

RESTAURATION ÉCOLOGIQUE DES TOURBIÈRES DE BIC-SAINT-FABIEN ET SAINT-FABIEN-SUR-MER RAPPORT D'ACTIVITÉS 2012-2015



Le présent document est issu du rapport final « Restauration écologique des tourbières de Bic–Saint-Fabien et de Saint-Fabien-sur-Mer dans le Bas-Saint-Laurent » - R719.1, déposé au ministère des Transports du Québec le 17 mars 2015, produit à la demande du ministère des Transports du Québec et financé par la Direction de l’environnement et de la recherche pour un projet de la Direction du Bas-Saint-Laurent–Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine. Pour accéder au document original : www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1169104.pdf.

Restauration écologique des tourbières de Bic–St-Fabien et Saint-Fabien-sur-Mer

Rapport d’activités 2012-2015

Groupe de recherche en écologie des tourbières
Université Laval, Québec, Québec.

Groupe de rédaction : Line Rochefort, Marie-Claire LeBlanc, Sandrine Hogue-Hugron, Rémy Pouliot, Noémie D’Amour et Claire Boismenu.

Citation recommandée :

Groupe de recherche en écologie des tourbières (2016). Restauration écologique des tourbières de Bic–St-Fabien et Saint-Fabien-sur-Mer, rapport d’activités 2012-2015. Groupe de recherche en écologie des tourbières, Université Laval, Québec. 61 pages.

Ce document est aussi disponible en version PDF : www.gret-perg.ulaval.ca
Octobre 2016

Références : Nous avons inclus dans ce document les liens internet de certaines références (rapports et organisations internationales). Les articles scientifiques cités peuvent être téléchargés à partir des plateformes traditionnelles de recherche de publications ou encore à partir du site web du GRET.

TABLE DES MATIÈRES

Glossaire.....	i
Contexte.....	ii
Synthèse des conclusions et des recommandations.....	iii
1. Problématique.....	1
2. Objectifs généraux.....	2
3. Sites d'étude.....	3
4. Adaptation de la technique de restauration aux fens.....	6
5. Travaux réalisés et résultats obtenus.....	8
5.1 Tourbière de Bic–Saint-Fabien	8
5.1.1 Propagation des espèces typiques des fens	8
A) Propagation de plantes vasculaires des fens : stratification et viabilité des semences ..	9
B) Propagation de plantes vasculaires des fens : semis in situ	11
C) Propagation de bryophytes des fens : production de mousses brunes in situ	13
D) Détermination du seuil de survie des mousses brunes	15
5.1.2 Établissement de communautés végétales des fens.....	16
A) Évaluation de la survie des plantations.....	17
B) Établissement de communautés végétales de fen	19
C) Compétition entre les espèces et biodiversité.....	23
D) Influence des cypéracées sur l'implantation et la survie des mousses	25
E) Fertilisation et chaulage des zones restaurées	29
5.1.3 Rétablissement d'un régime hydrologique approprié	31
A) Bilan hydrique du site restauré.....	31
B) Contrôle de l'érosion.....	33
5.1.4 Retour de la fonction d'accumulation de carbone	36
5.1.5 Biodiversité des arthropodes des mares de tourbières	37
5.1.6 Préservation de l'intégrité de la tourbière naturelle adjacente.....	40
A) Caractérisation et suivi de la composition chimique de l'eau	41
B) Caractérisation et suivi de la végétation.....	42
C) Suivi annuel du cypripède royal	44
D) Aménagement du gradient échohydrologique fen restauré - secteurs adjacents	46
5.2 Tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer.....	49
5.2.1 Établissement de communautés végétales typiques des milieux humides choisis	51
A) Restauration planifiée et réalisée	51
B) Écologie du <i>Scirpus cyperinus</i>	55
C) Suivi de la végétation	58
6. Discussion et conclusion.....	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse des tests de stratification et de viabilité des graines à BSF..	10
Tableau 2 : Espèces vasculaires introduites <i>in situ</i> à BSF.	12
Tableau 3 : Résultat d'établissement des espèces introduites à BSF.....	18
Tableau 4 : Distribution des 18 parcelles d'inventaire de végétation à BSF.	20
Tableau 5 : Recouvrement des espèces les plus abondantes à BSF.....	21
Tableau 6 : Espèces d'arthropodes à BSF et dans les tourbières naturelles à BSF .	39
Tableau 7 : Recommandation de suivis minimaux à la tourbière de SFSM.	50
Tableau 8 : Recouvrement des espèces dominantes à SFSM.	58

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des tourbières de BSF et de SFSM.....	3
Figure 2 : Plan de la tourbière de BSF.	4
Figure 3 : Plan de la tourbière de SFSM.	5
Figure 4 : Vue du bloc de plantation Sud.	11
Figure 5 : Installation des bassins de culture de mousse à BSF.....	13
Figure 6 : Recouvrement des espèces de mousses BSF	14
Figure 7 : Plantations à la tourbière de BSF	17
Figure 8 : Résultats des inventaires de végétation à BSF	20
Figure 9 : Parcelle expérimentale sur la compétition entre des espèces envahissantes et les espèces typiques des fens à BSF.	23
Figure 10 : Installation des parcelles expérimentales sur l'influence des cypéracées à BSF.	25
Figure 11 : Variations de la température et de l'humidité relative du tapis de mousses à BSF. ..	27
Figure 12 : Effet de la présence des cypéracées sur le couvert à BSF.....	28
Figure 13 : Effet de la fertilisation sur le couvert de végétation à BSF.	30
Figure 14 : Mise en place de l'expérience de fertilisation à BSF..	30
Figure 15 : Rétablissement de l'hydrologie à la tourbière de BSF..	32
Figure 16 : Méthodes de contrôle de l'érosion utilisées à BSF..	34
Figure 17 : Mares de BSF.	38
Figure 18 : Localisation des secteurs de tourbière naturelle adjacente à BSF.....	40
Figure 19 : Suivi de l'hydrologie à BSF.....	41
Figure 20 : Composition de la portion naturelle de la tourbière de BSF.....	43
Figure 21 : Suivi des individus de cypripède royal à BSF.	44
Figure 22 : Travaux de remodelage de la marge de la tourbière de BSF	47
Figure 23 : Disparité entre la marge de la tourbière restaurée et les abords intacts des tourbières naturelles à BSF.	48
Figure 24 : Restauration de la tourbière de SFSM.....	52
Figure 25 : Succès d'implantation du <i>Scirpus cyperinus</i> à SFSM..	56
Figure 26 : Le <i>Scirpus cyperinus</i> à SFSM	57
Figure 27 : Planches restaurées à SFSM	59

GLOSSAIRE

Acronymes :

BSF : Bic–Saint-Fabien

GRET : Groupe de recherche en écologie des tourbières

MTQ : Ministère des Transports du Québec

SFSM : Saint-Fabien-sur-Mer

Définitions de quelques notions abordées dans ce document :

Bloc : En statistique, un bloc est un sous-ensemble homogène d'unités expérimentales (p. ex. plantes, microenvironnement).

Carex : Plantes herbacées de la famille des cypéracées; genre comprenant de nombreuses espèces. Les *Carex* composent une large part de la végétation vasculaire des fens.

Écosystème de référence : Concept en écologie qui réfère à un véritable écosystème (un milieu naturel adjacent) ou d'une représentation plus théorique (la somme de la caractérisation de plusieurs écosystèmes) servant de modèle afin de définir les objectifs d'un projet de restauration puis à leur évaluation¹.

Mousses brunes : Les principales espèces de bryophytes trouvées dans les fens contribuant à l'accumulation de la tourbe et appartenant à la famille des Amblystegiaceae. À titre d'exemple, les genres *Campylium* et *Drepanocladus* font partie des mousses brunes.

Soulèvement gélival : Phénomène causé par le gel de l'eau, qui forme des aiguilles de glace à la surface du sol. Les jeunes végétaux sont particulièrement sensibles à ce phénomène puisqu'ils sont ainsi déracinés et meurent par dessiccation.

Traitement : En statistique, il s'agit de la manipulation par le chercheur de la variable indépendante (par exemple : la dose d'un fertilisant, l'espèce plantée ou le niveau de l'eau).

Transfert muscinal : Appellation courte de la « Méthode de restauration par transfert du tapis muscinal » développée par le GRET pour la réhabilitation des bogs, largement décrite dans le Guide de restauration des tourbières².

¹ Adapté de la définition officielle de : Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. 2004. The SER International Primer on Ecological Restoration. www.ser.org & Tucson: Society for Ecological Restoration International, www.ser.org/resources/resources-detail-view/ser-international-primer-on-ecological-restoration#6.

² Quinty, F., Rochefort, L. 2003. Guide de restauration des tourbières, 2^e éd. Association canadienne de mousse de sphaigne et Ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick. Québec, Québec. 119 p. [En ligne] www.gret-perg.ulaval.ca/uploads/tx_centrerecherche/Guide-restauration_2e_2003_01.pdf

CONTEXTE

En 2012, le ministère des Transports du Québec (MTQ) mandatait le Groupe de recherche en écologie des tourbières (GRET) de l'Université Laval pour réaliser une étude sur les méthodes de restauration des tourbières au Bas-Saint-Laurent. Cette opportunité était liée à l'exigence pour le ministère de répondre au programme de compensation pour la perte de milieux humides lors de la construction de l'autoroute 85 entre la municipalité de Témiscouata-sur-le-Lac (secteur Cabano) et la frontière du Nouveau-Brunswick (décret no. 7-2010).

Le groupe de recherche travaillait déjà dans la région aux sites de Bic-Saint-Fabien (BSF) et Saint-Fabien-sur-Mer (SFSM), restaurés en collaboration avec l'Industrie de la tourbe horticole. Le mandat confié par le MTQ a permis à au GRET d'entreprendre de nombreuses expériences afin d'adapter la méthode de restauration des tourbières par transfert du tapis de mousses (bryophytes) élaborée au cours des 20 dernières années au cas particulier d'une tourbière minérotrophe (Bic-Saint-Fabien), un type d'écosystème de plus en plus rare dans le sud du Québec. Le mandat a également permis de restaurer la tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer en une mosaïque de milieux humides (bogs, fen, marécages, zones de transition). La tourbe des deux tourbières avait été prélevée au cours du siècle dernier et les sites n'avaient pas été restaurés par la suite, laissant des milieux dénués de la végétation typique des tourbières minérotrophes de la région du Bas-Saint-Laurent.

Les connaissances acquises ont été transmises au ministère des Transports du Québec sous forme d'un rapport final d'activités, lequel a ensuite été réédité par le Groupe de recherche en écologie des tourbières, pour en faciliter la diffusion. Les informations contenues dans ce document serviront de référence dans le domaine de la restauration des fens. Nous espérons que plusieurs types d'intervenants dans le domaine de la restauration, de la gestion ou de la conservation des tourbières et des milieux humides en général pourront s'y référer.

Enfin, il importe de spécifier que les résultats présentés dans ce rapport sont tous préliminaires et n'ont pas encore été publiés (une partie de la propriété intellectuelle appartenant aux étudiants de 2e et de 3e cycles). Ils feront l'objet d'interprétations plus approfondies afin de produire des articles scientifiques révisés par des pairs. Par conséquent, il importe de considérer comme préliminaires les résultats présentés dans ce document et de contacter le GRET pour toute clarification, information ou mise à jour sur les renseignements présentés.

SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET DES RECOMMANDATIONS

Sont présentées dans cette section les grandes lignes des conclusions et des recommandations issues des 30 mois de recherches menées dans le cadre du mandat octroyé au Groupe de recherche en écologie des tourbières par le ministère des Transports du Québec. Pour en savoir plus, le lecteur est invité à consulter, au chapitre 5, la section « Faits saillants » qui conclut la description de chacun des projets de recherche présentés et qui fait ressortir les éléments les plus pertinents de ceux-ci.

A) Tourbière de Bic–Saint-Fabien

La tourbière de Bic–Saint-Fabien a été restaurée en décembre 2009 de façon à tenter le retour d’une tourbière minérotrophe. Plusieurs variantes de la méthode de restauration par transfert muscinal ont été testées à cette époque et plusieurs expériences complémentaires ont été réalisées depuis pour comprendre et définir quelles sont les meilleures approches permettant le retour des plantes typiques de fens. Voici les principales conclusions et recommandations issues des travaux menés à Bic–Saint-Fabien.

La restauration de la tourbière de Bic–Saint-Fabien a montré qu’il est possible de rétablir le système hydrologique du milieu et de limiter les émissions de gaz à effet de serre, comme le méthane. Toutefois, la méthode mécanique de restauration par transfert muscinal utilisée seule n’a pas donné pas d’aussi bons résultats en tourbière minérotrophe qu’en tourbière ombrotrophe en ce qui concerne le retour de la végétation typique des fens. Certaines approches complémentaires peuvent apporter des résultats intéressants, mais ils restent à être confirmés :

- La propagation en serre, les semis *in situ* et la plantation de plants de certaines espèces vasculaires typiques des fens (comme les cypéracées) peuvent faciliter le retour de la végétation inféodée à ces milieux. Il faut toutefois tenir compte des conditions abiotiques retrouvées sur le terrain (en particulier d’humidité). Il serait en effet possible de « prescrire » des espèces précises en fonction des conditions prévalant dans les tourbières lors de l’élaboration des plans de restauration.
- Également, il est possible de propager certaines espèces de mousses brunes (comme le *Tomenthypnum nitens*, le *Campylopus stellatum* et le *Scorpidium coscinii*) dans des bassins de culture en tourbière avec un contrôle du niveau de l’eau. Ces mousses peuvent être utilisées ensuite en restauration. Si ces mousses sont réintroduites dans un site où des cypéracées sont déjà présentes, il est préférable de les réintroduire sous des espèces de petite taille et dans des secteurs où la densité est faible.
- La création d’andains est la méthode de base, avec le blocage des canaux de drainage, pour le remouillage d’un site restauré. Pour la restauration de fen, il faut s’assurer d’apporter des correctifs pour limiter l’érosion par l’écoulement d’eau, comme l’utilisation de fagots d’arbustes indigènes, et ce, dès les travaux de restauration initiaux dans les endroits où une plus grande quantité d’eau circule. Des boutures de myrique baumier peuvent également aider à stabiliser le sol matériel et ralentir l’eau en circulation.

- La fertilisation phosphatée favorise l'établissement des plantes vasculaires et des mousses dans les secteurs restaurés, mais le chaulage n'a aucun effet sur l'établissement de la végétation.
- La création de mares, végétalisées avec des plantes typiques de ces milieux, a un effet positif sur la biodiversité de la tourbière (p. ex. sur les espèces végétales et les arthropodes) et sa fonctionnalité.
- En ce qui concerne le stockage du carbone dans la tourbière restaurée, la réintroduction du *Carex aquatilis*, une espèce qui a la capacité de séquestrer le carbone, est recommandée lorsque le rétablissement de la fonction d'accumulation de carbone est un objectif important.

D'autre part, à la tourbière de Bic – Saint-Fabien, il faudra continuer les recherches visant à limiter l'expansion de certaines espèces vasculaires envahissantes à l'aide d'autres plantes de fens. À noter également qu'un nouveau champ d'études se développe concernant la connectivité hydrologique entre les secteurs restaurés et la tourbière naturelle environnante.

Comme dans tout projet de restauration écologique, un suivi régulier de la situation de la tourbière de Bic–Saint-Fabien a été fait dans les années suivant la restauration et devra être effectué dans les années subséquentes, de façon à s'assurer :

- que les conditions abiotiques (comme le niveau d'eau et la chimie de l'eau) continuent à évoluer vers celles des écosystèmes de référence;
- que la végétation (invasculaire et vasculaire) typique des tourbières minérotrophes s'établit et que les espèces indésirables qui auraient pu coloniser le site ne deviennent pas envahissantes;
- d'obtenir des bases de données permettant d'évaluer le succès de la restauration et de les comparer à d'autres projets de restauration;
- de vérifier l'effet de la restauration de la tourbière perturbée sur la tourbière naturelle adjacente, p. ex. dans le cas des espèces végétales rares ou susceptibles d'être désignées menacées (comme le cypripède royal).

Il importe de posséder également des connaissances sur des tourbières non perturbées situées dans la même région qui peuvent servir d'écosystèmes de référence et permettre l'évaluation du succès de restauration.

B) Tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer

La tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer a été restaurée en novembre 2011 grâce à une collaboration entre le GRET, Planirest Environnement (une firme d'experts-conseil) et l'Association des producteurs de tourbe horticole du Québec (APTHQ). La tourbière a été aménagée de façon à créer un complexe de milieux humides formé d'un secteur de tourbière ombrotrophe, d'un secteur minérotrophe, de marécages, de laggs (zones de transition) et de secteurs de démonstration d'arbustes fruitiers et de mares.

Le plan de restauration initial comptait cinq zones homogènes pour lesquelles une option de restauration (y compris des travaux à titre expérimental) avait été déterminée en tenant compte des conditions du terrain avant sa restauration. Entre autres, la méthode de transfert du tapis muscinal a été utilisée sur une grande partie du site, avec une variante simplifiée éliminant l'étape de l'aplanissement du sol dans une portion de la tourbière abandonnée où il y avait eu une recolonisation naturelle par la végétation. Pour certains secteurs, un simple remouillage par blocage des canaux de drainage a été réalisé. Des plantations d'arbres ont également été effectuées, notamment dans des zones plus sèches de la tourbière. Ainsi, certains ajouts et ajustements ont été apportés au plan de restauration de départ afin de mieux refléter les conditions du terrain, comme création d'un marécage à aulne plutôt qu'à conifères et la modification de l'emplacement des plantations d'arbres et d'arbustes de petits fruits.

Le suivi de la végétation de la tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer depuis sa restauration est effectué par le GRET et les parcelles d'inventaire situées dans cette tourbière seront dorénavant incorporées au suivi pancanadien à long terme des tourbières aménagées après la cessation des activités d'extraction de la tourbe. Voici quelques éléments issus du premier inventaire :

- Deux des cinq parcelles réparties dans la zone où la méthode de transfert de la couche muscinale a été utilisée présentaient en 2014 une tendance vers un succès de restauration. La tendance de la trajectoire des trois autres parcelles était encore incertaine.
- Puisque des espèces envahissantes sont présentes sur le site (mais hors des parcelles d'inventaire), un suivi attentif de celles-ci, en plus des inventaires à long terme, devra être planifié pour empêcher leur établissement dans la portion restaurée.

L'une de ces espèces considérées comme envahissantes sur le site restauré de Saint-Fabien-sur-Mer, soit le *Scirpus cyperinus*, a fait l'objet d'une étude plus poussée de façon à déterminer de quelles façons il était possible de limiter sa tendance à l'envahissement. Ainsi, la présence d'un couvert végétal préétabli peut empêcher, dans une certaine mesure, l'implantation du scirpe par graines. Il faudrait de plus envisager de contrôler sa présence dès l'abandon du site après l'arrêt des activités d'extraction de la tourbe, donc avant qu'il ne s'implante, plutôt que d'essayer de limiter sa croissance par la compétition une fois qu'il domine le paysage.

En conclusion, même si un site de tourbière n'est pas de propriété privée, les firmes-conseils en environnement possèdent assez d'expertise pour entreprendre et réussir la restauration écologique d'un bog (site de Saint-Fabien-sur-Mer). Pour les fens, tel que l'ont démontré des travaux menés aux États-Unis, les méthodes de restauration exigeront plus d'efforts pour l'implantation des plantes graminoides recherchées si on ne veut pas voir les sites être envahis par des plantes non désirables. Ce projet a d'ailleurs permis de bâtir une excellente banque de référence sur l'écosystème cible de type fen pour les projets de restauration dans la région du Bas-Saint-Laurent. L'étude nous a de plus appris qu'il est possible de manipuler des mousses brunes de fen comme on le fait avec les sphaignes pour les bogs. Elles s'établissent bien sur la tourbe nue sur le terrain lors d'expériences menées à petite échelle et réalisées avec soin. Cependant, la mécanisation du processus pose problème : il s'agira, assurément, des prochaines questions de recherche du GRET.

1. PROBLÉMATIQUE

Selon le décret obtenu pour la phase II du projet de construction de l'autoroute 85 entre la municipalité de Témiscouata-sur-le-Lac (secteur Cabano) et la frontière du Nouveau-Brunswick (décret no 7-2010), le ministère des Transports du Québec doit élaborer et réaliser un programme de compensation pour les pertes de milieux humides.

À la suite d'échanges avec le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (actuel ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques) et le ministère Ressources naturelles et de la Faune (maintenant scindé en ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles et ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs), une proposition d'une contribution financière de 200 000 \$ aux travaux de recherche du Groupe de recherche en écologie des tourbières, visant les études sur la restauration des tourbières de Saint-Fabien-sur-Mer et de Bic-Saint-Fabien (par la revégétalisation, le rétablissement des conditions hydrologiques et des fonctions d'accumulation du carbone de l'écosystème) a été jugée adéquate pour assurer la compensation des pertes en milieux humides perturbés par la construction de cette portion d'autoroute. Les milieux humides à étudier dans le cadre du concept de restauration écologique sont des fens (tourbières minérotrophes) localisées au sud du Parc national du Bic entre les municipalités de Saint-Fabien et de Rimouski (le Bic).

L'expertise du GRET en restauration des tourbières s'est développée au début des années 1990 pour tenter en premier lieu de résoudre le conflit qui existe entre la valeur environnementale des tourbières et la valeur économique de la tourbe en encourageant la reprise des fonctions écologiques après les activités d'extraction de la tourbe. Des méthodes de restauration des tourbières ombrotrophes, ou bogs, ont été développées avec succès au cours des 20 dernières années. Ces méthodes s'appliquent bien aux tourbières abandonnées après extraction de la tourbe où le dépôt résiduel possède encore des caractéristiques typiques des bogs (tourbe acide, peu décomposée, principalement composée de fragments de sphaignes). Toutefois, on trouve ici et là dans le paysage des tourbières où les conditions pédologiques ressemblent à celles de tourbières minérotrophes (fens). Peu de projets de restauration ont été réalisés sur la restauration des fens en Amérique du Nord et aucun au Canada. Le projet de Bic-Saint-Fabien est l'occasion d'appliquer des techniques éprouvées de restauration écologique dans les tourbières à sphaigne et de les adapter aux tourbières minérotrophes, moins communes dans le sud du Québec.

