

## TABLE DES MATIÈRES

<b>Table des matières.....</b>	<b><i>iv</i></b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b><i>vii</i></b>
<b>Liste des Tableaux.....</b>	<b><i>ix</i></b>
<b>Résumé.....</b>	<b><i>xi</i></b>
<b>1 Introduction générale.....</b>	<b><i>xiii</i></b>
<b>2 Chapitre I Régénération naturelle en sapin et tremble : Conséquences des pratiques sylvicoles adaptées en forêt boréale mixte.....</b>	<b><i>1</i></b>
2.1 Résumé.....	1
2.2 Introduction.....	1
2.3 Objectifs.....	4
2.4 Hypothèses.....	4
2.5 Méthodologie.....	4
2.5.1 Site d'étude.....	4
2.5.2 Dispositif expérimental.....	5
2.5.3 Inventaires de la strate arborescente et de la régénération.....	5
2.5.4 Compétitions intra et interspécifiques et mesures de croissance.....	7
2.5.5 Indices de compétition.....	10
2.5.6 Ratio d'étalement.....	10
2.5.7 Indice de défilement.....	11
2.5.8 Analyses statistiques.....	12
2.6 Résultats.....	15
2.6.1 Peuplements originaux et effets de la coupe sur la strate arborescente.....	15
2.6.2 Évolution de la régénération en sapin en fonction des traitements et du temps...	18
2.6.3 Évolution de la régénération en tremble en fonction des traitements et du temps 20	
2.6.4 Évolution des densités relatives de la régénération en fonction des traitements et du temps.....	21

2.6.5	Croissance de la régénération en sapin en fonction des traitements et du temps .	21
2.6.6	Croissance de la régénération en tremble en fonction des traitements et du temps .	22
2.6.7	Effet de la compétition sur la croissance de la régénération en sapin et en tremble	31
<b>2.7</b>	<b>Discussion.....</b>	<b>34</b>
<b>2.8</b>	<b>Conclusion et implications sylvicoles.....</b>	<b>37</b>
<b>3</b>	<b><i>Chapitre 2 établissement et survie initiale de la régénération naturelle: rôle des débris ligneux au sol</i>.....</b>	<b>39</b>
3.1	Résumé .....	39
3.2	Introduction .....	40
3.3	Objectifs .....	42
3.4	Hypothèses .....	42
3.5	Méthodologie .....	43
3.5.1	Peuplements .....	43
3.5.2	Caractéristiques sommaires des peuplements .....	43
3.5.3	Plan d'échantillonnage.....	43
3.5.4	Analyses de laboratoire.....	46
3.5.5	Analyses statistiques.....	46
3.6	Résultats.....	48
3.6.1	Caractéristiques des peuplements .....	48
3.6.2	Caractéristiques des billes.....	48
3.6.3	Caractéristiques des billes qui expliquent la présence de semis .....	49
3.6.4	Différences sol - bille.....	60
3.7	Discussion.....	63
3.7.1	Caractéristiques des débris ligneux grossiers favorisant l'établissement et la survie des semis .....	64
3.7.2	L'établissement des semis.....	64
3.7.3	La survie des semis .....	65
3.7.4	Facteurs expliquant la présence de semis au sol .....	65

3.7.5	Différences sol-bille.....	66
3.7.6	Conclusion et implications sylvicoles.....	67
<b>4</b>	<b><i>Conclusion générale</i>.....</b>	<b>68</b>
<b>5</b>	<b><i>Bibliographie</i> .....</b>	<b>70</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Schéma de l'échantillonnage à l'échelle de la parcelle expérimentale.....	6
Figure 2.2 Schéma de l'échantillonnage des sous placettes de gaules au pourtour des PEP. ..	8
Figure 2.4 Schéma d'une des 4 sous placettes prise au pourtour des PEP. ....	9
Figure 2.5 Répartition diamétrale des 4 traitements l'année après coupe (2001) .....	17
Figure 2.6 Année d'établissement des arbres études. ....	19
Figure 2.7 Densités absolues de la régénération en sapin. ....	27
Figure 2.8 Densités absolues de la régénération en tremble. ....	28
Figure 2.9 Densité relative de la régénération en sapin (nombre de tiges de sapin par rapport au nombre total de tiges en régénération) .....	29
Figure 2.10 Croissance du sapin : .....	30
Figure 3.1 Schéma de l'échantillonnage sur la bille et au sol. ....	45
Figure 3.2 Recouvrement (%) substrat de germination à la surface des billes et épaisseur de mousse (mm).....	52
Figure 3.3 Caractéristiques physico-chimiques des billes échantillonnées en fonction de l'état de décomposition.....	53
Figure 3.4 Densité de semis (nombre par m <sup>2</sup> ) établis en 2007 et semis d'un an observés en 2008 par classe de décomposition.....	54
Figure 3.5 Probabilité d'observer au moins 1 semis de bouleau en 2007 et 2008 en fonction des caractéristiques physico-chimiques des billes, du recouvrement en herbacées et de la surface terrière en feuillus des peuplements. ....	56

Figure 3.6 Probabilité d'observer au moins 1 semis d'épinette en 2007 et 2008 en fonction des caractéristiques physico-chimiques des billes, du recouvrement en herbacées et de la surface terrière en feuillus des peuplements. ....	57
Figure 3.7 Probabilité d'observer au moins 1 semis en 2008 toutes essences et toutes classes d'âge confondues. ....	58
Figure 3.8 Différence entre le nombre de semis au sol et sur la bille par classes de décomposition (1=frais 3=moyennement décomposé et 5=bien décomposé) et par essence de semis. ....	61

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Sélection de modèles pour l'évolution des densités de la régénération et de la croissance en fonction des traitements et du temps .....	13
Tableau 2.2 Sélection de modèles pour l'effet de la compétition sur la croissance de la régénération.....	14
Tableau 2.3 Surface terrière de la strate arborescente ( $\geq 5$ cm DHP) et densité de la régénération des peuplements immédiatement après les traitements de coupe (2001) et en 2008 (écarts types entre parenthèses).....	16
Tableau 2.4 Effets du traitement et du temps depuis l'application des traitements sur la densité de la régénération en sapin pour trois classes de hauteur. Sélection de modèles basée sur le critère d'information d'Akaike.....	23
Tableau 2.5 Effets du traitement et du temps depuis l'application des traitements sur la densité de la régénération en tremble pour trois classes de hauteur. Sélection de modèles basée sur le critère d'information d'Akaike.....	24
Tableau 2.6 Effets du traitement et du temps depuis l'application des traitements sur la densité relative de la régénération en sapin pour trois classes de hauteur. Sélection de modèles basée sur le critère d'information d'Akaike .....	25
Tableau 2.7 Effets du traitement et du temps depuis l'application des traitements sur la croissance du sapin. Sélection de modèles basée sur le critère d'information d'Akaike .....	26
Tableau 2.8 Sélection de modèles pour la croissance du sapin six ans après coupe (2006) ..	32
Tableau 2.9 Sélection de modèles pour la croissance du tremble six ans après coupe (2006) .....	33
Tableau 3.1 Classification du niveau de décomposition des billes (Szewczyk et Szwagrzyk 1996) .....	42

Tableau 3.2 Composition et caractéristiques des peuplements échantillonnés .....	51
Tableau 3.3 Corrélations entre les facteurs physico-chimiques et les caractéristiques de recouvrement des billes.....	55
Tableau 3.4 Effet des différents facteurs sur l'établissement des semis au sol en 2007, toutes essences confondues .....	59
Tableau 3.5 Effet de la classe de décomposition et de l'essence des semis sur la différence de densité en semis au sol et sur la bille .....	62

## RÉSUMÉ

La présente étude a été réalisée dans le cadre du projet SAFE (Sylviculture et aménagement forestier écosystémique), dont l'objectif est de tester différents traitements sylvicoles s'inspirant de la dynamique naturelle des peuplements dans un contexte d'aménagement écosystémique. Les deux volets du présent mémoire touchent la régénération naturelle, un processus clé de l'aménagement forestier durable et visent les processus fins impliqués dans l'établissement et la croissance de la régénération forestière.

Dans un premier chapitre, la réponse en termes de croissance et de densité de la régénération du sapin baumier (*Abies balsamea*) et du peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) à quatre traitements de coupe a été évaluée ainsi que l'impact relatif des compétitions intra- et inter- spécifiques sur la croissance des deux essences. Les quatre traitements étaient : coupe partielle dispersée, coupe partielle par trouées, coupe totale et témoin non coupé. Des inventaires de la régénération ont été effectués un, deux, cinq et huit ans après coupe. Nous avons aussi caractérisé la croissance en diamètre en hauteur des gaules des deux essences pour la période immédiatement avant coupe et les années subséquentes. Dans la moitié des placettes échantillonnées, un sapin situé au milieu de la placette a servi d'arbre d'étude et dans l'autre moitié un peuplier a servi d'arbre d'étude. Un échantillon de coupe transversale à la base du tronc de l'arbre d'étude a été cueilli afin de déterminer l'âge et de mesurer la croissance radiale au collet.

Nos résultats confirment que la densité du tremble augmente avec le degré d'ouverture du couvert, mais diminue avec le temps depuis la coupe, tandis que la densité du sapin continue à augmenter (recrutement) dans tous les traitements. La croissance du sapin répond bien à l'ouverture du couvert. Ces résultats démontrent la possibilité d'influencer la composition des peuplements futurs à l'aide des pratiques sylvicoles adaptées.

Dans un deuxième chapitre, nous avons profité d'une année semencière en 2006 pour comparer l'établissement et la survie des semis d'arbres sur les débris ligneux grossiers (DLG) et sur la couverture morte issue de litière fine. La densité et la survie des semis de l'année suivant la pluie de graine ont été évaluées dans le cadre d'un échantillonnage où chaque bille était appariée à une superficie équivalente sur le sol adjacent à la bille. Un dénombrement des semis plus âgés a aussi été réalisé sur les billes. L'essence, le stade de décomposition, la dureté et la densité du bois, la capacité de rétention d'eau et le ratio C/N des billes ont été caractérisés. Le recouvrement d'herbacées, le recouvrement et l'épaisseur des feuilles et des mousses,



ont été mesurées sur les billes et au sol. Il en ressort que la probabilité qu'un semis s'établisse augmente avec l'humidité du bois et diminue avec la dureté de la surface des billes. La survie des semis diminue au cours de l'année suivant leur établissement dans des peuplements ayant une surface terrière en feuillus plus élevée. Les résultats montrent que les essences produisant de petites semences, soit le bouleau blanc et les épinettes noire et blanche s'établissent préférentiellement sur le bois mort, tandis que le sapin, une espèce qui produit des semences plus grosses, s'établit davantage au sol. Les peuplements surannés de sapin et bouleau blanc offrent de bonnes conditions pour l'établissement de la régénération sur les débris ligneux

Mots clés : Régénération, plasticité du sapin, gradient de lumière, aménagement écosystémique, débris ligneux grossiers, billes nourricières, semis, forêt boréale.

## 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis quelques années, les pressions sociales poussent les gouvernements et l'industrie forestière à faire évoluer le concept de rendement soutenu de la matière ligneuse vers un véritable aménagement durable qui maintiendrait les multiples fonctions et composantes des écosystèmes forestiers. Un des principaux critères de l'aménagement forestier durable est la productivité forestière, d'où l'importance d'assurer une régénération adéquate. Par ailleurs, les préoccupations récréatives et visuelles touchant l'aménagement des paysages forestiers, amènent un engouement pour les pratiques sylvicoles alternatives, telles les coupes partielles, qui maintiennent un couvert forestier et mettent en valeur la régénération naturelle (Kneeshaw *et al.* 1998a). Afin d'évaluer le potentiel de nouvelles approches sylvicoles qui visent à tirer parti de la régénération naturelle, il est important de bien connaître les conditions qui en favorisent l'établissement, la survie et la croissance, et ce, autant en milieu naturel qu'en peuplements aménagés et de bien connaître les différences interspécifiques quant aux adaptations d'établissement, de survie et de croissance en milieux ouverts et fermés (Messier *et al.* 1999a).

Le présent mémoire s'attarde à deux aspects de la dynamique de la régénération naturelle dans la forêt boréale mélangée de l'ouest du Québec. Le premier chapitre aborde la réponse en densité et en croissance des gaules de sapin et des drageons de tremble à l'ouverture du couvert forestier dans un contexte sylvicole. Le deuxième chapitre aborde l'établissement et la survie des semis d'arbre sur les billes de bois mort et cherche à comprendre les conditions qui leurs sont favorables dans des peuplements naturels non aménagés. Les deux études sont conduites dans le cadre du Projet SAFE (Sylviculture et aménagement forestier écosystémique) dont l'objectif principal est de développer des systèmes sylvicoles fidèles à la dynamique naturelle de la forêt boréale mixte qui permettent d'atteindre les objectifs de maintien de la diversité biologique, des processus écologiques et de la productivité des écosystèmes.

## 2 CHAPITRE I RÉGÉNÉRATION NATURELLE EN SAPIN ET TREMBLE : CONSÉQUENCES DES PRATIQUES SYLVICOLES ADAPTÉES EN FORÊT BORÉALE MIXTE

### 2.1 Résumé

Dans le contexte du virage vers l'aménagement forestier écosystémique (AFÉ), la diversification des pratiques sylvicoles constitue une mesure visant à réduire les écarts entre les paysages aménagés et la mosaïque naturelle et à concilier les objectifs de production forestière, de maintien de la biodiversité et d'acceptabilité sociale. Afin de tester une approche d'AFÉ en forêt boréale mélangée, le projet SAFE a été mise en place dans la Forêt d'enseignement et de recherche du lac Duparquet, en Abitibi, entre 1999 et 2002. Dans cette étude, réalisée dans des peuplements boréaux mixtes, la dynamique de la régénération naturelle en termes de densité et de croissance y a été suivie dans un dispositif expérimental de quatre traitements : deux types de coupes partielles (par pied d'arbres et par trouées d'environ 400 m<sup>2</sup>), la coupe totale et un témoin non coupé. Les inventaires de régénération ont été effectués 1, 2, 5 et 8 ans après coupes et l'influence relative de la compétition intraspécifique et interspécifique sur la croissance du tremble et du sapin a été évaluée 6 ans après coupes. Nos résultats confirment que la densité du tremble augmente avec le degré d'ouverture du couvert, mais diminue avec le temps depuis la coupe, tandis que la densité du sapin continue à augmenter (recrutement) dans tous les traitements, mais de façon plus importante dans le témoin et la coupe partielle dispersée. La croissance en hauteur du sapin répond bien à l'ouverture du couvert. Ces résultats démontrent la possibilité d'influencer la composition des peuplements futurs à l'aide des pratiques sylvicoles adaptées.

Mots clés : Aménagement forestier écosystémique, coupes partielles, régénération sapin-tremble

### 2.2 Introduction

Dans la forêt boréale mixte de l'Ouest québécois, suite à une perturbation importante, les feuillus intolérants à l'ombre, tel le peuplier faux tremble (*Populus tremuloides*) et le bouleau à papier (*Betula papyrifera*), ont tendance à coloniser rapidement le milieu. Avec le temps, des essences plus tolérantes à l'ombre en l'occurrence les épinettes noires (*Picea mariana*) et

blanches (*P. glauca*) et le sapin baumier (*Abies balsamea*) remplacent graduellement les espèces pionnières (Bergeron et Harvey 1997, Bergeron 2000). Les trouées résultant d'épidémies d'insectes, de petits chablis ou de la sénescence des arbres amènent graduellement les espèces de fin de succession à occuper une plus grande place au sein du peuplement (Kneeshaw *et al.* 1998). Sur les sites mésiques, les peuplements tendent à passer d'une composition généralement feuillue vers une composition plus mixte, pour finalement évoluer vers des peuplements à dominance résineuse (Kneeshaw et Bergeron 1998).

Dans le contexte d'un aménagement forestier écosystémique (Harvey *et al.* 2002; Brais *et al.* 2004), les coupes partielles constituent un moyen d'émuler des perturbations secondaires caractérisant la dynamique naturelle et, potentiellement, d'accélérer la succession en imitant la mortalité éparse des arbres ou les petits chablis. Les coupes partielles semblent alors présenter plusieurs avantages sur les plans forestier et faunique : maintenir le peuplement en production, protéger la régénération préétablie et fournir un abri pour la faune en maintenant un couvert forestier (Kneeshaw *et al.* 2002). Or, instaurer un aménagement forestier qui tire parti de la régénération naturelle et de sa réponse à l'ouverture partielle du couvert et amener les peuplements vers la composition et la structure désirées, constitue un des défis de l'aménagement écosystémique (Chen 1997).

Le tremble, une espèce intolérante à l'ombre, est doté d'une stratégie de reproduction extrêmement efficace après perturbation. La production de drageons, provoquée par les changements hormonaux induits par l'élimination de la dominance apicale suite à la mort des tiges mères, est favorisée par les perturbations sévères et l'augmentation des températures du sol qui s'en suit (Frey *et al.* 2003). Bien que les relations entre le taux de prélèvement et l'établissement de drageons soient variables d'une région à l'autre, des densités adéquates de tremble en régénération ont été observées suite à des coupes partielles dans le Nord-est canadien (Pothier et Prévost 2002; Brais *et al.* 2004). Les facteurs qui, par la suite, contrôlent la survie et la croissance des drageons incluent les conditions environnementales, les parasites et la compétition intra et inter spécifique (Pothier et Prévost 2002; Frey *et al.* 2003).

À l'opposé, le sapin baumier possède une bonne capacité à s'établir abondamment en sous couvert (Harvey et Bergeron 1989; Côté et Bélanger 1991; Parent et Messier 1995). Il

est très tolérant à l'ombre (Frank 1990) et atteint sa croissance optimale à 25 % de plein soleil (Parent et Messier 1995; Claveau *et al.* 2002). Sous sa forme de cime « parapluie », le sapin peut survivre plus de 60 ans en conditions ombragées tout en maintenant sa capacité à répondre par une croissance en hauteur vigoureuse suite à une ouverture du couvert (Parent et Messier 1995 Messier *et al.* 1999 a, Bourgeois *et al.* 2004).

Les espèces intolérantes et tolérantes ont généralement des biologies différentes. Celles qui sont intolérantes concentrent leurs énergies à une croissance en hauteur pour atteindre le plus rapidement possible la canopée, tandis que les espèces tolérantes investissent davantage dans la croissance latérale des branches pour capturer plus de lumière lorsque cette ressource est limitée (Chen 1997). Cependant, selon Kneeshaw *et al.* (2006), il est possible que cette différence entre les espèces tolérantes et intolérantes disparaisse avec l'augmentation de la taille, les espèces tolérantes perdant de leur plasticité.

Suite à une coupe partielle, la densité, la hauteur et la distribution des arbres résiduels détermineront l'influence du couvert sur l'environnement à l'intérieur du peuplement. La taille, la forme et l'orientation des trouées, de concert avec la hauteur des arbres, ainsi que la latitude, l'exposition et la pente du site influenceront la radiation incidente, la température du sol et les extrêmes de température (Carlson et Groot 1997). À moyen terme, l'évolution de la canopée (expansion, sénescence, chablis) en réponse à la coupe modulera la réponse fonctionnelle de la strate de sous-bois et les trajectoires successionales subséquentes (Messier *et al.* 1999b).

Le tremble et le sapin bénéficieront initialement tous deux d'une ouverture partielle du couvert (Messier *et al.* 1999a). Dans quelle mesure les deux essences peuvent, par la suite, cohabiter dépend de leur tolérance respective aux conditions ambiantes, mais aussi du degré de compétition intra et interspécifique qu'elles sont en mesure de tolérer. La présente étude réalisée dans le cadre du projet SAFE (Sylviculture et aménagement forestier écosystémique) vise 1) à quantifier la réponse (densité et croissance) de la régénération en tremble et en sapin aux coupes partielles et totales et 2) à quantifier la contribution de la compétition intra et inter spécifique entre la régénération du tremble, essentiellement d'origine de drageons et la régénération majoritairement préétablie du sapin à leur croissance respective.

### 2.3 Objectifs

L'objectif général de cette étude est de caractériser la réponse de la régénération naturelle à différents degrés d'ouverture du couvert forestier dans des peuplements mélangés à dominance de tremble et à différents degrés de compétition au cours des huit premières années suivant l'application des traitements de récolte.

**Objectif 1 :** Évaluer l'effet des coupes totales et partielles sur la densité et la composition de la régénération naturelle après coupe.

**Objectif 2 :** Caractériser les patrons de croissance de la régénération en tremble et en sapin en fonction de différents degrés d'ouverture du couvert et en fonction du temps depuis la coupe.

**Objectif 3 :** Évaluer l'effet de la compétition intraspécifique et interspécifique sur la croissance des gaules de sapin et de tremble.

### 2.4 Hypothèses

Nous posons l'hypothèse que la proportion et la densité du tremble dans la strate de régénération ainsi que sa croissance initiale refléteront le degré d'ouverture du couvert suite aux traitements de coupe. L'abondance et la croissance initiale du sapin seront optimales dans les coupes partielles. Avec le temps, la croissance des deux essences diminuera avec une hausse de la compétition intraspécifique et interspécifique.

### 2.5 Méthodologie

#### 2.5.1 Site d'étude

L'aire d'étude est située dans la Forêt d'enseignement et de recherche du lac Duparquet (FERLD), en Abitibi, plus précisément à 45 kilomètres au nord-ouest de Rouyn-Noranda, Québec (48°86'N- 48°32'N, 79°19'W-79°30'W). Cette région fait partie de la forêt boréale mélangée du sous domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'Ouest (Robitaille et Saucier 1996). La température annuelle y est de 0.7 °C et les précipitations de 890 mm. Le nombre moyen de jours sans gel est de 148 (Environnement Canada, 2009). Les

sols argileux proviennent de dépôts glaciolacustres laissés par le lac Ojibway (Vincent et Hardy 1977).

Les peuplements de l'étude, issus d'un feu datant de 1910, sont mélangés et le tremble occupe 80 % de la surface terrière des essences commerciales (tableau 2.1). La régénération naturelle de sapin y était abondante au moment de la coupe.

