

LE PIN BLANC

REVUE DE LITTÉRATURE

Version 1.1

Philippe Dan Vlasiu, ing. f.

Philippe Nolet, M.Sc.

Frédéric Doyon, ing. f., M.Sc., Ph. D.



En collaboration avec

Industries Davidson inc.

et

Forêt Québec – Unité de gestion de la Coulonge (U.G. 71)

Juillet 2001

REMERCIEMENTS

Cette revue de littérature a été réalisée grâce à la participation financière de la Scierie Davidson, du Conseil de gestion de la Forêt de l'Aigle et du Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier de Forêt Québec.

Pour leur collaboration, leurs suggestions, leurs corrections, ainsi que pour leurs encouragements et leur disponibilité, l'Institut québécois d'aménagement de la forêt feuillue tient à remercier les personnes suivantes (en ordre alphabétique) :

Marilou Beaudet, Ph. D.
Denis Bouillon, ing. f.
Serge Fiola, ing. f.
Michel Huot, ing. f., M.Sc.
Andrée Morneault, M.Sc.
Alison Munson, Ph.D.
Anick Patry, ing. f.
Daniel Pin, ing. f., M.Sc.
Patricia Raymond, ing. f., M.Sc.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
TABLE DES MATIÈRES	II
LISTE DES TABLEAUX.....	V
LISTE DES FIGURES	VI
1 INTRODUCTION.....	7
2 PROBLÉMATIQUE	8
3 AUTÉCOLOGIE DU PIN BLANC.....	9
3.1 CURRICULUM.....	9
3.1.1 Taxonomie	9
3.1.2 Variétés	9
3.1.3 Dimensions	9
3.1.4 Longévité	10
3.1.5 Morphologie.....	10
3.2 HABITAT.....	14
3.2.1 Aire de distribution	14
3.2.2 Climat.....	15
3.2.3 Sol.....	15
3.3 EXIGENCES ÉCOLOGIQUES	16
3.3.1 Eau	16
3.3.2 Lumière.....	16
3.3.3 Éléments nutritifs.....	17
3.4 ADAPTATION AU RÉGIME DES PERTURBATIONS NATURELLES	18
3.5 SUCCESSION ET ASSOCIATIONS VÉGÉTALES	19
4 AGENTS NUISIBLES.....	20
4.1 AGENTS BIOTIQUES.....	20

4.1.1	Charançon du pin blanc	20
4.1.2	Rouille vésiculeuse du pin blanc.....	27
4.1.3	Carie blanche alvéolaire.....	33
4.1.4	Bleuissement.....	34
4.1.5	Vertébrés.....	34
4.2	AGENTS ABIOTIQUES	35
4.2.1	Facteurs climatiques.....	35
4.2.2	Pollution.....	35
5	ÉTABLISSEMENT ET CROISSANCE.....	36
5.1	ÉTABLISSEMENT.....	36
5.2	CROISSANCE DES SEMIS	36
5.3	CROISSANCE DU STADE DE GAULIS AU STADE ADULTE	37
6	AMÉNAGEMENT DU PIN BLANC.....	38
6.1	CLASSIFICATION DES SITES POUR L'AMÉNAGEMENT.....	38
6.2	RÉCOLTE	40
6.2.1	Coupe totale (et avec réserve de semenciers)	40
6.2.2	Coupe par bandes.....	43
6.2.3	Coupe progressive d'ensemencement.....	45
6.2.4	Coupe par trouées	48
6.2.5	Coupe à diamètre limite	53
6.2.6	Coupe de jardinage	55
6.3	ENTRETIEN ET ÉDUCATION	56
6.3.1	Nettoisement et dégagement.....	57
6.3.2	Dépressage	58
6.3.3	Éclaircie	59
6.3.4	Coupe d'amélioration.....	59
6.3.5	Élagage.....	61
6.4	PRÉPARATION DES SITES.....	63
6.4.1	Préparation de terrain mécanique.....	64

6.4.2	Brûlage dirigé.....	64
6.5	RÉGÉNÉRATION	65
6.5.1	Régénération naturelle	65
6.5.2	Régénération artificielle.....	66
6.6	ÂGE D'EXPLOITABILITÉ	70
6.7	DOMMAGES ASSOCIÉS AUX OPÉRATIONS DE RÉCOLTE	71
7	BIBLIOGRAPHIE	74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Critères à respecter lors de l'application d'une coupe totale avec réserve de semenciers dans le cadre d'un aménagement visant à régénérer le pin blanc.	42
Tableau 2 : Critères à respecter lors de l'application d'une coupe par bandes dans le cadre d'un aménagement visant à régénérer le pin blanc.	45
Tableau 3 : Critères à respecter lors de l'application de la coupe progressive d'ensemencement dans le cadre d'un aménagement visant à régénérer le pin blanc.	48
Tableau 4 : Critères à respecter lors de l'application d'une coupe par trouées dans le cadre d'un aménagement visant à régénérer le pin blanc.	52
Tableau 5 : Critères à respecter lors de l'application d'une coupe à diamètre limite dans le cadre d'un aménagement visant à régénérer le pin blanc.	54
Tableau 6 : Critères à respecter lors de l'application de la coupe de jardinage dans le cadre d'un aménagement visant à régénérer le pin blanc.	56
Tableau 7 : Détails des résultats d'une étude portant sur les blessures d'exploitation les plus sérieuses chez les conifères (Adapté de Whitney, 1991).	72

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Aire de distribution du pin blanc (Adaptée de Wendel et Smith, 1990).	14
Figure 2 : Cycles de feux en relation avec la composition des espèces des peuplements forestiers. Adaptée de Frelich, 1992.	19
Figure 3 : Zones de susceptibilité du pin blanc aux attaques du charançon au Québec. Adaptée de Boulet, 1995.	22
Figure 4 : Représentation schématique des termes employés pour décrire l'élagage des tiges de pin blanc attaquées par le charançon. Position de la flèche terminale (F) et des latérales supérieures (LS) ou inférieures (LI) par rapport au point nodal où se fait l'étêtage du pin blanc. La localisation du premier internode (I) est également indiquée. Adaptée de Lavallée, 1989.	26
Figure 5 : Zones de susceptibilité du pin blanc à la rouille vésiculeuse au Québec. Adaptée de Lavallée, 1986.	28
Figure 6 : Relations entre les caractéristiques de sol, la productivité et les problèmes liés à la compétition et à la rouille vésiculeuse.	39

1 INTRODUCTION

Le pin blanc est une espèce dont les exigences écologiques sont complexes et plusieurs professionnels sont aux prises avec des problèmes relatifs à l'aménagement de cette essence. La planification adéquate de l'aménagement forestier nécessite l'accès à une importante quantité d'information. Toutefois, cette information provient souvent de sources variées et est parfois difficile à obtenir. Pour pallier ce manque d'information, l'Institut québécois d'aménagement de la forêt feuillue a colligé une bonne partie de l'information disponible sur le pin blanc dans le cadre de cette revue de littérature.

Dans le prochain chapitre (Chapitre 2), nous présenterons brièvement au lecteur la problématique particulière que pose l'aménagement du pin blanc. Nous ferons référence à l'impact de l'exploitation forestière et du contrôle des feux de forêts sur la régénération naturelle du pin blanc. Nous aborderons aussi la problématique présentée par les agents nuisibles.

Le Chapitre 3 traitera ensuite de l'autécologie du pin blanc. Nous aborderons successivement la taxonomie et la morphologie de cette essence, les caractéristiques de son habitat, ses exigences écologiques et le dynamisme des peuplements de pin blanc. Ces connaissances biologiques et écologiques sont essentielles pour comprendre l'adaptation du pin blanc aux conditions de site et sa réponse aux interventions sylvicole.

Dans le chapitre suivant (Chapitre 4), nous aborderons les facteurs biotiques et abiotiques qui peuvent être nuisibles au pin blanc. Une attention particulière sera portée au charançon du pin blanc (*Pissodes strobi* [Peck]) et à la rouille vésiculeuse (*Cronartium ribicola* J.C. Fischer). En effet, depuis leur premier signalement, cet insecte et cet agent pathogène occasionnent des problèmes importants pour la culture et l'aménagement du pin blanc dans l'ensemble de son aire de distribution (Houseweart et Knight 1985; Wendel et Smith 1990).

Par la suite, le Chapitre 5 portera sur l'établissement et la croissance du pin blanc, du stade de semis à celui d'arbre adulte. Une attention particulière sera accordée à la régénération en relation avec les conditions environnementales.

Finalement, le dernier chapitre présentera les différentes interventions sylvicoles relatives à l'aménagement du pin blanc. On y traitera de la classification des sites, de l'influence des pratiques de récolte sur la régénération et le développement du pin blanc, des travaux d'entretien et d'éducation, ainsi que de la préparation des sites. Le lecteur y trouvera aussi de l'information sur l'âge d'exploitabilité du pin blanc et sur les dommages associés aux opérations de récolte.

Par ce travail, nous voulons rendre accessible une information de base qui permettra de mettre à jour les connaissances des intervenants forestiers et facilitera la prise de décision dans l'aménagement du pin blanc. Nous invitons le lecteur à consulter ce document en souhaitant que cette synthèse pourra contribuer à redonner au pin blanc la place qui lui revient dans notre paysage forestier.

2 PROBLÉMATIQUE

Le pin blanc est une essence forestière très appréciée et les activités de récolte et de transformation qui lui sont associées génèrent des retombées économiques importantes. Cette ressource est toutefois menacée en raison de la difficulté qu'ont les forestiers à ré-établir les peuplements de pin blanc. Plusieurs indices nous portent à croire que l'importance du pin blanc dans le paysage a diminué de façon importante depuis le début de son exploitation.

À l'époque de la colonisation, la coupe sélective des tiges de grande dimension pour la production de mâts de navire a contribué à réduire considérablement la quantité et la qualité des arbres semenciers, et ce, particulièrement le long des axes de développement (Aird 1986). Depuis le début du vingtième siècle, l'exploitation forestière est devenue une industrie de plus en plus importante, en partie dû à l'augmentation de l'efficacité de la récolte grâce à la mécanisation des opérations.

On a assisté au cours des dernières décennies à la mise en place de mesures de protection contre les feux de forêt. Ces mesures ont eu pour effet de diminuer l'importance relative des perturbations naturelles (par rapport à l'exploitation forestière) dans le renouvellement des peuplements de pin blanc. Or, la dynamique naturelle de renouvellement des peuplements de pin blanc a de tout temps été liée aux feux de forêt. Les feux sont nécessaires à l'établissement des semis de pin blanc car ils ouvrent le couvert, éliminent temporairement la compétition, contrôlent les populations d'insectes nuisibles et préparent des lits de germination adéquats. En l'absence de ces perturbations naturelles majeures que sont les feux, la régénération naturelle du pin blanc dépend de la présence de conditions écologiques sèches et de perturbations créées par le chablis et les activités forestières. En diminuant l'importance des feux en forêt, on permet aux espèces feuillues d'envahir progressivement les sites les plus favorables pour la croissance du pin blanc et de l'y déloger sans presque aucun espoir de retour naturel pour ce dernier.

Pour remédier aux problèmes de régénération du pin blanc, plusieurs méthodes ont été expérimentées afin de régénérer artificiellement le pin blanc en milieu découvert. Ces méthodes se sont fréquemment avérées désastreuses en raison de la prolifération du charançon du pin blanc. De plus, l'introduction au début du siècle d'un autre agent nuisible, la rouille vésiculeuse du pin blanc, est venue compliquer la situation et réduire considérablement les chances de régénérer artificiellement le pin blanc avec succès. Malgré ces problèmes, la croissance rapide du pin blanc, la taille imposante de son fût et les qualités de son bois font de cet arbre une essence commerciale très intéressante à aménager et à réintroduire sur les sites qui lui sont les plus favorables dans son aire de distribution.

3 AUTÉCOLOGIE DU PIN BLANC

La connaissance de la biologie d'une essence est essentielle pour comprendre son adaptation aux conditions des sites ainsi que sa réaction face aux interventions sylvicoles. La production des graines, leur germination et leur établissement initial constituent des étapes particulièrement critiques dans la vie d'un arbre et dans le développement du peuplement à aménager (Stearns 1992). Pour le pin blanc, essence dont la régénération peut s'avérer problématique, la connaissance de ses caractéristiques biologiques et écologiques permettra de sélectionner le traitement le plus approprié aux conditions du site et le moment le plus propice pour son application.

3.1 Curriculum

3.1.1 Taxonomie

Famille : Pinacées

Nom latin : *Pinus strobus* L.

Nom français : Pin blanc (Pin du Lord, Pin Weymouth, Pin jaune)

Nom anglais : Eastern White Pine (Northern White Pine, Northern Pine)

3.1.2 Variétés

Il existe deux variétés bien connues de pin blanc. La variété typique aux forêts tempérées, *Pinus strobus* var. *strobus*, ou pin blanc de l'Est, compose l'ensemble de nos peuplements nordiques. La variété *Pinus strobus* var. *chiapensis*, ou pin blanc du Chiapas, est originaire des montagnes du sud du Mexique et du Guatemala. Quatre autres variétés de pin blanc sont aussi reconnues sur le marché de l'horticulture (Wendel et Smith 1990).

Le pin blanc de l'Est peut se croiser avec plusieurs autres pins : le pin blanc de l'Ouest (*Pinus monticola*), le pin des Balkans (*Pinus peuce*), le pin bleu (*Pinus griffithii*), le pin du Japon (*Pinus parviflora*), le pin flexible (*Pinus flexilis*) et le pin du Mexique (*Pinus ayacahuite*) (Wendel et Smith 1990). Chacun de ces hybrides présente des variations plus ou moins grandes de vigueur, de vitesse de croissance et de résistance au froid, mais aucune résistance efficace n'a encore été trouvée pour contrer les dommages de la rouille vésiculeuse et du charançon du pin blanc (Zsuffa 1985; Laflamme 1998; Lavallée et Daoust 1998).

3.1.3 Dimensions

Le pin blanc est le plus imposant des conifères du Nord-Est américain. La hauteur moyenne du pin blanc est de 30 m avec un diamètre moyen de 100 cm (Farrar 1996). Plus au sud, sa

hauteur peut atteindre 46 m et son diamètre 170 cm (Wendel et Smith 1990). Ces dimensions sont toutefois faibles en comparaison à celles de certains sujets rencontrés par les premiers bûcherons au début de la colonisation. On rapporte, en effet, que les dimensions du pin blanc pouvaient atteindre 75 m de hauteur et 180 cm de diamètre (Harlow & Harrar 1969 ; Collingwood et Brush 1984).

En milieu ouvert, les jeunes arbres produisent de larges couronnes de forme conique dont les branches vivantes, régulièrement verticillées, touchent presque le sol. En milieu forestier, particulièrement dans les forêts de feuillus tolérants, les pins blancs d'un âge plus avancé produisent souvent de hauts troncs de forme presque cylindrique, généralement dénués de branches sur les deux tiers de leur longueur. Leur couronne présente alors une silhouette largement ovale résultant de la présence de quelques longues branches robustes, presque horizontales, et d'un sommet tabulaire composé de branches dressées. Cette silhouette générale prend une forme asymétrique sous l'effet des vents dominants. Généralement, en forêt feuillue, la cime des vieux sujets surpasse le peuplement de 10 à 15 m (Harlow et Harrar 1969; Wendel et Smith 1990; Farrar 1996).

3.1.4 Longévité

Comparé aux espèces qui lui sont associées, le pin blanc vit relativement longtemps. Selon Stearns (1992), la limite d'âge du pin blanc est d'approximativement 400 ans, mais certains sujets peuvent parfois atteindre plus de 600 ans. Wendel et Smith (1990) sont plus conservateurs et établissent à 200 ans l'âge généralement atteint par le pin blanc lorsqu'aucune perturbation ne vient réduire sa croissance. Ces mêmes auteurs établissent à plus de 450 ans son âge maximum. En Ontario, devant la prépondérance des risques de carie liés à l'âge des peuplements de pin blanc, un âge pathologique de 160 à 170 ans a été établi pour cette essence (White 1953 *dans* Stiehl 1985).

3.1.5 Morphologie

3.1.5.1 Écorce

L'écorce des branches et des jeunes troncs est mince, lisse et d'une couleur allant du gris verdâtre au brun verdâtre. Avec l'âge, l'écorce se fissure, devient plus foncée, forme des sillons profonds et s'alourdit. Son épaisseur peut alors atteindre 10 cm et constitue un moyen de protection lors de feux de forêt. L'écorce du pin blanc peut être employée en tant qu'astringent et expectorant (Wendel et Smith 1990). Howard (1985) rapporte aussi que durant les mois de mai et juin la partie interne de l'écorce est bonne à mâcher et que les anciens en faisaient des lanières d'écorce confites en Nouvelle-Angleterre.

3.1.5.2 Aiguilles

Les aiguilles du pin blanc sont d'un vert bleuâtre et de forme triangulaire. Leur longueur varie de 5 à 15 cm. Elles apparaissent en faisceau de cinq aiguilles retenues à la base par une gaine qui disparaît au début de leur premier été (Farrar 1996). La division cellulaire des bourgeons commence en avril et leur éclosion s'effectue en mai. La croissance des aiguilles peut se poursuivre jusqu'à la mi-août (Owston 1969).

Wetzel et Burgess (1994) ont observé que les aiguilles du pin blanc ont une longévité différente selon les conditions de croissance dans lesquelles l'arbre se trouve. En milieu ouvert, les aiguilles tombent généralement au bout de deux ans, alors que sous couvert leur limite de persistance est de quatre ans.

Les déficits en eau affectent la photosynthèse de l'année courante et ont des répercussions lors des années ultérieures. Par exemple, les déficits en eau survenant tard dans la saison de croissance influencent, au printemps suivant, la dimension des nouvelles aiguilles qui sont alors plus petites. Les aiguilles d'un an sont essentielles pour l'élongation des pousses au printemps. En effet, en début de saison et jusqu'au plein développement des nouvelles aiguilles, les aiguilles d'un an contribuent à la croissance des nouvelles pousses en augmentant leur activité photosynthétique et en libérant une partie de leurs réserves énergétiques (Wetzel et Burgess 1994).

Dans une étude sur le potentiel de germination de différents types de litière, Ahlgren et Ahlgren (1981) rapportent que les aiguilles de pin blanc forment les lits de germination les plus favorables à la germination et à la croissance des semis de pin blanc.

3.1.5.3 Racines

La forme et la distribution du système racinaire du pin blanc varient avec les caractéristiques du sol telles que la profondeur, le drainage, la texture et la présence de poches ou de couches indurées d'argile. Sur les sols minces ou mal drainés, le système racinaire du pin blanc est peu profond. Bien que le système racinaire soit généralement bien ancré, lorsque le sol est saturé le chablis peut être courant (Stearns 1992). Une racine pivot est toujours présente dans le système racinaire du pin blanc, mais généralement peu développée. Habituellement, de trois à cinq racines de forte dimension s'étendent latéralement. À partir de ces racines latérales, des racines descendent verticalement à la recherche d'humidité jusqu'à une profondeur de 3 à 4 m, et ce, surtout dans les sols à texture grossière (Chapeskie *et al.* 1989; Wendel et Smith 1990). Un sol de moins de 60 cm contenant des obstructions (roc, till compacté, couche indurée) réduit généralement la productivité du pin blanc, bien que son système racinaire soit capable de fortes extensions latérales pour profiter des poches éparses de sol plus profond.

La croissance des racines du pin blanc commence plus tôt et se termine plus tard dans l'année que celle des autres tissus de l'arbre. La croissance des racines ralentit temporairement ou s'arrête complètement durant le milieu de l'été, en raison peut-être de la sécheresse des sols (Horton et Bedell 1960).

Wendel et Smith (1990) mentionnent que les greffes racinaires sont courantes dans les peuplements purs de pin blanc. Dans une étude portant sur cinq peuplements, 30 à 67 % des

arbres présentaient des greffes racinaires, et ce, sans relation directe avec l'âge du peuplement, les caractéristiques du sol ou la classe de drainage. Ces liens racinaires semblent prendre forme après l'établissement des semis, vers l'âge de dix ans (Wendel et Smith 1990). Les greffes racinaires pourraient améliorer l'apport d'eau et d'éléments nutritifs des arbres résiduels ou leur permettre une plus grande croissance lorsque leur photosynthèse est limitée (Bormann 1961; Gillespie et Hocker 1986). Ces systèmes racinaires partagés et étendus pourraient servir à augmenter la stabilité des arbres croissant sur des sols minces et à limiter l'invasion d'un site par d'autres espèces suite à l'ouverture du couvert (Stearns 1992). Dans un peuplement qui avait subi une coupe partielle 10 ans auparavant, plus de 25 % des souches des pins blancs abattus étaient encore vivantes, suggérant la présence de greffes racinaires (Bormann 1961). Dû à la présence de tels liens racinaires, l'application de produits chimiques à un arbre peut affecter l'état des arbres environnants (Bormann 1961).

En pépinière, les racines des semis du pin blanc sont souvent colonisées par des mycorrhizes de type inconnu alors que celles des arbres en forêt sont colonisées par des ectomycorrhizes. L'impact des mycorrhizes sur la croissance n'est pas encore parfaitement établi, leur influence variant de positive à nulle selon les études (Wetzel et Burgess 1994).

3.1.5.4 Fleurs et fruits

Le pin blanc est une espèce monoïque, les fleurs mâles et femelles étant normalement présentes sur le même arbre. Leur proportion varie toutefois selon l'âge des arbres : une plus forte proportion de fleurs mâles et une plus grande production de pollen semblent être l'apanage des individus plus vieux (diamètre supérieur à 60 cm) alors que les fleurs femelles et la production de graines sont communes à l'ensemble des individus (Wendel et Smith 1990; Pinto *et al.* 1998a).

Une bonne production de semences commence généralement entre 20 et 30 ans, culmine entre 50 et 150 ans, et diminue par la suite (Stiell 1959b; OMNR 1973; Lancaster et Leak 1978; Wendel et Smith 1990; Buse 1992). Les pins blancs ont une production de graines qui varie d'une année à l'autre et d'un individu à un autre, mais il est établi que les arbres dominants sont les meilleurs producteurs de graines (Pinto *et al.* 1998a). En moyenne, une bonne année semencière survient tous les 3 à 5 ans et une très bonne année, tous les 10 à 12 ans (Farrar 1996; Pinto *et al.* 1998a).

Un bon arbre semencier de pin blanc possède les caractéristiques suivantes (Pinto 1992; Pinto *et al.* 1998b) :

- il fait partie de la classe des dominants ou des codominants;
- il présente une qualité supérieure associée à un fût unique, droit, libre de branches et sans évaselement excessif à sa base;
- il est sain, sans indices de maladies et possède une couronne bien formée et fournie dont les aiguilles sont présentes sur une bonne partie des branches;
- il a un rapport diamètre/hauteur de moins de 1:80;

- il a fait ses preuves en tant que bon arbre semencier (arbre plus);
- son âge varie entre 50 et 150 ans, et son écorce présente habituellement des sillons serrés, signes d'une bonne croissance

Ces critères permettent généralement d'assurer une forte production de graines, de transmettre un potentiel génétique de qualité à la régénération et, peut-être, de préserver les individus présentant une résistance inscrite génétiquement à la rouille vésiculeuse et au charançon du pin blanc. Il va de soi que la disponibilité de telles tiges de qualité n'est pas égale partout et que le choix des arbres semenciers est alors basé sur la présence sur une même tige du plus grand nombre de ces critères.

Le cycle de reproduction du pin blanc couvre une période de trois ans. La formation des fleurs et leur différenciation en fleurs mâles et femelles se fait durant la première année. Les fleurs ne sont toutefois pas encore visibles. Durant les mois de mai et de juin de la deuxième année, les fleurs mâles, de couleur jaune, apparaissent sur les jeunes pousses des branches basses. Quelques semaines plus tard, les fleurs femelles, de couleur rose et pourpre, apparaissent sur les jeunes pousses des hautes branches. La pollinisation se fait durant cette période, soit vers la fin juin, et les fleurs mâles tombent peu après (Buse 1992). À la fin de cette deuxième année, les cônes femelles, de couleur verte et de port vertical, atteignent approximativement 3 cm. Tôt dans la troisième année, les cônes, en augmentant de poids, s'inclinent pour devenir pendants et changent progressivement de couleur, passant d'un vert jaunâtre à un brun pâle. Ils atteignent généralement leur maturité au cours du mois d'août et s'ouvrent durant le mois de septembre pour libérer leurs graines (Collingwood et Brush 1984). Les cônes ont alors de 8 à 20 cm de longueur et contiennent en moyenne de 50 à 80 écailles portant chacune 2 graines ailées d'une longueur totale d'environ 2 cm (Farrar 1996). Un pin blanc, lors d'une bonne année semencière, peut produire environ 65 000 graines viables, soit environ 1.8 hl par arbre (Buse 1992).

Habituellement, la majorité des graines tombent autour de l'arbre, à l'intérieur d'une distance équivalente à sa hauteur (Horton et Bedell 1960). Dans les peuplements purs, certaines graines peuvent atterrir jusqu'à 60 m de l'arbre producteur et, en milieu ouvert, atteindre des distances de plus de 210 m (Wendel et Smith 1990). La saison hivernale stratifie naturellement les graines qui germeront au printemps. Pour une stratification artificielle, il est nécessaire de garder les graines pendant 60 jours à une température variant entre 2 et 5 °C (Pinto *et al* 1998a). En moyenne, la capacité de germination des graines est d'environ 75 % (Buse 1992). La majorité des graines de pin blanc ne survivent pas plus d'une année sur le parterre forestier (Fisher et Terry 1920; Thomas et Wein 1985).

3.2 Habitat

3.2.1 Aire de distribution

Au Canada, l'aire de distribution du pin blanc couvre les îles de Terre-Neuve et d'Anticosti, la Gaspésie et les provinces des Maritimes, puis s'étend vers l'ouest jusqu'à la pointe sud-est du Manitoba (Figure 1). Le Lac Saint-Jean, au Québec, et le haut du Lac Supérieur, en Ontario, marquent la limite nordique de distribution du pin blanc. Aux États-Unis, l'aire de distribution de cette essence couvre les états du Minnesota et du Michigan, s'étend à ceux de la Nouvelle-Angleterre et se prolonge au sud jusqu'en Georgie (Pinto *et al.* 1998a, Wendel et Smith 1990).

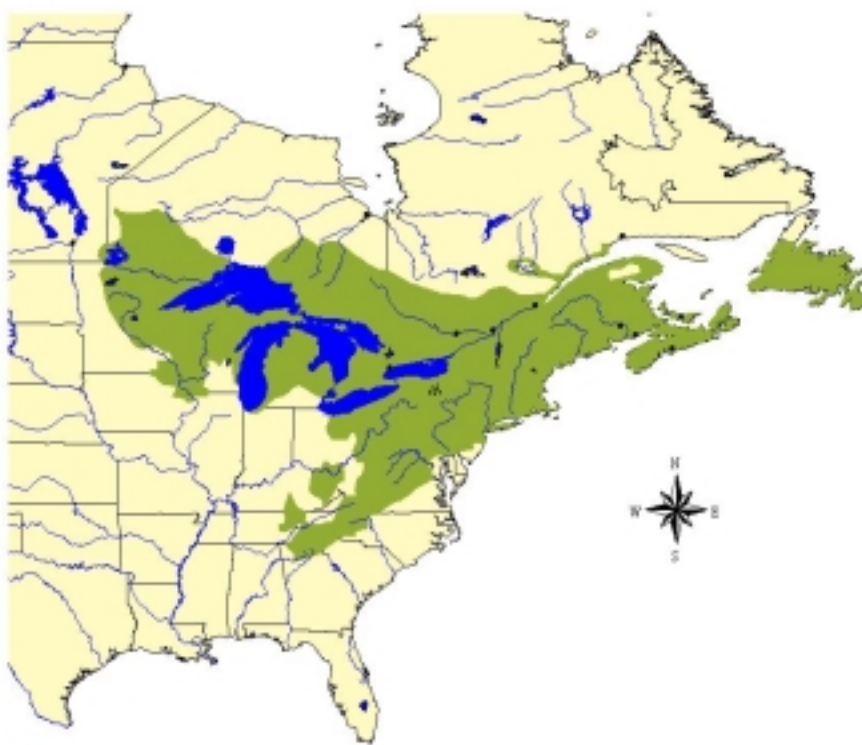


Figure 1 : Aire de distribution du pin blanc (Adaptée de Wendel et Smith, 1990).

Au Québec, la limite nord de l'aire de distribution du pin blanc s'étend, d'ouest en est, du Lac Abitibi au comté de Charlevoix. Elle s'allonge aussi en une première bande le long du fleuve Saint-Laurent, sur son côté nord jusqu'à Baie-Comeau, et en une seconde bande, le long de la rivière Saguenay. On retrouve également quelques pins blancs au nord-est de l'île d'Anticosti (Beaulieu 1998). Les plus grandes concentrations de pins blancs sont situées dans le bassin versant de la rivière Outaouais, dans les régions administratives de l'Outaouais (07) et de l'Abitibi-Témiscamingue (08) (Brown 1994).

3.2.2 Climat

Un climat frais et humide caractérise l'ensemble de l'aire de distribution du pin blanc (Wendel et Smith 1990). En Ontario et au Québec, les deux provinces où sont situées les plus fortes concentrations de pinèdes blanches, les caractéristiques descriptives moyennes du climat sont des températures annuelles variant de 0,1 à 9,4 °C, une saison de croissance variant de 171 à 243 jours, des précipitations annuelles variant de 557 à 1148 mm et des précipitations estivales variant de 196 à 304 mm (MacKey *et al.* 1996 dans Chambers et Merchant 1998). Ces valeurs peuvent varier selon la latitude, la topographie, l'altitude, la présence de plans d'eau et le type de sol, tous ces facteurs créant localement des conditions microclimatiques plus ou moins favorables à la croissance du pin blanc. Généralement, la productivité du pin blanc décroît en progressant vers le nord, cette tendance étant plus marquée sur les sites moins fertiles dans la partie septentrionale de son aire de distribution (Chapeskie *et al.* 1989).

3.2.3 Sol

Le pin blanc peut s'adapter à une grande variété de sols, allant des crêtes rocheuses et sableuses aux tourbières à sphaignes (Mader 1985 ; Wendel et Smith 1990; Farrar 1996). L'apport d'eau, la texture et l'espace disponible pour les racines sont, au niveau du sol, les facteurs qui affectent le plus le potentiel de production du pin blanc. L'apport d'éléments nutritifs et l'alcalinité du sol sont pour cette essence des facteurs d'importance secondaire. Un pH variant de 4,7 à 7,3 est considéré comme optimal pour le pin blanc, bien que sa croissance soit satisfaisante avec un pH de 4,0 à la surface du sol (Chapeskie *et al.* 1989).

On retrouve fréquemment le pin blanc sur des sites de qualité moyenne à pauvre, comme les sables et les loams sableux bien drainés (Wendel et Smith 1990). Cependant, le pin blanc a généralement une meilleure croissance sur les sols moins bien drainés, sur les sols possédant un bon potentiel de rétention d'humidité et sur les sols dont le contenu en pierres est plus fort dans les horizons de surface et moins fort dans les sous-horizons (Mader 1985). La croissance la plus forte du pin blanc s'effectue sur des sites riches présentant des sols de texture plus fine et de drainage plus lent. Cependant, la compétition exercée par les feuillus est plus forte sur ces sites, ce qui limite drastiquement l'établissement et le développement de la régénération de pin blanc (OMNR 1973).

