

STÉPHANIE BOUDREAU

**RESTAURATION DE TOURBIÈRES EXPLOITÉES, ABANDONNÉES ET
RECOLONISÉES PAR DIVERSES COMMUNAUTÉS VÉGÉTALES.**

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

Département de phytologie
Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation
UNIVERSITÉ LAVAL

JUIN 1999

RÉSUMÉ

Une étude a débuté en mai 1996 afin de vérifier si la présence de plantes pionnières favorise l'établissement des sphaignes en créant des conditions plus propices pour celles-ci. Trois expériences ont été initiées sur des sites abandonnés après l'exploitation et recolonisés par différentes communautés végétales: 1- des éricacées, 2- des linaigrettes denses (*Eriophorum spissum* Fern.) et 3- des linaigrettes à feuilles étroites (*E. angustifolium* Honck.). Dans chacune de ces expériences, deux types de matériel végétal ont été réintroduits afin de comparer leur efficacité relative au niveau de l'établissement de la végétation. Il s'agit de sphaignes récoltées à la main ou de toute la végétation de surface d'une tourbière naturelle récoltée à l'aide de machinerie. Enfin, l'ajout d'un paillis comme protection complémentaire pour les diaspores réintroduites a été testé. Afin de mieux comprendre les interactions possibles entre les espèces pionnières et les sphaignes, deux autres expériences impliquant différentes densités de couvert végétal ont aussi été élaborées. Des sphaignes ont été réintroduites, combinées à l'ajout d'un paillis, sur des parcelles représentant différentes densités de couvert d'éricacées ou de linaigrettes denses. Les propriétés du substrat et le microclimat à l'interface air-tourbe ont été caractérisés en fonction des communautés végétales présentes et de leur densité de couvert. Des mesures ont aussi été prises pour évaluer le succès d'établissement des sphaignes et des autres plantes des tourbières en fonction des différents facteurs étudiés.

Dans les trois communautés végétales, le matériel végétal récolté manuellement a un meilleur potentiel de régénération pour l'établissement des sphaignes que celui récolté mécaniquement. L'ajout d'un paillis a un effet positif sur l'établissement des sphaignes, mais seulement dans les communautés dominées par les éricacées. Les trois communautés végétales présentent des différences au niveau des propriétés de leur substrat et des conditions microclimatiques à la surface du sol, ce qui influence l'établissement des sphaignes. En effet, plus de sphaignes réussissent à s'établir dans les communautés dominées par les linaigrettes, où le substrat est plus humide et le microclimat plus favorable, que dans les communautés d'éricacées. Par contre, l'effet des densités de couvert des espèces pionnières sur l'établissement des sphaignes n'a pu être démontré clairement, en raison de la création de biais non prévus lors de la mise en place du dispositif expérimental. Enfin, même si des conditions microclimatiques favorables sont présentes sous les couverts des deux espèces de linaigrettes, la présente étude ne permet pas de dissocier l'influence des plantes de celle de leur environnement. Nous croyons cependant que, pour la restauration des tourbières abandonnées après l'exploitation, l'utilisation de plantes pionnières reste une avenue intéressante à explorer et peut représenter une alternative au paillis.

REMERCIEMENTS

Ce projet de maîtrise a été réalisé grâce à des bourses d'études qui m'ont été octroyées par le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie (CRSNG) et par Le Groupe Roche ltée, en association avec le Ministère de l'Environnement du Québec. Le projet de recherche a été financé par des subventions de recherche octroyées au Dr Line Rochefort par le CRSNG (# OGP 0138097) et par le FCAR-NC (#97-NC-1697).

En tout premier lieu, je remercie sincèrement ma directrice, Dr Line Rochefort, pour avoir si bien su diriger mon travail durant ces dernières années. Elle a su transmettre sa passion des tourbières, son enthousiasme débordant et sa détermination légendaire. Sa confiance, son support et ses connaissances m'ont été d'un grand secours et ont vraiment guidé mon cheminement. Je lui suis aussi extrêmement reconnaissante pour toutes les belles opportunités qu'elle m'a offerte, dont celles de participer à des congrès internationaux, où j'ai pu puiser une motivation nouvelle et faire la connaissance de gens remarquables, tous passionnés des tourbières.

Un remerciement spécial va aux membres du Groupe de recherche en écologie des tourbières (GRET), particulièrement à François Quinty et Suzanne Campeau, pour leurs judicieux conseils, leur appui et leur amitié. Je remercie aussi Annie Maloney qui a été une assistante formidable lors de la mise en place des expériences et toutes les autres personnes qui m'ont assistée sur le terrain: Sophie Pouliot, Sylvie LaRose, Julie Plamondon et Diane Leclerc.

Mes remerciements s'adressent également à Tourbières Premier ltée, pour l'accès aux sites, et à Dominique Lequéré, pour le support technique. Leur implication et leur intérêt dans mon projet ont été très appréciés. Je remercie également M. Dubé, contremaître à Président-Ouest à l'époque, pour son accueil chaleureux empreint de curiosité et son amour de la nature.

Finalement, il m'aurait été impossible de relever ce défi sans le soutien et la patience de mon conjoint Benoît qui fut très présent auprès des enfants lors de mes absences. Merci, Florence et Jérémie, pour vos sourires et votre joie de vivre. Vous êtes une source inépuisable de motivation pour moi! Merci enfin à ma mère et à mon père qui n'a malheureusement pas pu connaître l'issue de ces études. Sa confiance et sa fierté sont plus que jamais présentes à ma mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	xi
CHAPITRE 1 - INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.0 INTRODUCTION	1
1.1 ÉCOLOGIE DES TOURBIÈRES.....	2
1.1.1 Définition des tourbières	2
1.1.2 Développement des tourbières ombrotrophes.....	3
1.1.3 Structures et fonctions des tourbières ombrotrophes	3
1.2 L'EXPLOITATION DES TOURBIÈRES DOMINÉES PAR LES SPHAIGNES.....	5
1.2.1 Utilisation et méthodes d'extraction de la tourbe de sphaignes.....	5
1.2.2 Impacts écologiques de l'exploitation.....	6
1.3 ÉTAT DE LA SUCCESSION SECONDAIRE DES TOURBIÈRES ABANDONNÉES APRÈS EXPLOITATION PAR ASPIRATION	7
1.3.1 Recolonisation végétale.....	7
1.3.2 Régénération naturelle.....	8
1.4 RESTAURATION DES TOURBIÈRES ABANDONNÉES APRÈS EXPLOITATION PAR ASPIRATION.....	9
1.4.1 Buts de la restauration.....	9
1.4.2 Restauration hydrologique.....	11
1.4.3 Réintroduction des sphaignes.....	11
1.4.4 Conditions optimisant l'établissement des sphaignes.....	13
1.4.5 Interactions entre plantes vasculaires et sphaignes.....	14

1.5 OBJECTIFS DE RECHERCHE	15
CHAPITRE 2 - MÉTHODOLOGIE	17
2.1 SITES EXPÉRIMENTAUX.....	17
2.1.1 Site de Verbois	17
2.1.2 Site de Président-Ouest.....	18
2.2 RÉINTRODUCTION DE SPHAIGNES RÉCOLTÉES SELON DEUX MÉTHODES ET AJOUT D'UN PAILLIS DANS DES COMMUNAUTÉS VÉGÉTALES DOMINÉES PAR DIFFÉRENTES PLANTES PIONNIÈRES.....	21
2.2.1 Récolte et réintroduction des diaspores.....	21
2.2.2 Ajout de paillis.....	22
2.3 RÉINTRODUCTION DE SPHAIGNES SOUS DIFFÉRENTES DENSITÉS DE COUVERT DE PLANTES PIONNIÈRES.....	22
2.3.1 Description des densités de couvert d'éricacées.....	23
2.3.2 Description des densités de couvert d' <i>Eriophorum spissum</i>	23
2.3.3 Récolte et réintroduction des diaspores.....	24
2.4 PARAMÈTRES MESURÉS.....	24
2.4.1. Propriétés des substrats	24
a) Profondeur de la nappe phréatique.....	24
b) Teneur en eau volumique de la tourbe.....	25
c) Tension de l'eau du sol.....	25
d) Analyses chimiques des substrats.....	26
2.4.2 Conditions microclimatiques.....	26
a) Température à la surface du sol.....	27
b) Humidité relative à la surface du sol.....	27
c) Luminosité à la surface du sol	27
2.4.3 Analyses chimiques de la paille.....	28
2.4.4 Évaluation du couvert végétal initial	29
2.4.5 Évaluation de l'établissement de la végétation.....	29
2.5 ANALYSES STATISTIQUES.....	30

CHAPITRE 3 - RÉSULTATS	34
3.1 EFFET DU TYPE DE MATÉRIEL VÉGÉTAL RÉINTRODUIT ET DE L'AJOUT D'UN PAILLIS DANS DES COMMUNAUTÉS VÉGÉTALES DOMINÉES PAR DIFFÉRENTES PLANTES PIONNIÈRES	34
3.1.1 Caractérisation et comparaison des trois communautés végétales étudiées.....	34
3.1.1.1 Description du couvert végétal initial dans les trois communautés végétales.....	34
3.1.1.2 Propriétés du substrat dans les différentes communautés végétales....	35
a) Profondeur de la nappe phréatique	35
b) Teneur en eau volumique de la tourbe	36
c) Tension de l'eau du sol	36
d) Propriétés chimiques des substrats.....	36
3.1.1.3 Microclimat dans les différentes communautés végétales.....	39
a) Température à la surface du sol.....	39
b) Humidité relative à la surface du sol	39
c) Luminosité à la surface du sol.....	39
3.1.1.4 Succès d'établissement des sphaignes selon les différentes communautés végétales.....	41
3.1.2 Effet du type de matériel végétal réintroduit sur l'établissement de la végétation	42
3.1.2.1 Sous le couvert d'éricacées.....	42
3.1.2.2 Sous le couvert d' <i>Eriophorum spissum</i>	43
3.1.2.3 Sous le couvert d' <i>E. angustifolium</i>	46
3.1.3 Effet d'un paillis additionnel dans les différentes communautés végétales.....	49
3.1.3.1 Effet d'un paillis sur l'établissement de la végétation	49
a) Sous le couvert d'éricacées.....	49
b) Sous le couvert d' <i>Eriophorum spissum</i>	49
c) Sous le couvert d' <i>E. angustifolium</i>	50
3.1.3.2. Effet d'un paillis sur les propriétés du substrat	51
3.1.3.3 Effet d'un paillis sur le microclimat	51
a) Température à la surface du sol.....	51

b) Humidité relative à la surface du sol	53
c) Luminosité à la surface du sol.....	53
3.1.3.4. Éléments nutritifs libérés par le paillis.....	53
3.2 EFFET DES DENSITÉS DES PLANTES PIONNIÈRES.....	56
3.2.1 Caractérisation et comparaison des densités d'éricacées étudiées	56
3.2.1.1 Description des densités d'éricacées et de leur évolution	56
3.2.1.2 Propriétés du substrat selon les densités d'éricacées.....	58
a) Profondeur de la nappe phréatique	58
b) Teneur en eau volumique de la tourbe	58
c) Tension de l'eau du sol	58
3.2.1.3 Microclimat selon les densités d'éricacées.....	60
a) Température à la surface du sol.....	60
b) Humidité relative à la surface du sol	60
c) Luminosité à la surface du sol.....	60
3.2.2 Effet des densités d'éricacées sur l'établissement de la végétation.....	62
3.2.3 Caractérisation et comparaison des densités d' <i>Eriophorum spissum</i> étudiées....	64
3.2.3.1 Description des densités d' <i>E. spissum</i> et de leur évolution.....	64
3.2.3.2 Propriétés du substrat selon les densités d' <i>E. spissum</i>	65
a) Profondeur de la nappe phréatique	65
b) Teneur en eau volumique de la tourbe	65
c) Tension de l'eau du sol	66
3.2.3.3 Microclimat selon les densités d' <i>E. spissum</i>	66
a) Température à la surface du sol.....	66
b) Humidité relative à la surface du sol	67
c) Luminosité à la surface du sol.....	67
3.2.4. Effet de la densité de couvert d' <i>Eriophorum spissum</i> sur l'établissement de la végétation.....	69
CHAPITRE 4 - DISCUSSION.....	71
4.1 GESTION DU MATÉRIEL VÉGÉTAL DE RÉINTRODUCTION	71

4.2 LA PAILLE, FACULTATIVE OU ESSENTIELLE LORSQU'UN COUVERT VÉGÉTAL EST PRÉSENT ?.....	73
4.3 LES PLANTES PIONNIÈRES FAVORISENT-ELLES L'ÉTABLISSEMENT DES SPHAIGNES?.....	74
4.4 LES PLANTES PIONNIÈRES MODIFIENT-ELLES LE MILIEU OÙ ELLES POUSSENT?.....	76
4.5 APPLICATIONS EN RESTAURATION.....	81
4.5.1 Éricacées	81
4.5.2 <i>Eriophorum spissum</i>	82
4.5.2 <i>Eriophorum angustifolium</i>	82
CHAPITRE 5 - CONCLUSION	84
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 - Coefficients des contrastes simples et d'interactions utilisés pour les analyses statistiques de l'effet du type de matériel végétal réintroduit et du paillis sur l'établissement de la végétation.....	32
Tableau 2.2 - Facteurs analysés dans les analyses de variances portant sur l'établissement de la végétation et transformations opérées sur les variables dépendantes afin de réduire l'hétérogénéité des variances	33
Tableau 3.1 - Couverture de la végétation initiale dans les trois communautés végétales dominées par différentes espèces pionnières (moyenne, (erreur-type)).....	35
Tableau 3.2 - Propriétés chimiques des substrats tourbeux en fonction des communautés végétales présentes, prélevés en mai 1996.	38
Tableau 3.3 - Valeurs de F obtenues lors de l'analyse de variance à trois facteurs et des contrastes décrivant l'effet du type de matériel végétal réintroduit (récolté manuellement (man), récolté mécaniquement (méc) et aucune réintroduction (tém)), de la paille (avec ou sans) et de l'année de mesure (1996 et 1997) sur l'établissement de la végétation, et ce, dans la communauté d'éricacées.....	44
Tableau 3.4 - Valeurs de F obtenues lors de l'analyse de variance à trois facteurs et des contrastes décrivant l'effet du type de matériel végétal réintroduit (récolté manuellement (man), récolté mécaniquement (méc) et aucune réintroduction (tém)), de la paille (avec ou sans) et de l'année de mesure (1996 et 1997) sur l'établissement de la végétation, et ce, dans la communauté d' <i>Eriophorum spissum</i>	45
Tableau 3.5 - Valeurs de F obtenues lors de l'analyse de variance à trois facteurs et des contrastes décrivant l'effet du type de matériel végétal réintroduit (récolté manuellement (man), récolté mécaniquement (méc) et aucune réintroduction (tém)), de la paille (avec ou sans) et de l'année de mesure (1996 et 1997) sur l'établissement de la végétation, et ce, dans la communauté d' <i>Eriophorum angustifolium</i>	47

Tableau 3.6 - Teneur en eau volumique de la tourbe (%) en fonction de la présence d'un paillis, et ce, dans les trois communautés végétales dominées par différentes espèces pionnières.....	51
Tableau 3.7 - Propriétés chimiques des tissus végétaux de la paille, prélevée sur le terrain à différentes dates au cours de l'été 1996 (quantité moyenne de chaque élément présent dans la paille et pourcentage qui a été lessivé)	55
Tableau 3.8 - Propriétés chimiques de filtrats de paille, obtenus après une heure de macération de la paille dans l'eau.....	55
Tableau 3.9 - Couverture de la végétation initiale dans les deux catégories de densité d'éricacées (moyenne, (erreur-type))	57
Tableau 3.10 - Valeurs de F obtenues lors de l'analyse de variance à deux facteurs décrivant l'effet de la densité d'éricacées (D1 et D2) et de l'année de mesure (1996 et 1997) sur l'établissement de la végétation	57
Tableau 3.11 - Valeurs de F obtenues lors de l'analyse de variance à deux facteurs et des contrastes décrivant l'effet de la densité d' <i>Eriophorum spissum</i> (D1, D2 et D3) et de l'année de mesure (1996 et 1997) sur l'établissement de la végétation (valeurs de F)	64
Tableau 4.1 - Résumé de l'influence de différents milieux (différentes espèces pionnières et densités de couvert) sur l'établissement de la végétation réintroduite (à partir de matériel végétal récolté manuellement), sur le microclimat généré à l'interface air-tourbe et sur les propriétés des substrats sous-jacents.....	75

LISTE DES FIGURES

- Figure 2.1 - Communauté végétale dominée par les éricacées, recolonisant le site de Verbois (mai 1996).. 19
- Figure 2.2 - Communauté végétale dominée par *Eriophorum spissum* Fern., recolonisant en partie le site de Président-Ouest. On peut voir une bande d'éricacées bordant un ancien canal de drainage maintenant comblé, de même que la bordure non-exploitée située à l'ouest du site (novembre 1996).. 20
- Figure 2.3 - Communauté végétale dominée par *E. angustifolium* Honck., recolonisant en partie le site de Président-Ouest. On aperçoit cinq des six parcelles constituant un bloc expérimental. Les herbacées présentent une couleur plus verte à l'intérieur des parcelles en raison de la coupe des plantes effectuée une semaine plus tôt (juin 1996). 20
- Figure 3.1 - Propriétés du substrat dans des communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières, à l'été 1996. a) Profondeur de la nappe phréatique par rapport à la surface; b) Teneur en eau volumique de la tourbe; c) Tension de l'eau du sol à la surface. 37
- Figure 3.2 - Microclimat à la surface du sol dans des communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières. a) et b) Courbes cumulatives illustrant le pourcentage de temps où les températures maximales journalières et les humidités relatives minimales journalières excèdent les valeurs exprimées en ordonnée, pour la période allant du 14 juin au 17 septembre 1996. c) Luminosité sous les différents couverts végétaux (moyenne \pm erreur-type) le 4 septembre 1996..... 40
- Figure 3.3 - Comparaison de l'établissement des sphaignes, réintroduites à partir d'un matériel végétal récolté manuellement, dans des communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières, et ce, après une et deux saisons de croissance (moyennes sans paille \pm erreur-type)..... 41

- Figure 3.4 - Effet du type de matériel végétal réintroduit sur l'établissement de la végétation après une et deux saisons de croissance dans des communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières..... 48
- Figure 3.5 - Effet de l'ajout d'un paillis sur l'établissement de la végétation après une et deux saisons de croissance dans des communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières..... 50
- Figure 3.6 - Effet de la paille sur la température à la surface du sol dans des communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières. Les courbes cumulatives illustrent le pourcentage de temps où les températures (maximales et minimales journalières) excèdent les valeurs exprimées en ordonnée, et ce, pour la période allant du 14 juin au 17 septembre 1996..... 52
- Figure 3.7 - Effet de la paille sur la luminosité (rayons photosynthétiquement actifs (RPA)) dans la communauté végétale dominées par les éricacées, mesurée le 4 septembre 1996..... 53
- Figure 3.8 - Couvert d'éricacées et son évolution selon les deux catégories de densité naturelle sélectionnées dans cette communautés..... 58
- Figure 3.9 - Propriétés du substrat sous les deux densités d'éricacées, à l'été 1996. a) Profondeur de la nappe phréatique par rapport à la surface; b) Teneur en eau volumique de la tourbe; c) Tension de l'eau du sol à la surface. 59
- Figure 3.10 - Microclimat à la surface du sol sous les deux densités d'éricacées, combiné avec un paillis. a) et b) Courbes cumulatives illustrant le pourcentage de temps où les températures maximales journalières ET les humidités relatives minimales journalières excèdent les valeurs exprimées en ordonnée, pour la période allant du 14 juin au 17 septembre. c) Luminosité sous les différents couverts végétaux le 4 septembre 1996..... 61
- Figure 3.11 - Effet de la densité d'éricacées sur l'établissement de sphaignes réintroduites et protégées d'un paillis, après une et deux saisons de croissance..... 62

- Figure 3.12 - Couvert d'*Eriophorum spissum* et son évolution selon les trois catégories de densité. Les densités D1 et D2 ont été créées au printemps 1996 en laissant sur place un certain nombre de touradons (D1 = 5 touradons et D2 = 15 touradons) et en enlevant les autres. La densité D3 est celle que l'on retrouve à l'état naturel sur le site de Président-Ouest..... 65
- Figure 3.13 - Teneur en eau volumique de la tourbe sous différentes densités d'*Eriophorum spissum*, à l'été 1996..... 66
- Figure 3.14 - Microclimat à la surface du sol sous différentes densités d'*Eriophorum spissum*, combiné avec un paillis. a) et b) Courbes cumulatives illustrant le pourcentage de temps où les températures maximales journalières ou les humidités relatives minimales journalières excèdent les valeurs exprimées en ordonnée, pour la période allant du 14 juin au 17 septembre 1996. c) Luminosité sous les différents couverts végétaux le 4 septembre 1996. 68
- Figure 3.15 - Effet des densités d'*Eriophorum spissum* créées artificiellement sur l'établissement de sphaignes réintroduites et protégées d'un paillis, après une et deux saisons de croissance..... 69

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.0 INTRODUCTION

La restauration écologique est une science qui vise à réparer les dommages causés par l'humain à la diversité et à la dynamique des écosystèmes naturels, et qui contribue, en contrepartie, à améliorer nos connaissances fondamentales sur le fonctionnement des écosystèmes en question (Bradshaw, 1987; Jackson *et al.*, 1995). Les perturbations des milieux naturels causées par l'homme remontent à des temps immémoriaux. Cependant, le concept de restauration écologique des écosystèmes perturbés est relativement récent et a pris forme dans les années 1940, aux États-Unis, par les efforts d'Aldo Leopold (Jordan III *et al.*, 1987). Il fut le premier à revégétaliser un site, dans ce cas-ci une prairie, dans le but précis de recréer le plus fidèlement possible les communautés d'origine tout en étudiant la dynamique de la succession végétale.

La restauration des tourbières ombrotrophes est un exemple de restauration écologique (Wheeler et Shaw, 1995). La recherche dans ce domaine a non seulement permis de développer des techniques pour restaurer, du moins partiellement, ces écosystèmes, mais a aussi permis d'approfondir nos connaissances de base sur l'écologie des tourbières. L'idée même de vouloir recréer un écosystème de tourbière fonctionnel représente un défi scientifique de taille qui demande une compréhension profonde des processus qui régissent le développement de ces milieux humides.

Les recherches sur la restauration des tourbières après l'exploitation se sont accrues au cours des dernières années, grâce à une meilleure compréhension de l'importance de ces milieux sur notre planète (e.g. puits pour le carbone, biodiversité), mais aussi suite à la dégradation et la perte de la ressource, plus marquée en Europe. En Amérique du Nord, même si la réserve de tourbières est immense dans la zone de la forêt coniférienne boréale, l'exploitation se concentre dans les tourbières méridionales du Canada et crée donc de fortes pressions dans certaines régions (Keys, 1992). À une échelle régionale ou même locale, la restauration devient impérative si l'on veut préserver ces milieux et les fonctions écosystémiques qui y sont rattachées. Au Canada, la recherche sur la restauration des tourbières a débuté dans les années 1990, grâce aux efforts conjoints des gouvernements, des industries de la tourbe et des scientifiques. Essentiellement, la méthode de restauration développée au Canada consiste, après une restauration hydrologique partielle, à réintroduire des fragments de sphaignes que l'on protège à l'aide d'un paillis durant la

phase d'établissement (Quinty et Rochefort, 1997a). La présente étude propose un moyen alternatif à ceux élaborés jusqu'à présent, basé sur les processus de succession végétale observés dans les tourbières abandonnées. On y utilise le concept d'espèces pionnières, qui, par leur présence, peuvent faciliter l'établissement d'espèces moins tolérantes en modifiant le microclimat et en conditionnant le substrat (Connell et Slatyer, 1977). Ainsi, cette étude poursuit l'objectif général de la restauration des tourbières, qui est de promouvoir un établissement rapide des sphaignes afin de favoriser le retour des structures et des fonctions d'un écosystème à nouveau accumulateur de tourbe.

Une bonne connaissance des caractéristiques des milieux avant et après l'exploitation est essentielle au développement de techniques de restauration. Dans les prochaines sections, nous aborderons donc brièvement l'écologie des tourbières à l'état naturel, l'impact de l'exploitation sur ces milieux humides et la dynamique de succession végétale dans les tourbières abandonnées après l'exploitation. Nous décrirons ensuite l'état d'avancement des travaux de restauration des tourbières et les objectifs spécifiques de cette étude.

1.1 ÉCOLOGIE DES TOURBIÈRES

1.1.1 Définition des tourbières

Les tourbières sont des terres humides caractérisées par l'accumulation de matière végétale peu décomposée et qui présentent une couche de tourbe d'au moins 40 cm d'épaisseur (Clymo, 1983; Zoltaï, 1988). Comme tous les milieux humides, les tourbières subissent l'effet de la présence de l'eau sur une période assez prolongée pour influencer la végétation et le substrat (Couillard et Grondin, 1986). Au Canada, près de 17 % du territoire est couvert par ces écosystèmes, soit plus que tout autre pays (Gorham, 1991).

Il existe deux grands types de tourbières, distingués selon des critères hydrologiques, topographiques, trophiques et floristiques : les tourbières ombrotrophes, ou bogs, et les tourbières minérotrophes, ou fens (Gorham et Janssens, 1992). Dans la présente étude, nous nous attarderons plus particulièrement aux tourbières accumulatrices de tourbe de sphaignes (incluant bogs et fens pauvres), puisque ce sont elles qui subissent, depuis les années 1970, une plus forte pression d'exploitation pour l'extraction de la tourbe. Ces tourbières dominées par les sphaignes sont alimentées presque exclusivement par les eaux de précipitations. Elles sont caractérisées par un approvisionnement en éléments minéraux et nutritifs très limité et par un pH de l'eau de surface très

acide (pH < 4,2). La végétation qui s'y trouve est bien adaptée physiologiquement aux faibles apports d'éléments minéraux et nutritifs (Small, 1972). Les sphaignes, principales responsables de l'accumulation de la tourbe, constituent le groupe végétal dominant. On y trouve aussi des éricacées arbustives (e.g. *Ledum groenlandicum* Reitzius, *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench.) et quelques cypéracées, mousses, lichens et espèces ligneuses conifériennes (principalement *Picea mariana* (Mill.) BSP. et *Larix laricina* (Du Roi) Koch.).

1.1.2 Développement des tourbières ombrotrophes

Pour être en mesure de restaurer les tourbières perturbées en écosystèmes à nouveau fonctionnels, il faut d'abord comprendre les processus qui régissent leur initiation et leur développement. Le climat, le relief et l'hydrologie sont les principaux facteurs (allogènes) qui agissent, indépendamment ou en synergie, sur l'initiation du développement des tourbières (Vitt et Kuhry, 1992). Ainsi, la formation des tourbières peut être amorcée par un climat frais et des précipitations excédant l'évapotranspiration ou par un mauvais drainage du sol. L'invasion progressive des sphaignes se fait par terrestration ou paludification. On parle de terrestration, ou processus d'entourbement, lorsque les sphaignes apparaissent dans des habitats aquatiques tels les lacs et les étangs (Tallis, 1983; Vitt et Kuhry, 1992). La paludification réfère au processus par lequel les colonies de sphaignes se développent dans des habitats terrestres à faible pente et mal drainés, ou encore à l'étalement vertical et latéral des colonies, suite à l'entourbement d'une dépression (Vitt et Kuhry, 1992).

L'accumulation de la tourbe entraîne progressivement l'isolement de l'écosystème des eaux de ruissellement avec pour conséquence un appauvrissement en éléments nutritifs et minéraux ainsi qu'une acidification du milieu. Les sphaignes sont bien adaptées à ces conditions et ont de surcroît la capacité d'acidifier davantage le milieu par leurs produits de décomposition et des processus d'échanges ioniques (Hemond, 1980; Andrus, 1986). Ces facteurs (conditions d'oligotrophie et d'acidité), combinés à une saturation en eau, ralentissent la décomposition des sphaignes et favorisent l'accumulation des dépôts tourbeux (Damman, 1986; Clymo, 1987, 1991). Ainsi, le développement et la croissance des tourbières sont contrôlés, en premier lieu, par des facteurs allogènes, mais ensuite par des facteurs autogènes (Glaser et Janssens, 1986).

1.1.3 Structures et fonctions des tourbières ombrotrophes

Un des buts de la restauration des tourbières poursuivi par l'industrie canadienne de la tourbe est d'assurer le retour des structures et des fonctions de l'écosystème non perturbé

(CSPMA, 1998a). L'acquisition des connaissances au cours des dernières décennies sur les fonctions des tourbières nous a permis de mieux cibler les rôles que les écosystèmes tourbeux peuvent jouer dans le paysage et de mieux définir leurs apports aux différents niveaux de biodiversité.

Au niveau de la structure, il existe plusieurs formes de bogs définies selon leur morphologie de surface, leur modelé et la proximité des étendues d'eau (Buteau *et al.*, 1994; Zoltaï, 1988). Ces différentes formes contribuent à la biodiversité régionale et globale à l'échelle du paysage. Les tourbières bombées (« raised bogs »), forme la plus fréquente en Amérique du Nord, présentent une topographie en forme de lentille et des dépôts tourbeux s'élevant à plusieurs mètres au-dessus de la nappe phréatique régionale (Clymo, 1987). La microtopographie typique d'une tourbière est formée de buttes, platières et dépressions, combinée ou non à la présence de mares. Les différentes espèces de sphaignes et la majorité des espèces végétales se distribuent de façon préférentielle selon ces microtopographies, où se trouvent divers gradients hydriques et trophiques (Couillard et Grondin, 1986; Clymo, 1987). Ces multiples microtopographies rencontrées à l'intérieur d'une même tourbière contribuent à la biodiversité floristique locale, mais ont aussi un impact sur la biodiversité faunique (par exemple aviaire; Calmé, 1998).

