

Université de Montréal

L'établissement d'arbres feuillus en plantation sur terres agricoles abandonnées dans le sud du Québec : effets des traitements préparatoires, de la répression des herbacées et des conditions édaphiques

par

Alain Cogliastro

Département de Sciences biologiques

Faculté des Arts et des Sciences

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de
Philosophiæ Doctor (Ph.D.)
en Sciences biologiques

Juin, 1997

© Cogliastro Alain, 1997



QK
3
U54
1998
V.002

Université de Montréal

L'installation d'arbres feuillus en plantation sur terres agricoles abandonnées dans le
sud de Québec : effets des traitements préparatoires de la répression des herbacées et
des conditions édaphiques

Amin Cogan

Faculté des Arts et des Sciences
Département de Sciences Biologiques

Tiêu đề tiếng Việt của luận văn này là:
Tác động của các biện pháp xử lý đất và điều kiện
địa chất đối với sự phát triển của cây gỗ
ở miền nam Québec



Jan 1998

Amin Cogan

Page d'identification du jury

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée :

L'établissement d'arbres feuillus en plantation sur terres agricoles abandonnées dans le sud du Québec : effets des traitements préparatoires, de la répression des herbacées et des conditions édaphiques

présentée par :

Alain Cogliastro

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes:

Luc Brouillet	président du jury
André Bouchard	directeur de recherche
Daniel Gagnon	codirecteur de recherche
J. André Fortin	membre du jury
Alison Munson	examinatrice externe
Paul Comtois	représentant du doyen

Thèse acceptée le: 05.02.1998

Sommaire

Cette étude porte sur l'établissement d'espèces d'arbres feuillus en plantation sur les terres agricoles abandonnées du sud du Québec. Le but général de la thèse consiste à examiner le succès de l'établissement d'espèces d'arbres feuillus selon des conditions de disponibilité des ressources dont la variabilité est induite par différents traitements sylvicoles et conditions de sols.

Le succès de la plantation de feuillus sur les terres agricoles abandonnées n'est pas assuré par les approches qui ont été appliquées jusqu'à maintenant. Une hypothèse importante de ce travail est que le succès d'établissement des espèces d'arbres feuillus est conditionné par la répression des herbacées et par les caractéristiques du sol. L'étude prévoit que les effets propres à différents traitements de maîtrise de la végétation compétitrice vont modifier la disponibilité des ressources pour les plants. Aussi, l'action des particularités édaphiques influencerait le succès d'établissement des plants, et à des degrés divers selon l'espèce considérée.

Afin de vérifier ces hypothèses, trois dispositifs expérimentaux ont été établis. D'abord, différents paramètres de croissance, d'allocation en biomasse et de nutrition azotée ont été analysés chez quatre espèces d'arbres en fonction de deux traitements de répression des herbacées appliqués sur quatre sites édaphiquement distincts. Ce dispositif comprend 2500 plants. Dans un second plan d'expérience, qui compte cette fois 1440 plants, l'utilisation de traitements de répression des herbacées effectués après la plantation a été testée afin de réduire les efforts de préparation d'un site où l'utilisation de machinerie agricole est difficilement praticable. Dans ce dispositif expérimental, deux traitements de répression des herbacées réalisés sur la rangée d'arbre ont été appliqués sur des parcelles qui ont reçu une de trois méthodes de préparation du site. Un troisième dispositif a été réalisé. Il est constitué de 10 espèces d'arbres feuillus présentes dans 23 blocs expérimentaux représentant 6 différentes conditions de sol et totalisant 5760 semis. Dans cette expérience, la réaction des espèces d'arbres feuillus à l'égard des caractéristiques édaphiques est analysée dans le

contexte environnemental des champs agricoles abandonnés.

Les plans d'expérience constitués ici comprennent plus de 9 600 plants mis en terre et un suivi de 3 à 5 années selon le dispositif expérimental.

Les résultats montrent que la croissance, l'allocation en biomasse et la nutrition azotée des feuillus sont optimisées par la répression des herbacées compétitrices qui provoque une augmentation de la disponibilité des ressources. La répression des herbacées a eu plus d'effet sur le développement des espèces que la variation des conditions de fertilité entre les sites. Pour maîtriser les espèces herbacées, l'utilisation d'un paillis organique a été moins efficace que l'application de l'herbicide glyphosate. Les présents travaux ont également démontré que les avantages de la répression des herbacées par des traitements appliqués après la plantation peuvent être maintenus sans travaux mécaniques préparatoires qui, sur certains sites, sont impraticables. Ainsi, le spectre des conditions édaphiques susceptibles de recevoir la plantation d'arbres feuillus peut comprendre les dépôts glaciaires très pierreux qui retournent à une vocation forestière. Enfin, les espèces d'arbres feuillus se distinguent selon leur degré de spécialisation à l'égard des conditions édaphiques. Les résultats de croissance obtenus permettent d'ordonner les conditions de sol en fonction de leur potentiel à assurer le succès de l'établissement de l'espèce. Plusieurs espèces ont démontré un grand potentiel pour la reconstitution des forêts feuillues du sud-ouest du Québec.

Mots clés : plantation d'espèces d'arbres feuillus, écophysiologie, nutrition azotée, allocation en biomasse, préparation du site, herbicide, paillis, sélection d'espèces, terres agricoles abandonnées.

Table des matières

Sommaire	iii
Table des matières	v
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xi
Remerciements	xiii
Chapitre I	
Introduction générale	1
I.1 Contexte de l'étude	1
I.1.1 La nécessité du reboisement en espèces feuillues	1
I.1.2 État de la ressource et potentiel commercial	2
I.1.3 Situation du reboisement en feuillus	3
I.1.4 Le contexte des terres agricoles abandonnées	4
I.1.5 Un manque de connaissances à combler	5
I. 2 Objectifs généraux	7
I.3 Approche méthodologique	9
I.4 Description du territoire	11
I.4.1 Historique	11
I.4.2 Géomorphologie	11
I.4.3 Communautés forestières et utilisation du territoire	12

I.5 Plan de la thèse	13
I.6 Bibliographie	16

Chapitre II

Effet des sites et des traitements sylvicoles sur la croissance, l'allocation en biomasse et l'utilisation de l'azote de semis de quatre espèces feuillues en plantations dans le sud du Québec	24
II.1 Introduction	25
II.2 Description des sites	26
II.3 Méthodes	27
II.3.1 Espèces utilisées	27
II.3.2 Traitements et dispositif expérimental.	28
II.3.3 Paramètres échantillonnés	30
II.4 Résultats	32
II.4.1 Caractéristiques édaphiques et compétition herbacée	32
II.4.2 Mortalité, croissance, allocation en biomasse et nutrition azotée des semis d'arbres	35
II.5 Discussion	37
II.5.1 Ressources disponibles et croissance	37
II.5.2 Mortalité	40
II.5.3 Azote foliaire	41
II.5.4 Allocation en biomasse	42