Le pin blanc se retrouve sur presque tous les sols présents dans son aire de distribution, mais il compétitionne généralement mieux sur les sols sableux, bien drainés, dont l'indice de qualité de station varie de pauvre à moyen. Ces sols permettent une bonne croissance du pin blanc tout en limitant celle des feuillus (Wendel et Smith 1990). Sur des sites sableux, le pin blanc se régénère naturellement, compétitionne facilement et peut être aménagé efficacement et économiquement. Sur des sols de texture moyenne et plus fine, le pin blanc n'est pas aussi dominant naturellement, mais il est extrêmement productif (Mader 1985). Lorsque la compétition exercée par les feuillus n'est pas trop intense durant la période d'établissement du pin blanc, on peut retrouver cette essence sur des loams sableux et des loams limoneux dont le drainage varie de bon à imparfait. Le pin blanc a ainsi envahi de vieilles friches agricoles, des brûlis et des chablis (Wendel et Smith 1990). Il présente habituellement une moins bonne

croissance sur les sols très argileux, les bas de pentes mal drainés et les dépressions (Wendel et Smith 1990).

3.3 Exigences écologiques

3.3.1 Eau

Le pin blanc peut croître dans des conditions d'humidité très variées. On note sa présence tant dans des fondrières humides que dans des plaines sableuses et arides, ou encore sur des sommets de crêtes rocheuses (Horton et Brown 1960). Bien que le manque d'eau en début de saison limite sa croissance en affectant la photosynthèse et le développement des nouveaux tissus, c'est surtout lors des premiers stades de l'établissement, durant la germination et le développement des semis, que le manque d'eau est vraiment critique, le système racinaire étant alors peu développé (Ahlgren et Ahlgren 1981; Elliott et Vose 1993 ; Wetzel et Burgess 1994). Suite à l'établissement, les racines étant plus développées, le stress hydrique devient un facteur secondaire en comparaison à la compétition ou au manque de lumière (Pacala *et al.* 1994 ; Elliott et Vose 1995).

Le taux d'accroissement du pin blanc est habituellement supérieur sur les stations mésiques. Cependant, la structure et la richesse en éléments nutritifs d'un sol sur une station plutôt sèche peuvent aussi permettre une excellente croissance au pin blanc, plus particulièrement si le sol est propice à un enracinement profond et étendu. Dans les conditions les plus sèches et les plus humides, la croissance est toutefois retardée.

3.3.2 Lumière

Le pin blanc est reconnu comme étant une essence semi-tolérante à l'ombre (Logan 1959; Horton et Bedell 1960; Lancaster et Leak 1978; Stiell 1985; Frelich 1992; Stearns 1992; Pacala *et al.* 1994; Wetzel et Burgess 1994; Farrar 1996). L'adaptation physiologique du pin blanc à différents niveaux de lumière varie suivant le stade de développement de l'arbre. En l'absence d'autres facteurs limitants, un ensoleillement variant de 20 à 25 % est généralement nécessaire pour assurer la survie des semis. La croissance est toutefois encore possible, bien que faible, sous une intensité lumineuse de seulement 7 % du plein ensoleillement (Logan 1959; Atkins 1957 et Smith 1940 *dans* Pinto *et al.* 1998a). Messier *et al.* (1999) ont observé une augmentation de la croissance en hauteur et en diamètre avec l'augmentation de la disponibilité en lumière, jusqu'à environ 40 % de pleine lumière. Lors des cinq premières années, la croissance en hauteur augmente avec l'augmentation de l'intensité lumineuse, jusqu'à 45 % du plein ensoleillement (Wetzel et Burgess 1994). Par la suite, la pleine croissance en hauteur nécessite entre 45 et 55 % du plein ensoleillement (Logan 1959; Stiell 1985). Le poids des racines, le poids total des semis et la croissance en diamètre de la flèche terminale et du collet racinaire augmentent proportionnellement avec l'intensité lumineuse (Logan 1959; Wetzel et Burgess 1994).

La faculté du pin blanc à reprendre une pleine croissance suite à une période de suppression plus ou moins prolongée a été observée par plusieurs auteurs (Adams 1935 *dans* Bormann 1961; Horton et Bedell 1960; Horton et Brown 1960; Berry 1982; Stiell 1984; Kelty et Entcheva 1993). L'âge limite au-delà duquel le pin blanc n'a plus la faculté de reprendre une pleine croissance n'est cependant pas clairement établi dans la littérature : Buse (1992) mentionne un âge de 30 ans, alors que McCormack (1956 *dans* Horton et Bedell 1960) mentionne un âge de 50 ans et que Brown (1994) fait état d'un âge de 60 ans. Horton et Brown (1960) rapportent que des semis de forme rabougrie peuvent survivre pendant 40 ans sous des conditions moyennement ou très ombragées et que, suite à un dégagement du couvert, ils peuvent encore reprendre leur pleine croissance après un délai 2 à 3 ans. Kelty et Entcheva (1993) ont observé, 6 à 10 ans après un dégagement, des augmentations de croissance importantes sur la hauteur et le diamètre de la régénération préétablie dont l'âge variait de 7 à 38 ans.

Le premier symptôme de suppression est généralement une réduction de la croissance en diamètre due au fait que le xylème ne produit plus, ou seulement de façon discontinue, des cernes de croissance à la base de l'arbre (Frelich 1992; Wetzel et Burgess 1994). Dans des coupes progressives pratiquées en Ontario, les pins blancs de faible diamètre ne faisant pas partie des dominants ou des codominants sont systématiquement éliminés s'ils ne contribuent pas à la fermeture du couvert. L'âge de ces peuplements est généralement uniforme et supérieur à 80 ans et les plus petites tiges de ces peuplements équiennes sont considérées sans potentiel de croissance (Morneault 1998a).

3.3.3 Éléments nutritifs

Le pin blanc croît de façon satisfaisante sur des sols de fertilité moyenne à faible et, en général, les symptômes de carences nutritives sont rares (Horton et Brown 1960). Elliott et Vose (1995) considèrent l'azote comme le facteur limitant le plus important durant la première année d'établissement des semis. Des carences en magnésium et en potassium ont aussi été observées dans des plantations du Québec (Lafond 1954 *dans* Horton et Brown 1960). La présence de carbonates libres dans les premiers 60 cm du sol a aussi une influence négative sur la vigueur et la croissance en hauteur des arbres (Taylor et Jones 1986 *dans* Buse 1992). Dans l'état du Wisconsin, les sols offrant une bonne croissance au pin blanc possèdent généralement une capacité d'échange cationique d'environ 6 milliéquivalents par 100 g de sol et, au minimum, un contenu d'azote de 0,1 % (en éléments et non en oxydes) et des quantités de phosphore assimilable et de potassium de 34 kg/ha et 112 kg/ha, respectivement (Wilde 1966).

La fertilisation est surtout employée dans les pépinières où les bienfaits de son application peuvent être clairement identifiés sur les plants de pin blanc. En milieu naturel, la pertinence de ce traitement est plus difficile à établir en comparaison à celle d'un dégagement ou d'une éclaircie (Stiell 1985). L'emploi de la fertilisation dans les friches agricoles carencées semble être plus approprié (Heiberg et White 1951; Stone 1953 *dans* Stiell 1985). Dans neuf peuplements de pin blanc de l'état du Maine, dont sept étaient d'origine agricole, Shepard *et al.* (1991) ont observé que l'application d'azote à un taux d'environ 113 kg/ha permettait un bon retour sur l'investissement pour de nombreux peuplements âgés de 55 à 85 ans.

Dans la vallée de l'Outaouais, la faible croissance de certains groupes de pins est reliée à la présence de sols sableux délavés à faible teneur en éléments nutritifs, épuisés par une surexploitation agricole et dont le principal constituant minéral est le quartz. Des cas exceptionnels de surabondance et de carence en éléments nutritifs, habituellement liées à des types particuliers de terrain, se rencontrent quelquefois dans certaines localités. Un exemple de grande abondance d'éléments nutritifs est celui des dunes situées aux abords des rivières Chalk et Gatineau, dans la vallée de l'Outaouais. Dans cette région, les sables secs, à profil peu évolué, contiennent beaucoup de feldspath et de mica, et présentent une fertilité extrêmement élevée. Par contre, la croissance du pin blanc est très faible sur les dunes situées aux abords du Grand lac Victoria, en Abitibi-Témiscamingue. Ces dunes sont formées d'un sable de plage lessivé dans lequel le quartz est le principal constituant. Les sables lessivés sont généralement pauvres mais, dans les régions de Kipawa et de Témagami en Ontario, des sols lessivés exceptionnellement fertiles assurent une excellente croissance au pin blanc sur des stations sèches (Horton et Brown 1960).

3.4 Adaptation au régime des perturbations naturelles

Les forêts de pin blanc se sont régénérées pendant des milliers d'années grâce à des perturbations naturelles (Heinselman 1981). Ces perturbations majeures sont généralement des feux de forêt qui ouvrent le couvert, éliminent temporairement la compétition, contrôlent les populations d'insectes nuisibles séjournant dans la litière et préparent des lits de germination adéquats (Horton et Bedell 1960; Methven et Murray 1974; McRae *et al.* 1994). Ces feux permettent l'établissement, plus ou moins rapide, d'une nouvelle génération de pins blancs.

Le pin blanc n'a pas de cônes sérotineux, comme le pin gris et l'épinette noire, ni la possibilité de drageonner, comme le peuplier, ou de produire de grandes quantités de graines presque chaque année, comme le peuplier ou le bouleau à papier. Les conditions du site, la concordance des années semencières, le nombre et la proximité des arbres semenciers des différentes essences ainsi que le cycle, la dimension et l'intensité des feux régissent le type de forêt qui apparaît suite aux perturbations (Frelich 1992). La figure 2, adaptée de Frelich (1992), présente différents cycles de feux et leur relation avec la composition des espèces des peuplements forestiers de l'aire de distribution du pin blanc.

En conditions naturelles, selon Frelich (1992), le pin blanc est plus abondant dans les forêts présentant des cycles de feux de 150 à 300 ans. Suite à ces feux, l'établissement du pin blanc s'échelonne sur une période de 20 à 40 ans, généralement sous un couvert de peupliers, de bouleaux, d'érables rouges ou de chênes. Sur les sites relativement secs, des feux de surface survenant à tous les 20 à 40 ans éliminent les feuillus et créent des peuplements étagés de pin blanc qui peuvent persister pendant des siècles. Sur les sites mésiques, une succession dominée par des feuillus tolérants peut survenir malgré les feux de forêt.

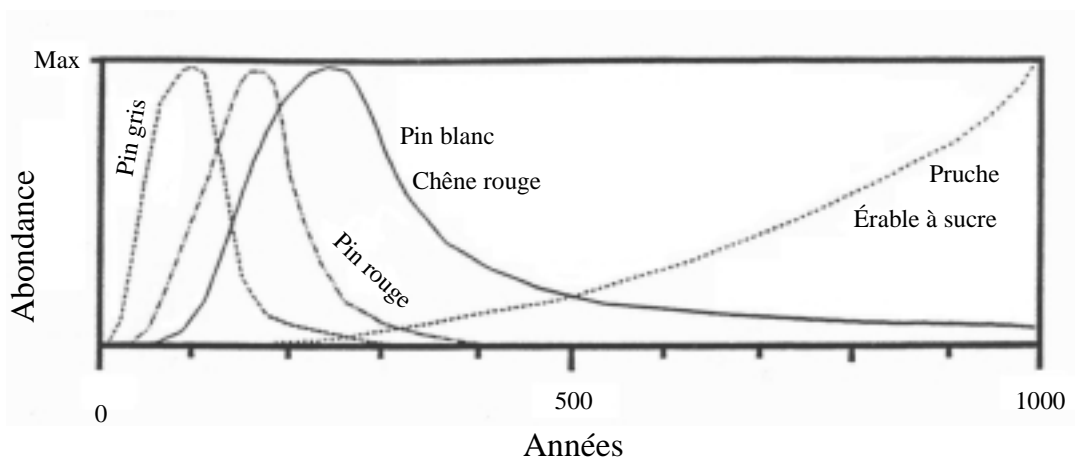


Figure 2 : Cycles de feux en relation avec la composition des espèces des peuplements forestiers. Adaptée de Frelich, 1992.

3.5 Succession et associations végétales

De par son adaptation à une grande diversité de conditions de sol, et de par sa tolérance à l'ombre intermédiaire et sa longévité, le pin blanc fait partie d'un grand nombre d'associations, mais ne constitue qu'un faible pourcentage du couvert dans un plusieurs d'entre elles (Horton et Brown 1960; Stiell 1985; Wendel et Smith 1990; Brown 1994). Ces associations, dont la composition dépend des conditions de site et de l'historique des perturbations, peuvent être divisées en quatre types de couvert (Horton et Bedell 1960; Horton et Brown 1960; Stiell 1985; Brown 1992) :

- les couverts formés essentiellement de pins;
- les couverts de pins et de feuillus intolérants;
- les couverts de pins et de conifères;
- les couverts de pins et de feuillus tolérants.

Contrairement aux pins et aux feuillus tolérants qui forment des peuplement climaciques dans lesquels le pin blanc n'est présent que sous forme de bouquets ou de tiges individuelles, les autres types de couvert sont généralement transitionnels. Suivant les circonstances des perturbations et les conditions du site, le pin blanc peut, par sa longévité, appartenir successivement à chacun de ces types de couvert sur le même site (Brown 1992).

4 AGENTS NUISIBLES

4.1 Agents biotiques

Des 277 insectes et 110 maladies pouvant s'attaquer au pin blanc, un insecte, le charançon du pin blanc (*Pissodes strobi* [Peck]), et une maladie, la rouille vésiculeuse du pin blanc (*Cronartium ribicola* J.C. Fischer), constituent les deux agents biotiques qui causent le plus de problèmes à l'aménagement du pin blanc. La qualité du bois est aussi affectée de façon importante par la carie blanche alvéolaire (*Phellinus pini* (Brot.: Fr.) A. Ames), surtout dans les pinèdes plus âgées.

4.1.1 Charançon du pin blanc

Le charançon du pin blanc est un insecte indigène de l'Amérique du Nord qui est présent dans toute l'aire de distribution du pin blanc (Martineau 1985). Cet insecte est responsable de pertes importantes de qualité et de volume chez le pin blanc (Marty et Mott 1964; Garrett 1985; Martineau 1985) ce qui fait en sorte qu'au Québec le reboisement en pin blanc est limité (Boulet 1998).

Le charançon du pin blanc a été décrit pour la première fois en 1817 et, depuis, a été l'un des insectes les plus intensivement étudiés (Houseweart et Knight 1985). Les études entreprises pour trouver une solution efficace au problème du charançon comprennent, entre autres, des études portant sur les pratiques sylvicoles, l'application de produits chimiques, l'emploi de contrôles biologiques, la stérilisation des insectes, leur manipulation génétique et le croisement de différents pins (Garrett 1985; Lavallée et Daoust 1998). Cependant, malgré tous les efforts déployés, le charançon continue de représenter un problème majeur pour la culture et l'aménagement du pin blanc (Houseweart et Knight 1985).

4.1.1.1 Description et biologie

Le charançon du pin blanc est un insecte de petite taille, mesurant entre 4 et 5 mm. Le charançon produit une génération par année et hiberne à l'état adulte. Son activité printanière débute à la sortie des bourgeons du pin blanc, à la foliation des cerisiers ou à la floraison des peupliers faux-tremble, soit vers la fin d'avril ou au début de mai, lorsque la température ambiante du site se situe entre 2 et 4 °C. Le charançon se dirige alors, en volant ou en grim pant, vers la flèche terminale des arbres hôtes pour s'alimenter de l'écorce ou pour s'accoupler. Les gouttelettes de résine qui s'écoulent des minuscules trous de nutrition révèlent sa présence. À partir du début du mois de mai et pendant les six semaines qui suivent, les femelles pondent environ une centaine d'œufs, surtout dans la moitié supérieure de la flèche terminale d'un ou de plusieurs arbres hôtes. C'est durant cette période que les adultes ont le plus tendance à voler. Après une dizaine de jours, les premiers œufs éclosent et les jeunes larves commencent à se nourrir des tissus de l'écorce. À mesure que les larves grossissent, elles empêchent

graduellement la circulation de la sève. On observe alors un arrêt de croissance et la flétrissure de la flèche terminale. Généralement, les symptômes de l'attaque sont visibles à partir des premières semaines du mois de juillet, moment auquel s'effectue généralement le contrôle mécanique du charançon. Les jeunes adultes apparaissent en août et en septembre et peuvent, dès ce moment, commencer à s'accoupler (Martineau 1985; Lavallée et Benoit 1989; Lavallée et Morissette 1989). Le charançon peut vivre plus d'une année. Généralement, les adultes de l'année courante et ceux de l'année antérieure se nourrissent de la mi-août à la mi-octobre sur la même tige où ils se concentrent toutefois en des endroits distincts : les adultes de l'année courante se trouvent principalement sur les pousses terminales (verticales) alors que 85 % des charançons de l'année antérieure se nourrissent sur les pousses des branches latérales (Houseweart et Knight 1985).

L'ensemble de la population de charançons atteint son plus haut niveau à la mi-septembre, alors que les insectes se nourrissent des pousses et des bourgeons de l'année dans le tiers supérieur de la cime (Houseweart et Knight 1985). Vers la mi-octobre, lorsque la température ambiante se maintient à moins de 5 °C, les charançons se cherchent un lieu d'hibernation, généralement sous les cimes affectées, à une distance de quelques 15 à 30 cm du tronc (Houseweart et Knight 1985; Lavallée et Benoit 1989). Les gels hâtifs de l'automne et les changements brusques de température, lors des hivers sans neige, contribuent à abaisser le niveau des populations de cet insecte (MacAloney 1930 *dans* Lavallée 1986a).

L'attaque du charançon dans une plantation se fait initialement de façon localisée pour ensuite progresser assez lentement lors des premières années à partir de ce foyer (Lavallée et Morissette 1989). Un arbre hôte peut alors être attaqué de façon répétitive (Katovich et Morse 1992; Harman 1975). Dans une plantation, la plupart des charançons se déplacent dans le sens des rangées d'arbres. Ces déplacements sont habituellement de l'ordre de 6 m par jour, mais certains peuvent atteindre des distances de 50 m (Harman (1975). La hauteur des vols ne dépasse généralement pas 6 m (Munro et Churcher 1998). McMullen et Condrashoff (1973) ont observé que dans le courant d'une saison la majorité des charançons se déplaçaient sur des distances inférieures à 180 m de leur lieu d'origine, mais que certains individus pouvaient, après plusieurs saisons, se retrouver à une distance de 1,2 km de leur emplacement initial.

4.1.1.2 Susceptibilité des tiges

Un fort diamètre de la flèche terminale (supérieur à 4 mm) demeure le critère de base employé pour définir la susceptibilité des tiges de pin blanc (Munro et Churcher 1998). Les plantations clairsemées, dégagées de la végétation concurrente ou enclavées entre des peuplements forestiers représentent des cibles de choix pour le charançon (Boulet 1995). Cependant, les bouquets de pins blancs en peuplements mélangés d'une superficie inférieure à 400 m² semblent échapper aux attaques de cet insecte (MacAloney 1930, 1943 *dans* Horton et Bedell 1960). Berryman (1986) rapporte que les infestations de charançons sur les flèches terminales apparaissent fréquemment dans les peuplements croissant sur des sites secs ou mal drainés, ou sur des sites affectés par la compaction, par l'érosion ou par des carences nutritives.

L'augmentation de l'âge des tiges n'offre pas, en lui-même, une protection contre le charançon (Boulet 1995), mais la fermeture progressive du couvert qui survient généralement avec l'augmentation de l'âge des tiges a pour effet de modifier les conditions

microclimatiques en sous-étage, les rendant moins favorables à l'hivernation du charançon (DeBoo 1978). La susceptibilité des tiges débute généralement vers l'âge de 5 à 8 ans (Lavallée et Morissette 1989) et culmine lorsque le pin blanc atteint une hauteur de 2 à 6 m et un diamètre de la flèche terminale de plus de 4 mm (Munro et Churcher 1998). Une période d'environ 20 à 30 ans représente généralement le temps nécessaire à la production d'une première bille de 5 m et c'est à la fin de cette période que se terminent les traitements de lutte contre le charançon entrepris pour atteindre les objectifs de production de l'aménagiste (DeBoo 1978; Munro et Churcher 1998).

Dans une plantation, les arbres qui ont déjà été affectés par le charançon semblent être attaqués plus fréquemment que ceux qui ne l'ont pas été. Dans un groupe de jeunes tiges, les individus les plus grands, généralement les plus vigoureux, sont attaqués plus souvent que leurs voisins plus petits. À mesure que l'infestation progresse, une plus grande proportion de petits arbres est attaquée, mais la majorité des attaques est toujours dirigée vers les arbres les plus hauts (Marty et Mott 1964). La carte des zones de susceptibilité au charançon du pin blanc (Figure 3) permet de déterminer le niveau de risque associé à chaque zone et d'évaluer les problèmes liés à l'aménagement du pin blanc, en plantation, dans ces zones.

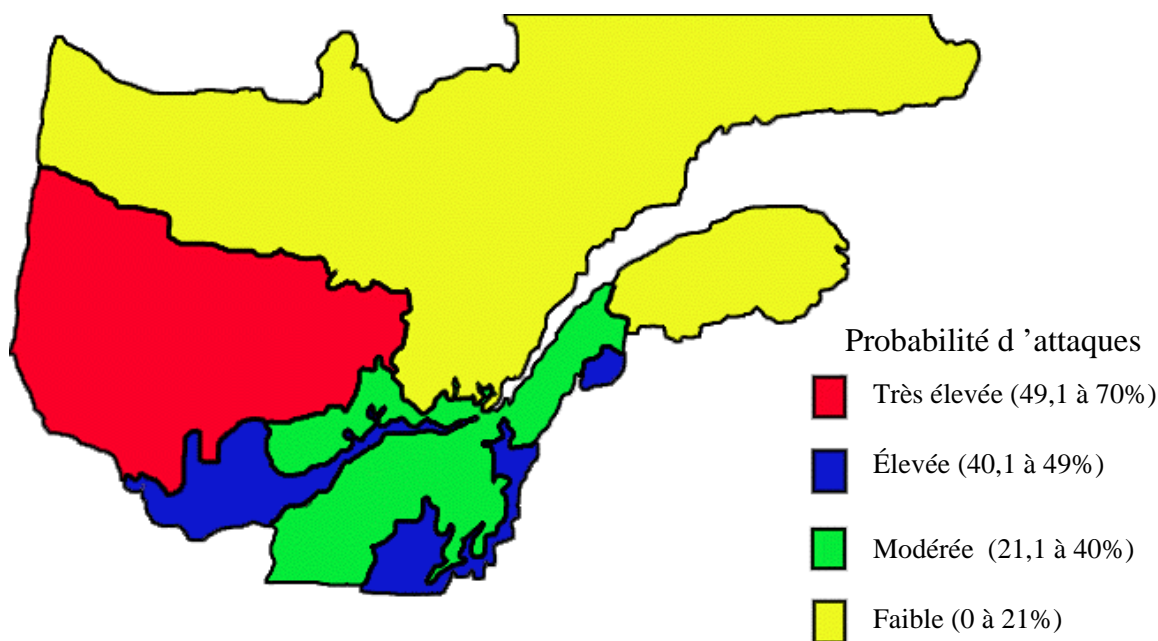


Figure 3 : Zones de susceptibilité du pin blanc aux attaques du charançon au Québec. Adaptée de Boulet, 1995.

4.1.1.3 Impact du charançon

Les attaques du charançon du pin blanc entraînent des réductions du volume marchand en affectant la hauteur, le diamètre et la forme des tiges de pin blanc. Elles causent aussi des réductions de la qualité des tiges parce qu'elles augmentent la quantité de nœuds, de flaches

(dépressions), de grain croisé et de bois de réaction. L'apparition de carie, qui peut faire suite aux blessures du charançon, contribue aussi aux pertes de volume et de qualité engendrées par cet insecte (Brace 1971).

Chez les conifères, la flèche terminale produit des hormones qui contrôlent la croissance du restant de la tige. Le charançon, en éliminant cette source de contrôle, libère la croissance des branches sous-jacentes qui entrent alors en compétition pour assumer la dominance apicale. La croissance de ces branches a pour effet d'augmenter leur diamètre et donc les défauts associés aux nœuds du bois. Ces branches prennent aussi un port plus vertical et leur angle d'attache au tronc se réduit, favorisant la formation de fourches. La présence du chicot de l'ancienne flèche terminale influence aussi la croissance de l'arbre, non seulement dû à la difficulté qu'a l'arbre à le recouvrir, mais aussi dû au fait qu'il constitue une porte d'entrée potentielle aux caries et autres organismes pathogènes. Burgess (1996) note que la majorité des dommages dus au charançon sont confinés à l'intérieur des tiges, dans les premiers 5 cm de croissance radiale.

Brace (1971) rapporte que dans un peuplement de pins blancs âgés de 60 à 90 ans, le charançon a causé sur les tiges affectées (fin bout de 15 cm de diamètre) des réductions de volume de 3 à 21 %. Marty et Mott (1964) rapportent, quant à eux, des pertes de volume marchand liées aux blessures du charançon variant de 22 à 63 %. Le nombre de blessures dues au charançon varie d'année en année et d'une région à une autre. Le nombre de blessures semble aussi être lié à la hauteur du peuplement. Dans des plantations du New Hampshire, les blessures étaient généralement peu nombreuses entre 1,2 et 2,4 m de hauteur, augmentaient dans les 5 m suivants et décroissaient dans les parties supérieures (Marty et Mott 1964).

4.1.1.4 Contrôle du charançon

Le contrôle du charançon requiert un suivi régulier et méticuleux des tiges susceptibles afin de pouvoir y repérer rapidement les symptômes d'une infestation (DeBoo 1978). Une vérification de la présence de dommages tous les deux ans est adéquate, mais une vérification annuelle est préférable si des attaques du charançon ont déjà été signalées dans le secteur (Lavallée et Morissette 1989).

Un taux annuel d'attaque de 2 à 5 % nécessite une intervention de contrôle (Jaynes et MacAloney 1958 *dans* Lavallée et Benoit 1989). Un faible taux d'attaque est susceptible, l'année suivante, de devenir relativement élevé (Marty et Mott 1964). À ce sujet, Lavallée et Daoust (1998) présentent une revue des méthodes de lutte contre le charançon du pin blanc et de leurs résultats d'application. Ces auteurs y regroupent les méthodes de lutte contre le charançon du pin blanc en deux catégories, soit les méthodes préventives et les méthodes curatives.

4.1.1.4.1 Méthodes préventives

Afin de prévenir les attaques de charançon, on recommande dans la littérature d'effectuer un aménagement intégré qui prend en considération le choix des sites de croissance, le type de coupe initiale et les traitements ultérieurs à employer pour limiter la susceptibilité du pin blanc aux agents pathogènes et favoriser la prédation du charançon (Struik 1978; Chapeskie *et al.*

1989; Boulet 1998; Lavallée et Daoust 1998; Reid et Woods 1998). Augmenter la densité des plants dans les plantations est une pratique qui peut permettre de récupérer un certain nombre de tiges non affectées par le charançon. Toutefois, cette pratique est coûteuse et sans effets sur le développement des populations de charançon. De plus, la forte densité des plants peut occasionner des pertes de croissance relativement importantes dues à la forte compétition intraspécifique (Stiell 1979).

La plantation du pin blanc avec une ou plusieurs essences compagnes est une méthode qui permet de procurer un couvert partiel au pin blanc. Ce couvert se développe de façon plus ou moins rapide et varie en densité selon les essences compagnes choisies (Stiell 1955; Lavallée et Daoust 1998). L'efficacité de cette méthode de lutte demande la présence d'un couvert partiel d'environ 50 %. Un tel couvert nuit aux activités de ponte et d'alimentation du charançon en augmentant l'humidité relative du site et en réduisant la température de l'écorce du pin blanc et la croissance radiale de sa flèche terminale (Stiell et Berry 1985). En tant qu'espèces compagnes, les essences feuillues causent moins d'ombrage au moment critique de l'émergence des charançons (au printemps) et s'avèrent donc moins efficaces que les essences résineuses (Houseweart et Knight 1985; Stiell et Berry 1985). D'autre part, lorsque des conifères sont utilisés comme espèces compagnes, ils peuvent agir comme arbres pièges pour le charançon et permettre de réduire de 40 % les dommages causés à cet insecte (Belyea 1923 dans Lavallée et Daoust 1998). Néanmoins, peu importe l'essence compagne choisie, un équilibre est généralement difficile à atteindre entre la protection que procure ces essences et l'oppression qu'elles exercent, de par leur forte croissance, sur les tiges de pin blanc (Stiell 1955; Lavallée et Daoust 1998). Parmi les effets négatifs de la présence d'un couvert d'espèces compagnes, on rapporte le fait que flèches terminales des pins blancs peuvent, sous l'action du vent, être fouettées de façon répétitive par les branches plus hautes des essences compagnes avoisinantes. Ces coups de fouet, s'ils ne sont pas contrôlés par un dégagement, peuvent causer des réductions de croissance importantes au pin blanc (Spaeth 1922; Clements 1966; Lavallée et Daoust 1998). Ces réductions de croissance peuvent dans certains cas être équivalentes à celles causées par les attaques du charançon (Marty et Mott 1964). La plantation sous couvert offre les mêmes avantages que la plantation avec des essences compagnes en permettant d'obtenir, dès le début de la plantation, des conditions moins favorables au charançon.

Les mésanges (*Parus* sp.) et les pics mineurs (*Picoides pubescens*) sont probablement les plus importants prédateurs du charançon durant la période qui précède le stade adulte de l'insecte (Munro et Churcher 1998). Dans les jeunes peuplements, il est recommandé de conserver 6 chicots à l'hectare d'un DHP de plus de 15 cm pour offrir à ces espèces des lieux de nidification adéquats (Evans et Conner 1979 dans Munro et Churcher 1998). De plus, la conservation d'une certaine quantité de débris de coupe (billots de plus de 10 cm de diamètre) sur le parterre est une pratique qui permet d'améliorer les conditions d'habitat des petits mammifères qui se nourrissent des charançons en hibernation (Munro et Churcher 1998).

Une autre méthode préventive consiste à couvrir la flèche terminale du pin blanc, au printemps, pour la protéger du charançon, un peu comme cela se fait dans l'état du Minnesota pour protéger les bourgeons des chevreuils (Horton et Bedell 1960; Rajala 1992). Toutefois, selon Horton et Bedell (1960), cette méthode serait trop coûteuse pour une application en foresterie, à l'instar de celle consistant à enlever manuellement les charançons. Finalement, la recherche génétique est une avenue qui offre des possibilités pour la lutte préventive, mais,

actuellement, cette méthode de contrôle n'est pas encore assez développée pour permettre l'application de ses résultats dans l'aménagement du pin blanc (Lavallée et Daoust 1998).

4.1.1.4.2 Méthodes curatives

Parmi les méthodes curatives de lutte mécanique, les plus connues sont la taille manuelle, la taille de formation, la taille d'hygiène, la taille phytosanitaire et l'élagage phytosanitaire. Boulet (1995), ainsi que Marty et Mott (1964), ont présenté des clés décisionnelles pour l'établissement d'un régime de traitements de contrôle du charançon.

L'élagage est généralement effectué lorsque le charançon est au stade de larve, de la mi-juillet à la mi-août et, plus spécifiquement, du 5 au 31 juillet, soit après la ponte et avant l'émergence des adultes (Lavallée et Benoit 1989). C'est généralement durant cette période que l'on observe chez les pins blancs affectés un arrêt de croissance suivi, peu après, par la flétrissure et la décoloration de la flèche terminale (Drouin et Lavallée 1989). Cette période de l'été concorde avec la période usuelle des travaux sylvicoles d'entretien (Horton et Bedell 1960; Chapeskie *et al.* 1989; Boulet 1995; Lavallée et Daoust 1998; Munro et Churcher 1998). Le moment de l'intervention est très important car un retard trop important dans son application permettrait à une partie de la nouvelle génération de charançons de sortir des flèches terminales attaquées et d'ainsi recommencer un nouveau cycle de dommages (Lavallée et Morissette 1989). L'élagage devrait être fait simultanément dans toutes les superficies affectées attenantes pour prévenir une ré-infection des sites traités (Chapeskie *et al.* 1989). Idéalement, toutes les plantations de la région où cet insecte sévit devraient être également traitées.