### 2.5.2 *Dispositif expérimental*

Le dispositif expérimental est constitué de trois blocs. Dans chacun des blocs, les quatre traitements (témoin, coupe partielle dispersée, coupe partielle par troués et coupe totale) ont été attribués aléatoirement avant la coupe à des parcelles expérimentales (PEX) de 2 à 3,5 ha. Les coupes ont été réalisées à l'hiver 2000-2001. Le sol étant recouvert de neige, le sol et la régénération basse furent du moins partiellement protégés lors des opérations de récolte. Le prélèvement dans les deux traitements de coupe partielle était de l'ordre de 40 % de la surface terrière originale (tableau 2.1). Les sentiers dans toutes les coupes partielles étaient orientés est-ouest et d'une largeur d'environ 6 m. Dans la coupe partielle dispersée, tous les arbres ont été récoltés à l'intérieur de sentiers alors qu'un arbre sur trois était coupé dans les bandes d'environ 5 m situées de part et d'autre des sentiers. Dans la coupe par trouées, ces dernières ont été créées en étendant le prélèvement total à environ 8 m de part et d'autre des sentiers sur une longueur de 20 m avant de revenir à une ouverture de 6 m. La distance entre deux trouées le long d'un même sentier était de 20 m. Pour ces deux traitements, une bande de 5 à 6 m non coupée a été laissée entre chaque bande récoltée. La coupe totale a été réalisée avec protection de la régénération et des sols. Les sentiers de débardage étaient larges d'environ 6 m avec une distance de plus ou moins 15 m entre les sentiers (P. Duval, comm. pers.).

### 2.5.3 *Inventaires de la strate arborescente et de la régénération*

Dans chacune des unités expérimentales, cinq placettes-échantillon permanentes (PEP) circulaires de 400 m<sup>2</sup> ont été mises en place avant la coupe sans tenir compte de l'emplacement des sentiers et des trouées (figure 2.1). À l'intérieure de celles-ci, tous les arbres et arbustes dont le diamètre à hauteur de poitrine (DHP, 1,3m) était supérieur à 5 cm ont été numérotés, identifiés à l'espèce et leur DHP mesuré. La même procédure a été reprise à l'intérieure d'une sous-placette (100 m<sup>2</sup>), formant un quadrant de la PEP, pour les arbres et

arbustes dont le DHP est compris entre 2 et 5 cm. Cet inventaire a été effectué avant coupe (2000), immédiatement après coupe (2001), en 2005 et en 2008. Le suivi de la régénération < 2 cm DHP a été effectué par essence et classe de hauteur à l'intérieur de huit quadrats circulaires de 2 m<sup>2</sup> disposés systématiquement à l'intérieur de chaque PEP. Cet inventaire a été effectué avant traitement (2000), et a été repris 1, 2, 5 et 8 ans après la coupe.

### Parcelle expérimentale (PEX)

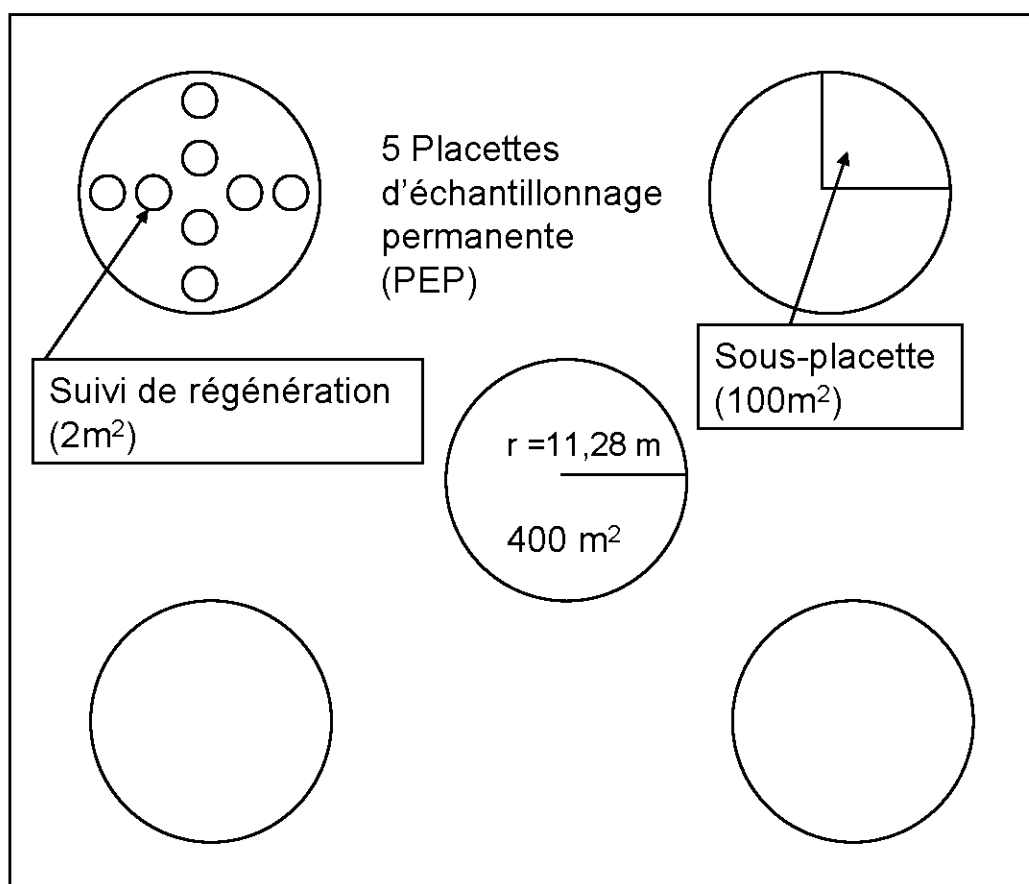


Figure 2.1 Schéma de l'échantillonnage à l'échelle de la parcelle expérimentale.



#### 2.5.4 *Compétitions intra et interspécifiques et mesures de croissance*

Afin de décrire les relations fines entre la compétition intraspécifique et interspécifique et la croissance des gaules, des placettes d'échantillonnage circulaires de 50 m<sup>2</sup> (rayon de 3,99 m) ont été échantillonnées en 2007 au pourtour des placettes de 400 m<sup>2</sup>. Cette dimension de parcelle est considérée optimale pour décrire les relations de compétition des arbres au stade de gaulis (Filipescu et Comeau 2007a). À l'extrémité des rayons nord et est de chaque PEP de 400 m<sup>2</sup> décrite précédemment, le sapin le plus près ayant de 2 à 5 centimètres de DHP a été choisi comme arbre-étude et pour former le centre de la placette d'échantillonnage de 50 m<sup>2</sup>. Au sud et à l'ouest, la procédure a été reprise avec un peuplier. À l'intérieure du rayon de 3,99 m autour des arbres-études, tous les arbres de 2 à 10 cm de DHP ont été dénombrés par essence (figure 2.2). Par la suite, la placette a été divisée en quatre quadrants selon les axes nord-sud et est-ouest. Dans chacune des pointes ainsi formées, nous avons choisi la gaule (2 à 10 cm DHP) la plus proche de l'arbre-étude. L'espèce a été notée et la hauteur, le DHP et sa distance de l'arbre-étude ont été mesurés (figure 2.3).

Finalement, l'arbre-étude a été coupé à la base et mesuré précisément (hauteur et DHP). Dans le cas des sapins, la croissance annuelle en hauteur ainsi que la croissance annuelle d'une des branches (croissance latérale) ont été mesurées pour les années 1998 à 2006 soit deux (2) ans avant les traitements et six (6) ans après. Nous avons prélevé un disque à la base de chaque arbre. Au laboratoire, les disques ont été sablés, le nombre de cernes compté et la largeur des huit (8) derniers cernes mesurée le long de deux (2) rayons représentatifs à l'aide d'un velmex (Bloomfield, NY, USA). Nous avons ainsi obtenu l'âge des arbres-étude ainsi que leur croissance radiale annuelle de 1998 à 2006.

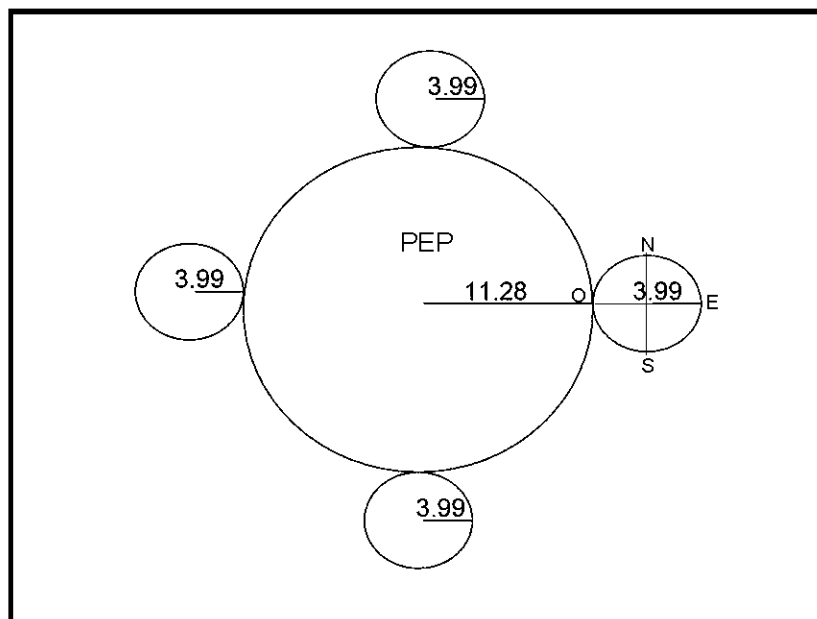


Figure 2.2 Schéma de l'échantillonnage des sous placettes de gaules au pourtour des PEP.

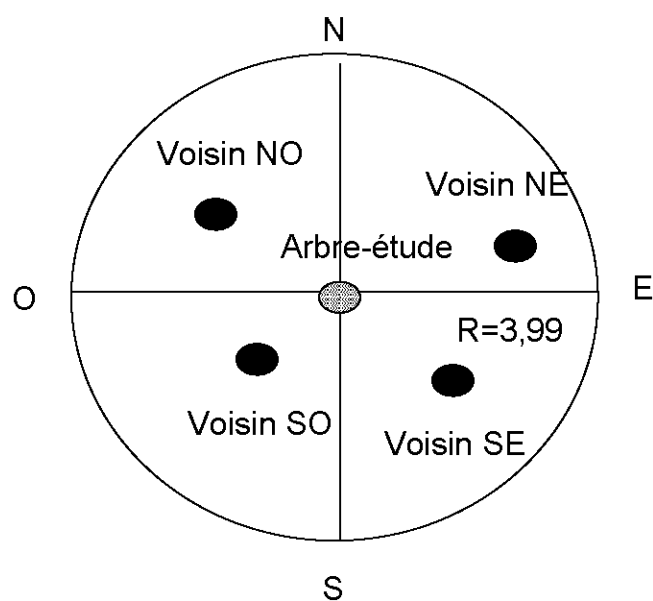


Figure 2.3 Schéma d'une des 4 sous placettes prise au pourtour des PEP.



### 2.5.5 Indices de compétition

La compétition est un processus difficile à mesurer directement et des indices de compétition sont utilisés pour quantifier et interpréter les effets de la compétition (Filipescu et Comeau 2007a,b). Bien que ces indices aient été abondamment utilisés avec succès, leur utilisation reste critiquée. On leur reproche, entre autres, de fournir une description statique du processus de compétition qui s'opère dans des systèmes dynamiques et changeants (Filipescu et Comeau 2007a).

Nous avons utilisé un indice de compétition dépendant de la distance, car ces indices sont plus appropriés dans le cas de peuplements hétérogènes (Prévosto 2005). Nous avons modifié l'indice d'Hegyi (1974) afin de prendre en compte les quatre arbres voisins (Béland *et al.* 2003; Zhao *et al.* 2006; Filipescu et Comeau 2007a,b). L'indice est basé sur le ratio de la taille des compétiteurs pondérée par leur distance à l'arbre-étude, selon la formule suivante :

$$HEGY = \left( \sum_{i=1}^4 \frac{dhp_i}{dhp_c * dist_i} \right) * dens / 4$$

Où  $dhp_c$  = diamètre de l'arbre central;  $dhp_i$  = diamètre du compétiteur  $i$ ;  $dist_i$  = distance entre le compétiteur  $i$  et l'arbre central; et  $dens$  = densité totale.

Un deuxième indice de compétition plus simple a été défini comme la densité absolue soit le nombre de tiges à l'hectare, calculé à partir de la densité à l'intérieur de la placette de 50 m<sup>2</sup>.

### 2.5.6 Ratio d'étalement

Les semis d'essences possédant une forte tolérance à l'ombre ont la capacité de varier la morphologie de leur cime : dans des conditions de forte intensité lumineuse, la cime adoptera une forme plus conique, tandis que dans des conditions ombragées, elle aura plutôt une forme de parapluie (Parent et Messier 1995; Kneeshaw *et al.* 1998a; Duchesneau *et al.* 2001). La forme parapluie se caractérise par une croissance des branches latérales au détriment de la

croissance en hauteur (Logan 1969; Kohyama 1980; Carter et Klinka 1992; Parent et Messier 1995). Cette forme maximise l'interception de lumière, réduit les coûts liés aux structures de soutien soit des tissus non photosynthétiques (Sprugel 1989; Kohyama 1991; Waring 1991; Parent et Messier 1995; Claveau *et al.* 2002), et minimise l'ombre que les branches du haut font sur celles du bas (Kohyama 1991). Le ratio d'étalement fournit un indice approprié pour caractériser la réponse des espèces tolérantes aux conditions de lumière.

Afin de décrire la plasticité du sapin à l'augmentation de lumière, un ratio d'étalement a été calculé à partir de la croissance en hauteur et de la croissance latérale correspondante à chaque année.

$$RE_t = H_t/L_t$$

Où  $H_t$  correspond à la croissance en hauteur absolue (flèche terminale) de l'année  $t$  et  $L_t$  à la croissance latérale absolue (branche latérale) de l'année  $t$ .

Ce ratio est utile pour caractériser la vigueur de la régénération préétablie et tend à refléter la disponibilité de la lumière puisque le sapin favorise généralement sa croissance en hauteur lorsque la lumière augmente. Le ratio est donc un bon indicateur des conditions récentes de croissance et est facilement mesurable sur le terrain (Ruel *et al.* 2000).

#### 2.5.7 Indice de défilement

Un indice de défilement du sapin a été calculé en fonction du rapport de la hauteur sur le diamètre au collet pour les années 1999 à 2006. Un indice de défilement a été calculé pour le tremble seulement pour 2006 à l'aide des mesures de hauteur et de diamètre au collet de cette année.

$$ID_t = H_{tot}/DC_{tot}$$

Où  $H_{tot}$  correspond à la hauteur totale à l'année  $t$  et  $DC_{tot}$  au diamètre au collet total à l'année  $t$ .

### 2.5.8 Analyses statistiques

Afin de caractériser l'évolution des densités en sapin, en tremble, des densités relatives et la croissance dans le temps selon les différents traitements et en fonction du temps écoulé depuis l'application des traitements, des modèles linéaires généralisés mixtes ont été développés (tableau 2.2) à l'aide de la procédure MIXED de SAS (Littell et al. 2006). Les facteurs fixes considérés sont les traitements et le temps depuis l'application des traitements. La relation linéaire et quadratique entre le temps et les variables expliquées ainsi que l'interaction entre le temps et les traitements ont été testés. Les facteurs aléatoires retenus étaient le bloc, la parcelle expérimentale et la placette d'échantillonnage, ces dernières étant imbriquées dans la parcelle expérimentale et les parcelles expérimentales imbriquées dans le bloc. Afin de traiter les mesures de densité comme mesures répétées dans le temps à intervalles de temps égaux, nous avons retenu les densités observées en 2002, 2005 et 2008, et la structure de la matrice de variance-covariance retenue est la AR(1) (Littell *et al.* 2006). Dans le cas des densités en gaules, les données ont été récoltées en 2001 et non en 2002. Comme les densités à ce stade ne varient pas beaucoup en 1 an, la même structure de matrice de variance-covariance a été retenue. Pour les mesures de croissance, les mesures annuelles entre 2002 et 2006 ont été incluses dans l'analyse.

Pour certaines des variables expliquées, un des termes d'erreur (facteur aléatoire) a dû être enlevé afin de remédier au problème de variance nulle. La normalité de la distribution des résidus des modèles globaux a été vérifiée visuellement.

La sélection du modèle le plus probable parmi les cinq modèles (tableau 2.1) repose sur le critère d'information d'Akaike (AIC) et sur le poids d'Akaike, une mesure de la probabilité du modèle d'être le plus plausible parmi les modèles testés (Mazerolle 2006). Pour chaque variable expliquée, le modèle retenu était celui présentant le poids d'Akaike le plus élevé. Le rapport d'évidence a été calculé pour le modèle le plus probable à partir du poids d'Akaike du meilleur modèle sur le poids d'Akaike du deuxième meilleur modèle. Ce rapport permet de dire par quel facteur le meilleur modèle est plus probable que le deuxième modèle le plus probable. L'ajustement du modèle a été estimé à partir du coefficient de corrélation ( $R^2$ ) entre les valeurs observées et des valeurs prédites par le modèle le plus probable. Il montre

comment les valeurs prédites par le modèle le plus probable se rapprochent des valeurs réelles.

*Tableau 2.1 Sélection de modèles pour l'évolution des densités de la régénération et de la croissance en fonction des traitements et du temps*

Modèles	Interprétation
a= an traitement an*traitement	Relation linéaire dans le temps différente selon le traitement
b= an an2 traitement an <sup>2</sup> *traitement	Relation quadratique dans le temps différente selon le traitement
c= an an <sup>2</sup> traitement	Relation quadratique dans le temps semblable pour tous les traitements
d= an traitement	Relation linéaire dans le temps semblable selon le traitement
e= an an <sup>2</sup>	Effet temps sans effet traitement

*Tableau 2.2 Sélection de modèles pour l'effet de la compétition sur la croissance de la régénération*

Modèles	Interprétation
a= DEN_G_SAB, DEN_G_PET, IND_H, SURF_F, SURF_R	Global
b= DEN_G_SAB, SURF_F, SURF_R	Compétition avec le sapin
c= DEN_G_PET, SURF_F, SURF_R	Compétition avec le tremble
d= IND_H, SURF_F, SURF_R	Indice de compétition
e= SURF_F, SURF_R	Surfaces terrière
(DEN_G_SAB : densité en gaules de sapin, DEN_G_PET : densité en gaules de tremble, IND_H : indice de défilement de Hegyi, SURF_F : surface terrière en feuillus, SURF_R : surface terrière en résineux)	



Les mesures de croissance six (6) ans après coupe (en 2006) ont aussi été analysées à l'aide de modèles linéaires généralisés mixtes afin de déterminer le poids de la compétition intra et interspécifique sur la croissance absolue du sapin et du tremble. Outre les indices de compétition basés sur l'échantillonnage des placettes de 50 m<sup>2</sup>, la surface terrière (2005) de la strate du couvert et les densités en gaules ont aussi été incluses dans les modèles comme variables explicatives. Cinq (5) modèles ont été utilisés (tableau 2.2). Le modèle global (a), comprend tous les facteurs soit : les densités en gaules de sapin (DEN\_G\_SAB) et de tremble (DEN\_G\_PET) mesurées dans les parcelles de 50 m<sup>2</sup> durant l'été 2007 (tiges de 2 à 10 cm de DHP), la densité en sapin et en tremble mesurée dans les quadrants nord-est (100 m<sup>2</sup>) des parcelles échantillons permanentes en 2005 (tiges de 2 à 5 cm de DHP), l'indice de compétition (IND\_H) calculé à partir des 4 voisins ainsi que les surfaces terrières en feuillus (SUF\_F) et en résineux (SUR\_R). Les quatre modèles sous-jacents découlent du modèle global et sont définis au tableau 2.2. La surface terrière des tiges résineuses et feuillues > 5 cm DHP est incluse dans tous les modèles. Il s'agit d'une mesure de l'ouverture du couvert arborescent suite à la coupe. La comparaison du poids d'Akaike entre les quatre premiers modèles et le dernier qui n'inclut que les surfaces terrières, permet d'estimer si l'ajout de l'ouverture du couvert au modèle explicatif rend ce dernier plus probable.

## 2.6 Résultats

### 2.6.1 Peuplements originaux et effets de la coupe sur la strate arborescente

La strate arborescente des peuplements originaux était composée à 80 % de tremble. La composante résineuse était essentiellement dominée par l'épinette blanche et, de manière générale, les tiges résineuses étaient plus abondantes dans les plus petites classes de diamètres (Figure 2.4a). Les coupes partielles ont réduit la surface terrière de 42 à 54 % alors que la surface terrière résiduelle dans les coupes totales était de 1 %. Les coupes par trouées présentaient des surface terrières en feuillus légèrement inférieures à celles des coupes dispersées.

La répartition diamétrale des arbres résiduels suite à la coupe partielle dispersée (figure 2.4 b) reflète un prélèvement uniforme selon les diamètres. Dans tous les traitements, la

surface terrière en feuillus diminue légèrement de 2001 à 2008, tandis qu'on observe une augmentation de surface terrière en résineux (tableau 2.3).

