

KATHLEEN MARCOUX

**LES INVASIONS DE LINAIGRETTE (*ERIOPHORUM VAGINATUM* L.):
AIDE OU FREIN À LA RESTAURATION DES TOURBIÈRES?**

Mémoire
présenté
à la Faculté des études supérieures
de l'Université Laval
pour l'obtention
du grade de maître en aménagement du territoire
et développement régional (M.ATDR)

Département d'aménagement
FACULTÉ D'AMÉNAGEMENT, D'ARCHITECTURE ET DES ARTS VISUELS
UNIVERSITÉ LAVAL

NOVEMBRE 2000

Résumé

Les tourbières exploitées à des fins industrielles subissent de profondes perturbations. Comme la plupart des milieux perturbés par les activités anthropiques, les tourbières abandonnées après exploitation sont favorables aux invasions massives d'espèces opportunistes. Ces invasions ont généralement des impacts négatifs, mais elles peuvent, dans certains cas, contribuer à la restauration des écosystèmes dégradés. Nous avons testé les hypothèses suivantes: 1) les invasions de linaigrette (*Eriophorum vaginatum* L.) qui se produisent dans les tourbières abandonnées après exploitation améliorent les conditions microclimatiques et hydrologiques et stabilisent le sol, contribuant ainsi à l'établissement des sphaignes et des autres plantes de tourbière, et 2) les caractéristiques hydrologiques et physiques de ces milieux perturbés peuvent être gérées de façon à favoriser les invasions de linaigrette. Au cours de l'été 1999, un dispositif expérimental a été installé dans une tourbière exploitée du sud du Québec. Les conditions microclimatiques et hydrologiques ont fait l'objet d'un suivi quotidien dans des sites avec (couvert: 100%) ou sans (couvert: 0%) linaigrette. Les données suggèrent que la présence d'un couvert dense de linaigrette génère un microclimat moins contrasté et des conditions hydrologiques plus propices à l'établissement des sphaignes et des autres espèces typiques des écosystèmes tourbeux. Le couvert de linaigrette minimise également les perturbations du sol associées au soulèvement gélival. La mise en œuvre de certaines mesures hydrologiques simples pourrait favoriser l'obtention rapide d'un couvert dense de linaigrette. La recolonisation massive par la linaigrette des sites tourbeux perturbés par les activités d'exploitation constitue une alternative naturelle, peu coûteuse et, à long terme, prometteuse pour la restauration des tourbières.

Kathleen Marcoux
Étudiante M.ATDR

Claude Lavoie
Directeur

Jonathan S. Price
Codirecteur

Remerciements

La réalisation de ce travail de recherche a impliqué la collaboration de plusieurs personnes à qui je souhaite exprimer toute ma gratitude. Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche, M. Claude Lavoie, professeur au département d'aménagement de l'Université Laval, pour son encadrement de grande qualité, sa disponibilité et ses commentaires pertinents. Il a manifesté un grand enthousiasme pour cette recherche, et ce, à toutes les étapes du projet. Je désire également remercier M. Jonathan S. Price, professeur au département de géographie de l'Université de Waterloo, pour avoir accepté de codiriger ce mémoire. Il m'a prodigué de judicieux conseils quant aux aspects hydrologiques de cette recherche. Je remercie aussi Mme Line Rochefort, professeure au département de phytologie de l'Université Laval, pour le temps consacré à l'évaluation de ce mémoire.

Je remercie particulièrement Mme Nathalie Rivard, mon assistante, pour son aide et sa bonne humeur au cours des trois mois de cueillette de données sur le terrain. Mes remerciements s'adressent également à Mmes Stéphanie Boudreau, Suzanne Campeau et Line Rochefort et à M. François Quinty du Groupe de recherche en écologie des tourbières (GRET), ainsi qu'à MM. Dan Fitzgerald, Grant Whitehead et Tim Van Seters du Wetland Hydrology Laboratory de l'Université de Waterloo pour leurs conseils et leurs critiques constructives au moment de l'élaboration du dispositif expérimental. Mesdames Annie Saint-Louis et Laurence Letarte et M. Gilles Bordage ont fourni une aide précieuse pour la saisie des données. L'aide de Suzanne Campeau a été très appréciée pour les questions d'analyses statistiques.

Je remercie MM. Robert Gauthier et Claude Roy et Mme Michelle Garneau de l'Herbier Louis-Marie de l'Université Laval pour m'avoir aidé à identifier certaines espèces de sphaigne, d'hépatique et de plante vasculaire.

Je remercie aussi M. Jean Caron, professeur au département des sols et de génie agroalimentaire de l'Université Laval, ainsi que son technicien, M. Gilles Richard, pour leur aide et pour l'accès à leur laboratoire au moment de la calibration des données de contenu volumique en eau de la tourbe.

Monsieur Pierre Lemieux, informaticien au Centre de recherche en aménagement et en développement (CRAD) de l'Université Laval, a fourni un support informatique très apprécié.

Je désire remercier la compagnie Premier Horticulture inc., propriétaire de la tourbière de Saint-Henri, et la compagnie Tourbière Smith 2000 inc., propriétaire de la tourbière de Saint-Charles-de-Bellechasse, pour m'avoir autorisée à mener mon projet de recherche sur leur site d'exploitation. Les données recueillies à la tourbière de Saint-Charles-de-Bellechasse n'ont pas été analysées dans le cadre du présent mémoire, mais elles constituent une banque d'information importante qui sera utilisée lors de recherches ultérieures. Je remercie particulièrement M. Georges Gagnon pour tous les renseignements fournis au sujet de la tourbière de Saint-Henri.

J'adresse des remerciements particuliers à ma famille et mes amis qui m'ont encouragée tout au long de ce projet. Je tiens aussi à remercier mes collègues du Laboratoire d'écologie historique du CRAD. Grâce à l'esprit de coopération qui existe entre les étudiants de ce laboratoire, j'ai pu réaliser mon projet de recherche dans un cadre de travail très stimulant.

Enfin, cette recherche a été rendue possible grâce au support financier du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et de l'industrie canadienne de la tourbe horticole (Association canadienne de mousse de tourbe inc., Association des producteurs de tourbe du Québec inc., Compagnie de tourbe Fafard ltée, Fafard et frères ltée, La mousse acadienne, Premier Horticulture inc., Tourbière Berger inc., Tourbière Lambert inc., SunGro Horticulture inc.) accordé à Claude Lavoie. La bourse d'étude qui m'a été décernée par le CRSNG m'a permis de me consacrer entièrement à cette recherche au cours de ces deux années d'études graduées.

Table des matières

Résumé	i
Remerciements	ii
Table des matières	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
Liste des annexes	viii
1.0 Introduction	1
2.0 Méthodes	5
2.1 Région d'étude et site d'échantillonnage	5
2.2 Suivi des conditions microclimatiques et hydrologiques et du soulèvement gélival	7
2.2.1 Conditions microclimatiques.....	7
2.2.2 Conditions hydrologiques.....	12
2.2.3 Soulèvement gélival	13
2.2.4 Analyse des données	13
2.3 Caractéristiques associées à la présence de linaigrette	14
2.3.1 Végétation	15
2.3.2 Élévation relative.....	15
2.3.3 Épaisseur du dépôt de tourbe résiduel.....	15
2.3.4 Conditions hydrologiques.....	16
2.3.5 Représentation des données.....	16
3.0 Résultats	17
3.1 Précipitations à la tourbière de Saint-Henri	17
3.2 Conditions microclimatiques	17
3.2.1 Température à la surface du sol.....	17
3.2.2 Humidité relative à la surface du sol	21
3.2.3 Évaporation à la surface du sol.....	30
3.2.4 Luminosité à la surface du sol.....	30
3.2.5 Interception des précipitations par le couvert de linaigrette.....	30
3.3 Conditions hydrologiques	30
3.3.1 Niveau de la nappe phréatique	30
3.3.2 Contenu volumique en eau de la tourbe	34
3.4 Soulèvement gélival	34
3.5 Caractéristiques biophysiques de l'ensemble de la planche d'exploitation	34
3.5.1 Végétation	34
3.5.2 Élévation relative.....	37
3.5.3 Épaisseur du dépôt de tourbe résiduel.....	37

3.5.4 Contenu volumique en eau de la tourbe	40
3.5.5 Niveau de la nappe phréatique	40
3.5.6 Densité du couvert de linaigrette et caractéristiques du milieu	40
4.0 Discussion.....	43
4.1 Les invasions de linaigrette: leurs impacts sur les conditions biophysiques d'une tourbière abandonnée après exploitation	43
4.2 Les invasions de linaigrette: une alternative pour la restauration des tourbières	49
5.0 Conclusion.....	52
6.0 Références citées.....	53
Annexe A: Calibration.....	59

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du site d'étude : tourbière de Saint-Henri, Saint-Henri-de-Lévis, Québec, Canada	6
Figure 2 : Dispositif expérimental installé sur la planche d'exploitation faisant l'objet de la présente étude	8
Figure 3 : Quadrat recouvert de linaigrette et quadrat dénudé.....	9
Figure 4 : Profil horaire moyen de la température de l'air à 5 cm au-dessus de la surface du sol sous un couvert d' <i>Eriophorum vaginatum</i> , sur une surface tourbeuse nue et à 1,5 m de la surface du sol	18
Figure 5 : Courbes cumulatives de la température de l'air à 5 cm au-dessus de la surface du sol sous un couvert d' <i>Eriophorum vaginatum</i> et sur une surface tourbeuse nue	26
Figure 6 : Profil horaire moyen de l'humidité relative de l'air à 5 cm au-dessus de la surface du sol sous un couvert d' <i>Eriophorum vaginatum</i> , sur une surface tourbeuse nue et à 1,5 m de la surface du sol	27
Figure 7 : Profil horaire moyen de l'humidité relative de l'air à 5 cm au-dessus de la surface du sol sous un couvert d' <i>Eriophorum vaginatum</i> et sur une surface tourbeuse nue pour une période sans précipitation de 18 journées consécutives	27
Figure 8 : Courbes cumulatives de l'humidité relative de l'air à 5 cm au-dessus de la surface du sol sous un couvert d' <i>Eriophorum vaginatum</i> et sur une surface tourbeuse nue pour les paires de quadrats A, B et C	29
Figure 9 : Précipitations à la tourbière de Saint-Henri et taux d'évaporation pour une surface tourbeuse couverte d' <i>Eriophorum vaginatum</i> et pour une surface tourbeuse nue	31
Figure 10 : Proportion d'eau interceptée par cinq tourradons d' <i>Eriophorum vaginatum</i>	32
Figure 11 : Précipitations à la tourbière de Saint-Henri et niveau de la nappe phréatique sous un couvert d' <i>Eriophorum vaginatum</i> et sous une surface tourbeuse nue	33
Figure 12 : Précipitations à la tourbière de Saint-Henri et contenu volumique en eau de la tourbe sous un couvert d' <i>Eriophorum vaginatum</i> et sous une surface tourbeuse nue	35
Figure 13 : Répartition spatiale des arbres, des éricacées, d' <i>Eriophorum vaginatum</i> , des autres cypéracées et des mousses dans une planche d'exploitation abandonnée de la tourbière de Saint-Henri	38

- Figure 14 :** Représentation cartographique de la répartition spatiale d'*Eriophorum vaginatum*, de l'élévation relative, de l'épaisseur du dépôt de tourbe résiduel et du contenu volumique en eau de la tourbe dans une planche d'exploitation abandonnée de la tourbière de Saint-Henri39
- Figure 15 :** Niveau de la nappe phréatique et élévation relative à l'intérieur des zones établies de part et d'autre des puits d'observation de la nappe phréatique installés en réseau le long d'une planche d'exploitation abandonnée de la tourbière de Saint-Henri41
- Figure 16 :** Importance du couvert d'*Eriophorum vaginatum*, niveau de la nappe phréatique et épaisseur du dépôt de tourbe le long d'une planche d'exploitation abandonnée de la tourbière de Saint-Henri42
- Figure 17 :** Représentation graphique de la droite de régression et du coefficient de détermination associés à la calibration des données de contenu volumique en eau de la tourbe.....61

Liste des tableaux

Tableau I :	Analyse de variance en mesures répétées comparant la température, l'humidité relative, le niveau de la nappe phréatique et le contenu volumique en eau de la tourbe sous un couvert d' <i>Eriophorum vaginatum</i> et sur une surface tourbeuse dénudée.....	19
Tableau II :	Tests de comparaisons multiples pour la température ou l'humidité relative enregistrée à chaque heure sous un couvert d' <i>Eriophorum vaginatum</i> et sur une surface tourbeuse dénudée.....	20
Tableau III :	Tests de comparaisons multiples pour la température, l'humidité relative, le niveau de la nappe phréatique ou le contenu volumique en eau de la tourbe sous un couvert d' <i>Eriophorum vaginatum</i> et sur une surface tourbeuse dénudée.....	22
Tableau IV :	Nombre de journées où les tests de comparaisons multiples indiquent une différence significative, hautement significative ou non significative entre la température, l'humidité relative, le niveau de la nappe phréatique ou le contenu volumique en eau de la tourbe sous un couvert d' <i>Eriophorum vaginatum</i> et sur une surface tourbeuse dénudée.....	25
Tableau V :	Pourcentage de points d'échantillonnage où une espèce donnée a été recensée dans une planche d'exploitation abandonnée de la tourbière de Saint-Henri.....	36
Tableau VI :	Effets des invasions de linaigrette sur la restauration des tourbières abandonnées après exploitation	50

Liste des annexes

Annexe A:	Calibration.....	59
------------------	------------------	----

1.0 Introduction

En Amérique du Nord, et plus particulièrement dans l'est du Canada, les tourbières exploitées à des fins industrielles (production de tourbe horticole) subissent de profondes perturbations (Rocheffort & Bastien 1998). La végétation de surface est enlevée, le sol est drainé, puis la tourbe est prélevée à l'aide d'aspirateurs géants remorqués par des tracteurs. Lorsque la tourbe, trop décomposée, ne répond plus aux exigences de l'industrie horticole, les activités d'exploitation cessent, laissant dans le paysage une surface de tourbe résiduelle aux caractéristiques modifiées. La structure du dépôt de tourbe résiduel est plus uniforme (Price 1996), ce qui accroît la tension de l'eau dans le sol (Price 1997). L'acrotelme étant partiellement ou complètement détruit (LaRose et al. 1997; Rocheffort et al. 1997), la nappe phréatique se trouve loin de la surface du sol et connaît des fluctuations plus importantes que dans une tourbière non exploitée (Schouwenaars 1993, 1995; Price 1996). Ce bas niveau de la nappe phréatique associé à un taux plus élevé d'évaporation contribuent à maintenir une faible humidité à la surface du sol (Heathwaite 1995; Price 1997). Le substrat, complètement dénudé, ne contient pas de réservoir de graines viables et est exposé à des températures plus élevées, à d'importantes fluctuations des températures, à la sécheresse, à l'érosion éolienne et au soulèvement gélival (Curran & MacNaeidhe 1986; Salonen 1987; Soro et al. 1999; Tuittila et al. 2000). Le substrat tourbeux résiduel est aussi, en général, acide et pauvre en éléments nutritifs (Wind-Mulder et al. 1996), ce qui constitue un frein à l'implantation de la plupart des espèces de plante.

Un environnement aussi perturbé présente des conditions peu propices à la recolonisation par les espèces typiques des tourbières (Salonen 1994; Campeau & Rocheffort 1996; Sagot & Rocheffort 1996). On constate en effet que le processus de colonisation est généralement lent (Curran & MacNaeidhe 1986; Salonen 1992; Rocheffort et al. 1995; Tuittila & Komulainen 1995; Campeau & Rocheffort 1996). Peu de tourbières exploitées mécaniquement (aspirateur) semblent évoluer vers un écosystème tourbeux fonctionnel (Joosten 1995; Money 1995; Lavoie & Rocheffort 1996; Quinty & Rocheffort 1997). Dans la plupart des cas, la succession végétale que l'on observe dans les tourbières abandonnées après exploitation est différente de celle qui se produit dans les

tourbières après une perturbation naturelle, telle le feu (Jonsson-Ninniss & Middleton 1991; Kuhry 1994; Salonen et al. 1992; Quinty & Rochefort 1997; Bérubé & Lavoie 2000; Girard 2000). Certaines éricacées arbustives typiques des tourbières peuvent être présentes, mais les sphaignes, principales espèces formatrices de tourbe, sont souvent rares ou même absentes en raison de contraintes de nature hydrologique et microclimatique (Price 1996; Price et al. 1998).

Caractérisées par une faible compétition induite par des conditions hostiles, les tourbières perturbées par les activités d'exploitation se révèlent favorables aux invasions massives d'espèces opportunistes (Lavoie & Rochefort 1996; Lavoie & Saint-Louis 1999; Lavoie et al. 2000). Le phénomène des invasions biologiques a été défini par Baker (1986) et par Vermeij (1996) comme étant une extension géographique très rapide de l'aire de répartition d'une espèce ou son établissement soudain et massif dans un milieu où elle était précédemment absente ou peu présente. Les espèces opportunistes qui envahissent les tourbières abandonnées après exploitation proviennent des environs (Salonen 1990) et leurs diaspores sont principalement transportées par le vent (Curran & MacNaeidhe 1986).

La linaigrette (*Eriophorum vaginatum* L.) est l'une des principales espèces qui envahissent la surface dénudée des tourbières abandonnées après exploitation. En effet, de nombreux scientifiques européens et nord-américains ont observé à de multiples reprises une recolonisation massive des tourbières exploitées par la linaigrette ou, à tout le moins, la dominance de cette espèce dans de tels milieux (Salonen 1987, 1992, 1994; Smart et al. 1989; Meade 1992; Grosvernier et al. 1995; Money 1995; Boudreau & Rochefort 1999; Soro et al. 1999; Lavoie et al. 2000; Tuittila et al. 2000). Le succès d'établissement de cette espèce peut s'expliquer par la grande capacité de dissémination de ses graines et par leur surface rugueuse qui leur permet de s'accrocher au substrat suffisamment longtemps pour germer (Salonen 1987, 1990, 1992). La linaigrette germe bien dans les conditions de grande exposition à la lumière engendrées par des perturbations (Gartner et al. 1986). En plus de germer rapidement, elle tolère bien la sécheresse grâce à ses profondes racines, ainsi que l'acidité, la pauvreté en éléments nutritifs et une faible aération du substrat (Wein 1973; Wein & MacLean 1973; Gartner et al. 1986; Salonen 1987, 1990, 1994; Salonen & Setälä 1992). Aussi, la forme de croissance particulière de cette plante (elle forme de petits

monticules appelés tourradons) génère un micro-environnement thermique qui favorise chez les individus une productivité élevée (Chapin et al. 1979).

Certaines études suggèrent que le micro-environnement créé par la linaigrette est favorable à l'établissement des autres plantes typiques des tourbières, notamment les sphaignes. En effet, des sphaignes et d'autres espèces caractéristiques des écosystèmes tourbeux ont été observées à proximité de tourradons (Tuittila & Komulainen 1995; Soro et al. 1999). Les sphaignes s'installeraient sous les feuilles mortes des tourradons de linaigrette ayant colonisé le substrat dénudé pour ensuite recouvrir ces derniers (Grosvernier et al. 1995; Robert et al. 1999). Ce processus peut s'expliquer par les conditions particulières d'humidité et d'ombre de même que par la protection contre la sécheresse et la dessiccation qu'offrirait la structure physique des tourradons (Grosvernier et al. 1995; Soro et al. 1999). Ces conditions microclimatiques pourraient compenser un niveau de nappe phréatique inadéquat pour la croissance des sphaignes (Grosvernier et al. 1995). Un couvert de linaigrette pourrait aussi contribuer à réduire les fluctuations de la nappe phréatique (Soro et al. 1999). D'autres études ont montré que les tourradons constituent une protection contre le vent (Schouwenaars 1993) et une trappe pour les graines (Salonen 1992). Des recherches menées en restauration des tourbières suggèrent que la linaigrette serait une espèce compagne qui faciliterait la réimplantation des sphaignes (Ferland & Rochefort 1997; Boudreau & Rochefort 1999). Enfin, une étude récente (Tuittila et al. 2000) révèle que les tourradons agiraient comme des centres de dissémination de la végétation en augmentant le nombre et la variété des microsites favorables à la croissance des autres espèces.

