* in North America north of Mexico. *Bryologist* **93** : 500-501.
- Anderson, L.E., Crum, H.A. & Buck, W.R. (1990) List of mosses of North America north of Mexico. *Bryologist* **93** : 448-499.
- Bérubé, M.-È. & Lavoie, C. (2000) The natural revegetation of a vacuum-mined peatland : eight years of monitoring. *Canadian Field-Naturalist* **114** (sous presse).
- Bonham, C.D. (1989) Measurements for terrestrial vegetation. John Wiley & Sons, New York.
- Borcard, D., Legendre, P. & Drapeau, P. (1992) Partialling out the spatial component of ecological variation. *Ecology* **73** : 1045-1055.
- Bouchette, J. (1832) A topographical dictionary of the province of Lower Canada. Longman, Rees, Orme, Brown, Green and Longman, Londres.
- Bugnon, J.-L., Rochefort, L. & Price, J.S. (1997) Field experiment of *Sphagnum* reintroduction on a dry abandoned peatland in eastern Canada. *Wetlands* **17** : 513-517.
- Bunting, M.J., Morgan, C.R., Van Bakel, M. & Warner, B.G. (1998) Pre-European settlement conditions and human disturbance of a coniferous swamp in southern Ontario. *Canadian Journal of Botany* **76** : 1770-1779.
- Bureau de recherche sur l'industrie de la tourbe dans l'Est du Québec (1979). Dossier BRITEQ. BRITEQ, Rivière-du-Loup.
- Bureau de recherche sur l'industrie de la tourbe dans l'Est du Québec (1984). Tourbe. BRITEQ, Rivière-du-Loup.
- Buttler, A., Grosvernier, P. & Matthey, Y. (1998) Development of *Sphagnum fallax* diaspores on bare peat with implications for the restoration of cut-over bogs. *Journal of Applied Ecology* **35** : 800-810.
- Buttler, A., Warner, B.G., Grosvernier, P. & Matthey, Y. (1996) Vertical patterns of testate amoebae (Protozoa: Rhizopoda) and peat-forming vegetation on cutover bogs in the Jura, Switzerland. *New Phytologist* **134** : 371-382.
- Campeau, S. & Rochefort, L. (1996) *Sphagnum* regeneration on bare peat surfaces : field and greenhouse experiments. *Journal of Applied Ecology* **33** : 599-608.

- Canadian Sphagnum Peat Moss Association (1990) Peatland development and reclamation policy. Canadian Sphagnum Peat Moss Association, St-Albert, Alberta.
- Damman, A. (1986) Hydrology, development, and biogeochemistry of ombrogenous peat bogs with special reference to nutrient relocation in a western Newfoundland bog. *Canadian Journal of Botany* **64** : 384-394.
- Desaulniers, A.-S. (2000) La fragmentation des tourbières: son impact sur l'évolution des communautés végétales. Mémoire M.ATDR, Université Laval, Sainte-Foy.
- Dionne, A. (1975) Essai sur l'histoire civile et sociale de Kakouna. Perspectives jeunesse Kakouna 1825, Cacouna.
- Drolet, J.-P. (1946) Cacouna peat bog, Rivière-du-Loup county. Department of Mines, Ottawa.
- Elling, A.E. & Knighton, M.D. (1984) *Sphagnum* moss recovery after harvest in a Minnesota bog. *Journal of Soil and Water Conservation* **39** : 209-211.
- Environment Canada (1993) Canadian Climate Normals, 1961-1990. Québec. Atmospheric Environment Service, Canadian Climate Program, Environment Canada, Ottawa.
- Esslinger, T.L. & Egan, R.S. (1995) A sixth checklist of the lichen-forming, lichenicolous and allied fungi of the continental United States and Canada. *Bryologist* **98** : 467-549.
- Famous, N.C., Spencer, M. & Nilsson, H. (1991) Revegetation patterns in harvested peatlands in central and eastern North America. Pages 48-66 In D.N. Grubich, & T.J. Malterer (éditeurs). Proceedings of the International Peat Symposium. Peat and peatlands : the resource and its utilization. Duluth.
- Ferland, C. & Rochefort, L. (1997) Restoration techniques for *Sphagnum*-dominated peatlands. *Canadian Journal of Botany* **75** : 1110-1118.
- Fisher, A.S., Podniesinski, G.S. & Leopold, D.J. (1996) Effects of drainage ditches on vegetation patterns in abandoned agricultural peatlands in central New York. *Wetlands* **16** : 397-409.
- Floyd, D.A. & Anderson, J.E. (1987) A comparison of three methods for estimating plant cover. *Journal of Ecology* **75** : 221-228.
- Fortin, J.-C. & Lechasseur, A. (1993) Histoire du Bas-Saint-Laurent. Institut québécois de recherche sur la culture, Québec.
- Foster, D.R., Aber, J.D., Melillo, J.M., Bowden, R.D. & Bazzaz, F.A. (1997) Forest response to disturbance and anthropogenic stress. *BioScience* **47** : 437-445.

- Foster, D.R. & Glaser, P.H. (1986) The raised bogs of south-eastern Labrador, Canada: classification, distribution, vegetation and recent dynamics. *Journal of Ecology* **74** : 47-71.
- Fuller, J.L., Foster, D.R., McLachlan, J.S. & Drake, N. (1998) Impact of human activity on regional forest composition and dynamics in central New England. *Ecosystems* **1** : 76-95.
- Gauthier, R. (1980) Les sphaignes et la végétation des tourbières du parc des Laurentides, Québec. Thèse Ph.D., Université Laval, Sainte-Foy.
- Gauthier, R. & Grandtner, M.M. (1975) Étude phytosociologique des tourbières du Bas Saint-Laurent, Québec. *Naturaliste canadien* **102** : 109-153.
- Gérardin, V., Grondin, P. et Lebel, M. (1984) L'inventaire du capital-nature de la Moyenne-et-Basse-Côte-Nord : distribution et description des tourbières de la Moyenne-et-Basse-Côte-Nord. Série de l'inventaire du capital-nature no 4, Ministère de l'Environnement du Québec, Québec.
- Girard, H. (1947) Report on Allied Peat Moss, Limited. Cacouna, Province of Quebec.
- Gouvernement du Canada (1991) The federal policy on wetland conservation. Environment Canada, Ottawa.
- Gouvernement du Canada (1994) L'approche de l'écosystème. Environnement Canada, Hull.
- Gratton, L. & Grenier, C. (1992) Cartographie de la végétation de la tourbière de l'Isle-Verte. Environnement Canada, Service canadien de la faune, Conservation et Protection (Région de Québec), Québec.
- Grayson, J.E., Chapman, M.G. & Underwood, A.J. (1999) The assessment of restoration of habitat in urban wetlands. *Landscape and Urban Planning* **43** : 227-236.
- Green, P.E. (1983) Natural revegetation of mined peatlands in northern Minnesota. Mémoire M.Sc., University of Minnesota, Saint-Paul.
- Grosvernier, P. (1997) Restauration des hauts-marais : jusqu'où aller ? *Anthos* **3** : 60-63.
- Grosvernier, P., Buttler, A., Gobat, J.-M. & Matthey, Y. (1997a) Régénération ou réimplantation des sphaignes dans les hauts-marais jurassiens suisses. *Actes du 150^e anniversaire de la Société Jurassienne d'Émulation* : 155-170.
- Grosvernier, P., Matthey, Y. & Buttler, A. (1997b) Growth potential of three *Sphagnum* species in relation to water table level and peat properties with implications for their restoration in cut-over bogs. *Journal of Applied Ecology* **34** : 471-483.