*Tableau 2.3 Surface terrière de la strate arborescente ( $\geq 5$  cm DHP) et densité de la régénération des peuplements immédiatement après les traitements de coupe (2001) et en 2008 (écarts types entre parenthèses)*

Traitement	Témoin		CP dispersée		CP trouées		CT	
Année	2001	2008	2001	2008	2001	2008	2001	2008
<i>Surface terrière (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>)</i>								
Résineux	7.4 (2.5)	8.9 (1.2)	3.7 (1.1)	4.7 (1.0)	3.3 (2.4)	3.7 (1.7)	0.3 (0.2)	1.8 (1.0)
Feuillus	32.3 (2.2)	27.9 (3.2)	19.3 (1.2)	14.8 (1.0)	15.0 (0.5)	11.2 (2.6)	0.3 (0.2)	0.0 (0.0)
<i>Densité de régénération</i>								
<i>Tiges moins de 1 m en hauteur (tiges 2 m-2)</i>								
Résineux	3.9 (3.4)	5.6 (1.1)	2.1 (1.5)	6.2 (3.1)	2.2 (2.3)	3.1 (1.5)	1.5 (0.4)	2.1 (0.9)
Feuillus	0.4 (0.1)	0.1 (0.1)	4.9 (2.4)	0.2 (0.1)	7.6 (3.0)	0.3 (0.1)	10.3 (1.5)	0.2 (0.1)
<i>Tiges plus de 1 m et moins de 2 cm de DHP (tiges 2 m<sup>-2</sup>)</i>								
Résineux	1.2 (0.4)	0.9 (0.6)	0.6 (0.4)	0.9 (0.5)	0.3 (0.2)	0.9 (0.5)	0.2 (0.1)	1.0 (0.3)
Feuillus	0.0 (0.0)	0.1 (0.1)	0.9 (0.6)	1.0 (0.6)	1.1 (1.1)	1.5 (0.7)	3.7 (1.3)	2.3 (0.8)
<i>Tiges 2 à 5 cm de DHP (tiges 100 m-2)</i>								
Résineux	10.2 (5.2)	22.6 (4.5)	4.0 (4.5)	21.3 (8.3)	2.7 (3.0)	15.6 (6.4)	2.3 (2.3)	19.9 (7.1)
Feuillus	0.1 (0.1)	0.5 (0.6)	0.0 (0.0)	18.5 (8.0)	0.0 (0.0)	24.3 (8.1)	0.0 (0.0)	30.2 (2.2)

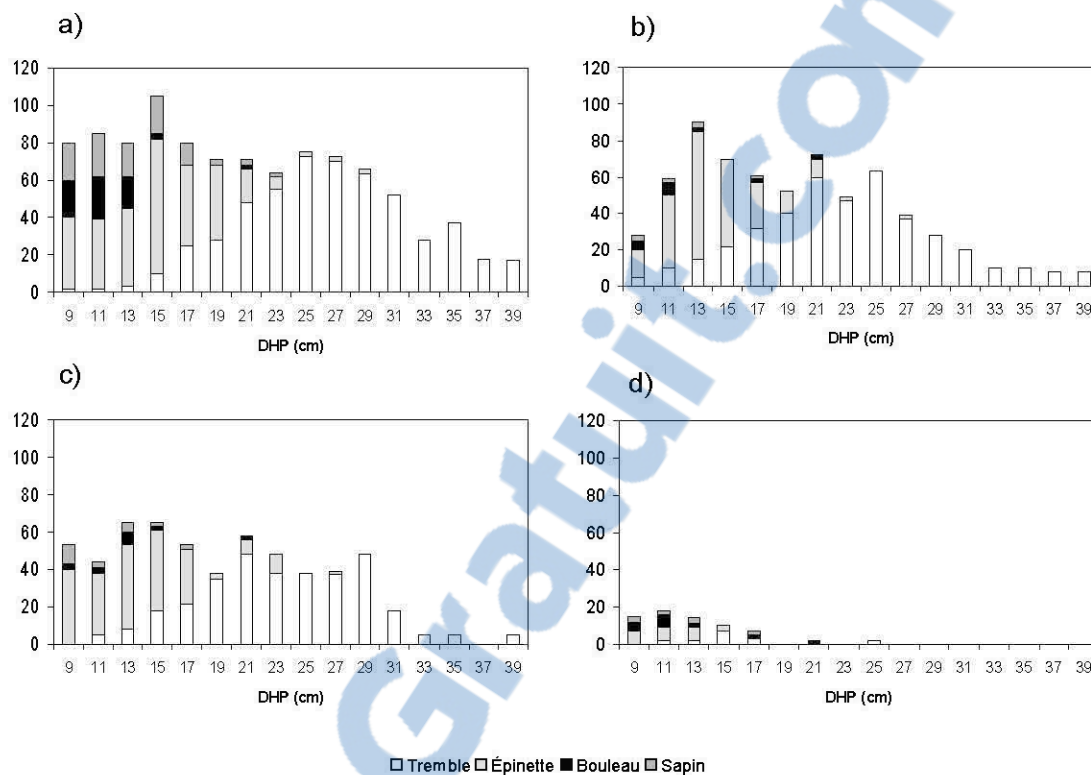


Figure 2.4 Répartition diamétrale des 4 traitements l'année après coupe (2001) : a) témoin b) coupe partielle dispersée c) coupe partielle par trouées d) coupe totale.

### *2.6.2 Évolution de la régénération en sapin en fonction des traitements et du temps*

La régénération en sapin préalablement à la coupe atteignait, en moyenne, 22 765, 7 167 et 1 021 tiges ha<sup>-1</sup> pour la régénération basse (< 1m), intermédiaire (> 1 m et < 2 cm de DHP) et en gaules respectivement. La majeure partie de la régénération en sapin s'était établie entre 1965 et 1985 (figure 2.5). La régénération en épinette était beaucoup moins abondante alors que celle en tremble était, à quelques exceptions, inexistante avant l'application des traitements.

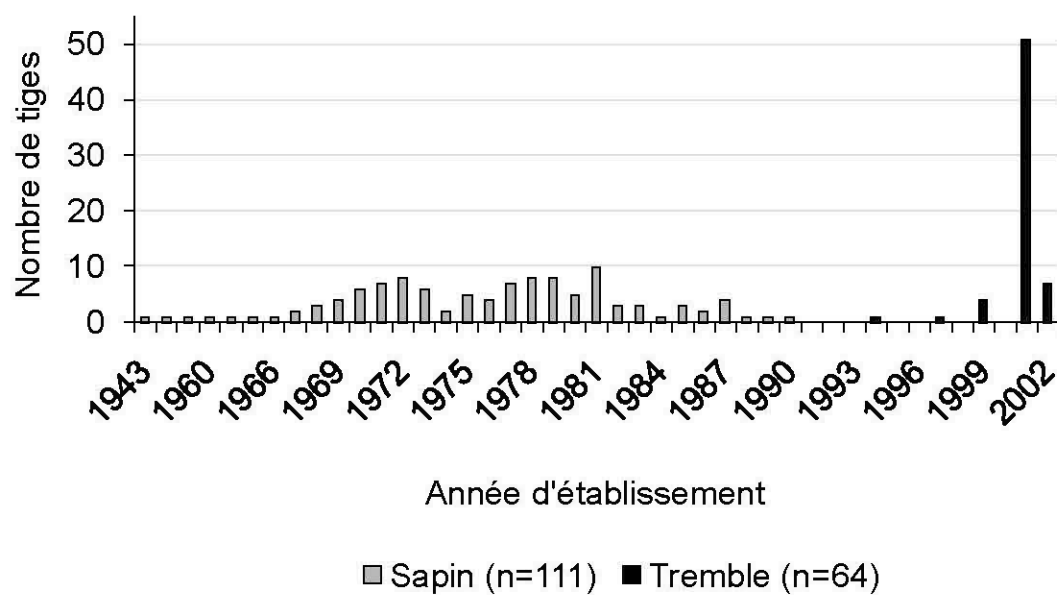


Figure 2.5 Année d'établissement des arbres études.



L'évolution de la régénération en sapin en fonction des traitements et du temps depuis leur application montre des patrons de réponse différents pour chacune des classes de hauteur inventoriées (Figure 2.6a, tableau 2.4). La coupe n'affecte pas directement la régénération basse. Dans les années suivant la coupe, la densité augmente linéairement avec le temps à un rythme comparable dans les témoins et les coupes partielles dispersées. Les densités dans les coupes totales et les coupes partielles par trouées demeurent stables. Huit ans après la coupe, elles sont toujours plus faibles que pour les deux autres traitements. Dans la classe de hauteur intermédiaire (plus de 1 m et de moins de 2 cm de DHP) la coupe a eu comme effet immédiat de réduire d'en moyenne 4 700 tiges  $\text{ha}^{-1}$  (figure 2.6 b, tableau 2.3) dans tous les traitements. Au cours des années suivant la coupe, les densités augmentent linéairement avec le temps et à un rythme comparable pour tous les traitements de coupe alors qu'elles diminuent linéairement dans les témoins, pour faire en sorte que huit ans après la coupe, les densités soient comparables dans tous les traitements. Pour ce qui est du stade gaule (de 2 à 5 cm de DHP), le meilleur modèle illustre une relation linéaire sans interaction (tableau 2.4), le recrutement au stade gaule augmente de façon similaire et linéaire avec le temps dans tous les traitements (figure 2.6 c). Par contre, les témoins conservent toujours des densités en gaules plus élevées que la coupe totale et que la coupe partielle par trouées (1 021, 2 167 et 2 260 tiges  $\text{ha}^{-1}$  pour 2001, 5 et 8 respectivement.).

### 2.6.3 *Évolution de la régénération en tremble en fonction des traitements et du temps*

La régénération en tremble demeure minimale dans les témoins sur l'ensemble de la période de l'étude. En 2002, les densités observées (figure 2.7), toutes classes de hauteur confondues, dans les coupes totales s'élèvent à 62 000 tiges  $\text{ha}^{-1}$ . Pour la régénération basse (1 m et moins), on observe une forte diminution de la densité avec le temps qui suit une relation quadratique (figure 2.7 a et tableau 2.5). Huit ans après coupes, les densités de la régénération basse sont minimales dans tous les traitements. Pour la classe intermédiaire, dès 2002, les densités sont nettement supérieures dans les coupes totales que dans les coupes partielles. On observe une diminution linéaire dans la coupe totale, tandis que les densités restent plutôt stables dans les autres traitements (figure 2.7 b et tableau 2.5) et huit ans après coupe, les densités sont comparables dans l'ensemble des traitements de coupe. Les densités des gaules de tremble augmentent de façon quadratique avec le temps dans les trois coupes

(figure 2.7c et tableau 2.5) et huit ans après coupe, les valeurs moyennes observées s'élèvent respectivement à 2640, 1795 et 1067 tiges ha<sup>-1</sup> dans les coupes totales, par trouées et dispersées respectivement.

#### *2.6.4 Évolution des densités relatives de la régénération en fonction des traitements et du temps*

Les densités relatives en sapin ont été calculées à partir des densités absolues en sapin sur la somme des densités absolues en sapin et en tremble. Pour la régénération basse, la proportion de sapin 2 ans après coupe est plus faible dans les coupes (entre 25 et 46 %), mais augmente de façon quadratique avec le temps (figure 2.8a et tableau 2.6). Huit ans après coupe, le sapin représente entre 80 et 100 % de la régénération basse dans l'ensemble des traitements. Pour la classe intermédiaire, la proportion en sapin reste plus faible que le tremble dans tous les traitements de coupe (figure 2.8b et tableau 2.6) alors que la densité relative de sapin au stade gaule diminue rapidement et linéairement avec le temps dans les coupes (figure 2.8c et tableau 2.6) et atteint entre 40 et 60 % huit ans après coupe comparativement à 95 % dans les témoins.

#### *2.6.5 Croissance de la régénération en sapin en fonction des traitements et du temps*

Les gaules de sapin échantillonnées mesuraient entre 2 et 6 m de hauteur et entre 2 et 5 cm de DHP. Dans les témoins, la croissance radiale du sapin diminue faiblement et progressivement avec le temps (figure 2.9a et tableau 2.7), elle demeure relativement stable dans les coupes dispersées alors qu'elle augmente linéairement avec le temps dans les coupes totales et par trouées.

La croissance en hauteur augmente avec le temps depuis la coupe de façon similaire pour les coupes totale et partielle par trouées. L'augmentation est moindre dans la coupe partielle dispersée et plafonne dans les témoins (figure 2.9 b et tableau 2.7). Les gaules mesurées dans les coupes présentaient une hauteur initiale moindre que celles des témoins. L'évolution de la hauteur totale des sapins montre un accroissement plus élevé pour les coupes totales et par trouées, moindre pour la coupe dispersée et encore plus faible pour le témoin (figure 2.9 c et tableau 2.7) pour et six ans après la coupe, les hauteurs sont comparables dans l'ensemble des traitements. L'indice de défilement est plus élevé dans les

témoins que dans les trois autres traitements et plus faible dans la coupe totale. Au cours de la période de suivi, l'indice de défilement augmente plus rapidement dans les coupes partielles que dans la coupe totale et le témoin est le traitement où l'indice de défilement augmente le moins (figure 2.9 d et tableau 2.7). Le ratio d'étalement augmente dans le temps de façon similaire dans toutes les coupes et tend vers une asymptote six ans après la coupe alors qu'il semble diminuer légèrement dans le témoin à partir de la cinquième année après coupe (figure 2.9 e et tableau 2.7).

#### *2.6.6 Croissance de la régénération en tremble en fonction des traitements et du temps*

Pour ce qui est de la croissance radiale du tremble et de sa hauteur totale, la sélection de modèles ne fonctionnait pas en raison d'une variance trop faible. En effet, la croissance radiale du tremble est constante dans le temps et similaire d'un traitement à l'autre. Six ans après coupe, les gaules mesuraient en moyenne 3 cm au DHP et atteignaient une hauteur de 4 m.



Tableau 2.4 Effets du traitement et du temps depuis l'application des traitements sur la densité de la régénération en sapin pour trois classes de hauteur. Sélection de modèles basée sur le critère d'information d'Akaike

Modèles	K	Delta AIC	Poids d'Akaike	Rapport d'évidence
<i>moins de 1 m</i>				
a= an traitement an*traitement	11	0.00	0.7227	4.3
b= an an <sup>2</sup> traitement an <sup>2</sup> *traitement	12	2.90	0.1695	
c= an an <sup>2</sup> traitement	9	7.50	0.0170	
d= an traitement	8	5.80	0.0398	
e= an an <sup>2</sup>	6	5.30	0.0511	
<i>plus de 1 m et de moins de 2 cm de DHP</i>				
a= an traitement an*traitement	11	0.00	0.9914	115.6
b= an an <sup>2</sup> traitement an <sup>2</sup> *traitement	12	9.50	0.0086	
c= an an <sup>2</sup> traitement	9	32.10	0.0000	
d= an traitement	8	31.40	0.0000	
e= an an <sup>2</sup>	6	29.70	0.0000	
<i>gaules de sapin</i>				
a= an traitement an*traitement	11	3.80	0.0877	3.2
b= an an <sup>2</sup> traitement an <sup>2</sup> *traitement	12	4.30	0.0683	
c= an an <sup>2</sup> traitement	9	2.30	0.1857	
d= an traitement	8	0.00	0.5865	
e= an an <sup>2</sup>	6	4.20	0.0718	

*Tableau 2.5 Effets du traitement et du temps depuis l'application des traitements sur la densité de la régénération en tremble pour trois classes de hauteur. Sélection de modèles basée sur le critère d'information d'Akaike*

Modèles	K	Delta AIC	Poids d'Akaike	Rapport d'évidence
<i>moins de 1 m</i>				
a= an traitement an*traitement	11	18.40	0.0001	9897.1
b= an an <sup>2</sup> traitement an <sup>2</sup> *traitement	12	0.00	0.9999	
c= an an <sup>2</sup> traitement	9	66.60	0.0000	
d= an traitement	8	90.60	0.0000	
e= an an <sup>2</sup>	6	104.70	0.0000	
<i>moins de 2 cm de DHP</i>				
a= an traitement an*traitement	11	0.00	1.000	1.3E+115
b= an an <sup>2</sup> traitement an <sup>2</sup> *traitement	12	530.10	0.000	
c= an an <sup>2</sup> traitement	9	547.00	0.000	
d= an traitement	8	546.80	0.000	
e= an an <sup>2</sup>	6	557.40	0.000	
<i>gaules de tremble</i>				
a= an traitement an*traitement	11	2.60	0.1175	1.1
b= an an <sup>2</sup> traitement an <sup>2</sup> *traitement	12	5.30	0.0305	
c= an an <sup>2</sup> traitement	9	0.00	0.4313	
d= an traitement	8	0.20	0.3902	
e= an an <sup>2</sup>	6	5.30	0.0305	

Tableau 2.6 Effets du traitement et du temps depuis l'application des traitements sur la densité relative de la régénération en sapin pour trois classes de hauteur. Sélection de modèles basée sur le critère d'information d'Akaike

Modèles	K	Delta AIC	Poids d'Akaike	Rapport d'évidence
<i>moins de 1 m</i>				
a= an traitement an*traitement	11	23.40	0.0000	120571.7
b= an an <sup>2</sup> traitement an <sup>2</sup> *traitement	12	0.00	1.0000	
c= an an <sup>2</sup> traitement	9	42.50	0.0000	
d= an traitement	8	66.00	0.0000	
e= an an <sup>2</sup>	6	49.60	0.0000	
<i>de plus de 1 m et moins de 2 cm de DHP</i>				
a= an traitement an*traitement	11	0.00	0.8279	5.8
b= an an <sup>2</sup> traitement an <sup>2</sup> *traitement	12	3.50	0.1439	
c= an an <sup>2</sup> traitement	9	9.10	0.0087	
d= an traitement	8	7.50	0.0195	
e= an an <sup>2</sup>	6	22.30	0.0000	
<i>gaules de sapin</i>				
a= an traitement an*traitement	11	0.00	0.8909	8.2
b= an an <sup>2</sup> traitement an <sup>2</sup> *traitement	12	4.20	0.1091	
c= an an <sup>2</sup> traitement	9	20.80	0.0000	
d= an traitement	8	22.60	0.0000	
e= an an <sup>2</sup>	6	38.50	0.0000	

Tableau2.7 Effets du traitement et du temps depuis l'application des traitements sur la croissance du sapin. Sélection de modèles basée sur le critère d'information d'Akaike

Modèles	K	Delta AIC	Poids d'Akaike	Rapport d'évidence
<i>croissance radiale du sapin</i>				
a= an traitement an*traitement	11	0.00	1.0000	29732.6
b= an an <sup>2</sup> traitement an <sup>2</sup> *traitement	12	20.60	0.0000	
c= an an <sup>2</sup> traitement	9	45.30	0.0000	
d= an traitement	8	43.90	0.0000	
e= an an <sup>2</sup>	6	63.90	0.0000	
<i>croissance en hauteur du sapin</i>				
a= an traitement an*traitement	11	13.40	0.0012	812.4
b= an an <sup>2</sup> traitement an <sup>2</sup> *traitement	12	0.00	0.9988	
c= an an <sup>2</sup> traitement	9	43.60	0.0000	
d= an traitement	8	57.70	0.0000	
e= an an <sup>2</sup>	6	48.30	0.0000	
<i>hauteur totale du sapin</i>				
a= an traitement an*traitement	11	182.00	0.0000	1.4E+20
b= an an <sup>2</sup> traitement an <sup>2</sup> *traitement	12	0.00	1.0000	
c= an an <sup>2</sup> traitement	9	92.80	0.0000	
d= an traitement	8	215.70	0.0000	
e= an an <sup>2</sup>	6	92.80	0.0000	
<i>indice de défilement du sapin</i>				
a= an traitement an*traitement	11	40.50	0.0000	53757836.0
b= an an <sup>2</sup> traitement an <sup>2</sup> *traitement	12	0.00	1.0000	
c= an an <sup>2</sup> traitement	9	35.60	0.0000	
d= an traitement	8	66.30	0.0000	
e= an an <sup>2</sup>	6	42.50	0.0000	
<i>ratio d'étalement du sapin</i>				
a= an traitement an*traitement	11	14.40	0.0006	5.0
b= an an <sup>2</sup> traitement an <sup>2</sup> *traitement	12	0.00	0.8055	
c= an an <sup>2</sup> traitement	9	6.50	0.0312	
d= an traitement	8	21.70	0.0000	
e= an an <sup>2</sup>	6	3.20	0.1626	

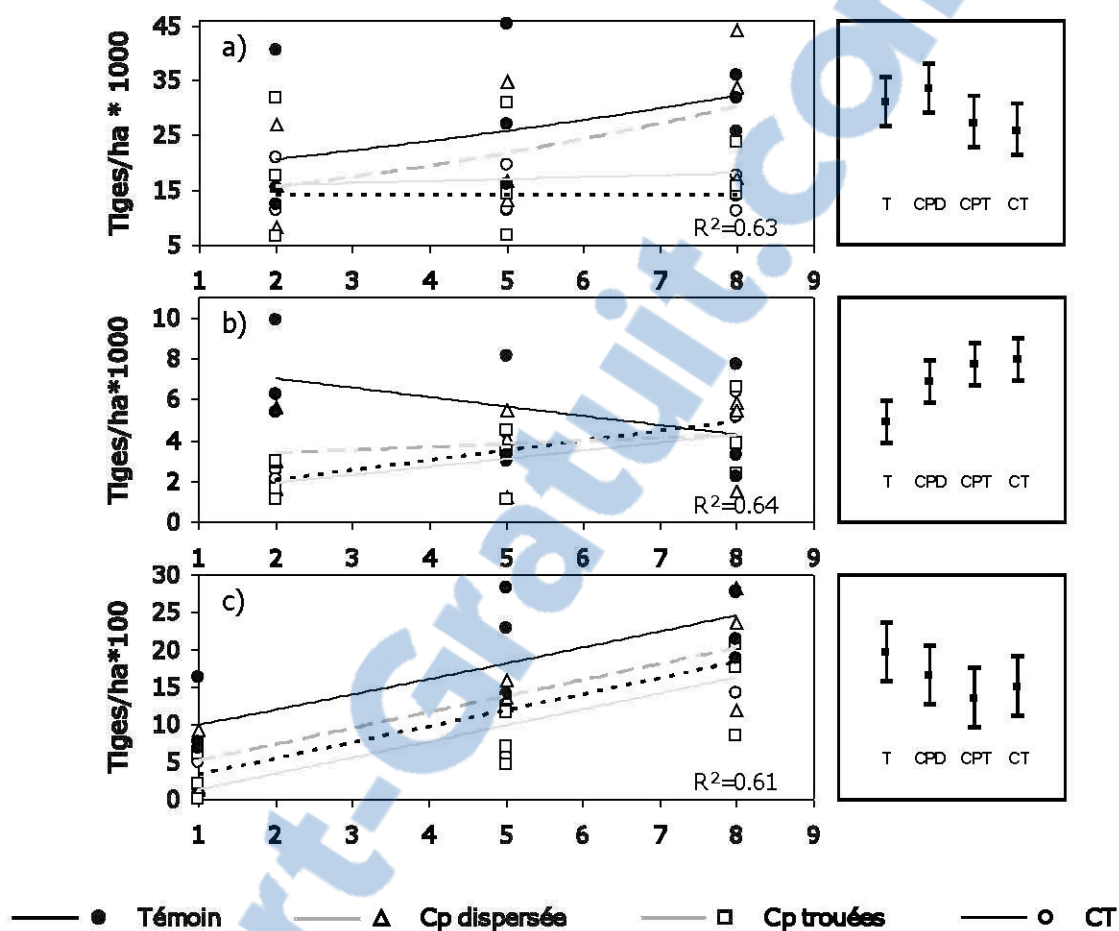


Figure 2.6 Densités absolues de la régénération en sapin a) 0 à 1 m b) plus de 1 m et moins de 2 cm de DHP c) gaule, 2 à 5 cm de DHP. Les formes géométriques (●△□○) illustrent les valeurs réelles, soit les moyennes par traitement pour chacun des blocs (n = 3). Les petites figures de droite représentent les intervalles de confiance du paramètre de la relation linéaire entre la variable expliquée et le temps (a, b) ou de l'ordonnée à l'origine (c) pour chacun des traitements.