Les tourbières ombrotrophes sont aussi caractérisées par la structure diplohelmiqque du sol organique qui régit l'équilibre hydrique de l'écosystème. L'acrotelme est définie comme la couche supérieure possédant une conductivité hydraulique élevée et qui comprend les sphaignes vivantes de la surface jusqu'à la tourbe de sphaigne partiellement décomposée (Ingram, 1978). Le tapis de sphaignes est composé de nombreux pores et peut ainsi emmagasiner une très grande quantité d'eau. C'est dans cette zone que le niveau de la nappe phréatique fluctue. Le catotelme constitue la couche inférieure où la décomposition est fortement réduite et où la tourbe est peu perméable et saturée en eau en permanence (Ingram, 1978). La limite entre l'acrotelme et la catotelme est déterminée par le niveau minimal de la nappe phréatique et par l'endroit où s'effondre la macrostructure des sphaignes. Cette structure diplohelmiqque et les différents facteurs qui la caractérisent confèrent à l'écosystème tourbeux des fonctions hydrographiques importantes. Le pouvoir tampon des tourbières permet de régulariser à court terme les chutes importantes de pluie et retarde les sorties d'eau en période de sécheresse. De plus, les tourbières peuvent agir au niveau de la qualité de l'eau (filtration de divers éléments et métaux lourds naturels).

Un autre rôle très important des tourbières ombrotrophes se situe au niveau de leur apport au cycle du carbone. La tourbe accumulée dans ces écosystèmes constitue une immense réserve de carbone, estimé à près de 250 Gt mondialement (Clymo, 1997). Le drainage de ces surfaces (pour

l'exploitation de la tourbe ou autres) entraîne une remise en circulation du carbone oxydé (CO₂) dans l'environnement, ce qui augmenterait de façon significative l'effet de serre à court terme (Gorham, 1991; Clymo, 1997).

Comme mentionné précédemment, les tourbières jouent aussi un rôle dans la biodiversité floristique et faunique. Par rapport aux autres milieux humides de l'hémisphère nord, les tourbières comptent le plus grand nombre d'espèces rares ou endémiques (Bouchard *et al.*, 1983 dans Mead, 1990). On y trouve des plantes carnivores qui ont développé des mécanismes leur donnant accès à des nutriments non disponibles dans la tourbe. La tourbière représente aussi pour certaines espèces d'oiseaux (e.g. paruline à couronne rousse) des habitats nécessaires à la viabilité de leur population (Desrochers *et al.*, 1998).

Ainsi, plusieurs raisons justifient la mise en valeur des tourbières ombrotrophes. Des efforts accrus de conservation de milieux naturels et de restauration après exploitation sont d'ailleurs mis en œuvre au Canada pour maintenir les fonctions et les valeurs associées à ces milieux.

1.2 L'EXPLOITATION DES TOURBIÈRES DOMINÉES PAR LES SPHAIGNES

Suite à l'avancement des connaissances scientifiques et aux pressions exercées par l'opinion publique, l'industrie de la tourbe au Canada s'est engagé à faire une gestion durable de cette ressource. À cet égard, le Canada représente un exemple de remise en valeurs des tourbières mais également de concertation entre les responsables de la réglementation, les scientifiques et les utilisateurs des tourbières (Soppo, 1996). La présente étude se situe d'ailleurs dans ce contexte. C'est aussi pourquoi nous nous attardons à restaurer plus particulièrement les sites abandonnées après l'extraction de la tourbe par aspiration.

1.2.1 Utilisation et méthodes d'extraction de la tourbe de sphaignes

Depuis une quinzaine d'années, le Canada se place au rang des principaux pays producteurs de tourbe. La vente de tourbe génère plus de 180 millions de dollars annuellement et représente une activité économique importante pour plusieurs régions éloignées des grands centres urbains (Keys, 1992). La tourbe de sphaigne fibrique qu'on récolte dans les tourbières ombrotrophes est destinée principalement à des usages horticoles, tels les terreaux, ou pour des fins d'amendements organiques ou de compostage (CSPMA, 1998b). La tourbe fibrique est également de plus en plus

utilisée au Canada pour la fabrication de biofiltres. En Europe, on exploite aussi la tourbe plus décomposée (donc plus en profondeur) à des fins énergétiques ou pour la production de fibres textiles (Asplung, 1996; Pirtola, 1996).

L'exploitation de la tourbe nécessite le drainage préalable du site, la destruction de la végétation de surface et l'extraction partielle ou totale du dépôt tourbeux. Le drainage se fait par un réseau de canaux principaux et secondaires distribués perpendiculairement les uns par rapport aux autres et qui permettent l'écoulement de l'eau hors du site d'exploitation.

De 1930 à 1970, la récolte de tourbe se faisait par des moyens artisanaux. La tourbe était extraite à la main sous forme de blocs grâce à des bêches spéciales et ces blocs étaient disposés sur des terre-pleins adjacents pour le séchage et le transport. Les sites exploités par cette méthode et abandonnés aujourd'hui présentent une topographie particulière, constituée de tranchées de minage alternant avec des terre-pleins. La végétation étant souvent entassée sur les terre-pleins, il semble que cette ancienne méthode avait l'avantage de conserver « in situ » de bonnes sources de diaspores qui pouvaient éventuellement aider à la recolonisation végétale naturelle (Robert *et al.*, sous presse).

Depuis l'avènement de l'aspirateur à la fin des années 1960, la tourbe est maintenant récoltée par des aspirateurs géants motorisés ou actionnés par des tracteurs qui n'enlèvent, chaque année, qu'une mince couche de tourbe. L'exploitation du champ d'aspiration s'étend sur plusieurs années et cesse lorsque la tourbe ne possède plus les qualités requises pour satisfaire les exigences du marché (le marché horticole exige une tourbe fibrique, de H1 à H4 selon l'échelle von Post). Avant 1992, lorsque l'exploitation cessait, on abandonnait généralement les sites qui consistait alors en de vastes étendues planes et hostiles pour la végétation. S'étant dotée d'une politique environnementale, l'industrie canadienne contribue maintenant aux recherches sur la restauration de ces écosystèmes après l'exploitation.

1.2.2 Impacts écologiques de l'exploitation

L'exploitation des tourbières, particulièrement par la méthode d'aspiration, perturbe considérablement le milieu, tant au niveau des conditions hydrologiques et des propriétés physico-chimiques du substrat qu'au niveau de la flore et de la faune.

Un premier impact de l'exploitation est de modifier de façon majeure l'équilibre hydrique du site. Le drainage, la perte de l'acrotelme et l'extraction partielle ou totale du catotelme font en sorte que la nappe phréatique n'est pas maintenue aussi haute que dans les tourbières naturelles (i.e. à moins de 30 cm en général sous la surface) et l'amplitude de ses fluctuations y sont plus grande (Schouwenaars, 1993; Price, 1996). L'assèchement qui résulte entraîne une décomposition accrue et une compaction de la tourbe, de même que des phénomènes d'oxydation, de minéralisation et de libération d'éléments. Le substrat résiduel possède donc des propriétés physiques fort différentes de celles du substrat originel, causant des répercussions sur les fonctions hydrologiques de l'écosystème. Par contre, les tourbières abandonnées dans l'est du Canada, exploitées moins profondément que dans d'autres régions ou qu'en Europe, possèdent toujours des propriétés chimiques se situant dans l'échelle de définition des bogs ou des fens pauvres (Wind-Mulder *et al.*, 1996).

L'exploitation mécanisée des tourbières entraîne aussi la perte de la végétation et des habitats qui s'y rattachent, et ce, sur des superficies assez considérables (de l'ordre de 100 à 3000 ha). Le substrat résiduel est dépourvu de graines ou de rhizomes viables et la dissémination naturelle des diaspores des plantes de tourbière est rendue difficile par l'éloignement des zones non exploitées (Salonen, 1987; Salonen et Setälä, 1992). Cette situation a des conséquences sur la rapidité et l'orientation de la succession végétale dans les tourbières abandonnées, comme nous le verrons dans la section suivante.

1.3 ÉTAT DE LA SUCCESSION SECONDAIRE DES TOURBIÈRES ABANDONNÉES APRÈS EXPLOITATION PAR ASPIRATION

1.3.1 Recolonisation végétale

Comme il ne reste aucune diaspore viable dans la tourbe après l'exploitation, le point de départ du processus de succession est presque similaire à celui d'une succession primaire. Cependant, le sol tourbeux étant constitué uniquement de plantes partiellement décomposées, la succession est considérée comme un type de succession secondaire (Salonen, 1987). Plusieurs études en Europe et en Amérique du Nord décrivent la recolonisation végétale naturelle des tourbières abandonnées (Smart *et al.*, 1989; Jonssons-Ninniss et Middleton, 1991; Maas et Poschlod, 1991; Poschlod, 1992; Salonen, 1994; Money, 1995; Lavoie et Rochefort, 1996). La plupart des surfaces restent longtemps dénudées ou peuvent être recolonisées par des plantes vasculaires capables de disséminer des diaspores jusqu'aux sites résiduels et de soutenir les

conditions sévères du milieu (Salonen, 1987, 1994; Poschlod, 1995). Dans l'est du Canada, un inventaire exhaustif de la végétation a été mené dans les champs d'aspiration abandonnés dans les années 80 et 90. En général, la dynamique de revégétation y est très lente et les principales espèces colonisatrices sont les linaigrettes (*Eriophorum* ssp.), les bouleaux (*Betula* ssp.) et les éricacées (e.g. *Chamaedaphne calyculata* et *Kalmia angustifolia*) (Groupe de recherche en écologie des tourbières (GRET), données non publiées; voir aussi Lavoie et Rochefort, 1996). Dans ces cas, la succession naturelle ne se dirige pas vers un écosystème tourbeux fonctionnel, puisque la sphaigne, principal élément responsable de l'accumulation de tourbe, est absente.

1.3.2 Régénération naturelle

La régénération spontanée de la végétation des bogs prend place seulement dans certains cas. Diverses études basées sur l'interprétation des patrons actuels de recolonisation végétale et sur l'analyse des macrorestes végétaux ont tentés d'expliquer le succès de régénération d'un site par rapport à un autre. Des conditions d'humidité favorables, des propriétés du substrat adéquates et la proximité d'une source de diaspores sont des facteurs essentiels à l'apparition des sphaignes (Elling et Knighton, 1984; Salonen et Setälä, 1992; Schouwenaars, 1993; Poschlod, 1995).

En raison de tous ces facteurs, les tourbières exploitées par la méthode artisanale sont plus susceptibles d'être recolonisées par les mousses formatrices de tourbe que celles exploitées par aspiration. Au Québec, environ 10 % des superficies exploitées de manière artisanale ont été recolonisées par les sphaignes tandis que seulement 1 % des champs aspirés ont un couvert de sphaignes excédant 25 % de la surface (GRET, données non publiées). La dégradation du système de drainage avec le temps, de même que la topographie de tranchées et de terre-pleins des tourbières exploitées par la méthode de coupe par blocs, génèrent des zones aux conditions hydrologiques favorisant les processus de paludification. De plus, une source de diaspores est souvent présente puisque, lors de l'exploitation, la végétation de surface était entassée à proximité.

Outre les facteurs mentionnés plus haut, les sphaignes réapparaissent souvent, dans les premiers stades de la succession, sous le couvert de plantes pionnières telles les linaigrettes et certaines mousses brunes du genre *Polytrichum* (Grosvernier *et al.*, 1995; Robert *et al.*, sous presse). Ces espèces colonisatrices pourraient agir comme plantes compagnes et faciliter l'établissement des sphaignes, en améliorant particulièrement les conditions d'humidité déficientes à la surface et en stabilisant le substrat (Salonen, 1992; Grosvernier *et al.*, 1995). Grosvernier *et al.* (1995) décrivent un exemple de succession par paludification menant à la formation d'un tapis continu de sphaignes et impliquant l'*Eriophorum vaginatum* L., une espèce pionnière « type »

reconnue pour son habileté à recoloniser les substrat résiduels. Malgré une nappe phréatique assez basse, les sphaignes auraient réussi à s'établir grâce aux conditions microclimatiques particulières engendrées par la présence de *E. vaginatum*. Les éricacées sont aussi souvent présentes dans les premiers stades de la succession (Grosvernier *et al.*, 1995; Robert, 1997). Par contre, il est souvent difficile de déterminer si les éricacées sont apparues avant, en même temps, ou après les sphaignes et leur rôle possible en tant qu'espèce compagnes n'est donc pas clair.

Certaines études montrent aussi la convergence des successions végétales, causé par la dominance rapide des sphaignes une fois établies (Grosvernier *et al.*, 1995; Robert *et al.*, sous presse). Cette convergence témoigne de l'étonnante capacité des sphaignes à créer des conditions favorables à leur croissance et à la formation du dépôt tourbeux. Les sphaignes auraient donc le pouvoir, une fois établie, de diriger la succession végétale (Luken *et al.*, 1985; Andrus, 1986).

Ces observations de sites bien régénérés mettent en lumière l'importance de la phase d'établissement des sphaignes comme étape cruciale pour assurer le retour des communautés végétales d'origine. De plus, cela nous permet de croire que la restauration des tourbières abandonnées est possible, si certaines conditions sont réunies pour permettre l'établissement des mousses formatrices de tourbe. Un des facteurs qui pourraient faciliter cet établissement, et qui est étudié dans cette recherche, est la présence d'espèces pionnières comme point de départ de la succession, afin d'optimiser les conditions initiales rencontrées par les sphaignes.

1.4 RESTAURATION DES TOURBIÈRES ABANDONNÉES APRÈS EXPLOITATION PAR ASPIRATION

1.4.1 Buts de la restauration

Étant donné que la majorité des surfaces résiduelles ne se reconstituent pas en écosystème accumulateur de tourbe, du moins à l'échelle d'une vie humaine, l'intervention est nécessaire afin de rediriger et d'accélérer les processus de succession. Le but de la restauration des tourbières abandonnées après exploitation est de favoriser le retour d'un écosystème humide fonctionnel, et ce, dans une échelle de temps raisonnable (GRET, adresse URL : <http://www.fsaa.ulaval.ca/gret-perg/>). Dans l'est du Canada, différents intervenants (gouvernements, industries, universités) ont réuni leurs efforts pour atteindre ce but, qui constitue, en outre, un pas en avant vers une gestion intégrée et durable de la ressource afin d'éviter " toute perte nette " de ce type de milieu au Canada

méridional (Lynch-Stewart, 1992). En effet, conformément à la politique de conservation des terres humides en Amérique du Nord, il faut :

“ (...) s’assurer qu’il n’y ait aucune perte nette globale de la base restante des terres humides, telle que définie par la superficie et la fonction, et de gérer et créer des terres humides partout où c’est possible, de façon à améliorer qualitativement et quantitativement la base de ressources de terres humides de la nation. ”

(Lynch-Stewart, 1992).

Plus spécifiquement, la restauration des tourbières vise surtout à rétablir un couvert végétal dominé par les sphaignes et les conditions hydrologiques caractéristiques de ces milieux. Ces deux conditions sont essentielles pour que l'écosystème soit à même d'assurer le retour de ses fonctions. De plus, les méthodes de restauration développées à ce jour (Quinty et Rochefort, 1997a) visent particulièrement les anciens champs d'aspiration, puisque ce sont ce genre de surface qui seront abandonnées dans les années futures. En Europe, les efforts se sont concentrés surtout sur la restauration hydrologique et certains chercheurs considèrent que le milieu doit être inondé ou saturé d'eau pour assurer l'établissement de la sphaigne (Schouwenaars, 1988; Joosten, 1992; Meade, 1992; Money, 1995; Wheeler *et al.*, 1998). Cette approche est souvent fondée sur le processus de terrestration où le développement des tourbières se fait par le remplissage d'un plan d'eau. Une méthode alternative a été élaborée au Canada, basée sur un processus de restauration par paludification. Après une restauration hydrologique partielle, les efforts sont plutôt axés sur la restauration de la végétation par réintroduction active de sphaignes, en combinaison avec des techniques visant à créer des conditions plus propices à leur établissement (cf section 1.4.4 pour une discussion plus élaborée de ces conditions). Cette méthode résout la difficulté de la faible disponibilité en diaspores dispersées jusqu'au site et compense pour les conditions d'humidité extrêmement déficientes qui peuvent persister à la surface en dépit d'une nappe phréatique élevée (Price *et al.*, 1998). Évidemment, la restauration des tourbières est une science en pleine évolution et seul un assez grand laps de temps permettra de constater le succès ou l'échec des interventions par rapport au retour d'un écosystème fonctionnel autorégulé et autosuffisant. Par contre, le rétablissement d'un tapis muscinal dominé par les sphaignes entraînera fort probablement la formation d'un acrotelme (et donc le retour des fonctions hydrologiques), l'accumulation de la tourbe (et ainsi du carbone), des processus de filtration d'eau et la reconstruction d'habitats propices à certains animaux et plantes spécialisées.

1.4.2 Restauration hydrologique

La première étape, l'une des plus importantes en vue de restaurer une tourbière, est de bloquer les canaux de drainage afin de permettre le remouillage du site. Généralement, cette seule intervention peut suffire à remonter la nappe phréatique de l'ordre de 20 à 40 cm par rapport à une tourbière drainée pour l'exploitation (Eggelsmann, 1988; Price, 1996, 1997). Par contre, en général, le blocage des canaux de drainage ne parvient qu'à restaurer partiellement l'hydrologie des sites. La nappe phréatique peut être très près de la surface lors des périodes de fortes précipitations comme au printemps et à l'automne, mais elle s'abaisse souvent au cours de l'été en-deça du niveau moyen minimal rencontré dans les milieux naturels (Campeau et Rochefort, 1996; Price, 1996; Rochefort et Campeau, 1997). De plus, la difficulté du remouillage est souvent accrue en raison de la proximité des zones drainées en exploitation. Schouwenaars (1988) indique que la nappe phréatique devrait se situer dans les 40 premiers centimètres sous la surface pour escompter un succès de régénération des bogs européens. Un autre point de vue est émis par Price (1996, 1997) qui a démontré que la nappe phréatique n'est pas nécessairement un bon indicateur des conditions hydrologiques de la surface dans les tourbières canadiennes. La disponibilité de l'eau pour les diaspores réintroduites dépendrait plus des forces capillaires du substrat résiduel, elles-mêmes dépendantes du degré de décomposition du substrat.

Étant donné que les conditions hydrologiques ne sont souvent que partiellement restaurées, les surfaces sont sujettes à l'assèchement et, par le fait même, à l'érosion. À cet égard, la présence de plantes vasculaires pourraient pallier à ces déficiences, en créant un microclimat plus humide et en stabilisant le substrat, conditions qui pourraient ultérieurement faciliter l'établissement des sphaignes.

1.4.3 Réintroduction des sphaignes

Puisque le rétablissement des espèces typiques des tourbières, particulièrement les sphaignes, est un élément essentiel au retour d'un écosystème fonctionnel et que les sources de diaspores sont généralement trop éloignées pour permettre leur dissémination jusqu'aux surfaces résiduelles, la deuxième étape en vue de restaurer un site est de réintroduire activement des diaspores de sphaignes.

En milieu naturel, les sphaignes survivent et s'étalent principalement par propagation végétative (Lane, 1977; Cronberg, 1991). En fait, presque toutes les parties de la plante ont la capacité de régénérer un nouvel individu (Clymo et Duckett, 1986; Poschlod et Pfadenhauer, 1989;

Rochefort *et al.*, 1995). Ce grand pouvoir de régénération permet aux sphaignes, quand les conditions sont favorables, de recoloniser des substrats de tourbe à nue et d'entraîner ainsi des processus de paludification permettant l'établissement de colonies (Quinty et Rochefort, 1997b; Robert, 1997; Rochefort et Bastien, 1998).

En restauration, on utilise ce pouvoir de régénération en réintroduisant des fragments de sphaignes récoltés dans une tourbière naturelle. Afin d'avoir un matériel végétal de qualité, seulement les 10 premiers centimètres de la couche muscinale sont récoltés car c'est là où le potentiel de régénération des espèces de sphaignes communes des bogs est à son maximum (Campeau et Rochefort, 1996). Quinty et Rochefort (1997a) suggèrent de réintroduire les sphaignes selon un rapport de 1:15 ou 1:20, i.e. que chaque mètre carré récolté est épandu sur 15 ou 20 m² de surface à restaurer. Ce rapport représente un bon compromis entre la quantité optimale de sphaignes à épandre pour assurer l'établissement rapide du couvert muscinal et un minimum d'impact de prélèvement dans les tourbières naturelles.

Les fragments de sphaignes sont récoltés dans les tourbières naturelles manuellement ou mécaniquement, selon les objectifs visés et l'échelle de grandeur des expériences ou des sites à restaurer. La récolte manuelle, utilisée pour les expériences à petites et moyennes échelles ou celles impliquant des espèces spécifiques, est plus précise et produit un matériel composé presque uniquement de sphaignes. Pour ce faire, un quadrat d'une superficie donnée est déposé sur la surface du tapis muscinal et les sphaignes se trouvant à l'intérieur des limites du quadrat sont récoltées, placées dans des sacs et transportées au site où elles seront réintroduites. Pour les expériences à grande échelle, le matériel est récolté à l'aide d'un rotoculteur et l'épandage se fait à l'aide d'un épandeur à fumier. Ce matériel, souvent dénommé « top spit », est composé de toute la végétation de surface de la tourbière naturelle, soit principalement des sphaignes mais aussi d'autres espèces de mousses et des graines et fragments de plantes vasculaires (Quinty et Rochefort, 1997a). L'efficacité relative des deux méthodes de récolte au niveau de la reprise de la végétation n'a jamais été comparée directement. Outre l'aspect pratique de la méthode mécanique, la plus grande diversité du matériel végétal pourrait permettre une plus grande diversité des espèces s'établissant sur le substrat résiduel. D'un autre côté, le stress mécanique causé par la machinerie pourrait aussi entraîner une perte d'efficacité dans le succès d'établissement des sphaignes. Le succès relatif de ces deux méthodes de récolte du matériel d'introduction est comparé dans la présente étude.

Même si l'établissement des sphaignes sur les substrats résiduels est possible et favorisé par les réintroductions de fragments, la présence de l'eau demeure néanmoins d'une importance

cruciale quant au succès d'une telle approche. Les sphaignes sont des organismes poïkilohydriques, i.e. qu'elles ne possèdent pas de tissus vasculaires permettant le transport de l'eau et des éléments nutritifs et minéraux (Clymo et Hayward, 1982). En milieu naturel, la translocation est causée par la tension capillaire créée par la structure serrée des communautés et l'absorption des éléments nutritifs et minéraux se fait en grande partie par contact direct, grâce à la structure unicellulaire en épaisseur des sphaignes. Ainsi, les fragments de sphaignes isolés n'ont pas le même comportement et sont beaucoup plus susceptibles à la dessiccation que les communautés naturelles. Comme les conditions hydrologiques des tourbières résiduelles ne sont rétablies que partiellement et que les surfaces sont sujettes à l'assèchement, il importe de trouver des moyens alternatifs pour protéger la végétation réintroduite contre la dessiccation, du moins à court terme, en attendant la formation d'un couvert continu.

1.4.4 Conditions optimisant l'établissement des sphaignes

Diverses techniques ont été testées afin de favoriser un établissement rapide des sphaignes, en améliorant les conditions microclimatiques à l'interface air-tourbe (principalement l'humidité) et les propriétés du substrat résiduel ou en optimisant le potentiel de régénération des fragments. Des expériences ont ainsi tenté de déterminer l'influence de l'apport artificiel d'eau (par irrigation ou inondation superficielle), de l'application de couverts protecteurs (artificiels ou naturels), de la création de topographie et de la fertilisation (Rocheffort *et al.*, 1995; Bugnon *et al.*, 1997; Ferland et Rocheffort, 1997; Quinty et Rocheffort, 1997b; Rocheffort et Campeau, 1997; Rocheffort *et al.*, 1997; Price *et al.*, 1998; Rocheffort et Bastien, 1998). Les succès obtenus avec certaines de ces méthodes ont permis de démontrer qu'une nappe phréatique élevée, bien que ce soit un facteur fondamental tout comme le climat général, n'est pas une nécessité exclusive pour ré-initier la croissance des sphaignes si des conditions environnementales favorables sont présentes autour des sphaignes. Les techniques les plus efficaces faisant appel à des couverts protecteurs artificiels ou naturels sont présentées ici.

Parmi les différents types de couverts protecteurs testés, l'ajout d'un paillis s'est avéré être une méthode peu dispendieuse, facilement applicable et surtout très efficace pour protéger les diaspores de sphaignes. La paille ne fait pas qu'augmenter les chances de survie des diaspores mais elle favorise aussi la croissance et la régénération des fragments (Quinty et Rocheffort, 1997b). Son utilisation permet de diminuer les pertes d'eau par évaporation et procure un environnement plus tempéré et plus humide à la surface du sol, ce qui augmente les chances de survie et le succès d'établissement des sphaignes (Quinty et Rocheffort, 1997b; Rocheffort *et al.*, 1997; Price *et al.*, 1998). Il est aussi possible que la paille libère par lessivage certains éléments nutritifs qui peuvent

alors être captés par les plantes introduites (Plass, 1978). La nature et la teneur de ces éléments sera vérifiée dans cette étude.

La présence de plantes compagnes a aussi été testée comme dispositif de protection (naturel) pour les diaspores réintroduites. De façon générale, les espèces compagnes sont reconnues pour aider à prévenir l'érosion, fournir un microclimat favorable pour l'établissement des espèces souhaitées et réduire la compétition par les mauvaises herbes (Buckley, 1984). Salonen (1992) a montré que la présence d'un couvert végétal artificiel de 80 % (imitant la structure des éricacées) sur une surface tourbeuse dénudée améliore l'humidité et diminue la température à la surface. Ferland et Rochefort (1997) ont réimplanté trois groupes de plantes compagnes (mélange d'éricacées, linaigrettes à feuilles étroites et mousses brunes) afin de vérifier l'influence de celles-ci sur la reprise des sphaignes. La présence des linaigrettes, dont les transplants sont très efficaces pour recoloniser le substrat tourbeux, a favorisé l'établissement des sphaignes. Par contre, l'effet des éricacées et des mousses brunes sur l'établissement des sphaignes n'a pu être déterminé adéquatement suite aux faibles succès de réimplantation de ces plantes avec les méthodes utilisées. Aucune de ces recherches n'a cependant tenté de mesurer le microclimat et les propriétés du substrat générés par la présence des plantes compagnes.

1.4.5 Interactions entre plantes vasculaires et sphaignes

La présence de plantes compagnes représente une avenue intéressante à approfondir en restauration et pourrait constituer une méthode alternative à l'utilisation du paillis. La paille procure des conditions favorables à l'établissement de sphaignes sur la tourbe à nu mais seulement à court terme. Celle-ci est presque complètement dégradée après la deuxième année alors que les mousses nécessiteraient encore la présence d'un couvert protecteur. De plus, l'utilisation de la paille représente un problème dans les endroits exposés au vent. La présence de plantes compagnes avec un couvert suffisant pourrait protéger les diaspores introduites de manière semblable à la paille, et ce, à plus long terme. De plus, un couvert végétal déjà établi pourrait stabiliser le substrat et réduire l'érosion de la tourbe.

Dans le même ordre d'idée, les études sur la succession végétale sur les sites abandonnés bien régénérés ont montré que les sphaignes apparaissent souvent sous le couvert d'espèces pionnières (cf section 1.3.2). On a déjà observé, dans les stades pionniers de la succession, la présence des espèces suivantes : *Eriophorum spissum* Fern., *E. angustifolium* Honck., *Polytrichum strictum* Brid. et certaines espèces d'éricacées. Ces espèces pionnières pourraient agir

comme plantes compagnes et leur présence pourrait faciliter l'établissement subséquent des sphaignes en modifiant les conditions microclimatiques et les propriétés du substrat.

On en connaît cependant très peu sur les processus régissant la succession végétale sur les surfaces résiduelles. Les modèles de facilitation, de tolérance et d'inhibition proposés par Connell et Slatyer (1977) sont souvent utilisés pour expliquer les changements dans les premiers stades de la succession (Walker et Chapin III, 1987) et semblent appropriés au cas des tourbières abandonnées. Ainsi, certains chercheurs ont observé des processus de facilitation entre les plantes vasculaires et les sphaignes en phase d'établissement (Salonen, 1990; Salonen *et al.*, 1992; Grosvernier *et al.*, 1995). Par contre, l'importance de ces processus successionnels n'est souvent qu'hypothétique et bien des questions sont encore sans réponse. Par exemple, l'influence des éricacées sur l'établissement des sphaignes n'est pas claire puisqu'il est souvent difficile de déterminer si les sphaignes apparaissent avant, en même temps ou après les arbustes (Robert *et al.*, sous presse). De plus, on ne connaît pas l'effet des densités de couvert des espèces pionnières ou s'il existe des densités de couvert végétal optimales au-delà desquelles les sphaignes ne peuvent plus s'établir en raison d'une trop forte compétition.

Enfin, l'association des sphaignes et des plantes vasculaires semble être un élément essentiel au développement des tourbières et permettrait à l'écosystème d'être plus productif (Malmer *et al.*, 1994). Dans une perspective de restauration à moyen terme, la présence de plantes vasculaires serait indispensable et contribuerait au retour d'une diversité végétale et d'une structure de végétation similaire aux écosystèmes naturels, en stimulant les interactions entre les sphaignes et ces espèces.

1.5 OBJECTIFS DE RECHERCHE

Dans le cadre de cette recherche, nous voulons appliquer les observations faites sur la succession végétale dans les sites bien régénérés à nos techniques de restauration. Nous voulons ainsi vérifier l'hypothèse émise par Grosvernier *et al.* (1995) que les plantes pionnières facilitent l'établissement des sphaignes en créant des conditions microclimatiques et des propriétés de substrat plus favorables pour celles-ci. D'un point de vue pratique, nous voulons savoir si la présence de plantes pionnières peut offrir une méthode alternative à l'ajout d'un paillis. De plus, nous profitons du dispositif mis en place pour comparer directement l'influence du mode de récolte des diaspores réintroduites afin de mieux connaître l'impact de la mécanisation des opérations sur l'établissement de la végétation. Nous avons donc procédé à des réintroductions de sphaignes

(récoltées manuellement ou mécaniquement) dans des communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières (plusieurs espèces d'éricacées, *Eriophorum spissum* et *E. angustifolium*), en combinaison ou non avec l'ajout d'un paillis.

