

GABRIEL CAISSE

IMPORTANCE DE LA FERTILISATION LORS DU BOISEMENT DES TOURBIÈRES RÉSIDUELLES

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

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

OCTOBRE 2007

RÉSUMÉ

Le boisement des tourbières résiduelles peut être envisagé comme complément à la restauration écologique ou comme option de réhabilitation lorsque la restauration pose problème.

La tourbe résiduelle est trop pauvre en éléments nutritifs pour permettre une croissance adéquate des arbres. La fertilisation lors de la plantation est donc nécessaire pour favoriser la croissance et la survie des jeunes arbres. La refertilisation des plantations doit aussi être considérée pour soutenir leur croissance après que l'effet de la fertilisation initiale se soit estompé.

Nous avons étudié l'effet de six traitements de fertilisation localisée, appliqués à la plantation, sur la croissance, la survie et la nutrition de plants d'épinettes noires et de mélèzes. L'importance de l'application d'azote, de phosphore et de potassium lors de la refertilisation de plantations a aussi été étudiée.

Nos résultats démontrent qu'une fertilisation initiale appropriée doit contenir une source facilement accessible d'azote ainsi que des quantités suffisantes de phosphore et de potassium. De plus, lors de la refertilisation, le phosphore est l'élément clé à appliquer afin de stimuler la croissance des arbres.

ABSTRACT

Residual peatland afforestation can be complementary to ecological restoration or it can be a rehabilitation option where restoration is problematic.

Residual is too nutrient poor to allow for adequate tree growth. Fertilization at planting time is then necessary to promote the growth and survival of tree seedlings. Refertilization must also be considered to sustain tree growth after that the initial fertilization effect has vanished.

We have studied the effect of six localized fertilization treatments, applied at planting time, on the growth, survival and nutrition of black spruce and tamarack seedlings. The importance of applying nitrogen, phosphorous and potassium for plantation refertilization has also been studied.

Our results show that a good initial fertilization must include an easily accessible nitrogen source as well as sufficient amounts of phosphorous and potassium. At refertilization time, phosphorous is the key element to apply to promote tree growth.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Line Rochefort, ma directrice de recherche, qui m'a permis de faire mes travaux de maîtrise au sein du Groupe de recherche en écologie des tourbières (GRET) grâce au nécessaire soutien financier qu'elle m'a offert. Son appui et ses conseils ne sont pas, non plus, à négliger, tout comme ceux que m'a offert Alison Munson, ma co-directrice de recherche.

Plusieurs membres du GRET m'ont aussi offert un soutien indispensable au cours de mes travaux. Je tiens donc à remercier Claire Boismenu pour sa disponibilité et sa gentillesse, Stéphanie Boudreau pour son écoute et ses conseils ainsi que Roxane Andersen, Cillian Breathnach et Jacinthe Letendre pour leur amitié.

La réalisation des travaux qui ont été mis en oeuvre pour ma maîtrise aurait été impossible sans la participation de nos partenaires industriels. Je tiens particulièrement à remercier Jacques Gagnon de Premier Horticulture et Daniel Lebel de Tourbières Berger dont la collaboration a été des plus appréciée.

Je remercie également tous les assistants qui m'ont donné un vaillant coup de main tant au labo que sur le terrain. Donc, merci à Élisabeth, Émeline, Fabrice, Guillaume, Mathieu, Natacha, Rachel et Roxane ainsi qu'à mes parents Serge et Vivianne.

Pour terminer, merci beaucoup à Catherine pour sa relecture attentive du manuscrit et son support de tous les instants.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
ABSTRACT	iii
REMERCIEMENTS	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
1. INTRODUCTION	1
1.1. Exploitation et réhabilitation des tourbières	1
1.1.1. Recolonisation végétale des tourbières résiduelles	2
1.1.2. Restauration écologique.....	3
1.1.3. Le boisement comme option de réaménagement.....	4
1.2. Boisement des tourbières résiduelles	5
1.2.1. La nutrition des arbres plantés en tourbières résiduelles	5
La tourbe résiduelle comme substrat de croissance	6
Influence du sol minéral sous-jacent	7
Épaisseur de tourbe restante	8
Carences communes	10
1.2.2. Fertilisation	10
Fertilisation initiale	11
Durée de la fertilisation initiale et refertilisation	12
Autres approches de fertilisation	12
1.3. Le drainage.....	13
1.4. La méthode d'analyse vectorielle	17
1.5. Hypothèses de recherche.....	22
1.6. Objectifs de recherche	22
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES	22
2.1. Description des sites d'étude	23
2.2. Dispositifs expérimentaux	23
2.3. Mesures physiques	29
2.4. Analyses foliaires	30
2.5. Analyses statistiques	31
2.6. Analyses vectorielles	32

3. RÉSULTATS	33
3.1. Expérience de fertilisation initiale	33
3.1.1. Épinette	34
Survie	34
Mesures physiques	34
Nutrition	37
3.1.2. Mélèze	40
Survie	40
Mesures physiques	40
Nutrition	41
3.2. Expérience de refertilisation	44
3.2.1. Épinette	44
Croissance	44
Nutrition	47
3.2.2. Mélèze	49
Croissance	49
Nutrition	49
3.2.3. Mauvaises herbes	50
4. DISCUSSION	53
4.1. Expérience de fertilisation initiale.....	53
4.2. Expérience de refertilisation.....	57
5. CONCLUSION	62
RÉFÉRENCES	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Composition des traitements de fertilisation localisée appliqués aux épinettes et aux mélèzes au moment de la plantation dans la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.).

Tableau 2. Quantité de fertilisant et contenu élémentaire utilisés lorsqu'un élément faisait partie de la combinaison appliquée lors de la refertilisation de plantations d'épinettes et de mélèzes dans les tourbières résiduelles de Bay-du-Vin et de Baie-Sainte-Anne (N.-B.).

Tableau 3. Taux de survie des épinettes et des mélèzes de l'expérience de fertilisation initiale deux ans après la plantation et la fertilisation.

Tableau 4. Analyse de variance appliquée à la croissance annuelle, la masse d'un arbre entier, la survie et la masse foliaire des épinettes et des mélèzes fertilisés avec six traitements de fertilisation localisée au moment de leur plantation dans la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.).

Tableau 5. Analyse de variance factorielle de la croissance annuelle et de la masse foliaire des épinettes et des mélèzes plantés dans les tourbières résiduelles de Bay-du-Vin et de Baie-Sainte-Anne (N.-B.).

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Analyse vectorielle : représentation graphique des variations de contenu, concentration et masse foliaires chez des arbres traités par rapport à des arbres de référence non traités. Inspiré et adapté de Timmer (1991).

Figure 2. Expérience de fertilisation initiale : distribution des traitements, des parcelles d'échantillonnage et identification des arbres servant aux mesures physiques et à l'échantillonnage foliaire.

Figure 3. Expérience de refertilisation : disposition factorielle des traitements et identification des arbres servant à la fois aux mesures physiques et à l'échantillonnage foliaire à l'intérieur d'une parcelle d'échantillonnage.

Figure 4. Longueur de la pousse terminale de la seconde saison de croissance et masse sèche après deux saisons de croissance des épinettes et des mélèzes fertilisés avec six traitements de fertilisation localisée au moment de leur plantation dans le cadre de l'expérience de fertilisation initiale dans la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.).

Figure 5. Effet nutritionnel, après une saison de croissance, des six traitements de fertilisation localisée appliqués au moment de la plantation chez les épinettes plantées dans la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.) dans le cadre de l'expérience de fertilisation initiale.

Figure 6. Effet nutritionnel, après deux saisons de croissance, des six traitements de fertilisation localisée appliqués au moment de la plantation chez les épinettes plantées dans la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.) dans le cadre de l'expérience de fertilisation initiale.

Figure 7. Effet nutritionnel, après une saison de croissance, des six traitements de fertilisation localisée appliqués au moment de la plantation chez les mélèzes plantées dans la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.) dans le cadre de l'expérience de fertilisation initiale.

Figure 8. Effet nutritionnel, après deux saisons de croissance, des six traitements de fertilisation localisée appliqués au moment de la plantation chez les mélèzes plantés dans la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.) dans le cadre de l'expérience de fertilisation initiale.

Figure 9. Longueur de la pousse annuelle des épinettes et des mélèzes dans les tourbières résiduelles de Bay-du-Vin et de Baie-Sainte-Anne (N.-B.) la seconde saison de croissance après leur refertilisation.

Figure 10. Effet nutritionnel, après une saison de croissance de la refertilisation des plantations d'épinettes de la tourbière résiduelle de Bay-du-Vin (N.-B.).

Figure 11. Effet nutritionnel, après une saison de croissance de la refertilisation des plantations de mélèzes de la tourbière résiduelle de Baie-Sainte-Anne (N.-B.).

Figure 12. Influence de l'application de fertilisant azoté en présence de phosphore sur l'envahissement des plantations par les mauvaises herbes.

1. INTRODUCTION

Le boisement des tourbières résiduelles est une pratique plutôt récente en Amérique du Nord. Jusqu'à maintenant, la majorité des connaissances scientifiques proviennent de travaux de recherche européens.

La tourbe résiduelle offre des conditions de croissance difficiles aux arbres qui y sont plantés. La nutrition déficiente de ces milieux fait en sorte que les arbres y développent des carences nutritionnelles qui nuisent à leur croissance et à leur survie. Dans ces conditions, la fertilisation est donc indispensable au succès des plantations d'arbres. Les travaux de recherche relatés dans le présent ouvrage portent sur la fertilisation et la nutrition d'essences résineuses plantées en tourbières résiduelles.

Dans ce premier chapitre, nous allons commencer par nous attarder brièvement à l'exploitation des tourbières et à leur réhabilitation. En second lieu, nous dresserons un portrait des connaissances actuelles quant au boisement des tourbières résiduelles. Enfin, nous présenterons la méthode d'analyse vectorielle. Cette technique d'analyse graphique des données nutritionnelles est méconnue, mais a un intérêt certain pour l'analyse d'expérience de fertilisation.

1.1. Exploitation et réhabilitation des tourbières

L'exploitation industrielle des dépôts de tourbe est une activité qui a une importance économique régionale dans le Sud-est du Québec ainsi qu'au Nord-est et à l'Est du Nouveau-Brunswick. La tourbe de sphaigne extraite est principalement destinée à être utilisée pour l'horticulture commerciale et domestique où elle sert d'amendement pour le sol ou à la préparation de substrats destinés à la culture des plantes en contenants ou en pots.

La méthode moderne d'extraction de la tourbe nécessite l'utilisation de gros aspirateurs remorqués par des tracteurs qui récoltent une fine couche de tourbe à chaque passage. Cette méthode d'extraction modifie profondément les tourbières puisqu'elle nécessite

l'enlèvement de la végétation en surface puis un drainage intensif de la tourbière pour permettre à la machinerie de circuler sur le site. Les travaux d'extraction de la tourbe s'étendent sur plusieurs années et dépendent de l'épaisseur du dépôt de tourbe à récolter. Plusieurs raisons peuvent mener à l'arrêt des activités d'extraction de la tourbe sur un site d'exploitation. Toutefois dans la plupart des cas, l'extraction de la tourbe cesse lorsque des couches de tourbe de qualité moins intéressante pour l'horticulture sont atteintes.

1.1.1. Recolonisation végétale des tourbières résiduelles

Lorsque les travaux d'extraction de la tourbe cessent, les conditions environnementales retrouvées dans les tourbières résiduelles sont différentes de celles retrouvées en tourbières naturelles. L'abaissement de la nappe phréatique dû au drainage intensif combiné au passage répété de la machinerie durant plusieurs années mènent à l'oxydation et à la compaction du sol organique (Price 1996). De plus, la surface sans végétation d'une tourbière résiduelle est formée de tourbe accumulée à un stade plus jeune de l'histoire de la tourbière souvent lorsque des conditions minérotrophes prévalaient (Wind-Mulder *et al.* 1996).

La recolonisation végétale des tourbières ayant été exploitées par la méthode moderne d'aspiration est lente et implique rarement la retour des mousses du genre *Sphagnum* dominant l'écosystème naturel (Lavoie et Rochefort 1996, Desrochers *et al.* 1998, Poulin *et al.* 2005). Certains filtres environnementaux compliquant la recolonisation naturelle des tourbières ont été identifiés par Campbell *et al.* (2000). Tout d'abord, les surfaces abandonnées sont grandes, sans végétation et dépourvues de banque de graines. Les diaspores de plantes colonisatrices doivent donc provenir du pourtour de ces zones (Salonen 1987). Plus la distance des sources de graines est grande, plus la colonisation sera lente. Une deuxième barrière à l'établissement des plantes sur les tourbières résiduelles est l'instabilité de la surface. Le soulèvement gélival (Groeneveld et Rochefort 2002), l'érosion éolienne (Campbel *et al.* 2002) et l'oxydation de la tourbe (McNeil *et al.* 2000) sont tous des facteurs qui peuvent compliquer l'établissement et la survie des plantes colonisatrices. La tourbe est aussi un sol très pauvre en éléments minéraux, ce qui

complique grandement l'établissement d'une végétation colonisatrice. Toutefois, les conditions physico-chimiques prévalant dans les tourbières résiduelles sont semblables, quoique plus variables, à des conditions typiques de fens pauvres où on retrouve une végétation typique de tourbière (Wind-Mulder *et al.* 1996). Enfin, les conditions hydrologiques caractérisées par une nappe d'eau fluctuante et un assèchement estival du sol entraînent un stress hydrique qui est un autre facteur défavorisant la colonisation végétale des tourbières résiduelles (Price 1997, Price *et al.* 2003).

Malgré le fait que la recolonisation végétale spontanée des tourbières résiduelles soit possible (Lavoie et Rochefort 1996, Lavoie *et al.* 2003), l'intervention humaine est souvent nécessaire pour assurer la réhabilitation rapide de ces milieux. Deux options de réhabilitation sont possibles pour les tourbières résiduelles: la restauration écologique et le réaménagement.

1.1.2. Restauration écologique

La restauration écologique est l'option de réhabilitation des tourbières résiduelles qui devrait être favorisée aussi souvent que possible. Au Sud-est du Québec ainsi qu'au Nord-est et à l'Est du Nouveau-Brunswick, des centaines d'hectares de tourbières ont déjà été affectées par l'extraction de la tourbe, l'agriculture, le développement résidentiel, la foresterie et la construction de route (Pellerin et Lavoie 2000, Pellerin 2003, Poulin *et al.* 2004). Étant donné l'intense pression anthropique à laquelle les tourbières du Sud-est du Canada sont soumises, il est important de préserver certaines des tourbières naturelles restantes ainsi que de mettre le plus d'efforts possible pour restaurer celles qui ont été affectées par l'extraction de la tourbe (Desrochers *et al.* 2000).

Une technique efficace de restauration écologique a été développée depuis les années 1990. L'objectif principal de cette technique est le retour d'un couvert végétal typique des tourbières ombrotrophes (principalement les mousses du genre *Sphagnum*) et aussi le rétablissement des conditions hydrologiques caractéristiques de ces écosystèmes. Le but à

long terme de la restauration est le rétablissement des tourbières résiduelles en écosystèmes accumulateurs de tourbe (Rochefort *et al.* 2003).

Les travaux de restauration consistent au blocage des canaux de drainage, à la réintroduction de fragments de plantes récoltées en surface d'un site d'emprunt naturel, à leur protection par l'épandage d'un paillis et à une faible fertilisation phosphatée. Une description détaillée de la méthode est présentée par Quinty et Rochefort (2003) et Rochefort *et al.* (2003).

1.1.3. Le boisement comme option de réaménagement

Dans certains cas, la restauration de parties ou de la totalité de certaines tourbières résiduelles peut s'avérer trop ardue. Par exemple, la topographie de la tourbière résiduelle peut rendre le remouillage de certains secteurs problématique. Dans certains cas, il peut aussi être impossible de trouver un site d'emprunt naturel pour récolter des fragments de plantes à une distance convenable d'un site à restaurer. Ainsi le réaménagement doit être considéré comme une option de réhabilitation, soit pour des parties ou pour la totalité de certaines tourbières résiduelles. Le réaménagement consiste à donner une nouvelle vocation à un site dégradé qui est toutefois différente de son état naturel original.

Le boisement est une option de réaménagement intéressante pour les tourbières résiduelles. Il peut être envisagé comme complément à la restauration écologique dans un projet de restauration à grande échelle, soit pour accélérer le retour d'îlots forestiers sur la tourbière, pour recréer une bordure forestière sur les pourtours du site à restaurer ou pour implanter un couvert végétal là où les conditions ne sont pas propices au retour des mousses typiques des tourbières. Le boisement peut aussi être considéré comme une option de réhabilitation d'un site complet lorsque la restauration pose problème. L'utilisation d'arbres est aussi utile pour former des brise-vents limitant l'érosion éolienne et pour la formation de barrières visuelles sur des sites où l'extraction de la tourbe est en cours. L'utilisation des tourbières résiduelles pour la production de matière ligneuse serait aussi possible. Toutefois, cette

utilisation des tourbières après leur exploitation n'est pas encouragée présentement dans le contexte Nord-Américain, la restauration écologique étant considérée primordiale.

1.2. Boisement des tourbières résiduelles

La majorité des travaux de recherche concernant le boisement des tourbières résiduelles ont eu lieu en Europe, soit en Estonie (Valk 1986), en Finlande (Aro 2001), en Irlande (Renou et Farrell 2005) ou plus récemment en Suède (Leupold 2005). Peu d'études portant sur ce sujet ont été menées dans le contexte Nord Américain. Jusqu'à ce jour, seuls les travaux de Bussièrès (2005) se sont attardés à des questions telles que le choix des espèces d'arbres et à la fertilisation lors du boisement des tourbières résiduelles.

Dans le contexte européen, le boisement des tourbières résiduelles est commun et considéré comme une mesure de réhabilitation convenable (Selin 1996, Lötjönen 2004). L'objectif principal des travaux de recherche effectués en Europe est de maximiser le potentiel de production forestière des plantations sur tourbe résiduelle (Aro 2000, Renou et Farrell 2005). Cet objectif diffère de celui poursuivi en Amérique du Nord où la plantation d'arbres est vue comme un moyen de création d'habitat forestier complémentaire aux travaux de restauration écologique. Malgré qu'ils aient des objectifs actuels différents des nôtres, les chercheurs européens s'accordent pour dire que la tourbe résiduelle offre un bon potentiel pour la croissance des plantations d'arbres tant que le drainage et la nutrition sont adéquatement pris en charge (Carey *et al.* 1985, Pikk et Valk 1996, Aro 2001).

1.2.1. La nutrition des arbres plantés en tourbières résiduelles

La tourbe résiduelle est pauvre en éléments nutritifs et minéraux. La survie et la croissance des arbres qui y sont plantés sont souvent mauvaises sans fertilisation (Leupold 2005). Dans certains cas, les efforts de boisement des tourbières résiduelles n'ont donné que des résultats médiocres (Renou et Farrell 2005). Le régime nutritionnel des arbres plantés en tourbières résiduelles est influencé par plusieurs facteurs dont le contenu en éléments

nutritifs de la tourbe résiduelle, l'épaisseur de la couche de tourbe restante, la qualité du sol minéral sous-jacent ainsi que la profondeur d'enracinement des arbres. Par ailleurs, lorsque la nutrition des arbres est prise en charge, il est possible d'obtenir une survie et une croissance adéquate malgré les conditions de croissance originellement difficiles du milieu.

La tourbe résiduelle comme substrat de croissance

La tourbe résiduelle contient une quantité totale d'azote jugée suffisante pour permettre une croissance adéquate des arbres (Aro et Kaunisto 1998a). Toutefois, tant en tourbières résiduelles qu'en tourbières naturelles boisées, seulement une très faible proportion de l'azote total contenu dans la tourbe résiduelle est disponible pour les arbres, la majorité de l'azote étant immobilisé au sein de la matière organique (Kaunisto et Viinamäki 1991, Päivänen et Paavilainen 1996). Ainsi, la disponibilité de l'azote pour les arbres est directement reliée à l'activité des microorganismes qui décomposent de la tourbe. Par ailleurs, des analyses foliaires menées sur de jeunes plants de bouleau et de pin sylvestre plantés sur de la tourbe résiduelle en Finlande ont démontré que ces arbres avaient une nutrition normale en azote qu'ils aient été fertilisés ou non (Aro et Kaunisto 1998a). Selon Paavilainen et Päivänen (1995), il doit y avoir entre 1,3 % et 1,5 % d'azote dans les 20 premiers centimètres de tourbe afin d'assurer une croissance satisfaisante aux arbres.

La tourbe résiduelle est pauvre en éléments comme le phosphore et le potassium (Päivänen et Paavilainen 1996, Aro et Kaunisto 1998a, Renou et Farrell 2005). La quantité de phosphore disponible pour les arbres est aussi très faible par rapport au contenu en phosphore total de la tourbe résiduelle (Kaunisto et Viinamäki 1991). La même situation a été observée pour les tourbières naturelles boisées (Braekke 1987, Päivänen et Paavilainen 1996). C'est pourquoi le contenu en phosphore total de la tourbe n'est pas un bon indicateur du phosphore disponible pour les plantes (Wells et Williams 1996). De plus, le ratio N/P de la tourbe résiduelle est d'environ 100/2-4 alors que les arbres fixent ces deux éléments selon un ratio de 100/10-13 (Kaunisto et Aro 1996). Les arbres sont donc soumis à une nutrition déséquilibrée en ce qui a trait à l'azote et au phosphore et subissent un manque de phosphore relativement à l'azote. La quantité de phosphore total de la tourbe est

étroitement liée à la quantité de fer aussi présente (Wells et Williams 1996, Silfverberg et Hartman 1999, Rautjärvi *et al.* 2004). Dans les conditions aérobiques rencontrées en surface dans les tourbières résiduelles, le fer est sous forme oxydée et réduit la mobilité du phosphore. Cet élément est donc moins susceptible au lessivage, mais en contrepartie il est moins disponible pour les arbres (Wells et Williams 1996, Silfverberg et Hartmann 1999).

La tourbe résiduelle est caractérisée par un déficit sévère en potassium (Kaunisto et Aro 1996). La rétention du potassium dans la tourbe dépend de la disponibilité des sites d'échange et cet élément est facilement déplacé du complexe d'échange par d'autres cations (Malcolm et Cuttle 1983, Braekke 1987). Le potassium est donc facilement lessivé hors des couches superficielles de tourbe.