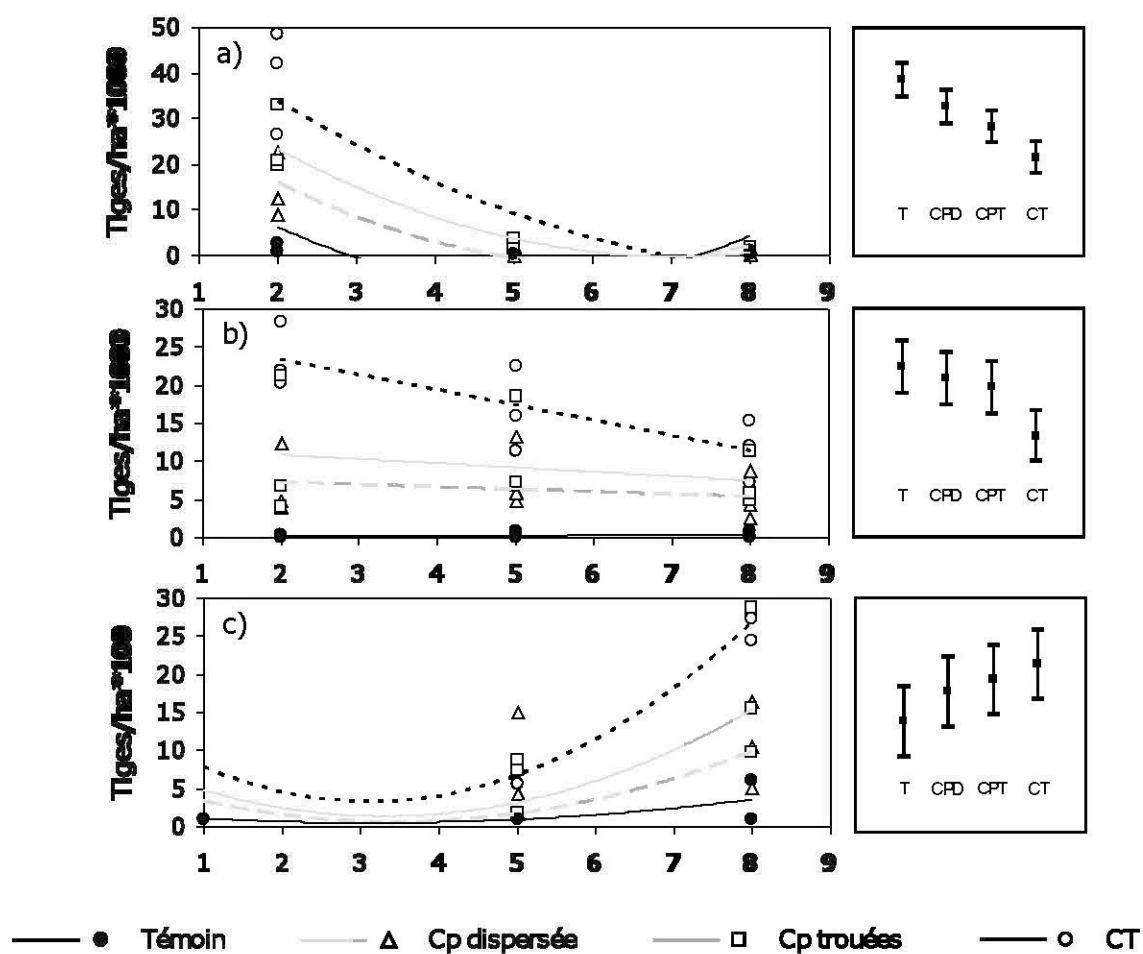


Figure 2.7 Densités absolues de la régénération en tremble a) 0 à 1 m b) plus de 1 m et moins de 2 cm de DHP c) gaules, 2 à 5 cm de DHP. Les petites figures de droite représentent les intervalles de confiance du paramètre de la relation quadratique (a), linéaire (b) entre la variable expliquée et le temps ou de l'ordonnée à l'origine (c) pour chacun des traitements.

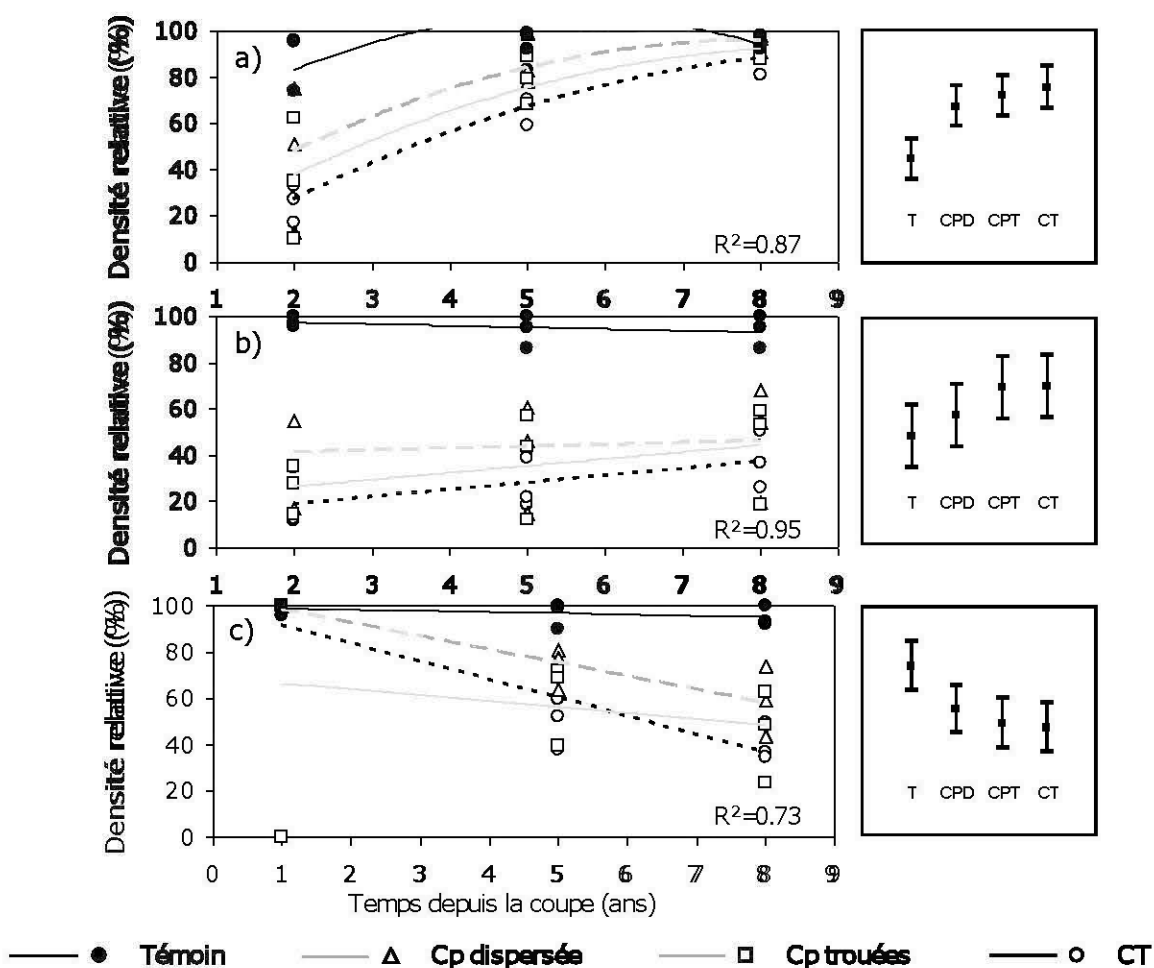


Figure 2.8 Densité relative de la régénération en sapin (nombre de tiges de sapin par rapport au nombre total de tiges en régénération) a) 0 à 1 m b) plus de 1 m et moins de 2 cm de DHP c) gaule, 2 à 5 cm de DHP. Les petites figures de droite représentent les intervalles de confiance du paramètre de la relation quadratique (a) ou linéaire (b et c) entre la variable expliquée et le temps pour chacun des traitements.



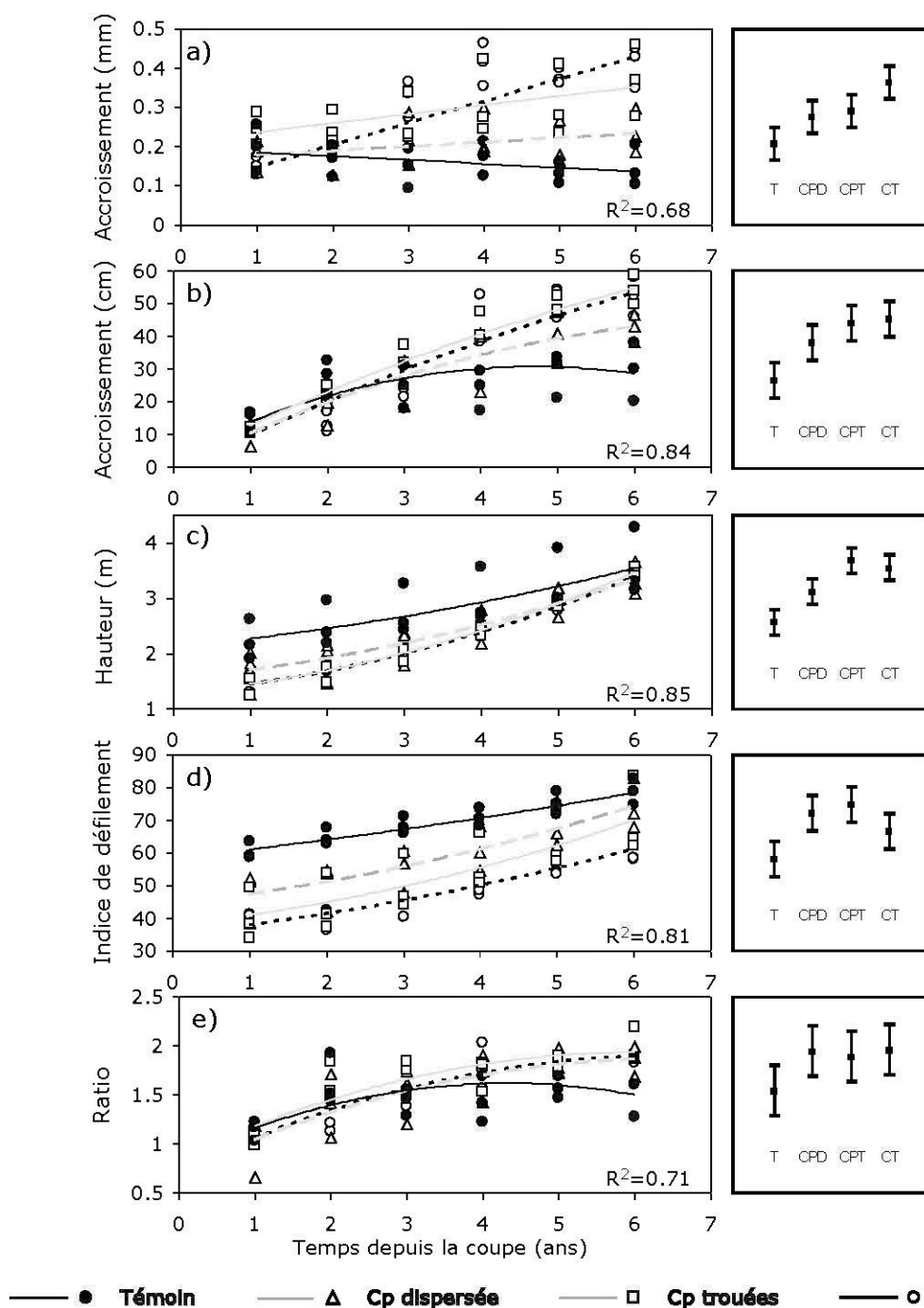


Figure 2.9 Croissance du sapin : a) accroissement en diamètre b) Croissance en hauteur c) hauteur totale d) indice de défilement e) ratio d'étalement. Les petites figures de droite représentent les intervalles de confiance du paramètre de la relation linéaire (a) ou quadratique (b, c, d et e) entre la variable expliquée et le temps et ce pour chacun des traitements.



### 2.6.7 *Effet de la compétition sur la croissance de la régénération en sapin et en tremble*

Six ans après coupe, la croissance radiale du sapin est affectée de façon plus importante par la compétition intraspécifique (tableau 2.8). En effet, le modèle b est 2.2 fois plus probable que le deuxième modèle plus probable, soit le modèle basé sur l'indice de compétition qui ne fait pas la différence entre les tiges de tremble et du sapin. Le modèle b inclut aussi les surfaces terrières, mais il est 14.8 fois plus probable que le modèle avec seulement les surfaces terrières et 14 fois plus probable que le modèle global.

Pour la croissance en hauteur, le modèle basé uniquement sur les surfaces terrières est légèrement supérieur aux deux modèles qui incluent l'indice de compétition et la compétition par le tremble.

Pour l'indice de défilement, les modèles basés sur la compétition intraspécifique et sur l'indice de compétition sont tous les deux plus probables. En effet, ils sont 4.3 fois plus probables que le modèle global et 103 fois plus probables que le modèle ne comprenant que les surfaces terrières.

Le ratio d'étalement est affecté par les surfaces terrières, mais on ne peut pas exclure l'effet de la compétition par les gaules, puisque le modèle e n'est que 1.4 fois plus probable que le modèle d. Par contre, il est 9 fois plus probable que le b et 7.4 fois plus probable que le c. Le ratio d'étalement est donc sensible à la surface terrière résiduelle et à la compétition, peu importe l'essence.

Pour ce qui est du tremble, sa croissance radiale est influencée par la surface terrière (tableau 2.9). En effet, ce modèle est 4.3 fois plus probable que le modèle c et 60 fois plus probable que le modèle global. La hauteur du tremble est affectée principalement par la compétition interspécifique. Ce modèle est 6.4 fois plus probable que le deuxième modèle le plus probable (modèle d), 19 fois plus probable que le modèle global et 219 fois plus probable que le modèle ne comprenant que les surfaces terrières résiduelles.

Pour ce qui est de l'indice de défilement, la compétition des quatre voisins n'est que 1.3 fois plus probable que la compétition avec le tremble. Par contre, ce modèle est 3 fois plus probable que le modèle qui inclut la compétition avec le sapin et 9 fois plus probable que le modèle global. Donc, c'est la compétition des quatre voisins et, dans une moindre mesure, la compétition intraspécifique qui affectent le défilement du tremble.

Tableau 2.8 Sélection de modèles pour la croissance du sapin six ans après coupe (2006)

Modèles	K	Delta AIC	Poids d'Akaike	Rapport d'évidence
<i>croissance radiale</i>				
a= Global	10	5.30	0.0443	2.2
b= Compétition avec le sapin	7	0.00	0.6266	
c= Compétition avec le tremble	7	9.50	0.0054	
d= Indice de compétition	6	1.60	0.2816	
e= Surfaces terrières	5	5.40	0.0421	
<i>croissance en hauteur</i>				
a= Global	10	2.70	0.0884	1.2
b= Compétition avec le sapin	7	3.40	0.0623	
c= Compétition avec le tremble	7	0.40	0.2793	
d= Indice de compétition	6	0.80	0.2287	
e= Surfaces terrières	5	0.00	0.3412	
<i>indice de défilement</i>				
a= Global	10	2.90	0.1043	4.3
b= Compétition avec le sapin	7	0.00	0.4447	
c= Compétition avec le tremble	7	10.80	0.0020	
d= Indice de compétition	6	0.00	0.4447	
e= Surfaces terrières	5	9.30	0.0043	
<i>ratio d'étalement</i>				
a= Global	10	7.30	0.0131	1.4
b= Compétition avec le sapin	7	4.40	0.0561	
c= Compétition avec le tremble	7	4.00	0.0685	
d= Indice de compétition	6	0.70	0.3565	
e= Surfaces terrières	5	0.00	0.5059	

Tableau 2.9 Sélection de modèles pour la croissance du tremble six ans après coupe (2006)

Modèles	K	Delta AIC	Poids d'Akaike	Rapport d'évidence
<i>croissance radiale</i>				
a= Global	10	8.20	0.0118	4.3
b= Compétition avec le sapin	7	6.20	0.0320	
c= Compétition avec le tremble	7	2.90	0.1667	
d= Indice de compétition	6	4.40	0.0788	
e= Surfaces terrières	5	0.00	0.7107	
<i>hauteur totale</i>				
a= Global	10	5.90	0.0424	6.4
b= Compétition avec le sapin	7	0.00	0.8095	
c= Compétition avec le tremble	7	7.70	0.0172	
d= Indice de compétition	6	3.70	0.1273	
e= Surfaces terrières	5	10.80	0.0037	
<i>indice de défilement</i>				
a= Global	10	4.50	0.0480	1.3
b= Compétition avec le sapin	7	2.10	0.1593	
c= Compétition avec le tremble	7	0.60	0.3373	
d= Indice de compétition	6	0.00	0.4553	
e= Surfaces terrières	5	17.30	0.0000	

## 2.7 Discussion

La structure diamétrale des peuplements avant coupe est typique de celle des peuplements naturels issus de feu de la sapinière à bouleau blanc caractérisée par une distribution diamétrale normale des essences intolérantes et une plus grande proportion des tiges résineuses tolérantes dans les classes diamétrales inférieures (figure 2.4). Cette structure diamétrale reflète l'évolution progressive du peuplement vers une composition mélangée (Harvey et Brais 2007). Les gaules de sapin échantillonnées dataient en grande partie de la période précédant ou correspondant du moment de la dernière épidémie de tordeuse des bourgeons d'épinette qui a sévi à la fin des années soixante-dix (Morin et al. 1993). Bien que les âges aient pu être sous estimés pour plusieurs individus, cette structure d'âge explique l'abondance de la régénération en sapin malgré la faible représentation de ce dernier dans la strate arborescente (figure 2.5). Ces observations illustrent la capacité de sapin de survivre pendant des décennies en conditions ombragées sous couvert (Messier *et al.* 1999 a).

L'augmentation de la densité des gaules de sapins dans les témoins au cours de la période d'étude est conforme à cette dynamique, mais se fait aux dépens des sapins compris entre 1 m de hauteur et 2 cm de DHP (figure 2.6). La densité des semis augmente alors que celle de la classe de hauteur intermédiaire diminue suggérant que des conditions lumineuses dans des témoins sont déficientes pour la croissance en hauteur (Claveau *et al.* 2002) sans limiter la capacité des semis de s'établir (Harvey et Bergeron 1989; Côté et Bélanger 1991; Parent et Messier 1995 Simard *et al.* 1998).

Les coupes totales et partielles ont eu pour effet immédiat de diminuer la densité de la régénération entre 1 m et 2 cm de DHP alors que les semis < 1m ont vraisemblablement été protégés par la neige. Cette interprétation est confirmée par les analyses de tige qui montrent que la régénération résiduelle des sapins était généralement moins haute dans les coupes que dans les témoins immédiatement après les traitements (figure 2.9c).

L'évolution de la densité de la régénération en sapin dans les années qui suivent la coupe résulte de plusieurs processus agissant simultanément : l'établissement de nouveaux semis, la croissance en hauteur et la mortalité des tiges. L'effet de l'ouverture du couvert sur la

régénération s'est fait surtout sentir sur la strate de régénération intermédiaire pour laquelle on note le contraste le plus frappant entre le témoin et les trois traitements de coupe. La plupart des tiges échantillonnées pour les mesures de croissance appartenaient aussi à cette classe de hauteur au moment des traitements.

Le stress physiologique engendré par l'ouverture subite du couvert (Ruel *et al.* 2000; Man *et al.* 2008) ne s'est pas traduit ici par une baisse de croissance des tiges entre 1m et 2 cm de dhp. Par contre, les tiges ont mis deux à trois ans avant de répondre positivement à l'ouverture du couvert. Cette réponse s'est traduite par une augmentation de l'accroissement annuel en hauteur et en diamètre ainsi que du ratio d'étalement. Bourgeois *et al.* (2004), dans le cadre d'une étude similaire conduite sur le même territoire, avait observé une réduction initiale de la croissance en hauteur de la régénération de sapin suite à des coupes totales et partielles suivie d'une réponse positive au cours des deuxième et troisième années suivant la coupe. Nos résultats montrent que cette réponse positive peut se poursuivre au-delà de six ans après coupe.

Par ailleurs, le ratio d'étalement a conservé, pour l'ensemble de la période étudiée, des valeurs similaires pour les trois traitements de coupe, indiquant qu'au-delà d'une ouverture donnée, la réponse du sapin plafonne (Parent et Messier 1995). Duchesneau *et al.* (2001) ont estimé que ce plafonnement se produisait à des valeurs de lumière disponible correspondant à 25 % des conditions de plein ensoleillement. Malgré des conditions de lumière favorables dans toutes les coupes, des densités en gaules de sapin et des indices de compétition similaires entre les traitements de coupe, la croissance radiale du sapin est plus élevée dans la coupe totale et répondait plus vite aux traitements que la croissance en hauteur. Six ans après coupe, la croissance radiale et l'indice de défilement du sapin étaient plus affectés par la compétition exercée par les gaules que par surface terrière résiduelle des peuplements (tableau 2.7). Outre la lumière, les modifications du régime thermique et hydrique du sol peuvent aussi influencer la croissance (Ferguson et Adams 1980; Tucker *et al.* 1987; Kneeshaw *et al.* 2002, Ruel *et al.* 2000).

La densité des tiges de sapin < 1 m est restée stable dans les coupes totales et par trouées au cours des huit ans suivant la coupe, indiquant que le passage à la classe supérieure était

compensé par le recrutement de nouveaux semis. Par contre dans les coupes dispersées, on observe un recrutement de sapin dans l'ensemble des classes hauteur. Le recrutement de petits semis plus important dans les coupes dispersées s'expliquerait par des conditions plus favorables à l'ensemencement et à l'établissement que dans les coupes par trouées ou totales. En effet, diverses études (McLaren et Janke 1996, Duchesneau et Morin 1999) montrent qu'à partir d'un certain seuil d'ouverture de la canopée, le recrutement en sapin baumier diminue, en raison de températures trop élevées ou d'humidité déficiente. Cependant, dans une étude similaire à la notre, conduite sur le même territoire, Calogeropoulos et al. (2004) n'ont pas détecté d'effet de l'intensité de la coupe sur l'établissement et la survie de semis de sapin, la nature des lits de germination ayant des effets plus marqués.

Finalement, le recrutement en tiges  $> 2$  cm DHP est resté similaire dans les traitements de coupe à celui des peuplements non coupés indiquant que l'ouverture du couvert ou la lumière n'est pas le facteur limitant le recrutement en gaule dans les témoins. Cependant, huit ans après les coupes, les densités de gaules restent supérieures dans les peuplements témoins, vraisemblablement à cause de la mortalité infligée, particulièrement aux tiges  $> 1$ m et  $< 2$  cm DBH, lors des opérations de coupe dans les autres traitements.

En ce qui concerne la régénération de tremble, le taux de drageonnement était proportionnel à l'ouverture du couvert et de courte durée, ce qui est conforme aux résultats obtenus par Prévost et Pothier (2003), Brais et al (2004) et Gradowski et al. (2010). Dans les coupes, le passage des drageons d'une classe de hauteur à l'autre se fait rapidement et ce taux augmente avec l'ouverture du couvert, indiquant un effet positif de cette ouverture sur la survie et la croissance en hauteur des drageons. Dès la deuxième année suivant la coupe totale, près de la moitié des drageons mesuraient plus d'un mètre et on observe dans ce traitement un recrutement en gaules à partir de la cinquième année suivant la coupe.