Toutes ces études témoignent de l'importance de la linaigrette dans la régénération des écosystèmes tourbeux perturbés. Toutefois, il existe peu de données sur l'impact microclimatique et hydrologique réel de la linaigrette dans les tourbières abandonnées après exploitation. Notre étude vise donc à déterminer, de façon quantitative, l'impact d'un couvert dense de linaigrette sur les conditions physiques d'une surface tourbeuse perturbée par des activités d'exploitation. Nous émettons l'hypothèse que les invasions de linaigrette peuvent aider à la restauration des tourbières en créant des conditions favorables à l'établissement des autres plantes caractéristiques de ces milieux. Elles amélioreraient les conditions

- 1) microclimatiques (températures moins élevées près de la surface du sol, plus grande

humidité de l'air, pertes en eau par évaporation à la surface du sol moins importantes), 2) hydrologiques (niveau de nappe phréatique plus élevé et plus grande disponibilité de l'eau dans le sol) et 3) de substrat (stabilisation de la surface du sol). Nous supposons également qu'il est possible de gérer certaines caractéristiques hydrologiques et physiques d'une tourbière abandonnée après exploitation de façon à favoriser les invasions de linaigrette. La modification de ces caractéristiques pourrait permettre d'obtenir rapidement une population de linaigrette ayant une densité optimale pour la réintroduction des autres espèces de tourbière. La compréhension de l'impact des invasions biologiques qui se produisent de façon spontanée dans les tourbières et des propriétés qui les favorisent ou les limitent permettrait le développement d'actions de restauration plus appropriées et intégrées et contribuerait à une gestion efficace et durable de la ressource tourbeuse.

2.0 Méthodes

2.1 Région d'étude et site d'échantillonnage

L'étude a été réalisée dans la tourbière de Saint-Henri où la linaigrette a massivement envahi plusieurs planches d'exploitation¹ abandonnées, comme c'est le cas dans de nombreuses autres tourbières perturbées du Québec méridional. Située à Saint-Henri-de-Lévis, sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, à 16 km au sud-est de la ville de Québec (Figure 1), la tourbière de Saint-Henri (46° 42' N., 71° 03' O.) couvre une superficie d'environ 150 ha. Environ 80% (120 ha) de la superficie de la tourbière a été exploitée à des fins horticoles, et 60% de cette superficie (72 ha) est toujours en exploitation. Cette tourbière ombrotrophe a fait l'objet d'une exploitation manuelle de la fin des années 1960 au début des années 1970, pour ensuite être exploitée de façon mécanique en utilisant des aspirateurs géants par la compagnie Premier Horticulture Inc. (G. Gagnon, comm. pers.).

La tourbière de Saint-Henri se trouve à une altitude de 92 m au-dessus du niveau de la mer. Elle fait partie de la subdivision physiographique des plaines du Saint-Laurent, l'une des constituantes de la région des terres humides tempérées de l'Est du Canada (Groupe de travail national sur les terres humides 1988). Comme l'ensemble des tourbières de cette région, la tourbière de Saint-Henri s'est probablement développée au sein d'une légère dépression, sur un substrat mal drainé (Groupe de travail national sur les terres humides 1988). Le dépôt de tourbe repose sur une couche de limon argilo-sableux mise en place lors du retrait de la mer de Goldthwait qui a submergé la région à la suite de la fonte de l'inlandsis laurentidien (Dionne 1977; Occhietti 1989). Le substrat tourbeux, dont le pH varie entre 3,9 et 4,4, est plutôt acide. Il présente une faible conductivité spécifique dont les valeurs se situent entre 0 et 12 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (K. Marcoux, données non publiées). Les données de la station météorologique la plus proche, celle de Honfleur, située à 15 km au sud-est de la tourbière de Saint-Henri, indiquent, pour la période 1957-1990, que la température annuelle moyenne est de 3,4°C, la température moyenne du mois le plus froid (janvier) est de -12,9°C et la température moyenne du mois le plus chaud (juillet) est de 18,2°C. La moyenne des précipitations annuelles totales est de

¹ Une planche d'exploitation est un champ d'aspiration de tourbe délimité par des canaux de drainage.

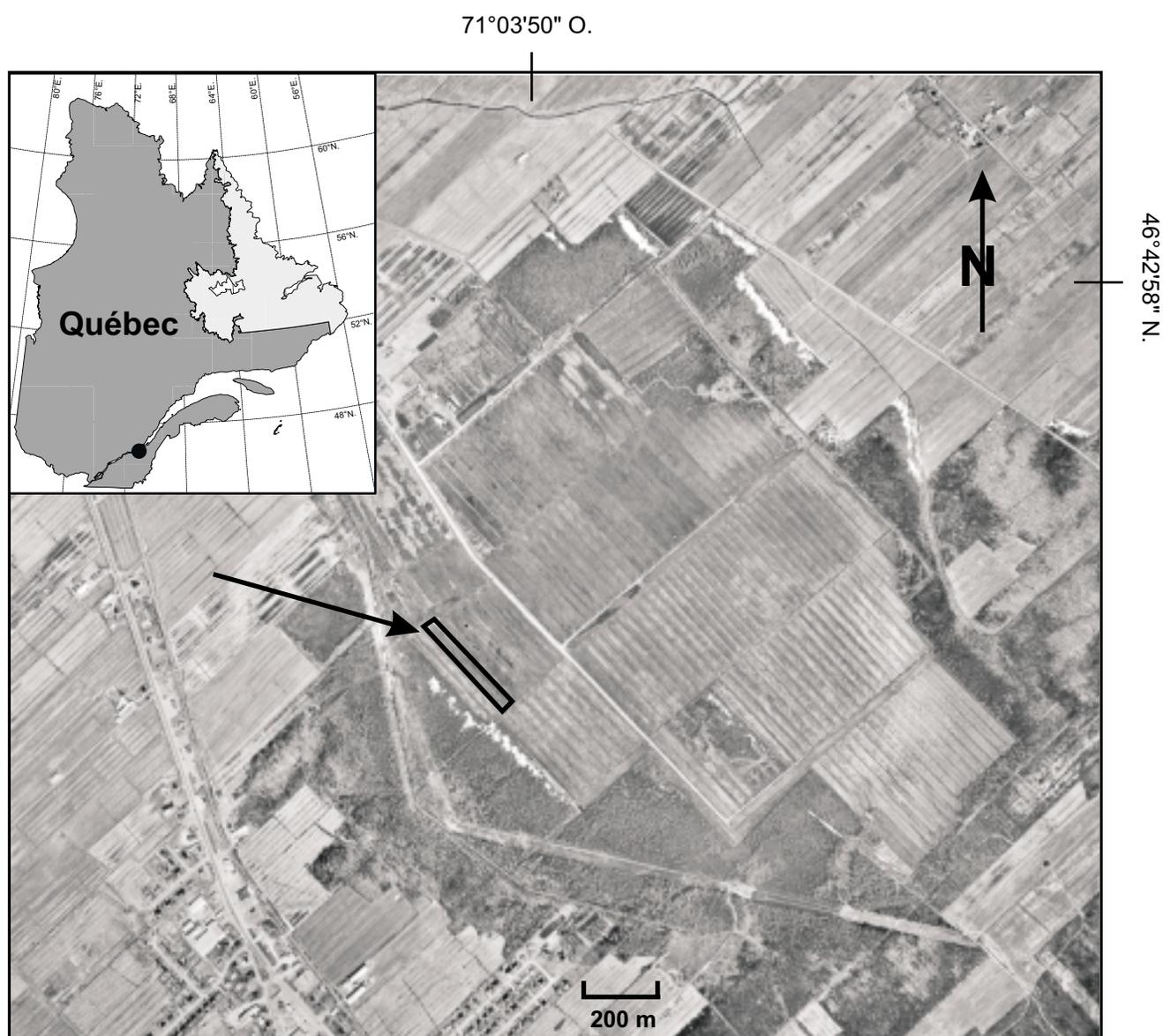


Figure 1. Localisation du site d'étude: tourbière de Saint-Henri, Saint-Henri-de-Lévis, Québec, Canada. Sur la photographie aérienne, prise le 3 mai 1993, la flèche et le rectangle indiquent la planche d'exploitation abandonnée et envahie par la linaiquette qui a fait l'objet de la présente étude (Ministère des Ressources naturelles du Québec. Photographie HMQ-106 - 12,21L 34).

1 181 mm, dont 27% tombent sous forme de neige. Les précipitations moyennes des mois de juillet et août totalisent 244 mm (Environment Canada 1993).

Une planche d'exploitation abandonnée, située à quelques dizaines de mètres d'une zone non exploitée (Figure 1) et présentant un gradient de densité de recouvrement par la linaigrette (28 à 96%), a été choisie pour tester nos hypothèses. D'une dimension de 300 x 30 m, cette planche a fait l'objet d'une exploitation à l'aspirateur entre 1975 et 1992 (G. Gagnon, comm. pers.; C. Lavoie, données non publiées).

2.2 Suivi des conditions microclimatiques et hydrologiques et du soulèvement gélival

Au cours de l'été 1999, un dispositif expérimental permettant de comparer les caractéristiques microclimatiques, hydrologiques et de substrat sous un couvert dense de linaigrette à celles d'une surface de tourbe nue a été installé sur la planche d'exploitation sélectionnée. Ce dispositif expérimental (Figures 2 et 3) est constitué de quatre paires de quadrats. Chacune de ces paires se compose d'un quadrat (5 x 5 m) massivement envahi par la linaigrette (couvert: 100%) et d'un site de même dimension où la surface tourbeuse a été mise à nue en enlevant tous les tourradons de linaigrette (couvert: 0%). Les tourradons ont été retirés manuellement de façon à minimiser les perturbations dans le milieu. Une zone tampon d'un mètre de largeur sépare chaque quadrat couvert de linaigrette du quadrat sans linaigrette qui lui est associé. Nous avons estimé que cette distance était suffisamment importante pour minimiser l'influence d'un quadrat sur son voisin. Une distance plus grande entre les quadrats aurait pu engendrer un certain nombre de problèmes quant à la comparaison des résultats, car moins l'altitude est élevée, plus la nappe phréatique se rapproche de la surface du sol.

2.2.1 Conditions microclimatiques

Afin de déterminer l'impact d'un couvert dense de linaigrette sur les conditions microclimatiques, la température et l'humidité relative de l'air à 5 cm au-dessus de la surface du sol ont été enregistrées au sein des quadrats dénudés et sous les tourradons dans les quadrats recouverts de linaigrette. Ces données ont été enregistrées simultanément, à toutes les

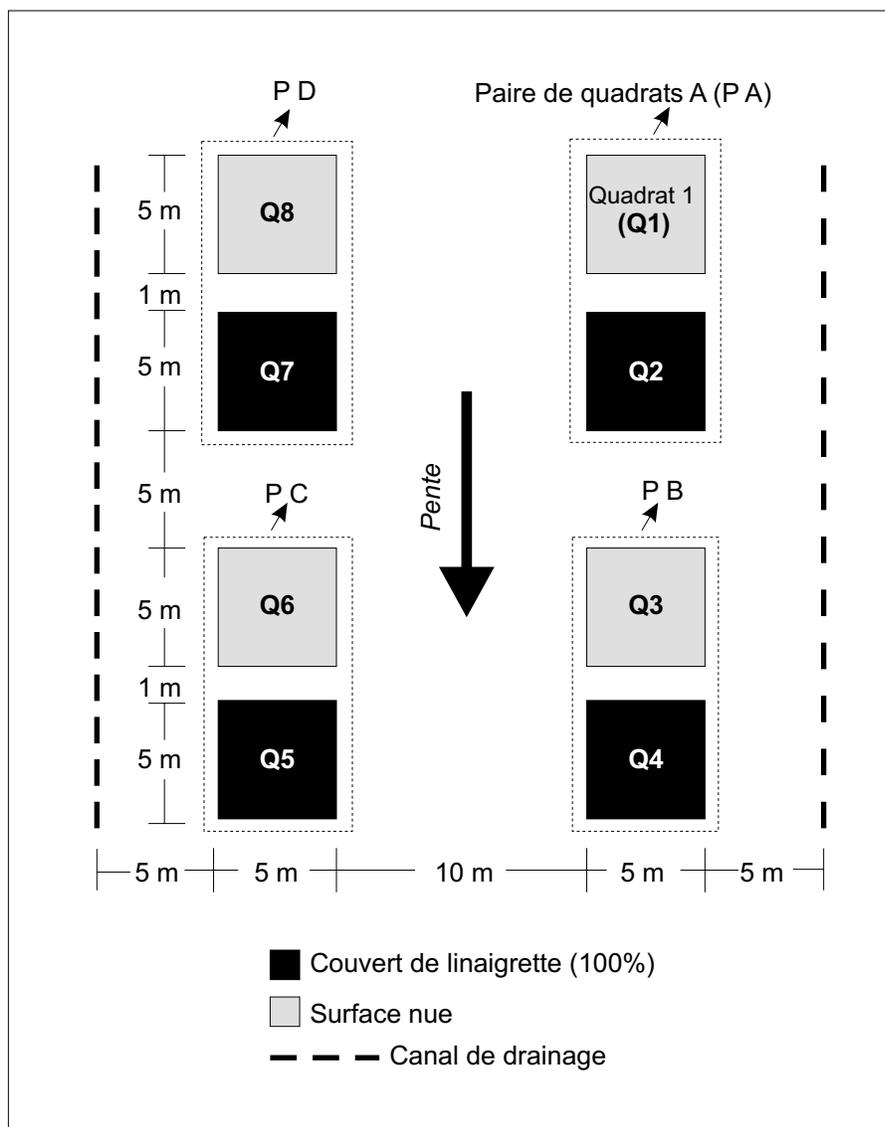


Figure 2. Dispositif expérimental installé sur la planche d'exploitation faisant l'objet de la présente étude.

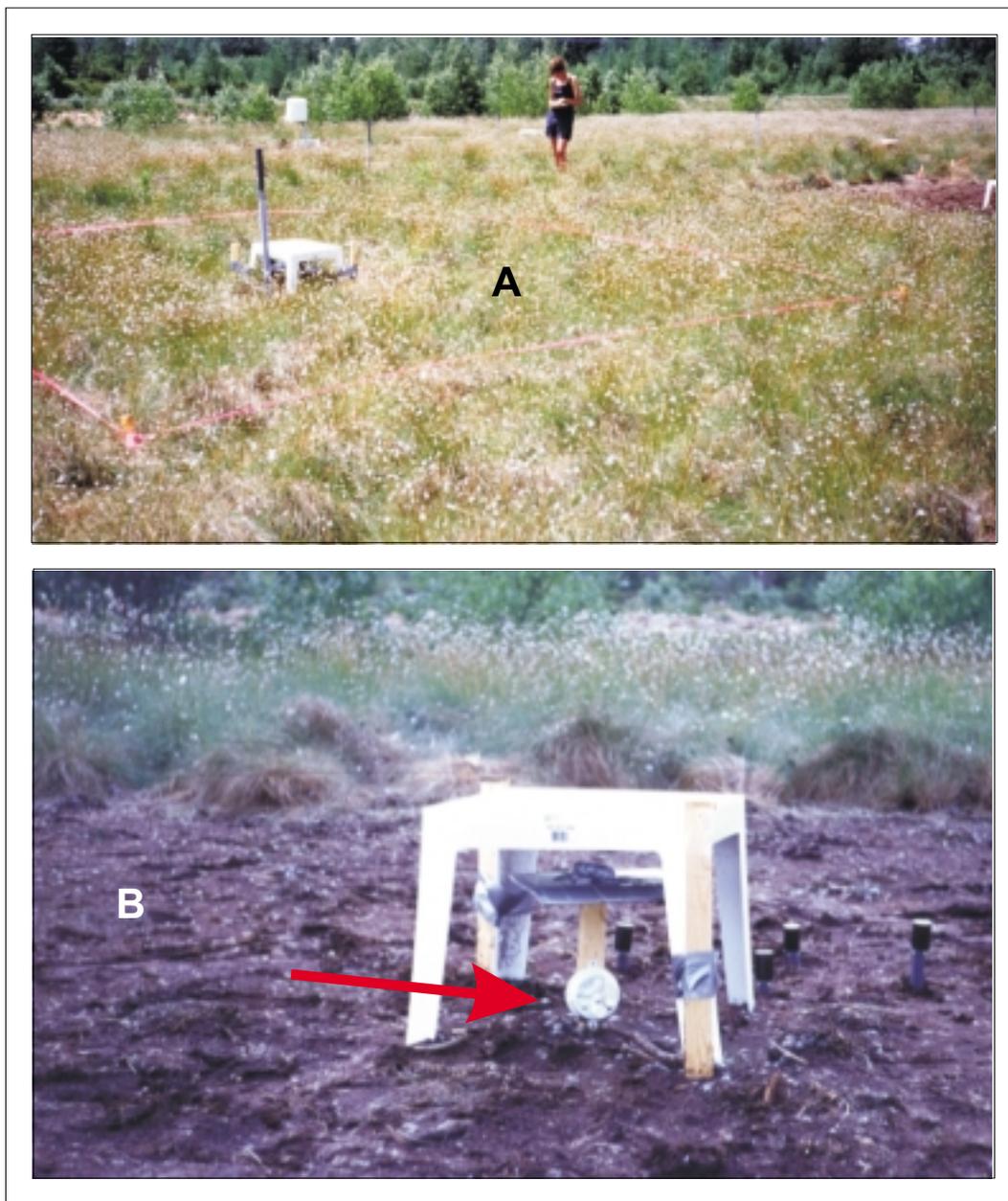


Figure 3. Quadrat recouvert de linaigrette (A) et quadrat dénudé (B). La flèche indique un enregistreur de données d'humidité relative et de température.

heures, du 7 juin au 4 septembre 1999, à l'aide d'enregistreurs de données *Hobo® H8 Pro Series RH/Temp* disposés au centre de chacun des huit quadrats (Figure 3). Les appareils ont été fixés à une tige de bois puis placés sous une table de plastique blanche (40 x 40 x 40 cm) afin de protéger les capteurs de la radiation solaire directe et de la pluie tout en laissant l'air circuler librement. Les données de température et d'humidité relative ont été téléchargées une fois par semaine à l'aide d'un ordinateur portable et du logiciel *BoxCar Pro®*. Le profil horaire moyen des températures et des taux d'humidité relative a été établi en calculant, pour chaque heure de la journée, la valeur moyenne de température ou d'humidité relative enregistrée du 7 juin au 4 septembre 1999. Cette période était susceptible de couvrir les journées les plus chaudes et les plus sèches de l'été, soit celles où l'on s'attendait à un impact plus important du couvert de linaigrette sur les conditions du milieu. Suffisamment longue, cette période était en outre susceptible d'être représentative de l'ensemble d'une saison de croissance des plantes au point de vue des conditions microclimatiques. Les moyennes, maxima et minima journaliers de température et d'humidité relative ont été calculés pour chacune des 90 journées de relevé.

Dans le but de déterminer l'impact d'un couvert de linaigrette sur les pertes en eau par évaporation de l'eau contenue dans la tourbe, deux bacs de plastique (38 x 31 x 19 cm), contenant respectivement un bloc de tourbe à nue et un bloc de tourbe recouvert de linaigrette, ont été pesés quotidiennement du 5 juillet au 5 septembre 1999. Les précipitations des dernières 24 heures ont également été enregistrées une fois par jour au moyen d'un pluviomètre installé sur le site. Le taux quotidien d'évaporation a ensuite été obtenu pour chacun des bacs de tourbe (avec et sans linaigrette) à l'aide des équations suivantes:

$$(1) \text{Poids}^{J1} (\text{kg}) - \text{Poids}^{J2} (\text{kg}) = \Delta w (\text{kg})$$

$$(2) \Delta w (\text{kg}) \rightarrow \Delta w (\text{g})$$

$$(3) \Delta w (\text{g}) / \rho_w (\text{cm}^3) = \Delta w (\text{cm}^3)$$

$$(4) \Delta w (\text{cm}^3) / S (\text{cm}^2) = \Delta w (\text{cm})$$

$$(5) \Delta w (\text{mm}) + P = Et (\text{mm})$$

où Poids^{Jx} = poids du bac pour une journée donnée (x)

Δw = variation quotidienne en eau

ρ_w = densité de l'eau

S = surface du bac

P = précipitations quotidiennes

Et = taux d'évaporation de l'eau contenue dans la tourbe

La luminosité à la surface du sol sous un couvert dense de linaigrette a été mesurée entre 11h30 et 12h00 lors d'une journée ensoleillée, le 20 août 1999, à l'aide d'un radiomètre *Sunscan Canopy Analysis System*[®]. Muni d'une sonde contenant 64 photodiodes également espacées, cet appareil mesure les radiations photosynthétiques actives ou la quantité de photons reçus et permet en conséquence de déterminer la quantité de lumière interceptée par un couvert dense de linaigrette (Potter et al. 1996). Un terminal *Psion Workabout*[®] a été utilisé pour l'enregistrement des données et leur transfert à un ordinateur. Le pourcentage de rayonnement incident transmis a été obtenu grâce à l'équation suivante:

$$(5) \text{ (RayT / RayI) } \times 100 = \text{RayIT (\%)}$$

où RayT = rayonnement solaire transmis

RayI = rayonnement solaire incident

RayIT = rayonnement solaire incident transmis

Une expérience visant à évaluer la proportion des précipitations interceptées par le couvert de linaigrette (et qui ne parviennent donc pas jusqu'au sol) a été réalisée en laboratoire. Cinq tourradons de linaigrette ont été prélevés dans la tourbière de Saint-Henri, emmenés en laboratoire et déposés sur un grillage résistant lui-même placé sur un bac en plastique. Une quantité de 200 ml d'eau a été versée sur chacun des tourradons à l'aide d'un filtre à eau de type *Brita*[®] simulant une pluie. Pour chacun des tourradons, la quantité d'eau non interceptée a été recueillie au fond du bac puis mesurée à l'aide d'un cylindre gradué.

