

JOSÉE LANDRY

**IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX D'UNE
NOUVELLE TECHNIQUE DE RÉCOLTE DE LA
TOURBE**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en biologie végétale
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

DÉPARTEMENT DE PHYTOLOGIE
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2008

© Josée Landry, 2008

Résumé

La technique de récolte de tourbe la plus utilisée au Canada est celle de l'aspiration. Cette technique extensive engendre des impacts majeurs sur l'environnement. Depuis 4 ans, une nouvelle technique de récolte est à l'essai. La technique de récolte mécanique par tranchée vise l'extraction de la tourbe par bloc tout en conservant la végétation de surface pour une restauration simultanée à la récolte. Ce projet permettra d'évaluer si cette technique exercera moins de changement sur la chimie de l'eau des cours d'eau récepteurs et sur la restauration du couvert végétal après extraction de la tourbe. Afin d'y parvenir, des inventaires de végétation, des mesures de décomposition de la tourbe et de productivité de l'écosystème ainsi que des analyses d'eau provenant de la tourbière de Pointe-Lebel ont été réalisés avant et après les essais de la technique de récolte mécanique par tranchée. La récolte mécanique par tranchée présente plusieurs avantages face à l'aspiration. Elle permet l'installation d'un couvert végétal typique d'une tourbière ombrotrophe plus rapidement et entraîne moins d'impacts sur la qualité de l'eau issue de la tourbière. Somme toute, la récolte mécanique par tranchée est une technique très prometteuse.

À ma famille et Joël pour leur support

Remerciements

Premièrement, j'aimerais remercier ma directrice, Line Rochefort, pour m'avoir donné la chance de travailler sur ce projet. Je suis très reconnaissant puisqu'elle m'a beaucoup appris sur ce que sont l'esprit scientifique, la rigueur et la persévérance.

J'aimerais également remercier notre merveilleuse équipe de recherche qu'est le GRET. Un merci spécial à Mylène Marchand-Roy pour sa complicité, son amitié et pour m'avoir accompagnée dans les nombreux défis qu'entraînent les études de 2^e cycle. Merci à Stéphanie Boudreau de m'avoir épaulée tout au long du projet et pour les nombreuses discussions scientifiques ou non. Merci aussi à Claudia St-Arnaud, qui sait si bien nous transmettre sa passion des tourbières! J'aimerais également remercier Claire Boismenu pour sa patience et sa bonne humeur sans failles, Roxane Andersen pour avoir toujours la réponse à mes questions, Rémy Pouliot pour ses réflexions et son aide, Monique Poulin pour m'avoir introduit à l'équipe de recherche, Gilles Ayotte pour toujours réussir à nous décrocher un sourire ainsi qu'aux plus récents arrivants du GRET : Tommy, Vicky, Sandrine et Hélène, je leur souhaite un aussi beau séjour que le mien au sein de cette équipe incroyable.

Un gros merci à Premier Tech pour leur soutien technique et financier. Merci également de m'avoir donné accès au très beau site de Pointe-Label.

Merci à Geneviève Turner qui a fait un stage de deux mois à mes côtés, son travail de terrain et de laboratoire a été fort apprécié. Un énorme merci à Joël Ouellette pour son aide sur le terrain et dans la vie de tous les jours. Sans lui, il aurait été beaucoup plus difficile de passer au travers. Et finalement un gros merci à ma famille, maman, papa, Diane et Chantal, vous êtes pour moi une grande source d'inspiration.

Table des matières

Résumé.....	ii
Remerciements	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	viii
1 Introduction.....	1
1.1 Importance des tourbières.....	2
1.2 Développement, accumulation et décomposition	3
1.3 Propriétés chimiques des tourbières ombrotrophes	4
1.4 Perception des tourbières par l'humain	6
1.5 Évolution des techniques d'extraction de la tourbe	7
1.6 Les avantages de l'extraction par aspiration.....	8
1.7 Les désavantages de l'extraction par aspiration	8
1.8 Efforts pour contrer la dépendance aux conditions climatiques.....	10
1.9 Description de la technique de récolte mécanique par tranchée.....	10
1.10 Techniques de restauration	12
1.11 Objectifs et hypothèses	15
2 Matériel et méthode	16
2.1 Description du site d'étude	16
2.2 Plan de l'expérience.....	18
2.2.1 Suivi de la végétation.....	18
2.2.2 Suivi de la qualité de l'eau.....	21
2.3 Structure et végétation	21
2.4 Mesures liées au retour d'un système accumulateur de tourbe	23
2.4.1 Productivité.....	23
2.4.1.1 Productivité (zones naturelle et récolte mécanique par tranchée)	23
2.4.1.1.1 <i>Élongation annuelle (zones : naturelle et récolte mécanique par tranchée)</i>	23
2.4.1.1.2 <i>Densité et biomasse (zones : naturelle et récolte mécanique par tranchée)</i>	25
2.4.1.2 Productivité (zone restaurée)	25
2.4.1.2.1 <i>Élongation annuelle (zone restaurée)</i>	26
2.4.1.2.2 <i>Densité et biomasse (zone restaurée)</i>	26
2.4.1.3 Calcul de la productivité (zones naturelle, récolte mécanique et restaurée).....	27
2.4.2 Décomposition.....	27

2.5 Analyses chimiques	28
2.6 Interprétation des résultats	29
2.6.1 Végétation	29
2.6.2 Qualité de l'eau	32
3 Résultats.....	33
3.1 Diversité floristique	33
3.2 Productivité	37
3.3 Décomposition	38
3.4 Qualité de l'eau	39
4 Discussion	47
4.1 Diversité floristique	47
4.2 Productivité	49
4.3 Décomposition	50
4.4 Qualité de l'eau	51
5 Conclusion générale.....	56
Bibliographie	60
Annexe 1 : Définition des communautés végétales pour la zone expérimentale et naturelle	70
Annexe 2 : Liste des éléments analysés dans l'eau de la tourbière de Pointe-Lebel.....	71

Liste des tableaux

Tableau 1. Nombre de parcelles dans chaque zone d'étude.....	20
Tableau 2. Liste des espèces et leur pourcentage de recouvrement moyen dans les parcelles à la tourbière de Pointe-Lebel durant les périodes pré-intervention (2004) et post-intervention (2006).....	34-35
Tableau 3. Calcul de productivité du couvert muscinal à la tourbière de Pointe-Lebel: moyenne et erreur-type des mesures.....	38
Tableau 4. Taux de décomposition de la sphaigne à la tourbière de Pointe-Lebel: moyenne et erreur-type des mesures pour la saison de croissance 2006.....	38

Liste des figures

Figure 1. Schéma des principales étapes de la récolte mécanique par tranchée.....	11
Figure 2. Récolte par aspiration suivie de la restauration versus récolte mécanique par tranchée.....	14
Figure 3. Localisation des zones d'étude à la tourbière de Pointe-Lebel.	17
Figure 4. Illustration de la composition floristique des communautés végétales composant la zone de tourbière expérimentale de récolte mécanique pré-intervention.....	19
Figure 5. Disposition des quadrats de 25 cm x 25 cm à l'intérieur des parcelles pour l'estimation du pourcentage de couvert de la strate muscinale.....	22
Figure 6. Exemple de marqueur naturel de croissance chez <i>Polytrichum strictum</i>	26
Figure 7. Strates de végétation : moyenne et erreur-type des mesures du pourcentage de recouvrement et la moyenne de leur cote de santé, pour les zones : naturelle, récolte mécanique par tranchée et restaurée après aspiration.....	36
Figure 8. Évolution des paramètres physicochimiques de l'eau	42
Figure 9. Évolution des éléments nutritifs dans l'eau.....	43
Figure 10. Évolution des cations de base dans l'eau.....	44
Figure 11. Évolution des métaux dans l'eau.....	45
Figure 12. Évolution des autres métaux et non-métaux dans l'eau.....	46

1 Introduction

Les tourbières ont de multiples fonctions écosystémiques qui sont de plus en plus mises en valeur à l'échelle globale, d'où l'intérêt grandissant de leur conservation et de leur restauration. Dans le monde, on compte en superficie environ 4 millions de km² de tourbière. Le Canada, à lui seul, détient 28 % de ces tourbières (Lappalainen, 1996) et est un leader mondial dans l'exploitation de la tourbe horticole (Daigle et Gautreau-Daigle, 2001). La technique de récolte la plus utilisée est l'aspiration. Elle s'exerce sur de grandes superficies dénudées de végétation et fait appel à l'énergie du soleil et du vent pour sécher la tourbe afin que celle-ci puisse être récupérée par un aspirateur géant tiré par un tracteur. Cette technique affecte non seulement la chimie du système (Wind-Mulder et al., 1996), mais elle élimine également toutes graines pouvant se retrouver dans le sol (Salonen, 1987), ce qui rend difficile la régénération naturelle de l'écosystème après les activités de récolte. Après exploitation, la surface des tourbières est inhospitalière et dans la majorité des cas, des efforts de réintroduction sont essentiels afin de ramener la végétation caractéristique d'une tourbière naturelle sur le site (p. ex: Poulin et al., 2005; Lavoie et al., 2005). Un des obstacles majeurs à la restauration est qu'elle demande des efforts et des coûts substantiels. Depuis 4 ans, une nouvelle technique de récolte est à l'essai et cette approche combine simultanément récolte et restauration. Cette technique, dite, récolte mécanique par tranchée, a l'avantage d'être indépendante des conditions climatiques quant au processus d'extraction de la tourbe. Puisque la tourbe est récoltée humide, il n'est plus essentiel d'attendre les journées ensoleillées et venteuses qui sont des conditions importantes lors de la récolte par aspiration. De plus, cette technique s'exerce sur de plus petites superficies et n'expose pas le dépôt de tourbe sur de grandes surfaces. Potentiellement, cette technique de récolte pourrait être plus avantageuse pour l'environnement. Le présent projet vise à évaluer si cette nouvelle technique exercera une moins grande pression environnementale sur le système, et ce, avec des coûts de restauration et des interventions moindres d'aménagement.

Dans les sections qui suivent, l'importance des tourbières naturelles pour l'environnement, l'homme, la faune et la flore sera soulignée. Pour que les tourbières

puissent rendre de nombreux services et bénéfiques, elles doivent se développer. Donc, un survol des processus permettant l'accumulation de la tourbe sera présenté. Lorsqu'une tourbière est formée, elle présente des caractéristiques chimiques distinctives qui seront décrites. L'eau est particulièrement acide ce qui influence la solubilité des éléments à l'intérieur de la tourbière ainsi qu'à l'extérieur lorsque celle-ci est perturbée. Les rôles primordiaux des écosystèmes tourbeux dans notre paysage n'ont pas toujours été reconnus. C'est pourquoi l'évolution de la relation des hommes avec ces écosystèmes particuliers ainsi que l'importance de la restauration dans une optique de développement durable seront synthétisées. Puisque l'activité d'intérêt est la récolte de tourbe, nous verrons l'évolution des principales techniques d'extraction, suivie des avantages et des inconvénients de la technique majoritairement utilisée : l'aspiration. Après quoi suivra une description technique et économique d'un type de restauration permettant la recolonisation végétale des sites récoltés par aspiration. Puisque l'aspiration suivie de la restauration éprouve plusieurs problèmes environnementaux et économiques, et dépend des conditions climatiques, une nouvelle technique tentant de pallier à ces difficultés sera présentée. Cette nouvelle technique, la récolte mécanique par tranchée ainsi que son potentiel d'utilisation seront décrits. Pour compléter l'introduction, les hypothèses et objectifs de cette étude seront énumérés.

1.1 Importance des tourbières

Les tourbières naturelles ont un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre de la biosphère. Elles sont impliquées dans plusieurs cycles biogéochimiques, dans la chaîne alimentaire, dans la dynamique de l'hydrologie et dans la qualité de l'eau (Lappalainen, 1996). Les tourbières à sphaignes, appelées aussi tourbières ombrotrophes, sont reconnues comme étant d'importants puits de carbone, mais elles ont également une remarquable aptitude à filtrer l'eau. En effet, les sphaignes ont une grande capacité d'échange cationique (Clymo, 1963) qui leur permet d'adsorber des éléments minéraux en solution dans le milieu. Les tourbières sont également des sources d'eau douce (Joosten et Clarke, 2002) qui peuvent s'avérer importantes dans certaines localisations géomorphologiques.

Les tourbières sont des endroits clés pour la collecte de petits fruits. On peut y retrouver plusieurs variétés en passant des plus traditionnels, comme les canneberges et les bleuets vers des espèces moins connues, mais intéressantes comme la chicouté, la camarine, les ronces ainsi que les fruits d'aronia, de sureau, de gaylussacia et d'amélanchier. Ces petits fruits indigènes sont profitables pour la population environnante et peuvent contribuer à l'économie locale (Groupe de recherche en écologie des tourbières, 2007).

En prime, les tourbières offrent un habitat unique pour la faune et la flore qui ont su s'adapter à ses conditions particulières. Les tourbières peuvent donc augmenter la biodiversité régionale, comme démontré par Calmé et al. (2002) pour la faune aviaire.

1.2 Développement, accumulation et décomposition

Les tourbières, avant de pouvoir nous rendre tous ces services, mettent énormément de temps à se développer. Dans les tourbières ombrotrophes, la tourbe s'accumule en moyenne de 0,5 à 0,6 mm par année (Lappalaiden, 1996), et ce, pendant des centaines d'années. Il y a accumulation de la tourbe dans cet écosystème puisque la proportion de biomasse produite est supérieure à la proportion de biomasse perdue par le processus de décomposition.

La biomasse sèche produite par mètre carré par année est définie comme étant la productivité végétale. La productivité diffère d'une tourbière à l'autre et est influencée par plusieurs facteurs. Gunnarsson (2005) a déterminé que le facteur le plus déterminant pour expliquer la variation de productivité sur une échelle globale entre les tourbières dominées par *Sphagnum* est la température moyenne annuelle. La position géographique, les conditions climatiques et l'espèce de sphaigne dominante ont également un rôle à jouer dans la variation de la productivité végétale.

Le faible taux de décomposition de la matière organique dans les tourbières favorise grandement l'accumulation de la tourbe. Cette faible décomposition résulte d'une

combinaison d'effets. Les sphaignes ont une composition chimique particulière qui leur permet non seulement de survivre et de se nourrir dans un milieu acide et faible en nutriments, mais également de résister à la décomposition. Un composé d'acide uronique présent dans les membranes des cellules de sphaignes, nommé sphagnan (acide galacturonique et acide 5-céto-D-mannuronique) serait le principal responsable de la résistance inhérente du tissu des sphaignes à la décomposition. Ce composé se trouve à la fois dans les cellules mortes et les cellules vivantes de la sphaigne (Børsheim et al. 2001). Il se lie à l'ammoniac le rendant non disponible pour les microorganismes (Painter, 1998). Par cette action, le sphagnan prévient la dégradation microbienne des tissus des sphaignes vivantes ou mortes. Des facteurs externes ont également une influence sur le faible taux de décomposition. La limitation de la diffusion de l'oxygène dans une partie du profil de tourbe, par la présence d'eau, crée des conditions anaérobiques, ce qui réduit la décomposition microbienne (Clymo, 1992). Une faible température de la tourbe peut également ralentir l'activité microbienne (Chapman et Thurlow, 1998).

Les tourbières ombrotrophes, lors de leur développement, au fur et mesure que la tourbe s'accumule, créent une nappe phréatique perchée. Cette nappe d'eau maintient, sous elle, des conditions anaérobiques. La nappe d'eau définit la limite entre les deux couches qui composent une tourbière ombrotrophe. L'acrotelme, la couche supérieure dite active, est l'endroit où la nappe d'eau fluctue et où les sphaignes vivantes ou récemment mortes sont aérées. C'est l'endroit où les phénomènes de productivité et de décomposition sont les plus actifs. Sous l'acrotelme se trouve le catotelme, la couche dite inactive, où la tourbe s'accumule tout en continuant à se décomposer à un plus faible taux. Cette couche est constamment en condition anaérobique et contient des couches de tourbe plus anciennes, donc plus décomposées (Rydin et Jeglum, 2006).

1.3 Propriétés chimiques des tourbières ombrotrophes

Les tourbières ombrotrophes sont des milieux humides très pauvres en éléments nutritifs et minéraux et particulièrement acides. Puisque leur surface est plus élevée que le reste du paysage, elles sont isolées de toutes percolations en provenance des terres plus

riches en cations de base. Donc, les tourbières ombrotrophes sont alimentées en éléments minéraux exclusivement des précipitations et des dépositions atmosphériques.

La chimie d'une tourbière peut être traduite en bonne partie par la chimie de son eau, puisque typiquement, les tourbières sont composées de 80-95 % d'eau (Hobbs, 1986). Au fur et à mesure que la tourbe s'accumule, l'influence du sol minéral sous-jacent s'amointrit ce qui diminue la concentration en éléments minéraux et augmente l'acidité. La sphaigne a la capacité d'acidifier son milieu tout en se nourrissant des nutriments peu abondants retrouvés dans le milieu. Au fur et à mesure de son développement, la sphaigne crée des sites d'échange cationique qui lui permettent de capter des cations essentiels à sa nutrition. L'acide uronique (sphagnan), substance qui constitue de 10 % à 30 % de la masse sèche des sphaignes (Clymo et Hayward, 1982), est en grande partie responsable de l'acidification du milieu et de l'approvisionnement en nutriments par les sphaignes. L'acide uronique libère des ions H^+ dans le milieu. Ces ions H^+ déplacent des cations sinon inaccessibles présents dans le milieu. Ces cations sont captés par les groupes carboxyles présents en surface des sphaignes (Rydin et al., 2006).

La chimie de l'eau d'une tourbière ombrotrophe est couplée aux changements extérieurs. La chimie varie selon l'abondance et la composition des précipitations (Proctor, 2006) et des dépositions atmosphériques (Zoltai, 1988; Blancher et McNicol, 1987) qui sont elles-mêmes influencées par la proximité d'un océan (Underwood et al., 1988). La chimie de l'eau varie également dans le temps, d'une saison à l'autre et d'année en année (Boatman et al., 1975).

La chimie change même à l'intérieur du profil d'une tourbière (Gorham 1949). Dans une tourbière, les couches de tourbe accumulées sont soumises à une aération différente, leur composition et leur degré de décomposition sont aussi différents. L'eau de surface est typiquement acide, autour d'un pH 4 et les éléments y sont facilement oxydés. Tandis que l'eau en profondeur est plus près de la neutralité et ses éléments chimiques sont majoritairement sous forme réduite (Shotyk et al., 1992).

1.4 Perception des tourbières par l'humain

À cause de cette eau acide et abondante même en surface, les tourbières ont longtemps été des endroits proscrits. Il y a de cela une centaine d'années, les tourbières étaient perçues comme des terres sans valeurs, des endroits inhospitaliers, voire mystiques. Les gens craignaient ces terres et certains croyaient même qu'ils pouvaient y être aspirés et y périr (Rydin et Jeglum, 2006).

Aujourd'hui l'utilisation des tourbières par l'homme a bien changé. Les tourbières naturelles sont des endroits recherchés pour la récolte de petits fruits ou de plantes médicinales. De plus, l'écotourisme y est fleurissant, que ce soit pour la chasse, l'observation d'oiseaux ou d'amphibiens ou encore pour observer un paysage unique. Les tourbières sont également des sites archéologiques hors pair où les objets préhistoriques peuvent être préservés intacts pendant des millénaires (Lappalaiden, 1996). Dans certaines parties du monde, les tourbières sont également modifiées afin de pratiquer l'agriculture, la foresterie ou la récolte de tourbe (Rydin et Jeglum, 2006).

Le Canada est un des plus grands producteurs de tourbe horticole au monde, en 1999 cette industrie générait plus de 170 millions de dollars à partir de tourbe horticole et 75 % de ces revenus provenaient des régions rurales du Québec et du Nouveau-Brunswick (Daigle et Gautreau-Daigle, 2001). La récolte de la tourbe a également un grand potentiel dans le secteur de l'énergie. Par contre, ce secteur n'est pas encore développé au Canada, mais des études sont en cours (Peat Ressources Limited, 2005). Ce secteur est potentiellement intéressant puisque la combustion de la tourbe est moins polluante que celle du charbon.

Avec la prise de conscience des biens et services écologiques que peuvent rendre les tourbières, il devient de plus en plus impératif, si l'homme a à les utiliser, de penser à le faire dans une optique de développement durable. Ce concept implique un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. Le développement durable doit être basé sur une vision globale de nos

actions de développement à long terme, en assurant l'intégrité de l'environnement, l'équité sociale et la prospérité économique (MDDEP, 2002).