La structure du présent document vise à fournir de l'information de façon à la fois approfondie et conviviale. Ainsi, le rapport final résume les activités de recherche réalisées au cours des 30 derniers mois aux tourbières de Bic-Saint-Fabien et de Saint-Fabien-sur-Mer. La présentation, au chapitre 5, des expériences menées et des résultats obtenus, permet de mieux comprendre les projets de recherches réalisés.

2. OBJECTIFS GÉNÉRAUX

Les principaux objectifs du projet de recherche sont de :

- Développer des méthodes pour la restauration écologique de tourbières ombrotrophes, de tourbières minérotrophes et de marécages dégradés à la suite des activités d'extraction de la tourbe comme mesure de compensation pour la perte de milieux humides;
- Tester l'aménagement de divers types de milieux humides : bog, fen et zone marécageuse en fonction des conditions résiduelles post-extraction;
- Adapter les techniques de restauration écologique utilisées dans les tourbières ombrotrophes pour la restauration de tourbières minérotrophes;
- Caractériser un écosystème de référence afin d'établir les critères de succès de la restauration écologique d'une tourbière;

La « restauration écologique » se définit comme le processus d'aide au rétablissement d'un écosystème qui a été endommagé, dégradé ou détruit. Dans le cas des tourbières, le but ultime de la restauration est de promouvoir le retour d'un écosystème fonctionnel et accumulateur de tourbe, et ce, dans une échelle de temps raisonnable.

Comme il s'agit d'un processus qui prend du temps, des objectifs plus spécifiques peuvent être définis en fonction du type de tourbière que l'on souhaite restaurer pour permettre une évaluation à plus court terme. Afin d'établir les critères de succès d'un projet de restauration d'une tourbière, le projet inclut la caractérisation d'un écosystème de référence.

Le projet d'étude de Bic-Saint-Fabien a pour but de développer le savoir-faire en restauration de tourbières minérotrophes dans leur intégrité, c'est-à-dire tant au niveau de la structure que des fonctions de l'écosystème. Le projet de restauration de la tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer a pour principaux buts de tester l'aménagement de divers types de milieux humides : bog, fen et zone marécageuse en fonction des conditions résiduelles post-extraction et de mettre en place un protocole de suivi de la restauration.

3. SITES D'ÉTUDE

Les tourbières de Bic-Saint-Fabien et de Saint-Fabien-sur-Mer sont situées dans la municipalité de Saint-Fabien, dans la région du Bas-Saint-Laurent (Figure 1).



Figure 1 : Localisation des tourbières de Bic-Saint-Fabien et de Saint-Fabien-sur-Mer.

La tourbe de la tourbière de Bic-Saint-Fabien a été récoltée à des fins horticoles dès 1946, d'abord par la méthode de coupe manuelle par blocs, puis par une méthode plus moderne, mécanique, par aspiration. Les activités d'extraction de la tourbe se sont terminées entre 1995 et 2000 selon les secteurs et les terrains ont ensuite été laissés à l'abandon. Le secteur anciennement exploité possède une superficie de 16 hectares et est bordé par une tourbière naturelle modérément riche et des champs cultivés (Figure 2). Le projet de restauration initié par le Groupe de recherche en écologie des tourbières de l'Université Laval vise le retour d'un écosystème de fen, en prenant la tourbière adjacente ainsi que quelques tourbières minérotrophes de la région comme écosystèmes de référence.

En 2008, une caractérisation de la tourbière abandonnée de Bic-Saint-Fabien a été conduite afin de dresser le portrait des conditions prévalant avant la restauration. Pendant l'hiver 2009, des

travaux de restauration ont été réalisés sur 11 hectares, en suivant la méthode de transfert du tapis muscinal de restauration des bogs développée par le GRET. Depuis, des recherches sur le retour des conditions hydrologiques, de la végétation typique des fens et de la capacité de captage du carbone ont lieu sur le site. Le soutien financier accordé au GRET par le ministère des Transports du Québec permet la poursuite des travaux déjà amorcés et la mise en place d'expériences afin d'atteindre le double objectif de restauration du site et de l'adaptation de la méthode de restauration aux fens. Les projets de recherche réalisés à ce jour ont été en quasi-totalité financés par le MTQ. Des projets additionnels ont aussi été rendus possibles par d'autres sources de financement, entre autres le Conseil de recherche en sciences et génie du Canada (CRSNG) et l'industrie canadienne de la tourbe, des bourses d'études-travail, des bourses du CRSNG pour stage d'été en recherche et accueil d'étudiants étrangers.

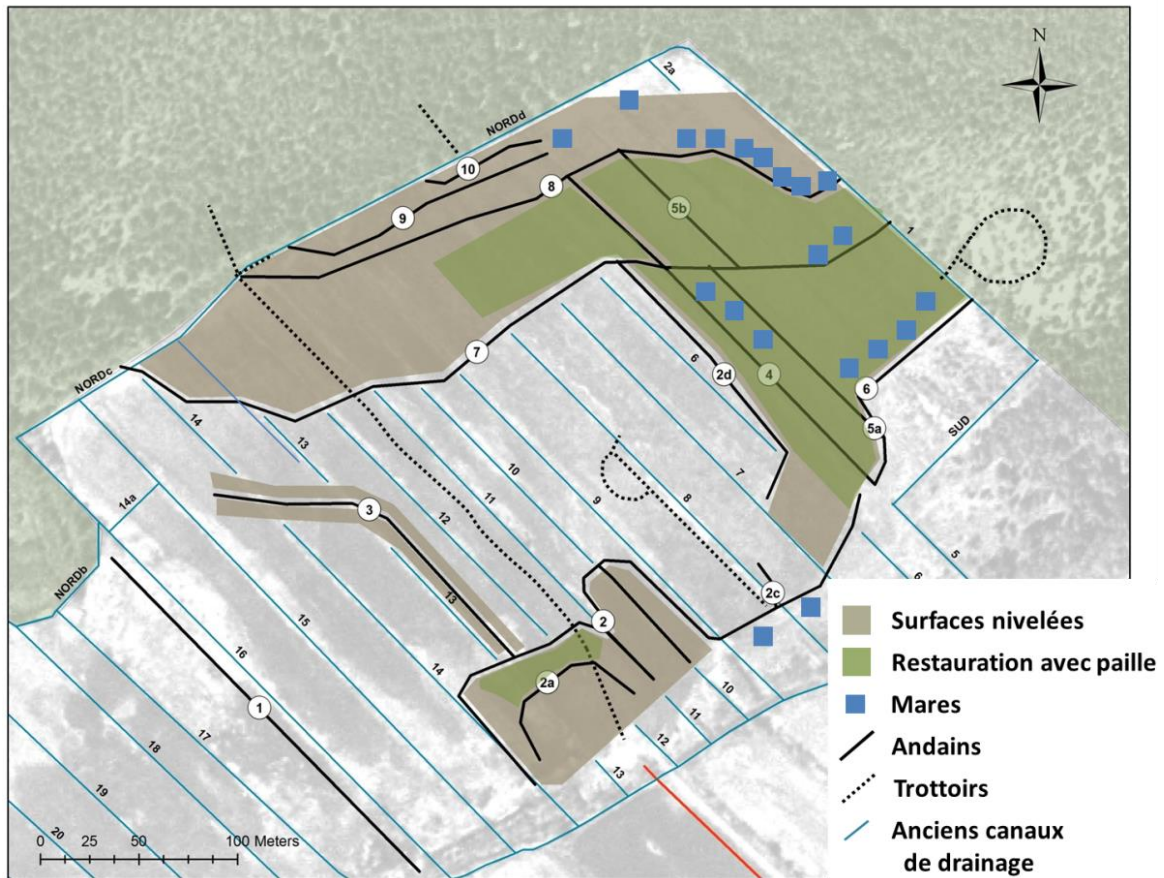


Figure 2 : Plan de la tourbière de Bic-Saint-Fabien.

La tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer a été exploitée par aspiration et les terrains ont été abandonnés entre 1993 et 1999 selon les secteurs. Le site couvre une superficie de 20 hectares. Il est bordé au nord par la limite sud-ouest du Parc national du Bic, par des friches recolonisées par des arbres à l'est et au sud, ainsi que par la Route de la mer et par une autre tourbière maintenant abandonnée à l'ouest.

Lors des travaux de restauration réalisés en novembre 2011, la tourbière a été aménagée de façon à créer un complexe de milieux humides formé d'un secteur de tourbière ombrotrophe, d'un secteur minérotrophe, de marécages, de laggs (zones de transition) et de secteurs de démonstration d'arbustes fruitiers et de mares (Figure 3).

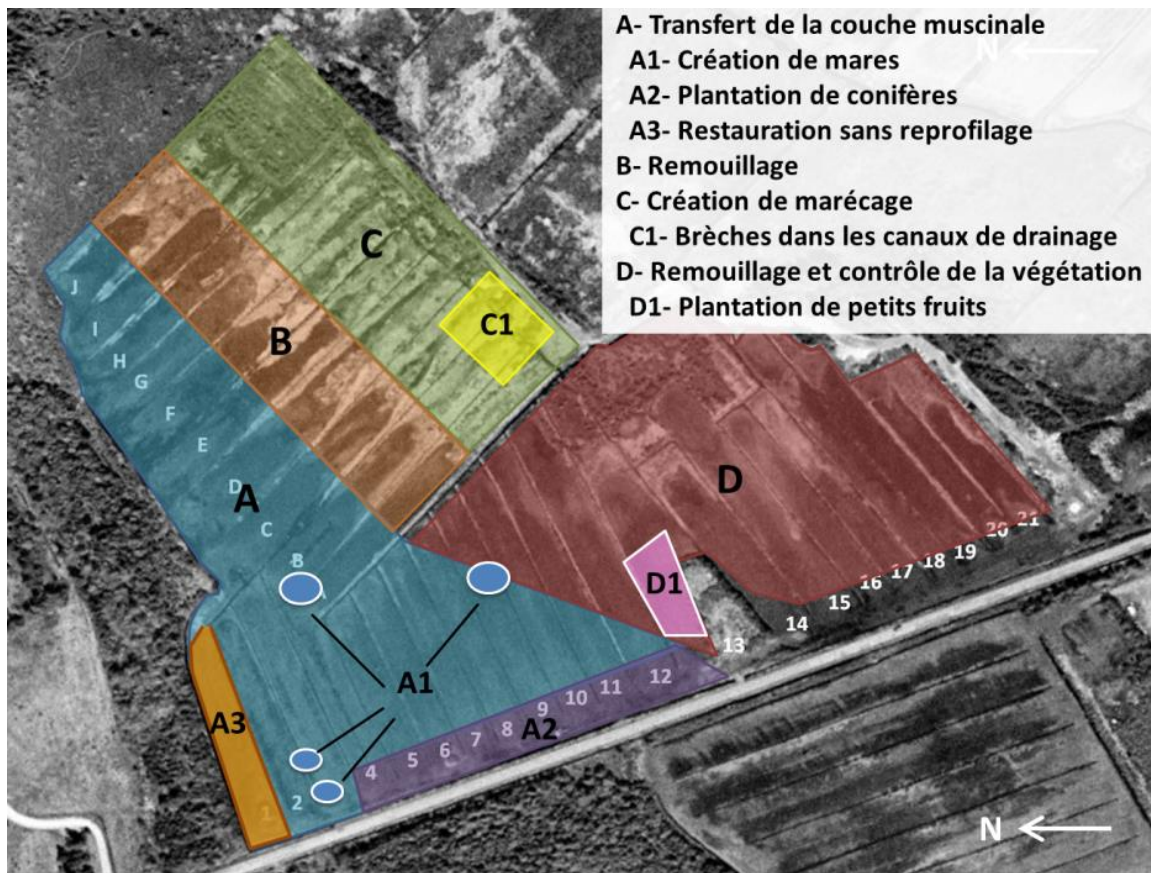


Figure 3 : Plan de la tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer.

4. ADAPTATION DE LA TECHNIQUE DE RESTAURATION AUX FENS

Les bogs et les fens sont des milieux humides accumulateurs de matière organique. Bien que considérés tous deux comme des tourbières, ces types d'écosystèmes se distinguent toutefois par leur alimentation en eau. Cette différence influence l'écoulement de l'eau dans la tourbière, la quantité de nutriments présents et, par le fait même, les communautés végétales.

La technique de restauration par transfert du tapis muscinal vise spécifiquement le retour des sphaignes, les espèces-clés des bogs³. Les sphaignes sont beaucoup moins abondantes dans les fens où les communautés végétales sont dominées par les mousses brunes et les cypéracées. La technique de restauration développée par le GRET doit donc être adaptée lorsque vient le temps de restaurer les fens.

D'abord, le drainage des fens est beaucoup plus complexe que celui des bogs. En effet, les bogs sont isolés du réseau hydrographique régional et alimentés uniquement par les précipitations atmosphériques. Pour leur part, en plus des précipitations, les fens sont alimentés par les eaux de ruissellement de surface, des eaux souterraines et sont même parfois adjacents à des cours d'eau. Les fens sont donc sujets à des inondations ou encore à un écoulement d'eau en surface beaucoup plus important que les bogs. Les problèmes d'érosion doivent donc impérativement être pris en considération lors du terrassement du site à restaurer.

Ensuite, le cortège floristique des fens est beaucoup plus diversifié que celui des bogs. Une restauration à petite échelle réalisée manuellement a démontré qu'il était possible de propager les espèces de fens en utilisant la technique du transfert muscinal⁴. Toutefois, il est largement reconnu que la propagation de certaines espèces dominantes des fens, particulièrement les carex, est difficile dans le cadre de la restauration⁵. Si l'on désire réintroduire ces espèces, des actions supplémentaires doivent être entreprises, telles que la transplantation ou la propagation par semis⁶.

Enfin, en raison de l'apport en éléments minéraux provenant du ruissellement, la tourbe de fen est beaucoup plus riche en cations de base (Ca, Mg, Na et K) que la tourbe de bog. Cette différence influence principalement la colonisation naturelle des sites après la fin des activités d'extraction de la tourbe. Alors que la tourbe de bog demeure dénudée de végétation plusieurs années après la fin des activités d'extraction (Poulin et coll. 2005⁷), la tourbe de fen est rapidement colonisée par diverses espèces de plantes. Il s'agit principalement d'espèces de

³ Rochefort, L. 2000. New frontiers in bryology and lichenology - *Sphagnum* - A keystone genus in habitat restoration. *Bryologist* 103(3): 503-508.

⁴ Graf, M. D., Rochefort, L. 2008. Techniques for restoring fen vegetation on cut-away peatlands in North America. *Applied Vegetation Science* 11: 521-528.

⁵ Cooper, D. J., MacDonald, L. H. 2000. Restoration of vegetation of mined peatland in the southern Rocky Mountains of Colorado, U.S.A. *Restoration Ecology* 8: 103-111.

⁶ Graf, M. D., Bérubé, V., Rochefort, L. 2012. Restoration of peatlands after peat extraction: Impacts, restoration goals, and techniques. P. 259-280 dans Vitt, D. H. & J. S. Bhatti (éd.), *Restoration and Reclamation of Boreal Ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.

⁷ Poulin, M., Rochefort, L., Quinty, F., Lavoie, C. 2005. Spontaneous revegetation of mined peatlands in eastern Canada. *Canadian Journal of Botany* 83: 539-557.

milieux humides, mais pas nécessairement typiques des fens⁸. Cet aspect doit être pris en compte lors de la restauration, notamment pour ajuster la dose des fertilisants, éviter la colonisation d'espèces indésirables, ainsi que pour déterminer le délai entre les opérations de terrassement et de réintroduction des plantes.

L'adaptation de la méthode du transfert du tapis muscinal aux tourbières minérotrophes présente donc des défis à de nombreux niveaux. Le projet de restauration de la tourbière de Bic–Saint-Fabien est particulièrement ambitieux, puisqu'il est le premier projet de restauration écologique d'une tourbière minérotrophe à grande échelle au Canada. Le développement des connaissances dans le domaine est toutefois primordial, car la plupart des fens ont déjà disparu dans le Québec méridional, en grande partie en raison du drainage agricole des basses terres du Saint-Laurent⁹.

⁸ Graf, M. D., Rochefort, L., Poulin, M. 2008. Spontaneous revegetation of harvested peatlands of Canada and Minnesota, USA. *Wetlands* 28: 28-39.

⁹ Pellerin, S., Poulin, M. 2013. Analyse de la situation des milieux humides au Québec et recommandations à des fins de conservation et de gestion durable. Rapport final pour le Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec Institut de recherche en biologie végétale et Université Laval, Québec. 104 p.

5. TRAVAUX RÉALISÉS ET RÉSULTATS OBTENUS

Ce chapitre présente les activités de recherche réalisées dans le cadre du mandat accordé au GRET par le ministère des Transports du Québec (printemps 2012 à hiver 2015). La méthode, les travaux sur le terrain ainsi que les résultats de chacune des activités de recherche sont discutés brièvement. Un effort de synthétisation a été réalisé afin de décrire succinctement les expériences et ne présenter que les résultats saillants des expériences. Comme la méthodologie est aussi présentée de façon très simplifiée, nous conseillons au lecteur de se référer au document original du MTQ ou de contacter le GRET pour plus de détails sur les protocoles.

Les résultats sont tous préliminaires et non publiés (une partie de la propriété intellectuelle appartenant aux étudiants de 2^e et de 3^e cycles) et feront l'objet d'interprétations plus approfondies afin de produire des articles scientifiques. Ainsi, il importe de considérer comme préliminaires les résultats présentés dans ce document et de contacter le GRET pour toute clarification, information ou mise à jour sur les renseignements présentés.

5.1 Tourbière de Bic-Saint-Fabien

5.1.1 Propagation des espèces typiques des fens

Avec l'approche par transfert muscinal, les espèces réintroduites sont celles du fen « donneur » où s'est fait le prélèvement, à moins de pouvoir récolter dans plusieurs sites donneurs représentant une variété de fens. Cette dernière situation est vraiment idéale, écologiquement, pour obtenir une grande diversité floristique et génétique. Il faut essayer de le faire lorsque cela est possible. Mais, dans les cas où la diversité d'espèces de fen du site donneur est insuffisante ou que certaines espèces recherchées ne soient pas favorisées par le transfert muscinal, la réintroduction par semis ou par la plantation de plants ou de rhizomes s'impose. Une série d'expériences a cherché à déterminer quelles sont les méthodes de propagation, de transplantation ou d'introduction par semis les plus adéquates pour favoriser le retour de la végétation typique des fens. Ce faisant, nous avons rassemblé des renseignements sur plusieurs espèces cibles de fen concernant leur biologie d'établissement sur tourbe nue.

A) Propagation de plantes vasculaires typiques des fens : stratification et viabilité des semences

Problématique et contexte :

Cooper et MacDonald (2000)¹⁰ ont déterminé que la plantation de plants était une méthode de réintroduction efficace pour plusieurs espèces vasculaires typiques des fens. Cependant, peu de pépinières produisent ce type de plantes de façon commerciale et il est parfois nécessaire d'obtenir des plants pour les besoins spécifiques de la restauration. Des graines peuvent alors être récoltées à proximité du site concerné. Outre les techniques courantes de production de végétaux en serre, il existe peu d'information sur les méthodes de préparation de ce type de semences. L'une des étapes essentielles de la production est la stratification. Cette opération consiste à manipuler les semences de façon à permettre leur germination. En leur faisant subir une période froide, on imite les conditions hivernales trouvées sous nos latitudes, ce qui permet de mettre fin à la dormance des semences et d'enclencher leur germination. Les détails (durée, température) de cette étape de la propagation des espèces est peu documentée malgré son importance cruciale.

Méthodologie :

L'expérience consistait à comparer le succès de germination chez dix espèces communes de fens : *Carex aquatilis*, *C. disperma*, *C. echinata*, *C. flava*, *C. magellanica*, *Eriophorum viridicarinarum*, *Scirpus validus*, *Trichophorum alpinum*, *T. cespitosum* et *Triglochin palustre*. Les résultats de germination des dix espèces ont été évalués en fonction de quatre durées de stratification à 3 °C (0, 50, 75 et 90 jours), ainsi qu'à -4 °C pour *T. alpinum* (stratification de 70 jours).

Résultats préliminaires :

GERMINATION : Le *C. flava* a connu son meilleur taux de germination après 75 jours de stratification, tandis que le *E. viridicarinarum* a bien germé après une stratification de 50 jours. Des temps de stratification de 75 et de 90 jours n'ont engendré aucune différence pour le taux de germination de *S. validus*. Par contre, pour quatre des sept espèces ayant germé (*C. disperma*, *C. magellanicum*, *S. validus* et *T. alpinum*), une certaine durée de stratification a été nécessaire (aucune germination sans stratification). Ainsi, *C. flava*, *E. viridicarinarum* et *T. palustre* ont montré une certaine capacité à germer même sans stratification.

VIABILITÉ : En 2013, la viabilité initiale des graines (avant stratification) de six espèces a été évaluée par la méthode de coloration des embryons au tétrazolium. Cet exercice avait pour but de connaître le taux de production maximal espéré pour une espèce puisque les résultats de 2012 étaient très variables. Parmi les espèces pour lesquelles la viabilité des graines a été évaluée, quatre sur six ont obtenu des taux de viabilité supérieurs à 62 % (Tableau 1). Le *C. aquatilis* (taux de 16 %) et le *T. cespitosum* (taux de 38 %) présentaient les graines les moins viables. Il faut noter que deux des espèces avec des taux de germination nul ou très faible présentaient aussi des taux de viabilité faibles. Par contre, dans un cas un particulier (*C. echinata*), le taux de viabilité était le plus élevé (96 %), pourtant cette espèce n'a pas germé, ce qui indique un problème quant aux conditions de stratification.

¹⁰ Cooper, D.J., MacDonald, L. H. 2000. Restoration of vegetation of mined peatland in the southern Rocky Mountains of Colorado, U.S.A. *Restoration Ecology* 8: 103-111.

Tableau 1 : Synthèse des tests de stratification et de viabilité des graines. Les taux de germination ont été calculés après 14 jours de croissance.

