

# ÉTABLISSEMENT DE SPHAIGNES RÉINTRODUITES SOUS DIVERSES COMMUNAUTÉS VÉGÉTALES RECOLONISANT LES TOURBIÈRES APRÈS L'EXPLOITATION

Stéphanie BOUDREAU & Line ROCHEFORT

Département de phytologie et Centre d'études nordiques Université Laval, Sainte-Foy, Québec, Canada, G1K 7P4  
Fax : (418) 656-7856 (e-mail : line.rochefort@plg.ulaval.ca)

## SUMMARY

(original scientific paper)

*As part of a research project on restoration of post-harvested peatlands, a study was undertaken to test whether the presence of pioneer species helps the establishment of re-introduced Sphagnum mosses. Experiments were initiated on abandoned peat surfaces recolonised either by ericaceous shrubs, Eriophorum spissum or E. angustifolium. Sphagnum diaspores, manually or mechanically-collected in a natural peatland, were re-introduced at each site, with or without the addition of a straw mulch. More Sphagnum mosses established beneath the cover of the two Eriophorum species, where the substrate is more humid and the microclimatic conditions more suitable to Sphagnum establishment. However, it was not possible to separate the effect of the plants themselves from the effect of their growing environment. Straw mulch had a positive effect on Sphagnum establishment in ericaceous communities, but this effect was not present in Eriophorum communities. Finally, Sphagnum diaspores established better when collected manually rather than mechanically.*

**KEY WORDS:** Peatland restoration - Sphagnum mosses - Succession - Pioneer species.

## RÉSUMÉ

(travail original)

*Des expériences de restauration de tourbières abandonnées après exploitation ont été effectuées afin de comparer l'influence d'espèces pionnières sur l'établissement de sphaignes réintroduites. Les sites expérimentaux étaient recolonisés par des communautés végétales dominées par : 1) des éricacées (e.g. Ledum groenlandicum et Chamaedaphne calyculata), 2) la linaigrette dense (Eriophorum spissum) et 3) la linaigrette à feuilles étroites (E. angustifolium). Des sphaignes, récoltées manuellement ou mécaniquement, ont été réintroduites dans ces communautés végétales, en combinaison ou non avec l'ajout d'un paillis. Plus de sphaignes réussissent à s'établir dans les communautés dominées par l'une ou l'autre des deux espèces de linaigrettes, où le substrat est plus humide et le microclimat plus favorable, que dans les communautés d'éricacées. En outre, la paille a un effet bénéfique sur l'implantation des sphaignes sous les couverts d'éricacées mais n'a pas d'effet dans les deux communautés de linaigrettes. Il n'est cependant pas possible de dissocier l'influence des plantes de celle de leur environnement. Enfin, dans tous les cas, un meilleur succès d'établissement des sphaignes est observé lorsque celles-ci sont récoltées manuellement plutôt que mécaniquement.*

**MOTS CLÉS :** Restauration - Tourbière - Sphaigne - Succession - Espèce pionnière.

## INTRODUCTION

Les recherches sur la restauration des tourbières ombrotrophes (bogs) se sont accrues au cours des dernières années, grâce à une meilleure compréhension de l'importance de ces milieux sur notre planète (e.g. puits pour le carbone, biodiversité), mais aussi suite à la dégradation et la perte de la ressource (WHEELER & SHAW, 1995). En Amérique du Nord, même si la réserve de tourbières est immense dans la zone de la forêt coniférienne boréale, l'exploitation se concentre dans les tourbières

méridionales et crée de fortes pressions dans certaines régions (KEYS, 1992). À une échelle régionale ou même locale, la restauration devient impérative si l'on veut préserver ces milieux et les fonctions écosystémiques qui y sont rattachées.

Au Canada, la recherche sur la restauration des tourbières abandonnées après l'exploitation de la tourbe a débuté dans les années 1990, grâce aux efforts conjoints des gouvernements, des scientifiques et des industries de la tourbe. Ces dernières se sont d'ailleurs engagées à faire une gestion durable de cette ressource. L'objectif principal

poursuivi est de promouvoir un établissement rapide des sphaignes et le retour des conditions hydrologiques caractéristiques de ces milieux afin de favoriser le retour des structures et des fonctions d'un écosystème à nouveau accumulateur de tourbe. Essentiellement, la méthode de restauration développée au Canada consiste, après une restauration hydrologique partielle, à réintroduire des fragments de sphaignes que l'on protège à l'aide d'un paillis durant la phase d'établissement (QUINTY & ROCHEFORT, 1997a; ROCHEFORT *et al.*, 1997). Les fragments de sphaignes (diaspores) sont récoltés dans des tourbières non perturbées de façon manuelle ou mécanique, selon l'échelle de grandeur des expériences ou des sites à restaurer. L'épandage des fragments de sphaigne résout la difficulté de la faible disponibilité en diaspores dispersées jusqu'au site à restaurer et l'ajout d'un paillis compense pour les conditions d'humidité extrêmement déficientes qui peuvent persister à la surface en dépit d'une nappe phréatique élevée (PRICE *et al.*, 1998).

La présente étude propose un moyen alternatif à ceux développés jusqu'à présent, basé sur les processus de successions végétales observés dans les tourbières abandonnées qui se sont spontanément recolonisées par la végétation typique des tourbières à sphaigne. En effet, on a souvent observé que dans les premiers stades de succession végétale dans les tourbières abandonnées, des sphaignes réapparaissent sous le couvert de plantes pionnières telles les *Eriophorum* spp. ou certaines mousses brunes du genre *Polytrichum*. (GROSVERNIER *et al.*, 1995; ROBERT *et al.*, sous presse). Ces espèces pionnières pourraient agir comme plantes compagnes et faciliter l'établissement des sphaignes en améliorant les conditions d'humidité déficientes à la surface et en réduisant l'érosion du substrat (SALONEN, 1992; GROSVERNIER *et al.*, 1997; BUTTLER *et al.*, 1998). Par contre, ces conditions microclimatiques générées par la présence de plantes pionnières n'ont, à notre connaissance, jamais été mesurées directement sur le terrain. Une fois établies, les sphaignes auraient le pouvoir de diriger la succession végétale, de part leur étonnante capacité à créer des conditions favorables à leur croissance et à la formation du dépôt tourbeux (LUKEN *et al.*, 1985; VAN BREEMEN, 1986).

Une série d'expériences a été initiée dans des sites abandonnés après l'exploitation de la tourbe et maintenant recolonisés par des communautés végétales dominées par différentes espèces pionnières : 1) des éricacées arbustives, 2) des linaigrettes denses (*Eriophorum spissum* Fern.) et 3) des linaigrettes à feuilles étroites (*E. angustifolium* Honck.). Les objectifs spécifiques de cette étude sont de comparer l'influence de ces différentes espèces pionnières sur l'établissement des sphaignes et de vérifier si la paille est nécessaire pour protéger les diaspores lorsque différents couverts végétaux sont déjà présents.