Influence du sol minéral sous-jacent

Le contenu en éléments nutritifs de la tourbe peut varier en fonction de la nature du sol minéral situé sous la tourbe. En effet, lorsque le sol minéral sous-jacent est argileux, les couches de tourbe situées près de l'interface entre la tourbe et le sol minéral sont enrichies en éléments dont le phosphore et le potassium (Aro et Kaunisto 2002). Par contre, un sol minéral plutôt sableux n'a pas d'effet bénéfique sur la teneur en minéraux de la tourbe près de l'interface entre la tourbe et le sol minéral (Kaunisto 1997). Un sol minéral de texture grossière est pauvre et retient mal l'eau. Ce type de sol minéral situé sous la tourbe est donc peu approprié à la foresterie (Lötjönen 2004). L'importance de la nature du sol minéral situé sous la tourbe peut être illustrée par le fait qu'en Finlande la nutrition des pins sylvestres est normale lorsque le sous-sol est argileux (Aro et Kaunisto 1998a), alors que ces mêmes arbres développent des carences sévères en P et K si le sol minéral sous-jacent est de texture grossière (Kaunisto 1997). Dans un même ordre d'idées, la mortalité des arbres au cours des 6 à 8 années suivant la plantation est plus élevée lorsque la texture du sol minéral est plus grossière (Aro et Kaunisto 1998a).

Épaisseur de tourbe restante

Le contenu en éléments minéraux de la tourbe résiduelle n'est pas constant à travers le profil vertical de la couche de tourbe restante. En effet, l'influence du sol minéral ne se fait sentir que dans les derniers 10 cm à 15 cm du profil de tourbe (Aro et Kaunisto 1998a). Ainsi, l'épaisseur de tourbe résiduelle et la profondeur d'enracinement des arbres influencent grandement le régime nutritionnel des arbres.

L'épaisseur de tourbe résiduelle est très variable. Elle dépend entre autres des conditions de drainage, des méthodes de récolte et de l'utilisation à laquelle la tourbe récoltée est destinée. En Amérique du Nord, où la tourbe est principalement destinée à un usage horticole, seules les couches de tourbe fibriques peu décomposées sont récoltées. En Europe, la tourbe plus décomposée des couches profondes du profil de tourbe est récoltée pour la production d'énergie thermique (Kaunisto 1997). L'épaisseur de tourbe résiduelle laissée lors de l'arrêt des activités d'exploitation en Europe est donc souvent plus mince que celle laissée en Amérique du Nord.

La topographie variable de la surface du sol minéral situé sous la tourbe fait aussi en sorte que l'épaisseur de la tourbe résiduelle n'est pas uniforme (Kaunisto 1997, Renou et Farrell 2005). L'étendue de la variation de l'épaisseur de tourbe résiduelle est considérable entre différentes tourbières abandonnées aussi bien qu'à l'intérieur d'un même site. Par exemple, en Finlande, des plantations ont été établies sur des sites où la tourbe résiduelle varie de 24 à 72 cm (Kaunisto et Viinamäki 1991), de 4 à 100 cm (Aro et Kaunisto 2002) ou bien de 44 à 155 cm (Aro et Kaunisto 2003). D'autres travaux ont été menés en Suède sur des sites où l'épaisseur de tourbe résiduelle varie de 50 à 100 cm (Leupold 2005) tandis qu'en Irlande, Carey *et al.* (1985) ont recensé des épaisseurs de tourbe résiduelle allant de 50 cm à plus de trois mètres. Au Québec et au Nouveau Brunswick, des plantations ont été établies sur des tourbières dont l'épaisseur de tourbe résiduelle varie de 15 à 183 cm (Bussièrès 2005).

La profondeur d'enracinement des arbres influence directement leur accès aux ressources disponibles dans la tourbe résiduelle. Les racines des arbres ne pénètrent la tourbe résiduelle que superficiellement. La profondeur moyenne d'enracinement du pin sylvestre planté en tourbière résiduelle varie entre 4 cm et 20 cm tandis que la profondeur maximale

atteinte par ses racines s'étend de 15 cm à 34 cm dans le cas de plantations âgées de 17 à 34 ans (Kaunisto et Viinamäki 1991, Aro 2000, Aro et Kaunisto 2003).

Les arbres peuvent donc seulement puiser les éléments nutritifs nécessaires à leur croissance de la couche supérieure du profil de tourbe. Donc si la tourbe est trop épaisse, ce qui est fréquent, ils ne peuvent pas profiter de l'apport accru en éléments minéraux fourni par le sol minéral sous-jacent à la tourbe lorsque celui-ci est de bonne qualité. En effet, même lorsque le sol minéral sous la tourbe était de bonne qualité pour la croissance des arbres, Aro et Kaunisto (1998a) ont observé que l'augmentation de l'épaisseur de tourbe résiduelle entraînait une augmentation de la mortalité des plants de pin sylvestre âgés de 6 à 8 ans. Ils ont aussi observé une corrélation négative entre la croissance des pins et l'épaisseur de tourbe.

Afin d'éviter les effets négatifs liés à une trop grande épaisseur de tourbe, il est généralement recommandé de planter des arbres seulement si la couche de tourbe résiduelle a une épaisseur inférieure à 30 cm là où le sol minéral sous-jacent est propice à la croissance des arbres (Kaunisto et Viinamäki 1991, Aro et Kaunisto 1998a, 1998b, Aro 2001). Ainsi, les arbres pourront avoir accès aux éléments minéraux contenus dans le sol minéral sous-jacent afin d'assurer la continuité de leur développement. Toutefois, des problèmes nutritionnels peuvent quand même se produire durant la phase d'établissement des plants (Kaunisto et Aro 1996) avant que leur système racinaire ne se soit suffisamment développé pour leur permettre de puiser les éléments nutritifs fournis par le sol minéral sous-jacent à la tourbe.

En Irlande, où les tourbières se sont formées sur des dépôts morainiques alcalins, l'influence du sol minéral est néfaste pour les arbres qu'on désire y planter (Renou et Farrell 2005). Ainsi, de 50 à 60 cm de tourbe devraient être laissés afin de s'assurer que les racines des arbres n'accèdent pas à la tourbe influencée par le sol minéral qui leur est néfaste (Carey *et al.* 1985, Jones et Farrell 2000). Par ailleurs, sur un sol minéral pauvre de texture grossière, l'épaisseur de tourbe résiduelle n'a pas d'importance puisque aucun enrichissement de la tourbe n'a lieu.

Carences communes

Le faible contenu en éléments nutritifs, l'épaisseur variable de la tourbe résiduelle et la faible profondeur d'enracinement des arbres font en sorte que les arbres n'ont souvent pas accès à une nutrition minérale adéquate si la tourbe résiduelle est relativement épaisse, et ce, peu importe la qualité du sol minéral sous-jacent.

Le phosphore est l'élément limitant le plus la croissance des arbres en tourbières résiduelles (Valk 1986, Pikk et Valk 1996, Jones et Farrell 2000). Des essais de fertilisation ont démontré que la taille atteinte par des bouleaux et des pins sylvestres est le plus fortement influencée par l'ajout de phosphore peu importe si de l'azote ou du potassium sont aussi utilisés (Pikk et Valk 1996). Des carences en azote et en potassium sont aussi souvent observées (Renou et Farrell 2005). En Irlande, des anomalies de croissance observées sur plusieurs arbres sont attribuées à un manque de cuivre (Carey *et al.* 1985, Jones et Farrell 2000). Alors qu'une carence en bore affecte la croissance des arbres en Scandinavie tant en tourbières résiduelles (Aro et Kaunisto 1998b) qu'en tourbières naturelles boisées (Kaunisto 1997).

1.2.2. Fertilisation

La nutrition déficiente rencontrée en tourbières résiduelles fait en sorte que, sans fertilisation, les arbres plantés en tourbières résiduelles développent rapidement des carences nutritives qui mènent à une mauvaise croissance et à une mortalité élevée (Aro et Kaunisto 1998b, Bussièrès 2005, Letho 2005, Leupold 2005). La fertilisation a donc une importance capitale quant au succès de l'établissement et de la croissance des arbres plantés en tourbières résiduelles (Carey *et al.* 1985, Valk 1986, Aro et Kaunisto 1998b, Leupold 2005).

Fertilisation initiale

Une fertilisation initiale comprenant du phosphore et du potassium appliquée de façon localisée est recommandée (Aro 2000). Du cuivre et du bore peuvent aussi être appliqués selon les besoins (Aro et Kaunisto 1998b, Carey *et al.* 1985). L'azote n'est pas considéré nécessaire lors de la fertilisation initiale des arbres. L'application de phosphore stimulerait la minéralisation de l'azote contenu dans la tourbe (Wells et Williams 1996) et pourrait ainsi assurer une nutrition azotée adéquate pour les arbres.

L'application localisée du fertilisant est habituellement faite en « spot », c'est-à-dire que le fertilisant est appliqué à la surface du sol dans un cercle d'environ 15 cm à 30 cm de rayon autour du plant. La fertilisation localisée est préférable à une fertilisation à la volée puisqu'elle limite l'envahissement du sol par la végétation compétitrice qui pourrait nuire aux arbres plantés durant les premières années ou engendrer des coûts de contrôle de la végétation élevés. De plus, des essais de fertilisation sur des plantations d'arbres en tourbières naturelles ouvertes ont démontré que l'application de fertilisant en « spot » est aussi efficace que l'application à la volée pour favoriser la survie et la croissance des plants; de plus celle-ci nécessite de trois fois moins de fertilisant (Sundström 1998). Selon les recommandations de Aro (2000), le taux d'application du fertilisant est de 2,7 g de phosphore et 5,1 g de potassium par plant. Le phosphore est le plus souvent appliqué sous forme de roche phosphatée et le potassium sous forme de muriate de potasse.

Selon les essais de fertilisation de Oskarsson et Sigurgeirsson (2001) sur des plantations d'arbres sur des sols d'origine volcanique en Islande, les plants fertilisés avec des engrais à dissolution lente croissent significativement mieux que ceux qui ont reçu la même dose sous forme d'engrais solubles. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait qu'un fertilisant à dissolution plus lente est capable de relâcher des nutriments à un rythme tel que les microbes et les plantes puissent l'utiliser avant qu'il ne soit lessivé (Pirainen et Domish 2004). Les pertes de fertilisant appliqué sont donc limitées puisque le fertilisant est retenu et utilisé dans le système. L'utilisation de fertilisants à dissolution lente semble donc un moyen intéressant d'améliorer l'efficacité de la fertilisation appliquée ce qui peut permettre d'utiliser de plus faibles quantités de fertilisation tout en favorisant la croissance des arbres.

Durée de la fertilisation initiale et refertilisation

L'effet bénéfique de la fertilisation initiale localisée est toutefois de courte durée. Selon Kaunisto et Aro (1996), la fertilisation initiale appliquée en « spot » peut assurer le développement des plants pour les premiers 4 à 6 ans. En Finlande, des carences en phosphore et en potassium ont été décelées par des analyses foliaires dans des plantations de pins sylvestres âgées de 6 à 8 ans qui avaient été fertilisées au moment de la plantation (Aro et Kaunisto 1998a). En Irlande, le statut nutritionnel de plantations de diverses espèces d'arbres a commencé à se détériorer 5 ans après la fertilisation initiale (Jones et Farrell 2000). Le taux de croissance de ces mêmes arbres s'est alors mis à diminuer de sorte que, 5 ans suivant la plantation, seulement un tiers des arbres poussait de façon satisfaisante (Jones et Farrell 1997). Après environ 10 ans, la croissance de certaines de ces plantations stagnait (Jones et Farrell 2000).

La refertilisation des plantations doit donc être envisagée pour soutenir la croissance des arbres après que l'effet de la fertilisation initiale se soit estompé. Il est recommandé de fertiliser les arbres une deuxième fois 4 à 5 ans après la plantation. La fertilisation est alors appliquée à la volée selon un taux de 45 kg/ha de phosphore et de 80 kg/ha de potassium (Aro 2000). Les sources de phosphore et de potassium utilisées le plus souvent sont encore la roche phosphatée et le muriate de potasse.

Autres approches de fertilisation

D'autres approches sont aussi utilisées pour améliorer la nutrition des arbres en tourbières résiduelles. L'application à la volée de grandes quantités de cendre riche en éléments minéraux provenant de la combustion de bois ou de tourbe dans des centrales thermiques est un moyen qui s'est avéré efficace pour favoriser la survie et la croissance des arbres (Nilsson et Lundin 1996, Aro et Kaunisto 1998a, Leupold 2005). Cette technique est aussi utilisée pour la fertilisation des tourbières forestières (Moilanen *et al.* 2002). Lorsque le sol minéral situé sous la tourbe est de bonne qualité pour la croissance des arbres et qu'il est accessible, il est bénéfique de l'utiliser pour amender la tourbe. Le labour profond du sol

est une méthode efficace pour mélanger la tourbe au sol minéral sous-jacent lorsque la couche de tourbe résiduelle est assez mince pour que les équipements de labour puissent l'atteindre (Valk 1986). Il est aussi possible de répandre du sol minéral sur la surface de la tourbe lors du creusage des canaux de drainage. Enfin, lorsque les canaux de drainage sont en contact avec le sol minéral, ils peuvent être bloqués afin d'inonder la tourbière et de répandre du sol minéral en suspension qui se déposera sur la surface de la tourbe lors du retrait de l'eau (Kaunisto et Aro 1996, Aro et Kaunisto 1998b). L'application de cendre à la volée tout comme l'amendement de la tourbe avec du sol minéral favorisent toutefois la recolonisation végétale rapide de la tourbe nue par des espèces autres que les arbres plantés (Leupold 2005).

1.3. Le drainage

Le drainage des tourbières naturelles boisées est considéré comme un moyen efficace pour améliorer la croissance des arbres et la productivité des peuplements forestiers (Rothwell 1991). En effet, le drainage des tourbières naturelles boisées en Finlande résulte habituellement en une production de bois satisfaisante pour l'exploitation forestière (Kaunisto 1997). Des travaux de recherche menés sur des tourbières boisées de l'Alberta ont démontré que la croissance de l'épinette noire et du mélèze laricin était positivement reliée à une augmentation de la profondeur de la nappe phréatique (Lieffers et Rothwell 1987, Lieffers et Macdonald 1990). Dans le même ordre d'idée, il a aussi été démontré que l'abaissement de la nappe phréatique entraîné par la transpiration de la végétation avait un effet positif sur la croissance en hauteur et en diamètre des arbres croissant sur une tourbière boisée du Nord-ouest du Québec (Jutras 2004).

Le drainage a aussi un effet positif sur la survie des arbres plantés sur des tourbières naturelles. Dans une étude menée en Alberta, Rothwell *et al.* (1993) ont noté une meilleure survie des plants d'épinette blanche plantés sur des sites drainés par rapport à ceux plantés sur des sites non drainés. Une augmentation de l'intensité du drainage a augmenté la survie de diverses espèces d'arbres plantés sur des tourbières ombrotrophes du sud de la Suède une vingtaine d'années suite à la plantation (Sundström 1998). Dans la même étude, il n'y a

eu aucun effet du drainage sur la survie des arbres pour les tourbières situées plus au Nord. Cette absence d'effet est probablement causée par des conditions climatiques plus froides qui ont un effet plus limitant sur la croissance des arbres que le contenu en eau du sol.

Malgré le fait que les tourbières résiduelles soient déjà drainées intensivement et souvent depuis plusieurs années, il est important de porter attention aux conditions de drainage présentes dans ces tourbières lorsque leur boisement est considéré. Des conditions saturées en eau peuvent être fréquentes même si les sites sont drainés (Renou et Farrell 2005). La conductivité hydraulique de la tourbe résiduelle est réduite vu la compaction de la tourbe entraînée par le drainage intensif et le passage de la machinerie (Price 1996) ce qui rend le drainage de ces milieux plus ardu que celui des tourbières naturelles (Paavilainen et Päivänen 1995). De plus, une détérioration du système de drainage peut se produire si les canaux ne sont pas entretenus suivant l'abandon des activités d'extraction de la tourbe.

Le contenu en eau de la tourbe est un facteur crucial dans l'établissement des jeunes plants dans les tourbières résiduelles; le manque ainsi que le surplus d'eau peuvent entraîner des problèmes pour les plantations (Renou et Farrell 2005). Un site dont le contenu en eau est trop élevé ou qui est périodiquement inondé n'est pas propice au boisement (Pikk et Valk 1996). Un régime hydrique est considéré favorable lorsque la nappe phréatique se situe à plus de 30 cm sous la surface (Pikk et Valk 1996).

La magnitude de l'effet du drainage dépend de l'espacement des drains (Rothwell 1991). Toutefois une étude menée sur une tourbière résiduelle en Suède n'a pas décelé de différence quant au développement de la forêt selon l'intensité du drainage lorsque l'espacement des canaux était de 20 m, 30 m et 40 m (Letho 2005). Ainsi, un espacement des canaux de drainage d'au moins 40 m semble suffisant pour assurer une croissance adéquate des arbres.

Tout comme un drainage déficient, un drainage trop prononcé peut avoir un effet négatif sur les plantations d'arbres sur les tourbières résiduelles. L'assèchement du sol lors de périodes de faibles précipitations peut entraîner un stress hydrique chez les plants. Le stress hydrique a un effet négatif sur l'acquisition de nutriments par les plants puisque lorsque le prélèvement en eau est restreint, le prélèvement des nutriments l'est aussi (Margolis et

Brand 1990). Le stress hydrique empêche aussi les plants d'obtenir le carbone nécessaire à la formation de leur tissu en entraînant la fermeture des stomates pour réduire les pertes d'eau (Margolis et Brand 1990).

L'effort apporté à l'entretien des canaux de drainage pour favoriser la croissance des arbres plantés en tourbière résiduelle sera plus ou moins grand selon le désir d'implanter un couvert forestier. En Irlande, où le boisement des tourbières résiduelles est considéré comme un bon moyen de produire de la matière ligneuse, l'entretien des drains est considéré primordial (Jones et Farrell 2000). Par contre, en Estonie, il n'est pas jugé profitable de drainer les tourbières résiduelles dont le réseau de drainage est devenu inefficace (Pikk et Valk 1996). D'autres options de réhabilitation écologique des tourbières sont alors favorisées.

Plusieurs modifications des propriétés de la tourbe entraînées par le retrait du surplus d'eau contenu dans le sol sont à l'origine de l'effet positif du drainage sur la croissance et la survie des arbres. Plusieurs études ont démontré que le drainage des tourbières naturelles entraîne une augmentation de la masse volumique de la tourbe (Westman 1981, Laiho et Laine 1995, Wells et Williams 1996, Minkinen et Laine 1998). L'augmentation de la masse volumique est principalement due à la compaction de la tourbe qui n'est plus soutenue par la masse d'eau qu'elle contenait. Minkinen et Laine (1998) ont démontré que l'augmentation de la masse volumique de la tourbe est corrélée positivement au volume des peuplements forestiers retrouvés sur des tourbières boisées situées en Finlande. L'accroissement de la masse volumique entraînée par le drainage fait en sorte que plus d'éléments nutritifs requis par les plantes se retrouvent dans un volume de sol donné (Laiho *et al.* 1999). Le drainage entraîne donc une augmentation de la quantité totale d'azote (Braekke 1987, Sundström 1995, Wells et Williams 1996, Minkinen et Laine 1998), de phosphore (Braekke 1987, Sundström 1995) et d'autres éléments minéraux (Minkinen et Laine 1998) contenus dans les couches de tourbe superficielles. Par ailleurs, la quantité totale de potassium contenu dans la tourbe est diminuée par le drainage (Sundström 1995) malgré une augmentation de la capacité d'échange cationique de la tourbe (Braekke 1987). Westman (1981) a obtenu des résultats similaires pour l'azote, le phosphore et le potassium en étudiant l'effet de l'augmentation de la masse volumique de la tourbe due à la

compaction des couches de tourbe selon leur profondeur dans le profil de sol. Dans la même étude, la capacité d'échange cationique de la tourbe était négativement corrélée à la masse volumique.

L'amélioration de la croissance et de la survie des arbres par le drainage peut aussi être causée par l'augmentation de la température du sol (Rothwell 1991, Sundström 1995). Le sol drainé se réchauffe plus tôt au printemps ce qui permet aux arbres de profiter d'une saison de croissance plus longue.

En plus d'augmenter la température du sol, le drainage en augmente l'aération (Liefers 1988). Ces deux facteurs améliorent les conditions de vie des microorganismes décomposeurs du sol qui sont défavorisés lorsque le sol est saturé en eau. La minéralisation des éléments nutritifs à partir de la matière organique est ainsi accélérée par le drainage (Päivänen et Paavilainen 1996) ce qui augmente la disponibilité des éléments nutritifs et minéraux contenus dans la tourbe.

Un sol saturé en eau dont l'aération est mauvaise nuit aussi à la croissance des racines (Päivänen et Paavilainen 1996). Dans des tourbières boisées de l'Alberta, la profondeur maximale atteinte par les racines d'épinette noire et de mélèze laricin est accrue lorsque la profondeur de la nappe phréatique augmente (Liefers et Rothwell 1987). En conséquence, le volume d'enracinement des arbres dans le sol est augmenté (Westman 1981) ce qui a pour effet d'accroître l'accessibilité aux nutriments contenus dans la tourbe (Päivänen et Paavilainen 1996). L'abaissement de la nappe phréatique entraîne aussi un accroissement de la biomasse de racines fines (Liefers et Rothwell 1987) qui permet aux arbres d'acquérir plus de nutriments. En plus de son effet sur la profondeur d'enracinement et la quantité de racines, le drainage pourrait aussi être lié à de plus hauts taux d'assimilation nette des nutriments par les arbres (Macdonald et Liefers 1990). L'augmentation de la capacité des arbres à acquérir des nutriments suite au drainage peut être illustrée par le fait que l'application de fertilisants sur des tourbières boisées n'entraîne un accroissement de la croissance des arbres qu'aux endroits bien drainés (Paavilainen et Päivänen 1995). Cette réponse différente à la fertilisation selon que le drainage soit efficace ou déficient démontre que les racines qui souffrent d'un excès d'eau sont incapables d'absorber les nutriments provenant des fertilisants (Paavilainen et Päivänen 1995). La concentration foliaire en azote

de l'épinette noire et du mélèze laricin est corrélée positivement à la profondeur de la nappe phréatique dans les tourbières boisées (Lieffers et Macdonald 1990) et elle est aussi augmentée par le drainage pour des épinettes blanches plantées sur une tourbière de l'Alberta (Rothwell *et al.* 1993). Par contre, aucun effet du drainage sur la concentration foliaire en phosphore et en potassium n'a été observé sur ces mêmes plants d'épinette blanche (Rothwell *et al.* 1993).