II.6 Conclusion	44
II.7 Remerciements	46
II.8 Bibliographie	58

Chapitre III

Is site preparation necessary for bur oak receiving post-planting weed control?	62
III.1 Introduction	63
III.2 Methods	64
III.2.1 Site description	64
III.2.2 Experimental design and treatments	65
III.2.3 Measurements and statistical analysis	67
III.3 Results	68
III.3.1 Growth and survival of bur oak	68
III.4 Discussion	69
III.5 Conclusion	71
III.6 Acknowledgements	72
III.7 References	78

Chapitre IV

Experimental determination of soil characteristics optimal for the growth of ten hardwoods planted on abandoned farmland	82
IV.1 Introduction	83

IV.2 Methods	84
IV.2.1 Experimental design	84
IV.2.2 Soil characteristics	86
IV.2.3 Statistical analysis	88
IV.3 Results	90
IV.3.1 Soil conditions	90
IV.3.2 Survival and growth	90
IV.3.3 Soil conditions and tree growth	91
IV.4 Discussion	92
IV.4.1 Soil conditions	92
IV.4.2 Survival	93
IV.4.3 Soil-site factors and growth	93
IV.4.4 Species' ecological requirements and tolerances	94
IV.4.5 Specialist species	95
IV.4.6 Intermediate species	98
IV.4.7 Generalist species	98
IV.4.8 Hardwood plantation decisional chart	99
IV.5 Acknowledgments	102
IV.6 References	112

Chapitre V

Discussion générale	119
Conclusion générale	122
Bibliographie générale	125

Liste des tableaux

Tableau I. ANOVA du diamètre et de la hauteur des espèces après trois saisons de croissance en plantations.	47
Tableau II. Comparaison des indices de nutrition, de morphologie et d'allocation en biomasse entre les traitements.	48
Tableau III. Comparaison de l'azote foliaire et de la surface foliaire spécifique entre les espèces feuillues.	49
Tableau IV. Comparaison des indices de productivité et de nutrition entre les sites et les espèces.	50
Table V. Soil characteristics of the experimental site, measured in 1990.	73
Table VI. Repeated measures ANOVA of the diameter and the height of seedlings (1990, 1991, 1992, 1994).	74
Table VII. Characteristics of the different soils types of the experimental design. ...	103
Table VIII. ANOVA of hardwood species height and diameter after 4 growing seasons.	104
Table IX. Measure of sampling adequacy (MSA) of the variables and percent variance explained by the axes of the factorial analysis of the height and diameter of the hardwood species.	105
Table X. Decisional chart for hardwood species selection	106

Liste des figures

Figure 1. Caractéristiques édaphiques des quatres sites de plantation de feuillus.	51
Figure 2. Comparaison de la richesse des sols (A) des quatre sites de plantation de feuillus et (B) des traitements de répression de la végétation compétitrice.	52
Figure 3. Température du sol à 5 cm de profondeur en fonction des traitements et des sites de plantation.	53
Figure 4. Teneur en eau des sols à 15 cm de profondeur en fonction des sites (A) et des traitements (B).	54
Figure 5. Biomasse herbacée estimée dans les parcelles témoin de chaque site (A) et dans chaque traitement de tous les sites confondus (B).	55
Figure 6. Taux de mortalité des semis de feuillus selon le traitement (A) et selon le site (B).	56
Figure 7. Hauteur moyenne, après trois saisons de croissance, de quatre espèces feuillues sur quatre sites de plantations, en fonction des traitements.	57
Figure 8. Soil water content in 1992 at two depths in the glyphosate herbicide and black plastic mulching post-planting treatments.	75
Figure 9. Weed biomass in experimental units with glyphosate herbicide and black plastic mulching post-planting treatments (1990 and 1992).	76
Figure 10. Diameter and height growth curves of bur oak seedlings in site preparation types for each post-planting weed control treatments.	77
Figure 11. Location map of the study area, in south-western Quebec, Canada, within the limits of the Upper St-Lawrence County Regional Municipality.	107

Figure 12. Cluster analysis diagram of the 23 experimental blocks based on 12 edaphic variables.	108
Figure 13. Survival of hardwood species after 4 years in plantation in relation to soil conditions.	109
Figure 14. Height means of hardwood species after 4 years in plantation in relation to soil conditions.	110
Figure 15. Species height (A) and diameter (B) in relation to soil conditions.	111

Remerciements

Je tiens ici à exprimer ma profonde reconnaissance envers mes directeurs de recherche qui ont été soucieux des opportunités de carrière qu'allait engendrer la réalisation de cette thèse.

Mes sincères remerciements à Dr André Bouchard, mon directeur, pour sa grande disponibilité en tout temps et pour souligner l'importance de ses judicieux conseils tout au cours des travaux. Ses compétences, sa grande expérience, son humanisme, ont été extrêmement bénéfiques à mon développement. Je lui suis également extrêmement reconnaissant d'avoir conçu et développé l'étude multidisciplinaire du territoire de la Municipalité régionale de comté du Haut-Saint-Laurent. L'appartenance à un espace géopolitique intensément étudié par Dr André Bouchard et ses collaborateurs, en plus de favoriser la planification des plans d'expérience au bénéfice de l'évaluation des résultats, accentue les possibilités d'intégration des connaissances de la présente recherche à l'aménagement forestier du territoire. André Bouchard m'a transmis une part de sa sensibilité et de son attachement au paysage de la région du Haut-Saint-Laurent, tout comme sa confiance en nos capacités à influencer positivement l'aménagement d'un territoire.

Je témoigne également toute ma gratitude envers mon codirecteur, Dr Daniel Gagnon. Sa grande disponibilité à toutes les étapes des travaux et ses vastes connaissances ont été indispensables à l'accomplissement de cette recherche. Ses présences fréquentes sur le terrain, ses conseils à la rédaction, ses encouragements, sa confiance, démontrent une grande générosité et un plaisir au travail que j'ai beaucoup appréciés et qui m'ont inspiré. Daniel Gagnon m'a communiqué avec enthousiasme son intérêt pour les espèces feuillues, et nous avons oeuvré ensemble pour accroître leur importance dans nos paysages et pour le maintien de leur apport dans l'économie du Québec.

Sur le terrain et au laboratoire, Sophie Grignon a été de tous les instants. Je tiens à la reconnaître tout particulièrement pour sa rigueur et la constance de sa capacité de travail,

des qualités portées à un niveau rarement rencontré. Elle fut une associée parfaite, ce qui engendra une relation de travail faite de beaucoup de confiance. L'approche expérimentale privilégiée ici a bénéficié des excellents réflexes de statisticien de Stéphane Daigle. Je le remercie pour le niveau de précision des démonstrations de la thèse et je souhaite que nous poursuivions notre collaboration.

La plantation de 10000 plants d'arbres a nécessairement impliqué de nombreuses personnes. Leur collaboration à l'établissement des dispositifs a toujours été au-delà de mes attentes et tous doivent recevoir mes remerciements. Certains noms émergent toutefois et je me permets de mentionner l'apport précieux de Kim Marineau et Renée Langevin, qui ont assisté le travail avec beaucoup de talents et dont je garde de très bons souvenirs.