Les conditions microclimatiques engendrées par la présence des plantes pionnières sont examinées. De plus, nous profitons du dispositif mis en place pour comparer les modes de récolte des diaspores réintroduites afin de mieux connaître l'impact de la mécanisation des opérations sur l'établissement des sphaignes.

## MÉTHODES

### SITES EXPÉRIMENTAUX

Au printemps 1996, des expériences ont été initiées simultanément dans des sites abandonnés après l'exploitation de la tourbe pour des fins horticoles, où le substrat dénudé a été recolonisés spontanément par diverses plantes vasculaires, désignées ici sous le nom d'espèces pionnières. Les sites expérimentaux, abandonnés depuis une dizaine d'années, se situent à l'intérieur du grand complexe de la tourbière de Rivière-du-Loup (47°48' N, 69°28' O), 200 km à l'est de la ville de Québec (Canada), sur la rive sud du fleuve St-Laurent. Le premier site est constitué de deux anciennes planches d'exploitation recolonisées presque exclusivement par des éricacées arbustives, dont les plus fréquentes sont *Ledum groenlandicum* Retzius, *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench et *Kalmia angustifolia* L. Le deuxième site comporte une dizaine de planches d'exploitation colonisées par deux communautés végétales bien distinctes, soit une communauté dominée par la linaigrette dense (*Eriophorum spissum* Fern.), espèce ayant une forme de croissance en touradon, et une autre dominée par la linaigrette à feuilles étroites (*E. angustifolium* Honck.), espèce stolonifère. Aux deux sites, les canaux de drainage principaux et secondaires ont été bloqués il y a environ cinq ans, mais le remouillage a été beaucoup plus efficace dans le site recolonisé par les linaigrettes. Le marché horticole exigeant une tourbe fibrique, celle-ci n'a pas été exploitée sur une grande profondeur. Les substrats ont donc des propriétés chimiques quelque peu différentes de celles existant dans les tourbières naturelles (notamment un enrichissement en azote), mais le pH demeure dans l'échelle de définition des bogs (TAB. I; WIND-MULDER *et al.*, 1996).

Dans chaque communauté végétale, des parcelles de 1,5 x 5 m ont été délimitées, séparées par des zones tampons d'au moins 1 m, dans des secteurs présentant des structures végétales homogènes et dont la densité du couvert était le plus représentée au niveau du site. Afin de permettre un meilleur contact des diaspores avec le substrat tourbeux lors de leur réintroduction, les plantes ont dû être taillées. Le tableau II décrit le couvert végétal des plantes pionnières avant la taille des plantes et après une et deux saisons de croissance.

**TABLEAU I.**– Chimie des substrats tourbeux en fonction des communautés végétales présentes, en mai 1996. VÉG. = Espèces pionnières dominantes; ÉRI = éricacées; SPI = *Eriophorum spissum*; ANG = *E. angustifolium*; n = nombre d'échantillons; M.O. = taux de matière organique; C.E.C. = capacité d'échange cationique; - = données non disponibles.

*Comparison of the chemical properties of the peat substrate in the three plant communities in may 1996. VÉG. = dominating pioneer species; ÉRI = ericaceous shrubs; SPI = Eriophorum spissum; ANG = E. angustifolium; n = number of samples; M.O. = organic matter content; C.E.C. = cation exchange capacity; - = non-available data.*

Vég.	n	pH eau	pH tampon	M.O.	P	K	Ca	Mg	Al	N-NO3	N-NH4	C/N	CEC
				%assimilable Kg/ha			ppm			ppm	ppm		
ÉRI	4	3,7	3,9	75,9	21	59,5	560	410	157	1,7	105,1	43,0	35,5
SPI	2	4,3	4,6	75,4	14	32	426	266	127	–	39,3	44,3	28,5
ANG	2	4,2	4,8	75,4	12	45	460	289	78	–	42,2	34,5	26,5

**TABLEAU II.**– Couverture (en pourcentage) des espèces pionnières dominantes dans les trois communautés végétales étudiées, et ce, avant la taille des plantes et après une et deux saisons de croissance.

*Cover (in percentage) of pioneer species dominating the three plant communities before the cutting of the plants and after one and two growing seasons.*

	Éricacées	<i>E. spissum</i>	<i>E. angustifolium</i>
Printemps 1996 (avant taille)	29 ± 2	33 ± 1	95 ± 1
Automne 1996	14 ± 1	23 ± 2	15 ± 1
Automne 1997	21 ± 2	55 ± 4	75 ± 2

### RÉCOLTE ET RÉINTRODUCTION DES DIASPORES DE SPHAIGNE ET AJOUT D'UN PAILLIS

Dans chacune des expériences, deux types de diaspores de sphaignes ont été réintroduits, soit des diaspores récoltées à la main et d'autres récoltées mécaniquement à l'aide d'un rotoculteur. Certaines parcelles n'ont reçu aucune réintroduction afin de servir de témoins. Que ce soit de façon manuelle ou mécanique, les diaspores de sphaignes, composées essentiellement de *Sphagnum capillifolium* (Ehrn.) Hedw. et *S. magellanicum* Brid., ont été récoltées sur une profondeur approximative de 10 cm dans une partie naturelle de la tourbière de Rivière-du-Loup. Ces espèces sont les principales responsables de l'accumulation du dépôt tourbeux dans le secteur de l'étude. Les réintroductions ont été effectuées à la main selon un ratio de 1:16, ce qui veut dire que 1 m<sup>2</sup> de végétation prélevée a été épanchée sur 16 m<sup>2</sup> de surface à restaurer. Un paillis d'avoine a ensuite été ajouté à raison de 1 balle de paille par 50 m<sup>2</sup> sur et autour des parcelles leur étant attribuées aléatoirement, afin de minimiser l'effet de bordure. Cette quantité de paille représente 1 500 kg/ha et est considérée comme optimale pour l'établissement des sphaignes (QUINTY & ROCHFORD, 1997a). Chaque combinaison des deux facteurs (diaspores réintroduites (3) X paillis (2)) a été répétée cinq fois dans chacune des com-

munités végétales et le tout a été organisé en blocs complets aléatoires.

### PARAMETRES MESURÉS

Deux paramètres ont été mesurés pour décrire et comparer les conditions hydrologiques dans les communautés végétales étudiées. La profondeur de la nappe phréatique a été mesurée à toutes les semaines ou deux semaines, au cours de l'été 1996 et 1997. Des puits d'observation (tuyaux de PVC de 5 cm de diamètre perforés sur leur longueur) ont été placés au centre de chaque bloc expérimental. La teneur en eau volumique de la tourbe a été mesurée à la fin de chaque mois (de mai à août 1996) en prélevant des échantillons de tourbe de 375 cm<sup>3</sup> (3 x 125 ml) à la surface (0 - 5 cm) de chaque parcelle expérimentale à l'aide d'un échantillonneur à rebords dentelés. Les échantillons ont été pesés (poids humide), séchés au four à 105 °C pendant 24 heures, puis pesés à nouveau (poids sec).