L'intensité de l'effet du drainage est plus grande lorsque la distance du drain diminue. La nappe phréatique est plus basse et la température du sol plus élevée en bordure des canaux de drainage (Rothwell 1991, Sundström 1995). En effet, Sundström (1995) a noté une meilleure croissance des pins sylvestres plantés le long des drains dans une tourbière. Toutefois l'effet n'est pas seulement dû au drainage comme tel puisqu'en bordure des canaux de drainage, les arbres ont aussi accès à plus de lumière (Rothwell 1991, Sundström 1995) les canaux de drainage étant dépourvu de végétation.

1.4. La méthode d'analyse vectorielle

La méthode d'analyse vectorielle est une approche graphique servant à l'interprétation des résultats d'analyses foliaires. Cette méthode a été développée dans les années 1960 par les chercheurs allemands Heisendorf et Krause (Morisson 1974, Haase et Rose 1995) puis raffinée et largement utilisée par Timmer et ses collaborateurs (Timmer et Stone 1978, Timmer et Morrow 1984) ainsi que d'autres chercheurs (Munson *et al.* 1993, Munson et Timmer 1995, Macdonald *et al.* 1998). La méthode d'analyse vectorielle peut sembler complexe au premier abord. Pourtant, c'est une façon simple d'observer simultanément les variations de croissance, de concentration foliaire et de contenu foliaire entre deux groupes de plantes croissant dans des conditions différentes. Une description détaillée de la façon d'utiliser la méthode d'analyse vectorielle a été présentée par Haase et Rose (1995). Un article de vulgarisation de Timmer (1991) explique aussi très bien les rudiments de l'analyse vectorielle en plus de comparer cette méthode à d'autres techniques plus conventionnelles d'analyse de données nutritionnelles.

L'analyse vectorielle s'applique à plusieurs types de plantes et permet de comparer les différences quant à la croissance et à la nutrition qui sont engendrées par des conditions de croissance différentes lorsque différents groupes de plantes sont comparés entre eux. Nous considérerons ici l'utilisation de l'analyse vectorielle en ce qui a trait à l'interprétation des résultats d'expériences de fertilisation sur des conifères.

La figure 1, inspirée et adaptée de celle présentée par Timmer (1991), présente un graphique d'analyse vectorielle typique. Le contenu foliaire est représenté en abscisse alors que la concentration foliaire l'est en ordonnée. Les lignes diagonales pointillées représentent une masse foliaire sèche constante. Le contenu foliaire d'un élément donné est obtenu par le produit de sa concentration foliaire et de la masse foliaire sèche. La masse foliaire est déterminée en mesurant la masse d'échantillons de quelques centaines d'aiguilles préalablement séchées. Un point de référence représentant un groupe de plantes témoin non traitées ainsi qu'un autre point représentant un groupe de plantes qui ont reçu un traitement de fertilisation sont positionnés selon les valeurs de masse sèche, de concentration foliaire et de contenu foliaire qui leur sont associées. Ces deux points sont reliés par un vecteur qui représente le changement induit par le traitement.

Les valeurs des trois variables sont présentées en valeurs relatives par rapport au groupe de référence pour lequel toutes les valeurs ont été normalisées à 100. La présentation des données en valeurs relatives permet de représenter l'information concernant plusieurs éléments nutritifs sur un même graphique et ainsi de comparer leurs réponses respectives au traitement. Il est aussi possible de représenter plusieurs groupes d'arbres ayant reçu différents traitements sur un même graphique afin de comparer directement la réponse qui leur est associée.

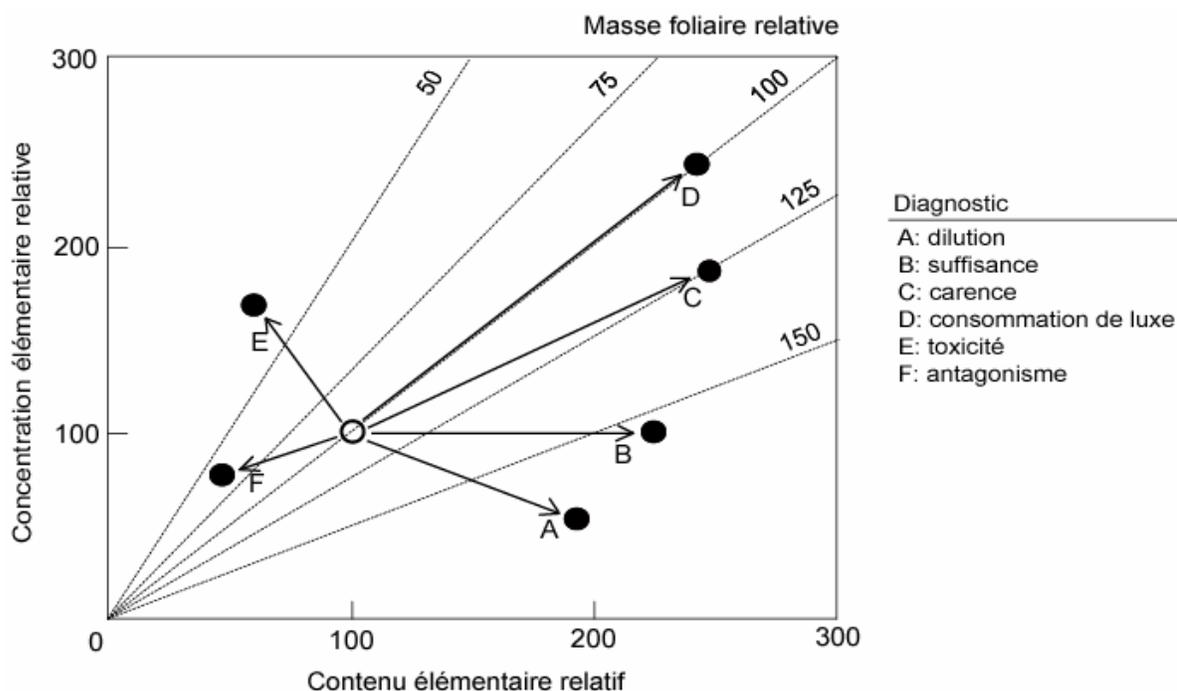


Figure 1. Représentation graphique des variations de contenu, concentration et masse foliaires chez des arbres traités (cercles pleins) par rapport à des arbres de référence non traités (cercle vide). Les valeurs relatives aux arbres de référence ont été normalisées à 100. Les vecteurs indiquent la magnitude et la direction du changement. Inspiré et adapté de Timmer (1991).

Une fois le graphique d'analyse vectorielle construit, il est possible d'interpréter le changement induit par la fertilisation des arbres. Le vecteur reliant les arbres non traités aux arbres fertilisés illustre de façon dynamique la réponse des arbres traités en ce qui a trait à leur nutrition et à leur croissance. La longueur et l'orientation du vecteur reliant deux points nous informent sur la magnitude et le type du changement engendré par le traitement. Tout d'abord, lorsque plusieurs éléments sont représentés sur un même graphique, la longueur des vecteurs propres à chacun des éléments observés permet d'ordonner ces éléments selon l'importance de la réponse à la fertilisation qui leur est associée. Ensuite, l'orientation des vecteurs permet d'interpréter la nature du changement engendré par la fertilisation quant à la masse sèche, de la concentration foliaire et du contenu foliaire de arbres traités et donc de poser un diagnostic quant à l'état nutritionnel des arbres non traités et à l'effet du traitement auquel ils ont été soumis.

Par exemple, le vecteur C de la figure 1, indique une augmentation simultanée des trois variables considérées par l'analyse vectorielle en réponse à un traitement donné. Il est donc possible de déterminer que le traitement a favorisé la croissance et l'absorption de nutriments des plantes traitées par rapport à celles qui ne l'ont pas été. Nous pouvons ainsi avancer que le groupe de référence subissait une carence de l'élément observé et que le traitement appliqué au groupe traité a permis la levée de cette carence. D'un autre côté, le vecteur E indique une augmentation de la concentration d'un élément dans les aiguilles liée à une diminution de la masse foliaire et du contenu de l'élément. Il est donc possible de déterminer que le traitement appliqué dans ce cas a causé une toxicité due à l'élément observé. Outre la levée de carences nutritionnelles et la toxicité, l'analyse vectorielle permet de diagnostiquer la suffisance (vecteur B), la consommation de luxe (vecteur D), la dilution (vecteur A) et l'antagonisme (vecteur F) entraînés par un traitement pour les éléments observés (figure 1).

L'application de la méthode d'analyse vectorielle aux conifères est généralement limitée aux espèces qui ont une croissance déterminée. C'est-à-dire que le nombre d'aiguilles qui seront produites la saison suivante est prédéterminé dans le bourgeon de l'année courante. Puisque la masse foliaire sèche est une des variables d'importance pour l'analyse vectorielle, une croissance déterminée assure que l'effet du traitement sur la variation de la masse foliaire ne sera pas occulté par une variation du nombre d'aiguilles produites. Dans le même ordre d'idées, la récolte du matériel foliaire à analyser suivant le traitement doit idéalement être faite à la fin de la saison de croissance où le traitement a été appliqué. Sinon une dilution de l'effet du traitement sur la masse foliaire sèche est probable puisque dans les années suivant la première saison de croissance après le traitement, le nombre d'aiguilles formées par un bourgeon pourra être soumis à l'influence du traitement. Toutefois, il est important de remarquer que, si l'analyse vectorielle est appliquée à une espèce de conifère à croissance indéterminée ou que la récolte d'échantillons foliaires est faite plus d'un an après l'application d'un traitement, il n'en résultera pas pour autant de fausses conclusions. Le risque encouru dans de telles situations est une dilution de l'effet du traitement sur la masse foliaire sèche. Ainsi, il pourrait être possible de ne pas détecter d'effet du traitement. Par contre, si un effet est détecté, nous pouvons être confiants qu'il est bel et bien réel malgré le fait qu'il soit vraisemblablement atténué.

Un des grands avantages de l'analyse vectorielle par rapport à d'autres méthodes d'analyses des données de concentration foliaire est qu'elle n'est pas dépendante de valeurs prédéterminées. En effet, puisque des groupes de plantes qui croissent sous des conditions de croissance différentes sont comparés directement, il est possible de tirer des interprétations puissantes et cohérentes propres à un contexte donné. C'est pourquoi, selon Binkley (1986), il s'agit probablement de la meilleure approche pour identifier les nutriments qui limitent la croissance des arbres dans un contexte où peu d'études ont été faites. Les travaux de Timmer et Armstrong (1987) ont démontré la puissance de l'analyse vectorielle à identifier les carences nutritives volontairement induites sur des jeunes pins rouges. De plus, selon Grégoire et Fisher (2004), l'analyse vectorielle est une des méthodes les plus efficaces pour prédire la réponse de croissance des arbres à un traitement de fertilisation. L'interprétation des résultats avec l'analyse vectorielle permet de prédire avec confiance la croissance future des arbres puisque les variations de masse foliaire y sont corrélées (Timmer et Morrow 1984).

1.5. Hypothèses de recherche

Les hypothèses de base des travaux présentés dans cet ouvrage sont : 1) la fertilisation au moment de la plantation est nécessaire à l'implantation et au développement d'arbres résineux dans des tourbières abandonnées après exploitation; 2) l'effet bénéfique de la fertilisation appliquée au moment de la plantation de conifères en tourbières abandonnées après exploitation est de durée limitée et la refertilisation est nécessaire afin de maintenir la croissance des arbres.

1.6. Objectifs de recherche

Cette étude porte sur la fertilisation initiale et la refertilisation de plantations d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) et de mélèze laricin (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch) dans des tourbières résiduelles du Québec et du Nouveau-Brunswick. Les objectifs spécifiques de l'étude sont : 1) comparer l'efficacité de six traitements de fertilisation localisée appliqués au moment de la plantation pour favoriser la croissance et la survie des plants; 2) déterminer les besoins nutritionnels en azote, phosphore et potassium de plantations établies depuis 4 ans dont la croissance stagne; 3) interpréter la réponse nutritionnelle des arbres à la fertilisation appliquée en utilisant l'analyse vectorielle. Deux expériences ont été mises en place afin d'atteindre les objectifs de cette étude : une **expérience de fertilisation initiale** et une **expérience de refertilisation**.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Description des sites d'étude

L'expérience de fertilisation initiale a été mise en place sur la tourbière abandonnée de Pointe-au-Père (48°29'N, 68°27'O) dans la région administrative du Bas-St-Laurent au Québec. La température annuelle moyenne de cette région, mesurée à la station météorologique de Rimouski (48°27'N, 68°31'O), est de 3,9 °C avec un minimum annuel moyen de -11,7 °C en janvier et un maximum annuel moyen de 18,2 °C en juillet. Les précipitations annuelles moyennes sont de 915 mm dont 643 mm sous forme de pluie (Environnement Canada 2006). Les activités d'extraction de la tourbe ont cessé vers 1997 sur ce site. L'épaisseur du dépôt de tourbe résiduel variait de 1 m à plus de 1,5 m. Le pH de la tourbe était en moyenne de 4,5 sur le site.

Les travaux reliés à l'expérience de refertilisation ont eu lieu sur les tourbières de Baie-Sainte-Anne (47°00'N, 64°52'O) et de Bay-du-Vin (47°02'N, 65°06'O) situées dans la péninsule d'Escuminac sur la côte Est du Nouveau-Brunswick. La température annuelle moyenne de cette région, mesurée à la station météorologique de Kouchibouguac (46°46'N, 65°00'O), est de 5,0 °C avec un minimum annuel moyen de -10,0 °C en janvier et un maximum annuel moyen de 19,3 °C en juillet. Les précipitations annuelles moyennes sont de 1274 mm dont 874 mm sous forme de pluie (Environnement Canada 2006). L'épaisseur du dépôt de tourbe résiduel varie de 22 à 183 cm à Baie-Sainte-Anne et de 27 à 144 cm à Bay du Vin (Bussièrès 2005). Le pH moyen de la tourbe était de 4,1 sur le site.

2.2. Dispositifs expérimentaux

Expérience de fertilisation initiale

Les deux espèces d'arbres à l'étude étaient l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) et le mélèze laricin (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch). Les six traitements de fertilisation comprenaient trois fertilisants à dégagement lent en sachets de thé de formulation expérimentale, deux formulations commerciales en sachets de thé à dégagement lent et un

mélange expérimental de roche phosphatée (0-13-0) et de muriate de potasse (0-0-60) granulaires (tableau 1). Les doses des traitements expérimentaux ont été formulées pour s'approcher le plus possible des recommandations finlandaises. Les sachets utilisés ont été fabriqués par l'entreprise californienne Restoration Technologies International (RTI).

Tableau 1. Composition des traitements de fertilisation localisée appliqués aux épinettes et aux mélèzes au moment de la plantation dans la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.).

Fertilisant	Abréviation	Formulation (%)			Contenu élémentaire (g/plant)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P	K
PK granulaire	PK	0	11	10	0	3,1	5,7
Expérimental 1	E1	10	48	0	1,4	3	0
Expérimental 2	E2	10	23	20	3,2	3	5
Expérimental 3	E3	18	17	15	7	3	5
Restoration Pak	Rp	11	17	9	1,1	0,7	0,7
Forest Pak	Fp	20	11	9	2	0,5	0,7

Les arbres ont été mis en terre à la mi-juin 2004 et ont été fertilisés au moment de la plantation. Les sachets de thé ont été enfouis dans une fente pratiquée dans le sol à une distance du plant et une profondeur d'environ 5 cm. Le traitement de fertilisation en granules a été appliqué en surface en formant un cercle d'un rayon d'environ 15 cm autour du plant. Les plants d'épinette étaient d'un calibre de 110 cc et provenaient de chez Pépinière Aiglon Inc. située à Plessisville (Québec). Les plants de mélèze avaient un calibre de 90 cc et provenaient de la pépinière Bechedor Inc. située à Saint-Prospère (Québec). Les plants des deux espèces n'ont pas été produits à partir de graines de la région où ils ont été plantés. Les arbres ont été plantés à intervalles de trois mètres soit une densité de plantation de 1089 plants à l'hectare.

L'expérience comportait deux plans en blocs complets dans lesquels les six traitements de fertilisation localisée étaient répétés en trois blocs (figure 2). Chacun des deux plans en blocs complets correspondaient à une des deux espèces d'arbres à l'étude. Les unités expérimentales ont été distribuées aléatoirement à l'intérieur des blocs sur le terrain. Les blocs ont été disposés perpendiculairement à l'orientation des planches de récolte

abandonnées. Deux répétitions de l'expérience ont été disposées sur le terrain; l'une était située dans un secteur bien drainé de la tourbière et l'autre dans un secteur où le drainage était déficient. Douze planches d'une largeur d'environ 30 m et séparées par des canaux de drainage ont été utilisées pour mettre l'expérience en place dans les deux secteurs.

L'unité expérimentale de base de cette expérience est une parcelle recevant un même traitement de fertilisation pour chaque espèce d'arbre. Dans les deux répétitions de l'expérience, les unités expérimentales occupent toute la largeur d'une planche, mais sont par contre de taille différente en longueur. Dans le secteur bien drainé, les unités expérimentales comprennent 150 arbres (10 arbres X 15 arbres) tandis que celles du secteur mal drainé comprennent 100 arbres (10 arbres X 10 arbres).

Des parcelles de comparaison non fertilisées ont été établies dans le secteur bien drainé à raison de trois parcelles par espèce comprenant chacune 50 arbres (10 X 5). Peu de parcelles non fertilisées ont été mises en place, puisqu'il a été démontré que sans fertilisation, les arbres plantés présentent un taux de survie très faible et une croissance déficiente (Bussièrès 2005, Leupold 2005). Économiquement, cela n'avait aucun sens de monter un dispositif complet avec des traitements non fertilisés.

La prise de mesures physiques et la récolte d'échantillons foliaires sur les arbres ont été effectuées dans des parcelles d'échantillonnage disposées aléatoirement dans chaque unité expérimentale. Ces parcelles forment un carré de trois arbres de côté et comptent donc neuf arbres desquels trois servent pour la prise de mesures physiques tandis que les six autres sont utilisés pour les prélèvements foliaires (figure 2). Les mesures physiques et la récolte d'échantillons foliaires ont été faites sur des arbres différents pour éviter un effet négatif de l'amputation de branches sur les mesures physiques des jeunes arbres. Il y avait cinq parcelles d'échantillonnage par unité expérimentale dans le secteur bien drainé et trois dans le secteur mal drainé. Ainsi, dans les deux secteurs, 10 % des arbres ont été utilisés pour les mesures physiques et 20 % pour la récolte d'échantillons foliaires. Toutefois, il est important de noter que lors de la prise des données initiales suivant immédiatement la plantation des arbres, seulement trois parcelles d'échantillonnage étaient en place dans les unités expérimentales du secteur bien drainé.

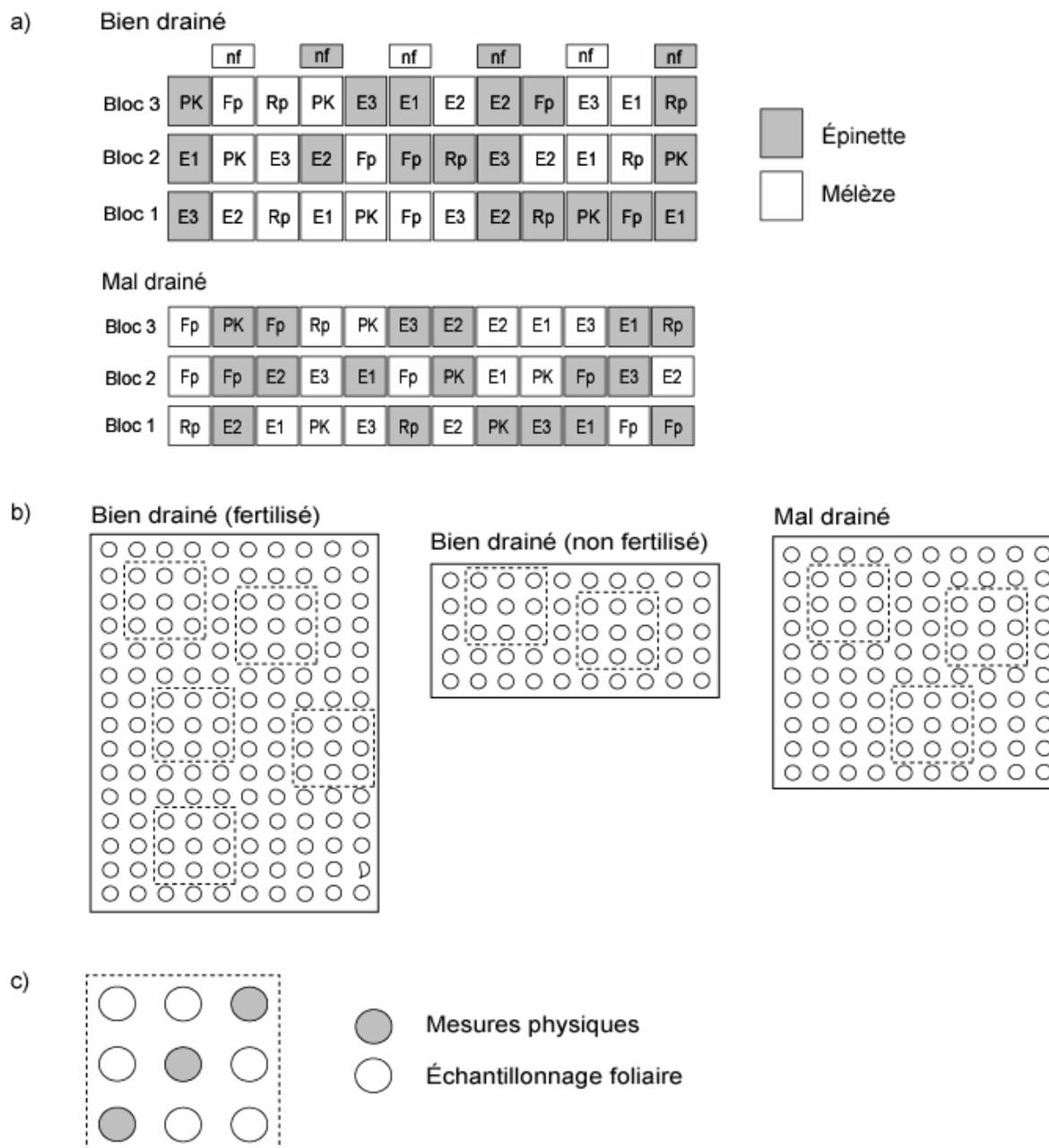


Figure 2. a) Plans en blocs complets de l'expérience de fertilisation initiale mise en place dans deux secteurs de la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.). Voir le tableau 1 pour la description des traitements. b) Exemple de distribution des parcelles d'échantillonnage (carrés pointillés) à l'intérieur des unités expérimentales. c) Identification des arbres servant aux mesures physiques et à l'échantillonnage foliaire à l'intérieur d'une parcelle d'échantillonnage.