Afin d'atteindre ces objectifs de développement durable, il est primordial de se responsabiliser à la restauration des tourbières après utilisation. La restauration est particulièrement nécessaire au Québec, car bien que la province possède une grande quantité de tourbières, la majorité d'entre elles se trouvent dans des écosystèmes nordiques, éloignés des réseaux routiers ou impropres à la récolte pour la tourbe horticole, parce que trop décomposée ou encore gelée en permanence dans le pergélisol (Rochefort, 2001). Donc, certaines régions comme le Bas-Saint-Laurent et la région du Manicouagan sont fortement sollicitées pour la récolte de tourbe. Dans ces régions, il reste peu de tourbières ombrotrophes naturelles pour des fins de conservation. C'est pourquoi la restauration est essentielle afin d'assurer la présence de tourbières pour les générations futures.

1.5 Évolution des techniques d'extraction de la tourbe

Il y a de cela une cinquantaine d'années, la technique de récolte de la tourbe horticole privilégiée était la coupe manuelle par bloc. Cette technique d'extraction manuelle impliquait des centaines d'hommes qui creusaient à la pelle des tranchées afin d'y extraire des blocs de tourbe. Les hommes creusaient côte à côte afin de créer une longue tranchée un mètre à la fois. Pour avoir accès à la tourbe, la couche de végétation en surface était enlevée à la pelle et jetée par-dessus l'épaule dans le fond de la tranchée entamée. Par la suite, la tourbe était extraite par blocs jusqu'à une profondeur de quelques mètres dépendamment de l'accumulation de la tourbe dans la tourbière exploitée. Les blocs de tourbe étaient temporairement entreposés sur des terre-pleins afin de permettre le séchage. Ces étapes étaient répétées jusqu'à ce que la tranchée exploitée soit suffisamment large (3-4 m). Ensuite, une nouvelle tranchée était débutée quelques mètres plus loin (Girard et al., 2002).

Maintenant, la technique de récolte la plus utilisée pour la tourbe horticole au Canada est celle par hersage qui défait la structure de la tourbe en petits morceaux (de

poussières à des particules de 2 cm). Cette technique nécessite l'excavation de canaux de drainage à tous les trente mètres (Daigle et Gautreau-Daigle, 2001) pour permettre la circulation de la machinerie. Le défrichement de grandes surfaces de tourbière est nécessaire afin que la tourbe sous-jacente soit hersée et séchée au champ pour être aspirée par d'immenses tracteurs-vacuum ou raclée en andains pour ensuite être récoltée par des convoyeurs (méthode Haku).

1.6 Les avantages de l'extraction par aspiration

Assurément, le passage d'une technique manuelle à une technique mécanisée pour l'extraction de la tourbe comporte des avantages. L'automatisation de la technique permet de récolter un plus gros volume de tourbe en beaucoup moins de temps. De plus, la machinerie permet de diminuer la main-d'œuvre nécessaire à la récolte (Warner et Buteau, 2000).

1.7 Les désavantages de l'extraction par aspiration

Certes, la récolte de la tourbe par aspiration apporte des avantages économiques importants. Par contre, cette technique agressive par assèchement apporte également son lot d'impacts environnementaux et diminue la qualité de la fibre de sphaigne récoltée.

Les tourbières exploitées par aspiration peuvent demeurer en exploitation de 15 à 50 ans (CSPMA, 2007) en fonction de la quantité et de la qualité de la tourbe. Durant ce temps, les tourbières exploitées, au lieu d'accumuler du carbone comme le ferait en général une tourbière naturelle, dégagent du CO₂ dans l'atmosphère (Glatzel et al., 2004).

Après plusieurs années d'exploitation, la banque de graines dans la tourbe résiduelle est complètement détruite ce qui compromet grandement le retour de la végétation (Salonen, 1987). Les étendues exploitées sont habituellement très vastes, ce qui accentue le problème puisque la végétation environnante est souvent trop loin pour une dissémination

efficace. Ces grandes superficies planes, dépourvues de végétation sont instables et difficilement colonisées à cause, entre autres, de l'érosion par le vent (Campbell et al., 2002), l'oxydation de la tourbe de surface (Waddington et McNeil, 2002) et le soulèvement gélival (Groeneveld et Rochefort, 2002). De plus, le drainage intensif abaisse considérablement le niveau l'eau et la rend difficilement disponible pour les sphaignes (Price et al., 2003) ce qui ne favorise pas non plus la recolonisation par les plantes. Une restauration active doit être appliquée afin de redonner vie à ces habitats quasi désertiques, puisque la recolonisation naturelle est souvent insuffisante.

Un drainage très intensif est nécessaire afin de permettre la circulation de la machinerie lourde sur la tourbière. Cette pratique d'assèchement, suivi du hersage, brise la structure de la fibre de sphaigne en petits fragments. La compaction, suite aux passages répétés de la machinerie, contribue également à altérer la qualité de la tourbe. De plus, les activités de drainage perturbent grandement la chimie de l'eau (Wind-Mulder et al., 1996). L'eau d'un site drainé a une conductivité supérieure à celle d'une tourbière naturelle. On trouve une plus grande présence d'éléments nutritifs dans l'eau, puisqu'il n'y a plus de végétation en surface pour capter ou retenir ces éléments. De plus, lors du drainage, l'eau entre en contact avec des couches de tourbe plus décomposées où sont adsorbés des cations. Puisque la chimie de l'eau dans une tourbière est en équilibre avec la tourbe, l'eau est enrichie en cations lorsqu'elle entre en contact avec des couches de tourbe plus décomposées (Andersen et al., En préparation). Donc, le drainage entraîne le lessivage de plusieurs éléments dans l'eau, dont l'azote, le sodium, le soufre, le calcium et le magnésium. Son pH se voit également augmenter d'au moins une unité (Prévost et al., 1999).

La composition chimique des tourbières est modifiée par le fait que lors de l'aspiration, la couche supérieure de tourbe est retirée, exposant une nouvelle couche plus basse et différente en éléments. Puisque les couches inférieures de tourbe ont été formées plus tôt que les couches supérieures, elles sont plus minérotrophes et ont une composition chimique plus variable que les tourbières non exploitées (Wind-Mulder et al., 1996; Wheeler et Shaw, 1995). Suite à une exploitation intensive de la tourbière, celle-ci n'est

plus surélevée par rapport au paysage. Elle peut donc être sujette aux mouvements de l'eau souterraine en provenance dans terres avoisinantes (Meade, 1992) et ainsi être enrichie en nutriments et en bases.

Une contrainte technique importante de la récolte par aspiration est que la tourbe doit être très sèche, ce qui rend la récolte fortement dépendante des conditions climatiques (Daigle et Gautreau-Daigle, 2001). De plus, les aspirateurs génèrent de grandes quantités de poussière qui se retrouve dans l'air environnant.

1.8 Efforts pour contrer la dépendance aux conditions climatiques

Étant donné les contraintes liées à la récolte de la tourbe par aspiration, plusieurs compagnies se demandent s'il serait possible de développer une méthode de récolte moins dépendante des conditions climatiques, moins destructrice et qui permettrait d'obtenir une restauration rapide et efficace par la suite. Des essais sont faits entre autres en Finlande, où des machines sont en développement (Vapo, 2006).

1.9 Description de la technique de récolte mécanique par tranchée

Premier Tech ltée, un leader dans l'industrie de la tourbe au Canada, a développé une technique permettant de combiner récolte et restauration des tourbières dans un environnement humide. Cette technique tente de pallier le problème de dépendance aux conditions climatiques tout en cherchant à diminuer les impacts négatifs sur l'environnement.

La technique de récolte mécanique par tranchée est une version moderne de l'ancienne technique de coupe manuelle par bloc. Un schéma des principales étapes est présenté à la figure 1.

- 1) Initialement, les premiers 20-30 cm de la végétation en surface (acrotelme) sont enlevés et mis de côté.

2) Ensuite, une pelle mécanique est utilisée pour prélever la tourbe exposée jusqu'à une profondeur de 2,4 m. Cette tourbe est acheminée vers le site de traitement de la tourbe.

3) Suite à l'extraction de la tourbe exposée, la végétation de surface préalablement conservée lors de l'étape 1 est déposée dans la tranchée nouvellement formée, composée d'une couche de tourbe plus profonde mise en exposition.

Ces étapes sont répétées tout au long de la tranchée ce qui crée un élargissement de la tranchée initiale. La végétation qui se trouve dans la tranchée constitue un effort de restauration qui sera évalué dans cette étude.

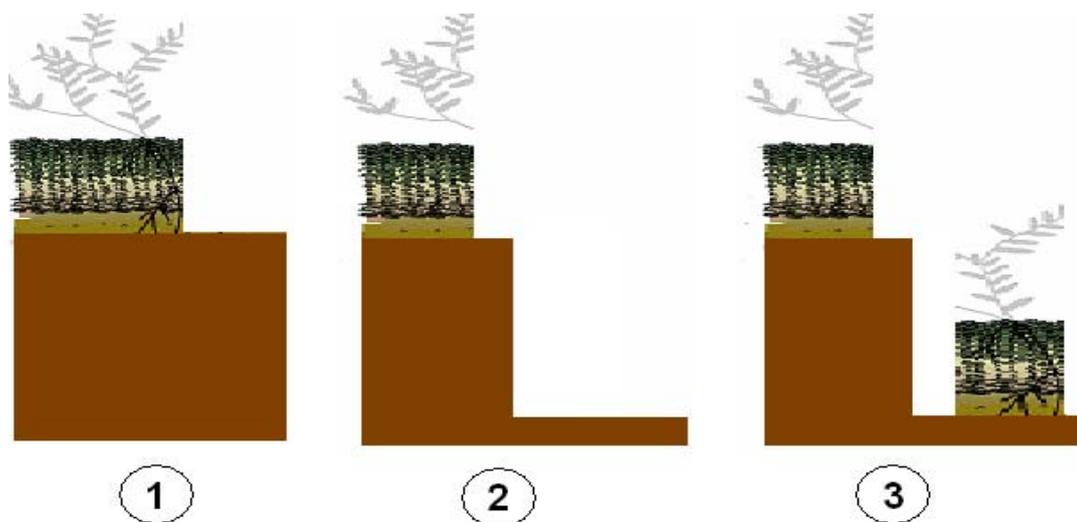


Figure 1 Schéma des principales étapes de la récolte mécanique par tranchée

Cette nouvelle technique semble moins destructrice que la récolte par aspiration puisqu'elle est utilisée sur de plus petites superficies et exige un drainage beaucoup moins intensif. Elle pourrait également entraîner moins d'impacts environnementaux au niveau des échanges gazeux. Cagampan et Waddington (2008) ont effectué des mesures de flux de carbone dans les tranchées. Ils en ont conclu que la dynamique du carbone de ce système était maintenue grâce au transfert de la couche supérieure de végétation dans le fond de la

tranchée. Ainsi, il est fort probable que l'écosystème retrouve sa fonction de puits de carbone atmosphérique plus rapidement qu'un site non restauré ou qu'un site restauré après aspiration.

D'autre part, puisque la tourbe peut être récoltée humide, la récolte est indépendante des conditions climatiques et génère peu de poussière. La tourbe amassée en blocs est très peu altérée au niveau de sa structure comparativement à l'aspiration ce qui permettrait d'atteindre de nouveaux standards de qualité de la tourbe. Finalement, en redéposant la végétation de surface dans les tranchées, on assure une source de graines et de diaspores viables. Ce type de restauration est peu coûteux, puisque les manipulations se font simultanément à la récolte. Elle ne demande que quelques minutes de plus à l'opérateur de la machinerie qui est déjà en place pour la récolte. De plus, cette restauration n'exige aucun matériel supplémentaire, puisque la végétation de surface est préservée sur le site.

1.10 Techniques de restauration

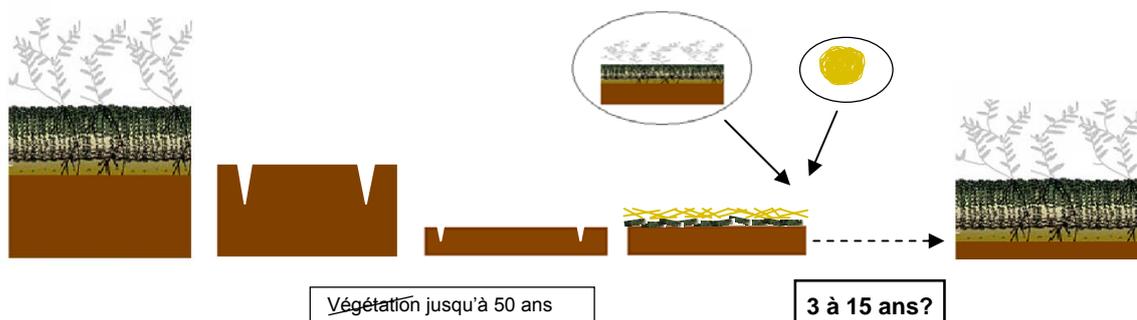
Depuis une dizaine d'années, plusieurs techniques de restauration ont été développées pour les tourbières après exploitation par aspirateur (p. ex: Egan, 1998; Rochefort et Bastien, 1998; Campeau et al., 2004b; Money, 2004; Rochefort et Lode, 2006). Une d'elles, développée au Canada, vise à établir un tapis de sphaignes afin de recréer la fonction la plus caractéristique des tourbières, soit l'accumulation de tourbe. Cette technique de restauration consiste à récolter les sphaignes d'un site d'emprunt et d'en étaler les fragments sur le site abandonné à restaurer, dans un ratio approximatif de 1:10. Les sphaignes disposent d'un grand pouvoir de régénération à partir de fragments végétaux (Campeau et Rochefort, 1996). Par contre, la surface d'une tourbière après exploitation devient un milieu où la température peut atteindre 70 °C avec une absence totale d'ombre (Sliva, 1998). Pour contrer ce problème, l'épandage d'un couvert de paille permet d'augmenter l'humidité à la surface de la tourbe tout en diminuant les variations de température et l'évaporation (Price et al., 1998). Finalement, les canaux de drainage sont bloqués afin de remouiller le site et rendre l'eau disponible aux sphaignes (LaRose et al., 1997). Cette technique de restauration après aspiration permet de rétablir un couvert

végétal constitué de plantes de tourbières et permet de retrouver les fonctions d'un système accumulateur de tourbe dans un délai estimé entre 3 à 15 ans.

En revanche, la restauration demande des efforts et des coûts substantiels. Quinty et Rochefort (2003) ont estimé le coût total, en argent et en main d'œuvre, de la restauration par hectare d'une tourbière après aspiration. L'achat du matériel requis pour la restauration d'une tourbière, impliquant en majeure partie la paille (~640 \$) et la location d'équipement, s'élève à plus de 800 \$/hectare. Le temps requis à un opérateur et à la machinerie afin d'accomplir les étapes de restauration pour 1 hectare demande environ 25 heures de travail : préparation du terrain (~3,5 h), récolte et épandage des plantes (~13 h), épandage de la paille (~7 h) et fertilisation suivie du blocage des canaux (~1,5 heure).

Il reste à voir si la récolte mécanique par tranchée qui unit récolte et restauration facilitera la réhabilitation des sites de récolte, et ce, avec des coûts et des interventions moindres. Ce projet vise à vérifier si la technique de récolte mécanique par tranchée est plus avantageuse sur le plan environnemental que la récolte par aspiration suivie de la restauration. Voir figure 2 pour une illustration de l'enjeu.

Récolte par aspiration:



Récolte mécanique par tranchée:

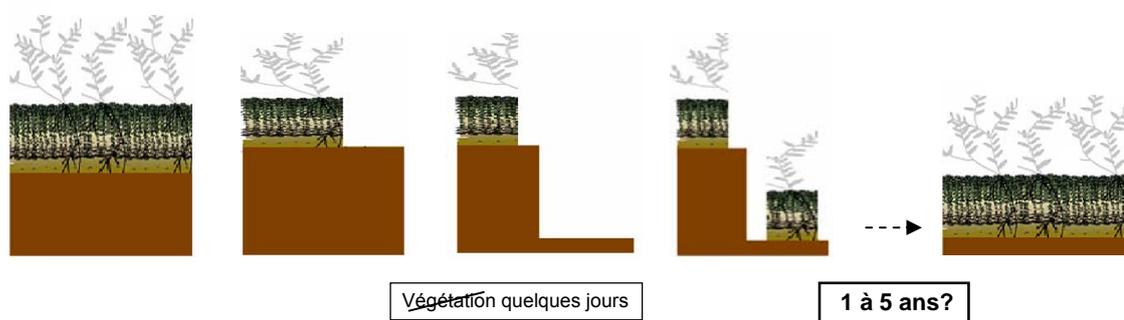


Figure 2 Récolte par aspiration suivie de la restauration versus récolte mécanique par tranchée. La récolte par aspiration, bien qu'efficace, engendre l'exposition du dépôt de tourbe dénué de végétation pendant une période pouvant aller jusqu'à 50 ans (CSPMA, 2007). Cette exposition de la tourbe couplée à un drainage intensif entraîne plusieurs problèmes environnementaux, dont un faible taux de recolonisation par les plantes de tourbière. La restauration de ce type de milieu exige des coûts et de la main-d'œuvre, entre autres, pour le transport du matériel et l'achat de la paille. Bien qu'exigeante, cette technique de restauration permet le retour vers un système accumulateur de tourbe dans une période estimée de 3 à 15 ans. La technique de récolte mécanique par tranchée unit récolte et restauration dans une même série d'opérations. Cette technique devrait être plus avantageuse pour l'environnement puisque le drainage est beaucoup moins extensif et le dépôt de tourbe ne demeure exposé que quelques jours au maximum. Les coûts de restauration sont moindres, puisque la restauration ne nécessite aucun apport extérieur. Lors de la restauration, la végétation est peu abimée et les conditions d'humidité sont meilleures. Par conséquent, le retour vers un écosystème tourbeux fonctionnel devrait se faire dans un laps de temps plus court (1 à 5 ans) que lors de l'aspiration suivie de la restauration et les impacts environnementaux liés à la récolte mécanique par tranchée devraient être moindres.

1.11 Objectifs et hypothèses

L'objectif général de cette étude est donc d'évaluer les impacts qu'aura la technique de récolte mécanique par tranchée sur la survie et la croissance de la végétation ainsi que sur la qualité de l'eau pour les cours d'eau récepteurs en aval du site. Cette étude compte quatre hypothèses :

1. Lors de la récolte mécanique par tranchée, la banque de graines et la végétation de surface ne seront pas complètement détruites. Donc, l'établissement du couvert végétal, constitué de plantes de tourbières, s'effectuera plus rapidement après récolte mécanique par tranchée qu'après aspiration suivie de la restauration.
2. La productivité sera plus élevée dans la partie de récolte mécanique par tranchée que dans la partie restaurée après aspiration puisque les conditions sont plus appropriées pour un bon développement de la sphaigne.
3. Le taux de décomposition de la tourbe sera plus faible dans la partie de récolte mécanique par tranchée que dans la partie de tourbière naturelle, car les conditions hydrologiques sont semblables, mais plus inondées dans la partie de récolte mécanique par tranchée que dans la partie naturelle.
4. La récolte mécanique par tranchée affectera moins la qualité de l'eau environnante que la restauration après aspiration, car le drainage est beaucoup moins extensif, donc moins de lessivage des nutriments. De plus, le dépôt de tourbe est exposé pendant un laps de temps beaucoup plus court que lors de l'aspiration, ce qui devrait également diminuer le lessivage.

2 Matériel et méthode

2.1 Description du site d'étude

La tourbière étudiée se situe dans la région de Pointe-Lebel (49° 10' N 68° 17' O). Cette municipalité fait partie du comté de Manicouagan, région administrative de la Côte-Nord. La normale climatique annuelle pour la station météorologique la plus proche, celle de Baie-Comeau, est de 1,5 °C. La normale des précipitations sur 30 ans (1971-2000) dans cette région totalise 1014,4 mm par année (Environnement Canada, 2006).

Cette tourbière ombrotrophe est composée d'une strate muscinale dominée par *Sphagnum fuscum* (Schimper) H. Klinggraff et *Sphagnum rubellum* Wilson. La strate arborescente est dominée par *Picea mariana* (Mill.) BSP. et la strate arbustive par les éricacées *Kalmia angustifolia* L. ainsi que *Ledum groenlandicum* Retzius. Il y a également une présence marquée de *Rubus chamaemorus* L. et quelques lichens du genre *Cladina*. Cette tourbière est le foyer de cinq zones d'étude : soit une zone 1) naturelle, 2) de récolte active par aspiration, 3) restaurée après aspiration, 4) expérimentale de récolte mécanique par tranchée et 5) de traitement de la tourbe.