- Groupe de travail national sur les terres humides (1988) Terres humides du Canada. Environnement Canada, Ottawa, et Polyscience Publications, Montréal.
- Heathwaite, A.L. (1994) Hydrological management of cut-over peatland. *Hydrological processes* **8** : 245-262.
- Heikurainen, L. & Päivänen, J. (1970) The effect of thinning, clear cutting, and fertilization on the hydrology of peatland drained for forestry. *Acta Forestalia Fennica* **104** : 1-23.
- Hill, M.O. & Gauch, H.G., Jr. (1980) Detrended correspondence analysis : an improved ordination technique. *Vegetatio* **42** : 47-58.
- Honnay, O., Hermy, M. & Coppin, P. (1999) Impact of habitat quality on forest plant species colonization. *Forest Ecology and Management* **115** : 157-170.
- Hood, G. (1992) Réaménagement des tourbières. Actes du colloque Tourbe 1992. Centre de recherche et de développement de la tourbe, Shippagan.
- Hood, G. (1997) The global peat resource and its use in horticulture. Pages 10-14 In G. Schmilewski (éditeur). Peat in horticulture : its use and sustainability. International Peat Society, Jyväskylä.
- Ingram, H.A.P. (1978) Soil layers in mires : function and terminology. *Journal of Soil Science* **29** : 224-227.
- Ivanov, K.E. (1981) *Water movement in mirelands*. Academic Press, Londres.
- Jean, M. & Bouchard, A. (1993) Riverine wetland vegetation : importance of small-scale and large-scale environmental variation. *Journal of Vegetation Science* **4** : 609-620.
- Jonsson-Ninniss, S. & Middleton, J. (1991) Effect of peat extraction on the vegetation in Wainfleet Bog, Ontario. *Canadian Field-Naturalist* **105** : 505-511.
- Joosten, J.H.J. (1992) Bog regeneration in the Netherlands : a review. Pages 367-373 In O.M. Bragg, P.D. Hulme, H.A.P. Ingram & R.A. Robertson (éditeurs). *Peatland ecosystems and man : an impact assessment*. Department of Biological Sciences, University of Dundee, Dundee.
- Laine, J., Vasander, H. & Laiho, R. (1995) Long-term effects of water level drawdown on the vegetation of drained pine mires in southern Finland. *Journal of Applied Ecology* **32** : 785-802.
- LaRose, S., Price, J.S. & Rochefort, L. (1997) Rewetting of a cutover peatland : hydrologic assessment. *Wetlands* **17** : 416-423.

- Lavoie, C. & Rochefort, L. (1996) The natural revegetation of harvested peatland in southern Québec: a spatial and dendroecological analysis. *Écoscience* **3** : 101-111.
- Lavoie, C. & Saint-Louis, A. (1999) The spread of gray birch (*Betula populifolia*) in eastern Quebec : landscape and historical considerations. *Canadian Journal of Botany* **77** : 859-868.
- Lebel, R. (1975) Au pays du porc-épic : Kakouna, 1673, 1825, 1975. Comité des fêtes de Cacouna, Cacouna.
- Lynch-Stewart, P. (1992) Aucune perte nette. Mise en œuvre d'objectifs "aucune perte nette" pour la conservation des terres humides au Canada. Conseil nord-américain de conservation des terres humides (Canada), communication no 1992-2, Ottawa.
- Maltby, E. (1992) Microbiological changes resulting from human impacts on peat and organic soil horizons. Pages 45-58 In O.M. Bragg, P.D. Hulme, H.A.P. Ingram & R.A. Robertson (éditeurs). *Peatland ecosystems and man : an impact assessment*. Department of Biological Sciences, University of Dundee, Dundee.
- Meade, R. (1992) Some early changes following the rewetting of a vegetated cutover peatland surface at Danes Moss, Cheshire, UK, and their relevance to conservation management. *Biological Conservation* **61** : 31-40.
- Økland, R.H. (1990) A phytoecological study of the mire Northern Kisselbergmosen, SE Norway. II. Identification of gradients by detrended (canonical) correspondence analysis. *Nordic Journal of Botany* **10** : 79-108.
- Pellerin, S. & Lavoie, C. (1999) Peatland fragments of southern Québec : recent evolution of their vegetation structure. *Canadian Journal of Botany* **78** (sous presse).
- Poschlod, P. (1995) Diaspore rain and diaspore bank in raised bogs and implications for the restoration of peat-mined sites. Pages 471-494 In B.D. Wheeler, S.C. Shaw, W.J. Fojt, & R.A. Robertson (éditeurs). *Restoration of temperate wetlands*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Price, J.S. (1996) Hydrology and microclimate of a partly restored cutover bog, Québec. *Hydrological Processes* **10** : 1263-1272.
- Price, J.S. (1997) Soil moisture, water tension, and water table relationships in a managed cutover bog. *Journal of Hydrology* **202** : 21-32.
- Price, J.S. (1998) Methods for restoration of a cutover peatland, Québec, Canada. Pages 149-154 In T.J. Malterer, K. Johnson & J. Stewart (éditeurs). *Peatland restoration and reclamation : techniques and regulatory considerations*. International Peat Symposium, International Peat Society, Duluth.

- Price, J., Rochefort, L. & Quinty, F. (1998) Energy and moisture considerations on cutover peatlands : surface microtopography, mulch cover and *Sphagnum* regeneration. *Ecological Engineering* **10** : 293-312.
- Quinty, F. & Rochefort, L. (1997a) Guide de restauration des tourbières. Association canadienne de mousse de sphaigne et Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation de l'Université Laval, Sainte-Foy.
- Quinty, F. & Rochefort, L. (1997b) Plant reintroduction on a harvested peat bog. Pages 133-145 *In* C.C. Trettin, M.F. Jurgensen, D.F. Grigal, M.R. Gale & J.K. Jeglum (éditeurs). Northern forested wetlands : ecology and management. CRC Lewis Publishers, Boca Raton.
- Risi, J., Brunette, C.E., Spence, D. & Girard, H. (1953) Étude chimique des tourbes du Québec. Ministère des Mines du Québec, Service des laboratoires, rapport no 282, Québec.
- Robert, É.C., Rochefort, L. & Garneau, M. (1999) Natural revegetation of two block-cut mined peatlands in eastern Canada. *Canadian Journal of Botany* **77** : 447-459.
- Robert, P.-E. (1965) Les tourbières du Bas-Saint-Laurent. Bureau d'aménagement de l'Est du Québec, Mont-Joli.
- Rochefort, L. & Bastien, D.F. (1998) Réintroduction de sphaignes dans une tourbière exploitée : évaluation de divers moyens de protection contre la dessiccation. *Écoscience* **5** : 117-127.
- Rochefort, L., Gauthier, R. & Lequéré, D. (1995) *Sphagnum* regeneration - toward an optimisation of bog restoration. Pages 423-434 *In* B.D. Wheeler, S.C. Shaw, W.J. Fojt & R.A. Robertson (éditeurs). Restoration of temperate wetlands, John Wiley & Sons, Chichester.
- Rochefort, L. & Quinty, F. (éditeurs) (1996) La restauration des tourbières exploitées: le développement d'une stratégie intégrée au Québec. Rapport remis au Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. Université Laval, Sainte-Foy.
- Rochefort, L., Quinty, F. & Campeau, S. (1997) Restoration of peatland vegetation : the case of damaged or completely removed acrotelm. *International Peat Journal* **7** : 20-28.
- Rubec, C.D.A. (éditeur) (1996) Global mire and peatland conservation. Proceedings of an International Workshop. World Conservation Union, Canadian Wildlife Service, Environment Canada, Norwegian Directorate for Nature Management, International Mire Conservation Group, and International Peat Society.
- Rydin, H. & McDonald, A.J.S. (1985) Tolerance of *Sphagnum* to water level. *Journal of Bryology* **13** : 571-578.