Expérience de refertilisation

Les expériences de refertilisation ont été mises en place dans des plantations d'épinette noire (Bay-du-Vin) et de mélèze laricin (Baie-Ste-Anne) établies en 2001 sur une partie de chacun des deux sites où les activités d'extraction de la tourbe avaient cessé l'automne précédent. Les sites qui ont été exploités par la méthode d'aspiration étaient caractérisés par des planches de récolte abandonnées de longueur variable et d'une largeur d'environ 22 m séparées par des canaux de drainage. Les plants d'un calibre de 110 cc plantés à intervalles de 2 m (2500 plants à l'hectare) ont été fertilisés individuellement au moment de la plantation avec un fertilisant en capsule Evergro Tab (10 g/plant de 20-10-5). Un ralentissement marqué de la croissance des arbres a été observé lors des troisième et quatrième saisons de croissance.

La refertilisation des arbres a été réalisée en mai 2005, soit au début de la cinquième saison de croissance des arbres. L'expérience a été disposée sur les deux sites d'études selon un plan en 4 blocs complets à l'intérieur desquels les traitements ont été distribués aléatoirement aux unités expérimentales (figure 3). La structure factorielle des traitements comportait 3 facteurs (azote, phosphore et potassium) ayant chacun deux niveaux (absence, présence). Ainsi, 8 traitements différents étaient appliqués aux arbres. À l'intérieur d'un bloc, des parcelles de 3 arbres par 10 arbres occupant toute la largeur d'une planche recevaient un même traitement de fertilisation. Toutefois, la prise de données n'a été effectuée que sur les 8 arbres centraux de ces parcelles de façon à éviter toute contamination entre les traitements (figure 3).

L'azote a été appliqué sous forme d'urée (46-0-0) selon un taux de 87 g/plant, le phosphore sous forme de roche phosphatée (0-13-0) selon un taux de 159 g/plant et le potassium sous forme de muriate de potasse (0-0-60) selon un taux de 31 g/plant (tableau 2). Le dosage des fertilisants était inspiré des doses utilisées en Finlande lors de travaux de refertilisation.

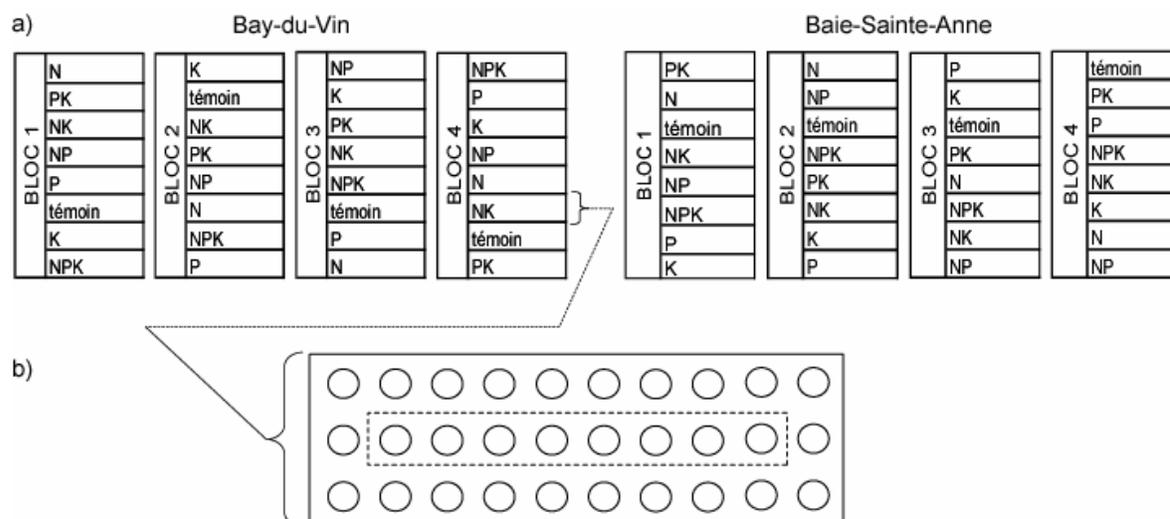


Figure 3. a) Plans factoriels mis en place dans les plantations d'épinettes et de mélèzes des tourbières résiduelles de Bay-du-Vin et de Baie-Sainte-Anne (N.-B.) dans le cadre de l'expérience de refertilisation. b) Indentification des arbres servant à la fois aux mesures physiques et à l'échantillonnage foliaire à l'intérieur d'une parcelle d'échantillonnage.

Tableau 2. Quantité de fertilisant et contenu élémentaire utilisés lorsqu'un élément faisait partie de la combinaison appliquée lors de la refertilisation de plantations d'épinettes et de mélèzes dans les tourbières résiduelles de Bay-du-Vin et de Baie-Sainte-Anne (N.-B.).

Élément	Fertilisant	Quantité (g)	Contenu élémentaire (g)
N	urée	87	40
P	roche phosphatée	159	9
K	muriate de potasse	31	15

2.3. Mesures physiques

Expérience de fertilisation initiale

La taille des arbres et leur diamètre au sol ont été mesurés immédiatement après la plantation dans les deux secteurs. Ensuite, la longueur de la pousse terminale de la saison a été mesurée au mois d'octobre de la deuxième année de croissance dans le secteur bien drainé seulement. La longueur de la pousse terminale a été mesurée à l'aide d'un ruban à mesurer tandis que le diamètre au sol a été mesuré à l'aide d'un pied à coulisse. La prise de données dans le secteur mal drainé a été abandonnée. Le drainage déficient de ce secteur de la tourbière faisait en sorte qu'une grande partie de l'expérience était inondée au printemps ou suivant des pluies importantes ce qui a entraîné une forte mortalité des arbres dans les parcelles d'échantillonnage.

Cinq arbres entiers sélectionnés au hasard dans chaque unité expérimentale du secteur bien drainé ont été déracinés avec précaution au mois d'octobre de la seconde année de croissance. Ces arbres ont été rapidement ramenés au laboratoire. La partie aérienne des arbres a été séparée des racines, placée dans des sacs de papier, séchée à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante puis pesée. Les racines ont été placées dans des sacs de plastique hermétiques puis conservées au réfrigérateur. Elles ont ensuite été soigneusement nettoyées de toute la tourbe qui leur était attachée à l'aide d'un jet d'eau, placées dans des sacs de papier, séchées à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante puis pesées.

Le taux de survie des plants a été déterminé pour chaque unité expérimentale à la fin de la deuxième année de croissance dans les deux secteurs.

Expérience de refertilisation

La taille et le diamètre au sol des arbres ont été mesurés lors de la mise en place de l'expérience. La longueur de la pousse terminale a été mesurée en octobre deux saisons de croissance suivant la seconde fertilisation. La taille et la longueur de la pousse terminale

ont été mesurées à l'aide d'un ruban à mesurer tandis que le diamètre au sol a été mesuré à l'aide d'un pied à coulisse digital.

2.4. Analyses foliaires

Dans le cas de l'expérience de fertilisation initiale, un échantillonnage foliaire a été effectué dans le secteur bien drainé de l'expérience à la fin des deux premières saisons de croissance suivant la plantation des arbres. Seuls les arbres des parcelles échantillons qui ne devaient pas servir aux mesures physiques ont été échantillonnés. En ce qui a trait à l'expérience de refertilisation, un seul échantillonnage foliaire a été effectué à la fin de la première saison de croissance.

Chez les mélèzes, la récolte d'échantillons foliaires a eu lieu à la mi-août avant que la retranslocation des éléments qui se produit avant l'abscission des aiguilles ne se mette en marche (Tilton 1977, Tyrrell et Boerner 1987, Mugasha *et al.* 1999). Quant aux épinettes, elles ont été échantillonnées en octobre lorsque la teneur en éléments dans les aiguilles est le plus stable (Tyrrell et Boerner 1987, Mugasha *et al.* 1999).

Dans le cas du mélèze, ce sont les aiguilles des pousses courtes qu'il est préférable de récolter puisque ce type de pousse a une croissance déterminée contrairement aux pousses longues (Clausen et Kozlowski 1967). Toutefois, dans le cas de l'expérience de fertilisation initiale, les pousses courtes étant trop rares sur les jeunes plants, nous avons donc dû nous contenter des pousses longues. Ainsi, une atténuation de l'effet nutritionnel des traitements est possible lors de l'analyse des données des analyses foliaires.

Les pousses annuelles de deux branches latérales situées de part et d'autre de la couronne ont été récoltées dans le tiers supérieur de chaque arbre. Pour chaque expérience, les pousses récoltées dans une même unité expérimentale ont été mises en commun dans des sacs de papier pour former un seul échantillon par unité expérimentale. Les pousses récoltées ont été rapportées au plus vite au laboratoire où elles ont été mises à sécher à l'étuve à 65 °C durant 48 heures. Les aiguilles ont ensuite été séparées des branches, puis un sous échantillon d'aiguilles a été compté pour en déterminer la masse. Lors de la

première année de l'expérience de fertilisation initiale ces sous échantillons comptaient 300 aiguilles, tandis que la seconde année et pour l'expérience de refertilisation 500 aiguilles ont été comptées.

Les échantillons foliaires ont été broyés en utilisant un moulin à café électrique. Ils ont ensuite été envoyés au laboratoire d'analyses chimiques du Département des Sciences du Bois et de la Forêt de l'Université Laval à Québec. Les concentrations foliaires en azote, phosphore et potassium y ont été déterminées suivant la méthode décrite par Parkinson et Allen (1975).

2.5. Analyses statistiques

Expérience de fertilisation initiale

Une analyse de variance a été appliquée aux données issues de mesures initiales prises au moment de la plantation afin de s'assurer que les moyennes des unités expérimentales n'étaient pas différentes au début de l'expérience. Les données recueillies à la fin de l'expérience ont tout d'abord été traitées par analyse de variance selon un plan en blocs complets pour chaque espèce afin de déterminer s'il y avait des différences entre les traitements de fertilisation pour chacune des deux espèces d'arbres étudiées (tableau 4). La différence entre les espèces n'a pas été testée, puisque l'intérêt de l'expérience était de comparer l'effet des fertilisants entre eux et non de comparer l'épinette et le mélèze. Lorsqu'un effet significatif était détecté, un test de LSD protégé a été appliqué aux données pour identifier les traitements de fertilisation qui différaient entre eux. Les données recueillies dans les parcelles non fertilisées ne faisaient pas partie des données auxquelles les tests statistiques ont été appliqués. En effet, les parcelles non fertilisées ne représentaient pas un vrai traitement témoin puisqu'elles n'ont pas été distribuées au hasard. Nous n'avons toutefois pas l'intention de mettre un traitement témoin en place. Le taux de mortalité trop élevé envisagé à la lumière de nos connaissances antérieures aurait entraîné à un gaspillage de ressources.. Les valeurs relatives aux arbres non fertilisés seront toutefois présentées à titre comparatif même si aucun test statistique ne peut y être appliqué. Le

niveau α des tests statistiques était de 0,05. La normalité et l'homogénéité des résidus ont été vérifiées et jugées conformes aux postulats de l'analyse de variance.

Expérience de refertilisation

La corrélation entre la taille et le diamètre au sol des arbres au début de l'expérience et leur croissance annuelle de la seconde année suivant la fertilisation a été étudiée afin de s'assurer que cette dernière variable était indépendante de la morphologie initiale des arbres. Une analyse de variance suivant un plan en blocs complets avec une organisation factorielle des traitements a ensuite été appliquée aux données recueillies à la fin de l'expérience afin de déterminer les effets des facteurs azote, phosphore et potassium à l'étude et de leurs interactions (tableau 5). Le niveau α des tests statistiques était de 0,05. La normalité et l'homogénéité des résidus ont été vérifiées et jugées conformes aux postulats de l'analyse de variance.

2.6. Analyses vectorielles

Pour les deux expériences, les données de concentrations foliaires en éléments chimiques et les masses des sous-échantillons d'aiguilles ont ensuite été utilisées pour construire des graphiques d'analyse vectorielle permettant de visualiser la réponse nutritionnelle des arbres aux différents traitements. Le contenu foliaire des différents éléments a été calculé par le produit de la masse foliaire et de la concentration. La masse ainsi que la concentration et le contenu en éléments des aiguilles provenant des arbres fertilisés ont été standardisés par rapport à des valeurs de 100 pour les arbres non fertilisés pour permettre la représentation graphique de plusieurs éléments simultanément.

3. RÉSULTATS

3.1. Expérience de fertilisation initiale

Le taux de mortalité des arbres plantés dans le secteur mal drainé était trop élevé pour permettre un échantillonnage intéressant (tableau 3). La prise de mesure sur les arbres survivants de ce secteur était fortement compliquée puisque plusieurs arbres étaient entièrement submergés par l'eau retenue dans ce secteur à cause du drainage déficient. Les résultats de cette expérience proviennent donc seulement du secteur bien drainé de la tourbière.

Tableau 3. Taux de survie des épinettes et des mélèzes de l'expérience de fertilisation initiale 2 ans après la plantation et la fertilisation. Les taux de survie suivis d'une même lettre pour le secteur bien drainé ne sont pas différents. Les arbres non fertilisés ne faisaient pas partie de l'analyse statistique et sont présentés à titre comparatif.

Fertilisant	Taux de survie (%)			
	Épinette		Mélèze	
	bien drainé	mal drainé	bien drainé	mal drainé
non fertilisé	55	---	81	---
PK granulaire	58 ^d	46	98	64
Expérimental 1	69 ^{bcd}	26	98	56
Expérimental 2	72 ^{bc}	47	98	60
Expérimental 3	64 ^{cd}	35	97	48
Restoration Pak	87 ^a	51	97	49
Forest Pak	81 ^{ab}	35	92	64

Il est aussi important de noter que les résultats des tests statistiques présentés pour l'expérience de fertilisation initiale n'incluent pas les données reliées aux arbres non fertilisés. En effet, comme il a été expliqué dans la section matériel et méthodes les arbres non fertilisés ne faisaient pas partie du dispositif expérimental étudié. Les valeurs relatives aux arbres non fertilisés seront toutefois présentées à titre comparatif même si aucun test statistique ne peut y être appliqué.

3.1.1. Épinette

Survie

La survie des épinettes était différente selon les traitements de fertilisation après deux saisons de croissance ($P=0,0071$; tableaux 3 et 4). Les plus hauts taux de survie, soit 87 % et 81 % ont été atteints avec le Restoration Pak et le Forest Pak tandis que les arbres fertilisés avec la formulation PK granulaire ont présenté le plus faible taux de survie, soit 58 %. Des taux de survie intermédiaires ont été obtenus pour les trois traitements expérimentaux en sachets de thé. Dans le cas des arbres non fertilisés, le taux de survie s'élevait à seulement 55 %.

Mesures physiques

Selon les mesures de taille et de diamètre au sol prises sur les épinettes immédiatement après la plantation on constate que les arbres n'étaient pas différents au début de l'expérience. En effet, l'analyse de variance appliquée aux données initiales n'a pu identifier de différences entre les arbres soumis aux différents traitements (taille : $P=0,67$; diamètre : $P=0,35$). La taille moyenne des épinettes était alors de 50 cm et leur diamètre moyen était de 5,4 mm.

Deux saisons de croissance suivant la plantation et la fertilisation des épinettes, il y avait des différences significatives entre les effets des traitements de fertilisation sur la croissance des arbres ($P=0,0089$; tableau 4; figure 4). Par contre, un seul traitement était significativement différent des autres. En effet, les arbres fertilisés avec la roche phosphatée et le muriate de potasse (PK granulaire) ont eu une croissance inférieure aux autres. La longueur de la pousse terminale de ces épinettes était de 4 cm. Par ailleurs, la croissance annuelle des arbres fertilisés avec les cinq autres traitements ne différait pas entre eux et était en moyenne de 6 cm. Les épinettes qui n'avaient pas été fertilisées au moment de la plantation ont quant à elles présenté une croissance annuelle de 3 cm au cours de la deuxième saison de croissance.

Tableau 4. Analyse de variance appliquée à la croissance annuelle, la masse d'un arbre entier, la survie et la masse foliaire des épinettes et des mélèzes fertilisés avec six traitements de fertilisation localisée au moment de leur plantation dans la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.). Toutes les variables ont été mesurées après deux ans sauf la masse foliaire.

Source de variation	Épinette				Mélèze			
	d.l.	carré moyen	F	P	d.l.	carré moyen	F	P
<i>Croissance annuelle</i>								
Bloc	2	2,96	0,80	0,48	2	651,26	6,21	0,018
Fertilisant	5	21,57	5,82	0,0089	5	2915,65	27,80	<0,0001
Erreur expérimentale	10	3,70			10	104,89		
Erreur d'échantillonnage	180				241			
Total	197				258			
<i>Masse d'un arbre entier</i>								
Bloc	2	40,68	2,46	0,135	2	244,26	0,71	0,51
Fertilisant	5	1046,15	63,33	<0,0001	5	6375,69	18,66	<0,0001
Erreur expérimentale	10	16,52			10	341,72		
Erreur d'échantillonnage	71				71			
Total	88				88			
<i>Survie</i>								
Bloc	2	0,00288	0,54	0,5973	2	0,00356	3,02	0,094
Fertilisant	5	0,03305	6,22	0,0071	5	0,01493	1,26	0,35
Erreur expérimentale	10	0,00531			10	0,00118		
Total	17				17			
<i>Masse foliaire 1^{ère} saison</i>								
Bloc	2	15,17	0,59	0,57	2	80,89	0,70	0,52
Fertilisant	5	12,67	0,49	0,77	5	18,22	0,16	0,97
Erreur expérimentale	10	25,83			10	115,49		
Total	17				17			
<i>Masse foliaire 2^e saison</i>								
Bloc	2	5270,72	2,11	0,17	2	1423,72	0,05	0,95
Fertilisant	5	1548,46	0,62	0,69	5	41475,26	1,59	0,25
Erreur expérimentale	10	2495,86			10	26145,86		
Total	17				17			

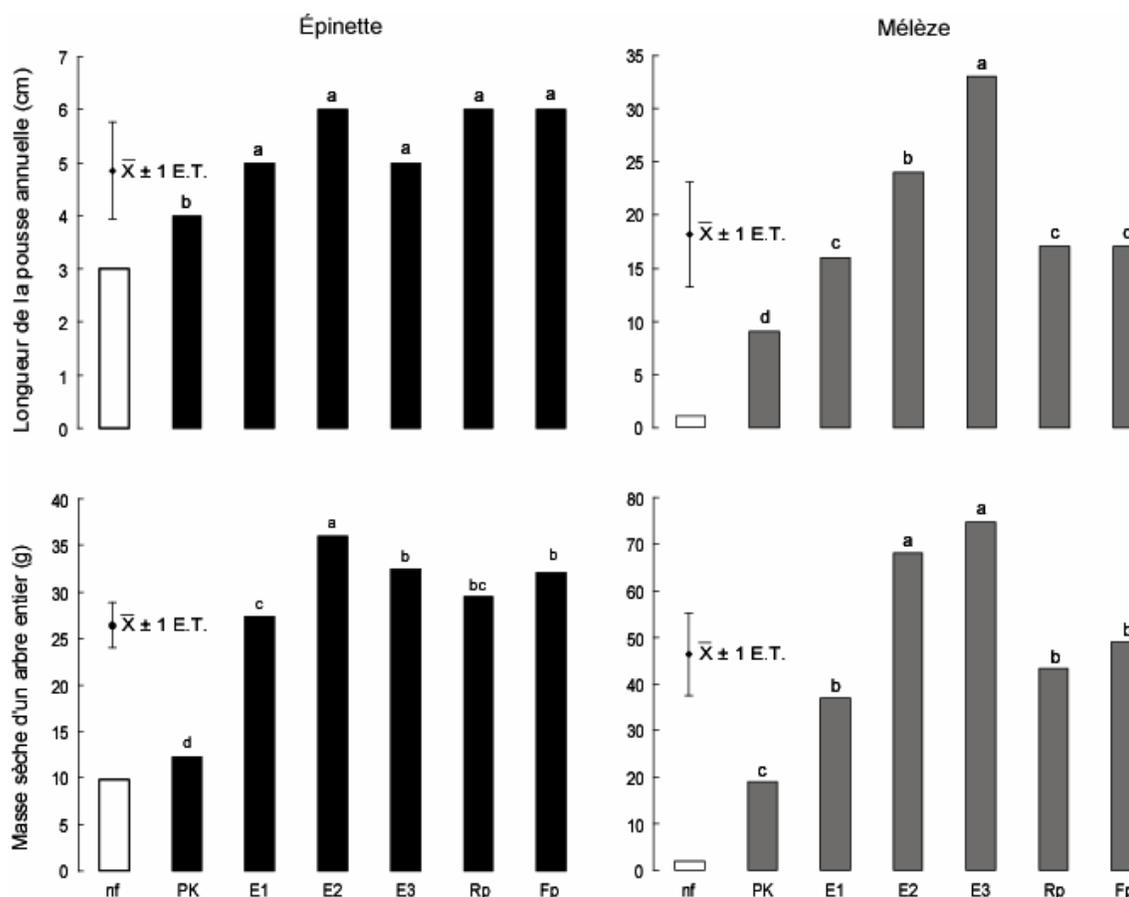


Figure 4. Longueur de la pousse terminale de la seconde saison de croissance et masse sèche après deux saisons de croissance des épinettes et des mélèzes fertilisés avec six traitements de fertilisation localisée au moment de leur plantation dans le cadre de l'expérience de fertilisation initiale dans la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.). Voir le tableau 1 pour la description des traitements. À l'intérieur d'un même graphique, les traitements auxquels une lettre différente a été attribuée sont différents selon un test LSD protégé ayant un niveau α de 0.05. E.T. : erreur type. Voir le tableau 2 pour la description des traitements.