La température, l'humidité relative et la luminosité ont été mesurées à la surface du sol pour comparer les conditions microclimatiques prévalant sous le couvert des diverses plantes pionnières ainsi que sous un couvert additionnel de paille. La température et l'humidité relative ont été mesurées et enregistrées aux heures sur des périodes plus ou moins continues, entre le 14 juin et le 17 septembre 1996, à l'aide de systèmes miniatures d'acquisition de données StowAway™ XTI et RH (Onset Computer Corporation, Pocasset, MA). Les appareils ont été placés sous le couvert végétal de chaque type d'espèces pionnières, avec et sans paille, et ont été déplacés à chaque semaine d'un bloc expérimental à un autre afin de tenir compte des variations spatiales. Les valeurs moyennes journalières et les maxima et minima journaliers ont été calculés à partir des données recueillies. La luminosité a été mesurée à l'aide d'un appareil SunScan Canopy Analysis System (Delta-T Devices LTD, Cambridge) qui permet de mesurer les radiations photosynthétiquement actives (RPA) sous et au-dessus de la voûte végétale, en terme de quantité de pho-

tons. Cette mesure a été effectuée deux fois lors d'une journée ensoleillée, soit le 4 septembre 1996 entre 11 h00 et 13 h00, sous le couvert des diverses plantes pionnières et sous la paille.

Pour quantifier l'établissement de la végétation, huit quadrats (25 cm x 25 cm) par parcelle ont été systématiquement répartis le long de deux transects disposés parallèlement à la longueur de la parcelle. Lors de ces évaluations, effectuées à l'automne 96 et 97, le nombre d'individus de sphaignes (considéré comme tel lorsque le capitulum est formé d'un minimum de 4 à 5 rameaux) a été compté et le pourcentage de recouvrement estimé. Pour chaque communauté végétale, l'effet du type de diaspores et du paillis a été analysé à l'aide d'ANOVAs à 3 facteurs, suivant le modèle de plans en tiroirs, où le "type de diaspores" et le "paillis" ont été considérés comme facteurs principaux regroupés en blocs et "l'année de mesure" comme un sous-facteur. De plus, des contrastes simples et d'interactions ont été utilisés pour identifier les différences significatives entre les traitements ou groupes de traitements. Les données de dénombrement de sphaignes ont été transformées ( $\log(x+1)$ ) afin de réduire l'hétérogénéité des variances. Les analyses ont été menées à l'aide de la procédure GLM de SAS (SAS Institute Inc., 1988).

## RÉSULTATS

### COMPARAISON DES CONDITIONS HYDROLOGIQUES DANS LES TROIS COMMUNAUTÉS VÉGÉTALES

La nappe phréatique se situe beaucoup plus près de la surface dans les communautés végétales dominées par les cypéracées que dans celles dominées par les éricacées (FIG. 1 a). De plus, la nappe phréatique est légèrement plus haute, même souvent affleurante, dans les communautés d'*E. angustifolium* que dans celles d'*E. spissum*. En 1996, la nappe phréatique se situe en moyenne à 39, 15 et 10 cm sous la surface dans les communautés d'éricacées, d'*E. spissum* et d'*E. angustifolium* respectivement. En 1997, les moyennes sont de 49, 18 et 13 cm sous la surface dans ces mêmes communautés végétales respectives. La teneur en eau volumique de la tourbe de surface est aussi plus élevée dans les communautés dominées par les deux espèces de linaigrettes, où on calcule des valeurs moyennes pour l'été 1996 de 65 % dans la communauté d'*E. spissum* et de 68 % dans celle d'*E. angustifolium* (FIG. 1 b). La teneur en eau moyenne n'est que de 46 % dans la communauté d'éricacées.

### MICROCLIMAT DANS LES DIVERSES COMMUNAUTÉS VÉGÉTALES

Les courbes cumulatives présentées à la figure 2 (a et b) illustrent le pourcentage de temps où les températures maximales et les humidités relatives minimales journalières

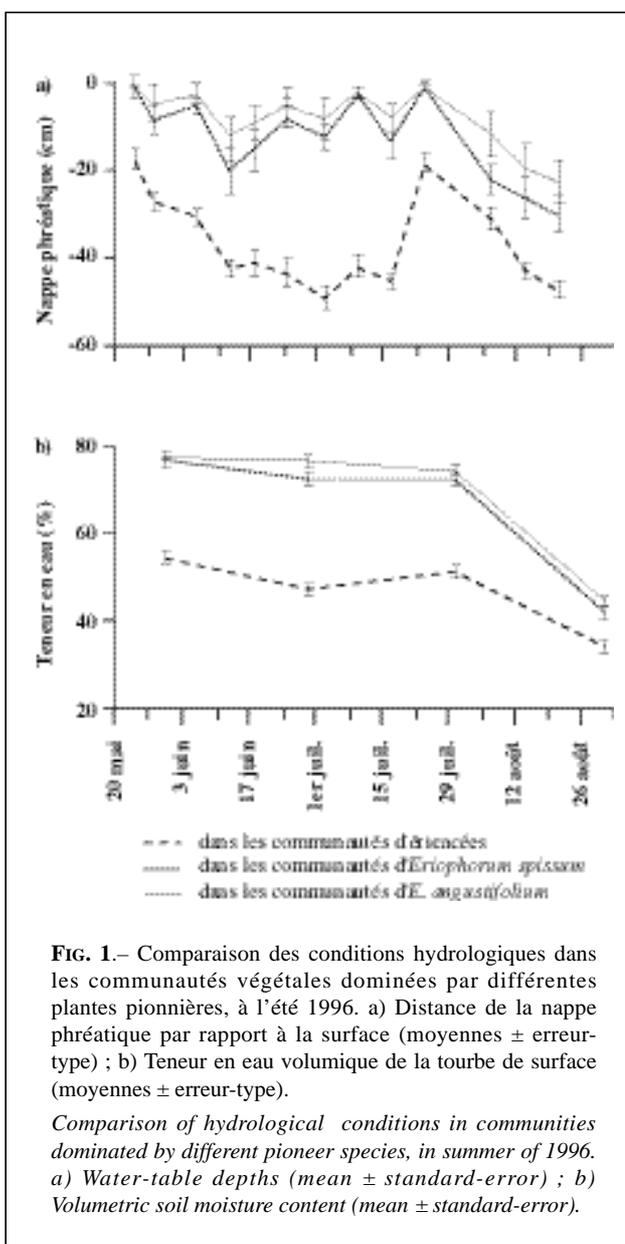
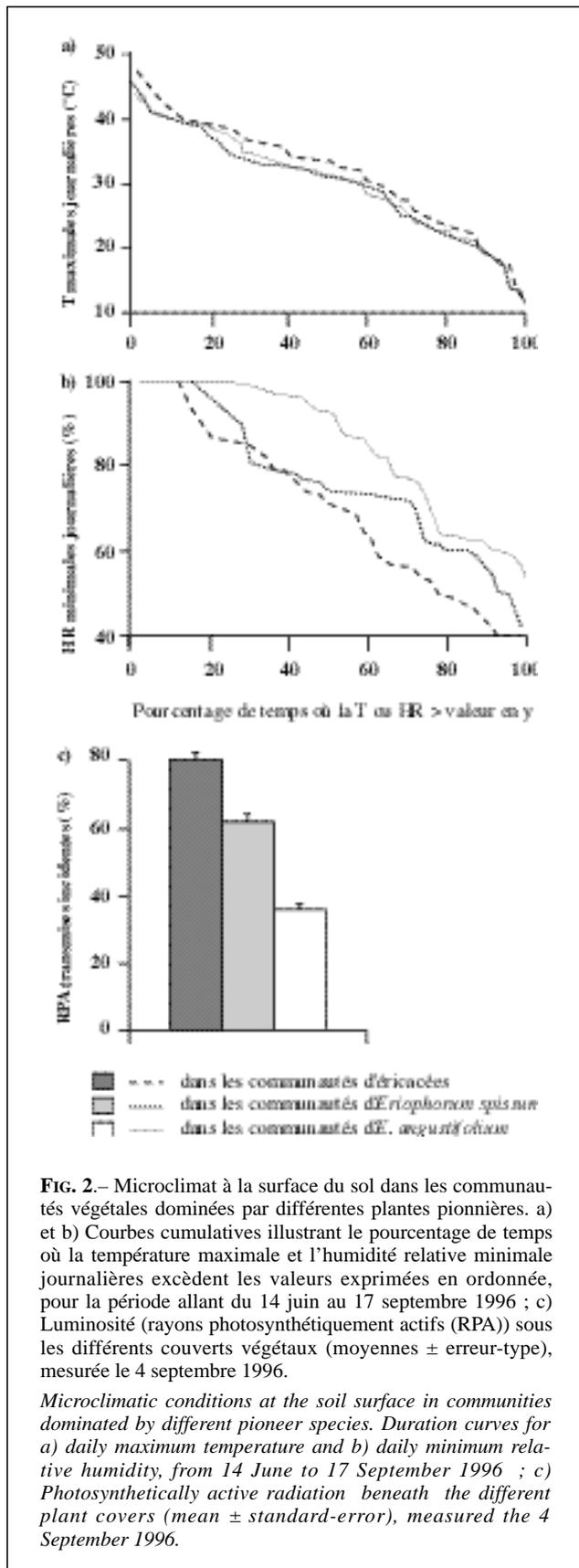