L'intervention consiste à couper la flèche terminale ou, s'il y a lieu, celle de l'année antérieure, en dessous de la zone atteinte (Drouin et Lavallée 1989). Pour activer et améliorer la reprise d'une nouvelle flèche, on suggère de couper toutes les pousses latérales gênant la croissance de celle qui offre les meilleures conditions de santé. Cette nouvelle flèche terminale doit être issue du dernier verticille en bon état et présenter un diamètre moyen ou supérieur à celui des autres pousses qui ont été coupées (Rhodes 1963 *dans* Lavallée et Benoit 1989). Plus précisément, le point d'origine de cette nouvelle flèche terminale devrait se trouver dans la partie supérieure de ce point nodal qu'est le dernier verticille (Figure 4; Lavallée 1989).

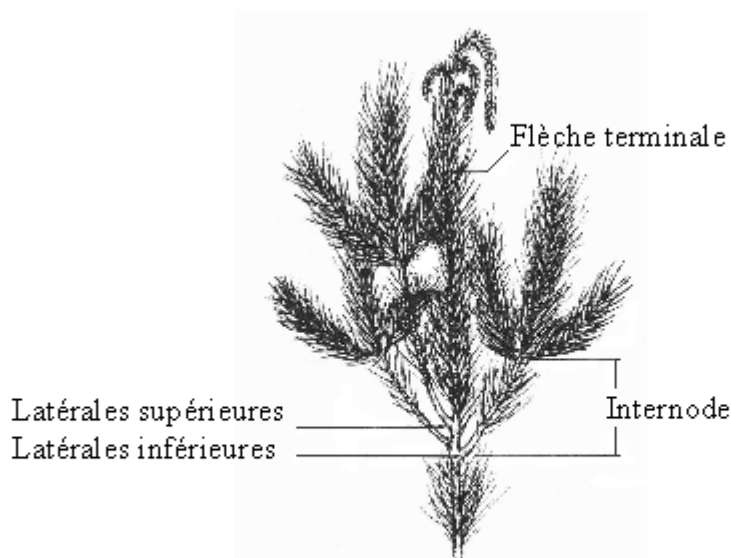


Figure 4 : Représentation schématique des termes employés pour décrire l'élagage des tiges de pin blanc attaquées par le charançon. Position de la flèche terminale (F) et des latérales supérieures (LS) ou inférieures (LI) par rapport au point nodal où se fait l'étêtage du pin blanc. La localisation du premier internode (I) est également indiquée. Adaptée de Lavallée, 1989.

Un élagage bien fait et appliqué rapidement permet de rétablir, du moins en partie, le potentiel marchand des tiges. Burgess (1996) mentionne que si l'on examine avec soin des billes de pins blancs élagués, plusieurs blessures de charançon peuvent être identifiées sur celles-ci. Malgré ces défauts, ces billes ont suffisamment de potentiel marchand pour être traitées, au moulin, comme des billes de déroulage de haute valeur. Les dommages occasionnés par le charançon sur une tige sont donc grandement diminués par des travaux d'élagage, particulièrement si on laisse la tige atteindre un fort diamètre. Une fois l'élagage effectué, il est à noter que les larves présentes dans les flèches coupées peuvent poursuivre leur alimentation et leur développement. Pour cette raison, il faut disposer des résidus d'élagage de façon adéquate, en les brûlant ou en les utilisant pour un contrôle biologique (Lavallée et Morissette 1989).

Le contrôle biologique repose sur les prédateurs naturels du charançon. Il va généralement de pair avec l'élagage. Il existe plus de 90 espèces d'arthropodes vivant dans les flèches de pin blanc (Taylor 1928 dans Lavallée et Daoust 1998). *Lonchaea corticis* Taylor, un insecte de l'ordre des diptères, est le principal agent de répression naturelle du charançon du pin blanc. Il est responsable de 34 à 77 % de la mortalité chez le charançon (Therrien 1994). Pour favoriser les insectes prédateurs et les parasites naturels, les flèches coupées peuvent être mises dans des cages dont l'espace entre les mailles est plus petit que la dimension moyenne des charançons adultes, mais plus grand que la dimension de ses prédateurs. Cette technique, qui demande encore des recherches pour augmenter et évaluer son efficacité, a, malgré tout, permis de

réduire le nombre des flèches attaquées dans la plupart des plantations sous étude, après deux années de traitement (Lavallée et Daoust 1998).

Récemment, les insecticides systémiques ont démontré leur efficacité, mais leur homologation au Canada et leur coût restreignent leur emploi (Lavallée et Daoust 1998). La lutte chimique à l'aide d'insecticides doit être effectuée au moment suivants : (i) à l'émergence printanière du charançon, lors des premières journées chaudes d'avril ou de mai, et (ii) lors de l'émergence de la seconde génération, au mois d'août. Une plus grande efficacité est obtenue lorsque les traitements chimiques sont utilisés conjointement avec l'élagage (Lavallée et Benoit 1989). Ces auteurs recommandent l'application printanière, si une seule application doit être faite. L'application automnale offre, par contre, les avantages suivants, selon Houseweart et Knight (1985) :

- la fenêtre de temps pour le traitement est plus longue et le moment exact d'application du traitement est moins critique;
- les adultes sont plus accessibles puisqu'ils sont exposés sur des cibles horizontales (sur les pousses latérales) alors qu'au printemps ils sont exposés sur des cibles verticales (flèches terminales);
- les insectes bénéfiques, séjournant dans les flèches affectées, sont moins exposés qu'au printemps;
- la température de l'automne est généralement plus favorable à ce traitement.

4.1.2 Rouille vésiculeuse du pin blanc

L'origine génétique du pin blanc est le centre-nord de l'Asie. C'est aussi le lieu d'origine de toutes les rouilles qui lui sont associées. De ce lieu d'origine, la rouille s'est répandue, géographiquement, avec le pin blanc. Elle s'est différenciée, en Amérique du Nord, en *Cronartium occidentale* Hedge, en association avec l'espèce *Strobus* des pins et, dans le sud de l'Asie et de l'Europe, en *Cronartium ribicola* Fisch., en association avec l'espèce *Cembra* des pins. Les dommages associés aux rouilles étaient apparemment mineurs avant 1860, date à partir de laquelle les échanges économiques ont permis l'immigration de *Cronartium ribicola* J.C. Fisch. en Europe et, au début du siècle, en Amérique. Tous les pins blancs des États-Unis et du Canada, sans défenses naturelles élaborées au cours de leur évolution, ont alors été affectés par cet agent pathogène (Garrett 1985).

4.1.2.1 Cycle biologique

La rouille vésiculeuse du pin blanc, *Cronartium ribicola* J.C. Fisch, est un champignon qui nécessite deux hôtes pour se propager. Au Québec, le pin blanc est l'hôte principal, mais tous les pins possédant cinq aiguilles par faisceau peuvent être affectés. L'hôte alterne de ce champignon est constitué des plantes du genre *Ribes*, soit les gadelliers, les groseilliers et les cassis (Lavallée 1978; Gignac *et al.* 1996). La rouille vésiculeuse du pin blanc est un parasite obligatoire qui nécessite des tissus vivants pour se développer et compléter son cycle évolutif

(Manion 1981). Cependant, pour s'établir et débiter ce cycle, la rouille vésiculeuse requiert sur son hôte, pour une période de quelques heures au minimum, une humidité adéquate qui est généralement associée à de la rosée. Cette humidité de surface et cette période de temps sont nécessaires pour permettre aux spores de germer et ainsi développer les filaments nécessaires à la pénétration à l'intérieur des aiguilles du pin blanc (Van Arsdel 1972). Les périodes de pluie ne semblent pas être favorables à l'infection, car la pluie nettoie l'air et la surface des aiguilles du pin blanc des spores qui s'y trouvent (Anderson 1973).

Pour produire de nouvelles infections de rouille vésiculeuse sur le pin blanc, il est établi qu'il faut au moins deux semaines pendant lesquelles la température se maintient en dessous de 20 °C, suivies d'au moins 48 heures d'air saturé d'humidité. Si, à l'intérieur de ces deux semaines une période chaude (ex. : 28 °C pendant 5 heures par jour) dure plus de trois jours, les spores, en provenance du *Ribes* sont détruites (Van Arsdel 1961 dans Lavallée 1986a). Ces conditions climatiques particulières ont permis la création d'une carte présentant différentes zones de susceptibilité à la rouille vésiculeuse pour le Québec (Figure 5).

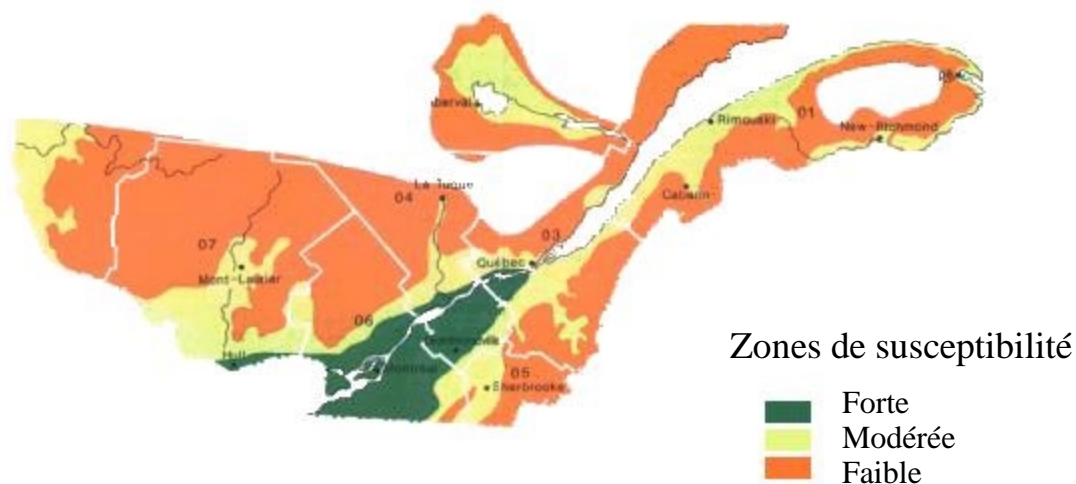


Figure 5 : Zones de susceptibilité du pin blanc à la rouille vésiculeuse au Québec. Adaptée de Lavallée, 1986.

Le cycle d'infection de la rouille débute par la pénétration de ce champignon dans les aiguilles du pin blanc à la fin de l'été ou au début de l'automne. De petits points de coloration jaunâtre apparaissent sur les aiguilles entre 4 et 10 semaines après l'infection (Lavallée 1978). Pendant les 12 à 18 mois suivants, le champignon pénètre dans la branche et cause une coloration de l'écorce variant du jaunâtre à l'orangé. Cette coloration s'étend en même temps que le champignon progresse. L'écorce devient brune et renflée et produit un chancre fusiforme. À la

fin de l'été de la troisième saison, soit 2 ans après le début de l'infection, des gouttes de couleur ambrée à brunâtre suintent du renflement de la branche (Singh 1994). Une résinose accompagne souvent ce stade de développement (Lavallée 1978). Le printemps suivant, généralement durant la troisième année d'infection, l'écorce affectée se couvre de fructifications contenant des spores de couleur orangée. Ces spores, propagées par le vent, infectent l'hôte alterne, les *Ribes*. L'ouverture de ces fructifications offre l'aspect de pustules oranges qui facilitent leur dépistage pendant les mois de mai et de juin. Leur teneur élevée en protéines est très appréciée des rongeurs (Lavallée 1978; Gignac *et al.* 1996). Une écorce chançrée, grignotée, présentant une résinose abondante ainsi qu'une écorce fissurée au-dessus du chancre constituent de bons indices de la présence du champignon (Singh 1994).

Chaque année, le chancre continue de progresser jusqu'à ce qu'il annelle la branche ou le tronc. Si l'arbre est gravement atteint, le feuillage au-dessus du tronc jaunit puis devient brun-rouge. Les chancres qui provoquent la mortalité de la cime peuvent éventuellement entraîner le bris du tronc et une carie risque alors de s'installer dans le bois exposé à l'infection. Le pin blanc peut mourir en 3 ans ou survivre plus de 20 ans, dépendant de sa taille et de la partie du tronc affectée (Lavallée 1978).

Sur les *Ribes*, les premiers signes d'infection créés par les spores de la rouille en provenance du pin blanc sont des pustules jaunâtres qui apparaissent sous leurs feuilles au printemps. L'ouverture de ces pustules marque le début d'une propagation rapide du champignon aux *Ribes* avoisinants. À la fin de l'été et à l'automne, des structures filamenteuses se développent sous les feuilles infectées des *Ribes* qui produisent des spores capables, avec l'aide du vent, de réinfecter le pin blanc. La distance de dispersion de la majorité des spores issues des *Ribes* est généralement inférieure à 300 m (Lavallée 1978).

4.1.2.2 Susceptibilité des tiges et des sites

Toutes les tiges de pin blanc peuvent être affectées par la rouille vésiculeuse, peu importe leur âge. Cependant, c'est sur les tiges en bas âge que la maladie s'avère le plus souvent fatale parce que l'annelage du tronc se fait sur une période beaucoup plus courte (Anderson 1973). Les tiges d'une hauteur de moins de 2 m requièrent donc un suivi soutenu (Munro et Churcher 1998).

La présence simultanée de plusieurs facteurs est nécessaire, sur un site, pour que l'infection d'une tige de pin blanc ait lieu, entre autres :

- des courants aériens pour transporter les spores de la rouille vésiculeuse;
- une température fraîche pour les protéger durant leur transport et leur établissement;
- une humidité comparable à de la rosée sur les aiguilles pour leur germination.

La susceptibilité des tiges de pin blanc à la rouille vésiculeuse est donc liée à la topographie et à la végétation locale qui influencent ces conditions environnementales (Van Arsdell 1972; Anderson 1973). Les petites ouvertures du couvert forestier, puisqu'elles ne permettent pas un ensoleillement important du parterre, ont une température plus basse et de la rosée qui persiste

plus longtemps sur les plantes que les sites plus ensoleillés, ce qui a pour effet d'augmenter les risques d'infection. Dans les ouvertures plus grandes, bien que les conditions nocturnes soient favorables à la formation de rosée, le potentiel d'infection est par la suite réduit dû au réchauffement matinal qui permet, peu après le lever du soleil, l'assèchement rapide des aiguilles du pin blanc (Anderson 1973).

La présence de plans d'eau change la dynamique de circulation des courants aériens. Ainsi, une plantation de pin blanc établie sur une pente au bas de laquelle se trouve un marais hébergeant une forte population de *Ribes* sera malgré tout plus infectée en haut de pente qu'en bas de pente. Pour la régénération du pin blanc, toute condition topographique ou tout emplacement qui favorise la formation de rosée persistante est généralement à éviter (Lavallée 1986b), comme par exemple :

- les creux de culots glaciaires ou les dépressions humides;
- les bas des pentes, surtout celles exposées au nord;
- les petites vallées ou les petites ouvertures entourées de peuplements à maturité;
- les sites où la végétation est dense et où les *Ribes* sont présents.

Les sites à privilégier sont les suivants :

- les sommets de pente, surtout des pentes exposées au sud;
- les terrains plats bien aérés où les courants aériens favorisent l'évaporation de la rosée matinale;
- les plantations sous couvert de feuillus fournissant un éclairage au sol de 50 % de pleine lumière;
- les sites qui sont exempts de *Ribes* à l'intérieur et autour du territoire à planter.

4.1.2.3 Impacts de la rouille vésiculeuse

Sur la majeure partie du territoire québécois, la rouille vésiculeuse représente le plus grand problème affectant la régénération du pin blanc (Laflamme 1998). Après un suivi sur une période de 5 ans de 16 jeunes plantations âgées de 5 à 8 ans, Lavallée (1992) rapporte que dans 25 % de celles-ci plus de 3 % des arbres étaient nouvellement attaqués à chaque année, alors que dans 35 % de ces plantations, une progression de moins de 1 % par année était observée. Le restant des plantations présentait un taux de progression intermédiaire. Les relevés antérieurs, dans des plantations de 15 ans et plus, ont révélé des situations catastrophiques (Pomerleau et Bard 1969 dans Lavallée 1992). Lehrer (1982) rapporte que sur des pins blancs de 7,4 m de hauteur moyenne, 96 % des chancres mortels sont situés dans les premiers 3 m de hauteur et 90 % dans les premiers 2 m.

Haddow (1956) observe que pour les forêts de l'est de l'Ontario, les stations qui sont exposées à la rouille depuis plus de 20 ans ont des taux d'infection qui varient entre 20 et 70 % pour les

arbres adultes. Dans ces peuplements, la mortalité due à la rouille est cependant faible et les dommages encore peu importants. Cependant, dans les sites très favorables à l'infection, cet auteur observe 17 % de mortalité sur l'ensemble des arbres.

4.1.2.4 Contrôle de la rouille vésiculeuse

Il existe plusieurs façons de contrôler les infestations de rouille vésiculeuse : le contrôle sylvicole, l'éradication des *Ribes*, les traitements antibiotiques, le contrôle biologique, le contrôle chimique et le contrôle mécanique (Laflamme 1998). La recherche génétique est une avenue préventive qui offre aussi un bon potentiel à long terme (Anderson 1973; Lavallée 1978; French 1992; Thorne 1992)

4.1.2.4.1 Contrôle sylvicole

Le contrôle sylvicole se résume surtout au choix de sites de reboisement adéquats où les facteurs de risque associés à la rouille sont identifiés, évalués et pris en considération dans l'aménagement. Ce contrôle comporte aussi l'emploi de pratiques sylvicoles qui ne favorisent pas l'établissement du *Ribes* et la susceptibilité des tiges de pin blanc à la rouille, c'est-à-dire le maintien d'un couvert et le contrôle, dans les ouvertures, de la végétation basse (Munro et Churcher 1998). Pour les sites de reboisement, il faudrait aussi éviter de créer des andains qui sont des milieux favorables à la prolifération des *Ribes* (Laflamme 1998).

4.1.2.4.2 Éradication des *Ribes*

L'éradication des *Ribes*, pratiquée aux États-Unis depuis 1909, a été jusqu'aux années 1950 considérée comme le meilleur moyen de contrôle de la rouille. Progressivement, l'emploi d'autres méthodes et les résultats de recherche portant sur les distances de dispersion de la rouille ont remis en question cette méthode de lutte. En effet, son efficacité n'était pas assez grande pour contrecarrer les conditions climatiques favorables à cette maladie dans l'ouest des États-Unis où le programme d'éradication a été arrêté. Concernant les résultats de ces recherches, l'éradication des *Ribes* est surtout recommandée sur les sites des zones de risque intermédiaire où l'expérience a démontré que la dispersion des spores se fait localement et non sur de grandes distances (Anderson 1973). Cette restriction n'enlève pas l'efficacité de cette méthode pour le Québec et l'état du Maine, où des réductions significatives de rouille ont été observées (Laflamme 1998). Cet auteur mentionne aussi que l'élimination de tous les *Ribes* est requise pour que ce contrôle soit réellement efficace.

4.1.2.4.3 Traitements antibiotiques

Les traitements antibiotiques n'ont pas encore démontré leur pleine efficacité (Laflamme 1998). L'emploi des antibiotiques a cependant permis de constater qu'il serait intéressant de développer un fongicide systémique pour éliminer les infections de la rouille sur toutes les parties d'un arbre, pour nettoyer une surface forestière ou agricole avant d'établir un régime

de contrôle préventif ou pour prévenir une nouvelle vague d'infection dans une région qui est normalement peu touchée (Anderson 1973).

4.1.2.4.4 Contrôle biologique

Le contrôle biologique à l'aide d'un des premiers champignons hyperparasites trouvé sur les chancres de la rouille n'a pas été fructueux (Rostrup 1890 dans Wicker 1981; Maloy 1997). Mais, même s'il ne permet pas de contrôler pleinement la rouille, ce parasite (*Tuberculina maxima*) permet de retarder la progression des dommages et ainsi de prolonger la vie des arbres infectés (Wicker 1981). Parmi les champignons endophytes retrouvés sur les aiguilles du pin blanc, *Coniothyrium* sp. semble, au stade actuel des recherches, avoir moins d'applications en foresterie qu'en agronomie, où ce parasite a permis d'obtenir de bons résultats sur le *Ribes* (Laflamme 1998).

4.1.2.4.5 Contrôle chimique

Le triadimefon est un fongicide systémique qui, à ce jour, présente une efficacité éprouvée pour le contrôle chimique de la rouille vésiculeuse en pépinière. Deux saisons de croissance après le traitement des semis, seulement 3,8 % d'entre eux montraient des signes d'infection et ceux-ci étaient mineurs et limités à des points jaunâtres sur les aiguilles, caractéristiques de la première phase d'établissement de cette maladie. En comparaison, environ 71 % des arbres témoins présentaient des signes d'infection dont la gravité a été mortelle sur environ 12 % de l'ensemble de la population témoin (Bérubé 1996). Ce produit, non homologué au Canada (Laflamme 1998), pourrait permettre un contrôle efficace des chancres durant les 5 premières années suivant le reboisement, période durant laquelle les infections sont généralement mortelles (Bérubé 1996). L'utilisation d'une pastille contenant un fongicide, un insecticide et des fertilisants, et que l'on dépose dans le trou de plantation, permettrait également un contrôle chimique et des chercheurs de l'Ontario travaillent sur ce projet en ce moment (Laflamme 1998).

4.1.2.4.6 Contrôle mécanique

Il est établi que le contrôle mécanique de la rouille vésiculeuse par l'élagage des tiges de pin blanc est efficace (Lehrer 1982; Lavallée 1986; Laflamme 1998). L'élagage peut être effectué dans les zones de haute susceptibilité pour suppléer à l'éradication des *Ribes*, ou dans les zones de susceptibilité intermédiaire pour offrir une protection adéquate sans avoir recours à l'éradication des *Ribes* (Lehrer 1982).

L'efficacité de l'élagage repose sur des inspections de la régénération effectuées à des intervalles plus ou moins rapprochés selon les zones de vulnérabilité. Ces inspections s'effectuent idéalement en mai et en juin (Gignac *et al.* 1996). Sur les sites non favorables à la rouille, une surveillance et une taille d'hygiène des branches affectées, au cours des 5 premières années, permettent de réduire le nombre d'attaques au tronc à un niveau acceptable et permettent d'identifier le besoin d'interventions ultérieures (Lavallée 1978). Munro et Churcher (1998) recommandent d'établir très tôt un régime d'élagage pour les pins blancs de

moins de 2 m de hauteur dans les plantations ou dans les peuplements croissant sur des sites de risque modéré ou élevé. Les arbres doivent être élagués assez fréquemment pour dégager le tiers inférieur du tronc de ses branches (Anderson 1973). Au Québec, l'élagage de la moitié inférieure du houppier des arbres est recommandé dans les plantations, vers l'âge de 8 ans (Gignac *et al.* 1996). Au cours d'une journée d'élagage de 8 heures, 450 tiges peuvent être traitées par un ouvrier sylvicole avec un sécateur manuel; un rendement qui pourrait être amélioré en ayant recours à des équipements plus performants comme un sécateur hydraulique (Laflamme 1998).

L'élagage contrôle la rouille vésiculeuse de deux façons. Premièrement, la coupe d'une branche affectée avant que l'infection n'atteigne le tronc élimine la rouille sans dommages majeurs à l'arbre. Deuxièmement, la coupe des branches inférieures élimine les aiguilles les plus proches du sol et donc celles qui sont le plus vulnérables à l'infection (Anderson 1973). Les avantages obtenus en termes de protection et d'accroissement de la qualité sur les tiges favorisent la pratique de l'élagage des branches inférieures (Lavallée 1978). Selon Lehrer (1982), l'élagage des infections latentes afin de prévenir de nouvelles infections présente une efficacité au moins deux fois plus élevée que le seul élagage des chancre observés.

Michaud (1996 *dans* Laflamme 1998) rapporte des taux d'infection variant de 1 à 3 % suite à l'élagage dans 11 plantations, comparativement à des taux d'infection variant de 8 à 35 % pour les arbres témoins. Lehrer (1982) rapporte que l'élagage a éliminé des infections latentes sur 13,9 % des arbres et prévenu l'infection sur 6,2 % d'entre eux. Les pertes dues à la rouille étaient de 7,4 % pour les arbres élagués et de 29,7 % pour les arbres témoins.

4.1.2.4.7 Contrôle génétique

Bien que des progrès aient été accomplis dans le développement d'une résistance génétique du pin blanc à la rouille vésiculeuse, un certain nombre d'années seront encore nécessaires avant qu'on ne puisse effectuer la plantation de pins blancs résistants à ce champignon (Anderson 1973; Zsuffa 1985; French 1992; Laflamme 1998). La recherche de cette résistance génétique repose sur l'inventaire, le marquage et le suivi des arbres-plus de pin blanc, puis sur la récolte de semences et de boutures de ces arbres.

4.1.3 Carie blanche alvéolaire

La carie blanche alvéolaire (*Phellinus pini* (Brot. : Fr.) A Ames) est un champignon qui est considéré comme l'une des principales causes de perte de volume chez les conifères en Amérique du Nord (Myren 1994). La carie blanche alvéolaire est responsable de 90 % des pertes dues aux caries chez le pin blanc et peut entraîner des pertes d'environ 35 % du volume marchand chez des pins âgés de plus de 210 ans (Boulet 1998). On rencontre aussi *Fomes pini* (Thore : Fr.) Karsten et *Trametes pini* (Thore) Fr. comme autres appellations de ce champignon (Myren 1994).

La formation d'une alvéole de carie blanche, où des tissus blancs sont entourés par du bois relativement ferme de couleur rougeâtre, est généralement le signe de la présence de carie blanche alvéolaire (Horton et Bedell 1960). Ce champignon est un problème surtout rencontré

dans les vieilles pinèdes établies sur un sol mince, où le pin blanc se trouve en association avec le pin rouge et le chêne rouge. Les études visant à évaluer précisément l'impact de ce champignon sont peu nombreuses. De telles études requièrent un nombre important de grumes qui, après analyse, perdent une grande partie de leur potentiel marchand. White (1953) présente toutefois des données résultant de l'examen de 1012 arbres d'un diamètre minimum de 15 cm. Plus récemment, Lafferrière et Thomassin (1991) ont aussi présenté des données concernant le pourcentage de carie en fonction de l'âge et du diamètre des tiges.

4.1.4 Bleuissement

Les taches bleues, bien qu'elles n'affectent pas sérieusement les propriétés physiques du bois, réduisent cependant la qualité visuelle des produits de transformation. En effet, ces taches n'apparaissent que dans l'aubier, ce type de champignon se nourrissant du contenu des cellules de l'arbre plutôt que de leurs parois, comme dans le cas des caries (Manion 1981). Plusieurs champignons sont responsables des taches qui pénètrent souvent profondément dans le bois, mais ceux qui provoquent le bleuissement du bois sont reconnus pour être les plus communs et ceux ayant l'impact économique le plus important (Linares-Hernandez et Wengert 1997). La coloration du bois ne représente pas un danger pour la vie du pin blanc et sa présence, selon l'étude de White (1953), est relativement faible dans les tiges examinées (Basham 1991). Cependant, une fois le pin blanc coupé, la colonisation de ces champignons peut, par température sèche et chaude, réduire la qualité de la bille si celle-ci n'est pas transportée rapidement au moulin pour être transformée ou entreposée adéquatement sous jets d'eau (Linares-Hernandez et Wengert 1997).

4.1.5 Vertébrés

Un grand nombre d'animaux se nourrissent du pin blanc ou de ses semences. Les campagnols et les écureuils se nourrissent d'une grande quantité de graines (Abbott 1961). Le porc-épic peut anneler le haut des arbres et le lièvre, les semis et les gaulis. Cependant, c'est généralement le chevreuil qui occasionne le plus de dommages aux arbres (Jones 1992). En effet, les dommages dus aux petits rongeurs et aux lièvres sont habituellement limités aux arbres de moins de 1 m alors que le chevreuil peut brouter les branches basses des arbres plus grands (Munro et Churcher 1998). Toutefois, la majorité des dommages associés au chevreuil se limite aux pins blancs de moins de 2,75 m (Jones 1992). Kittredge et Ashton (1995), dans une étude sur l'impact du broutage de la régénération par le chevreuil, n'ont pas noté de préférences marquées pour une essence particulière lorsque la hauteur des plants dépasse 48 cm. En deçà de cette hauteur, les chevreuils montraient une préférence marquée pour la pruche et le bouleau noir, une préférence moyenne pour le chêne rouge et aucune préférence pour l'érable à sucre, l'érable rouge et le pin blanc. Malgré cette absence de préférence gustative pour le pin blanc, la surpopulation et le manque de nourriture adéquate à proximité sont des facteurs qui peuvent faire en sorte que les dommages liés au broutage soient importants chez la régénération de pin blanc.

4.2 Agents abiotiques

4.2.1 Facteurs climatiques

Plusieurs facteurs climatiques peuvent causer des dommages au pin blanc. Chapeskie *et al.* (1989) mentionnent que la neige et le verglas sont la cause de bris de branches dans les jeunes peuplements de pin blanc. Le gel peut causer des dommages aux pins blancs dans les sites où l'air froid s'accumule et dans les platières sèches de sable où, la nuit, les pertes de chaleur par radiation provoquent des refroidissements rapides. Les dommages causés par le gel sont particulièrement sérieux au printemps, lors de la formation des aiguilles (Horton et Bedell 1960). Toutefois, les cotylédons des semis peuvent aussi être affectés durant toute la saison de croissance ainsi qu'en automne (Horton et Bedell 1960). Le gel peut entraîner la mort de l'extrémité des pousses, ce qui provoque par la suite des déformations et, dans des cas extrêmes, la mort des semis. Finalement, les lésions au cambium et le chablis sont d'autres types de dommages qui peuvent être causés par des facteurs climatiques locaux. Les lésions au cambium sont causées par l'insolation et les grands froids et se retrouvent habituellement en bordure des ouvertures, sur la partie du tronc exposée au sud-ouest. Le chablis survient généralement sur des sols minces et les dommages les plus importants se retrouvent sur des pentes d'exposition sud et dans de vieux peuplements équiennes denses. (Horton et Bedell 1960).

4.2.2 Pollution

Les conifères, de par leur longévité et la rétention de leurs aiguilles sur une période de deux à trois ans, se classent parmi les plantes les plus sensibles à la pollution et le pin blanc est généralement considéré comme l'un des conifères les plus sensibles (Hodges 1985). Le pin blanc est particulièrement sensible à une concentration trop élevée d'ozone, de dioxyde de soufre (SO₂), d'oxydes d'azote et de composés fluorés. Les effets de ces polluants varient suivant l'agent en cause, le degré d'exposition, le bagage génétique du pin blanc et selon les conditions du site de croissance. Ces polluants affectent l'ensemble des activités biologiques du pin blanc en réduisant l'efficacité photosynthétique de ses aiguilles et, par conséquent, l'apport d'énergie nécessaire au développement et à la défense de l'arbre (Hodges 1985).

5 ÉTABLISSEMENT ET CROISSANCE

5.1 Établissement

Normalement, la germination des graines de pin blanc s'effectue au printemps ou au début de l'été lorsque les conditions de température, d'humidité et d'aération des lits de germination sont favorables (Chapeskie *et al.* 1989). La germination des graines est particulièrement sensible aux écarts excessifs de température et d'humidité du lit de germination. Tout microsite offrant une certaine stabilité à ces égards, et dont le pH est inférieur à 8,5, est considéré comme favorable pour la germination des graines de pin blanc. Un sol minéral humide, un mélange de sol minéral et d'humus, la présence d'une fine couche de mousse de *Polytrichum* sp. ou d'horizons organiques brûlés constituent des conditions favorables à la germination des semences de pin blanc (Wendel et Smith 1990).