Les propriétaires des sites où ont été établies les plantations expérimentales m'ont donné accès à leur propriété, tous avec intérêt et gentillesse. Merci à M. Leblanc, feu M. Quenneville, M. Caza, M. Higgins, M. Mauffette, M. Barré, M. Ireland, M. Pauzé, Mme Dawn-Ebbet et M. Labrie. Mes remerciements vont également au secrétaire-trésorier et à l'aménagiste de la Municipalité régionale de comté du Haut-Saint-Laurent, M. François Landreville et Mme Céline Lebel, qui ont appuyé nos efforts de diffusion des résultats de nos activités auprès des propriétaires forestiers de la région.

Je voudrais enfin remercier le ministère des Ressources naturelles du Québec qui a financé la majeure partie des travaux. Messieurs Denis Robitaille et Jean-Marc Veilleux du même Ministère ont appuyé nos efforts et ont apporté de bons conseils. La bourse que m'a accordée le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada a également été fort appréciée. Un grand merci à Anne, ma compagne de vie, qui m'a appuyé dans les moments où j'ai dû me consacrer à cette recherche, pendant que se déroulait la vie de famille avec Vincent... puis Étienne.

Chapitre I ***Introduction générale***

I.1 Contexte de l'étude

I.1.1 La nécessité du reboisement en espèces feuillues

La forêt décidue qui recouvrait 90% de l'est de l'Amérique du Nord (Greller, 1988) est largement disparue aujourd'hui. Les perturbations anthropiques récurrentes et pratiquées à grande échelle ont réduit la surface et modifié la composition des forêts résiduelles (Bergeron *et al.*, 1988; Bouchard *et al.*, 1989; White & Mladenoff, 1994; Simard & Bouchard, 1996).

Plusieurs des solutions proposées pour améliorer l'état de la forêt décidue contemporaine comportent des interventions de reboisement pour assurer l'approvisionnement en bois aux générations futures et régler plusieurs problèmes de conservation des écosystèmes (Rooney, 1995; Keddy & Drummond, 1996). La distribution et la persistance des populations végétales et animales, étant associées à la structure du paysage (With & Crist, 1995) peuvent être modifiées par des interventions de reboisement. L'intention de diriger le processus de succession végétale dans les milieux naturels protégés (Bradshaw, 1989) peut également se réaliser par la plantation d'espèces arborescentes. La plantation d'espèces ligneuses est également préconisée pour la restauration des sites dégradés (Munshower, 1994), comme pour faire face à l'érosion des sols (Vézina, 1989; Skidmore, 1994). L'actuel développement du potentiel récréo-touristique de certaines régions du Québec passe inévitablement par la reconstruction des paysages (Paquette, 1996) et le reboisement de terres agricoles abandonnées peut largement y contribuer.

Dans la partie méridionale du Québec, les espèces arborescentes feuillues peuvent servir les diverses occasions de reboisement. C'est toutefois l'intérêt économique de la matière ligneuse des espèces feuillues de haute valeur qui constitue actuellement la principale

motivation des activités de reboisement par ces essences et c'est le phénomène d'abandon de certaines activités agricoles qui occasionne la plus importante opportunité pour l'établissement de plantations forestières sur des terres moins propices à l'agriculture contemporaine.

1.1.2 État de la ressource et potentiel commercial

Le Québec est la plus importante province productrice de bois de sciage de feuillus au Canada avec 55% du volume des livraisons canadiennes et 67% de leur valeur. L'Ontario est la seule autre province d'importance avec 38,9% du volume et 32,7% de leur valeur (Duquet, 1993). Toutefois, selon les statistiques de 1989, le Canada est un importateur net de bois de sciage de feuillus : les exportations totalisaient alors 449 000 m³ contre des importations de 619 000 m³ (Duquet, 1993).

À l'échelle mondiale, les possibilités d'une croissance des exportations de bois de sciage de feuillus nord-américain sont très grandes. On prévoit que la production aux États-Unis augmentera de 70% d'ici 2005 (Anonyme, 1990). Cette prédiction s'appuie sur l'abondance de la ressource aux États-Unis (Duquet, 1993) et est renforcée par la volonté politique de préserver la forêt tropicale et d'augmenter, pour ces régions, les retombées économiques locales de l'exploitation de la ressource. À titre d'exemple, en Indonésie les exportations de bois de sciage sont passées de 45% de la production en 1989 à 5% en 1990 suite à l'imposition de taxes à l'exportation (Anonyme, 1990). Ceci provoque une raréfaction et une baisse de la demande pour les bois tropicaux susceptibles d'avantager les bois nord-américains.

Le bois des arbres feuillus du Québec a des possibilités sur le marché mondial qui s'apparentent celles des bois en provenance du nord-est des États-Unis. La qualité de notre ressource est toutefois déficiente à cause, en bonne partie, de la surexploitation dans les régions traditionnelles du bois franc du Québec (Duquet, 1993). L'importation de grumes provenant principalement des régions américaines limitrophes, mais aussi d'états plus

éloignés comme la Pennsylvanie, compense pour la faible disponibilité locale de bois de qualité. Les grumes importées représentent 30% des approvisionnements des scieries de feuillus du Québec et de 60% à 80% des approvisionnements dans les régions du sud du Saint-Laurent qui ont une frontière commune avec les États-Unis (SPBRM, 1987; Duquet, 1993). Actuellement, et pour l'avenir prévisible, la demande pour des meubles de qualité favorise le bois. La pression sur la ressource pourra aider à valoriser les plus faibles qualités de bois du Québec. Pour les produits où le bois joue un rôle esthétique, les bois de couleur claire connaissent un retour en vogue sur les marchés internationaux dont l'Europe (Anonyme, 1992) ce qui favoriserait nos essences traditionnelles.

1.1.3 Situation du reboisement en feuillus

C'est donc principalement pour la production de bois d'oeuvre et parce qu'on reconnaît leur grande valeur commerciale que un million de plants de feuillus sont mis en terre annuellement depuis 1986 au Québec (Dumont, 1995). Sur les sites agricoles abandonnés, la Stratégie de protection des forêts du Gouvernement du Québec (Gouvernement du Québec, 1994) préconise une intensification de la plantation d'essences feuillues et mixtes (conifères et feuillus) de qualité, surtout dans le sud de la province. Il n'existe cependant pas de données disponibles permettant de connaître précisément le niveau de succès du reboisement en essences feuillues qui se pratique principalement sur des terres agricoles abandonnées. Il y a par ailleurs un consensus général concernant un taux d'échec élevé des plantations telles qu'elles ont été généralement effectuées (Dumont, 1995). De nouvelles études, avec des résultats scientifiques mieux étoffés, pourraient contribuer à assurer le succès des interventions et susciter le développement de cette activité importante pour l'activité économique et la qualité écologique de certaines régions du Québec.