Le modèle quadratique retenu pour la densité des gaules de tremble (figure 2.7) indique que ce recrutement devrait se poursuivre au-delà des huit années après coupe dans tous les traitements à l'exception du témoin. Cependant, la sélection de modèle pour la hauteur totale des gaules de tremble six ans après coupe montre que cette dernière est dépendante de la densité des gaules de sapin. Cet effet pourrait être de courte durée puisque la hauteur

moyenne des gaules de tremble mesurées en 2006 (4 m) était supérieure à celle des sapins (3,5 m) et la croissance radiale des gaules de tremble qui jusque là n'avait pas été affectée par la nature des coupes pourrait devenir plus sensible à la surface terrière résiduelle des peuplements (tableau 2.9).

La proportion de régénération en sapin par rapport au tremble (figure 2.8) varie dans le temps selon la classe de hauteur. La régénération basse en tremble est importante immédiatement après coupe, mais chute très rapidement. Par contre, la proportion des semis de sapin se maintient et même augmente dans le temps dans les témoins et les coupes partielles dispersées où le drageonnement du tremble est moins important. Ceci se traduit par une augmentation de la proportion relative du sapin (par rapport au tremble) dans le temps. Au stade de gaule, la densité relative de sapin diminue, car les densités de gaule de tremble continuent d'augmenter 8 ans après coupe. Cependant, on s'attend qu'à plus long terme, le sapin continuera de recruter au stade gaule en raison de ses fortes densités de la régénération basse contrairement au tremble.

## 2.8 Conclusion et implications sylvicoles

Selon Matthias *et al.* (2003), les stratégies d'aménagement qui préservent la régénération préétablie constituent une alternative économique à la plantation et peuvent contribuer à maintenir plusieurs aspects de la structure et la composition des forêts naturelles. Par ailleurs, plusieurs études menées sur les coupes partielles démontrent les avantages de ces dernières. La réponse initiale à la coupe partielle dans des peuplements de tremble ou des peuplements mélangés indique qu'un prélèvement de 50 à 60 % de la surface terrière peut produire une deuxième cohorte de tremble (Brais *et al.* 2004), favorise la croissance du sapin (Bourgeois *et al.* 2004) et pourrait avoir l'effet d'accélérer la succession des peuplements équiennes vers une composition et une structure plus complexes propres aux peuplements plus anciens (Harvey *et al.* 2002). La présente étude va dans le même sens. La coupe par trouées se rapproche légèrement de la coupe totale et favorise un peu plus le tremble. Tous les traitements favorisent la croissance du sapin, mais la coupe partielle dispersée épargne davantage la régénération préétablie de sapin. On peut donc s'attendre à ce que ce traitement amène le peuplement vers une composition à dominance résineuse et accélère sa succession de façon plus importante que la coupe partielle par trouées. La réponse en croissance et en

mortalité observée lors de notre étude pourrait être utilisée dans des modèles de simulation forestière pour estimer la réponse à diverses stratégies sylvicoles alternatives. Cependant, déterminer le niveau de réduction de la surface terrière pour aménager les forêts mixtes de sorte que la régénération résineuse soit favorisée au détriment du drageonnement de tremble constitue un défi (MacDonald et al. 2004). Enfin, puisque la Nature, dont l'aménagement écosystémique cherche à s'inspirer, façonne des mosaïques forestières diversifiées, la diversification sylvicole constitue un volet important d'aménagement et les traitements expérimentés dans le cadre de présente étude demeurent pertinents pour la forêt boréale mélangée.



### 3 CHAPITRE 2 ÉTABLISSEMENT ET SURVIE INITIALE DE LA RÉGÉNÉRATION NATURELLE: RÔLE DES DÉBRIS LIGNEUX AU SOL

#### 3.1 *Résumé*

Les débris ligneux grossiers (DLG) revêtent une importance primordiale pour la dynamique forestière. Ils constituent des lieux propices à la germination et à la croissance de la régénération, gouvernant ainsi l'évolution de la composition des communautés végétales, un rôle qui leur a valu l'appellation de « billes nourricières ». Dans la présente étude, nous profitons d'une année semencière (2006) pour comparer l'établissement et la survie pendant deux ans des semis d'arbres sur les DLG et sur la couverture morte issue de litière fine, en forêt boréale mixte. La densité et la survie des semis de l'année ont été évaluées dans le cadre d'un échantillonnage où chaque bille est appariée à une superficie équivalente sur le sol adjacent à la bille. Comme plusieurs facteurs expliquent l'établissement préférentiel des semis d'arbre sur les billes en décomposition, les diverses caractéristiques des DLG qui semblent influencer la régénération ont été mesurées. Celles-ci incluent l'essence, le stade de décomposition des billes, la dureté, la densité, l'humidité et le ratio C/N du bois. D'autres caractéristiques ont été mesurées sur les billes et au sol, tel le recouvrement d'herbacées, le recouvrement en litière, en mousse, l'épaisseur de mousse et de feuilles. Des régressions logistiques ont été appliquées aux données. La probabilité d'établissement des semis augmente avec l'humidité du bois, et diminue avec sa dureté. La probabilité de survie diminue avec l'augmentation de la surface terrière feuillue des peuplements. Les résultats montrent que les essences produisant de petites semences, soit le bouleau blanc, les épinettes noire et blanche et le thuya s'établissent préférentiellement sur le bois mort, tandis que le sapin, une espèce qui produit des semences plus grosses, s'établit davantage au sol. Ceci met en évidence l'importance du bois mort au sol comme micro habitat pour la régénération forestière, gage de la composition future des peuplements.

Mots clés : débris ligneux grossiers, billes nourricières, semis, forêt boréale mixte

### 3.2 Introduction

Les débris ligneux grossiers (DLG) revêtent une importance primordiale pour la dynamique forestière (Harmon 1986; Freedman *et al.* 1996; Stevenson *et al.* 2006). Ils constituent des lieux propices à la germination et à la croissance de la régénération, gouvernant ainsi l'évolution de la composition des communautés végétales (Gray et Spies 1997), un rôle qui leur a valu l'appellation de billes nourricières (Franklin 1987; Simard *et al.* 1998; Narukawa *et al.* 2003; Heinemann et Kitzberger 2006). Ce phénomène a été observé dans les forêts boréales et tempérées à travers le monde (Narukawa *et al.* 2003; Szweczyk et Szwagrzyk; 1996; Harmon et Franklin; 1989). Dans certaines forêts, la régénération arborescente est limitée à la surface occupée par les billes nourricières. Ainsi, Harmon et Franklin (1989) estiment que 88 à 97 % des semis poussent sur des billes dans les forêts résineuses du Parc national Olympic dans l'état de Washington. Cette proportion est d'autant plus remarquable que ces billes ne couvrent que 6 à 11 % de la surface du sol.

Plusieurs facteurs expliquent l'établissement préférentiel des semis d'arbres sur les billes en décomposition. Les semis poussant sur une bille sont surélevés par rapport à la végétation herbacée avoisinante, une position qui peut influencer la disponibilité de l'eau et de la lumière ainsi que la déprédation. La compétition réduite avec les plantes herbacées et une teneur en eau constante sont les facteurs les plus cités pour expliquer l'établissement des semis (Christy et Mack 1984; Harmon et Franklin 1989; Beach et Halpern 2001). Par contre, l'accumulation de litière de feuilles au sol est connue comme un facteur limitant l'établissement des semis (Beach et Halpern, 2001; Greene *et al.*, 1999).

Avec la décomposition des billes, une succession de changement des propriétés physiques et chimiques de l'environnement prend place, contribuant à favoriser l'établissement et la survie des semis. L'établissement des mousses avec le temps réduit l'évaporation (Iijima *et al.* 2006; Zielonka 2006), favorise l'adhérence des semences à la surface (Harmon 1987) et protège les semis de l'impact direct des gouttes d'eau (Narukawa *et al.* 2003a). Par contre, un tapis de mousse trop épais risque de nuire aux plus petits semis qui n'auront pas suffisamment de lumière (Sugita et Nagaike 2005; Iijima *et al.* 2007). Harmon et Franklin (1989) ont fixé à 5 cm le seuil où l'effet bénéfique du tapis de mousse est perdu dans les forêts d'épinette du nord-ouest Pacifique.

Le bois bien décomposé est caractérisé par une capacité de rétention en eau élevée (Brais *et al.* 2005). Cette humidité est propice à la germination des semences ainsi qu'aux champignons mycorhiziens qui peuvent favoriser la croissance des semis (Zielonka, 2006; Fraver *et al.*, 2002). Les concentrations en nutriments du bois, notamment en azote, augmentent aussi (Takahashi *et al.* 2000; Brais *et al.* 2006) alors que la diminution de la dureté du bois permet aux racines des semis d'y pénétrer (Narukawa et Yamamoto 2003b).

Selon Szewczyk et Szwagrzyk (1996) et Narukawa *et al.* (2003), la quantité de semis sur les billes atteindrait des maximums dans les classes de décomposition (tableau 3.1) les plus avancées, mais les semis peuvent s'établir dès les premiers signes de décomposition (McCullough 1948). Dans la forêt boréale japonaise, Takahashi (2000) a trouvé que les semis commençaient à s'établir sur des billes de classe 2 et étaient plus abondants sur les classes 3 à 5. Par contre, l'auteur a observé un accroissement de la mortalité à partir de la classe de décomposition 4 en raison de la compétition et du décollement de parties d'écorce qui entraîne les petits semis avec elles. Par ailleurs, plus la décomposition est avancée, plus la composition floristique tend à ressembler à celle du sol avoisinant (Lee et Sturges 2001).

Tableau 3.1 Classification du niveau de décomposition des billes (Szewczyk et Szwagrzyk 1996)

Classes de décomposition	Description
1	Écorce intacte; pas de végétation à la surface; mousses recouvrent moins de 10 % de la surface; bois est dur; présence de branches
2	Écorce partiellement intacte; mousses recouvrent de 10 % à 25 % de la surface; bois est dur mais présente des signes de décomposition au niveau de l'aubier; présence de branches
3	Écorce en majorité dissociée de l'aubier; mousses et plantes couvrent de 25 % à 75 % de la surface; bois est plus mou; signes de décomposition vont jusqu'au cœur; seulement de grosses branches encore présentes
4	Écorce complètement absente; mousses et plantes couvrent de 75 % à 100 % de la surface; bois est très mou; bille est toujours ronde
5	Mousses et plantes recouvrent complètement; bille aplatie parfois difficile à distinguer du sol

### 3.3 Objectifs

L'objectif général de cette étude est de comparer l'établissement et la survie de la régénération naturelle sur le bois mort et sur le sol en forêt naturelle et de déterminer les caractéristiques du bois mort qui sont propices à la germination et la survie des semis.

### 3.4 Hypothèses

En raison de la dimension plus petite de leurs semences, le bouleau, l'épinette et le thuya s'établiront préférentiellement sur les billes et le sapin sur la litière forestière. Les écarts d'établissement et de survie entre des semis retrouvés sur le bois mort bien décomposé et sur la litière seront plus importants pour le bouleau, l'épinette et le thuya comparativement au sapin. Nous supposons également qu'en vertu de leurs propriétés physico-chimiques avantageuses, les billes plus décomposées (classes de décomposition 3 à 5) supporteront une densité de semis plus élevée.

### 3.5 Méthodologie

#### 3.5.1 Peuplements

L'étude est réalisée dans les peuplements matures et surannés de la Forêt d'enseignements et de recherche du Lac Duparquet (Tableau 3.2). Les peuplements sont issus de trois feux différents et représentent au gradient d'âge et de composition typique de la chronoséquence sur sites riches du sud de la forêt boréale mélangée (Bergeron 2000).

#### 3.5.2 Caractéristiques sommaires des peuplements

L'étude est réalisée dans les parcelles témoins de trois dispositifs sylvicoles du projet SAFE (Brais et al. 2004, <http://web2.uqat.ca/safe/dispositifs.htm>). Dans chacune des parcelles expérimentales (PEX, trois par peuplement), cinq placettes-échantillon permanentes (PEP) (400 m<sup>2</sup>) ont été échantillonnées (figure 2.1). À l'intérieure de celles-ci, tous les arbres dont le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) était supérieur à 5 cm ont été numérotés, identifiés et leur DHP mesuré afin d'estimer la surface terrière. À l'intérieur de chacune des neuf parcelles expérimentales, les billes de bois mort au sol ont été dénombrées par classe de décomposition et de diamètre le long d'un triangle équilatéral de 30 m de côté (VanWagner 1982) afin d'obtenir un volume moyen de bois mort. Afin d'estimer la surface du sol occupée par des billes de bois, un transect de 150 m a été établis dans chaque parcelle expérimentale et la présence ou l'absence de bois peu (classe 1 – 3) ou bien décomposé (classe 4 -5) a été notée. L'année précédant l'initiation de cette étude (2006) a été une année semencière particulièrement importante pour le bouleau blanc et les espèces résineuses (A. Rive, données non publiées).

#### 3.5.3 Plan d'échantillonnage

Pour cette étude, 163 billes ont été localisées (5 essences x 5 classes de décomposition x 5 à 6 répétitions) dans l'ensemble des parcelles expérimentales. L'essence a été identifiée par des critères morphologiques au terrain ou, lorsque la décomposition était trop avancée, à partir d'analyses anatomiques de lames minces de bois. Le diamètre des billes a été mesuré et leur degré de décomposition a été déterminé à l'aide d'une classification basée sur des critères visuels (tableau 3.1). Un échantillon de bois a été prélevé sur chaque bille afin de déterminer les caractéristiques physiques et chimiques au laboratoire.

Dans le but de procéder à un échantillonnage aléatoire systématique de la densité des semis sur les billes et sur le sol à proximité des billes, un premier quadrat de 1 mètre de long a été disposé sur la bille à 2 mètres du plus gros bout de celles-ci. Le diamètre de la bille a été mesuré aux deux extrémités du quadrat (D3 et D4) afin de tracer un deuxième quadrat de mêmes dimensions sur le sol parallèle au premier quadrat et à une distance équivalente au plus grand diamètre de la bille. Ce deuxième quadrat a été placé systématiquement du côté gauche de la bille, l'observateur faisant dos au gros bout de la bille (figure 3.1).

À l'automne 2007, dans chacun des quadrats appariés, tous les semis ont été dénombrés par essence et par classes d'âge : semis de l'année, semis de 1 à 5 ans et semis de 6 ans et plus. Des petites tiges de bois munies de drapeaux portant une couleur correspondant à l'essence marquaient chaque semis de l'année pour le suivi ultérieur. Dans le but de quantifier la survie hivernale des semis établis en 2007, les semis ont été dénombrés une seconde fois au printemps et une troisième fois à l'automne 2008.

Afin de caractériser le milieu de croissance, un transect de 1 mètre a été placé sur la diagonale de chaque quadrat. Pour les deux types milieux (bille et sol) et à dix points équidistants le long du transect, nous avons noté le substrat (mousse, litière de feuilles, litière d'aiguilles, écorce, bois) et l'épaisseur du substrat en millimètres dans le cas de la mousse et en nombre de feuilles le cas échéant. L'épaisseur de la couverture morte (horizons LFH) a été mesurée à trois endroits le long des quadrats au sol. Sur le débris ligneux, la résistance de la couche superficielle de la bille a été évaluée à l'aide d'un pénétromètre de poche pour sol (modèle E-280 de Geotest). Finalement, le recouvrement en herbacés (0 à 1 mètre) a été estimé pour les deux quadrats, selon 6 classes : 0 = aucune plante herbacée; 1= 1-5 %; 2= 6-25 %; 3= 26-50 %; 4=51-75 %; 5= 76-100 %. Ces données permettront d'établir des relations entre les caractéristiques du substrat et l'abondance de la régénération.

À l'automne 2008, deux autres quadrats de 1 mètre de long ont été ajoutés de façon systématique le long des billes de part et d'autre des quadrats existants afin d'augmenter la surface échantillonnée. Tous les semis âgés de plus d'un an ont été dénombrés. Cet échantillonnage plus grand permet d'augmenter la probabilité d'observer des semis plus âgés et d'établir les relations entre l'abondance de semis sur les billes et les caractéristiques de ces dernières.

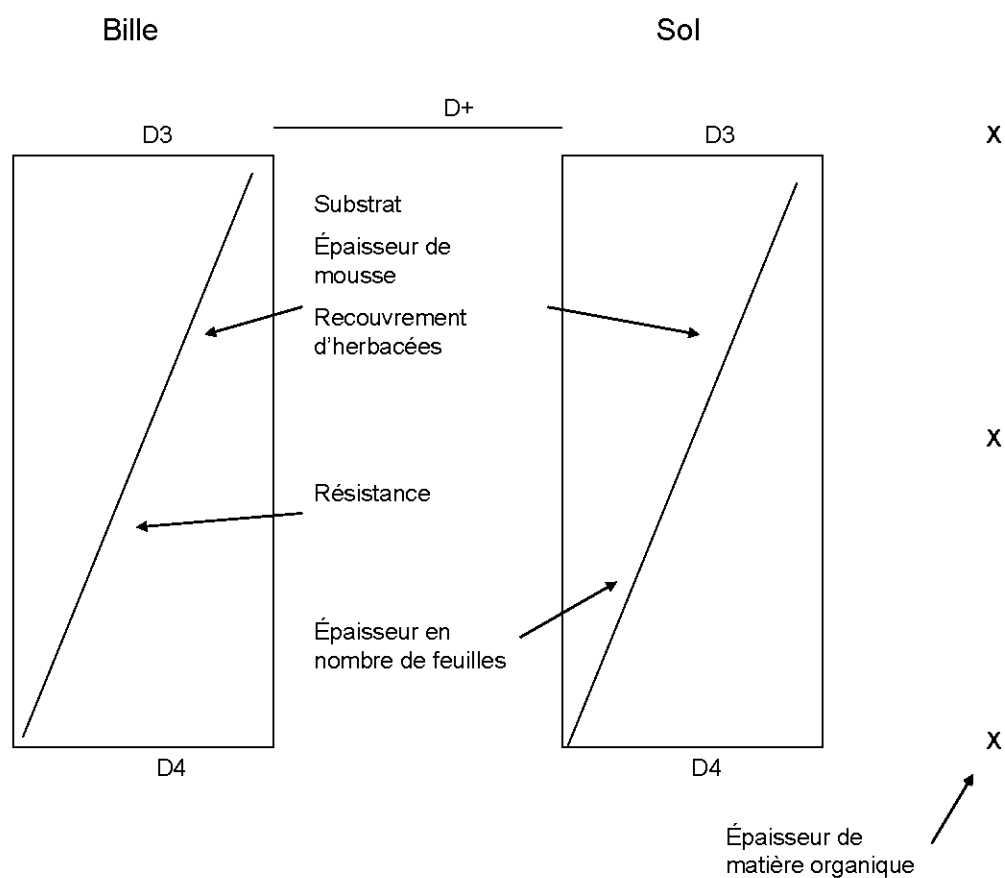


Figure 3.1 Schéma de l'échantillonnage sur la bille et au sol.

### 3.5.4 Analyses de laboratoire

Les échantillons de bois ont été divisés en trois. La densité du bois a été mesurée par déplacement d'eau à partir d'un premier sous échantillon préalablement pesé et enduit de paraffine (Brais et al. 2005). Les corrections ont été faites pour le taux d'humidité obtenu à partir d'un deuxième sous-échantillon. Les concentrations en azote et en carbone ont été obtenues par combustion au four avec un analyseur LECO sur un troisième sous échantillon préalablement broyé.

### 3.5.5 Analyses statistiques

En raison de la distribution non normale de la densité des semis sur les billes et de la fréquence élevée de billes ne présentant aucun semis, nous avons choisi de modéliser la probabilité d'observer au moins un semis sur chacune des billes inventoriées. Cette variable binaire suit une distribution binomiale. Un modèle linéaire généralisé avec effets mixtes a été développé à l'aide de la procédure GLIMMIX de SAS (Littell et al. 2006) afin de déterminer les facteurs qui facilitent l'établissement (probabilité d'observer au moins un semis en 2007) et la survie (probabilité d'observer au moins un semis de un an à l'automne 2008) des semis sur le bois mort. Les facteurs aléatoires retenus étaient le bloc, la parcelle expérimentale et la placette d'échantillonnage, ces dernières étant imbriquées dans la parcelle expérimentale et les parcelles expérimentales imbriquées dans le bloc. La variable réponse suivant une distribution binomiale, la fonction de lien retenue pour le modèle est le logit. Pour chaque facteur fixe significatif ( $p < 0.1$ ), la probabilité d'observer au moins un semis a été calculée en fonction de facteur, à l'aide des formules suivantes (Ramsey et Schafer 2002) :

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p \quad \eta = \text{logit}(\pi) = \log [\pi / (1 - \pi)]$$

$$\text{Donc } \pi = \exp(\eta) / [1 + \exp(\eta)]$$

Où  $\pi$  est utilisé pour la moyenne et représente une proportion ou une probabilité. Les figures 3.7 à 3.9 de la section résultats ont été obtenues de cette façon.

La même analyse a été utilisée afin de déterminer les caractéristiques qui favorisent l'établissement au sol de toutes les essences confondues. Dans ce cas-ci, les facteurs fixes



étaient le recouvrement d'herbacées, l'épaisseur d'humus, l'épaisseur de feuilles (en nombre de feuilles), ainsi que les surfaces terrières en résineux et en feuillus.

Afin de comparer les densités de semis établis en 2007 sur le bois mort aux densités de semis établis sur le sol, nous avons créé comme variable dépendante la différence de densité sol-bille, soit le nombre de semis retrouvés sur la bille soustrait au nombre de semis retrouvés au sol pour chaque essence de semis et avons omis de l'analyse les paires de quadrats où il n'y avait aucun semis. Un modèle linéaire généralisé mixte a été développé à l'aide de la procédure MIXED de SAS (Littell et al. 2006). Les facteurs aléatoires retenus étaient le bloc, la parcelle expérimentale et la placette d'échantillonnage, ces dernières étant imbriquées dans la parcelle expérimentale et les parcelles expérimentales imbriquées dans le bloc. Pour certaines variables dépendantes, un des termes d'erreur a dû être enlevé pour remédier à un problème de variance nulle. Les facteurs fixes considérés sont les classes de décomposition (frais : classe 1-2, intermédiaire : classe 3 et bien décomposés : classe 4-5), les essences des semis ainsi que l'interaction entre ces deux facteurs. L'analyse a été faite en mesures répétées sur l'interaction entre essence de semis et classe de décomposition, ce qui permet d'avoir un terme de variance résiduelle pour chaque groupe et d'éviter que les résidus obtenus présentent un patron d'entonnoir.