FIG. 1.— Comparaison des conditions hydrologiques dans les communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières, à l'été 1996. a) Distance de la nappe phréatique par rapport à la surface (moyennes  $\pm$  erreur-type) ; b) Teneur en eau volumique de la tourbe de surface (moyennes  $\pm$  erreur-type).

Comparison of hydrological conditions in communities dominated by different pioneer species, in summer of 1996. a) Water-table depths (mean  $\pm$  standard-error) ; b) Volumetric soil moisture content (mean  $\pm$  standard-error).

lières excèdent les valeurs exprimées en ordonnée. En général, les températures maximales journalières à la surface de la tourbe sont de 2 - 3 °C plus chaudes sous les éricacées que sous les deux espèces de linaigrettes (FIG. 2 a). Aucune différence n'est visible pour les températures minimales journalières (moyenne de 9 °C pour l'été 1996) et les moyennes journalières (17,5 °C). Des différences beaucoup plus marquées sont observées au niveau de l'humidité relative à l'interface tourbe-air (FIG. 2 b). L'humidité relative est la plus élevée dans la communauté d'*E. angustifolium* où l'air à la surface du sol reste plus humide, et ce, plus longtemps, que dans les autres communautés végétales. Les pourcentages de rayons incidents qui sont transmis à travers la voûte végétale jusqu'au sol sont



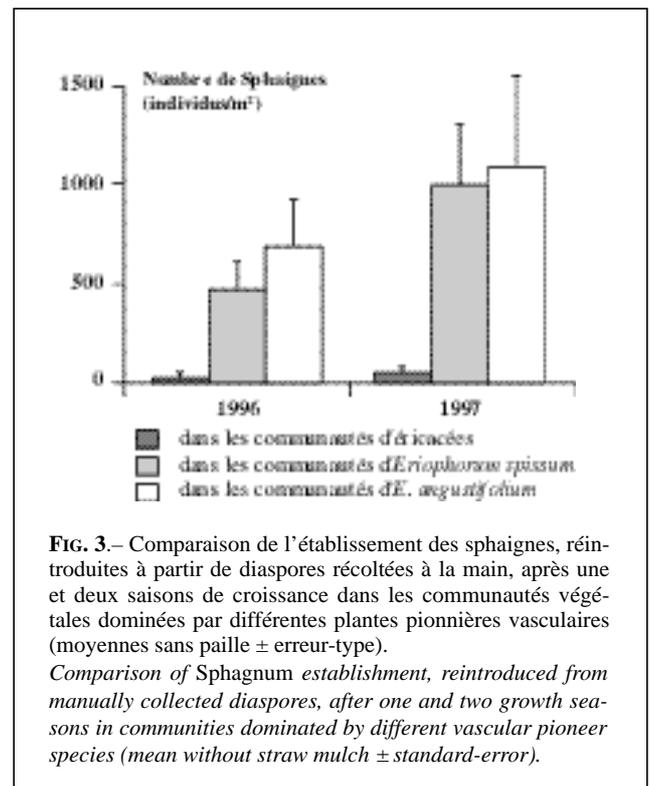
de 80, 60 et 40 % sous les éricacées, l'*E. spissum* et l'*E. angustifolium* respectivement (Fig. 2 c). Ainsi, l'interface tourbe-air est légèrement plus fraîche, beaucoup plus humide et plus ombragée sous les linaigrettes, particulièrement sous *E. angustifolium*, que sous les éricacées.

#### ÉTABLISSEMENT DES SPHAIGNES EN FONCTION DES COMMUNAUTÉS VÉGÉTALES

Les caractéristiques hydrologiques et microclimatiques étant très différentes dans les trois communautés végétales étudiées, il n'est pas surprenant d'observer des succès d'établissement des sphaignes différents selon ces communautés. Dans les communautés d'éricacées, les sphaignes ont peine à survivre (35 ind/m<sup>2</sup> en 1997, ce qui équivaut à un recouvrement de 0,3 % ; FIG. 3). Par contre, dans les communautés d'*E. spissum* et d'*E. angustifolium*, non seulement elles survivent mais elles forment à certains endroits des tapis de sphaignes continus (995 et 1090 ind/m<sup>2</sup> respectivement, ou 17 et 22 % de recouvrement).