La popularité de la plantation augmente avec la concurrence en agriculture qui réduit les profits sur les sols de productivité marginale et sur ceux qui sont peu propices à la mécanisation des activités agricoles (von Althen, 1990). Les possibilités de reboisement des anciennes terres agricoles sont de plus en plus nombreuses au Québec puisqu'il y a une

réduction continue des superficies cultivées (SPBRM, 1987; Domon *et al.*, 1993; Caron, 1994).

Après l'abandon des activités agricoles, la restauration des forêts par la plantation ou par la régénération naturelle peut conduire à une structure de communautés comparable aux forêts matures dites naturelles : c'est toutefois la composition en espèces qui est la plus susceptible de différer. La régénération d'espèces possédant des semences de fortes dimensions et à plus faible dissémination peut être particulièrement déficiente en régénération naturelle (Shear *et al.*, 1996), ce que la plantation peut corriger.

1.1.4 Le contexte des terres agricoles abandonnées

Les terres agricoles abandonnées présentent des conditions environnementales particulières. Les sols, dont la production végétale a été régulièrement récoltée, sont relativement appauvris. La réserve en éléments nutritifs, notamment en azote, est bien inférieure aux 1500 kg d'azote à l'hectare contenu dans la litière de la forêt tempérée (Bradshaw, 1989). Les sites de plantation sur terres agricoles abandonnées sont également souvent exposés aux vents et susceptibles de subir d'importants écarts de température de l'air et du sol. Des rongeurs, habitants de la strate herbacée dense, et des brouteurs, tel le chevreuil, sont également présents et peuvent endommager les espèces plantées. Tous ces facteurs peuvent limiter le succès des plantations.

Les terres agricoles devenues marginales dans le contexte de l'agriculture contemporaine, peuvent présenter des conditions de forte pierrosité ou de mauvais drainage, autres contraintes à la production végétale. Les facteurs qui se sont révélés les plus déterminants sur le succès d'établissement des espèces en plantation sur terres agricoles sont la compétition par les herbacées et l'adéquation entre les conditions édaphiques et les besoins et tolérances des espèces choisies pour le reboisement du site (Sutton, 1978; Gjerstad *et al.*, 1984; Klinka & Feller, 1984; Klinka *et al.*, 1984; Davies, 1988; Klinka & Carter, 1990; Woods *et al.*, 1992).

1.1.5 Un manque de connaissances à combler

Les technologies utilisées en agriculture ont exercé une influence dominante sur l'orientation des recherches en aménagement de la végétation forestière (Wagner, 1993), comme en témoigne le premier guide canadien de plantation de feuillus sur terres agricoles abandonnées (von Althen, 1990). En outre, la foresterie a utilisé les mêmes approches chimiques et mécaniques pour la maîtrise de la végétation indésirable que l'agriculture. Les méthodes de reboisement inspirées des techniques agricoles ont été largement acceptées au Québec et sont devenues la norme pour l'obtention de l'aide gouvernementale (MRN, 1992).

La préoccupation des citoyens concernant la qualité de l'environnement a conduit, d'une part, à une valorisation des activités de reboisement et d'autre part, à fixer un objectif d'élimination de l'utilisation des herbicides. La Stratégie de protection des forêts (Gouvernement du Québec, 1994) préconise une intensification de la plantation des essences feuillues, et du même coup, fixe l'objectif d'éliminer complètement l'usage des phytocides en foresterie d'ici l'an 2001. Ces nouvelles conditions viennent modifier ce qui semblait être une voie de réussite (von Althen, 1990). Rappelons également que les pressions liées aux considérations environnementales favorisent les bois en provenance de forêts soumises à une exploitation visant le développement durable, ce qui implique de nouvelles approches en matière d'aménagement. Les intervenants, reconnaissant que la répression des herbacées est nécessaire au succès du reboisement, tentent actuellement de minimiser les impacts des herbicides et, ultimement, doivent s'appliquer à rechercher des solutions de remplacement (Woods *et al.*, 1992; Liebman & Dyck, 1993). L'utilisation de paillis représente l'une de ces solutions. Les paillis se présentent sous plusieurs formes (McDonald & Helgerson, 1990; Robitaille, 1993) mais ont été rarement le sujet de recherche en plantation sur sites mésiques de la partie est des États-Unis et du Canada (Wagner, 1993).

Une meilleure connaissance sur le plan de l'écophysiologie des espèces feuillues en réaction à divers traitements de répression des herbacées s'avère nécessaire pour juger de

manière approfondie de l'efficacité de nouvelles interventions. Une approche expérimentale de l'examen de la relation espèces-traitements et intégrant différentes conditions de sol représenterait une importante référence sur le plan de la connaissance des espèces en fonction de la variation de la disponibilité des ressources induite par les traitements, les sols et leurs interactions.

Les terres agricoles marginales, abandonnées pour la pratique de grandes cultures mécanisées à cause d'une trop forte pierrosité, ne peuvent être facilement reboisées selon les pratiques issues de l'agriculture. Les pratiques du labourage et du hersage sont en effet difficiles d'application sur des sols pierreux, qui sont alors fréquemment reboisés en espèces conifériennes exemptées de ces travaux préparatoires par le programme d'aide provincial. De tels sites de la partie méridionale du Québec ont généralement déjà été occupés par le passé par des essences feuillues de haute valeur. Un secteur marginal pour l'agriculture à cause des difficultés de la mécanisation des pratiques, peut par contre être très propice, et aucunement marginal, pour la sylviculture à cause d'un potentiel trophique favorable. Un ensemble de pratiques adaptées aux différents contextes devraient mieux servir l'objectif d'intensification du reboisement en essences feuillues actuellement préconisé. Ainsi, nous avons intérêt à explorer les possibilités d'exemption de travaux préparatoires pour certains sites de reboisement en feuillus. Une démonstration sans équivoque du succès de nouvelles pratiques pourrait changer les règles actuelles.

Les feuillus sont plantés sur une grande variété de conditions de sol de terres agricoles abandonnées. Dans le meilleur des cas, le choix des espèces est basé sur des grilles de sélection construites à partir de l'observation des forêts naturelles (Cauboue, 1988; Hightshoe, 1988; Vézina *et al.*, 1989). La connaissance de la réaction écophysiological des espèces sous les conditions environnementales particulières des plantations sur terres agricoles abandonnées est insuffisante pour comprendre l'établissement des espèces. Aussi, les interventions humaines en plantation peuvent réduire les forces compétitrices et modifier les limites connues de la niche réalisée d'une espèce. Les résultats d'un examen rigoureux de la croissance des espèces feuillues, établies en un dispositif expérimental représentant

différentes conditions édaphiques, pourra constituer un appui important au processus du choix des espèces appropriées en plantation.