- Salonen, V. (1990) Early plant succession in two abandoned cut-over peatland areas. *Holarctic Ecology* **13** : 217-223.
- Salonen, V. (1994) Revegetation of harvested peat surfaces in relation to substrate quality. *Journal of Vegetation Science* **5** : 403-408.
- Salonen, V., Penttinen, A. & Särkkä, A. (1992) Plant colonization of a bare peat surface : population changes and spatial patterns. *Journal of Vegetation Science* **3** : 113-118.
- SAS Institute Inc. (1999) SAS system for Windows V.6.12. SAS Institute Inc., Cary.
- Schothorst, C.J. (1977) Subsidence of low moor peat soils in the western Netherlands. *Geoderma* **17** : 265-291.
- Schouwenaars, J.M. (1993) Hydrologic differences between bogs and bog-relicts and consequences for bog restoration. *Hydrobiologia* **265** : 217-224.
- Scoggan, H.J. (1978-1979) The flora of Canada. National Museum of Natural Sciences, Ottawa.
- Sjörs, H. (1950) On the relation between vegetation and electrolytes in north Swedish mire waters. *Oikos* **2** : 241-258.
- Smart, P.J., Wheeler, B.D. & Willis, A.J. (1986) Plants and peat cuttings : historical ecology of a much exploited peatland - Thorne Waste, Yorkshire, UK. *New Phytologist* **104** : 731-748.
- Smart, P.J., Wheeler, B.D. & Willis, A.J. (1989) Revegetation of peat excavations in a derelict raised bog. *New Phytologist* **111** : 733-748.
- Soro, A., Sundberg, S. & Rydin, H. (1999) Species diversity, niche metrics and species associations in harvested and undisturbed bogs. *Journal of Vegetation Science* **10** : 549-560.
- Steel, R.G.D. & Torrie, J.H. (1960) Principles and procedures of statistics, with special reference to the biological sciences. McGraw-Hill, New York.
- Stevens, M.H.H. & Cummins, K.W. (1999) Effects of long-term disturbance on riparian vegetation and in-stream characteristics. *Journal of Freshwater Ecology* **14** : 1-17.
- Stotler, R. & Crandall-Stotler, B. (1977) A checklist of the liverworts and hornworts of North America. *Bryologist* **80** : 405-428.
- ter Braak, C.J.F. (1986) Canonical correspondence analysis : a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology* **67** : 1167-1179.

- ter Braak, C.J.F. (1987) The analysis of vegetation-environment relationships by canonical correspondence analysis. *Vegetatio* **69** : 69-77.
- ter Braak, C.J.F. (1990) Update notes : CANOCO version 3.10. Agricultural Mathematics Group, Wageningen.
- ter Braak, C.J.F. & Prentice, I.C. (1988) A theory of gradient analysis. *Advances in Ecological Research* **18** : 271-317.
- ter Braak, C.J.F. & Šmilauer, P. (1998) CANOCO Reference manual and user's guide to CANOCO for Windows : software for canonical community ordination (version 4). Microcomputer Power, Ithaca.
- van Breemen, N. (1995) How *Sphagnum* bogs down other plants. *Trends in Ecology and Evolution* **10** : 270-275.
- Van Seters, T. (1999) Linking the past to the present : the hydrological impacts of peat harvesting and natural regeneration on an abandoned cut-over bog, Quebec. Mémoire M.Sc., University of Waterloo, Waterloo.
- Wheeler, B.D. & Shaw, S.C. (1995) Restoration of damaged peatlands, with particular reference to lowland raised bogs affected by peat extraction. HMSO, Londres.

Annexe A : Variables abiotiques et spatio-historiques et relevés de végétation des tranchées échantillonnées dans la tourbière de Cacouna (étés 1997-1998).