Cette quantité a été soustraite de la quantité totale versée (200 ml) pour obtenir la quantité d'eau interceptée par le tourradon. Cette expérience a été répétée à cinq reprises pour chacun des tourradons.

2.2.2 Conditions hydrologiques

Afin de déterminer l'impact d'un couvert dense de linaigrette sur les conditions hydrologiques, le niveau de la nappe phréatique a été mesuré au centre de chacun des huit quadrats. Cette mesure a été relevée quotidiennement du 5 juillet au 5 septembre 1999 grâce à un réseau de puits (un puits par quadrat), c'est-à-dire des tuyaux de plastique perforés sur leur longueur, recouverts d'une toile de nylon empêchant la pénétration des sédiments, et insérés dans le sol organique jusqu'au substrat minéral sous-jacent.

Le contenu volumique en eau de la tourbe (volume d'eau / volume de sol, exprimé en pourcentage), indice de la quantité d'eau accessible aux plantes par contact direct (Price 1997), a été mesuré quotidiennement à l'aide d'un appareil *Hydrosense*[®]. Cet appareil utilise la propriété physique du sol de résistance diélectrique pour estimer le contenu volumique en eau. Les composantes électroniques de la sonde génèrent une énergie électromagnétique de haute fréquence nécessaire à la polarisation des molécules d'eau et permet de mesurer la résistance diélectrique. Le temps de parcours de l'énergie électromagnétique le long de l'électrode est lié à la résistance diélectrique (Campbell Scientific Inc. 1999). Cinq mesures par quadrat (une au centre du quadrat et quatre entre le centre et chacun des coins) ont été prises quotidiennement à l'aide d'une sonde d'une longueur de 20 cm du 5 juillet au 5 septembre 1999. Cinq mesures par quadrat ont aussi été prises quotidiennement et aux mêmes endroits avec une sonde d'une longueur de 12 cm du 29 juillet au 5 septembre 1999. La valeur obtenue est une moyenne du contenu volumique en eau du sol le long d'une tranche de sol de profondeur égale à la longueur de la sonde et de largeur égale à une distance radiale de 3 cm de la surface de la sonde. Le contenu volumique en eau est donc mesuré pour un volume de sol approximatif de 650 cm³ avec une sonde de 12 cm et de 1100 cm³ avec une sonde de 20 cm (Campbell Scientific Inc. 1999). La moyenne des cinq mesures quotidiennes a été calculée pour obtenir une mesure de contenu volumique en eau générale pour chacun des quadrats et pour chacune des sondes. L'appareil *Hydrosense*[®] applique une

calibration standard permettant de convertir la réponse de la sonde en millisecondes afin d'obtenir un contenu volumique en eau en pourcentage. Toutefois, une calibration supplémentaire doit être appliquée pour chaque sonde et pour chaque type de sol (Campbell Scientific Inc. 1999; J. Caron, comm. pers.). Une calibration a donc été effectuée en laboratoire afin d'obtenir, pour chaque sonde, un coefficient de calibration adapté à un sol tourbeux (Annexe A).

2.2.3 Soulèvement gélival

Afin de vérifier si la présence d'un couvert de linaigrette contribue à minimiser les effets du soulèvement gélival à la surface du sol, des clous en acier de 30 cm de longueur ont été insérés dans le sol avant les premiers gels automnaux de 1999. Neuf clous ont été enfoncés dans le sol jusqu'à la tête dans chacun des huit quadrats. Au printemps 2000, lorsque la période de gel fût terminée, la portion des clous ayant été poussée hors du sol par l'action du gel-dégel a été mesurée.

2.2.4 Analyse des données

Les données concernant les conditions microclimatiques et hydrologiques sous un couvert de linaigrette et sur une surface à nue ont été représentées graphiquement, pour fins de comparaison.

Les données de température (moyennes horaires, moyennes, maxima et minima journaliers), d'humidité relative (moyennes horaires, moyennes, maxima et minima journaliers), de niveau de la nappe phréatique et de contenu volumique en eau de la tourbe (sondes de 12 et de 20 cm) ont été traitées statistiquement grâce à une analyse de variance en mesures répétées (Sokal et Rohlf 1981) à l'aide de la procédure MIXED du progiciel SAS[®] (SAS Institute Inc. 1989; Little et al. 1996). Une matrice de corrélation de type *Compound Symmetric*, appropriée à un grand nombre de mesures dans le temps, a été utilisée pour tenir compte de l'autocorrélation temporelle entre les observations. Chaque quadrat avec couvert de linaigrette et le quadrat dénudé qui lui est associé ont été considérés comme une paire (Figure 2) afin de permettre une répétition de l'expérimentation. Par conséquent, le facteur *paire* a été intégré à l'analyse de variance à titre de facteur aléatoire. Les facteurs *traitement*

(avec ou sans couvert de linaigrette), *temps* (jour ou heure) et *traitement x temps* ont été considérés comme des facteurs fixes dans l'analyse de variance. L'interaction de premier ordre *traitement x temps* permet de déterminer si la différence entre les traitements est constante ou non dans le temps. Lorsque cette différence est constante dans le temps, c'est-à-dire que l'interaction *traitement x temps* n'est pas significative, l'effet principal du traitement peut alors être examiné. Il renseigne sur l'effet global du traitement, tous temps de mesure confondus. Plus précisément, l'effet principal *traitement* permet de comparer les deux traitements (avec ou sans couvert de linaigrette) en moyenne, en combinant tous les jours ou toutes les heures, et de déterminer si la différence entre les deux est significative. L'effet principal *temps* indique si le phénomène étudié est stable ou non dans le temps, et cela pour tous les traitements confondus. Cet effet ne peut être examiné que lorsque l'interaction *traitement x temps* n'est pas significative. Des comparaisons de type LSD (*Least significant difference*) ont été effectuées afin de localiser les différences significatives entre les moyennes des traitements. Lorsque l'interaction *traitement x temps* était significative, les tests de comparaisons multiples ont été examinés afin de déterminer, pour chaque journée ou pour chaque heure, si les conditions au sein des quadrats avec couvert de linaigrette et celles au sein des quadrats dénudés différaient de façon significative. L'homogénéité de la variance et la normalité des ensembles de données ont été testées.

Les données de soulèvement gélival ont aussi fait l'objet d'une analyse statistique. Les moyennes des données sous un couvert de linaigrette et sur une surface nue ont été comparées à l'aide d'un test *t* (Scherrer 1984). Un test d'hypothèse bilatéral a été effectué afin de déterminer si les moyennes des deux ensembles de données différaient de façon significative.

2.3 Caractéristiques biophysiques associées à la présence de linaigrette

Puisqu'il existe, au sein des planches d'exploitation abandonnées de la tourbière de Saint-Henri, un gradient très net de densité du couvert de linaigrette le long de la pente, nous avons voulu identifier les caractéristiques à l'origine de ce gradient en effectuant, au cours de l'été 1999, une série de relevés le long de la planche sélectionnée. Tous les relevés ont été effectués sur une longueur de 180 m (distance minimale pour couvrir l'ensemble du gradient de densité du couvert de linaigrette) et sur une largeur de 24 m. Une zone tampon de 3 m a été

conservée entre les limites de la zone de relevés et les canaux de drainage bordant la planche d'exploitation afin d'éviter de confondre l'effet des canaux de drainage et celui des caractéristiques biophysiques étudiées (couvert de linaigrette, élévation, épaisseur du dépôt de tourbe et conditions hydrologiques) sur la répartition spatiale de la végétation.

2.3.1 Végétation

La végétation présente sur la planche sélectionnée a été recensée au moyen de la méthode du relevé ponctuel (Lavoie & Rochefort 1996; Girard 2000). Vingt-cinq transects distancés les uns des autres d'un mètre ont été établis dans le sens de la longueur de la planche d'exploitation. La présence de toute espèce de plante vasculaire, de mousse, de sphaigne, d'hépatique et de lichen touchant un point de 1 cm de diamètre ou son prolongement vertical a été notée à tous les mètres le long de chaque ligne. Pour chaque espèce, la proportion d'apparition d'une espèce (nombre de points d'échantillonnage où l'espèce est présente / nombre total de points d'échantillonnage) a été calculée. L'identification de la végétation suit la nomenclature de Anderson et al. (1990) pour les mousses et de Scoggan (1978-1979) pour les plantes vasculaires.

2.3.2 Élévation relative

L'élévation relative de la surface tourbeuse a été mesurée à l'aide d'un niveau d'arpentage à tous les deux mètres le long de treize transects distancés les uns des autres de deux mètres et disposés dans le sens de la longueur de la planche d'exploitation.

2.3.3 Épaisseur du dépôt de tourbe résiduel

L'épaisseur du dépôt de tourbe résiduel a été mesurée en insérant dans le sol organique une tige métallique jusqu'à la surface du sol minéral. Neuf transects distancés les uns des autres de trois mètres ont été établis dans le sens de la longueur de la planche d'exploitation. L'épaisseur du dépôt de tourbe a été mesurée à tous les dix mètres le long de chaque transect.

2.3.4 Conditions hydrologiques

Le contenu volumique en eau de la tourbe a été mesuré le 11 août 1999 à l'aide de l'appareil *Hydrosense*[®] (décrit précédemment) muni d'une sonde de 12 cm de long. Cette mesure a été réalisée à tous les cinq mètres le long de sept transects distancés les uns des autres de quatre mètres et disposés dans le sens de la longueur de la planche d'exploitation.

Par ailleurs, le niveau de la nappe phréatique a été relevé quotidiennement, du 5 juillet au 5 septembre 1999, au centre de la planche d'exploitation, à l'intérieur d'un réseau linéaire de puits installés à tous les dix mètres. Afin de vérifier si le niveau de la nappe phréatique fluctue beaucoup d'une année à l'autre, le niveau d'eau des puits a de nouveau été mesuré, sur une base hebdomadaire, du 12 juin au 28 août 2000.

2.3.5 Représentation des données

Les données de nature édaphique, hydrologique et de végétation ont fait l'objet d'une cartographie à l'aide du logiciel *MapInfo Professionnal*[®] et de la méthode d'interpolation par krigeage du logiciel *Surfer*[®].

La proportion de linaigrette a été graphiquement mise en relation avec le niveau de la nappe phréatique et l'épaisseur du dépôt de tourbe résiduel. De même, le niveau de la nappe phréatique a été graphiquement mis en relation avec l'élévation relative. La moyenne, le maximum et le minimum du niveau de la nappe phréatique ont été calculés pour chacun des puits du réseau. La zone de relevés de 180 x 24 m a été divisée en 17 sous-zones de 10 x 24 m, chaque sous-zone étant centrée autour d'un puits d'observation de la nappe phréatique. Aux extrémités, les dimensions des sous-zones n'étaient que de 5 x 24 m (les puits étant situés aux mètres 0 et 180). À l'intérieur de chacune des sous-zones, la moyenne des données d'élévation relative, d'épaisseur du dépôt de tourbe et de contenu volumique en eau de la tourbe ont été calculées, ainsi que la proportion de linaigrette.

3.0 Résultats

3.1 Précipitations à la tourbière de Saint-Henri

Les précipitations enregistrées au sein même de la tourbière de Saint-Henri totalisent 236 mm pour la période du 5 juillet au 5 septembre 1999. Un total de 172 mm de pluie est tombé du 5 au 31 juillet et de 64 mm au cours du mois d'août. Aucune précipitation n'a été enregistrée du 18 août au 5 septembre 1999. Les précipitations totales enregistrées entre le 5 juillet et le 5 septembre 1999 (236 mm) sont comparables aux normales climatiques (1957-1990) de la station de Honfleur (244 mm pour les mois de juillet et août).

3.2 Conditions microclimatiques

3.2.1 Température à la surface du sol

La moyenne horaire de la température de l'air à 5 cm au-dessus de la surface du sol est légèrement moins élevée sous un couvert de linaigrette que sur une surface de tourbe dénudée (Figure 4). La différence entre la température sous un couvert de linaigrette et celle sur une surface nue peut atteindre 2°C. L'analyse de variance en mesures répétées montre que l'interaction *traitement x temps* est significative, c'est-à-dire que la différence entre les traitements n'est pas constante dans le temps (Tableau I). Par conséquent, on doit se référer aux tests de comparaisons multiples pour localiser les différences significatives quant à la moyenne horaire de température sous un couvert de linaigrette et à 5 cm de la surface de tourbe nue. Les tests de comparaisons multiples indiquent que le profil horaire moyen de température sous un couvert de linaigrette et celui sur une surface de tourbe nue diffèrent de façon hautement significative de 7h00 à 11h00, à 18h00 et à 19h00, et de façon significative à 12h00, 13h00, 17h00 et 20h00 (Tableau II).

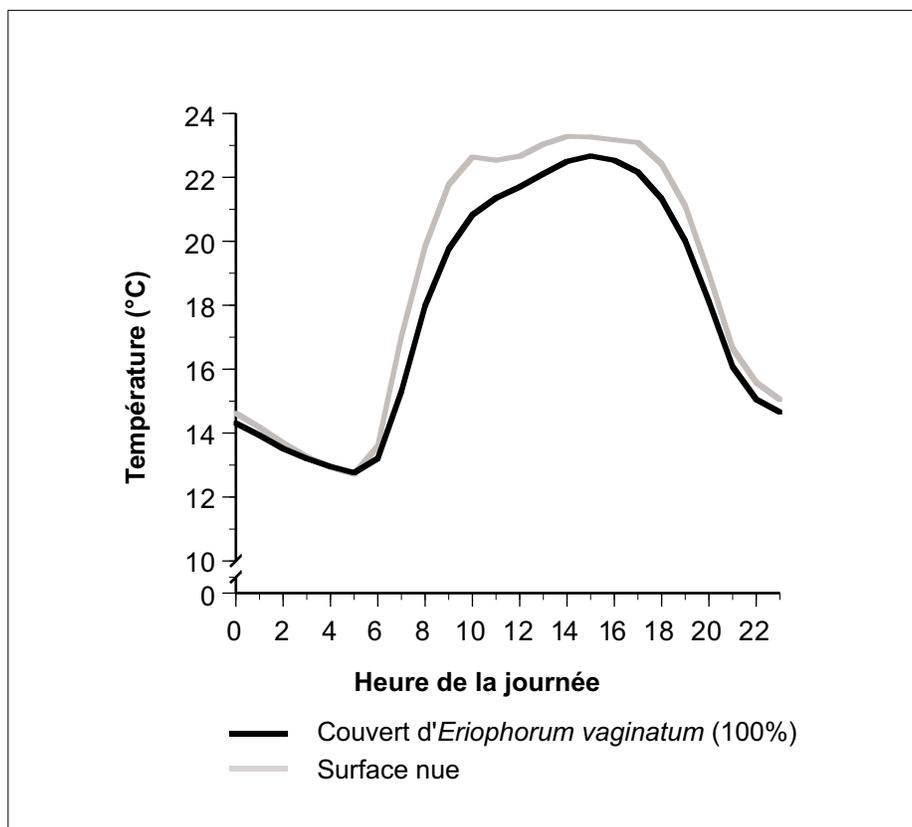


Figure 4. Profil horaire moyen de la température de l'air à 5 cm au-dessus de la surface du sol sous un couvert d'*Eriophorum vaginatum* (moyenne des quadrats 2, 4, 5 et 7) et sur une surface tourbeuse nue (moyenne des quadrats 1, 3, 6 et 8). Le profil horaire moyen a été établi à partir des températures enregistrées à toutes les heures entre le 7 juin et le 4 septembre 1999.

Tableau I. Analyse de variance en mesures répétées comparant la température (moyennes horaires, moyennes, maxima et minima journaliers), l'humidité relative (moyennes horaires, moyennes, maxima et minima journaliers), le niveau de la nappe phréatique et le contenu volumique en eau de la tourbe (sondes 12 et 20 cm) sous un couvert d'*Eriophorum vaginatum* et sur une surface tourbeuse dénudée.

Variable dépendante	Source de variation	Degrés de liberté		F calculé de type III	Pr>F
		Numérateur	Dénominateur		
Moyenne horaire de température	Traitement	1	3	10,73	0,0466*
	Temps (heures)	23	138	538,56	0,0001**
	Traitement X temps	23	138	3,09	0,0001**
Moyenne journalière de température	Traitement	1	3	10,76	0,0464*
	Temps (journées)	89	534	476,03	0,0001**
	Traitement X temps	89	534	8,97	0,0001**
Maximum journalier de température	Traitement	1	537	14,50	0,0002**
	Temps (journées)	89	537	97,92	0,0001**
	Traitement X temps	89	537	2,47	0,0001**
Minimum journalier de température	Traitement	1	537	1,12	0,2901
	Temps (journées)	89	537	708,77	0,0001**
	Traitement X temps	89	537	5,51	0,0001**
Moyenne horaire d'humidité relative	Traitement	1	3	19,53	0,0476*
	Temps (heures)	23	92	69,13	0,0001**
	Traitement X temps	23	92	5,43	0,0001**
Moyenne journalière d'humidité relative	Traitement	1	2	21,96	0,0426*
	Temps (journées)	86	296	18,12	0,0001**
	Traitement X temps	86	296	3,46	0,0001**
Maximum journalier d'humidité relative	Traitement	1	2	0,52	0,5457
	Temps (journées)	86	296	2,07	0,0001**
	Traitement X temps	86	296	0,91	0,6869
Minimum journalier d'humidité relative	Traitement	1	2	95,54	0,0103*
	Temps (journées)	86	296	20,24	0,0001**
	Traitement X temps	86	296	3,26	0,0001**
Nappe phréatique	Traitement	1	369	7,43	0,0067**
	Temps (journées)	61	369	92,06	0,0001**
	Traitement X temps	61	369	0,85	0,7810
Contenu volumique en eau (sonde 12 cm)	Traitement	1	231	1068,58	0,0001**
	Temps (journées)	38	231	61,55	0,0001**
	Traitement X temps	38	231	7,50	0,0001**
Contenu volumique en eau (sonde 20 cm)	Traitement	1	375	185,29	0,0001**
	Temps (journées)	62	375	43,63	0,0001**
	Traitement X temps	62	375	3,18	0,0001**

* significatif à $P < 0,05$

** significatif à $P < 0,01$

Tableau II. Tests de comparaisons multiples comparant la température (moyennes horaires) ou l'humidité relative (moyennes horaires) enregistrées à toutes les heures sous un couvert d'*Eriophorum vaginatum* (quadrats 2, 4, 5 et 7) à la température ou l'humidité relative enregistrées sur une surface tourbeuse dénudée (quadrats 1, 3, 6 et 8).

Heure	Température Moyenne horaire	Humidité relative Moyenne horaire
0	n.s.	n.s.
1	n.s.	n.s.
2	n.s.	n.s.
3	n.s.	n.s.
4	n.s.	n.s.
5	n.s.	n.s.
6	n.s.	n.s.
7	**	**
8	**	**
9	**	**
10	**	**
11	**	**
12	*	**
13	*	**
14	n.s.	**
15	n.s.	**
16	n.s.	**
17	*	**
18	**	**
19	**	**
20	*	**
21	n.s.	n.s.
22	n.s.	n.s.
23	n.s.	n.s.

* *significatif à $P < 0,05$*

** *significatif à $P < 0,01$*

n.s. non significatif

L'analyse de variance en mesures répétées signale une interaction *traitement x temps* significative pour la moyenne et les maxima et minima journaliers de température de l'air (Tableau I). Les tests de comparaisons multiples montrent qu'il existe une différence significative entre les moyennes journalières de température sous un couvert de linaigrette et celles enregistrées à 5 cm de la surface tourbeuse dénudée pour 58% des journées d'échantillonnage (Tableaux III et IV). La température maximale de l'air est presque toujours plus élevée sur une surface dénudée que sous un couvert de linaigrette (Figure 5). Dans 50% du temps, la température maximale est supérieure à 24,5°C sous un couvert de linaigrette alors qu'elle est supérieure à 26°C sur la surface nue. Toutefois, lors des journées les plus chaudes de l'été, la température maximale s'élève à 29,5°C sous un couvert de linaigrette tandis qu'elle atteint 33,5°C sur la surface nue, d'où une différence de température pouvant atteindre 4°C. Les tests de comparaisons multiples indiquent que la différence entre les maxima journaliers de température sous un couvert de linaigrette et ceux sur une surface tourbeuse dénudée s'avère significative pour 37% des journées d'échantillonnage (Tableaux III et IV). La température minimale de l'air sous un couvert de linaigrette et celle sur une surface tourbeuse sont similaires (Figure 5). Cependant, les tests de comparaisons multiples montrent que les minima journaliers peuvent différer de façon significative certaines journées (Tableaux III et IV).