Les traitements de fertilisation ont aussi différencié quant à leur influence sur la masse sèche des épinettes entières ($P < 0,0001$; tableau 4; figure 4). C'est le traitement expérimental 2 qui a produit les épinettes les plus lourdes. Leur masse sèche moyenne s'élevait à 36,0 g. À l'opposé, les arbres fertilisés les moins vigoureux étaient ceux qui avaient reçu le traitement PK granulaire. Leur masse après deux saisons de croissance était de 12,3 g soit près de trois fois inférieure à celle des arbres qui avaient reçu le traitement le plus performant. Les quatre autres fertilisants ont entraîné des résultats intermédiaires. La masse sèche moyenne

d'un arbre fertilisé avec le traitement expérimental 3 était de 32,5 g, celle engendrée par le Forest Pak était de 32,1 g, elle diminuait à 29,5 g dans le cas du Restoration Pak alors qu'elle était de 27,4 g pour les arbres fertilisés avec le traitement expérimental 1. Dans tous les cas, la masse sèche était plus élevée pour les arbres fertilisés que pour les arbres n'ayant reçu aucun traitement. En effet, la masse sèche moyenne d'une épinette non fertilisée n'était que de 9,8 g après deux saisons de croissance.

Nutrition

L'analyse vectorielle des données d'analyses foliaires obtenues à la fin des deux premières saisons de croissance suivant la fertilisation présentent un patron général commun à la majorité des traitements.

Lors de la première saison de croissance, l'effet principal des traitements était en général une plus forte absorption de l'azote par les arbres fertilisés comparativement aux arbres de référence qui n'avaient pas reçu de fertilisation (figure 5). En effet, tous les traitements ont entraîné une importante augmentation du contenu et de la concentration foliaires en azote dans le feuillage des épinettes sauf le traitement PK granulaire qui ne contenait pas d'azote. Par ailleurs, le fertilisant expérimental 1 qui contenait le moins d'azote a entraîné un effet nutritionnel du phosphore proportionnellement plus fort que celui de l'azote malgré que l'effet dû à ce dernier élément soit aussi considérable. Pour tous les traitements où l'azote représentait l'effet le plus important, le phosphore était le second élément en importance suivi par le potassium qui n'a que légèrement varié par rapport aux arbres non fertilisés.

L'effet nutritionnel de la fertilisation lors de la seconde saison de croissance suivant la fertilisation était différent de celui de l'année précédente. Le phosphore était alors l'élément qui entraînait le plus fort effet nutritionnel de la fertilisation par rapport aux arbres non fertilisés, et ce, pour tous les traitements (figure 6). L'absorption du phosphore était toutefois proportionnellement plus faible pour le Restoration Pak et le Forest Pak. Pour leur part, l'azote et le potassium ont aussi été absorbés en plus grande quantité par les arbres fertilisés, mais leur importance était moindre relativement à celle du phosphore.

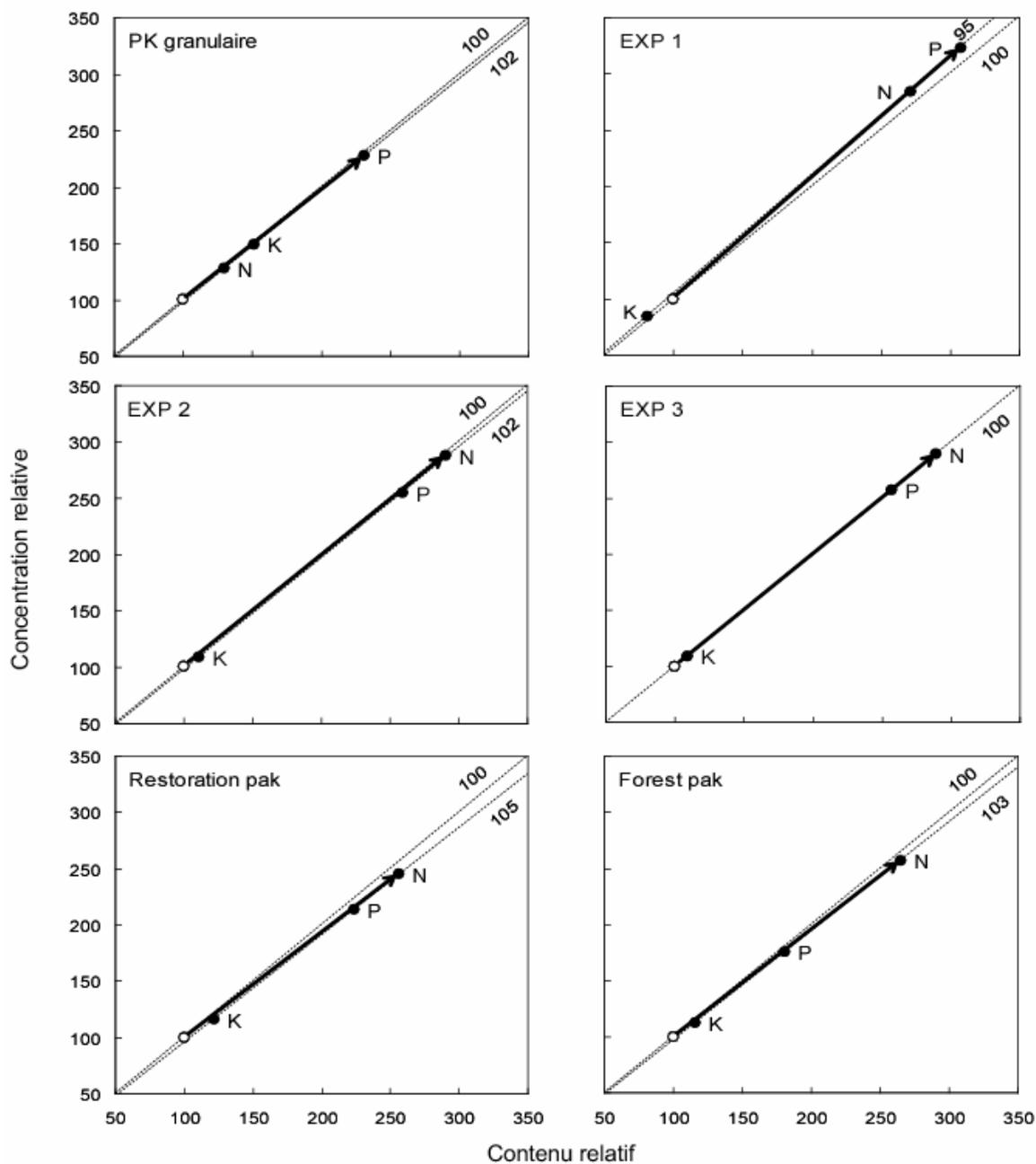


Figure 5. Effet nutritionnel, après une saison de croissance, des six traitements de fertilisation localisée appliqués au moment de la plantation chez les épinettes plantées dans la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.) dans le cadre de l'expérience de fertilisation initiale. Voir le tableau 1 pour la description des traitements. Les lignes pointillées représentent la masse foliaire relative. Les valeurs relatives au groupe de référence et aux arbres fertilisés sont respectivement représentées par des symboles vides et pleins. Le vecteur représente l'effet nutritionnel le plus prononcé.

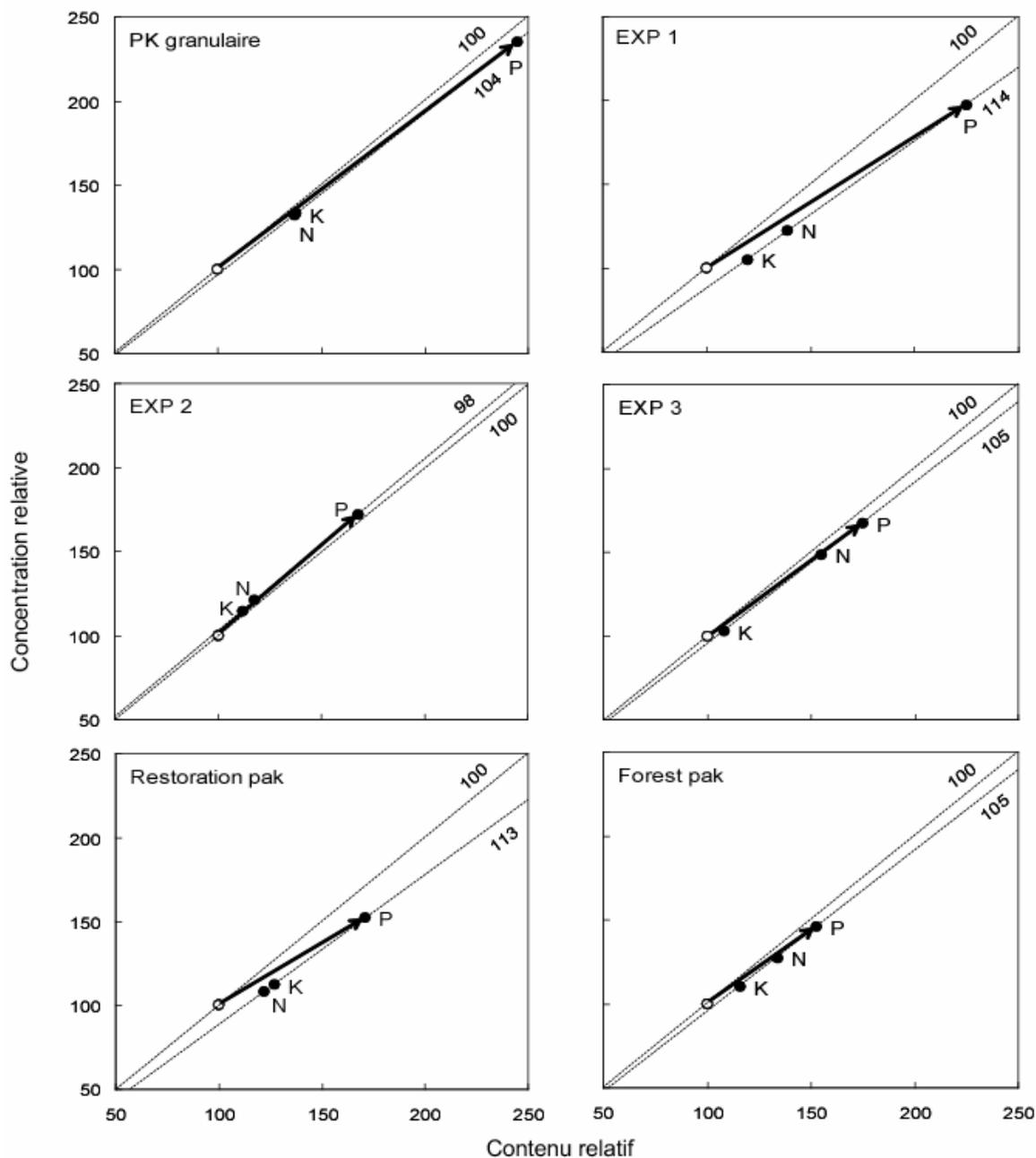


Figure 6. Effet nutritionnel, après deux saisons de croissance, des six traitements de fertilisation localisée appliqués au moment de la plantation chez les épinettes plantées dans la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.) dans le cadre de l'expérience de fertilisation initiale. Voir le tableau 1 pour la description des traitements. Les lignes pointillées représentent la masse foliaire relative. Les valeurs relatives au groupe de référence et aux arbres fertilisés sont respectivement représentées par des symboles vides et pleins. Le vecteur représente l'effet nutritionnel le plus prononcé.

Il n'y avait aucune différence statistiquement significative entre les traitements quant à la masse foliaire des aiguilles récoltées à la fin des deux saisons de croissance suivant la fertilisation ($P=0,77$ et $P=0,69$, tableau 4). Après la première saison de croissance, la masse foliaire d'un échantillon de 300 aiguilles était similaire entre les épinettes fertilisées et celles qui ne l'avaient pas été (figure 5). Toutefois, après la seconde saison de croissance, la masse foliaire d'un échantillon de 500 aiguilles était en moyenne légèrement supérieure pour les arbres fertilisés comparativement aux arbres non traités (figure 6).

3.1.2. Mélèze

Survie

Après deux saisons de croissance, la survie des mélèzes fertilisés n'a pas été affectée différemment par les traitements de fertilisation appliqués ($P=0,35$; tableaux 3 et 4). Le taux de survie moyen comptabilisé après la deuxième saison de croissance était de 97 %. Une survie plus faible a par ailleurs été observée pour les mélèzes non fertilisés. Leur taux de survie lors de la même période de mesure était de 81 %.

Mesures physiques

Comme pour l'épinette, les mélèzes n'étaient pas différents au début de l'expérience. L'analyse de variance appliquée aux données initiales n'a pu identifier de différences entre les arbres soumis aux différents traitements (taille : $P=0,72$; diamètre $P=0,10$). Leur taille moyenne était alors de 22 cm et leur diamètre au sol moyen était de 3,3 mm.

Il y avait des différences significatives entre les traitements de fertilisation quant à la croissance des mélèzes deux saisons de croissance après la mise en place de l'expérience ($P<0,0001$; tableau 4; figure 4). Le traitement le plus performant a été le fertilisant expérimental 3 qui a engendré une croissance de 33 cm lors de la seconde saison de croissance. Le second traitement le plus efficace était le fertilisant expérimental 2 pour lequel la longueur de la pousse terminale était de 24 cm. Le Forest Pak, le Restoration Pak

et le fertilisant expérimental 1 ont entraîné une croissance annuelle similaire qui était en moyenne de 17 cm. C'est le fertilisant PK granulaire qui a été le moins performant puisque la croissance annuelle des arbres auxquels il avait été appliqué était de 9 cm. Par ailleurs, la croissance annuelle des mélèzes non fertilisés n'était que de 1 cm.

La masse sèche des mélèzes était aussi significativement différente selon le traitement de fertilisation appliqué ($P > 0,0001$; tableau 4; figure 4). Les fertilisants expérimentaux 2 et 3 ont été les plus performants, leurs effets étant similaires. La masse sèche moyenne d'un arbre fertilisé avec l'un ou l'autre de ces traitements était d'environ 71,5 g. Tout comme pour la croissance, le Forest Pak, le Restoration Pak et le fertilisant expérimental 1 ont eu un effet similaire sur la masse sèche des mélèzes. En moyenne, la masse sèche d'un arbre ayant reçu l'un ou l'autre de ces fertilisants était de 43,1 g. C'est encore une fois le fertilisant PK granulaire qui s'est avéré le moins performant avec une masse sèche moyenne de 18,9 g par arbre. La masse sèche des arbres fertilisés était dans tous les cas très supérieure à celle des arbres non traités qui n'était que de 1,8 g.

Nutrition

L'analyse vectorielle des données nutritionnelles recueillies à la fin des deux premières saisons de croissance suivant la fertilisation initiale des mélèzes présente un patron général similaire à celui observé dans le cas de l'épinette.

L'azote, qu'il fasse partie ou non de la fertilisation appliquée, a été l'élément qui a entraîné la réponse nutritionnelle la plus importante pour tous les traitements lors de la première saison de croissance des mélèzes (figure 7). Le contenu et la concentration foliaires en azote des mélèzes fertilisés se sont accrus par rapport aux arbres non fertilisés dans tous les cas. Par contre, le traitement PK granulaire a entraîné la plus faible augmentation de l'absorption d'azote comparativement aux autres traitements. L'absorption du phosphore et du potassium s'est généralement accrue chez les arbres fertilisés lorsque ces éléments étaient appliqués. Toutefois, le Forest Pak ne semble pas avoir eu d'effet sur l'absorption du phosphore par les arbres.

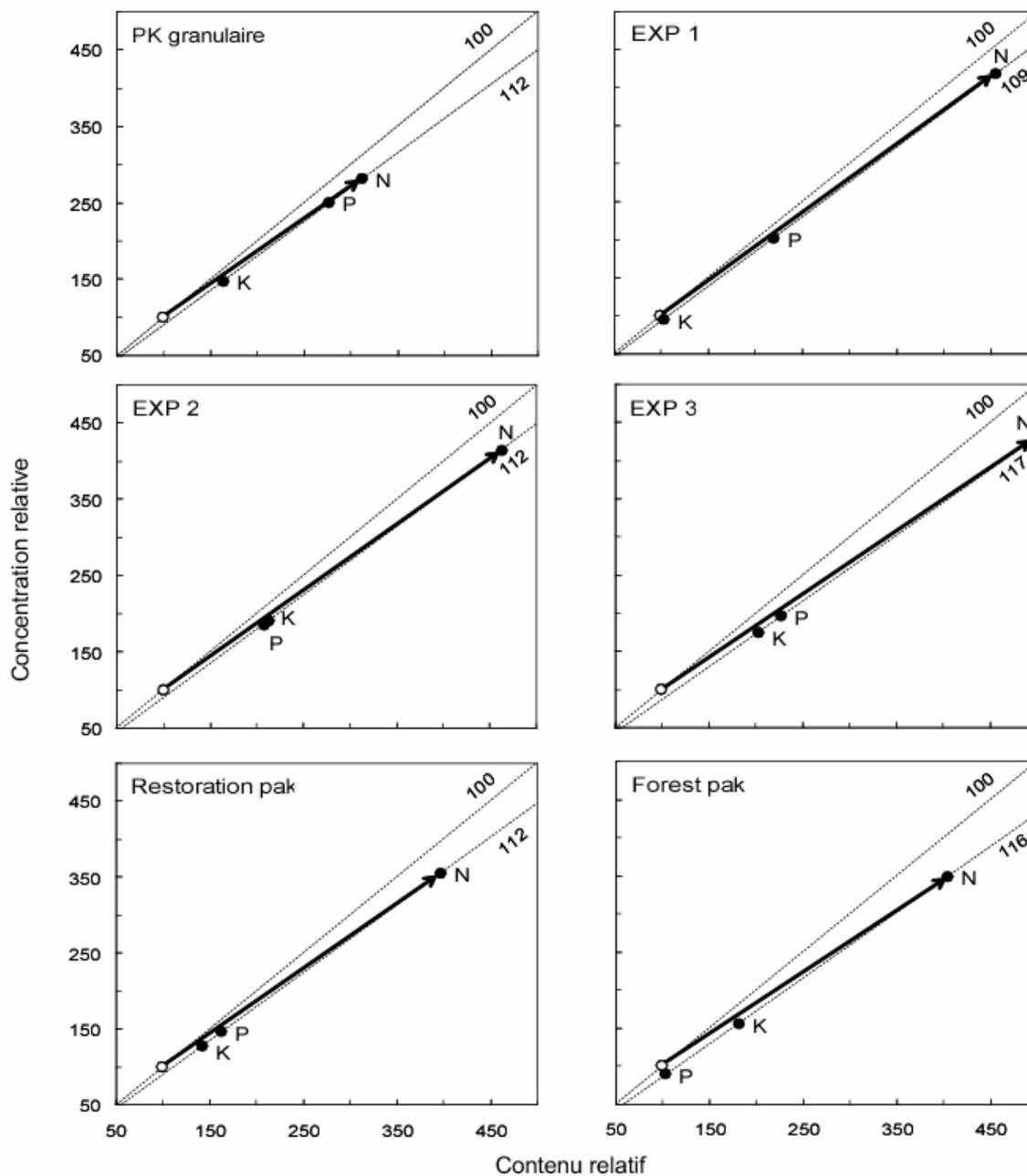


Figure 7. Effet nutritionnel, après une saison de croissance, des six traitements de fertilisation localisée appliqués au moment de la plantation chez les mélèzes plantées dans la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.) dans le cadre de l'expérience de fertilisation initiale. Voir le tableau 1 pour la description des traitements. Les lignes pointillées représentent la masse foliaire relative. Les valeurs relatives au groupe de référence et aux arbres fertilisés sont respectivement représentées par des symboles vides et pleins. Le vecteur représente l'effet nutritionnel le plus prononcé.

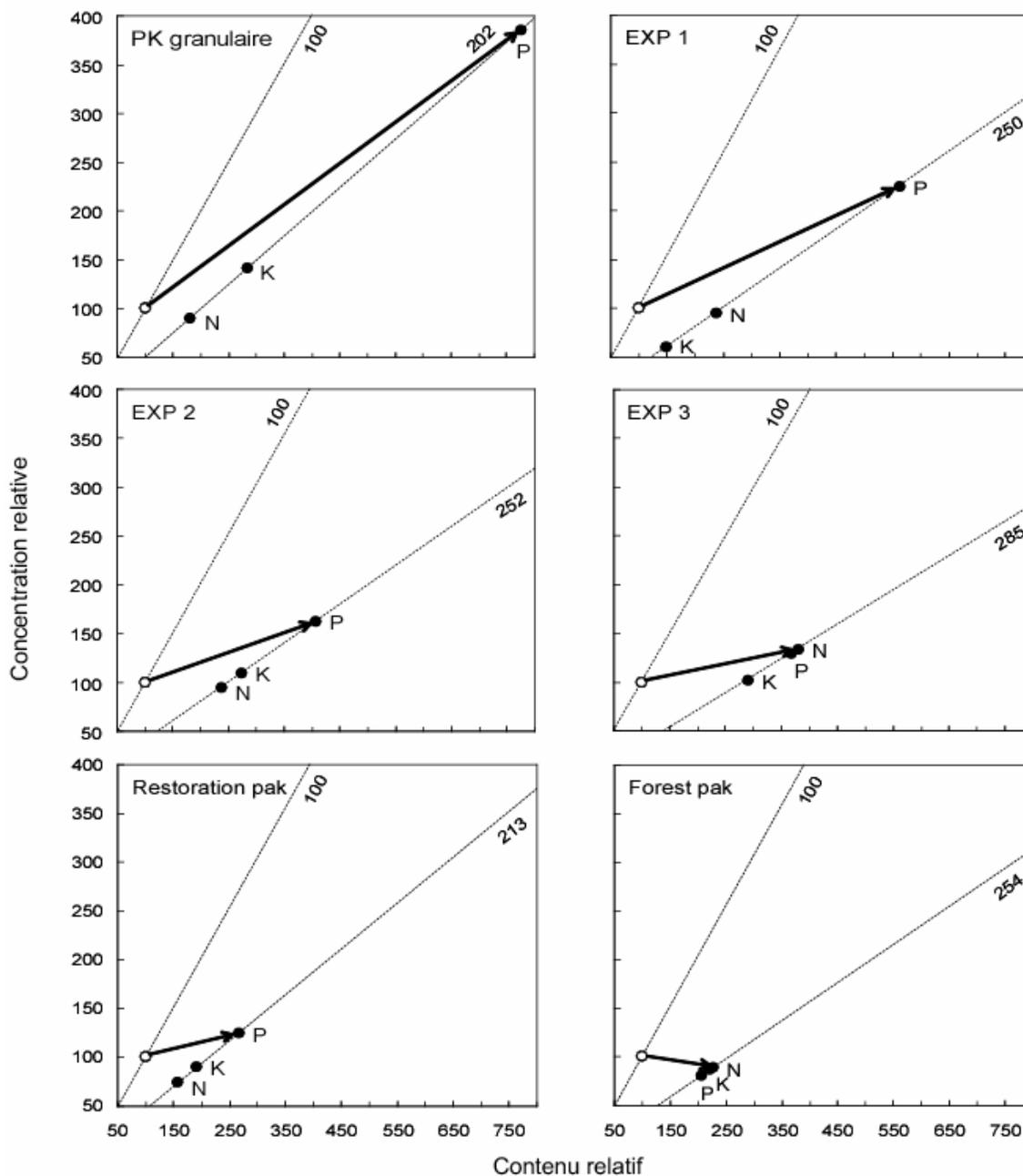


Figure 8. Effet nutritionnel, après deux saisons de croissance, des six traitements de fertilisation localisée appliqués au moment de la plantation chez les mélèzes plantés dans la tourbière résiduelle de Pointe-au-Père (Qc.) dans le cadre de l'expérience de fertilisation initiale. Voir le tableau 1 pour la description des traitements. Les lignes pointillées représentent la masse foliaire relative. Les valeurs relatives au groupe de référence et aux arbres fertilisés sont respectivement représentées par des symboles vides et pleins. Le vecteur représente l'effet nutritionnel le plus prononcé.