Plus spécifiquement, les objectifs de l'étude sont : 1) de comparer l'efficacité relative du mode de récolte des diaspores réintroduites en fonction du succès d'établissement des sphaignes et des autres plantes réintroduites; 2) de vérifier si la paille favorise l'établissement de la végétation lorsque différents couverts végétaux sont déjà présents; 3) de comparer l'influence de différentes espèces pionnières préétablies dans les tourbières abandonnées sur l'établissement des sphaignes et autres plantes réintroduites; 4) de vérifier si la densité du couvert des espèces pionnières influence le succès d'établissement des plantes réintroduites; et 5) d'examiner les conditions engendrées par les plantes pionnières, selon les espèces et leur densité de couvert, au niveau du microclimat et des propriétés physico-chimiques de la tourbe.

CHAPITRE 2 - MÉTHODOLOGIE

2.1 SITES EXPÉRIMENTAUX

Au début du printemps 1996, plusieurs champs d'aspiration abandonnés depuis un certain nombre d'années ont été visités au Québec. Le but premier de ces visites était de choisir des sites recolonisés par différentes espèces pionnières et ce, en nombre suffisant pour avoir plus d'un site avec le même type de communautés végétales. Cependant, la démesure de cette démarche nous est vite apparue. La plupart des sites visités étaient soit difficiles d'accès ou trop éloignés les uns des autres, introduisant ainsi un biais climatique. Certaines communautés végétales ne se rencontraient qu'en un seul endroit tandis que d'autres étaient représentées en plus grand nombre. C'est donc pour ces raisons que notre choix s'est arrêté sur deux sites non éloignés l'un de l'autre et présentant trois communautés végétales fort différentes au niveau de la structure : 1) des éricacées arbustives (e.g. *Ledum groenlandicum* Retzius, *Kalmia angustifolia* L.), 2) des linaigrettes denses (*Eriophorum spissum* Fern.), formatrice de touradons, et 3) des linaigrettes à feuilles étroites (*E. angustifolium* Honckeny), espèce stolonifère.

Les deux sites retenus pour l'étude sont situés à l'intérieur du grand complexe de la tourbière de Rivière-du-Loup (47°48' N, 69°28' O) qui couvre près de 3150 ha. À la station météorologique la plus près (St-Arsène), la température moyenne annuelle est de 4,2 °C et les précipitations moyennes annuelles atteignent 930 mm, dont 645 mm tombent sous forme de pluie (Environnement Canada, 1993).

2.1.1 Site de Verbois

Ce site est constitué de deux anciennes planches d'exploitation rectangulaires (30 X 300 m chaque) entourées d'anciens canaux de drainage. Une bordure de tourbière non perturbée boisée les délimite au nord et à l'ouest. Au sud, se trouve un chemin emprunté par la machinerie suivi d'une zone présentement en exploitation, et à l'est, deux autres planches abandonnées plus récemment. La tourbe a été récoltée à l'aide d'aspirateurs, puis le site a été abandonné à la fin des années 1980. Les canaux de drainage entourant ce site ont été comblés de tourbe sur toute leur longueur, tandis que celui situé entre les deux planches a été bloqué à intervalles réguliers. Il existe cependant un canal toujours fonctionnel plus au sud, entre le chemin emprunté par la machinerie et la zone en

exploitation. Le remouillage n'est donc pas optimal, étant donné qu'une certaine quantité d'eau s'écoule vers ce canal.

De façon générale, la végétation ayant recolonisé ce site est composée presque exclusivement d'éricacées dont les plus fréquentes sont *Ledum groenlandicum* Retzius, *Kalmia angustifolia* L., *Vaccinium angustifolium* Ait. et *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench (Fig. 2.1). Quelques petits bouleaux, des mousses brunes et des linaigrettes denses souvent en état de dégénérescence sont aussi présents. Les sphaignes ne se trouvent qu'en de rares endroits situés dans des zones où la végétation arbustive est plus dense.

2.1.2 Site de Président-Ouest

Ce site comporte une dizaine de planches (ca 30 X 350 m chaque) séparées par d'anciens canaux de drainage. Un chemin le borde au sud et il est entouré de bandes plus ou moins larges de tourbière non perturbée. La tourbe a été récoltée pendant quelques années avec des aspirateurs mais le dépôt tourbeux n'étant pas très profond, il a été abandonné. Les canaux de drainages entourant le site et ceux séparant les différentes planches d'exploitation ont été comblés de tourbe au début des années 1990. Ce site est très bien remouillé aujourd'hui et l'eau affleure souvent en surface. Cette situation peut être dû à la couche argileuse qui retient l'eau et par l'absence d'exploitation active dans les environs.

Deux communautés végétales bien distinctes occupent ce site, soit une communauté dominée par *Eriophorum spissum* Fern. (Fig. 2.2) et une autre dominée par *E. angustifolium* Honck. (Fig. 2.3). La structure végétale différente de ces deux espèces crée une mosaïque bien visible, avec des zones de petites buttes formées par les touradons de l'*E. spissum*, et des zones plus homogènes et plus foncées, dues aux feuilles rougeâtres de l'*E. angustifolium*. Ces dernières croissent dans les endroits les plus humides du site, où l'eau affleure souvent. Selon Grosvernier (comm. pers.), il semble que l'*E. spissum* ait été le premier colonisateur, alors que la nappe phréatique n'était pas aussi haute. Puis, il y aurait eu un changement dans l'hydrologie du milieu, entraînant un rehaussement de la nappe phréatique et permettant l'établissement et l'expansion de *E. angustifolium*.

Outre ces cypéracées, on trouve aussi quelques rares éricacées et mousses brunes. Cependant, il existe une bande de végétation bordant les anciens canaux de drainage comblés, constituée de buissons denses d'éricacées (Fig. 2.2). Des sphaignes sont souvent présentes sous le

couvert de ces arbustes et de petites colonies réussissent quelquefois à se propager jusqu'à un mètre vers l'intérieur des planches.

Figure 2.1 - Communauté végétale dominée par les éricacées, recolonisant le site de Verbois. (mai 1996).

Figure 2.2 - Communauté végétale dominée par *Eriophorum spissum* Fern., recolonisant en partie le site de Président-Ouest. On peut voir une bande d'éricacées bordant un ancien canal de drainage maintenant comblé, de même que la bordure non exploitée située à l'ouest du site (novembre 1996).

Figure 2.3 - Communauté végétale dominée par *E. angustifolium* Honck., recolonisant en partie le site de Président-Ouest. On aperçoit cinq des six parcelles constituant un bloc expérimental. Les herbacées présentent une couleur plus verte à l'intérieur des parcelles en raison de la coupe des plantes effectuée une semaine plus tôt (juin 1996).

2.2 RÉINTRODUCTION DE SPHAIGNES RÉCOLTÉES SELON DEUX MÉTHODES ET AJOUT D'UN PAILLIS DANS DES COMMUNAUTÉS VÉGÉTALES DOMINÉES PAR DIFFÉRENTES PLANTES PIONNIÈRES

Une série de trois expériences a été initiée simultanément sur les deux sites, la première impliquant les éricacées, la seconde, *Eriophorum spissum* et la troisième, *E. angustifolium*. Outre l'influence des plantes pionnières sur l'établissement des sphaignes, ces expériences visaient également à mettre en relief l'efficacité du type de matériel végétal utilisé pour les réintroductions et l'effet d'un paillis comme protection physique complémentaire aux plantes pionnières. Le facteur « matériel végétal » comprenait trois niveaux : des sphaignes récoltées manuellement, la végétation de surface d'une tourbière naturelle récoltée mécaniquement et, enfin, aucun matériel réintroduit. Le facteur « paillis » incluait 2 niveaux, soit avec et sans paille. Ces expériences factorielles ont été disposées selon un plan en blocs complets aléatoires.

Dans chaque communauté végétale, 30 parcelles expérimentales de 1,5 X 5 m ont été délimitées et regroupées en cinq blocs dans des secteurs présentant des structures végétales homogènes et dont la densité du couvert végétal était représentative de celle de l'ensemble du site. Une zone de 1,5 X 1 m a aussi été identifiée aléatoirement à l'une ou l'autre des extrémités des parcelles afin de servir pour les mesures dites destructives. Un minimum d'un mètre séparait les six parcelles constituant un bloc. Dans chaque bloc, les six combinaisons des facteurs « matériel végétal » et « paillis » étaient représentées.

Certaines manipulations se sont avérées nécessaires pour permettre un meilleur contact des diaspores avec le substrat tourbeux lors de leur réintroduction. Ainsi, nous avons partiellement taillé les plus gros buissons d'éricacées et la couronne de feuilles des touradons d'*E. spissum* avec des ciseaux de jardinage. Les *E. angustifolium* ont été coupés à environ 10 cm de longueur à l'aide d'une débroussailleuse.

2.2.1 Récolte et réintroduction des diaspores

Le matériel végétal utilisé pour les réintroductions a été récolté de deux façons, dans une partie non exploitée de la tourbière de Rivière-du-Loup. La première méthode consistait à récolter à la main uniquement la strate muscinale sur une surface délimitée par un quadrat (25 X 25 cm) et sur une profondeur approximative de 10 cm. La deuxième méthode de récolte a été effectuée après qu'un rotoculteur ait coupé la végétation de surface, toujours sur une profondeur de 10 cm. Le matériel végétal a été ramassé en plaçant un quadrat sur les plantes coupées afin de prélever la

même quantité de matériel par unité de surface que pour la méthode manuelle. Les récoltes manuelles et mécaniques ont été effectuées dans des zones adjacentes et les deux types de matériel étaient composés des mêmes espèces dominantes de sphaignes (*Sphagnum capillifolium* (Ehrh.) Hedw. et *S. magellanicum* Brid.) et de quelques mousses brunes du genre *Polytrichum*. Le matériel coupé au rotoculteur comprenait, en plus des bryophytes, des fragments d'éricacées et d'herbacées. Le matériel végétal a été placé dans des sacs puis transporté jusqu'aux sites expérimentaux pour y être épandu la journée suivante.

Que ce soit pour l'une ou l'autre de ces méthodes de récolte, le matériel a été réintroduit à la main à un ratio de 1:16, i.e. que 1 m² de matériel prélevé a été épandu sur 16 m² de surface à restaurer.

2.2.2 Ajout de paillis

Après les réintroductions, un paillis de paille d'avoine a été ajouté à raison de 1 balle de paille par 50 m² sur et autour des parcelles leur étant attribuées aléatoirement, afin de minimiser l'effet de bordure. Cette quantité de paille représente 1500 kg/ha et est considérée comme optimale pour l'établissement des sphaignes (Quinty et Rochefort, 1997a).

2.3 RÉINTRODUCTION DE SPHAIGNES SOUS DIFFÉRENTES DENSITÉS DE COUVERT DE PLANTES PIONNIÈRES

Une autre série d'expériences a aussi été initiée afin de mettre en relief l'influence de la densité de couvert des espèces pionnières sur l'établissement de la végétation réintroduite. La première expérience impliquait les éricacées et la seconde, *Eriophorum spissum*. Il était impossible de faire ce genre d'expérience avec *E. angustifolium*, car les endroits où on la rencontrait en faible densité étaient colonisés par *E. spissum*. Les différentes densités de recouvrement testées pour chacun des deux types d'espèces colonisatrices et les dispositifs expérimentaux sont décrits dans les paragraphes suivants. Au facteur « densité » s'ajoute le facteur « réintroduction » qui comprenait 2 niveaux, soit des réintroductions avec des sphaignes récoltées manuellement et aucune réintroduction. Enfin, la paille a été épandue sur toutes les parcelles, de la façon décrite précédemment, pour favoriser un établissement optimal.

2.3.1 Description des densités de couvert d'éricacées

Dès les premières visites, différentes densités de couvert d'éricacées ont été observées sur le site de Verbois. En effet, même si la plus grande superficie de ce site avait un couvert en éricacées variant de 10 à 30 %, le couvert de certains secteurs étaient beaucoup plus dense. Des parcelles expérimentales ont été délimitées dans six secteurs à densité faible (D1)¹ et dans trois secteurs à densité forte (D2), choisis au hasard sur le site. Les densités faibles correspondent au couvert végétal utilisé pour l'expérience testant l'effet du matériel végétal et du paillis en présence d'éricacées, décrite à la section précédente (cf. section 2.2). Les couverts respectifs de ces deux densités sont détaillés dans la section traitant des résultats de cette expérience. L'expérience a été disposée selon un plan en tiroirs, le facteur principal (« densité d'éricacées ») étant distribué aléatoirement sur le site et le facteur secondaire (« réintroduction ») étant regroupé à l'intérieur d'une même densité. Les parcelles expérimentales avaient les mêmes dimensions que pour les expériences précédentes et une zone a aussi été délimitée à l'intérieur des parcelles pour les mesures destructives. Les éricacées ont aussi été coupées partiellement afin de faciliter la réintroduction du matériel végétal et de permettre un meilleur contact diaspores-sol.

2.3.2 Description des densités de couvert d'*Eriophorum spissum*

À Président-Ouest, il était moins évident de distinguer différentes densités naturelles d'*Eriophorum spissum*. Nous avons donc choisi d'intervenir activement afin de créer artificiellement les densités de couvert végétal désirées. La densité la plus forte (D3) consistait en parcelles à l'état naturel, correspondant au couvert végétal utilisé pour l'expérience décrite à la section précédente et testant l'effet du matériel végétal et du paillis en présence d'*E. spissum* (cf. section 2.2). Pour les deux autres densités, un certain nombre de touradons ont été enlevés à la fourche. Ainsi, 15 et 5 touradons par parcelle ont été respectivement maintenus en place pour la densité intermédiaire (D2) et la densité la plus faible (D1). Les couverts végétaux sont détaillés dans la section traitant des résultats de cette expérience. Cette expérience a été disposée avec un plan en blocs complets aléatoires, toutes les combinaisons des facteurs « densités d'*E. spissum* » et « réintroduction » étant regroupées à l'intérieur d'un des trois blocs. Les feuilles des linaigrettes ont été coupées avec des ciseaux autour des touradons afin que tous subissent les mêmes manipulations permettant un meilleur contact diaspores-tourbe.

¹ Au départ, nous avons distingué trois catégories de densités de couvert d'éricacées. Il s'est avéré, suite à l'analyse des données de recouvrement végétal initial, que les deux plus faibles densités de couvert ne sont pas différentes statistiquement. Nous avons donc combiné ces deux plus faibles densités de couvert en une seule (D1), ce qui fait que celle-ci est répliquée six fois, tandis que le couvert le plus dense (D2) n'est répliqué que trois fois.

2.3.3 Récolte et réintroduction des diaspores

Le matériel végétal utilisé pour ces expériences a été récolté manuellement, de la façon décrite précédemment (cf. section 2.2.1). Nous avons choisi d'utiliser la méthode manuelle plutôt que mécanique, car c'est celle qui favorise probablement une implantation plus rapide et optimale des sphaignes. De plus, nous avons jugé bon d'inclure des parcelles témoins, sans réintroduction, afin d'être en mesure de suivre, s'il y a lieu, l'évolution de la régénération naturelle. La composition en sphaignes ainsi que le ratio de matériel réintroduit étaient les mêmes que dans les expériences précédentes.

2.4 PARAMÈTRES MESURÉS

Divers paramètres ont été mesurés, et ce, pour les cinq expériences, afin de mieux comprendre l'effet des différents traitements. Certaines mesures ont été prévues pour caractériser et comparer les communautés végétales selon l'espèce dominante et la densité de couvert tandis que d'autres se sont attardées plus particulièrement à l'effet du type de matériel végétal et du paillis.

2.4.1. Propriétés des substrats

Trois paramètres physiques (profondeur de la nappe phréatique, teneur en eau volumique de la tourbe, tension de l'eau du sol) et des analyses chimiques des substrats ont été choisis pour définir les propriétés du substrat. Ces paramètres ont été mesurés non seulement pour décrire et comparer les surfaces à restaurer mais aussi dans le but de voir si les plantes pionnières modifient les propriétés du sol de façon à favoriser l'établissement des sphaignes.

a) Profondeur de la nappe phréatique

Des puits d'observation (tuyaux de PVC de 5 cm de diamètre perforés sur leur longueur) ont été disposés stratégiquement sur les deux sites. Un puits d'observation a été placé au centre de chaque bloc pour la première série d'expériences impliquant les trois types d'espèces pionnières et au centre de chaque parcelle principale pour l'expérience impliquant les densités naturelles d'éricacées. Cette disposition nous permet de calculer une profondeur moyenne de la nappe phréatique pour chaque espèce pionnière étudiée et aussi pour les différentes densités d'éricacées impliquées. Cependant, cette mesure n'a pas été évaluée pour les différentes densités d'*Eriophorum spissum* créées artificiellement car il aurait fallu placer un puits à l'intérieur même

des parcelles expérimentales. Les mesures ont été prises à toutes les semaines ou deux semaines, au cours de l'été 1996 et 1997, à l'aide d'un ruban à mesurer muni d'un senseur sonore.

b) Teneur en eau volumique de la tourbe

La teneur en eau volumique de la tourbe est une variable importante concernant l'établissement des sphaignes car elle détermine la quantité d'eau accessible aux diaspores par contact direct (Price, 1997). En outre, la mesure volumique plutôt que pondérale utilise aussi la composante de la densité apparente de la tourbe (« bulk density »), qui est fonction de la structure poreuse du substrat. À la fin de chaque mois (de mai à août 1996), des échantillons de tourbe de 375 cm³ (3 X 125 ml) ont été prélevés à la surface (0 - 5 cm) de chaque parcelle expérimentale, dans les zones réservées pour les mesures destructives, à l'aide d'un échantillonneur à rebords dentelés pour éviter la compaction de la tourbe. Les échantillons ont été placés dans des sacs « Ziploc® » fermés hermétiquement et transportés jusqu'au laboratoire. Chaque échantillon a été pesé (poids humide), séché au four à 105°C pendant 24 heures, puis pesé à nouveau (poids sec). On calcule la teneur en eau volumique de la tourbe () de chaque parcelle expérimentale avec la formule suivante :

$$= \frac{(\text{poids humide} - \text{poids sec})}{\text{volume}} r_w$$

où

$$r_w \text{ (densité de l'eau)} = 1 \text{ g cm}^{-3}$$

c) Tension de l'eau du sol

Plus un sol s'assèche, plus les particules qui le composent ont tendance à retenir fortement l'eau résiduelle. La tension de l'eau du sol détermine la capacité du substrat à retenir l'eau et nous informe, par le fait même, sur la disponibilité de l'eau pour les plantes. Elle est fonction de la quantité d'eau présente mais aussi de la grosseur des pores et des particules qui composent le substrat (Price, 1997). Pour mesurer cette variable, on utilise des tensiomètres, tubes coudés de 10 cm de longueur, dont l'une des extrémités est pourvue d'un bouchon poreux de céramique qu'on insère dans le sol et l'autre d'une membrane de caoutchouc. Le tensiomètre est rempli d'eau et un tensimètre™ enregistre la tension engendrée à l'intérieur du tube et causée par le potentiel matriciel du sol (i.e. la succion du sol). La tension de l'eau du sol est alors égale à la tension lue par l'appareil à laquelle on additionne la tension gravitationnelle causée par la colonne d'eau à l'intérieur des tensiomètres (qui est égale à la hauteur de la colonne d'eau).

Des tensiomètres ont été enfouis à 1 cm sous la surface du sol dans des parcelles expérimentales représentant chacune des communautés végétales et densités étudiées. Les mesures ont été prises à toutes les 2 semaines, du 24 juillet au 21 août 1996.

d) Analyses chimiques des substrats

Pour procéder à des analyses chimiques des substrats résiduels, huit échantillons ont été prélevés, soit quatre dans les communautés d'éricacées, deux dans celles d'*E. spissum* et 2 dans celles d'*E. angustifolium*. Les échantillons de tourbe ont été prélevés en mai 1996 à la surface à l'aide de gants aseptisés, puis envoyés dans les plus brefs délais au laboratoire régional de chimie du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ, Rock-Forest) pour fins d'analyses.

Un certain nombre de propriétés couramment utilisées en pédologie ont été mesurées sur les tourbes, à savoir :

- l'acidité du sol frais, mesurée par le pH dans l'eau et dans une solution normale de KCl;
- le taux de matière organique (MO), exprimé en % de poids sec de tourbe;
- la concentration en P, K, Ca et Mg, assimilables par les plantes, exprimée en kg/ha, ainsi que la concentration en Al, N-NO₃ et N-NH₄ exprimée en ppm;
- le taux de saturation en K, Ca et Mg, ainsi que le taux de saturation totale, exprimés en %;
- la concentration en azote total (N), exprimée en % du poids sec de tourbe séchée;
- le rapport fondamental C/N;
- la capacité d'échange cationique (CEC).

2.4.2 Conditions microclimatiques

Les plantes qui colonisent une surface peuvent entraîner des changements de microclimat à l'interface sol-air, où les conditions sont particulièrement importantes pour les diaspores isolées de sphaignes (Ferland et Rochefort, 1997). La paille joue aussi ce rôle et crée des conditions microclimatiques avantageuses pour l'établissement des mousses (Price *et al.*, 1998). Trois paramètres ont été mesurés afin de comparer le microclimat à la surface du sol selon les communautés végétales présentes, la densité du couvert végétal et la présence ou non de paille.

a) Température à la surface du sol

La température a été mesurée et enregistrée aux 5 minutes sur des périodes plus ou moins continues, entre le 14 juin et le 17 septembre 1996, à l'aide de systèmes miniatures d'acquisition de données StowAway™ XTI (# XTI08-37+46, Onset Computer Corporation, Pocasset, MA) munis d'une sonde thermistor externe reliée par un fil. Ces appareils de mesure étant perméables à l'eau, nous les avons placés dans des boîtes de plastique (la sonde et le fil sortant de la boîte par un trou) hermétiquement fermées et scellées avec de la paraffine et du silicone.

Des appareils ont été placés sous le couvert végétal de chaque type d'espèces pionnières (avec et sans paille) et chaque densité de couvert étudiées (avec paille). Pour tenir compte des variations possibles entre les parcelles expérimentales, les StowAway™ ont été déplacés à chaque semaine d'un bloc expérimental (ou d'une répétition) à un autre. Les températures moyennes à l'heure, les températures moyennes journalières et les maxima et minima journaliers ont été calculés à partir des données recueillies.

b) Humidité relative à la surface du sol

Cette variable a aussi été mesurée et enregistrée aux 5 minutes sur des périodes plus ou moins continues, entre le 14 juin et le 17 septembre 1996, à l'aide d'appareils StowAway™ RH (# SRHA08, Onset Computer Corporation, Pocasset, MA). Ceux-ci consistent en une petite boîte de 5 X 5 X 2 cm de hauteur, pourvue d'une sonde sur le dessus. Il était impossible de placer les appareils à même le sol, puisqu'ils ne sont pas imperméables, et nous avons dû élaborer une méthode pour les isoler de la pluie, inspirée des appareils de mesures utilisés dans les stations météorologiques. Chaque boîtier a été collé par un Velcro® dans un sous-pot à plante ornementale sur lequel était attaché des piquets. Le tout était planté à l'envers, avec un espace de quelques centimètres entre le sous-pot et le sol pour permettre la circulation de l'air.

Ces appareils ont été placés à côté de ceux enregistrant les données de température. Les taux d'humidité moyens à l'heure, les taux d'humidité moyens journaliers et les maxima et minima journaliers ont été calculés à partir des données compilées.

c) Luminosité à la surface du sol

La luminosité a été mesurée à l'aide d'un appareil SunScan Canopy Analysis System (Delta-T Devices LTD, Cambridge) qui permet de mesurer les radiations photosynthétiquement actives

(RPA) sous et au-dessus de la voûte végétale, en terme de quantité de photons. Cet appareil est muni d'une sonde de 1 m de long, contenant 64 photodiodes également espacées sur toute la longueur, que l'on place sous la voûte pour mesurer les RPA transmises. Il est jumelé à un senseur externe, nommé Beam Fraction sensor, qui mesure simultanément les RPA incidentes. L'utilisation de cet appareil nécessite un terminal Psion Workabout qui enregistre les données et permet le transfert à un ordinateur.

Cette mesure a été effectuée lors d'une journée ensoleillée, soit le 4 septembre 1996, entre 11:00 heures et 13:00 heures. Six parcelles expérimentales ont été choisies aléatoirement pour représenter chacune des communautés végétales et des densités étudiées. Dans chacune des parcelles, 4 à 5 mesures successives de RPA transmises et incidentes ont été prises sous le couvert végétal afin de tenir compte de l'hétérogénéité spatiale, tant en largeur qu'en longueur. Des moyennes pour chaque parcelle ont été calculées à partir de ces mesures. Le déplacement entre chacune des parcelles échantillonnées s'est fait le plus rapidement possible pour éviter des changements climatiques imprévus tel l'arrivée de nuages. La différence de luminosité au sol entre les parcelles recouvertes ou non de paille a aussi été déterminée en prenant des mesures successives sous et au-dessus du paillis, mais seulement dans les communautés d'éricacées. De plus, les mesures ont été répétées deux fois au cours de la journée, soit peu avant et peu après midi.

2.4.3 Analyses chimiques de la paille

On reconnaît que l'ajout de paille crée des conditions microclimatiques particulières qui avantagent les sphaignes en diminuant les écarts de températures et en maintenant un taux d'humidité plus élevé (Price *et al.*, 1998). Par contre, on en connaît peu sur les éléments nutritifs qui pourraient être lessivés de la paille par la pluie et qui pourraient être disponibles aux plantes (Plass, 1978). Pour en savoir plus, nous avons procédé à deux types d'analyses chimiques (effectuées par la laboratoire régional de chimie du MAPAQ, Rock-Forest).

Le premier type d'analyse a été effectué sur la paille en tant que tissu végétal (composé principalement d'avoine). Trois petites parcelles de 1 m² ont été délimitées sur le terrain et on y a épandu de la paille en proportion identique à celle utilisée pour les expériences (1500 kg/ha). Des échantillons ont été prélevés sur chacune des parcelles à 4 reprises au cours de l'été 1996, soit au début de l'expérimentation puis après 1, 2 et 3 mois. Les analyses chimiques de cette paille ont permis de déterminer les concentrations de K, P, Ca, N et Mg, exprimées en % de poids sec, et celles de Bo, Zn, Fe, Mn et Cu, exprimées en ppm.

Un deuxième type d'analyses chimiques a été effectué sur un filtrat de paille obtenu après 1 heure de macération dans l'eau (1:1). Le filtrat ainsi obtenu équivaut à la quantité d'éléments lessivés par une grosse averse. Le filtrat a été tamisé sur filtres d'acétate de cellulose (0,45 µm) puis le pH a été mesuré. Les analyses chimiques de 3 échantillons de ce filtrat ont permis de déterminer les concentrations de K, SO₄, P, Ca, Na, N-NH₄, N-NO₃, Mg, Bo, Zn, Fe, Mn et Cu, exprimées en ppm.

2.4.4. Évaluation du couvert végétal initial

Avant de couper la végétation ou de réintroduire le matériel végétal, nous avons évalué la végétation couvrant toutes les parcelles expérimentales. Dans la communauté végétale dominée par les éricacées, la description s'est faite par la méthode des quadrats, décrite en détails à la section 2.4.5. En raison de contraintes logistiques, il nous a été impossible de poursuivre avec cette méthode pour les communautés d'*E. spissum* et d'*E. angustifolium*, où nous avons plutôt estimé globalement le pourcentage de recouvrement de chaque espèce à l'intérieur des parcelles. Aucun relevé de végétation (par quadrats ou par parcelles) n'a été effectué pour l'expérience impliquant différentes densités d'*E. spissum* puisque pratiquement toute la végétation autre que le nombre de touradons requis a été arrachée.

2.4.5. Évaluation de l'établissement de la végétation

Des mesures ont été effectués à l'automne 1996 et 1997 afin d'évaluer l'effet des différents traitements sur la reprise de la végétation. Huit quadrats (25 X 25 cm) par parcelle ont été systématiquement répartis le long de deux transects disposés parallèlement à la longueur de la parcelle, en excluant les zones réservées aux mesures destructives.

Divers paramètres ont été considérés lors de ces évaluations. Pour les sphaignes, le nombre d'individus (considéré comme tel lorsque le capitulum est formé d'un minimum de 4 à 5 rameaux) a été compté et le pourcentage de recouvrement estimé. Pour les autres espèces, soit les bryophytes autres que les sphaignes, les éricacées, *E. spissum* et *E. angustifolium*, seul le pourcentage de recouvrement a été estimé. Le seuil minimal de détection de cette méthode a été établi à 1 %, en-deça de quoi nous notions simplement « présence ».

En 1997, plusieurs quadrats présentaient un couvert en sphaignes assez élevé et il aurait été ardu de compter tous ces individus. Ceux-ci ont donc été dénombrés quand il y en avait moins de 200 par quadrat, sinon on notait tout simplement « plus de 200 », tout en évaluant bien sûr le

pourcentage de recouvrement. Ainsi, les deux méthodes de mesure ont été retenues pour contrer les limites de chacune d'elles : le dénombrement des individus est plus précis dans les cas où le succès d'établissement des sphaignes est bas tandis que l'estimation du recouvrement est plus appropriée dans les situations où les sphaignes sont abondantes.

2.5 ANALYSES STATISTIQUES

Les données de certaines variables mesurées dans les expériences ont fait l'objet d'analyses de variance, multifactorielles mais univariées, afin de vérifier la fiabilité statistique des observations effectuées. Cependant, l'influence des trois types de communautés végétales n'a pu être comparée statistiquement en raison des contraintes du dispositif expérimental (les communautés n'étaient pas randomisées). Les analyses de variance (ANOVA) ont été menées à l'aide du programme SAS (SAS Institute, 1988). Avant chaque ANOVA, l'homogénéité des variances a été vérifiée par un test de Bartlett et par l'analyse graphique des résidus et les données ont été transformées si nécessaire. Les paragraphes suivants décrivent les analyses effectuées pour les différentes variables.