Espèces	Temps optimal de stratification (jours)	Taux de germination au temps optimal de stratification (%; moyenne $\pm$ erreur-type)	Taux de viabilité (%)
<i>Carex aquatilis</i>	Aucun	1 $\pm$ 1 (après 75 jours)	16
<i>Carex disperma</i>	90	27 $\pm$ 2	88
<i>Carex echinata</i>	Aucun	3 $\pm$ 1 (après 90 jours)	96
<i>Carex flava</i>	75	81 $\pm$ 6	-
<i>Carex magellanicum</i>	90	31 $\pm$ 3	74
<i>Eriophorum viridicarinarum</i>	50	76 $\pm$ 3	-
<i>Scirpus validus</i>	75 ou 90	48 $\pm$ 7	-
<i>Trichophorum alpinum</i> (3 °C)	90	40 $\pm$ 7	-
<i>Trichophorum alpinum</i> (-4 °C)	90	37 $\pm$ 4	-
<i>Trichophorum cespitosum</i>	Aucun	Aucune germination	38
<i>Triglochin palustre</i>	90	87 $\pm$ 1	62

Faits saillants :

- Parmi les espèces ayant germé (7 sur 10), cinq ont montré le taux de germination le plus élevé après une stratification de 90 jours à 3 °C.
- Les espèces peuvent être divisées en trois groupes distincts selon leurs taux de germination pour leur durée de stratification optimale :
 - *Carex flava*, *Eriophorum viridicarinarum* et *Triglochin palustris* ont présenté des taux de germination très élevés (> 75 %).
 - À l’opposé, *Carex aquatilis*, *Carex echinata* et *Trichophorum cespitosum* n’ont eu aucune germination ou une germination très faible (< 3 %).
 - (*Carex disperma*, *Carex magellanicum*, *Scirpus validus* et *Trichophorum alpinum*) ont eu des taux de germination intermédiaires compris entre 27 et 48 %.

B) Propagation de plantes vasculaires typiques des fens : semis in situ

Problématique et contexte :

La production en serre de plants voués à la restauration peut être une méthode de propagation efficace, mais elle est aussi très coûteuse. L'utilisation des graines plutôt que de plants déjà matures permet aussi une meilleure représentativité de la diversité génétique régionale, puisque plus de graines peuvent être récoltées de plusieurs colonies¹¹ puis réintroduites sur le site à restaurer. Le GRET tente donc de déterminer si certaines espèces pourraient plutôt être semées directement sur le terrain (semis *in situ*).

Méthodologie :

Une grande quantité de graines récoltées à la fin de l'été et au début de l'automne 2012 a été stratifiée pendant le printemps 2013 en suivant les conditions recommandées par les résultats préliminaires des essais de stratification (voir section précédente 5.1.1. A). Au début de juillet 2013, les graines ont été semées à la volée sur le site, en deux blocs. Quatre inventaires ont été réalisés afin d'évaluer le nombre de plantules dans chacune des parcelles.



Figure 4 : Vue du bloc de plantation Sud, août 2014.

¹¹ Galatowitsch, S. M. 2012. Plants. P. 277-336 (chapitre 8) dans Ecological restoration. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, Massachusetts, É.-U.

Résultats préliminaires :

Des 20 espèces introduites, 13 ont démontré une capacité à germer lorsque semées à la volée sur le terrain (Tableau 2). Il est impossible de déterminer le taux de germination des graines puisque la quantité de graines semées était différente d'un lot à l'autre et qu'il n'était pas possible de les dénombrer.

Tableau 2 : Espèces vasculaires introduites *in situ* à Bic-Saint-Fabien en juillet 2013. Celles en gras ont démontré une capacité de germination sur le terrain. Celles suivies d'un astérisque ont produit un nombre de plantules particulièrement élevé.

<i>Calamagrostis canadensis</i>	<i>Conioselinum chinense</i>
<i>Caltha palustris</i>	<i>Drosera rotundifolia</i>
<i>Carex aquatilis</i>	<i>Eriophorum viridicarinated</i>
<i>Carex disperma</i>	<i>Menyanthes trifoliata</i>
<i>Carex echinata*</i>	<i>Parnassia glauca</i>
<i>Carex flava*</i>	<i>Sarracenia purpurea</i>
<i>Carex lasiocarpa</i>	<i>Thalictrum pubescens*</i>
<i>Carex leptalea*</i>	<i>Trichophorum alpinum</i>
<i>Carex magellanica*</i>	<i>Trichophorum cespitosum</i>
<i>Carex prairea*</i>	<i>Triglochin palustre</i>

Faits saillants :

- Le *Carex echinata*, le *C. flava*, le *C. leptalea*, le *C. magellanica*, le *C. prairea* et le *Thalictrum pubescens* sont les espèces ayant produit le plus de plantules.
- Ces espèces pourraient être utilisées pour la réintroduction *in situ*.
- La viabilité à plus long terme des semis *in situ* devra être étudiée.

C) Propagation de bryophytes typiques des fens : production de mousses brunes in situ

Problématique et contexte :

La méthode de restauration par transfert de la couche muscinale nécessite une grande quantité de matériel végétal pour ensemençer les sites à restaurer. Ce matériel végétal peut être difficile (par la rareté des sites) ou coûteux à obtenir à partir de sites donneurs naturels. Le GRET a exploré la possibilité de produire des mousses sur place, en quantité suffisante pour les besoins de restauration. Il s'agit d'adapter la méthode de la culture de sphaignes en bassin développée par le groupe de recherche aux conditions d'une tourbière minérotrophe.

Méthodologie :

Deux stations de culture de mousses brunes ont été implantées à Bic-Saint-Fabien où trois espèces de bryophytes ont été introduites dans trois bassins : *Campylium stellatum*, *Tomentypnum nitens* et *Scorpidium cossonii*. Deux ans après l'implantation, un inventaire de végétation a été effectué dans le but de connaître l'évolution du couvert muscinal dans les bassins de culture.



Figure 5 : Installation des bassins de culture de mousse (station Sud).

Résultats préliminaires :

Après trois saisons de croissance, les bassins de culture de mousses ont atteint un recouvrement moyen de la strate muscinale de 27 % (Figure 4). Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'une expérience de culture de sphaignes du GRET au Nouveau-Brunswick¹². Selon cette étude, le recouvrement moyen des sphaignes, après trois ans de culture, était de 31 %. Bien que les résultats de la culture de mousses brunes obtenus à Bic-Saint-Fabien soient légèrement inférieurs à cette étude, ces premiers essais de culture de mousses sont de bon augure pour une production de mousses en bassins pour la restauration de tourbières minérotrophes.

L'étude de Pouliot et coll. (2015) sur la culture de sphaignes a aussi permis de déterminer que des niveaux d'eau au-dessus de la surface du sol nuisent considérablement à l'établissement et à la croissance des tapis de bryophytes. En observant le schéma de profondeur de la nappe

¹² Pouliot, R., Hugron, S., Rochefort, L. 2015. *Sphagnum* farming: A long-term study on producing peat moss biomass sustainably, Ecological Engineering 74: 135-147.

phréatique et celui du recouvrement des mousses par bassin, on pourrait croire que c'est aussi le cas dans les bassins de culture de mousses brunes, puisque les meilleurs résultats sont associés aux bassins où la nappe phréatique demeure sous le niveau du sol.

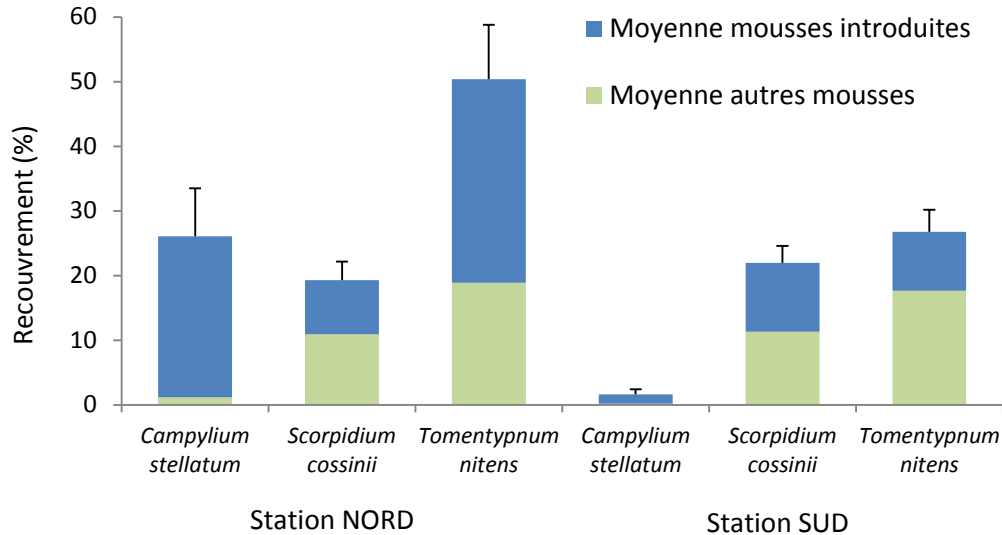


Figure 6 : Recouvrement moyen (%) des trois espèces de mousses brunes introduites et des autres mousses ayant colonisé spontanément les bassins de culture à Bic-Saint-Fabien, par bassin et par station de culture, après trois saisons de croissance.

Faits saillants :

- Le *Tomentypnum nitens*, avec les conditions d'hydrologie de la station Nord, a montré le meilleur recouvrement de la strate muscinale totale après trois saisons de croissance (en 2014), soit 50 % de toute la surface du bassin.
- Les résultats de l'expérience s'avèrent très satisfaisants (recouvrement moyen de la strate muscinale de 27 %) et prouvent que la culture de mousses brunes en bassins est une avenue possible pour les trois espèces testées.
- Le contrôle du niveau d'eau dans les bassins serait bénéfique à la croissance des mousses brunes et devrait être envisagé dans le cas de l'aménagement de nouveaux bassins.

D) Détermination du seuil de survie des mousses brunes

Problématique et contexte :

Lors des travaux de restauration, les mousses ne sont pas toujours récoltées immédiatement avant la restauration. Il arrive donc que certains lots soient empilés et entreposés pendant la saison hivernale. Aussi, le GRET entrepose fréquemment des mousses au congélateur en vue de mener des études en serre ou en laboratoire plus tard pendant l'année. Nous ne connaissons toutefois pas quelles sont les conditions et les durées maximales d'entreposage que peuvent tolérer les différentes espèces. L'objectif de cette expérience est de comparer le potentiel de régénération de trois espèces mousses brunes (le *Tomentypnum nitens*, le *Campylium stellatum* et le *Scorpidium cossonii*, les trois espèces les plus abondantes à la tourbière de Bic-Saint-Fabien) à la suite de différents traitements d'entreposage au froid.

Méthodologie :

Deux variables sont prises en compte pour cette étude sur la survie des échantillons de mousses récoltés dans les tourbières de la région de Bic-Saint-Fabien :

- 1) La température d'entreposage (-26 °C, -13 °C et -4 °C);
- 2) La date de récolte des bryophytes (printemps, été, automne).

Tous les spécimens sont, après leur entreposage sous des conditions spécifiques, mis dans des plats de Pétri, puis placés en chambre de croissance pendant dix semaines. L'évaluation de la reprise en fonction de la température et de la récolte est comptabilisée toutes les cinq semaines.

Résultats attendus :

L'expérience, qui est menée dans le cadre d'un projet d'initiation à la recherche (étudiante en biologie, 1^{er} cycle), est toujours en cours. La prise des données se terminera à la fin de mars et le rapport d'initiation à la recherche de l'étudiante sera produit en avril 2015. Les analyses statistiques auront alors été réalisées, ainsi que l'interprétation des résultats. Les résultats obtenus serviront à améliorer la méthode de restauration développée par le GRET, ainsi qu'à déterminer des méthodes d'entreposage idéales pour les mousses de fens.

5.1.2 Établissement de communautés végétales typiques des fens

Il a été démontré qu'après la fin des activités d'extraction de la tourbe, la revégétalisation des tourbières par des espèces typiques de ces milieux ne se fait pas de façon spontanée¹³. La restauration par transfert muscinal peut être une méthode efficace pour rétablir la végétation vasculaire des fens^{14, 15} mais n'assure pas le retour de toutes les espèces. Les bryophytes et certaines herbacées, telles que les *Carex*, peuvent effectivement être récalcitrantes à cette technique¹⁶. Cette section aborde la question de l'état de la revégétalisation de la tourbière à la suite des travaux de restauration, ainsi que les techniques de réintroduction des espèces à privilégier.

¹³ Lavoie, C., Grosvernier, P., Girard, M., Marcoux, K. 2003. Spontaneous revegetation of mined peatlands: an useful restoration tool? *Wetlands Ecology and Management* 11: 97-107.

¹⁴ Cobbaert, D., Rochefort, L., Price, J. S. 2004. Experimental restoration of a fen plant community after peat mining. *Applied Vegetation Science* 7: 209-220.

¹⁵ Graf, M. D., Rochefort, L., Poulin, M. 2008. Spontaneous revegetation of harvested peatlands of Canada and Minnesota, USA. *Wetlands* 28: 28-39.

¹⁶ Cooper, D. J., MacDonald, L. H. 2000. Restoring vegetation of mined peatlands in the southern Rocky Mountains of Colorado, U.S.A. *Restoration Ecology* 8: 103-111.

A) Évaluation de la survie des plantations

Problématique et contexte :

Il a été déterminé que l'introduction de plants d'espèces vasculaires est une technique efficace de rétablissement des communautés végétales dans le cadre de travaux de restauration^{17,18}. En raison des coûts élevés associés à cette technique, il importe toutefois de savoir quelles espèces performant le mieux et dans quelles conditions. Dans le cas des fens, il n'existe que peu d'information technique sur les plantations, le taux de succès prévu et les espèces à privilégier. Le GRET a donc réalisé une expérience visant à combler ces lacunes pour les espèces trouvées à Bic-Saint-Fabien et à identifier celles qui devraient être réintroduites par plantation.

Méthodologie :

En 2010, 13 espèces de plantes vasculaires indigènes de fen produites à partir de graines récoltées dans la région ont été introduites à Bic-Saint-Fabien. Les plantations ont été effectuées dans trois secteurs dispersés dans la tourbière, pour un total de 63 unités de plantations. Les conditions abiotiques (pH, conductivité électrique, température, humidité du sol) de ces secteurs sont mesurées. Depuis 2011, un suivi annuel de l'état de santé et du taux de mortalité au sein des unités de plantations de ces plantations est réalisé.

Résultats préliminaires :

Les mesures des conditions abiotiques révèlent que du point de vue microclimatique, les secteurs A et B sont semblables, tandis que le secteur C est plus sec. On suppose que les résultats d'établissement des espèces plantées pourraient être liés à ces conditions. Il est donc possible de lier des espèces avec certaines conditions où elles performant le mieux. Les résultats d'établissement des espèces par rapport aux conditions abiotiques sont présentés au Tableau 3.



Figure 7 : Plantations à la tourbière de Bic-Saint-Fabien. À gauche : réception et décompte des plants. À droite : un secteur de plantation.

¹⁷ Galatowitsch, S. M. 2012. Ecological restoration. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, Massachusetts, É.-U.

¹⁸ Cooper, D. J., MacDonald, L.H. 2000. Restoration of vegetation of mined peatland in the southern Rocky Mountains of Colorado, U.S.A. Restoration Ecology 8: 103-111.

Tableau 3 : Résultat d'établissement (2010 à 2014) des espèces introduites à Bic-Saint-Fabien, en fonction des conditions d'humidité.

Espèce	Résultat d'établissement
<i>Aster</i> sp.	Échec (toutes conditions)
<i>Carex aquatilis</i>	Succès; devient rapidement envahissant en conditions plus humides.
<i>Carex flava</i>	Succès en conditions plus sèches; échec en conditions plus humides, où il est très sensible au soulèvement gélival. Dans les secteurs soulevés, les plants semblaient toutefois présenter une reprise en 2015.
<i>Carex leptalea</i>	Échec (toutes conditions)
<i>Carex magellanica</i>	Échec (toutes conditions)
<i>Carex prairea</i>	Succès en conditions plus sèches; échec en conditions plus humides.
<i>Carex retrorsa</i>	Échec (toutes conditions)
<i>Carex rostrata</i>	Succès variable selon les conditions.
<i>Iris versicolor</i>	Succès en conditions plus sèches.
<i>Lobelia kalmii</i>	Succès; difficile au début puis reprise après 2 ans.
<i>Solidago uliginosa</i>	Succès en conditions plus humides; échec en conditions plus sèches.
<i>Trichophorum alpinum</i>	Succès (toutes conditions)
<i>Trichophorum cespitosum</i>	Succès en conditions plus sèches; échec en conditions plus humides.

Par ailleurs, des arbustes (*Sanguisorba canadensis*, *Spirea latifolia* et *Myrica gale*) ont aussi été plantés afin de stabiliser les andains¹⁹ construits lors de la restauration. Les résultats de ces introductions sont toutefois peu concluants. Les arbustes n'ont en effet pas réussi à s'établir sur les andains où ils ont été introduits. La porosité des andains (le matériel remanié y demeure relativement meuble), leur tendance à sécher plus rapidement et leur exposition au vent et au gel pendant l'hiver (certains andains sont balayés par le vent et ne sont donc pas couverts de neige pendant la période hivernale) expliquent probablement l'incapacité des arbustes à s'établir sur les andains.

Faits saillants :

- Il est possible de déterminer le type de milieu (selon les conditions abiotiques) où certaines espèces introduites auront le plus de chance de survie. Il serait donc envisageable de « prescrire » des espèces précises en fonction des conditions prévalant dans les tourbières lors de l'élaboration des plans de restauration.
- Les arbustes ne survivent pas lorsqu'introduits sur les andains, probablement parce que les conditions (température, humidité ou sécheresse...) y sont trop extrêmes.

¹⁹ Les andains sont des digues d'environ 50 cm de hauteur sur 1 m de largeur utilisées pour assurer la distribution uniforme de l'eau dans la tourbière. Ils sont normalement construits de façon à retenir l'eau dans certains secteurs et pour limiter l'érosion dans d'autres.

B) Établissement de communautés végétales de fen après la réintroduction de matériel par transfert muscinal

Problématique et contexte :

Lors des travaux de restauration à la tourbière de Bic–Saint-Fabien, quatre variantes de la méthode par transfert muscinal ont été utilisées en fonction des conditions initiales de végétation et des contraintes techniques. Cette expérience vise donc à déterminer l’effet de l’utilisation de chacune de ces techniques sur l’établissement des communautés végétales. Les parcelles étudiées seront d’ailleurs incluses au suivi pancanadien à long terme des tourbières restaurées²⁰ qui est mené par le GRET depuis près d’une vingtaine d’années.

Méthodologie :

Dans l’ensemble de la tourbière, le niveau de l’eau a été considérablement remonté en bloquant les canaux de drainage et par la construction d’andains. Cinq ans après la restauration, des inventaires de végétation ont été réalisés dans 18 parcelles distribuées dans les quatre secteurs restaurés selon des variantes de la méthode de transfert muscinal (Tableau 4). La méthode de suivi utilise le protocole d’inventaire de la végétation des parcelles permanentes, développé par le GRET pour le suivi pancanadien des tourbières restaurées. L’effort d’échantillonnage (le nombre de parcelles de 5 m par 5 m par traitement) est également présenté au Tableau 4. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d’inventaires similaires menés dans la tourbière naturelle adjacente ainsi qu’au site d’où provient le matériel utilisé lors de la restauration.

Résultats préliminaires :

VASCULAIRES : Cinq ans après les travaux de restauration, le couvert de végétation le plus abondant se trouve dans le secteur remouillé sans introduction alors que les couverts les moins importants sont observés dans les secteurs de restauration mécanisée et nivelés seulement (Figure 5). Le recouvrement en plantes vasculaires du secteur restauré à la main est quant à lui intermédiaire. Le Tableau 5 présente le recouvrement des espèces les plus abondantes dans les différents secteurs (incluant le site d’emprunt ou écosystème de référence). Certaines espèces de cypéracées présentes dans le site d’emprunt du matériel végétal ne s’établissent pas dans les sites restaurés (Tableau 5).

²⁰ Le suivi pancanadien des tourbières restaurées est un suivi réalisé par le GRET sur tous les sites restaurés par l’industrie de la tourbe selon la méthode de restauration élaborée par le groupe de recherche. Des données sur les caractéristiques des tourbières et le rétablissement de la végétation sont recueillies annuellement selon un protocole précis. Au total, plus de 500 parcelles permanentes installées dans 5 provinces canadiennes sont inventoriées dans le cadre de ce suivi et ce, depuis près de 20 ans. Les banques de données mises sur pieds dans le cadre du suivi ont donné lieu à plusieurs projet de recherche et publications, dont: González, E., Rochefort, L. 2014. Drivers of success in 53 cutover bogs restored by a moss layer transfer technique. *Ecological Engineering* 68: 279-290. Le protocole d’inventaire est aussi bien résumé dans cet article.

Tableau 4 : Distribution des 18 parcelles d'inventaire de végétation selon les méthodes de restauration à Bic–Saint-Fabien.