### 3.6 Résultats

#### 3.6.1 Caractéristiques des peuplements

Les peuplements échantillonnés présentent des conditions variées de surface terrière et de volume de bois mort. Les surfaces terrières les plus élevées ont été observées dans les peuplements de tremble et mélangés à dominance de tremble. Le bouleau à papier, les épinettes et le sapin étaient plus abondants dans des vieilles sapinières post tordeuse. Les billes peu décomposées occupent jusqu'à 8 % de la surface du sol tandis que celles bien décomposées représentent 13 % en recouvrement pour la sapinière post tordeuse. La proportion de volume de bois mort bien décomposé est la plus élevée dans la sapinière post tordeuse (77 %). Le volume de bois mort moyennement décomposé est plus abondant (62 % du total) dans les peuplements mélangés à dominance de tremble (tableau 3.2).

#### 3.6.2 Caractéristiques des billes

Des 163 billes échantillonnées, 72 étaient localisées dans les peuplements de tremble, 40 dans les peuplements mélangés et 51 dans les sapinières post tordeuses (tableau 3.2). Une proportion plus élevée de billes bien décomposées a été échantillonnée dans les sapinières post tordeuse alors qu'une proportion plus élevée des billes fraîches a été échantillonnée dans les peuplements mélangés.

La surface des billes peu décomposées (classe frais) est principalement recouverte d'écorce et les aiguilles ou les feuilles y sont pratiquement absentes (figure 3.2). La principale distinction entre les billes intermédiaires (classe moyen) et les billes fraîches est la diminution du recouvrement de l'écorce qui laisse place au bois en raison du décollement de l'écorce. Les billes de bois bien décomposées présentent des recouvrements en mousse, en feuille et en bois (sans écorce) les plus importants soit 46, 11 et 27 % respectivement. La mousse y est aussi plus épaisse (moy. = 8.3 mm) mais le recouvrement en écorce est moindre (figure 3.2). Les feuilles et les aiguilles peuvent occuper jusqu'à 10 % de la surface de la bille. Les écarts-types importants illustrent la grande variabilité des conditions observées, et ce, principalement pour les billes les plus décomposées.

La densité, le rapport carbone/azote et la dureté de la surface des billes tendent à diminuer avec le stade de décomposition. Tandis que, le pourcentage d'humidité augmente

avec la décomposition (figure 3.3). Il en est de même pour le recouvrement d'herbacées sur les billes qui passe d'en moyenne 0.62, 0.71 et 1.16 pour le bois frais, moyennement, et bien décomposé respectivement.

On observe de fortes corrélations entre les caractéristiques externes des billes et les propriétés physico-chimiques (Tableau 3.3). Ainsi, la surface recouverte d'écorce est fortement et positivement corrélée avec la dureté, la densité, le rapport C/N et inversement corrélée avec l'humidité du bois. Le recouvrement et l'épaisseur des mousses sont fortement et négativement corrélés avec la dureté du bois.

Les densités de semis sur les billes sont extrêmement variables (figure 3.4). Les densités de semis s'étant établis en 2007 sont plus élevées sur le bois bien décomposé pour toutes les essences (figure 3.4). Les densités les plus élevées ont été observées sur les billes bien décomposées; le bouleau y a atteint en moyenne 19 semis par m<sup>2</sup>. Des quatre espèces dénombrées, bouleau blanc, thuya, épinette spp. et sapin, ce dernier présente les densités les moins élevées. Par contre, les densités en 2008 montrent un taux de survie moindre pour le bouleau.

### 3.6.3 Caractéristiques des billes qui expliquent la présence de semis

En raison de fortes corrélations entre les caractéristiques externes et les propriétés physico-chimiques des billes (tableau 3.3), seuls les caractéristiques physico-chimiques des billes et le recouvrement en herbacées ont été inclus dans les modèles. Ce choix fut aussi motivé par le fait que la compétition réduite avec les plantes herbacées et une teneur en eau constante sont les facteurs les plus cités pour expliquer l'établissement préférentiel des semis sur le bois mort.

Les facteurs fixes retenus pour ce modèle sont le recouvrement d'herbacées, la dureté de la surface de la bille, la densité de l'aubier, l'humidité, le rapport carbone azote, ainsi que les surfaces terrières en résineux et en feuillus.

Les caractéristiques des billes qui influencent l'établissement (2007) de semis de bouleaux ( $p > 0.1$ ) sont la dureté de la surface de la bille, l'humidité et le rapport carbone/azote. La probabilité d'observer au moins un semis de bouleau sur une bille diminue

avec l'augmentation de la dureté de la surface de la bille (figure 3.5) tandis qu'elle augmente rapidement avec l'humidité et le ratio C/N. En 2008, la probabilité d'observer au moins un semis de bouleau diminue avec la dureté, le recouvrement d'herbacées ainsi qu'avec l'augmentation de la surface terrière feuillue (figure 3.5).

En 2007, la probabilité d'observer au moins un semis d'épinette sur une bille diminue avec la dureté, mais augmente avec le rapport C/N. En 2008, la probabilité d'observer au moins un semis d'épinette diminue avec la dureté, le recouvrement d'herbacées ainsi qu'avec l'augmentation de la surface terrière feuillue (figure 3.6).

En 2007, la probabilité d'observer au moins un semis toutes classes d'âge et toutes essences confondues, passe de 96 à 10 % avec l'augmentation de la dureté alors que la probabilité d'observer au moins un semis en 2008 diminue avec l'augmentation de la surface terrière feuillue (figure 3.7).

Tableau 3.2 Composition et caractéristiques des peuplements échantillonnés

Peuplement	Tremblaie	Peuplement mélangé	Sapinière post tordeuse
<i>Caractéristiques des peuplements</i>			
Année d'établissement (dernier feu)	1923	1910	1760
Surface terrière totale (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	40.54	37.08	19.18
Tremble (%)	92	81	3
Bouleau à papier (%)	2	1	50
Épinette spp. (%)	3	11	32
Sapin (%)	2	7	13
Bois mort au sol (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	127.9	89.7	110.8
Recouvrement en bois mort (classes 1-3) (%)	7	8	6
Recouvrement en bois mort (classes 4-5) (%)	12	7	13
<i>Caractéristiques du bois mort</i>			
Bois mort frais (% du volume)	6	10	9
Bois mort moyen (%)	38	62	14
Bois mort bien décomposé (%)	56	28	77
<i>Caractéristiques des billes sélectionnées</i>			
Nombre de billes sélectionnées	72	40	51
Bois mort frais (% du nombre de billes)	18	35	12
Bois mort moyen (%)	43	30	18
Bois mort bien décomposé (%)	39	35	70

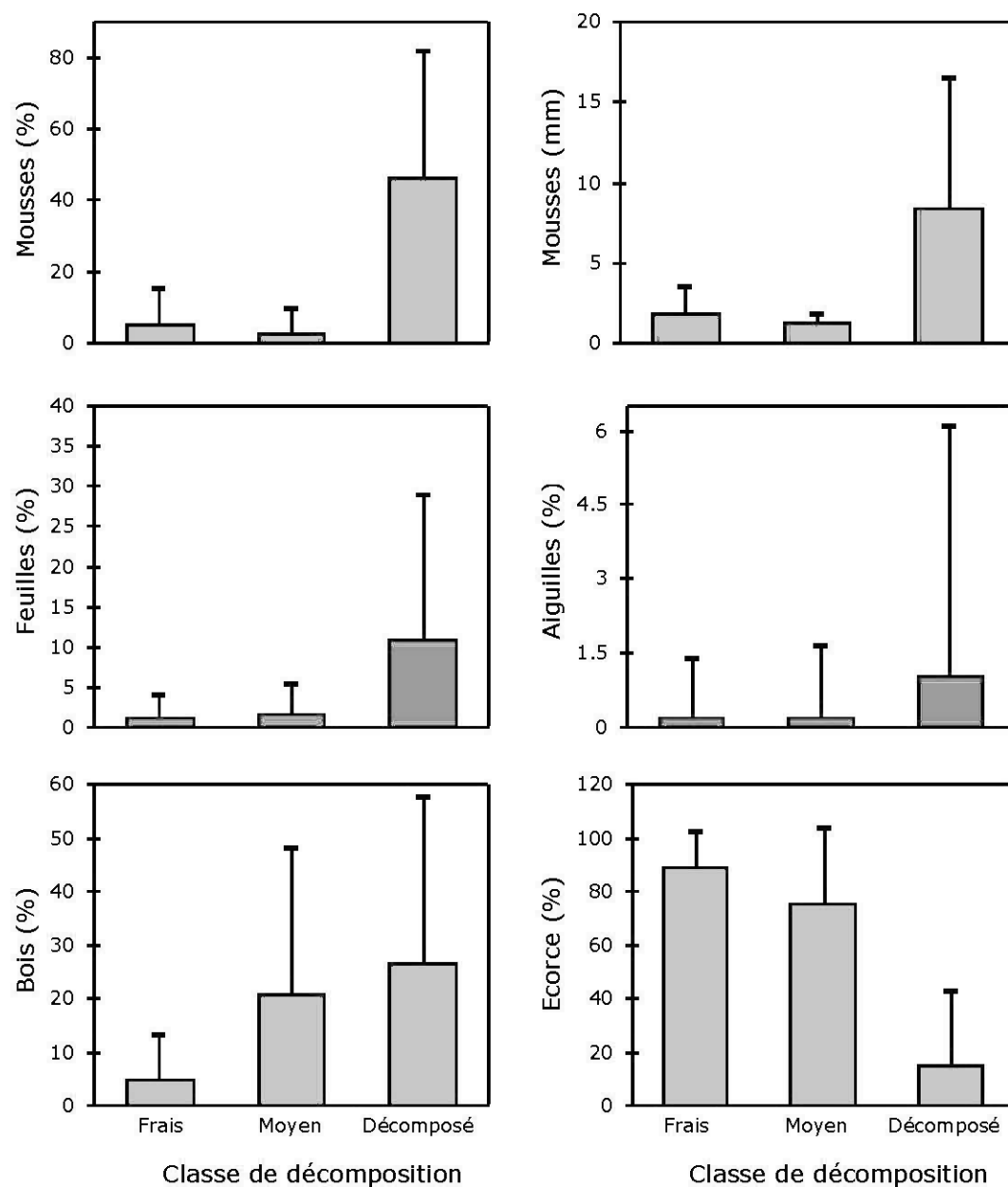


Figure 3.2 Recouvrement (%) substrat de germination à la surface des billes et épaisseur de mousse (mm). Les barres représentent l'écart-type de l'échantillon.

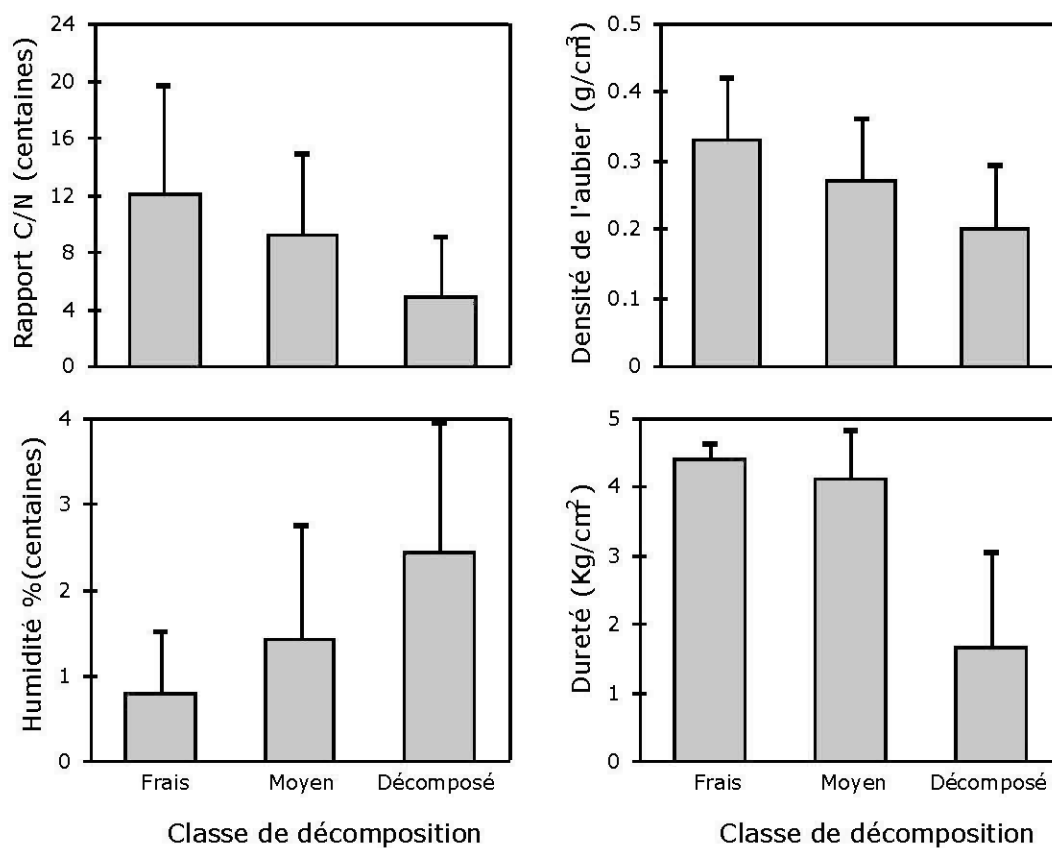


Figure 3.3 Caractéristiques physico-chimiques des billes échantillonnées en fonction de l'état de décomposition. Les barres présentent l'écart-type de l'échantillon.

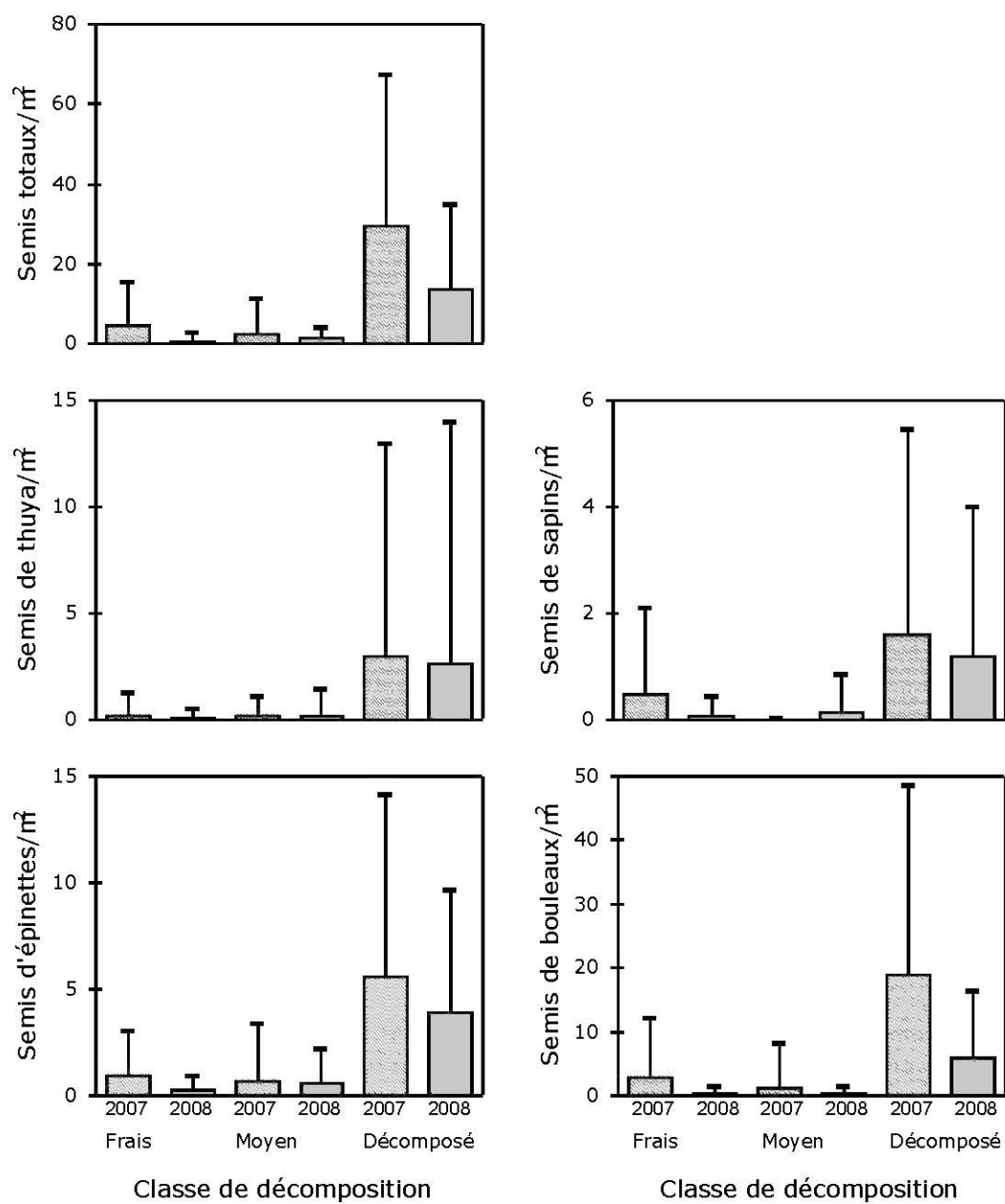


Figure 3.4 Densité de semis (nombre par m<sup>2</sup>) établis en 2007 et semis d'un an observés en 2008 par classe de décomposition. Les barres verticales représentent l'écart-type de l'échantillon.



*Tableau 3.3 Corrélations entre les facteurs physico-chimiques et les caractéristiques de recouvrement des billes (coefficients de corrélation de Pearson, probabilité, nombre d'observations)*

	Dureté	Densité de l'aubier	Humidité	Rapport C/N
Recouvrement en aiguille	<b>-0.18</b> <b>0.023</b> <b>158</b>	-0.04 0.602 155	0.07 0.419 153	-0.09 0.245 158
Recouvrement en bois	-0.01 0.857 158	<b>-0.27</b> <b>0.001</b> <b>155</b>	0.13 0.107 153	-0.14 0.090 158
Recouvrement en écorce	<b>0.76</b> <b>&lt;0.001</b> <b>158</b>	<b>0.41</b> <b>&lt;0.001</b> <b>155</b>	<b>-0.47</b> <b>&lt;0.001</b> <b>153</b>	<b>0.42</b> <b>&lt;0.001</b> <b>158</b>
Recouvrement en feuilles	<b>-0.54</b> <b>&lt;0.001</b> <b>158</b>	-0.13 0.106 155	<b>0.26</b> <b>0.001</b> <b>153</b>	<b>-0.20</b> <b>0.010</b> <b>158</b>
Recouvrement en mousses	<b>-0.72</b> <b>&lt;0.001</b> <b>158</b>	<b>-0.24</b> <b>0.003</b> <b>155</b>	<b>0.37</b> <b>&lt;0.001</b> <b>153</b>	<b>-0.32</b> <b>&lt;0.001</b> <b>158</b>
Épaisseur de mousse	<b>-0.63</b> <b>&lt;0.001</b> <b>81</b>	0.00 0.989 78	0.01 0.914 76	-0.13 0.232 81

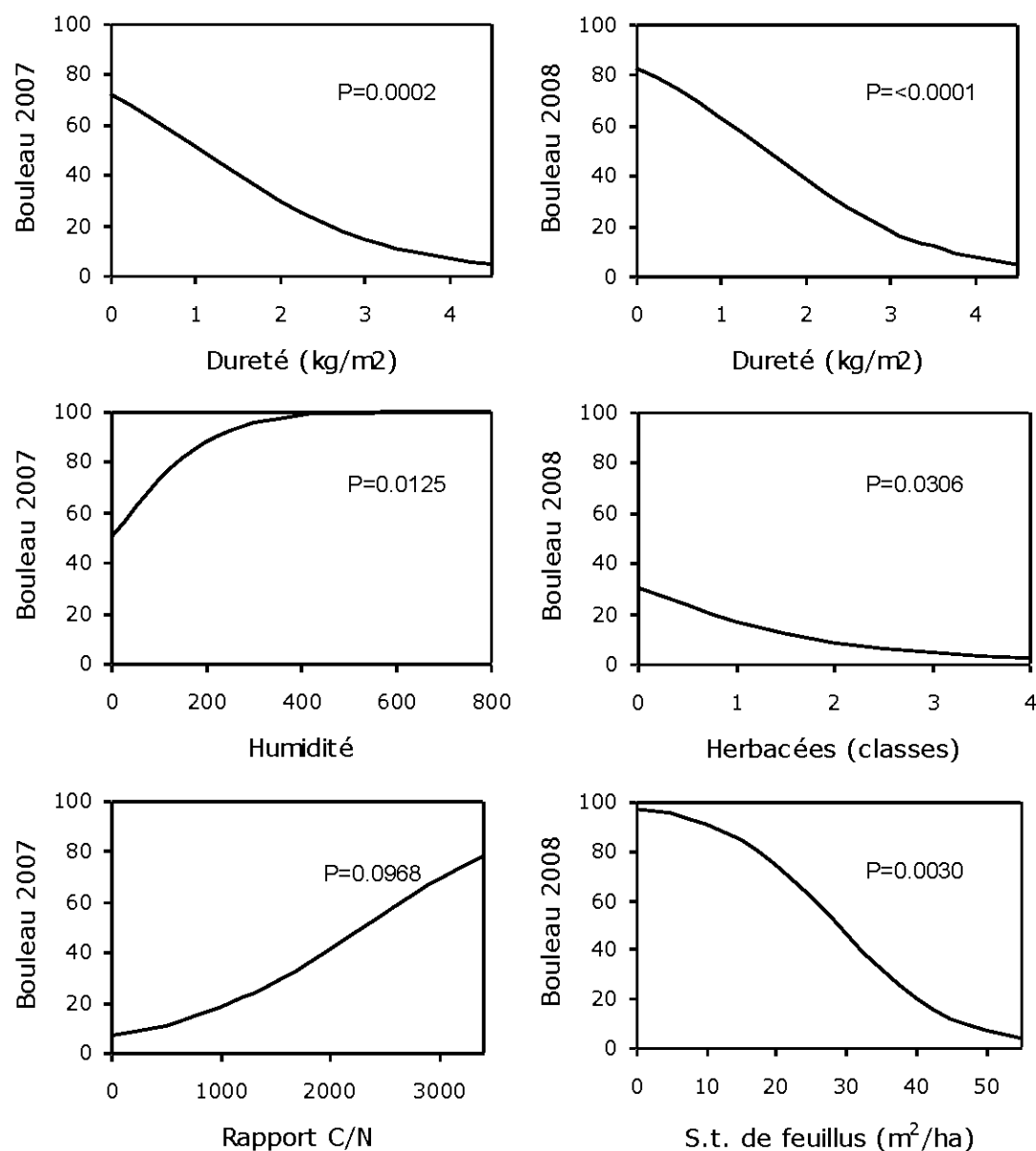


Figure 3.5 Probabilité d'observer au moins 1 semis de bouleau en 2007 et 2008 en fonction des caractéristiques physico-chimiques des billes, du recouvrement en herbacées et de la surface terrière en feuillus des peuplements.