- Pour les trois communautés végétales, la teneur en eau volumique de la tourbe en fonction de la présence ou non d'un paillis a été comparé statistiquement, par des ANOVA avec mesures répétées (paille, dates de mesure). Le type de matériel réintroduit n'a pas été inclus dans les analyses puisque ce n'est pas un facteur pertinent pouvant modifier le contenu en humidité de la tourbe. Des ANOVA avec mesures répétées (densités, dates de mesure) ont aussi été effectuées pour comparer la teneur en eau de la tourbe entre les différentes densités de couvert des plantes pionnières. Aucune transformation des données n'a été nécessaire.
- Les données (non transformées) de tension de l'eau du sol entre les différentes densités de couvert d'espèces pionnières ont aussi été analysées à l'aide d'ANOVA avec plan en mesures répétées (densités, dates de mesure).
- Les données (non transformées) de luminosité à la surface du sol entre les différentes densités de couvert d'espèces pionnières ont été analysées à l'aide d'ANOVA à un facteur (densités), avec plan entièrement aléatoire (pour l'expérience avec les éricacées) ou en blocs (pour l'expérience avec *E. spissum*).

- Pour l'estimation du couvert végétal initial, seuls les pourcentages de recouvrement des diverses composantes floristiques présentes dans les deux densités d'éricacées ont pu être comparées statistiquement, afin de vérifier les différences réelles entre ces densités. Des ANOVA à un facteur (densités) ont été effectuées pour les différentes variables dépendantes non transformées (recouvrement en sphaignes, autres bryophytes, éricacées, *Eriophorum spissum* et recouvrement total). Dans les autres communautés végétales, les moyennes et écarts-types ont été calculés pour décrire la végétation initialement présente. Aucune mesure n'a été effectuée pour l'expérience portant sur les différentes densités d'*E. spissum*.
- En ce qui concerne l'établissement de la végétation dans chacune des communautés végétales, l'effet du type de matériel végétal et du paillis a été analysé à l'aide d'ANOVA à trois facteurs, suivant le modèle de plans en tiroirs, où le « matériel végétal » et le « paillis » sont considérés comme facteurs principaux regroupés en blocs et « l'année de mesure » comme un sous-facteur. De plus, des contrastes simples et d'interactions ont été utilisés pour identifier les différences significatives entre les traitements ou groupes de traitements (Tableau 2.1). L'effet des densités de couvert des espèces pionnières a, quant à lui, été analysé à l'aide d'ANOVA à deux facteurs, suivant toujours le modèle de plans en tiroirs où « l'année » est considérée comme un sous-facteur et la « densité de couvert » comme facteur principal (distribué aléatoirement dans le cas de l'expérience avec les éricacées ou regroupé en blocs pour celle avec *E. spissum*). Dans ces dernières analyses, les données concernant les parcelles témoins ont été exclues afin d'améliorer l'homogénéité des variances. Le tableau 2.2 décrit les ensembles de données issus des comptages et soumis à une ANOVA, ainsi que les transformations que ces données ont subi pour réduire l'hétérogénéité des variances.

Tableau 2.2 - Facteurs analysés dans les analyses de variances portant sur l'établissement de la végétation et transformations opérées sur les variables dépendantes afin de réduire l'hétérogénéité des variance. *E. spi.* = *Eriophorum spissum*; *E. ang.* = *E. angustifolium*.

Type d'expériences et espèces pionnières impliquées	Sphaignes (nb/m ²)	Sphaignes (%)	Mousses (%)	Éricacées (%)	<i>E. spi.</i> (%)	<i>E. ang.</i> (%)	Total (%)
ANOVA à 3 facteurs (matériel végétal, paillis, années, et toutes les combinaisons)							
1. Éricacées	log(x+1)	-	log(x+1)	-	/	/	-
2. <i>Eriophorum spissum</i>	log(x+1)	-	log(x+1)	log(x+1)	-	log(x+1)	-
3. <i>E. angustifolium</i>	log(x+1)	-	log(x+1)	log(x+1)	log(x+1)	-	-
ANOVA à 2 facteurs (densités de couvert, années, et toutes les combinaisons)							
4. Éricacées	log(x+1)	log(x+1)	log(x+1)	-	/	/	-
5. <i>E. spissum</i>	-	log(x+1)	-	-	-	log(x+1)	-

/ : analyse non-pertinente en raison de la présence insuffisante de l'espèce.

- : aucune transformation requise.

CHAPITRE 3 - RÉSULTATS

3.1 EFFET DU TYPE DE MATÉRIEL VÉGÉTAL RÉINTRODUIT ET DE L'AJOUT D'UN PAILLIS DANS DES COMMUNAUTÉS VÉGÉTALES DOMINÉES PAR DIFFÉRENTES PLANTES PIONNIÈRES

3.1.1 Caractérisation et comparaison des trois communautés végétales étudiées

La première série d'expériences portant sur l'effet du type de matériel végétal réintroduit et du paillis s'est déroulée simultanément dans les trois communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières. Ces communautés végétales diffèrent bien sûr par leur composition floristique et leur structure mais aussi par les propriétés de leur substrat et les conditions microclimatiques présentes à la surface du sol. L'établissement de la végétation réintroduite étant susceptible d'être influencé par tous ces facteurs, il importe en premier lieu de caractériser et comparer les trois communautés végétales où se sont déroulées les expériences.

3.1.1.1 Description du couvert végétal initial dans les trois communautés végétales

Au site de Verbois, les éricacées couvraient environ 30 % de la surface des parcelles expérimentales au début de l'expérience, i.e. avant la coupe des arbustes (Tab. 3.1). On y trouvait aussi quelques autres bryophytes, des touradons d'*Eriophorum spissum* souvent en état de dégénérescence et des bouleaux. Des sphaignes ont été observées dans une des parcelles expérimentales, mais elles y couvraient moins de 1 % de la surface.

À Président-Ouest, dans les communautés végétales dominées par *E. spissum*, cette espèce couvrait un peu plus de 30 % de la surface des parcelles expérimentales. On y trouvait aussi *E. angustifolium* et quelques mousses et jeunes pousses d'éricacées (Tab. 3.1). Aucune sphaigne n'a été trouvée dans ces parcelles quoiqu'on en ait observées à proximité.

Enfin, les parcelles recolonisées par *E. angustifolium* avaient un couvert moyen de 95 %. On y trouvait aussi quelques touradons (*E. spissum*) et des plantules d'éricacées (Tab. 3.1). C'est dans cette communauté végétale que l'on a observé le plus de sphaignes établies naturellement, près des anciens canaux de drainage. Leur présence était toutefois négligeable.

Tableau 3.1 - Couverture de la végétation initiale dans les trois communautés végétales dominées par différentes espèces pionnières (moyenne, (erreur-type)). *E. spi.* = *Eriophorum spissum*; *E. ang.* = *E. angustifolium*; P = présence (< 1 %);

	n	Sphaignes (%)	Mousses (%)	Éricacées (%)	<i>E. spi.</i> (%)	<i>E. ang.</i> (%)	Arbres (%)
Éricacées	240	P	P	28,6 (1,9)	4,9 (0,9)	0	P
<i>Eriophorum spissum</i>	30	0	P	P	33,3 (1,3)	9,5 (1,0)	0
<i>Eriophorum angustifolium</i>	30	P	0	P	2,1 (0,4)	95,8 (0,8)	0

La coupe des arbustes et des herbacées, effectuée dans le but de faciliter les réintroductions, a entraîné bien entendu des modifications à ces estimés de couvert végétal initial. Les diaspores réintroduites subissent donc plutôt l'influence de la végétation partiellement coupée, décrite plus en détails lors des estimations de couvert végétal effectuées à l'automne 1996 et 1997 (cf. section 3.1.2).

3.1.1.2 Propriétés du substrat dans les différentes communautés végétales

a) Profondeur de la nappe phréatique

La nappe phréatique se situe beaucoup plus près de la surface dans les communautés végétales dominées par les cypéracées que dans celles dominées par les éricacées (Fig. 3.1 a). De plus, la nappe phréatique est légèrement plus haute, même souvent affleurante, dans les communautés avec *Eriophorum angustifolium* que dans celles avec *E. spissum*. En 1996, la nappe phréatique se situe respectivement à 39, 15 et 10 cm sous la surface dans les communautés végétales composées des éricacées, de *E. spissum* et de *E. angustifolium*. En 1997, les moyennes sont de 49, 18 et 13 cm sous la surface dans ces mêmes communautés végétales.

b) Teneur en eau volumique de la tourbe

Les plus faibles teneurs en eau de la tourbe sont mesurées dans les communautés d'éricacées, avec une teneur en eau moyenne pour l'été 96 de 46 % (Fig. 3.1 b). L'humidité du sol est nettement supérieure à Président-Ouest. Les communautés d'*E. spissum* présentent une teneur en eau moyenne de 65 % et les communautés d'*E. angustifolium* de 68 %.

c) Tension de l'eau du sol

Comme il existe une relation directe entre la teneur en eau et la tension matricielle du sol (Pearcy *et al.*, 1991; Price, 1997), il n'est pas surprenant de mesurer des tensions plus faibles dans les communautés végétales dominées par les éricacées. Les tensions minimales sont mesurées lorsque la nappe phréatique et la teneur en eau sont aux plus bas niveaux, soit au mois d'août 1996, où elles atteignent -39 mbar (Fig. 3.1 c). À Président-Ouest, la tension matricielle est équivalente dans les deux communautés végétales de linaigrettes, soit -25 mbar à pareille date. L'eau est ainsi plus disponible pour les diaspores de sphaignes dans les communautés dominées par les linaigrettes que dans celles dominées par les éricacées.

d) Propriétés chimiques des substrats

L'analyse chimique des substrats nous permet de comparer les propriétés chimiques de la tourbe selon les sites expérimentaux et la végétation qui y pousse. On remarque, en comparant les éléments nutritifs contenus dans la tourbe des différentes communautés végétales, que les plus grandes différences se situent au niveau des éléments azote-phosphore-potassium (NPK), assimilables par les plantes (Tab. 3.2). Ces éléments existent en plus grande quantité dans le substrat prélevé à Verbois où se trouvent les communautés d'éricacées.

Même si le pH et la capacité d'échange cationique (C.E.C.) mesurés dans les deux sites demeurent dans l'échelle de définition des bogs (Wind-Mulder *et al.*, 1996), le pH est légèrement plus acide et la C.E.C. plus élevée sous les communautés d'éricacées. De plus, les quantités de calcium (Ca) de magnésium (Mg) et d'aluminium (Al) sont plus importantes sous ces communautés que sous celles dominées par les herbacées.

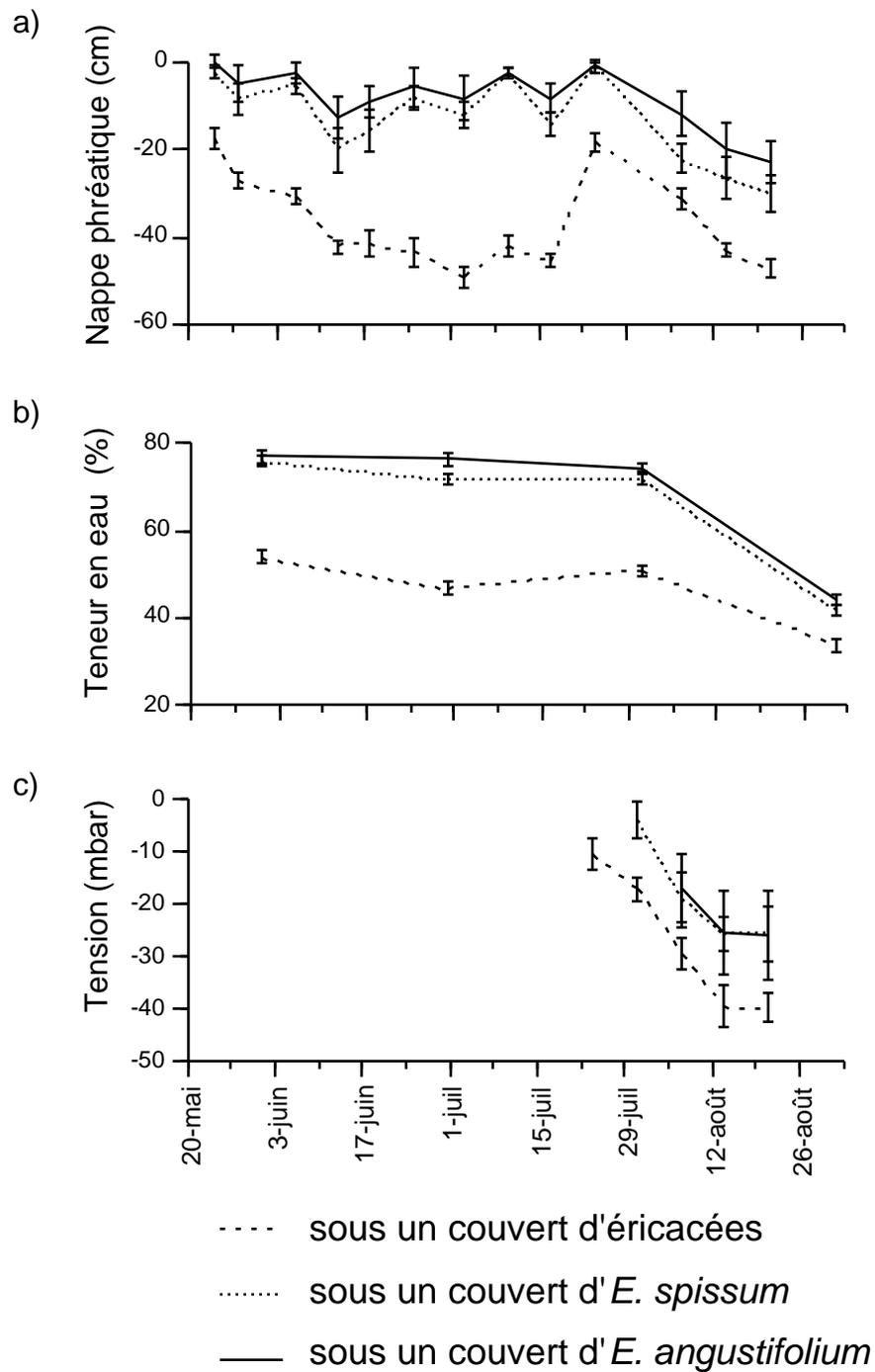


Figure 3.1 - Propriétés du substrat dans des communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières, à l'été 1996. a) Profondeur de la nappe phréatique par rapport à la surface (moyennes \pm erreur-type); b) Teneur en eau volumique de la tourbe (moyennes \pm erreur-type); c) Tension de l'eau du sol à la surface (moyennes \pm erreur-type).

À Président-Ouest, les substrats prélevés sous les communautés d'*E. angustifolium* diffèrent aussi quelque peu de ceux prélevés sous les communautés d'*E. spissum* (Tab. 3.2). Sous ces dernières, certains éléments, comme N, K, Ca et Mg, sont moins abondants.

3.1.1.3 Microclimat dans les différentes communautés végétales

a) Température à la surface du sol

La température à la surface de la tourbe est légèrement plus chaude sous le couvert des éricacées que sous le couvert des linaigrettes. Les écarts de température sont plus visibles au niveau des maxima journaliers qui sont de 2 à 3 °C plus élevés sous les éricacées (32 °C) que sous les deux espèces de linaigrettes (30 °C; Fig. 3.2 a).

b) Humidité relative à la surface du sol

L'humidité relative à l'interface air-tourbe est différente selon les communautés végétales présentes. L'humidité relative moyenne journalière est de 90, 94 et 96 % sous le couvert des éricacées, d'*E. spissum* et d'*E. angustifolium*. Les différences sont encore plus marquées au niveau des minima journaliers, qui sont en moyenne de 67, 75 et 84 % sous ces mêmes communautés végétales respectives (Fig. 3.2 b). L'air à la surface dans les communautés d'*E. angustifolium* reste donc plus humide, et ce, plus longtemps, que dans les autres communautés.

c) Luminosité à la surface du sol

Le pourcentage de rayons incidents qui sont transmis à travers la voûte végétale jusqu'au sol est de 80, 60 et 40 % sous les éricacées, l'*E. spissum* et l'*E. angustifolium* respectivement (Fig. 3.2 c). Cette dernière est donc l'espèce qui procure un plus grand ombrage aux diaspores de sphaignes réintroduites.

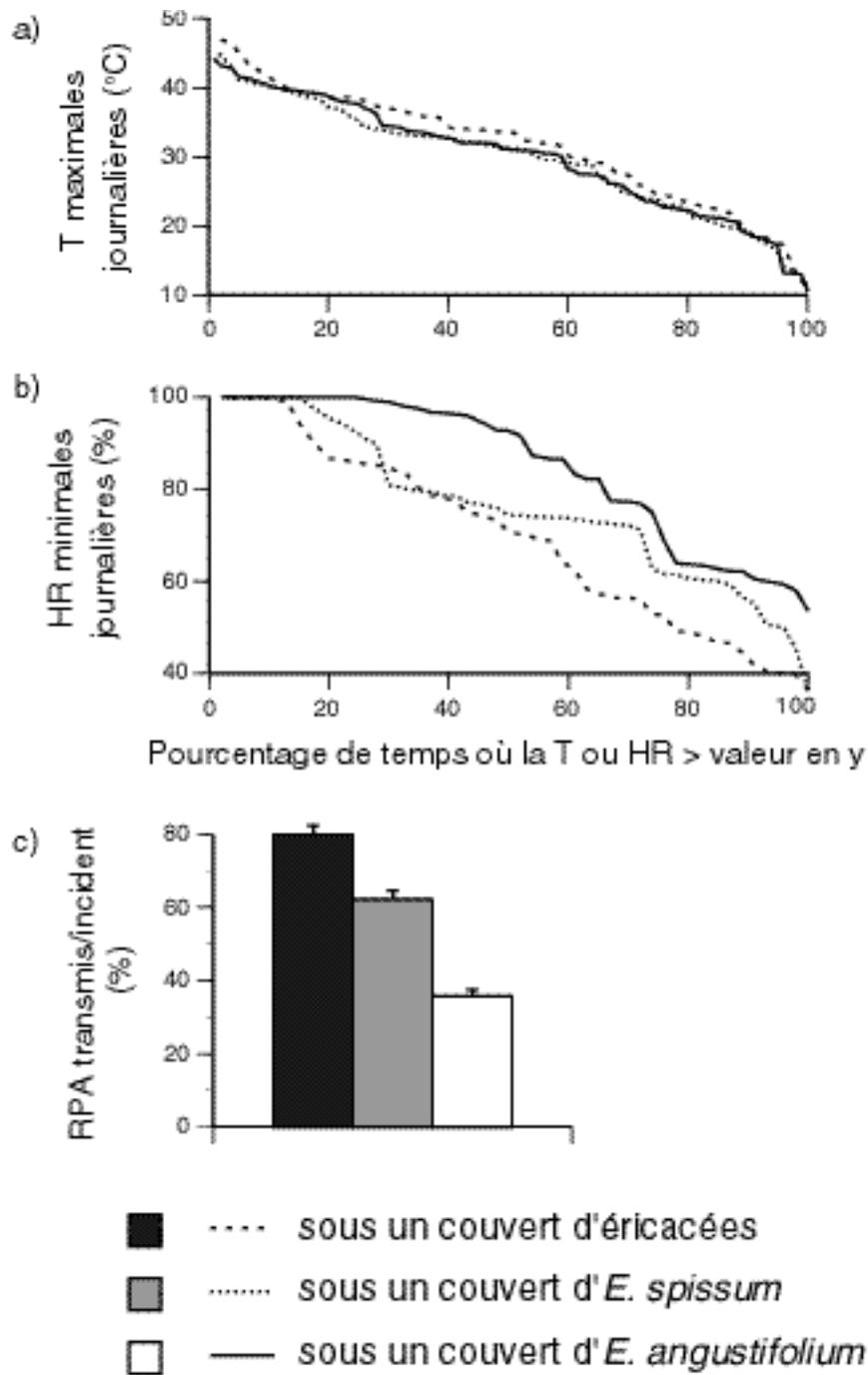


Figure 3.2 - Microclimat à la surface du sol dans des communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières. a) et b) Courbes cumulatives illustrant le pourcentage de temps où les températures (T) maximales journalières et les humidités relatives (HR) minimales journalières excèdent les valeurs exprimées en ordonnée, pour la période allant du 14 juin au 17 septembre 1996. c) Luminosité (% des RPA transmis par rapport aux RPA incidents) sous les différents couverts végétaux (moyenne \pm erreur-type) le 4 septembre 1996.

3.1.1.4 Succès d'établissement des sphaignes selon les différentes communautés végétales

Nous avons pu remarquer, au cours des paragraphes précédents, que les trois communautés végétales étudiées présentent des caractéristiques hydrologiques et microclimatiques très différentes. Il n'est donc pas surprenant que le succès d'établissement des sphaignes soit différent selon les trois communautés végétales. Pour obtenir une meilleure idée de ces différences, nous avons comparé le succès d'établissement des sphaignes lorsque le matériel réintroduit est récolté manuellement et qu'aucun paillis n'est ajouté (Fig. 3.3). On peut voir que le succès de recolonisation des sphaignes est nettement supérieur sous les couverts d'*E. angustifolium* et d'*E. spissum* que sous les éricacées. Les sphaignes semblent aussi préférer le couvert des linaigrettes à feuilles étroites plutôt que celui des linaigrettes denses, mais la grande variabilité des résultats ne nous permet pas d'en être certain.

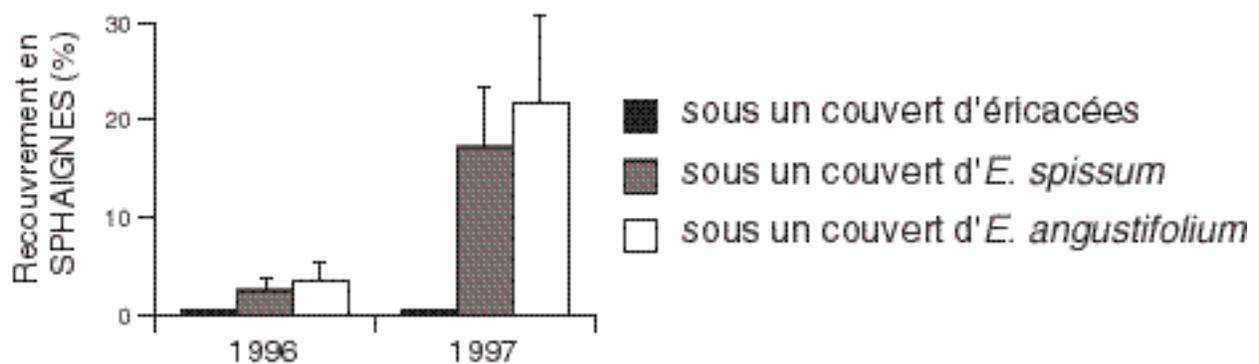


Figure 3.3 - Comparaison de l'établissement des sphaignes, réintroduites à partir d'un matériel végétal récolté manuellement, dans des communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières, et ce, après une et deux saisons de croissance (moyennes sans paille \pm erreur-type).

En conclusion, la nappe phréatique est plus près de la surface, la teneur en eau de la tourbe et la tension de l'eau du sol sont plus élevées dans les communautés dominées par les linaigrettes que dans celles dominées par les éricacées. L'eau est ainsi plus disponible aux diaspores de sphaignes dans les communautés végétales de linaigrettes.

L'interface air-tourbe est légèrement plus fraîche, beaucoup plus humide et plus ombragée sous les linaigrettes (particulièrement sous *E. angustifolium*) que sous les éricacées. Le microclimat est donc plus favorable pour les sphaignes réintroduites dans les communautés de linaigrettes que dans celles d'éricacées.

Enfin, on observe un meilleur établissement des sphaignes dans les communautés végétales dominées par les linaigrettes, particulièrement par *E. angustifolium*, que dans celle dominée par les éricacées.

3.1.2 Effet du type de matériel végétal réintroduit sur l'établissement de la végétation

3.1.2.1 Sous le couvert d'éricacées

Un plus grand nombre de sphaignes survivent et s'établissent à partir du matériel végétal récolté manuellement plutôt que mécaniquement. Par contre, ces différences entre les deux types de matériel deviennent significatives seulement après deux saisons de croissance (Tab. 3.3; Fig. 3.4 a). En 1997, que la paille soit ajoutée ou non, on dénombre près de 250 individus/m² lorsque le matériel réintroduit a été récolté à la main, comparé à 40 ind./m² pour celui récolté mécaniquement. Avec ce dernier type de matériel végétal, non seulement l'établissement des sphaignes demeure bas mais il n'évolue pas au fil des ans. Pratiquement aucune recolonisation naturelle n'a été observée dans les parcelles témoins n'ayant reçu aucune réintroduction. Malgré les différences observées en terme de nombre d'individus, les pourcentages de recouvrement en sphaignes entre les traitements ne diffèrent pas significativement, les valeurs étant trop faibles et variables (Tab. 3.3). Les tendances restent cependant les mêmes, avec des recouvrements en sphaignes moyens, en 1997, de 2,4 % lorsque le matériel réintroduit est récolté à la main et de 0,2 % avec celui récolté mécaniquement (Fig. 3.4 b).

La recolonisation par les bryophytes autres que les sphaignes est aussi influencée par le type de matériel végétal réintroduit, mais de façon différente (Tab. 3.3; Fig. 3.4 c). Contrairement aux sphaignes, ces mousses sont légèrement moins abondantes dans les parcelles ensemencées avec le matériel récolté à la main (presque 2 % en 1997) que dans celles ayant reçu du matériel récolté à l'aide de machinerie ou sans réintroduction (3 % en 1997).

Le recouvrement par les plantes vasculaires après une ou deux saisons de croissance n'est pas influencé par les réintroductions (Tab. 3.3). Les herbacées sont pratiquement absentes et ont été exclues des analyses. Quant aux éricacées, espèces colonisatrices de ce site, elle ont un couvert moyen de 14 % en 1996 et de 21 % en 1997, peu importe qu'il y ait eu ou non réintroduction ou le type de matériel réintroduit. Il est intéressant de noter que, même après deux saisons de croissance, les couverts d'éricacées demeurent sous les 30 % observés au début de l'expérience, alors que les arbustes n'avaient pas encore été coupés (Tab. 3.1).

3.1.2.2 Sous le couvert d'*Eriophorum spissum*

Le mode de récolte du matériel végétal réintroduit influence aussi l'établissement des sphaignes dans la communauté végétale dominée par *E. spissum* (Tab. 3.4). Le nombre d'individus/m² ainsi que le recouvrement en sphaignes sont plus élevés lorsque les diaspores réintroduites sont récoltées manuellement plutôt que mécaniquement (Fig. 3.4 d et e). En 1997, que la paille soit ajoutée ou non, on dénombre 825 ind./m² (14 %) avec le matériel récolté manuellement comparé à 570 ind./m² (7 %) avec celui récolté mécaniquement. Les parcelles témoins où aucune réintroduction n'a eu lieu présentent de très faibles succès de recolonisation naturelle par les sphaignes (22 ind./m² ou moins de 1 % en 1997).

Le type de matériel végétal utilisé influence aussi la recolonisation par les autres bryophytes (Tab. 3.4; Fig. 3.4 f). Celles-ci sont plus abondantes dans les parcelles sans réintroduction (près de 15 % en 1997) que dans celles ayant reçu du matériel végétal (recouvrement moyen de 7 %). Après deux saisons de croissance, on observe aussi un recouvrement en mousses supérieur lorsque le matériel de réintroduction est récolté mécaniquement plutôt qu'avec celui récolté manuellement. En effet, le recouvrement en *E. angustifolium* est aussi influencé par le type de matériel végétal réintroduit (Tab. 3.4; Fig. 3.4 g). L'établissement de cette herbacée est favorisé par les réintroductions de matériel végétal récolté mécaniquement (25 % en 1997) comparé aux réintroductions de matériel récolté manuellement ou aux parcelles sans réintroduction (16 % dans les deux cas en 1997).

La recolonisation par les autres plantes vasculaires n'est pas influencé par les réintroductions (Tab. 3.4). Les éricacées ne représentent qu'un très faible pourcentage du couvert végétal (1 % en 1997). La linaigrette dense, espèce dominante de cette communauté végétale, couvre environ 23 % de la surface en 1996 et 55 % en 1997. Quand on considère le pourcentage de recouvrement initial mesuré avant la coupe du feuillage (33 %; Tab. 3.1), on constate que l'*E. spissum* retrouve et même dépasse ce couvert initial en moins de deux ans.

Tableau 3.3 - Valeurs de F obtenues lors de l'analyse de variance à trois facteurs et des contrastes décrivant l'effet du type de matériel végétal réintroduit (récolté manuellement (man), récolté mécaniquement (méc) et aucune réintroduction (tém)), de la paille (avec ou sans) et de l'année de mesure (1996 et 1997) sur l'établissement de la végétation, et ce, dans la communauté d'éricacées (en gras).

Source de variation	d.f.	Sphaignes (nb/m ²)	Sphaignes (%)	Mousses (%)	Éricacées (%)	Total (%)
ANOVA						
Blocs	4	2,29	1,15	5,62	6,49	6,78
Matériel végétal (Mat)	2	7,54**	2,24	3,55*	0,10	0,08
Paille	1	4,54*	2,16	7,81**	0,15	1,00
Mat x Paille	2	1,44	1,88	0,07	0,13	0,27
Erreur a	20					
Année (An)	1	8,5**	2,68	5,21*	28,26***	14,69***
Mat x An	2	6,35**	2,43	0,06	0,90	1,43
Paille x An	1	0,57	2,25	1,09	5,41*	1,85
Mat x Paille x An	2	0,71	2,15	1,23	0,82	0,65
Erreur b	24					
Total	59					
CONTRASTES						
Mat:						
man vs méc	1	0,44	2,75	4,39*	0,01	0,06
tém vs autres	1	14,64**	1,72	2,70	0,20	0,10
Mat x Paille:						
(man vs méc) x Paille	1	0,15	2,65	0,00	0,26	0,54
(tém vs autres) x Paille	1	2,72	1,11	0,15	0,00	0,00
Mat x Année:						
(man vs méc) x An	1	9,84**	3,55	0,12	0,00	0,19
(tém vs autres) x An	1	2,86	1,3	0,00	1,79	2,67
Mat x Paille x An:						
(man vs méc) x Paille x An	1	0,61	3,15	1,38	0,25	0,42
(tém vs autres) x Paille x An	1	0,82	1,16	1,09	1,38	0,87

* $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$.