I. 2 Objectifs généraux

Le projet d'étude constitue l'une des rares recherches canadiennes en régénération artificielle des espèces feuillues. Le projet vise à comprendre le processus d'établissement de ces espèces selon différentes pratiques et à documenter leur potentiel en plantation sur terres agricoles abandonnées dans le sud du Québec. Les espèces sont analysées en fonction de différentes conditions de disponibilité des ressources qui sont induites, soit par l'application de traitements, soit par différentes conditions de sols. Les principales questions abordées ici, et qui réfèrent principalement à chacun des trois chapitres de la thèse, sont :

- Quels sont les effets des sites et des traitements de répression de la compétition herbacée sur la croissance, l'allocation en biomasse et l'utilisation de l'azote de semis de quatre espèces feuillues en plantations ?
- La préparation du site en pré-plantation par des procédés mécaniques est-elle nécessaire lorsqu'un traitement de répression des herbacées est appliqué après la plantation ?
- Quelles sont les conditions édaphiques optimales pour la croissance de 10 espèces feuillues en plantation sur terres agricoles abandonnées et quel est leur degré de spécificité à l'égard des variables édaphiques mesurées ?

Les questions abordées touchent des aspects fondamentaux et appliqués de la plantation d'arbres. L'étude peut répondre aux intérêts des intervenants quant à la compréhension de la réaction des espèces à la variation des conditions de disponibilité des ressources, comme à ceux liés à l'efficacité de différentes pratiques culturales.

Plusieurs travaux canadiens ont examiné la question de la répression des herbacées en plantation d'espèces feuillues sur terres agricoles abandonnées (von Althen, 1987; Von Althen & Mitchell, 1992). Toutefois, employant massivement des herbicides persistants, les pratiques dégagées ne répondent pas aux nouvelles exigences en matière de protection de l'environnement (Gouvernement du Québec, 1994). De plus, les résultats de ces travaux sont issus d'essais conduits sur un faible nombre d'espèces testées simultanément. Les conditions édaphiques abordées à chaque essai sont également souvent celles des terres strictement vouées à l'agriculture contemporaine où sont représentés des sols de texture fine et possédant des systèmes de drainage, alors que d'autres contextes édaphiques sont disponibles. Au Québec, les efforts de reboisement en espèces feuillues sont à ce jour peu répertoriés (Dumont, 1995). Le manque de rigueur dans la planification et le suivi des réalisations passées empêche de généraliser les conclusions. Les différentes solutions de réalisation qui sont abordées dans nos travaux tentent d'apporter une meilleure compréhension de la réaction des espèces à différentes manipulations de la végétation compétitrice, une condition au développement de véritables solutions de remplacement (Anonyme, 1991; Wagner, 1993).

Les résultats obtenus sur des sites marginaux pour l'agriculture en raison de leur forte pierrosité et, par le fait même, rarement abordés en régénération artificielle, devraient permettre de confirmer et d'exploiter leur potentiel forestier. En outre, une nouvelle façon d'aborder le reboisement de ces sites à texture caillouteuse-graveleuse sera proposée et testée quant à sa capacité de produire des résultats similaires à ceux obtenus des pratiques traditionnelles.

Le reboisement se doit de procéder par un choix judicieux des espèces en fonction des conditions des sites de plantations (Klinka & Feller, 1984). Cet objectif demeure difficile à réaliser. Soulignons, en premier lieu, la difficulté à caractériser la richesse d'un site en utilisant des indicateurs traditionnels qui sont des indices de disponibilité plutôt qu'une mesure du taux d'approvisionnement (Binkley & Vitousek, 1989). Également, la connaissance des besoins et des tolérances des espèces d'arbres est encore limitée.

L'amélioration de la connaissance de l'écologie des espèces d'arbres demeure une priorité du Conseil de la Recherche Forestière (Anonyme, 1991). Un des plans d'expérience a été élaboré en fonction de définir l'amplitude écologique des espèces qu'elles réalisent sous les conditions des sites agricoles récemment abandonnés, et où des interventions humaines, notamment pour la répression des herbacées, sont appliquées. Ceci permettrait éventuellement de calibrer objectivement les systèmes de classification écologique à partir des résultats des interventions sylvicoles tel que préconisé par Munson & Timmer (1989). Les résultats pourront être intégrés à une grille de sélection des espèces en fonction des conditions de sol. Le plan d'expérience représente également une opportunité pour mesurer la réponse des espèces à un plus large spectre de conditions environnementales que celles rencontrées dans le milieu naturel, où les espèces sont souvent restreintes par la compétition à un spectre plus étroit de variation des conditions (Aber, 1987).

Les présents travaux abordent spécifiquement le contexte biophysique des terres agricoles récemment abandonnées, soit celui qui est occupé par une végétation herbacée dominante. C'est actuellement le contexte pour lequel les propriétaires et les intervenants en aménagement forestier sollicitent le plus fréquemment l'activité de plantation. La plantation d'espèces feuillues est toutefois envisageable dans d'autres milieux, tels certaines arbustives ou jeunes peuplements d'espèces pionnières (Truax *et al.*, 1994; Truax, 1996). Nos résultats pourront alimenter sous certains aspects les autres situations potentielles.

Les résultats obtenus de l'expérimentation et présentés dans les prochains chapitres, conjugués aux connaissances biophysiques du territoire, visent à initier le développement d'un système de référence en matière d'aménagement forestier de la région du sud-ouest du Québec.

L.3 Approche méthodologique

Les objectifs ont été abordés selon une approche expérimentale où les plans d'expérience ont été développés de manière à maximiser les possibilités de généralisation des résultats.

La mesure des effets des traitements a été réalisée principalement au moyen des méthodes d'analyses de variance (Sokal & Rohlf, 1981), qui permettent de comparer les effets mesurés sur les espèces à l'étude ainsi que sur les variables de l'environnement afin d'identifier des liens potentiels de causalité. Les techniques d'analyses multivariées ont également été employées pour permettre de relier certains facteurs de l'environnement aux paramètres de croissance des espèces en plantation.

La présente étude a été conduite dans les limites de la Municipalité régionale de comté (MRC) du Haut-Saint-Laurent. C'est un territoire où la ressource forestière est sous-exploitée et où la dualité agroforestière s'exprime par un important morcellement du paysage (Domon *et al.*, 1993). Ce territoire est étudié depuis 1982 (Bouchard *et al.*, 1985) et la connaissance de la géomorphologie (Bariteau, 1988; Delage & Gangloff, 1993), de l'utilisation du territoire (Domon *et al.*, 1993; Paquette, 1996) et des communautés végétales (Jean & Bouchard, 1987; Bergeron *et al.*, 1988; Brisson *et al.*, 1988; Bouchard *et al.*, 1989; Jean & Bouchard, 1991; Meilleur *et al.*, 1992; Jean & Bouchard, 1993; Brisson *et al.*, 1994; Meilleur *et al.*, 1994a; Meilleur *et al.*, 1994b; Jean & Bouchard, 1996; Simard & Bouchard, 1996) y est particulièrement développée (Bouchard & Domon, 1997). L'accessibilité à une information précise à l'égard des caractéristiques abiotiques du territoire à l'étude offre l'opportunité d'une meilleure planification des plans d'expérience, au bénéfice de l'évaluation des résultats des interventions de régénération artificielle en fonction des conditions biophysiques.