La zone naturelle se trouve à quelques kilomètres au sud-ouest de la zone en exploitation active et à plus de 100 m de la zone expérimentale, donc à l'écart de l'influence du drainage (figure 3). Cette zone s'étend sur environ 1 km² et elle contient deux mares situées en son centre. La zone en récolte active par aspiration est constituée d'une suite de planches de 30 m de large, encore en exploitation. La zone restaurée, adjacente à la zone en exploitation, est une ancienne zone de récolte par aspiration qui a été abandonnée en 1997. Les travaux de restauration se sont déroulés au printemps 2004 sur 4,2 ha totalisant quatre planches (figure 3). La zone expérimentale de récolte mécanique est divisée en deux parties, un secteur d'essai d'environ 7 m x 13 m et un secteur de mise à l'échelle d'approximativement 10m x 60 m à une centaine de mètres de distance l'une de l'autre. Le canal principal de drainage adjacent au secteur de mise à l'échelle a été creusé à l'été 2003, tandis que le deuxième petit canal (~1 m x 2 m) à proximité du secteur d'essai a

été creusé en juin 2005. Les essais de la nouvelle technique de récolte ont eu lieu durant l'été 2005. Finalement, la zone de traitement de la tourbe a été aménagée à l'extérieur de la tourbière, dans la partie sud-est du pourtour boisé de celle-ci. Cette zone sert d'intermédiaire entre la récolte mécanique par tranchée et l'ensachage.

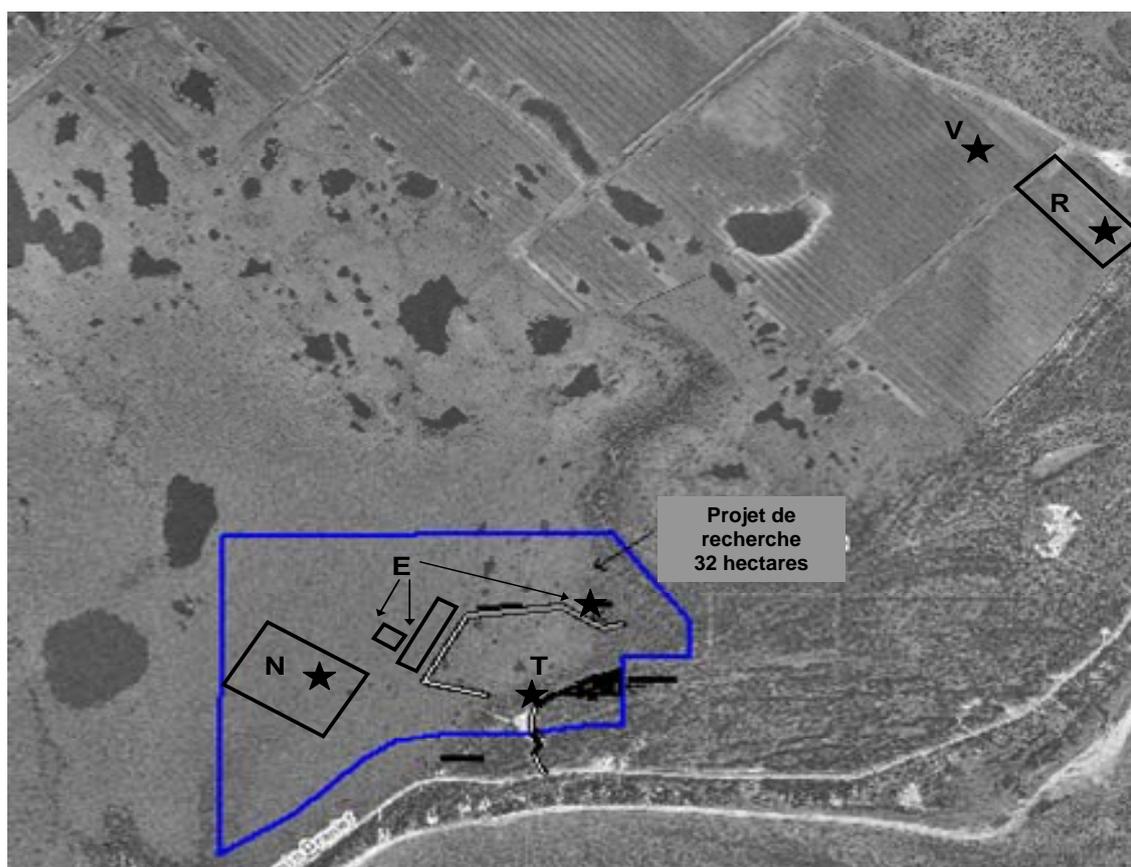


Figure 3 Localisation des zones d'étude à la tourbière de Pointe-Lebel. Les rectangles noirs délimitent les zones d'étude de la végétation : naturelle (N), expérimentale (E) et restaurée après aspiration (R). Les étoiles représentent les installations pour la collecte de l'eau. Dans la zone récoltée par aspiration (V) et la zone de traitement de la tourbe (T), seule l'eau est analysée.

2.2 Plan de l'expérience

2.2.1 Suivi de la végétation

Afin d'évaluer les efforts de restauration de la végétation par la nouvelle technique de récolte présentement en développement à la tourbière de Pointe-Lebel, trois zones ayant subi divers degrés d'intervention ont été comparées. Il s'agit des zones de tourbière : naturelle, récoltée mécaniquement par tranchée et restaurée (après récolte par aspiration). Les unités expérimentales sont des parcelles permanentes de 1 m x 4 m qui ont été installées dans les principales communautés végétales du site. Cette dimension permet une estimation précise du pourcentage de recouvrement de la végétation et un bon suivi de son évolution dans le temps (Elzinga et al., 2001).

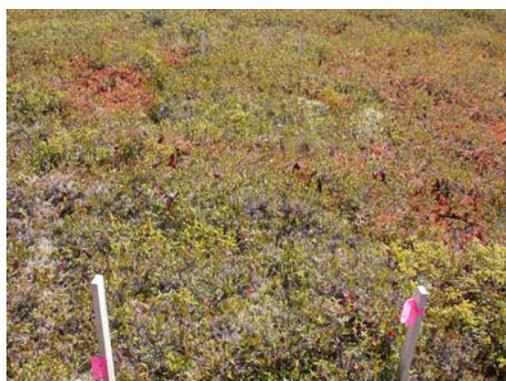
La première étape, réalisée en 2004 avant tout essai de récolte mécanique par tranchée, fut de définir les communautés végétales présentes dans la zone expérimentale. En tout, six types de communauté végétale ont été identifiés dans la zone de tourbière expérimentale: H1, H2, H3, H4, H5 et H6 (voir figure 4 pour un aperçu de la composition floristique). La description complète des communautés végétales ainsi que la distribution de ces communautés végétales dans les parcelles de la zone expérimentale et de la zone naturelle pré-intervention sont présentées à l'annexe 1. Cet inventaire préliminaire de la végétation et l'utilisation de la même proportion de communautés végétales dans la zone expérimentale et naturelle ont permis de mieux sélectionner la zone de tourbière naturelle afin que celle-ci soit la plus représentative possible de la zone récolte mécanique par tranchée. La zone naturelle sert donc d'écosystème de référence (SER, 2008), c'est-à-dire, une zone contrôle qui a un certain degré de variabilité, mais vers laquelle la zone récolte mécanique par tranchée devrait tendre si les efforts de restauration sont concluants.



H1 : Bosquet d'épinettes
(parcelle 15N)



H2 : Bosquet d'épinettes et d'éricacées
(parcelle 13N)



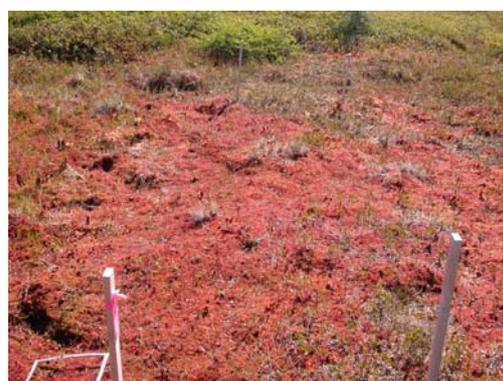
H4 : Platière à éricacées, sphaignes et lichens
(parcelle 3N)



H3 : Platière à éricacées et sphaignes
(parcelle 16N)



H5 : Platière à sphaignes
(parcelle 10N)



H6 : Tapis à sphaignes
(parcelle 17N)

Figure 4 Illustration de la composition floristique des communautés végétales composant la zone de tourbière expérimentale de récolte mécanique pré-intervention.

Afin de bien distinguer les effets qu'entraîne la récolte mécanique par tranchée versus les effets allogènes, toutes les mesures sur la végétation dans ces deux zones ont été faites pré-intervention (2004) et post-intervention (2006). Suite à la récolte de la tourbe dans la zone expérimentale, des parcelles ont été repositionnées dans les tranchées nouvellement formées de cette zone à l'été 2006. Étant donné l'état et la superficie des tranchées, nous avons quelque peu adapté la méthode d'échantillonnage de la végétation. Les parcelles ont dû être subdivisées en quatre sous-parcelles de 1 m x 1 m afin de faciliter le positionnement. Toutefois, on considère toujours l'unité expérimentale comme ayant une superficie de 4 m². Ainsi, en 2006, on dénombre six parcelles (ou 24 sous-parcelles de 1 m²). De plus, afin de comparer les impacts de la récolte mécanique par tranchée par rapport à la récolte par aspiration suivie de la restauration, des parcelles ont été installées dans la zone restaurée après aspiration. Le nombre de parcelles établies par zone est présenté au tableau 1.

Tableau 1 Nombre de parcelles dans chaque zone d'étude

Zones d'étude	Parcelles
Naturelle (N) 2004 et 2006	17
Expérimentale de récolte mécanique par tranchée, pré-intervention (E) 2004	15
Expérimentale de récolte mécanique par tranchée, post-intervention (E) 2006	6
Restaurée après aspiration (R) 2006	8

La nomenclature employée pour l'écriture de ce mémoire est tirée de plusieurs documents. La nomenclature utilisée pour les plantes vasculaires est celle de Marie-Victorin (1997); celle de Crum et Anderson (1981) pour les mousses brunes et les sphaignes; celle de Brodo et al., (2001) pour les lichens et finalement celle de Conard et Redfearn (1979) pour l'identification des hépatiques.

2.2.2 Suivi de la qualité de l'eau

Pour évaluer l'impact de la récolte mécanique par tranchée sur la qualité de l'eau, les cinq zones d'études de la tourbière de Pointe-Lebel sont comparées (naturelle, récolte active par aspiration, restaurée après aspiration, récolte mécanique par tranchée et traitement de la tourbe). Les échantillons d'eau étaient puisés dans des puits permanents forés à 1 m de profondeur sauf pour les échantillons de solides en suspension qui étaient puisés dans un trou à ciel ouvert. La zone naturelle, puisqu'elle est plus vaste et moins homogène, contient trois puits forés à 1 m de profondeur et trois trous à ciel ouvert. Les échantillons d'eau ont été récoltés de mai à octobre en 2004, 2005 et 2006. Les trois années correspondent à la période pré-intervention, pendant l'intervention et post-intervention. La liste complète des éléments chimiques analysés est présentée à l'annexe 2.

2.3 Structure et végétation

Un des principaux objectifs lors de la restauration d'une tourbière vise le retour d'une végétation caractéristique d'une tourbière naturelle (Gorham et Rochefort, 2003). Donc, l'évaluation de la composition des communautés végétales est une première étape importante.

Afin de bien caractériser la végétation présente dans chacune des parcelles énumérées au tableau 1, le pourcentage de recouvrement de chacune des espèces présentes a été estimé. Dans le but de faciliter cette évaluation, la végétation a été divisée en cinq catégories réparties à l'intérieur de deux strates principales. La majorité des catégories se trouve dans la strate supérieure, qui est composée de : arbres/arbustes, éricacées, herbacées et substrat perturbé. La strate muscinale, la cinquième catégorie, qui inclut sphaignes, mousses, hépatiques et lichens est considérée à part puisque cette strate joue un rôle clé pour le rétablissement de l'écosystème.

Pour la caractérisation de la strate végétale supérieure, chaque parcelle a été divisée en quatre sous-parcelles de 1 m x 1 m. Quant aux espèces de la strate muscinale, elles ont été évaluées dans huit quadrats de 25cm x 25 cm placés à des endroits prédéterminés dans les parcelles (voir figure 5).

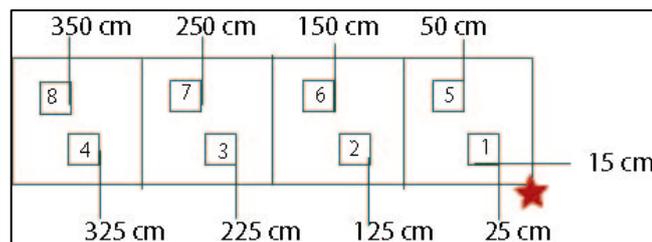


Figure 5 Disposition des quadrats de 25 cm x 25 cm à l'intérieur des parcelles pour l'estimation du pourcentage de couvert de la strate muscinale.

Par la suite, une cote de santé générale a été attribuée afin de dresser un portrait de l'état de la végétation dans les parcelles. Les cotes de santé accordées aux sous-parcelles sont ramenées en une moyenne pour la strate supérieure et la strate muscinale de chaque parcelle. La cote de santé varie de 1 à 5 selon le barème suivant :

- 1- La végétation pousse sans aucune difficulté.
- 2- Une minorité, environ le 1/4 des plantes, sont malades ou mortes.
- 3- Environ la moitié des plantes sont malades ou mortes.
- 4- La majorité, soit 3/4 des plantes, sont malades ou mortes.
- 5- Tout est mort ou extrêmement malade.

De façon à documenter visuellement chacune des parcelles, des photos numériques ont également été prises à chaque visite du site. De plus, un herbier de référence a été dressé avec la liste des espèces présentes sur le site. Pour s'assurer de l'exactitude des espèces retrouvées, les spécimens inconnus ou incertains ont été identifiés par un botaniste expérimenté.

2.4 Mesures liées au retour d'un système accumulateur de tourbe

Afin d'apprécier les performances écologiques des techniques de récolte/restauration face au retour d'un système accumulateur de tourbe, des taux de productivité et de décomposition de la tourbe ont été mesurés. Pour que la zone récolte mécanique par tranchée redevienne un système accumulateur de tourbe, sa productivité et son taux de décomposition doivent être similaires aux taux retrouvés dans une tourbière naturelle. Ces paramètres ont donc été mesurés.

2.4.1 Productivité

La mesure de la productivité est un élément crucial puisqu'elle englobe la performance de tout l'écosystème : la photosynthèse, la respiration, la consommation par les herbivores et la mortalité (Jordan III et al., 1987). Cette mesure est définie comme étant l'accumulation de biomasse sèche par mètre carré par année. Puisque la presque totalité de la productivité a lieu durant la période exempte de gel (Lindholm, 1990), les variables reliées à la productivité ont été mesurées de la fonte des neiges aux premières gelées automnales.

2.4.1.1 Productivité (zones naturelle et récolte mécanique par tranchée)

Dans la zone naturelle et la zone récolte mécanique par tranchée, les sphaignes ont été ciblées pour mesurer la productivité puisqu'elles déterminent l'accumulation de tourbe et la formation de la majeure partie des tourbières au Canada (Waddington et al., 2003). L'élongation des tiges de sphaignes, la densité et la biomasse sont des mesures nécessaires au calcul de la productivité annuelle de l'écosystème.

2.4.1.1.1 Élongation annuelle (zones : naturelle et récolte mécanique par tranchée)

Dans la zone de tourbière naturelle et la zone de récolte mécanique par tranchée, l'élongation annuelle a été estimée par la méthode des tiges coudées (Clymo, 1970). Cette méthode est idéale pour les sphaignes de la section *Acutifolia* qui dominent la tourbière de

Pointe-Lebel. Les tiges coudées sont des tiges de métal d'environ 30 cm de longueur et d'une épaisseur approximative de 2 mm. Elles sont pliées à angle droit en leur centre sur environ 2 cm et repliées vers le bas, ce qui permet leur ancrage dans le tapis de mousse. Les tiges coudées sont insérées dans les tapis de sphaignes, la partie repliée sous les capitules, en s'assurant d'avoir une bonne répartition entre les espèces dominantes, soit *Sphagnum rubellum* et *Sphagnum fuscum*. Les tiges coudées ont été mesurées au début et à la fin de la saison de croissance à l'aide d'une pipette graduée (1 mL = 8,35 cm). La différence entre la distance initiale et la distance finale est utilisée pour évaluer l'élongation moyenne des tiges de sphaignes.

En 2004, pré-intervention (avant les essais de la récolte mécanique par tranchée), toutes les parcelles des zones de tourbière naturelle (17) et récolte mécanique (15) ont été sélectionnées pour les mesures d'élongation. Les tiges coudées y ont été installées à raison de 21 tiges par parcelle.

En 2006, post-intervention (suite aux essais de la récolte mécanique par tranchée), pour la zone naturelle, six parcelles ont été sélectionnées (équivalent au nombre de parcelles dans la zone de récolte mécanique). Pour la sélection, les parcelles ont été divisées par type d'habitat (H1, H2, H3, H4, H5, H6) et pour chaque type d'habitat, une parcelle a été pigée au hasard. Dans chacune de ces parcelles, 21 tiges coudées ont été installées.

Dans le cas de la zone récolte mécanique par tranchée, post-intervention, puisque les tapis de sphaignes sont moins stables et moins uniformes une plus grande quantité de tiges coudées ont été installées. En effet, à cause de la plus grande variation de la nappe phréatique, les tiges pouvaient être soulevées par des agents externes à la croissance des mousses comme telle. Pour s'assurer d'avoir des résultats fiables, 84 tiges coudées pour chacune des six parcelles de 1 m x 4 m ont été installées. Lors de la prise des mesures finales, une cote de confiance a été assignée pour chaque mesure prise. La cote variait de 1 = fiable (aucune perturbation apparente) à 3 = non valide (forte perturbation apparente). Toutes les mesures portant la cote 3 ont été éliminées.

2.4.1.1.2 Densité et biomasse (zones : naturelle et récolte mécanique par tranchée)

Afin d'évaluer la densité et la biomasse du tapis de sphaignes, quatre échantillons représentatifs du tapis ont été prélevés au pourtour des parcelles à l'aide d'un carottier ayant une superficie de 33,42 cm². Les capitules de ces échantillons ont été comptés afin que la moyenne de la densité soit extrapolée (nb/m²). Dans le cas de la biomasse, les tiges de sphaigne ont été coupées uniformément, 3 cm sous les capitules puis placées dans une étuve à 70° C pendant 48h. Ensuite, les échantillons ont été pesés permettant ainsi d'obtenir la biomasse sèche (g/cm de tige).

La sélection des parcelles utilisées pour les mesures de densité et de biomasse suit la sélection faite pour les mesures d'élongation, c'est-à-dire, toutes les parcelles pré-intervention pour la zone naturelle et la zone de récolte mécanique. Par contre, pour la période post-intervention, six parcelles dans la zone naturelle et les six parcelles présentes dans la zone de récolte mécanique ont été utilisées.

2.4.1.2 Productivité (zone restaurée)

Puisque les sphaignes sont quasi absentes dans la zone restaurée après aspiration, la productivité de cette zone est estimée à partir de la plante dominante de ce système : *Polytrichum strictum*. En tourbière récemment restaurée, la productivité peut être mesurée directement en prélevant la végétation nouvellement établie depuis la restauration (Roxane Andersen, 2006, communication personnelle). En tout, seize échantillons de 25 cm x 25 cm répartis autour des parcelles ont été amassés de façon destructive.

À partir de chacun des échantillons de 25 cm x 25 cm récoltés, un sous-échantillon de 52,2 cm² a été prélevé de manière à ce qu'il soit le plus représentatif possible de la densité de l'échantillon initial. Pour tous les sous-échantillons délimités, l'élongation annuelle, la biomasse et la densité ont été évaluées.

2.4.1.2.1 Élongation annuelle (zone restaurée)

La mesure de l'élongation annuelle des tiges de *Polytrichum strictum* est possible grâce à un marqueur de croissance naturelle (Russell, 1988) présent sur cette espèce (voir figure 6). Afin de faciliter la distinction du marqueur, les tiges de polytric étaient humidifiées et placées sous un binoculaire pour un grossissement de 6,4 X et la première marque naturelle observée à partir de l'apex était coupée à l'aide d'une lame. Ensuite, chaque pousse de l'année était mesurée à l'aide d'un vernier électronique.



Figure 6 Exemple de marqueur naturel de croissance chez *Polytrichum strictum*. Le marqueur naturel démontre une diminution de l'espacement entre les feuilles indiquant la fin d'une année de croissance.

2.4.1.2.2 Densité et biomasse (zone restaurée)

Les pousses de l'année issues des sous-échantillons sont conservées. Elles sont dénombrées pour obtenir la densité qui sera ensuite calculée en nb/m². Ensuite, les tiges

sont séchées à 45 °C pendant 48h avant d'être pesées permettant d'obtenir la biomasse sèche.