Une épaisseur de litière inférieure à 5 cm (Pinto *et al.* 1998a) et une intensité lumineuse au sol d'au moins 20 à 25 % du plein ensoleillement sont nécessaires pour l'établissement des semis (Atkins 1957 et Smith 1940 *dans* Pinto *et al.* 1998a). À ces conditions, il faut ajouter une température, une humidité et un pH adéquats. Lorsque ces exigences sont satisfaites et que l'établissement initial des semis de pin blanc est complété, ceux-ci peuvent survivre sous une intensité lumineuse aussi faible que 7 % du plein ensoleillement (Smith 1940 *dans* Pinto *et al.* 1998a) et résister à des périodes de dessiccation de plusieurs semaines (Wendel et Smith 1990).

Les semis de pin blanc sont très sensibles à la présence de végétation concurrente. Ceci est non seulement dû à la compétition que celle-ci exerce pour les ressources, mais aussi dû aux feuilles de cette végétation qui, en tombant, forment un tapis humide et uniforme qui écrase les semis de pin blanc et les empêche d'utiliser l'énergie du soleil. Ce tapis de feuilles constitue, selon Heckman *et al.* (1985), l'un des obstacles les plus importants au développement des semis. C'est pourquoi la survie de ces derniers augmente en fonction de l'élévation du microsite où ils se trouvent par rapport au sol environnant. Ainsi, sur de petites élévations, les semis ont tendance à se dessécher mais, comparativement aux petites dépressions, ils n'étouffent pas sous l'accumulation des feuilles. Par ailleurs, l'ouverture partielle du couvert (entre 20 et 30 %) provoque un assèchement des feuilles et celles-ci, en se recroquevillant, préviennent la formation de ce tapis de litière humide souvent hermétique aux efforts de résurgence des semis de pin blanc. Cet apport additionnel de lumière améliore aussi la vigueur des semis, ce qui leur permet de résister plus aisément à l'écrasement par les feuilles (Heckman *et al.* 1985).

5.2 Croissance des semis

Une croissance en hauteur très faible caractérise la période d'établissement des semis. Cette période dure de 3 à 5 ans (Wendel et Smith 1990). Durant cette période, le système racinaire des semis s'adapte aux conditions du sol. Les semis de pin blanc peuvent atteindre une hauteur de 2,5 à 5 cm la première année (Horton et Bedell 1960). Peu de semis de pin blanc dépassent

30 cm après 5 ans (Chapeskie *et al.* 1989). Durant ces cinq premières années, la croissance en hauteur des semis de pin blanc augmente avec l'augmentation de l'intensité lumineuse, et ce, jusqu'à 45 % du plein ensoleillement (Wetzel et Burgess 1994).

Suite à cette période d'établissement, et en assumant une faible compétition du sous-étage, la croissance en hauteur du pin blanc augmente en moyenne de 30 cm par année et sa hauteur atteint généralement 1 m après 8 ans (Pinto *et al.* 1998a). En comparaison, le bouleau blanc peut atteindre 1 m et plus en 3 ans et les drageons de peupliers peuvent, en plein soleil, atteindre 1 m en une seule année (Chapeskie *et al.* 1989). Pour les dix premières années du pin blanc, on peut s'attendre à une croissance en hauteur presque inexistante durant les deux premières années, puis une stagnation jusqu'à l'âge de cinq ans, suivie d'une augmentation progressive et considérable jusqu'à dix ans (Frothingham 1914 *dans* Lancaster et Leak. 1978). La pleine croissance en hauteur nécessite entre 45 et 55 % du plein ensoleillement (Logan 1959; Stiell 1985). Par contre, la croissance en diamètre de la flèche terminale et du collet racinaire, ainsi que le poids des racines et des semis, augmentent proportionnellement avec l'intensité lumineuse (Logan 1959; Wetzel et Burgess 1994).

La compétition exercée sur les semis de pin blanc par les espèces à feuillage léger, comme le bouleau blanc, est relativement faible et permet donc généralement au pin blanc d'atteindre l'étage dominant des peuplements comportant de telles espèces. Cependant, lorsque les semis de pin blanc entre en compétition avec des essences plus vigoureuses (peupliers, chênes, érables), ils meurent généralement avant d'avoir pu atteindre l'étage dominant. Généralement, lorsque les semis atteignent le stade de gaulis, leurs chances de survie augmentent face à la compétition des arbres et des autres plantes (Wilson et McQuilkin 1963).

5.3 Croissance du stade de gaulis au stade adulte

La croissance en hauteur du pin blanc commence en mai avec l'élongation des pousses. Elle est généralement complétée à 90 % entre la mi et la fin juin, et se termine entre la fin juin et le début de juillet (Horton et Bedell 1960). Une forte poussée de croissance en hauteur se produit généralement au mois de mai (Buse 1992). La croissance a alors principalement lieu la nuit, surtout par nuits fraîches (Kienholz 1934 *dans* Horton et Bedell 1960). La croissance radiale débute peu après l'ouverture des bourgeons pour se poursuivre sur une période de quatre mois, si une sécheresse ne vient pas l'interrompre (Horton et Bedell 1960).

Une fois la hauteur du DHP atteinte (1,37 m), soit après une période de 8 à 10 ans, la croissance en hauteur atteint en moyenne 30 à 46 cm par année (Horton et Bedell 1960). Dans les meilleures conditions, les jeunes pins peuvent présenter des accroissements annuels en hauteur atteignant 1,22 m (Harlow et Harrar 1941 *dans* Horton et Bedell 1960). Le taux de croissance maximal est atteint plus tôt sur les sites de meilleure qualité mais, après 55 ans, il est généralement égal sur tous les sites, peu importe leur qualité (Beck 1971). Sur des sites de qualité intermédiaire, dans des peuplements de bonne densité, le taux d'accroissement en diamètre est relativement uniforme et atteint en moyenne 2,5 cm tous les 5 à 7 ans jusqu'à un âge de 250 ans. (Wilson et McQuilkin 1963).

6 AMÉNAGEMENT DU PIN BLANC

6.1 Classification des sites pour l'aménagement

Plusieurs auteurs ont proposé des classifications relatives à l'aménagement du pin blanc (Scott 1958; OMNR 1973; Lancaster et Leak 1978; Chapeskie *et al.* 1989; Carleton et Arnup 1993; Corbett 1994), mais ces classifications demeurent assez générales. Nous avons tenté de regrouper l'information la plus pertinente à la figure 6 où l'on décrit l'effet de différentes variables abiotiques sur la productivité et sur les risques associés à la rouille vésiculeuse et à la végétation concurrente.

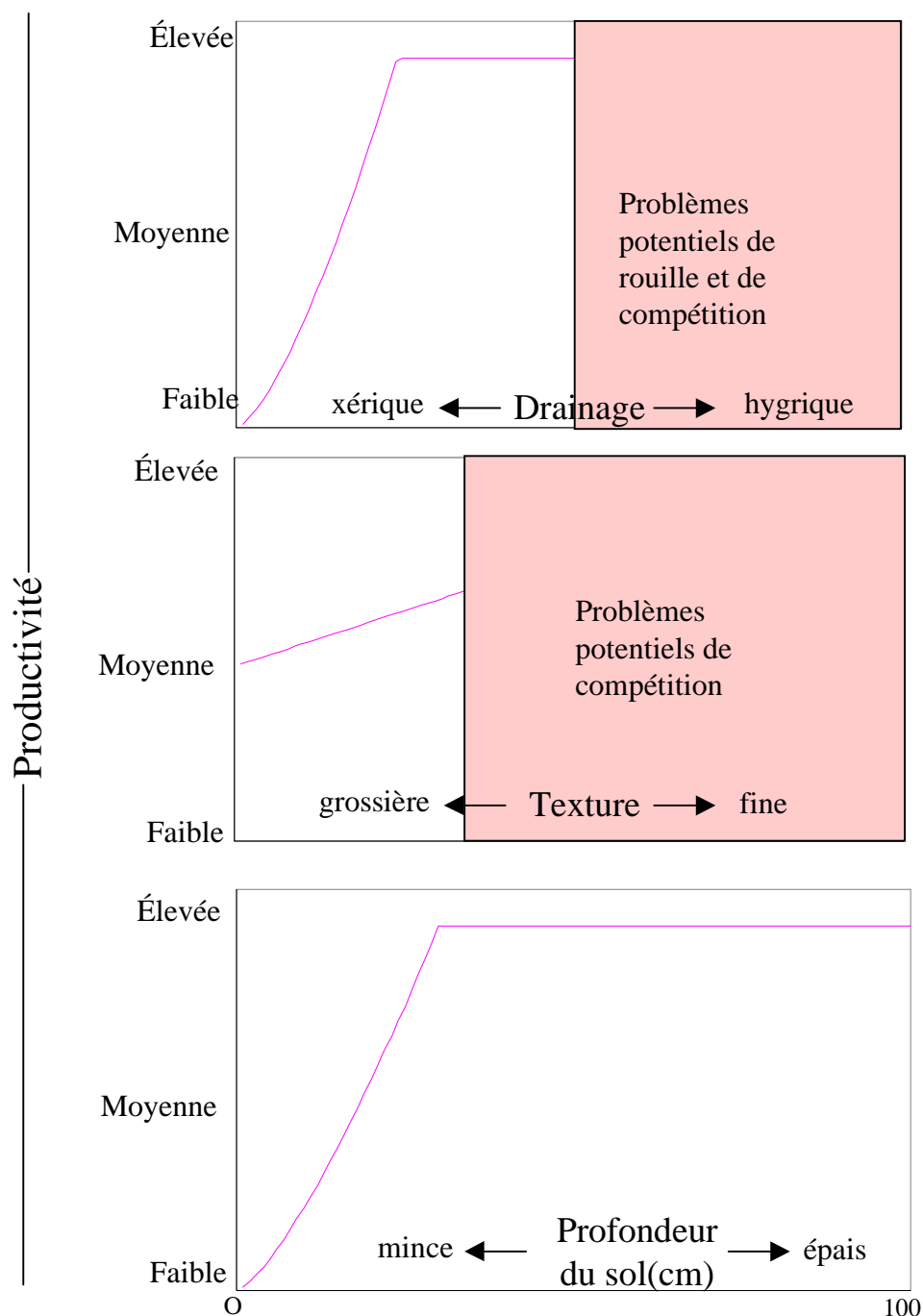


Figure 6 : Relations entre les caractéristiques de sol, la productivité et les problèmes liés à la compétition et à la rouille vésiculeuse.

On remarque tout d'abord que la productivité est optimale sur les sites mésiques dont le sol présente une texture fine (Figure 6). Un sol très argileux peut, par contre, nuire à la productivité, de même qu'une profondeur de sol de plus de 30 cm. On peut voir à la figure 6 que les sites riches présentent un plus grand risque de compétition. Ce qui est aussi le cas des sites humides par rapport aux sites xériques. La figure 6 permet de constater que les sites avec le meilleur potentiel de croissance pour le pin blanc sont aussi ceux sur lesquels le pin blanc

risque de rencontrer des problèmes de compétition et de rouille vésiculeuse. L'aménagiste se trouve donc devant le choix suivant: ou bien on aménage le pin blanc sur des sites relativement moins productifs en y mettant des efforts modérés, ou bien on aménage celui-ci sur des sites plus productifs qui nécessiteront toutefois des efforts plus soutenus pour contrer la compétition et la rouille vésiculeuse.

6.2 Récolte

Nous avons pu voir dans les sections précédentes de ce document que les caractéristiques des sites influencent les possibilités de régénération en pin blanc. Le type de coupe joue aussi un rôle déterminant. Dans cette section, nous présentons une revue de littérature sur l'effet des principaux types de coupe sur la régénération et la productivité du pin blanc. Pour chaque type de coupe, nous présentons un tableau synthèse dans lequel sont énumérés les facteurs à considérer pour obtenir une bonne régénération de pin blanc. Parmi ces facteurs, citons la présence de semenciers, la présence d'un sol minéral mis à nu et d'une intensité lumineuse intermédiaire.

6.2.1 Coupe totale (et avec réserve de semenciers)

6.2.1.1 Définition

La coupe à blanc est l'élimination complète, ou presque complète, du couvert d'origine. À la suite de cette intervention, le renouvellement du peuplement repose soit sur la régénération préétablie, sur la germination des graines enfouies dans la litière, sur l'ensemencement (naturel ou artificiel) ou sur la plantation (Stiell 1985). Par le passé, la coupe à blanc a été, avec la coupe à diamètre limite, l'un des traitements sylvicoles les plus utilisés dans les peuplements de pin blanc. Au Québec, la venue du nouveau régime forestier dans les années 1986-1987, a entraîné une diminution de l'utilisation ce type de coupe dans l'aménagement du pin blanc (Brown 1994).

6.2.1.2 Effet sur la régénération

De façon générale, la coupe totale a été peu favorable à l'établissement d'une régénération satisfaisante de pin blanc. Cela est imputable, d'une part, aux conditions inappropriées des sites sur lesquels ont été effectuées les coupes, au manque d'arbres semenciers résiduels, et à la non-concordance des coupes avec les bonnes années semencières. D'autre part, ce type de coupe entraîne généralement la création de conditions environnementales peu favorables à l'établissement, à la croissance et à la protection de la régénération. De plus, l'effet des feux suite aux coupes a parfois limité le succès de la régénération (Bowling et Niznowski 1996). En effet, les débris de coupe présentent un fort potentiel de combustibilité et, une fois consommés, ne laissent aucune possibilité de survie pour la régénération préétablie.

Dans l'ouest de l'Ontario, des inventaires indiquent que la régénération naturelle en pin blanc, 10 ans après une coupe totale, est en moyenne de 500 tiges/ha avec un coefficient de distribution de 10 à 15 %. Cette distribution varie cependant avec le pourcentage d'exposition du sol minéral, la proximité des arbres semenciers et la densité de la végétation concurrente (Bowling et Niznowski 1996). Dans le centre de cette même province, on rapporte une densité relative de pin blanc de 30 % dans une plantation établie après coupe totale sur une superficie de 824 ha (Morneault 1998a). Ahlgren (1976), pour sa part, rapporte la présence de dommages importants causés par la rouille vésiculeuse suite à une coupe totale, la majorité de la régénération ayant été affectée par la rouille. L'impact du charançon sur le développement du pin blanc en milieu ouvert est aussi un problème fréquemment mentionné dans la littérature (Marty et Mott 1964; Stiell 1985).

Il est bien établi que la coupe totale offre beaucoup moins de possibilités pour l'établissement et le développement du pin blanc que la coupe progressive (Lancaster et Leak 1978; Wray 1985b; Chapeskie *et al.* 1989; Pinto *et al.* 1998b). Toutefois, la coupe totale, et plus spécifiquement celle avec réserve d'arbres semenciers, est encore jugée acceptable dans certaines conditions de site pour restaurer le pin blanc, ou pour en maintenir la présence sur un site lorsque celui-ci ne s'y trouve qu'en faible nombre (Pinto *et al.* 1998b).

6.2.1.3 Application

6.2.1.3.1 Coupe totale

La coupe totale a été préconisée pour convertir des peuplements de mauvaise qualité sur des sites où le pin blanc pourrait potentiellement produire de belles tiges (Foster 1985; Chapeskie *et al.* 1989). Elle a aussi été préconisée pour la récupération de peuplements de pin blanc dont la qualité est affectée de façon importante par la rouille vésiculeuse et le charançon (Chapeskie *et al.* 1989).

6.2.1.3.2 Coupe totale avec réserve de semenciers

La coupe avec réserve de semenciers peut être utilisée dans des peuplements croissant sur des sols favorables à l'établissement d'une régénération de pin blanc et dont le couvert est composé d'une faible proportion de pins blancs et d'une forte proportion de feuillus intolérants et de conifères (Pinto *et al.* 1998b). Dans de tels peuplements, la coupe avec réserve d'arbres semenciers est préconisée lorsque la surface terrière en pin blanc est inférieure à 8 à 12 m²/ha (Pinto 1992) ou lorsque la surface terrière en conifères varie entre 4 et 12 m²/ha (Pinto *et al.* 1998b). Au-delà de 12 m²/ha, la coupe progressive devrait être utilisée. En deçà de 4 m²/ha, on peut maintenir ou augmenter la proportion de pin blanc en préservant les quelques semenciers présents. Lors de ces coupes, des traitements additionnels, avant ou après coupe, peuvent s'avérer nécessaires pour assurer une présence adéquate de pins blancs (Pinto *et al.* 1998b).

Sur les sites de coupe, une distribution de 10 à 35 arbres semenciers à l'hectare est généralement requise pour assurer un apport adéquat de semences. Cependant, 50 arbres semenciers à l'hectare permettraient une meilleure pollinisation et formeraient une base

d'échange génétique plus saine (Pinto *et al.* 1998b). Le chablis n'est généralement pas un problème pour le pin blanc dans des coupes totales avec réserve de semenciers. Toutefois, la conservation de groupes d'arbres semenciers distancés de 60 m les uns des autres, plutôt que la conservation de tiges individuelles réparties uniformément, a quand même été proposée pour minimiser les risques de chablis (Frothingham 1914 et Larsson 1946 *dans* Horton et Bedell 1960). La coupe avec réserve de semenciers devrait concorder avec une bonne année semencière et être accompagnée d'une préparation de terrain. De plus, les plus beaux sujets devraient être sélectionnés comme semenciers (Horton et Bedell 1960; Pinto *et al.* 1998b). Toutefois, les arbres à favoriser comme semenciers ne sont pas nécessairement ceux présentant une couronne très large et promettant une forte production de graines si ceux-ci ont été attaqués par le charançon. Il est préférable de favoriser des pins blancs présentant une belle tige en très bonne santé, permettant d'espérer le développement d'une lignée d'arbres de belle forme et résistants au charançon. Une liste des critères à utiliser pour le choix des arbres semenciers a été présentée à la section 3.1.5.4 (Fleurs et Fruits). Finalement, la préservation sur le parterre de coupe d'une certaine quantité de débris ainsi que d'un minimum de six arbres présentant des cavités a été instaurée en Ontario pour préserver et favoriser les populations de prédateurs naturels du charançon (Naylor 1994; Naylor 1998). Le tableau 1 présente les critères à respecter lors de la planification d'une coupe avec réserve de semenciers pour obtenir une bonne régénération de pin blanc.

Tableau 1 : Critères à respecter lors de l'application d'une coupe totale avec réserve de semenciers dans le cadre d'un aménagement visant à régénérer le pin blanc.

COUPE TOTALE AVEC RÉSERVE D'ARBRES SEMENCIERS	
Critères à respecter lors de la planification	Possibilité de respecter chacun des critères et travaux nécessaires pour y parvenir
10 à 35 arbres semenciers à l'hectare.	Réalisable. Inventaire et sélection des arbres semenciers requis.
Bonne année semencière pendant ou immédiatement après la coupe.	Réalisable. Suivi des arbres semenciers nécessaire pour établir la période de coupe.
Environ 50 % d'ensoleillement dans l'ouverture créée.	Réalisable. Coupe à blanc avec réserve d'arbres semenciers et rétention d'ombrage.
Exposition du sol minéral sur plus de 50 % du parterre de coupe.	Réalisable. Scarifiage nécessaire.
Suivi et réduction de la végétation concurrente.	Réalisable. Dégagements plus nombreux requis sur les sites plus riches.
Suivi et traitements de protection contre la rouille vésiculeuse.	Réalisable. Élagage nécessaire dans les zones et sites à risque élevé.
Suivi et traitements de protection contre le charançon.	Réalisable. Tailles de formation dans les zones à risque élevé.

6.2.1.3.3 Coupe avec protection de la régénération et des sols

La coupe avec protection de la régénération et des sols représente pour la régénération du pin blanc une alternative encore moins recommandable que la coupe totale lorsque la régénération n'est pas présente sur le parterre. Comme l'objectif de ce type de coupe est de limiter la perturbation du sol, le nombre de microsites propices à l'établissement du pin blanc est fortement réduit. En présence d'une régénération adéquate de pin blanc, cette coupe prend toutefois toute sa valeur en protégeant la régénération préétablie de pin blanc et en permettant le reboisement ultérieur. L'application de cette coupe en hiver réduit les dommages à la régénération qui est alors protégée par une couche de neige (Horton et Bedell 1960).

6.2.2 Coupe par bandes

Bien que l'utilisation de la coupe par bandes ait connu une forte popularité tant en Ontario qu'au Québec, la littérature portant sur l'aménagement du pin blanc à l'aide de ce type de coupe semble être limitée à des mentions générales et à de rares articles.

6.2.2.1 Définition

La coupe par bandes se définit comme la coupe à blanc de bandes rectilignes ou sinueuses, appliquée de façon alterne ou progressive, dans le but de favoriser la régénération sur l'ensemble d'une surface d'aménagement. Les bandes sont généralement orientées à angle droit par rapport aux vents dominants pour favoriser l'ensemencement naturel. La coupe des bandes résiduelles peut s'étaler sur une période de 3 à 10 ans, selon le succès d'établissement de la régénération dans les bandes coupées.

6.2.2.2 Effet sur la régénération

L'effet de la coupe par bandes sur la régénération varie selon la composition du peuplement et la largeur et l'orientation des bandes, facteurs déterminant l'exposition du parterre et son ensemencement naturel (Marquis 1965; Smith 1986; Jeglum et Kennington 1993). Selon la largeur et l'orientation des bandes, les effets escomptés sur la régénération sont similaires à ceux d'une coupe progressive (bandes de 5 à 15 m de largeur), à ceux d'une coupe par trouées de forme rectangulaire (superficie de 500 à 1500 m²) ou à ceux d'une coupe à blanc de plus grande dimension (superficie de plus de 20 000 m² et largeur de plus de 20 m). L'utilisation des bandes constitue une variante reconnue de chacun de ces systèmes de coupe.

6.2.2.3 Application

On peut avoir recours à la coupe par bandes pour la régénération des pinèdes blanches croissant sur des tills ou des plaines d'épandage dont la topographie est relativement plane et uniforme ou dont les caractéristiques de peuplement sont homogènes (Chapeskie *et al.* 1989;

Pinto *et al.* 1998b). Elle est recommandée pour les peuplements très denses où l'utilisation de la coupe progressive est difficilement réalisable ou pour la conversion des peuplements de feuillus intolérants de mauvaise qualité. Elle représente aussi une alternative à l'utilisation de la coupe totale sur les tills minces (Chapeskie *et al.* 1989).

La coupe par bandes a été utilisée avec succès pour la régénération du pin blanc en peuplements purs et en peuplements mélangés sur les sites secs et pauvres (Horton et Bedell 1960). Fisher et Terry (1920) associent les classes inférieures de drainage à une bonne régénération de pin blanc dans leurs coupes par bandes de 30 à 60 m de largeur. Sur des tills secs, la coupe par bande (bande de 20 m et moins de largeur) donne une régénération satisfaisante, mais les périodes d'établissement sont longues si des travaux de préparation de terrain et d'entretien ne sont pas effectués (Chapeskie *et al.* 1989). De tels travaux sont aussi préconisés pour assurer la régénération du pin blanc sur les sols plus riches (MERQ 1981; Chapeskie *et al.* 1989).

Stiell et Berry (1985) ont eu recours à des variations dans l'orientation et la largeur des bandes pour faire varier l'exposition et ainsi trouver une solution économique et naturelle aux dommages causés par le charançon. Leurs résultats démontrent que l'orientation nord-sud de bandes dont la largeur ne dépasse pas 0,66 à 1 fois la hauteur du peuplement environnant permet à une proportion intéressante de tiges de pins blancs d'atteindre une hauteur de 5,2 m sans dommages causés par le charançon. Cependant, cette protection n'est efficace que lorsque les peuplements comportent une forte proportion de conifères, les feuillus n'offrant que très peu d'ombre tôt au printemps durant la période de réveil du charançon. Ces auteurs concluent qu'une orientation qui permettrait une réduction encore plus grande de l'exposition du parterre pourrait être plus efficace que celle employée dans leur expérience.

La coupe par bandes est d'application simple pour les travailleurs et la machinerie. De plus cette technique de coupe est très versatile, se localise facilement, est adaptée à l'exploitation des sites fragiles ainsi qu'aux peuplements trop denses pour permettre la circulation de la machinerie. Elle permet également d'assurer une régénération adéquate sur les sols minces et d'intégrer plus facilement les travaux de suivi et d'entretien. Par contre, la protection de la régénération lors de la coupe des bandes résiduelles, de même que l'application de ce type de coupe sur terrain escarpé, sont deux sources de difficultés. Le tableau 2 présente les critères à respecter lors de la planification d'une coupe par bandes pour obtenir une bonne régénération de pin blanc.

Tableau 2 : Critères à respecter lors de l'application d'une coupe par bandes dans le cadre d'un aménagement visant à régénérer le pin blanc.

COUPE PAR BANDES	
Critères à respecter lors de la planification	Possibilité de respecter chacun des critères et travaux nécessaires pour y parvenir
10 à 35 arbres semenciers à l'hectare.	Réalisable. Inventaire et sélection des arbres semenciers requis dans les bandes résiduelles.
Bonne année semencière pendant ou immédiatement après la coupe.	Réalisable. Suivi des arbres semenciers nécessaire pour établir la période de coupe.
Environ 50 % d'ensoleillement dans les ouvertures créées.	Réalisable. Sélection adéquate de l'orientation et de la largeur des bandes.
Exposition du sol minéral sur plus de 50 % du parterre de coupe.	Réalisable. Scarifiage nécessaire.
Suivi et réduction de la végétation concurrente.	Réalisable. Dans sa niche naturelle, protection liée à l'orientation et à la largeur des bandes. Dégagements plus nombreux requis sur les sites plus riches.
Suivi et traitements de protection contre la rouille vésiculeuse.	Réalisable. Dans les zones à faible risque, protection liée à l'orientation et à la superficie des bandes. Élagage nécessaire dans les zones et sites à haut risque.
Suivi et traitements de protection contre le charançon.	Réalisable. Dans les zones à faible risque, protection liée à l'orientation et à la superficie des bandes. Tailles de formation requises dans les zones à haut risque.

6.2.3 Coupe progressive d'ensemencement

6.2.3.1 Définition

La coupe progressive d'ensemencement implique la coupe graduelle de l'ensemble d'un peuplement par une série de coupes partielles, étalées sur une fraction de la révolution, dans le but d'établir une régénération essentiellement équienne sous la protection partielle d'arbres semenciers (Smith 1986). Plusieurs variantes de la coupe progressive d'ensemencement peuvent être définies suivant l'uniformité de leur application à l'ensemble du peuplement. La coupe progressive uniforme correspond à l'application des coupes partielles de façon uniforme sur l'ensemble du peuplement. L'application de la coupe progressive peut aussi être effectuée de façon non uniforme soit par bandes, habituellement d'une largeur inférieure à une demi-

hauteur du couvert, ou par groupes ou trouées, qui sont alors centrées sur un secteur bien régénéré. Dans toutes les variantes, la suite des opérations dépend du succès de la régénération sur la superficie coupée au départ.

6.2.3.2 Effet sur la régénération

La coupe progressive est considérée comme le système de coupe qui offre les meilleures conditions de croissance pour la régénération du pin blanc. Plus spécifiquement, elle procure des lits de germination réceptifs, une provision abondante de graines, une protection durant la phase d'établissement des semis et un dégagement progressif (MERQ 1981). La protection offerte par les arbres résiduels réduit également les risques d'infection par la rouille vésiculeuse en temporisant le refroidissement du parterre en soirée et en limitant la formation de rosée matinale à l'étage dominant (Hodge *et al.* 1989 dans Pinto 1992). L'exposition partielle du parterre de coupe constitue aussi un avantage en réduisant la végétation concurrente et les dommages causés par le charançon du pin blanc (Horton et Bedell 1960; Stiell et Berry 1985; Chapeskie *et al.* 1989).

6.2.3.3 Application

La coupe progressive s'applique aux peuplements qui comptent au moins 30 % de pins blancs et de pins rouges ou à ceux dont la surface terrière comporte plus de 12 m²/ha de pins blancs et une composante inférieure de pin rouge, d'épinette blanche, de pruche et de chêne rouge. La coupe progressive peut également être utilisée dans les peuplements mixtes contenant des concentrations suffisantes de pins blancs (Morneault 1998a) ou pour introduire par plantation le pin blanc dans des peuplements où il est absent (coupe d'abri) (Pinto 1992). Elle est aussi recommandée dans les endroits touristiques lorsque la valeur esthétique prime sur la production (Horton et Bedell 1960).

La coupe progressive d'ensemencement comporte de deux à quatre coupes, suivant les conditions du peuplement. La première coupe, ou coupe préparatoire, est employée pour éliminer les espèces indésirables et donner plus d'espace de croissance aux tiges sélectionnées. Elle est comparable à une éclaircie commerciale. Généralement, cette première coupe est appliquée dans des peuplements âgés de 61 à 80 ans dont le diamètre moyen des tiges varie de 25 à 42 cm, ainsi que dans certains peuplements dont le diamètre moyen des tiges est supérieur à 42 cm, mais où les couronnes ne sont pas pleinement développées (entre 4 et 5 m de diamètre). Après coupe, la surface terrière est approximativement de 18 m²/ha et la fermeture du couvert de 50 % (Morneault 1998a; Pinto *et al.* 1998b). En espaçant les arbres résiduels d'une distance équivalente à environ 25 à 30 % de leur hauteur, ou d'une largeur d'une couronne, la coupe préparatoire permet à ces tiges d'augmenter la dimension et le volume de leur couronne et, ainsi, leur production de graines (Pinto 1992).

La deuxième coupe partielle, ou coupe d'ensemencement, est employée dans des peuplements âgés de 81 à 100 ans, c'est-à-dire environ 20 ans après la coupe préparatoire, ou parfois plus,

selon la réussite de la première opération. La dimension des couronnes est alors d'environ 6 à 8 m de diamètre. Lors de cette coupe, idéalement réalisée durant une bonne année semencière, les arbres résiduels sont éclaircis par le bas en favorisant les plus beaux semenciers. L'espacement requis correspond à environ 40 % de leur hauteur, ou approximativement une demi-largeur de couronne, ce qui correspond à une fermeture du couvert de 40 à 50 % (Pinto *et al.* 1998b). Le but de cette seconde coupe est de favoriser la germination et le développement initial du pin blanc en procurant un ombrage partiel qui réduit les variations d'humidité et de température tout en permettant l'entrée dans le sous-étage de suffisamment de lumière pour la croissance de la régénération (Pinto 1992).

Les deux dernières coupes sont des coupes de dégagement. Lorsque la régénération atteint une hauteur moyenne de 1,5 m, que les risques de dommages par le charançon sont faibles et qu'au moins 1000 semis/ha sont répartis uniformément sur le parterre après la coupe, on peut n'appliquer qu'une seule coupe de dégagement. Dans les autres cas, deux coupes de dégagement sont recommandées. La première de ces coupes est appliquée lorsque la régénération atteint 0,3 à 1,5 m et que la fermeture du couvert est supérieure à 50 %. Lors de cette coupe, les tiges résiduelles de qualité supérieure sont espacées de 50 à 60 % de leur hauteur, ce qui correspond à une fermeture du couvert de 30 à 40 %. La coupe finale est effectuée lorsque la régénération atteint une hauteur moyenne de 5 à 6 m (Pinto 1992 ; Morneault 1998a). Le tableau 3 présente les critères à respecter lors de l'application d'une coupe progressive d'ensemencement pour obtenir une bonne régénération en pin blanc.

Tableau 3 : Critères à respecter lors de l'application de la coupe progressive d'ensemencement dans le cadre d'un aménagement visant à régénérer le pin blanc.