3.2.2 Humidité relative à la surface du sol

La moyenne horaire des taux d'humidité relative de l'air à 5 cm au-dessus de la surface du sol est, en tout temps, plus élevée sous un couvert de linaigrette que sur une surface de tourbe nue (Figure 6). La différence entre l'humidité relative sous un couvert de linaigrette et celle sur une surface tourbeuse dénudée varie entre 2 et 22%. Cette différence se révèle encore plus importante lorsque l'on concentre notre analyse sur une période sèche. Au cours de la période du 18 août au 4 septembre 1999, où aucune précipitation n'a été enregistrée à la tourbière de Saint-Henri, la différence observée entre les taux d'humidité relative sous un couvert de linaigrette et ceux sur une surface de tourbe nue varie de 5 à près de 35% (Figure 7). L'analyse de variance en mesures répétées indique une interaction *traitement x temps* significative (Tableau I). Les tests de comparaisons multiples montrent que

Tableau III. Tests de comparaisons multiples comparant la température (moyennes, maxima et minima journaliers), l'humidité relative (moyennes, maxima et minima journaliers), le niveau de la nappe phréatique ou le contenu volumique en eau de la tourbe (sondes 12 et 20 cm) mesurés quotidiennement sous un couvert d'*Eriophorum vaginatum* (quadrats 2, 4, 5 et 7) aux mêmes variables enregistrées sur ou sous une surface tourbeuse dénudée (quadrats 1, 3, 6 et 8).

JourJulien	Variable dépendante								
	Moyenne journalière	Température		Humidité relative			Nappe phréatique	Contenu volumique en eau	
		Maximum journalier	Minimum journalier	Moyenne journalière	Maximum journalier	Minimum journalier		Sonde 12 cm	Sonde 20 cm
158	**	**	**	n.s.	n.s.	**	n.d.	n.d.	n.d.
159	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
160	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.d.	n.d.	n.d.
161	**	**	n.s.	*	n.s.	**	n.d.	n.d.	n.d.
162	**	**	n.s.	*	n.s.	**	n.d.	n.d.	n.d.
163	**	**	**	**	n.s.	**	n.d.	n.d.	n.d.
164	**	**	n.s.	**	n.s.	**	n.d.	n.d.	n.d.
165	**	**	*	**	n.s.	**	n.d.	n.d.	n.d.
166	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
167	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
168	**	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
169	**	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
170	**	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
171	**	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
172	**	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
173	**	**	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
174	**	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
175	**	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
176	**	**	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
177	*	n.s.	*	n.s.	n.s.	*	n.d.	n.d.	n.d.
178	**	**	*	*	n.s.	*	n.d.	n.d.	n.d.
179	n.s.	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
180	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
181	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
182	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
183	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
184	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
185	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.
186	n.s.	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	**
187	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	**
188	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	**

* significatif à $P < 0,05$

** significatif à $P < 0,01$

n.s. non significatif

n.d. non disponible

Tableau III. (suite).

JourJulien	Variable dépendante								
	Moyenne journalière	Température		Humidité relative			Nappe phréatique	Contenu volumique en eau	
		Maximum journalier	Minimum journalier	Moyenne journalière	Maximum journalier	Minimum journalier		Sonde 12 cm	Sonde 20 cm
189	*	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	*
190	n.s.	*	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.s.
191	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	*
192	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	**
193	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	**
194	*	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	**
195	**	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	*
196	**	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	**
197	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.s.
198	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	**
199	**	**	*	*	n.s.	**	n.s.	n.d.	*
200	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	n.d.	**
201	*	n.s.	n.s.	**	**	**	n.s.	n.d.	n.s.
202	**	**	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	n.d.	**
203	**	**	n.s.	**	n.s.	**	*	n.d.	n.s.
204	**	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	n.d.	**
205	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	n.d.	n.s.
206	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	*
207	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	**	n.s.	n.d.	**
208	*	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	n.d.	**
209	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	n.d.	**
210	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	**
211	**	**	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	*
212	**	**	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	**	**
213	*	**	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	**	**
214	*	**	*	**	n.s.	**	n.s.	**	*
215	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	*	**	**
216	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	**	**
217	n.s.	*	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	**	**
218	n.s.	*	*	**	n.s.	**	n.s.	**	**

* significatif à $P < 0,05$

** significatif à $P < 0,01$

n.s. non significatif

nd. non disponible

Tableau III. (suite).

JourJulien	Variable dépendante									
	Température			Humidité relative			Nappe phréatique	Contenu volumique en eau		
	Moyenne journalière	Maximum journalier	Minimum journalier	Moyenne journalière	Maximum journalier	Minimum journalier		Sonde 12 cm	Sonde 20 cm	
219	n.s.	n.s.	**	**	n.s.	**	n.s.	**	**	
220	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	**	
221	n.s.	n.s.	*	**	**	**	n.s.	**	**	
222	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	**	**	
223	**	*	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	**	**	
224	*	*	n.s.	*	n.s.	**	n.s.	**	**	
225	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	**	
226	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	**	**	
227	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	**	
228	**	**	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	
229	*	**	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	**	**	
230	n.s.	n.s.	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.	n.s.	**	*	
231	*	*	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.	n.s.	**	**	
232	**	*	n.s.	n.d.	n.d.	n.d.	n.s.	**	**	
233	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	**	*	
234	*	*	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	**	**	
235	**	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	*	**	**	
236	**	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	*	**	**	
237	**	n.s.	*	**	n.s.	**	n.s.	**	**	
238	**	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	**	**	
239	**	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	*	**	**	
240	*	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	*	**	**	
241	n.s.	n.s.	**	**	**	**	*	**	**	
242	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	*	**	**	
243	*	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	*	**	**	
244	**	n.s.	n.s.	**	n.s.	**	*	**	**	
245	**	*	n.s.	**	n.s.	**	*	**	**	
246	**	**	n.s.	**	n.s.	**	*	**	**	
247	n.s.	n.s.	n.s.	**	*	**	*	**	**	
248	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	*	**	**	

* significatif à $P < 0,05$

** significatif à $P < 0,01$

n.s. non significatif

n.d. non disponible

Tableau IV. Nombre de journées où les tests de comparaisons multiples indiquent une différence significative ($P < 0,05$), hautement significative ($P < 0,01$) ou non significative ($P \geq 0,05$) entre la température (moyenne, maximum et minimum journaliers), l'humidité relative (moyenne, maximum et minimum journaliers), le niveau de la nappe phréatique ou le contenu volumique en eau de la tourbe (sondes 12 et 20 cm) sous un couvert d'*Eriophorum vaginatum* (quadrats 2, 4, 5 et 7) et sur ou sous une surface tourbeuse nue (quadrats 1, 3, 6 et 8).

Variable dépendante	Journées (N)	Significatif (n) *	Hautement significatif (n)	Non significatif (n)
<i>Température</i>				
Moyenne journalière	90	52 (58%)	36 (40%)	38 (42%)
Maximum journalier	90	33 (37%)	19 (21%)	57 (63%)
Minimum journalier	90	29 (32%)	15 (17%)	61 (68%)
<i>Humidité relative</i>				
Moyenne journalière	87	42 (48%)	36 (41%)	45 (52%)
Maximum journalier	87	4 (5%)	3 (4%)	83 (95%)
Minimum journalier	87	51 (59%)	49 (56%)	36 (41%)
<i>Nappe phréatique</i>	63	14 (22%)	0 (0%)	49 (78%)
<i>Contenu volumique en eau</i>				
Sonde 12 cm	39	39 (100%)	39 (100%)	0 (0%)
Sonde 20 cm	63	57 (91%)	48 (76%)	6 (9%)

* Les journées où une différence significative a été observée incluent aussi celles où une différence hautement significative a été signalée.

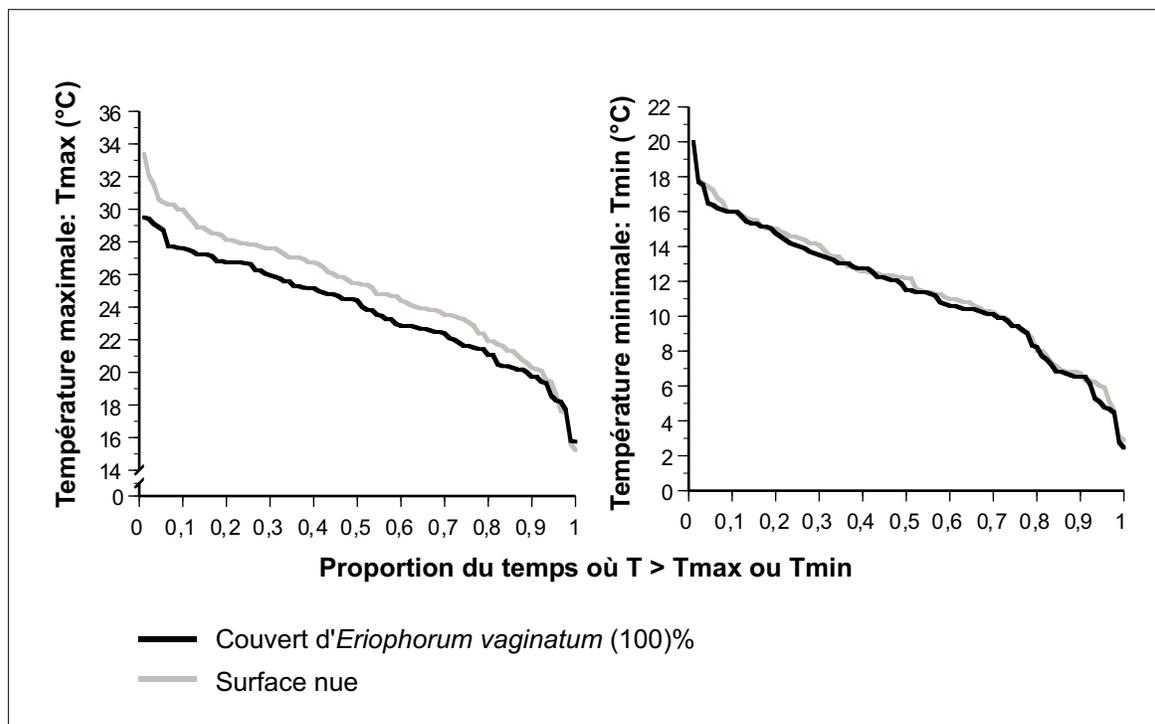


Figure 5. Courbes cumulatives de la température de l'air à 5 cm au-dessus de la surface du sol sous un couvert d'*Eriophorum vaginatum* (moyenne des maxima et minima journaliers des quadrats 2, 4, 5 et 7) et sur une surface tourbeuse nue (moyenne des maxima et minima journaliers des quadrats 1, 3, 6 et 8). Les courbes cumulatives illustrent la proportion du temps où les maxima et minima journaliers de température sont supérieurs à la valeur exprimée en ordonnée. La température a été enregistrée à toutes les heures entre le 7 juin et le 4 septembre 1999.

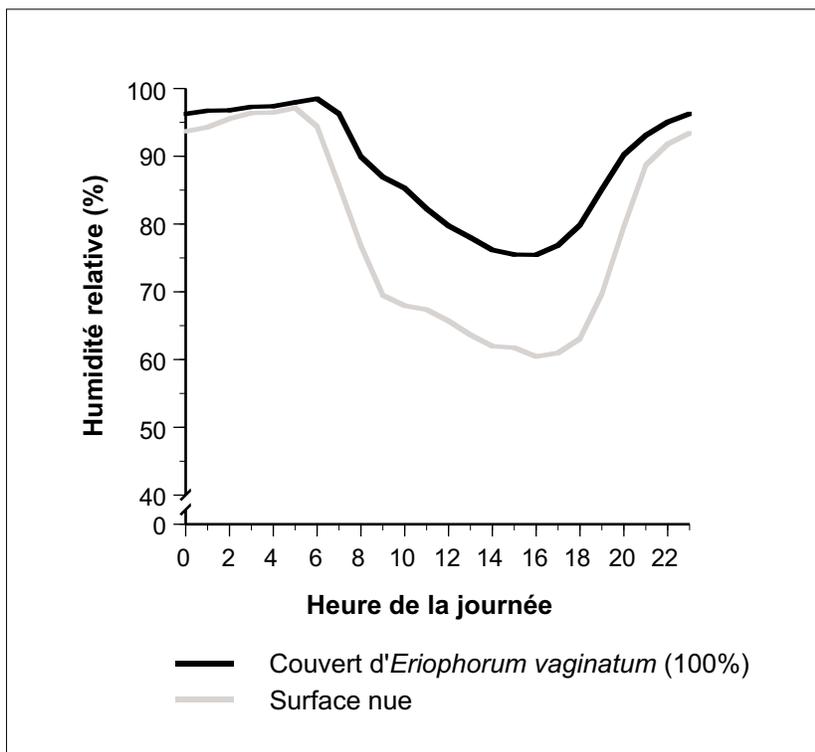


Figure 6. Profil horaire moyen de l'humidité relative de l'air à 5 cm au-dessus de la surface du sol sous un couvert d'*Eriophorum vaginatum* (moyenne des quadrats 2, 4, 5 et 7) et sur une surface tourbeuse nue (moyenne des quadrats 1, 3, 6 et 8). Le profil horaire moyen a été établi à partir des taux d'humidité relative enregistrés à toutes les heures entre le 7 juin et le 4 septembre 1999.

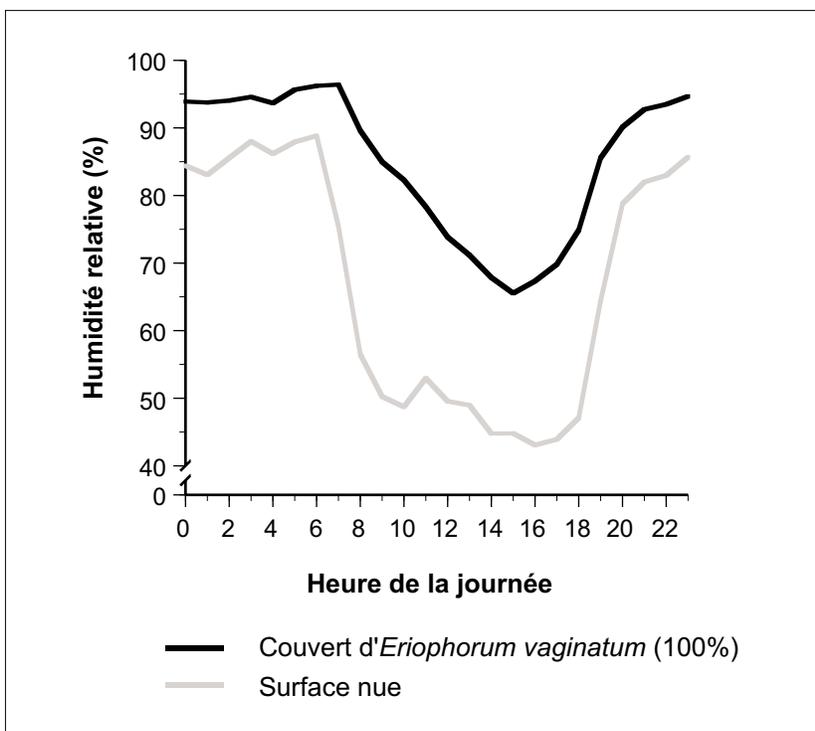


Figure 7. Profil horaire moyen de l'humidité relative de l'air à 5 cm au-dessus de la surface du sol sous un couvert d'*Eriophorum vaginatum* (moyenne des quadrats 2, 4, 5 et 7) et sur une surface tourbeuse nue (moyenne des quadrats 1, 3, 6 et 8) pour une période sans précipitation de 18 journées consécutives. Le profil horaire moyen a été établi à partir des taux d'humidité relative enregistrés à toutes les heures entre le 18 août et le 4 septembre 1999.

les taux d'humidité relative sous un couvert de linaigrette et ceux sur une surface dénudée diffèrent de façon hautement significative de 7h00 à 20h00 (Tableau II).

L'analyse de variance en mesures répétées signale une interaction *traitement x temps* significative pour la moyenne et les minima journaliers d'humidité relative de l'air (Tableau I). Les tests de comparaisons multiples montrent qu'il existe une différence significative entre les moyennes journalières d'humidité relative sous un couvert de linaigrette et celles enregistrées à 5 cm de la surface tourbeuse dénudée pour 48% des journées d'échantillonnage (Tableaux III et IV). Cette différence est hautement significative pour toutes les journées de la période sèche prolongée (fin août - début septembre). L'humidité relative minimale est, de façon générale, plus élevée sous un couvert de linaigrette que sur une surface de tourbe nue. Dans 50% du temps, les minima d'humidité relative sont supérieurs à 55-77% sous le couvert de linaigrette alors qu'ils sont supérieurs à 40-57% sur la surface dénudée (Figure 8). Lors des journées les plus sèches de l'été, les minima d'humidité relative sont de 34-51% sous un couvert de linaigrette, tandis qu'ils descendent jusqu'à 11-35% sur la surface nue. Il importe de mentionner que certaines données d'humidité relative manquantes ou aberrantes (mauvais fonctionnement temporaire de certains appareils) ont imposé le retrait de certaines journées dans le calcul des moyennes et des maxima et minima journaliers. La paire de quadrats D (Q7 et Q8) a été complètement retirée de cette analyse en raison d'un trop grand nombre de données manquantes ou aberrantes. Le calcul d'une moyenne pour l'ensemble des quadrats avec couvert de linaigrette et de celle pour l'ensemble des quadrats dénudés s'est avéré impossible, car les paires de quadrats ne partageaient pas toutes les mêmes journées d'enregistrement. Les tests de comparaisons multiples indiquent que la différence entre les minima journaliers d'humidité relative sous un couvert de linaigrette et celle sur une surface tourbeuse dénudée est significative pour 59% des journées d'échantillonnage (Tableaux III et IV). Cette différence s'est révélée hautement significative tout au long de la période sèche prolongée (fin août - début septembre). L'analyse de variance en mesures répétées signale une interaction *traitement x temps* non significative et indique que les maxima journaliers d'humidité relative sous un couvert de linaigrette et ceux sur une surface nue ne diffèrent pas de façon significative (Tableau I).

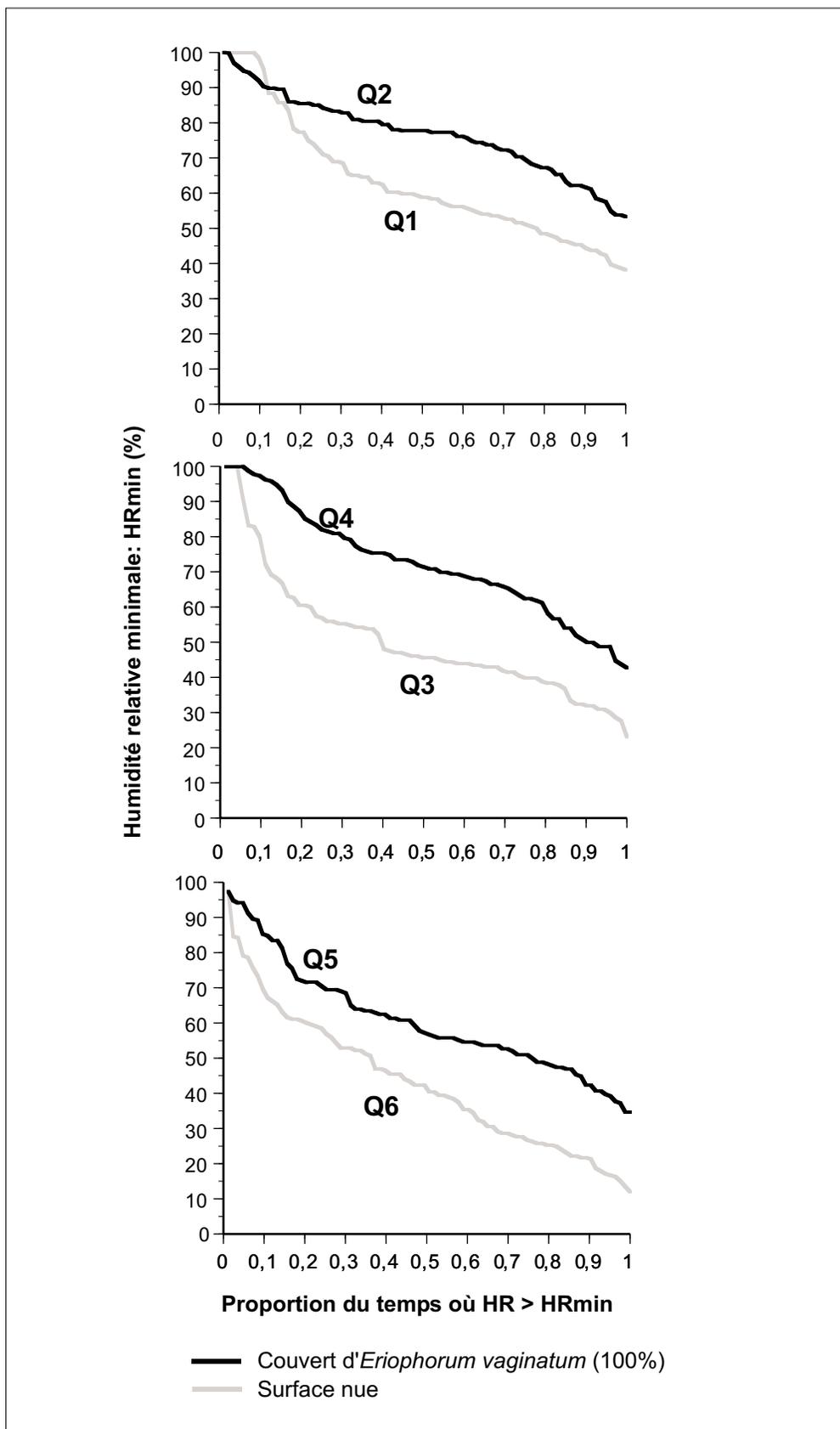


Figure 8. Courbes cumulatives des taux d'humidité relative de l'air à 5 cm au-dessus de la surface du sol sous un couvert d'*Eriophorum vaginatum* et sur une surface tourbeuse nue pour les paires de quadrats A (Q1, Q2), B (Q3, Q4) et C (Q5, Q6). Les courbes cumulatives illustrent la proportion du temps où les minima journaliers d'humidité relative sont supérieurs à la valeur exprimée en ordonnée. Le taux d'humidité relative a été enregistré à toutes les heures entre le 7 juin et le 4 septembre 1999. Certaines journées de mesure ont été retirées en raison de données manquantes ou aberrantes.