Secteur	Description de la méthode de restauration	Superficie (ha)	Nb de parcelles d'inventaire
Restauration mécanisée	Surface rafraîchie puis recouverte mécaniquement de matériel végétal et de paille	2,15	5
Restauration à la main	Surface rafraîchie puis recouverte à la main de matériel végétal et de paille	0,15	2
Nivelé seulement	Surface rafraîchie sans aucune introduction de matériel végétal	3,55	5
Secteur remouillé seulement	Surface non rafraîchie sans introduction de matériel végétal. La portance du sol ne permettait pas le passage de la machinerie.	4,85	5

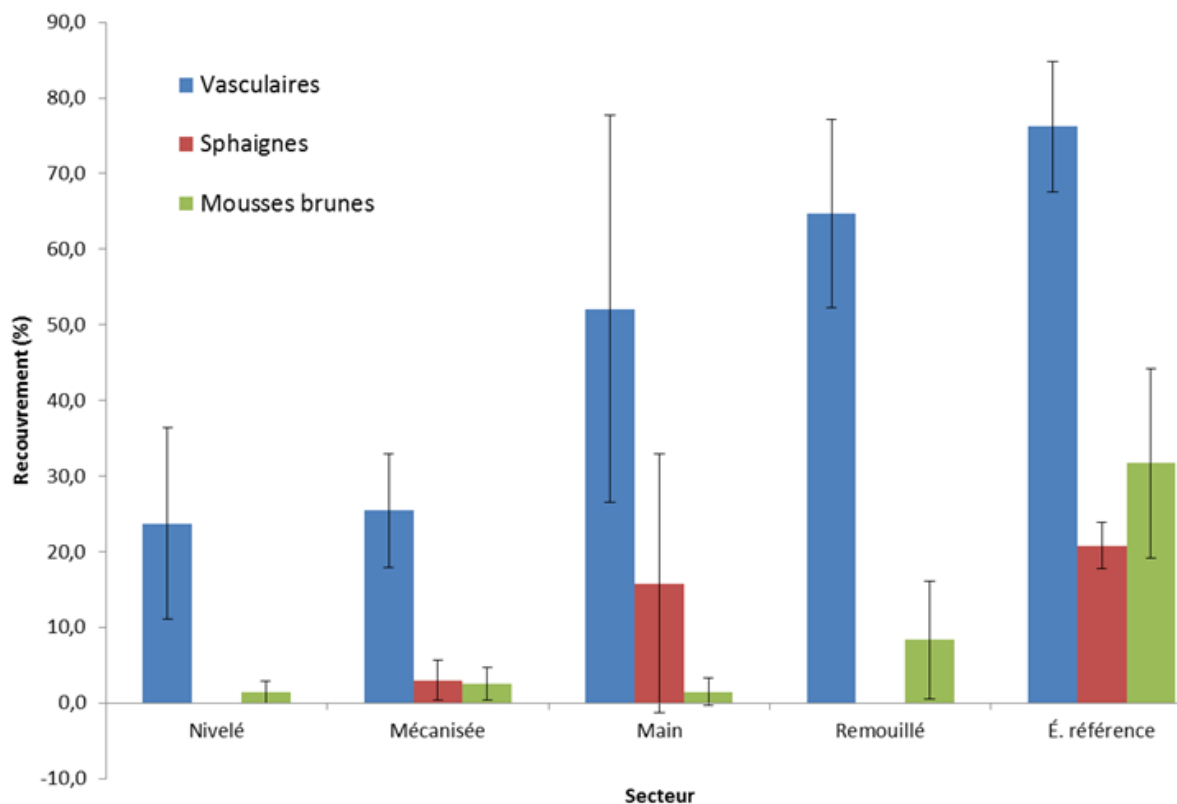


Figure 8 : Résultats des inventaires de végétation selon les types de végétation (plantes vasculaires, sphaignes et mousses brunes) et la méthode de restauration à Bic–Saint-Fabien, cinq ans après la restauration (2014).

BRYOPHYTES : Le recouvrement des mousses brunes et des sphaignes est très faible dans tous les secteurs restaurés (moins de 10 % en moyenne), sauf dans le secteur restauré à la main (près de 20 %; Figure 5). Dans tous les cas, ces recouvrements sont beaucoup plus faibles que dans l'écosystème de référence (site d'emprunt), où le recouvrement est supérieur à 40 %. On observe également que la composition en espèces des sites restaurés diffère du site d'emprunt (Tableau 5).

Tableau 5 : Recouvrement moyen (%) des espèces dominantes à la tourbière de Bic–Saint-Fabien (selon la méthode de restauration), ainsi qu'au site d'emprunt, cinq ans après la restauration.

Espèces dominantes	Site emprunt	Restauration		Nivelé sans introduction
		Mécanisée	À la main	
Vasculaires				
Total vasculaires	59	23	52	24
<i>Carex aquatilis</i>	4	0	0	10
<i>Carex lasiocarpa</i>	7	0	0	0
<i>Carex flava</i>	5	>1	0	0
<i>Eriophorum vaginatum</i>	0	0	35	4
<i>Myrica gale</i>	9	6	5	>1
<i>Sanguisorba canadensis</i>	7	5	4	>1
<i>Scirpus validus</i>	5	0	0	0
<i>Trichophorum alpinum</i>	19	6	0	>1
Invasculaires				
Total invasculaires	71	6	19	2
<i>Campylium stellatum</i>	18	0	0	0
<i>Climacium dendroides</i>	5	0	0	0
<i>Sphagnum fuscum</i>	5	0	0	0
<i>Sphagnum teres</i>	8	0	12	0
<i>Warnstorfia</i> sp.	24	0	0	0

Faits saillants :

- Le recouvrement de la végétation à la tourbière restaurée de Bic–Saint-Fabien demeure largement inférieur à celui observé dans la tourbière naturelle adjacente.
- Les recouvrements des secteurs restaurés mécaniquement et nivelés sans introduction présentent des couverts végétaux semblables. La composition en espèces est toutefois très différente entre les deux secteurs.
- Contrairement au site nivelé sans introduction de végétation, le secteur restauré mécaniquement est dominé par des espèces de plantes vasculaires qui étaient abondantes de façon importante dans le site d'emprunt.

- Plus de recherches sont nécessaires afin de comprendre pourquoi la mécanisation de la technique du transfert du tapis muscinal ne permet pas l'établissement des mousses brunes dans le site restauré.

NOTE : Les données présentées dans cette expérience ont été réanalysées dans le cadre de la préparation d'un article scientifique paru dans la revue Botany²¹. Nous suggérons d'y référer afin de connaître les plus récentes conclusions de cette étude.

²¹ Rochefort, L., M.-C. LeBlanc, V. Bérubé, S. Hugron, S. Boudreau & R. Pouliot. 2016. Reintroduction of fen plant communities on a degraded minerotrophic peatland. Botany (Primeur électronique / Section Just-in du site web de Botany, juillet 2016).

C) Compétition entre les espèces et biodiversité

Problématique et contexte :

À la suite du remouillage de la tourbière de Bic–Saint-Fabien à la fin des travaux de restauration, plusieurs espèces se sont établies spontanément. Parmi celles-ci figurent le *Scirpus cyperinus* et l'*Equisetum arvense*, des espèces qui y sont considérées envahissantes. Le GRET a mis en place d'une expérience visant deux objectifs : 1) comprendre le phénomène de compétition entre les espèces envahissantes et celles typiques des fens (*Calamagrostis canadensis*, *Carex flava* et *Scirpus acutus*), 2) évaluer si la plantation de ces espèces entraîne des effets positifs sur la biodiversité (par l'introduction d'espèces et la colonisation spontanée).

Méthodologie :

Les parcelles expérimentales ont été mises en place de juin à août 2011 (Figure 6). Dans l'ensemble, 32 parcelles de 2 m x 2 m ont été délimitées dans des secteurs de végétation homogène et où peu d'espèces étaient présentes, à l'exception des espèces envahissantes visées par l'expérience (*Equisetum arvense*, *Scirpus cyperinus* et *Typha latifolia*). La moitié de chacune des parcelles a été végétalisée par la plantation de plants d'espèces indigènes de fens. Trois ans plus tard (2014), des inventaires de recouvrement des espèces (introduites, envahissantes et introduites spontanément) ont été conduits.



Figure 9 : Inventaire d'une parcelle expérimentale sur la compétition entre des espèces envahissantes et les espèces typiques des fens à Bic–Saint-Fabien.

Résultats préliminaires :

L'analyse des résultats a montré qu'il existe une très grande variabilité entre les parcelles de cette expérience. Par exemple, malgré une densité de plantation similaire dans toutes les parcelles, le recouvrement du *C. flava* après trois saisons de croissance variait de 0 à 70 %. De façon similaire, le recouvrement de *C. canadensis* variait de 3 à 35 %. D'autre part, l'introduction de *S. acutus* (afin de compétitionner avec le *S. cyperinus*) a été un échec (recouvrement moyen de 4 %, minimum = 0 % et maximum = 15 %).

Des analyses plus poussées ont été réalisées pour les plantations de *C. flava* et *C. canadensis* en compétition avec le *E. arvense*. Dans ce cas, on n'a observé aucune variation du couvert de l'espèce indésirable, malgré un recouvrement des espèces typiques de fens environ 17 ± 12 % plus élevé (moyenne $\pm$ erreur-type) dans les parcelles avec plantations. Ni la densité initiale de *E. arvense*, ni l'espèce plantée n'ont influencé significativement les résultats.

Faits saillants :

- L'établissement des espèces typiques des fens a été très variable d'une parcelle à une autre ce qui complique l'interprétation des résultats.
- La plantation de *Carex flava* et de *C. canadensis* n'a pas permis de faire diminuer l'abondance de *E. arvense*, ni d'augmenter la biodiversité dans les parcelles avec plantations.

D) Influence des cypéracées sur l'implantation et la survie des mousses

Problématique et contexte :

La présence des plantes vasculaires herbacées au-dessus de la strate muscinale peut avoir une influence considérable sur l'établissement, la croissance ou la survie des mousses. D'un côté, les plantes herbacées peuvent créer un microclimat plus favorable à la croissance des mousses en diminuant les variations de température et d'humidité relative en plus de stabiliser le sol par leur système racinaire et de fournir un niveau d'ombre optimal. Par contre, à partir d'un certain seuil, l'ombre créée par les plantes herbacées et l'augmentation de la litière produite peuvent nuire à la croissance des mousses et éventuellement les faire disparaître. Le but de cette expérience était donc d'évaluer l'influence des cypéracées sur l'établissement des mousses dans un contexte d'établissement de communautés végétales typiques des fens lors de travaux de restauration.

Méthodologie :

Une expérience a été mise en place en juin 2012 à Bic-Saint-Fabien et les premiers inventaires ont été réalisés en 2014. Un mélange composé d'une proportion égale de quatre espèces de mousses (*Campylium stellatum*, *Scorpidium cossonii*, *Sphagnum warnstorffii* et *Tomentypnum nitens*) a été introduit sous des couverts bien établis de cypéracées (*Carex aquatilis*, *C. flava* et *Trichophorum alpinum*) pour un total de neuf parcelles. Neuf autres parcelles sans traitement (parcelles témoins : introduction de mousses sans couvert de cypéracées) ont été installées à proximité (conditions similaires). Une estimation du recouvrement des mousses et des cypéracées a été faite. De plus, la température et l'humidité relative ont été mesurées sous le couvert des cypéracées.



Figure 10 : Installation des parcelles expérimentales, été 2012.

Résultats préliminaires :

L'analyse des données des capteurs de température et d'humidité relative a démontré que, durant le jour, comparativement aux parcelles sans couvert de cypéracées, la température était légèrement plus élevée à la surface du tapis de mousses sous des couverts de *C. flava* et de *T. alpinum*, mais que l'humidité relative y était aussi un peu plus élevée. Les courbes de température étaient plutôt similaires durant la nuit. Par contre, à la surface des mousses sous un couvert de *C. aquatilis*, la température était plus haute et l'humidité relative plus basse (ou

équivalente) durant le jour (aussi durant la nuit pour l'humidité relative). Ces conclusions sont reflétées à Figure 7 (un exemple pour chaque traitement, tous dans le même bloc).

Le recouvrement de la strate muscinale est influencé par les cypéracées. Pour les deux espèces de *Carex*, le tapis de mousses s'est plus développé lorsqu'il n'y avait pas de cypéracées, mais il n'y a pas eu d'effet des cypéracées sous un couvert de *T. alpinum*. Même si les espèces de mousses ont été réintroduites en proportions égales, leur recouvrement respectif n'a pas évolué de la même manière. Ainsi, le *C. stellatum* était l'espèce la plus abondante lors de l'estimation des couverts, suivi dans l'ordre de *S. warnstorffii* et de *T. nitens* (*S. cossonii* avait presque entièrement disparu). Le recouvrement de *C. stellatum* était influencé par l'espèce de cypéracée (plus développé sous un couvert de *C. flava*) et par la présence ou non d'un couvert de cypéracées (plus développé sans cypéracée). La présence des deux espèces de *Carex* a diminué le recouvrement de *S. warnstorffii*, mais la présence de *T. alpinum* l'a favorisé. Le *T. nitens* était plus développé sans couvert de cypéracées, peu importe les espèces. Les résultats préliminaires sont présentés à la Figure 8.

Faits saillants :

- La présence de cypéracées nuit à l'établissement des bryophytes, sauf pour *Sphagnum warnstorffii* qui a semblé profiter de la présence du *Trichophorum alpinum*.
- Les conditions abiotiques semblent légèrement adaptées aux mousses (plus chaud et plus humide) sous un couvert de *Carex flava* ou de *T. alpinum*.
- Il faudrait éviter l'introduction des mousses sous les grosses cypéracées comme le *Carex aquatilis* (grandes tiges, beaucoup de litières).
- Sous de plus petites espèces comme le *C. flava* et le *T. alpinum*, les chances de succès sont meilleures (ou du moins, les mousses survivent mieux), mais les couverts de cypéracées ne doivent pas être trop grands.

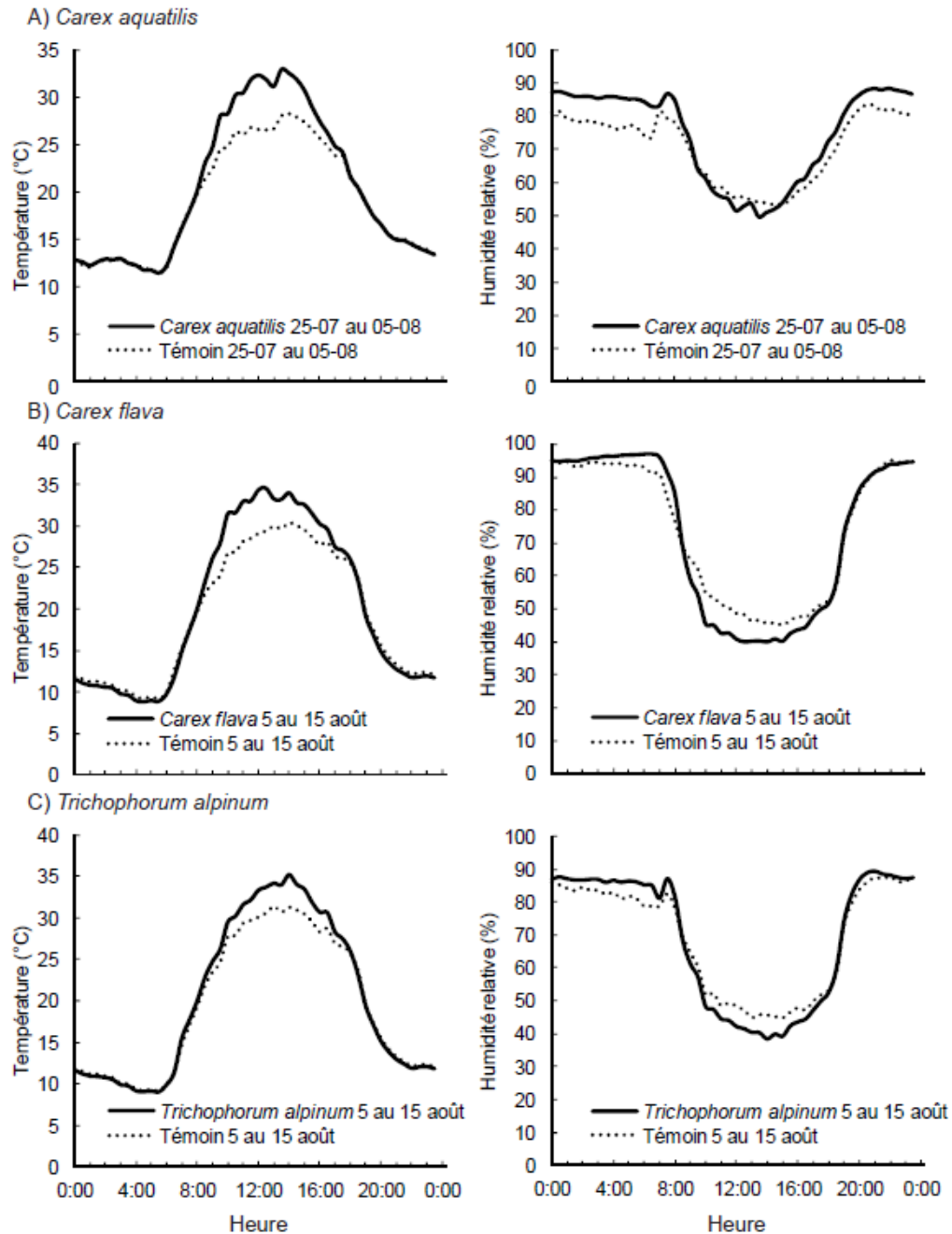


Figure 11 : Variations de la température et de l'humidité relative au niveau du tapis de mousses durant une période de 24 heures sous un couvert de : A) *Carex aquatilis*, B) *Carex flava* et C) *Trichophorum alpinum* (à Bic-Saint-Fabien). Les données sont représentées pour un des trois blocs, mais les résultats étaient similaires pour l'ensemble des blocs.

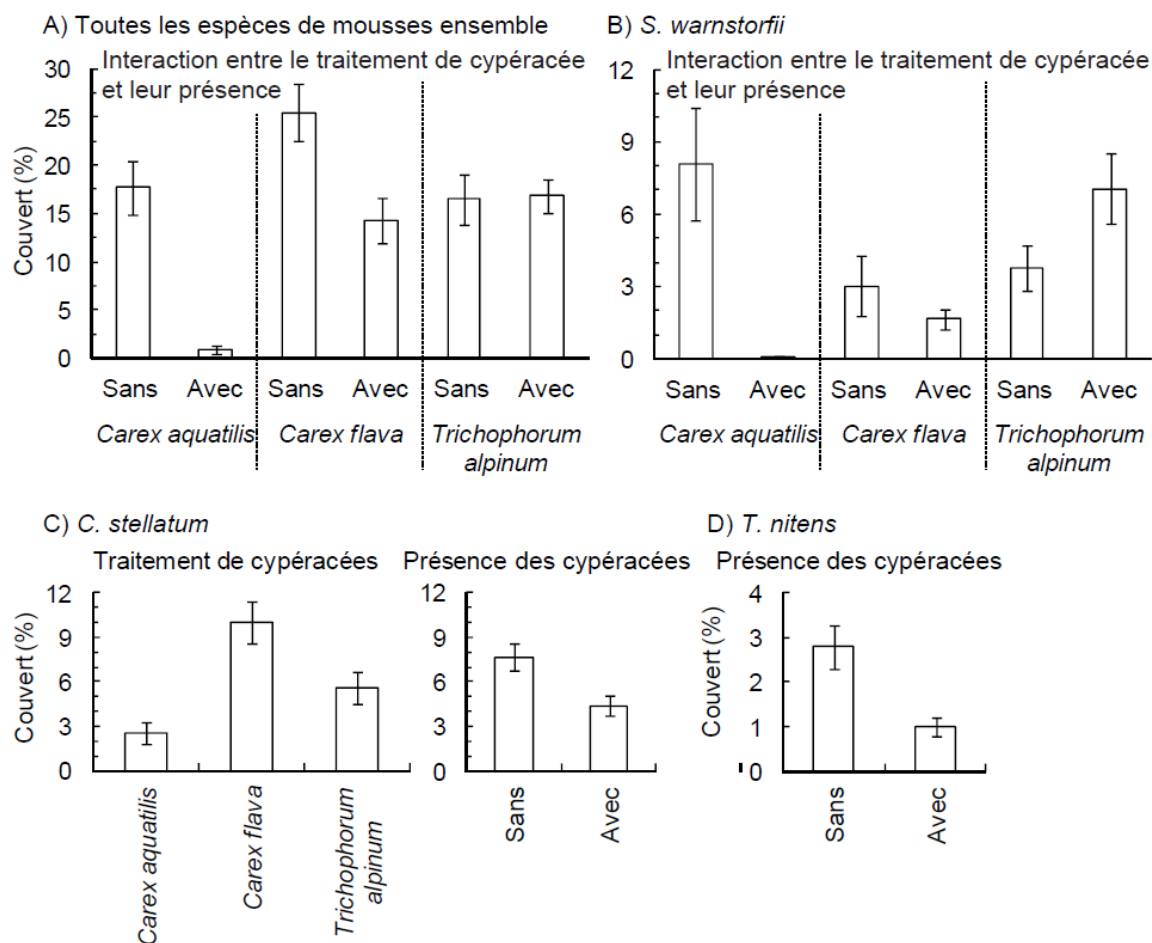


Figure 12 : Effet de la présence des cypéracées sur le couvert (moyenne $\pm$ erreur-type) des mousses. A) Pour toutes les espèces de mousses réunies, B) pour *Sphagnum warnstorffii*, C) pour *Campylium stellatum* et D) pour *Tomentypnum nitens* (à Bic-Saint-Fabien).

E) Fertilisation et chaulage des zones restaurées

Problématique et contexte :

La tourbière de Bic–Saint-Fabien a été restaurée en décembre 2009. Plusieurs variantes de la méthode de restauration par transfert muscinal ont été testées, dont l'épandage de matériel avec paille (sur 1,95 ha) et sans paille (sur 0,2 ha). Un secteur a aussi été restauré à la main (0,15 ha) en mai 2010, avec paille. Contrairement à ce qui est recommandé pour les tourbières à sphaignes, aucune fertilisation n'a eu lieu sur le site, car il a été présumé que le pH et la conductivité électrique plus élevés de la tourbe résiduelle du fen faciliteraient la recolonisation.

Il s'est toutefois avéré que les résultats de la restauration étaient hétérogènes et que le retour de la végétation était inégal par endroits à Bic–Saint-Fabien. Le soulèvement gélival a été un frein important à l'établissement des plantes dans les secteurs restaurés.

Pour les tourbières ombrotrophes, la fertilisation phosphatée qui suit les étapes de restauration permet l'établissement rapide du *Polytrichum strictum*, une bryophyte qui permet de stabiliser la tourbe^{22,23}. Le chaulage a déjà été utilisé dans des projets de restauration afin d'augmenter le pH, espérant rendre le phosphore plus disponible aux plantes colonisatrices (Emond 2013²⁴). Ainsi, le but de cette expérience est d'étudier l'effet de deux types d'amendements (fertilisation et chaulage) sur le recouvrement des plantes dans les secteurs restaurés de Bic–Saint-Fabien.