Tableau 3.4 - Valeurs de F obtenues lors de l'analyse de variance à trois facteurs et des contrastes décrivant l'effet du type de matériel végétal réintroduit (récolté manuellement (man), récolté mécaniquement (méc) et aucune réintroduction (tém)), de la paille (avec ou sans) et de l'année de mesure (1996 et 1997) sur l'établissement de la végétation, et ce, dans la communauté d'*Eriophorum spissum* (en gras). *E. spi.* = *E. spissum*; *E. ang.* = *E. angustifolium*.

Source de variation	d.f.	Sphaignes (nb/m ²)	Sphaignes (%)	Mousses (%)	Éricacées (%)	<i>E. spi.</i> (%)	<i>E. ang.</i> (%)	Total (%)
ANOVA								
Blocs	4	3,39	3,32	5,33	5,69	4,88	2,36	2,62
Matériel végétal (Mat)	2	70,83***	10,35***	3,55*	0,81	0,60	3,87*	0,38
Paille	1	2,8	0,23	0,34	0,26	0,03	0,42	0,02
Mat x Paille	2	2,89	2,71	0,97	0,42	0,22	0,16	0,99
Erreur a	20							
Année (An)	1	7,38*	20,61***	5,81*	7,52*	79,44***	52,26***	116,3***
Mat x An	2	1,02	6,43**	4,7*	1,09	0,35	0,36	0,04
Paille x An	1	0,56	0,19	0,53	5,82*	0,95	0,03	2,36
Mat x Paille x An	2	2,02	1,94	0,28	1,31	0,18	0,12	0,18
Erreur b	24							
Total	59							
CONTRASTES								
Mat:								
man vs méc	1	7,68*	5,15*	1,87	1,46	0,04	3,92*	0,74
tém vs autres	1	133,99***	15,54***	5,23*	0,17	1,16	3,83	0,01
Mat x Paille:								
(man vs méc) x Paille	1	2,33	5,30	0,18	0,02	0,14	0,02	1,91
(tém vs autres) x Paille	1	3,45	0,11	1,77	0,83	0,30	0,30	0,07
Mat x Année								
(man vs méc) x An	1	0,00	2,84	9,21**	1,49	0,35	0,00	0,00
(tém vs autres) x An	1	2,05	10,01**	0,20	0,69	0,36	0,71	0,07
Mat x Paille x An								
(man vs méc) x Paille x An	1	3,65	3,78	0,12	2,41	0,12	0,06	0,10
(tém vs autres) x Paille x An	1	0,38	0,09	0,43	0,21	0,24	0,18	0,26

* $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$.

3.1.2.3 Sous le couvert de l'*Eriophorum angustifolium*

Comme dans les autres communautés végétales, l'établissement des sphaignes est favorisé par l'application de matériel végétal récolté à la main (1170 ind./m² en 1997) par rapport à celui récolté mécaniquement (650 ind./m²; Tab. 3.5; Fig. 3.4 h). Même si on observait la présence de sphaignes dans certaines parcelles au début de l'expérience, la recolonisation naturelle par celles-ci dans les parcelles témoins demeure minimale. Au niveau du pourcentage de recouvrement en sphaignes, les différences entre les traitements sont moins nettes, en raison d'une grande variabilité, mais on peut observer des tendances similaires (Fig. 3.4 i).

Les réintroductions n'influencent pas vraiment le succès d'implantation des autres bryophytes, quoique l'analyse des contrastes nous laisse voir une interaction significative entre les parcelles témoins et celles avec réintroduction, en fonction de l'année (Tab. 3.5). Cette interaction est causée par le fait que les bryophytes, après deux ans, ont tendance à couvrir légèrement plus de surface dans les parcelles témoins (Fig. 3.4 j).

Finalement, le recouvrement des plantes vasculaires n'est pas influencé par les réintroductions (Tab. 3.5). Les éricacées et l'*E. spissum* sont très peu abondantes et couvrent toute deux, en moyenne, un peu plus de 1 % de la surface en 1997. L'espèce dominante, *E. angustifolium*, couvre moins de 15 % de la surface en 1996 mais prend rapidement de l'expansion pour atteindre un recouvrement de 75 % en 1997. Ces recouvrements se situent en dessous de ceux estimés initialement avant la coupe des plantes (95 % ; Tab. 3.1). Finalement, si l'on tient compte du bon succès d'établissement des sphaignes, l'influence des réintroductions est visible sur le couvert végétal total que l'on estime à 86 % en 1997 dans les parcelles avec matériel réintroduit, soit 8 % de plus que dans les parcelles témoins (Tab. 3.4).

En conclusion, le type de matériel végétal réintroduit a surtout un impact sur l'implantation des sphaignes et des autres bryophytes. Dans les trois communautés végétales étudiées, le matériel récolté manuellement, ne comprenant que des fragments de bryophytes, entraîne un meilleur succès d'établissement des sphaignes. Au contraire des sphaignes, les autres bryophytes couvrent en général plus de surface quand aucun matériel n'est réintroduit. Finalement, à part une exception, le matériel récolté mécaniquement et incluant toute la végétation de surface d'une tourbière naturelle ne permet pas une recolonisation plus grande par les espèces vasculaires telles que les éricacées et les linaigrettes.

Tableau 3.5 - Valeurs de F obtenues lors de l'analyse de variance à trois facteurs et des contrastes décrivant l'effet du type de matériel végétal réintroduit (récolté manuellement (man), récolté mécaniquement (méc) et aucune réintroduction (tém)), de la paille (avec ou sans) et de l'année de mesure (1996 et 1997) sur l'établissement de la végétation, et ce, dans la communauté d'*Eriophorum angustifolium* (en gras). *E. spi.* = *E. spissum*; *E. ang.* = *E. angustifolium*.

Source de variation	d.f.	Sphaignes (nb/m ²)	Sphaignes (%)	Mousses (%)	Éricacées (%)	<i>E. spi.</i> (%)	<i>E. ang.</i> (%)	Total (%)
ANOVA								
Blocs	4	7,71	3,85	2,85	2,30	3,11	14,11	23,61
Matériel végétal (Mat)	2	90,15***	7,01**	2,00	0,28	0,76	1,59	7,20**
Paille	1	0,88	0,12	0,03	0,28	0,90	0,47	4,18
Mat x Paille	2	0,65	0,12	1,06	0,19	1,07	2,17	1,09
Erreur a	20							
Année (An)	1	12,31**	15,71***	46,59***	12,66**	0,39	1155,5** *	1448,4** *
Mat x An	2	0,90	4,23*	3,12	0,18	1,69	0,12	0,72
Paille x An	1	0,27	0,02	0,52	0,25	0,30	4,39	2,28
Mat x Paille x An	2	0,57	0,28	0,20	0,60	0,86	0,64	0,30
Erreur b	24							
Total	59							
CONTRASTES								
Mat:								
man vs méc	1	10,43**	4,21	3,55	0,05	0,79	2,46	0,31
tém vs autres	1	169,87***	9,81**	0,45	0,52	0,74	0,73	14,08**
Mat x Paille:								
(man vs méc) x Paille	1	0,00	0,25	0,36	0,35	0,71	0,34	1,86
(tém vs autres) x Paille	1	1,30	0,00	1,75	0,03	1,43	4,00	0,33
Mat x Année								
(man vs méc) x An	1	0,00	2,15	0,59	0,09	2,72	0,01	0,64
(tém vs autres) x An	1	1,80	6,31*	5,66*	0,27	0,65	0,23	0,81
Mat x Paille x An								
(man vs méc) x Paille x An	1	0,50	0,53	0,01	0,41	0,98	0,14	0,60
(tém vs autres) x Paille x An	1	0,64	0,03	0,39	0,79	0,75	1,13	0,00

* $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$.

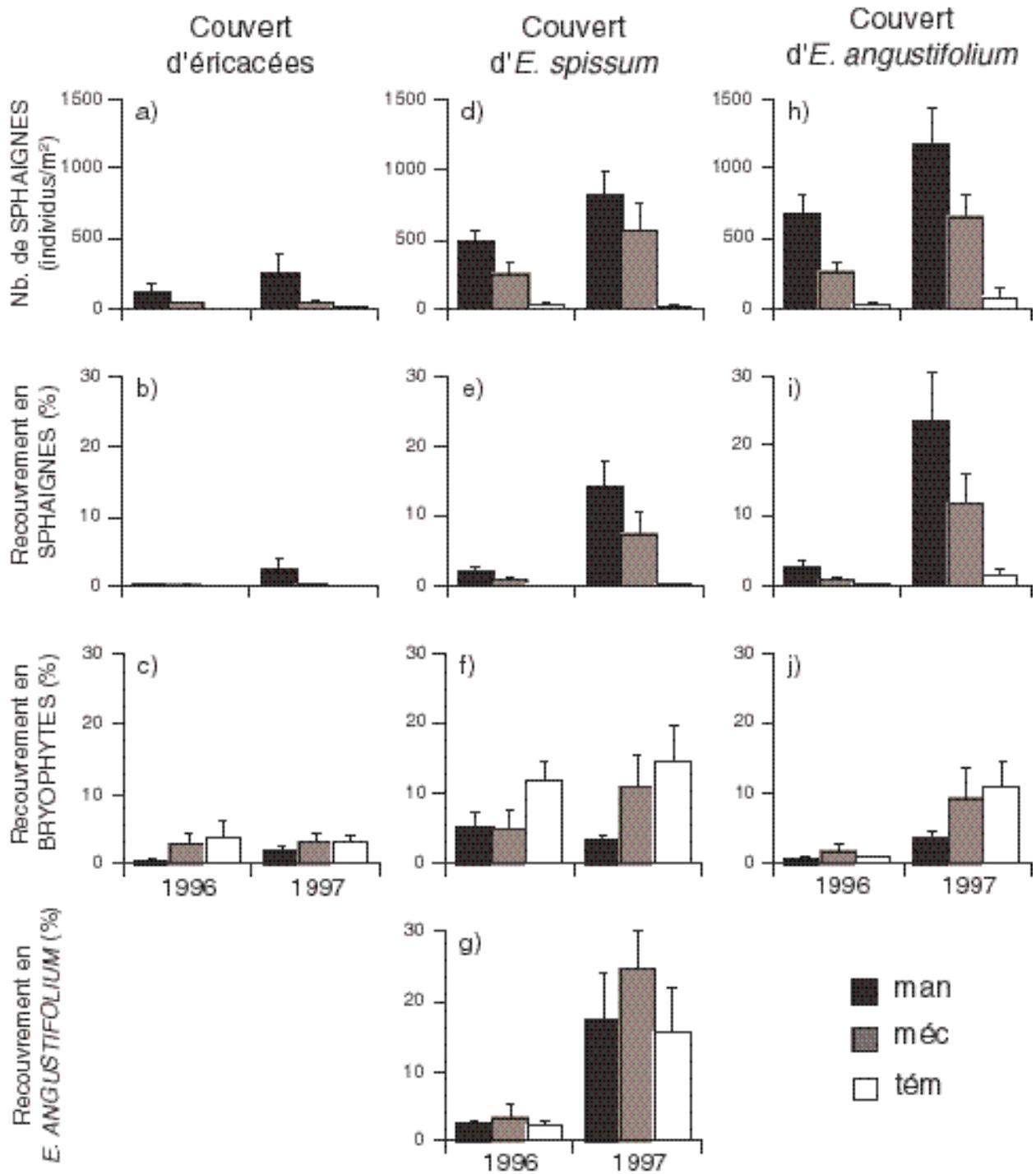


Figure 3.4 - Effet du type de matériel végétal réintroduit sur l'établissement de la végétation (moyenne avec et sans paille \pm erreur-type) après une et deux saisons de croissance dans des communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières (éricacées (a, b, c): 14% de recouvrement en 1996 et 21% en 1997; *E. spissum* (d, e, f, g): 23% en 1996 et 55% en 1997; *E. angustifolium* (h, i, j): 15% en 1996 et 75% en 1997). man = matériel végétal récolté manuellement; méc = matériel récolté mécaniquement; tém = aucune réintroduction.

3.1.3 Effet d'un paillis additionnel dans les différentes communautés végétales

3.1.3.1 Effet d'un paillis sur l'établissement de la végétation

a) Sous le couvert d'éricacées

Dans cette communauté végétale de type arbustive, l'ajout d'un paillis de paille permet un meilleur établissement des sphaignes, et ce, peu importe le type de matériel réintroduit (Tab. 3.3; Fig. 3.5 a). On compte environ sept fois plus de sphaignes sous le couvert de paille et d'éricacées que sous le couvert des éricacées seulement. Les mêmes tendances sont observées pour le pourcentage de recouvrement en sphaignes, mais sans différence significative (Fig. 3.5 b).

La présence de paille procure aussi un léger avantage pour l'établissement des autres bryophytes (Tab. 3.3). En 1997, celles-ci couvrent près de 3 % de la surface lorsque protégées d'un paillis comparé à 2 % en absence de paille. Pour les éricacées, on observe une interaction légèrement significative entre les facteurs paille et année : leur recouvrement en présence de paille est légèrement plus élevé la première année (15 % avec paille, 12 % sans paille) mais plus bas la deuxième année (19 % avec paille, 23 % sans paille ; Tab. 3.3). Étant donné que ces éricacées sont des plantes vasculaires déjà établies depuis un certain temps, ces différences semblent discutables du point de vue biologique.

b) Sous le couvert d'*Eriophorum spissum*

Dans ce type de communauté végétale, la présence de paille n'entraîne pas un meilleur établissement des sphaignes, que ce soit en terme de quantité d'individus ou de recouvrement (Tab. 3.4; Fig. 3.5 c et d). Le recouvrement par les autres bryophytes et herbacées n'est pas non plus influencé par l'ajout de paille. Par contre, les éricacées présentent un recouvrement légèrement supérieur après deux saisons de croissance lorsque protégées d'un paillis (3 % avec paille, 1,4 % sans paille; Tab. 3.4). Contrairement à la communauté d'éricacées, où celles-ci sont bien établies, les éricacées présentes dans la communauté de linaigrettes denses sont encore au stade de plantule. Elles sont donc plus susceptibles d'être influencées par l'effet protecteur d'un paillis ou par l'effet fertilisant potentiel de celui-ci.

c) Sous le couvert d'*Eriophorum angustifolium*

Comme dans la communauté végétale précédente, l'ajout de paille ne permet pas un meilleur établissement des sphaignes (Tab. 3.5; Fig. 3.5 e et f). La recolonisation par les autres plantes présentes (bryophytes, éricacées et herbacées) n'est pas non plus influencée par l'ajout de paille (Tab. 3.5).

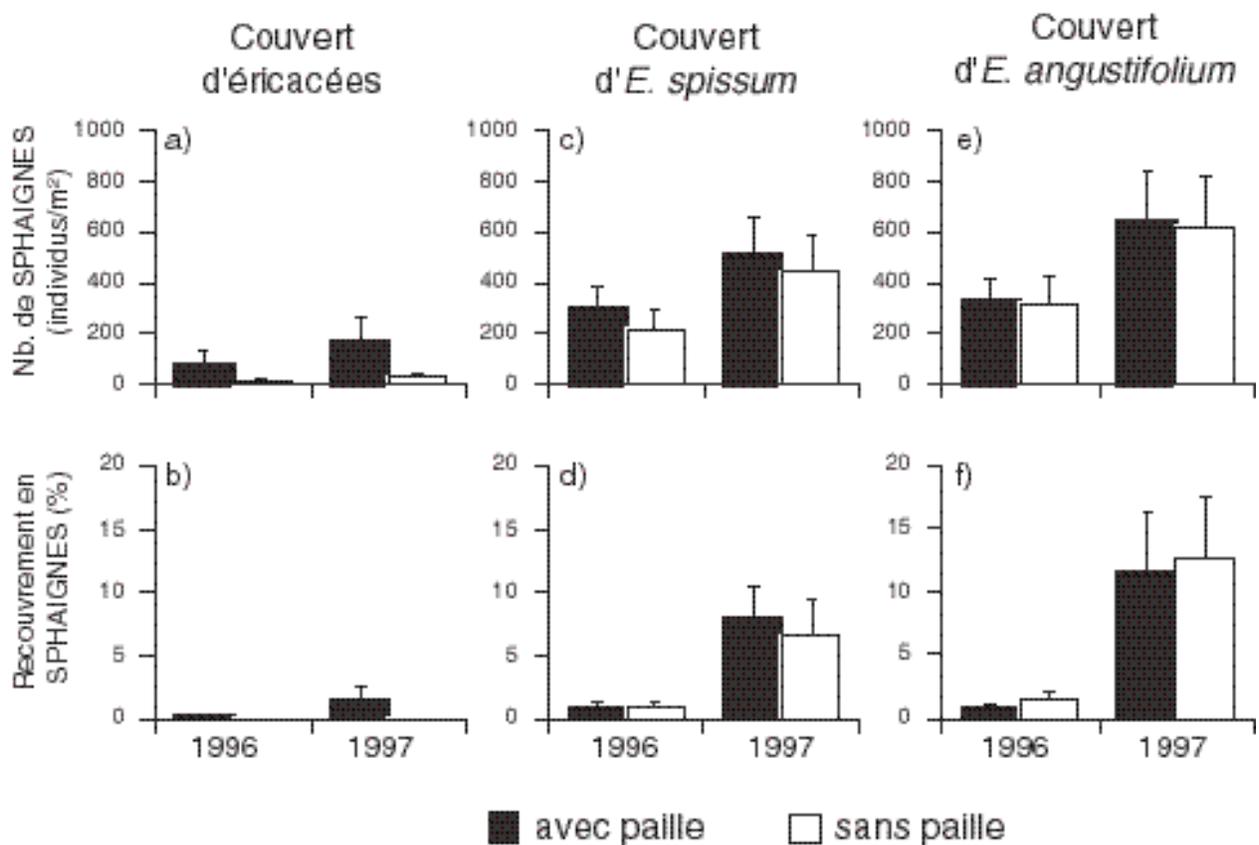


Figure 3.5 - Effet de l'ajout d'un paillis sur l'établissement de la végétation (moyenne des différents types de matériel végétal \pm erreur-type) après une et deux saisons de croissance dans des communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières (éricacées (a, b): 14% de recouvrement en 1996 et 21% en 1997; *E. spissum* (c, d): 23% en 1996 et 55% en 1997; *E. angustifolium* (e, f): 15% en 1996 et 75% en 1997).

3.1.3.2 Effet d'un paillis sur les propriétés du substrat

Le seul paramètre physique mesuré relatif aux propriétés des substrats et pouvant être affecté par l'addition de paille est la teneur en eau volumique de la tourbe. Les analyses statistiques effectuées pour chaque communauté végétale indiquent qu'il n'y a pas de différences de teneur en eau entre les surfaces couvertes de paille et celles dépourvues de paille (Tab. 3.6).

Tableau 3.6 - Teneur en eau volumique de la tourbe (%) en fonction de la présence d'un paillis, et ce, dans les trois communautés végétales dominées par différentes espèces pionnières (moyenne de l'été 1996 (erreur-type)). n = 30.

Espèces pionnières	teneur en eau (%)	
	avec paille	sans paille
Éricacées	46,2 (1,6)	46,3 (1,6)
<i>Eriophorum spissum</i>	64,9 (0,6)	65,7 (0,6)
<i>Eriophorum angustifolium</i>	66,5 (1,0)	69,2 (1,0)

3.1.3.3 Effet d'un paillis sur le microclimat

a) Température à la surface du sol

L'ajout d'un paillis de paille modifie la température à l'interface air-tourbe, particulièrement au niveau des températures extrêmes, et ce, dans les trois communautés végétales étudiées. Les courbes cumulatives présentées à la figure 3.6 illustrent le pourcentage de temps où les maxima et minima journaliers excèdent les valeurs exprimées en ordonnée. Ces courbes montrent bien qu'en général, les températures maximales sont moins chaudes et les températures minimales sont plus chaudes sous la paille. Selon les moyennes générales pour l'été 1996, la présence de paille réduit les températures maximales journalières de 3,5 °C sous le couvert des éricacées, de 1 °C sous le couvert d'*E. spissum* et de 2 °C sous le couvert d'*E. angustifolium*. La paille permet aussi de maintenir les températures minimales journalières à la surface du sol légèrement plus chaudes sous

les couverts des éricacées et d'*E. angustifolium* (écarts de 1 °C), mais cet effet n'est pas visible sous le couvert d'*E. spissum*. La température au sol sous la paille se maintient donc en général plus fraîche le jour et légèrement plus chaude la nuit que lorsque aucun paillis n'est ajouté.

La paille a un impact plus prononcé sur la température à la surface du sol dans les communautés d'éricacées que dans les autres communautés. Ainsi, la température moyenne journalière sous le couvert combiné d'éricacées et de paille est équivalente à celles mesurées sous les couverts des deux espèces de linaigrettes (17 °C). La température maximale journalière est même plus fraîche sous le couvert combiné d'éricacées et de paille (28 °C) que sous les couverts des deux espèces de linaigrettes (30°C).

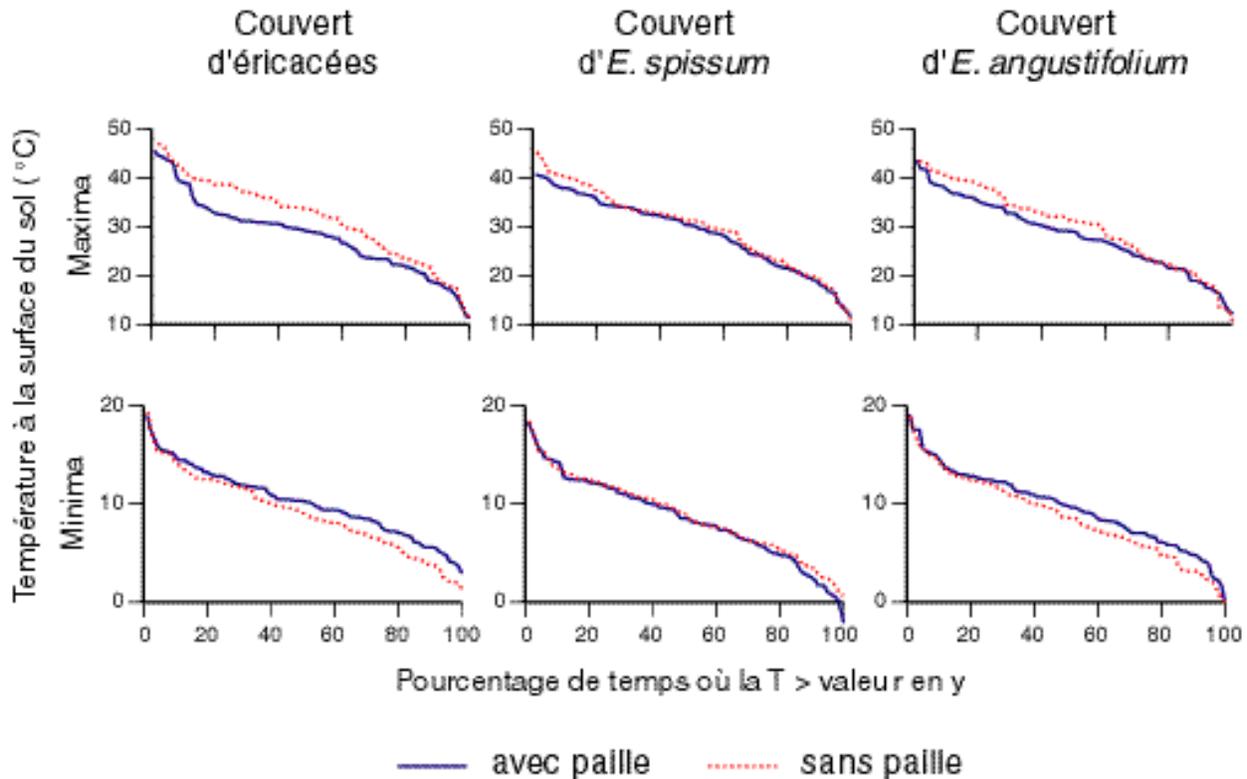


Figure 3.6 - Effet de la paille sur la température à la surface du sol dans des communautés végétales dominées par différentes plantes pionnières. Les courbes cumulatives illustrent le pourcentage de temps où les températures (maxima et minima journaliers) excèdent les valeurs exprimées en ordonnée, et ce, pour la période allant du 14 juin au 17 septembre 1996.

b) Humidité relative à la surface du sol

Quelle que soit la communauté végétale, la présence d'un paillis n'affecte pas vraiment l'humidité relative à la surface du sol. Les moyennes générales, de même que les maxima et minima journaliers entre parcelles avec paille et parcelles sans paille ne diffèrent pas.

c) Luminosité à la surface du sol

La luminosité à la surface du sol entre surfaces avec paille ou sans paille a été mesurée sous les couverts d'éricacées seulement. Sous ces conditions, le couvert de paille intercepte presque 50 % des rayons incidents photosynthétiquement actifs (RPA) (Fig. 3.7). L'ajout d'un paillis combiné aux couverts d'éricacées procure ainsi un ombrage qui équivaut à celui généré par le couvert de linaigrettes à feuilles étroites (cf. Fig. 3.2).

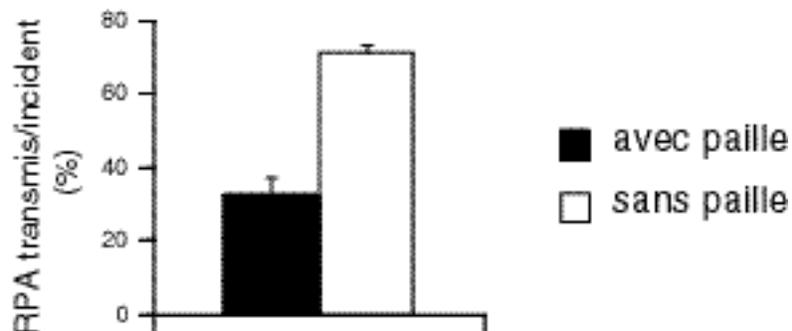


Figure 3.7 - Effet de la paille sur la luminosité (rayons photosynthétiquement actifs (RPA)) à la surface du sol dans la communauté végétale dominées par les éricacées (moyenne \pm erreur-type), mesurée le 4 septembre 1996.

3.1.3.4 Éléments nutritifs libérés par le paillis

Les analyses chimiques effectuées sur des échantillons de paille prélevés sur le terrain à différents moments au cours de l'été 1996 révèlent que le potassium (K) est le principal élément libéré par la paille (Tab. 3.7). On note aussi, au cours de l'été, un lessivage des autres éléments, particulièrement le phosphore (P), calcium (Ca), azote (N) et magnésium (Mg). Par contre, les analyses ne permettent pas de distinguer sous quelles formes l'N est libéré. Le K et le P sont lessivés de la paille surtout dans les deux premiers mois, contrairement aux autres éléments qui sont libérés plus graduellement.

L'analyse chimique du filtrat de paille montre sensiblement les mêmes résultats mais avec quelques détails supplémentaires (Tab. 3.8). Les éléments nutritifs présents en plus grande quantité dans le filtrat sont le K, suivis du sulfate (SO_4), du P, du Ca, du sodium (Na), de l'N sous forme d'ammonium (NH_4) et du Mg. On peut aussi constater que le filtrat est légèrement acide, avec un pH de 6.

En conclusion, l'ajout d'un paillis de paille permet un meilleur établissement des sphaignes, mais seulement dans les communautés végétales dominées par les éricacées. La paille procure aussi un avantage aux autres bryophytes qui s'établissent sous ces arbustes. Les éricacées au stade de plantule, comme on observe dans la communautés d'*E. spissum*, semblent aussi bénéficier de la présence d'un paillis.

En général, la présence de paille crée des températures à la surface du sol plus fraîches le jour et légèrement plus chaudes la nuit, de même qu'elle réduit de moitié la luminosité à la surface du sol. Par contre, le paillis n'influence pas l'humidité relative à l'interface tourbe-air ou la teneur en eau de la tourbe. Finalement, la paille peut avoir un effet fertilisant sur la végétation sous-jacente en libérant, notamment, du potassium.

3.2 EFFET DES DENSITÉS DES PLANTES PIONNIÈRES

L'effet des densités des plantes pionnières sur l'établissement de la végétation réintroduite a été évalué dans les communautés végétales composées d'éricacées et celles composées d'*Eriophorum spissum*. Dans le premier cas, deux catégories de densités ont été sélectionnées selon les densités naturellement présentes sur le site. Par contre, dans le cas des linaigrettes denses, deux densités ont été créées artificiellement en enlevant un certain nombre de touradons, perturbant ainsi le milieu naturel. Comme l'approche est très différente, l'effet des densités de couvert de ces deux plantes pionnières sur les paramètres mesurés sera traité de façon séparée.

3.2.1 Caractérisation et comparaison des densités d'éricacées étudiées

3.2.1.1 Description des densités d'éricacées et de leur évolution

La première question à se poser est quel est le couvert réel en éricacées et son évolution dans les différentes catégories de densités? Les estimés effectués au début de l'expérience, i.e. avant la coupe des éricacées, révèlent que la densité dite faible (D1) est caractérisée par un recouvrement moyen de 27 %, tandis que la densité désignée forte (D2) se démarque avec un recouvrement de 95 % (Tab. 3.9). Évidemment, la coupe des arbustes, effectuée dans le but de permettre un meilleur contact des diaspores réintroduites avec le substrat, modifie ces estimations. La faible densité en éricacées est estimée à environ 10 % après une saison de croissance et atteint 20 % après deux saisons de croissance (Tab. 3.10; Fig. 3.8). Quant à la densité forte, elle est significativement différente de la plus faible mais n'évolue pas au fil des ans (40 % de recouvrement en 1996 et 1997). Notons que même après deux saisons de croissance, les recouvrement en éricacées demeurent sous les valeurs estimées au début de l'expérience, alors que les arbustes n'avaient pas encore été coupés.