Sites d'échantillonnage (tranchées)	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	F2	G1	G2	H1	H2	I1	I2	J1	J2	K1	K2	L1	L2	M1	N1						
Longueur (m)	96	96	88	88	90	90	90	90	88	88	176	175	179	180	180	180	129	110	118	118	120	120	107	119	114	120						
Largeur (m)	14	13	12	13	13	12	14	13	11	11	12	11	9	11	10	9	12	11	15	14	13	12	13	14	10	11						
variables abiotiques																																
Superficie du secteur (ha)	2,4	2,4	2,3	2,3	2,7	2,7	2,5	2,5	2,3	2,3	2,3	2,3	6,5	6,5	3,0	2,0	1,8	1,8	1,8	2,3	2,3	1,9	1,9	0,9	0,9							
Largeur de la tranchée / largeur moyenne des 2 terre-pleins adjacents	5,7	5,7	4,0	4,0	5,3	5,3	15,0	15,0	15,0	15,0	20,0	20,0	1,7	1,7	1,4	1,4	6,2	6,2	7,4	7,4	7,2	7,2	0,3	0,3	0,5	3,0						
Pente (degré)	0,08	0,09	0,10	0,03	0,13	0,14	0,16	0,17	0,42	0,60	0,04	0,09	0,34	0,51	0,53	0,38	0,05	0,04	0,09	0,05	0,33	0,10	0,08	0,04	0,24	0,09						
Bombement central moyen (cm)	14,1	20,8	18,6	36,6	21,2	33,1	31,3	18,8	16,6	16,4	8,3	8,8	39,1	37,0	20,6	17,2	15,6	16,4	17,3	17,5	13,8	29,5	-6,4	-2,2	-9,1	22,3						
Épaisseur moyenne de la tourbe résiduelle (cm)	364	342	388	371	369	382	367	373	342	286	382	389	361	324	252	213	139	160	236	232	212	203	307	361	335	291						
Niveau moyen de la nappe phréatique (cm)	-42,6	-39,3	-48,0	-42,3	-54,5	-69,8	-28,6	-40,8	-46,4	-36,9	-33,9	-40,0	-61,9	-63,8	-51,6	-45,2	-38,7	-37,3	-35,8	-12,8	-29,8	-45,3	-70,6	-64,8	-73,3	-46,8						
Fluctuation de la nappe phréatique (écart-type) (cm)	11,5	10,7	14,3	12,7	12,7	13,3	9,4	10,2	13,4	12,1	11,5	10,6	8,9	10,6	8,9	11,2	15,6	14,0	8,4	10,4	8,2	12,9	7,0	7,8	9,4	14,8						
pH (puits situé au centre de la tranchée)	4,26	3,99	3,87	4,32	3,87	4,05	3,47	3,51	3,55	3,6	3,48	3,46	4,27	3,75	4,49	4,86	5,09	5,07	4,46	4,51	3,65	3,6	3,97	3,92	3,70	4,39						
Conductivité spécifique (K_{corr} : μS) (puits au centre)	114	112	89	102	64	75	42	28	40	63	35	41	127	58	128	185	136	127	120	138	66	50	95	99	60	101						
variables spatio-historiques																																
Position X (longitude MTM 7, NAD 83) - 382500	1265	1315	1194	1215	1126	1137	1001	1046	925	969	944	923	700	629	500	439	263	211	72	21	57	35	161	200	697	734						
Position Y (latitude MTM 7, NAD 83) - 5306200	690	746	777	800	861	873	888	936	962	1010	765	744	499	421	280	212	92	44	280	225	466	443	378	425	959	1001						
Durée de l'exploitation (années)	12	13	13	13	13	12	13	13	13	13	12	13	25	21	28	26	30	29	31	33	33	33	21	20	3	11						
Durée de l'abandon (années)	30	29	29	29	29	30	29	29	29	29	30	29	30	29	27	29	25	26	24	22	22	22	34	35	42	31						
Nombre de secteurs adjacents en exploitation	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3	3	2	0						
relevé de végétation																																
	Total																															
Points échantillonnés (N)	9369	294	294	270	270	276	276	276	270	270	534	448	546	546	546	546	370	325	360	322	322	322	330	366	348	366						
Points avec présence de végétation (%)	98,5	99,0	100	100	100	99,0	99,0	99,0	100	99,0	99,0	98,0	98,0	98,0	96,0	99,0	100	100	100	99,7	92,5	90,7	99,0	100	99,0	99,0						
(toutes les espèces considérées)																																
arbres	30,0%	37,1	23,8	32,0	20,7	21,7	17,0	2,9	5,4	27,4	28,5	8,6	8,9	20,4	19,6	31,2	49,7	49,6	56,6	21,9	15,8	10,9	12,1	86,4	79,5	75,9	64,0					
<i>n</i>																																
<i>Larix laricina</i>	1166	0,7	3,1	1,1	2,2	4,7	2,2	1,8	0,7	8,9	12,6	1,5	2,0	4,2	4,0	9,9	10,3	34,4	37,2	17,8	13,7	7,5	7,1	66,1	60,7	1,2	11,8					
<i>Picea mariana</i>	773	27,9	14,0	15,2	12,6	12,3	7,3	1,1	4,4	13,0	12,6	2,8	4,5	5,9	6,4	5,9	15,9	9,5	18,8	0,8	1,2	0,6	0,6	2,7	2,7	18,7	6,8					
<i>Pinus banksiana</i>	626	10,5	6,1	13,7	6,3	3,6	2,2			7,8	1,9		0,2	1,8	1,1	5,0	9,7	1,6	4,3							60,1	42,4					
<i>Betula papyrifera</i>	335										0,8	0,2	5,0	2,6	1,7	1,8			4,6	0,8						9,5	2,2					
<i>Betula cordifolia</i>	238	0,3	0,7	3,0	1,5	1,5	2,9		0,4	0,4	1,9	2,1	2,2	2,0	3,7	3,3	4,2	1,9	0,6	2,8				8,8	6,0	6,0	5,5					
<i>Betula populifolia</i>	176	0,7	0,3	0,7		0,4	2,9				1,1	0,7	1,8	2,8	4,6	8,4	1,9	0,3	1,1	1,6	3,4	5,0	0,9	1,1		1,6						
<i>Prunus pensylvanica</i>	55												2,0	0,7	1,8	2,9	1,9	0,3	0,3					0,6	0,8							
<i>Betula xcaerulea</i>	33				0,4	0,4				0,4	1,9				0,6	2,0	1,6	0,3	0,6				0,3			0,3						
<i>Sorbus americana</i>	29												0,4		1,1	0,9	1,1	1,2												2,2		
<i>Abies balsamea</i>	21		0,4								0,2		0,2	0,4		2,0		0,3							0,3	0,9						
<i>Populus tremuloides</i>	9												0,2			0,2	0,5	0,6								0,3	0,6					
<i>Thuja occidentalis</i>	2															0,4																
<i>Acer rubrum</i>	1															0,2																
<i>Pinus resinosa</i>	1																														0,3	
<i>Populus balsamifera</i>	1																	0,2														
éricacées arbustives	88,7%	90,8	93,2	95,2	92,2	97,1	96,0	94,9	90,9	93,7	91,1	95,3	93,8	91,8	92,7	86,3	84,6	93,5	88,3	88,3	78,6	84,8	84,8	83,6	92,9	69,8	86,9					
<i>n</i>																																
<i>Ledum groenlandicum</i>	3681	37,8	42,5	45,9	39,6	37,7	43,5	34,4	35,9	41,9	48,2	35,4	38,0	33,3	37,7	32,6	39,7	65,9	64,9	40,6	30,4	29,8	29,8	31,5	42,6	32,5	40,4					
<i>Vaccinium angustifolium</i>	3223	29,6	37,1	38,9	21,9	39,9	37,7	18,5	22,1	30,0	28,9	37,6	39,3	46,3	51,1	48,4	39,7	23,6	17,5	24,7	4,7	23,3	20,8	55,8	50,3	27,3	36,9					
<i>Kalmia angustifolia</i>	3071	39,8	32,0	45,2	47,0	52,5	43,5	40,9	31,5	53,3	41,5	45,5	39,3	44,0	36,3	26,4	22,0	12,2	5,9	16,7	6,8	22,4	26,1	20,9	27,1	41,4	42,4					
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	2751	35,4	36,4	40,4	34,8	39,1	39,9	49,3	56,2	25,6	30,0	37,3	38,4	23,4	21,6	24,2	12,5	25,8	28,0	38,6	48,8	46,3	46,0	3,6	13,7	2,6	3,0					
<i>Rhododendron canadense</i>	564	4,1	2,7	5,2	1,5	1,8	3,6	1,1	0,7	3,3	3,7	3,8	4,9	2,4	6,6	3,5	9,7	17,1	12,0	13,1	9,3	6,5	4,4	7,9	5,7	5,8	11,8					
<i>Kalmia polifolia</i>	18		1,4						0,4	0,4	0,4			0,2	0,4	0,4	0,4										0,6					
<i>Andromeda glaucophylla</i>	5																				1,2	0,3										
cypéracées	8,2%	2,7	7,5	1,5	0,7			6,9	10,9	1,5	0,7																					

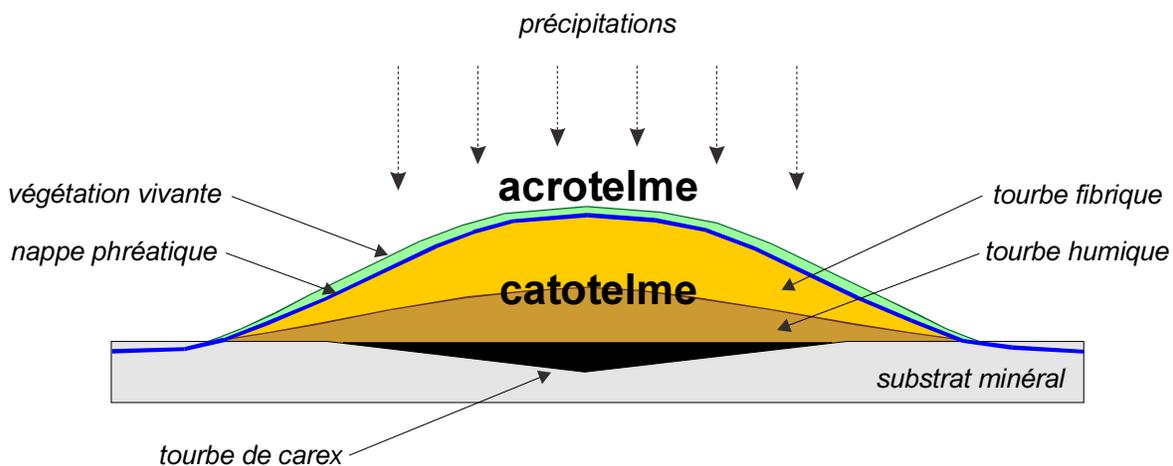
Annexe A : Variables abiotiques et spatio-historiques et relevés de végétation des tranchées échantillonnées dans la tourbière de Cacouna (étés 1997-1998).