#### EFFET D'UN PAILLIS DANS LES DIVERSES COMMUNAUTÉS VÉGÉTALES

Dans la communauté d'éricacées, l'ajout d'un paillis de paille entraîne un meilleur établissement des sphaignes, et ce, peu importe le type de diaspores réintroduites ( $P = 0,04$ ; FIG. 4). Après deux saisons de croissance, on compte environ sept fois plus de sphaignes quand un



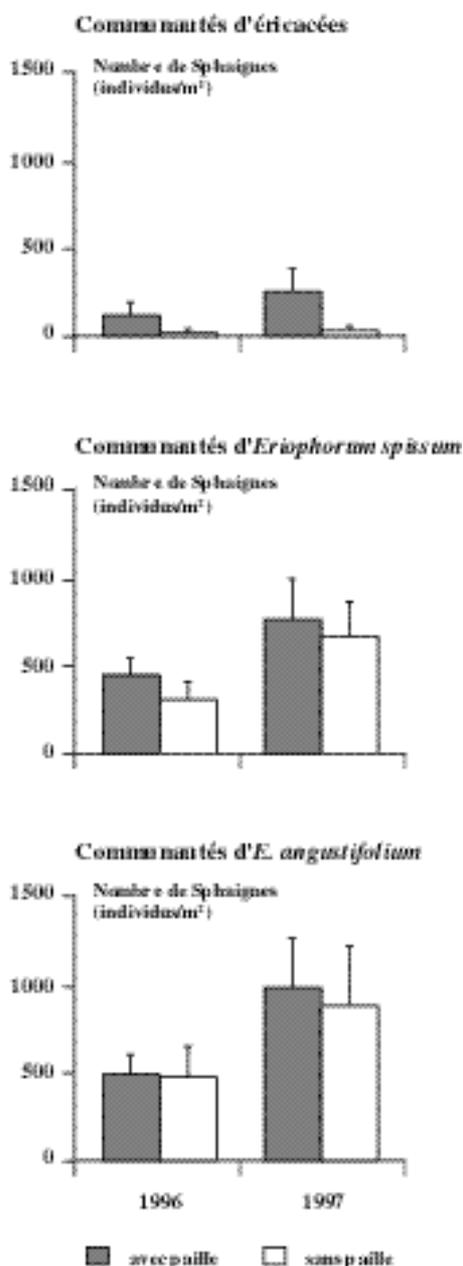


FIG. 4.— Effet de l'ajout d'un paillis sur l'établissement des sphaignes après une et deux saisons de croissance dans les communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières (moyennes des deux types de diaspores  $\pm$  erreur-type).

Effect of straw mulch on Sphagnum establishment after one and two growth seasons in communities dominated by different pioneer species (mean of manually and mechanically collected diaspores  $\pm$  standard-error).

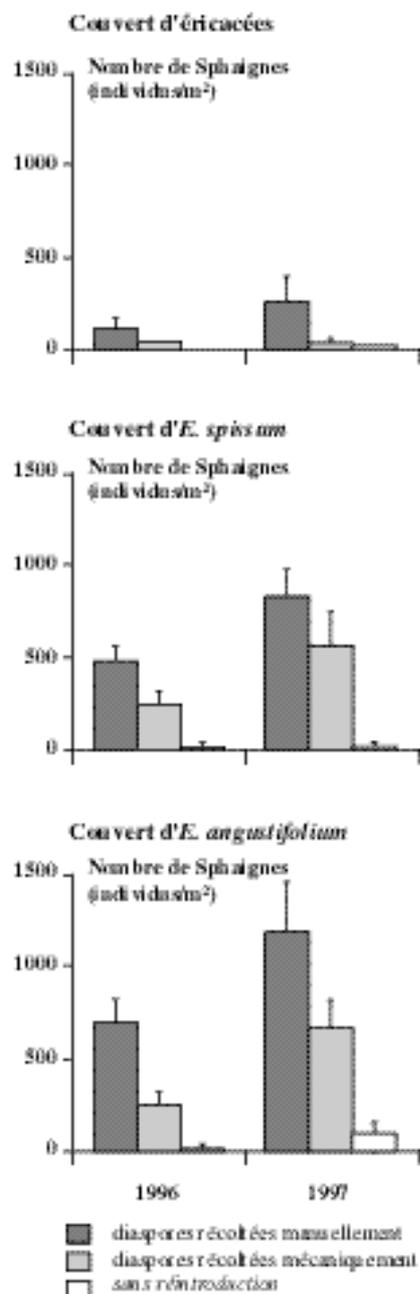


FIG. 5.— Effet du mode de récolte des diaspores de sphaignes sur leur succès d'établissement, après une et deux saisons de croissance dans les communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières (moyennes avec et sans paillis  $\pm$  erreur-type).

Effect of collection techniques of Sphagnum diaspores on their establishment success, after one and two growth seasons in communities dominated by different pioneer species (mean with and without straw mulch  $\pm$  standard-error).

paillis a été ajouté (247 ind/m<sup>2</sup>, soit 2,5 % de recouvrement) comparé aux endroits où il n'y en a pas (23 ind/m<sup>2</sup>, soit 0,2 %). Malgré l'effet positif de la paille dans cette communauté arbustive, le succès d'établissement des sphaignes reste inférieur à ceux observés dans les communautés d'herbacées. D'ailleurs, la présence de paille n'entraîne pas un meilleur établissement des sphaignes dans les communautés d'*E. spissum* ( $P = 0,11$ ; FIG. 4) ou d'*E. angustifolium* ( $P = 0,36$ ; FIG. 4).

L'ajout d'un paillis modifie les conditions microclimatiques à la surface du sol. En général, la température sous la paille se maintient légèrement plus fraîche le jour et plus chaude la nuit que lorsqu'aucun paillis n'est ajouté. Selon les moyennes générales pour l'été 1996, la présence de paille réduit les maxima journaliers de 3,5 °C sous les éricacées et de 1,5 °C sous les deux espèces de linaigrettes. Dans les trois cas, les minima journaliers sont plus élevés de 1 °C en présence de paille. Le couvert de paille modifie aussi la luminosité à la surface en interceptant près de 50 % des rayons photosynthétiquement actifs (RPA). Par contre, dans les trois communautés végétales étudiées, le paillis n'influence pas l'humidité relative à la surface ni la teneur en eau du sol (BOUDREAU, 1999).

#### **EFFET DU MODE DE RÉCOLTE DES SPHAIGNES RÉINTRODUITES SUR LEUR SUCCÈS D'ÉTABLISSEMENT**

Dans les trois communautés végétales étudiées, plus de sphaignes survivent et s'établissent à partir des diaspores récoltées manuellement plutôt que mécaniquement (communautés d'éricacées :  $P = 0,004$ , d'*E. spissum* :  $P = 0,0001$ , d'*E. angustifolium* :  $P = 0,0001$ ; FIG. 1). Dans la communauté d'éricacées, on dénombre cinq fois plus de sphaignes, après deux saisons de croissance, lorsque celles-ci ont été récoltées à la main. Dans les deux communautés de linaigrettes, presque deux fois plus de sphaignes s'établissent à partir des diaspores récoltées manuellement comparées à celles récoltées de façon mécanique. Dans tous les cas, la recolonisation naturelle par les sphaignes dans les parcelles témoins demeure minime.