Méthodologie :

Trois amendements ont été testés :

- 1) chaux (15 g/m²);
- 2) roche phosphatée (RP) (25 g/m²);
- 3) témoin : absence de fertilisation),

dans trois secteurs restaurés : 1) restauration mécanisée sans paille, 2) mécanisée avec paille et 3) à la main). L'expérience comporte trois répétitions.

Résultats préliminaires :

Le recouvrement de la végétation est 1,8 fois plus important dans les secteurs qui ont reçu une fertilisation phosphatée, comparativement aux secteurs chaulés ou sans fertilisation (Figure 9). Cette augmentation du couvert est observée autant pour les plantes vasculaires que pour les mousses. L'effet de la fertilisation phosphatée était particulièrement marqué dans la zone de restauration mécanique sans paille. L'ajout de phosphore a favorisé particulièrement la croissance de *Bryum pseudotriquetrum*, peu importe le secteur.

²² Groeneveld, E. V. G., Massé, A., Rochefort, L. 2007. *Polytrichum strictum* as a nurse-plant in peatland restoration. Restoration Ecology 15(4): 709-719.

²³ Sottocornola, M., Boudreau, S., Rochefort, L. 2007. Peat bog restoration: Effect of phosphorus on plant re-establishment. Ecological Engineering 31: 29-40.

²⁴ Emond, C. 2013. Réhabilitation de tourbières industrielles contaminées par l'eau salée : végétation de marais salés et amendements. Mémoire de M. Sc., Département de phytologie, Université Laval, Québec. 59 p.

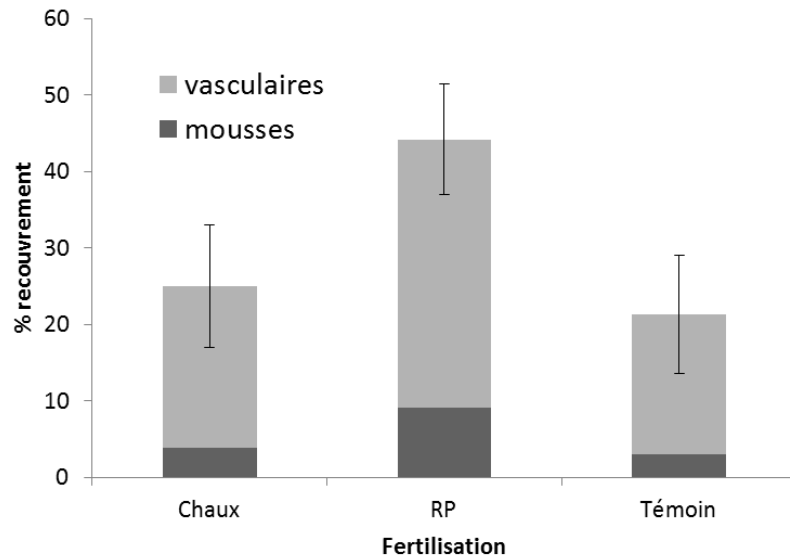


Figure 13 : Effet de la fertilisation sur le couvert de végétation (moyenne $\pm$ écart-type) à Bic-Saint-Fabien. Trois traitements de fertilisation ont été testés : 1) chaux (15 g/m^2), 2) RP : roche phosphatée (25 g/m^2) et 3) témoin : absence de fertilisation.



Figure 14 : Mise en place de l'expérience de fertilisation. Gauche : application de roche phosphatée à la main. Droite : Installation des traitements.

Faits saillants :

- La fertilisation phosphatée favorise l'établissement des plantes vasculaires et des mousses dans les secteurs restaurés.
- Le chaulage n'a aucun effet sur l'établissement de la végétation.

5.1.3 Rétablissement d'un régime hydrologique approprié

A) Bilan hydrique du site restauré

Problématique et contexte :

Lors des travaux de restauration de la tourbière de Bic–Saint-Fabien en 2009, les canaux de drainage (tracés vers 1970 pour permettre les activités d'extraction de la tourbe) ont été bloqués (Figure 10) afin de permettre la remontée du niveau de l'eau (remouillage). Les pentes du site ont aussi été atténuées à l'aide d'un réseau d'andains de façon à reconfigurer les patrons de circulation et de rétention d'eau en surface. Si ces méthodes sont celles recommandées pour le remouillage des bogs^{25,26}, elles n'avaient toutefois pas encore été expérimentées pour le rétablissement de l'hydrologie des fens. Dans les tourbières en restauration, la disponibilité en eau peut contrôler la recolonisation par les bryophytes²⁷ et les plantes vasculaires et peut avoir un effet sur le phénomène de soulèvement gélival^{28,29}. Les flux des gaz à effet de serre sont aussi étroitement liés à la position de la nappe phréatique³⁰. Il importe donc de savoir si la méthode de rétablissement de l'hydrologie utilisée (création d'andains, blocage des canaux de drainage) est adaptée à la restauration des fens.

Méthodologie :

Chaque été, depuis 2008, des analyses chimiques de l'eau (mensuellement) ainsi que des mesures du niveau d'eau (hebdomadairement) sont réalisées dans 46 stations d'échantillonnage réparties sur l'ensemble de la tourbière, ainsi que dans la tourbière naturelle adjacente. Des mesures de contenu en eau du sol ont aussi été prises pendant l'année 2011.

²⁵ Quinty, F., Rochefort, L. 2003. Guide de restauration des tourbières, 2^e éd. Association canadienne de mousse de sphaigne et Ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick. Québec, Québec. 119 p.

²⁶ Landry, J., Rochefort, L. 2011. Le drainage des tourbières : impacts et techniques de remouillage. Groupe de recherche en écologie des tourbières, Université Laval, Québec, 53 p.

²⁷ Campeau, S, Rochefort, L., Price, J. S. 2004. On the use of shallow basins to restore cutover peatlands: Plant establishment. *Restoration Ecology* 12(4): 471-482.

²⁸ Groeneveld, E. 2002. Le *Polytrichum strictum* comme stabilisateur de substrat et plant compagne pour les sphaignes dans la restauration des tourbières exploitées par aspirateur. Mémoire de maîtrise, Département de Phytologie, Université Laval, Sainte-Foy, Québec.

²⁹ Groeneveld, E., 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.

³⁰ Waddington, J. M., Price, J. S. 2000. Effect of peatland drainage, harvesting, and restoration on atmospheric water and carbon exchange. *Physical Geography* 21: 433-451.



Figure 15 : Rétablissement de l'hydrologie à la tourbière de Bic-Saint-Fabien. À gauche : blocage initial des canaux de drainage en mars 2010. À droite : construction de barrages afin de bloquer l'eau des canaux de drainage en juillet 2010.

Résultats préliminaires :

Selon les données d'hydrologie analysées par l'étudiante-chercheuse Shannon Malloy dans le cadre de son mémoire de maîtrise³¹, les méthodes de remouillage utilisées à Bic-Saint-Fabien ont permis de faire monter le niveau d'eau dans la tourbière restaurée tout en diminuant les variations de celui-ci. Dans les bases de données analysées par Mme Malloy, la différence moyenne de position de la nappe phréatique (distance à la surface du sol) entre les secteurs restaurés et non restaurés était de 17 cm avant la restauration et de 2,2 cm après. La poursuite de la prise de données d'hydrologie à long terme permettra de suivre les changements du régime hydrique dans la tourbière.

Faits saillants :

- Entre 2008 et 2011, la restauration a permis de remonter le niveau de la nappe phréatique et d'en atténuer les variations intrasaisonnières dans le secteur restauré.
- L'utilisation des andains et le blocage des canaux de drainage sont des méthodes efficaces de restauration de l'hydrologie des fens.

³¹ Malloy, S., Price, J. S. 2014. Fen restoration on a bog harvested down to sedge peat: A hydrological assessment. *Ecological Engineering* 64: 151-160.

B) Contrôle de l'érosion

Problématique et contexte :

L'un des problèmes rencontrés lors de la restauration des tourbières et tout particulièrement celle des fens est l'érosion du substrat récemment nivelé^{32,33} et remouillé. Comme les fens reçoivent des apports en eau non seulement par les précipitations, mais aussi par le milieu environnant, le ruissellement peut y être important, surtout lorsque le terrain comprend des zones de pentes fortes. Lors des travaux de restauration de la tourbière de Bic-Saint-Fabien, des andains ont été construits de façon à suivre les contours topographiques et former des terrasses afin de distribuer également l'eau dans la tourbière, tout en créant des obstacles visant à ralentir sa circulation à travers la tourbière. L'utilisation des andains s'est révélée une méthode très efficace de remouillage³² (voir section 5.1.3 A). Toutefois, quelques andains ont cédé lors des premiers dégels printaniers, entraînant des problèmes de nature, de taille et d'importance diverses.

Méthodologie :

Pendant l'été 2012, un système d'évaluation et de suivi des secteurs d'érosion a été élaboré. Au total, 27 sites à problèmes ont été décrits et évalués. Des actions de correction ont été entreprises en utilisant quatre techniques principales inspirées de l'éco-ingénierie. Les sites ont été évalués à nouveau après un et deux ans pour déterminer le succès ou l'échec des interventions. Les quatre techniques utilisées sont (Figure 11) :

- La plantation d'herbacées (*Carex flava* et *Carex aquatilis*) en amont et en aval de la zone érodée;
- L'installation de boudins de bois raméal fragmenté couvert de jute (normalement utilisés pour la filtration des eaux sur les chantiers de construction);
- L'introduction de fagots végétaux (construits en attachant des branches cueillies dans la tourbière). Espèces testées : *Spirea latifolia* et *Salix* sp.;
- L'introduction de boutures d'arbustes, à la verticale. Espèce testée : *Myrica gale*.

³² Malloy, S., Price, J. S. 2014. Fen restoration on a bog harvested down to sedge peat: A hydrological assessment. *Ecological Engineering* 64: 151-160.

³³ Graf, M. D., Bérubé, V., Rochefort, L. 2012. Restoration of peatlands after peat extraction: Impacts, restoration goals, and techniques. P. 259-280 dans Vitt, D. H. & J. S. Bhatti (éd.), *Restoration and Reclamation of Boreal Ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.



Figure 16 : Méthodes de contrôle de l'érosion utilisées à Bic-Saint-Fabien. En haut, à gauche : plantations d'herbacées. En haut, à droite : boudins de bois raméal fragmenté. En bas, à gauche : fagots d'arbustes. En bas, à droite : boutures d'arbustes.

Résultats :

Des 27 sites identifiés en 2012 et corrigés, seuls huit ont nécessité des actions supplémentaires après un an et aucune autre correction additionnelle n'a été requise après deux ans. De nouveaux secteurs à problèmes ont toutefois été identifiés et les anciens devront faire l'objet d'un suivi attentif dans les prochaines années. Voici les observations générales issues de ces travaux :

- **Plantation d'herbacées :** Les populations s'établissent difficilement en raison du ruissellement et du soulèvement gélival (surtout le *C. flava*). Méthode à utiliser à titre préventif ou dans les secteurs où le ruissellement n'est pas trop important (incision du matériel < 10 cm de profondeur). Privilégier le *Carex aquatilis* (plante robuste, qui s'implante bien en milieu humide) ou tester d'autres espèces.
- **Boudins de bois raméal fragmenté :** Les boudins colmatent les brèches dans les andains et les renforcent efficacement. Toutefois, leur effet est temporaire (une ou deux saisons au maximum avant de se désintégrer) : ils ne permettent donc pas à eux seuls de régler les problèmes d'érosion. En les utilisant avec d'autres techniques (notamment de végétalisation), ils deviennent toutefois beaucoup plus efficaces, puisque les végétaux ont le

temps de bien s'établir avant la désintégration des boudins pour stabiliser le sol et empêcher l'érosion autour et sous les boudins.

- Fagots de végétaux : Utilisés dans les secteurs où le ruissellement est causé par la pente ou pour colmater les brèches des andains. Les fagots permettraient de réintroduire des espèces tout en stabilisant le sol. Ainsi, le *Spirea latifolia* et le *Salix* sp. ont permis de créer des obstacles empêchant l'eau qui s'écoule rapidement d'inciser la surface de la tourbière. Ils ont aussi été utilisés avec succès afin de stabiliser le bas d'andains fragiles, parfois où des boudins avaient été installés. La spirée a démontré des résultats particulièrement probants, alors que le saule a démontré parfois moins de vigueur et une reprise plus difficile. La période de récolte des tiges pourrait être en cause.
- Introduction d'arbustes : Les introductions d'arbustes visent à créer des obstacles ralentissant l'eau et à la faire circuler horizontalement plutôt qu'en circulant rapidement en incisant la surface du sol. Cette méthode a été évaluée dans des secteurs où les incisions sont peu profondes (< 10 cm) et où les problèmes d'érosion concernaient plutôt la déposition de matériel dans la zone située en aval. Les introductions de myrique démontrent des résultats variables. Après une première année, les plants semblaient majoritairement morts. Toutefois, une reprise a été notée pendant la deuxième année. Un suivi devrait être effectué dans le futur. Des tests sur la période idéale d'introduction des plants devraient aussi être réalisés. Par ailleurs, les lisières d'arbustes ont bien rempli leur fonction et ralenti la circulation rapide de l'eau.

Faits saillants :

- La fabrication et l'utilisation des fagots d'arbustes indigènes afin de contrer les problèmes d'érosion présentent des résultats très concluants. Cette technique devrait être intégrée aux travaux de restauration; ils pourraient être installés dès les travaux de restauration initiaux dans certains endroits où une plus grande quantité d'eau circule.
- Une fois peaufinée, la méthode utilisant des boutures de myrique baumier pourrait être prometteuse pour stabiliser le sol, sédimenter le matériel et ralentir l'eau en circulation.

5.1.4 Retour de la fonction d'accumulation de carbone

Problématique et contexte :

L'un des objectifs principaux de la restauration des tourbières est le rétablissement de la capacité de stockage du carbone dans la tourbière. Dans cette optique, l'équipe de Mme Maria Strack, collaboratrice du GRET de l'Université de Calgary, s'intéresse aux échanges de dioxyde de carbone et de méthane dans les tourbières restaurées, abandonnées après les activités d'extraction de la tourbe et naturelles. Dans le cadre de son projet de maîtrise, l'étudiante-chercheuse Golnoush Hassanpour Fard a caractérisé la balance de carbone au site de Bic–Saint-Fabien. Elle a aussi étudié l'effet de différentes communautés végétales de fen sur les échanges gazeux dans la tourbière.

Méthodologie :

Pendant les étés 2011 et 2012, les flux de gaz à effet de serre ont été mesurés dans différentes communautés végétales à Bic–Saint-Fabien. Ces communautés différaient en termes d'espèces (monocultures), de nombre de taxons (polycultures) et de types d'assemblages (interaction entre les espèces des polycultures).

Résultats préliminaires (articles scientifiques en préparation) :

Les résultats de ce projet³⁴ démontrent que la diversité végétale n'aurait pas d'effet sur la capacité de stockage du carbone. Par contre, certaines espèces auraient la capacité de faire basculer les bilans vers une captation du carbone plutôt que d'émettre des gaz à effet de serre. Les émissions moyennes de huit espèces végétales typiques (vasculaires et muscinales) des fens cultivées en monocultures ont été mesurées : *Carex aquatilis*, *Calamagrostis canadensis*, *Campyllum stellatum*, *Sphagnum warnstorffii*, *Trichophorum alpinum*, *Trichophorum cespitosum*, *Tomentypnum nitens* et *Myrica gale*. Parmi celles-ci, seul le *Carex aquatilis* démontre une capacité à séquestrer le carbone. Aucun lien entre le nombre d'espèces (richesse) d'une communauté végétale et le bilan de carbone n'a pu être détecté.

En ce qui concerne l'ensemble du site de Bic–Saint-Fabien, le secteur restauré présente des flux de méthane (CH₄) inférieurs aux taux normalement observés dans les tourbières nordiques. Ceci pourrait être expliqué par les conditions abiotiques du site. En 2011 et 2012, les échanges de carbone mesurés ont prouvé que le secteur restauré n'est pas une source de méthane.

Faits saillants :

- La diversité végétale (nombre d'espèces par communauté végétale) n'influence pas directement la capacité de stockage du carbone de la tourbière.
- Certaines espèces, dont le *Carex aquatilis*, ont toutefois la capacité de capter plus de carbone qu'elles en émettent.
- Des prescriptions prenant en compte des capacités de stockage du carbone de certaines espèces pourraient être intégrées aux plans de restauration des tourbières lorsque le rétablissement de la fonction d'accumulation de carbone est un objectif important.

³⁴ Hassanpour Fard, G. 2014. Carbon dynamics in extracted minerotrophic peatlands: An analysis of the effect of plant biodiversity. Thèse de M.Sc., University of Calgary, Calgary, Alberta. 173 p.

5.1.5 Biodiversité des arthropodes des mares de tourbières naturelles, restaurées et non restaurées

Problématique et contexte :

Dans les tourbières naturelles, les mares sont des habitats qui contribuent largement à la biodiversité^{35,36}. Leur création est parfois intégrée aux techniques de restauration des tourbières, mais les aspects plus techniques de leur aménagement demeurent toujours à parachever^{37,38}. Les arthropodes sont des indicateurs écologiques avantageux, car ils sont diversifiés et abondants, ils occupent une multitude de niches écologiques et répondent rapidement aux changements environnementaux³⁹. Dans cette optique, l'étudiant à la maîtrise André-Philippe Drapeau Picard a entrepris un projet de recherche sur le suivi des macro-invertébrés à la tourbière de Bic-Saint-Fabien au printemps 2013 (Figure 12). Son étude vise à déterminer l'influence de la végétation introduite aux abords des mares, ainsi que de la profondeur de ces dernières sur le retour et la biodiversité des arthropodes. Pour ce faire, les dytiques (Coleoptera : Dytiscidae) et les araignées (Araneae) ont été échantillonnés en 2013 et 2014 dans la tourbière de Bic-Saint-Fabien, ainsi que dans quatre tourbières naturelles (non perturbées) des environs (écosystèmes de référence).

Méthodologie :

En 2010, 15 mares ont été creusées dans la tourbière de Bic-Saint-Fabien, certaines étant profondes (environ 1 m de profondeur) et d'autres peu profondes (environ 30 cm). En 2010, les berges des mares du secteur restauré de la tourbière de Bic-Saint-Fabien ont été revégétalisées en y établissant l'un des cortèges floristiques suivants : 1) plantations d'arbustes, 2) plantations d'herbacées graminoides et 3) tapis de mousses. En 2013, six nouvelles mares ont été creusées, mais aucune végétation n'a été introduite sur leurs berges.

En 2013 et 2014, les arthropodes ont été échantillonnés à l'intérieur et autour de 21 mares de la tourbière de Bic-Saint-Fabien et de 16 mares de tourbières naturelles. Pour l'échantillonnage des dytiques, des nasses⁴⁰ étaient déposées au fond des mares et vidées 24 heures plus tard. Pour les araignées, six pièges-fosses ont été posés autour de chaque mare et laissés en place pendant quatre semaines. Le périmètre et la profondeur des mares ont été mesurés et la

³⁵ Fontaine, N., Poulin, M., Rochefort, L. 2007: Plant diversity associated with pools in natural and restored peatlands. *Mires and Peat* 2: Art. 6.

³⁶ Rosenberg, D. M., Danks, H. V. 1987. Aquatic insects of peatlands and marshes in Canada: Introduction. *Memoirs of the Entomological Society of Canada* 119: 1-4.

³⁷ Mazerolle, M., Poulin, M., Lavoie, C., Rochefort, L., Desrochers, A., Drolet, B. 2006. Animal and vegetation patterns in natural and man-made bog pools: implication for restoration. *Freshwater Biology* 51: 333-350.

³⁸ Landry, T., Rochefort, L., Poulin, M. 2012. Impact of seedbed and water level on the establishment of plant species associated with bog pools: implications for restoration. *Native Plants Journal* 13(3): 205-215.

³⁹ Kremen, C., Colwell, R. K., Erwin, T. L., Murphy, D. D., Noss, R. F., Sanjayan, M. A. 1993. Terrestrial arthropod assemblages: Their use in conservation planning. *Conservation Biology* 7(4): 796-808.

⁴⁰ Les nasses sont des pièges utilisés entre autres pour l'échantillonnage d'insectes aquatiques. Leur fonctionnement est semblable aux casiers à homards: les insectes peuvent entrer par une ouverture mais ne peuvent en ressortir. Le piège, composé d'une structure de métal recouverte d'un filet à petites mailles, est déployé dans l'eau puis repêché pour récupérer les organismes.

végétation autour de celles-ci a été inventoriée. L'humidité du substrat et la luminosité au sol ont aussi été mesurées autour des pièges-fosses⁴¹.



Figure 17 : Mares de Bic-Saint-Fabien. À gauche : inventaires de macro-invertébrés aquatiques. À droite : suivi de la végétation aux abords des mares.

Résultats préliminaires :

Au total, 418 dytiques et 4 205 araignées identifiables à l'espèce ont été récoltés. Les dix espèces les plus abondantes apparaissent au Tableau 6. Ces inventaires montrent que la tourbière restaurée de Bic-Saint-Fabien est déjà recolonisée par plusieurs espèces de milieux humides et de tourbières. En comparant les assemblages d'araignées et de dytiques de la tourbière restaurée à ceux des sites de référence, il est possible d'affirmer que plusieurs taxons se trouvent à la fois dans les deux milieux, quoique leur abondance diffère. La tourbière restaurée compte plus d'espèces d'araignées que les milieux naturels, dont plusieurs sont généralistes ou associées aux perturbations.