Sites d'échantillonnage (tranchées)		A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	F2	G1	G2	H1	H2	I1	I2	J1	J2	K1	K2	L1	L2	M1	N1
<i>Pteridium aquilinum</i>	76																										20,8
<i>Rubus chamaemorus</i>	67	2,0	0,7					1,5	1,1	0,4	2,2	0,4		1,7	0,4		1,1			0,3		3,4	2,2	0,9			0,3
<i>Amelanchier humilis</i>	28														0,2		3,1	1,1	1,2					0,3		0,3	
<i>Drosera rotundifolia</i>	21	0,7	0,3					0,4	2,2	0,4		0,2		0,4			0,2			0,8							0,8
<i>Viburnum cassinoides</i>	17																0,7	0,5	3,1								0,3
<i>Nemopanthus mucronata</i>	15	0,7	1,4			0,4			1,5																		1,1
<i>Salix y. discolor</i>	14																	2,7	1,2								
<i>Dryopteris phegopteris</i>	11														0,2	0,9	0,4			0,3							0,6
<i>Vaccinium oxycoccos</i>	10			0,4	0,4			0,4	1,1			0,4				0,2					0,3						
<i>Cornus canadensis</i>	8								0,4																		1,9
<i>Polypodium clavatum</i>	3														0,4				0,3								
<i>Aster lanceolatus (simplex)</i>	2																0,2	0,2									
<i>Lycopodium clavatum</i>	2													0,4													
<i>Solidago rugosa</i>	2																0,4										
<i>Spiraea latifolia</i>	2																0,2	0,2									
<i>Alnus rugosa</i>	1																										0,3
<i>Cornus stolonifera</i>	1																	0,2									
<i>Cypripedium acaule</i>	1																				0,3						
<i>Dryopteris spinulosa</i>	1													0,2													
<i>Hieracium lachenalii</i>	1																0,2										
<i>Melampyrum lineare</i>	1																					0,3					
<i>Osmunda cinnamomea</i>	1													0,2													
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	1																										0,3
Sphaignes et mousses	24,4%	31,0	32,7	3,7	8,9	3,6	4,3	33,0	39,9	30,4	16,7	24,5	23,2	20,7	15,2	21,2	47,3	39,2	50,5	64,2	56,8	5,3	7,1	8,5	3,6	9,8	12,3
<i>n</i>																											
<i>Sphagnum capillifolium</i>	1453	23,8	29,6	2,2	4,8	2,5	3,3	18,8	22,5	28,5	16,3	16,5	15,2	18,5	11,4	13	33,2	28,7	35,1	45,6	5,9	3,4	2,8				8,7
<i>Sphagnum magellanicum</i>	249	1,0	1,0					0,7	1,5	0,7		0,6	0,5	0,6	1,8	3,1	11	10,3	11,7	12,2	3,7	0,6	0,9				0,8
<i>Dicranum polysetum</i>	166	0,3		0,7		0,7		0,7	0,4			1,5	1,6	0,7	1,8	6,2	6,4	0,8		13,1						0,3	2,5
<i>Pleurozium schreberi</i>	161	3,4	2	1,1			0,7	1,8	4,4	1,1		6,7	4,2	0,2	0,4		0,6		3,4					3,6	3,3	5,8	1,1
<i>Sphagnum fallax</i>	120				0,4				0,4	0,4											35,7	0,3	0,3				
<i>Sphagnum rubellum</i>	101	2,7			4,1			10,9	11,2				1,8	0,7	0,4						1,2			0,6			0,3
<i>Polytrichum strictum</i>	56	0,3				0,4		2,5	0,7		0,4										10,3	0,6	2,8				
<i>Hylacomium splendens</i>	25																							3,9		3,5	
<i>Sphagnum fuscum</i>	20							0,4	2,9						0,2						2,5	0,3					0,3
<i>Dicranum undulatum</i>	13						0,4	0,4					0,9		0,2				0,6					0,6	0,3	0,3	
<i>Sphagnum russowii</i>	13			0,4				1,1	1,1					0,7									0,3				0,3
<i>Sphagnum angustifolium</i>	1								0,4																		
<i>Sphagnum fimbriatum</i>	1																				0,3						
<i>Sphagnum lindbergii</i>	1							0,4																			
Hépatique	3,8%	6,5	2,7	4,1	3,0	2,5	0,4	20,3	21,0	3,7	4,4	4,3	7,4	1,5	2,2	1,1	0,5	0,3	0,3	5,8	1,6	8,4	4,3	0,6	0,5	1,4	2,7
<i>n</i>																											
<i>Mylia anomala</i>	363	6,5	2,7	4,1	3	2,5	0,4	20,3	21	3,7	4,4	4,3	7,4	1,5	2,2	1,1	0,6	0,3	0,3	5,8	1,6	8,4	4,4	0,6	0,6	1,4	2,7
Lichens	1,8%	0,7	2,0	0,4	1,1	1,8	3,6	0,4	0,7	2,1	3,1	2,2	3,1	3,7	1,3	0,3	0,3	0,6	1,9	1,2	0,6	1,1	6,3	3,8			
<i>n</i>																											
<i>Cladonia mitis</i>	82							0,7	0,4			2,1	0,9	1,5	2,4	1,1	1,1		0,3		1,9	0,9	0,3	1,1	3,2	1,4	
<i>Cladonia crispata</i>	37									0,4			0,5	0,4	0,4	1,7	0,2			0,3			0,3		2,6	2,5	
<i>Cladonia rangiferina</i>	25	0,7	1,4		0,4	0,7		1,5	2,5				1,1														
<i>Cladonia conocraea</i>	11											0,5	0,2	0,4	0,7											0,6	
<i>Cladonia cristatella</i>	9		0,3					0,7	0,7				0,5									0,6					
<i>Cladonia stella</i>	1				0,4																						
<i>Cladonia gracilis</i>	1															0,2											
<i>Cladonia squamosa</i>	1								0,4																		
Total des espèces	72	23	21	18	19	17	16	27	30	20	17	21	24	33	33	31	38	25	30	23	21	19	21	22	17	23	35