### **DISCUSSION**

#### **ÉTABLISSEMENT DES SPHAIGNES SOUS DIVERSES COMMUNAUTÉS VÉGÉTALES**

Le succès d'établissement des sphaignes est nettement supérieur dans les communautés de linaigrettes que dans celle d'éricacées. Si on compare les conditions microclimatiques dans les trois communautés végétales, on peut voir que les surfaces sont plus fraîches, plus humides et plus ombragées sous les couverts des cypéracées que sous les couverts d'éricacées. Des mesures prises dans une

zone où des touradons d'*E. spissum* ont été enlevés ont d'ailleurs permis de démontrer que l'humidité relative de l'air à la surface est plus élevée lorsqu'un couvert végétal est présent que lorsqu'il a été enlevé (BOUDREAU, 1999).

Des températures fraîches et surtout une humidité relative élevée sont des conditions microclimatiques favorables pour les sphaignes (HARLEY *et al.*, 1989; BUTTLER *et al.*, 1998). On connaît moins l'effet d'une diminution des rayons incidents sur les diaspores de sphaignes réintroduites. Quoiqu'il en soit, les sphaignes réintroduites ont une surface beaucoup plus exposée aux rayons solaires que celles croissant en communauté qui se font de l'ombrage mutuellement et qui n'ont souvent que le capitulum d'exposé. Dans ces conditions, il est fort possible qu'une trop forte luminosité nuise à la reprise des sphaignes sur le terrain en causant des processus de photoinhibition (MURRAY *et al.*, 1993). Ainsi, il existe bien un microclimat favorable pour les sphaignes sous les couverts des cypéracées, particulièrement sous l'*E. angustifolium*. Il est cependant difficile de déterminer l'importance réelle de ce microclimat sur l'établissement des sphaignes.

En effet, même si des conditions microclimatiques favorables sont générées par la présence des plantes pionnières de type herbacé, les conditions hydrologiques locales du site influencent directement les sphaignes qui sont plus abondantes dans les endroits où le substrat est le plus humide et l'eau plus disponible. Des succès d'établissement des sphaignes proportionnels à un gradient d'humidité ont d'ailleurs déjà été rapportés dans différentes études (MONEY, 1995; ROCHEFORT *et al.*, 1995; CAMPEAU & ROCHEFORT, 1996; BUGNON *et al.*, 1997). Il n'est donc pas possible de dissocier l'influence des plantes de celle de leur environnement. Il est cependant fort probable que, pour deux substrats résiduels possédant des caractéristiques physiques et hydrologiques similaires, la présence de plantes pionnières de type herbacé facilite l'établissement d'un couvert muscinal. Par contre, cette interaction positive n'est probablement effective que lorsque les conditions microclimatiques à la surface sont limitantes, c'est-à-dire lorsque les conditions hydrologiques ne sont pas optimales.

#### **EFFET D'UN PAILLIS EN PRÉSENCE DE DIFFÉRENTS COUVERTS VÉGÉTAUX**

L'effet bénéfique de la paille comme protection physique pour les diaspores réintroduites dépend de la surface à restaurer. Il a été maintes fois prouvé que l'ajout de paille permet un meilleur établissement des sphaignes réintroduites sur des substrats nouvellement abandonnés et donc dénudés de toute autre végétation (QUINTY & ROCHEFORT, 1997B; ROCHEFORT & CAMPEAU, 1997; ROCHEFORT *et al.*, 1997). Par contre, lorsque les surfaces à restaurer ont été abandonnées depuis un certain temps

et qu'un couvert végétal est présent, l'ajout d'un paillis de paille peut s'avérer superflu, selon le type d'espèces pionnières colonisant le substrat et des conditions hydrologiques du site. Ainsi, la paille est essentielle pour promouvoir l'établissement des sphaignes réintroduites sous les couverts d'éricacées mais n'est pas nécessaire en présence des deux espèces d'*Eriophorum*. Ceci nous amène à penser que la présence d'un couvert végétal herbacé peut remplacer avantageusement la protection offerte par le paillis, dans certaines situations. D'un autre côté, il se peut aussi que la paille ne soit plus nécessaire dans les communautés dominées par les linaigrettes en raison des bonnes conditions hydrologiques du site. Si c'est le cas, le microclimat à la surface n'est plus limitant pour les sphaignes, qui bénéficient de toute l'humidité dont elles ont besoin.

En général, l'utilisation d'un paillis est reconnue pour améliorer les conditions d'humidité du sol et la température à la surface via son effet sur le bilan énergétique (GARDNER & WOOLHISER, 1978; PLASS, 1978; HARES & NOVAK, 1992). Des températures plus tempérées, une humidité relative de l'air à la surface du sol plus élevée et une plus grande teneur en eau de la tourbe ont d'ailleurs été observées par PRICE *et al.* (1998) sous un paillis appliqué sur un substrat tourbeux dénudé. Dans la présente étude, la paille crée des températures à la surface du sol plus fraîches le jour et légèrement plus chaudes la nuit, de même qu'elle réduit de moitié la luminosité à la surface du sol. Par contre, le paillis n'influence pas l'humidité relative de l'air et la teneur en eau volumique de la tourbe de surface. Il est possible que la grandeur de nos parcelles expérimentales, relativement petites, soit une des raisons expliquant ces différentes réponses, en ne permettant pas de générer ou de mesurer des conditions plus humides à cette échelle.

#### IMPACT DE LA MÉCANISATION SUR LES DIASPORES DE SPHAIGNES

Le mode de récolte des diaspores réintroduites influence fortement le succès d'établissement des sphaignes. Lorsque récoltées à la main, les diaspores sont beaucoup plus efficaces pour l'établissement des sphaignes que celles récoltées mécaniquement, et ce, dans les trois communautés végétales étudiées. Puisque nous assumons que la même quantité de sphaignes par unité de surface a été prélevée pour les deux modes de récolte, le facteur qui semble le plus important pour expliquer cette perte d'efficacité est le stress mécanique causé par la machinerie lors de la récolte. La mécanisation des opérations est inévitable lors de travaux de restauration à grande échelle et il est assez difficile de minimiser le stress causé à la végétation. Cependant, une attention particulière devrait toujours être accordée à ces opérations, par

exemple en s'assurant de respecter l'épaisseur optimale de récolte (10 premiers cm; CAMPEAU & ROCHEFORT, 1996) ou en réduisant les délais d'attente avant les réintroductions, afin de maximiser la qualité du matériel de réintroduction, en terme de potentiel de régénération (CLYMO & DUCKETT, 1986).