L'analyse fine des données est toujours en cours, mais les résultats préliminaires permettent de poser un constat positif de l'effet de la restauration sur la diversité des arthropodes de tourbières. En général, les communautés sont plus abondantes et plus diversifiées autour des mares où des végétaux ont été introduits comparativement à celles qui n'ont pas été revégétalisées. Aux mares entourées de tourbe nue sont principalement associées des espèces généralistes. De la même façon, les communautés d'espèces trouvées autour des mares végétalisées sont aussi composées de plus d'espèces généralistes que celles des écosystèmes de référence. La présence de ces espèces s'explique en partie par la proximité de terres agricoles autour de la tourbière et parce que le milieu est encore en phase de transition après les travaux assez récents de restauration. Il serait donc pertinent de répéter ces inventaires dans le futur (p. ex. dans trois ou quatre ans) pour connaître la trajectoire écologique des communautés d'arthropodes.

⁴¹ Les pièges-fosses sont des récipients insérés dans le sol, dans lesquels est versé un liquide de préservation (dans notre cas : l'éthylène-glycol (antigel) puisqu'il s'évapore très lentement). Les insectes tombent dans la fosse où ils sont trappés puis récupérés intacts par la suite. Les pièges-fosses permettent l'échantillonnage des insectes terrestres.

Tableau 6 : Comparaison des 10 espèces d'araignées et de dytiques les plus abondantes dans la tourbière restaurée de Bic–Saint-Fabien et dans les tourbières naturelles (écosystèmes de référence, n= 4).

Tourbière restaurée		Tourbières naturelles	
Espèces	Nb	Espèces	Nb
Araignées			
<i>Pardosa moesta</i>	580	<i>Pirata insularis</i> ³	489
<i>Pirata minutus</i> ¹	403	<i>Pardosa moesta</i>	299
<i>Pardosa milvina</i>	355	<i>Arctosa raptor</i>	118
<i>Pirata piraticus</i> ¹	252	<i>Pirata piraticus</i> ¹	97
<i>Pardosa fuscula</i>	208	<i>Gramonota gigas</i>	80
<i>Pardosa xerampelina</i>	202	<i>Oedothorax trilobatus</i>	72
<i>Trochosa ruricola</i> ²	74	<i>Gnaphosa parvula</i>	50
<i>Erigone dentigera</i>	68	<i>Walckenaeria spiralis</i>	44
<i>Pirata insularis</i> ³	61	<i>Pardosa fuscula</i> ¹	43
<i>Gnaphosa parvula</i>	58	<i>Trochosa ruricola</i> ²	38
Dytiques			
<i>Colymbetes sculptilis</i>	225	<i>Colymbetes sculptilis</i>	28
<i>Ilybius biguttulus</i>	34	<i>Acilius semisulcatus</i>	19
<i>Rhantus binotatus</i>	16	<i>Laccornis conoideus</i>	3
<i>Acilius semisulcatus</i>	14	<i>Rhantus binotatus</i>	3
<i>Ilybius discolor</i>	12	<i>Ilybius pleuriticus</i>	2
<i>Agabus confinis</i>	11	<i>Acilius medius</i>	1
<i>Ilybius pleuriticus</i>	9	<i>Agabus confinis</i>	1
<i>Dytiscus verticalis</i>	7	<i>Colymbetes paykulli</i> ⁴	1
<i>Colymbetes dolabratus</i>	3	<i>Dytiscus verticalis</i>	1
<i>Agabus immaturus</i>	2	<i>Hydaticus aruspex</i>	1

¹ Araignée associée aux milieux humides⁴²

² Espèce envahissante⁴³

³ Araignée associée aux tourbières⁴⁴

⁴ Dytique associé aux tourbières⁴⁵

Faits saillants :

- Lorsque la décision est prise de recréer des mares dans un projet de restauration de tourbières, il est recommandé de revégétaliser les abords de mares avec une végétation typique de bordure de mares, car on augmente ainsi grandement sa fonctionnalité⁴⁶.

⁴² Dondale, C. D., Redner, J. H. 1990. The insects and arachnids of Canada, part 17: The Wolf Spiders, Nurseryweb Spiders, and Lynx Spiders of Canada and Alaska. Biosystematic Research Center, Ottawa. 382 p.

⁴³ Paquin, P., Duperré, N. 2003. Guide d'identification des Araignées du Québec. Fabriques, Supplément 11. 251 p.

⁴⁴ Dondale, C. D., Redner, J. H. 1990. The insects and arachnids of Canada, part 17: The Wolf Spiders, Nurseryweb Spiders, and Lynx Spiders of Canada and Alaska. Biosystematic Research Center, Ottawa. 382 p.

⁴⁵ Larson, D. J., Alarie, Y., Roughley, R.E. 2000. Predacious diving beetles (Coleoptera: Dytiscidae) of the Nearctic region, with emphasis on the fauna of Canada and Alaska. NRC Research Press, Ottawa. 982p.

5.1.6 Préservation de l'intégrité de la tourbière naturelle adjacente

La restauration des tourbières n'a pas pour seul avantage de reconstituer un écosystème fonctionnel. Elle peut aussi contribuer à assurer la pérennité des ressources biologiques et des fonctions écologiques des parcelles de tourbières adjacentes aux terrains restaurés qui n'ont pas été utilisées à des fins industrielles, mais qui sont néanmoins affectées par le drainage des parcelles en exploitation. Il est toutefois difficile de démontrer la réelle efficacité des mesures de restauration quant à la préservation de l'intégrité écologique des parcelles naturelles périphériques.

La restauration de la tourbière de Bic-Saint-Fabien offre une excellente opportunité à cet égard. La zone anciennement perturbée par l'activité industrielle (et maintenant restaurée) est bordée par une tourbière naturelle, non perturbée, sur ses côtés nord et est (Figure 13). Le GRET et ses collaborateurs ont donc constitué une banque de données sur la tourbière naturelle adjacente au site restauré de façon à caractériser l'écosystème et à effectuer un suivi en vue d'étudier les changements qui pourraient s'y produire.

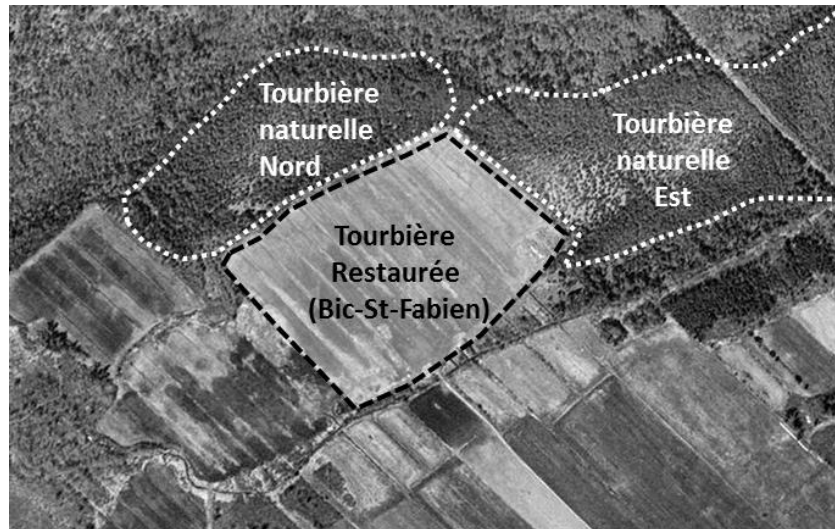


Figure 18 : Localisation approximative des deux secteurs de tourbière naturelle adjacente à la tourbière restaurée de Bic-Saint-Fabien : secteurs est et nord.

En parallèle à l'amélioration des connaissances des fragments naturels adjacents, plusieurs fens naturels de la région ont été recensés afin de bâtir une référence d'écosystèmes de fen de la région du Bas-Saint-Laurent. Pour les assemblages végétaux, l'hydrologie, la décomposition, la productivité des arbres, des plantes vasculaires et des bryophytes, les données proviennent du projet de doctorat de Vicky Bérubé. Pour les arthropodes, elles sont issues du projet de maîtrise d'André-Philippe Drapeau Picard. Tous ces renseignements sont colligés dans un document produit par le GRET⁴⁷.

⁴⁶ Fontaine, N., Poulin, M., Rochefort, L. 2007: Plant diversity associated with pools in natural and restored peatlands. *Mires and Peat* 2: Art. 6.

⁴⁷ Groupe de recherche en écologie des tourbières (2016). *Tourbières minérotrophes naturelles d'intérêt écologique du Bas-Saint-Laurent*. Groupe de recherche en écologie des tourbières, Université Laval, Québec. 59 pages.

A) Caractérisation et suivi de la composition chimique de l'eau de la tourbière naturelle adjacente

Problématique et contexte :

L'échantillonnage de l'eau pour l'analyse de la composition chimique est effectué depuis 2008 dans la tourbière naturelle adjacente au site restauré de Bic-Saint-Fabien. La base de données ainsi générée permet entre autres d'étudier l'évolution de la tourbière et les incidences des activités de restauration.

Méthodologie :

Chaque année, des prélèvements d'eau sont faits dans des puits (9 puits en 2008 et 2009; 12 puits à partir de 2010) cinq fois par année pour obtenir des données de pH, de conductivité et de composition chimique (Figure 14). Le niveau d'eau de ces mêmes puits est aussi mesuré hebdomadairement. En 2013 et 2014, des mesures supplémentaires ont aussi été prises dans la cédrière située au nord du site restauré afin de caractériser plus finement ce secteur (voir section 5.1.6 D).



Figure 19 : Suivi de l'hydrologie. À gauche : échantillonnage de l'eau dans la tourbière naturelle située à l'est du secteur restauré de Bic-Saint-Fabien. À droite : puits hydrologiques dans la cédrière située au nord.

Résultats préliminaires :

L'observation des résultats de pH obtenus depuis 2008 démontre que des variations intrasaisonnières ont lieu dans les secteurs naturels de Bic-Saint-Fabien, mais que les valeurs se situent généralement entre 5 et 7, des valeurs typiques pour les fens. Aucune variation drastique de pH n'a été observée après la restauration réalisée en décembre 2009. Les analyses de pH indiquent que le secteur naturel de Bic-Saint-Fabien n'a pas subi de perturbations majeures depuis 2008. La mesure de ces conditions sera poursuivie dans les prochaines années dans le cadre du suivi de la tourbière, afin d'identifier si des variations importantes surviennent, ainsi que pour déterminer la trajectoire de l'écosystème restauré.

B) Caractérisation et suivi de la végétation de la tourbière naturelle adjacente au secteur restauré de Bic–Saint-Fabien

Problématique et contexte :

Tout comme c'est le cas de la mesure des caractéristiques hydrologiques, la végétation de la tourbière naturelle adjacente au secteur restauré doit faire l'objet d'un suivi attentif afin de détecter les changements qui pourraient y survenir comme : le retour de plantes de sous-bois plus typiques des fens à la suite de la restauration de la tourbière perturbée, des changements drastiques des assemblages végétaux, la disparition de certaines espèces, l'arrivée de plantes envahissantes, etc.

Méthodologie :

Pendant l'été 2014, six parcelles de suivi de la végétation ont été installées dans les secteurs naturels adjacents à la tourbière restaurée (trois parcelles au nord et trois parcelles à l'est). Chacune des parcelles comprend quatre sous-parcelles d'inventaire de végétation vasculaire et douze pour la végétation muscinale⁴⁸. Les résultats des inventaires serviront de base afin de suivre l'évolution de la végétation du secteur naturel de la tourbière.

Résultats préliminaires :

La composition des communautés végétales des secteurs naturels nord et est présente des proportions semblables de plantes vasculaires, de sphaignes et de mousses brunes (Figure 15), mais les espèces retrouvées dans chacun des secteurs diffèrent grandement. Par ailleurs, les deux secteurs naturels présentent une bonne intégrité écologique, sauf pour la bordure de 5 à 10 m qui est fortement dense en arbres. Le secteur naturel situé à l'est de la zone restaurée est une tourbière arbustive relativement ouverte, alors que dans le secteur naturel situé au nord la canopée est beaucoup plus dense. Dans les deux secteurs, le *Thuja occidentalis*, le *Myrica gale* et les sphaignes (*Sphagnum rubellum* et *Sphagnum warnstorffii*) sont dominants. Dans le secteur est, on observe une plus grande variété de plantes vasculaires et on y trouve notamment le *Larix laricina*, le *Trichophorum cespitosum* et le *Menyanthes trifoliata*. Au niveau de la strate muscinale, en plus des sphaignes, on trouve en abondance dans le secteur nord le *Rhytiadelphus triquetra* et le *Pleurozium schreberi*, alors que dans le secteur est, les espèces les plus fréquemment observées sont le *Campylium stellatum*, le *Tomentypnum nitens* et le *Scorpidium cossonii*.

L'examen des résultats d'inventaires révèle aussi que les communautés végétales du secteur naturel de la tourbière ne sont pas menacées par la présence d'espèces rudérales⁴⁹ ou envahissantes. Une attention particulière devrait être portée à ces espèces. Les changements observés dans les communautés devraient aussi être suivis attentivement.

Par ailleurs, un herbier de référence des plantes typiques des fens de la région de Bic–Saint-Fabien a été mis sur pied pendant l'été 2013. L'herbier contient près de 150 espèces de plantes

⁴⁸ Effort d'échantillonnage décrit dans : González, E., Rochefort, L., Boudreau, S., Poulin, M. 2014. Combining indicator species and key environmental and management factors to predict restoration success. *Ecological Indicators* 46: 156-166.

⁴⁹ Les espèces rudérales sont celles associées aux milieux perturbés par l'Homme, tels que les friches, les abords des routes ou les terrains vagues.

vasculaires et de bryophytes, dont plusieurs ont été récoltées dans la portion naturelle de la tourbière de Bic–Saint-Fabien. Un tel recueil constitue un précieux document de référence et d’enseignement pour l’étude des fens et facilitera les inventaires dans ces écosystèmes. L’herbier a été bonifié en 2014 par l’ajout de nouveaux spécimens et continuera à l’être dans le futur si des espèces additionnelles sont trouvées. Éventuellement, la collection sera déposée à l’herbier Louis-Marie de l’Université Laval (QFA).

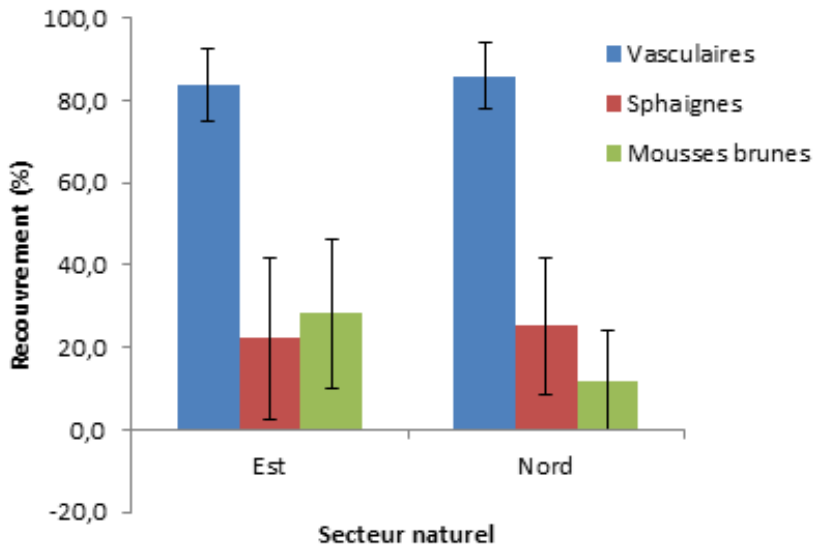


Figure 20 : Composition de la portion naturelle de la tourbière de Bic–Saint-Fabien, par type de végétation (secteurs est et nord).

Faits saillants :

- Bien que les deux secteurs soient visuellement différents, le portrait global est le même par strate : les strates arborescentes, arbustives et muscinales sont des composantes dominantes de l’écosystème.
- Les bordures se sont fortement densifiées à la suite du drainage dans les premiers 5 à 10 mètres des secteurs naturels. La dominance des espèces diffère grandement entre les deux secteurs, mais celles-ci demeurent des espèces typiquement rencontrées dans les fens.
- Il y a absence d’espèces rudérales ou envahissantes qui sont généralement trouvées dans les écosystèmes perturbés.

C) Suivi annuel du cyripède royal (*Cypripedium reginae*)

Problématique et contexte :

Il est probable que les fossés de drainage creusés dans la tourbière pendant sa période d'utilisation à des fins industrielles aient affecté de manière sérieuse l'hydrologie de l'ensemble du site, incluant les secteurs naturels adjacents. Les plantes de la tourbière peuvent éprouver des problèmes à maintenir des populations viables en raison d'un approvisionnement en eau déficient, dont l'effet peut être amplifié par une croissance accélérée des arbres qui poussent mieux en conditions sèches dans les tourbières^{50,51}.

M. Claude Lavoie, chercheur associé au GRET, pose l'hypothèse que la perturbation des tourbières à des fins industrielles a des conséquences sur les communautés végétales trouvées en périphérie, et tout particulièrement sur les plantes rares. Le cas du cyripède royal (Figure 16), une orchidée rare présente à proximité de la tourbière restaurée, constitue une bonne opportunité de vérifier cette hypothèse. Au Québec, le cyripède royal est susceptible d'être désigné menacé ou vulnérable. Il s'agit d'une plante fragile : ses exigences écologiques sont strictes, sa maturité est atteinte tardivement et elle est très vulnérable au broutement. Ces caractéristiques en font donc une sentinelle très sensible de l'état de santé de la tourbière naturelle adjacente au secteur restauré, qui pourrait être menacée par un passé industriel (l'extraction de la tourbe).



Figure 21 : Suivi des individus de cyripède royal à Bic-Saint-Fabien. À gauche : inventaire et décomptes en 2013; au centre : détail des fleurs; à droite : identification des tiges de chaque individu.

⁵⁰ Pellerin, S., Lavoie, C. 2003. Reconstructing the recent dynamics of mires using a multitechnique approach. *Journal of Ecology* 91: 1008-1021.

⁵¹ Lachance, D., Lavoie, C., Desrochers, A. 2005. The impact of peatland afforestation on plant and bird diversity in southeastern Québec. *Écoscience* 12: 161-171.

Méthodologie :

Chaque année depuis 2008, tous les individus de la population de cyripède royal de la tourbière de Bic–Saint-Fabien sont recensés (marqués et cartographiés) pendant la période de floraison. Le décompte des feuilles et des fleurs est aussi réalisé afin de déterminer si l'âge des plants peut être estimé à l'aide de ces caractères.

Résultats préliminaires :

À ce jour (2014), un total de 1 638 cyripèdes ont été identifiés et marqués dans la partie nord de la tourbière du Bic–Saint-Fabien. C'est 295 individus de plus que ceux qui ont été marqués en 2009, qui constitue la véritable année de référence (plusieurs individus n'ont pas été aperçus en 2008). En nombre de feuilles, la population a une distribution normale avec un mode à 9 feuilles (le nombre varie de 2 à 13). En général (2009 – 2014), la proportion d'individus avec fleur est assez stable d'une année à l'autre (24 – 28 %). Très peu de cyripèdes fleurissent s'ils n'ont pas au moins 8 feuilles. Par contre, la majorité (> 80 %) des individus avec 10 feuilles et plus portent une fleur, sinon deux. Il semble donc y avoir une étroite correspondance entre le nombre des feuilles (probablement un indicateur de l'âge du plant) et des fleurs.

La population de cyripède royal de la tourbière du Bic–Saint-Fabien est beaucoup plus importante qu'on ne le suspectait au départ. La quantité d'individus trouvés est suffisante pour effectuer des tests statistiques robustes permettant de vérifier certaines hypothèses quant à l'état de santé de la population. Il est donc important de poursuivre un suivi de la population de cyripèdes : avec des mesures additionnelles et des mesures hydrologiques, on pourra déterminer d'ici 2018 dans quelle mesure la restauration de la tourbière aura été bénéfique à la plante.

Faits saillants :

- La tourbière naturelle adjacente à Bic–Saint-Fabien abrite une grande population de cyripède royal (1 638 individus); son ampleur est d'ailleurs beaucoup plus importante que ce qui était estimé initialement.
- Le cyripède est une plante sensible aux modifications de son environnement, ce qui en fait une espèce indicatrice de l'intégrité du milieu.

D) Aménagement du gradient échohydrologique entre un fen restauré et les secteurs naturels adjacents

Problématique et contexte :

Certaines études indiquent que les secteurs bordant les tourbières industrielles peuvent eux aussi être grandement affectés lors de l'exploitation⁵². Il en résulte une transition abrupte et artificielle entre la tourbière industrielle et les secteurs adjacents, notamment en termes de densité forestière et de topographie.

Dans le cadre de son projet de maîtrise, l'étudiante Stéphanie Lefebvre-Ruel pose l'hypothèse que la topographie artificielle retrouvée à la marge des tourbières exploitées ou restaurées entraîne une discontinuité hydrologique majeure avec le milieu naturel. Cette rupture affecte la répartition des espèces végétales et empêche l'établissement d'un gradient de connectivité échohydrologique naturel. Même s'ils ne subissent pas directement les perturbations liées aux activités industrielles, les secteurs naturels bordant les tourbières industrielles peuvent donc aussi être affectés. On y remarque une densification des arbres^{53,54,55}, une transformation de la végétation vers des communautés forestières⁵⁶, une cassure topographique entre la tourbière restaurée et les secteurs adjacents, ainsi qu'un abaissement de la nappe phréatique jusqu'à 200 m de distance des canaux de drainage⁵⁷.

Méthodologie :

Pendant l'été 2014, les secteurs adjacents à la tourbière restaurée de Bic-Saint-Fabien ont été inventoriés et caractérisés, ainsi que les gradients de végétation observés dans les marges d'autres tourbières intactes de la région, à titre de référence. Des données d'élévation⁵⁸, de profondeur de la nappe phréatique, de surface terrière⁵⁹ et de végétation, mesurées à partir de transects perpendiculaires au canal de drainage (situé à la marge entre la tourbière et la zone adjacente) ont permis de dresser le portrait de ces environnements.

⁵² Poulin, M., Rochefort, L., Desrochers, A. 1999. Conservation of bog plant species assemblages: assessing the role of natural remnants in mined sites. *Applied Vegetation Science* 2: 169-180.

⁵³ Landry, J., Rochefort, L. 2011. Le drainage des tourbières: impacts et techniques de remouillage. Groupe de recherche en écologie des tourbières, Université Laval, Québec. 53 p.