Annexe B: Les conséquences de la récolte manuelle de la tourbe

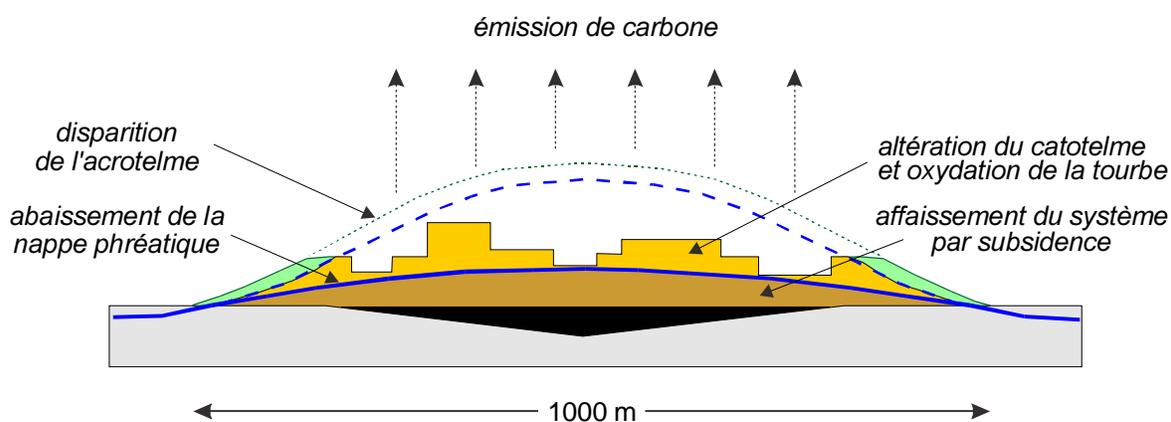
Profil vertical d'une tourbière ombrotrophe

a) naturelle



d'après Joosten (1992)

b) exploitée par la méthode de la coupe par blocs



Marc Girard

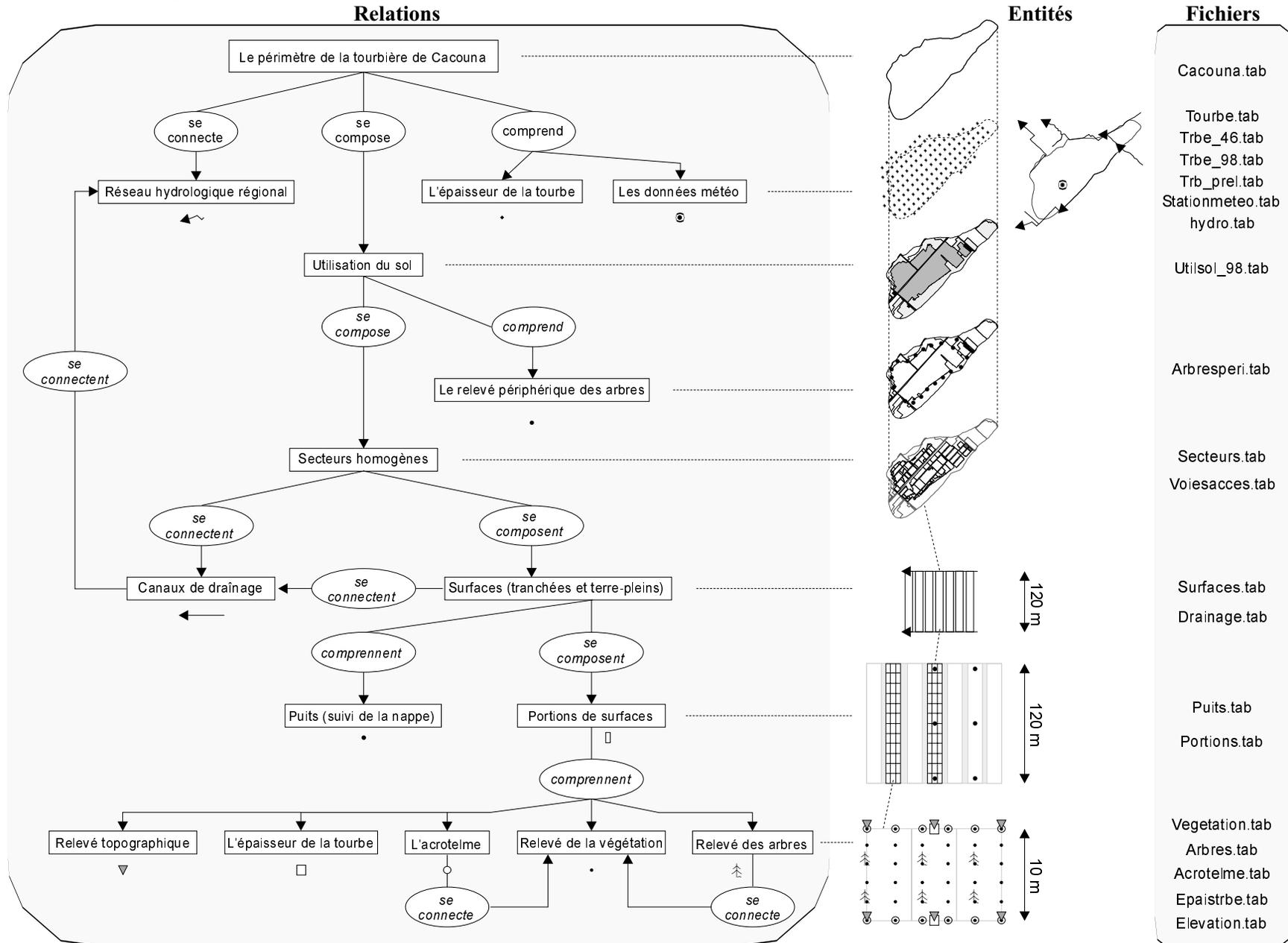
Annexe C

A - Données intégrées dans le système d'information géographique (SIG)