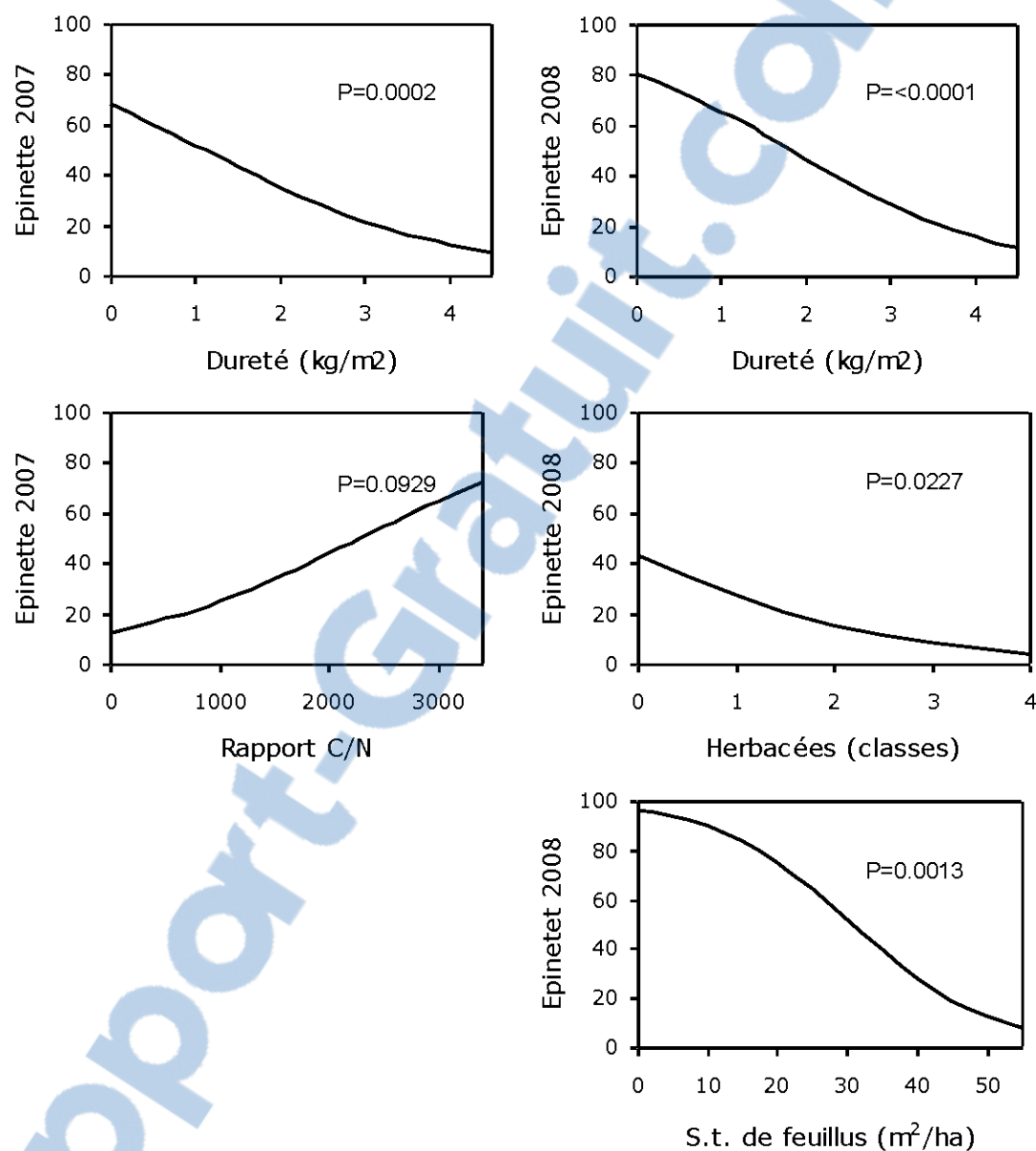


Figure 3.6 Probabilité d'observer au moins 1 semis d'épinette en 2007 et 2008 en fonction des caractéristiques physico-chimiques des billes, du recouvrement en herbacées et de la surface terrière en feuillus des peuplements.

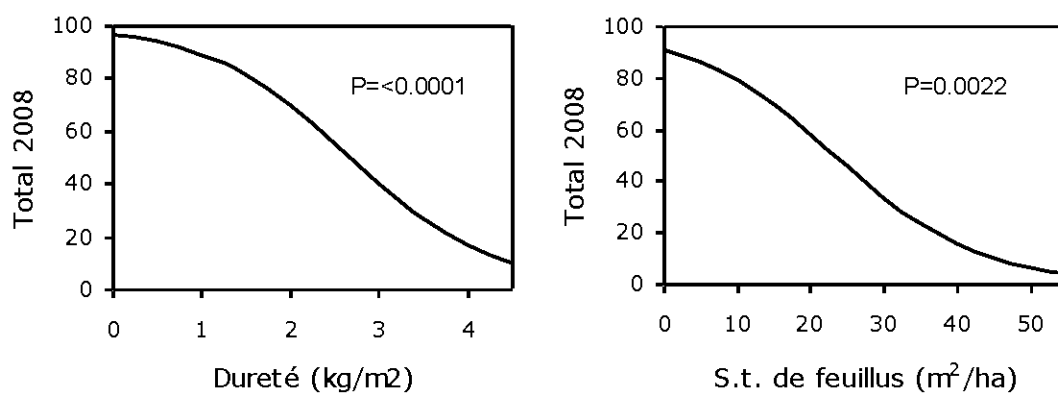


Figure 3.7 Probabilité d'observer au moins 1 semis en 2008 toutes essences et toutes classes d'âge confondues.

#### 6.3.4 Caractéristiques qui expliquent la présence de semis au sol

Les seuls facteurs affectant l'établissement des semis au sol (toutes essences confondues) sont les surfaces terrières en feuillus et en résineux (tableau 3.4). La probabilité augmente avec la surface terrière en résineux tandis qu'elle diminue avec la surface terrière en feuillus. Probablement parce que les feuillus sont principalement représentés par le tremble qui se reproduit principalement par drageonnement et produit beaucoup d'ombre.

Tableau 3.4 Effet des différents facteurs sur l'établissement des semis au sol en 2007, toutes essences confondues

	Degrés de liberté	Den DDL	Valeur de F	Pr >F
Recouvrement d'herbacées	1	138	1.70	0.1940
Épaisseur de l'humus	1	138	2.29	0.1329
Épaisseur de feuilles	1	138	0.51	0.4742
Surface terrière en résineux	1	138	7.54	0.0068
Surface terrière en feuillus	1	138	3.31	0.0710

#### 3.6.4 *Différences sol - bille*

La différence entre la densité de semis établis au sol et la densité de semis établis sur les billes en 2007 varie d'une espèce de semis à l'autre (figure 3.8, tableau 3.5). Pour ce qui est de bouleaux et d'épinettes, les densités de semis sont plus fortes sur le bois mort, et ce, pour toutes les classes de décomposition. Dans le cas du bouleau, il y a 15.49, 3.49 et 28.94 semis par mètre carré de plus sur la bille qu'au sol pour les classes de décomposition frais, moyen et bien décomposé respectivement. Le sapin s'est établi préférentiellement au sol; on observe 2.22, 10.56 et 6.74 semis par mètre carré de plus au sol que sur la bille pour les classes de décomposition frais, moyen et bien décomposé respectivement. Le même patron s'observe en 2008, malgré les densités plus faibles.

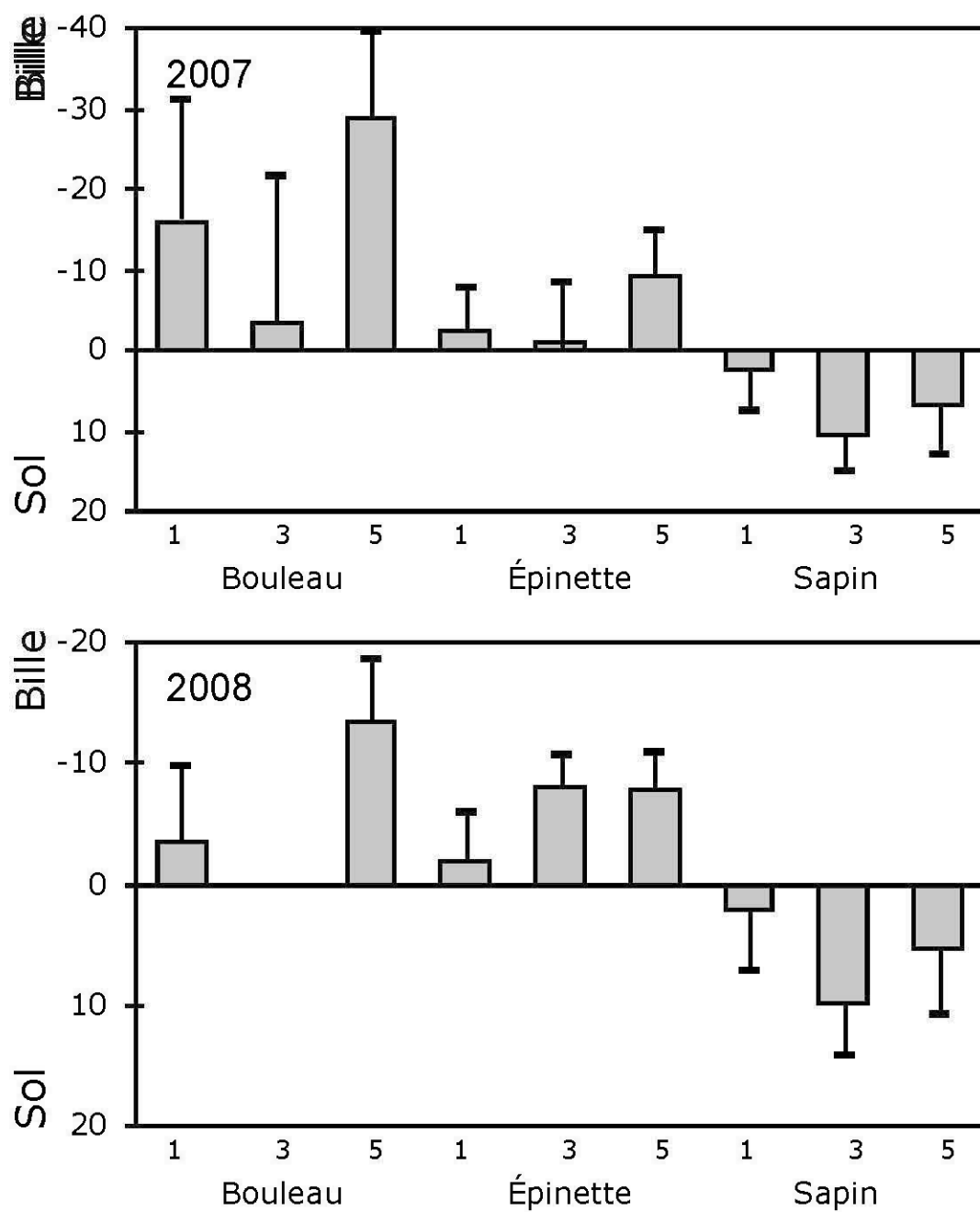


Figure 3.8 Différence entre le nombre de semis au sol et sur la bille par classes de décomposition (1=frais 3=moyennement décomposé et 5=bien décomposé) et par essence de semis.

*Tableau 3.5 Effet de la classe de décomposition et de l'essence des semis sur la différence de densité en semis au sol et sur la bille*

	Degrés de liberté	Den DDL	Valeur de F	Pr >F
<i>2007</i>				
Classe de décomposition	2	113	5.20	0.0069
Essence de semis	2	113	25.56	<.0001
Classe de décomposition*				
Essence de semis	4	113	2.58	0.0408
<i>2008</i>				
Classe de décomposition	2	101	3.15	0.0469
Essence de semis	2	101	22.84	<.0001
Classe de décomposition*				
Essence de semis	4	101	3.71	0.0074



### 3.7 Discussion

L'année 2006 a été une année semencière exceptionnelle. Dans le cadre d'une autre étude réalisée dans le même secteur, Rive (données non publiées) a estimé des densités de d'épinettes et de sapins, à partir des contenus de trappes à graines, à plus de 10 millions et environ 460 000 graines ha<sup>-1</sup> respectivement.

Les volumes de bois mort observés présentent des valeurs élevées, mais comparables à ce qui a été rapporté pour des peuplements naturels de la forêt boréale (Hély et al. 2000; Pedlar et al. 2002). Le bois mort, toutes classes de décomposition confondues, couvrait entre 15 et 20 % du sol et était susceptible de recevoir une partie importante de la pluie de semence. Les variations de la composition du couvert entre les différents peuplements de l'étude ne se sont pas traduites par une augmentation de la probabilité d'observer des semis avec l'augmentation de la surface terrière des essences semencières. Le fait qu'une proportion plus importante des billes bien décomposées était localisée dans les vieilles sapinières, où le bouleau occupait une proportion importante de la surface terrière, explique en partie la surreprésentation des semis de bouleau par rapport au semis d'épinette sur le bois mort. D'autre part, le bouleau produit de plus petites semences en plus grande quantité.

Avec la décomposition, la surface du bois se transforme (figures 3.2 et 3.3), les différentes caractéristiques des billes évoluent avec la décomposition et sont donc très corrélées entre elles (tableau 3.3). La densité du bois diminue et l'ouverture des trachéides forme un système capillaire qui accroît substantiellement la rétention en eau (Zielonka 2006). La surface des billes change; l'écorce tombe laissant apparaître plus de bois, les mousses prolifèrent tant en recouvrement qu'en épaisseur. Nos résultats montrent que les billes bien décomposées qui sont moins dures et qui ont un taux d'humidité plus élevé supportent de plus grandes quantités de semis (figure 3.4). Lors de la chute des semences, la surface des billes bien décomposées étant plus poreuse (plus de mousse, bois plus décomposé exposé par la perte de l'écorce), la rétention des graines à la surface de la bille est favorisée. Dans le cas du bois frais, les semences tombent sur un substrat lisse et dur et ont tendances à glisser au sol. Cependant, nous avons observé plusieurs semis s'établissant dans des trous à la surface

des billes peu décomposées. Ces trous étaient majoritairement créés par des insectes ou des pics.

### 3.7.1 *Caractéristiques des débris ligneux grossiers favorisant l'établissement et la survie des semis*

Les caractéristiques du bois mort les plus souvent citées comme favorisant la régénération arborescente sont le maintien de l'humidité et la compétition réduite des plantes herbacées (Motta *et al.* 2006; Christy et Mack 1984; Harmon et Franklin 1989; Beach et Halpern 2001). Nos résultats vont dans le même sens: l'humidité affecte l'établissement du bouleau, tandis que le recouvrement en herbacées affecte la survie du bouleau et de l'épinette.

### 3.7.2 *L'établissement des semis*

La dureté des débris ligneux affecte négativement l'établissement des semis de bouleau et d'épinette (figures 3.5 et 3.6). Lorsque la surface de la bille est moins résistante, la pénétration des racines des semis est facilitée (Narukawa *et al.* 2003). D'autre part, le recouvrement en mousse est aussi fortement lié à la dureté et à l'humidité : plus la surface d'une bille est meuble plus celle-ci est couverte de mousse, plus le tapis de mousse y est épais et plus le taux d'humidité est élevé (tableau 3.3). La présence de mousse est reconnue comme étant un facteur facilitant l'établissement des semis (Santiago 2000) car elle retient les semences (Harmon 1989), protège les semis d'impact des gouttes d'eau (Nakamura 1992) et maintient l'humidité (Iijima *et al.* 2006).

Étant donné la très petite taille des graines de bouleau, ce dernier est très sensible à l'humidité pour son établissement (figure 3.5), ce qui est moins le cas pour l'épinette. Iijima *et al.* (2006) ont aussi trouvé que l'humidité des billes n'affectait pas les semis d'épinettes. Le bois mort, particulièrement lorsque bien décomposé, est reconnu pour avoir une très bonne capacité de rétention d'eau, ce qui en fait un substrat où l'humidité est relativement stable (Fraver *et al.* 2002). Les semis plus petits sont reconnus pour être plus sensibles à la dessiccation (Greene *et al.* 2004) et le bouleau est probablement plus vulnérable que d'autres essences à une légère baisse d'humidité en raison de sa taille. Ses racines initiales étant plus petites que celles de l'épinette, on peut supposer qu'elles pénètrent moins profondément dans le bois décomposé et sèchent plus facilement.

### 3.7.3 *La survie des semis*

Nos résultats montrent que la survie des semis, en terme de probabilité d'observer au moins un semis de 1 an en 2008, dépend de la dureté de la surface de la bille. Ceci résulte de l'établissement et peut être aussi du développement racinaire qui est facilité dans un substrat plus meuble (Narukawa *et al.* 2003). Il a été démontré que puisque les débris ligneux grossiers sont généralement surélevés et arrondis, les feuilles ont moins tendance à s'y déposer et la compétition par les plantes herbacées y est réduite (DeLong *et al.* 1997). Dans la présente étude, nous avons pu observer que la litière de feuilles sur les billes était quasi inexistante. En outre, nos résultats montrent que le recouvrement en herbacées à la surface des billes, quoi qu'inférieur au sol adjacent, affecte négativement la survie des semis de bouleaux et d'épinettes un an après l'établissement. Il en est de même pour la surface terrière en feuillus (figure 3.5 et 3.6). Dès que la surface terrière dépasse 20 mètres carrés à l'hectare, la probabilité d'observer au moins un semis de un an en 2008 décroît, et ce, tant pour le bouleau que pour l'épinette. Ces deux facteurs (recouvrement en herbacées et surface terrière en feuillus) sont liés à la disponibilité de la lumière et indiquent que celle-ci devient rapidement limitante pour la survie des semis. Globalement, la pluie de semence, l'abondance de bois mort bien décomposé et un couvert arborescent ouvert correspondent aux conditions qui favorisent la régénération en épinette et en bouleau. Ces conditions se retrouvent dans des peuplements de stade successional plus avancé. En outre, comme l'essence de bois mort ne semble pas influencer l'établissement, on peut supposer que même dans des peuplements de trembles, s'il y a suffisamment de semenciers, les débris ligneux au sol peuvent favoriser la régénération en épinette et en bouleau.

### 3.7.4 *Facteurs expliquant la présence de semis au sol*

Les semis retrouvés au sol étaient principalement des semis de sapins. L'épaisseur de feuilles en nombre de feuilles n'était probablement pas assez variable pour que l'on puisse voir un effet sur les densités de semis au sol. Le seul facteur ayant affecté l'établissement au sol est la surface terrière, car elle influence la lumière et le nombre de semenciers.

### 3.7.5 Différences sol-bille

Les espèces produisant des petites semences ont une dépendance étroite aux microsites surélevés telles les billes de bois mort (Lusk et Kelly 2003) en raison de leur difficulté à traverser la litière de feuillus (McGee 2001; Iijima *et al.* 2007) et de leur susceptibilité à la dessiccation (Greene *et al.* 2004; Wang et Kembball 2005) alors que les essences possédant des semences plus grosses sont reconnues comme étant plus résistantes aux stress et sont donc plus ubiquistes quant au substrat de germination (Takahashi 1994; Gray et Spies 1997; Simard *et al.* 2003; Mori *et al.* 2004). Les semis de sapin, dont les semences sont quatre fois plus grosses que celle de l'épinette (Galipeau *et al.* 1997), sont plus aptes à s'établir sur la litière épaisse (Knapp et Smith 1982; Christy et Mack 1984; Harmon et Franklin 1989; Nakamura 1992; Takahashi 1994; Sugita et Tani 2001) et se distribuent généralement sur une gamme de substrats plus large que l'épinette. Plusieurs études ont démontré que comparativement aux semis d'épinette, les semis de sapin ayant de plus longues racines et de plus longues tiges sont plus aptes à percer la litière de feuilles du sol forestier et à y survivre (Simard *et al.* 1998; Knapp et Smith 1982; Narukawa et Yamamoto 2001). C'est ce qui explique que le sapin soit plus ubiquiste quant à son substrat d'établissement (Simard *et al.* 1998; Takahashi 1994; Gray et Spies 1997; Mori *et al.* 2004; Sugita et Tani 2001). Nos résultats vont dans le même sens: on observe plus de semis de sapins au sol que sur les billes (figure 3.8). La plus faible densité de semis de sapin sur les billes comparativement au bouleau et à l'épinette s'explique en raison de la taille des semences de sapin. En effet, les graines de sapin étant plus grosses, elles ont moins tendance à se coincer dans les crevasses d'écorce ou les petits trous à la surface de billes (McGee 2001). De plus, les semences plus grosses du sapin ayant une surface de contact moindre avec la bille ont un apport en eau moins important qu'une petite semence d'épinette logée dans une crevasse de bois (Anderson et Winterton 1996). Par contre, les réserves d'énergie plus importantes contenues dans ses plus grosses graines permettent au sapin de mieux résister au stress hydrique et aux conditions ombragées du sol forestier que d'autres espèces ayant des plus petites semences (Kimmins 1997). Contrairement à nos résultats, certaines études (Szewczyk et Szwagrzyk 1996; Parish et Antos 2005) ont trouvé que les sapins (*Abies alba* Mill.) s'établissaient préférentiellement sur le bois mort. Il est possible que cette différence soit simplement due à une différence de taille, si les débris ligneux sont plus gros, ou bien à des conditions au sol

moins propices, par exemple, plus de compétition avec les plantes herbacées ou une litière de feuilles plus épaisse.

#### 3.7.6 Conclusion et implications sylvicoles

Parmi les multiples fonctions du bois mort dans les écosystèmes forestiers, son importance comme substrat de germination est non négligeable. En effet, en favorisant l'établissement et la survie des semis de certaines espèces (Caspersen et Saprunoff 2005), notamment l'épinette blanche et le thuya, la présence de débris ligneux au sol joue un rôle important dans la dynamique forestière et peut potentiellement influencer le taux de transition de la succession naturelle des peuplements de feuillus intolérants vers les peuplements résineux.

L'exploitation forestière influence de manière importante la dynamique du bois mort. Par exemple, la récolte des tiges de gros diamètre, la fragmentation des DLG de stade de décomposition avancé (Fraver *et al.* 2002) ainsi que la modification des conditions environnementales au sol (étendue des températures, humidité) perturbe cette dynamique. L'impact sur le bois mort est généralement proportionnel au taux de prélèvement (Stevenson *et al.* 2006). De plus, une exploitation forestière qui garde les peuplements jeunes et prélève les futurs débris ligneux grossiers, limite le recrutement en conifères (Simard *et al.* 1998).