3.2.3 Évaporation à la surface du sol

Les taux d'évaporation de l'eau de la surface tourbeuse couverte de linaigrette se sont révélés inférieurs à ceux de la surface dénudée pour 61% des journées d'échantillonnage (Figure 9). La situation inverse s'est produite pour 26% des journées d'échantillonnage. Les taux d'évaporation de la surface tourbeuse couverte de linaigrette et ceux de la surface dénudée se sont avérés similaires dans 13% du temps. Globalement, pour l'ensemble de la période de mesure, le bac de tourbe nue a perdu 15% plus d'eau par évaporation que le bac recouvert de linaigrette.

3.2.4 Luminosité à la surface du sol

Le couvert de linaigrette intercepte la quasi-totalité du rayonnement solaire incident. La surface du sol sous un couvert de linaigrette reçoit en moyenne 1,2% du rayonnement solaire incident.

3.2.5 Interception des précipitations par le couvert de linaigrette

Un tourradon de linaigrette intercepte de 30 à près de 80% de l'eau reçue sous forme de précipitations (Figure 10). De façon générale, la proportion de l'eau interceptée diminue à chaque fois que l'on simule une précipitation supplémentaire. Le taux d'interception des précipitations est très élevé (60 à près de 80%) lorsque le tourradon est sec. Il diminue entre 40 et 65% après une première simulation de pluie, puis décroît graduellement avec les versements d'eau subséquents.

3.3 Conditions hydrologiques

3.3.1 Niveau de la nappe phréatique

Le niveau de la nappe phréatique s'est avéré légèrement plus élevé (de 1 à 5 cm) sous un couvert de linaigrette que sous une surface de tourbe nue lors des journées sans pluie et au cours d'une période de sécheresse prolongée (fin août - début septembre) (Figure 11). L'analyse de variance en mesures répétées signale une interaction *traitement* \times *temps* non

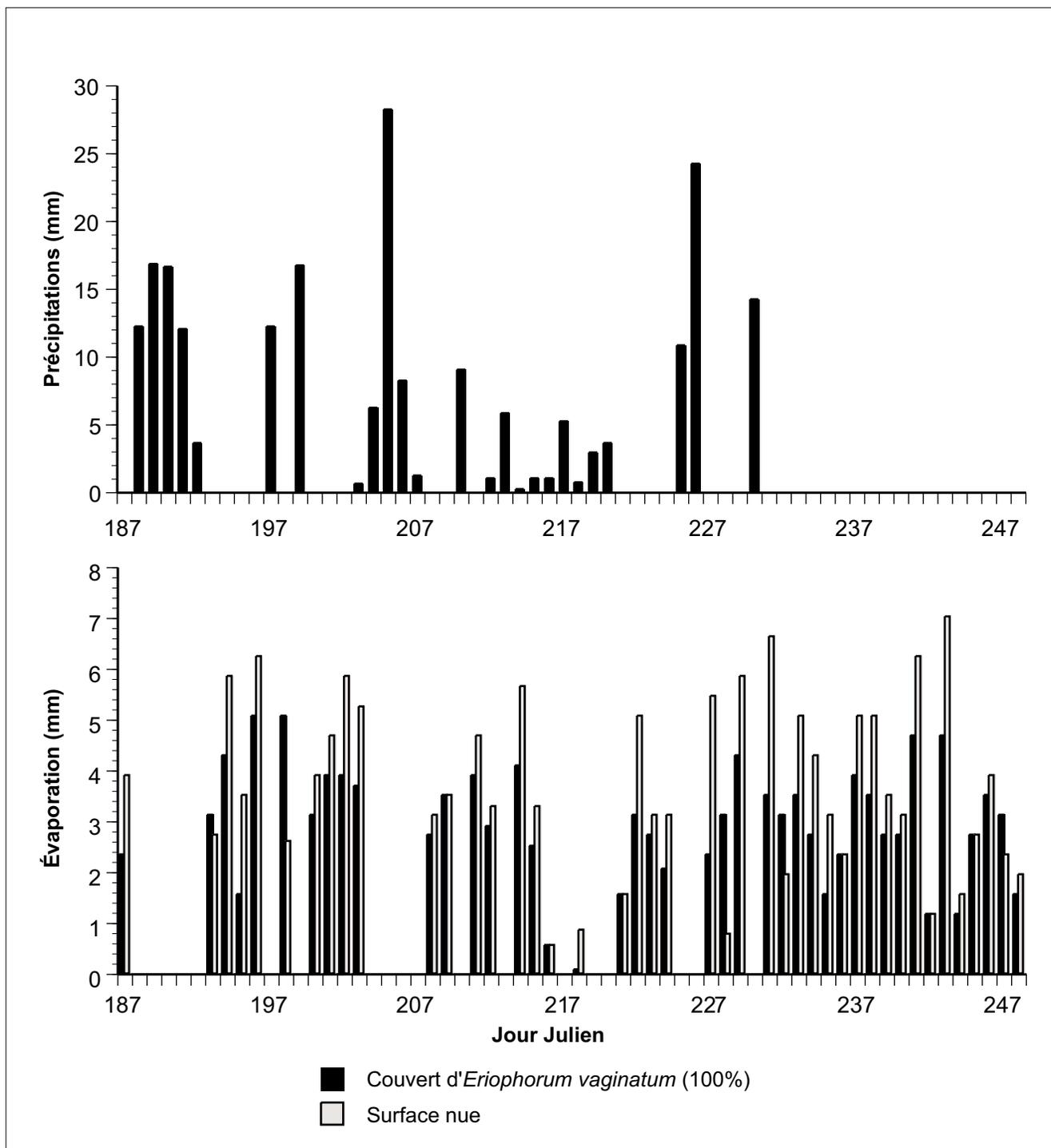


Figure 9. Précipitations à la tourbière de Saint-Henri et taux d'évaporation pour une surface tourbeuse couverte d'*Eriophorum vaginatum* et pour une surface tourbeuse nue. Les précipitations et les taux d'évaporation ont été mesurés quotidiennement, pour une période de 24 heures, entre le 6 juillet et le 5 septembre 1999.

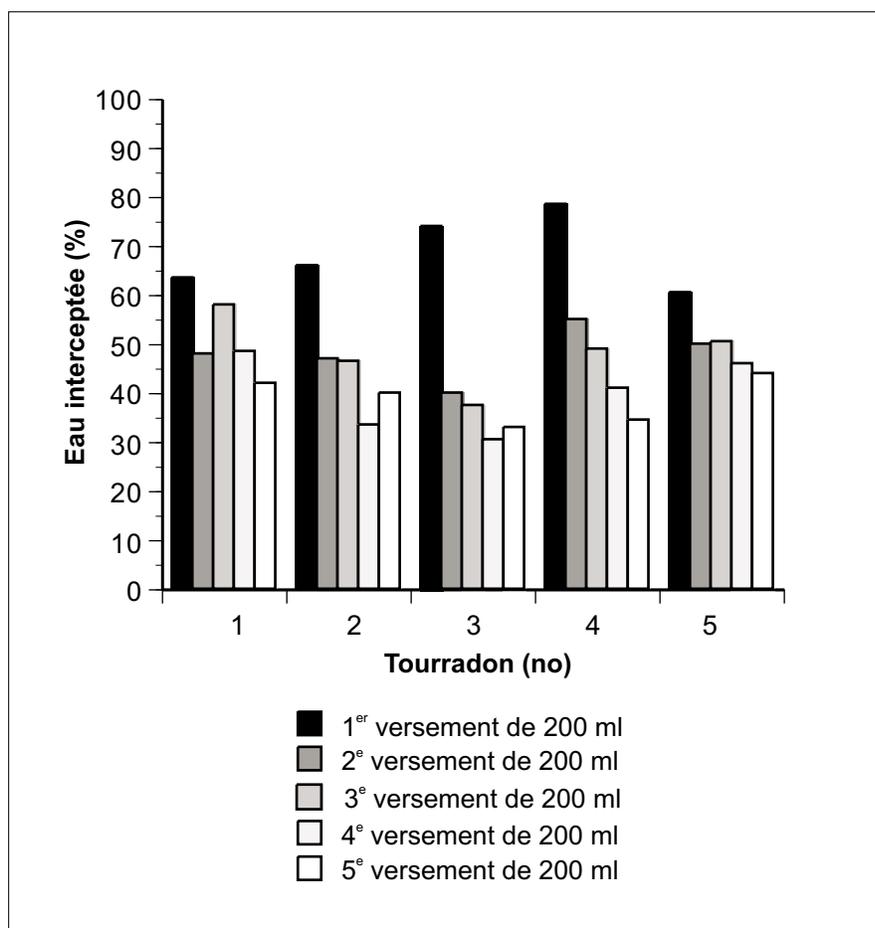


Figure 10. Proportion d'eau interceptée par cinq tourradons d'*Eriophorum vaginatum* après avoir reçu une, deux, trois, quatre, et cinq quantités de 200 ml d'eau sur la surface de leurs feuilles.

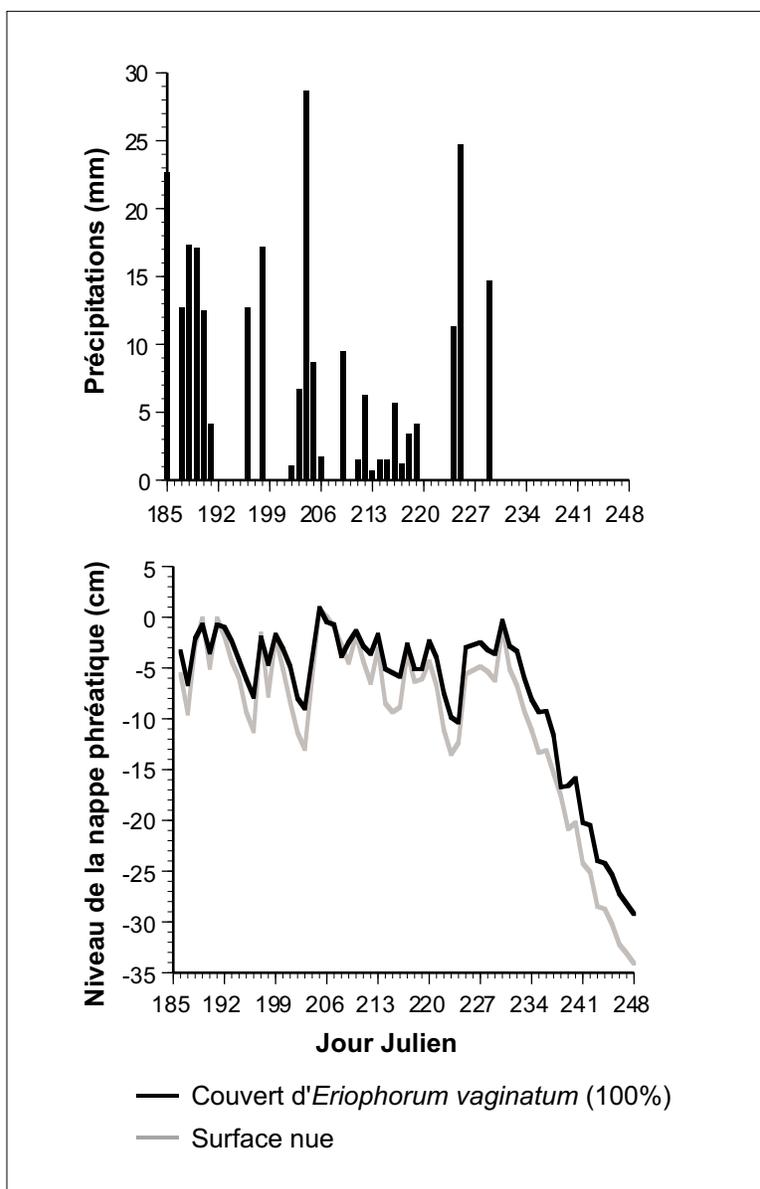


Figure 11. Précipitations à la tourbière de Saint-Henri et niveau de la nappe phréatique sous un couvert d'*Eriophorum vaginatum* (moyenne des quadrats 2, 4, 5 et 7) et sous une surface tourbeuse nue (moyenne des quadrats 1, 3, 6 et 8). Les courbes illustrent les variations quotidiennes du niveau de la nappe phréatique entre le 5 juillet et le 5 septembre 1999.

significative et indique que, tous temps de mesure confondus, la différence entre le niveau de la nappe phréatique est significative entre les deux traitements (Tableau I). Toutefois, les tests de comparaisons multiples montrent que cette différence est significative seulement pour quelques journées, principalement pendant la période sèche, et non significative pour 78% des journées d'échantillonnage (Tableaux III et IV).

3.3.2 Contenu volumique en eau de la tourbe

Le contenu volumique en eau de la tourbe est plus élevé sous un couvert de linaigrette que sous une surface de tourbe nue, tant pour une tranche de sol de 12 cm que pour une tranche de sol de 20 cm d'épaisseur (Figure 12). L'analyse de variance en mesures répétées signale une interaction *traitement x temps* significative (Tableau I). Les tests de comparaisons multiples révèlent que la différence entre le contenu volumique en eau de la tourbe pour une tranche de sol de 12 cm d'épaisseur sous un couvert de linaigrette et celui sous une surface dénudée est hautement significative, et cela pour toute la période de mesure. Cette différence s'est avérée significative pour 91% des journées d'échantillonnage pour une tranche de sol de 20 cm d'épaisseur (Tableaux III et IV).

3.4 Soulèvement gélival

Le test *t* montre que le soulèvement gélival est significativement ($P < 0,01$) moins important sur une surface couverte de linaigrette que sur une surface de tourbe nue. Dans les quadrats dénudés, les clous insérés dans le sol ont été expulsés à l'extérieur du sol sur une hauteur variant entre 1,9 et 6,5 cm (hauteur moyenne de 4,1 cm), alors qu'ils l'ont été sur une hauteur inférieure ou égale à 2,3 cm (hauteur moyenne de 0,5 cm) dans les quadrats recouverts de linaigrette.

3.5 Caractéristiques biophysiques sur l'ensemble de la planche d'exploitation

3.5.1 Végétation

Sur la planche d'exploitation abandonnée à l'étude, 66% des points échantillonnés sont recouverts de végétation (Tableau V). La richesse en espèce s'avère peu élevée

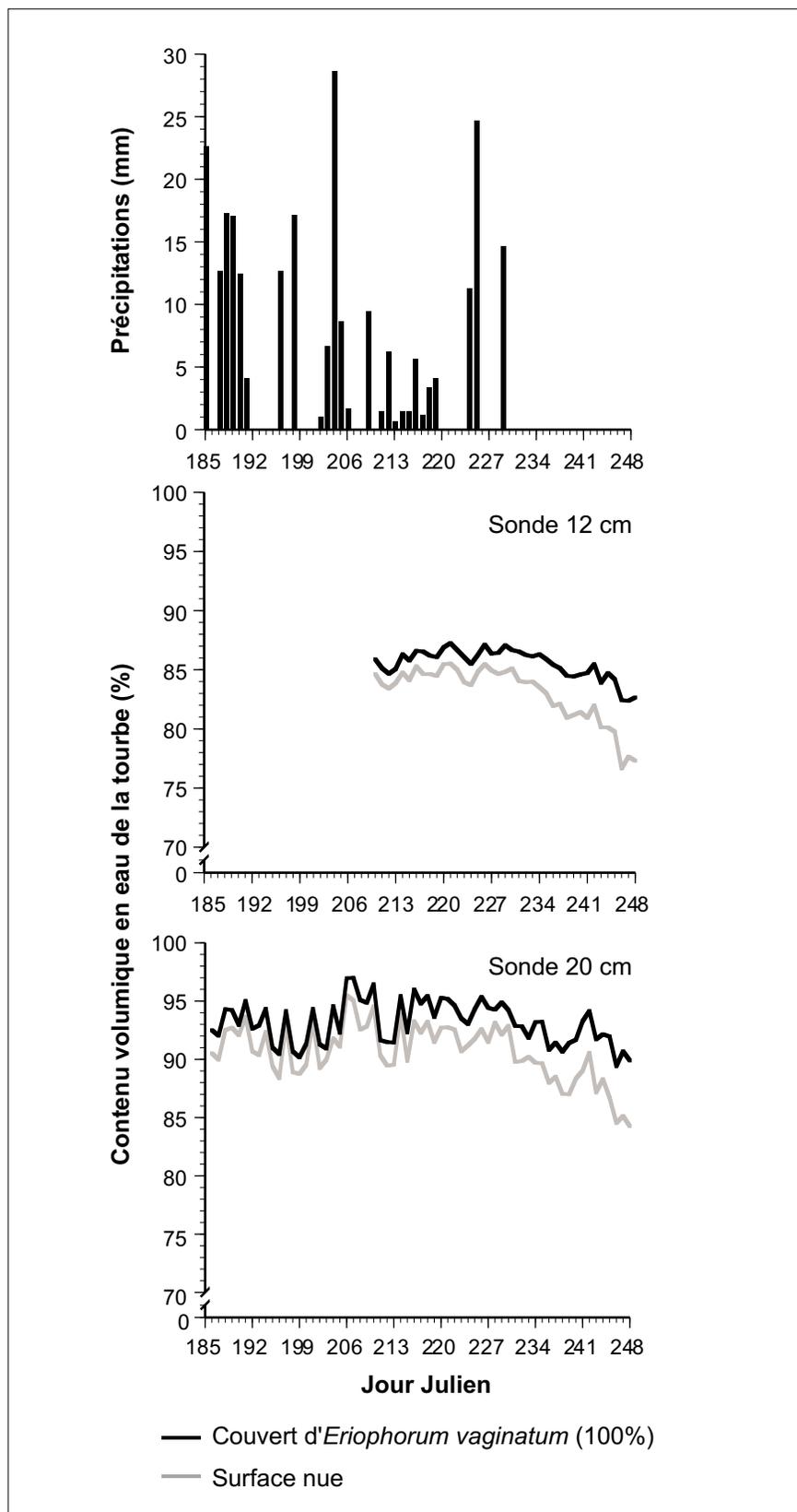


Figure 12. Précipitations à la tourbière de Saint-Henri et contenu volumique en eau de la tourbe (%) à l'intérieur d'une tranche de sol d'une épaisseur de 12 cm et de 20 cm sous un couvert d'*Eriophorum vaginatum* (moyenne des quadrats 2, 4, 5 et 7) et sous une surface tourbeuse nue (moyenne des quadrats 1, 3, 6 et 8). Les courbes illustrent les variations quotidiennes du contenu en eau de la tourbe entre le 29 juillet et le 5 septembre 1999 (sonde 12 cm) et entre le 5 juillet et le 5 septembre 1999 (sonde 20 cm).

Tableau V. Pourcentage de points d'échantillonnage où une espèce donnée a été recensée dans une planche d'exploitation abandonnée de la tourbière de Saint-Henri.