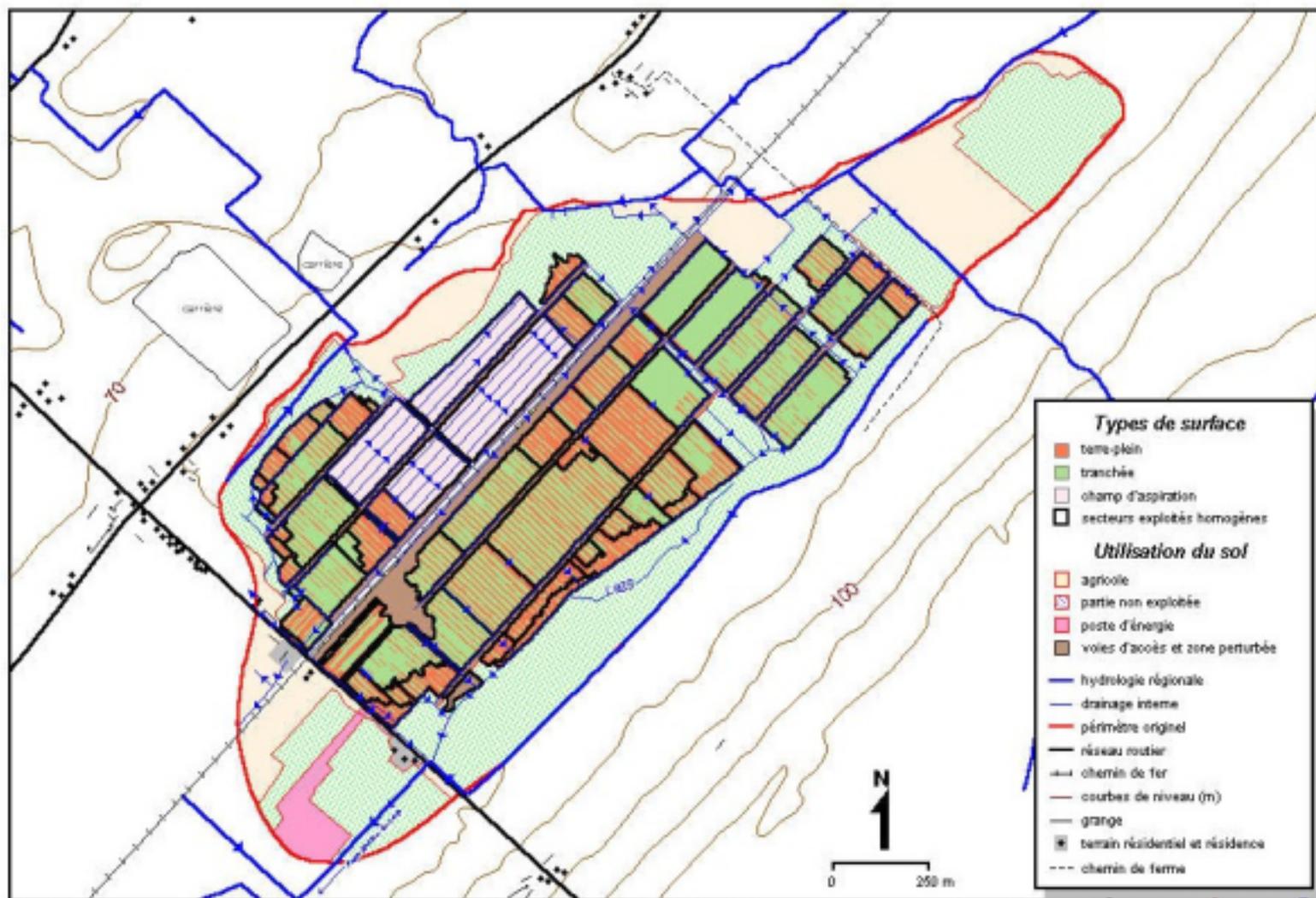
No	Thème	Description	Entité	Fichier
1	Le réseau routier	Réseau routier du territoire où se trouve la tourbière de Cacouna; carte topo 1/20000 numérique du MRN	lignes	Routier.tab
2	Le réseau ferroviaire	Chemin de fer qui traverse la tourbière de Cacouna; carte topo 1/20000 numérique du MRN	lignes	Chemfer.tab
3	Le réseau hydrologique	Réseau hydrologique régional auquel la tourbière est connectée; carte topo 1/20000 numérique du MRN	lignes	Hydro.tab
4	Le périmètre de la tourbière	Périmètre originel de la tourbière avant toute forme de perturbation; photo-interprétation	polygone	Cacouna.tab
5	L'épaisseur de la tourbe	Mesures de l'épaisseur du dépôt de tourbe en 1946 (Drolet 1946) et 1998	points	Tourbe.tab
6	Le dépôt de tourbe en 1946	Volume du dépôt de tourbe en 1946; reconstitution faite avec l'aide du logiciel Surfer 6	polygones	Trbe_46.tab
7	Le dépôt de tourbe en 1998	Volume du dépôt de tourbe en 1998; reconstitution faite avec l'aide du logiciel Surfer 6	polygones	Trbe_98.tab
8	La quantité de tourbe prélevée	Volume de tourbe perdu suite à la récolte et à la subsidence; reconstitution faite avec le logiciel Surfer 6	polygones	Trb_prel.tab
9	Les précipitations	Relevé des précipitations quotidiennes pendant l'été 1998; station météorologique installée dans la tourbière	point	Stationmeteo.tab
10	L'utilisation du sol	Utilisation du sol dans la tourbière de Cacouna; naturel, agricole, résidentiel, infrastructure, exploitation	polygones	Utilisol.tab
11	Les canaux de drainage	Réseau de drains secondaires et principaux quadrillant la zone exploitée et entourant la tourbière	lignes	Drainage.tab
12	Les secteurs homogènes	Dans la zone exploitée, secteurs homogènes au niveau de la physionomie des surfaces et de la végétation	polygones	Secteurs.tab
13	Les chemins dans la tourbière	Chemins de tourbe dans la zone exploitée qui permettent l'accès aux différents secteurs exploités	polygones	Voiesacces.tab
14	Les types de surface	Types de surface qui composent les secteurs homogènes: terre-plein, tranchée et champs d'aspiration	polygones	Surfaces.tab
15	Les portions de surfaces	Sous surface de 10 m de long se répétant sur trois rangs et sur toute la longueur de la surface	polygones	Portions.tab
16	L'épaisseur de la tourbe	Mesures de l'épaisseur du dépôt de tourbe à tous les 10 m au centre des tranchées ou terre-pleins	points	Epaistrbe.tab
17	Le relief dans les surfaces	Mesures de l'élévation du centre et des bordures des tranchées ou terre-pleins à tous les 10 m	points	Elevation.tab
18	La nappe phréatique	Relevé hebdomadaire (été 1998) du niveau de la nappe phréatique de 84 puits; pH et conductivité spécifique	points	Puits.tab
19	La végétation	Relevé des espèces végétales réalisé le long de 6 lignes installées dans les tranchées	points	Vegetation.tab
20	Les espèce végétales	Espèces végétales recensées sur les points d'échantillonnage et identifiées par un numéro	s.o.	Especies.tab
21	L'identification des espèces	Correspondance entre le numéro de l'espèce végétale et son nom latin et description de son habitat	s.o.	Espece_Id.tab
22	Les arbres en périphérie	Relevé des espèces et mesures dendrométriques des arbres qui entourent la zone exploitée	points	Arbresperi.tab
23	Les arbres	Relevé des espèces et mesures dendrométriques des arbres dans la surface exploitée	points	Arbres.tab
24	L'acrotelme	Mesures de l'épaisseur de l'acrotelme à tous les 10 m sur les 6 lignes d'échantillonnage	points	Acrotelme.tab

Annexe C (suite)