2.4.1.3 Calcul de la productivité (zones naturelle, récolte mécanique et restaurée)

La productivité annuelle des zones naturelle, récolte mécanique par tranchée et restaurée est calculée à partir de la formule suivante :

$$\text{Productivité annuelle (g m}^{-2} \text{ an}^{-1}) = \text{ES} \times \text{D} \times \text{B}$$

Où ES = Élongation (cm), D = Densité (nb/ m²), B = Biomasse (g/cm de tige).

À partir de ces moyennes de productivité, il sera possible de comparer la performance entre la zone récolte mécanique par tranchée et la zone restaurée en comparaison à la zone de référence; la zone naturelle.

2.4.2 Décomposition

Afin de comparer les taux de décomposition annuelle, la technique des sacs à décomposition a été utilisée. Plusieurs études ont eu recours à cette technique (p. ex : St-Arnaud, 2007; Belyea 1996; Rochefort et al., 1990) et elle s'est avérée très efficace puisqu'elle permet de prendre en compte tous les processus impliqués dans la décomposition tels la respiration, le lessivage et le morcellement (Belyea, 1996).

Des sacs en filet de nylon de 5 cm x 5 cm à fines mailles d'environ 0,25 mm ont été initialement remplis de sphaignes provenant de la tourbière de Pointe-Lebel. Ils ont été identifiés, séchés (70 °C, 48h) et pesés pour obtenir un poids initial. Par la suite, un ensemble de dix sacs à décomposition a été enfoui à une profondeur de 15 cm dans les tapis de sphaignes au pourtour des parcelles. Dans la zone naturelle, six parcelles préalablement sélectionnées pour les mesures de productivité ont reçu des sacs. Dans la zone récolte mécanique par tranchée, les six parcelles ont également reçu chacune dix sacs à décomposition. Après un an d'incubation dans les tapis de sphaignes, ils ont été extraits,

séchés à 70 °C pendant 48 h et pesés. La différence entre le poids initial et le poids final équivaut au poids de matériel perdu par la décomposition. Le coefficient linéaire de décomposition est calculé à l'aide de la formule : $K' = (X_0 - X_1) / X_0$, où X_0 est la phytomasse initiale du matériel végétal et X_1 la phytomasse finale. Afin d'obtenir un pourcentage de perte de phytomasse, les résultats sont multipliés par un facteur 100.

2.5 Analyses chimiques

L'évaluation de la qualité de l'eau est une étape primordiale puisque tous les projets de récolte de tourbe doivent se soumettre à une évaluation environnementale qui inclut les eaux issues du site de récolte et les cours d'eau récepteurs (MDDEP, 2002). Le choix des éléments a été influencé par la littérature scientifique (Wind-Mulder et al., 1996) et par une étude antérieure réalisée par Premier Horticulture à la tourbière de Pointe-Lebel (Roche, 2000).

Pour certaines analyses, les mesures ont été collectées directement sur le terrain. Le pH, la conductivité électrique et la température sont mesurés avec un pH-mètre Hanna HI 98129 et l'oxygène dissous mesuré avec un appareil du type accumet® 13636AP74A.

La conductivité électrique a été convertie en conductivité électrique corrigée à partir de la formule développée par Sjörs (1952):

$$\text{Conductivité corrigée} = \text{Conductivité originale} - (10^{-\text{pH}} \times \text{constante})$$

Où la constante est égale à 349820.

Pour le reste des analyses chimiques, des échantillons d'eau pour remplir deux bouteilles de 125 mL ont été prélevés dans les puits forés en plus d'une bouteille de 2 L prélevée dans les trous à ciel ouvert pour les solides en suspension, et ce, pour chaque zone de la tourbière de Pointe-Lebel. Pour la partie naturelle, chaque bouteille de 125 mL et de 2 L était un échantillon composite combinant les trois points d'échantillonnage.

Les échantillons ainsi recueillis étaient gardés au froid durant le court laps de temps précédant leur arrivée aux laboratoires d'analyses.

La majorité des analyses ont été prises en charge par le laboratoire d'analyse de la Faculté de foresterie et de géomatique de l'Université Laval. Les éléments suivants : sodium, potassium, calcium, magnésium, phosphore, manganèse, fer, plomb, mercure, cuivre, cadmium, nickel, zinc et aluminium ont été dosés à partir de l'appareil Optima 4300DV de la compagnie Perkin-Elmer. Le nitrate et l'ammonium ont été analysés par FIA (flow injection analysis). La méthode Quikchem method 12-107-04-1-F a été utilisée pour le nitrate et la méthode Quikchem method 10-107-06-2-B a été utilisée pour l'ammonium. La méthode décrite par Qualls (1989) utilisant l'oxydation au persulfate a servi à mesurer l'azote total.

Les huiles et les graisses ont été prises en charge par le Laboratoire de l'environnement LCQ situé à Québec et ont été testées par la méthode gravimétrique. Les solides en suspension sont évalués par filtration au laboratoire de Premier Horticulture. L'analyse du carbone organique dissous a été réalisée par l'Université McGill à l'aide d'un Shimadzu TOC-5050 analyzer à haute température de combustion (680 °C) et avec un catalyseur de platine (Mike Dalva, Mc Gill University, 2007, communication personnelle).

2.6 Interprétation des résultats

2.6.1 Végétation

Les études d'impacts permettent une meilleure compréhension de la capacité d'adaptabilité des systèmes naturels face aux perturbations. Elles deviennent donc des outils puissants permettant des décisions plus éclairées pour une meilleure gestion de nos ressources naturelles (Bernstein et Zalinski, 1983).

Différents types de modèles statistiques sont suggérés afin de quantifier les effets d'une perturbation sur la faune ou la flore. Parmi les modèles proposés, on retrouve le before-after studies (Skalski et Robson, 1992), le control-impact studies (Skalski et

Robson, 1992) et le before-after-control-impact studies (Green, 1979; Skalski et Robson, 1992 ; Stewart-Oaten et al., 1986; Smith, 2002).

Green (1979) définit le modèle BACI (before-after-control-impact studies) comme étant optimal puisqu'il possède à la fois un contrôle spatial et temporel. Le modèle inclut une zone où a lieu l'impact et une zone contrôle qui sont toutes deux échantillonnées avant et après l'impact. La zone contrôle doit être suffisamment loin pour ne pas être influencée par l'impact, mais assez près pour être sous l'influence des mêmes phénomènes naturels que la zone d'impact, comme le climat (Stewart-Oaten et al., 1986). La zone contrôle mesure l'effet des conditions ambiantes tandis que la zone d'impact mesure les mêmes variations en plus des effets engendrés par l'impact testé. Les conséquences d'une perturbation sur l'environnement peuvent être confirmées lorsque des changements observés dans la zone d'impact n'ont pas lieu dans la zone contrôle.

Une approche souvent utilisée pour l'analyse du modèle BACI est centrée sur l'estimation de l'interaction entre le traitement (contrôle – impact) et le temps (avant – après) (Green, 1979; McDonald et al., 2000). Il existe différentes stratégies afin de déterminer l'unité de répétition. La première option est de prélever des mesures à plusieurs reprises dans le temps avant et après la perturbation. Dans ce cas, les unités expérimentales sont considérées comme étant les répétitions dans le temps. On mesure donc la variabilité dans le temps avant versus après l'impact (Stewart-Oaten et al., 1986). Une deuxième approche utilisée (Day et al., 1997) consiste à considérer les parcelles ou les tranchées comme étant des répétitions en soi. Les conclusions sont basées sur les différences avant et après perturbation sur le site contrôle et sur le site d'impact. Dans notre cas, c'est la deuxième approche, soit la réplication spatiale qui était visée. L'analyse statistique recommandée pour le modèle BACI est l'ANOVA à deux facteurs (Green, 1979).

Le modèle BACI en soi est un design intéressant qui permet de visualiser l'effet d'un impact sur un écosystème. Par contre, l'interprétation statistique du modèle BACI est très critiquée dans la littérature (Hurlbert, 1984; Murtaugh, 2000 ;Murtaugh, 2002; Underwood, 1989; Underwood, 1991; Underwood, 1992; Underwood, 1994; Underwood et

Chapman, 2003). L'interprétation statistique de ce modèle est principalement critiquée pour le manque de réplification spatiale causant de la pseudo réplification (Hurlbert, 1984). D'après Hurlbert (1984) et Murtaugh (2002), le terme d'erreur utilisé lors d'une ANOVA est inapproprié et teste faussement les effets anticipés par l'hypothèse de départ.

Il est difficile d'éviter la pseudo réplification lors d'une étude d'impacts puisque habituellement, il n'y a qu'un seul site d'impact (Stewart-Oaten et al., 1986). Il serait déraisonnable d'exiger un répliquat du site d'impact, dans notre cas, une tourbière distincte où les essais de la nouvelle technique de récolte (récolte mécanique par tranchée) auraient été effectués. Nous avons un contrôle très limité sur ce genre de site. Par contre, il est possible de remédier à ce problème en répliquant le site contrôle (Underwood, 1989, 1992, 1994). Un design asymétrique avec un seul site d'impact et plusieurs sites contrôles permettrait une analyse statistique plus fiable (Underwood, 1994).

Le site contrôle utilisé lors de cette expérience est très diversifié, il contient plusieurs types d'habitats et s'étend sur environ 1 km². Il est à proximité du site d'impact, donc il subit les mêmes conditions climatiques. Par contre, le site contrôle n'est pas répété dans une autre tourbière. Il aurait été très difficile de trouver un autre site contrôle soumis aux mêmes conditions climatiques, biologiques et édaphiques.

L'analyse des résultats suivra donc les recommandations faites par Hurlbert (1984) et Murtaugh (2002, 2007). Ils prônent que la façon optimale de présenter les résultats dans une telle situation est de développer des graphiques et des tableaux démontrant clairement les moyennes et la variabilité des données recueillies. Le message sera aussi valide tout en étant beaucoup plus explicite qu'avec des résultats d'ANOVA qui auraient été difficilement interprétables.

2.6.2 Qualité de l'eau

Une analyse graphique permettra de discerner les impacts sur la composition chimique de l'eau imposés par les différents degrés d'activité sur la tourbière de Pointe-Lebel. La tendance générale de chacun des éléments sera comparée pour les cinq zones, et ce, pour trois années (pré-intervention, pendant l'intervention et post-intervention) en fonction des normes gouvernementales. Les normes gouvernementales avec lesquelles les éléments chimiques de l'étude sont comparés sont majoritairement les critères de vie aquatique aigu (CVAA). Les critères de vie aquatique aigu sont les critères présentement utilisés par le gouvernement du Québec dans la région du Manicouagan lors d'études d'impacts pour tous les projets affectant des cours d'eau, ce qui inclut l'exploitation des tourbières (Marie-Lou Tremblay, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2007, communication personnelle).

3 Résultats

3.1 Diversité floristique

Afin d'évaluer la diversité floristique des trois zones (naturelle, récolte mécanique par tranchée et restaurée après aspiration) de la tourbière de Pointe-Lebel, une liste exhaustive des espèces avec leur pourcentage de recouvrement moyen est présentée au tableau 2. L'inventaire des espèces retrouvées dans les parcelles des trois zones d'études est présenté pré-intervention (2004) et post-intervention (2006).

En comparant les deux techniques de récolte/restauration post-intervention, présentées au tableau 2, on constate que la zone récolte mécanique par tranchée et la zone restaurée ont un couvert muscinal très différent. En 2006, post-intervention, la zone récolte mécanique par tranchée compte un pourcentage en sphaigne de près de 28%. Ce recouvrement est nettement supérieur à celui de la zone restaurée qui compte moins de 1% de sphaigne au total, mais tout de même inférieur à la zone naturelle qui compte environ 63% de couvert en sphaigne. Le couvert muscinal de la zone restaurée est plutôt dominé par *Polytrichum strictum* avec 33%. Ces deux zones de récolte/restauration ont un point en commun, elles montrent un pourcentage notable de substrat perturbé, respectivement 10% et 13% de leur superficie.

Dans la zone récolte mécanique par tranchée, la plupart des espèces qui étaient présentes avant les essais de récolte mécanique par tranchée s'y trouvent également après les essais de récolte. Les plantes qui étaient fortement représentées pré-intervention comme *Picea marina* et *Sphagnum rubellum* sont retrouvées post-intervention à des pourcentages de recouvrement légèrement inférieurs. Seulement quelques espèces sporadiquement présentes (ex : *Ptilidium ciliare* et *Andromeda glaucophylla*) dont la présence pré-intervention n'excédait pas 2% n'ont pas été recensées post-intervention.

La zone naturelle n'a pas subi de changement majeur entre 2004 (pré-intervention) et 2006 (post-intervention). Les espèces s'y retrouvent dans approximativement les mêmes proportions pour les deux années d'observation. La plus grande variation de pourcentage de recouvrement est décelée pour *Sphagnum fuscum* qui varie de 22 % (2004) à 29 % (2006).

Tableau 2 Liste des espèces et leur pourcentage de recouvrement moyen dans les parcelles à la tourbière de Pointe-Lebel durant les périodes pré-intervention (2004) et post-intervention (2006).

Strates	Espèces	Zones de tourbière				
		Pré-intervention (2004)		Post-intervention (2006)		
		N	E	N	E	R
Arbres	<i>Picea mariana</i>	15	16	17	9	+
	<i>Larix laricina</i>	+	+	+	0	0
	<i>Betula papyrifera</i>	0	0	+	0	2
	<i>Salix sp.</i>	0	0	0	0	+
Éricacées	<i>Chamaedaphne calyculata</i>	7	10	10	5	+
	<i>Kalmia polifolia</i>	+	+	1	+	+
	<i>Kalmia angustifolia</i>	5	19	3	2	+
	<i>Ledum groenlandicum</i>	1	2	+	+	+
	<i>Empetrum nigrum</i>	+	+	+	+	0
	<i>Vaccinium oxycoccos</i>	+	+	+	+	+
	<i>Vaccinium angustifolium</i>	+	+	+	+	+
	<i>Vaccinium macrocarpon</i>	0	0	+	0	0
	<i>Andromeda glaucophylla</i>	+	+	+	0	0
	<i>Chiogenes hispidula</i>	0	+	0	0	0
Herbacées	<i>Rubus chamaemorus</i>	3	2	+	0	+
	<i>Sarracenia purpurea</i>	+	+	+	+	+
	<i>Drosera rotundifolia</i>	+	+	+	+	+
	<i>Drosera intermedia</i>	+	+	+	0	0
	<i>Scirpus cespitosus</i>	+	+	+	0	+
	<i>Eriophorum virginicum</i>	0	0	0	+	0
	<i>Eriophorum vaginatum</i>	+	+	+	+	+
	<i>Carex limosa</i>	+	+	+	0	+
	<i>Geocolon lividum</i>	0	+	0	0	0
	<i>Epilobium angustifolium</i>	0	0	0	0	+

Le signe « + » est utilisé lorsque le recouvrement de l'espèce équivaut à moins de 1%. N = zone naturelle, E = zone expérimentale de récolte mécanique par tranchée, R = zone restaurée après récolte par aspiration. La période post-intervention est deux ans pour la zone R et un an pour la zone E.

Tableau 2 (suite)

Strates	Espèces	Zones de tourbière				
		Pré-intervention (2004)		Post-intervention (2006)		
		N	E	N	E	R
Invasculaires						
Sphaignes	<i>Sphagnum rubellum</i>	37	33	34	11	0
	<i>Sphagnum fuscum</i>	22	17	29	17	0
	<i>Sphagnum magellanicum</i>	+	+	+	+	0
	<i>Sphagnum tenellum</i>	0	+	0	0	0
	<i>Sphagnum sp.</i>	0	0	+	+	+
Mousses Brunes	<i>Dicranum undulatum</i>	+	+	+	0	0
	<i>Dicranum polysetum</i>	+	0	+	0	+
	<i>Dicranum leineuron</i>	0	0	+	+	0
	<i>Dicranum sp.</i>	0	0	0	+	0
	<i>Polytrichum strictum</i>	+	+	+	1	33
	<i>Pleurozium schreberi</i>	+	+	1	2	0
	<i>Pohlia nutans</i>	+	+	+	+	+
	<i>Dicranella cerviculata</i>	0	0	0	0	+
Hépatiques	Hépatiques sp.	0	0	+	+	+
	<i>Mylia anomala</i>	3	3	2	+	+
	<i>Gymnocolea inflata</i>	+	+	0	0	0
	<i>Kurzia setacea</i>	+	+	0	0	0
	<i>Lepidozia reptans</i>	0	+	0	0	0
	<i>Ptilidium ciliare</i>	4	+	3	0	0
Algues	<i>Algue sp.</i>	+	+	+	1	+
Lichens	<i>Lichens sp.</i>	0	0	+	0	+
	<i>Cladina rangiferina</i>	7	1	7	4	0
	<i>Cladina stellaris</i>	0	+	+	+	2
	<i>Cladina mitis</i>	0	2	0	0	0
	<i>Cladonia maxima</i>	0	0	+	0	0
Substrat perturbé		0	2	+	10	13

La figure 7 montre un portrait plus général de la végétation en combinant les pourcentages de recouvrement par strate ainsi que leur état de santé. L'abondance des strates de végétation permet de constater qu'en 2004, pré-intervention, la zone naturelle était très similaire à la zone récolte mécanique par tranchée au niveau de la composition végétale, à l'exception des éricacées.

Les deux techniques de récolte/restauration dévoilent des différences notables au niveau du pourcentage de recouvrement en plantes vasculaires. La zone récolte mécanique par tranchée contient une quantité plus importante d'arbres et d'éricacées que la zone restaurée par la méthode conventionnelle après aspiration.

L'état de santé de la majorité de la végétation est très convenable, puisqu'elle se situe généralement autour d'une cote de 1. Par contre, dans la zone récolte mécanique post-intervention, l'état de santé des arbres et des mousses oscille entre 2 et 3. Cette cote de santé indique qu'entre le quart et la moitié de la population est mal en point.

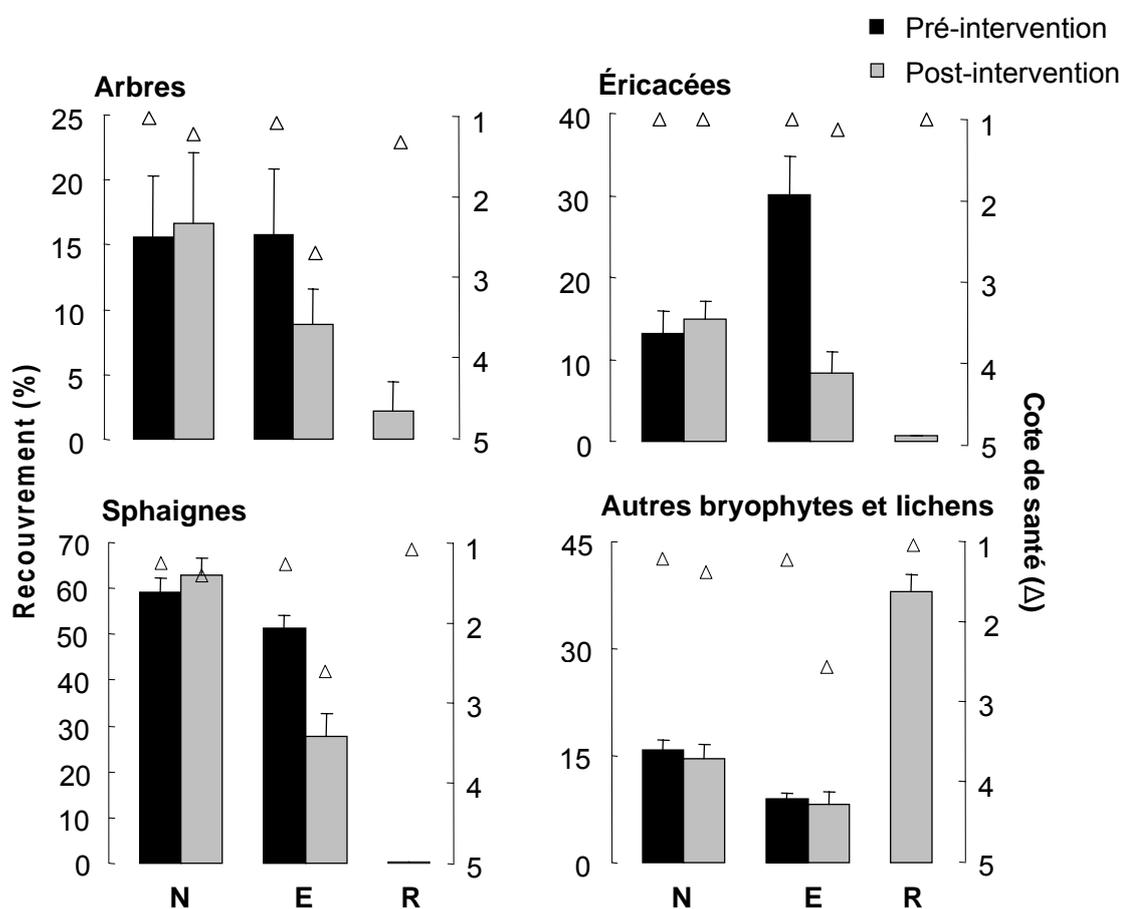


Figure 7 Strates de végétation : moyenne et erreur-type des mesures du pourcentage de recouvrement et la moyenne de leur cote de santé (Δ), pour les zones : naturelle, récolte mécanique par tranchée et restaurée après aspiration

3.2 Productivité

Dans la zone de récolte mécanique par tranchée, le retour de la végétation dans la tranchée humide, suite à la récolte semble avoir un léger effet positif sur le développement des sphaignes. Tel que visible au tableau 3, la croissance des sphaignes est légèrement favorisée dans la zone de récolte mécanique par tranchée, passant de $0,4 \pm 0,1$ cm pré-intervention à $0,5 \pm 0,1$ cm post-intervention. La productivité annuelle, sans correction selon le couvert en mousses, indique que la végétation est plus productive post-intervention (152 ± 29 g m⁻² année⁻¹), que pré-intervention (74 ± 18 g m⁻² année⁻¹).