Au début de l'expérience, les deux catégories de densités naturelles sélectionnées ne diffèrent pas seulement au niveau du couvert d'éricacées. Les bryophytes autres que les sphaignes, les linaigrettes denses, de même que les arbres couvrent une plus grande superficie dans les zones fortement recolonisées en éricacées que dans les zones à moins forte densité (Tab. 3.9). Les éricacées demeurent néanmoins les espèces dominantes et les plus susceptibles d'influencer l'établissement de la végétation réintroduite. De plus, c'est sous les couverts denses d'arbustes que l'on a observé le plus de sphaignes naturellement établies (Tab. 3.9). Nous avons été très étonnée de découvrir, lors de la coupe des arbustes dans une parcelle en particulier, de belles petites colonies de sphaignes blotties au creux des buissons.

Tableau 3.9 - Couverture de la végétation initiale dans les deux catégories de densité d'éricacées (en gras; moyenne, (erreur-type)). Dans une même colonne, les moyennes significativement différentes ($P = 0,05$) sont distinguées par des lettres différentes. *E. spi.* = *Eriophorum spissum*; n = 48.

Densités de couvert d'éricacées	Sphaignes (%)	Mousses (%)	<i>E. spi.</i> (%)	Éricacées (%)	Arbres (%)
faible (D1)	0 A (0)	0,2 A (0,4)	2 A (1)	27 A (5)	0,2 A (0,2)
forte (D2)	1,5 B (0,7)	6,5 B (1,8)	12,8 B (3,1)	94 B (1)	6,7 B (0,5)

Tableau 3.10 - Valeurs de F obtenues lors de l'analyse de variance à deux facteurs décrivant l'effet de la densité d'éricacées (en gras; D1 et D2) et de l'année de mesure (1996 et 1997) sur l'établissement de la végétation.

Source de variation	d.f.	Sphaignes (nb/m ²)	Sphaignes (%)	Mousses (%)	Éricacées (%)	Total (%)
ANOVA						
Densités	1	0,08	0,10	4,26	8,33*	16,92*
Erreur a	4					
Années	1	1,71	8,53*	2,89	3,97	9,16*
Densités x Années	1	0,89	0,20	0,13	3,52	4,08
Erreur b	10					
Total	17					

* $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$.

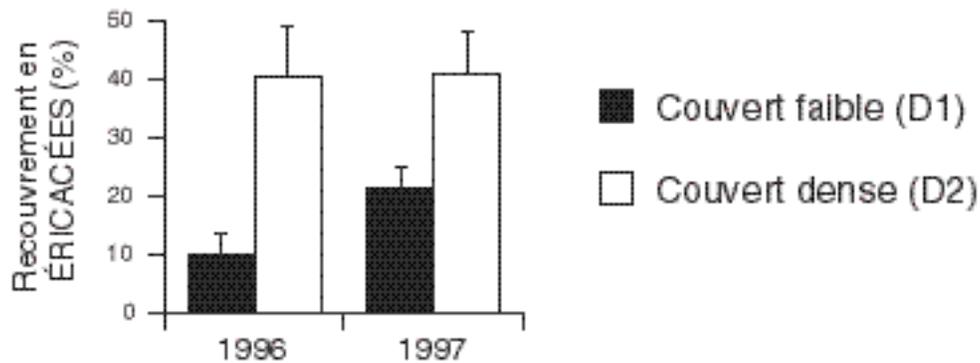


Figure 3.8 - Couvert d'éricacées et son évolution selon les deux catégories de densité naturelle sélectionnées dans cette communautés (moyenne \pm erreur-type).

3.2.1.2 Propriétés du substrat selon les densités d'éricacées

a) Profondeur de la nappe phréatique

Que ce soit à l'été 1996 ou 1997, la nappe phréatique se maintient plus près de la surface lorsque le couvert d'éricacées est plus dense (Fig. 3.9 a).

b) Teneur en eau volumique de la tourbe

La teneur en eau par volume de la tourbe n'est pas différente selon les densités d'éricacées ($P = 0,4$; Fig. 3.9 b). Le contenu en humidité décroît au cours de l'été, avec un maximum de 52 % en mai et un minimum de 32 % en août 1996.

c) Tension de l'eau du sol

La densité du couvert arbustif influence la tension matricielle du sol à 1 cm sous la surface ($P = 0,0001$). La tension est moins négative sous les couverts végétaux denses que sous les couverts plus faibles (Fig. 3.9 c), avec des tensions moyennes en août 1996 de -30 mbar et de -39 mbar respectivement.

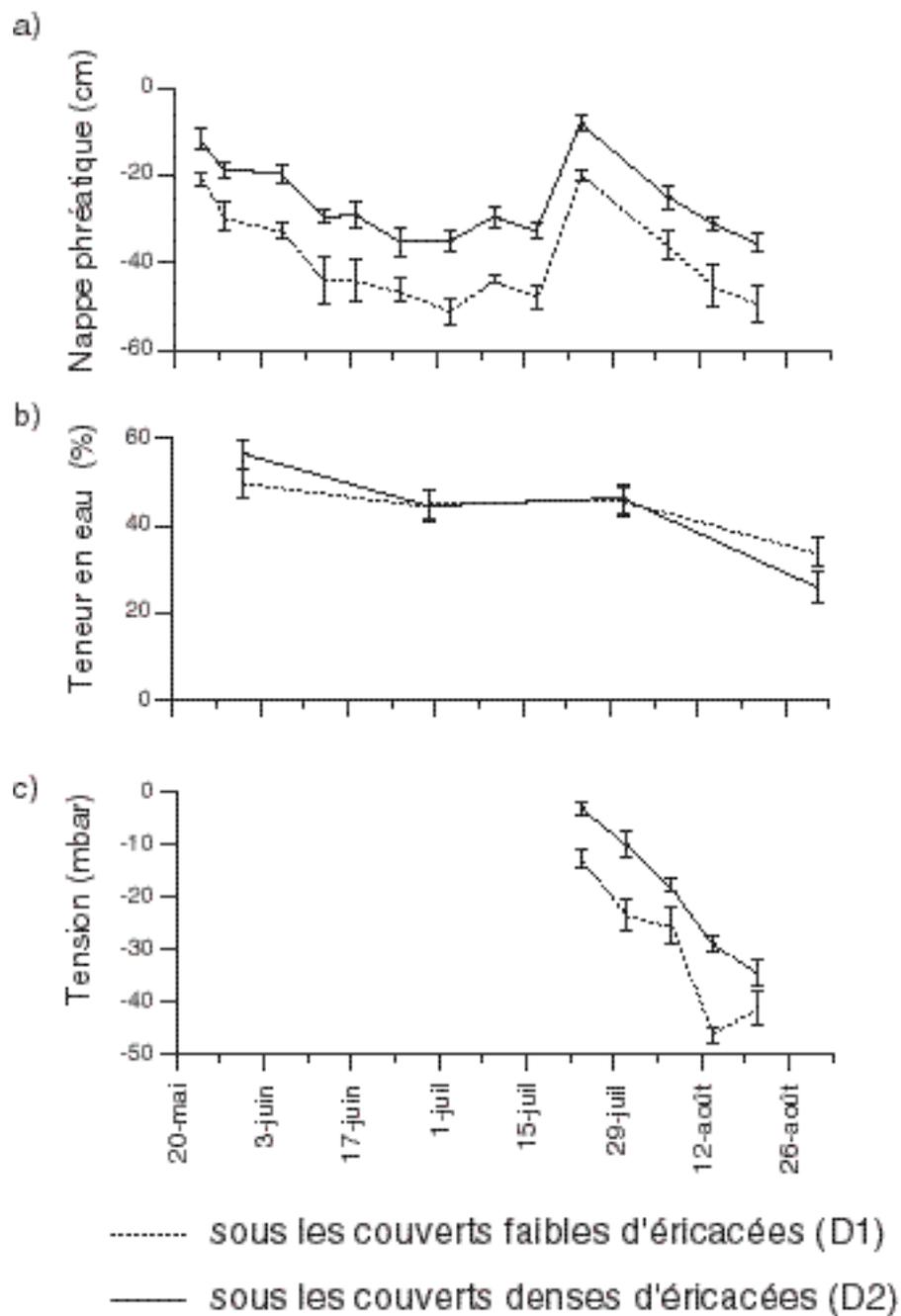


Figure 3.9 - Propriétés du substrat sous les deux densités d'éricacées, à l'été 1996. a) Profondeur de la nappe phréatique par rapport à la surface (moyennes \pm erreur-type); b) Teneur en eau volumique de la tourbe (moyennes \pm erreur-type); c) Tension de l'eau du sol à la surface (moyennes \pm erreur-type).

3.2.1.3 Microclimat selon les densités d'éricacées

Dans cette expérience sur les densités d'éricacées, la paille a été ajoutée sur toutes les parcelles. Pour évaluer le microclimat en fonction des différentes densités de couvert des plantes pionnières, les mesures de température et d'humidité relative à la surface du sol ont été prises sous le couvert végétal et sous le paillis. C'est donc d'une façon très relative et non absolue que nous présentons ces résultats.

a) Température à la surface du sol

La densité du couvert végétal arbustif n'influence pas la température à la surface du sol lorsqu'un paillis est aussi présent (Fig. 3.10 a). Peu importe la densité, la température moyenne pour l'été 1996 est de 17,0 °C, avec un maximum et minimum journaliers moyens de 28 °C et de 9 °C. Il est cependant possible que la paille minimise les écarts de température qu'il pourrait y avoir sous les deux densités de couvert d'éricacées.

b) Humidité relative à la surface du sol

Si on n'observe aucune différence de température sous les deux densités d'éricacées, on observe cependant des différences d'humidité relative (Fig. 3.10 b). L'humidité relative minimum à la surface sous les densités faibles d'éricacées (combiné avec un paillis) est en moyenne de 70 % pour l'été 96. Sous les couverts denses, l'humidité relative minimale journalière est plus élevée, mais seulement 20 % du temps, lorsque les conditions environnementales sont humides (fig. 3.10 b). Lorsque les conditions s'assèchent, soit 80 % du temps, la surface du sol dessèche plus vite et l'humidité relative atteint des pourcentages plus bas que sous les densités faibles. En moyenne, pour l'été 1996, l'humidité relative minimale journalière sous ces couverts denses est de 62 %.

c) Luminosité à la surface du sol

La densité du couvert arbustif influence la luminosité à la surface du sol ($P = 0,0001$; Fig. 3.10 c). Environ 40 % des rayons incidents photosynthétiquement actifs (RPA) sont transmis jusqu'aux diaspores de sphaignes sous les couverts faibles d'éricacées combinés avec un paillis. Les couverts denses d'éricacées, toujours combinés avec un paillis, procurent plus d'ombrage car seulement 20 % des RPA incidents sont transmis jusqu'au sol.

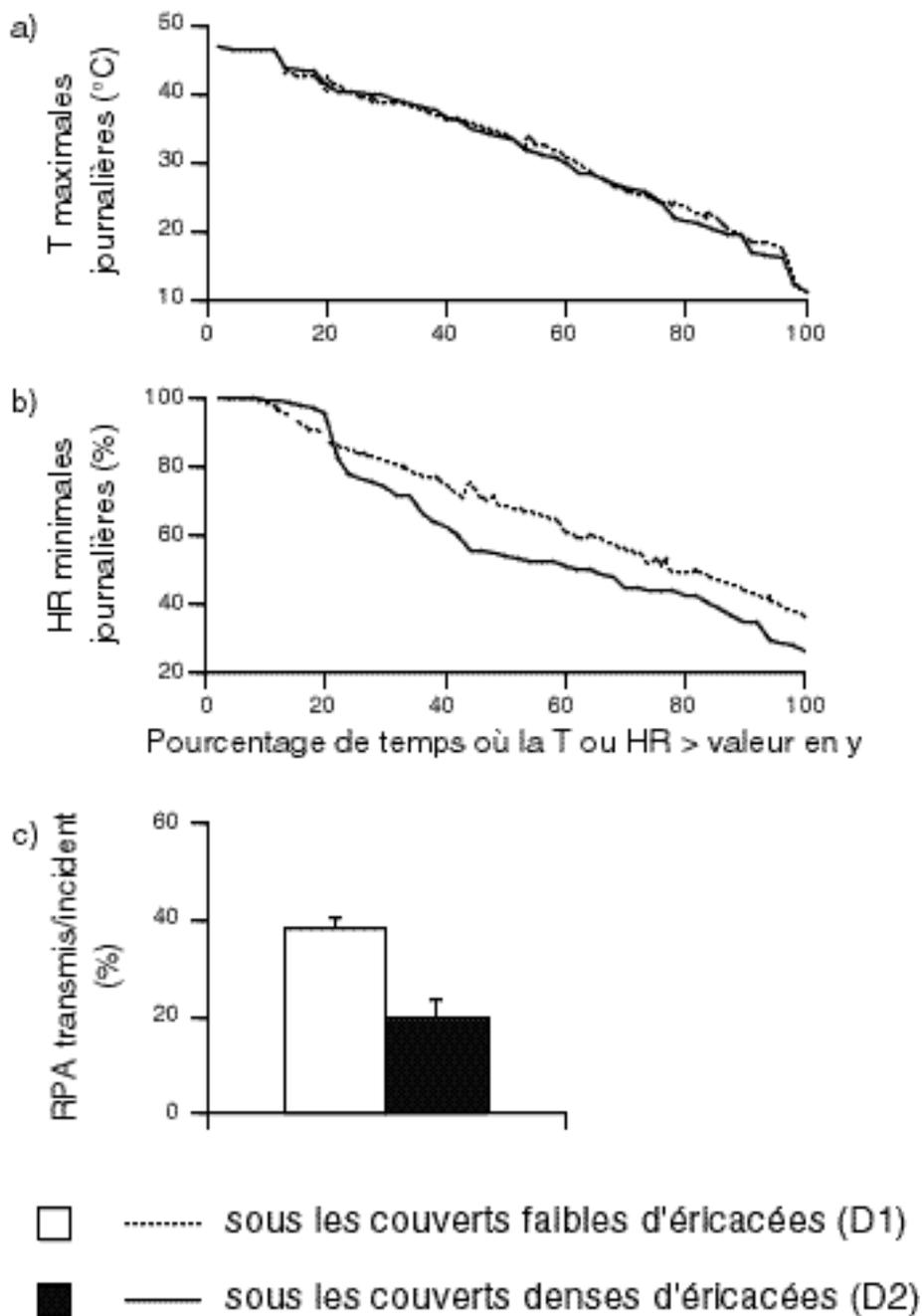


Figure 3.10 - Microclimat à la surface du sol sous les deux densités d'éricacées combinées avec un paillis. a) et b) Courbes cumulatives illustrant le pourcentage de temps où les températures (T) maximales journalières ou les humidités relatives (HR) minimales journalières excèdent les valeurs exprimées en ordonnée, pour la période allant du 14 juin au 17 septembre 1996. c) Luminosité (pourcentage des rayons photosynthétiquement actifs (RPA) transmis par rapport aux incidents) sous les différents couverts végétaux (moyenne \pm erreur-type) le 4 septembre 1996.

3.2.2 Effet des densités d'éricacées sur l'établissement de la végétation

Les résultats concernant l'établissement des sphaignes sous les différentes densités de couvert d'éricacées sont très variables et ne permettent pas de discerner des différences significatives entre les traitements (Tab. 3.10). La figure 3.11 semble pourtant montrer un établissement supérieur des sphaignes sous les couverts denses d'éricacées (600 ind./m² ou 6 % en 1997) comparé aux couverts faibles (300 ind./m² ou 2 % en 1997). Par contre, en examinant ces données de plus près, on constate que les sphaignes se trouvent en plus grande quantité dans une parcelle en particulier, soit la même où on avait découvert de petites colonies de sphaignes au début de l'expérience¹.

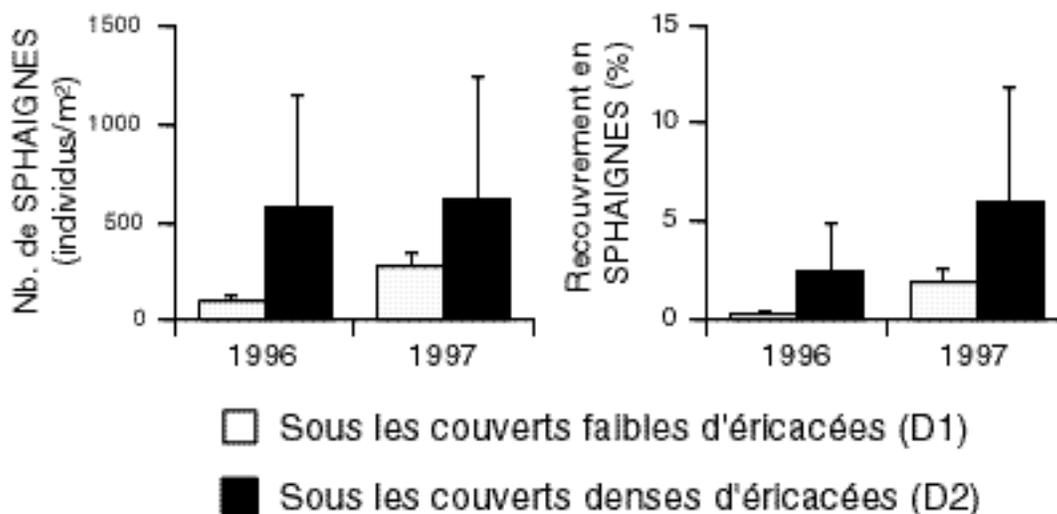


Figure 3.11 - Effet de la densité d'éricacées sur l'établissement de sphaignes réintroduites et protégées d'un paillis, après une et deux saisons de croissance (moyenne \pm erreur-type). Les densités d'éricacées sont représentées à la figure 3.8.

Lors des estimations de recouvrement initiaux, nous avons vu que les autres bryophytes couvraient aussi plus de surface dans les zones fortement recolonisées en éricacées (6,5 %; Tab. 3.9). Après une et deux saisons de croissance, le recouvrement en mousse est le même sous les deux densités de couvert d'éricacées, soit 1 % en 1996 et 4 % en 1997 (Tab. 3.10). Sous les couverts denses d'éricacées, le recouvrement en mousses est donc plus faible après la coupe des arbustes qu'avant celle-ci. Par ailleurs, les parcelles n'ayant reçues aucune réintroduction ont été

¹ Des analyses statistiques ont été refaites en excluant cette parcelle expérimentale mais cela n'a pas permis de démontrer des différences significatives entre les traitements.

exclues des analyses mais peuvent quand même nous informer sur l'effet de la coupe des arbustes sur les colonies de sphaignes établies naturellement. En effet, les sphaignes observées initialement sous les couverts denses d'éricacées recouvraient environ 1,5 % de la surface des parcelles expérimentales (Tab. 3.9). À l'automne 1996 et 1997, ces couverts sont plus bas que 1 %, soit sous le seuil de détection.

En conclusion, on observe des différences au niveau des propriétés du substrat entre les densités d'arbustes. La nappe phréatique et la tension de l'eau du sol sont plus élevées dans les zones fortement recolonisées en éricacées que dans celles à couverts faibles. Par contre, la teneur en eau de la tourbe n'est pas influencée par la densité du couvert arbustif.

Au niveau des conditions microclimatiques, les densités de couverts arbustifs ont un impact sur l'humidité relative et la luminosité à la surface du sol mais n'influencent pas vraiment la température sous le couvert végétal. L'humidité relative est, d'une part, plus élevée dans les conditions favorables sous les couverts denses mais est, d'autre part, plus basse sous ces couverts dans les conditions plus sèches. La luminosité est deux fois moins élevée sous les couverts denses comparés aux faibles couverts.

Finalement, les densités de couvert d'éricacées n'ont pas d'effet significatif sur l'établissement des sphaignes réintroduites. D'autre part, on a remarqué, au début de l'expérience, de petites colonies de sphaignes établies naturellement sous les couverts d'éricacées plus denses. Ces petites colonies de sphaignes subissent un déclin en terme de superficie suite à taille des arbustes.

3.2.3. Caractérisation et comparaison des densités d'*Eriophorum spissum* étudiées

3.2.3.1 Description des densités d'*Eriophorum spissum* et de leur évolution

Initialement, les densités faibles et intermédiaires (D1 et D2) d'*E. spissum* ont été établies en gardant sur place un certains nombres de touradons et en enlevant les autres. Ainsi, 5 et 15 touradons ont été maintenus en place pour les densités D1 et D2, tandis que la densité forte (D3) consistait en parcelles à l'état naturel (33 % de recouvrement). L'analyse statistique effectuée sur les données prélevées à l'automne 1996 et 1997 montre que les densités D1 et D2 sont différentes l'une de l'autre mais que la densité D3 se distingue de la densité D2 seulement après deux saisons de croissance (Tab. 3.11). En 1997, les couverts de linaigrettes sont estimés à 22 % dans D1, à 37 % dans D2 et à 72 % dans D3 (Fig. 3.12).

Tableau 3.11 - Valeurs de F obtenues lors de l'analyse de variance à deux facteurs et des contrastes¹ décrivant l'effet de la densité d'*Eriophorum spissum* (en gras; D1, D2 et D3) et de l'année de mesure (1996 et 1997) sur l'établissement de la végétation. *E. spi.* = *E. spissum*; *E. ang.* = *E. angustifolium*.

Source de variation	d.f.	Sphaignes (nb/m ²)	Sphaignes (%)	Mousses (%)	Éricacées (%)	<i>E. spi.</i> (%)	<i>E. ang.</i> (%)	Total (%)
ANOVA								
Blocs	2	0,35	0,67	4,24	1,82	2,3	0,74	0,20
Densités	2	2,44	2,07	1,52	1,15	38,84**	0,66	0,74
Erreur a	4							
Années	1	3,26	29,29***	0,15	2,73	20,53**	129,71	48,94***
Densités x Années	2	0,55	0,77	0,50	3,08	10,32**	6,10	1,06
Erreur b	6							
Total	17							
CONTRASTES ¹								
Densités x Années:								
(D1 vs D2) x Années	1	0,25	0,42	0,43	0,00	0,58	4,05*	1,59
(D2 vs D3) x Années	1	1,07	0,17	0,03	3,64	15,61**	0,88	1,86

* $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$.

¹ Le programme SAS (SAS Institute, 1988) a été incapable de calculer les contrastes pour le facteur principal « densité », probablement en raison d'un nombre inégal ou insuffisant de réplicats. Pour la variable dépendante « *E. spissum* », outre l'interaction « densité X années » significative, des LSD-protégés ont aussi démontré des différences significatives entre les densités D1 et D2.

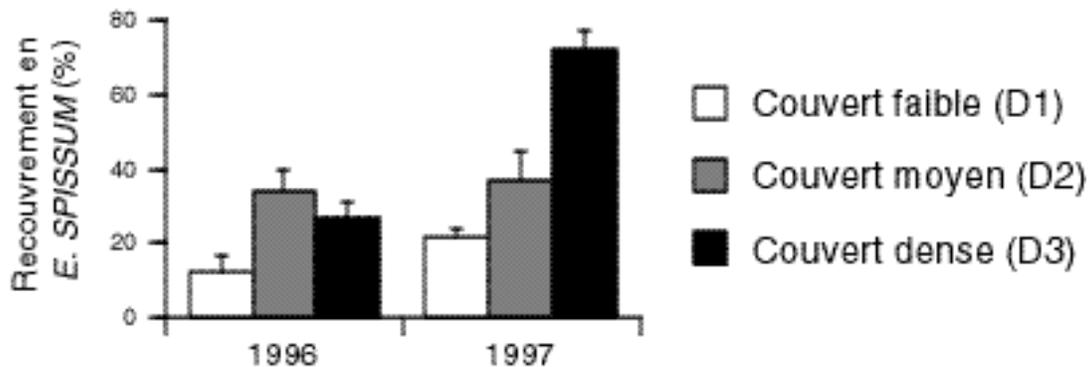


Figure 3.12 - Couvert d'*Eriophorum spissum* et son évolution selon les trois catégories de densité (moyenne \pm erreur-type). Les densités D1 et D2 ont été créées au printemps 1996 en laissant sur place un certain nombre de touradons (D1 = 5 touradons et D2 = 15 touradons) et en enlevant les autres. La densité D3 est celle que l'on retrouve à l'état naturel sur le site de Président-Ouest.

3.2.3.2 Propriétés du substrat selon les densités d'*Eriophorum spissum*

a) Profondeur de la nappe phréatique

Aucune donnée n'a été prise pour mesurer la position de la nappe phréatique sous les deux densités plus faibles d'*E. spissum* (D1 et D2), créées artificiellement. Par contre, les observations visuelles permettent d'affirmer que la nappe phréatique se maintient beaucoup plus près de la surface dans les parcelles avec peu de touradons que dans celles avec couvert naturel. En effet, la nappe phréatique y est beaucoup plus souvent affleurante, en raison du niveau plus bas de la surface causé par l'arrachement des touradons.

b) Teneur en eau volumique de la tourbe

Le teneur en eau volumique de la tourbe est significativement plus élevée dans les parcelles où les densités ont été créées artificiellement que dans celles à densité naturelle ($P = 0,008$; Fig. 3.13). Ceci corrobore les observations mentionnées auparavant, à savoir que l'arrachement des touradons dans les densités D1 et D2 a entraîné un abaissement de la surface et par conséquent une nappe phréatique plus élevée, ce qui se traduit en une teneur en eau plus élevée. Le contenu en humidité diminue progressivement au cours de l'été et varie, de mai à août 1996, de 75 % à 40 % dans la densité D3 et de 90 % à 47 % dans les densités D2 et D1.

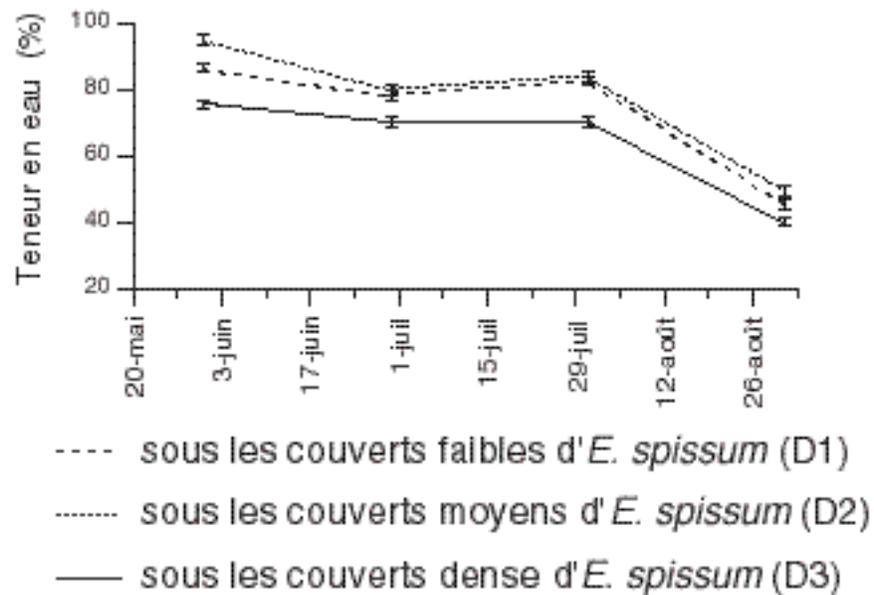


Figure 3.13 - Teneur en eau volumique de la tourbe (moyennes \pm erreur-type) sous différentes densités d'*Eriophorum spissum*, à l'été 1996.

c) Tension de l'eau du sol

La tension de l'eau du sol n'a pas été mesurée assez souvent dans les densités D1 et D2 pour permettre de faire des comparaisons valables. En août 96, la tension moyenne de l'eau du sol pour les trois densités de couvert d'herbacées est de -23 mbar .

3.2.3.3 Microclimat sous les densités d'*Eriophorum spissum*

Comme pour l'expérience avec les éricacées, les mesures de température, d'humidité relative et de luminosité à la surface du sol ont été prises sous le couvert végétal et sous le paillis (car toutes les parcelles en étaient couvertes).

a) Température à la surface du sol

La densité du couvert végétal herbacé n'influence pas vraiment la température à la surface du sol (Fig. 3.14 a). Peu importe les densités de linaigrettes (D1, D2 et D3), la température moyenne pour l'été 1996 est de 17,5 °C, avec un maximum et minimum journaliers moyens de 28,5 °C et de 9,0 °C.

b) Humidité relative à la surface du sol

L'humidité relative au sol sous les herbacées est influencée par les densités de couvert de celles-ci (Fig. 3.14 b). Tout d'abord, l'humidité relative minimale journalière est toujours plus élevée sous les densités végétales naturelles (D3), avec un taux d'humidité relative moyen de 75 % en 1996. Les deux autres densités de couvert semblent engendrer des humidités relatives au sol assez similaires, soit un taux d'humidité minimal journalier moyen de 65 %. Ces mesures montrent donc une certaine augmentation du pourcentage d'humidité procurée par les couverts denses d'*E. spissum*.

c) Luminosité à la surface du sol

La densité du couvert d'*E. spissum* n'influence pas la quantité de rayons photosynthétiquement actifs (RPA) qui se rend jusqu'aux diaspores ($P = 0,4$). Avec la paille, environ 30 % des RPA incidents sont transmis à travers le couvert végétal, et ce, peu importe la densité de celui-ci (Fig. 3.14 c). Il est cependant possible que la présence de paille minimise les écarts de luminosité qui pourraient exister sous les trois densités de couverts. Notons aussi qu'il est très difficile dans ce cas d'estimer avec précision la luminosité à la surface du sol : la végétation ne couvre pas de façon homogène la surface et les parcelles expérimentales sont assez petites pour évaluer la luminosité dans ces cas-là.