COUPE PROGRESSIVE D'ENSEMENCEMENT	
Critères à respecter lors de la planification	Possibilité de respecter chacun des critères et travaux nécessaires pour y parvenir
10 à 35 arbres semenciers à l'hectare.	Réalisable. Inventaire et sélection des arbres semenciers requis.
Bonne année semencière pendant ou immédiatement après coupe.	Réalisable. Suivi des arbres semenciers nécessaire pour établir la période de coupe.
Environ 50 % d'enselement dans l'ouverture créée.	Réalisable.
Exposition du sol minéral sur plus de 50 % du parterre de coupe.	Réalisable. Scarifiage requis.
Suivi et réduction de la végétation concurrente.	Réalisable. Protection offerte par le couvert résiduel. Dégagements plus nombreux requis sur les sites plus riches.
Suivi et traitements de protection contre la rouille vésiculeuse.	Réalisable. Dans les zones à faible risque, protection offerte par le couvert résiduel. Élagage nécessaire dans les zones et sites à haut risque.
Suivi et traitements de protection contre le charançon.	Réalisable. Dans les zones à faible risque, protection offerte par le couvert résiduel. Tailles de formation requises dans les zones à haut risque.

6.2.4 Coupe par trouées

6.2.4.1 Définition

La coupe par trouées correspond à une petite coupe totale de forme variable et d'une superficie allant de 500 à 1500 m². Elle est employée pour favoriser la régénération des essences peu tolérantes à l'ombre (MRNQ 1998). Marquis (1965) définit la trouée comme une coupe de dimension restreinte, inférieure à 0,4 ha, et de forme ronde, rectangulaire, carrée ou irrégulière. Dans un bloc d'aménagement où le jardinage est le principal système de coupe employé, la coupe par trouées prend, dans la nomenclature forestière du Québec, le nom de coupe de jardinage avec trouées (MRNQ 1998). Ce type de coupe, dont la superficie coupée correspond à des trouées d'un diamètre variant de 25 à 45 m, est un compromis entre la coupe de jardinage par groupes d'arbres et la coupe de jardinage avec régénération par parquets. En

France, la coupe de jardinage par groupes ou bouquets d'une superficie variant entre 200 et 2000 m² englobe ce type de coupe (Bary-Lenger 1988). Au Québec, la coupe par trouées est le traitement sylvicole préconisé pour l'aménagement des groupes de production de pins et de bouleaux (MRNQ 1998).

6.2.4.2 Effet sur la régénération

Marquis (1965) observe que la dimension des ouvertures a un effet important sur la composition ultérieure de la trouée dû à la quantité de lumière qui atteint le sol. La forme et l'orientation de la trouée sont particulièrement importantes pour établir la quantité de lumière atteignant le sol des trouées de superficie intermédiaire (ex.: 2000 m²), mais sont des facteurs secondaires déterminant l'ensoleillement dans les trouées plus petites (ex.: 400 m²).

Selon Fisher et Terry (1920), l'application d'une coupe par trouées, avec des trouées d'un diamètre variant entre 15 à 33 m, produit une bonne régénération en pin blanc sur des sols secs et une régénération plutôt pauvre sur de meilleurs sites. La concordance d'une bonne année semencière, associée à la présence de bons arbres semenciers, est alors considérée comme indispensable à la réussite de l'opération. Sowers *et al.* (1956) recommandent aussi l'emploi d'ouvertures plus grandes que dans la coupe de jardinage par groupes d'arbres, associant le succès de ces interventions à la grandeur des ouvertures et à la scarification des sites. Plus récemment, des ouvertures de 10 à 50 m de diamètre ont aussi été proposées pour favoriser la croissance du pin blanc (OMNR 1996).

Dans une étude portant sur l'établissement et le développement de différentes essences, Smith et Ashton (1993) font part du suivi d'une trouée de 45 m de diamètre ayant subi une préparation de terrain ne laissant sur le parterre que des chênes âgés d'un an, des semis de pruche et des drageons de hêtre. Cette préparation de terrain, effectuée avec un peigne monté sur un buteur, a repoussé sur les côtés de la trouée l'ensemble de la végétation ligneuse et exposé le sol minéral sur une proportion substantielle du parterre dans la trouée. Un ensemencement avec du pin blanc, du bouleau noir et du bouleau blanc a suivi ce traitement. Le sol, un loam sableux issu d'un till épais, avait une couche indurée (fragipan) à 0,5 m de profondeur. Après 21 ans, seuls quelques pins blancs épars ont survécu en sous-couvert. Les tiges de pin blanc qui présentaient la meilleure croissance se trouvaient dans la partie nord de la trouée, sous le couvert de bouleaux gris. Dans cette même expérience, des trouées de formes rectangulaires de 24 m de large ont donné sensiblement le même résultat pour le pin blanc.

6.2.4.3 Applications

Les références sur les trouées sont nombreuses pour les feuillus, mais plus limitées lorsqu'elles concernent spécifiquement le pin blanc. Horton et Bedell (1960) mentionnent les recommandations de Lutz et Cline (1947) pour les peuplements de pins de structure inéquienne issus de friches agricoles, croissant sur sols sableux ou graveleux. Ces auteurs proposent des ouvertures variant de 15 à 23 m de diamètre pour limiter la végétation concurrente. Ils recommandent aussi, sous couvert de feuillus tolérants, de favoriser le

développement de groupes de forte densité de pins blancs sur des superficies inférieures à 800 m² pour limiter les dommages causés par le charançon.

Marquis (1965) ne recommande pas l'emploi exclusif des trouées pour l'aménagement de grandes superficies dû au problème de localisation ultérieure des trouées. Par contre, le recours aux trouées est recommandé, conjointement avec le jardinage, pour éliminer les groupes d'arbres mûrs, surannés ou malades, et pour maintenir la proportion des essences semi-tolérantes.

Dans une étude couvrant une période de 30 ans, Dale *et al.* (1995) notent l'importance de l'effet d'ombrage créé par la lisière sur la croissance des nouvelles tiges. Toutefois, plus la trouée est grande, plus cet effet se dissipe rapidement. À dix mètres du pourtour, le volume produit dans une trouée de 4000 à 8000 m² est trois fois plus élevé que dans une trouée de 400 à 1200 m². Après 30 ans, la surface terrière et le volume à l'hectare sont 4 à 5 fois plus élevés dans une trouée de 4000 m² que dans une trouée de 400 m². Généralement, plus l'on se rapproche du centre de la trouée, plus le nombre d'arbres de qualité augmente. Le nombre moyen d'arbres de qualité était de 5 dans des trouées de 400 m² sur des sites de qualité moyenne ou bonne, de 35 dans des trouées de 2000 à 4000 m² sur des sites de qualité moyenne, et de 55 sur des sites de bonne qualité. Dans des trouées de plus de 12 000 m², il était de 60 sur les sites de qualité moyenne et de 80 sur les sites de bonne qualité. Bien que la composition du peuplement futur soit toujours dépendante de la qualité du site, la proportion en essences intolérantes augmente avec l'augmentation de la dimension des trouées de 400 à 4000 m².

Coates et Burton (1997) résument leur revue de littérature et leur expérience sur les trouées en disant que :

- les trouées de 25 m de diamètre reçoivent environ 50 % du plein ensoleillement lorsque la hauteur du peuplement est de 30 m;
- la plus grande diversité des conditions de lumière, et donc la plus grande diversité d'espèces, se retrouvent dans les trouées d'un diamètre variant entre 30 et 75 m, ou entre 1 et 2,5 fois la hauteur du peuplement environnant;
- l'exposition du sol minéral favorise la colonisation par les essences intolérantes;
- une trouée de plus de 400 m² défavorise les essences tolérantes;
- la composition ultérieure de la trouée est liée à l'abondance des espèces présentes sur son pourtour;
- des conditions de sol particulières et des emplacements particuliers dans la trouée peuvent favoriser certaines espèces au détriment d'autres;
- la présence de régénération préétablie modifie drastiquement la dynamique de succession de la trouée.

À la lumière de ces recherches, il est donc permis de penser que :

- une trouée de moins de 1500 m², offrant une exposition de moins de 50 % du plein ensoleillement, limite la croissance en diamètre des pousses terminales de pin blanc et contribue donc à réduire les attaques du charançon;
- une trouée d'un diamètre de 1 à 2,5 fois la hauteur du couvert environnant correspond aux dimensions maximales que devrait avoir une ouverture pour favoriser une essence semi-tolérante comme le pin blanc;
- la scarification du site est indispensable pour favoriser le pin blanc;
- la dimension minimale des trouées établie par le Ministère des Ressources Naturelles du Québec (1998), soit 500 m², défavorise les feuillus tolérants;
- un ensemencement ou une plantation peuvent s'avérer nécessaires lorsque les arbres semenciers sont peu nombreux, puisque l'abondance de la régénération en pin blanc est proportionnelle au nombre d'arbres semenciers.

Dans une étude menée dans un peuplement de feuillus tolérants avec pin blanc, Nolet *et al.* (1999) arrivent aux conclusions suivantes quant à l'application de la coupe par trouées :

- à moins d'opter pour la régénération artificielle, il est absolument nécessaire que l'aménagiste planifie ses travaux en fonction des bonnes années semencières;
- à moins d'opter pour la régénération artificielle, il est absolument nécessaire de localiser les trouées à proximité d'une quantité suffisante de semenciers. Cette quantité dépendra de l'intensité du scarifiage, de la viabilité des graines et du nombre de pins blancs matures que l'on désire obtenir dans les trouées;
- le scarifiage des sites est fortement recommandé. Ce scarifiage devrait être fait avant l'automne car, autrement, on risque de retirer les semences de la trouée;
- un suivi intensif et l'éducation des tiges sont nécessaires pour réduire les problèmes de compétition, de charançon et de rouille vésiculeuse. L'intensité de ces activités dépendra aussi du nombre de pins blancs que l'on désire obtenir à maturité dans les trouées.

Le tableau 4 présente les critères à respecter lors de l'application d'une coupe par trouées pour obtenir une bonne régénération en pin blanc.

Tableau 4 : Critères à respecter lors de l'application d'une coupe par trouées dans le cadre d'un aménagement visant à régénérer le pin blanc.

COUPE PAR TROUÉES	
Critères à respecter lors de la planification	Possibilité de respecter chacun des critères et travaux nécessaires pour y parvenir
10 à 35 arbres semenciers à l'hectare.	Réalisable. Inventaire et sélection des arbres semenciers requis à l'intérieur de 30 m du pourtour de la trouée.
Bonne année semencière pendant ou immédiatement après coupe.	Réalisable. Suivi des arbres semenciers requis pour établir la période de coupe.
Environ 50 % d'ensoleillement dans l'ouverture créée.	Réalisable. Planification adéquate de la superficie et de l'orientation des trouées.
Exposition du sol minéral sur plus de 50 % du parterre de coupe.	Réalisable. Scarifiage nécessaire.
Suivi et réduction de la végétation concurrente.	Réalisable. Protection liée à l'orientation et à la superficie de la trouée. Dégagements plus nombreux nécessaires sur les sites plus riches.
Suivi et traitements de protection contre la rouille vésiculeuse.	Réalisable. Dans les zones à faible risque, protection liée à l'orientation et à la superficie de la trouée. Élagage nécessaire dans les zones et sites à haut risque.
Suivi et traitements de protection contre le charançon.	Réalisable. Dans les zones à faible risque, protection liée à l'orientation et à la superficie de la trouée. Tailles de formation requises dans les zones à haut risque.

6.2.5 Coupe à diamètre limite

6.2.5.1 Définition

La coupe à diamètre limite implique la récolte de tous les arbres contenant au moins une bille de sciage ou de déroulage, et dont le diamètre est supérieur à un diamètre minimum d'utilisation. Ce type de coupe a marqué le début des coupes dans les peuplements de pins. Un diamètre à la souche de 32 cm a prévalu pendant longtemps pour passer ensuite à 36 cm et subir de nombreuses modifications qui l'ont ramené, en 1978, de 40 à 30 cm (Huot 1987). Ce type de coupe, malgré sa mauvaise réputation, a permis de préserver un certain nombre d'arbres semenciers sur le parterre de coupe, mais en quantité et en qualité limitées (Horton et Bedell 1960).

6.2.5.2 Effet sur la régénération

Suivant la période de coupe et la proportion de pin blanc récoltée dans le peuplement, la coupe à diamètre limite a des effets très variables sur la régénération. La régénération en pin blanc varie selon les conditions de drainage, le nombre d'arbres semenciers laissés sur le parterre et la quantité de lumière au sol après coupe. Les peuplements dont la densité après coupe est inférieure à 10 m²/ha offrent les meilleures possibilités d'établissement et de survie pour la régénération, particulièrement lorsqu'un nombre d'environ 10 arbres semenciers est présent sur les sites les plus exposés et dont le drainage varie de rapide à excessif (Huot 1987).

6.2.5.3 Application

Les effets très variables de cette coupe, qui peut prendre la forme d'une coupe presque totale ou d'un prélèvement par pied d'arbres (selon les caractéristiques du peuplement d'origine), limitent son emploi dans l'aménagement du pin blanc. De plus, la coupe à diamètre limite présente le risque d'éliminer les meilleurs reproducteurs et de réduire à moyen terme la qualité génétique du peuplement. Le tableau 5 présente les critères à respecter lors de l'application d'une coupe à diamètre limite dans le cadre d'un aménagement visant à régénérer le pin blanc.

Tableau 5 : Critères à respecter lors de l'application d'une coupe à diamètre limite dans le cadre d'un aménagement visant à régénérer le pin blanc.

COUPE À DIAMÈTRE LIMITE	
Critères à respecter lors de la planification	Possibilité de respecter chacun des critères et travaux nécessaires pour y parvenir
10 à 35 arbres semenciers à l'hectare.	Difficilement réalisable. Un inventaire et une sélection des arbres semenciers d'un diamètre inférieur à la limite sont requis.
Bonne année semencière pendant ou immédiatement après coupe.	Réalisable. Suivi des arbres semenciers nécessaire pour établir la période de coupe.
Environ 50 % d'ensoleillement dans l'ouverture créée.	Difficilement réalisable dans toutes les ouvertures créées.
Exposition du sol minéral sur plus de 50 % du parterre de coupe.	Difficilement réalisable. Scarifiage par pied d'arbre, par groupe d'arbres ou dans les ouvertures créées.
Suivi et réduction de la végétation concurrente.	Difficilement réalisable. Protection variable offerte par le couvert résiduel. Dégagements plus nombreux requis sur les sites plus riches.
Suivi et traitements de protection contre la rouille vésiculeuse.	Difficilement réalisable. Dans les zones à faible risque, protection variable offerte par le couvert résiduel. Élagage nécessaire dans les zones et sites à haut risque.
Suivi et traitements de protection contre le charançon.	Difficilement réalisable. Dans les zones de faible risque, protection variable offerte par le couvert résiduel. Tailles de formation requises dans les zones à haut risque.

6.2.6 Coupe de jardinage

6.2.6.1 Définition

La coupe de jardinage correspond à l'abattage ou la récolte d'arbres choisis individuellement ou par petits groupes, dans une futaie inéquienne, pour amener la structure du peuplement à une distribution des diamètres en J inversé, tout en assurant les soins cultureux nécessaires aux arbres en croissance et en favorisant l'installation des semis (MRN 1998).

6.2.6.2 Effet sur la régénération

La coupe de jardinage est généralement incompatible avec l'aménagement du pin blanc (Horton et Bedell 1960). Sous un couvert de feuillus tolérants, où ce genre de coupe est généralement pratiqué, la régénération doit être capable de croître assez rapidement pour profiter de l'ouverture du couvert avant sa fermeture (Hibbs 1982; Smith 1986; Pinto *et al.* 1998b). Le pin blanc est généralement dans l'impossibilité d'établir dans de telles ouvertures une régénération susceptible de croître assez vite face à l'agressivité de la végétation concurrente. En effet, sa production de graines n'est pas toujours prolifique et la période d'établissement des semis est longue.

Le jardinage par groupes d'arbres offre de meilleures possibilités en occasionnant des délais de fermeture du couvert plus longs. Malgré cela, la rareté de la régénération préétablie de pin blanc, les risques de blessures causées par les opérations de récolte et la compétition exercée par la végétation concurrente sont tous des problèmes à surmonter. Une préparation de terrain permet généralement de limiter la végétation concurrente, mais le temps requis pour l'établissement des semis de pin blanc limite leurs chances de survie dans d'aussi petites ouvertures.

6.2.6.3 Application

Quinby (1991) suggère l'emploi de la coupe de jardinage pour la régénération du pin blanc. Cette recommandation fait suite à une étude portant sur les mécanismes de régénération des forêts anciennes de pins blancs. Le recours à la coupe de jardinage est aussi suggéré pour conserver les qualités esthétiques de certaines pinèdes (Woolsey et Chapman 1914 *dans* Horton et Bedell 1960). Plusieurs autres références font mention de la coupe de jardinage pour l'aménagement du pin blanc, mais ces études ont été présentées dans la section sur la coupe par trouées car la dimension des ouvertures proposées y était supérieure à 500 m². Le tableau 6 présente les critères à respecter lors de l'application de la coupe de jardinage pour obtenir une bonne régénération en pin blanc.

Tableau 6 : Critères à respecter lors de l'application de la coupe de jardinage dans le cadre d'un aménagement visant à régénérer le pin blanc.

COUPE DE JARDINAGE	
Critères à respecter lors de la planification	Possibilité de respecter chacun des critères et travaux nécessaires pour y parvenir
10 à 35 arbres semenciers à l'hectare.	Réalisable. Inventaire et sélection des arbres semenciers requis.
Bonne année semencière pendant ou immédiatement après coupe.	Réalisable. Suivi des arbres semenciers nécessaire pour établir la période de coupe.
Environ 50 % d'ensoleillement dans l'ouverture créée.	Difficilement réalisable. Jardinage par groupes d'arbres.
Exposition du sol minéral sur plus de 50 % du parterre de coupe.	Difficilement réalisable. Scarifiage par pieds d'arbres ou par groupes d'arbres.
Suivi et réduction de la végétation concurrente.	Difficilement réalisable. Protection offerte par le couvert résiduel. Dégagements plus nombreux requis sur les sites plus riches.
Suivi et traitements de protection contre la rouille vésiculeuse.	Difficilement réalisable. Protection offerte par le couvert résiduel. Élagage nécessaire dans les zones et sites à haut risque.
Suivi et traitements de protection contre le charançon.	Difficilement réalisable. Protection offerte par le couvert résiduel. Tailles de formation requises dans les zones à haut risque.

6.3 Entretien et éducation

Les travaux d'entretien et d'éducation s'effectuent entre deux périodes de régénération et comprennent toutes les opérations sylvicoles entreprises pour contrôler la composition et la densité d'un peuplement, ainsi que pour améliorer la croissance et la qualité des tiges qui le composent (Daniel *et al.* 1979). Le dégagement, le nettoyage, le dépressage, les travaux phytosanitaires, l'éclaircie, l'élagage, la fertilisation et la coupe d'amélioration sont inclus dans ces travaux.

De tous les facteurs influençant la croissance des arbres, la compétition est celui qui est le plus important à contrôler pour un aménagiste (Gillespie et Hocker 1986). La rentabilité des opérations et l'efficacité du contrôle de la végétation concurrente dépendent des conditions du site, de la composition initiale du peuplement, des pratiques d'exploitation et de l'efficacité de la préparation de terrain (Struik 1978). L'atteinte des objectifs d'aménagement, en termes de

nombre et de qualité des tiges à récolter dans le peuplement final, dépend de l'efficacité du programme d'entretien pendant la rotation (Reid et Woods 1998).

6.3.1 Nettoiement et dégagement

Les traitements de nettoiement et de dégagement sont des traitements utilisés pour contrôler la compétition. Le nettoiement vise à libérer le semis de la compétition venant de la strate herbacée et arbustive basse alors que le dégagement s'applique au gaulis et vise à éliminer les autres tiges arborescentes pouvant nuire à la croissance des tiges d'avenir. Pour le pin blanc, le but recherché par ces deux traitements est de créer une ouverture partielle du couvert dans laquelle l'ombrage n'est pas éliminé, mais réduit. En effet, bien qu'il soit clairement établi dans la littérature que le dégagement a un effet positif sur l'accroissement en diamètre et en volume des semis et des gaulis de pin blanc (Struik 1978; Stiell 1979; Tellier *et al.* 1995; Wagner *et al.* 1996; OMNR 1998), la présence du charançon du pin blanc présente un risque tel que la pleine ouverture du couvert par un dégagement complet n'est généralement pas pratiquée (Stiell 1979). Une oppression partielle des tiges de pin blanc est préconisée pour une période prolongée, habituellement de 20 ans dans les plantations. La pleine croissance, associée à un dégagement complet, n'est prescrite que lorsque la hauteur des tiges de pin blanc permet de préserver au moins une longueur de bille des attaques du charançon (Struik 1978).

On ne trouve pas de recommandations précises dans la littérature quant à l'application et à l'intensité des traitements de nettoiement et de dégagement. La fréquence et le moment d'application du traitement sont particulièrement critiques pour la survie et la croissance de la régénération (Struik 1978). En règle générale, après un nettoiement ou un dégagement, les tiges de pin blanc doivent être capables d'utiliser efficacement l'espace de croissance additionnel créé par l'élimination ou le rabat de la végétation concurrente, ainsi qu'être capable de croître assez rapidement pour maintenir leur flèche terminale au-dessus de la compétition immédiate (Lancaster et Leak 1978; MERQ 1981).

Le nettoiement est cependant moins critique que le dégagement en ce qui a trait à ses conditions d'application. En effet, les études de Wagner *et al.* (1996) sur la compétition herbacée en plantation n'établissent pas l'urgence d'une intervention avant une période de trois ans, le taux de survie des pins blancs non traités étant de toute façon relativement élevé, soit de 89 %. Cependant, un traitement s'avère nécessaire par la suite afin de maintenir la croissance en diamètre des semis. Ces mêmes auteurs ont en effet observé que dans les parcelles non traitées, le diamètre et le volume des tiges correspondaient à 55 % et 27 %, respectivement, de ceux des tiges traitées. Ces auteurs concluent que les pertes en diamètre ont été proportionnelles au nombre d'années sans traitements. Chapeskie (1989) préconise d'effectuer ces traitements au moment dans la saison où les réserves racinaires de la végétation concurrente sont à leur niveau le plus bas (généralement vers la mi-juillet).

Struik (1978) recommande une forme de contrôle de la végétation concurrente avant l'établissement de la régénération, ainsi que des dégagements graduels et périodiques appliqués de façon sélective tous les 5 ans. Lancaster et Leak (1978) préconisent aussi des intervalles de 5 ans pour réévaluer la végétation concurrente. Ces auteurs proposent d'ailleurs une clé pour l'aménagement du pin blanc. Cette clé repose sur le coefficient de distribution des pins blancs libres de croître et sur la richesse du site. Plus la densité de pin blanc est

élevée, ou moins le site est riche, et moins il y a d'efforts à faire pour favoriser le pin blanc. En règle générale, ces auteurs suggèrent de ne pas tenter d'obtenir des peuplements purs de pins blancs quand les sites sont riches ou quand le coefficient de distribution est de moins de 50 %.

La réponse d'un arbre au dégagement varie selon la forme initiale de sa tige. Un semis ou un gaulis de pin blanc dont la couronne est fournie et en santé, s'étend sur 50 % ou plus de sa hauteur, et dont la pousse terminale présente une croissance continue répond presque immédiatement au dégagement (Struik 1978; Reid et Woods 1998). Même après une longue période d'oppression, les tiges de pin blanc présentent un bon potentiel de croissance. Par exemple, des semis de pin blanc de 0,5 m de hauteur, âgés de 27 ans et opprimés depuis leur ensemencement par un couvert de peupliers ont présenté des accroissements 10 fois supérieurs (0,3 m/an) suite à un dégagement complet du couvert (Berry 1982). De façon similaire, Kelty et Entcheva (1993) rapportent qu'une régénération préétablie de pin blanc âgée de 10 à 38 ans et ayant une hauteur de 0,4 à 2,0 m répondit rapidement au dégagement par une coupe progressive et atteignit, 11 ans après la coupe, des hauteurs allant de 3,8 à 5,1 m.

Le dégagement peut être fait chimiquement, mécaniquement ou manuellement. Malgré leur mauvaise presse, les phytocides sont couramment employés aux États-Unis (Heckman 1992) et en Ontario (OMNR 1998). Au Québec, par contre, la législation prévoit leur bannissement du milieu forestier pour l'an 2001 (Bouliane *et al.* 1996). Dans ce contexte, le potentiel de compétition de la végétation concurrente doit être évalué en fonction des conditions du site, et cette évaluation doit nécessairement s'intégrer aux pratiques d'exploitation.

6.3.2 Dépressage

Contrairement au nettoisement et au dégagement, le dépressage vise à réduire la densité en essences recherchées lorsque cette densité est trop forte pour permettre une croissance satisfaisante chez l'ensemble des tiges. L'influence de la densité des peuplements de pin blanc sur l'incidence et la sévérité des dommages causés par le charançon a été clairement établie : les peuplements les plus denses sont généralement moins affectés (Stiell 1979). Ainsi, en acceptant une perte de croissance en début de développement du peuplement, une haute densité de pin blanc peut offrir une alternative aux traitements phytosanitaires. Partant de ce principe, Stiell (1979) a établi, en 1939, une plantation avec un espacement de 0,66 m par 0,66 m (22 900 tiges/ha) pour limiter les dommages du charançon. En 1958, le peuplement avait 19 ans, une hauteur de 7,5 m et une densité de 10 000 tiges/ha. Bien que 6000 tiges aient échappé aux dommages du charançon, la compétition intraspécifique causait deux fois plus de mortalité chez les tiges non charançonnées (en majorité dans les classes de dominance inférieures) que dans celles charançonnées (en majorité parmi les dominants). Le premier traitement appliqué fut une éclaircie précommerciale pour dégager les arbres, en majorité des codominants, dont la première bille de 5 m avait échappé aux dommages du charançon. En 1977, les 370 arbres sélectionnés et élagués avaient survécu et bien répondu à l'éclaircie. Cette même année, dans la partie de la plantation servant de témoin, le nombre d'arbres non charançonnés était de 149 tiges/ha. Seulement 10,2 % des arbres présentant un diamètre supérieur à la moyenne dans la parcelle témoin étaient non-charançonnés. Le coût associé aux plantations de telles densités étant élevé, l'auteur suggère l'emploi de cette technique dans les

endroits où la régénération naturelle est très dense au départ. Malgré son application tardive dans cette expérience, le dépressage a permis d'arrêter la mortalité engendrée par la densité extrême des tiges en maximisant, par l'espace de croissance libéré, la croissance des tiges sélectionnées (Stiell 1979). Pour déterminer si un secteur a besoin d'être dépressé, Smith et Woods (1997) suggèrent de suivre le diagramme de gestion de la densité qu'ils ont établi pour le pin blanc. Selon ce diagramme, il est possible de déterminer une densité désirée à partir de paramètres de taille.

6.3.3 Éclaircie

Burgess et Robinson (1998) ont établi que le volume retiré lors des éclaircies, s'il est comptabilisé en fin de révolution avec celui de la récolte finale, est approximativement égal au volume des peuplements non traités. L'éclaircie réduit la production en volume brut du peuplement en récupérant le volume associé à la mortalité engendrée par la forte densité des tiges. L'éclaircie accélère cependant l'accroissement des tiges résiduelles, permettant ainsi d'atteindre plus rapidement des diamètres associés à des rotations plus longues (Smith 1996). C'est donc en regard de la qualité et de la taille des produits recherchés dans les buts de production que l'utilisation de l'éclaircie revêt son importance. Les éclaircies permettent aussi d'introduire une coupe progressive d'ensemencement sans coupe préparatoire (Spurr *et al.* 1957).

La recherche de la période et de l'intensité idéale pour l'application des éclaircies a fait l'objet de nombreuses expériences, mais l'applicabilité des résultats et des recommandations obtenus est souvent limitée aux conditions du site où a eu lieu l'expérience (Frothingham 1942; Spurr *et al.* 1957; Stiell 1959a; Horton et Bedell 1960; Della-Bianca 1993). Plutôt que de se baser sur les résultats obtenus dans de telles études, on pourra avoir recours à un guide de gestion de la densité tel que celui présenté récemment par Smith et Woods (1997). Ce guide de gestion de la densité pour le pin blanc est un outil de planification permettant à l'aménagiste de visualiser et d'évaluer l'impact de différents traitements sur le développement d'un peuplement (Smith et Woods 1997). L'utilisation du guide de gestion de la densité permet aussi de mettre en évidence l'importance des marchés et des buts de production pour justifier la nécessité des éclaircies commerciales. À partir de ce guide de gestion de la densité, Reid et Woods (1998) présentent la surface terrière à éclaircir selon l'âge pour une première éclaircie dans un peuplement de pin blanc, et cela en fonction de la densité initiale et de l'indice de qualité de station. L'emploi du guide de gestion de la densité ne permet cependant pas d'éviter de considérer certaines recommandations de base relatives aux éclaircies. Ainsi, lorsqu'il y a des possibilités de dommages dus à des vents forts, à la neige ou au verglas, il est recommandé de ne pas réduire de plus du tiers la surface terrière des peuplements (Chapeskie *et al.* 1989).

6.3.4 Coupe d'amélioration

La coupe d'amélioration est une intervention effectuée dans un peuplement qui a dépassé le stade de gaulis afin d'en améliorer la composition en éliminant les essences indésirables et les sujets mal formés (Doucet *et al.* 1996). Ce type de coupe s'applique généralement aux

peuplements écrémés, aux peuplements mélangés et, occasionnellement, aux plantations au stade de perchis qui n'ont pas été entretenues (Chapeskie *et al.* 1989).

Les résultats de suivis sur plus de 20 ans effectués suite à des coupes d'amélioration appliquées à Petawawa dans des peuplements mélangés ont permis d'établir l'intérêt que de telles coupes présentent tant au point de vue sylvicole que financier (Brace 1968, 1972, 1978; Brace et Stewart 1974; ; Smyth et Methven 1978; Stiell 1984; Whitney 1991; Stiell *et al.* 1994; Rollins *et al.* 1994, 1995; Williams 1994). Dans la première étude (Brace 1968), le peuplement original était équienne, âgé d'environ 60 ans, et constitué d'un mélange de feuillus intolérants et de conifères. Il se composait en majorité de bouleaux blancs, de peupliers, de pins et de sapins et, en moindre quantité, de feuillus tolérants dont une forte proportion étaient dégradés. Brace (1968) rapporte que la coupe, dont le but était d'augmenter fortement la proportion de conifères de belle forme, a retiré approximativement 35 % de la surface terrière (principalement des feuillus). Ce traitement a fait passer la proportion de conifères de 38 à 76 %. Après 20 ans, en comparaison aux parcelles témoins, les parcelles traitées avaient augmenté leur volume total et leur volume marchand en résineux de respectivement 51 et 94 %. Durant cette période, le volume de sciage de pin blanc a doublé suite à ce traitement qui s'accompagnait d'un élagage.

La seconde étude, effectuée dans un peuplement mélangé au lac Cartier, à Petawawa, avait pour but de dégager un sous-étage de pins blancs âgés d'environ 55 ans du couvert de peupliers et de bouleaux blancs d'environ 80 ans qui le recouvrait. L'objectif principal de cette expérience était d'accroître la croissance du pin blanc destiné au sciage au cours d'une période de 20 à 30 ans suivant le dégagement des pins et de préparer le peuplement pour une coupe progressive d'ensemencement. Les pins blancs avaient, en moyenne, un DHP de 30 cm et une hauteur de 18 m, dont 25 à 50 % était occupée par la couronne. Le volume initial était d'environ 211 m³/ha. Des 63 % du volume initial enlevés par la coupe, seulement 16 % étaient de qualité sciage, le reste allant à la pâte. Un élagage sur une hauteur de 5,5 m, effectué en hiver sur environ 250 tiges/ha, a complété le traitement. L'augmentation de croissance associée à l'élimination du couvert a été hautement significative et a donné lieu, après 20 ans, à un accroissement du volume de sciage de l'ordre de 80% (Brace 1978; Stiell *et al.* 1994). L'étude économique indique que la coupe d'amélioration, lorsqu'elle est comparée aux peuplements témoins, a augmenté les bénéfices nets par hectare de peuplement traité de 80 à 110% (considérant des taux d'intérêt de 5 et de 3%, respectivement). De plus, les frais d'intérêts sur les investissements encourus peuvent être réduits si le traitement est appliqué en fin de révolution. Cette seconde étude revêt un intérêt particulier de par le suivi détaillé qui a été fait au sujet des conditions initiales du peuplement traité, des procédures d'exploitation, des coûts et des bénéfices du traitement, de l'impact esthétique du traitement, ainsi que des blessures aux arbres résiduels et de leur impact sur la santé du peuplement. Considérant que les peuplements mixtes composés de pin blanc constituent une forte proportion des forêts des Grands Lacs (Brace 1968) et que l'offre, plutôt que la demande, limite son marché (Brace 1972), la pratique de ce type de coupe semble représenter une alternative très intéressante pour l'aménagement de ce type de peuplement, particulièrement dans les sites où les feuillus ont de la difficulté à croître (Foster 1985).