L'ensemble des plans d'expérience constitués aux fins de la réalisation des présents objectifs de recherche constitue un effort imposant représentant plus de 10 000 plants mis en terre entre 1988 et 1991, et un suivi de 3 à 5 années selon le dispositif expérimental.

I.4 Description du territoire

I.4.1 Historique

La période d'exploitation de la forêt du Haut-Saint-Laurent se situe entre 1795 et 1900. D'après les ventes de bois consignées dans les actes notariés (Simard & Bouchard, 1996), la plus grande partie du bois s'est vendue dans les années 1820 et 1830. Les premières ventes de bois, au cours des années 1800, sont principalement constituées de chêne. La région est alors peu habitée mais l'exploitation forestière y est importante (Sellar, 1888). À cette époque, la demande pour le chêne est très grande de la part de l'Angleterre. Le chêne a d'ailleurs été l'espèce la plus dispendieuse tout au long de la période d'exploitation forestière du Haut-Saint-Laurent. L'épuisement du chêne se serait produit au cours des années 1820. D'importants volumes de bois de pin ont également été mis en marché dès le début de l'exploitation de la région. Les principales espèces feuillues exploitées au cours des décennies de 1810 à 1830 ont été l'érable, le bouleau jaune et le hêtre. Dans les années 1840, les ventes de bois chutent et c'est pendant cette période que les ventes de frêne sont les plus importantes. L'épuisement généralisé des ressources en espèces feuillues de la MRC du Haut-Saint-Laurent se fait sentir dans les années 1860 et c'est pratiquement la fin des ventes de bois dans les années 1870 (Simard & Bouchard, 1996). L'agriculture occupe alors près de 70% du territoire (Paquette, 1996). Toutes ces coupes de bois auront des impacts sur la qualité de la ressource et favoriseront des espèces plus tolérantes à la lumière, ou encore celles capables de se régénérer végétativement, au détriment de celles qui se développent à l'ombre d'une forêt déjà mature (Bergeron *et al.*, 1988; Brisson *et al.*, 1988).

I.4.2 Géomorphologie

L'assise rocheuse de la MRC du Haut-Saint-Laurent est dominée par deux grandes unités. Le Groupe de Beekmantown (Ordovicien inférieur : environ 500 millions d'années), dans lequel la dolomie abonde, domine tout le secteur ouest de la région, alors que le Groupe de Potsdam (Cambrien : environ 570 à 500 millions d'années), en grande partie

constitué de grès, se trouve à l'est. Les grands glaciers du quaternaire, qui ont connu leur dernier maximum il y a 18 000 ans, ont raboté ces roches. Le matériel transporté, puis déposé avec la fonte de la glace est un amalgame d'argile, de limon, de sable et de cailloux. Ces moraines sont fortement influencées par les roches provenant de l'assise sous-jacente : l'assise dolomitique est caractérisée par de fortes teneurs en carbonates de calcium et en magnésium et par un pH élevé (7 à 8); l'assise gréseuse est formée de grains de silice cimentés et affiche de plus faibles valeurs de pH (4 à 5) (Mailloux & Godbout, 1954; Globensky, 1987).

Une grande diversité de dépôts de surface est présente dans la MRC du Haut-Saint-Laurent (Delage & Gangloff, 1993). Les principaux dépôts, littoraux, marins, glaciaires et tardiglaciaires, et la mosaïque qu'ils engendrent, permettent l'expérimentation sur une variété de conditions de sol soumises aux mêmes conditions climatiques générales.

1.4.3 Communautés forestières et utilisation du territoire

La région du Haut-Saint-Laurent est classée dans le domaine climacique de l'érablière à caryers (Grandtner, 1966), région écologique 1a de Montréal-Haut-Richelieu (Thibault, 1985). La mosaïque forestière s'est complexifiée avec les coupes intensives du XIX^e siècle et les perturbations du XX^e siècle. Parmi les 47 types de communautés forestières identifiées, 23 ne sont significativement corrélées avec aucun des dépôts de surface (Meilleur *et al.*, 1994a). Plusieurs de ces types tendent à être ubiquistes sur différents dépôts de surface de même classe de drainage et à être dominés par des espèces favorisées par les perturbations (bouleau gris, érable rouge). Les champs abandonnés sont envahis par les frênes, les bouleaux gris et les ormes d'Amérique. Sur les dépôts morainiques, la forte régénération et la grande tolérance à l'ombre de l'érable à sucre lui assurent une éventuelle dominance et la succession converge vers l'érablière à caryers (Meilleur *et al.*, 1994a).

L'étude d'un secteur du territoire de la MRC du Haut-Saint-Laurent, la Municipalité rurale de Godmanchester, révélait que 84,2% des plaines argileuses (dépôts marins) étaient

actuellement cultivées comparativement à seulement 21,2% des dépôts morainiques (Paquette, 1996). Nous observons actuellement, sur les dépôts morainiques, de nombreuses forêts composées d'espèces pionnières.

La ressource forestière résiduelle est de faible qualité à l'exception de certaines tiges de chênes à gros fruits (SPBRM, 1987). Les sommes allouées en 1994-95 pour la mise en valeur de la forêt privée de la MRC du Haut-Saint-Laurent totalisaient 79 900\$. Elles représentent un faible 0,22% du total consacré au Québec. La décentralisation des responsabilités a permis la création en 1996 des agences de mise en valeur de la forêt privée, chacune représentant une région administrative. La Municipalité régionale de comté du Haut-Saint-Laurent est comprise dans l'agence de la Montérégie qui regroupe 14 MRC voisines. Les décisions prises localement devraient favoriser l'augmentation de la proportion d'espèces feuillues plantées dans les régions les plus méridionales du Québec.

I.5 Plan de la thèse

Cette thèse comporte trois parties rédigées sous forme d'articles scientifiques. Chaque partie représente une expérimentation indépendante qui touche à l'une ou l'autre des deux principales problématiques de la plantation d'espèces feuillues sur champs agricoles abandonnés. Dans les chapitres II et III, la compétition par les herbacées est abordée sous l'angle de ses effets et de sa maîtrise. La problématique du choix des espèces en plantation bénéficie d'une comparaison interspécifique dans différentes conditions géologiques, géomorphologiques et pédologiques. Ici, l'autécologie des espèces feuillues est définie expérimentalement. On retrouve cette approche au chapitre II, mais surtout au chapitre IV, entièrement consacré à la relation entre la croissance de dix espèces et les conditions de sol.

Motivé par la considération des impacts environnementaux des herbicides persistants, le chapitre II met à l'essai un herbicide de faible rémanence et un paillis organique. Le dispositif expérimental a été constitué afin de permettre de comparer statistiquement les traitements appliqués à quatre espèces et sur quatre sites de plantations. L'analyse de paramètres de

croissance, d'allocation en biomasse et de nutrition azotée des espèces est présentée de manière à approfondir la compréhension des effets des conditions de disponibilités des ressources. L'hypothèse générale postule qu'il faut réprimer les herbacées afin d'assurer la survie et la croissance optimales des espèces. La disponibilité en eau et en éléments nutritifs seraient accrues par les traitements de répression. Il est également attendu que la croissance des espèces et les bénéfices apportés par les traitements varieront en fonction des conditions édaphiques des sites de plantation. Les résultats portent sur trois années (1988-1990) après l'établissement des espèces en plantation.