#### APPLICATION EN RESTAURATION

Malgré les efforts de remouillage des sites à restaurer, ceux-ci ne présentent généralement pas des conditions hydrologiques aussi favorables à l'établissement et la croissance des sphaignes que celles rencontrées dans les tourbières naturelles ou dans le site recolonisé par les cypéracées (e.g. PRICE, 1996). Les conditions microclimatiques à la surface, qu'elles soient générées par la présence de plantes pionnières ou par l'ajout d'un paillis, deviennent alors importantes et peuvent être garantes du succès de réimplantation des sphaignes. D'un point de vue pratique, la présence de plantes pionnières peut représenter une alternative intéressante au paillis, en offrant une protection à plus long terme et plus résistante aux vents et en réduisant l'érosion souvent importante sur les substrats abandonnés après l'exploitation. Une fois les sphaignes établies, il est aussi possible que la présence d'un couvert végétal procure un certain support structurel qui facilite la croissance et la productivité des sphaignes. Ce phénomène a déjà été observé dans les communautés non perturbées (MALMER *et al.*, 1994), mais cette hypothèse demeure à vérifier dans le cas de sites en restauration et demande une étude à plus long terme.

Les deux espèces de linaigrettes sont des plantes pionnières très efficaces pour recoloniser les tourbières abandonnées après exploitation, en raison de leur grande amplitude écologique et la rapidité de leur propagation (WEIN, 1973; ANDERSON *et al.*, 1996). *L'E. angustifolium* est une espèce à privilégier pour la restauration, car elle procure, de part son système de rhizomes entrelaçants, un couvert (et donc une protection) plus uniforme que ne le fait *L'E. spissum*. *L'E. angustifolium* est aussi une espèce qui se transpose bien, et plusieurs centaines d'individus peuvent facilement être récoltées dans une petite communauté dense (RICHARDS *et al.*, 1995). Des associations avantageuses ont d'ailleurs déjà été observées entre la linaigrette à feuilles étroites et les sphaignes (JOOSTEN, 1992; FERLAND & ROCHEFORT, 1997). Les sphaignes pourraient ainsi être réintroduites lorsque le couvert végétal est assez dense pour leur procurer un microclimat favorable. D'autres recherches sont toutefois nécessaires afin de déterminer les densités optimales d'espèces vasculaires pouvant procurer un microclimat favorable pour les sphaignes. Celles-ci, une fois établies et si des conditions favorables persistent, seront à même de modifier leur environnement et d'engendrer des processus d'accumulation de tourbe.

## REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée grâce à des bourses octroyées par le Conseil de recherche en sciences et en génie (CRSNG) et par Le Groupe Roche Itée. Nous remercions Premier Horticulture Itée pour l'accès aux sites et le support technique. Nous remercions également tous les membres du Groupe de recherche en écologie des tourbières, et plus particulièrement François QUINTY et Suzanne CAMPEAU, pour leurs judicieux conseils et leur appui.

## BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON, D.S., DAVIS, R.B., ROONEY, S.C. & CAMPBELL, C.S., 1996.— The ecology of sedges (cyperaceae) in Maine peatlands, *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 123 : 100-110.
- BOUDREAU, S., 1999.— *Restauration des tourbières exploitées, abandonnées et recolonisées par diverses communautés végétales*. Mémoire de Maîtrise ès Sciences, Université Laval, Québec. 93 p.
- BUGNON, J.-L., ROCHEFORT, L. & PRICE, J.S., 1997.— Field experiment of *Sphagnum* reintroduction on a dry abandoned peatland in eastern Canada, *Wetlands*, 17 : 513-517.
- BUTTLER, A., GROSVERNIER, P. & MATTHEY, Y., 1998.— Development of *Sphagnum fallax* diaspores on bare peat with implications for the restoration of cut-over bogs, *J. Appl. Ecol.*, 35 : 800-810.
- CAMPEAU, S. & ROCHEFORT, L., 1996.— *Sphagnum* regeneration on bare peat surfaces : field and greenhouse experiments, *J. Appl. Ecol.*, 33 : 599-608.
- CLYMO, R.S. & DUCKETT, J.G., 1986.— Regeneration of *Sphagnum*, *New Phytol.*, 102 : 589-614.
- FERLAND, C. & ROCHEFORT, L., 1997.— Restoration techniques for ombrotrophic peatlands, *Can. J. Bot.*, 75 : 1110-1118.
- GARDNER, H.R. & WOOLHISER, D.A., 1978.— Hydrologic and climatic factors affecting the hydrological cycle. In : SHALLER & SUTTON (éd.), *Reclamation of drastically disturbed lands : proceedings (9-12 August 1976)*. ASA-CSSA-SSSA, Madison : 46-58.
- GROSVERNIER, P., MATTHEY, Y. & BUTTLER, A., 1995.— Microclimate and physical properties of peat : new clues to the understanding of bog restoration processes. In : WHEELER, B.D., SHAW, S.C., FOJT, W.J. & ROBERTSON, R.A. (éd.), *Restoration of temperate wetlands*. John Wiley & Sons, Chichester : 435-449.
- GROSVERNIER, P., MATTHEY, Y. & BUTTLER, A., 1997.— Growth potential of three *Sphagnum* species in relation to water table level and peat properties with implications for their restoration in cut-over bogs, *J. Appl. Ecol.*, 34 : 471-483.
- HARES, M.A. & NOVAK, M.D., 1992.— Simulation of surface energy balance and soil temperature under strip tillage : II. field test, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56 : 29-36.
- HARLEY, P.C., TENHUNEN, J.D., MURRAY, K.J. & BEYERS, J., 1989.— Irradiance and temperature effects on photosynthesis of tussock tundra *Sphagnum* mosses from the foothills of the Philip Smith Mountains, Alaska, *Oecologia*, 79 : 251-259.
- JOOSTEN, J.H.J., 1992.— Bog regeneration in the Netherlands : a review. In : BRAGG, O.M., HULME, D.D., INGRAM, H.A.P. & ROBERTSON, R.A. (éd.), *Peatland ecosystems and Man : an impact assessment*. Department of biological sciences, University of Dundee : Dundee, U.K. : 367-373.
- KEYS, D., 1992.— *Canadian peat harvesting and the environment*. Conseil nord-américain de conservation des terres humides, Ottawa : 29 p., n° 1992-3.
- LUKEN, J.O., BILLINGS, W.D. & PETERSON, K.M., 1985.— Succession and biomass allocation as controlled by *Sphagnum* in an Alaskan peatland, *Can. J. Bot.*, 63 : 1500-1507.
- MALMER, N., SVENSSON, B.M. & WALLEN, B., 1994.— Interactions between *Sphagnum* mosses and field layer vascular plants in the development of peat-forming systems, *Folia Geobot. Phytotaxon.*, 29 : 483-496.
- MONEY, R.P., 1995.— Re-establishment of a *Sphagnum*-dominated flora on cut-over lowland raised bogs. In : WHEELER, B.D., SHAW, S.C., FOJT, W.J. & ROBERTSON, R.A. (éd.), *Restoration of temperate wetlands*. John Wiley & Sons, Chichester : 405-422.
- MURRAY, K.J., TENHUNEN, D. & NOWAK, R.S., 1993.— Photoinhibition as a control on photosynthesis and production of *Sphagnum* mosses, *Oecologia*, 96 : 200-207.
- PLASS, W.T., 1978. Use of mulches and soil stabilizers. In : SHALLER & SUTTON (éd.), *Reclamation of drastically disturbed lands : proceedings (9-12 August 1976)*. ASA-CSSA-SSSA, Madison : 123-131.
- PRICE, J.S., 1996.— Hydrology and microclimate of a partly restored cutover bog, Québec, *Hydrol. Proc.*, 10 : 1263-1272.
- PRICE, J., ROCHEFORT, L. & QUINTY, F., 1998. Energy and moisture considerations on cutover peatlands : surface preparation, mulch cover and *Sphagnum* regeneration, *Ecol. Eng.*, 10 : 293-312.
- QUINTY, F. & ROCHEFORT, L., 1997a.— *Guide de restauration des tourbières - Peatland restoration guide*. Association Canadienne de Mousse de Tourbe, Québec : 21 p.
- QUINTY, F. & ROCHEFORT, L., 1997b.— Plant reintroduction on a harvested peat bog. In : TRETIN, C., JURGENSEN, M.F., GRIGAL, D.F., GALE, M.R. & JEGNUM, J.K. (éd.), *Northern Forested Wetlands*. CRC Lewis Publishers, Boca Raton : 133-145.
- RICHARDS, J.R.A., WHEELER, B.D., & WILLIS, A.J., 1995.— The growth and value of *Eriophorum angustifolium* Honck. in relation to the revegetation of eroding blanket peat. In : WHEELER, B.D., SHAW, S.C., FOJT, W.J. & ROBERTSON, R.A. (éd.), *Restoration of temperate wetlands*. John Wiley & Sons, Chichester : 509-521.
- ROBERT, É.C., ROCHEFORT, L. & GARNEAU, M., 1999.— Natural revegetation of two block-cut mined peatlands in eastern Canada, *Can. J. Bot.*, : sous presse.
- ROCHEFORT, L. & CAMPEAU, S., 1997.— Rehabilitation work on post-harvested bogs in south-eastern Canada. In : PARKYN, L., STONEMAN, R.E. & INGRAM, H.A.P. (éd.), *Conserving peatlands*. Cab International, Wallingford (U.K.) : 287-294.
- ROCHEFORT, L., GAUTHIER, R. & LEQUERÉ, D., 1995.— *Sphagnum* regeneration - toward an optimisation of bog restoration. *Restoration of temperate wetlands*. In : WHEELER, B.D., SHAW, S.C., FOJT, W.J. & ROBERTSON, R.A. (éd.), *Restoration of temperate wetlands*. John Wiley & Sons, Chichester : 423-434.
- ROCHEFORT, L., QUINTY, F. & CAMPEAU, S., 1997.— Restoration of peatland vegetation : the case of damaged or completely removed acrotelm, *Intern. Peat J.*, 7 : 20-28.
- SALONEN, V., 1992.— Effects of artificial plant cover on plant colonization of a bare peat surface, *J. Veg. Sci.*, 3 : 109-112.
- SAS INSTITUTE INC., 1988.— *SAS/STAT® TM User's Guide, release 6.03 Edition*. SAS Institute Inc, Cary, NC : 1028 p.
- VAN BREEMAN, N., 1995.— How *Sphagnum* bogs down other plants, *Tree*, 10 : 270-275.
- WEIN, R.W., 1973.— Biological flora of British isles : *Eriophorum vaginatum* L., *J. Ecol.*, 612 : 601-615.