6.3.5 Élagage

Le pin blanc est un arbre qui s'élague mal naturellement. Ses branches latérales, dans les premiers 7 m, gardent généralement leur vitalité pendant 15 ans. Plus de 60 ans peuvent être nécessaires pour leur élagage naturel. La vitesse de cicatrisation des nœuds est liée à la dimension des branches et au rythme de croissance de l'arbre; une cicatrisation complète de nœuds de 1,3 cm peut se prolonger sur une période de 3 à 10 ans (Paul 1938; Hawley et Clapp 1935 *dans* Horton et Bedell 1960). À la fin de la troisième saison suite à une taille phytosanitaire effectuée dans trois plantations d'une hauteur variant entre 1 et 2 m, on a observé des taux de cicatrisation de 30, 62 et 87 % (Lavallée 1989).

L'élagage en lui-même n'augmente pas la qualité de la tige traitée. C'est la croissance ultérieure en diamètre de cette tige et, par le fait même, sa production de bois sans nœud, qui rehausse sa valeur. Pour assurer la rentabilité de l'élagage, la croissance des arbres élagués doit produire un accroissement en diamètre de 20 à 30 cm avant la prochaine récolte, ce qui correspond généralement à une période de 30 à 50 ans (Hawley et Lutz 1943 *dans* Horton et Bedell 1960). Selon Page et Smith (1994), la rentabilité de l'opération n'est possible que si l'accroissement annuel des tiges est égal ou supérieur à ¼ pouce par année. Le choix des tiges à élaguer doit donc se concentrer sur les arbres offrant un potentiel de croissance élevé (Stiell 1959a; Horton et Bedell 1960; Smith 1986; MERQ 1981; Doucet *et al.* 1996).

Les peuplements croissant sur les sites les plus riches devraient être élagués en premier, les plus grandes distances entre les verticilles et les faibles diamètres des branches réduisant les coûts de ce traitement (Chapeskie *et al.* 1989). En raison des risques associés au charançon, Smith et Seymour (1985) recommandent d'effectuer le traitement lorsque la hauteur des tiges permet l'élagage d'une première bille. Pour limiter les risques de blessures aux arbres élagués, ces auteurs recommandent aussi d'effectuer l'élagage après la première éclaircie précommerciale.

Pour profiter des gains de croissance et de qualité des arbres élagués, il est nécessaire de procéder à une identification des tiges élaguées afin d'éviter de les confondre, lors des éclaircies ultérieures, avec des arbres qui se seraient élagués naturellement. La proportion de bois sans nœuds dans les tiges élaguées est en effet plus forte que dans des tiges non traitées (Reid et Wood 1998). Il est recommandé d'élaguer un minimum de 250 tiges/ha (MERQ 1981). En règle générale, l'élagage ne nuit pas à la santé de l'arbre. L'élimination des branches mortes permet une cicatrisation plus rapide des voies d'entrée des organismes pathogènes et l'élagage des petites branches vertes provoque un écoulement de résine qui scelle les surfaces coupées et devrait limiter l'entrée des spores (Hawley et Clapp 1935 *dans* Stiell 1959a). Un élagage bien fait requiert une coupe nette, effectuée à la limite du bourrelet cicatriciel, mais sans le toucher (particulièrement s'il fait une bosse), et ce, tant sur une branche morte que sur une branche verte (Reid et Woods 1998). Même avec un travail bien fait, l'élagage de grosses branches vertes peut, dans certains cas, favoriser les infections fongiques. Pour limiter ces risques, il est recommandé de n'élaguer que les branches vertes de moins de 5 cm de diamètre (Sleeth 1938 *dans* Horton et Bedell 1960). La coupe des branches vertes affecte directement l'apport d'énergie de l'arbre et donc son taux de croissance. Chapeskie *et al.* (1989) recommandent de conserver un rapport de hauteur de cime/hauteur totale supérieur à 40 % suite à l'élagage. Ce critère étant respecté, on pourra élaguer de un tiers à une demie de la couronne vivante en une seule opération.

D'un point de vue physiologique, il n'y a pas de période de l'année particulièrement favorable pour élaguer un pin blanc. D'autres facteurs doivent toutefois être pris en considération (Horton et Bedell 1960). Par exemple, Murray (1977) présente les avantages et les inconvénients de l'élagage effectué durant la saison hivernale. Les avantages mentionnés comprennent :

- la possibilité de faire l'élagage durant une période de l'hiver où d'autres travaux ne sont pas possibles;
- la supervision plus aisée de la progression des équipes de travail;
- la mobilité offerte par une épaisseur de neige croûtée d'un mètre et plus qui permet aux élagueurs de se déplacer au-dessus du sous-étage;
- la possibilité d'augmenter la hauteur de l'élagage avec beaucoup moins d'efforts;
- la plus grande efficacité des scies lorsque la résine du pin blanc est gelée;
- les risques moindres de déchirures de l'écorce;
- l'absence d'insectes.

Par ailleurs, les désavantages de cette saison comprennent le froid, la neige qui tombe des branches et la difficulté de se déplacer sur de la neige non croûtée.

D'après Chapeskie *et al.* (1989), l'élagage devrait s'appliquer à des tiges d'un diamètre de 15 cm pour limiter la dimension des nœuds. À ce diamètre, les branches sont petites, la cicatrisation rapide et l'élagage moins coûteux (Chapeskie *et al.* 1989). Cependant, selon Horton (1966), il pourrait être profitable d'élaguer de 60 à 75 arbres à l'hectare, d'un diamètre allant jusqu'à 30 cm et d'une hauteur inférieure ou égale à 10 m. Cet élagage pourrait se faire conjointement avec des éclaircies fréquentes et une plus longue rotation (Horton 1966). Pour vérifier ces recommandations, Horton (1966) a établi une expérience dans trois peuplements différents. Les trois peuplements, de bonne densité et de distribution uniforme, avaient des conditions de site comparables et étaient représentatifs des différentes étapes du développement successional, allant d'un peuplement mélangé (pin rouge, pin blanc, peuplier, bouleau blanc) âgé de 35 ans à un peuplement presque pur de pin blanc et de pin rouge âgé de 80 ans. De cette étude, l'auteur tire les conclusions suivantes :

- les coûts de l'élagage n'augmentent pas avec le diamètre des arbres dans un peuplement équienne et ils diminuent significativement à mesure que l'âge du peuplement augmente. Ce fait est lié à l'élagage naturel qui augmente avec l'âge des arbres et à la diminution de la période de capitalisation des coûts du traitement, au moment de la récolte;
- en considération des exigences plus faibles requises pour les classes de qualité « D Select », l'élagage des grosses tiges de moins de 80 ans permet de réaliser de bons profits;
- une période de croissance de 40 ans doit s'écouler entre l'élagage et la récolte d'un arbre pour lui permettre de produire du bois sans nœuds en assez grande quantité pour atteindre le seuil de rentabilité.

Les analyses des coûts et des bénéfices de l'élagage effectuées suite à une coupe d'amélioration dans un peuplement mélangé âgé de 60 ans confirment la rentabilité de ce traitement, du moins pour la première bille (5,5 m) (Brace 1968). Les profits associés à l'élagage dépendent des prix obtenus pour les billes de haute valeur. Pour encourager l'élagage, une augmentation de la valeur du bois sur pied et un système de vente à l'encan ont déjà été proposés (Reid et Woods 1998). Les élagages phytosanitaires pour contrer les pertes de productivité et de qualité dues à la rouille vésiculeuse et au charançon du pin blanc sont décrits à la section 4 qui traite de ces agents pathogènes.

6.4 Préparation des sites

Les objectifs de la préparation de terrain sont, d'une part, de créer un nombre suffisant et bien distribué de microsites propices à l'établissement, à la survie et à la croissance d'une régénération naturelle ou artificielle et, d'autre part, de contrôler la végétation concurrente (von der Gönna 1992). Le type et l'intensité de la préparation de terrain dépendent des conditions du site, des objectifs des interventions sylvicoles et de la méthode de régénération ciblée (Chapeskie *et al.* 1989). Une réduction de l'abondance et de la vigueur de la végétation concurrente durant la période critique de l'établissement est essentielle pour favoriser l'aménagement des espèces tolérantes et semi-tolérantes de conifères (Morneault 1998b).

La préparation de terrain peut être accomplie par des moyens mécaniques, chimiques, ou par le brûlage dirigé, seuls ou en combinaison (Morneault 1998b). Les méthodes de préparation de terrain peuvent être combinées et liées ou non au contrôle de l'ouverture du couvert (McRae 1986; Heckman 1992; McRae *et al.* 1994; Campbell 1981 *dans* Morneault 1998b; Morneault 1998b).

En raison de la législation québécoise qui prévoit le bannissement des phytocides dans les pratiques sylvicoles vers 2001 (Bouliane *et al.* 1996), ceux-ci ne seront pas considérés dans ce texte malgré leur efficacité et leurs moindres coûts d'application.

La préparation de terrain peut favoriser un taux de germination plus élevé des semences de pin blanc sur certains sites. Heckman *et al.* (1985), dans leurs essais pour augmenter le taux de germination du pin blanc, ont en effet observé qu'après un scarifiage les taux de germination étaient 5 fois plus élevés sur les sites secs et 2 fois plus élevés sur les sites humides que sur les parcelles non scarifiées. L'accroissement de la température du sol par le traitement favorisait alors une germination précoce et une meilleure survie. Dans cette étude, il a été également observé qu'après deux ans, et suivant le type de sol, la scarification a augmenté de 3 à 10 fois le taux de survie des semis. Le taux de survie augmente aussi en fonction de l'élévation des microsites par rapport au sol environnant. Tellier *et al.* (1995) ont observé que suite à un scarifiage ou à un brûlage intense, les indices de compétition sont, après deux ans, deux fois moindres sur les parcelles plantées et traitées. Ces observations laissent supposer qu'un scarifiage ou un brûlage intense pourraient retarder le traitement de dégagement habituellement nécessaire dans les premières années suivant l'établissement d'une plantation de pin blanc.

La préparation de terrain peut se faire avant ou après la coupe mais, idéalement, elle devrait être effectuée durant une bonne année semencière. À défaut de quoi les sites devraient être régénérés artificiellement aussitôt après la coupe (Morneault 1998b). La préparation de terrain peut aussi être retardée pour permettre aux débris de coupe de se décomposer partiellement et pour faire coïncider ce traitement avec une bonne année semencière (Burgess 1996).

6.4.1 Préparation de terrain mécanique

La réponse de la végétation concurrente à la perturbation mécanique dépend des caractéristiques de reproduction des espèces présentes ainsi que de la profondeur et de la localisation de leur système racinaire. La dimension de la surface perturbée, la sévérité de la perturbation et les délais entre son application et l'introduction de la régénération naturelle ou artificielle, ont chacun un impact sur l'efficacité du contrôle opéré par la perturbation mécanique sur la végétation concurrente. La préparation de terrain doit généralement être peu profonde pour éviter d'endommager le système racinaire des arbres résiduels (Morneault 1998b).

Les méthodes de préparation de terrain généralement employées en milieu ouvert pour obtenir des résultats adéquats ont déjà été bien décrites (von der Gönna 1992; Bouliane *et al.* 1996). Sous couvert, l'emploi de chaînes tirées par une débusqueuse offre, selon Heckman (1992), des possibilités intéressantes pour la préparation de terrain étant donné la maniabilité de l'équipement, le peu de blessures faites aux racines et aux troncs des arbres résiduels, le mélange de litière et de sol minéral obtenu et la profondeur du sol traité. Par contre, cet auteur signale que cette méthode n'est pas adéquate pour les parterres de coupe où les débris forment des accumulations denses ou encore des couches compactes. Dans de tels cas, la solution pourrait être d'attendre plusieurs années après la coupe de régénération pour appliquer le traitement.

6.4.2 Brûlage dirigé

La dynamique de régénération naturelle des forêts de pin blanc est caractérisée par une combinaison de feux de surface d'intensité modérée revenant à courts intervalles et de feux de couronne, de petite superficie, revenant à longs intervalles (Heinselman 1981). Les caractéristiques nécessaires pour résister à ces cycles de feu sont une épaisseur d'écorce suffisante pour survivre au passage d'un feu de surface et une hauteur suffisante des branches les plus basses pour limiter la progression du feu dans l'arbre. Pour le pin blanc, un âge de 80 ans marque généralement le début de cette résistance (Van Wagner 1993 *dans* Morneault et Heaman 1998).

Le brûlage dirigé utilisé dans le but de favoriser la régénération du pin blanc est généralement effectué avant la récolte, en association avec une coupe progressive d'ensemencement. Son emploi après la récolte dans une coupe avec réserve d'arbres semenciers ou dans une coupe progressive d'ensemencement n'est pas recommandé, même si de bons lits de germination peuvent ainsi être obtenus. En effet, dans ces circonstances, les connaissances actuelles liées à

ce type d'intervention ne sont pas suffisantes et les risques de dommages associés au couvert trop importants dû à la combustibilité des débris de coupes (Morneault et Heaman 1998).

Les feux utilisés avant la récolte lors d'un brûlage dirigé du sous-étage doivent généralement être d'une intensité modérée avec une hauteur de flamme de 50 à 100 cm et une intensité frontale de 400 à 600 kW/m (Van Wagner 1993 *dans* Morneault et Heaman 1998). Suivant les conditions de peuplement et l'intensité localisée des flammes, ces feux éliminent tous les sapins de 3 à 15 cm de diamètre à la souche, ainsi que la partie aérienne des arbres et arbustes de moins de 8 cm de diamètre (Morneault et Heaman 1998). Dans certains cas, suivant la qualité des lits de germination, le drageonnement de la compétition feuillue et la périodicité des bonnes années semencières, il peut être nécessaire de faire jusqu'à trois brûlages dirigés consécutifs (McRae *et al.* 1994). Stiell (1985) mentionne que pour obtenir des résultats adéquats, l'élimination du sapin requiert généralement un feu, alors que celle des espèces feuillues requiert deux feux étalés sur une période de deux ans.

Tellier *et al.* (1995) ne notent aucune différence de survie entre les brûlis et les sites scarifiés, mais ils remarquent que le pin blanc exhibe une forte sensibilité à l'intensité du brûlage, sa santé et son taux de survie étant positivement et significativement corrélés avec l'intensité du feu pour les deux années de l'étude. Les feux doivent généralement être initiés au printemps, avant le débourrement, pour permettre le développement de nouvelles aiguilles en cas de blessures causées par le feu. Effectuer le brûlage au printemps permet également d'assurer une plus grande protection des racines des arbres du couvert dominant dû à l'humidité de la litière. De plus, cela permet d'avoir de meilleures conditions de combustibilité, le sous-étage étant libre de feuillage (Morneault et Heaman 1998).

La fenêtre d'application durant laquelle sont présentes toutes les conditions nécessaires pour assurer une bonne combustibilité et une marge de sécurité adéquate est limitée. Cela constitue un inconvénient majeur du brûlage dirigé. En effet, en raison des conditions météorologiques, plusieurs années peuvent s'écouler entre l'occurrence de deux périodes propices consécutives (Stiell 1985).

6.5 Régénération

6.5.1 Régénération naturelle

Une étude récente, effectuée par Carleton *et al.* (1996), nous indique que dans un inventaire réalisé dans 320 peuplements mélangés et dans 170 peuplements de pins, la production de graines de pin blanc, leur dispersion et leur établissement semblent être moins une limite à la régénération naturelle que la survie et la croissance ultérieure des semis. Ces auteurs ont observé que la répartition des semis de pin blanc était plus grande que celle des gaules et était concentrée dans la forêt de feuillus tolérants tandis que celle des gaules était limitée, en majeure partie, aux peuplements dominés par les pins ou les chênes. Ils concluent de leur analyse que lorsque le couvert arboré est incomplet, que la densité de conifères tolérants dans le sous-étage est faible, que les feuillus, les arbustes et les herbacées sont peu nombreux et que la présence des mousses est peu abondante, l'établissement et la croissance ultérieure des semis de pin blanc semblent probables (Carleton *et al.* 1996). Ainsi, lorsque l'ensemencement naturel est suffisant et que le taux de prédation ou de parasitisme est raisonnablement bas,

l'établissement des semis de pin blanc semble probable sur un site présentant une strate muscinale peu développée et des conditions de croissance qui ne permettent pas soutenir la productivité des espèces feuillues ou des conifères tolérants (Abbott et Quink 1970 dans Carleton *et al.* 1996). Ces sites préférentiels ont été identifiés par Lancaster et Leak (1978) comme ayant un IQS d'environ 18 à 20 m (55 à 65 pi.) pour les feuillus dans le nord-est des États-Unis.

Il est établi dans la littérature que la régénération naturelle est généralement proportionnelle au nombre d'arbres semenciers de pin blanc présents sur le parterre (Kitteredge et Ashton 1990; Palik et Pregitzer 1993; Palik et Pregitzer 1994). L'étude de Palik et Pregitzer (1994), effectuée dans un peuplement de 80 ans composé en majorité de peupliers, a permis de quantifier les relations entre le nombre, la dimension et la localisation des arbres semenciers résiduels et la régénération en pin blanc qui s'est établie par la suite. Leurs résultats indiquent que la densité de la régénération de pin blanc est inversement proportionnelle à la distance des arbres semenciers, et proportionnelle à leur surface terrière et à leur nombre. Ils ont remarqué que la régénération en pin blanc, dans les parcelles situées à proximité de plusieurs grands arbres semenciers, était plus abondante, s'était établie plus tôt, comportait des individus plus grands et une plus grande diversité d'âges et de hauteurs en comparaison avec les parcelles dont les caractéristiques semencières étaient moins favorables. Leurs résultats indiquent aussi que le pin blanc a été capable de s'établir sous un couvert de peupliers à grandes dents peu de temps après la coupe et qu'un certain nombre de tiges de pin blanc, déjà établies, se sont bien développées dans le sous-étage (Palik et Pregitzer 1994).

Des études effectuées en Outaouais ont démontré d'une part que la quantité de semences retrouvée sur un microsite est fortement reliée à la surface terrière en semenciers de pin blanc 50 m autour du microsite (Nolet et al 1999). De plus, la quantité de semis issus de ces semences est beaucoup plus élevée lorsque le sol minéral des microsite a été mis à nu. Les auteurs concluent que la quantité de semenciers à laisser sur un parterre de coupe est beaucoup moins élevée si on procède à une mise à nu du sol minéral (Nolet et al 2000).

Dans un autre ordre d'idée, Alexander *et al.* (1985) ont établi un lien entre la régénération naturelle du pin blanc et la quantité de chênes et d'autres arbres producteurs de noix. Selon eux, lorsqu'il y a concordance entre les bonnes années semencières du pin blanc et celles des arbres producteurs de noix, les activités automnales d'entreposage des noix dans le sol par les écureuils gris (*Sciurus carolinensis*) créent un grand nombre de microsites adéquats (plus de 54 /ha) qui permettent à la fois l'enfouissement des graines de pin blanc, leur protection des prédateurs et leur établissement ultérieur. Leurs conclusions s'appuient sur la densité significativement plus grande de régénération du pin blanc à proximité des arbres producteurs de noix, sans relation significative avec la proximité des arbres semenciers de pin blanc. Leur étude révèle que la présence de noix sur le parterre augmente de 65 % l'établissement des semis de pin blanc et que, comparativement au témoin, l'exclusion des écureuils gris le réduit de 43 %.

6.5.2 Régénération artificielle

La régénération artificielle, qui inclut l'ensemencement et le reboisement, est généralement employée pour régénérer des surfaces où les arbres semenciers sont manquants, où les

probabilités d'établissement des semis sont limitées, où la compétition par la végétation concurrente limite la régénération naturelle et où les circonstances ne permettent pas de créer des conditions de site favorables à la germination du pin blanc (Pinto 1998).

6.5.2.1 Ensemencement artificiel

Malgré des expériences réussies d'ensemencement artificiel avec le pin blanc, cette méthode de régénération n'est pas encore considérée comme étant suffisamment efficace. En effet, étant donné les résultats inadéquats parfois obtenus suite à l'ensemencement artificiel, il peut être nécessaire de répéter l'opération, éliminant ainsi les avantages monétaires que présente l'ensemencement sur la plantation. Le manque de graines, leur vulnérabilité avant la germination et la densité très variable des semis qui en résulte sont les principaux désavantages associés à l'ensemencement artificiel (Stiell 1985). Bien appliqué, l'ensemencement demeure cependant une option très intéressante lorsqu'un manque de plants, de main-d'œuvre ou de fonds limitent les possibilités de reboisement (Minckler et Chapman 1954).

Suite à leurs expériences sur l'ensemencement du pin blanc, Horton et Wang (1969) concluent que la scarification est indispensable à la réussite de l'ensemencement et qu'un boteur constitue un moyen efficace pour l'accomplir. Ils suggèrent aussi :

- de scarifier environ 50 % de la surface totale à ensemer en bandes alternes;
- d'enlever la végétation et l'humus pour exposer l'horizon B en laissant quelques tiges individuelles ou des îlots d'arbres;
- de semer, aussitôt que possible, à une profondeur d'environ 0,6 cm, les graines de pin blanc traitées aux répulsifs;
- de bien distribuer les graines;
- de faire cette opération vers la fin de l'automne, pour stratifier naturellement les graines, ou au début du printemps, si les graines sont déjà stratifiées.

Plus récemment, Pinto (1992) mentionne que l'emploi de mini-serres en plastique photodégradable permet de maintenir des conditions microclimatiques favorables aux graines de pin blanc et permet donc d'obtenir une meilleure survie et distribution des semis. Après deux ans, la densité relative des graines ensemencées sans abri était de 34 % alors que celle des graines avec une mini-serre atteignait 85 %.

Duchesne *et al.* (1998) présentent une équation pour établir la quantité de graines requises pour l'ensemencement du pin blanc:

$$\text{Quantité de graines (kg/ha)} = 1/G * 1/S * D * (7.01 + (20 * \text{REM}))$$

où G est le potentiel de germination des graines (entre 0 et 1), S est le nombre de graines par kg (58 300 pour le pin blanc), D est le nombre de semis requis/ha, et REM est un indice relatif à la proportion de sol scarifié (0 pour un sol complètement scarifié et 1 en absence de scarification).

6.5.2.2 Reboisement

Il n'existe aucune pratique d'aménagement qui demande autant d'engagement que l'établissement d'une plantation (Margolis et Brand 1990). Cet énoncé s'applique particulièrement bien aux plantations de pin blanc dont la culture requiert une très bonne évaluation des conditions de sites (Mader 1985; Foster 1985; Locey 1992), une préparation de terrain adéquate (Wang et Horton 1968; Foster 1985; Heckman *et al.* 1985) et un bon suivi de la végétation concurrente, de la rouille vésiculeuse et du charançon du pin blanc (Struik 1978; DeBoo 1978; Chapeskie *et al.* 1989; Jones 1992).

Selon Chapeskie *et al.* (1989), la plantation est la méthode de régénération généralement préférée pour les sites dont le drainage varie de bon à imparfait dû aux très fortes probabilités d'établissement des semis lorsqu'un contrôle de la végétation concurrente est effectué. De plus, la plantation permet d'éviter les difficultés associées à la germination des graines et à l'absence de concordance entre les années semencières et les coupes. Les plants ont aussi un avantage sur la régénération naturelle au niveau de la compétition. Avec un aménagement adéquat, il est possible d'obtenir pour le pin blanc au moins 1 m de croissance en hauteur en 5 à 7 ans, en comparaison à des périodes d'établissement de 8 ans et plus pour une régénération naturelle (Chapeskie *et al.* 1989).

L'espacement établi entre les tiges lors de la plantation a un effet direct sur le taux de croissance des tiges, le taux de fermeture du couvert, l'agencement des éclaircies et le volume récolté pour les différents marchés (Stiell 1985). C'est aussi un facteur de base pour établir les coûts de la plantation. Ainsi, un espacement d'au moins 2,1 m × 2,1 m peut être intéressant pour favoriser la croissance en diamètre et offrir la possibilité d'un retour sur l'investissement dès la première éclaircie. Toutefois, si l'on préfère prévenir les dégâts causés par le charançon, il est préférable d'utiliser un espacement de 1,5 m × 1,5 m ou moins, pour protéger la première bille d'un nombre suffisant de tiges (Stiell 1985).

Stiell (1955) rapporte des réductions dans les dommages causés par le charançon lors de plantations effectuées sous un couvert de peupliers préalablement éclairci, ainsi que sous l'ombrage de drageons de peuplier issus d'une coupe totale dans une peupleraie. Dans les deux cas, le contrôle du couvert dominant a été nécessaire pour permettre d'obtenir un équilibre entre la protection que le couvert offre au pin blanc et l'oppression qu'il engendre chez celui-ci. Cet équilibre critique pour la survie du pin blanc est particulièrement difficile à maintenir sur les sites mésiques où une ouverture trop grande du couvert favorise la croissance d'un dense sous-étage d'arbustes (Stiell 1955).

Dans une plantation effectuée sous un couvert de drageons de peuplier éclairci et âgé de 13 ans, Clements (1966) souligne aussi la nécessité de contrôler le sous-étage d'arbustes pour assurer la survie et la croissance du pin blanc, et ce, jusqu'à ce que les plants atteignent une hauteur d'environ 1,2 m, soit la hauteur des arbustes compétiteurs. Des 7250 pins blancs plantés à l'hectare en 1936, il ne restait, en 1960, que 625 tiges/ha dans le bloc éclairci et 83 tiges/ha dans le bloc témoin.

L'influence du sous-étage dans les plantations sous couvert est aussi notée par Smidt et Puettman (1998). Suite à l'étude de 20 peuplements ayant subi une coupe partielle, ces auteurs

suggèrent que la présence avant coupe d'un étage intermédiaire d'arbres tolérants (plus spécifiquement de sapins) empêche l'établissement d'un sous-étage de gaullis et d'arbustes et favorise la croissance des semis de pin blanc plantés sous couvert. En comparaison, la présence d'un sous-étage dense avant la coupe partielle du couvert dominant nuit à l'établissement des semis de pin blanc, le sous-étage profitant des bienfaits du dégagement et présentant alors aux semis de pin blanc une compétition accrue. La phase d'exclusion¹ survenant dans les peuplements où l'on retrouve un étage intermédiaire d'arbres tolérants est donc, selon ces auteurs, une période de développement favorable aux plantations sous couvert. Lors de la coupe du couvert dominant, ces auteurs recommandent de ne laisser pénétrer que le minimum de lumière pour assurer une croissance adéquate du pin blanc et d'éliminer le sous-étage par scarification ou par traitement chimique.

Wang et Horton (1968) ont suivi pendant 3 ans une plantation de pins blancs et d'épinettes blanches sous couvert dans des peuplements tolérants et intolérants de faible qualité. Suite à une ouverture du couvert d'environ 60 %, l'exposition de l'horizon B du sol² est, selon ces auteurs, la clé pour assurer la reprise et la croissance en hauteur des plants. Ces auteurs ont aussi constaté que la croissance des plants était significativement plus forte sous un couvert de feuillus tolérants que sous un couvert de feuillus intolérants. Une telle différence de croissance semble être due au fait que sous un couvert d'arbres tolérants, la reprise de la végétation concurrente est relativement lente suite à un traitement de scarification. En contraste, les conditions moins ombragées qu'on trouve sous le couvert des feuillus intolérants semble favoriser la recrudescence des arbustes et des drageons de peuplier.

Stiell et Berry (1985) ont démontré que des bandes d'orientation nord-sud dont la largeur ne dépasse pas 0,66 à 1 fois la hauteur du peuplement environnant, soit 50 à 75 % du plein ensoleillement, permettent à une proportion intéressante de tiges de pin blanc d'atteindre 5,2 m sans dommages dus au charançon. Cependant, cette protection n'est efficace que lorsque les peuplements comportent une forte proportion de conifères. En effet, ces arbres possèdent un feuillage permanent qui permet d'assurer une certaine protection au pin blanc tôt au printemps, durant la période de réveil du charançon. Des pins blancs âgés de 4 ans, plantés selon un espacement de 2,1 m × 2,1 m dans de telles bandes ont présenté, suite à des traitements d'entretien, des taux de survie variant entre 83 et 88 % et des taux d'attaque variant entre 34 et 42 %. Dans des bandes moins larges (0,25 à 0,5 fois la hauteur du peuplement environnant, ou 25 % du plein ensoleillement), les pins blancs ont présenté un taux de survie de 86 % et un taux d'attaque de 8 %. Lavallée et Daoust (1998) rapportent qu'après 6 ans et plusieurs traitements de dégagement, on observe des taux de survie de 80 % et un taux d'attaque de 0,1 %, suite à la plantation de pins blancs dans des bandes de 2 et 3 m, sous le couvert de peuplements denses à dominance de peuplier et issus de coupe totale.

Plusieurs essais de plantation de pin blanc avec des essences compagnes ont été faits dans le but de limiter les dommages dus au charançon mais les résultats de ces essais sont rarement

¹ Étape de développement d'un peuplement empêchant la pénétration du couvert dominant par les tiges sous-jacentes. Cette étape est caractérisée par la fermeture rapide des trouées et par une mortalité des tiges due à la densité (Frelich 1992).

² À l'aide d'un Bulldozer D4.

publiés. Chapeskie *et al.* (1989) mentionnent toutefois que ce type de plantation devrait être réalisé de façon à faciliter la récolte des essences compagnes possédant une courte révolution et que l'emploi du pin gris ou du mélèze réduit l'impact du charançon et améliore partiellement les conditions du site.

Les plantations mixtes de pin blanc et de pin rouge, en milieu ouvert, ont donné des résultats variables. Après 17 ans, 30 % des pins blancs ont dû être coupés suite aux dommages causés par le charançon. Après 30 ans, une coupe additionnelle de 50 % du nombre initial de plants a dû être effectuée pour les mêmes raisons. Les performances mitigées de telles plantations mixtes sont en partie dues au peu d'ombrage produit par le pin rouge (Stiell 1955).

6.6 Âge d'exploitabilité

L'âge d'exploitabilité est l'âge auquel il convient de récolter un arbre ou un peuplement pour obtenir un résultat déterminé. Il est fonction des essences, de leur rapidité de croissance, de la valeur de leurs produits et des circonstances économiques (Barrette *et al.* 1996). Irland (1985) note qu'il n'y a pas d'âge d'exploitabilité optimal et clairement défini dans un peuplement bien aménagé. Il existe plutôt un large éventail d'âges d'exploitabilité pour lesquels les revenus nets sont sensiblement équivalents. Selon cet auteur, les aménagistes devraient tirer avantage de ce large éventail en planifiant la récolte du pin blanc en fonction des besoins de sa régénération.