À la fin de la seconde saison de croissance suivant la fertilisation, le phosphore était l'élément qui avait l'effet nutritionnel le plus marqué pour la majorité des traitements (figure 8). Toutefois, les traitements expérimental 3 et Forest Pak présentaient un effet plus important de l'azote. L'absorption du phosphore était plus élevée par rapport aux arbres non fertilisés pour tous les traitements sauf pour le Forest Pak. Ce dernier traitement n'a d'ailleurs pas mené à une plus grande absorption des trois éléments à l'étude par rapport aux arbres non fertilisés.

Il n'y avait aucune différence statistiquement significative entre les traitements quant à la masse foliaire des aiguilles récoltées à la fin des deux saisons de croissance suivant la fertilisation ($P=0,97$; $P=0,25$: tableau 4). Par ailleurs, la masse foliaire des mélèzes fertilisés était en moyenne plus élevée que celle des mélèzes n'ayant pas reçu de fertilisant lors des deux années de mesures (figures 7 et 8). Cette différence était la plus importante lors de la seconde année alors que la masse d'un échantillon de 500 aiguilles d'arbres fertilisés était deux fois et demie plus élevée que chez les arbres non fertilisés.

3.2. Expérience de refertilisation

Les analyses préliminaires que nous avons effectuées ont démontré qu'il n'y avait pas de corrélation significative entre la taille initiale des épinettes et des mélèzes et la longueur de leur pousse terminale deux saisons de croissance après la refertilisation (épinette : $r^2 = -0,017$, $P=0,80$; mélèze : $r^2 = 0,012$, $P=0,86$). Ainsi, une ANOVA est justifiée pour l'analyse des données de croissance des 2 espèces d'arbres.

3.2.1. Épinette

Croissance

Deux saisons de croissance suivant la refertilisation, la longueur de la pousse terminale des épinettes a été affectée par une interaction des trois facteurs à l'étude ($P=0,0097$; tableau 5). Les longueurs moyennes de la pousse terminale des épinettes deux saisons de croissance

suivant la refertilisation pour les différentes combinaisons de fertilisants appliquées sont présentées à la figure 9.

Tableau 5. Analyse de variance factorielle de la croissance annuelle et de la masse foliaire des épinettes et des mélèzes plantés dans les tourbières résiduelles de Bay-du-Vin et de Baie-Sainte-Anne (N.-B.). La masse foliaire et la croissance ont été mesurées respectivement après la première et la seconde saison de croissance suivant la refertilisation des plantations avec la combinaison factorielle de trois facteurs (N, P et K) appliqués selon deux niveaux (présence, absence).

Source de variation	Épinette				Mélèze			
	d.l.	carré moyen	F	P	d.l.	carré moyen	F	P
Croissance								
Bloc	3	18,68	0,24	0,87	3	282,76	1,31	0,28
N	1	1,55	0,02	0,89	1	45,23	0,21	0,65
P	1	8505,57	109,55	<0,0001	1	157420,09	730,26	<0,0001
K	1	163,53	2,11	0,16	1	4187,44	19,43	0,0002
N*P	1	139,74	1,80	0,19	1	37,37	0,17	0,68
N*K	1	951,22	12,25	0,0021	1	43,01	0,20	0,66
P*K	1	144,24	1,86	0,19	1	4217,12	19,56	0,0002
N*P*K	1	629,35	8,11	0,0097	1	0,24	0,00	0,97
Erreur expérimentale	21	77,64			21	215,57		
Erreur d'échantillonnage	215				196			
Total	246				227			
Masse foliaire								
Bloc	3	1704,09	0,53	0,67	3	40365,88	14,31	<0,0001
N	1	698,71	0,22	0,65	1	13530,13	4,80	0,040
P	1	68280,57	21,10	0,0002	1	1740,5	0,62	0,44
K	1	246,76	0,08	0,79	1	288	0,10	0,75
N*P	1	466,44	0,14	0,71	1	2450	0,87	0,36
N*K	1	527,28	0,16	0,69	1	5100,5	1,81	0,19
P*K	1	2125,76	0,66	0,43	1	45,13	0,02	0,9
N*P*K	1	976,73	0,30	0,59	1	2485,13	0,88	0,36
Erreur expérimentale	20	3235,73			21	2820,95		
Total	30				31			

Lorsque le phosphore ne faisait pas partie de la fertilisation appliquée, l'ajout d'azote ou de potassium n'a eu aucun effet positif sur la croissance de l'épinette. En effet, les arbres qui ont reçu uniquement du potassium ou de l'azote ont présenté une croissance moyenne légèrement inférieure à ceux n'ayant pas été fertilisés.

En contrepartie, lorsque du phosphore était appliqué seul ou avec les autres éléments, la croissance des épinettes était de deux à plus de trois fois supérieure à celle des arbres non fertilisés. L'application de phosphore seul a entraîné une croissance des épinettes 2 fois et demie plus forte que chez le témoin. Par contre, la combinaison de potassium ou d'azote au phosphore a entraîné une croissance réduite quoique environ 2 fois supérieure à celle du témoin. C'est la combinaison de l'azote, du phosphore et du potassium qui a engendré la plus forte de croissance des épinettes. En effet, la croissance des épinettes fertilisées avec le mélange complet des trois éléments était trois fois plus élevée que la croissance des arbres non fertilisés.

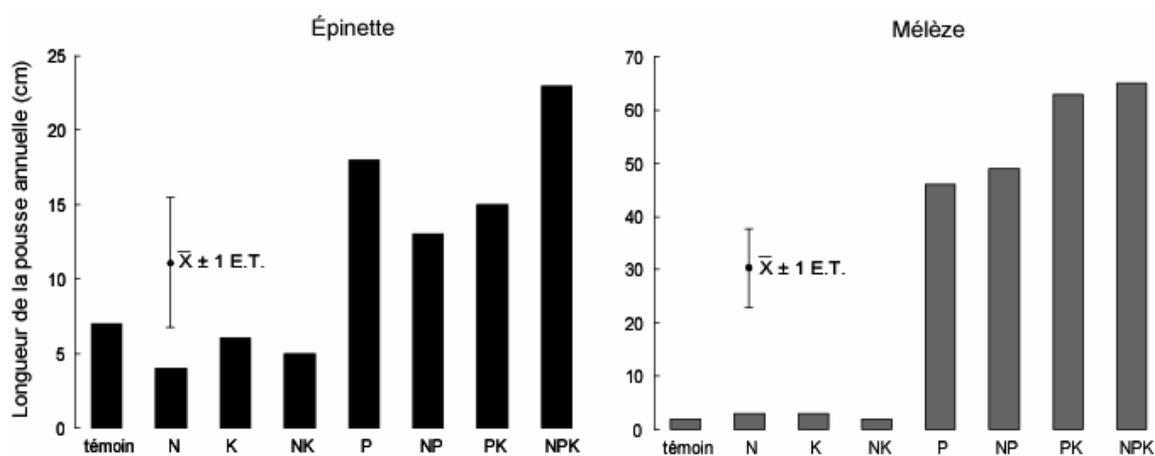


Figure 9. Longueur de la pousse annuelle des épinettes et des mélèzes dans les tourbières résiduelles de Bay-du-Vin et de Baie-Sainte-Anne (N.-B.) la seconde saison de croissance suivant leur refertilisation avec la combinaison factorielle des facteurs azote, phosphore et potassium appliqués selon deux niveaux (présence, absence). E.T. : erreur type. Voir le tableau 2 pour la description des traitements.

Nutrition

Les résultats de l'analyse vectorielle démontrent que le phosphore est l'élément qui a entraîné la plus forte réponse nutritionnelle chez les épinettes (figure 10). Dans tous les cas où le phosphore faisait partie de la fertilisation appliquée, le contenu et la concentration foliaires de cet élément étaient beaucoup plus élevés par rapport au témoin non fertilisé. Ainsi, une forte absorption du phosphore ajouté a eu lieu. Les résultats démontrent aussi un effet significatif du facteur phosphore sur la masse foliaire des épinettes ($P=0,0002$; tableau 5). La masse moyenne d'un échantillon de 500 aiguilles était plus élevée lorsque le phosphore était appliqué seul ou avec d'autres éléments. L'augmentation de l'absorption du phosphore par les arbres a donc mené à une augmentation de la masse foliaire. Ces résultats sont indicateurs d'une carence forte en phosphore chez les arbres non traités.

Une augmentation de l'absorption de l'azote par les arbres s'est produite pour tous les traitements où cet élément a été appliqué. Par ailleurs, l'application de phosphore a aussi mené à une augmentation du contenu et de la concentration foliaires en azote même lorsque ce dernier ne faisait pas partie de la fertilisation. L'application d'azote n'a eu aucun effet significatif sur la masse foliaire des épinettes ce qui indique une probable consommation de luxe.

L'application de potassium s'est avérée inutile pour modifier le contenu et la concentration foliaires de cet élément tant que du phosphore n'y était pas combiné. En effet, la présence de phosphore dans un traitement de fertilisation était nécessaire à l'augmentation de l'absorption du potassium appliqué. Cependant, l'application de phosphore a aussi entraîné une augmentation de l'absorption du potassium par les arbres même lorsque ce dernier élément ne faisait pas partie de la fertilisation.

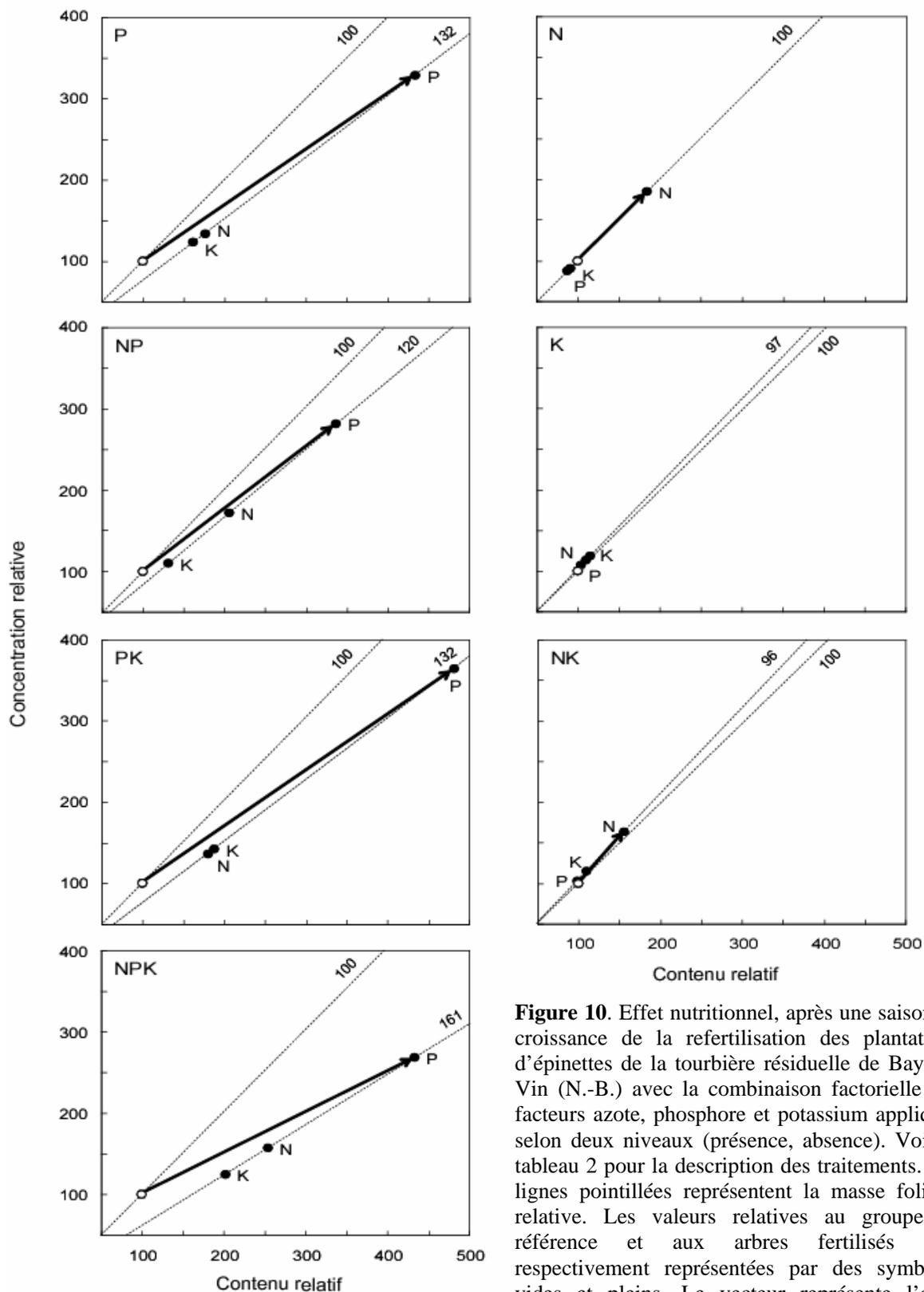


Figure 10. Effet nutritionnel, après une saison de croissance de la refertilisation des plantations d'épinettes de la tourbière résiduelle de Bay-du-Vin (N.-B.) avec la combinaison factorielle des facteurs azote, phosphore et potassium appliqués selon deux niveaux (présence, absence). Voir le tableau 2 pour la description des traitements. Les lignes pointillées représentent la masse foliaire relative. Les valeurs relatives au groupe de référence et aux arbres fertilisés sont respectivement représentées par des symboles vides et pleins. Le vecteur représente l'effet nutritionnel le plus prononcé.

3.2.2. Mélèze

Croissance

Deux saisons de croissance suivant la refertilisation, la longueur de la pousse terminale des mélèzes a été affectée par une interaction des facteurs phosphore et potassium ($P=0,0002$; tableau 5). Les longueurs moyennes de la pousse terminale des mélèzes deux saisons de croissance suivant la refertilisation pour les différentes combinaisons de fertilisants appliquées sont présentées à la figure 9.

Dans les plantations de mélèze, la croissance des arbres n'a pas été affectée par la fertilisation en l'absence de phosphore. En effet, la croissance annuelle des arbres qui ont été fertilisés avec de l'azote ou du potassium est similaire à celle des arbres qui n'ont pas été fertilisés. En moyenne, la longueur de la pousse terminale de ces arbres était de 2 cm à 3 cm deux saisons de croissance suivant la refertilisation.

Par contre, les résultats démontrent un effet sans équivoque de l'application du phosphore et du potassium. Tous les traitements comportant au moins du phosphore ont entraîné une croissance des mélèzes beaucoup plus importante que ceux qui n'en contenaient pas. Lorsque le phosphore est appliqué seul ou en combinaison avec l'azote, la croissance des arbres est plus de 20 fois supérieure à celle du témoin. De plus, si du potassium est aussi combiné aux deux traitements précédents, la croissance des arbres passe à plus de 30 fois celle du témoin. Toutefois, le potassium n'entraîne une réponse de croissance positive que s'il est appliqué conjointement avec du phosphore. Par ailleurs, aucun effet de l'azote n'a pu être observé quant à la croissance des arbres.

Nutrition

Contrairement à ce qui a pu être observé dans le cas des épinettes, l'effet de la fertilisation sur la masse foliaire des mélèzes était plus ténu. Par surcroît, les effets de la fertilisation sur la masse foliaire et la croissance des arbres ne concordent pas tout à fait entre eux; ce qui complique l'analyse des résultats à l'aide de l'analyse vectorielle. Seul un effet positif du

facteur azote était statistiquement significatif ($P=0,040$; tableau 5). Lorsque l'azote faisait partie de la fertilisation appliquée, la masse moyenne d'un échantillon de 500 aiguilles était plus élevée que lorsque seulement les autres éléments étaient appliqués.

Selon les résultats de l'analyse vectorielle, c'est le phosphore qui a entraîné la plus forte réponse nutritionnelle chez les mélèzes (figure 11). Dans tous les cas où cet élément faisait partie de la fertilisation appliquée, son absorption par les arbres s'est grandement accrue comme l'indique l'augmentation du contenu et de la concentration foliaires qui y est liée. L'application de phosphore ne peut toutefois pas être reliée à une variation significative de la masse foliaire.

L'absorption d'azote par les arbres s'est accrue dans tous les cas où cet élément faisait partie de la fertilisation appliquée. De plus, lorsque l'azote était appliqué conjointement au phosphore, la masse foliaire était plus élevée. Par contre, il y a eu diminution du contenu et de la concentration foliaires en azote dans les aiguilles des mélèzes lorsque du phosphore leur était appliqué sans azote.

En ce qui a trait au potassium, l'absorption de cet élément par les arbres ne s'est accrue de façon importante que lorsqu'il était appliqué avec du phosphore. L'application d'azote sans que du phosphore n'y soit combiné a même mené à une diminution de l'absorption du potassium par les arbres.

3.2.3. Mauvaises herbes

Des observations qualitatives ont permis de constater que l'application d'azote, lorsque combiné à du phosphore, entraînait une invasion massive par des plantes compétitrices. Aucun envahissement majeur par les mauvaises herbes n'a toutefois été observé lorsque l'azote n'était pas appliqué ou lorsque cet élément était appliqué sans phosphore (figure 12).

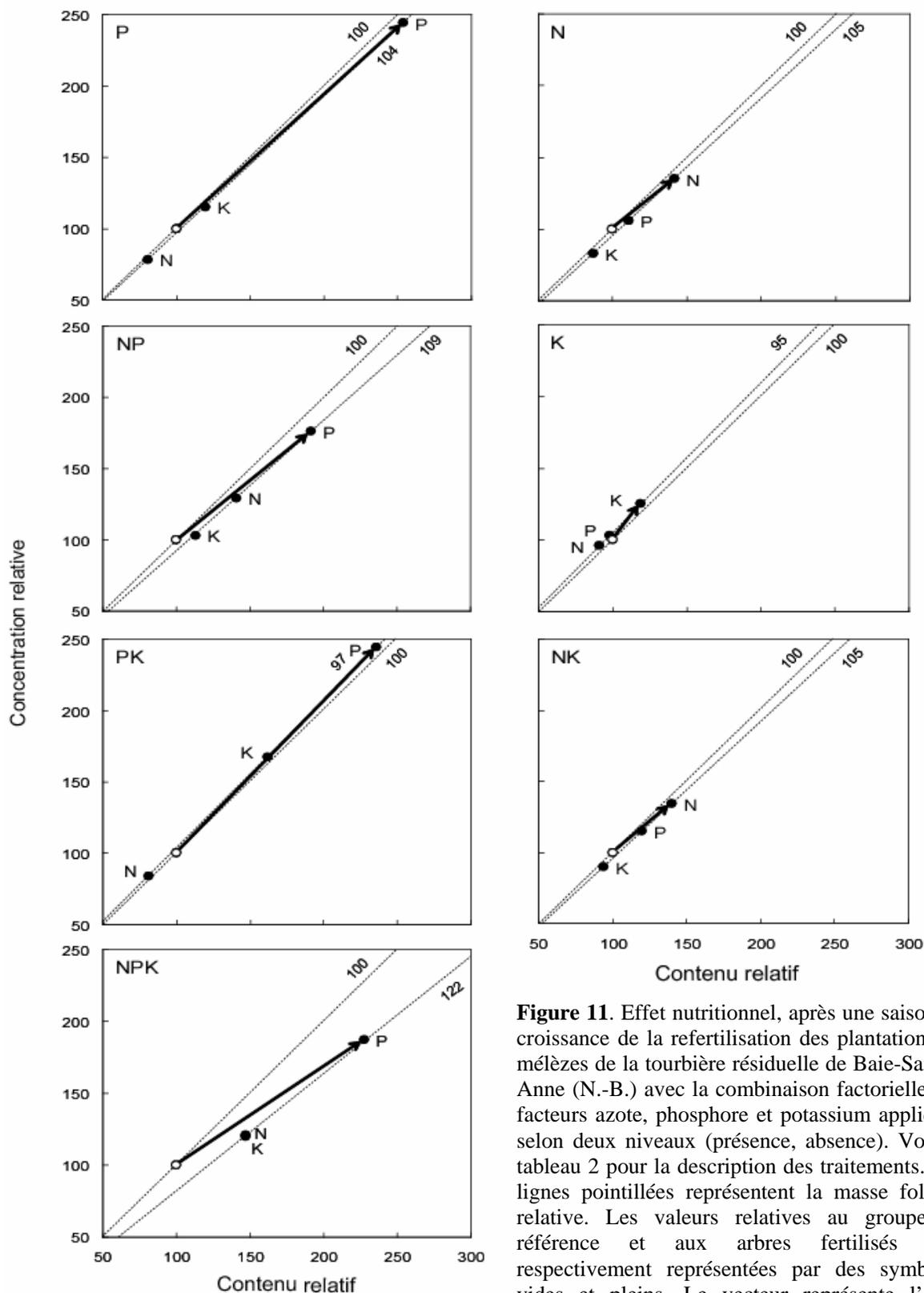


Figure 11. Effet nutritionnel, après une saison de croissance de la refertilisation des plantations de mélèzes de la tourbière résiduelle de Baie-Sainte-Anne (N.-B.) avec la combinaison factorielle des facteurs azote, phosphore et potassium appliqués selon deux niveaux (présence, absence). Voir le tableau 2 pour la description des traitements. Les lignes pointillées représentent la masse foliaire relative. Les valeurs relatives au groupe de référence et aux arbres fertilisés sont respectivement représentées par des symboles vides et pleins. Le vecteur représente l'effet nutritionnel le plus prononcé.