Un aménagement forestier écosystémique devrait, en principe, prendre en compte l'importance des débris ligneux qui jonchent le sol forestier. Le maintien de la dynamique du bois mort pourrait être atteint à travers certains aménagements, notamment par les prescriptions visant le maintien et la production future de chicots à l'intérieur des peuplements aménagés et par des coupes partielles de faibles intensités.

#### 4 CONCLUSION GÉNÉRALE

Selon Matthias *et al.* (2003), les stratégies d'aménagement qui préservent la régénération préétablie constituent une alternative économique à la plantation et peuvent contribuer à maintenir plusieurs aspects de la structure et la composition des forêts naturelles. Par ailleurs, plusieurs études menées sur les coupes partielles démontrent les avantages de ces dernières. La réponse initiale à la coupe partielle dans des peuplements de tremble ou des peuplements mélangés indique qu'un prélèvement de 50 à 60 % de la surface terrière peut produire une deuxième cohorte de tremble (Brais *et al.* 2004), favorise la croissance du sapin (Bourgeois *et al.* 2004) et pourrait avoir l'effet d'accélérer la succession des peuplements équiennes vers une composition et une structure plus complexes propres aux peuplements plus anciens (Harvey *et al.* 2002). La présente étude va dans le même sens. La coupe par trouées se rapproche légèrement de la coupe totale et favorise un peu plus le tremble. Tous les traitements favorisent la croissance du sapin, mais la coupe partielle dispersée épargne davantage la régénération préétablie de sapin. On peut donc s'attendre à ce que ce traitement amène le peuplement vers une composition à dominance résineuse et accélère sa succession de façon plus importante que la coupe partielle par trouées. La réponse en croissance et en mortalité observée lors de notre étude pourrait être utilisée dans des modèles de simulation forestière pour estimer la réponse à diverses stratégies sylvicoles alternatives. Cependant, déterminer le niveau de réduction de la surface terrière pour aménager les forêts mixtes de sorte que la régénération résineuse soit favorisée au détriment du drageonnement de tremble constitue un défi (MacDonald *et al.* 2004). Enfin, puisque la Nature, dont l'aménagement écosystémique cherche à s'inspirer, façonne des mosaïques forestières diversifiées, la diversification sylvicole constitue un volet important d'aménagement et les traitements expérimentés dans le cadre de présente étude demeurent pertinents pour la forêt boréale mélangée.

Parmi les multiples fonctions du bois mort dans les écosystèmes forestiers, son importance comme substrat de germination est non négligeable. En effet, en favorisant l'établissement et la survie des semis de certaines espèces (Caspersen et Saprundoff 2005), notamment l'épinette blanche et le thuya, la présence de débris ligneux au sol joue un rôle

important dans la dynamique forestière et peut potentiellement influencer le taux de transition de la succession naturelle des peuplements de feuillus intolérants vers les peuplements résineux. L'exploitation forestière influence de manière importante la dynamique du bois mort. Par exemple, la récolte des tiges de gros diamètre, la fragmentation des DLG de stade de décomposition avancé (Fraver *et al.* 2002) ainsi que la modification des conditions environnementales au sol (étendue des températures, humidité) perturbe cette dynamique. L'impact sur le bois mort est généralement proportionnel au taux de prélèvement (Stevenson *et al.* 2006). De plus, une exploitation forestière qui garde les peuplements jeunes et prélève les futurs débris ligneux grossiers, limite le recrutement en conifères (Simard *et al.* 1998). Un aménagement forestier écosystémique devrait, en principe, prendre en compte l'importance des débris ligneux qui jonchent le sol forestier. Le maintien de la dynamique du bois mort pourrait être atteint à travers certains aménagements, notamment par les prescriptions visant le maintien et la production future de chicots à l'intérieur des peuplements aménagés et par des coupes partielles de faibles intensités

- Anderson, L. J. et A. J. Winterton. 1996. Germination as a determinant of seedling distribution among natural substrates in *Picea enelmanni* (pinaceae) and *Abies lasiocarpa* (pinaceae). *Am. J. Bot.* **83**: 112-117.
- Beach, E. W. et C. B. Halpern. 2001. Controls on conifer regeneration in managed riparian forests: Effects of seed source, substrate, and vegetation. *Can. J. For. Res.* **31**(3): 471-482.
- Béland, M., J. M. Lussier, Y. Bergeron, M. H. Longpre et M. Béland. 2003. Structure, spatial distribution and competition in mixed jack pine (*Pinus banksiana*) stands on clay soils of eastern Canada. *Annals For. Sci.* **60**(7): 609-617.
- Bergeron, Yves. 2000. Species and stand dynamics in the mixed woods of Quebec's southern boreal forest. *Ecology* **81** (6): 1500-1516.
- Bourgeois, L., C. Messier et S. Brais. 2004. Mountain maple and balsam fir early response to partial and clear-cut harvesting under aspen stands of northern Quebec. *Can. J. For. Res.* **34**(10): 2049-2059.
- Brais, S., B. D. Harvey, Y. Bergeron, C. Messier, D. Greene, A. Belleau et D. Pare. 2004. Testing forest ecosystem management in boreal mixedwoods of northwestern Quebec: Initial response of aspen stands to different levels of harvesting. *Can. J. For. Res.* **34**(2): 431-446.
- Brais, S., D. Pare et C. Lierman. 2006. Tree bole mineralization rates of four species of the Canadian eastern boreal forest: Implications for nutrient dynamics following stand-replacing disturbances. *Can. J. For. Res.* **36**(9): 2331-2340.
- Brais, S., F. Sadi, Y. Bergeron et Y. Grenier. 2005. Coarse woody debris dynamics in a post-fire jack pine chronosequence and its relation with site productivity. *For. Ecol. Manage.* **220**: 216-226.



- Brand, D. G. 1985. A competition index for predicting the vigour of planted Douglas- fir in southwestern British Columbia. *Can. J. For. Res.* **16**(1): 23-29.
- Carlson, D. W. et A. Groot. 1997. Microclimate of clear-cut, forest interior, and small openings in trembling aspen forest. *Agric.For. Meteor.* **87**(4): 313-329.
- Carter, R. E. et K. Klinka. 1992. Variation in shade tolerance of Douglas fir, western hemlock, and western red cedar in coastal British Columbia. *For. Ecol. Manage.* **55**: 87105.
- Caspersen, J. P. et M. Saprunoff. 2005. Seedling recruitment in a northern temperate forest: The relative importance of supply and establishment limitation. *Can. J. Bot.* **35**(4): 978-989.
- Chen, H. Y. H. 1997. Interspecific response of planted seedlings to light availability in interior British Columbia: survival, growth, allometric patterns, and specific leaf area. *Can. J. For. Res.* **27**: 1383-1393.
- Christy, E. J. et R. N. Mack. 1984. Variation in demography of juvenile *Tsuga heterophylla* across the substratum mosaic. *J. Ecology* **72**(1): 75-91.
- Claveau, Y., C. Messier, P. G. Comeau et K. D. Coates. 2002. Growth and crown morphological responses of boreal conifer seedlings and saplings with contrasting shade tolerance to a gradient of light and height. *Can. J. For. Res.* **32**(3): 458-468.
- Côté, S. et L. Bélanger. 1991. Variations de la régénération préétablie dans les sapinières boréales en fonction de leurs caractéristiques écologiques. *Can. J. For. Res.* **21**: 1779-1795.
- Duchesneau, R., I. Lesage, C. Messier et H. Morin. 2001. Effects of light and intraspecific competition on growth and crown morphology of two size classes of understory balsam fir saplings. *For. Ecol. Manage.* **140**(2-3): 215-225.

- Duchesneau, R. et H. Morin. 1999. Early seedling demography in balsam fir seedling banks. *Can. J. For. Res.* **29**: 1502-1509.
- Environment Canada. 2009 <http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca>
- Ferguson, D. E. et D. L. Adams. 1980. Response of advance grand fir regeneration to overstory removal in northern Idaho. *For. Sci.* **26**: 537-545.
- Filipescu, C. N. et P. Comeau. 2007a. Aspen competition affects light and white spruce growth across several boreal sites in western Canada. *Can. J. For. Res.* **37**: 1701-1713.
- Filipescu, C. N. et P. G. Comeau. 2007b. Competitive interactions between aspen and white spruce vary with stand age in boreal mixedwoods. *For. Ecol. Manage.* **247**(1-3): 175-184.
- Frank, R. M. 1990. *Abies Balsamea* (L.) Mill. \_ Balsam fir. U.S. Dep.Agric, Agric. Handb.
- Franklin, J. F., H. H. Shugart et M. E. Harmon. 1987. Tree death as an ecological process The causes, consequences, et variability of tree mortality. *BioScience* **37** No.8.
- Fraver, S., R. G. Wagner et M. Day. 2002. Dynamics of coarse woody debris following gap harvesting in the Acadian forest of central Maine, U.S.A. *Can. J. For. Res.* **32**(12): 2094-2105.
- Freedman, B., V. Zelazny, D. Beaudette, T. Fleming, S. Flemming, G. Forbes, J. S. Gerrow, G. Johnson et S. Woodley. 1996. Biodiversity implications of changes in the quantity of dead organic matter in managed forests. *Environ. Rev.* **4**(3): 238-265.
- Frey, B. R., V. J. Lieffers, S. M. Landhausser, P. G. Comeau et K. J. Greenway. 2003. An analysis of sucker regeneration of trembling aspen. *Can. J. For. Res.* **33**(7): 1169-1179.

- Galipeau, C., D. Kneeshaw et Y. Bergeron. 1997. White spruce and balsam fir colonization of a site in the southeastern boreal forest as observed 68 years after fire. *Can. J. For. Res.* **27**(2): 139-147.
- Gradowski, T., V. J. Lieffers, S. M. Landhausser, D. Sidders, J. Volney, J. R. Spence. 2010. Regeneration of *Populus* nine years after variable retention harvest in boreal mixedwood forests. *For. Ecol. Manage.* **259**: 383-389.
- Gray, A. N. et T. A. Spies. 1997. Microsite controls on tree seedling establishment in conifer forest canopy gaps. *Ecology* **78**(8): 2458-2473.
- Greene, D. F., J. Noel, Y. Bergeron, M. Rousseau et S. Gauthier. 2004. Recruitment of *Picea mariana*, *Pinus banksiana*, and *Populus tremuloides* across a burn severity gradient following wildfire in the southern boreal forest of Quebec. *Can. J. For. Res.* **34**(9): 1845-1857.
- Greene, D. F., J. C. Zasada, L. Sirois, D. Kneeshaw, H. Morin, I. Charron et M. J. Simard. 1999. A review of the regeneration dynamics of North American boreal forest tree species. *Can. J. For. Res.* **29**(6): 824-839.
- Harmon, M. E. 1986. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Adv. Eco. Res.* **15**: 133-302.
- Harmon, M. E. 1987. The influence of litter and humus accumulation and canopy openness on *Picea sitchensis* (Bong.) Carr, et *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg. Seedlings growing on logs. *Can. J. For. Res.* **17**: 1475-1479.
- Harmon, M. E. et J. F. Franklin. 1989. Tree seedlings on logs in *Picea-Tsuga* forest in Oregon and Washington. *Ecology* **70**(1): 48-59.
- Harvey, B., et S. Brais. 2007. Partial cutting as an analogue to stem exclusion and dieback in trembling aspen (*Populus tremuloides*) dominated boreal mixedwoods: implications for deadwood dynamics. *Can. J. For. Res.* **37**: 1525-1533.

- Harvey, B., A. Leduc, S. Gauthier et Y. Bergeron. 2002. Stand-landscape integration in natural disturbance-based management of the southern boreal forest. *For. Ecol. Manage.* **155**: 369-385.
- Harvey, B. D. et Y. Bergeron. 1989. Site patterns of natural regeneration following clear-cutting in northwestern Quebec. *Can. J. For. Res.* **19**: 1458-1469.
- Heinemann, K. et T. Kitzberger. 2006. Effects of position, understorey vegetation and coarse woody debris on tree regeneration in two environmentally contrasting forests of north-western Patagonia: A manipulative approach. *J. Biogeography* **33**(8): 1357-1367.
- Hély, C., Y. Bergeron, M. D. Flannigan. 2000. Coarse woody debris in the southeastern Canadian boreal forest composition and load variations in relation to stand replacement. *Can. J. For. Res.* **30**: 674-687.
- Iijima, H., M. Shibuya et H. Saito. 2007. Effects of surface and light conditions of fallen logs on the emergence and survival of coniferous seedlings and saplings. *J. For. Res.* **12**(4): 262-269.
- Iijima, H., M. Shibuya, H. Saito et K. Takahashi. 2006. The water relation of seedlings of *Picea jezoensis* on fallen logs. *Can. J. For. Res.* **36**: 664-670.
- Kimmins, J.P. 1997. *Forest Ecology: A Foundation for Sustainable Management* (2e edition). Prentice Hall, New Jersey. 596 p.
- Knapp, A. K. et W. K. Smith. 1982. Factors influencing understory seedling establishment of Engelmann spruce (*Picea engelmannii*) and subalpine fir (*Abies lasiocarpa*) in southeast Wyoming. *Can. J. Bot.* **60**: 2753-2761.
- Kneeshaw, D., Y. Bergeron. 1996. Ecological factors affecting the abundance of advance regeneration in Quebec's southwestern boreal forest. *Can. J. For. Res.* **26**: 889-898.

- Kneeshaw, D., Y. Bergeron et L. De Grandpre. 1998a. Early response of *Abies balsamea* seedlings to artificially created openings. *J. Veg. Sci.* 9(4): 543-550.
- Kneeshaw, D. D. et Y. Bergeron. 1998b. Canopy gap characteristics and tree replacement in the southeastern boreal forest. *Ecology* 79(3): 783-794.
- Kneeshaw, D. D., R. K. Kobe, K. D. Coates et C. Messier. 2006. Sapling size influences shade tolerance ranking among southern boreal tree species. *J. Ecol.* 94(2): 471-480.
- Kneeshaw, D. D., H. Williams, E. Nikinmaa et C. Messier. 2002. Patterns of above- and below-ground response of understory conifer release 6 years after partial cutting. *Can. J. For. Res.* 32(2): 255-265.
- Kohyama, T. 1980. Growth pattern of *Abies mariesii* sapling under conditions of open-growth and suppression. *Bot. Mag. Tokyo* 93: 13-24.
- Kohyama, T. 1991. A functional model describing sapling growth under a tropical forest canopy. *Funct. Ecol.* 5: 83-90.
- Lee, P. et K. Sturges. 2001. The effect of logs, stumps, and root throws on understory communities within 28-year-old aspen-dominated boreal forests. *Can. J. Bot* 79: 905-916.
- Littell, R.C., P.R. Henry et C.B. Ammerman. 1998. Statistical analysis of repeated measures data using SAS procedures. *J. Anim. Sci.* 76: 1216-1231.
- Littell, R. C., G.A. Milliken, W.W. Stroup, R.D. Wolfinger, and O. Schabenberger. 2006. SAS for mixed models, second Edition. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Logan, K. T. 1969. Growth of tree seedlings as affected by light intensity. IV. Black spruce, white spruce, balsam fir, and eastern white cedar. . *Can. For. Serv. Dep. Fish. For. Publ. n 1256*.
- Lusk, C. H. et C. K. Kelly. 2003. Interspecific variation in seed size and safe sites in a temperate rain forest. *New Phytologist* 158: 535-541.

- Margolis, H. A. et D. G. Brand. 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. *Reviews. Can. J. For. Res.* **20**: 375-390.
- Matthias, L., N. Kenkel, A. Groot, D. Kneeshaw, E. Macdonald, C. Messier, H. Morin, J. C. Ruel, G. Wang, 2003. Differential growth and mortality of advance regeneration across the Canadian boreal forest. Project report 2003/2004, Sustainable Forest Management Network
- Mazerolle, Marc J. 2006. Improving data analysis in herpetology: using Akaike's Information Criterion (AIC) to assess the strength of biological hypotheses. *Amphibia-Reptilia* [Amphibia-Reptilia]. **27**(2): 169-180.
- McGee, G. G. 2001. Stand-level effects on the role of decaying logs as vascular plant habitat in Adirondack northern hardwood forests. *J. Torrey Bot. Soc.* **128**(4): 370-380.
- McLaren, B. E., et R. A. Janke. 1996. Seedbed and canopy cover effects on balsam fir seedling establishment in Isle Royal National Park. *Can. J. For. Res.* **26**: 782-793.
- Messier, C., R. Doucet, J. C. Ruel, Y. Claveau, C. Kelly et M. J. Lechowicz. 1999a. Functional ecology of advance regeneration in relation to light in boreal forests. *Can. J. For. Res.* **29**(6): 812-823.
- Messier, C., S. Parent, M. Chengaou et J. Beaulieu. 1999b. Juvenile growth and crown morphological plasticity of eastern white pines (*Pinus strobus* L.) planted along a natural light gradient: Results after six years. *For. Chron.* **75**(2): 275-279.
- Mori, A., E. Mizumachi, T. Osono et Y. Doi. 2004. Substrate-associated seedling recruitment and establishment of major conifer species in an old-growth subalpine forest in central Japan. *For. Ecol. Manage.* **196**: 287-297.

- Motta, R., R. Berretti, E. Lingua et P. Piussi. 2006. Coarse woody debris, forest structure and regeneration in the Valbona Forest Reserve, Paneveggio, Italian Alps. *For. Ecol. Manage.* **235**: 155-163.
- Nakamura, T. 1992. Effect of bryophytes on survival of conifer seedlings in subalpine forests of central Japan. *Ecol. Res.* **7**: 155-162.
- Narukawa, Y., S. Iida, H. Tanouchi, S. Abe et S.-I. Yamamoto. 2003. State of fallen logs and the occurrence of conifer seedlings and saplings in boreal and subalpine old-growth forests in Japan. *Ecol. Res.* **18**: 267-277.
- Narukawa, Y. et S. Yamamoto. 2001. Gap formation, microsite variation and the conifer seedling occurrence in a subalpine old-growth forest, central Japan. *Ecol. Res.* **16**: 617-625.
- Narukawa, Y. et S. Yamamoto. 2003. Development of conifer seedlings roots on soil and fallen logs in boreal and subalpine coniferous forest of Japan. *For. Ecol. Manage.* **175**: 131-139.
- Parent, S. et C. Messier. 1995. Effets d'un gradient de lumière sur la croissance en hauteur et la morphologie de la cime du sapin baumier régénère naturellement. *Can. J. For. Res.* **25**(6): 878-885.
- Parish, R. et J. A. Antos. 2005. Advanced regeneration and seedling establishment in small cutblocks in high-elevation spruce-fir forest at Sicamous Creek, southern British Columbia. *Can. J. For. Res.* **35**: 1877-1888.
- Pothier, D. et M. Prévost. 2002. Photosynthetic light response and growth analysis of competitive regeneration after partial cutting in a boreal mixed stand. *Trees - Structure and Function* **16**(4-5): 365-373.
- Prévost, M. et D. Pothier. 2003. Partial cuts in a trembling aspen – conifer stand: effects on microenvironmental conditions and regeneration dynamics. *Can. J. For. Res.* **33**: pp.1-15.

- Robitaille, A. et J. P. Saucier. 1996. Land district, ecophysiographic units and areas: The landscape mapping of the ministere des ressources naturelles du Quebec. *Environ. Monitor. Assess.* **39**(1-3): 127-148.
- Ruel, J. C., C. Messier, R. Doucet, Y. Claveau et P. Comeau. 2000. Morphological indicators of growth response of coniferous advance regeneration to overstorey removal in the boreal forest. *For. Chron.* **76**(4): 633-642.
- Simard, M.-J., Y. Bergeron et L. Sirois. 2003. Substrate and litter fall effect on conifer seedling survivorship in southern boreal stands of Canada. *Can. J. Res.* **33**: 672-681.
- Simard, M. J., Y. Bergeron et L. Sirois. 1998. Conifer seedling recruitment in a south eastern Canadian boreal forest: The importance of substrate. *J. Veg. Sci.* **9**: 575-582.
- Sprugel, D. G. 1989. The relationship of evergreenness, crown architecture, and leaf size. *Am. Nat.* **133**: 465-479.
- Stevenson, S. K., M. J. Jull et B. J. Roger. 2006. Abundance and attributes of wildlife trees and coarse woody debris at three silvicultural systems study areas in the interior Cedar-Hemlock zone, British Columbia. *For. Ecol. Manage.* **223**: 176-191.
- Sugita, H. et T. Nagaike. 2005. Microsites for seedling establishment of subalpine conifers in a forest with moss-type undergrowth on Mt. Fuji, central Honshu, Japan. *Ecol. Res.* **20**: 678-685.
- Sugita, H. et M. Tani. 2001. Difference in microhabitat-related regeneration patterns between two subalpine conifers, *Tsuga diversifolia* and *Abies mariesii*, on Mount Hayachine, northern Honshu, Japan. *Ecol. Res.* **16**: 423-433.
- Szewczyk, J. et J. Szwagrzyk. 1996. Tree regeneration on rotten wood and on soil in old-growth stand. *Vegetatio* **122**: 37-46.
- Takahashi, K. 1994. Effect of size structure, forest floor type and disturbance regime on tree species composition in a coniferous forest in Japan. *J. Ecology* **82**: 769-773.



- Takahashi, M., Y. Sakai, R. Ootomo et M. Shiozaki. 2000. Establishment of tree seedlings and water-soluble nutrients in coarse woody debris in a old-growth Picea-Abies forest in Hokkaido, northern Japan. *Can. J. For. Res.* **30**: 1148-1155.
- Tucker, G. F., T. M. Hinckley, J. W. Leverenz et S. M. Jiang. 1987. Adjustments of foliar morphology in the acclimation of understory Pacific Silver fir following clearcutting. *For. Ecol. Manage.* **21**: 249-268.
- VanWagner, C.E. 1982. Practical aspects of the line intersect method. Petawawa National Forestry Institute, Can. For. Serv. Inf. Rep. PI-X-12.
- Vincent, J. S. et L. Hardy. 1977. L'évolution et l'extension des lacs glaciaires Barlow et Ojibway en territoire québécois. *Geogr. Phys. Quat.* **31**: 357-372.
- Wang, G. G. et K. J. Kembell. 2005. Balsam fir and white spruce seedling recruitment in response to understory release, seedbed type and litter exclusion in trembling aspen stands. *Can. J. For. Res.* **35**: 667-673.
- Waring, R. H. 1991. Response of Evergreen Trees to Multiple Stresses. Pp? *Dans Response of Plants to Multiple Stresses*. Academic Press, New York.
- Zhao, D., B. Borders, M. Wilson et S. L. Rathbun. 2006. Modeling neighborhood effects on the growth and survival of individual trees in a natural temperate species-rich forest. *Ecol. Model.* **196**(1-2): 90-102.
- Zielonka, T. 2006. When does dead wood turn into a substrate for spruce replacement? *J. Veg. Sci.* **17**: 739-746.