Points d'échantillonnage (<i>N</i>)	4525
Points avec végétation (%)	
Toutes espèces confondues	66,08
Arbres	
<i>Acer rubrum</i> L.	0,04
<i>Betula xcaerulea</i> Blanch.	0,07
<i>Betula papyrifera</i> Marsh.	0,33
<i>Betula populifolia</i> Marsh.	3,09
<i>Larix laricina</i> (Du Roi) Koch	1,24
Ericaceae	
<i>Chamaedaphne calyculata</i> (L.) Moench	1,70
<i>Kalmia polifolia</i> Wang.	0,02
<i>Ledum groenlandicum</i> Oeder	0,04
<i>Vaccinium oxycoccos</i> L.	0,04
Cyperaceae	
<i>Carex oligosperma</i> Michx.	0,02
<i>Carex stricta</i> Lam.	0,29
<i>Carex</i> sp.	0,02
<i>Eriophorum virginicum</i> L.	1,22
<i>Eriophorum vaginatum</i> L.	63,73
<i>Scirpus atrocinctus</i> Fern.	0,02
Mousses	
<i>Polytrichum commune</i> Hedw.	0,07
<i>Pohlia nutans</i> (Hedw.) Lindb.	0,49
<i>Polytrichum strictum</i> Brid.	0,20
Nombre total d'espèces	18

(18 espèces au total). La linaigrette, présente sur 64% des points échantillonnés, est de loin l'espèce dominante. L'ensemble des autres espèces relevées n'ont été observées que sur un très faible pourcentage des points d'échantillonnage (moins de 4%). Parmi ces autres espèces, *Betula populifolia*, *Chamaedaphne calyculata*, *Larix laricina* et *Eriophorum virginicum* se révèlent les plus abondantes.

La carte de répartition spatiale des espèces (Figure 13) permet d'observer avec précision la distribution des espèces par rapport à la densité du couvert de la principale espèce envahissante, soit la linaigrette. Les arbres se concentrent principalement dans une zone où le couvert de linaigrette est de densité moyenne. Les éricacées se trouvent en majeure partie dans les zones de moyenne et de forte densité de couvert de linaigrette. Les autres cypéracées ont une répartition plutôt contagieuse et elles sont un peu moins abondantes dans la zone où le couvert de linaigrette est moins dense. La plus grande partie des mousses se trouve là où le couvert de linaigrette est très dense.

3.5.2 Élévation relative

La planche d'exploitation abandonnée à l'étude présente un gradient d'élévation relative qui varie, de façon graduelle, entre 0 et 83 cm. Un faible bombement central s'observe également sur la largeur de la planche (Figure 14). L'altitude moyenne s'élève de moins de 0,5 cm par mètre, ce qui confère au site une très faible pente (0,5%).

3.5.3 Épaisseur du dépôt de tourbe résiduel

L'épaisseur du dépôt de tourbe varie entre 24 et 143 cm et suit grossièrement le gradient d'élévation relative (Figure 14). L'épaisseur moyenne du dépôt de tourbe est de 95 cm. L'épaisseur maximale du dépôt de tourbe s'observe là où l'élévation relative est la plus élevée et son épaisseur minimale là où l'élévation est la plus faible. La plus grande partie de la surface étudiée a une épaisseur de tourbe résiduelle de 104 à 123 cm.

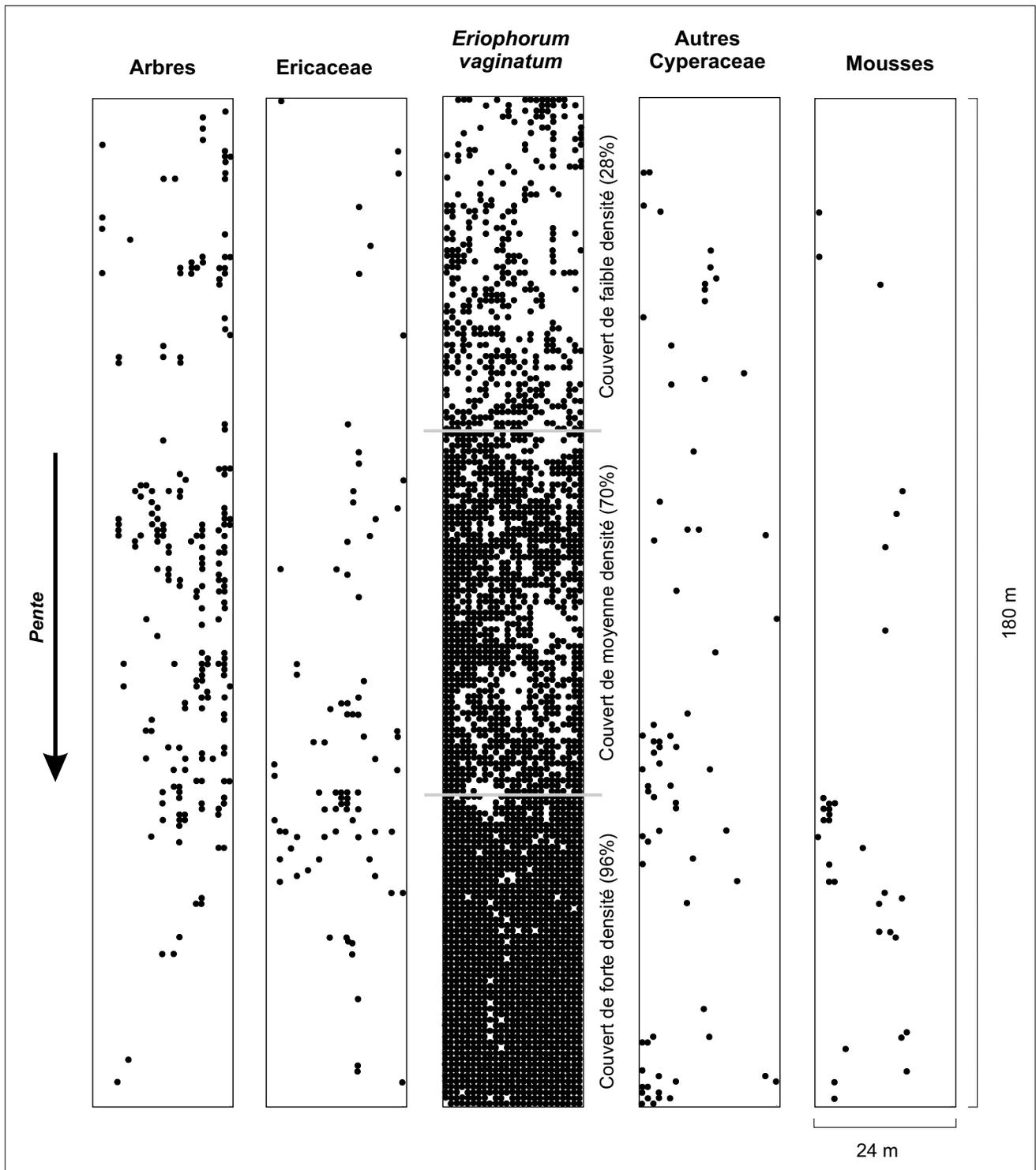


Figure 13: Répartition spatiale des arbres, des éricacées, de l'espèce envahissante *Eriophorum vaginatum*, des autres cypéracées et des mousses dans une planche d'exploitation abandonnée de la tourbière de Saint-Henri. Chaque individu d'une espèce ou d'un groupe d'espèces donné couvrant un point d'échantillonnage localisé à tous les mètres, le long de transects distancés d'un mètre les uns des autres, est représenté par un point.

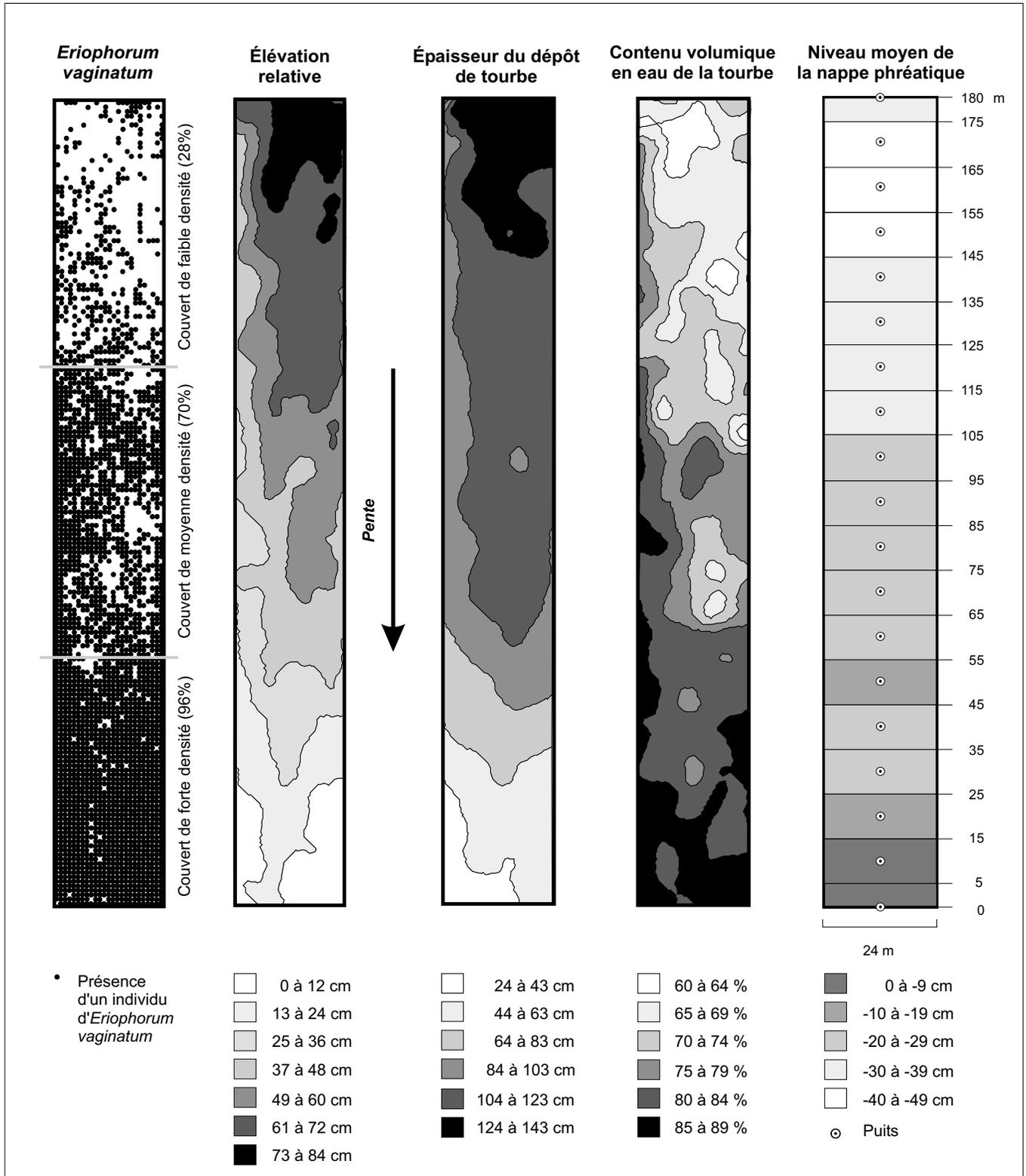


Figure 14. Représentation cartographique de la répartition spatiale d'*Eriophorum vaginatum*, de l'élévation relative, de l'épaisseur du dépôt de tourbe résiduel, du contenu volumique en eau de la tourbe et du niveau moyen de la nappe phréatique (été 1999) dans une planche d'exploitation abandonnée de la tourbière de Saint-Henri.

3.5.4 Contenu volumique en eau de la tourbe

Le contenu volumique en eau de la tourbe pour une tranche de sol de 12 cm d'épaisseur varie de façon graduelle, mais irrégulière, du haut vers le bas de la pente, soit entre 60 et 88% (Figure 14). Le contenu volumique en eau moyen s'élève à 77%. Le contenu volumique en eau maximal s'observe là où l'élévation est la plus faible, alors que le contenu volumique en eau minimal se trouve dans le haut de la pente.

3.5.5 Niveau de la nappe phréatique

Au cours de l'été 1999, considérant l'ensemble des puits installés sur la planche d'exploitation à l'étude, le niveau de la nappe phréatique a varié entre 99 cm sous la surface du sol, en période sèche, à plus de 5 cm au-dessus de la surface lors des pluies abondantes. Il a varié entre 0,3 et 69 cm sous la surface du sol au cours de l'été 2000. Le niveau moyen de la nappe phréatique pour l'ensemble des puits était de 28 cm sous la surface du sol pour l'été 1999 et de 36 cm sous la surface du sol pour l'été 2000. Les niveaux de nappe phréatique les plus faibles ont été enregistrés dans les puits situés dans le haut de la pente alors que les plus élevés l'ont été dans le bas de la pente (Figure 15).

3.5.6 Densité du couvert de linaigrette et caractéristiques physiques du milieu

La courbe de densité du couvert de linaigrette suit grossièrement celle du niveau de la nappe phréatique (Figure 16). Lorsque le niveau moyen de la nappe phréatique est près de la surface (0-25 cm sous la surface), le couvert de linaigrette est très dense (90-100%). Lorsque le niveau moyen de la nappe phréatique descend à un niveau inférieur à 30 cm sous la surface du sol, la densité de linaigrette chute brusquement, passant de 75 à moins de 35% sur une distance d'à peine 20 m.

Enfin, le couvert de linaigrette se révèle plus dense là où le dépôt de tourbe est plus mince (Figures 14 et 16). Lorsque l'épaisseur du dépôt de tourbe devient supérieure à un mètre, la densité du couvert de linaigrette passe de 75 à moins de 35% sur une distance d'à peine 20 m.

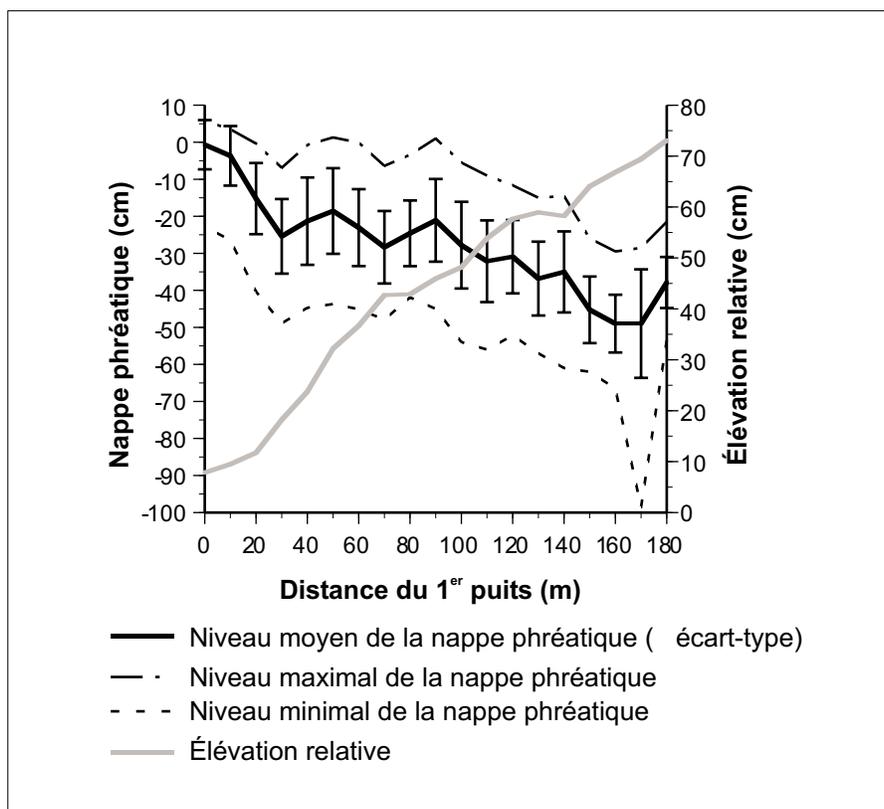


Figure 15. Niveau de la nappe phréatique (moyen, maximal et minimal) et élévation relative à l'intérieur de zones établies de part et d'autre des puits d'observation de la nappe phréatique installés en réseau (à tous les 10 m) le long d'une planche d'exploitation abandonnée de la tourbière de Saint-Henri (voir la section *Méthodes* pour les détails). La nappe phréatique a été relevée quotidiennement, au centre de chaque zone, du 5 juillet au 5 septembre 1999.

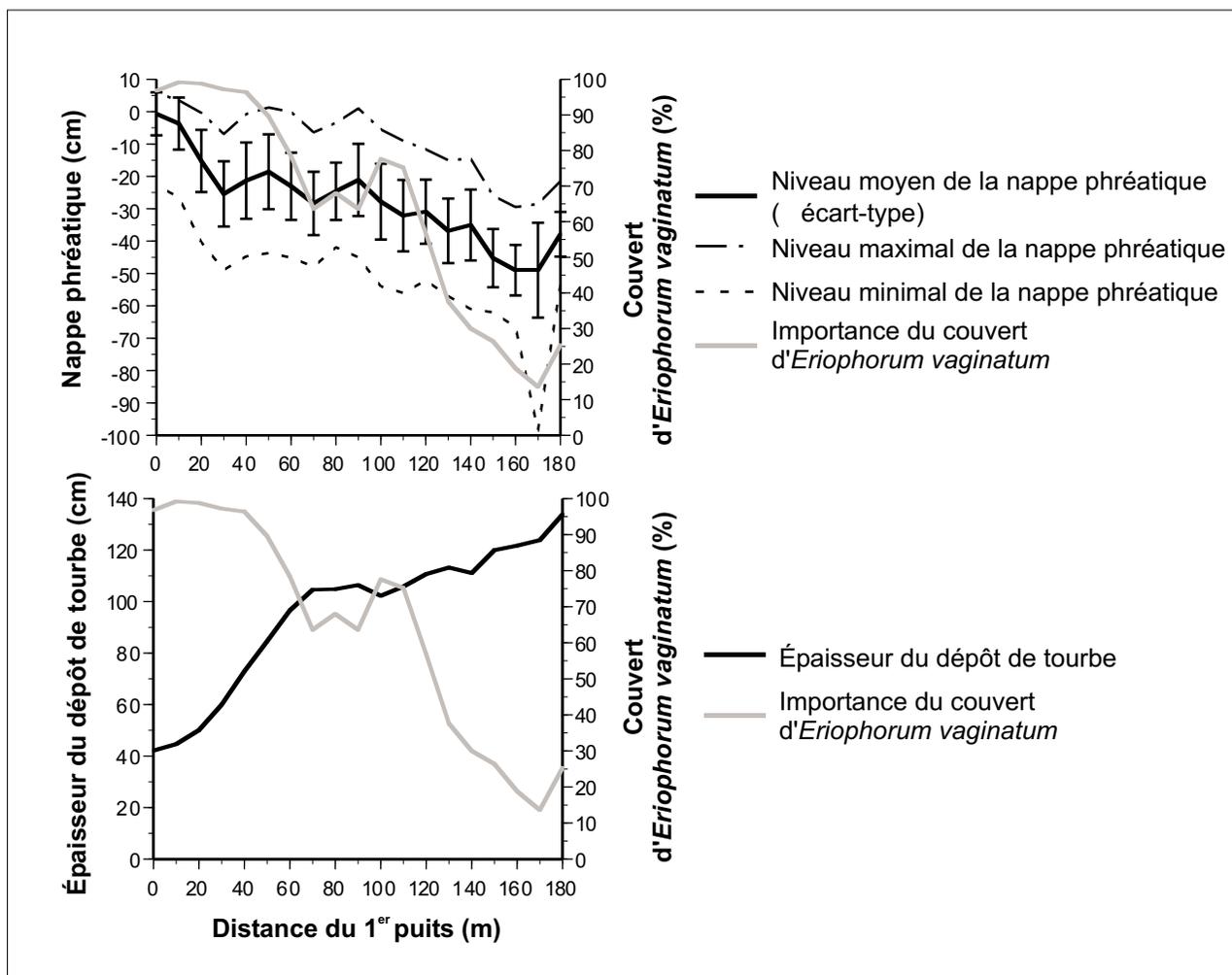


Figure 16. Importance du couvert d'*Eriophorum vaginatum*, niveau de la nappe phréatique (moyen, minimal et maximal) et épaisseur du dépôt de tourbe le long d'une planche d'exploitation abandonnée de la tourbière de Saint-Henri. Les mesures correspondent à une moyenne des données prélevées au sein de zones établies de part et d'autre des puits d'observation de la nappe phréatique installés en réseau à tous les 10 m (voir la section *Méthodes* pour les détails). La nappe phréatique a été relevée quotidiennement, au centre de chaque zone, du 5 juillet au 5 septembre 1999.

4.0 Discussion

4.1 Les invasions de linaigrette: leurs impacts sur les conditions biophysiques d'une tourbière abandonnée après exploitation

La population de linaigrette sur la planche à l'étude modifie les conditions microclimatiques, hydrologiques et de substrat de cette parcelle de tourbière abandonnée après exploitation. Un couvert dense de linaigrette intercepte la quasi-totalité du rayonnement solaire incident. En créant de l'ombre, il génère à la surface du sol des conditions microclimatiques moins chaudes et plus humides, surtout pendant les heures les plus chaudes de la journée et lors de chaleurs extrêmes. L'effet le plus important du couvert de linaigrette est sans contredit celui sur les conditions d'humidité près de la surface du sol. Le couvert de linaigrette crée un micro-environnement beaucoup plus humide, particulièrement entre 7h00 et 20h00. Cet effet du couvert de linaigrette est encore plus remarquable lors d'une période de sécheresse prolongée. Aussi, les tourradons de linaigrette génèrent, dans la couche de tourbe superficielle, une humidité significativement plus élevée en terme de contenu volumique en eau de la tourbe, et ce, particulièrement en période de sécheresse prolongée.