⁵⁴ Price, J. S., Heathwaite, A. L., Kettridge, N. 2003. Hydrological processes in abandoned and restored peatlands: An overview of management approaches. *Wetlands Ecology and Management* 11(1-2): 65-83.

⁵⁵ Van Seters, T. E., Price, J. S. 2001. The impact of peat harvesting and natural regeneration on the water balance of an abandoned cutover bog, Québec. *Hydrological Processes* 15: 233-248.

⁵⁶ Lachance, D., Lavoie, C. 2005. The impact of peatland afforestation on plant and bird diversity in southeastern Québec. *Ecoscience* 12(2): 161-171.

⁵⁷ Landry, J., Rochefort, L. 2011. Le drainage des tourbières: impacts et techniques de remouillage. Groupe de recherche en écologie des tourbières, Université Laval, Québec. 53 p.

⁵⁸ Élévation: L'élévation de chaque placette est mesurée par rapport à celle du canal de drainage.

⁵⁹ Surface terrière : Somme des superficies des sections transversales de chaque tige du peuplement d'arbres à hauteur de poitrine (Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. 2000. Dictionnaire de la foresterie. Les Presses de l'Université Laval, Québec. p.210).



Figure 22 : Marge de la tourbière de Bic–Saint-Fabien avant (gauche) et après (droite) les travaux de remodelage, en vue de rétablir la connectivité hydrologique entre le secteur restauré et celui naturel adjacent.

Résultats préliminaires :

En comparant les gradients de végétation en bordure de la tourbière restaurée avec ceux observés dans les milieux naturels non perturbés, l'étudiante a constaté une grande disparité entre les milieux. En effet, la nappe phréatique est considérablement plus profonde, la topographie plus élevée et la surface terrière plus importante en bordure de la tourbière restaurée que dans des gradients naturels de végétation d'une tourbière intacte (Figure 17). Parmi les résultats préliminaires obtenus, on remarque que dans les cinq premiers mètres en s'éloignant du canal de drainage, la profondeur moyenne (très) approximative de la nappe phréatique dans les bordures de la tourbière est environ de 54 cm, alors qu'elle est de 17 cm dans les gradients naturels de végétation. De la même façon, la surface terrière moyenne dans les quatre premiers mètres de la bordure de la tourbière est d'environ 43 m²/ha, alors qu'elle est de 29 m²/ha dans les gradients naturels de végétation. Dans les cinq premiers mètres en s'éloignant du canal de drainage, l'élévation moyenne approximative des bordures de la tourbière de Bic–Saint-Fabien est de 83 cm, alors qu'elle est de 7 cm dans les gradients naturels de végétation.

Un deuxième volet du projet vise à adapter la méthode de restauration des tourbières de façon à améliorer la connectivité entre les zones restaurées et les zones naturelles adjacentes. Pendant l'automne 2014, la densité forestière de la marge forestière a été modifiée par endroits (coupe d'arbres dans trois parcelles expérimentales) de façon à reproduire la surface terrière trouvée dans des tourbières naturelles. À l'hiver 2015, des travaux de reprofilage topographique de la bordure forestière sont prévus à la tourbière de Bic–Saint-Fabien : le remblai hérité des activités d'ouverture pour l'exploitation de la tourbe sera estompé. Le GRET espère ainsi rétablir une meilleure connectivité écohydrologique entre les secteurs naturels bordant la tourbière industrielle et la tourbière restaurée. Les effets des essais réalisés seront évalués pendant l'été 2015. Les résultats du projet permettront de poser des recommandations quant aux approches de restauration des marges de tourbières.

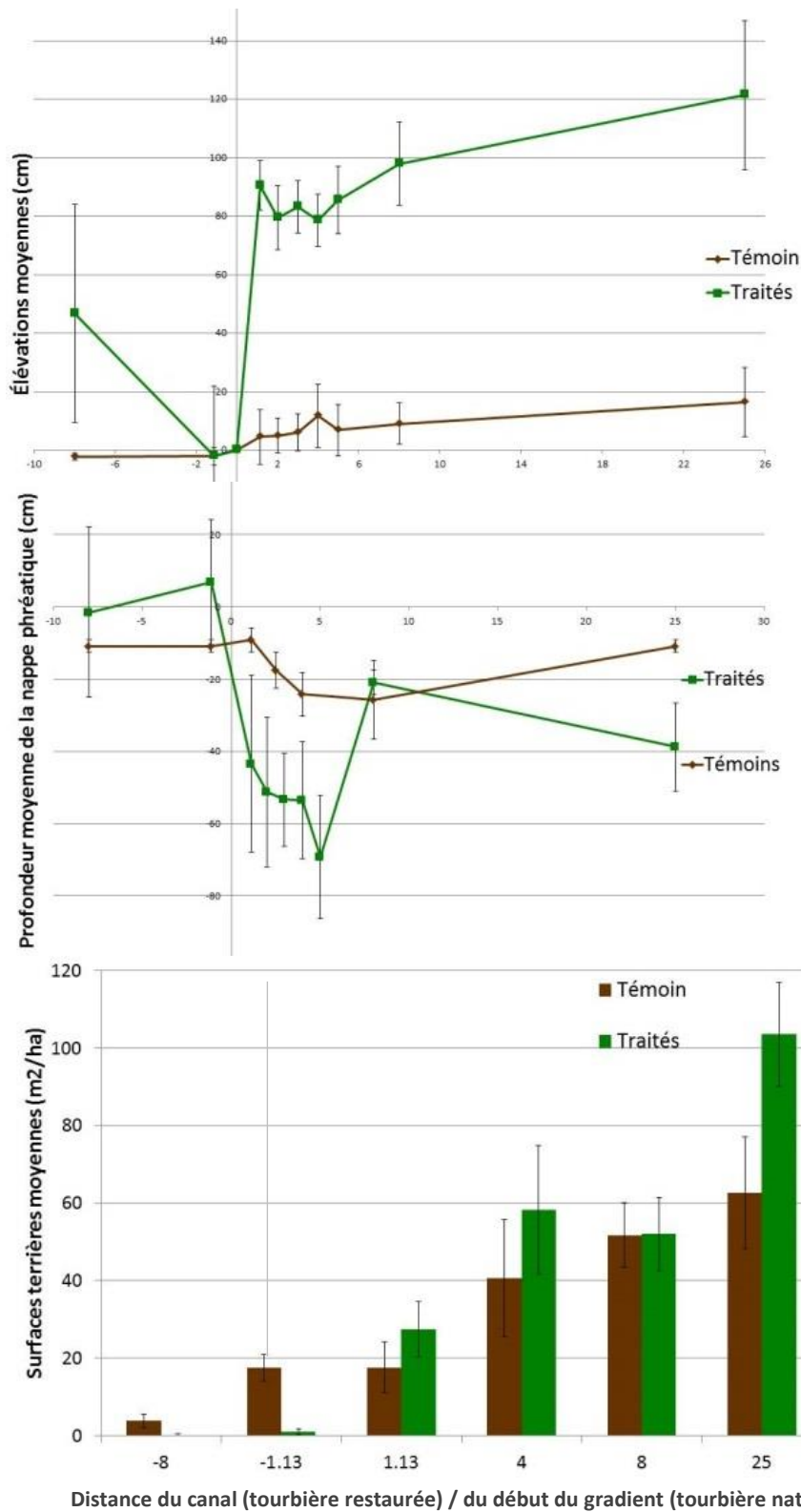


Figure 23 : Disparité entre la marge de la tourbière restaurée et les abords intacts des tourbières naturelles en termes d'élévation moyenne, de niveau d'eau et de surface terrière. Témoin = tourbières naturelles intactes. Traités = tourbière adjacente à Bic-Saint-Fabien.

5.2 Tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer

La tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer a été restaurée grâce à une collaboration entre le GRET, Planirest Environnement (entreprise spécialisée dans la restauration des tourbières) et l'Association des producteurs de tourbe horticole du Québec (APTHQ). Line Rochefort (GRET), François Quinty (Planirest) et Raynald Bélanger (alors de la compagnie Sun Gro Horticulture) ont fait les relevés de terrain préliminaires à l'automne 2010 afin d'élaborer le plan de restauration. Les travaux de restauration ont pu être réalisés grâce à l'appui financier et technique de l'APTHQ, sous la supervision de Planirest et du GRET. L'APTHQ gère maintenant le développement du site, en collaboration avec le GRET (en tant que conseiller scientifique), le Parc national du Bic et différents groupes de chercheurs et de représentants locaux. Le suivi écologique post-restauration s'est fait par l'équipe technique de l'APTHQ, grâce à un soutien d'une filière ACCORD⁶⁰, et par le GRET, grâce au soutien financier du MTQ.

En 2014, un sentier d'interprétation a été installé : la tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer est dorénavant un site de démonstration de la méthode de réhabilitation pour le public intéressé par la restauration écologique des tourbières. Certains détails des activités prévues à la tourbière ont été modifiés en cours de route. Ceux-ci sont discutés à la section 5.2.1 A). L'objectif principal de la tourbière demeure toutefois le même : favoriser le retour des conditions de tourbière et de milieux humides. La tourbière a d'ailleurs été ajoutée au suivi pancanadien des tourbières restaurées.

Le beau défi de restauration de ce site de 20 ha était la diversité du substrat résiduel de la tourbe post-extraction. Compte tenu des conditions initiales suivant l'exploitation industrielle de la tourbière, il a été déterminé lors de l'élaboration du plan de restauration que plusieurs méthodes devaient être employées afin de restaurer le site. La tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer est donc devenue un exemple illustrant l'utilisation de plusieurs méthodes de restauration pour créer une mosaïque de milieux humides. Comme le site a été restauré depuis relativement peu de temps, il faudra continuer le suivi afin de déterminer sa trajectoire écologique. D'ailleurs, l'APTHQ réalise des suivis de la fluctuation de la profondeur de la nappe phréatique sur le site. De son côté, le GRET a mené un inventaire de la végétation dans la zone restaurée par méthode de transfert de la couche muscinale. Les parcelles permanentes installées ont été ajoutées au suivi pancanadien des tourbières mené par le GRET depuis une vingtaine d'années. Selon les premières données acquises, la restauration semble une réussite. La poursuite de l'étude rigoureuse du site est toutefois primordiale. Un résumé des suivis minimaux qui devraient être réalisés à SFSM est d'ailleurs présenté au Tableau 7. Ces recommandations ont été élaborées à partir du Guide de restauration des tourbières⁶¹ et s'applique donc à toutes les tourbières ombrotrophes. Les détails des activités réalisées sont présentés dans les sections qui suivent.

⁶⁰ Démarche ACCORD : www.tourbehorticole.com/fr/industrie-partenaires/apthq.php et www.mdeie.gouv.qc.ca/accord/

⁶¹ Quinty, F., Rochefort, L. 2003. Guide de restauration des tourbières, 2^e éd. Association canadienne de mousse de sphaigne et Ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick. Québec, Québec. 119 p.

Tableau 7 : Recommandation de suivis minimaux à la tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer.

Type de suivi	Début du suivi	Fréquence
Végétation	3 saisons de croissance ⁶² après les travaux.	3, 5 et 10 ans suivant la restauration.
Hydrologie	Quelques semaines après les travaux, puis pendant le premier printemps (lors du dégel).	Annuellement pour les trois premières années, puis après 5 et 10 ans suivant la restauration. Au printemps si possible.
Érosion	Quelques semaines après les travaux, puis pendant le premier printemps (lors du dégel).	Annuellement pour les trois premières années, puis après 5 et 10 ans suivant la restauration. Au printemps si possible.

⁶² Par « saison de croissance », on entend une saison estivale, en tout ou en partie. Le calcul du temps écoulé doit se faire en fonction des saisons et non des années. Ainsi, pour des travaux réalisés pendant une même année, la végétation d'un site restauré au printemps aura profité d'une saison de croissance de plus que celle d'un site restauré à l'automne.

5.2.1 Établissement de communautés végétales typiques des milieux humides choisis

A) Restauration planifiée et réalisée

Problématique et contexte :

La restauration de la tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer a été réalisée en novembre 2011. Un plan de restauration avait été préparé afin de prévoir les types de milieux humides à restaurer en fonction des conditions initiales (post-industrielles) trouvées sur le site. Il incorporait plusieurs techniques de restauration afin de former une mosaïque de milieux humides.

Le plan de restauration initial comptait cinq zones homogènes pour lesquelles une option de restauration (y compris des travaux à titre expérimental) avait été déterminée en regard de l'objectif général de favoriser le retour à des conditions de tourbière ou de milieu humide (Figure 18).

Méthodologie et résultats préliminaires :

Les cinq zones (A, B, C, D et E) sont détaillées ici (voir aussi la Figure 18).

Zone A : La restauration par transfert de sphaignes visait la majeure partie de la tourbière (8,5 ha au total). Juste avant les travaux de restauration, cette zone était dépourvue de végétation et présentait des caractéristiques (pH de la tourbe résiduelle) de bog. L'option de restauration retenue était donc la méthode par transfert de la couche muscinale⁶³. La restauration a été réalisée comme ce qui avait été prévu dans le plan de restauration initial sur une grande surface dans le but essentiellement de recréer un tapis de mousses typique des tourbières ombrotrophes. Trois modifications ont été ajoutées à la planification originale afin de bonifier la méthode de restauration. Quatre mares ont ainsi été creusées pour favoriser une plus grande biodiversité du site (voir section 5.1.5).

Des plantations d'arbres ont également été effectuées dans la zone A, dans un secteur de la tourbière trop sec pour l'établissement des propagules de mousses. En effet, l'élévation topographique plus importante de la bordure de la tourbière qui est parallèle à la Route de la Mer et le passage répété de la machinerie lors de la restauration a incité le choix de l'approche de plantations de conifères. Au total, 950 plants d'épinette noire et 950 plants de mélèze laricin fournis par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (actuel ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles) ont été plantés.

⁶³ Pour des détails sur cette méthode, consulter : Quinty, F., Rochefort, L. 2003. Guide de restauration des tourbières, 2^e éd. Association canadienne de mousse de sphaigne et Ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick. Québec, Québec. 119 p.

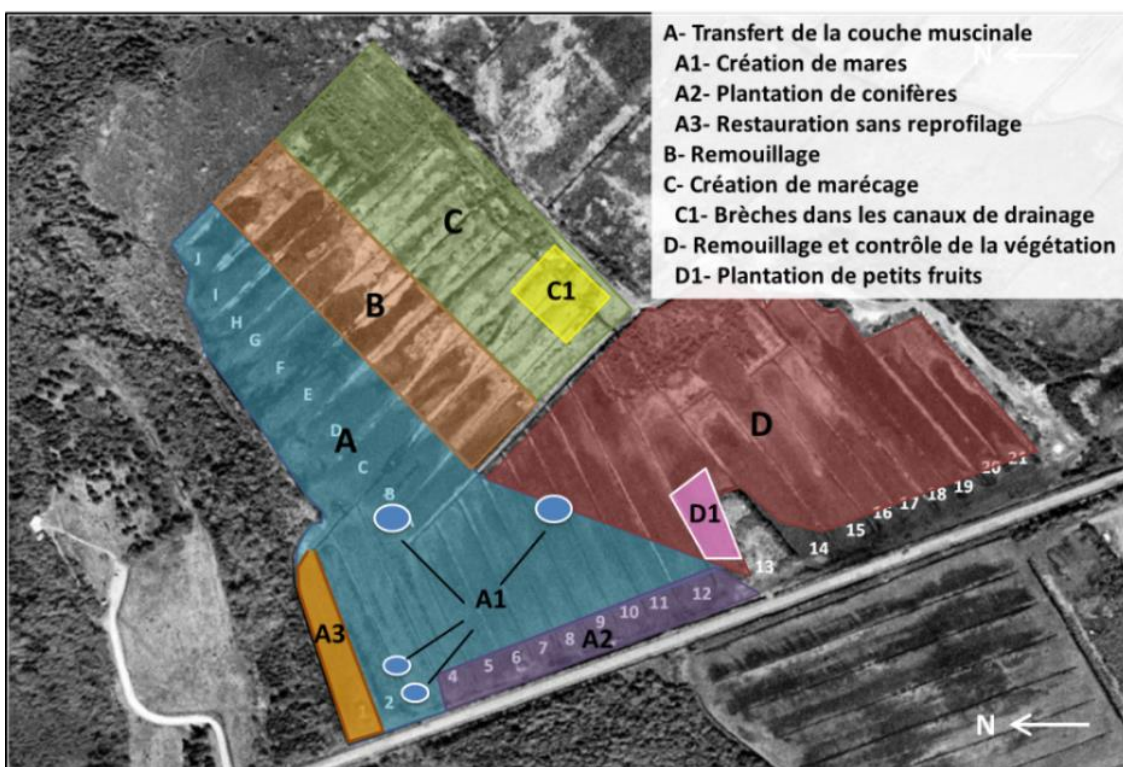
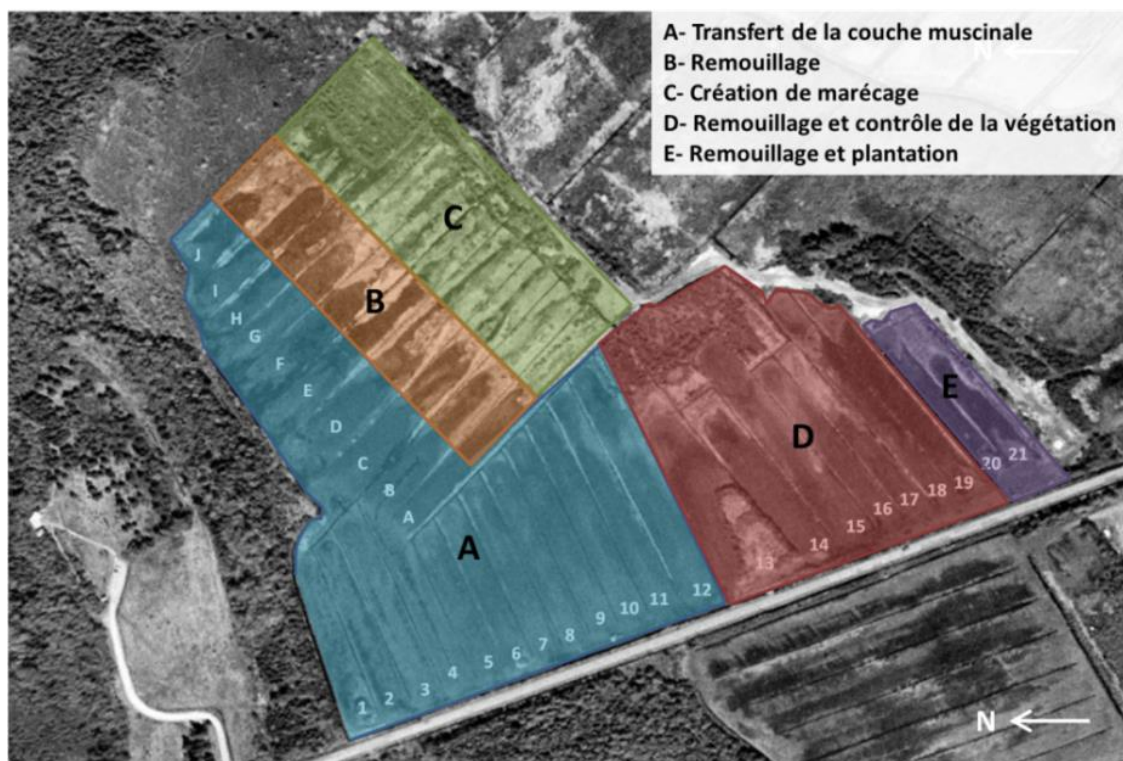


Figure 24 : Restauration de la tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer telle que planifiée initialement (en haut) et ce qui a été réalisé (en bas), illustrant les zones en fonction du type de restauration.

Enfin, la tourbière de SFSM n'est pas seulement un projet de restauration facilité par le MTQ dans la région, mais aussi un terrain d'essai afin de peaufiner les techniques de restauration des tourbières ombrotrophes. Ainsi, une planche⁶⁴ de la zone A (la planche la plus au nord) a été restaurée sans reprofilage préalable de la surface. Il s'agissait d'expérimenter, à grande échelle, une version simplifiée de la méthode de restauration par transfert muscinal sans niveler la surface d'une planche de l'ancien site industriel, puisque cette dernière s'était déjà revégétalisée naturellement de manière éparse sans trop présenter de croûte biologique (celle-ci est généralement défavorable à la reprise des mousses). Sur cette planche, les propagules de mousses de sphaigne ont été réintroduites directement à travers le couvert végétal existant afin de vérifier si l'étape du nivelage pourrait être éliminée de la méthode de restauration des bogs lorsque le couvert préétabli est en faible densité. Cette option de restauration pourrait diminuer considérablement les coûts des opérations de restauration à grande échelle.

Zone B : Cette zone de 2,34 ha partiellement colonisée par des plantes de milieux humides avant les travaux a été restaurée par remouillage uniquement. Les canaux de drainage ont été bloqués afin de faire remonter naturellement le niveau d'eau. La végétation déjà présente devrait s'établir vigoureusement dans les prochaines années.

Zone C : Le sud-est de la tourbière (3,35 ha) comportait déjà une plantation de conifères et un couvert végétal de milieu humide bien établi. Le plan de restauration initial visait la restauration de cette zone en un marécage par la création de plans d'eau ouverts et l'introduction d'espèces typiques des « laggs » (des écosystèmes de transition entre la marge forestière et la tourbière), comme le *Thuya* et des fougères. Comme prévu initialement, des brèches perpendiculaires aux canaux de drainage originaux ont été créées lors des travaux de restauration en 2011 dans la zone C. Les plantations n'ont toutefois pas été réalisées en raison de niveaux d'eau trop élevés empêchant l'accès au secteur. Les niveaux d'eau maintenus relativement élevés et les espèces déjà présentes ont donc créé un marécage à aulne plutôt qu'à conifères. Selon l'évolution du secteur, celui-ci pourrait aussi éventuellement servir à confirmer les conclusions de la thèse de doctorat d'Étienne Paradis (membre du GRET) sur l'écologie des laggs (publications en préparation), à savoir si un remouillage seul peut ramener des marges de tourbières dégradées sur une trajectoire de lagg naturel.