Figure 12. Influence de l'application de fertilisant azoté en présence de phosphore sur l'envahissement des plantations par les mauvaises herbes. Plantation de mélèzes de la tourbière résiduelle de Baie-Sainte-Anne (N.-B.) deux saisons de croissance suivant la refertilisation.

4. DISCUSSION

4.1. Expérience de fertilisation initiale

Tout d'abord, il semble que la croissance et la survie des épinettes et des mélèzes ait été favorisée par la fertilisation pour la majorité des traitements. Cependant, chez l'épinette, le fertilisant composé de roche phosphatée et de muriate de potasse appliqués en granules à la surface du sol n'a pas entraîné une amélioration notable du succès d'implantation par rapport à l'absence de fertilisation. Toutefois, la structure de l'expérience ne permettait pas de tester statistiquement les différences entre les différents fertilisants et les arbres non fertilisés.

Une fertilisation appropriée permet aux arbres d'avoir un accès facile aux ressources nécessaires à une croissance rapide de leurs parties aériennes qui captent la lumière, mais aussi de leur système racinaire. L'expansion rapide des racines est d'une importance capitale pour l'acquisition de nutriments en provenance du sol et surtout pour que l'arbre puisse s'approvisionner convenablement en eau (Margolis et Brand 1990). L'approvisionnement en eau est particulièrement critique dans les tourbières résiduelles qui sont souvent soumises à des conditions de sécheresse durant l'été (Price 1997). Une autre fonction importante du système racinaire est de fournir un ancrage dans le sol pour les arbres. Les arbres qui ont des racines bien développées sont donc moins sujets à être déracinés par des animaux ou le soulèvement gélival caractéristique des tourbières résiduelles (Groeneveld et Rochefort 2002).

Dans le cas de l'épinette, la croissance annuelle était peu informative pour comparer l'efficacité des traitements de fertilisation à l'étude. Cependant, des différences claires entre les traitements ont été observées en ce qui a trait à la masse sèche des arbres entiers. Cette dernière variable tenait en compte plusieurs facteurs tels que l'accroissement du système racinaire, l'augmentation de la quantité du feuillage ainsi que la croissance générale des branches de l'arbre. La masse sèche était donc une variable plus sensible que la longueur de la pousse terminale seule pour discerner les différences de croissance engendrées par les divers traitements. Ainsi, il a été possible de déterminer que les fertilisants expérimentaux 2 et 3 ainsi que le Forest Pak favorisaient le plus la croissance des épinettes même s'il n'y

avait pas de différences entre ces traitements pour la longueur de la pousse terminale des épinettes.

Chez le mélèze, la croissance annuelle et la masse sèche des arbres entiers apportaient des informations comparables quant à la performance des différents fertilisants étudiés. Les fertilisants expérimentaux 2 et 3 étaient les plus efficaces pour favoriser la croissance en hauteur et la prise de masse des mélèzes. Le mélèze est un arbre qui utilise rapidement les ressources disponibles pour sa croissance (Macdonald et Lieffers 1990). C'est pourquoi il a présenté une forte réponse de croissance à la fertilisation. Même le fertilisant PK granulaire, qui a été le moins performant des six fertilisants testés, a entraîné une croissance bien supérieure à celle des mélèzes non fertilisés. D'ailleurs, en tourbières boisées naturelles, le mélèze se retrouve dans les parties plus riches en nutriments, alors que l'épinette domine dans les endroits plus pauvres (Montague et Givnish 1996).

Il est toutefois important de remarquer que les fertilisants qui favorisaient le plus la croissance des arbres ne sont pas nécessairement ceux qui engendraient des taux de survie maximaux. En effet, pour l'épinette, c'est avec le Restoration Pak suivi par le Forest Pak que la survie des plants était la meilleure. Ces deux traitements étaient ceux qui contenaient la plus petite quantité de fertilisant (tous les éléments compris) des traitements à l'étude. L'épinette semble très sensible à la toxicité engendrée par une surfertilisation comme en font foi les résultats de Bussièrès (2005) qui montrent une forte augmentation de la mortalité des plants pour les plus fortes doses de fertilisant appliquées. De plus, il a été observé qu'une fertilisation trop abondante pouvait réduire la survie des arbres (Oskarsson et Sigurgeirsson 2001). La question de l'équilibre entre une bonne croissance et une survie optimale ne posait pas problème pour le mélèze puisqu'il n'y avait pas de différences entre les taux de survie relatifs aux différents fertilisants étudiés pour cet arbre.

Comme l'a démontré l'analyse vectorielle des données d'analyses foliaires, l'azote était l'élément le plus important pour la nutrition des arbres lors de l'année de plantation tandis que le phosphore était primordial lors de la seconde saison de croissance. Les meilleures performances de croissance ont donc été obtenues avec les fertilisants qui contenaient de l'azote facilement accessible, ce qui assurait une absorption rapide de cet élément lors de la première saison de croissance. L'azote absorbé pouvait donc être utilisé rapidement par les

jeunes plants pour la construction de leur système racinaire, de leur feuillage et de leurs branches leur permettant ainsi de s'accaparer rapidement le plus de ressources possible afin de favoriser le succès de leur implantation. De plus, une quantité suffisante de phosphore pour assurer une bonne nutrition phosphorée lors de la saison subséquente était primordiale. En effet, les arbres pouvaient probablement compter sur leurs réserves internes de phosphore acquises en pépinière pour leur première saison de croissance, tandis que par la suite, un apport extérieur était nécessaire vu la pauvreté de la tourbe en ce dernier élément. Du potassium devait aussi être contenu en quantité suffisante dans le fertilisant appliqué afin que cet élément soit disponible en quantité convenable pour la croissance des arbres. Les fertilisants les moins performants tels que le fertilisant expérimental 1, le Restoration Pak et le fertilisant PK granulaire ont failli soit à fournir l'azote facilement accessible la première saison de croissance, soit à assurer une nutrition convenable en phosphore et en potassium pour assurer une croissance maximale des arbres.

Selon des études scandinaves qui ont porté sur la fertilisation initiale des plantations d'arbres en tourbières résiduelles, la fertilisation en phosphore et en potassium est primordiale pour assurer une bonne implantation des arbres (Aro et Kaunisto 1998b, Aro 2000). Toutefois, selon ces études, la fertilisation azotée n'est pas nécessaire pour favoriser la survie et la croissance des arbres. En Finlande, la fertilisation recommandée contient environ 3 g de phosphore et 5 g de potassium par plant appliqués sous forme de roche phosphatée et de muriate de potasse. Cette formulation est similaire au traitement PK granulaire utilisé pour notre expérience. C'est cependant ce traitement fertilisant qui a entraîné les plus faibles croissances annuelles et masses sèches d'arbres entiers chez l'épinette et le mélèze. De plus, le traitement fertilisant PK granulaire a mené au taux de survie le plus faible pour l'épinette. Par ailleurs, les fertilisants expérimentaux 2 et 3 ont été les plus performants en ce qui a trait à la croissance des arbres alors qu'ils contenaient de l'azote en plus des quantités de phosphore et de potassium comparables à la recommandation finlandaise. Dans le contexte Nord-Américain, l'azote semble donc être une composante importante de la fertilisation initiale des arbres plantés en tourbières résiduelles. Cette différence face aux résultats obtenus en Scandinavie pourrait être causée par un plus faible taux de déposition atmosphérique azotée dans le nord-est de l'Amérique du Nord. De plus, puisque les tourbières sont souvent exploitées plus en profondeur en

Europe, où la tourbe est utilisée comme combustible (Kaunisto 1997), la plantation d'arbres a lieu dans des couches de tourbe plus denses et plus décomposées probablement plus concentrées en azote vu leur plus forte masse volumique (Westman 1981).

D'après certaines études, la tourbe contient suffisamment d'azote sous forme organique pour soutenir une croissance suffisante des arbres (Paavilainen et Päivänen 1995, Aro et Kaunisto 1998a). De plus, la fertilisation en phosphore permet de stimuler l'activité microbienne du sol, ce qui favorise la minéralisation de l'azote (Finér 1992, Wells et Williams 1996). Dans cette expérience, la fertilisation avec du phosphore et du potassium a favorisé l'absorption d'azote par les épinettes et les mélèzes (figures 5 à 8) au moins pour la première saison de croissance. Toutefois, l'azote minéralisé à cause de l'apport en roche phosphatée a probablement été mis en disponibilité plus lentement que l'azote fourni directement par les fertilisants dans lesquels cet élément était contenu. Ainsi les arbres ont eu accès à moins d'azote facilement accessible pour subvenir aux besoins de leur implantation. Cela explique probablement la croissance moins rapide des épinettes et des mélèzes ainsi que la faible survie des épinettes ayant reçu le traitement PK granulaire.

La durée de l'expérience de fertilisation initiale ne permet pas d'évaluer la durée de l'effet bénéfique des traitements appliqués en ce qui a trait à la croissance des arbres. Selon le fabricant des sachets de thé utilisés, la durée de vie de ces fertilisants à dégagement lent est de 2 à 3 ans (RTI communication personnelle). Des travaux finlandais démontrent que l'effet de la fertilisation initiale à base de roche phosphatée et de muriate de potasse appliquée en surface autour des plants ne dure que de 4 à 6 ans (Aro et Kaunisto 1996) tandis qu'en Irlande des carences nutritionnelles, majoritairement en phosphore, étaient déjà apparentes 5 ans après une fertilisation initiale PK appliquée à la volée. (Jones et Farrell 1997, 2000). Les résultats de l'expérience de fertilisation démontrent qu'il y a apparition de carences nutritionnelles moins de 4 ans après la fertilisation initiale avec le fertilisant commercial Evergro Tab. En définitive, il est impératif d'effectuer un suivi de la croissance des épinettes et des mélèzes plantés à Pointe-au-Père afin de déterminer avec confiance la durée de temps pendant laquelle ces arbres profiteront de la fertilisation initiale qui leur a été appliquée. Ces informations seront ensuite utiles dans la planification à long terme de travaux de plantation afin de prévoir le moment approprié pour une refertilisation.

En somme, la fertilisation initiale des arbres plantés en tourbières résiduelles est nécessaire au succès de leur implantation. Une fertilisation appropriée, comportant de l'azote, du phosphore et du potassium, engendre des arbres plus vigoureux en favorisant une croissance rapide de leur partie aérienne et de leur système racinaire. Elle permet aussi de subvenir aux besoins nutritionnels de ces arbres à court et moyen termes. Le Forest Pak a été le traitement le plus intéressant pour optimiser la croissance et la survie des épinettes tandis que le mélèze a présenté le plus grand succès d'implantation lorsqu'il était fertilisé avec les traitements expérimentaux 2 et 3. Toutefois, nous ne connaissons pas la durée de l'effet bénéfique des fertilisants utilisés dans cette étude. Il sera donc nécessaire de faire un suivi de la croissance des arbres afin d'acquérir plus d'information à ce sujet.

4.2. Expérience de refertilisation

L'analyse des résultats de l'expérience de refertilisation démontre un effet majeur de l'application de phosphore sur la croissance et la nutrition des deux espèces d'arbres à l'étude.

Tout d'abord, pour les épinettes et les mélèzes, l'application de phosphore était absolument nécessaire à une amélioration de la croissance. En effet, lorsque les autres éléments étaient appliqués sans phosphore, la croissance des arbres ne différait pas de celle des témoins non fertilisés. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par Valk (1986) et Pikk et Valk (1996) pour des pins sylvestres de 10 et 17 ans fertilisés avec une combinaison factorielle d'azote, de phosphore et de potassium lors de leur plantation sur une tourbière résiduelle. Selon leurs résultats, la fertilisation n'avait qu'un effet mineur sur la taille atteinte par les arbres à moins que du phosphore n'en fasse partie.

En second lieu, le phosphore était représenté par le vecteur dominant dans les graphiques d'analyses vectorielles dans tous les cas où cet élément faisait partie de la fertilisation appliquée. En d'autres termes, l'application de phosphore menait à une absorption proportionnellement plus grande de cet élément par rapport aux autres. Une réponse nutritionnelle semblable a été observée par Wells (1991) dans une expérience où l'analyse

vectorielle était utilisée pour étudier la réponse nutritionnelle à la refertilisation chez des mélèzes du japon plantés sur une tourbière naturelle. Le phosphore était donc l'élément le plus déficient pour les épinettes et les mélèzes. C'est pourquoi la fertilisation phosphorée était primordiale pour permettre une meilleure croissance des épinettes et des mélèzes.

L'application de phosphore a aussi causé une augmentation de la masse foliaire dans le cas de l'épinette. Comme l'ont démontré Timmer et Morrow (1984), les variations de la masse foliaire des conifères sont un bon indicateur de la croissance future des arbres. Il est donc possible d'affirmer que la levée de la carence en phosphore chez les épinettes est la cause d'une amélioration de la croissance des arbres qui se poursuivra pour les années à venir.

Par ailleurs, la fertilisation phosphorée n'a pas causé de variation de la masse foliaire chez le mélèze malgré son effet indéniable sur la croissance des arbres. Nous devrions conclure à une consommation de luxe du phosphore même si son application était indéniablement nécessaire à l'augmentation de la croissance des mélèzes. Seul l'azote a eu un effet positif sur la masse foliaire des aiguilles récoltées chez les mélèzes. Toutefois, l'absorption de l'azote n'a pas été aussi forte que celle du phosphore lorsque ces éléments étaient appliqués. Il est donc peu probable qu'une carence en azote limitait principalement la croissance des arbres. Un phénomène semblable a aussi été rapporté par Wells (1991) pour la refertilisation de plantations de mélèzes du japon plantés 18 ans plus tôt dans une tourbière naturelle. L'absence de lien clair entre la masse foliaire et l'effet majeur du phosphore sur la nutrition ainsi que la croissance des mélèzes a compliqué l'interprétation de l'analyse vectorielle. En effet, cette méthode d'analyse se base sur la variation de la masse foliaire pour quantifier la variation de croissance engendrée par le traitement appliqué. L'absence d'effet du phosphore sur l'accroissement de la masse foliaire du mélèze semble être due à la particularité de ces arbres de présenter deux types de croissances distinctes. En effet, la croissance des mélèzes est caractérisée par la présence de pousses longues à croissance indéterminée et de pousses courtes qui ont une croissance déterminée (Clausen et Kozlowsky 1967). Le nombre d'aiguilles formées par un bourgeon issu d'une pousse courte lors d'une saison de croissance donnée est donc fixé à la fin de la saison précédente. C'est pourquoi il est conseillé de récolter les aiguilles provenant des pousses courtes pour mesurer les valeurs foliaires utilisées en analyse vectorielle. L'effet

relatif au traitement est exprimé par une variation de la masse foliaire, puisque le nombre d'aiguilles ne peut pas être affecté. Conformément à cette logique, ce sont les aiguilles des pousses courtes des mélèzes qui ont été récoltées dans le cadre de cette expérience. Dans le cas présent, il semble toutefois que l'effet relatif au traitement ait été atténué par la forte croissance des pousses à croissance indéterminée. Les mélèzes semblent avoir alloué une plus grande part des ressources apportées par la fertilisation à la croissance de leurs pousses longues. Ainsi, la variation attendue de la masse des aiguilles des pousses courtes ne s'est pas exprimée aussi clairement. L'attribution de plus de ressources à la croissance des pousses longues est confirmée par la retranslocation de l'azote contenu dans les aiguilles des pousses courtes qu'il est possible d'observer pour les traitements où du phosphore était appliqué seul ou en combinaison avec le potassium sans apport extérieur d'azote (figure 11 traitements P et PK).

Outre son effet direct sur la nutrition en phosphore des arbres, la fertilisation phosphorée peut aussi avoir favorisé la croissance des arbres par ses effets indirects sur la consommation d'autres éléments par les arbres. Dans notre expérience, la fertilisation avec du phosphore a favorisé l'absorption d'azote par les arbres. La tourbe résiduelle est un substrat riche en azote qui est contenu dans la matière organique (Aro et Kaunisto 1998a, Paavilainen et Päivänen 1995). L'application de phosphore à la tourbe résiduelle stimule l'activité microbienne et favorise la minéralisation de l'azote contenu dans la tourbe (Wells et Williams 1996). L'azote doit toutefois être contenu en quantité suffisante dans la tourbe pour que les arbres puissent profiter de l'augmentation de la minéralisation entraînée par la fertilisation en phosphore (Pietilainen *et al.* 2005). De plus, l'élimination d'une carence majeure limitant la croissance des arbres peut mener à une augmentation de la consommation d'autres éléments (Finér 1992). Dans le cas présent, il semble que la levée de la carence en phosphore ait permis une plus grande absorption du potassium disponible dans la tourbe.

Par ailleurs, en plus de l'effet majeur dû au phosphore, les applications d'azote et de potassium ont aussi eu des effets non négligeables sur la croissance des épinettes et des mélèzes. La croissance des épinettes a été favorisée par des apports extérieurs d'azote et de potassium lorsque du phosphore faisait partie de la fertilisation appliquée. Toutefois, il est

impossible d'attribuer l'effet positif à un seul des deux éléments puisqu'il semble que l'azote et le potassium devaient être ajoutés ensemble au phosphore afin d'entraîner une amélioration de la croissance des arbres. En effet, l'application d'azote et de phosphore ou de phosphore et de potassium a entraîné une plus faible augmentation de croissance des épinettes par rapport au témoin que l'application de phosphore seul ou des trois éléments à la fois. Cette plus faible performance est difficile à expliquer d'autant plus que les quatre traitements comportant du phosphore ont eu un effet similaire sur la nutrition des épinettes. Il est probable que les épinettes fertilisés avec de l'azote et du phosphore ou du phosphore et du potassium aient présenté une augmentation de croissance comparable aux deux autres traitements, mais que la composante verticale de cette croissance ait été réduite au profit de la croissance des racines ou de pousses latérales.

En ce qui a trait au mélèze, sa croissance a été favorisée par l'ajout de potassium lorsque du phosphore était aussi appliqué. Il est effectivement possible que la forte croissance des mélèzes, stimulée par l'apport en phosphore, ait été limitée par un manque de potassium à un certain point. Il était donc nécessaire de fournir un apport extérieur en potassium aux mélèzes afin de profiter pleinement de l'augmentation de croissance entraînée par la refertilisation. Par ailleurs, l'application d'azote n'a eu aucun effet sur la croissance des mélèzes même si cet élément était absorbé en plus grande quantité lorsqu'il était fourni. Ainsi, l'azote ne faisait pas défaut aux mélèzes. La mise en disponibilité de l'azote de la tourbe due à la fertilisation en phosphore de même que l'allocation de l'azote vers la croissance des pousses longues ont permis de subvenir aux besoins des mélèzes pour leur croissance. Une expérience menée sur des plantations en tourbières naturelles par Sundström (1995) a aussi montré que l'addition d'azote au phosphore et au potassium n'améliorait pas la croissance des arbres lorsque la tourbe était assez riche en azote.

La durée de temps pendant laquelle la croissance des arbres sera favorisée par la refertilisation avec les traitements contenant du phosphore ne pouvait être mesurée au cours de la période consacrée à l'expérience de refertilisation. La méthode d'application du fertilisant et les quantités appliquées au cours de cette expérience diffèrent de ce qui a été fait dans le cadre d'autres études. En effet, dans la majorité des cas, les travaux de refertilisation sont effectués par application à la volée ce qui entraîne aussi l'utilisation

d'une plus grande quantité de fertilisants. L'observation des résultats d'autres études permet toutefois de déterminer un ordre de grandeur quant à la durée de l'effet bénéfique des traitements efficaces de notre expérience. L'effet positif sur la croissance des arbres d'une application de phosphore sous forme peu soluble est d'environ 25 à 30 ans en tourbières naturelles boisées (Silfverberg et Hartman 1999, Rautjärvi *et al.* 2004) tandis qu'en tourbière résiduelle l'effet semble être de moindre durée soit d'environ 15 ans (Aro et Kaunisto 2003). En ce qui a trait au potassium appliqué sous forme de muriate de potasse soluble, la durée de son effet positif est d'environ 15 ans en tourbières naturelles boisées (Rautjärvi *et al.* 2004, Pietiläinen *et al.* 2005). En ce qui a trait à notre expérience de refertilisation, il sera nécessaire d'effectuer un suivi de la croissance des arbres pour déterminer la durabilité de l'effet positif des traitements de refertilisation contenant du phosphore.

En résumé, une stagnation de la croissance des plantations de Baie-Ste-Anne et de Bay-du-Vin était causée par des carences nutritionnelles apparues moins de 4 ans après la fertilisation initiale des arbres. Une carence majeure en phosphore était la cause principale de la faible croissance des épinettes et des mélèzes. La fertilisation avec de la roche phosphatée a permis de lever cette carence tout en favorisant l'absorption d'azote et de potassium par les arbres, ce qui leur a permis d'augmenter considérablement leur croissance. L'épinette a aussi profité d'apports supplémentaires en azote et en potassium tandis que la croissance des mélèzes a été maximisée par un apport supplémentaire de potassium. Tout comme dans le cas de l'expérience de fertilisation initiale, il serait important d'effectuer un suivi de la croissance des épinettes et des mélèzes refertilisés avec les traitements contenant du phosphore afin d'en apprendre plus sur la durée de l'effet positif de la refertilisation sur la croissance des arbres.

5. CONCLUSION

La fertilisation au moment de la plantation est primordiale afin que les arbres s'implantent avec succès. La croissance et la survie des épinettes et des mélèzes sont favorisées par l'application d'une fertilisation appropriée. Une formulation adéquate doit contenir une source d'azote facilement accessible lors de la première saison de croissance pour permettre une croissance rapide de la partie aérienne et du système racinaire des arbres. Il est aussi important que le fertilisant utilisé contienne une quantité suffisante de phosphore et de potassium pour assurer la croissance des arbres au cours des saisons subséquentes. À la lumière des résultats obtenus, nous croyons qu'il est approprié d'utiliser le Forest Pak comme fertilisant lors de la plantation des épinettes noires. Dans le cas du mélèze laricin, les traitements expérimentaux 2 et 3 sont recommandés. Toutefois, l'effet positif de la fertilisation des arbres au moment de la plantation pourrait être de courte durée comme en font foi les résultats de l'expérience de refertilisation.

La stagnation de la croissance des plantations de Bay-du-Vin et de Baie-Ste-Anne était causée par des carences nutritionnelles apparues moins de quatre ans suivant la fertilisation initiale des arbres. La refertilisation de ces plantations de mélèzes et d'épinettes était nécessaire afin de soutenir la croissance des arbres. L'élément limitant le plus la croissance des deux espèces d'arbres était le phosphore. Le mélèze a aussi bénéficié d'un apport supplémentaire en potassium. Quant à l'épinette, l'application d'azote et de potassium en plus du phosphore a favorisé une augmentation de sa croissance. Par ailleurs, l'application d'azote a favorisé un envahissement des plantations par de la végétation compétitrice. Ainsi, nous croyons que la refertilisation de plantations d'épinette noire ne devrait consister qu'en une application de phosphore tandis que le mélèze devrait recevoir du phosphore et du potassium.