La littérature fait état de conclusions similaires à celles que nous avons obtenues à Saint-Henri. Plusieurs recherches menées en Europe et en Amérique du Nord (Schouwenaars 1993; Grosvernier et al. 1995; Boudreau & Rochefort 1999; Robert et al. 1999; Soro et al. 1999; Tuittila et al. 2000) suggèrent que les tourradons de linaigrette génèrent, dans les tourbières abandonnées après exploitation, des conditions microclimatiques d'ombre, de température et d'humidité qui pourraient faciliter l'établissement et la croissance des plantes typiques des tourbières, particulièrement les sphaignes. La présente étude a permis de déterminer, de façon quantitative, l'impact réel d'un couvert de linaigrette sur les conditions du milieu et de constater que, en effet, les linaigrettes créent des conditions favorables à l'établissement des sphaignes. Par exemple, Sagot & Rochefort (1996) ont montré que les sphaignes peuvent résister à la dessiccation et supporter des périodes de sécheresse prolongées lorsque les conditions de température et d'humidité relative se maintiennent respectivement autour de 20°C et de 60%. À Saint-Henri, pendant une période de sécheresse (fin août - début septembre 1999), l'humidité relative est descendue jusqu'à 43% près de la

surface de tourbe nue alors qu'elle s'est maintenue à plus de 65% sous un couvert de linaigrette. Aussi, les températures maximales de l'air à la surface de la tourbe sont demeurées inférieures à 29,5°C sous un couvert de linaigrette tandis qu'elles ont atteint 33,5°C près de la surface de tourbe nue. Un couvert dense de linaigrette constitue donc une protection efficace contre la dessiccation et une certaine protection contre les chaleurs extrêmes.

Un haut niveau de nappe phréatique est aussi considéré comme un facteur-clé dans le succès de régénération des tourbières abandonnées après exploitation (Money 1995; Rochefort et al. 1995; Campeau & Rochefort 1996; Lavoie & Rochefort 1996; Rochefort & Bastien 1998; Van Seters 1999; Girard 2000). Selon Schouwenaars (1995), le niveau de la nappe phréatique d'une tourbière doit être stable et ne pas s'abaisser à plus de 40 cm sous la surface du sol pour permettre l'établissement et la survie des sphaignes. À Saint-Henri, le niveau de la nappe phréatique a toujours été supérieur à ce seuil critique de 40 cm sous les quadrats recouverts de linaigrette et sous les quadrats de tourbe nue. Malgré cela, Buttler et al. (1998) ont montré que les conditions d'humidité qui prévalent sous les tourradons de linaigrette permettent aux sphaignes de croître même si le niveau de nappe phréatique est inférieur à 40 cm sous la surface du sol. De plus, le contenu volumique en eau de la tourbe et la tension de l'eau dans le sol seraient, dans les sites abandonnés après exploitation, de meilleurs prédicteurs de la présence des sphaignes que le niveau de la nappe phréatique (Price 1997). En effet, c'est à la surface du dépôt de tourbe résiduel que les sphaignes prélèveraient l'eau nécessaire à leur croissance (Sagot & Rochefort 1996); or, la couche de tourbe superficielle peut s'assécher malgré un niveau élevé de nappe phréatique (Ferland & Rochefort 1997). Une étude menée dans une tourbière abandonnée après exploitation a montré que les sphaignes ont de la difficulté à se régénérer sur une surface de tourbe dont le contenu volumique en eau (0-4 cm de profondeur) et la tension sont respectivement inférieurs à 50% et -100 cm (Whitehead 1999). La tension de l'eau dans le sol n'a pas été mesurée dans le cadre de la présente étude, mais le contenu volumique en eau (0-12 cm de profondeur) a toujours été supérieur à 82% sous un couvert de linaigrette alors qu'il est descendu jusqu'à 75% sous une surface de tourbe nue. On peut s'attendre à un effet plus important du couvert de linaigrette dans la couche de tourbe superficielle (0-4 cm de profondeur), car, de façon générale, la différence de contenu volumique en eau observée s'accroît avec la diminution de l'épaisseur

de la tranche de sol sur laquelle est effectuée la mesure (K. Marcoux, observations personnelles).

En somme, en favorisant un contenu volumique en eau de la tourbe plus élevé et en générant une plus grande humidité relative de l'air près de la surface du sol, le couvert de linaigrette accroît la disponibilité en eau dans la couche de tourbe superficielle et contribue ainsi à créer des conditions hydrologiques propices à l'établissement et à la croissance des sphaignes et des autres espèces typiques des tourbières. En outre, on peut s'attendre à ce que l'effet du couvert de linaigrette sur les conditions d'humidité de l'air près de la surface du sol et de contenu en eau de la tourbe soit accentué pendant une saison de croissance particulièrement sèche, comme nous l'avons observé au cours de la période de sécheresse de la fin de l'été 1999.

Même si le niveau de la nappe phréatique est moins critique pour la survie des sphaignes que le contenu volumique en eau et l'humidité de l'air à la surface de la tourbe, il serait néanmoins bénéfique, pour favoriser le retour d'un écosystème tourbeux fonctionnel, que le couvert de linaigrette puisse aussi contribuer à maintenir un niveau élevé de nappe phréatique. Les résultats obtenus à Saint-Henri suggèrent que, une fois bien établi, un couvert de linaigrette minimise les effets d'une période de sécheresse prolongée sur le niveau de la nappe phréatique. Ceci doit toutefois être interprété avec prudence. En effet, l'écart absolu entre le niveau de la nappe phréatique sous les quadrats avec linaigrette et sous les quadrats dénudés est très faible. À l'exception des journées les plus sèches où il se révèle légèrement plus important, cet écart correspond approximativement à la différence d'élévation relative mesurée entre les quadrats avec linaigrette et les quadrats dénudés. En outre, si le couvert de linaigrette avait un impact appréciable sur le niveau de la nappe phréatique, on pourrait s'attendre à ce qu'il y ait une baisse notable du niveau de la nappe phréatique lorsque la densité du couvert de linaigrette diminue de façon importante le long de la planche d'exploitation étudiée. Or, ce n'est pas ce que l'on observe sur cette planche lorsque, par exemple, à 120 m du premier puits d'observation, la densité du couvert de linaigrette chute de façon considérable. Par conséquent, l'effet du couvert de linaigrette sur le niveau de la nappe phréatique devrait faire l'objet d'études subséquentes. Les quadrats recouverts de linaigrette et les quadrats dénudés d'une même paire devraient se trouver au même niveau dans la pente. De

plus, les quadrats recouverts de linaigrette et les quadrats dénudés devraient être déterminés au hasard plutôt que de façon systématique.

Les résultats obtenus à Saint-Henri suggèrent qu'un couvert de linaigrette limite, à la surface du sol, les pertes d'eau par évaporation. L'albédo d'un couvert de linaigrette est probablement plus élevé que celui d'une surface noire de tourbe nue. L'absorption de la chaleur par le sol sous un couvert de linaigrette s'en trouve alors réduite, ce qui minimise les pertes d'eau par évaporation, et ce, même si les plantes perdent elles-mêmes de l'eau par le phénomène de l'évapotranspiration qui implique l'extraction d'une certaine quantité d'eau du sol par les racines. Matthey (1996) a obtenu des résultats similaires en mesurant, dans une tourbière abandonnée du Jura suisse, de plus faibles pertes en eau sous les tourradons de linaigrette (0,16 mL/h) qu'entre les tourradons (0,4 mL/h). Toutefois, d'autres études révèlent que l'établissement de certaines plantes vasculaires (graminées) dans les tourbières abandonnées augmente les pertes en eau du sol en raison d'une forte évapotranspiration pendant les périodes sèches et que cela contribue à abaisser le niveau de la nappe phréatique (Schouwenaars 1993, 1995; Groot 1998). Cette apparente contradiction semble s'expliquer par une question d'humidité du site. Lorsque le niveau d'humidité de la tourbe (nappe phréatique, contenu volumique en eau de la tourbe) est peu élevé, l'effet bénéfique du couvert végétal (réduction de la radiation solaire) sur l'évaporation à la surface du sol est annulé par la transpiration des plantes (Lafleur & Rouse 1988; Lafleur 1990; Whitehead 1999). À Saint-Henri, l'humidité du site n'aurait jamais atteint le bas niveau à partir duquel l'extraction de l'eau par les racines de linaigrette annule les bienfaits de nature hydrologique que le couvert de linaigrette peut procurer à la surface de la tourbe. Quoi qu'il en soit, des études d'envergure devraient être réalisées pour confirmer ou infirmer la tendance observée à Saint-Henri selon laquelle les pertes en eau par évaporation d'une surface de tourbe nue sont légèrement plus élevées (15%) que celles d'une surface tourbeuse couverte de linaigrette.

Il importe de noter qu'il est possible qu'un couvert dense de linaigrette intercepte entre 30 et 80% des précipitations. Il réduirait donc, comparativement à une surface tourbeuse dénudée, la quantité d'eau disponible à la surface du sol pour les sphaignes et celle alimentant la nappe phréatique. Cela serait particulièrement vrai lorsque les précipitations sont faibles puisque, une fois bien humide, un tourradon de linaigrette n'intercepte plus que de 30 à 40%

des précipitations reçues. Price et al. (1998) ont testé l'impact d'un couvert artificiel (paillis de paille) sur l'interception des précipitations, et la proportion des précipitations interceptées (44%) est comparable à celle que nous avons mesurée pour les tourradons humides (30-40%). Un couvert dense de linaigrette pourrait donc avoir un certain impact négatif sur la restauration des conditions hydrologiques présentes à l'origine. Cet impact semble toutefois assez faible. En effet, les tourradons de linaigrette permettent à la tourbe qui en est recouverte de maintenir un contenu volumique en eau significativement plus élevé que la tourbe dénudée. Cette relation est particulièrement évidente lorsque l'on compare la répartition spatiale des tourradons de linaigrette à celle du contenu volumique en eau de la tourbe pour l'ensemble de la planche d'exploitation étudiée. En somme, l'impact négatif de l'interception des précipitations semble largement compensé par l'effet protecteur du couvert de linaigrette.

À notre connaissance, la présente étude est la première à fournir des données quant à l'effet d'un couvert de linaigrette sur le soulèvement gélival. La présence massive de linaigrette constitue un épais couvert végétal qui a pour effet de stabiliser la surface tourbeuse en minimisant les perturbations du substrat associées au soulèvement des particules de sol qui font obstacle à l'établissement des plantes typiques des écosystèmes tourbeux (Salonen 1987). La linaigrette peut donc contribuer à la restauration des tourbières en stabilisant le sol.

Si les invasions de linaigrette permettent de créer un environnement où les conditions sont propices à l'établissement des sphaignes et des autres plantes des tourbières, pourquoi le site de Saint-Henri est-il si pauvre en espèces végétales? À Saint-Henri, seulement 18 espèces ont été recensées lors du relevé de végétation. De plus, aucune sphaigne n'a été échantillonnée, bien que de petites colonies de sphaignes aient été observées au cours des étés 1999 et 2000 sous les feuilles de linaigrette ou à proximité des tourradons (K. Marcoux, observations personnelles). Ce phénomène s'expliquerait par une question de temps. En effet, les résultats préliminaires d'un suivi récent de la succession de la végétation de cinq tourbières abandonnées après exploitation et envahies par la linaigrette suggèrent qu'il s'écoule un laps de temps d'une quinzaine d'années entre le début de l'invasion et un établissement notable des sphaignes (Lavoie et al. 2000). Les sphaignes s'installent d'abord sous les feuilles mortes des tourradons de linaigrette et ne prennent de l'expansion que lorsqu'un grand nombre de

tourradons meurent. Elles finissent par recouvrir les tourradons en cours de succession (Grosvernier et al. 1995; Robert et al. 1999). Les tourradons morts favoriseraient davantage le développement des sphaignes que les tourradons vivants: ils offriraient tous les effets bénéfiques de nature microclimatique et hydrologique que génèrent les tourradons vivants sans toutefois pomper l'eau et les éléments nutritifs du sol.

À Saint-Henri, le couvert de linaigrette aurait donc permis d'initier une succession végétale et de créer un micro-environnement favorable à l'implantation et à la croissance de certaines espèces typiques des tourbières. Toutefois, il faudra attendre encore quelques années, voire quelques décennies, avant que le couvert d'autres espèces de plantes vasculaires et invasculaires ne prenne de l'expansion.

4.2 Les invasions de linaigrette: une alternative pour la restauration des tourbières?

La linaigrette se révèle une excellente plante colonisatrice dans plusieurs milieux perturbés par les activités d'extraction de la tourbe. Bien que la régénération naturelle des sphaignes et des autres espèces typiques des écosystèmes tourbeux semble nécessiter passablement de temps, la linaigrette pourrait être utilisée comme plante compagne pour créer, de façon naturelle et à peu de frais, des conditions d'établissement propices pour les autres espèces de tourbières. En fait, outre le phénomène de l'interception des précipitations, il y a peu d'impacts négatifs associés à une invasion massive de linaigrette. Certains producteurs de tourbe craignent que la présence de linaigrette, à proximité de champs où l'extraction de la tourbe se poursuit, ne nuise à la qualité de la tourbe récoltée en raison de la dissémination dans les champs d'un grand nombre de graines (contamination potentielle). Or, jusqu'à preuve du contraire, la présence de champs de linaigrette ne semble pas avoir d'impact sur la qualité de la tourbe récoltée à proximité: l'acidité de la tourbe peut être facilement modifiée de façon à créer des conditions défavorables à la germination de la linaigrette (J.-Y. Daigle, comm. pers.). D'autre part, la présence massive de linaigrette pourrait favoriser la décomposition de la tourbe et, par conséquent, accroître les émissions de CO₂ et de CH₄, deux gaz à effet de serre (S. Glatzel, comm. pers.). Toutefois, il ne semble pas y avoir unanimité en la matière (voir Komulainen et al. 1998, 1999; Tuittila et al. 1999). Quoi qu'il en soit, les invasions de linaigrette semblent générer plus d'effets positifs que négatifs pour la restauration des tourbières (Tableau VI). Elles peuvent donc constituer une alternative viable très peu coûteuse aux autres techniques de restauration visant directement le retour d'un couvert végétal dominé par les sphaignes (Rochefort 2000).

Ainsi, tel que l'ont suggéré Lavoie et ses collaborateurs (Lavoie et al. 2000), les travaux de restauration devraient être minimaux dans les tourbières abandonnées après exploitation où la linaigrette s'installe massivement. Lorsque le couvert de linaigrette est négligeable, la mise en œuvre de certaines mesures relativement simples pourrait permettre d'obtenir plus rapidement un couvert de linaigrette plus important. Les résultats obtenus à Saint-Henri suggèrent que la restauration d'un haut niveau de nappe phréatique (>25 cm sous la surface du sol) favorise l'établissement d'un couvert de linaigrette très dense (90-100%). Bien que cette plante soit très tolérante à la sécheresse et capable de germer sous des

Tableau VI. Effets (positifs, négatifs, nuls, non déterminés avec certitude) des invasions de linaigrette sur la restauration des tourbières abandonnées après exploitation.

Variable	Effet			
	Positif	Négatif	Nul	Non déterminé avec certitude
Température près de la surface de tourbe	X			
Humidité relative près de la surface de tourbe	X			
Évaporation de l'eau contenue dans la tourbe	X			
Interception des précipitations		X		
Niveau de la nappe phréatique				X
Contenu volumique en eau de la tourbe	X			
Stabilité de la surface du sol	X			
Émissions de dioxyde de carbone (CO ₂)				X
Émissions de méthane (CH ₄)				X
Qualité de la tourbe récoltée à proximité			X	
Facilitation de l'établissement de la végétation	X			

conditions d'humidité moins favorables que celles requises par de nombreuses autres graminées (Wein & MacLean 1973), son développement est particulièrement favorisé par une saturation en eau de la couche de tourbe superficielle (Wein & MacLean 1973; Salonen 1990; Meade 1992). Les résultats de la présente étude laissent aussi croire qu'une épaisseur du dépôt de tourbe résiduel inférieure à un mètre pourrait favoriser la présence massive de la linaigrette. Il est possible que la proximité du sol minéral sous-jacent permette une plus grande accessibilité aux éléments nutritifs. Cependant, la capacité d'absorption des nutriments par cette plante serait, grâce à ses racines, sans limite de profondeur (Wein 1973) et elle semble bien adaptée à des sols à faible teneur en éléments nutritifs (Salonen 1994). Des mesures visant la saturation en eau de la tourbe, par exemple un simple blocage efficace des canaux de drainage, apparaissent donc susceptibles de favoriser le développement d'un couvert dense de linaigrette. En Finlande, le blocage des canaux de drainage combiné à la coupe des arbres dans une tourbière abandonnée après exploitation ont permis d'augmenter fortement la densité du couvert de linaigrette en l'espace d'une seule année (Komulainen et al. 1999).

5.0 Conclusion

À l'instar de la plupart des écosystèmes perturbés par les activités anthropiques telles que l'exploitation des ressources naturelles, l'agriculture et l'urbanisation (Orians 1986; Lodge 1993; Ruesink et al. 1995; Begon et al. 1996; Rejmànek 1996; Pimentel et al. 2000), de nombreuses tourbières abandonnées après exploitation sont envahies de façon massive par plusieurs espèces de plantes. Les invasions biologiques sont surtout connues pour leurs impacts négatifs sur les écosystèmes et leurs conséquences économiques considérables (Lodge 1993; Mack & D'Antonio 1998; Pimentel et al. 2000). Toutefois, elles peuvent, dans certains cas, contribuer à la restauration des écosystèmes perturbés. Cette étude a permis de montrer, de façon quantitative, l'impact positif des invasions de linaigrette sur la création d'un environnement plus propice à l'établissement des sphaignes et des autres espèces typiques des écosystèmes tourbeux. Un couvert de linaigrette améliore les conditions microclimatiques et hydrologiques du milieu et minimise les perturbations associées au soulèvement gélival, constituant ainsi une aide à la restauration des tourbières. En conséquence, les activités de restauration devraient être minimales lorsque la linaigrette s'installe de façon massive dans le milieu. Lorsque la linaigrette est absente du milieu ou peu présente, certaines mesures simples pourraient être mises en œuvre afin de favoriser ce processus de recolonisation massive et obtenir une densité de linaigrette qui permette de créer des conditions favorables à l'établissement des sphaignes et des autres espèces de tourbière. La recolonisation massive des sites abandonnés par la linaigrette constitue donc une alternative naturelle, peu coûteuse et, à long terme, prometteuse pour atteindre les objectifs visés par la restauration des tourbières. Un suivi à long terme des conditions biophysiques qui prévalent dans les écosystèmes perturbés est à la base d'une meilleure compréhension des processus de régénération naturelle. Dans une perspective de gestion efficace et durable des ressources naturelles, les processus de régénération naturelle devraient être intégrés aux programmes de restauration des écosystèmes dégradés.

6.0 Références citées

- Anderson, L. E., H. A. Crum & W. R. Buck. 1990. List of the mosses of North America north of Mexico. *The Bryologist* **93**: 448-499.
- Baker, H. G. 1986. Patterns of plant invasion in North America. Pages 44-57 *in* Mooney, H. A. et J. A. Drake, éditeurs. *Ecology of biological invasions of North America and Hawaii*. Springer-Verlag, New-York.
- Begon, M., J. L. Harper & C. R. Townsend. 1996. *Ecology. Individuals, populations and communities*. Troisième édition. Blackwell Science, Oxford.
- Bérubé, M.-È. & C. Lavoie. 2000. The natural revegetation of a vacuum-mined peatland: eight years of monitoring. *Canadian Field-Naturalist* **114**: 279-286.
- Boudreau, S. & L. Rochefort. 1999. Établissement de sphaignes réintroduites sous diverses communautés végétales recolonisant les tourbières après l'exploitation. *Écologie* **30**: 53-62.
- Buttler, A., Ph. Grosvernier & Y. Matthey. 1998. Development of *Sphagnum fallax* diaspores on bare peat with implications for the restoration of cut-over bogs. *Journal of Applied Ecology* **35**: 800-810.
- Campbell Scientific Inc. 1999. Hydrosense instruction manual. Version révisée, mai 1999. Campbell Scientific Canada, Edmonton.
- Campeau, S. & L. Rochefort. 1996. *Sphagnum* regeneration on bare peat surfaces: field and greenhouse experiments. *Journal of Applied Ecology* **33**: 599-608.
- Chapin, F. S. III, K. Van Cleve & M. C. Chapin. 1979. Soil temperature and nutrient cycling in the tussock growth form of *Eriophorum vaginatum*. *Journal of Ecology* **67**: 169-189.
- Curran, P. L. & F. S. MacNaeidhe. 1986. Weed invasion of milled-over bog. *Weed Research*. **26**: 45-50.
- Dionne, J.-C. 1977. La mer de Goldthwait au Québec. *Géographie physique et Quaternaire* **31**: 61-80.
- Environment Canada. 1993. Canadian climate normals, 1961-1990. Québec. Atmospheric Environment Service, Canadian Climate Program, Environment Canada, Ottawa.
- Ferland, C. & L. Rochefort. 1997. Restoration techniques for *Sphagnum*-dominated peatlands. *Canadian Journal of Botany* **75**: 1110-1118.
- Freund, R. J., R. C. Little & P. C. Spector. 1986. SAS system for linear models. SAS Institute Inc., Cary.