- WHEELER, B.D. & SHAW, S.C., 1995.— *Restoration of damaged peatlands*. HMSO, London : 211 p.
- WIND-MULDER, H.L., ROCHEFORT, L. & VITT, D.H., 1996.— Water and peat chemistry comparisons of natural and post-harvested peatlands across Canada and their relevance to peatland restoration, *Ecol. Eng.*, 7 : 161-181.

#### ENGLISH ABRIDGED VERSION

Research into the restoration of post-harvested peatlands began in Canada in 1993, in a collaborative efforts between governments, academic researchers and peat industries. In general, the restoration techniques consist of a partial rewetting of the sites followed by the re-introduction of *Sphagnum* diaspores, protected by a straw mulch in the establishment stage. As part of this research project, a study was undertaken in 1996 to test whether the presence of pioneer species helps the establishment of re-introduced *Sphagnum* mosses. Three experiments were initiated on abandoned peat surfaces now recolonised by communities dominated either by 1) ericaceous shrubs (e.g. *Ledum groenlandicum* and *Chamaedaphne calyculata*), 2) dense cotton-grass (*Eriophorum spissum*) or 3) narrow-leaved cotton-grass (*E. angustifolium*).

In each experiment, *Sphagnum* diaspores were manually or mechanically-collected in a natural peatland and re-introduced in experimental sites, with or without the addition of a straw mulch. The water-table depth and the volumetric soil moisture content were measured to compare hydrological conditions in the three plant communities. The microclimatic conditions beneath each type of pioneer species and beneath the straw mulch were also estimated by measuring temperature, relative humidity and photosynthetically active radiation (PAR) at the ground surface. The establishment success of *Sphagnum* diaspores was estimated in autumn 1996 and 1997.

The hydrological conditions prevailing in each plant community are very different. The water table is much closer to the surface in the two cotton-grass communities than in the ericaceous shrub community. The volumetric soil moisture content is higher in communities dominated by the two cotton-grass species. Microclimatic conditions at the ground surface are also different beneath each type of pioneer species. Daily maximum temperatures are 2 to 3 °C warmer beneath the ericaceous shrubs than beneath the two *Eriophorum* species. Relative humidity beneath the canopy is the highest in *E. angustifolium* community, where the air at the ground surface stays more humid, and that for a longer time, compared to the other plant communities. Therefore, more *Sphagnum* mosses establish beneath the cover of the two *Eriophorum* species, where the substrate is more humid and the microclimatic conditions more suitable for their establishment. However, it is not possible to dissociate the effect of the plants themselves from the effect of their growing environment.

Straw mulch has a positive effect on *Sphagnum* establishment in ericaceous communities, but this effect is not present in *Eriophorum* communities. This may either be due to the better protection offered by the herbaceous communities or to the better hydrological conditions of the site. In general, straw mulch moderates temperature and reduces by half the quantity of PAR reaching the ground surface. Finally, *Sphagnum* diaspores established better when collected manually rather than mechanically. Even if needed for restoration trials on larger scales, mechanisation of operations will cause a loss of quality of the diaspores, in terms of their recolonisation potential.

In restoration trials, rewetting of the post-harvested sites is often not optimal. Microclimatic conditions at the ground surface, created by the presence of pioneer species or by the addition of straw mulch, then become more critical for *Sphagnum* establishment. From a practical point of view, the presence of herbaceous pioneer species could represent a good alternative to the use of straw mulch, by offering a protection over a longer period and by being more resistant to wind.