Par contre la productivité corrigée en fonction du pourcentage de sphaignes montre que les zones récolte mécanique par tranchée pré et post-intervention ainsi que la zone restaurée (correction en fonction du couvert de polytric) ont des valeurs plutôt similaires. En ordre décroissant de productivité corrigée, ces zones se classent comme suit : récolte mécanique post-intervention (44 g m⁻² année⁻¹) > récolte mécanique pré-intervention (33 g m⁻² année⁻¹) > restaurée après aspiration (29 g m⁻² année⁻¹).

Pré-intervention, la productivité des sphaignes était nettement plus élevée dans la zone naturelle que dans la zone expérimentale, où on observe une élongation moins importante et une densité plus faible des individus de sphaigne (tableau 3). En milieu naturel la productivité varie d'une année à l'autre. En 2006 (post-intervention), dans la zone naturelle, la productivité annuelle ainsi que la productivité corrigée pour le pourcentage de couvert en sphaignes sont plus élevées qu'en 2004 (pré-intervention).

Tableau 3 Calcul de productivité du tapis muscinal de la tourbière de Pointe-Lebel : moyenne et erreur-type des mesures.

	2004 (pré-intervention)		2006 (post-intervention)		
	Naturelle	Récolte mécanique	Naturelle	Récolte mécanique	Restaurée*
Densité (# m ⁻²)	40716 ± 1960	34216 ± 3120	58236 ± 5996	43541 ± 2174	29921 ± 4454
Biomasse (g cm ⁻¹)	0,007 ± 0,000	0,007 ± 0,001	0,006 ± 0,001	0,007 ± 0,001	0,002 ± 0,000
Élongation (cm année ⁻¹)	0,6 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,5 ± 0,1	1,1 ± 0,1
Productivité (g m ⁻² année ⁻¹)	148 ± 23	74 ± 18	226 ± 30	152 ± 29	88 ± 24
**Productivité corrigée selon le % de couvert (g m ⁻² année ⁻¹)	88	33	144	44	29

La période post-intervention est deux ans pour la zone R et d'un an pour la zone E.

*Pour la zone restaurée, les mesures d'élongation ont été prises sur *Polytricum strictum*.

**La productivité corrigée est calculée en fonction du pourcentage de recouvrement total en sphaignes pour les zones naturelle et récolte mécanique, puis en pourcentage de recouvrement en polytrics pour la zone restaurée.

3.3 Décomposition

Le tableau 4 montre les taux moyens de décomposition pour la zone de tourbière naturelle et la zone récolte mécanique par tranchée. On constate que ces deux zones ont un taux de décomposition très similaire.

Tableau 4 Taux de décomposition de la sphaigne à la tourbière de Pointe-Lebel : moyenne et erreur-type des mesures pour la saison de croissance 2006.

Zones	Proportion de masse sèche perdue
Naturelle	4,34 ± 0,27 %
Récolte mécanique par tranchée	4,25 ± 0,15 %

3.4 Qualité de l'eau

Les figures 8, 9, 10, 11 et 12 nous dévoilent que pour les cinq zones dans lesquelles les impacts sur la qualité de l'eau sont évalués, pratiquement tous les éléments analysés présentent une certaine variation saisonnière ou interannuelle exception faite peut-être du nickel. De plus, pour l'ensemble de ces éléments (figure 8 à 12), la courbe de concentration de la zone de récolte mécanique par tranchée (courbe rouge) semble suivre assez fidèlement la courbe de la zone de tourbière naturelle (courbe noire).

Pour une grande partie des éléments, les courbes de la zone récoltée par aspiration (violette) et de la zone restaurée après aspiration (verte) démontrent des concentrations supérieures à celles rencontrées dans la zone de récolte mécanique par tranchée (rouge). Cette tendance est évidente pour la dureté (figure 8), tous les cations de bases, incluant le calcium, le sodium, le magnésium et le potassium (figure 9 et 10), ainsi que pour le fer, l'aluminium, le zinc (figure 11) et le carbone organique dissous (COD) (figure 12).

Pour la zone restaurée, celle en aspiration et celle de récolte mécanique par tranchée, le pH (figure 8), surtout en 2004 (pré-intervention), est supérieur à celui de la zone naturelle. Le pH atteint parfois jusqu'à une unité de plus que la partie naturelle.

Lors des dates correspondant aux essais de séchage de la tourbe à la zone de traitement (courbe bleue), on note une augmentation de la concentration en éléments nutritifs, NPK (figure 9) dans l'eau. De plus, certains métaux, comme Al, Fe, Cu et Zn (figure 11) montrent également une augmentation lors des essais de récolte et de séchage qui ont eu lieu en juillet et en août 2005. Ces hausses en éléments nutritifs et en métaux sont tout de même limitées aux périodes suivant les essais de séchage, ensuite les concentrations semblent se stabiliser. Pour le calcium, le magnésium et le pH les essais de séchage ont l'effet inverse. Suite aux essais, on note une baisse de la concentration de ces éléments (Ca, Mg et pH).

En 2004, pour plusieurs éléments de la zone restaurée (courbe verte), on distingue un patron caractérisé par une augmentation prononcée suivie d'une chute des concentrations. Ce patron est facilement notable pour les courbes de la conductivité électrique corrigée (figure 8) ainsi que pour les concentrations du P et K (figure 9), du Mg et Ca (figure 10) et du COD (figure 12).

Également en 2004, on note de fortes augmentations des matières en suspension (figure 8), jusqu'à 170 mg/L pour la partie naturelle et plus de 200 mg/L pour la partie restaurée. En 2005, la zone de traitement, endroit où la tourbe est acheminée suite à la récolte mécanique par tranchée pour être traitée avant l'ensachage, montre une concentration élevée des matières en suspension avec plus de 180 mg/L.

Les bandes ombragées présentes dans certains graphiques représentent les concentrations qui se trouvent en dehors des critères environnementaux fixés par le gouvernement du Québec (MDDEP, 2002). Les éléments possédant un critère de vie aquatique aigu sont le pH et les matières en suspension (figure 8), le nitrate (figure 9), le fer et l'aluminium (figure 11) ainsi que l'oxygène dissous (figure 12). La norme pour le nitrate n'est pas présentée dans le graphique, car elle est de 200 mg/L. L'inclure aurait fait perdre beaucoup de précision au graphique. La norme illustrée pour le phosphore (figure 9) est légèrement différente et évalue les effets chroniques sur la vie aquatique. Il n'existe aucune norme pour l'azote total et la seule norme disponible et interprétable pour l'azote ammoniacal est une norme de prévention de la contamination établie à 1,5 mg/L.

Pour le nitrate et le fer, les cinq zones de la tourbière de Pointe-Lebel (naturelle, récolte mécanique, aspiration, restaurée après aspiration et zone de traitement) demeurent à l'intérieur des critères établis par le gouvernement. À l'inverse, ces cinq zones de tourbière se retrouvent majoritairement à l'extérieur des limites permises pour le pH, le phosphore et l'oxygène dissous. Pour l'azote ammoniacal, le critère de prévention de la contamination est dépassé de peu même par la zone naturelle. Le seul excès notable est dans la zone de traitement de la tourbe suite aux essais de séchage en juillet 2005. Les concentrations d'aluminium excèdent seulement à quelques reprises la norme fixée à 0,75 mg/L dans les

zones récoltée par aspiration, restaurée après aspiration et la zone de traitement de la tourbe. Par contre, dans la zone de traitement de la tourbe l'excès n'est pas alarmant, puisqu'il n'excède jamais 1 mg/L.

Aucun problème n'a été observé avec les huiles et les graisses ainsi qu'avec les métaux lourds, comprenant le cadmium, le plomb et le mercure, puisque leurs teneurs sont demeurés sous les limites de détection pour toutes les zones de la tourbière (données non-présentées).

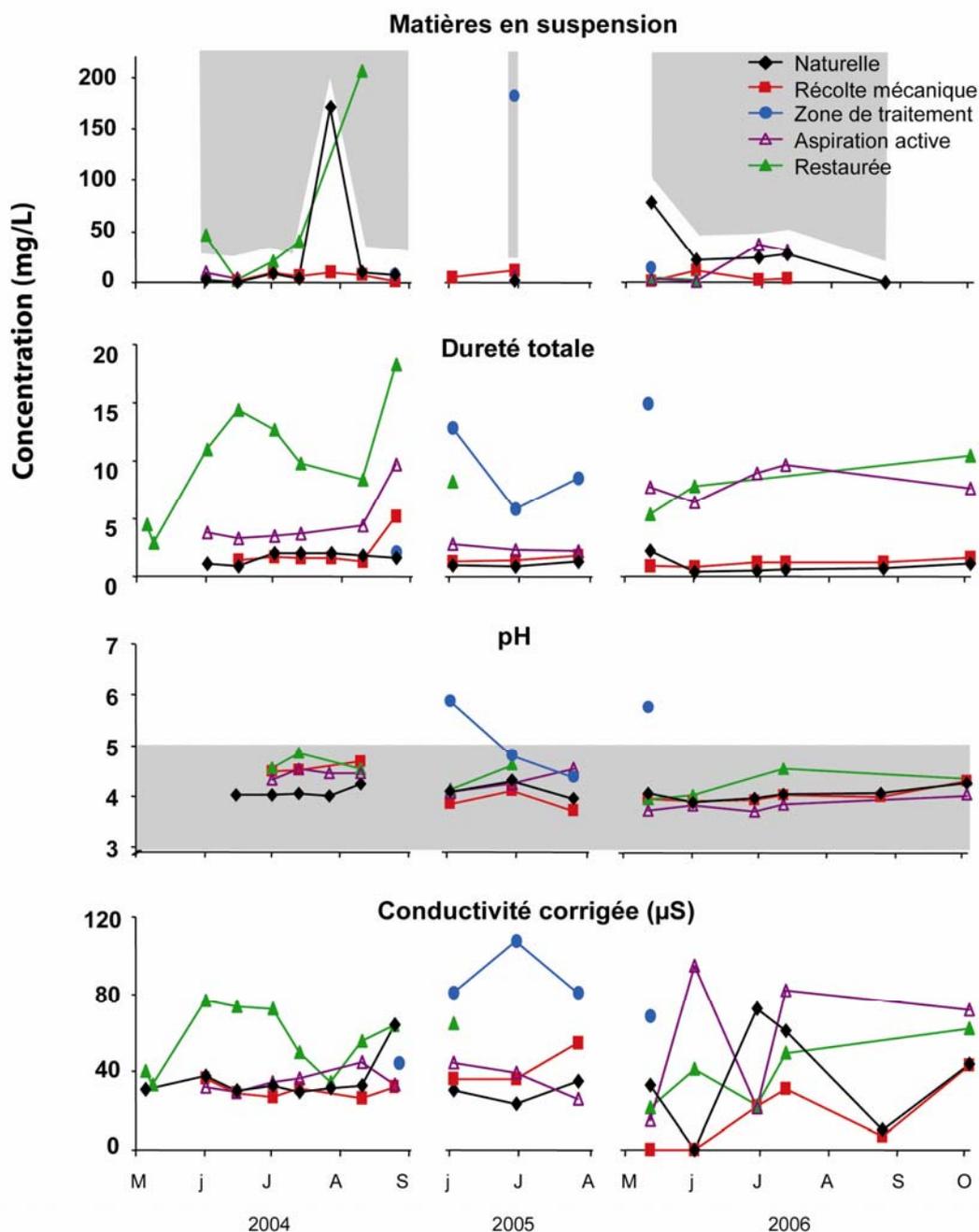


Figure 8 Évolution des paramètres physicochimiques de l'eau. Les mois d'analyse varient d'une année à l'autre sur l'axe horizontal et sont identifiés comme suit : (M) mai, (j) juin, (J) juillet, (A) août, (S) septembre, (O) octobre. Les zones ombragées excèdent les critères gouvernementaux. La norme pour les MES est de 25mg/L de plus que l'écosystème de référence, i.e. zone naturelle. C'est donc pourquoi la zone ombragée suit la zone naturelle.

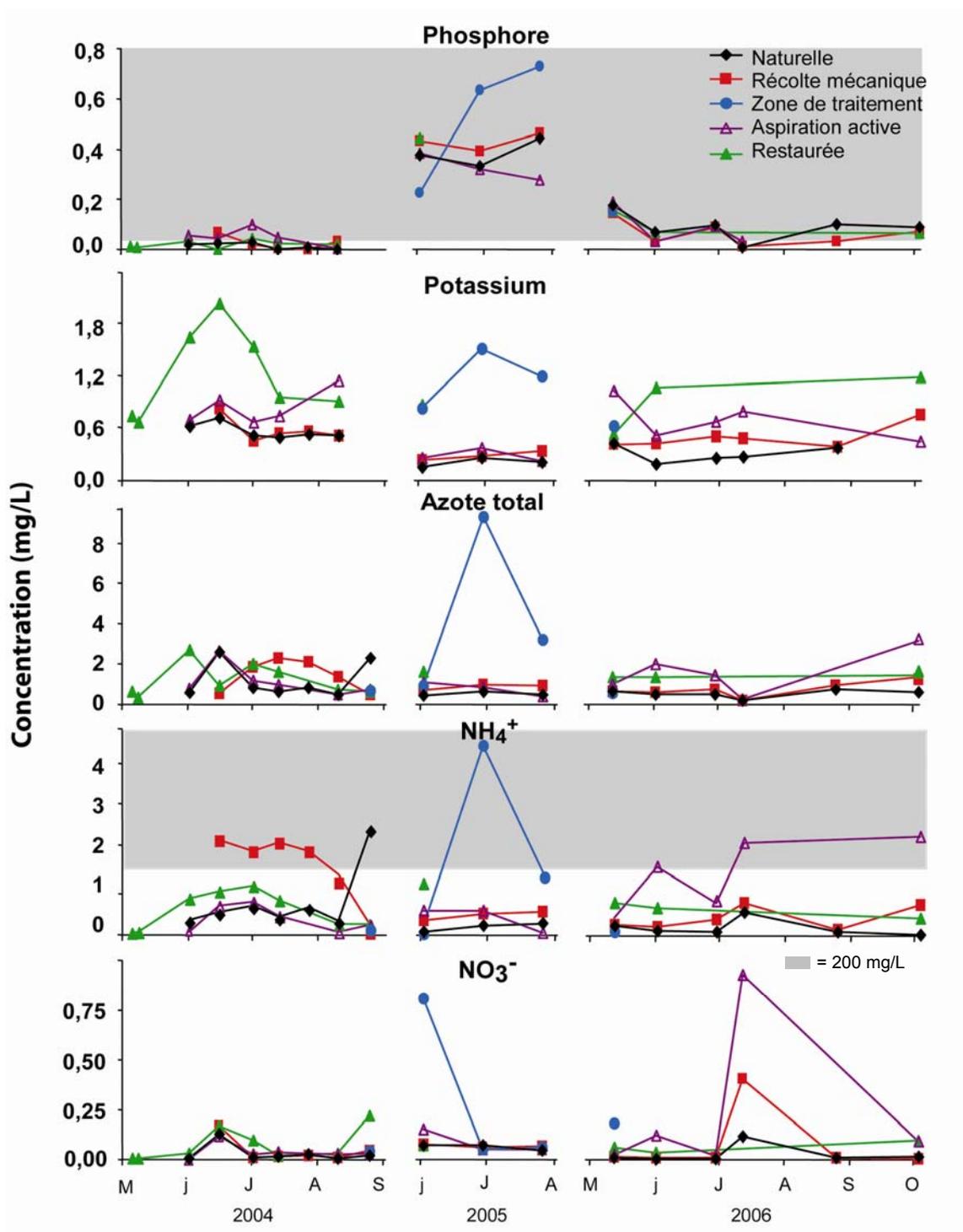


Figure 9 Évolution des éléments nutritifs dans l'eau. Les mois d'analyse varient d'une année à l'autre sur l'axe horizontal et sont identifiés comme suit : (M) mai, (j) juin, (J) juillet, (A) août, (S) septembre, (O) octobre. Les zones ombragées excèdent les critères gouvernementaux.

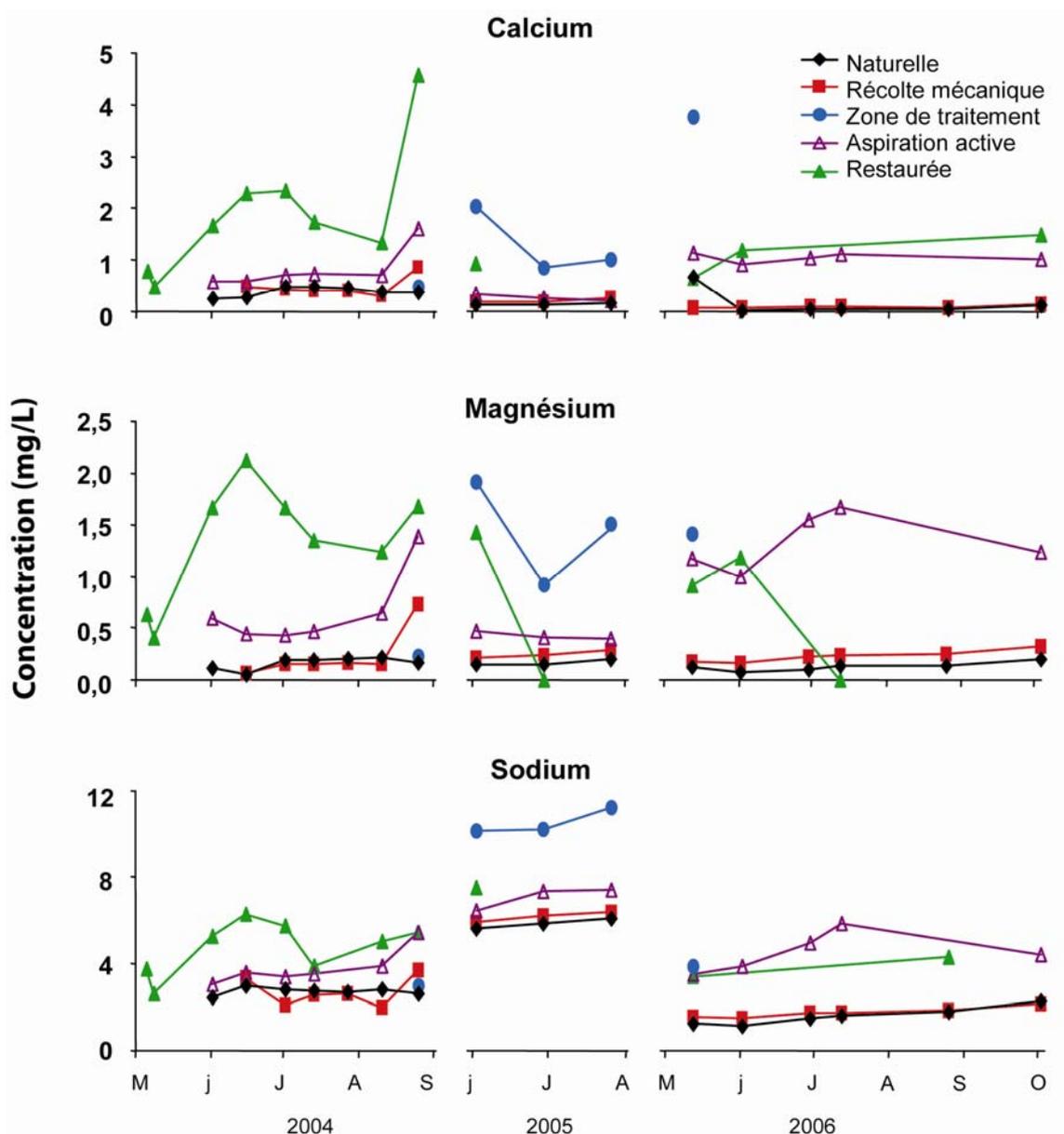


Figure 10 Évolution des cations de base dans l'eau. Les mois d'analyse varient d'une année à l'autre sur l'axe horizontal et sont identifiés comme suit : (M) mai, (j) juin, (J) juillet, (A) août, (S) septembre, (O) octobre.