B - Schéma conceptuel du SIG

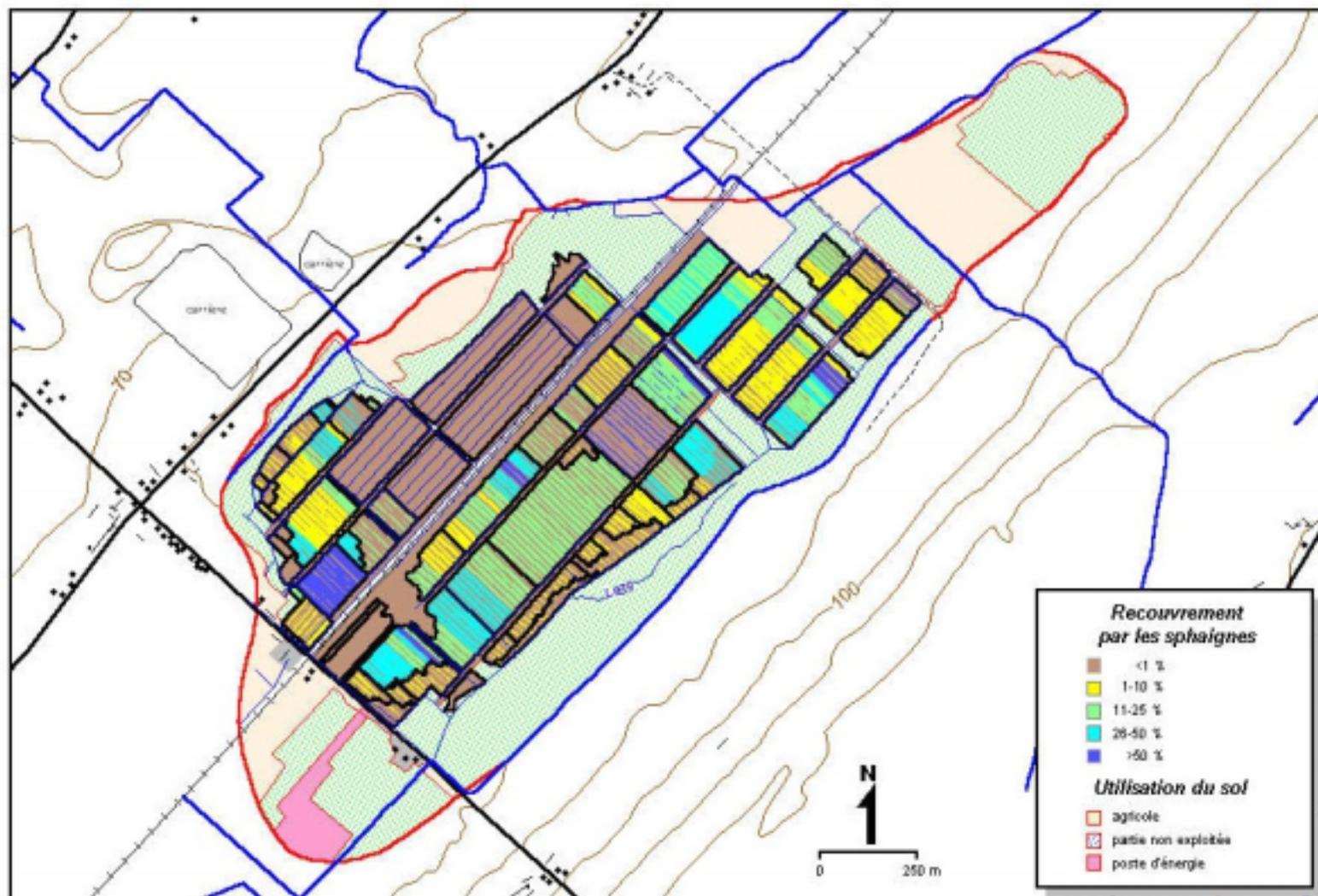


Annexe D: Les éléments de terrain et l'utilisation du sol de la tourbière de Cacouna



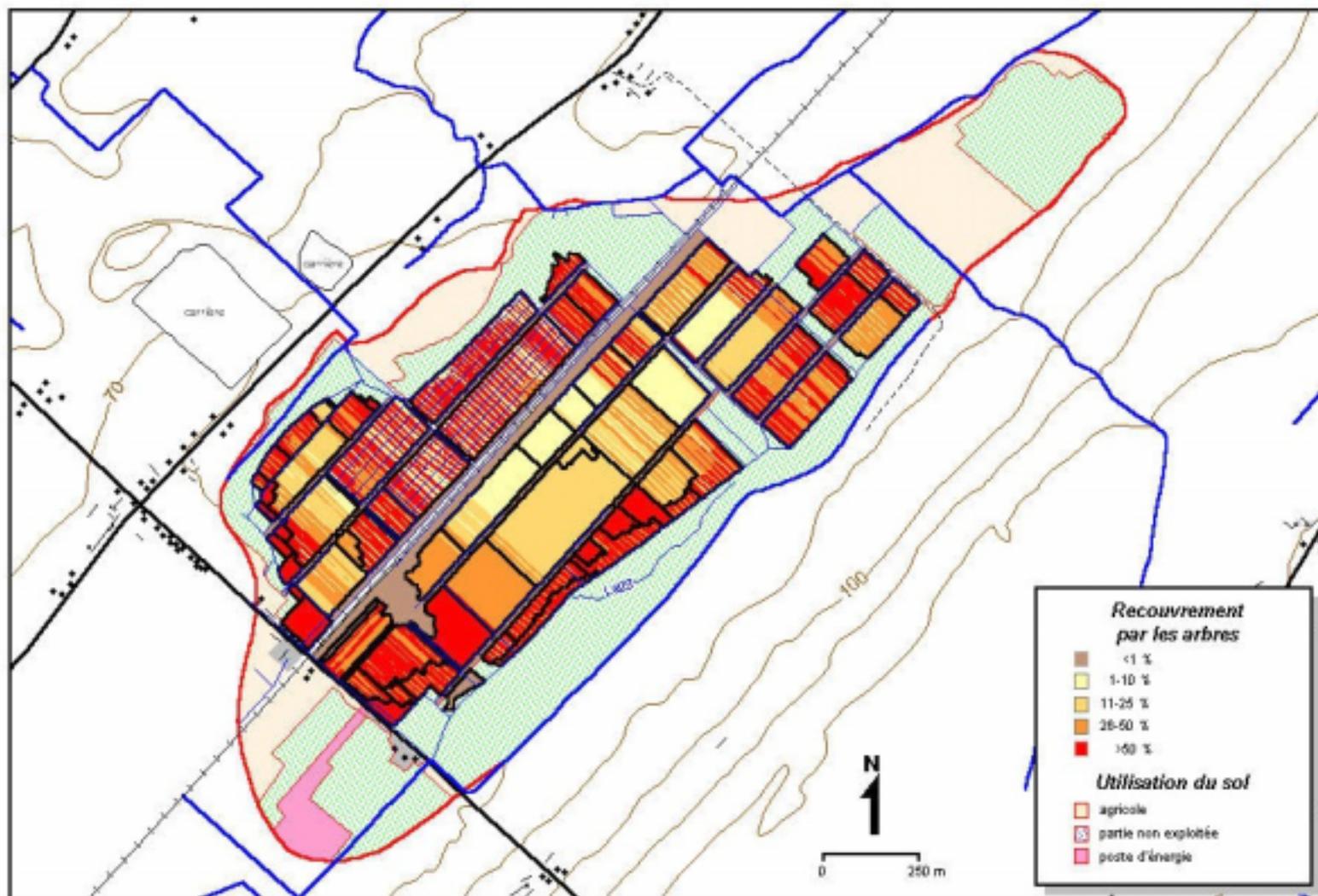
Sources : Faillite topographique numérique 1:50 000 du MRN; photos aériennes 1932, 1943, 1961, 1962, 1970, 1974, 1979, 1983, 1986, 1991 et 1995; tracés de terrain (1997-1998) ; Marc Girard, Tim Van Soest et Grant Whitehead

Annexe E: Recouvrement de la surface du sol par les sphaignes dans la zone exploitée de la tourbière de Cacouna



Source: Feuilles topographiques numériques 1:20 000 du MRN; photos aériennes 1922, 1949, 1961, 1963, 1970, 1974, 1979, 1983, 1986, 1991 et 1995; travaux de terrain (1997-1998); Marc Girard, Tim Van Seters et Gene Whithead

Annexe F: Recouvrement de la surface du sol par les arbres dans la zone exploitée de la tourbière de Cacouna



Sources : Feuille topographique numérique 1:20 000 du MRN; photos aériennes 1922, 1968, 1961, 1963, 1970, 1974, 1975, 1982, 1986, 1991 et 1995; courbes de niveau (1997-1998) : Marc Girard, Tim Van Seters et Grant Whithead