La rencontre des courbes d'accroissement annuel moyen et d'accroissement annuel courant définit l'âge d'exploitabilité absolu, mais l'emploi de cet âge est surtout associé à l'industrie des pâtes et papiers où la qualité des tiges n'est pas un facteur prépondérant (Barrette *et al.* 1996). Brown (1992) remarque que les tiges de pin blanc peuvent atteindre de grandes dimensions et que leur accroissement continue d'augmenter jusqu'à de gros diamètres. Il en déduit que les accroissements les plus forts, en volume de bois de la plus haute qualité, s'accumulent sur les tiges les plus grosses, souvent même lorsque l'accroissement radial a commencé à décroître. À ce sujet, cet auteur présente l'exemple de 6 pins blancs d'un âge variant de 164 à 204 ans et présentant des DHP de 46 à 70 cm, qui, sur tillis minces, ont présenté des accroissements de 300 à 700 dm³ de bois de haute qualité sur une période de 10 ans. De tels accroissements en volume correspondent généralement à des tiges de pin blanc de 24 à 34 cm de DHP. Brown (1992) recommande donc d'éviter de récolter trop tôt les tiges de pin blanc en pleine croissance, à moins que celles-ci ne soient situées sur des stations où il y a de la carie. Cet auteur suggère aussi le concept de diamètre de maturité plutôt que celui de l'âge de maturité pour améliorer les pratiques d'aménagement et tirer le meilleur parti du potentiel de production des peuplements en place (Brown 1992; Brown 1994).

Pour l'état du Wisconsin, l'âge d'exploitabilité varie de 90 à 130 ans (Zastrow 1992). Pour l'Ontario, celui-ci varie de 100 à 140 ans, pour obtenir des dimensions de billes variant de 12,2 m (avec un fin bout de 15,5 cm) à 14,6 m (avec un fin bout de 25,4 cm) (Anon. 1981 dans Stiell 1985). Pour l'ensemble de l'aire commerciale du pin blanc, Chapeskie *et al.* (1989) rapportent des âges d'exploitabilité variant de 80 à 150 ans. La récolte à des âges plus avancés est limitée par la carie des tiges. L'âge pathologique du pin blanc a été fixé à 160-170 ans en

Ontario (White 1953 dans Stiell 1985). Boyce (1961) présente aussi un âge pathologique de 160 à 170 ans, alors que l'âge maximal peut atteindre 450 ans. L'âge pathologique varie avec le site et ses conditions de croissance et il n'est pas, à notre connaissance, clairement établi pour les différentes régions du Québec.

6.7 Dommages associés aux opérations de récolte

La forêt est un milieu où le sol, le parterre, le sous-étage et le couvert arboré sont intimement liés par un réseau de racines, de branches et de feuillages. Le travail des ouvriers sylvicoles et de la machinerie ne peut être accompli sans causer des dommages à ce réseau. Les dommages qui peuvent survenir lors des travaux forestiers comprennent, entre autres, les blessures au tronc des arbres dues à l'arrachement de l'écorce, les bris de racines, de branches et de tiges, la courbure et l'inclinaison des arbres, et l'érosion et la création d'ornières (Anderson *et al.* 1998).

Bien que la littérature sur les blessures liées à l'aménagement du pin blanc soit restreinte, une coupe d'amélioration dont les pratiques d'aménagement ont été bien détaillées et dont le suivi s'est effectué sur plusieurs années permet cependant d'obtenir une bonne estimation de ces dommages. Brace et Stewart (1974) présentent des données concernant les blessures associées à une coupe d'amélioration effectuée dans un peuplement où des tiges de pin blanc âgées de 50 à 80 ans étaient présentes sous un couvert composé de bouleaux et de peupliers. Pour l'ensemble des tiges de conifères (en majorité du pin blanc) d'un diamètre supérieur ou égal à 7,5 cm, 6 % ont subi des blessures qui se sont avérées mortelles, alors que 14 % ont subi des blessures non mortelles. Sur ces pourcentages, 66 % des blessures mortelles étaient associées à l'abattage et 60 % des blessures non mortelles étaient associées au raclage de l'écorce par la débusqueuse dans le premier mètre de hauteur des arbres. La majorité des tiges blessées étaient de petit diamètre. Cinq ans après la coupe, l'échantillonnage des blessures les plus sérieuses a révélé très peu de défauts internes, soit une moyenne de carie de 0,25 % du volume marchand brut et une moyenne de coloration de 0,39 % (tableau 7). Sur les 52 arbres étudiés, 19 % présentaient de la carie avant les opérations de récolte. Après la coupe, 30 % des arbres présentaient de la carie et 63 % de la coloration (tous les types de blessures liés à l'exploitation confondus) (tableau 7).

Tableau 7 : Détails des résultats d'une étude portant sur les blessures d'exploitation les plus sérieuses chez les conifères (Adapté de Whitney, 1991).

Abattage				Débusquage					
Bris de couronne		Arrachement d'écorce		Arrachement d'écorce avec contact avec le sol		Arrachement d'écorce sur plus de 25 % de la circonférence sans contact avec le sol		Entaille profonde	
APRÈS 5 ANS									
En % de volume marchand brut des arbres atteints									
Carie	Coloration	Carie	Coloration	Carie	Coloration	Carie	Coloration	Carie	Coloration
0,2	0,6	0,6	0,6	0,1	0,3	0,1	0,5	0,5	0,4
Moyenne pondérée totale : Carie 0,3 % Coloration 0,4 %									
En % de fréquence sur les arbres atteints									
Carie	Coloration	Carie	Coloration	Carie	Coloration	Carie	Coloration	Carie	Coloration
33	66	20	90	30	80	33	66	70	70
Moyenne pondérée totale : Carie 30 % Coloration 63 %									
APRÈS 10 ANS									
En % de volume marchand brut des arbres atteints									
Carie	Coloration	Carie	Coloration	Carie	Coloration	Carie	Coloration	Carie	Coloration
0,6	0,4	2,9	0,7	1,9	0,5	0,2	0,8	0,6	1,0
Moyenne pondérée totale : Carie: 1,0 % Coloration 0,6 %									
En % de fréquence sur les arbres atteints									
Carie	Coloration	Carie	Coloration	Carie	Coloration	Carie	Coloration	Carie	Coloration
67	100	29	86	67	100	50	100	33	100
Moyenne pondérée totale : Carie 40 % Coloration 90 %									

Cinq ans après la coupe, les entailles profondes ont été les plus importantes sources de carie, 70 % de celles-ci étant affectées par un stade de carie avancée. En comparaison, l'arrachement de l'écorce avec contact au sol lors du débusquage et les bris de couronnes ont occasionné 30 et 33 % de carie, respectivement.

Une relation entre le taux d'infection par les pathogènes et la dimension des blessures a été établie pour les blessures dues à l'arrachement de l'écorce sur la bille de souche lors de l'abattage, mais non pour les autres types de blessures. La carie blanche alvéolaire (*Phellinus pini* [Fr.] Karst.), la carie brune (*Coniophora puteana* Schum. ex Fr.) Karst., *Stereum sanguinolentum* (Alb. et Schw. ex Fr.) Fr., et *Scytinostroma galactinum* (Fr.) Donk. ont été les organismes pathogènes les plus fréquemment identifiés (Brace 1978; Whitney et Brace 1979).

En 1981, 10 ans après le début de la même expérience et suite à l'examen de 32 arbres supplémentaires, Whitney (1991) rapporte que la carie affectait, en moyenne, 1.0 % du volume marchand brut alors que la coloration affectait 0.6 % du volume. En terme de pourcentage de fréquence sur les arbres atteints, 40 % des blessures présentaient un stade de carie avancé et 90 % de coloration (tableau 7). La proportion la plus grande de bois affecté par la carie est toujours liée aux mêmes blessures. Cependant, les colonnes de carie et de coloration causées par l'arrachement de l'écorce lors de l'abattage, représentent maintenant 2,9 % et 0,7 % du volume marchand brut (total 3,6 %), comparé à 0,6 % et 0,6 % (total 1,2 %) cinq ans plus tôt. Les blessures du même type causées par le débusquage avec contact au sol, représentent maintenant 2.4 % du volume marchand brut (carie: 1,9 %; coloration: 0,5 %), comparé à 0,4 % cinq ans plus tôt (carie: 0,1 %; coloration: 0,3 %). Dix ans après la coupe, le nombre de blessures dues aux entailles profondes affectées par de la carie est moins grand que 5 ans plus tôt, soit 33 % comparé à 70 % (tableau 7). Bien que la proportion absolue des blessures soit encore faible après 10 ans, le pourcentage de carie a augmenté de plus de 300 % comparativement à 5 ans après la coupe. L'auteur observe aussi que, si cette progression continue au même rythme, le volume de sciage net des arbres affectés pourrait être réduit de 25 à 30 % (25 à 30 ans après coupe) (Whitney 1991).

La résine et les fibres croisées produites par l'arbre en réaction à ces blessures entraînent toutefois une perte plus importante que la carie et la coloration en elles-mêmes. L'inclinaison des arbres entraîne la production de bois de compression qui représente aussi une perte importante pour l'industrie.

Après 10 ans, les organismes pathogènes les plus fréquemment observés lors de l'étude étaient *Stereum sanguinolentum* (Alb. et Schw. ex Fr.) Fr. et *Coniophora puteana* (Schum. ex Fr.) Karst. Durant cette période, la cicatrisation (compartimentation) a varié entre 0 et 100 % suivant l'impact des blessures sur le cambium et la dimension des blessures. Les blessures dues à l'arrachement de l'écorce lors de l'abattage et celles plus petites dues au débusquage ont présenté la cicatrisation la plus avancée soit en moyenne 52 et 46 % de cicatrisation, respectivement.

Smith *et al.* (1994) n'ont pas étudié spécifiquement le pin blanc dans leur analyse portant sur le taux de fermeture des blessures d'exploitation. Cependant, leur travail sur cinq essences feuillues permet de donner un ordre de grandeur concernant la période de temps nécessaire pour la fermeture de ces blessures. Les arbres étudiés, après éclaircie, avaient en moyenne un diamètre d'environ 43 cm, étaient en position codominante et présentaient des accroissements en diamètre variant entre 6,4 et 8,9 cm, au DHP en 10 ans. Ces auteurs ont observé que les blessures de dimension variant entre 6,5 et 325 cm² prennent 5 à 10 ans pour se refermer et celles variant entre 325 et 1290 cm², de 15 à 20 ans. Smith *et al.* (1994) offrent aussi une liste de recommandations pour éviter ces dommages.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Abbott, H. G. 1961. White pine seed consumption by small mammals. *J. For.*, 59: 197-200.
- Abbott, H. G. et T. F. Quink. 1970. Ecology of eastern white pine seed caches made by small forest mammals. *Ecology*, 51: 271-278. *Cité dans* Carleton *et al.* (1996).
- Adams, W.R. 1935. Studies in tolerance of New England forest trees. XII. Effects of thinning in plantations on some of the physical factors of the site and on the development of young northern white pine (*Pinus strobus* L.) and scotch pine (*Pinus silvestris* L.). *Vt. Agric. Exp. Sta. Bull.* 390. *Cité dans* Bormann (1961).
- Ahlgren, C. E. 1976. Regeneration of Red Pine and White Pine following wildfire and logging in northeastern Minnesota. *J. For.*, 74(3): 135-140.
- Ahlgren, C. E. et I. F. Ahlgren. 1981. Some effects of different forest litters on seed germination and growth. *Can. J. For. Res.*, 11(3): 710-714.
- Alexander, L., Larson, B. C. et D. P. Olson. 1985. The influence of wildlife on white pine regeneration in mixed hardwood-conifer forests. pp. 40-45 *dans* D. T. Funk (comp.) *Eastern White Pine: Today and Tomorrow. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.*
- Aird, P.L. 1986. Éloge du pin. Service Canadien des Forêts, Institut Forestier National de Petawawa, Chalk River, Ont. Rapport d'information PI-X-52 F, 32 pp.
- Anderson, R. L. 1973. A summary of white pine blister rust research in the Lake States. USDA Forest Service, North Central For. Exp. Stn., General Technical Report NC-6, 13 pp.
- Anderson, H. W., Batchelor, B. D., Corbett, C. M. et B. Rose. 1998. Harvesting considerations. *dans* Sect 9.0, pp. 1-14. OMNR (1998) A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario, Version 1.1, Ontario Ministry of Natural Resources., Sault Ste-Marie, Ont. 425 pp.
- Anon. 1939. Beneficial effects of partial shade on field survival. *Lake States For. Exp. Stn. Technical. Note* 144. *Cité dans* Horton et Bedell (1960).
- Anon. 1981. Report of the Great Lakes-St. Lawrence Forest Management Committee on white and red pine in Ontario. *Ont. Prof. For. Assoc.*, Huntsville, Ont., 7 pp. *Cité dans* Stiel (1985).
- Atkins, E.S. 1957. Light measurement in a study of white pine reproduction. Canadian Department of Northern Affairs and Natural Resources, Forestry Branch, Technical Note 38. *Cité dans* Pinto *et al.* (1998a).
- Basham, J. T. 1991. Stem decay in living trees in Ontario's forests: A users' compendium and guide. Information report 0-X-408. Forestry Canada, Ontario region, Sault Ste-Marie, Ont. 69 pp.

- Barrette, Y., Gauthier, G. et A. Paquette. 1996. Aménagement de la forêt pour fins de production ligneuse. pp. 649-672. *dans* OIFQ (1996) Manuel de foresterie, Les Presses de l'Université Laval, 1428 pp.
- Bary-Lenger, A., Evrard, R. et P. Gathy. 1988. La forêt: écologie, gestion, économie et conservation. Les éditions du Perron, Liège, France, 611 pp.
- Beaulieu, J. 1998. La noble histoire du pin blanc. pp. 5-12. *dans* Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Service Canadien des Forêts et le Conseil de la Recherche Forestière du Québec (éditeurs). Recueil des conférences du Colloque sur le Pin Blanc tenu à Mont-Laurier les 3 et 4 juin 1998.
- Bell, F.W., Parker, W. C., White, R. G., Duckert, D. R. et J. A. Elliot. 1998. Autecology of Associated plants. *dans* Sect 3.4.7, pp. 1-16. OMNR (1998) A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario, Version 1.1, Ontario Ministry of Natural Resources, Sault Ste-Marie, Ont., 425 pp.
- Belyea, H. C. 1923. The control of white pine weevil (*Pissodes strobi*) by mixed planting. *J. For.* 21: 384-390 *Cité dans* Lavallée et Daoust (1998).
- Beck, D. E. 1971. Height growth patterns of site index of white pine in the southern Appalachians. *For. Sci.* 17: 252-260.
- Bentley, C. V. 1996. Prediction of residual canopy cover for white pine in central Ontario. OMNR, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Ontario Development Agreement, NODA Note 20, 6 pp.
- Berry, A. B. 1982. Response of suppressed conifer seedlings to release from an aspen-pine overstorey. *For. Chron.* 58(2): 91-92.
- Berryman, A. A. 1986. Forest insects: Principles and practice of population management. Plenum Press, N.Y., 279 pp.
- Bérubé, J. A. 1996. Use of triadimefon to control white pine blister rust. *For. Chron.* 72(6): 637-638.
- Bormann, F. H. 1961. Intraspecific Root Grafting and the Survival of Eastern White Pine Stumps. *For. Sci.* 7(3): 247-256.
- Boulet, B. 1995. Guide d'interventions applicables dans les plantations d'épinettes de Norvège afin de minimiser l'impact des dégâts causés par le charançon du pin blanc (Version provisoire).
- Boulet, B. 1998. Un pin blanc vulnérable, pp. 13-23 *dans* Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Service Canadien des Forêts et le Conseil de la Recherche Forestière du Québec (éditeurs), Recueil des conférences du Colloque sur le Pin Blanc tenu à Mont-Laurier les 3 et 4 juin 1998.
- Bouliane, P. S., Cormier, D., Dunnigan, J., Gingras, J.-F., Maranda, J., Masse, D. et P.-S. Tremblay. 1996. Opérations forestières, pp. 1179-1225 *dans* OIFQ (1996) Manuel de foresterie, Les Presses de l'Université Laval, 1428 pp.

- Bowling, C. et G. Niznowski. 1996. White Pine in Northwestern Ontario: Distribution, Silviculture History and Prospects. Ontario Ministry of Natural Resources. NWST Technical Report TR-94, 30 pp.
- Brace, L. G. 1968. Improvement cut in pine mixedwoods. Dep. Forest Rural Develop., Forest Br., Dep. Publication 1235, 12 pp.
- Brace, L. G. 1971. Effects of white pine weevil damage on tree height, volume, lumber recovery and lumber value in eastern white pine. Dept. Environ., Can. For. Serv., Ont. Publication No 1303, 31 pp.
- Brace, L. G. 1972. Assessing silvicultural stand improvement alternatives in pine mixedwoods. 1. Costs and effects of cutting treatments. Project plan and progress report. Can. For. Serv., Petawawa For. Exp. Stn, Chalk River, Ont., Internal Report PS-27, 31 pp.
- Brace, L. G. et D. J. Stewart. 1974. Careful thinning can preserve amenities and increase yield. Pulp and Paper Magazine of Canada 75(8): 36-42.
- Brace, L. G. 1978. An intermediate cutting in pine mixedwoods. *dans* Proceedings of the White and Red Pine Symposium 0-P-6, Can. For. Serv., Chalk River, Ont.
- Brown, J.-L. 1992. Principes et normes d'aménagement des peuplements naturels de pin blanc et de pin rouge proposés pour le Québec. Note de recherche forestière No 46, Gouv. du Québec, Dir. rech. for., 10 pp.
- Brown, J. L. 1994. White pine management in the Ottawa River area of Quebec. For. Chron. 70(4): 437-441.
- Burgess, D. 1996. Forests of the Menominee - a commitment to sustainable forestry. For. Chron. 72(3): 268-275.
- Burgess, D. et C. Robinson. 1998. Canada's oldest permanent sample plots- thinning in white pine red pine. For. Chron. 74(4): 606-616.
- Buse, L. J. 1992. Critical silvics of white pine as related to vegetation management, pp. 1-8 *dans* Technical Note TN-14, Ministry of Natural Resources, Northwestern Ontario Forest Technology Development Unit, Thunder Bay, Ont.
- Campbell, R. A. 1981. Implications of silvicultural strategies on future weed populations in northern Ontario, pp. 72-80 *dans* Proceedings : Weed Control in Forest Management, The 1981 John S. Wright Forestry Conference, Feb. 3-5, 1981. H. Holt et B. Fischer (éditeurs), Department of Forestry and Natural Resources, Indiana Co-operative Extension Services, Purdue University, Timber Management Research, USDA For. Serv., Silvicultural Working Group, Society of American Foresters *Cité dans* Morneau (1998b).
- Carleton, T. J. et R. W. Arnup. 1994. Vegetation ecology of eastern white pine and red pine forests in Ontario. Report No 11, Forest Fragmentation and Biodiversity Project, OMNR, Ontario Forest Research Institute, Sault Ste-Marie, Ont. *Cité dans* Bowling et Niznowski (1996).

- Carleton, T. J., Maycock, P. F., Arnup, R. et A. M. Gordon. 1996. *In situ* regeneration of *Pinus strobus* and *P. resinosa* in the Great Lakes forest communities of Canada. *J. Veg. Sci.* 7 (3): 431-444.
- Carpentier J.-P., Lacombe, L., Bergeron, D., St-Jean, L. et P. Tardif. 1989. Estimation du faisceau de courbes d'indice de qualité de station pour le pin blanc au Québec, Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction de la recherche et du développement, Service de la recherche appliquée, Mémoire 97, 228 pp.
- Chapeskie, D. J., Galley, D. F., Mitchell, J. R., Quinn, N. W. et H. H. Struik. 1989. A silvicultural guide for the white pine and red pine working groups in Ontario, OMNR, Forest Resources Group, Toronto, Ont. 102 pp.
- Chambers, B. A. et B. G. Merchant. 1998. Characteristics of the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest. *dans* Sect 3.0, pp. 1-10, OMNR (1998) A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario, Version 1.1, Ontario Ministry of Natural Resources, Sault Ste-Marie, Ont., 425 pp.
- Clements, J. R. 1966. Development of a white pine underplantation in thinned and unthinned Aspen. *For. Chron.* 42: 244-250.
- Coates, K. D. et P. J. Burton. 1997. A gap-based approach for development of silvicultural systems to adress ecosystem management objectives. *For. Ecol. Manage.* 99: 337-354.
- Collingwood, G. H. et W. D. Brush. 1984. *Knowing your trees*, The American Forestry Association, Washington, D.C., 392 pp.
- Connola, D. P. et E. C. Wixson. 1963. Effects of soil and other environmental conditions on white pine weevil attack in New York, *J. For.* 61: 447-448 *Cité dans* Boulet (1995).
- Cooke, R. R. et J. P. Barrett. 1985. Growth estimates in natural white pine stands over two decades, pp. 46-50 *dans* D. T. Funk (comp.) *Eastern White Pine: Today and Tomorrow*. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Corbett, C. M. 1994. White pine management and conservation in Algonquin Park. *For. Chron.* 70 (4): 435 436.
- Dale, M. E., Smith, H. C. et J. N. Percy. 1995. Size of clearcut opening affects species composition, growth rate, and stand characteristics, USDA For. Serv., Northeastern For. Exp. Stn. Res. Pap. NE-698, 21 pp.
- Daniel, T. W., Helms, J. A. et F. S. Baker. 1979. *Principles of silviculture*. Second Edition. McGraw-Hill Book Company, N.Y., 500 pp.
- Dean, T. J. et C.V. Baldwin, Jr. 1993. Using a density-management diagram to develop thinning schedules for Loblolly pine plantations. USDA For. Serv. Southern For. Exp. Stn. Res. Pap. SO-275, 7 pp.
- DeBoo, R. F. 1978. Management of pine insect pests, pp. 165-176 *dans* D. A. Cameron (comp.) *White and Red Pine Symposium*, Dep. Environ., Can. For. Serv., Sault Ste-Marie, Ont. Symp. Proc. O-P-6, 178 pp.

- Della-Bianca, L. 1993. Thinning eastern white pine in the southern Appalachians. *South. J. Appl. For.* 17: 68-73.
- Dirks, C.O. 1964. The white pine weevil in Maine: Biology and dispersal and effect of prompt clipping of infested leaders on trunk form, *Maine Agric. Expt. Stn Bull.* No 625, 23 pp.
- Doucet, R., Pineau, M., Ruel, J.-C. et G. Sheedy. 1996. Sylviculture appliquée, pp. 967-995 *dans* OIFQ (1996) Manuel de foresterie, Les Presses de l'Université Laval, 1428 pp.
- Drew, T. J. et J. W. Flewelling. 1977. Some recent Japanese theories of yield-density relationships and their application to Monterey pine plantations. *For. Sci.* 23(4): 517-534.
- Drouin, L. et R. Lavallée. 1989. La lutte contre le charançon: une leçon d'aménagement. Ministère des Ressources Naturelles du Québec, La foresterie sans détour, Série Conservation des ressources, No. 3.
- Duchesne, L. C., Beardmore, T. et R. Reader. 1998. Determining Seeding Rates *dans* Sect 7.4.3, pp. 1-8, OMNR (1998) A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario, Version 1.1, Ontario Ministry of Natural Resources, Sault Ste-Marie, Ont. 425 pp.
- Ducruc, J. P. et A. Lafond. 1977. Les pinèdes à pin blanc de la vallée de la rivière de l'Aigle, Pontiac, Québec. *Nat. Can.* 104(4): 325-339.
- Dulac, S. 1998. L'importance, les besoins et les préoccupations pour le syndicat des producteurs de bois de l'Estrie en regard du pin blanc, pp. 75-80 *dans* Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Service Canadien des Forêts et le Conseil de la Recherche Forestière du Québec (éditeurs), Recueil des conférences du Colloque sur le Pin Blanc tenu à Mont-Laurier les 3 et 4 juin 1998.
- Elliott, K. J. et J. M. Vose. 1995. Evaluation of the competitive environment for white pine (*Pinus strobus* L.) seedlings planted on prescribed burn sites in the Southern Appalachians. *For. Sci.* 41(3): 513-530.
- Elliott, K. J. et J. M. Vose. 1993. Site preparation burning to improve southern Appalachian pine-hardwood stands: photosynthesis, water relations, and growth of planted *Pinus strobus* during establishment. Proceedings of the international conference on forest vegetation management held at the School of Forestry, Auburn University, Auburn, Alabama, USA, 27 April -1 May 1992. *Can. J. For. Res.* 23(10): 2278-2285.
- Engalichev, N. 1985. More value added for everyone in marketing eastern white pine, pp. 106-108 *dans* D. T. Funk (comp.) Eastern White Pine: Today and Tomorrow. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Evans, K. E. et R. N. Conner. 1979. Snag management, pp. 214-225 *dans* Management of North Central and Northeastern forests for Nongame birds, R. M. DeGraff et K. E. Evans (éditeurs), USDA For. Serv. General technical report NC-51. *Cité dans* Munro et Churcher (1998).
- Farrar, J. L. 1996. Les arbres du Canada., Publié par les éditions FIDES et le Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada avec la collaboration du Groupe Communication Canada-Édition Approvisionnement et Services Canada, 502 pp.

- Fisher, R. T. et E. I. Terry. 1920. The management of second growth white pine in central New England. *J. For.* 18: 358-366.
- Foster, C. E. 1985. Converting to white pine and plantation management, pp. 55-56 *dans* D. T. Funk (comp.) *Eastern White Pine: Today and Tomorrow*. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Frelich, L. E. 1992. The relationship of natural disturbances to white pine stand development, pp.27-37 *dans* R. A. Stine et M. J. Baughman (éditeurs), *Proceedings of White Pine Symposium: history, ecology, policy and management*, tenu du 16-18 sept. à Duluth, Minnesota, University of Minnesota, St. Paul, MN.
- Frelich, L. E. et C. G. Lorimer. 1991. Natural disturbances regimes in hemlock-hardwood forests of the upper Great Lakes region. *Ecol. Monogr.* 61: 145-164 *Cité dans* Frelich (1992).
- French, D. W. 1992. White pine blister rust can be controlled, pp.123-125 *dans* R. A. Stine et M. J. Baughman (éditeurs), *Proceedings of White Pine Symposium: history, ecology, policy and management*, tenu du 16-18 sept. à Duluth, Minnesota, University of Minnesota, St. Paul, MN.
- Frothingham, E. H. 1942. Twenty years' results of plantation thinning at Biltmore, N.C. *J. For.* 40: 444-452.
- Frothingham, E. H. 1914. White pine under forest management. USDA Agric. Bull. No. 13, 70 pp., *Cité dans* Lancaster et Leak.(1978).
- Garrett, P. W. 1985. Role of tree improvement in providing pest-resistant eastern white pine (*Pinus strobus* L.), pp. 75-88 *dans* D. T. Funk (comp.) *Eastern White Pine: Today and Tomorrow*. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Gignac, M. et collaborateurs. 1996. La rouille vésiculeuse du Pin Blanc. Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Les maladies des arbres, 4 pp.
- Gillespie, A. R. et H. W. Hocker, Jr. 1986. The influence of competition on individual white pine thinning response. *Can. J. For. Res.* 16(6): 1355-1359.
- Haddow, W. R. 1956. Blister rust control as an element of white pine management. *For. Chron.* 32: 68-74.
- Hamel, M. et E. Bauce. 1994. Choix de l'hôte par les adultes du charançon du pin blanc: Rôle des stimuli gustatifs, pp. 35-56 *dans* R. Lavallée et G. Bonneau (éditeurs), *compte-rendu du Colloque sur le charançon du pin blanc*, tenu les 27 et 28 septembre 1994 au Centre de Foresterie des Laurentides.
- Harlow, W. M., Harrar, E. S. et F. M. White. 1969. *Textbook of dendrology, covering the important forest trees of the United States and Canada*, 6th edition. McGraw-Hill, N.Y., 510 pp.
- Harman, D. M. 1975. Movement of individually marked white pine weevils, *Pissodes strobi*. *Env. Entomol.* 4(1): 120-124.

- Hawley, R. C. et R. T. Clapp. 1935. Artificial pruning in coniferous plantations. Yale Univ. Sch. For. Bull. 39 *Cité dans* Horton et Bedell (1960).
- Hawley, R. C. et H. J. Lutz. 1943. Establishment, development, and management of conifer plantations in the Eli Whitney Forest, New Haven, Connecticut. Yale Univ. Sch. For. Bull. 53 *Cité dans* Horton et Bedell (1960).
- Heckman, S. T. 1992. White pine management on the Menominee and its evolutionary process. pp.157-165 *dans* R. A. Stine et M. J. Baughman (éditeurs), Proceedings of White Pine Symposium: history, ecology, policy and management, tenu du 16-18 sept. à Duluth, Minnesota, University of Minnesota, St. Paul, MN.
- Heckman, S. T., Pecore, M. J. *et al.* 1985. Natural white pine regeneration: Site requirements. pp. 57-61 *dans* D. T. Funk (comp.) Eastern White Pine: Today and Tomorrow. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Heiberg, S. O. 1942. Cutting based upon economic increment. J. For. 40(8) *Cité dans* Horton et Bedell (1960).
- Heiberg, S. O. et D. P. White. 1951. Potassium deficiency of reforested pine and spruce stands in northern New York. Soil Sci. Soc. Amer., Proc. 1950. 15: 369-376 *Cité dans* Stiell (1985)
- Heinselman, M. L. 1981. Fire intensity and frequency as factors in the distribution and structure of northern ecosystems. pp. 5-57 *dans* Fire regimes and ecosystem properties. Compte-rendu d'une conférence tenue du 11 au 15 décembre 1978 à Honolulu, Hawaii. General Technical Report WO-26.
- Hibbs, D. E. 1982. Gap dynamics in a hemlock-hardwood forest. Can. J. For. Res. 12(3): 522-527.
- Hodge, J.C., Juzwik, J., Gross, H. L. et A. Retnakaran. 1989. White pine blister rust and white pine weevil management: guidelines for white pine in Ontario. OMNR, Pest Man. Section. Sault Ste-Marie, Ont. *Cité dans* Pinto (1992).
- Hodges, C. S. 1985. Diseases of eastern white pine. pp. 93-98. *dans* D. T. Funk (comp.) Eastern White Pine: Today and Tomorrow. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Honer *et al.* 1983. Metric timber tables for the commercial tree species of central and eastern Canada. Environment Canada. Can. For. Serv. Maritimes For. Res. Center. Information report M-X-140., 139 pp.
- Horton, K. W. 1966. Profitability of pruning white pine. For. Chron. 42: 294-305.
- Horton, K. W. et G. H. D. Bedell. 1960. White and Red Pine ecology, silviculture and management. Canadian Department of Northern Affairs and National Resources, Forestry Branch Bulletin No. 124, 185 pp.
- Horton, K. W. et W. G. E. Brown. 1960. Ecology of white and red pine in the Great Lakes-St.-Lawrence-Forest Region. Dept. North. Aff. Natl. Resour., Forestry Branch, Ottawa, Ontario. Technical Note No. 88, 22 pp.