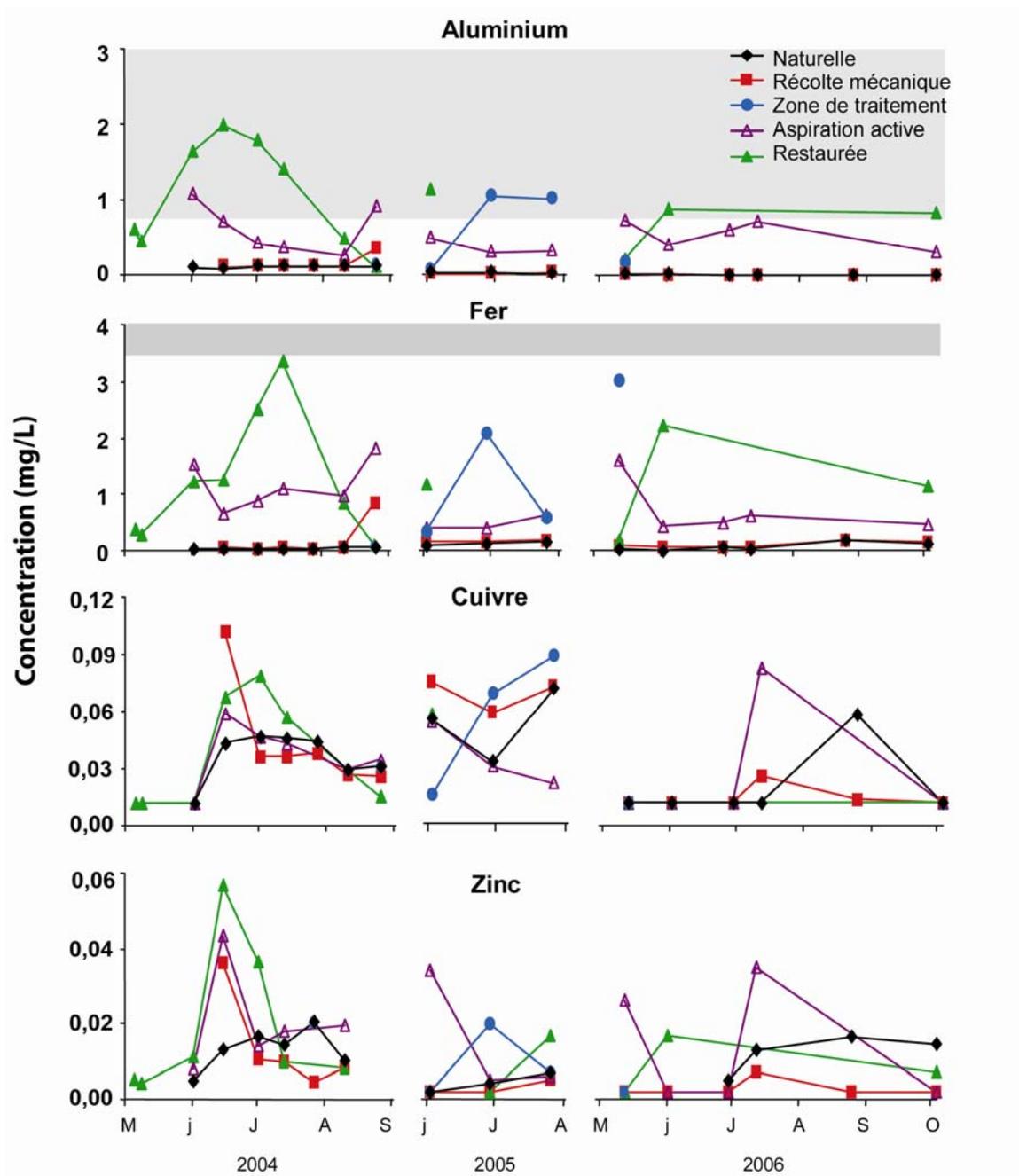


Figure 11 Évolution des métaux dans l'eau. Les mois d'analyse varient d'une année à l'autre sur l'axe horizontal et sont identifiés comme suit: (M) mai, (j) juin, (J) juillet, (A) août, (S) septembre, (O) octobre. Les zones ombragées excèdent les critères gouvernementaux.

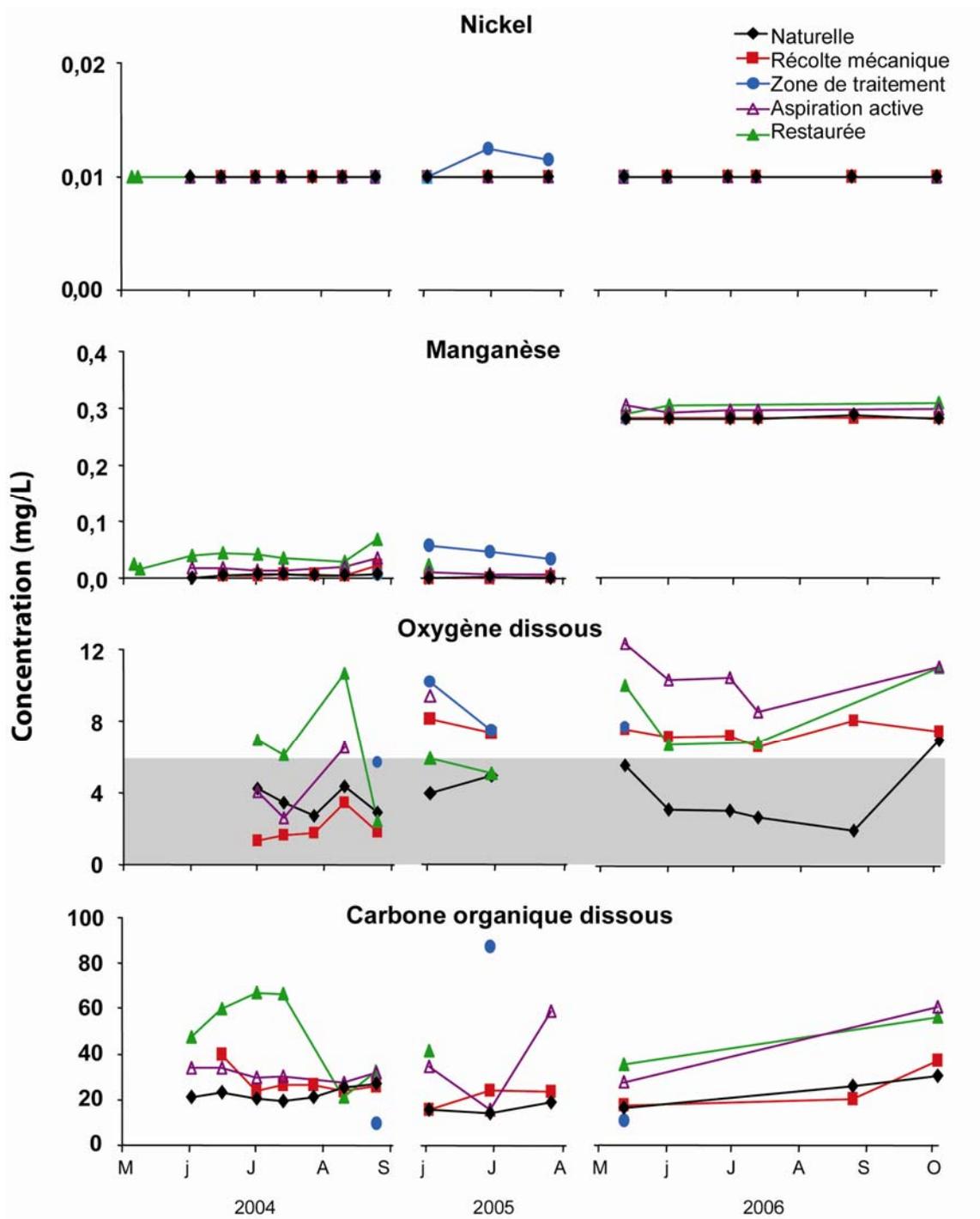


Figure 12 Évolution des autres métaux et non-métaux. Les mois d'analyse varient d'une année à l'autre sur l'axe horizontal et sont identifiés comme suit: (M) mai, (j) juin, (J) juillet, (A) août, (S) septembre, (O) octobre. Les zones ombragées excèdent les critères gouvernementaux.

4 Discussion

4.1 Diversité floristique

Les résultats de diversité floristique et de productivité permettent de constater que l'installation d'un couvert végétal typique d'une tourbière ombrotrophe s'effectuera plus efficacement suite à la récolte mécanique par tranchée qu'après aspiration suivie de la restauration. La sphaigne, espèce clé dans le fonctionnement des tourbières holarctiques (van Breemen, 1995), s'établit plus efficacement suite à la récolte mécanique par tranchée qu'après la récolte par aspiration suivie de la restauration. Bien que la végétation de la zone restaurée ait bénéficié d'un an d'établissement supplémentaire (restauration en 2004), les sphaignes ne sont pas encore significativement présentes, tandis que dans la zone récolte mécanique par tranchée (travaux en 2005) les sphaignes font déjà plus d'un quart du couvert muscinal.

Une tourbière suite à la récolte par aspiration est un environnement très hostile. La tourbe de surface suite à plusieurs années de drainage et de compaction par la machinerie est fortement sujette au craquelage, à la formation de croûte biologique, au soulèvement gélival et à l'érosion par le vent, ce qui limite grandement les chances de survie des diaspores de sphaignes (Salonen, 1987). L'ajout d'un paillis de paille (Price et al., 1998) et l'établissement de plantes compagnes comme la polytric (Groeneveld et Rochefort, 2002; Groeneveld et Rochefort, 2005) permettent de contrer ces effets nuisibles en rendant le substrat plus propice à la croissance des sphaignes. Il faut donc un certain temps d'évolution avant que le substrat soit adéquat à l'émergence des sphaignes dans ce type d'écosystème.

L'état de la zone après la récolte mécanique par tranchée est beaucoup plus propice à l'établissement rapide des sphaignes dès l'instant que la végétation y est déposée. La tranchée n'est pas sujette à l'érosion par le vent, car sa superficie est plus petite et n'est pas au même niveau que le reste du paysage. Il n'y a pas non plus de formation de croûte

biologique qui est une mince couche d'organismes divers composée principalement par des cyanobactéries, des lichens et des mousses (Belnap, 2003). Le sol est également exempt de soulèvement gélival puisque le fond de la tranchée n'est laissé sans végétation que pendant très peu de temps. La tranchée a également l'énorme avantage d'être très humide. L'humidité du substrat est un facteur déterminant dans la survie des diaspores de sphaignes (Campeau et Rochefort, 1996). De plus, la végétation déposée au fond de la tranchée subit moins de stress que la végétation utilisée lors de la restauration conventionnelle puisqu'elle n'a pas été déchiquetée.

Non seulement la sphaigne s'établit avec succès suite à la récolte mécanique, mais les plantes vasculaires également sont bien représentées comparativement à la zone restaurée après aspiration. Dans la zone de récolte mécanique, les plantes vasculaires ont l'avantage d'être transférées entières, plutôt que seulement par des bouts de rhizomes lors de la restauration après aspiration.

La végétation post-intervention de la zone de récolte mécanique est bien représentée. Par contre, on note un état de santé médiocre pour les sphaignes et les arbres. Dans le cas des sphaignes, une partie de cette mauvaise cote peut être attribuée à la façon dont la végétation a été déposée au fond de la tranchée. Une partie des sphaignes se retrouvait dans la tranchée empilée les unes sur les autres ou sous des débris et des sédiments. Pour les arbres, c'est peut-être causé par une trop grande présence d'eau en surface. Dans ces deux cas, les plantes ont eu à peine un an pour s'adapter à leur nouveau milieu. On s'attend à ce que la stabilisation des conditions à court terme favorise le rétablissement du couvert de sphaignes, mais les conditions de plus grande humidité risquent d'entraîner la mort de plusieurs arbres, qui ne profiteront plus de conditions environnementales optimales. Avec le temps, on devrait retrouver une végétation typique des platières entourant les mares où la présence d'épinettes est plutôt rare.

Le transfert des espèces par la technique de récolte mécanique par tranchée est tout de même un succès, puisque la majorité des espèces présentes pré-intervention se sont retrouvées dans la tranchée post-intervention. Seules quelques espèces n'ont pas été

retrouvées. Par contre, il est à noter que la zone pré-intervention a bénéficié d'un plus grand nombre de parcelles que la zone de récolte mécanique post-intervention.

Ce plus grand nombre de parcelles pré-intervention se rapproche plus du nombre de parcelles présentes dans la zone de tourbière naturelle, permettant une comparaison efficace entre ces zones. La composition floristique de ces deux zones est d'ailleurs semblable, tel qu'anticipé. Ces deux zones se devaient d'être initialement comparables, car il est très important d'avoir un écosystème de référence aussi équivalent que possible à la future zone d'impact, i.e. récolte mécanique (SER, 2008). La seule différence notable est la plus forte présence d'éricacées dans la zone de récolte mécanique. Il faut noter que dans cette zone l'excavation du canal de drainage a eu lieu en 2003 et l'inventaire de la végétation à l'automne 2004. Vasander (1982) et Laine et al. (1995) ont démontré que suite à quelques années de drainage, les éricacées étaient positivement influencées. Puisque la zone de récolte mécanique pré-intervention était directement aux abords d'un canal de drainage très profond (~2m), il est possible que l'effet du drainage se soit fait sentir rapidement et que les éricacées aient été favorisées. Il est à supposer que si les données avaient été prises avant l'excavation du canal, les éricacées auraient été au même niveau que dans la zone naturelle.

4.2 Productivité

La flore dans la tranchée post récolte mécanique est non seulement diversifiée, mais elle semble tendre vers un écosystème fonctionnel. Effectivement, la productivité des sphaignes dans la zone de récolte mécanique par tranchée s'est avérée plus élevée suite aux travaux de récolte, qu'avant les travaux de récolte. Le tapis de sphaignes post-intervention est plus productif, par contre, son pourcentage de couvert est moins important que le tapis de sphaignes pré-intervention. Donc, lorsqu'on considère la productivité corrigée en fonction du pourcentage de couvert en sphaigne, les zones de récolte mécanique pré et post-intervention présentent des résultats très similaires. Le canal de drainage est sûrement le principal responsable expliquant la plus faible productivité de cette zone pré-intervention. Les sphaignes sont très peu tolérantes à la dessiccation prolongée (Clymo, 1973) car leur

croissance est assurée par un apport constant en eau. La tranchée humide suite à la récolte mécanique semble être un habitat plus approprié pour le bon développement de la sphaigne. Par contre, il est difficile d'attribuer cette plus grande productivité seulement à l'effet du transfert du tapis de sphaignes dans la tranchée post-intervention puisque dans la zone naturelle, la productivité a également augmenté entre 2004 (pré-intervention) et 2006 (post-intervention). En effet, on observe dans la zone de tourbière naturelle, une augmentation de la productivité des sphaignes de 2004 à 2006. Asada et al. (2003) ainsi que Bakeus (1988) attribuent une forte corrélation entre la variabilité de la productivité de la sphaigne et le régime de précipitation de l'année en cours. Le climat a donc un rôle important dans la productivité annuelle de la sphaigne.

Les différentes composantes permettant de calculer la productivité dans la zone naturelle concordent bien avec les résultats retrouvés dans la littérature. La croissance moyenne pour la zone naturelle est dans l'intervalle obtenue par Luken (1985) et Gunnarson et Rydin (2000) qui ont mesuré une croissance variant de 0,24 à 1,2 cm année⁻¹ pour des sphaignes de la section *Acutifolia*; sphaignes dominant la tourbière de Pointe-Lebel. Gunnarson et Rydin (2000) ont obtenu des résultats de densité comparables, mais légèrement plus élevés que ceux retrouvés à Pointe-Lebel. La productivité annuelle est également analogue à plusieurs autres études mesurant la productivité des sphaignes de la section *Acutifolia* (Clymo, 1970; Rochefort et al., 1990; Moore et al., 2002).

4.3 Décomposition

Une autre composante importante pour évaluer le retour éventuel d'un système accumulateur de tourbe est le taux de décomposition du système. Initialement, il avait été prédit que le taux de décomposition serait plus bas dans la zone de récolte mécanique par tranchée que dans la zone naturelle. Par contre, les résultats indiquent que les deux zones ont un taux de décomposition équivalant. Dans la tranchée de la zone de récolte mécanique, la microtopographie était inégale (observation personnelle). Les zones surélevées formant des genres de buttes plus sèches ont dû contrebalancer les zones inondées de la tranchée qui nous laissent croire que l'habitat est généralement plus humide.

Des résultats de taux de décomposition similaires à ceux retrouvés lors de cette étude (~ 4,35 %), pour les sphaignes de la section *Acutifolia*, ont été obtenus dans quelques autres études. Reader et Steward (1972) sont arrivés à un taux de décomposition moyen de 2 %. Rosswall et al., (1975), eux, ont obtenu un taux de décomposition moyen de 5 %. Par contre, plusieurs autres études sont arrivées à des taux de décomposition plus élevés pour les sphaignes de la section *Acutifolia*, variant plutôt de 10 % à 16 % (Clymo, 1965; Rochefort et al., 1990; Johnson et Damman, 1991). Plusieurs facteurs ont pu influencer sur le faible taux de décomposition de la tourbière de Pointe-Lebel. Premièrement, lors de cette étude, les sacs ont été insérés dans le tapis de sphaignes à 15 cm sous la surface, tandis que dans la plupart des études citées ci-haut les sacs étaient placés entre 0 et 10 cm de profondeur dans un profil de tourbe plus aéré. De plus, Chapman et Thurlow (1998) ont démontré qu'une faible température de la tourbe peut ralentir l'activité microbienne diminuant ainsi la décomposition. La tourbière de Pointe-Lebel est située sur la côte nord du Québec où la normale climatique est de seulement 1,5 °C et où les précipitations sont très abondantes avec plus de 1014,4 mm par année (Environnement Canada, 2006).

4.4 Qualité de l'eau

L'extraction de la tourbe par récolte mécanique par tranchée affecte considérablement moins la qualité de l'eau issue de la tourbière que la récolte par aspiration suivie de la restauration, car les manipulations y sont beaucoup moins extensives. Entre autres, le drainage y est beaucoup moins intensif. Dans la zone de récolte mécanique par tranchée un seul canal est creusé versus un à tous les trente mètres pour la zone récoltée par aspiration. Le drainage intensif d'une tourbière récoltée par aspiration est connu pour perturber la chimie de l'eau (Wind-Mulder et al., 1996). Un site fortement drainé est sujet au lessivage de plusieurs ions, comme l'azote, le sodium, le calcium et le magnésium qui se retrouvent donc en plus grande quantité dans l'eau de surface (Prévost et al., 1999). Ces changements dans la chimie de l'eau expliquent qu'en général la zone récoltée par aspiration et la zone restaurée après aspiration ont une concentration plus élevée en métaux que les sections naturelle et expérimentale.

Le drainage d'une tourbière affecte également les valeurs de pH. En 2004, les travaux de drainage et de préparation du terrain pour la zone de récolte mécanique par tranchée avaient déjà eu lieu et les travaux débutaient pour la restauration dans la zone restaurée après aspiration. Dans ces zones ainsi que dans la zone récoltée par aspiration, trois zones supportant un certain degré de drainage, le pH est légèrement supérieur à celui retrouvé dans la partie de tourbière naturelle. D'après Prévost et al. (1999), le pH peut augmenter d'au moins une unité sur un sol organique drainé, résultats similaires à ceux observés lors de cette étude.