Le chapitre III analyse la croissance du chêne à gros fruits, l'ampleur de la compétition herbacée et la disponibilité des ressources en eau en fonction de différentes intensités de travaux préparatoires à la plantation. La démarche vise à développer des pratiques qui évitent la préparation mécanique en pré-plantation par le labourage et le hersage, qui est actuellement préconisée. Les nouvelles pratiques analysées ici comprennent l'usage de paillis de plastique noir ou l'application d'un herbicide peu persistant qui, de surcroît, est appliqué de manière à réduire les impacts sur l'environnement. L'hypothèse générale de ce chapitre est que les efforts investis en post-plantation pour la répression des herbacées permettraient de compenser pour l'absence de préparation du sol avant la plantation. Les résultats intègrent cinq années de croissance, soit de 1990 à 1994.

Le chapitre IV s'adresse au choix des espèces en plantation, qui doit être en accord avec les conditions édaphiques. Une analyse de la croissance de dix espèces feuillues plantées dans six différentes conditions édaphiques est réalisée afin d'établir expérimentalement les conditions de croissance optimales des espèces. L'importance des variables du sol pour la croissance d'une espèce est quantifiée, offrant une mesure du degré de spécialisation de l'espèce. Il est postulé que les conditions environnementales des champs abandonnés et les interventions humaines conditionnent la régénération artificielle des espèces. Ces spécificités de la régénération par la plantation en comparaison de celles de la régénération naturelle (en milieu forestier ou sans intervention humaine) militent en faveur du développement d'outils de sélection des espèces élaborés dans le contexte de la régénération artificielle, en champs

abandonnés et sous traitement de répression des herbacées. Les résultats de quatre années de croissance (1991-1994) sont synthétisés de manière à constituer une grille de sélection des espèces en fonction des conditions de sol.

I.6 Bibliographie

- Aber, J.D. 1987. Restored forests and the identification of critical factors in species-site interactions. *In* : W. R. Jordan III, M. E. Gilpin & J. D. Aber (Eds.), Restoration ecology : a synthetic approach to ecological research. Cambridge. pp. 241-250.
- Anonyme. 1990. Timber trends and prospects for North America. United Nations, 41 p.
- Anonyme. 1991. RPincipaux besoins de recherche et de développement sur la forêt et les produits forestiers. Conseil de la recherche forestière du Québec, 19 p.
- Anonyme. 1992. Europe 1992 : Étude sur les produits du bois à valeur ajoutée. Rapport préparé pour la Direction de la Communauté européenne, Affaires extérieures et Commerce extérieur Canada, 40 p.
- Bariteau, L. 1988. La carte géomorphologique au 1 :20 000 de modelés polygéniques : un exemple des basses terres du Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal, 185 p.
- Bergeron, Y., Bouchard, A. & Leduc, A. 1988. Les successions secondaires dans les forêts du haut Saint-Laurent, Québec. *Naturaliste Canadien* 115 : 19-38.
- Binkley, D. & Vitousek, P. 1989. Soil nutrient availability. *In* : R. W. Percy, J. R. Ehleringer, H. A. Mooney & P. W. Rundel (Eds.), Plant physiological ecology. Chapman and Hall, New York. pp. 75-93.
- Bouchard, A., Bergeron, Y., Camiré, C., Gangloff, P. & Gariépy, M. 1985. Proposition d'une méthodologie d'inventaire et de cartographie écologique : le cas de la MRC du Haut-Saint-Laurent. *Cahiers de géographie du Québec* 29 : 79-95.

- Bouchard, A. & Domon, G. 1997. The transformation of the natural landscapes of the Haut-Saint-Laurent (Québec) and its implication on future resources management. *Landscape and Urban Planning* 37 : 99-107.
- Bouchard, A., Dyrda, S., Bergeron, Y. & Meilleur, A. 1989. The use of notary deeds to estimate the change in the composition of 19th century forest, in Haut-Saint-Laurent, Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 19 : 1146-1150.
- Bradshaw, A.D. 1989. Management problems arising from successional processes. *In* : G. P. Buckley (Ed.), *Biological habitat reconstruction*. Belhaven Press, New York. pp. 68-78.
- Brisson, J., Bergeron, Y. & Bouchard, A. 1988. Les successions secondaires sur sites mésiques dans le Haut-Saint-Laurent, Québec, Canada. *Canadian Journal of Botany* 66 : 1192-1203.
- Brisson, J., Bergeron, Y., Bouchard, A. & Leduc, A. 1994. Beech-maple dynamics in an old-growth forest in southern Québec, Canada. *Ecoscience* 1 : 40-46.
- Caron, C. 1994. Revalorisation des terres en friche. Recueil des communications du colloque - L'arbre en ville et à la campagne -. Fondation Louis-de-Gonzague-Fortin. Jardin botanique de Montréal, Montréal. pp. 37-42
- Cauboue, M. 1988. Le reboisement au Québec. Guide-terrain pour le choix des essences résineuses. Ministère de l'Énergie et des Ressources, 32 p.
- Davies, R.J. 1988. Sheet mulching as an aid to broadleaved tree establishment II. Comparison of various sizes of black polythene mulch and herbicide treated spot. *Forestry (Oxf.)* 61 : 107-124.
- Delage, M. & Gangloff, P. 1993. Marques d'icebergs reliques dans la région de Montréal, Québec. *Géographie physique et Quaternaire* 47 : 69-80.

- Domon, G., Bouchard, A. & Gariépy, M. 1993. The dynamics of the forest landscape of Haut-Saint-Laurent (Quebec, Canada) : interactions between biophysical factors, perceptions and policy. *Landscape and Urban Planning* 25 : 53-74.
- Dumont, M. 1995. Plantation des feuillus nobles. Direction de l'assistance technique, Ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec, Pub. No RN95-3022, 126 p.
- Duquet, A. 1993. L'industrie québécoise du bois de sciage de feuillus. Ministère des Forêts du Québec, 110 p.
- Gjerstad, D.H., Nelson, L.R., Dukes, J.H. & Retzlaff, W.A. 1984. Growth response and physiology of tree seedlings as affected by weed control. *In* : M. L. Duryea & G. N. Brown (Eds.), *Seedling physiology and reforestation success*. Martinus Nijhoff/Dr W. Junk, Dordrecht, Netherlands. pp. 246-257.
- Globensky, Y. 1987. Géologie des basses terres du Saint-Laurent. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Québec, MM. 85-02. 53 p.
- Gouvernement du Québec. 1994. Une stratégie : aménager pour mieux protéger les forêts. Direction des programmes forestiers, Ministère des Ressources naturelles, 197 p.
- Grandtner, M.M. 1966. La végétation forestière du Québec méridional. Les Presses de l'Université Laval, Québec, 216 p.
- Greller, A.M. 1988. Deciduous forest. *In* : M. G. Barbour & W. D. Billings (Eds.), *North American terrestrial vegetation*. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 287-316.
- Hightshoe, G.L. 1988. Native trees, shrubs, and vines for urban and rural America : A planting design manual for environmental designers. Van Nostrand Reinhold, New-York, 819 p.