- Gartner, B. L., F. S. Chapin III & G. R. Shaver. 1986. Reproduction of *Eriophorum vaginatum* by seed in alaskan tussock tundra. *Journal of Ecology* **74**: 1-18.
- Girard, M. 2000. La régénération naturelle d'écosystèmes fortement perturbés: le cas d'une tourbière exploitée du Bas-Saint-Laurent (Québec). Mémoire M.A., Université Laval, Sainte-Foy.
- Groot, A. 1998. Physical effects of site disturbance on peatlands. *Canadian Journal of Soil Science* **78**: 45-50.
- Grosvernier, Ph., Y. Matthey & A. Buttler. 1995. Microclimate and physical properties of peat: new clues to the understanding of bog restoration processes. Pages 435-450 in Wheeler, B. D., S. C. Shaw, W. J. Fojt et R. A. Robertson, éditeurs. *Restoration of temperate wetlands*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Groupe de travail national sur les terres humides. 1988. *Terres humides du Canada*. Environnement Canada, Ottawa, et Polyscience Publications, Montréal.
- Heathwaite, L. 1995. Problems in the hydrological management of cut-over raised mires, with special reference to Thorne Moors, South Yorkshire. Pages 315-329 in Wheeler, B. D., S. C. Shaw, W. J. Fojt et R. A. Robertson, éditeurs. *Restoration of temperate wetlands*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Jonsson-Ninniss, S. & J. Middleton. 1991. Effect of peat extraction on the vegetation in Wainfleet Bog, Ontario. *Canadian Field-Naturalist* **105**: 505-511.
- Joosten, J. H. J. 1995. Time to regenerate: long-term perspectives of raised bog regeneration with special emphasis on palaeoecological studies. Pages 379-404 in Wheeler, B. D., S. C. Shaw, W. J. Fojt et R. A. Robertson, éditeurs. *Restoration of temperate wetlands*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Komulainen, V.-M., H. Nykänen, P. J. Martikainen & J. Laine. 1998. Short-term effect of restoration on vegetation change and methane emissions from peatlands drained for forestry in southern Finland. *Canadian Journal of Forest Research* **28**: 402-411.
- Komulainen, V.-M., E.-S. Tuittila, H. Vasander & J. Laine. 1999. Restoration of drained peatlands in southern Finland: initial effects on vegetation change and CO₂ balance. *Journal of Applied Ecology* **36**: 634-648.
- Kuhry, P. 1994. The role of fire in the development of *Sphagnum*-dominated peatlands in western boreal Canada. *Journal of Ecology* **82**: 899-910.
- Lafleur, P. M. 1990. Evapotranspiration from sedge-dominated wetland surfaces. *Aquatic Botany* **37**: 341-353.

- Lafleur, P. M. & W. R. Rouse. 1988. The influence of surface cover and climate on energy partitioning and evaporation in a subarctic wetland. *Boundary-Layer Meteorology* **44**: 327-347.
- LaRose, S., J. Price & L. Rochefort. 1997. Rewetting of a cutover peatland: hydrologic assessment. *Wetlands* **17**: 416-423.
- Lavoie, C., P. Grosvernier, M. Girard & K. Marcoux. 2000. Peatland restoration: are natural processes useless? Soumis à *Wetlands Ecology and Management*.
- Lavoie, C. & L. Rochefort. 1996. The natural revegetation of a harvested peatland in southern Québec: a spatial and dendroecological analysis. *Écoscience* **3**: 101-111.
- Lavoie, C. & A. Saint-Louis. 1999. The spread of gray birch (*Betula populifolia*) in eastern Quebec: landscape and historical considerations. *Canadian Journal of Botany* **77**: 859-868.
- Little, R. C., G. A. Milliken, W. W. Stroup & R. D. Wolfinger. SAS system for mixed models. SAS Institute Inc., Cary.
- Lodge, D. M. 1993. Biological invasions: lessons for ecology. *Trends in Ecology and Evolution* **8**: 133-137.
- Mack, M. C. & C. M. D'Antonio. 1998. Impacts of biological invasions on disturbance regimes. *Trends in Ecology and Evolution* **5**: 195-198.
- Matthey, Y. 1996. Conditions écologiques de la régénération spontanée du *Sphagnion magellanicum* dans le Jura suisse. Typologie, pédologie, hydrodynamique et micrométéorologie. Thèse Ph.D., Université de Neuchâtel, Neuchâtel.
- Meade, R. 1992. Some early changes following the rewetting of a vegetated cutover peatland surface at Danes Moss, Cheshire, UK, and their relevance to conservation management. *Biological Conservation* **61**: 31-40.
- Money, R. P. 1995. Re-establishment of a *Sphagnum*-dominated flora on cut-over lowland raised bogs. Pages 405-422 in Wheeler, B. D., S. C. Shaw, W. J. Fojt et R. A. Robertson, éditeurs. *Restoration of temperate wetlands*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Occhiotti, S. 1989. Géologie quaternaire de la sous-région de la vallée du Saint-Laurent et des Appalaches. Pages 374-417 in R. J. Fulton, directeur. *Le Quaternaire du Canada et du Groenland*. Commission géologique du Canada, Ottawa.
- Orians, G. H. 1986. Site characteristics favoring invasions. Pages 133-148 in Mooney, H. A. et J. A. Drake, éditeurs. *Ecology of biological invasions of North America and Hawaii*. Springer-Verlag, New-York.

- Paquet, J. M., J. Caron & O. Banton. 1993. In situ determination of the water desorption characteristics of peat substrates. *Canadian Journal of Soil Science* **73**: 329-339.
- Pimentel, D., L. Lach, R. Zuniga & D. Morrison. 2000. Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States. *BioScience* **50**: 53-65.
- Potter, E., J. Wood & C. Nicholl. 1996. SunScan Canopy Analysis System. User manual, version 1.05. Delta-T Devices Ltd, Cambridge.
- Price, J. S. 1996. Hydrology and microclimate of a partly restored cutover bog, Québec. *Hydrological Processes* **10**: 1263-1272.
- Price, J. 1997. Soil moisture, water tension, and water table relationships in a managed cutover bog. *Journal of Hydrology* **202**: 21-32.
- Price, J., L. Rochefort & F. Quinty. 1998. Energy and moisture considerations on cutover peatlands: surface microtopography, mulch cover and *Sphagnum* regeneration. *Ecological Engineering* **10**: 293-312.
- Quinty, F. & L. Rochefort. 1997. Plant reintroduction on a harvested peat bog. Pages 133-145 in Trettin, C. C., M. F. Jurgensen, D. F. Grigal, M. R. Gale et J. K. Jeglum, éditeurs. *Northern forested wetlands: ecology and management*. Lewis Publishers, New-York.
- Rejmánek, M. 1996. A theory of seed plant invasiveness: the first sketch. *Biological Conservation* **78**: 171-181.
- Robert, E. C., L. Rochefort & M. Garneau. 1999. Natural revegetation of two block-cut mined peatlands in eastern Canada. *Canadian Journal of Botany* **77**: 447-459.
- Rochefort, L. 2000. *Sphagnum*: a keystone genus in habitat restoration. *The Bryologist* **103**: 503-508.
- Rochefort, L. & D. Bastien. 1998. Réintroduction de sphaignes dans une tourbière exploitée: évaluation de divers moyens de protection contre la dessiccation. *Écoscience* **5**: 117-127.
- Rochefort, L., R. Gauthier & D. Lequéré. 1995. *Sphagnum* regeneration: toward an optimisation of bog restoration. Pages 423-434 in Wheeler, B.D., S.C. Shaw, W.J. Fojt et R.A. Robertson, éditeurs. *Restoration of temperate wetlands*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Rochefort, L., F. Quinty & S. Campeau. 1997. Restoration of peatland vegetation: the case of damaged or completely removed acrotelm. *International Peat Journal* **7**: 20-28.
- Ruesink, J. L., I. M. Parker, M. J. Groom & P. M. Kareiva. 1996. Reducing the risks of nonindigenous species introductions. *BioScience* **45**: 465-477.

- Sagot, C. & L. Rochefort. 1996. Tolérance des sphaignes à la dessiccation. *Cryptogamie, Bryologie, Lichénologie* **17**: 171-183.
- Salonen, V. 1987. Relationship between the seed rain and the establishment of vegetation in two areas abandoned after peat harvesting. *Holarctic Ecology* **10**: 171-174.
- Salonen, V. 1990. Early plant succession in two abandoned cut-over peatland areas. *Holarctic Ecology* **13**: 217-223.
- Salonen, V. 1992. Effects of artificial plant cover on plant colonization of a bare peat surface. *Journal of Vegetation Science* **3**: 109-112.
- Salonen, V. 1994. Revegetation of harvested peat surfaces in relation to substrate quality. *Journal of Vegetation Science* **5**: 403-408.
- Salonen, V., A. Penttinen & A. Särkkä. 1992. Plant colonization of a bare peat surface: population changes and spatial patterns. *Journal of Vegetation Science* **3**: 113-118.
- Salonen, V. & H. Setälä. 1992. Plant colonization of bare peat surface: relative importance of seed availability and soil. *Ecography* **15**: 199-204.
- SAS Institute Inc. 1989. SAS/Stat. user's guide, version 6. Quatrième édition. SAS Institute Inc., Cary.
- Scherrer, B. 1984. *Biostatistique*. Gaëtan Morin, Chicoutimi.
- Schouwenaars, J. M. 1993. Hydrological differences between bogs and bog-relicts and consequences for bog restoration. *Hydrobiologia* **265**: 217-224.
- Schouwenaars, J. M. 1995. The selection of internal and external water management options for bog restoration. Pages 331-346 *in* Wheeler, B. D., S. C. Shaw, W. J. Fojt et R. A. Robertson, éditeurs. *Restoration of temperate wetlands*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Scoggan, H. J. 1978-1979. *The flora of Canada*. National Museum of Natural Sciences, Ottawa.
- Smart, P. J., B. D. Wheeler & A. J. Willis. 1989. Revegetation of peat excavations in a derelict raised bog. *New Phytologist* **111**: 733-749.
- Sokal, R. S. & F. J. Rohlf. 1981. *Biometry*. Deuxième édition. W. H. Freeman, New-York.
- Soro, A., S. Sundberg & H. Rydin. 1999. Species diversity, niche metrics and species associations in harvested and undisturbed bogs. *Journal of Vegetation Science* **10** :549-560.
- Tuittila, E.-S. & V.-M. Komulainen. 1995. Vegetation and CO₂ balance in an abandoned harvested peatland in Aitoneva, southern Finland. *Suo* **46**: 69-80.

- Tuittila, E.-S., V.-M. Komulainen, H. Vasander & J. Laine. 1999. Restored cut-away peatland as a sink for atmospheric CO₂. *Oecologia* **120**: 563-574.
- Tuittila, E.-S., H. Rita, H. Vasander & J. Laine. 2000. Vegetation patterns around *Eriophorum vaginatum* L. tussocks in a cut-away peatland in southern Finland. *Canadian Journal of Botany* **78**: 47-58.
- Van Seters, T. 1999. Linking the past to the present: the hydrological impacts of peat harvesting and natural regeneration on an abandoned cut-over bog, Quebec. Mémoire M.E.S., University of Waterloo, Waterloo.
- Vermeij, G. J. 1996. An agenda for invasion biology. *Biological Conservation* **78**: 3-9.
- Wein, R. W. 1973. Biological flora of the British Isles: *Eriophorum vaginatum* L. *Journal of Ecology* **61**: 601-615.
- Wein, R. W. & D. A. MacLean. 1973. Cotton grass (*Eriophorum vaginatum*) germination requirements and colonizing potential in the Arctic. *Canadian Journal of Botany* **51**: 2509-2513.
- Whitehead, G. S. 1999. The hydrological processes influencing the natural recolonisation of *Sphagnum* in a cutover bog after 25 years of abandonment, Québec. Mémoire M.E.S., University of Waterloo, Waterloo.
- Wind-Mulder, H., L. Rochefort & D. H. Vitt. 1996. Water and peat chemistry comparisons of natural and post-harvested peatlands across Canada and their relevance to peatland restoration. *Ecological Engineering* **7**: 161-181.

Annexe A: Calibration

Une calibration suivant la méthode de Paquet et al. (1993) a été réalisée en laboratoire afin d'obtenir, pour les données de contenu volumique en eau de la tourbe relevées sur le terrain, un coefficient de calibration adapté au sol tourbeux du site de la tourbière de Saint-Henri et à chacune des sondes (longueur de 12 et 20 cm) utilisées avec l'appareil *Hydrosense*[®]. Pour les fins de cette calibration, un échantillon de tourbe (20 x 20 x 20 cm) a été prélevé, à partir de la surface du sol, dans chacun des huit quadrats. Afin d'éviter la compaction et la perturbation des couches lors du prélèvement et du transport, les échantillons ont été soigneusement retirés du sol et insérés dans des boîtes en bois constituées de quatre faces démontables et d'un fond en grillage résistant. Après avoir démonté les quatre faces des boîtes, les échantillons ont été sortis puis recouverts d'une pellicule plastique pour favoriser leur maintien. Les huit échantillons entourés de la pellicule plastique ont été saturés d'eau, du bas vers le haut, dans des grands bassins de plastique jusqu'à la moitié de leur hauteur pendant douze heures, puis entièrement pendant les douze heures suivantes. Les échantillons ont ensuite été retirés des bassins d'eau, déposés sur une surface plane pour essuyage (égouttement de l'eau contenue dans les échantillons), puis placés sur des tables de tension préalablement préparées. La surface des échantillons a été recouverte d'un sac de plastique afin de minimiser l'évaporation.

Le volume total des échantillons a été calculé avant leur mise en place sur les tables de tension et à un potentiel de tension de l'eau de -100 cm. La masse pondérale de l'eau de chacun des échantillons a été déterminée en les pesant, au moyen d'une balance, à des potentiels de tension de l'eau de -20, -50 et -100 cm ainsi qu'après séchage. Le contenu en eau empirique (fréquences en laboratoire) a été mesuré à l'aide de l'appareil *Hydrosense*[®] (sondes de 12 et de 20 cm) à saturation, à capacité en pot (après essuyage) et à des potentiels de tension de l'eau de -20, -50 et -100 cm. Lorsqu'un potentiel de tension de -100 cm fût atteint, les échantillons ont été morcelés puis chauffés dans une étuve à une température de 105°C pendant 24 heures afin d'obtenir la masse sèche des échantillons.

La teneur en eau volumique a été obtenue à l'aide de l'équation suivante:

$$(6) \theta_v = \theta_g \times (M_s/V_t)$$

où θ_v = contenu volumique en eau

θ_g = teneur en eau pondérale

M_s = masse sèche du sol (g)

V_t = volume total de sol (cm³)

Le contenu volumique en eau ainsi obtenu a été graphiquement mis en relation avec les fréquences obtenues en laboratoire à l'aide de l'appareil *Hydrosense*[®]. Une droite de régression a ensuite été tracée dans le nuage de points formé par les valeurs de teneur en eau volumique et les fréquences obtenues en laboratoire afin d'obtenir une équation de calibration de type $Y = aX + b$ (Figure 17). La valeur X de cette équation a été remplacée par les fréquences obtenues sur le terrain à l'aide de l'appareil *Hydrosense*[®] pour obtenir des valeurs de teneur en eau volumique de terrain calibrées (Y). Une équation de calibration a été déterminée pour chacun des échantillons et pour l'ensemble des échantillons. Un test d'homogénéité des pentes effectué à l'aide de la procédure GLM du progiciel SAS[®] (Freund et al. 1986) a permis de déterminer que les résultats obtenus en laboratoire ne différaient pas significativement d'un échantillon à l'autre et qu'une équation générale pour l'ensemble des points pouvait être utilisée pour les fins de la calibration. En l'occurrence, l'équation suivante permet de calibrer les données recueillies à l'aide de la sonde de 12 cm:

$$(7) Y = 1,1746X - 0,6334,$$

et l'équation suivante permet de calibrer les données obtenues à l'aide de la sonde de 20 cm:

$$(8) Y = 0,7905X - 0,0006.$$

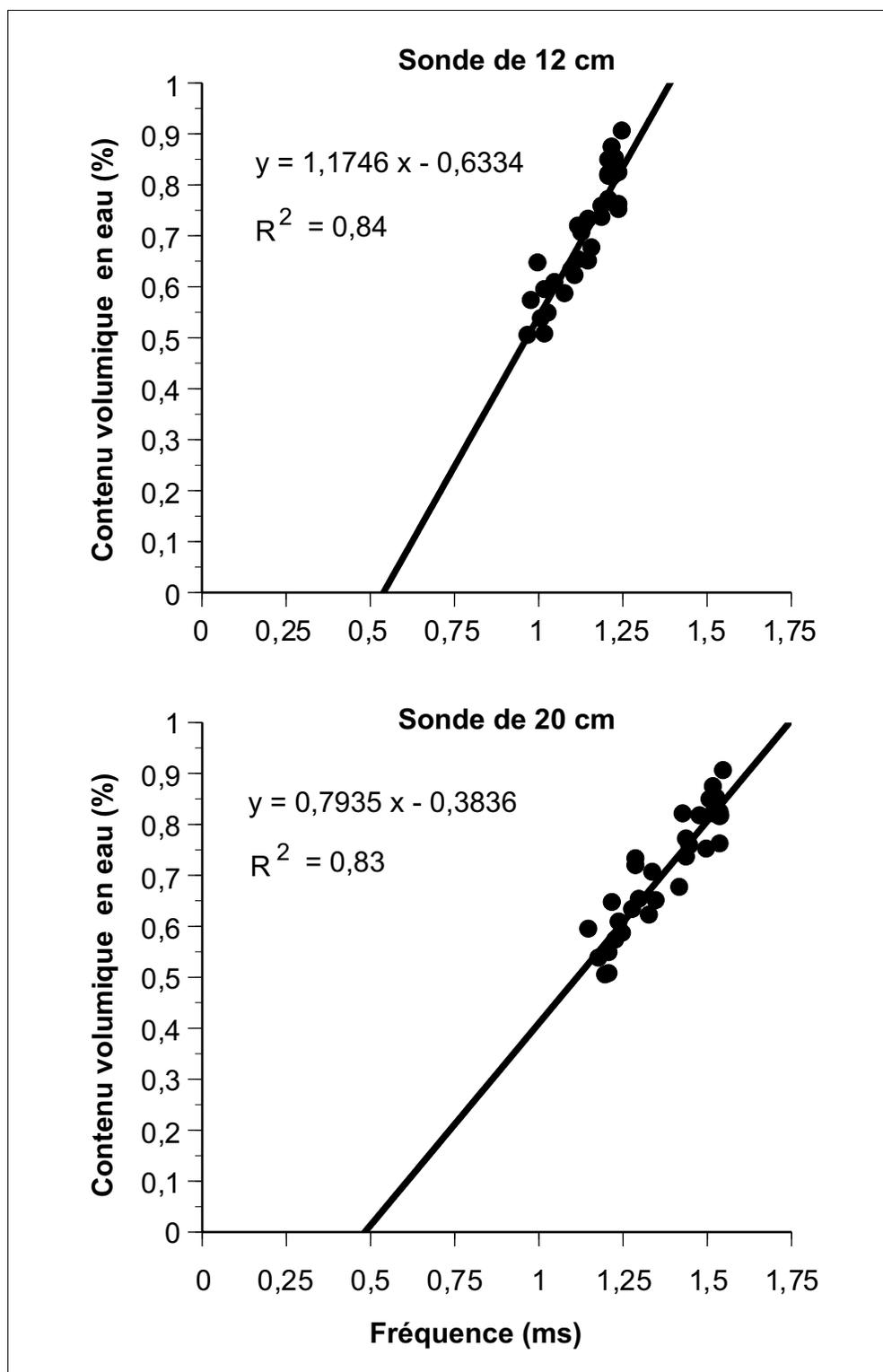


Figure 17. Représentation graphique de la droite de régression et du coefficient de détermination associés à l'équation permettant de calibrer, pour un sol tourbeux, les données recueillies à l'aide de la sonde de 12 cm et de la sonde de 20 cm de l'appareil *Hydrosense* .