Donc la récolte mécanique en tant que telle, à l'exception peut être du pH, fait peu varier la concentration des éléments. Par contre, les résultats ont révélé que lors des dates correspondantes aux essais de séchage de la tourbe dans la zone de traitement, il y a modification de la concentration de certains éléments. Cette étape provoque l'augmentation des produits azotés, du P, du K, de l'Al, du Fe, du Cu et du Zn ainsi que la diminution du pH, du Ca et du Mg. Il est à noter que le point d'échantillonnage de l'eau pour la zone de traitement de la tourbe se trouve sur un site minéral. Donc, il est normal que la concentration en cations de bases, avant le début des travaux, soit supérieure à celle retrouvée à la surface des sols tourbeux. L'augmentation des produits azotés est attribuée à la lyse des cellules végétales de sphaigne lors du pressage et du séchage de la tourbe, puisque l'azote est le quatrième macroélément en importance dans la sphaigne, après le carbone, l'oxygène et l'hydrogène (Rydin et Jeglum, 2006). Le pH initialement élevé, avant les essais de séchage, diminue suite au début des travaux puisque l'eau en surface du sol minéral ayant un pH autour de la neutralité se mélange graduellement à l'eau extraite de la tourbe qui a, pour cette tourbière, typiquement un pH ~ 4 . La variation du pH d'une solution peut modifier grandement la solubilité des sels. Une diminution de pH peut augmenter la solubilité de certains cations métalliques si ceux-ci sont originalement associés à des bases efficaces comme OH^- , S^{2-} , CO_3^{3-} etc. ou encore des bases modérément fortes comme PO_4^{3-} (Zumdahl, 1988). Ceci peut expliquer l'augmentation de certains métaux en solution et l'augmentation du phosphore qui peuvent avoir été dissociés de leurs ions de départ suite à l'acidification du milieu.

Dans la zone restaurée, l'augmentation de la conductivité électrique corrigée et l'enrichissement en phosphore, potassium, magnésium, calcium et carbone organique dissous, fait suite aux travaux de restauration qui se sont étendus du 17 au 27 avril 2004. Probablement que lors des travaux, les passages répétés de la machinerie et le profilage de la surface de la tourbière ont perturbé la couche de tourbe supérieure ce qui a remis des éléments en solution dans l'eau et changé sa chimie. Par contre, ces hausses subites semblent diminuer progressivement à la fin de l'été 2004 puisque plus aucune intervention n'a eu lieu sur la tourbière, ce qui a permis de diminuer les concentrations en éléments retrouvés dans l'eau. Dans les années successives, la disparition de la paille via le processus de décomposition et l'installation de la végétation dans la zone restaurée ont fort probablement contribué à faire diminuer la concentration de ces éléments.

Les matières en suspension sont très variables spatialement et selon les saisons. Elles peuvent être influencées entre autre par de fortes précipitations (Chow-Fraser, 1999). Dans la zone restaurée, en juillet 2004, la concentration de matières en suspension a augmenté radicalement. Cette hausse subite des matières en suspension pourrait être expliquée par des averses abondantes de plus de 46 mm (Environnement Canada, 2006) reçues à Pointe-Lebel approximativement une semaine avant l'échantillonnage. Dans le cas de l'augmentation des matières en suspension dans la partie naturelle, elle aurait pu être causée soit par une erreur de manipulation ou encore par de forts vents, puisqu'elle ne succède aucune précipitation importante. Chow-Fraser (1999) a démontré que de forts vents influençaient grandement la concentration des matières en suspension dans les milieux humides. Une dernière augmentation des matières en suspension est notée dans la zone de traitement. Cette concentration élevée peut être expliquée par le brassage de l'eau dans la zone de récolte mécanique par tranchée lors des essais de la technique de récolte en 2005. L'eau de ce canal s'écoule vers le bassin de la zone de traitement où l'eau a été collectée.

La cueillette d'échantillons sur trois ans, de 2004 à 2006, nous a permis de suivre efficacement la chimie de l'eau dans les zones d'intérêt. Grâce à ce suivi, des tendances intéressantes ont pu être observées en relation aux différents degrés de perturbation ayant été imposés à la tourbière de Pointe-Lebel. De plus, la zone témoin i.e. la zone naturelle

nous a permis de tenir en compte les nombreux facteurs exogènes qui peuvent survenir d'année en année.

La composition chimique de l'eau retrouvée dans la tourbière de Pointe-Label est similaire à celle retrouvée dans plusieurs autres tourbières ombrotrophes de l'est du Canada (Campeau et al., 2004a; Roche, 2000; Rochefort et al., 1996; Ferland et Rochefort, 1994; Rochefort et al., 1993; Blancher et McNicol, 1987; Foster et King, 1984). Ces tourbières sont principalement caractérisées par un pH inférieur à 4,8, une conductivité électrique corrigée de moins de 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une concentration en calcium inférieure à 2 mg/L.

Afin d'évaluer les impacts de ce projet sur la qualité de l'eau, il était important de se fier à une limite de tolérance des cours d'eau récepteurs. Le gouvernement du Québec détient des critères afin d'assurer la qualité des eaux de surface au Québec (MDDEP, 2002). Ces critères proviennent d'organismes reconnus tels le Conseil canadien des ministres en environnement, le U.S. Environmental Protection Agency et l'Organisation mondiale de la santé. Certains des critères peuvent également avoir été calculés à partir de la méthode retenue par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Le critère de la qualité pour la protection de la vie aquatique, majoritairement utilisé dans cette étude, protège celle-ci contre toute agression provenant des effets directs des substances toxiques ou des effets indirects liés, par exemple, à une baisse en oxygène dissous ou à l'augmentation des matières en suspension. Le critère de vie aquatique aigu (CVAA) est la concentration maximale d'une substance que les organismes aquatiques peuvent tolérer pendant une courte période de temps sans être gravement touchés.

Malheureusement, la banque de CVAA fournissait des concentrations seuils, pour seulement six des vingt-cinq éléments analysés (pH, matières en suspension, nitrate, fer, aluminium, oxygène dissous). Puisque le phosphore et l'azote ammoniacal sont des éléments nutritifs essentiels et qu'aucun CVAA ne leur est fixé, des critères légèrement différents ont tout de même été utilisés. Par contre, pour d'autres éléments importants, comme la conductivité électrique et le magnésium aucune norme n'existe. Pour certains éléments par exemple le cuivre et le zinc, il faut se référer à la dureté du cours d'eau

récepteur, donnée non comprise dans cette étude ou sinon, les critères fournis ne sont disponibles que pour l'eau salée.

Les critères de vie aquatiques aigus sont difficiles d'utilisation, ils ne sont pas adaptés aux conditions retrouvées dans les tourbières. En commençant par le pH qui ne se trouve pas dans l'intervalle permis par ce critère (5,0 -9,5). Ce seuil est aberrant et devrait être adapté aux eaux issues d'une tourbière ombrotrophe naturelle qui possèdent typiquement un pH inférieur à 4,8. La norme fixée pour le phosphore, légèrement différente des CVAA, qui prévient les effets chroniques est établie à 0,03 mg/L. Ce chiffre ne concorde pas non plus avec les concentrations rencontrées dans les tourbières ombrotrophes naturelles canadiennes. La concentration de phosphore retrouvé dans la littérature varie entre 0 et 4,2 mg/L (Campeau et al., 2004a; Roche, 2000; Robert et al., 1999; Rochefort et al., 1996; Ferland et Rochefort, 1994; Rochefort et al., 1993 Wind-Mulder et al., 1996; Vitt et Bayley, 1984). Une variante de ce critère, tenant compte de la concentration normale de phosphore retrouvée dans l'eau des tourbières naturelles, devrait être établie. Pour l'oxygène dissous, la norme est fixée à un minimum de 6 mg/L pour une température moyenne de 15 °C; température retrouvée à la tourbière de Pointe-Lebel lors des échantillonnages. La partie naturelle se trouve elle-même à plusieurs reprises sous cette limite. L'eau échantillonnée dans les puits forés à 1m n'est soumise à aucun brassage et se retrouve dans un milieu pratiquement anaérobique. Donc encore une fois ce critère devrait être réajusté en fonction des eaux pratiquement stagnantes retrouvées dans les tourbières naturelles.

Une approche plus appropriée, afin d'évaluer l'efficacité de la restauration d'un écosystème est de comparer l'écosystème restauré à un ou plusieurs écosystèmes de référence, comme proposé par Society for Ecological Restoration International (2008). L'écosystème de référence, comme dans ce cas-ci, la zone de tourbière naturelle est la base pour l'évaluation de la progression d'un projet de restauration. Dans ce projet, les concentrations en éléments chimiques retrouvées dans la zone de tourbière naturelle sont des objectifs concrets vers lesquelles doivent tendre les sites restaurés.

5 Conclusion générale

En résumé, cette étude d'impacts nous a démontré que la récolte mécanique par tranchée est une technique très prometteuse et avantageuse sur le plan environnemental, tant au niveau des efforts de restauration de la végétation qu'au niveau de la qualité de l'eau issue de la tourbière. La zone de récolte mécanique par tranchée tend à redevenir un système accumulateur de tourbe plus rapidement et plus efficacement que la zone restaurée après aspiration. Parce que, la zone de récolte mécanique est avantagée par le retour plus efficace de la sphaigne, espèce clé dans le développement des tourbières (van Breemen, 1995). De plus, cette zone de récolte mécanique détient un taux de décomposition équivalent à celui retrouvé dans l'écosystème de référence, i.e. tourbière naturelle. La récolte mécanique avantage également une présence de plantes vasculaires plus importante qu'une récolte par aspiration suivie de la restauration, ce qui permet d'augmenter la diversité du site. La technique de récolte mécanique par tranchée génère également des avantages intéressants au niveau de la qualité de l'eau issue de la tourbière vers les cours d'eau récepteurs. En effet, cette nouvelle technique de récolte affecte considérablement moins la qualité de l'eau issue de la tourbière que la récolte par aspiration suivie de la restauration, car les manipulations sont beaucoup moins extensives. Seulement l'étape du traitement de la tourbe affecte la concentration de certains éléments en solution. Par contre, ces impacts ne sont pas alarmants et pourraient être relativement facilement corrigés si la technique devait se poursuivre à plus grande échelle.

En effet, dans l'éventualité de l'utilisation de cette technique à plus grande échelle, des moyens pourraient être pris pour améliorer le rendement de cette technique. Au niveau du retour de la végétation, il a été remarqué lors de cette étude que la microtopographie au fond de la tranchée variait considérablement, laissant des sphaignes dans des micros habitats inondés en permanence et d'autres sur des buttes plus sèches. Rochefort et al. (2002) ont montré que les fragments de sphaignes, dont *Sphagnum fuscum* survivent à l'inondation et produisent même un plus grand nombre d'innovations lors d'une inondation à court ou moyen terme. Or, l'inondation à trop long terme de sphaignes développées pourrait altérer la structure des sphaignes les rendant plus susceptibles aux périodes de

sécheresse. Clymo (1973) a démontré que les sphaignes sont très peu tolérantes à la dessiccation, situation prévalente dans les endroits surélevés de la tranchée. Il serait donc préférable de niveler le fond de la tranchée avant le transfert des blocs de végétation afin que des conditions optimales de croissance soient favorisées.

Une seconde amélioration possible pour de futurs travaux serait de changer l'orientation des tranchées. Présentement, les tranchées sont creusées de façon parallèle au canal ce qui entraîne un glissement de tourbe dans la tranchée sur une partie des sphaignes, compromettant leur croissance. Il serait intéressant de tester la même technique, mais avec des tranchées creusées de façon perpendiculaire au canal. La restauration pourrait d'autant plus être optimisée en gardant des bandes de terrain entre les tranchées parallèles permettant le passage de la machinerie. De cette façon, la machinerie n'aurait pas à passer répétitivement sur la végétation utilisée pour la restauration, mais pourrait plutôt passer sur ces bandes de terrain, laissant la végétation qui se retrouverait dans les tranchées intactes et plus propices à la régénération. Également, il serait préférable de récolter la tourbe dans un court laps de temps suite à l'excavation du canal de drainage pour minimiser l'augmentation des éricacées au détriment des sphaignes, ce phénomène diminue l'efficacité de la restauration de la zone après coup.

Certaines modifications pourraient également être apportées afin d'améliorer la qualité de l'eau sortante de la tourbière vers les cours d'eau récepteurs. Puisque la qualité de l'eau est une préoccupation grandissante, des techniques de traitement de l'eau de drainage sont en constant développement. Dans le cas d'une application de la méthode de séchage à plus grande échelle, on pourrait envisager quelques façons d'améliorer la qualité de l'eau issue du traitement de la tourbe. La construction de plaines inondables avec écoulement diffus en surface des eaux issues du traitement ou encore l'amélioration du bassin de sédimentation pourrait réduire considérablement la concentration en azote et en phosphore. Ces installations permettent également de diminuer la quantité de solides en suspension, véhicules de plusieurs contaminants des eaux d'écoulement issues des tourbières en exploitation (Klove 2000).

Blanco-Canqui et al. (2004) et Daniels et Gilliam (1996) proposent un autre moyen efficace afin de diminuer de façon notable le phosphore et l'azote issus de l'agriculture. Il s'agit de l'établissement de barrières de hautes herbes, qui constituent des bandes d'environ 1 m d'une grande herbacée, résistante et vivace, par exemple *Panicum virgatum* L., nom commun « Switch-grass ». Cette technique est très abordable, durable et extrêmement simple d'entretien. Elle pourrait être adaptée et utilisée en bordure du site de traitement afin de diminuer les concentrations d'azote et de phosphore qui s'y échappe.

L'industrie de la tourbe a une grande importance économique pour plusieurs pays. Certains pays, comme le Canada, axent la récolte pour l'utilisation de la tourbe horticole tandis que d'autres pays comme la Finlande et l'Irlande l'utilisent plutôt comme source d'énergie (CSPMA, 2007). Bien entendu, la récolte mécanique par tranchée n'est pas la seule tentative pour contrer les impacts négatifs de la récolte par aspiration. Plusieurs compagnies, entre autres en Finlande, sont en plein développement de nouvelles techniques et de nouvelles machineries permettant une récolte moins destructrice du milieu (Vapo, 2006). De nombreuses études évaluent les impacts de ces diverses techniques de récolte. Entre autres, plusieurs chercheurs (p. ex : Klove et Bengtsson, 1999 ; Klove, 2001) s'intéressent à comprendre les facteurs influant la chimie de l'eau issue des tourbières en exploitation afin d'optimiser les techniques de récolte pour l'environnement en améliorant la qualité de l'eau pour les cours d'eau récepteurs.

Dans l'ensemble de ces efforts, la récolte mécanique par tranchée mérite une attention particulière. En plus d'être avantageuse au niveau environnemental, elle a le potentiel de régler une partie du problème de la dépendance aux conditions climatiques rencontré par la récolte par aspiration. Lors des saisons très pluvieuses de récolte, cette technique pourrait être une alternative à l'aspiration qui permettrait d'assurer un volume de tourbe aux compagnies qui se retrouvent habituellement à la merci des caprices du climat. De plus, cette technique assure un effort simultané de restauration vers le retour d'un écosystème tourbeux.

La restauration des tourbières suite à la récolte est une pratique à prioriser, surtout dans les régions subissant une forte pression d'exploitation (Rocheport, 2001). La récolte de la tourbe est un moteur important de notre économie au Canada (Daigle et Gautreau-Daigle, 2001). La tourbe de sphaigne présente plusieurs critères de qualité, entre autres, la stabilité de sa structure et une grande capacité de rétention en eau. Ces multiples avantages font de la tourbe un substrat de croissance de choix difficilement remplaçable (CSPMA, 2007). Cette ressource a également un potentiel prometteur dans le domaine de l'énergie qui est encore peu exploré ici au Canada (p. ex : Peat Ressources Limited, 2005). Donc, la récolte de la tourbe est une activité qui n'est pas prête de s'éteindre. C'est pourquoi il est important de restaurer les fonctions de ces précieux écosystèmes afin de s'assurer que les générations futures puissent, elles aussi, apprécier ces habitats uniques. Les tourbières contribuent activement à l'équilibre précaire de notre planète (Lappalaiden, 1996).

Bibliographie

- Andersen, R., Rochefort, L. et Poulin, M. (En préparation). Peat, water and plant tissues chemistry in a restored ombrotrophic peatland: what can we learn from seven years of monitoring?
- Asada, T., Warner, B.G. et Barner, A. 2003. Growth of mosses in relation to climate factors in a hypermaritime coastal peatland in British Columbia, Canada. *The Bryologist* 106: 516-527.
- Bakeus, I. 1988. Weather variables as predictors of Sphagnum growth on a bog. *Holarctic Ecology* 11: 146-150.
- Belnap, J. 2003. The world at your feet: desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1: 181-189.
- Belyea, L.R. 1996. Separating the effects of litter quality and microenvironment on decomposition rates in a patterned peatland. *Oikos* 77: 529-539.
- Bernstein, B.B. et Zalinski, J. 1983. An optimum sampling design and power tests for environmental biologists. *Journal of Environmental Management* 16: 35-44.
- Blancher, P.J. et McNicol, D.K. 1987. Peatland water chemistry in central Ontario in relation to acid deposition. *Water, Air, and Soil Pollution* 35: 217-232.
- Blanco-Canqui, H., Gantzer, C.J., Anderson, S.H., Alberts, E.E. et Thompson, A.L. 2004. Grass barrier and vegetative filter strip effectiveness in reducing runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus loss. *Soil Science Society of America* 68: 1670-1678.
- Boatman, D.J., Hulme, P.D. et Tomlinson, R.W. 1975. Monthly determinations of the concentrations of sodium, potassium, magnesium and calcium in the rain and in pools on the Silver Flow National Nature Reserve. *Journal of Ecology* 63: 903-912.
- Børsheim, K.Y., Christensen, B.E. et Painter, T.J. 2001. Preservation of fish embedment in Sphagnum moss, peat or holocellulose: experimental proof of the oxopolysaccharidic nature of the preservative substance and of its antimicrobial and tanning action. *Innovative Food Science Emerging Technology* 2: 63-74.
- Brodo, I.M., Sharnoff, S.D. et Sharnoff, S. 2001. *Lichens of North America*. Yale University Press. 795 p.
- Cagampan, J.P. et Waddington, J.M. 2008. Net ecosystem CO₂ exchange of a cutover peatland rehabilitated with a transplanted acrotelm. *Écoscience* 15 : 258-267.

- Calmé, S., Desrochers, A. et Savard, J-P.L. 2002. Regional significance of peatlands for avifaunal diversity in southern Québec. *Biological Conservation* 107: 273-281.
- Campbell, D.R., Lavoie, C. et Rochefort, L. 2002. Wind erosion and surface stability in abandoned milled peatlands. *Canadian Journal of Soil Science* 82: 85-95.
- Campeau, S. et Rochefort, L. 1996. Sphagnum regeneration on bare peat surface: field and greenhouse experiment. *Journal of Applied Ecology* 33: 599-608.
- Campeau, S., Miousse, L. et Quinty, F. 2004a. Caractérisation du site expérimental de Shippagan et techniques suggérées dans un but de recherche sur la production de fibre de sphaigne. Rapport technique présenté au Groupe de recherche en écologie des tourbières, Québec. 61 p.
- Campeau, S., Rochefort, L. et Price, J.S. 2004b. On the use of shallow basins to restore cutover peatlands: Plant establishment. *Restoration Ecology* 12: 471-482.
- Canadian Sphagnum Peat Moss Association (CSPMA). 2007. Site internet de Canadian Sphagnum Peat Moss Association: <http://www.peatmoss.com>, consulté le 10 décembre 2007.
- Chapman, S.J. et Thurlow, M. 1998. Peat respiration at low temperatures. *Soil Biology & Biochemistry* 30: 1013-1021.
- Chow-Fraser, P. 1999. Seasonal, interannual, and spatial variability in the concentrations of total suspended solids in a degraded coastal wetland of Lake Ontario. *Journal of Great Lakes Research* 25: 799-813.
- Clymo, R.S. 1963. Ion exchange in Sphagnum and its relation to bog ecology. *Annales Botanici Fennici* 27: 309-324.
- Clymo, R.S. 1965. Experiments on breakdown of Sphagnum in two bogs. *Journal of Ecology* 53: 747-758.
- Clymo, R.S. 1970. The growth of Sphagnum: Methods of measurement. *Journal of Ecology* 58: 13-44.
- Clymo, R.S. 1973. The growth of Sphagnum: Some effects of environment. *Journal of Ecology* 61: 849-869.
- Clymo, R.S. 1992. Models of peat growth. *Suo* 43: 127-36.
- Clymo, R.S. et Hayward, P.M. 1982. The ecology of sphagnum. Dans: Smith, A.J.E. *Bryophyte ecology*. Chapman and Hall Ltd., London, pp. 229-289

- Conard, H.S. et Redfearn, P.L. 1979. How to know the mosses and liverworts, deuxième édition. Wm. C. Brown Company Publishers, Dubuque, Iowa. 302 p.
- Crum, S.H. et Anderson, L.E. 1981. Mosses of eastern North America. Volume I and II. Columbia University Press, New York. 1328 p.
- Daigle, J.-Y., et Gautreau-Daigle, H. 2001. Canadian peat harvesting and the environment. Canadian Sphagnum Peat Moss Association, Environment Canada et North American Wetlands Conservation Council Committee. Issues Paper No. 2001-1, 41p.
- Daniels, R.B. et Gilliam, J.W. 1996. Sediment and chemical load reduction by grass and riparian filters. *Soil Science Society of America Journal* 60: 246-251.
- Day, R.H., Murphy, S.M., Wiens, J.A., Hayward, G.D., Harner, E.J. et Lawhead, B.E. 1997. Effects of the Exxon Valdez oil spill on habitat use by birds along the Kenai Peninsula, Alaska. *The Condor* 99: 728-742.
- Egan, T. 1998. The future use of cutaway bogs. Cutaway bogs conference 1998. Brosna Press Ltd., Ferbane, Co. Offaraly, Irlande. 80 p.
- Elzinga, C.L., Salzer, D.W., Willoughby, J.W. et Gibbs, J.P. 2001. Monitoring plant and animal populations. Blackwell Science Inc, Malden, MA. 360 p.
- Environnement Canada. 2006. Site Internet de Normales climatiques au Canada 1971-2000. http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/index_f.html, consulté le 12 octobre 2006.
- Ferland, C. et Rochefort, L. 1994. Restauration d'une tourbière ombrotrophe côtière du Nouveau-Brunswick. Rapport présenté à Division des Ressources minières, Ministère des Ressources naturelles, Nouveau-Brunswick. 24 p.
- Foster, D.R. et King, G.A. 1984. Landscape features, vegetation and developmental history of a patterned fen in south-eastern Labrador, Canada. *Journal of Ecology* 72: 115-143.
- Girard, M., Lavoie, C. et Thériault, M. 2002. The regeneration of a highly disturbed ecosystem: A mined peatland in southern Québec. *Ecosystems* 5: 274-288.
- Glatzel, S., Basiliko, N. et Moore, T.M. 2004. Carbon dioxide and methane production potentials of peats from natural, harvested and restored sites, eastern Québec, Canada. *Wetlands* 24: 261-267.
- Gorham, E. 1949. Some chemical aspects of peat profile. Dans : Wheeler, B.D. et Shaw, S.C. Restoration of damaged peatlands. HMSO, Londres. P. 44.