Il sera nécessaire d'effectuer un suivi à moyen terme de la croissance des arbres faisant partie des expériences de fertilisation initiale et de refertilisation. Dans un premier temps, un suivi permettra de déterminer la durée de l'effet de la fertilisation initiale sur les épinettes et les mélèzes selon les traitements appliqués. Ainsi, il sera possible d'identifier le moment où une refertilisation des arbres pourrait être nécessaire. En second lieu, il sera aussi important de déterminer la durée de l'effet positif de la refertilisation sur la croissance

des arbres afin de déterminer la fréquence à laquelle de tels travaux devraient être mis en œuvre. Toutefois, l'effort consenti à l'amélioration de la croissance des arbres plantés en tourbières résiduelles dépendra des objectifs propres à chaque plantation.

Bien que les connaissances acquises au cours de ce projet de recherche pourraient être utilisées pour la production de matière ligneuse sur des tourbières résiduelles, l'intérêt accordé à la plantation d'arbres dans ces milieux perturbés est pour l'instant tourné vers un tout autre objectif. La plantation d'arbres en tourbières résiduelles est plutôt considérée comme une composante de la restauration des tourbières; soit pour la restauration de tourbières forestières ou d'une bordure forestière et d'îlots boisés en tourbières plus ouvertes. Il sera toutefois important de déterminer la compatibilité entre la fertilisation de plants de résineux et la réintroduction de bryophytes et d'arbustes typiques des tourbières naturelles lors de la mise en œuvre de plans de restauration à grande échelle. De plus, il est nécessaire de définir les dimensions jugées acceptables que les arbres devront atteindre dépendamment des objectifs des plans de restauration pour guider l'intensité des travaux de fertilisation mis en œuvre.

RÉFÉRENCES

- Aro, L. 2001. Afforestation of cutaway peatlands in Finland. *Dans* Re-use of peat production areas. Proceeding of the International seminar. Oulu, Finlande, 19 au 20 juin 2000. *Sous la direction* de P. Åman. EU's Northern Periphery Programme project, Copenhagen, Danemark. p. 43-46.
- Aro, L. 2000. Root penetration of Scots pine and silver birch on cut-away peatlands. *Dans* Pour une gestion harmonieuse des tourbières. Actes du 11e Congrès international de la tourbe. Volume II. Québec, 6 au 12 août 2000. *Sous la direction* de L. Rochefort et J.-Y. Daigle. Canadian Society of Peat and Peatlands, Shippagan, NB et International Peat Society, Jyväskylä, Finlande. p. 932-936.
- Aro, L., et Kaunisto, S. 2003. Jatkolannoituksen ja kasvatustiheyden vaikutus nuorten mäntymetsiköiden ravinnetilaan sekä puuston ja juuriston kehitykseen paksuturpeisella suonpohjalla. *Résumé*: Effect of refertilisation and growing density on the nutrition, growth and root development of young Scots pine stands in a peat cutaway area with deep peat layers. *Suo*, 54(2): 49-68.
- Aro, L. et Kaunisto, S. 2002 Relationships between some soil properties and nutrition and height growth of Scots pine on cutaway peatlands. Affiche. *Résumé dans* Proceedings of the IUFRO Conference on Restoration of Boreal and Temperate Forests - Documenting Forest Restoration Knowledge and Practices in Boreal and Temperate Ecosystems. Vejle, Denmark, 28 avril au – 2 mai 2002. *Sous la direction* de E.S. Gardiner et L.J. Breland, Danish Centre for Forest, Landscape and Planning, Reports No. 11. p. 238.
- Aro, L. et Kaunisto, S. 1998a. Afforestation of peat cutaway areas. Aitoneva, Kihniö. Finnish Forest Research Institute, Parkano Research Station. Field guide, 24 p.
- Aro, L. et Kaunisto, S. 1998b. Forestry use of peat cutaway areas in Finland. *Dans* The spirit of peatland – 30 years of the International Peat Society. Proceedings of the International Peat Symposium. Jyväskylä, Finlande, 7 au 9 septembre 1998. *Sous la direction* de R. Sopo. IPS, Jyväskylä, Finlande. p. 185-187.
- Binkley, D. 1986. Forest Nutrition Management. John Wiley and Sons, New York. 290 p.
- Braekke, F.H. 1987. Nutrient relationships in forest stands: effects of drainage and fertilization on surface peat layers. *Forest Ecology and Management*, 21: 269-284.
- Bussièrès, J. 2005. Potentiel d'établissement d'essences forestières et fruitières en tourbières résiduelles. Mémoire M.Sc., Université Laval, Québec, QC. 81 p.

- Campbell, D.R., Rochefort, L. et Lavoie, C. 2000. The colonization potential of peatland plants recolonizing post-vacuum-extracted bogs. *Dans* Sustaining our peatlands: Proceedings of the 11th International Peat Congress. Québec City, Canada. 6 au 12 Août 2000. Volume II. *Sous la direction de* L. Rochefort et J.-Y. Daigle. Edmonton (Ab.): Canadian Society of Peat and Peatlands & International Peat Society. p. 670-674.
- Campbell, D. R., Lavoie, C. et Rochefort, L. 2002. Wind erosion and surface stability in abandoned milled peatlands. *Canadian Journal of Soil Science* 82: 85-95.
- Carey, M.L., Hammond, R.F. et McCarthy, R.G. 1985. Plantation forestry on cutaway raised bogs and fen peats in the Republic of Ireland. *Irish Forestry* 42: 106-122.
- Clausen, J.J. et Kozlowski, T.T. 1967. Seasonal growth characteristics of long and short shoots of tamarack. *Canadian Journal of Botany* 45: 1643-1651.
- Desrochers, A., Lavoie, C., Pellerin, S. et Poulin, M. 2000. Bog conservation: a Canadian perspective. *Dans* Sustaining our peatlands: Proceedings of the 11th International Peat Congress. Québec City, Canada. 6 au 12 Août 2000. Volume II. *Sous la direction de* L. Rochefort et J.-Y. Daigle. Edmonton (Ab.): Canadian Society of Peat and Peatlands & International Peat Society. p. 1027-1033.
- 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.
- Environnement Canada 2006. *En ligne* : http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/index_f.html. Consulté en mai 2006.
- Finér, L. 1992. Nutrient concentrations in *Pinus sylvestris*, growing on an ombrotrophic pine bog, and the effects of PK and NPK fertilization. *Scandinavian Journal of Forest Research* 7: 205-218.
- Grégoire, N. et Fisher, R.F. 2004. Nutritional diagnoses in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) established stands using three different approaches. *Forest Ecology and Management* 203: 195-208.
- Groeneveld, E.V.G. et Rochefort, L. 2002. Nursing plants in peatland restoration: on their potential use to alleviate frost heaving problems. *Suo* 53 (3-4): 73-85.
- Haase, D.L. et Rose, R. 1995. Vector analysis and its use for interpreting plant nutrient shifts in response to silvicultural treatments. *Forest Science* 41(1): 54-66.
- Jones, S.M. et Farrell, E.P. 2000. Research program to develop a forest resource on industrial cutaway peatland in the Midlands. Forest Ecosystem Research Group, Department of Environmental Resource Management, University College Dublin. Forest Ecosystem research Group Report Number 52. 145 p.

- Jones, S.M. et Farrell, E.P. 1997. Survey of plantation forests on Bord na Móna cutaway bog. Forest Ecosystem Research Group report number 20. Department of Resource Management. University College Dublin. Belfield, Dublin 4, Ireland.
- Jutras, S. 2004. Bégin, J., Plamondon, A.P. 2004. Illustration of biological drainage in forested peatlands by spatially explicit single-tree growth modelling. *Dans Wise Use of Peatlands. Proceedings of the 12th International Peat Congress, Tampere, Finland, 6 au 11 Juin 2004. Vol. 1. Oral presentations. Sous la direction de J. Päivänen. International Peat Society, Jyväskylä, Finlande. p. 491-499.*
- Kaunisto, S. 1997. Peatland forestry in Finland: problems and possibilities from the nutritional point of view. *Dans Northern forested wetlands ecology and management. Sous la direction de C.C., Trettin, M.F, Jurgensen, D.F. Grigal, M.R. Gale et J.K. Jørgensen. CRC Lewis Publishers Boca Raton. p. 387-401.*
- Kaunisto, S. et Aro, L. 1996. Forestry use of cut-away peatlands. *Dans Peatlands in Finland. Sous la direction de H. Vasander. Finnish Peatland Society. Helsinki, Finlande. p.130-134.*
- Kaunisto, S. et Viinamäki, T. 1991. Lannoituksen ja leppäsekoituksen vaikutus mäntytaimikon kehitykseen ja suonpohjaturpeen ominaisuuksiin Aitonevalla. *Résumé: Effect of fertilization and alder (Alnus incana) mixture on the development of young Scots pine (Pinus sylvestris) trees and the peat properties in a peat cutover area at Aitoneva, southern Finland. Suo, 42(1): 1-12.*
- Laiho, R., Sallantausta, T. et Laine, J. 1999. The effect of forestry drainage on vertical distributions of major plant nutrients in peat soils. *Plant and Soil 207: 169-181.*
- Laiho, R. et Laine, J. 1995. Changes in mineral element concentrations in peat soils drained for forestry in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research 10: 218-224.*
- Lavoie, C., Grosvernier, P., Girard, M. et Marcoux, K. 2003. Spontaneous revegetation of mined peatlands: an useful restoration tool? *Wetlands Ecology and Management 11: 97-107.*
- 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.*
- Letho, B. 2005. Skogstillväxten ca 20 år efter plantering på Flakmossen - dikningens och gödslingens betydelse vid beskogning på en avslutad torvtäkt i Värmland. *Résumé: Stand growth 20 years after planting on Flakmossen – the significance of drainage and fertilization in an afforestation trial on a peat harvesting field in province of Värmland, West Central Sweden. Graduate Thesis in Biology. Department of Forest Ecology. Swedish University of Agricultural Sciences. Umeå. 28 p.*

- Leupold, S. 2005. Vegetation succession and biomass production after peat ash and PK-fertilization on the cutaway peatland of Näsmyran in Hälsingland, Sweden. Graduate Thesis in Biology. Department of Forest Ecology. Swedish University of Agricultural Sciences. Umeå. 30 p.
- Lieffers, V.J. 1988. Sphagnum and cellulose decomposition in drained and natural areas of an Alberta peatland. *Canadian Journal of Soil Science* 68: 755–761.
- Lieffers, V.J. et Macdonald, S.E. 1990. Growth and foliar nutrient status of black spruce and tamarack in relation to depth of water table in some Alberta peatlands. *Canadian Journal of Forest Research* 20: 805-809.
- Lieffers, V.J. et Rothwell, R.L. 1987. Rooting of peatland black spruce and tamarack in relation to depth of water table. *Canadian Journal of Botany* 65: 817-821.
- Lötjönen, P. 2004. After-use predictions for Finnish cut-over peatlands – based on the characteristics of the under-lying mineral soils. P. 385-390 *Dans* Wise use of peatlands. Proceedings of the 12th International Peat Congress. Tampere, Finlande, 6 au 11 juin 2004. *Sous la direction* de J. Päivänen. International Peat Society, Jyväskylä, Finlande. p. 385-390.
- Macdonald S.E., Schmidt, M.G. et Rothwell, R.L. 1998. Impacts of mechanical site preparation on foliar nutrients of planted white spruce seedlings on mixed-wood boreal forest sites in Alberta. *Forest Ecology and Management* 110: 35-48.
- Macdonald, S.E, et Lieffers, V.J. 1990. Photosynthesis, water relations and foliar nitrogen of *Picea mariana* and *Larix laricina* from drained and undrained peatlands. *Canadian Journal of Forest Research* 20: 995-1000.
- Malcolm, D.C. et Cuttle, S.P. 1983. The application of fertilizers to drained peat : 1. Nutrient losses in drainage. *Forestry* 56(2): 155-175.
- Margolis, H.A. et Brand, D.G. 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. *Canadian Journal of Forest Research* 20: 375-390.
- McNeil, P., Waddington, J.M., Lavoie, C., Price, J.S. et Rochefort, L.. 2000. Contemporary and long-term peat oxidation rates in a post-vacuum harvested peatland. *Dans* Sustaining our peatlands: Proceedings of the 11th International Peat Congress. Québec City, Canada (6-12 August 2000). Volume II. *Sous la direction* de L. Rochefort et J.-Y. Daigle. Edmonton (Ab.): Canadian Society of Peat and Peatlands & International Peat Society. p. 732-741.
- Minkinen, K. et Laine, J. 1998. Effect of forest drainage on the peat bulk density of pine mires in Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 178-186.

- Moilanen, M., Silfverberg, K. et Hokkanen, T.J. 2002. Effects of wood-ash on the tree growth, vegetation and substrate quality of a drained mire: a case study. *Forest Ecology and Management* 171: 321–338.
- Montague, T.G. et Givnish T.J. 1996. Distribution of black spruce versus eastern larch along peatland gradients: relationships to relative stature, growth rate, and shade tolerance. *Canadian Journal of Botany* 74: 1514-1532.
- Morrison, I.K. 1974. Mineral nutrition of conifers with special reference to nutrient status interpretation: a review of literature. Canadian Forest Service publication No. 1343, Departement of the Environment, Ottawa. 74 p.
- Mugasha, A.G., Pluth, D.G. et Macdonald, S.E. 1999. Effects of fertilization on seasonal patterns of foliar mass and nutrients of tamarack and black spruce on undrained and drained minerotrophic peatland sites. *Forest Ecology and Management* 116: 13-31.
- Munson, A.D. et Timmer, V.R. 1995. Soil nitrogen dynamics and nutrition of pine following silvicultural treatments in boreal and Great Lakes-St. Lawrence plantations. *For. Ecol. Manage.* 76: 169-179.
- Munson, A.D., Margolis, H.A. et Brand, D.G. 1993. Intensive silvicultural treatments: impacts on soil fertility and planted conifer response. *Soil Science Society of America Journal.* 57(1): 246-255.
- Nilsson, T. et Lundin, L. 1996. Effects of drainage and wood ash fertilization on water chemistry at a cutover peatland. *Hydrobiologia* 335(1): 3-18.
- Oskarsson, H. et Sigurgeirsson, A. 2001. Fertilization in Icelandic afforestation: evaluation of results. *Scandinavian Journal of Forest Research* 16: 536-540.
- Päivänen, J. et Paavilainen, E. 1996. Forestry on peatlands *Dans Peatlands in Finland. Sous la direction de H. Vasander.* Finnish Peatland Society. Helsinki, Finlande. p. 72-84.
- Paavilainen, E. et Päivänen, J. 1995. *Peatland Forestry, Ecology and Principles.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 248 p.
- Parkinson, J.A. et Allen, S.E. 1975. A wet oxidation procedure suitable for the determination of nitrogen and mineral nutrients in biological material. *Commun. Soil Science and Plant Analysis.* 6(1) : 1-11.
- Pellerin, S. 2003. Des tourbières et des hommes: l'utilisation des tourbières dans la région de Rivière-du-Loup L'Isle-Verte. *Le Naturaliste canadien* 127 (1): 18-23.
- Pellerin, S. et Lavoie, C. 2000. Peatland fragments of southern Quebec: Recent evolution of their vegetation structure. *Canadian Journal of Botany* 78: 255-265.

- Pietiläinen, P., Moilanen, M. et Vesala, H. 2005. Nutrient status and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on drained peatlands after potassium fertilisation. *Suo* 56(3):101-113.
- Piirainen, S. et Domisch T. 2004. Leaching of nutrients and heavy metals from drained peatlands after wood ash fertilization. *Dans* Wise Use of Peatlands. Proceedings of the 12th International Peat Congress, Tampere, Finland, 6 au 11 Juin 2004. Vol. 1. Oral presentations. *Sous la direction de* J. Päivänen. International Peat Society, Jyväskylä, Finlande. p. 491-499.
- Pikk, J., et Valk, U. 1996. Results of afforestation experiments of cut-over peatlands in Estonia. *Dans* Proceedings of the 10th International peat congress. Volume 2. Bremen, Allemagne, 27 mai au 2 juin 1998. *Sous la direction de* W. Lüttig. International Peat Society, Stuttgart, Allemagne. p. 219-224.
- Poulin, M., Rochefort, L., Quinty, F. et Lavoie, C. 2005. Spontaneous revegetation of mined peatlands in eastern Canada. *Canadian Journal of Botany* 83: 539-557.
- Poulin, M., Rochefort, L., Pellerin, S. and Thibault, J. 2004. Threats and protection for peatlands in Eastern Canada. *Geocarrefour* 79: 331-344.
- Price, J. S. 1996. Hydrology and microclimate of 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: 21-32.
- Price, J.S., Heathwaite, A.L. et Baird, A.J. 2003. Hydrological processes in abandoned and restored peatlands: An overview of management approaches. *Wetlands Ecology and Management* 11(1-2): 65-83.
- Quinty, F. et Rochefort, L. 2003. Guide de restauration des tourbières, 2e édition. Canadian Sphagnum Peat Moss Association et New Brunswick Department of Natural Resources and Energy. Québec, Québec. 106 p.
- Rautjärvi, H., Kaunisto, S. et Tolonen, T. 2004. The effect of repeated fertilizations on volume growth and needle nutrient concentrations of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on a drained pine mire. *Suo* 55(2): 21-32.
- Renou, F. et Farrell, E.P. 2005. Reclaiming peatlands for forestry : the Irish experience *Dans* Restoration of boreal and temperate forests. *Sous la direction de* J.A. Stanturf, et P. Madsen. CRC Press, Boca Raton, FL. p. 541-557

- Rochefort, L., Quinty, F., Campeau, S., Johnson, K.W. et Malterer, T.J. 2003. North American approach to the restoration of Sphagnum dominated peatlands. *Wetlands Ecology and Management* 11(1-2): 3-20.
- Rothwell 1991. Substrate environments on drained and undrained peatlands, Wally Creek Experimental Drainage Area, Cochrane, Ontario. *Dans Proceedings. Symposium '89. Peat and peatlands, Diversification and innovation. Volume 1-Peatland forestry. Sous la direction de J.K. Jeglum et R.P. Overend. Québec, Canada, 6 au 10 août 1989. The Canadian Society for Peat and Peatlands.* 103-108.
- Rothwell, R.L., Woodard, P.M. et Rivard, P.G. 1993. The effect of peatland drainage and planting position on the growth of white spruce seedlings. *Northern Journal of Applied Forestry* 10(4): 154-160.
- 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. et Settälä, H. 1992. Plant colonization of bare peat surface – relative importance of seed availability and soil. *Ecography* 15: 199-204.
- Selin, P. 1996. Many uses for peatland cutaway areas. *Dans Peatlands in Finland. Sous la direction de H. Vasander. Finnish Peatland Society. Helsinki, Finlande.* p. 128-129
- Silfverberg, K. et Hartman, M. 1999. Effects of different phosphorus fertilisers on the nutrient status and growth of Scots pine stands on drained peatlands. *Silva Fennica* 33(3): 187–206.
- Sundström, E. 1998. Afforestation of low-productive peatlands in Sweden – a tree species comparison. *Silva Fennica* 32(4): 351–361.
- Sundström, E. 1995. The Impact of climate, drainage and fertilization on the survival and growth of *Pinus Sylvestris* L. in afforestation of open, low-production peatlands. *Scandinavian Journal of Forest Research* 10: 190-203.
- Tilton, D.L. 1977. Seasonal growth and foliar nutrients of *Larix laricina* on three wetland ecosystems. *Canadian Journal of Botany* 55: 1291-1298.
- Timmer, V.R. 1991. Interpretation of seedling analysis and visual symptoms. *Dans Mineral Nutrition of Conifer Seedlings. Sous la direction de R. van den Driesshe. CRC Press, Boca Raton, FL.* p.113-134.
- Timmer, V.R. et Armstrong, G. 1987. Diagnosing nutritional status of containerized tree seedlings: Comparative plant analyses. *Soil Science Society of America Journal* 51: 1082-1086.

- Timmer V.R. et Morrow, L.D. 1984. Predicting fertilizer growth response and nutrient status of jack pine by foliar diagnosis. *Dans* Forest soils and treatment impact. Proceedings of the 6th North American Forest soils conference. *Sous la direction de* E.L. Stone. Department of Forestry, Wildlife and Fisheries, University of Tennessee, Knoxville. p. 335-351.
- Timmer, V.R. et Stone, E.L. 1978. Comparative foliar analysis of young balsam fir fertilized with nitrogen, phosphorous, potassium, and lime. *Soil Science Society of America Journal* 42: 125-130.
- Tyrrell, L.E. et Boerner, R.E.J. 1987. *Larix laricina* and *Picea mariana*: relationships among leaf life-span, foliar nutrient patterns, nutrient conservation, and growth efficiency. *Canadian Journal of Botany* 65: 1570-1577.
- Valk, U. 1986. Estonian cut-over peatlands and their use in forestry. *Dans* Socio-economic impacts of the utilization of peatlands in industry and forestry. Proceedings of the International Peat Society symposium. Oulu, Finlande, 9 au 13 juin 1986. IPS, Jyväskylä, Finlande. p. 265-276.
- Wells, E.D. 1991. Effects of refertilization of an 18-year-old Japanese larch (*Larix leptolepis*) peatland plantation in western Newfoundland, Canada. *Dans* Proceedings. Symposium '89. Peat and peatlands, Diversification and innovation. Volume 1- Peatland forestry. *Sous la direction de* J.K. Jeglum et R.P. Overend. Québec, Canada, 6 au 10 août 1989. The Canadian Society for Peat and Peatlands. P. 129-138.
- Wells, E.D. et Williams, B.L. 1996. Effects of drainage, tilling and PK-fertilization on bulk density, total N, P, K, Ca and Fe and net N-mineralization in two peatland forestry sites in Newfoundland, Canada. *Forest Ecology and Management* 84: 97-108.
- Westman, C.J. 1981. Fertility of surface peat in relation to the site type and potential stand growth. *Acta Forestalia Fennica* 172. 77 p.
- Wind-Mulder, H.L., Rochefort, L. et Vitt, D.H. 1996. Water and peat chemistry comparisons of natural and post-harvested peatlands across Canada and their relevance to peatland restoration. *Ecological Engineering* 7: 161-181.