Zone D : Une zone relativement étendue (5,16 ha) située dans le sud de la tourbière SFSM présente une végétation quasi monospécifique de scirpe (*Scirpus cyperinus*) et de roseau commun (*Phragmites australis*), des espèces opportunistes⁶⁵ de milieux humides. La méthode de restauration prévue pour cette zone prévoyait le remouillage par blocage des canaux de drainage. À la suite de plusieurs discussions avec des intervenants de la région et des écologistes de tourbière de notoriété internationale en restauration, il a été suggéré de bien remouiller le site par blocage des canaux de drainage afin de maintenir un milieu humide de magnocariçaie (végétation de grandes cypéracées) et de faire mourir les bouleaux qui s'étaient installés en bordure. Le questionnement sur le rôle des grandes colonies de scirpe dans les fens restaurés a suscité l'intérêt des travaux de recherche sur l'écologie du scirpe (voir section 5.2.2 B).

⁶⁴ Une planche correspond à la largeur de terre entre deux canaux de drainage, où l'extraction de la tourbe a lieu.

⁶⁵ Graf, M. D., Rochefort, L., Poulin, M. 2008. Spontaneous revegetation of cutaway peatlands of North America. *Wetlands* 28(1): 28-39.

Également dans la zone D, le remouillage efficace qui a suivi les travaux de restauration a, comme discuté précédemment, un peu trop inondé la zone marécageuse, mais a bien entraîné la sénescence des bouleaux. En effet, en faisant remonter les niveaux d'eau dans les canaux, les racines des bouleaux ancrées dans la tourbe poreuse du bord du canal se sont trouvées asphyxiées. En plus de la large colonie de scirpes, deux communautés de roseau commun (*Phragmites australis*) du génotype eurasiatique considéré comme envahissant⁶⁶ ont colonisé le site par les interventions effectuées dans le passé sur le milieu. L'APTHQ et le GRET collaborent présentement afin de déterminer les meilleures options de contrôle de cette espèce envahissante. Des travaux devraient être réalisés en 2015.

Par ailleurs, une portion plus élevée (et sèche) de ce secteur de la zone D a été utilisée afin d'introduire des arbustes d'espèces de petits fruits dans un souci de diversité, puisque les petits fruits abondent en tourbières naturelles. Le pépiniériste-fournisseur a acheminé des plants d'*Aronia* et de bleuets au site. Au cours des visites subséquentes aux plantations, il s'est avéré que l'espèce de bleuets plantée n'était pas une espèce typique de la région, mais plutôt un cultivar normalement utilisé dans la production de petits fruits. L'erreur a été corrigée en remplaçant les plants pour des cultivars indigènes, plus représentatifs de la flore locale.

Zone E : Une petite zone de 0,87 ha située dans l'est du site devait être l'hôte de plantations de conifères afin d'y contrer la présence d'espèces opportunistes. Ces plantations ont toutefois plutôt été réalisées dans la zone A. Comme ce secteur a aussi été remouillé, il a été inclus dans la zone D.

Faits saillants :

- La tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer a été restaurée en une mosaïque de milieux humides, en accord avec les conditions du terrain avant sa restauration.
- Quelques ajouts et ajustements au plan de restauration ont eu lieu afin de mieux refléter les conditions du terrain, comme l'ajout de mares, la création d'un marécage à aulne plutôt qu'à conifères et la modification de l'emplacement des plantations d'arbres et d'arbustes de petits fruits.

⁶⁶ Lavoie, C., Jean, M., Delisle, F. Létourneau, G. 2003. Exotic plant species of the St Lawrence River wetlands: a spatial and historical analysis. *Journal of Biogeography* 30: 537-549.

B) Écologie du *Scirpus cyperinus*

Problématique et contexte :

Les tourbières industrielles abandonnées après l'extraction de la tourbe sont fréquemment colonisées par le *Scirpus cyperinus*. Pendant son doctorat, Martha Graf⁶⁷ avait recensé la présence de cette espèce dans 50 % des quadrats d'inventaire de végétation de 17 fens abandonnés à travers le Canada. Bien qu'il s'agisse d'une espèce indigène typique des milieux humides et intéressante pour son faible indice de décomposition, le *S. cyperinus* peut aussi former de larges colonies denses difficilement peuplées par les autres espèces. C'est d'ailleurs le cas à Saint-Fabien-sur-Mer, où une partie du site est occupée par cette plante.

Le GRET a émis l'hypothèse que deux tactiques pourraient prévenir l'envahissement des sites par le scirpe si un but de restauration de biodiversité est visé. Premièrement, une restauration rapide après les activités d'extraction de la tourbe pourrait être défavorable au scirpe en limitant l'espace disponible pour sa colonisation et sa germination⁶⁸. Une seconde tactique pour contrer l'invasion du *S. cyperinus* pourrait être l'instauration d'un régime hydrique dissuasif dans les tourbières industrielles abandonnées. Il semble en effet que les niveaux d'eau fluctuants typiques de ces milieux puissent agir comme un facteur favorisant l'implantation monospécifique du scirpe. En induisant un niveau d'eau stable, d'autres espèces pourraient s'établir et diminuer la productivité du scirpe. L'étudiante-chercheuse Julie Lajoie s'est penchée sur ces deux hypothèses dans le cadre de son projet de maîtrise.

Méthodologie :

Germination des graines : Une première expérience a été mise en place en serres à l'Université Laval en introduisant des graines de *S. cyperinus* sur différents substrats végétaux préétablis dont :

- 1) des plants établis d'espèces typiques des fens (*Carex echinata*, *C. flava*, *C. magellanica*, *Glyceria canadensis*, *Iris versicolor* et *Menyanthes trifoliata*);
- 2) un lit de semences d'espèces de plantes vasculaires de fens;
- 3) un tapis de mousses (*Tomentypnum nitens*);
- 4) un tapis de sphaignes (*Sphagnum warnstorffii*);
- 5) de la tourbe nue.

Chacun de ces substrats était aussi soumis à trois régimes hydriques différents : un niveau d'eau bas, un niveau haut et un niveau fluctuant entre ces deux hauteurs.

Fluctuation des niveaux d'eau : La compétitivité du *S. cyperinus* face à deux graminées typiques de fen a été testée en milieu contrôlé (serres). Des plants de *S. cyperinus* ont été mis en

⁶⁷ Graf, M. D., Rochefort, L., Poulin, M. 2008. Spontaneous revegetation of cutaway peatlands of North America. *Wetlands* 28(1): 28-39.

⁶⁸ Bourgeois, B., Hugron, S., Poulin, M. 2012. Establishing a moss cover inhibits the germination of *Typha latifolia*, an invasive species, in restored peatlands. *Aquatic Botany* 100: 76-79.

compétition avec deux espèces cibles pour la restauration, le *Glyceria canadensis* et le *Calamagrostis canadensis*, sous deux régimes hydriques : stable et fluctuant. Ceux-ci simulent les conditions hydrologiques d'une tourbière naturelle et d'une tourbière abandonnée, respectivement. Dans chacun des cas, la biomasse aérienne produite après une saison de croissance en serre a été mesurée.

Résultats préliminaires :

Germination des graines : Le type de substrat a influencé les taux d'implantation du *S. cyperinus*, et ce, en interaction avec le régime hydrique. La sphaigne *S. warnstorffii* et les plants d'espèces typiques des fens sont les types de substrats sur lesquels l'implantation du *S. cyperinus* est la plus difficile (Figure 19). Peu importe le niveau d'eau, la tourbe nue est toujours le substrat le plus facilement colonisé par les semences de *S. cyperinus*.

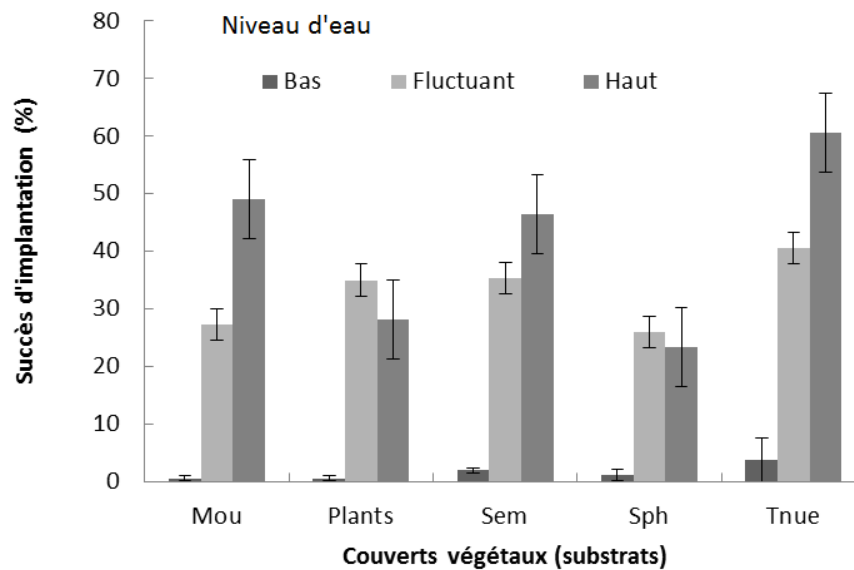


Figure 25 : Succès d'implantation (%) du *Scirpus cyperinus* à Saint-Fabien-sur-Mer. Résultats selon les types de couvert végétal (Mou : *Tomentypnum nitens*; Plants : plants d'espèces de fens; Sem : semences d'espèces de fen; Sph : *Sphagnum warnstorffii* et Tnue : tourbe nue) et le régime hydrique (bas, fluctuant ou haut).

Fluctuation des niveaux d'eau : L'analyse de la quantité de biomasse produite a démontré que le régime hydrique n'influence pas la productivité et la compétitivité du *Scirpus cyperinus*, du *Glyceria* ni du *Calamagrostis*. Le *Glyceria* n'arrive pas à s'implanter au travers du *S. cyperinus* peu importe le régime hydrique, alors que le *Calamagrostis* arrive à s'implanter et se maintenir, mais sans entraîner de perturbation sur le développement du *Scirpus*.

Faits saillants :

- La présence d'un couvert végétal préétabli peut empêcher, dans une certaine mesure, l'implantation du *Scirpus cyperinus* par graine.

- À elle seule, la stabilisation du niveau d'eau n'est pas une stratégie suffisante pour permettre l'établissement des espèces typiques des fens au travers du *Scirpus cyperinus* afin d'en diminuer la productivité. Seul le *Calamagrostis* pourrait s'implanter parmi le *Scirpus*, mais ne permettrait toutefois pas de limiter le développement de celui-ci.
- Il apparaît aussi que le *S. cyperinus* est une espèce très compétitive dans ce contexte et qu'on devrait envisager de contrôler sa présence dès l'abandon du site après l'arrêt des activités d'extraction de la tourbe, donc avant qu'il ne s'implante, plutôt que d'essayer de limiter sa croissance par la compétition une fois qu'il domine le paysage.



Figure 26 : Le *Scirpus cyperinus* à Saint-Fabien-sur-Mer: colonie monospécifique dense (à gauche) et touradon (à droite).

C) Suivi de la végétation

Problématique et contexte :

Pour évaluer le succès de la restauration de Saint-Fabien-sur-Mer, un premier inventaire de la végétation a été réalisé à l'automne 2014, dans le cadre du suivi pancanadien des tourbières restaurées.

Méthodologie :

Des relevés de végétation ont été effectués dans cinq parcelles permanentes (comprenant des sous-parcelles), réparties à travers la zone A (où la méthode de transfert de la couche muscinale a été utilisée; voir Figure 18 plus haut). Cet inventaire vise à évaluer la diversité et le recouvrement des communautés végétales présentes, ainsi qu'à suivre leur établissement au fil des années en le comparant à celui de sites de références.

Résultats préliminaires :

En moyenne, trois ans après la restauration, les plantes vasculaires couvraient 34 ± 12 % ($\pm$ erreur type) de la surface, alors que les bryophytes en couvraient 37 ± 13 %. Il faut toutefois noter qu'il existe une grande hétérogénéité sur le site et que les espèces dominantes et leur recouvrement peuvent varier grandement entre les parcelles. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente le portrait des cinq parcelles inventoriées.

Tableau 8 : Recouvrement moyen (%) des espèces dominantes dans les cinq parcelles permanentes de Saint-Fabien-sur-Mer en 2014.

Espèces dominantes	Parcelle permanente				
	1	2	3	4	5
Vasculaires	8	10	66	31	54
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	2	2	3	1	<1
<i>Equisetum arvense</i>	0	<1	40	13	0
<i>Poa palustris</i>	0	2	0	11	4
<i>Scirpus cyperinus</i>	<1	0	16	2	40
<i>Solidago graminifolia</i>	<1	<1	<1	6	9
Invasculaires	27	17	65	24	50
<i>Sphagnum rubellum</i>	6	3	53	8	38
<i>Polytrichum strictum</i>	20	14	15	13	1
Total végétation	24	29	92	44	75

Le recouvrement élevé de *S. rubellum* dans les parcelles no. 3 et 5 après seulement trois ans est un bon indicateur que la restauration devrait certainement se solder par le retour d'une communauté végétale typique des tourbières⁶⁹. Au contraire, le faible recouvrement total de la végétation et plus particulièrement des sphaignes dans les parcelles no. 1, 2 et 4 ne permettent pas de déclarer le succès de la restauration dans ces secteurs, puisque leur trajectoire demeure

⁶⁹ González, E., Rochefort, L., Boudreau, S., Hugron, S., Poulin, M. 2013. Can indicator species predict restoration outcomes early in the monitoring process? A case study with peatlands. *Ecological Indicators* 32: 232-238

incertaine⁷⁰. Néanmoins, le recouvrement important de *Polytrichum strictum* (une espèce compagne pour l'établissement des sphaignes⁷¹) dans ces parcelles pourrait favoriser l'établissement de la sphaigne à plus long terme.

Faits saillants :

- Deux des parcelles inventoriées en 2014 présentent une tendance vers un succès de restauration. Les trois autres ont une trajectoire encore incertaine.
- Le suivi à plus long terme des parcelles, déjà prévu par le GRET, sera nécessaire pour confirmer le succès de restauration dans ces secteurs.
- Puisque des espèces envahissantes sont présentes sur le site (mais hors des parcelles d'inventaire), un suivi attentif de celles-ci, en plus des inventaires à long terme, devra être planifié pour empêcher leur établissement dans la portion restaurée.



Figure 27 : Planches restaurées de la tourbière de Saint-Fabien–sur-Mer en août 2013.

⁷⁰ González, E., Rochefort, L. 2014. Drivers of success in 53 cutover bogs restored by a moss layer transfer technique. *Ecological Engineering* 68: 279-290.

⁷¹ Groeneveld, E. V. G., Rochefort, L. 2002. Nursing plants in peatland restoration: on their potential use to alleviate frost heaving problems. *Suo* 53(3-4): 73-85.

6. DISCUSSION ET CONCLUSION

Le mandat confié au Groupe de recherche en écologie des tourbières par le ministère des Transports du Québec était celui de développer des approches de restauration applicables aux tourbières minérotrophes perturbées par les activités industrielles d'extraction de la tourbe. En rétrospective, le travail effectué représente un très bon départ de mission, car les plantes cibles nécessaires à la restauration des fens ont été identifiées pour la région du Bas-Saint-Laurent, des méthodes de récolte (graines ou propagules) et de propagation ont été développées et on sait maintenant comment établir plusieurs espèces végétales de fen en tourbière dégradée dans des parcelles expérimentales mises en place à la main. Au site expérimental de Bic-Saint-Fabien, la restauration mécanisée d'un fen dégradé, pour laquelle une attention particulière a été portée sur la réintroduction des bryophytes, est une première au Canada et même en Amérique du Nord. Ainsi, le travail réalisé par le GRET au cours des trois dernières années, grâce en majeure partie au soutien financier du ministère des Transports du Québec, a permis de faire avancer considérablement les connaissances dans le domaine de la restauration écologique des fens. Les expériences ont tantôt mené à des conclusions satisfaisantes, tantôt elles ont justifié la modification des façons de faire ou, encore, ont poussé à poser de nouvelles questions. Dans tous les cas, il va sans dire que les expériences réalisées et les connaissances acquises sur le terrain ont permis de mieux adapter, pour la restauration des fens, la méthode de restauration par transfert muscinal développée pour les bogs.

Par ailleurs, la mission du GRET était aussi de fournir au ministère des documents de référence afin de mieux aborder les enjeux de restauration des fens, dans un contexte, entre autres, de la préparation de devis dans le cadre de mesures de compensation pour la perte de milieux humides de types tourbeux et minérotrophe. Le présent document, accompagné d'un second présentant les connaissances acquises de façon plus pratico-pratiques⁷², sont des références précieuses à ce titre, et peuvent par ailleurs servir pour tous travaux de restauration touchant les fens.

La tourbière de Bic-Saint-Fabien est une station de recherche remarquable. La disponibilité de données d'inventaires menés avant la restauration, la proximité de tourbières naturelles adjacentes et la présence d'autres fens de référence intacts dans la région en font un site de recherche incomparable. La caractérisation des milieux environnants et la définition d'un écosystème de référence ont servi à la planification de la restauration de la tourbière de Bic-Saint-Fabien et demeurent le modèle vers lequel les actions de restauration sont orientées. Ces informations sont inestimables pour tous les projets de recherche qui auront lieu dans la région. Un troisième document rédigé dans le même cadre que celui-ci fournit une description détaillée des sept fens inventoriés qui ont servi à définir l'écosystème de référence⁷³. Nous espérons que ce document puisse contribuer à la protection et à la conservation de ces sites précieux.

Les travaux menés à la tourbière de Saint-Fabien-sur-Mer ont, pour leur part, fourni une occasion unique de restaurer un site en intégrant plusieurs types de milieux humides. Cette restauration en mosaïque a permis d'expérimenter non seulement la réhabilitation de divers types de tourbières, mais aussi celle de marécages, ainsi que d'introduire des éléments de

⁷² Groupe de recherche en écologie des tourbières (2016). Restauration des tourbières minérotrophes: État des connaissances 2015. Groupe de recherche en écologie des tourbières, Université Laval, Québec. 22 p. et 3 annexes.

⁷³ Groupe de recherche en écologie des tourbières (2016). Tourbières minérotrophes naturelles d'intérêt écologique du Bas-Saint-Laurent. Groupe de recherche en écologie des tourbières, Université Laval, Québec. 59 pages.

biodiversité par la plantation d'arbres et d'arbustes fruitiers et la création de mares. Le suivi de la tourbière en termes d'hydrologie et de végétation permet de peaufiner la méthode de restauration. Aussi, les interventions à venir (selon les réflexions déjà amorcées avec des collaborateurs) sur les communautés de plantes envahissantes (*Phragmites australis*) et indésirables (*Scirpus cyperinus*) permettent de développer un savoir-faire sur les techniques de contrôle de la végétation dans un contexte de restauration.

La subvention accordée au GRET pour la réalisation de ce mandat constitue la principale source de financement des activités réalisées à Bic-Saint-Fabien et Saint-Fabien-sur-Mer entre 2012 et 2015. Elle a permis la mise en place et la réalisation d'expériences afin d'acquérir des connaissances sur la restauration des fens, ainsi qu'à faire l'acquisition de données à plus long terme (par exemple, d'hydrologie et de végétation). Au total, cinq professionnelles de recherche, six étudiants de 2^e et 3^e cycles, quatre stagiaires de niveau collégial, trois stagiaires internationaux et une quinzaine d'assistants de recherche au baccalauréat (provenant des équipes de l'Université Laval, de l'Université de Waterloo et de l'Université de Calgary) ont participé à des projets financés, directement ou non, à partir de la subvention du MTQ. Plusieurs articles scientifiques et thèses d'études portant sur les recherches à la tourbière de Bic-Saint-Fabien (directement reliés au mandat du MTQ ou non) devraient d'ailleurs être produits dans les prochaines années.

Certains des projets de recherche et suivis réalisés entre 2012 et 2015 se poursuivront jusqu'en avril 2018 (soit jusqu'à la fin du troisième mandat de la Chaire de recherche industrielle du CRSNG⁷⁴ en aménagement des tourbières, s'étendant de 2013 à 2018, dont Line Rochefort est titulaire). Le GRET et ses collaborateurs dresseront alors un nouveau bilan de l'état de la tourbière de Bic-Saint-Fabien afin d'en évaluer la trajectoire écologique. Par ailleurs, certaines expériences discutées dans ce document feront l'objet d'interprétations supplémentaires en vue de la publication scientifique des résultats. Enfin, il va sans dire que de nombreuses connaissances restent encore à acquérir à propos de la restauration des fens. À la tourbière de Bic-Saint-Fabien, l'écosystème semble se remettre en place, mais les techniques mécaniques de transfert de matériel végétal favorisant l'établissement des mousses brunes demeurent un échec. On a bien réussi à manipuler et rétablir des mousses brunes (*Campyllum*, *Scorpidium*, *Tomenthypnum*) par introduction manuelle, mais lorsque le matériel est manipulé mécaniquement, sa survie est plus difficile. Une question qui va assurément guider une partie des recherches du GRET dans les prochaines années. Par ailleurs, il n'est pas possible pour le moment de déterminer la liste précise des indicateurs de succès des projets de restauration des fens en raison de l'état encore peu avancé des connaissances sur le sujet. La poursuite des suivis à grande échelle (inclusion de nouveaux sites) et à long-terme (hydrologiques, de végétation, du carbone, de l'état général du site) ainsi que l'analyse attentive des données recueillies seront nécessaires afin de développer ces indices et de définir la trajectoire écologique des fens restaurés. À titre d'exemple, le GRET a défini pour la première fois des indicateurs de succès de la restauration des bogs en 2014⁷⁵, soit près de 20 ans après les premiers essais de restauration. Pour l'instant, les objectifs de restauration des fens visent à se rapprocher des écosystèmes de référence et à combler les attentes plus spécifiques des projets de restauration tels que la biodiversité, la stabilisation du sol ou le captage de carbone.

⁷⁴ Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada

⁷⁵ González, E., Rochefort, L. 2014. Drivers of success in 53 cutover bogs restored by a moss layer transfer technique. *Ecological Engineering* 68: 279-290