- Gorham, E. et Rochefort, L. 2003. Peatland restoration: A brief assessment with special reference to Sphagnum bogs. *Wetlands Ecology and Management* 11: 109-119.
- Green, R.H. 1979. *Sampling design and statistical methods for environmental biologists*. John Wiley & Sons, New York. 257 p.
- Groeneveld, E.V.G. et Rochefort, L. 2002. Nursing plants in peatland restoration: On their potential use to alleviate frost heaving problems. *Suo* 53: 73-85.
- Groeneveld, E.V.G. et Rochefort, L. 2005. *Polytrichum strictum* as a solution to frost heaving in disturbed ecosystems: A case study with milled peatlands. *Restoration Ecology* 13: 74-82.
- Groupe de recherche en écologie des tourbières. 2007. *Production de petits fruits en tourbières*. Université Laval, Québec. 134 p.
- Gunnarsson, U. 2005. Global patterns of Sphagnum productivity. *Journal of Bryology* 27: 269-279.
- Gunnarsson, U. et Rydin, H. 2000. Nitrogen fertilization reduces Sphagnum production in bog communities. *New Phytologist* 147: 527-537.
- Hobbs, N. 1986. Mire morphology and the properties and behaviour of some British and foreign peats. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology* 19: 7-80.
- Hurlbert, S.H. 1984. Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecological Monographs* 54: 187-211.
- Johnson, L.C. et Damman, A.W.H. 1991. Species-controlled Sphagnum decay on a south Swedish raised bog. *Oikos* 61: 234-242.
- Johnson, L.C. et Damman, A.W.H. 1993. Decay and its regulation in Sphagnum peatlands. *Advances in Bryology* 5: 249-96.
- Joosten, H. et Clarke, D. 2002. *Wise use of mires and peatlands. Background and principles including a framework for decision-making*. International Mire Conservation Group and International Peat Society, Finlande. 304 p.
- Jordan III, R.W., Gilpin, M.E. et Aber, J.D. 1987. *Restoration ecology – A synthetic approach to ecological research*. Cambridge University Press. 343 p.
- Klove, B. 2000. Retention of suspended solids and sediment bound nutrients from peat harvesting sites with peak runoff control, constructed floodplains and sedimentation ponds. *Boreal Environment Research* 5: 81-94.

- Klove, B. 2001. Characteristics of nitrogen and phosphorus loads in peat mining wastewater. *Water Research* 35: 2353-2362.
- Klove, B. et Bengtsson, L. 1999. Runoff generation in a plough-drained cutover fen in central Finland. *Journal of Hydrology* 218: 157-168.
- Laine, J., Vasander, H. et 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.
- Lappalainen, E. 1996. Global peat resources. International Peat Society, Finlande. 359 p.
- LaRose, S., Price, J. et Rochefort, L. 1997. Rewetting of a cutover peatland: hydrologic assesment. *Wetlands* 17: 416-423.
- Lavoie, C., Saint-Louis, A. et Lachance, D. 2005. Vegetation dynamics on an abandoned vacuum-mined peatland: 5 years of monitoring. *Wetlands Ecology and Management* 13: 621-633.
- Lindholm, T. 1990. Growth dynamics of the peat moss *Sphagnum fuscum* on hummocks on a raised bog in southern Finland. *Annales Botanici Fennici* 27: 67-78.
- Luken, J.O. 1985. Zonation of *Sphagnum* mosses: Interactions among shoot growth, growth form and water balance. *The Bryologist* 88: 374-379.
- Marie-Victorin, Fr. 1997. Flore laurentienne, troisième édition mise à jour et annotée, 1995. Les Presses de l'Université de Montréal, Montréal. 1093 p.
- McDonald, T.L., Erickson, W.P. et McDonald, L.L. 2000. Analysis of count data from Before-after Control-Impact Studies. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 5: 262-279.
- Meade, R.M. 1992. Some early changes following the rewetting of a vegetated cutover peatland surface at Danes Moss, Cheshire, UK, and their relevance to conservation management. Dans : Wheeler, B.D. et Shaw, S.C. Restoration of damaged peatlands. HMSO, Londres. P. 44.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). 2002. Site internet du Ministère Développement durable, de l'Environnement et des Parcs : www.mddep.gouv.qc.ca, consulté le 02 novembre 2007.
- Money, R. 2004. End-point options for wetland restoration - habitat creation from former commercial peat workings. Dans : Blankenburg, J. et Tonnis, W. Guidelines for wetland restoration of peat cutting areas. Results of the BRIGE-PROJECT. Allemagne, Brême. pp. 31-39.

- Moore, T., Bubier, J.L., Frohking, S.E., Lafleur, P.M. et Roulet, N.T. 2002. Plant biomass and production and CO₂ exchange in an ombrotrophic bog. *Journal of Ecology* 90: 25-36.
- Murtaugh, P.A. 2000. Paired intervention analysis in ecology. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics* 5: 280-292.
- Murtaugh, P.A. 2002. On rejection rates of paired intervention analysis. *Ecology* 83: 1752-1761.
- Murtaugh, P.A. 2007. Simplicity and complexity in ecological data analysis. *Ecology* 88: 56-62.
- Painter, T.J. 1998. Carbohydrate polymers in food preservation: an integrated view of the Maillard reaction with special reference to discoveries of preserved foods in Sphagnum-dominated peat bogs. *Carbohydrate Polymer* 36: 335-347.
- Peat Ressources Limited. 2005. Site internet de Peat Ressources Limited : www.peatresources.com, consulté le 14 octobre 2006.
- Poulin, M., Rochefort, L., Quinty, F. et Lavoie, C. 2005. Spontaneous revegetation of mined peatlands in eastern Canada. *Canadian Journal of Botany* 83: 539-557.
- Prévost, M., Plamondon, A.P. et Belleau, P. 1999. Effects of drainage of a forested peatland on water quality and quantity. *Journal of Hydrology* 214: 130-143.
- Price, J., Rochefort, L. et Quinty, F. 1998. Energy and moisture considerations on cutover peatlands : Surface microtopography, mulch cover and Sphagnum regeneration. *Ecological Engineering* 10: 293-312.
- Price, J.S., Heathwaite, A.L. et Baird, A.J. 2003. Hydrological processes in abandoned and restored peatlands: An overview of management approaches. *Wetlands Ecology and Management*. 11: 65-83.
- Proctor, M.C.F. 2006. Temporal variation in the surface-water chemistry of a blanket bog on Dartmoor, southwest England: Analysis of 5 year's data. *European Journal of Soil Science* 57: 167-178.
- Qualls, R.G. 1989. Determination of total nitrogen and phosphorus in water using persulfate oxidation: A modification for small sample volumes using the method of Koroleff (1983). Dans : Qualls, R.G. The biogeochemical properties of dissolved organic matter in a hardwood forest ecosystem: Their influence on the retention of nitrogen, phosphorus, and carbon. Thèse de Ph.D., University of Georgia Institute of Ecology, Athens, Georgia, USA. Appendix A: 131-138.

- Quinty, F. et Rochefort, L. 2003. Guide de restauration des tourbières, deuxième édition. Association canadienne de mousse de sphaigne et Ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick. Québec, Québec. 119 p.
- Reader, R.J. et Stewart, J.M. 1972. The relationship between net primary production and accumulation for a peatland in southeastern Manitoba. *Ecology* 53: 1024-1037.
- Robert, E.C., Rochefort, L. et Garneau, M. 1999. Natural revegetation of two block-cut mined peatlands in eastern Canada. *Canadian Journal of Botany* 77: 447-459.
- Roche ltée. 2000. Qualité de l'eau dans la tourbière et les cours d'eau récepteurs. Rapport final. Tourbière Pointe-Lebel. Rapport présenté à Premier Horticulture ltée, Québec. 12 p.
- Rochefort, L. 2001. Restauration écologique. Dans : Payette, S. et Rochefort, L. *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Les presses de l'Université Laval, Québec. pp. 449-504.
- Rochefort, L. et Bastien, D. 1998. Réintroduction de sphaignes dans une tourbière exploitée et abandonnée: Évaluation de divers moyens de protection contre la dessiccation. *Écoscience* 5: 117-127.
- Rochefort, L. et Lode, E. 2006. Restoration of degraded boreal peatlands. *Ecological Studies* 188: 381-423.
- Rochefort, L., Vitt, D.H. et Bayley, S.E. 1990. Growth, production, and decomposition dynamics of Sphagnum under natural and experimentally acidified conditions. *Ecology* 71: 1986-2000.
- Rochefort, L., Halsey, L. et Vitt, D.H. 1993. Restoration of the Maisonnette peatland, New-Brunswick: 1992. Baseline data. Rapport technique présenté à Mineral Resources Division. Ministry of Natural Resources and Energy. Bathurst, Nouveau-Brunswick. 35 p.
- Rochefort, L., Campeau, S. et Bugnon, J.-L. 2002. Does prolonged flooding prevent or enhance regeneration and growth of Sphagnum? *Aquatic Botany* 74: 327-341.
- Rochefort, L., Ferland, C., Campeau, S. et Vitt, D.H. 1996. Experimental work on peatland restoration at Maisonnette and Lamèque, New-Brunswick (1992-1994). Rapport présenté à New-Brunswick Department of Natural Resources and Energy, Minerals and Energy Division 95-3, Nouveau-Brunswick. 44 p.
- Rosswall, T., Veum, A. et Karenlampi, L. 1975. Plant litter decomposition at Fennoscandian tundra sites. Dans : Wiegolaski, F.E. *Fennoscandian tundra ecosystems. Part 1. Plants and microorganisms*. Springer, Berlin. pp. 268-277.

- Russell, S. 1988. Measurement of bryophyte growth 1. Biomass (harvest) technique. Dans : Glime, J.M. *Methods in bryology*. Hattori Botanical Laboratory, Nichinan. pp. 249-257.
- Rydin, H. et Jeglum, J. 2006. *The biology of peatlands*. Oxford University press. 343 p.
- Rydin, H., Gunnarsson, U. et Sundberg, S. 2006. The role of sphagnum in peatland development and persistence. Dans: Wieder, R.K. et Vitt, D.H. *Boreal Peatland Ecosystems*. Ecological Studies 188. Springer Berlin, Heidelberg. pp. 47-65.
- Salonen, V. 1987. Relationship between the seed rain and the establishment of vegetation in two areas abandoned after peat harvesting. *Holarctic Ecology* 10: 171-174.
- Shotyk, W., Nesbitt, H.W. et Fyfe, W.S. 1992. Natural and anthropogenic enrichments of trace metals in peat profiles. *International Journal of Coal Geology* 20: 49-84.
- Sjörs, H. 1952. On the relation between vegetation and electrolytes in north Swedish mire waters. *Oikos* 2: 242-258.
- Skalski, J.R. et Robson, D.S. 1992. *Techniques for wildlife investigations. Design and analysis of capture data*. Academic Press Inc., New York. 237 p.
- Sliva, J. 1998. Regeneration of milled peat bog: A large scale approach in Kollerfilze (Bavaria, southern Germany). Dans : Malterer, T., Johnson, K. et Stewart, J. *Peatland restoration and reclamation: Proceedings of the 1998 International Peat Symposium, Duluth, 14-18 July*. International Peat Society, Duluth. pp. 82-87.
- Smith, E.P. 2002. BACI design. Dans : El-Shaarawi, A.L. et Piegorisch, W.W. *Encyclopedia of Environmetrics*. John Wiley & Sons, Chichester. Vol. 1: 141-148.
- Society for Ecological Restoration International (SER). 2008. Site Internet de Society for Ecological Restoration International : <http://www.ser.org/> consulté le 14 janvier 2008.
- St-Arnaud, C. 2007. Dynamique de la végétation d'un fen pauvre face à une simulation de réchauffement climatique par l'abaissement du niveau de la nappe phréatique : Réponses potentielles des tourbières boréales à sphaignes. Mémoire de M.Sc., Département de phytologie, Université Laval, Québec. 105 p.
- Stewart-Oaten, A., Murdoch, W.W. et Parker, K.R. 1986. Environmental impact assessment: "Pseudoreplication" in time? *Ecology* 67: 929-940.
- Stoneman, R. 1997. Functioning peatlands. Dans: Parkyn, L., Stoneman, R.E. et Ingram, H.A.P. *Conserving Peatlands*. Cab International, Wallingford, Royaume-Uni. pp. 119-120

- Underwood, A.J. 1989. The analysis of stress in natural populations. *Biological Journal of the Linnean Society* 37: 51-75.
- Underwood, A.J. 1991. Beyond BACI-experimental-designs for detecting human environmental impacts on temporal variations in natural-populations. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 42: 569-587.
- Underwood, A.J. 1992. Beyond BACI: The detection of environmental impacts on populations in the real, but variable, world. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 161: 145-178.
- Underwood, A.J. 1994. On beyond BACI: Sampling designs that might reliably detect environmental disturbances. *Ecological Applications* 4: 3-15.
- Underwood, A.J. et Chapman, M.G. 2003. Power, precaution, type II error and sampling design in assessment of environmental impacts. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 296: 49-70.
- Underwood, J.K., Waller, D.H. et Thirumurthi, D. 1988. The influence of the ocean on the chemistry of precipitation in Nova Scotia. *Atmosphere-Ocean* 26: 467-479.
- van Breemen, N. 1995. How Sphagnum bogs down other plants. *Trends in Ecology and Evolution* 10: 270-275.
- Vapo. 2006. Site internet de Vapo : www.vapo.fi, consulté le 28 octobre 2006.
- Vasander, H. 1982. Plant biomass and production in virgin, drained and fertilized sites in a raised bog in southern Finland. *Annales Botanici Fennici* 19: 103-125.
- Vitt, D.H. et Bayley, S. 1984. The vegetation and water chemistry of four oligotrophic basin mires in northwestern Ontario. *Canadian Journal of Botany* 62: 1485-1500.
- Waddington, J.M. et McNeil, P. 2002. Peat oxidation in an abandoned cutover peatland. *Canadian Journal of Soil Science* 82: 279-286.
- Waddington, J.M., Rochefort, L. et Campeau, S. 2003. Sphagnum production and decomposition in a restored cutover peatland. *Wetlands Ecology and Management* 11: 85-95.
- Warner, B.G. et Buteau, P. 2000. The early peat industry in Canada: 1864-1945. *Geoscience Canada* 27: 57-66.
- Wheeler, B.D. et Shaw, S.C. 1995. Restoration of damaged peatlands. HMSO, Londres. 211 p.

- Wind-Mulder, H.L., Rochefort, L. et Vitt, D.H. 1996. Water and peat chemistry comparisons of natural and post-harvested peatlands across Canada and their relevance to peatland restoration. *Ecological Engineering* 7: 161-181.
- Zoltai, S.C. 1988. Distribution of base metals in peat near a smelter at Flin Flon, Manitoba. *Water, Air, and Soil Pollution* 37: 217-228.
- Zumdahl, S.S. 1988. *Chimie (Chimie des solutions)*. Centre éducatif et culturel inc., Montréal. 381 p.

Annexe 1 : Définition des communautés végétales pour la zone expérimentale et naturelle

H1 : Bosquet d'épinettes

Dominance d'épinette noire ayant une hauteur moyenne de 80 cm et un recouvrement moyen de 45 % et d'éricacées ayant une hauteur moyenne de 40 cm et un recouvrement moyen de 25 %. Les herbacées sont pratiquement absentes et la strate muscinale est peu abondante (35 %) et dominée par l'hépatique *Ptilidium ciliare*.

Parcelles : 14N, 15N 1E, 13E

H2 : Bosquet d'épinettes et d'éricacées

Dominance d'épinette noire ayant une hauteur moyenne de 50 cm et un recouvrement moyen de 40 % et d'éricacées ayant une hauteur moyenne de 35 cm et un pourcentage de recouvrement moyen de 28 %. La seule différence significative avec la communauté H1 est la présence plus importante de la strate muscinale (50 %), dominée ici par *Sphagnum rubellum*.

Parcelles : 11N, 13N (2E), 6E, 10E, 17E

H3 : Platière à éricacées et sphaignes

Dominance de mousses avec un recouvrement moyen de plus de 90 %. La strate muscinale est dominée par *Sphagnum fuscum* suivi de *Sphagnum rubellum* en plus d'une présence de l'hépatique *Mylia anomala* qui recouvre environ 4 %. Les éricacées recouvrent en moyenne 25 % avec une hauteur moyenne de 20 cm. Pour les éricacées, on remarque la présence de l'*Empetrum nigrum*. Les herbacées sont plus abondantes avec près de 3 % de recouvrement moyen et dominées par *Rubus chamaemorus*. L'épinette noire est toujours présente, mais moins abondante (hauteur moyenne : 25 cm, recouvrement moyen : 10 %).

Parcelles : 1N, 5N, 8N, 16N 3E, 7E, 12E, 14E

H4 : Platière à éricacées, sphaignes et lichens

Dominance de mousses (85 %) et d'éricacées ayant une hauteur moyenne de 20 cm et un recouvrement moyen de 30 %. Cette communauté est très **similaire à H3**, sauf que la strate muscinale est dominée par *S. rubellum*, suivi du lichen *Cladina rangiferina* et de *S. fuscum*.

Parcelles : 3N, 6N, 12N 9E, 11E, 15E

H5 : Platière à sphaignes

Dominance de mousses (96 %), particulièrement de *Sphagnum rubellum* et *S. fuscum*. Les arbres sont pratiquement absents et les éricacées moins abondantes avec seulement 15 % de recouvrement moyen et une hauteur de 15 cm. Les herbacées sont similaires aux communautés H3 et H4 avec environ 4 % de recouvrement moyen.

Parcelles : 4N, 9N, 10N 16E

H6 : Tapis à sphaignes

Tapis presque monospécifique de *Sphagnum rubellum* (88 %). Il n'y a aucun arbre et très peu d'éricacées (2 %). Les herbacées sont similaires aux communautés précédentes (4 %) mais *Scirpus cespitosus* et *Carex limosa* sont légèrement plus abondants (1 %). Ce type de communauté végétale se retrouve généralement en bordure des mares.

Parcelles : 2N, 7N, 17N 18E, 19E

Annexe 2 : Liste des éléments analysés dans l'eau de la tourbière de Pointe-Lebel

- pH
- Conductivité électrique corrigée
- Oxygène dissous
- Température
- Huiles et graisses
- Matière en suspension
- Dureté totale
- Azote totale Kjeldhal
- N-NH₄
- N-NO₃
- Phosphore total
- Carbone organique dissous
- Calcium
- Potassium
- Sodium
- Mercure dissous
- Plomb dissous
- Zinc dissous
- Nickel dissous
- Aluminium dissous
- Cadmium dissous
- Cuivre dissous
- Fer dissous
- Magnésium
- Manganèse dissous