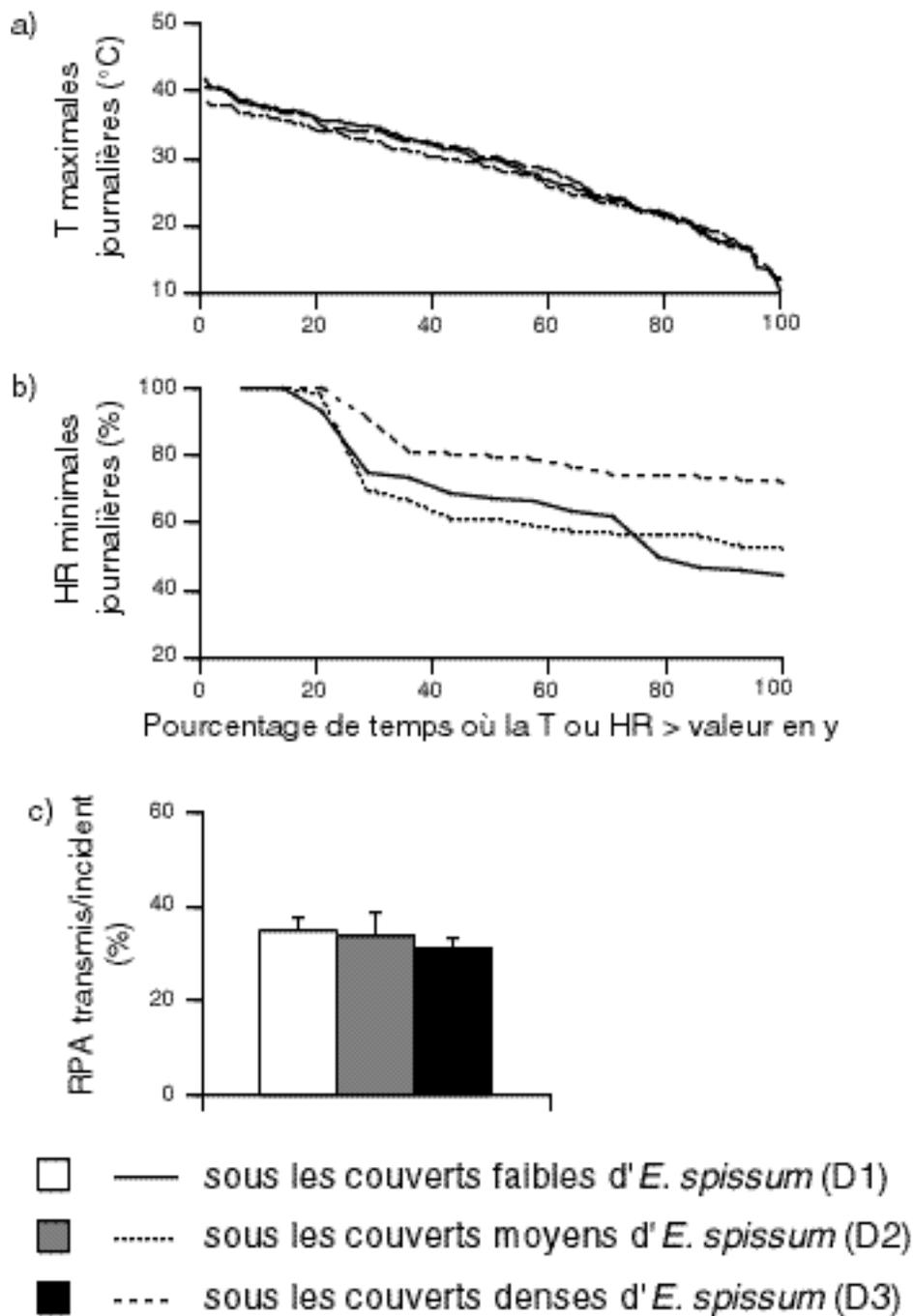


Figure 3.14 - Microclimat à la surface du sol sous différentes densités d'*Eriophorum spissum* combinées avec un paillis. a) et b) Courbes cumulatives illustrant le pourcentage de temps où les températures (T) maximales journalières ou les humidités relatives (HR) minimales journalières excèdent les valeurs exprimées en ordonnée, pour la période allant du 14 juin au 17 septembre 1996. c) Luminosité (pourcentage de rayons photosynthétiquement actifs (RPA) transmis par rapport aux incidents) sous les différents couverts végétaux (moyenne \pm erreur-type) le 4 septembre 1996.

3.2.4. Effet des densités d'*Eriophorum spissum* sur l'établissement de la végétation

L'établissement des sphaignes ne semble pas influencé, après deux saisons de croissance, par les différents couverts d'*E. spissum* (Tab. 3.11). Le nombre d'individus/m² et le pourcentage de recouvrement en sphaignes sont trop variables pour voir des différences significatives entre les traitements. Toutefois, la figure 3.15 laisse croire que la recolonisation par les sphaignes pourrait être inversement proportionnelle à la densité en *E. spissum*, car l'établissement de ces mousses semble être favorisé sous les couverts moins denses.

De plus, il semble que *E. angustifolium* bénéficie de l'espace libéré par l'arrachement des touradons dans les parcelles à densités plus faibles (Tab. 3.11). En 1996, cette espèce est plus abondante dans les communautés naturelles d'*E. spissum* (2 %) que dans les deux densités de couvert créées artificiellement (< 1 %). Par contre, en 1997, on estime le couvert moyen d'*E. angustifolium* à 12 % dans D1 comparé à 7 % dans D2 et D3. Aucune autre différence de recouvrement n'est observée pour les autres espèces : en 1997, les autres mousses couvrent en moyenne 2 % de la surface et les éricacées en couvrent moins de 1 % .

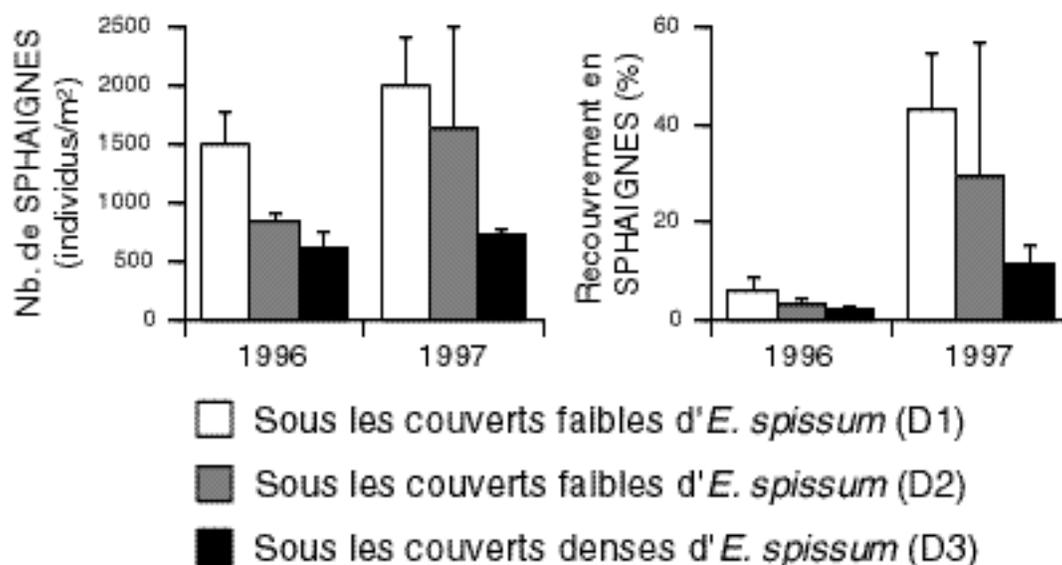


Figure 3.15 - Effet des densités d'*Eriophorum spissum* sur l'établissement de sphaignes réintroduites et protégées d'un paillis, après une et deux saisons de croissance (moyenne \pm erreur-type). Les densités d'*E. spissum* sont illustrées à la figure 3.12.

En conclusion, le contenu en humidité par volume de tourbe est supérieur dans les zones à faible densité, où on a prélevé des touradons. La nappe phréatique y est aussi probablement plus élevée.

D'un autre côté, les différentes densités d'herbacées ont un impact sur l'humidité relative à la surface du sol, qui demeure plus élevée sous les couverts naturels de linaigrettes (D3). Par contre, la température et la luminosité à la surface du sol ne sont pas influencées par la densité du couvert végétal.

Finalement, les sphaignes semblent préférer les endroits où le couvert végétal est moins dense, mais les analyses statistiques ne permettent pas de distinguer des différences d'établissement sous les trois densités de couvert étudiées.

CHAPITRE 4 - DISCUSSION

4.1 GESTION DU MATÉRIEL VÉGÉTAL DE RÉINTRODUCTION

Le mode de récolte du matériel végétal réintroduit influence fortement le succès d'établissement des sphaignes. Lorsque récolté à la main, le matériel végétal est beaucoup plus efficace en terme d'établissement des sphaignes que celui récolté mécaniquement, et ce, dans les trois communautés végétales étudiées. Dans les communautés d'éricacées, cinq fois plus de sphaignes sont dénombrées et les sphaignes couvrent dix fois plus de surface après deux saisons de croissance quand le matériel réintroduit est récolté à la main. Les différences sont moins frappantes mais tout de même importantes sous les couverts des deux espèces de linaigrettes, où deux fois plus de sphaignes s'établissent à partir du matériel récolté manuellement plutôt que mécaniquement.

Qu'est-ce qui peut expliquer cette perte d'efficacité? Certaines expériences ont montré que le délai d'attente entre le moment de la récolte et celui de la réintroduction pouvait influencer les chances de survie et de régénération des diaspores de sphaignes, en les exposant à des périodes de dessiccation plus ou moins prolongées (Sagot et Rochefort, 1996). Dans la présente étude, les deux types de matériel ont subi les mêmes délais d'attente puisqu'ils ont été récoltés dans la tourbière non exploitée et réintroduits sur les parcelles expérimentales en même temps. Nous assumons aussi que la même quantité de sphaignes par unité de surface a été prélevée pour les deux types de matériel car les récoltes ont été effectuées à l'aide de quadrats identiques dans les deux cas. Le facteur qui semble le plus important pour expliquer cette perte d'efficacité est le stress mécanique causé par la machinerie lors de la récolte de la végétation. La mécanisation des opérations est inévitable lors de travaux de restauration à grande échelle et il est assez difficile de minimiser le stress causé à la végétation. Cependant, une attention particulière devrait toujours être accordée à ces opérations, par exemple en s'assurant de respecter l'épaisseur optimale de récolte (10 premiers cm) ou en réduisant les délais d'attente avant les réintroductions, afin de maximiser la qualité du matériel végétal, en terme de potentiel de régénération.

Quant aux autres bryophytes, dans toutes les communautés végétales étudiées, les parcelles n'ayant reçu aucune réintroduction présentent des recouvrements égaux ou même supérieurs à ceux observés sur les parcelles avec matériel réintroduit. Les espèces n'ayant pas été identifiées lors des estimés, il est assez difficile de clarifier ce résultat. Ceci peut s'expliquer par la présence plus

abondante, dans les parcelles témoins, de mousses du genre *Dicranella* qui colonisent facilement (et naturellement) les surfaces tourbeuses dénudées (GRET, données non publiées). Les parcelles avec réintroductions présentent plutôt des espèces du genre *Polytrichum*, espèce présente dans le matériel de réintroduction (obs. pers.). Il est ainsi possible que lorsque les sphaignes sont présentes, elles prennent la place qu'occuperaient autrement les autres bryophytes. De plus, dans les communautés d'éricacées et d'*Eriophorum spissum*, les bryophytes autres que les sphaignes sont plus abondantes lorsque les réintroductions sont effectuées avec du matériel végétal récolté mécaniquement plutôt que manuellement. Comme les deux types de matériel sont similaires au niveau de leur composition en bryophytes, c'est peut-être la performance des sphaignes qui explique cette différence. Les bryophytes colonisent le substrat lorsque celui-ci n'est pas colonisé par les sphaignes, qui sont d'ailleurs meilleures compétitrices une fois établies.

Dans un autre ordre d'idée, le matériel végétal récolté manuellement n'est composé que des sphaignes et autres bryophytes tandis que celui récolté mécaniquement contient en plus toute la végétation de surface d'une tourbière naturelle, ce qui peut favoriser l'établissement d'une flore plus diversifiée. Certains chercheurs ont observé que les fragments de plantes (mousses brunes et plantes vasculaires) contenus dans le matériel végétal récolté mécaniquement (« top spit ») pouvaient aussi s'implanter sur le substrat tourbeux (Ferland, 1995; Quinty et Rochefort, 1997b). Dans la présente étude, seulement l'*E. angustifolium* bénéficie de l'apport de diaspores contenus dans le matériel récolté mécaniquement, et ce, seulement lorsqu'il est réintroduit dans les communautés végétales dominées par l'*E. spissum*. Ainsi, mis à part cette exception, le matériel récolté mécaniquement et incluant toute la végétation de surface d'une tourbière naturelle ne facilite pas vraiment l'établissement des plantes vasculaires à partir des fragments. Par contre, une méthode de mesures par recouvrement, comme celle que nous avons effectuée, n'est peut-être pas assez précise pour permettre de distinguer des différences dans l'établissement de plantes vasculaires après deux ans seulement. Des dénombrements de tiges auraient sans doute été une méthode plus appropriée.

Notre méthode de récolte et de réintroduction est donc efficace pour les diaspores de sphaignes, même si l'efficacité est diminuée par la mécanisation des opérations. Par contre, ce n'est peut-être pas une bonne méthode quand on veut aussi promouvoir l'établissement rapide des autres espèces, dans le but, par exemple, de stabiliser le substrat. Le réservoir de graines et les fragments végétatifs présents dans le matériel de surface (« top spit ») n'est pas suffisant pour toutes les espèces et leur potentiel d'implantation peut dépendre des surfaces à restaurer. D'autres recherches sont nécessaires pour trouver de meilleures méthodes permettant un établissement rapide et efficace des plantes désirées. Avec une compréhension écologique appropriée, on pourrait, par exemple,

récolter des graines ou des individus des espèces désirées et les semer ou les transplanter directement.

4.2 LA PAILLE, FACULTATIVE OU ESSENTIELLE LORSQU'UN COUVERT VÉGÉTAL EST PRÉSENT?

L'effet bénéfique de la paille comme protection physique pour les diaspores réintroduites dépend de la surface à restaurer. Il a été maintes fois prouvé que l'ajout de paille permet un meilleur établissement des sphaignes réintroduites sur des substrats nouvellement abandonnés et donc dénudés de toute autre végétation (Ferland, 1995; Quinty et Rochefort, 1997b; Rochefort et Campeau, 1997; Rochefort *et al.*, 1997). Par contre, lorsque les surfaces à restaurer ont été abandonnées depuis un certain temps et qu'un couvert végétal est présent, l'ajout d'un paillis de paille peut s'avérer superflu, selon le type d'espèces pionnières colonisant le substrat. Ainsi, la paille est essentielle pour promouvoir l'établissement des sphaignes réintroduites sous les couverts d'éricacées mais n'est pas nécessaire en présence des deux espèces d'*Eriophorum*.

L'ajout d'un paillis de paille est aussi reconnu pour favoriser l'implantation des autres bryophytes et des plantes vasculaires contenues dans le matériel de réintroduction (Ferland, 1995; Rochefort *et al.*, 1997). Dans la présente étude, cet effet bénéfique n'est observé que rarement et n'a que peu d'importance. Les mousses profitent de l'ajout d'un paillis, mais encore une fois seulement dans les communautés d'éricacées.

En général, l'utilisation d'un paillis est reconnue pour améliorer les conditions d'humidité du sol et la température à la surface via son effet sur le bilan énergétique (Gardner et Woolhiser, 1978; Plass, 1978; Hares et Novak, 1992). Des températures plus tempérées, une humidité relative de l'air à la surface du sol plus élevée et une plus grande teneur en eau de la tourbe ont d'ailleurs été observées par Price *et al.* (1998) sous un paillis appliqué sur un substrat tourbeux dénudé. Dans la présente étude, la paille crée des températures à la surface du sol plus fraîches le jour et légèrement plus chaudes la nuit, de même qu'elle réduit de moitié la luminosité à la surface du sol. Par contre, le paillis n'influence pas l'humidité relative de l'air et la teneur en eau volumique de la tourbe de surface. Certaines raisons peuvent expliquer ces différentes réponses. Il est possible que la taille de nos parcelles expérimentales, relativement petites, soit en cause et ne permette pas de générer ou de mesurer des conditions plus humides à cette échelle. Il est aussi possible que l'humidité à la surface du sol soit influencée de façon plus marquée par le couvert végétal présent que par l'ajout d'un paillis. Les appareils utilisés pour mesurer l'humidité relative sont moins précis et moins performants sous les conditions rencontrées sur le terrain et de petites différences peuvent alors être

perdues dans la grande variabilité des résultats. Nous suggérons d'ailleurs l'utilisation d'appareils plus précis et plus performants pour mesurer l'humidité relative de l'air dans les conditions rencontrées sur le terrain.

Le fait que la paille ait un effet bénéfique sur les sphaignes seulement dans les communautés d'éricacées suggère que la présence d'un couvert végétal herbacé remplace la protection offerte par le paillis. La température sous le couvert combiné d'éricacées et de paille est équivalente et même légèrement plus fraîche que celles mesurées sous les couverts des linaigrettes sans paillis additionnel. De plus, l'ombrage créé par le couvert de paille combiné aux couverts d'éricacées est aussi similaire à celui procuré par le couvert d'*E. angustifolium*. L'air à la surface dans les communautés d'éricacées demeure néanmoins plus sec, malgré l'ajout d'un paillis, que dans les communautés dominées par les herbacées. D'un autre côté, il se peut aussi que la paille ne soit plus nécessaire dans les communautés dominées par les linaigrettes en raison des bonnes conditions hydrologiques du site. Si c'est le cas, le microclimat à la surface n'est plus limitant pour les sphaignes, qui bénéficient de toute l'humidité dont elles ont besoin.

Enfin, la paille peut aussi avoir un effet fertilisant sur la végétation sous-jacente en libérant, notamment, surtout du potassium mais aussi du sulfate, de l'azote sous forme NH_4 , du phosphore, du calcium, du magnésium et du sodium. Cet apport d'éléments ne semble pas procurer beaucoup d'avantages aux sphaignes en phase d'établissement (A. Maloney, données non publiées). Par contre, les éricacées profitent probablement de cet apport d'éléments nutritifs, surtout lorsqu'elles sont au stade de plantules, comme c'est le cas dans les communautés dominées par *E. spissum*.

4.3 LES PLANTES PIONNIÈRES FAVORISENT-ELLES L'ÉTABLISSEMENT DES SPHAIGNES?

Afin de répondre à cette question, nous avons comparé l'établissement des sphaignes (récoltées et réintroduites à la main) en fonction des espèces pionnières présentes, de leur densité de couvert et de la présence d'un paillis. Plusieurs raisons peuvent justifier une telle comparaison, même si elle n'est pas permise statistiquement : les expériences ont toutes été initiées en même temps, dans une même région et donc aussi sous un même climat. De plus, les manipulations et mesures ont été effectuées de la même façon dans tous les cas. Cinq types de communautés végétales ou 5 milieux plus ou moins différents sont ainsi comparés (Tab. 4.1) :

Tableau 4.1 - Résumé de l'influence de différents milieux (espèces pionnières, densités de couvert et présence d'un paillis) sur l'établissement de la végétation réintroduite (à partir de matériel végétal récolté manuellement), sur le microclimat généré à l'interface air-tourbe et sur les propriétés des substrats sous-jacents. Les milieux comparatifs ont été sélectionnés en fonction des critères énoncés à la page 76. *E. spi.* = *Eriophorum spissum*; *E. ang.* = *E. angustifolium*.

ESPÈCES PIONNIÈRES	Éricacées		Éricacées	<i>E. spi.</i>	<i>E. spi.</i>	<i>E. ang.</i>
DENSITÉ DU COUVERT	faible		dense	faible	dense	naturelle
PAILLIS	sans	avec	avec	avec	sans	sans
VÉGÉTATION (après 2 ans)						
Couvert des plantes pionnières	20 %		40 %	30 %	60 %	75 %
Établissement des sphaignes (% de recouvrement)	0,2 %	2 %	6 %	35 %	14 %	25 %
MICROCLIMAT (en 1996) :						
Température à la surface du sol						
Moyennes journalières	18 °C	17 °C	17 °C	17,5 °C	17,5 °C	17,5 °C
Maxima journaliers	32 °C	28 °C	29 °C	28 °C	29 °C	30 °C
Humidité relative						
Moyennes journalières	90 %		89 %	91 %	94 %	96 %
Minima journaliers	67 %		62 %	69 %	75 %	84 %
Luminosité (% PAR transmis)	80 %	40 %	20 %	30 %	60 %	40 %
SUBSTRAT (en 1996) :						
Nappe phréatique (moy.)	-39 cm		-29 cm	>	-15 cm	-10 cm
Contenu en humidité (moy.)	46 %		46 %	75 %	65 %	68 %
Tension (le 21 août 1996)	-39 mbar		-30 mbar	-23 mbar	-25 mbar	-25 mbar

- 1- Éricacées à faibles couverts (D1) : Les arbustes couvrent, à l'automne 1997, environ 20 % de la surface. C'est le milieu qui ressemble le plus aux surfaces qu'on doit restaurer habituellement et sert donc en quelque sorte de point de référence. La paille ayant un rôle important dans ce milieu, l'établissement des sphaignes est aussi comparé entre les surfaces avec paille et les surfaces sans paille.
- 2- Éricacées à couverts denses (D2) : En 1997, les éricacées couvrent 40 % de la surface. Seules les surfaces avec paille sont examinées puisque l'influence de ce type de couvert n'a pas été testé sans paille.
- 3- *Eriophorum spissum* à densités faibles, créées artificiellement : Les densités D1 et D2 représentent des recouvrements en linaigrettes différents (22 % et 37 % respectivement, en 1997) mais les propriétés du substrat, les conditions microclimatiques, de même que la reprise de la végétation sont assez similaires entre ces deux densités. Seules les surfaces avec paille sont examinées puisque l'influence de ce type de couvert n'a pas été testé sans paille.
- 4- *E. spissum* à densité fortes, naturelles (D3) : En 1997, l'*E. spissum* couvre 60 % de la surface. Seules les surfaces sans paille sont considérées puisque la paille n'a pas d'influence sur l'établissement des sphaignes dans ce milieu.
- 5- *E. angustifolium* à densité naturelle : Cette plante couvre 75 % de la surface en 1997. Seules les surfaces sans paille sont considérées puisque la paille n'a pas d'influence sur l'établissement des sphaignes dans ce milieu.

Les plus faibles succès de recolonisation par les sphaignes sont observés sous les densités faibles d'éricacées, où on estime leur recouvrement, en 1997, à environ 0,2 % (35 ind/m²) en absence de paille et à 2 % (450 ind./ m²) en présence de celle-ci. Les couverts denses d'éricacées, combiné avec la paille, semblent permettre un meilleur établissement des sphaignes (6% ou 600 ind/m²) comparé aux couverts faibles.

Les sphaignes recolonisent aussi le substrat plus facilement sous les couvert naturels d'*E. spissum* que sous les éricacées, avec des recouvrements moyens de 14 % (995 ind/m²). Par contre, contrairement aux éricacées, les sphaignes couvrent plus de surface dans les secteurs moins denses, i.e. dans les milieux créés artificiellement. Les sphaignes y couvrent en moyenne 35 % (1650

ind/m²) de la surface des parcelles expérimentales en 1997, mais les valeurs sont tellement variables qu'il devient très difficile de comparer ces milieux artificiels avec les milieux naturels.

Finalement, les sphaignes recolonisent 25 % (1100 ind/m²) de la surface après deux saisons de croissance sous le couvert d'*E. angustifolium*. Ainsi, exception faite des milieux créés artificiellement, le succès d'établissement des sphaignes est proportionnel à la densité du couvert végétal présent, puisque celui-ci est le plus élevé dans le dernier type de milieu. Mais peut-on conclure à une relation de cause à effet? Autrement dit, peut-on conclure que la présence d'un couvert végétal dense entraîne des processus de facilitation pour les sphaignes en phase d'établissement? Dans les prochaines sections, nous allons examiner l'influence des plantes pionnières sur les conditions microclimatiques et les propriétés du substrat, pour ensuite déterminer les causes de ces différents succès d'établissement des sphaignes.

4.4 LES PLANTES PIONNIÈRES MODIFIENT-ELLES LE MILIEU OÙ ELLES POUSSENT?

Si on compare les trois communautés végétales lorsque aucun paillis additionnel n'est appliqué, on peut voir que les surfaces sont plus fraîches, plus humides et plus ombragées sous les couverts des cypéracées que sous les couverts d'éricacées (Tab. 4.1). Des températures fraîches et surtout une humidité relative élevée sont des conditions microclimatiques favorables pour les sphaignes. On connaît moins l'effet d'une diminution des rayons incidents sur les diaspores de sphaignes réintroduites. En communauté naturelle, des expériences ont montrées qu'un ombrage généré par les plantes peut réduire la croissance des sphaignes, à tout le moins quand les radiations photosynthétiquement actives sont réduites de l'ordre de 50 % (Clymo et Hayward, 1982). D'un autre côté, un ombrage modéré peut augmenter la croissance en longueur des mousses et entraîner la formation d'un couvert muscinal plus lâche, où la lumière pénètre plus profondément, augmentant ainsi la surface totale assimilatrice des mousses (Murray *et al.*, 1993). Quoiqu'il en soit, les individus de sphaignes réintroduites ont une surface beaucoup plus exposés aux rayons solaires que les sphaignes croissant en communauté qui se font de l'ombrage mutuellement et qui n'ont que le capitulum d'exposé. Dans ces conditions, il est fort possible qu'une trop forte luminosité nuise à la reprise des sphaignes sur le terrain en causant des processus de photoinhibition (Murray *et al.*, 1993). Ainsi, on peut donc conclure qu'il existe bien un microclimat favorable pour les sphaignes sous les couverts des cypéracées, particulièrement sous *Eriophorum angustifolium*. Il serait cependant hasardeux de conclure que nous sommes en présence de processus de facilitation de la part de ces espèces pionnières (*sensu* Connell et Slatyer, 1977). Pour

cela, il faudrait prouver que la présence des cypéracées procure un microclimat essentiel à l'établissement des sphaignes, ce que cette étude ne permet pas de faire.

En effet, même si des conditions microclimatiques favorables sont générées par la présence des plantes pionnières de type herbacé, les conditions hydrologiques locales du site influencent directement les sphaignes qui sont plus abondantes dans les endroits où le substrat est le plus humide et l'eau plus disponible. Dans le site recolonisé par les cypéracées, les communautés d'*E. angustifolium* se trouvent dans les secteurs où la nappe phréatique et la teneur en eau volumique de la tourbe sont les plus hautes (Tab. 4.1). Les communautés naturelles d'*E. spissum* se trouvent dans les secteurs où la nappe phréatique est légèrement plus basse, de même que le contenu en humidité de la tourbe de surface. Enfin, les conditions hydrologiques sont les plus défavorables pour les sphaignes dans les communautés d'éricacées. Même si on ne peut exclure une certaine influence des plantes sur leur environnement, ces paramètres du substrat reflètent probablement plus les conditions hydrologiques des sites étudiés, i.e. l'environnement de croissance des plantes. Il n'est donc pas possible de prouver s'il existe bien des interactions positives entre les cypéracées et les sphaignes.

Sous les différentes densités de couvert d'éricacées et lorsqu'un paillis est présent, la température à la surface n'est pas vraiment influencée par les densités. Par contre, l'humidité relative de l'air à la surface du sol est la plupart du temps plus sèche dans les zones fortement recolonisées par la végétation tandis que la luminosité est deux fois moins importante sous ces couverts denses (Tab. 4.1). Le fait que l'humidité relative soit plus basse dans les zones de végétation dense est assez surprenant et est difficilement explicable. Peut-être est-ce causé par les modifications engendrées par la coupe des arbustes au début de l'expérience. En taillant les arbustes, leur surface foliaire est considérablement diminuée, ce qui réduit la quantité de vapeur d'eau transpirée par les plantes, réduisant par conséquent l'humidité relative sous le couvert végétal. Cette dernière hypothèse est supportée par le fait que les éricacées taillées ne retrouvent pas leur couvert initial en deux ans. De plus, les colonies de sphaignes et de bryophytes présentes naturellement au début de l'expérience connaissent un déclin lors des années suivantes la coupe. Ainsi, l'interface air-tourbe était probablement plus humide avant la taille des arbustes qu'après celle-ci. Donc, pour les sphaignes réintroduites, outre l'ombrage plus intense, elles ne profitent pas d'un microclimat particulièrement favorable sous les couverts denses d'éricacées. Des facteurs autres que microclimatiques expliquent mieux le meilleur succès d'établissement des sphaignes réintroduites observé sous ces plus fortes densités.

En effet, encore ici, les conditions hydrologiques révèlent toute leur importance. La nappe phréatique et la tension de l'eau du sol sont plus élevées dans les communautés d'éricacées denses que dans celles moins densément recolonisées, ce qui explique la meilleure reprise des sphaignes dans ces endroits (Tab. 4.1). Notons que la nappe phréatique dans le site de Verbois où dominent les éricacées se situe souvent en-deça des 40 cm sous la surface, niveau souvent considéré comme critique pour le succès de régénération des sphaignes (Schouwenaars, 1988). Par contre, la tension de l'eau du sol est toujours au-dessus de -100 mbar, avec des tensions minimales de l'ordre de -40 mbar. Selon Price (1997), se basant sur les recherches de Hayward et Clymo (1982), des tensions matricielles allant jusqu'à -100 mbar n'empêcheraient pas l'attraction capillaire de l'eau à l'intérieur des cellules hyalines des sphaignes. Nos résultats ne semblent pas confirmer une telle affirmation puisque de très faibles succès de recolonisation ont été observés en dépit d'une tension matricielle que l'on dit « favorable ». Bien que la tension de l'eau dans le sol soit certainement révélatrice de la quantité d'eau disponible pour les sphaignes, des recherches devraient être faites afin de vérifier le seuil critique au-delà duquel les sphaignes, réintroduites sur un substrat résiduel, ne peuvent plus attirer l'eau jusqu'à leur cellules.