- Horton, K. W. et B. S. P. Wang. 1969. Experimental seeding of conifers in scarified strips. *For. Chron.* 45: 22-29.
- Houseweart, M. W. et F. B. Knight. 1985. Entomological problems in growing white pine. pp. 89-92. *dans* D. T. Funk (comp.) *Eastern White Pine: Today and Tomorrow*. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Howard, T. E. 1985. The lore and lure of eastern white pine. pp. 10-15. *dans* D. T. Funk (comp.) *Eastern White Pine: Today and Tomorrow*. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Huot, M. 1987. Régénération naturelle du pin blanc après coupe à diamètre-limite dans le sud-ouest du Québec. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de maître ès sciences forestières (M.Sc.F.). Faculté de Foresterie et de Géomatique, Université Laval, Québec, Canada, 76 pp.
- Irland, L. C. 1985. White pine: The case for optimism. pp. 1-6. *dans* D. T. Funk (comp.) *Eastern White Pine: Today and Tomorrow*. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Jaynes, H. A. et H. J. MacAloney. 1958. White pine weevil. USDA. For. Serv., Forest pest leaflet. No. 21, 7 pp., *Cité dans* Lavallée et Benoit (1989).
- Jeglum, J. K. et D. J. Kennington. 1993. Strip clearcutting in black spruce: a guide for the practicing forester, Forestry Canada, Ontario Region, Great Lakes Forestry Centre. Ministry of supply and Services Canada. Catalogue No. Fo42-189/1993E.
- Jones, A. C. 1992. The problem with white pine. pp.64-72. *dans* R. A. Stine et M. J. Baughman (éditeurs), *Proceedings of White Pine Symposium: history, ecology, policy and management*, tenu du 16-18 sept. à Duluth, Minnesota, University of Minnesota, St. Paul, MN.
- Joyce, D., Mosseler, A. et P. Nitschke. (sous presse). Managing forest genetic resources. *dans* R. Wagner et S. Columbo (éditeurs) *Regenerating Ontario's Forests*, 56 pp. *Cité dans* Pinto *et al.* (1998b).
- Katovich, S. A. et F. S. Morse. 1992. White pine weevil response to oak overstory girdling - results from a 16-year-old study. *North. J. Appl. For.* 9(2): 51-54.
- Kelty, M. J. et P. K. Entcheva. 1993. Response of suppressed white pine saplings to release during shelterwood cutting. *North. J. Appl. For.* 10(4): 166-169.
- Kienholz, R. 1934. Leader, needle, cambial, and root growth of certain conifers and their interrelationship. *Bot. Gaz.* 46: 73-92 *Cité dans* Horton et Bedell (1960).
- Kittredge, D. B., Jr. et P. M. S. Ashton. 1990. Natural regeneration patterns in even-aged mixed stands in southern New England. *North. J. Appl. For.* 7(4): 163-168.
- Kittredge, D. B. et P. M. S. Ashton. 1995. Impact of deer browsing on regeneration in mixed stands in southern New England. *North. J. Appl. For.* 12(3): 115-120.
- Kotar, J. 1992. Managing white pine: Finding the proper niche. pp.150-156. *dans* R. A. Stine et M. J. Baughman (éditeurs), *Proceedings of White Pine Symposium: history, ecology,*

- policy and management, tenu du 16-18 sept. à Duluth, Minnesota, University of Minnesota, St. Paul, MN.
- Laflamme, G. 1998. La rouille vésiculeuse du pin blanc, ça se contrôle! pp. 41-48. *dans* Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Service Canadien des Forêts et le Conseil de la Recherche Forestière du Québec (éditeurs) Recueil des conférences du Colloque sur le Pin Blanc tenu à Mont-Laurier les 3 et 4 juin 1998.
- Lafond, A. 1954. Les déficiences en potassium et magnésium des plantations de *Pinus strobus*, *P. resinosa* et *Picea glauca* dans la province de Québec. Compte-rendu de la 34^e Assemblée Annuelle Ass. Ingén. For. Québec, pp. 65-82 *Cité dans* Horton et Brown (1960).
- Lancaster, K. F. et W. B. Leak. 1978. A silvicultural guide for white pine in the Northeast. USDA For. Serv. North. For. Exp. Stn. General Technical Report NE-41.
- Larsson, H.C. 1946. Forest regeneration survey on cut-over pine lands in the Timagami Forest Reserve. Ont. Dept. Lands and For., Res. Div. Res. Rept. No. 7 *Cité dans* Horton et Bedell (1960).
- Lavallée, A. 1978. La rouille vésiculeuse du pin blanc. Serv. Can. For., Feuillet d'information CFL No 6, 2^e édition.
- Lavallée, A. 1986a. Zones de vulnérabilité du pin blanc à la rouille vésiculeuse au Québec. For. Chron.. 62(1): 24-28.
- Lavallée, A. 1986b. Les risques d'infection par la rouille vésiculeuse du pin blanc. Serv. Can. For., Feuillet d'information CFL No. 23.
- Lavallée, A. 1989. Note sur la réduction de la déformation des tiges de pin blanc attaquées par le charançon du pin blanc. Phytoprotection 70(1): 25-28.
- Lavallée, A. 1992. Évolution de la rouille vésiculeuse du pin blanc dans les jeunes plantations de pins blancs. Forêts Canada, Région Québec, Rapport d'information LAU-X-101.
- Lavallée, R. et P. Benoit. 1989. Le charançon du pin blanc. Serv. Can. For., Feuillet d'information CFL NO 18, édition révisée.
- Lavallée, R. et G. Bonneau. 1994. (éditeurs). Compte-rendu du Colloque sur le charançon du pin blanc, tenu les 27 et 28 septembre 1994 au Centre de Foresterie des Laurentides.
- Lavallée, R. et G. Daoust. 1998. Lutte contre le charançon du pin blanc: revue des méthodes et résultats d'application. pp. 49-51. *dans* Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Service Canadien des Forêts et le Conseil de la Recherche Forestière du Québec (éditeurs). Recueil des conférences du Colloque sur le Pin Blanc tenu à Mont-Laurier les 3 et 4 juin 1998.
- Lavallée, R. et J. Morissette. 1989. Le contrôle mécanique du charançon du pin blanc. Serv. Can. For., Feuillet d'information CFL No. 25.
- Lehrer, G. F. 1982. Pathological pruning: a useful tool in white pine blister rust control. Plant Disease. 66(12): 1138-1139.

- Locey, C. T. 1992. White pine artificial regeneration system. pp.168-169. *dans* R. A. Stine et M. J. Baughman (éditeurs), Proceedings of White Pine Symposium: history, ecology, policy and management, tenu du 16-18 sept. à Duluth, Minnesota, University of Minnesota, St. Paul, MN.
- Logan, K. T. 1959. Some effects of pruning on white pine seedlings. Can. Dept. N. A. and N. R., For. Br. Tech. Note 82.
- Lutz, R. J. et A. C. Cline. 1947. Results of the first thirty years of experimentation in silviculture in the Harvard Forest, 1908-1938. Part I. The conversion of stands of old field origin by various methods of cutting and subsequent cultural treatments. Harvard For., Bull. No. 23, 180 pp.
- MacAloney, H. J. 1930. The white pine weevil (*Pissodes strobi* Peck) - its biology and control. N.Y. State College For. Syracuse University. Tech. Publ. 28, pp. 1-97 *Cité dans* Horton et Bedell (1960).
- MacAloney, H. J. 1943. The white pine weevil. USDA (revised). Circ. 221 *Cité dans* Horton et Bedell (1960).
- MacKey, B. G., McKenny, D. W., Yang, Y.-Q., McMahon, J. P. et M. F. Hutchinson. 1996. Site regions revisited: a climatic analysis of Hill's site regions of Ontario using a parametric method. Can. J. For. Res. 26: 333-354 *Cité dans* Chambers et Merchant (1998).
- Mader, D. L. 1985. Soil- Site relationships for white pine in the Northeast. pp. 28-31 *dans* D. T. Funk (comp.) Eastern White Pine: Today and Tomorrow. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Maloy, O. C. 1997. White pine blister rust control in North America: a case history. Annu. Rev. Phytopathol. 35: 87-109.
- Manion, P. D. 1981. Tree disease concepts. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 399 pp.
- Margolis, H. A. et D. G. Brand. 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. Can. J. For. Res. 20(4): 375 390
- Marquis, D. A. 1965. Controlling Light in Small Clearcuttings. USDA For. Serv. Res. Paper NE-39, 16 pp.
- Martineau, R. 1985. Insectes nuisibles des forêts de l'est du Canada, Éditions Marcel Broquet Inc. conjointement avec le Gouvernement du Canada, Service canadien des forêts et le Centre d'édition du gouvernement du Canada, Approvisionnements et Services Canada. 283 pp.
- Marty, R. et D. G. Mott. 1964. Evaluating and scheduling white pine weevil control in the Northeast. Northeastern For. Exp. Stn., USDA For. Serv. Research. Paper No. 19.
- McCormack, R. J. 1956. Growth and yield of red and white pine. Can. Dept. N.A. and N. R., For. Br. S. and M. 56-6 *Cité dans* Horton et Bedell (1960).

- McMullen, L. H. et Condrashoff. 1973. Notes on dispersal, longevity and overwintering of adult *Pissodes strobi* (Peck) (*Coleoptera: Curculionidae*) on Vancouver Island. J. Entomolog. Soc. Brit. Columbia. 70: 22-26.
- McRae, D. J. 1986. Prescribed burning for stand conversion in budworm-killed balsam fir: an Ontario case history. For. Chron.. 62(2): 96-100.
- McRae, D. J., Lynham, T. J. *et al.* 1994. Understory prescribed burning in red pine and white pine. For. Chron.. 70(4): 395-401.
- MERQ. 1981. Normes de traitements sylvicoles. Gouvernement du Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources.
- Messier, C., Parent, S., Chengaou, M., et J. Beaulieu. 1999. 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.
- Methven, I. R. 1971. Prescribed fire, crown scorch and mortality: Field and laboratory studies on red and white pine. Department of Environment, Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experiment Station, Chalk River, Ont. Information Report PS-X-31. 10 pp. *Cité dans* Morneau et Heaman (1998).
- Methven, I. R. et W. G. Murray. 1974. Using fire to eliminate understory Balsam Fir in Pine management. For. Chron.. 50(2): 77-79.
- Michaud, E. 1996. Essai de l'élagage pour le contrôle de *Cronartium ribicola* J.C. Fisch. Projet en aménagement forestier (FOR-17244), Faculté de Foresterie et de Géomatique, Université Laval, Québec, 38 pp. *Cité dans* Laflamme (1998).
- Minckler, L. S. et A. G. Chapman. 1954. Direct seeding of pines in the central hardwoods region. USDA For. Serv. Central States Exp. Stn. Tech. Pap. No 140, 21 pp.
- Ministère des Ressources Naturelles du Québec (MRNQ). 1998. Manuel d'aménagement forestier. MRN, Direction des programmes forestiers, Québec.
- Morneault, A. E. 1998a. Méthodes sylvicoles appliquées au pin blanc en Ontario. pp. 63-73. *dans* Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Service Canadien des Forêts et le Conseil de la Recherche Forestière du Québec (éditeurs). Recueil des conférences du Colloque sur le pin Blanc tenu à Mont-Laurier les 3 et 4 juin 1998.
- Morneault, A. E. 1998b. Site preparation *dans* Sect 7.3, pp. 1-27. OMNR (1998) A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario, Version 1.1, Ontario Ministry of Natural Resources, Sault Ste-Marie, Ont., 425 pp.
- Morneault, A. E. et D. Heaman. 1998. Prescribed fire. *dans* Sect 7.3.3, pp. 49-78. OMNR (1998) A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario, Version 1.1, Ontario Ministry of Natural Resources. Sault Ste-Marie, Ont., 425 pp.
- Munro, J. S. et J. Churcher. 1998. Damaging agents *dans* Sect 3.4.8, pp. 1-18. OMNR (1998) A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario. Version 1.1 Ontario Ministry of Natural Resources, Sault Ste-Marie, Ont., 425 pp.

- Murray, W. G. 1977. A winter pruning operation in white and red pine. *For. Chron.*, 53(3): 164-165.
- Myren, D. T. 1994. Carie blanche alvéolaire *Phellinus pini* (Brot.: Fr) A. Ames. pp. 95-96 dans *Maladies des arbres de l'est du Canada*. Publié par Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Direction des sciences et du développement durable. 159 pp.
- Naylor, B. J. 1994. Managing wildlife habitat in red pine and white pine forests of central Ontario. *For. Chron.*, 70(4): 411-419
- Naylor, B. J. 1998. Integrating timber and wildlife habitat management. Sect 8.0, pp. 1-37. dans OMNR (1998) *A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario*, Version 1.1, Ontario Ministry of Natural Resources, Sault Ste-Marie, Ont. 425 pp.
- Nolet, P., Doyon, F. et P. D. Vlasiu. 1999. L'aménagement par coupe par trouées des strates de feuillus d'essences tolérantes avec pin blanc. Institut québécois d'aménagement de la forêt feuillue, 33 pp.
- Nolet, P., Doyon, F. et M. Beaudet. 2000. Effets du jardinage avec trouées et du scarifiage sur la régénération des essences commerciales dans des peuplements de feuillus tolérants avec pin blanc. Institut québécois d'aménagement de la forêt feuillue, 29 pp.
- Ordre des Ingénieurs Forestiers (OIFQ). 1996. Manuel de foresterie. Les Presses de l'Université Laval, Québec, 1452 pp.
- Ontario Ministry of Natural Resources (OMNR). 1973. A silvicultural guide to the white pine working group. OMNR Forest Management Branch, Division of Forests, 34 pp.
- Ontario Ministry of Natural Resources (OMNR). 1996. Restoring old-growth features to managed forests in southern Ontario. The LandOwner Resource Centre, OMNR, Eastern Ontario Model Forest, LRC-27, 8 pp.
- Ontario Ministry of Natural Resources (OMNR). 1998. A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario, Version 1.1, Ontario Ministry of Natural Resources, Sault Ste-Marie, Ont. 425 pp.
- Ontario Ministry of Natural Resources (OMNR). 1998. Ontario Tree Marker Training Course. Class Notes. OMNR, Frost Centre Westwind Forest Stewardship Inc.
- Owston, P.W. 1969. The shoot apex in eastern white pine: its structure, seasonal development, and variation with the crown. *Can. J. Bot.* 47: 1181-1188.
- Pacala, S. W., Canham, C. D., Silander, Jr., J.A. et R. K. Kobe. 1994. Sapling growth as a function of resources in a north temperate forest. *Can. J. For. Res.* 24(11): 2172-2183.
- Palik, B. J. et K. S. Pregitzer. 1993. The repeatability of stem exclusion during even-aged development of bigtooth aspen dominated forests. *Can. J. For. Res.* 23(6): 1156-1168.
- Palik, B. J. et K. S. Pregitzer. 1994. White pine seed-tree legacies in an aspen landscape: influences on post-disturbance white pine population structure. *For. Ecol. Manage.* 67(1-3): 191-201.

- Paradis, C. 1993. Évaluation des dégâts causés par le charançon du pin blanc, *Pissodes strobi* (Peck), dans les plantations-relevé de 1993 dans R. Lavallée et G. Bonneau (éditeurs), Compte-rendu du Colloque sur le charançon du pin blanc, tenu les 27 et 28 septembre 1994 au Centre de Foresterie des Laurentides.
- Paul, B. H. 1938. Knots in second-growth white pine and the desirability of pruning. USDA. Misc. Pub. 307 Cité dans Horton et Bedell (1960).
- Payandeh, B. et Y. Wang. 1996. Variable stocking version of Plonski's yield tables formulated. For. Chron.. 72(2): 181-184.
- Philbrook, J. S., Barrett, J.P. et W.B. Leak. 1973. Stocking guide for eastern white pine. USDA. For. Serv. N.-E.t For. Exp. Stn, Upper darby, PA, Tech. Note No. 168.
- Pinto, F. N. L. 1992. Silvicultural practices in Ontario's white pine forests. pp.170-178. dans R. A. Stine et M. J. Baughman (éditeurs), Proceedings of White Pine Symposium: history, ecology, policy and management, tenu du 16-18 sept. à Duluth, Minnesota, University of Minnesota, St. Paul, MN.
- Pinto, F. N. L. 1998. Renewal. dans Sect 7.4, pp. 1-9, OMNR (1998) A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario, Version 1.1, Ontario Ministry of Natural Resources, Sault Ste-Marie, Ont. 425 pp.
- Pinto, F. N. L., Corlett, A. S., Naylor, B. J., Morneau, A. E., Galley, D. F., Munro, J. S. et J. Leavey. 1998b. Silvicultural systems dans Sect 7.2, pp. 1-29. OMNR (1998) A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario, Version 1.1, Ontario Ministry of Natural Resources, Sault Ste-Marie, Ont. 425 pp.
- Pinto, F.N.L., Herr, D. et S. Vasiliauskas. 1998a. Silvics of the Great Lakes-St. Lawrence conifers. dans Sect 3.4, pp. 1-45. OMNR (1998) A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario, Version 1.1, Ontario Ministry of Natural Resources, Sault Ste-Marie, Ont. 425 pp.
- Plonski, W. L.1974. Normal yield tables (metric) for major species in Ontario. ONMR For. Ress. Group, Toronto, Ont. 40 pp.
- Plonski, W. L.1981. Normal yield tables (metric) for major species in Ontario. ONMR For. Ress. Group, Toronto, Ont.
- Pomerleau, R. et J. Bard. 1969. Les plantations de pin blanc et la rouille vésiculeuse dans le Québec. Phytoprotection, 50: 32-37.
- Quinby, P. A. 1991. Self-replacement in old growth white pine forests of Temagami, Ontario. For. Ecol. Manage. 41(1-2): 95-109.
- Racey, G. D., Whitfield, T. S. et al. 1989. Northwestern Ontario forest ecosystem interpretations, OMNR, Northwest Ontario Forest Technology Development Unit, Thunder Bay, Ont., 90 pp.
- Rajala, J. 1992. Growing white pine for today's markets. pp.120-122. dans R. A. Stine et M. J. Baughman (éditeurs), Proceedings of White Pine Symposium: history, ecology, policy

- and management, tenu du 16-18 sept. à Duluth, Minnesota, University of Minnesota, St. Paul, MN.
- Reid, S. R. et M. E. Woods. 1998. Stand maintenance. *dans* Sect 7.5, pp. 1-14. OMNR (1998) A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario, Version 1.1, Ontario Ministry of Natural Resources, Sault Ste-Marie, Ont. 425 pp.
- Rhodes, A. D. 1963. Reducing trunk malformation caused by injury to eastern white pine by the white pine weevil. *J. For.* 61: 374-378 *Cité dans* Lavallée et Benoit (1989).
- Robbins, J. 1985. Quality issues and alternatives. pp. 26-27 *dans* D. T. Funk (comp.) Eastern White Pine: Today and Tomorrow. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Rollins, K., M. Forsyth, S. Bonti-Ankomah et B. Amoah. (1994). Economic analysis of forestry management practices with an application to a white pine improvement cut in Ontario. OMNR. Natural Resources Canada. Canadian Forest Service. Northern Ontario Development Agreement. NODA Note 3. 6 pp.
- Rollins, K., Forsyth, M., Bonti-Ankomah, S. et B. Amoah. 1995. A financial analysis of a white pine improvement cut in Ontario. *For. Chron.* 71(4): 466-472.
- Rostrup, E. 1890. Ustilagineae, Daniae. *Dansk Botanisk Forening*, April 1890: 117-168 *Cité dans* Wicker (1981).
- Schuman, D. R. 1985. White pine marketing opportunities pp. 102-105 *dans* D. T. Funk (comp.) Eastern White Pine: Today and Tomorrow. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Scott, D. R. M. 1958. Forest ecology, as related to white pine silviculture in Central Ontario. *Soc. Amer. For., Proc.* 1957, pp. 72-74.
- Seymour, R. S. et D. M. Smith. 1987. A new stocking guide formulation applied to eastern white pine. *For. Sci.* 33(2): 469-484.
- Shepard, Jr., R. K., Reams, G. A. et R. C. Lemin, Jr. 1991. Response of eastern white pine to nitrogen fertilization. *North. J. Appl. For.* 8(2): 83-85.
- Singh, P. 1994. Rouille vésiculeuse du pin blanc *Cronartium ribicola* J.C. Fischer. pp. 107-109. *dans* Maladies des arbres de l'est du Canada. Publié par Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Direction des sciences et du développement durable. 159 pp.
- Sleeth, B. 1938. Pruning wounds as a avenue of entrance for *Stereum sanguinolentum* in northern white pine plantations. USDA For. Serv., Allegheny F.E.S. Technical Note No 22 *Cité dans* Horton et Bedell (1960).
- Smidt, M. F. et K. J. Puettmann. 1998. Overstory and understory competition affect underplanted eastern white pine. *For. Ecol. Manage.* 105: 137-150.
- Smith, D. 1986. The practice of silviculture. 8th edition, John Wiley & Sons, N.Y., 527 pp.

- Smith, D. J. 1996. Development and field application of density management diagrams and size-density surface models developed for the boreal mixedwoods stands of Ontario. Nat. Resour. Can., Canadian forest Service, Great Lakes Forestry Centre, Sault Ste. Marie, Ont. NODA/NFP Tech. Rep. TR-39. 11 pp.
- Smith, D. M. 1940. Factors controlling the early survival of eastern white pine in central New England. *Ecol. Monogr.* 10: 273-420 *Cité dans* Pinto *et al.* (1998a).
- Smith, D. M. 1985. Soft pine for the future. pp. 109 *dans* D. T. Funk (comp.) Eastern White Pine: Today and Tomorrow. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Smith, D. M. et P. M. S. Ashton. 1993. Early dominance of pioneer hardwood after clearcutting and removal of advanced regeneration. *North. J. Appl. For.* 10(1 : 14-19.
- Smith, D. M. et R. S. Seymour. 1985. Relationship between pruning and thinning. pp. 62-66 *dans* D. T. Funk (comp.) Eastern White Pine: Today and Tomorrow. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Smith, H.C., Miller, G. W. et T. M. Schuler. 1994. Closure of logging wounds after 10 years. USDA For. Serv. Northeastern For. Expt. Stn. Research Paper NE-692.
- Smith, D. J. et M. E. Woods. 1997. Red Pine and White Pine Density Management Diagrams for Ontario. Ontario Ministry of Natural Resources, SCSS Technical report No 48.
- Smyth, J. H. et L. R. Methven. 1978. Application of a numerical index to quantify the aesthetic impact of an improvement cut in pine mixedwoods. *Dep. Environ., Can. For. Serv., Great Lakes For. Res. Centre, Sault Ste. Marie, Ont. Rep. O-X-270*, 16 pp.
- Sowers, D. W. *et al.* 1956. Some factors affecting management of conifers and hardwoods in the Allegheny region. *J. For.* 54(9): 563-567.
- Spaeth, J. N. 1922. Notes on the release of white pine in Harvard Forest, Petersham, Massachusetts. *J. For* 20: 117-121.
- Spurr, S. H., Young, L. J., Barnes, B. V. et E. L. Hugues. 1957. Nine successive thinnings in a Michigan white pine plantation. *J. For* 55: 7-13.
- Stearns, F. 1992. Ecological characteristics of white pine. pp.10-18 *dans* R. A. Stine et M. J. Baughman (éditeurs), *Proceedings of White Pine Symposium: history, ecology, policy and management*, tenu du 16-18 sept. à Duluth, Minnesota, University of Minnesota, St. Paul, MN.
- Stiell, W. M. 1955. The Petawawa Plantations. Department. of Northern Affairs and National Resources. Forestry Branch. For. Res, Div. Technical Note No 21.
- Stiell, W. M. 1959a. Intermediate cuttings in Red and White Pine plantations. Department. of Northern Affairs and National Resources. Forestry Branch. For. Res, Div. Technical Note No 81.
- Stiell, W. M. 1959b. Seeding and planting red and white pine. Department. of Northern Affairs and National Resources. Forestry Branch. For. Res, Div. Technical Note No 80.

- Stiell, W. M. 1979. Releasing unweevilled white pine to ensure first-log quality of final crop. *For. Chron.* 55(4): 142-143.
- Stiell, W. M. 1984. Improvement cut accelerates white pine sawlog growth. *For. Chron.* 60(1): 3-9.
- Stiell, W. M. 1985. Silviculture of eastern white pine. *Proceedings of the Entomological Society of Ontario* 116 (supplement): 95-107.
- Stiell, W. M. et A. B. Berry. 1985. Limiting white pine weevil attacks by side shade. *For. Chron.* 61(1): 5-9.
- Stiell, W. M., Robinson, C. F. et D. Burgess. 1994. 20-year growth of white pine following commercial improvement cut in pine mixedwoods. *For. Chron.* 70(4): 385-394.
- Stone, E. J. 1953. Magnesium deficiency of some northeastern pines. *Soil Sci. Soc. Amer., Proc.* 17(3): 297-300 *Cité dans* Stiell (1985).
- Struik, H. 1978. Tending of White Pine and Red Pine. pp. 123-129 *dans* D. A. Cameron (comp.) *White and Red pine symposium*. *Env. Can. For. Serv., Great Lakes For. Res. Center, Symposium Proceedings O-P-6*, 178 pp.
- Taylor, R. L. 1928. The arthropod fauna of coniferous leaders weeviled by *Pissodes strobi* (Peck). *Arthropod of coniferous leaders*. 35: 217-225 *Cité dans* Lavallée et Daoust (1998).
- Taylor, E. P. et P. K. Jones. 1986. Soil Interpretation and training session (1981-1985) in the central and Southwestern regions. Site region 6E and 7C. *Ont. Inst. Ped., Guelph, Ont.* *Cité dans* Buse (1992).
- Tellier, I. R., Duchesne, L. C., Ruel, J.-C. et R. S. McAlpine. 1995. Effets du brûlage dirigé et du scarifiage sur l'établissement des semis et sur leur interaction avec la végétation concurrente. *For. Chron.* 71(5): 621-626.
- Therrien P. 1994. Le contrôle naturel des populations de charançon du pin blanc au Québec: organismes impliqués et leur impact *dans* R. Lavallée et G. Bonneau (éditeurs), *Compte-rendu du Colloque sur le charançon du pin blanc, tenu les 27 et 28 septembre 1994*.
- Thomas, P. A. et R. W. Wein. 1985. Delayed emergence of four conifer species on postfire seedbeds in eastern Canada. *Can. J. For. Res.* 15(4): 727-729.
- Thorne, S. G. 1992. White pine: Challenges for the future. pp.186-193 *dans* R. A. Stine et M. J. Baughman (éditeurs), *Proceedings of White Pine Symposium: history, ecology, policy and management, tenu du 16-18 sept. à Duluth, Minnesota, University of Minnesota, St. Paul, MN*.
- Van Arsdel, E. P. 1961. Growing white pine in the Lake States to avoid blister rust. *USDA. For. Ser., Lake States Forest exp. Sta. Pap.* 92. 11 pp. *Cité dans* Lavallée (1986).
- Van Arsdel, E. P. 1965a. Micrometeorology and plant disease epidemiology. *Phytopatology* 55: 945-950 *Cité dans* Anderson (1973).

- Van Arsdel, E. P. 1965b. Relationship between night breezes and blister rust spread on the Lake States white pines. USDA. For. Serv. Lake States For. Exp. Stn., Res. Note LS-60, 4 pp. *Cité dans* Anderson (1973).
- Van Arsdel, E. P. 1967. The nocturnal diffusion and transport of spores. *Phytopathology* 57: 1221-1229 *Cité dans* Anderson (1973).
- Van Arsdel, E. P. 1967. Environment in relation to white pine blister rust infection. pp. 479-493. *dans* Biology of rust resistance in forest trees: Proceedings of a NATO_IUFRO Advanced Study Institute, August 17-24, 1969. USDA For. Serv. Miscellaneous Publication No 1221.
- Van Wagner, C. E. 1993. Prescribed fire in the Great Lakes-St. Lawrence and the Deciduous forests of Ontario: problems and potential. Ontario Ministry of Natural Resources, Central Region and Technology Development Unit. North Bay, ON. Technical Report No. 23 / VMAP Technical Report No. 93-02. 68 pp. *Cité dans* Morneau et Heaman (1998)
- Von der Gönna, M. A. 1992. Fundamentals of mechanical site preparation. B.C. Ministry of Forests, Research Branch. Canada-British Columbia Partnership Agreement on Forest Resource Development : FRDA II. FRDA Report 178.
- Wagner, R. G. et M.S. McLaughlan. 1995. Forest Vegetation Management Alternatives: A Forward to the Guide. OMNR. Ontario Forest Research Institute. Vegetation Management Alternatives Program.
- Wagner, R. G., Noland, T. L. et G. H. Mohammedal. 1996. Timing and duration of herbaceous vegetation control around four northern coniferous species. Second International Conference on Forest Vegetation Management, 20-24 March 1995. New Zealand J. For. Sci. 26(1/2) : 39-52.
- Wagner, R. G. et J. C. Zasada. 1991. Integrating plant autecology and silvicultural activities to prevent forest vegetation management problems. *For. Chron.* 67(5): 506-513.
- Wang, B. S. P. et K. W. Horton. 1968. An underplanting experiment with white pine and white spruce seedling and transplant stock. *For. Chron.* 44: 36-51.
- Wang, Z. et R. D. Nyland. 1996. Changes in the Condition and Species Composition of Developing Even-Aged Northern Hardwood Stands in Central New York. *North. J. Appl. For.* 13(4): 189-194.
- Wendel, G.W. et H.C. Smith. 1990. *Pinus strobus* L. Eastern white pine. pp. 476-488 *dans* Silvics of North America. Vol. 1, Conifers. USDA For. Serv. Agriculture Handbook 654.
- Wetzel, S. et D. Burgess. 1994. Current understanding of white and red pine physiology. *For. Chron.* 1994, 70(4): 420-426.
- White, L. T. 1953. Studies in forest pathology. X. Decay of white pine in the Timagami Lake and the Ottawa Valley Areas. *Can. J. Bot.* 31: 175-200. *Cité dans* Stiell (1985).
- Whitney, R. D. 1991. Quality of eastern white pine 10 years after damage by logging. *For. Chron.* 67(1): 23-26.

- Whitney, R. D. et L. G. Brace. 1979. Internal defect resulting from logging wounds in residual white pine (*Pinus strobus*) trees. *For. Chron.* 55(1): 8-12.
- Wicker, E. F. 1981. Natural control of white pine blister rust by *Tuberculina maxima*. Stakman Craigie Symposium on rust diseases. *Phytopathology* 71(9): 997-1000.
- Wilde, S. A. 1966. Soil standards for planting Wisconsin conifers. *J. For.* 64: 389-391.
- Williams, J. 1994. Planning and executing a commercial stand improvement experiment in pine mixedwoods. *For. Chron.* 70(4): 382-384.
- Wilson, R. W. et W. F. McQuilkin. 1963 *dans* H.A. Fowells (comp.) *Silvics of the forest trees of the United States*. pp. 329-337 USDA Agric. Handbook No. 271, Washington, DC.
- Woods, M. E., Rice, J. A. et E. Boysen. 1998. Stand growth and yield. *dans* Sect 5.0, pp. 1-14. OMNR (1998) A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario, Version 1.1, Ontario Ministry of Natural Resources, Sault Ste-Marie, Ont. 425 pp.
- Woods, M. E. et R. J. Miller. 1996. Red Pine and White Pine Site Index Curves and Tables for South Central Region. Ontario Ministry of Natural Resources. Southcentral Sciences Section. North Bay, Ont. Technical Note No 2.
- Woolsey, Jr., T. S. et H. H. Chapman. 1914. Norway pine in the Lake states. USDA. Bull. 139 *Cité dans* Horton et Bedell (1960).
- Wray, D. O. 1985a. Securing the future of white pine in Ontario. *Proceedings of the Entomological Society of Ontario*. No 116 (Supplement): 109-110.
- Wray, D. O. 1985b. Securing the future of white pine. pp. 67-69. *dans* D. T. Funk (comp.) *Eastern White Pine: Today and Tomorrow*. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.
- Yoda, K., Kira, T., Ogana, H. et K. Hozumi. 1963. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *J. Biol. Osaka City Univ.* 14: 107-129 *Cité dans* Drew et Flewelling (1977).
- Young, L. J. et F. H. Eyre. 1937. Release cutting in plantations of white and Norway pine. Repr. from papers of the Mich. Acad. of Sci., Arts and Letters, Vol. XXII, 1936 *Cité dans* Horton et Bedell (1960).
- Zastrow, D. E. 1992. Big tree silviculture. pp.179-185 *dans* R. A. Stine et M. J. Baughman (éditeurs), *Proceedings of White Pine Symposium: history, ecology, policy and management*, tenu du 16-18 sept. à Duluth, Minnesota, University of Minnesota, St. Paul, MN.
- Zeide, B. 1987. Analysis of the 3/2 Power Law of Self-Thinning. *For. Sci.* 33(2): 517-537.
- Zsuffa, L. 1985. The genetic improvement of eastern white pine. pp. 32-39 *dans* D. T. Funk (comp.) *Eastern White Pine: Today and Tomorrow*. Symposium Proceedings. USDA For. Serv. General Technical Report WO-51.