Une question demeure toutefois importante : pourquoi les conditions hydrologiques (profondeur de la nappe phréatique et tension de l'eau du sol) sont-elles meilleures dans les endroits fortement recolonisés par la végétation? Autrement dit, est-ce que le couvert d'arbustes est plus dense en raison des conditions locales plus favorables (pouvant être causées, par exemple, par de légères dépressions où l'humidité est plus élevée) ou ces conditions sont-elles influencées par la végétation présente (un couvert dense peut, par exemple, augmenter le couvert de neige, ce qui peut améliorer les conditions d'humidité locales du substrat)? La présente étude ne permet pas de répondre à cette question. Si la dernière hypothèse est la bonne, on pourrait alors envisager des processus de facilitation puisque la présence des éricacées modifierait les conditions de façon à promouvoir l'établissement de d'autres espèces. Des interactions positives entre des plantes provenant de l'agrégation d'éricacées ont d'ailleurs déjà été observées en milieu de toundra (Carlsson et Callaghan, 1991).

Enfin, si on compare les différentes densités de couvert d'*E. spissum*, on peut voir que l'humidité relative de l'air augmente avec la densité du couvert herbacé, contrairement à ce qui se passe dans les communautés d'éricacées. Dans ce cas-ci, les zones moins densément recolonisées subissent probablement l'effet du vent qui crée des turbulences et diminue la couche limite où l'humidité est plus favorable, et ce, même si le substrat y est plus humide et si un paillis est présent. La température à la surface n'est pas influencée par les densités de couverts de la linaigrette, de même que la luminosité qui n'est, dans ce cas-ci, influencée que par la présence du

paillis dans les densités faibles. Ainsi, la présence d'un couvert relativement dense en *E. spissum* engendre un microclimat plus humide à la surface du sol, ce qui devrait être profitable pour les sphaignes. Cependant, comme les sphaignes s'établissent mieux lorsque le couvert végétal est faible, des facteurs autres que microclimatiques entrent en ligne de compte et agissent plus directement sur les sphaignes.

Encore une fois, en examinant les paramètres hydrologiques, on peut voir que les secteurs où des touradons d'*E. spissum* ont été enlevés ont une tourbe de surface beaucoup plus humide, une tension de l'eau moins négative et probablement une nappe phréatique aussi plus haute que dans les zones naturelles. Ainsi, en dépit des conditions microclimatiques favorables sous les couverts d'herbacées plus denses, les conditions hydrologiques locales influencent encore directement l'établissement des sphaignes.

Finalement, les substrats des trois communautés végétales diffèrent au niveau de leurs propriétés chimiques. Le site recolonisé par les éricacées est relativement plus riche en éléments minéraux et nutritifs que celui recolonisé par les herbacées. Ceci s'explique par la présence des plantes cypéracées qui sont très efficaces pour absorber certains éléments, particulièrement l'azote, le phosphore et le potassium (Chapin III *et al.*, 1979; Richards *et al.*, 1995). Les zones recolonisées par *E. spissum* sont aussi légèrement plus pauvres en éléments nutritifs que celles recolonisées par *E. angustifolium*. Ceci reflète l'efficacité de *E. spissum* à utiliser les nutriments et sa grande capacité d'assimilation, de rétention et de recyclage des éléments nutritifs en raison de sa forme de croissance en touradons (McGraw et Chapin III, 1989). L'effet sur les sphaignes réintroduites d'un enrichissement en éléments nutritifs n'est pas clair, mais ce facteur est sans contredit moins limitant pour leur établissement que ne le sont les conditions hydrologiques ou microclimatiques (A. Maloney, données non publiées).

Les paramètres mesurés pour définir les propriétés du substrat reflètent probablement plus l'environnement de croissance de la végétation, i.e. les conditions hydrologiques du site, plutôt que l'influence des plantes pionnières sur ces propriétés (à l'exception peut-être des communautés d'éricacées où leur présence plus abondante peut modifier ces conditions). Nous pouvons donc constater que, même si un microclimat est généré par la présence des plantes pionnières, les conditions hydrologiques prévalant à la surface du substrat résiduel demeurent le facteur principal influençant l'établissement des sphaignes. Des succès d'établissement des sphaignes proportionnels à un gradient d'humidité ont d'ailleurs déjà été rapportés dans différentes études (Money, 1995; Rochefort *et al.*, 1995; Campeau et Rochefort, 1996; Bugnon *et al.*, 1997). Il n'est donc pas possible de dissocier l'effet des plantes elles-mêmes de l'effet de leur environnement. Il

est cependant fort probable que, pour deux substrats résiduels possédant des caractéristiques physiques et hydrologiques similaires, la présence de plantes pionnières de type herbacé facilite l'établissement d'un couvert muscinal, puisqu'un microclimat plus favorable est présent à l'interface air-tourbe sous ce type de couvert végétal. Par contre, cette interaction positive (facilitation) n'est probablement effective que lorsque les conditions microclimatiques à la surface sont limitantes, c'est-à-dire lorsque les conditions hydrologiques ne sont pas optimales.

4.5 APPLICATIONS EN RESTAURATION

Malgré les efforts de remouillage des sites à restaurer, ceux-ci ne présentent généralement pas des conditions hydrologiques aussi favorables à l'établissement et la croissance des sphaignes que celles rencontrées dans les tourbières naturelles ou dans le site recolonisé par les cypéracées. Les conditions microclimatiques à la surface, qu'elles soient générées par la présence de plantes pionnières ou par l'ajout d'un paillis, deviennent alors importantes et peuvent être garantes du succès de réimplantation des sphaignes.

D'un point de vue pratique, la présence de plantes pionnières peut représenter une alternative intéressante au paillis, en offrant une protection à plus long terme et plus résistante aux vents et en réduisant l'érosion souvent importante sur les substrat abandonnés après l'exploitation. Une fois les sphaignes établies, il est aussi possible que la présence d'un couvert végétal procure un certain support structurel qui facilite la croissance et la productivité des sphaignes. Ce phénomène a déjà été observé dans les communautés non perturbées (Malmer *et al.*, 1994), mais cette hypothèse demeure à vérifier dans le cas de sites en restauration et demande une étude à plus long terme.

On pourrait envisager une approche de restauration en deux étapes, où les sphaignes sont réintroduites en un deuxième temps, lorsqu'un couvert végétal est déjà présent et qu'il procure une certaine protection. Regardons plus en détails les avantages ou les désavantages que pourrait occasionner l'utilisation des différentes espèces pionnières.

4.5.1 Éricacées

Bien que la présente étude n'ait pas démontré l'existence de microclimat particulièrement favorable dans les communautés d'éricacées, leur présence en densité élevée pourrait offrir une certaine protection puisque des sphaignes établies naturellement ont été observées sous ces couverts

plus denses. Leur présence pourrait aussi être bénéfique au niveau de la stabilisation du substrat ou du support structurel. Des phénomènes de commensalisme ont déjà été observés entre les éricacées et les sphaignes (Malmer *et al.*, 1994; Grosvernier *et al.*, 1995).

Par contre, l'utilisation de ces arbustes dans des travaux de restauration est difficilement applicable sur le terrain. La transplantation d'individus représente un travail ardu et n'est pas toujours une réussite (Ferland et Rochefort, 1997). De plus, on connaît encore peu la biologie des espèces et il faudrait des études plus approfondies pour comprendre les mécanismes de germination sur un substrat tourbeux dénudé. Finalement, il est assez difficile d'envisager les réintroductions de sphaignes lorsqu'un couvert arbustif dense est présent et la coupe des arbustes a des répercussions qui sont encore visibles après deux ans.

4.5.2 *Eriophorum spissum*

Cette espèce a certainement une certaine valeur lors de la restauration des tourbières. On l'a souvent observé dans les premiers stades de la succession sur des surfaces abandonnées, avec des sphaignes s'établissant sous son feuillage. La linaigrette dense est une espèce pionnière typique des tourbières abandonnées après exploitation par aspiration en raison de sa propagation rapide (surtout par graines) et de sa grande amplitude écologique (Wein, 1973; Anderson *et al.*, 1996). Sa présence génère un microclimat favorable pour les sphaignes et contribue probablement à stabiliser le substrat.

D'un autre côté, l'influence de *E. spissum* est peut-être très locale. Je crois que des études plus approfondies devraient être faites concernant cette espèce pour connaître l'étendue spatiale de l'influence d'un touradon sur le microclimat. De plus, les réintroductions de sphaignes dans des communautés d'*E. spissum* devraient être faites très minutieusement afin de s'assurer de la présence de sphaignes tout autour des touradons, bien protégées sous le feuillage.

4.5.3 *Eriophorum angustifolium*

L'*E. angustifolium* est aussi une espèce pionnière très efficace pour recoloniser les tourbières abandonnées après exploitation, en raison de sa grande amplitude écologique et la rapidité de sa propagation, surtout végétative (Richards *et al.*, 1995). Cette cypéracée est, selon moi, une espèce à privilégier car cette plante, en raison de son système de rhizomes entrelaçant, procure un couvert (et donc une protection) plus uniforme que ne le fait *E. spissum*. L'*E. angustifolium* est aussi une espèce qui se transplante bien, et plusieurs centaines d'individus

peuvent être récoltés dans une petite communauté dense (Richards *et al.*, 1995 ; Ferland et Rochefort, 1997). Des associations avantageuses ont d'ailleurs déjà été observées entre la linaigrette à feuilles étroites et les sphaignes (Joosten, 1992; Ferland et Rochefort, 1997).

Les sphaignes pourraient être réintroduites lorsque la couvert végétal est assez dense pour leur procurer un microclimat favorable. Pour ce faire, il est assez simple de couper (tondre) la linaigrette pour ensuite épandre les diaspores de sphaignes, et l'impact de la coupe n'est que temporaire. La linaigrette à feuilles étroites est l'espèce qui semble générer le microclimat le plus favorable pour les sphaignes. Par contre, une comparaison avec un témoin adjacent est conseillé pour quantifier ce microclimat. De plus, d'autres recherches sont nécessaires afin de déterminer les densités optimales d'espèces vasculaires procurant un microclimat favorable pour les sphaignes. Celles-ci, une fois établies et si des conditions favorables persistent, seront à même de modifier leur environnement et d'engendrer des processus d'accumulation de tourbe.

CHAPITRE 5 - CONCLUSION

En restauration, le matériel végétal utilisé pour les réintroductions doit être récolté avec soin afin de minimiser l'impact causé par la machinerie. Même si nécessaire pour la restauration de surfaces à grande échelle, la mécanisation des opérations entraîne une perte de la qualité du matériel, en terme de potentiel de recolonisation des sphaignes.

La paille a un effet bénéfique sur l'implantation des sphaignes sur les surfaces plus arides recolonisées par les éricacées mais n'a pas d'effet sur les surfaces plus humides recolonisées par les linaigrettes. Ceci peut être expliqué par la meilleure protection offerte par les plantes herbacées ou par les conditions d'humidité favorables du site.

Même si des conditions microclimatiques différentes ont été observées sous les couverts des différents types de plantes pionnières, la présente étude ne permet pas de dissocier l'influence des plantes de celle du milieu. Les conditions hydrologiques demeurent le facteur principal influençant le succès de recolonisation des sphaignes et, en restauration des tourbières, un effort maximum doit être fait pour améliorer ces conditions. Par contre, lorsque le remouillage du site à restaurer n'est pas optimal, comme c'est le cas la plupart du temps dans les tourbières en restauration en Amérique du Nord, le microclimat à l'interface tourbe-air, qu'il soit généré par la présence de plantes pionnières ou par l'ajout d'un paillis, devient plus critique pour l'établissement des sphaignes.

D'un point de vue pratique, la présence de plantes pionnières de type herbacé peut représenter une alternative intéressante au paillis, en offrant une protection à plus long terme et plus résistante aux vents. D'autres études sont actuellement en cours et impliquent la transplantation ou l'ensemencement de plantes connues pour leur habileté à recoloniser les substrats tourbeux résiduels, comme les *Eriophorum* spp. Ces études permettront de mieux comprendre l'influence réelle des plantes sur le milieu et l'impact de ces changements sur les sphaignes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON, D.S., DAVIS, R.B., ROONEY, S.C. et CAMPBELL, C.S. 1996. The ecology of sedges (cyperaceae) in Maine peatlands. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 123 : 100-110.
- ANDRUS, R.E. 1986. Some aspects of *Sphagnum* ecology. *Canadian Journal of Botany* 64 : 416-426.
- ASPLUNG, D. 1996. " Energy use of peat ". *Peatlands in Finland*. H. Vasander (éd.). Helsinki : Finnish Peatland Society. p. 107-113.
- BRADSHAW, A.D. 1987. " The reclamation of derelict land and the ecology of ecosystems ". *Restoration ecology : a synthetic approach to ecological research*. W.R. Jordan III, M.E. Gilpin et J.D. Aber (éd.). Cambridge : Cambridge University Press. p. 53-73.
- BUCKLEY, G.P. 1984. The uses of herbaceous companion species in the establishment of woody species from seed. *Journal of Environmental Management* 18 : 309-322.
- BUGNON, J.-L., ROCHEFORT, L. et PRICE, J.S. 1997. Field experiment of *Sphagnum* reintroduction on a dry abandoned peatland in eastern Canada. *Wetlands* 17 : 513-517.
- BUTEAU, P., DIGNARD, N. et GRONDIN, P. 1994. *Système de classification des milieux humides du Québec*. Ottawa : Énergie, Mines et Ressources Canada. 25 p. MB 94-01.
- CALMÉ, S. 1998. *Les patrons de distribution des oiseaux des tourbières du Québec méridional*. 92 p. Thèse Ph.D, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec.
- CAMPEAU, S. et ROCHEFORT, L. 1996. *Sphagnum* regeneration on bare peat surfaces : field and greenhouse experiments. *Journal of Applied Ecology* 33 : 599-608.
- CARLSSON, B.A. et CALLAGHAN, T.V. 1991. Positive plant interactions in tundra vegetation and the importance of shelter. *Journal of Ecology* 79 : 973-983.

- CHAPIN III, F.S., VAN CLEVE, K. et CHAPIN, M.C. 1979. Soil temperature and nutrient cycling in the tussock growth form of *Eriophorum vaginatum*. *Journal of Ecology* 67 : 169-189.
- CLYMO, R.S. 1983. " Peat ". *Ecosystems of the world : Mires: swamp, bog, fen and moor*. A.J.P. Gore (éd.). New York : Elsevier Scientific. Vol. 4A. p. 159-224.
- CLYMO, R.S. 1987. The ecology of peatlands. *Science Progress, Oxford* 71 : 593-614.
- CLYMO, R.S. 1991. " Peat growth ". *Quaternary Landscapes*. L.C.K. Shane et E.J. Cushing (éd.). Minnesota, Minneapolis : University of Minnesota Press. p. 76-112.
- CLYMO, R.S. 1997. " The role of Sphagnum in peat ". *Conserving peatlands*. L. Parkins, R.E. Stoneham, H.A.P. Ingram (éd.). Wallingford, U.K.: Cab International. p. 95-102.
- CLYMO, R.S. et DUCKETT, J.G. 1986. Regeneration of *Sphagnum*. *New Phytologist* 102 : 589-614.
- CLYMO, R.S. et HAYWARD, P.M. 1982. " Ecology of *Sphagnum* ". *Bryophyte Ecology*. A.E.J. Smith (éd.). London : Chapman & Hall. p. 229-289.
- CONNELL, J.H. et SLATYER, R.O. 1977. Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *American Naturalist* 111 : 1119-1144.
- COUILLARD, L. et GRONDIN, P. 1986. *La végétation des milieux humides du Québec*. Québec : Publications du Québec. 399 p.
- CRONBERG, N. 1991. Reproductive biology of *Sphagnum*. *Lindbergia* 17 : 68-82.
- CSPMA (Association Canadienne de Tourbe de Sphaignes). 1998a (page consultée le 8 décembre). *Canadian Sphagnum Peat Moss Association and the environment*. [en ligne] Adresse URL : <http://peatmoss.com/pm-env.html>
- CSPMA (Association Canadienne de Tourbe de Sphaignes). 1998b (page consultée le 8 décembre). *Using Peat moss*. [en ligne] Adresse URL : <http://peatmoss.com/pm-use2.html>

- DAMMAN, A.W.H. 1986. Hydrology, development, and biogeochemistry of ombrogenous peat bogs with special reference to nutrient relocation in a western Newfoundland bog. *Canadian Journal of Botany* 64 : 384-394.
- DESROCHERS, A., ROCHEFORT, L. et SAVARD, J.-P.L. 1998. Avian recolonization of eastern canadian bogs after peat mining. *Canadian Journal of Zoology* 76 : 989-997.
- EGGELSMANN, R.F. 1988. " Rewetting for protection and renaturation/regeneration of peatland after or without peat winning ". *Proceedings VIIIth International Peat Congress, Leningrad*. Leningrad : International Peat Society. Vol. 3, p. 251-260.
- ELLING, A.E. et KNIGHTON, M.D. 1984. *Sphagnum* moss recovery after harvest in a Minnesota bog. *Journal of Soil and Water Conservation* 39 : 209-211.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 1993. *Normales climatiques au Canada, 1961-1990*. Ottawa : Service de l'environnement atmosphérique.
- FERLAND, C. 1995. *Approches de restauration d'une tourbière ombrotrophe du Nouveau-Brunswick à la suite de son exploitation*. 74 p. Mémoire M. Sc., département de phytologie, Université Laval, Québec.
- FERLAND, C. et ROCHEFORT, L. 1997. Restoration techniques for ombrotrophic peatlands. *Canadian Journal of Botany* 75 : 1110-1118.
- GARDNER, H.R. et WOOLHISER, D.A. 1978. " Hydrologic and climatic factors affecting the hydrological cycle ". *Reclamation of drastically disturbed lands : proceedings (9-12 August 1976)*. Shaller et Sutton (éd.). Madison : ASA-CSSA-SSSA. p. 46-58.
- GLASER, P.H. et JANSSENS, J.A. 1986. Raised bogs in eastern North America : transitions in landforms and gross stratigraphy. *Canadian Journal of Botany* 64 : 395-415.
- GORHAM, E. 1991. Northern peatlands : role in carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications* 1 : 182-195.

- GORHAM, E. et JANSSENS, J.A. 1992. Concepts of fen and bog re-examined in relation to bryophyte cover and the acidity of surface waters. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 61 : 7-20.
- GROSVERNIER, P., MATTHEY, Y. et BUTTLER, A. 1995. "Microclimate and physical properties of peat : new clues to the understanding of bog restoration processes". *Restoration of temperate wetlands*. B.D. Wheeler, S.C. Shaw, W.J. Fojt et R.A. Robertson (éd.). Chichester : John Wiley & Sons. p. 435-449.
- HARES, M.A. et NOVAK, M.D. 1992. Simulation of surface energy balance and soil temperature under strip tillage : II. field test. *Soil Science Society of America Journal* 56 : 29-36.
- HAYWARD, P.M. et CLYMO, R.S. 1992. Profiles of water content and pore size in *Sphagnum* and peat and their relation to peat bog ecology. *Proceedings of the Royal Society of London B*. 215 : 299-325.
- HEMOND, H.F. 1980. Biogeochemistry of Thoreau's bog, Concord, Massachusetts. *Ecological monographs* 50 : 507-526.
- INGRAM, H.A.P. 1978. Soil layers in mires : function and terminology. *Journal of Soil Sciences* 29 : 224-227.
- JACKSON, L.L., LOPOUKHINE, N. et HILLYARD, D. 1995. Ecological restoration : a definition and comments. *Restoration Ecology* 3 : 71-75.
- JONSSONS-NINNISS, S. et MIDDLETON, J. 1991. Effect of peat extraction on the vegetation in Wainfleet bog, Ontario. *Canadian Field-Naturalist* 105 : 505-511.
- JOOSTEN, J.H.J. 1992. " Bog regeneration in the Netherlands : a review ". *Peatland ecosystems and Man : an impact assessment*. O.M. Bragg, D.D. Hulme, H.A.P. Ingram et R.A. Robertson (éd.). Dundee, U.K. : Department of biological sciences, University of Dundee. p. 367-373.
- JORDAN III, W.R., GILPIN, M.E. et ABER, J.D. 1987. " Restoration ecology : ecological restoration as a technique for basic research ". *Restoration ecology : a synthetic approach to ecological research*. W.R. Jordan III, M.E. Gilpin et J.D. Aber (éd.). Cambridge : Cambridge University Press. p. 3-21.

- KEYS, D. 1992. *Canadian peat harvesting and the environment*. Ottawa : Conseil nord-américain de conservation des terres humides. 29 p. n° 1992-3.
- LANE, D.M. 1977. Extent of vegetative reproduction in eleven species of *Sphagnum* from northern Michigan. *The Michigan Botanist* 16 : 83-89.
- LAVOIE, C. et ROCHEFORT, L. 1996. The natural revegetation of a harvested peatland in southern Québec : a spatial and dendroecological analysis. *Écoscience* 3 : 101-111.
- LUKEN, J.O., BILLINGS, W.D. et PETERSON, K.M. 1985. Succession and biomass allocation as controlled by *Sphagnum* in an Alaskan peatland. *Canadian Journal of Botany* 63 : 1500-1507.
- LYNCH-STEWART, P. 1992. *Aucune perte nette- mise en oeuvre d'objectifs " aucune perte nette " pour la conservation des terres humides au Canada*. Ottawa : Conseil nord-américain de conservation des terres humides. 44 p. n° 1992-2.
- MAAS, D. et POSCHLOD, P. 1991. " Restoration of exploited peat areas in raised bogs : technical management and vegetation development ". *Terrestrial and aquatic ecosystems, perturbation and recovery*. O. Ravera (éd.). Chichester : Ellis Horwood. p. 379-386.
- MALMER, N., SVENSSON, B.M. et WALLEN, B. 1994. Interactions between *Sphagnum* mosses and field layer vascular plants in the development of peat-forming systems. *Folia Geobotanica and Phytotaxonomica* 29 : 483-496.
- McGRAW, J.B. et CHAPIN III, F.S. 1989. Competitive ability and adaptation to fertile and infertile soils in two *Eriophorum* species. *Ecology* 70 : 736-749.
- MEAD, H.-L. (éd.) 1990. *L'état de l'environnement au Québec. Un bilan des milieux humides : perspectives de conservation*. Québec : Union québécoise pour la conservation de la nature. 70 p.
- 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 ". *Restoration of temperate wetlands*. B.D. Wheeler, S.C. Shaw, W.J. Fojt et R.A. Robertson (éd.). Chichester : John Wiley & Sons. p. 405-422.
- MURRAY, K.J., TENHUNEN, D. et NOWAK, R.S. 1993. Photoinhibition as a control on photosynthesis and production of *Sphagnum* mosses. *Oecologia* 96 : 200-207.
- PEARCY, R.W., EHLERINGER, J., MOONEY, H.A. et RUNDEL, P.W. (éd.) 1991. Plant physiological ecology - field methods and instrumentation. London, UK : Chapman et Hall. 457 p.
- PIRTOLA, M. 1996. " Peat textiles ". *Peatlands in Finland*. H. Vasander (éd.). Helsinki : Finnish Peatland Society. p. 123-127.
- PLASS, W.T. 1978. " Use of mulches and soil stabilizers ". *Reclamation of drastically disturbed lands : proceedings (9-12 August 1976)*. Shaller et Sutton (éd.). Madison : ASA-CSSA-SSSA. p. 123-131.
- POSCHLOD, P. 1992. " Development of vegetation in peat-mined areas in some bogs in the foothills of the alps ". *Peatland ecosystems and Man : an impact assessment*. O.M. Bragg, D.D. Hulme, H.A.P. Ingram et R.A.Robertson (éd.). Dundee, U.K.: Department of biological sciences, University of Dundee. p. 287-290.
- POSCHLOD, P. 1995. " Diaspore rain and diaspore bank in raised bogs and implications for the restoration of peat-mined sites ". *Restoration of temperate wetlands*. B.D. Wheeler, S.C. Shaw, W.J. Fojt et R.A. Robertson (éd.). Chichester : John Wiley & Sons. p. 471-494.
- POSCHLOD, P. et PFADENHAUER, J. 1989. Regeneration of vegetative parts of peat mosses - a comparative study of nine *Sphagnum* species. *Telma* 19 : 77-88.
- PRICE, J.S. 1996. Hydrology and microclimate of a partly restored cutover bog, Québec. *Hydrological processes* 10 : 1263-1272.
- PRICE, J.S. 1997. Soil moisture, water tension, and water table relationship in a managed cutover bog. *Journal of Hydrology* 202 : 21-23.

- PRICE, J., ROCHEFORT, L. et QUINTY, F. 1998. Energy and moisture considerations on cutover peatlands : surface preparation, mulch cover and *Sphagnum* regeneration. *Ecological engineering* 10 : 293-312.
- QUINTY, F. et ROCHEFORT, L. 1997a. *Guide de restauration des tourbières - Peatland restoration guide*. Québec : Association Canadienne de Mousses de Tourbe. 21 p.
- QUINTY, F. et ROCHEFORT, L. 1997b. “ Plant reintroduction on a harvested peat bog ”. *Northern Forested Wetlands*. C. Trettin, M.F. Jurgensen, D.F. Grigal, M.R. Gale et J.K. Jeglum (éd.). Boca Raton : CRC Lewis Publishers. p. 133-145.
- RICHARDS, J.R.A., WHEELER, B.D., et WILLIS, A.J. 1995. “ The growth and value of *Eriophorum angustifolium* Honck. in relation to the revegetation of eroding blanket peat ”. *Restoration of temperate wetlands*. B.D. Wheeler, S.C. Shaw, W.J. Fojt et R.A. Robertson (éd.). Chichester : John Wiley & Sons. p. 509-521.
- ROBERT, É.C. 1997. *Régénération spontanée de deux tourbières ombrotrophes anciennement exploitées*. 82 p. Mémoire M. Sc., département de phytologie, Université Laval, Québec..
- ROBERT, É.C., ROCHEFORT, L. et GARNEAU, M. 1999. Natural revegetation of two block-cut mined peatlands in eastern Canada. *Canadian Journal of Botany* : sous presse.
- ROCHEFORT, L. et BASTIEN, D. 1998. Réintroduction de sphaignes dans une tourbière exploitée et abandonnée : évaluation de divers moyens de protection contre la dessiccation. *Écoscience* 5(1) : 117-127.
- ROCHEFORT, L. et CAMPEAU, S. 1997. Rehabilitation work on post-harvested bogs in south-eastern Canada. *Conserving peatlands*. L. Parkyn, R.E. Stoneman et H.A.P. Ingram (éd.). Wallingford (U.K.) : Cab International. p. 287-294.
- ROCHEFORT, L., GAUTHIER, R. et LEQUERÉ, D. 1995. “ *Spagnum* regeneration - toward an optimisation of bog restoration. *Restoration of temperate wetlands* ”. B.D. Wheeler, S.C. Shaw, W.J. Fojt et R.A. Robertson (éd.). Chichester : John Wiley & Sons. p. 423-434.

- ROCHEFORT, L., QUINTY, F. et CAMPEAU, S. 1997. Restoration of peatland vegetation : the case of damaged or completely removed acrotelm. *International Peat Journal* 7 : 20-28.
- SAGOT, C. et ROCHEFORT, L. 1996. Tolérance des sphaignes à la dessiccation. *Cryptogamie, Bryologie et 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., PENTTINEN, A. et SARKKA, A. 1992. Plant colonization of a bare peat surface : population changes and spatial patterns. *Journal of Vegetation Science* 3(1) : 113-118.
- SALONEN, V. et SETÄLÄ, H. 1992. Plant colonization of bare peat surface - relative importance of seed availability and soil. *Ecography* 15(2) : 199-204.
- SAS INSTITUTE INC. 1988. *SAS/STAT® TM User's Guide, release 6.03 Edition*. Cary, NC : SAS Institute Inc. 1028 p.
- SCHOUWENAARS, J.M. 1988. The impact of water management upon groundwater fluctuations in a disturbed bog relict. *Agricultural Water Management* 14 : 439-449.
- SCHOUWENAARS, J.M. 1993. Hydrological differences between bogs and bog-relicts and consequences for bog restoration. *Hydrobiologia* 265 : 217-224.
- SMALL, E. 1972. Photosynthetic rates in relation to nitrogen recycling as an adaptation to nutrient deficiency in peat bog plants. *Canadian Journal of Botany* 50 : 2227-2233.

- SMART, P.J., WHEELER, B.D. et WILLIS, A.J. 1989. Revegetation of peat excavations in a derelict raised bog. *New Phytologist* 111 : 733-748.
- SOPPO, R. 1996. "Encourager les partenariats pour la conservation : le rôle des industries d'exploitation des tourbières". *La conservation mondiale des tourbières, compte-rendu d'un atelier international tenu à Brisbane, Australie*. C.D.A. Rubec (éd.). Ottawa : Conseil nord-américain de conservation des terres humides. p. 25-30.
- TALLIS, 1983. "Changes in wetland communities". *Ecosystems of the world : Mires: swamp, bog, fen and moor*. A.J.P. Gore (éd.). New York : Elsevier Scientific. Vol. 4A. p. 311-348.
- VITT, D.H. et KUHRY, P. 1992. "Changes in moss-dominated wetland ecosystems". *Bryophytes and lichens in a changing environment*. J.W. Bates et A.M. Farmer (éd.). Oxford : Clarendon Press. p. 178-210.
- WALKER, L.R. et CHAPIN III, F.C. 1973. Interactions among processes controlling successional change. *Oikos* 50 : 131-135.
- WEIN, R.W. 1973. Biological flora of British isles : *Eriophorum vaginatum* L. *Journal of Ecology* 612 : 601-615.
- WHEELER, B.D. et SHAW, S.C. 1995. *Restoration of damaged peatlands*. London : HMSO. 211 p.
- WHEELER, B.D., MONEY, R.P., SHAW, S.C. et MEADE, R. 1998. "Assessing priorities and approaches to the restoration of damaged lowland bogs in Northwest Europe". *Proceedings of the 1998 International Peat Symposium - Peatland restoration and reclamation : techniques and regulatory considerations, Duluth*. T. Malterer, K. Johnson et J. Stewart (éd.). Duluth, MN : International Peat Society. p. 23-31.
- WIND-MULDER, H.L., ROCHEFORT, L. et VITT, D.H. 1996. Water and peat chemistry comparisons of natural and post-harvested peatlands across Canada and their relevance to peatland restoration. *Ecological Engineering* 7 : 161-181.
- ZOLTAÏ, S. 1988. "Milieu et classification des terres humides". *Terres humides du Canada*. Montréal : Polyscience. p. 1-26.