- Jean, M., & Bouchard, A. 1987. La végétation de deux tourbières de la municipalité régionale de comté du Haut-St-Laurent (Québec). *Canadian Journal of Botany* 65 : 1969-1988.
- Jean, M. & Bouchard, A. 1991. Temporal changes in wetland landscapes of a section of the St. Lawrence River, Canada. *Environmental Management* 15 : 241-250.
- Jean, M. & Bouchard, A. 1993. Riverine wetland vegetation : importance of small-scale and large-scale environmental variation. *Journal of Vegetation Science* 4 : 609-620.
- Jean, M. & Bouchard, A. 1996. Tree-ring analysis of wetlands of the upper St. Lawrence river, Quebec : response to hydrology and climate. *Canadian Journal of Forest Research* 26 : 482-491.
- Keddy, P.A. & Drummond, C.G. 1996. Ecological properties for the evaluation, management, and restoration of temperate deciduous forest ecosystems. *Ecological Applications* 6 : 748-762.
- Klinka, K. & Carter, R.E. 1990. Relationships between site index and synoptic environmental factors in immature coastal Douglas-fir stands. *Forest Science* 36 : 815-830.
- Klinka, K. & Feller, M.C. 1984. Principles used in selecting tree species for regeneration of forest sites in south-western British Columbia. *The Forestry Chronicle* 60 : 77-85.
- Klinka, K., Green, R.N., Courtin, P.J. & Nuszdorfer, F.C. 1984. Site diagnosis, tree species selection, and slashburning guidelines for the Vancouver forest region. *Land Management Report No. 25, Ministry of Forest, Victoria, B.C.*, 180 p.
- Liebman, M. & Dyck, E. 1993. Weed Management : A Need to Develop Ecological Approaches. *Ecological Applications* 3 : 39-41.

- Mailloux, A. & Godbout, G. 1954. Étude pédologique des sols des comtés de Huntingdon et Beauharnois. Ministère de l'Agriculture du Québec, Division des sols, Ste-Anne-de-la-Pocatière, Québec. Bulletin technique No 4, 221 p.
- McDonald, P.M. & Helgerson, O.T. 1990. Mulches aid in regenerating California and Oregon forests : past, present, and future. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep., PSW-123. p.
- Meilleur, A., Bouchard, A. & Bergeron, Y. 1992. The use of understory species as indicators of landform ecosystem type in heavily disturbed forest : an evaluation in Haut-Saint-Laurent, Quebec. *Vegetatio* 102 : 13-32.
- Meilleur, A., Bouchard, A. & Bergeron, Y. 1994a. The relation between geomorphology and forest community types of the Haut-St-Laurent, Québec. *Vegetatio* 111 : 173-192.
- Meilleur, A., Véronneau, H. & Bouchard, A. 1994b. Shrub communities as inhibitors of plant succession in southern Quebec. *Environmental Management* 18 : 907-921.
- MRN. 1992. Programme d'aide à la mise en valeur des forêts privées. Cahier d'instructions (normes techniques). Service de mise en valeur des forêts privées. Ministère des forêts du Québec, 201 p.
- Munshower, F.F. 1994. Disturbed land revegetation. Lewis Publishers, London, 265 p.
- Munson, A.D. & Timmer, V.R. 1989. Site-specific growth and nutrition of planted *Picea mariana* in the Ontario Clay Belt. I. Early performance. *Canadian Journal of Forest Research* 19 : 162-170.
- Paquette, S. 1996. Dynamique des paysages agro-forestiers au XIXe siècle : le cas du Haut-Saint-Laurent. Mémoire de Maîtrise, École d'architecture du paysage. Faculté de l'aménagement. Université de Montréal, Montréal, 145 p.

- Robitaille, D. 1993. Ce que vous devez savoir sur les paillis forestiers. L'Aubelle, avril 1993 9-14.
- Rooney, T.P. 1995. Restoring landscape diversity and old growth to Pennsylvania's northern hardwood forests. *Natural Areas Journal* 15 : 274-278.
- Sellar, R. 1888. The history of Huntingdon and the Seignories of Beauharnois and Châteauguay. The Huntingdon Gleaner Inc., Huntingdon, Que., 634 p.
- Shear, T.H., Lent, T.J. & Fraver, S. 1996. Comparison of restored and mature bottomland hardwood forests in southwestern Kentucky. *Restoration Ecology* 4 : 111-123.
- Simard, H. & Bouchard, A. 1996. The precolonial 19th century forest of the Upper St-Lawrence region of Québec : a record of its exploitation and transformation through notary deeds of wood sales. *Canadian Journal of Forest Research* 26 : 1670-1676.
- Skidmore, E.L. 1994. Wind erosion. *In* : R. Lal (Ed.), Soil erosion. St. Lucie Press & Soil Water Conservation Society, pp. 265-294.
- Sokal, R.R. & Rohlf, F.J. 1981. Biometry. The principles and practice of statistics in biological research. 2nd ed. W.H. Freeman and Co., San Fransisco, 859 p.
- SPBRM. 1987. Plan de mise en valeur de la forêt privée. Syndicat des producteurs de bois de la région de Montréal, Montréal.
- Sutton, R.F. 1978. Glyphosate herbicide : An assessment of forestry potential. *Forestry Chronicle* 54 : 24-28.
- Thibault, M. 1985. Les régions écologiques du Québec méridional, (1 : 1 250 000). Service de la cartographie, Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Québec.

- Truax, B., Gagnon, D., Chevrier, N. 1994. Nitrate reductase activity in relation to growth and soil N forms in red oak and red ash planted in three different environments : forest, clear-cut and field. *Forest Ecology and Management* 64 : 71-82.
- Truax, B. 1996. Restauration écologique des forêts de feuillus par la plantation. *In* : D. Cantin & C. Potvin (Eds.), *L'utilisation durable des forêts québécoises*. Les Presses de l'Université Laval, Sainte-Foy. pp. 119-134.
- Vézina, A. 1989. Les facteurs qui influencent l'efficacité des brises-vent. Recueil des communications du colloque - Les brises-vent au service du milieu rural -. Conseil des productions végétales du Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. St-Hyacinthe. 9 nov. 1989. pp. 75-86
- Vézina, A., Anctil, C. & Desbiens, C. 1989. Le choix des espèces d'arbres et d'arbustes en brise-vent. Conseil des productions végétales du Québec, publi. 89-0186. 26 p.
- von Althen, F.W. 1987. Site preparation and weed control in hardwood afforestation in Ontario. Proceedings of the 6th Central Hardwood Forest Conference, Knoxville, 24-26 février 1987. University of Tennessee, Knoxville. pp.
- von Althen, F.W. 1990. Hardwood planting on abandoned farmland in southern Ontario : revised guide. Ministry of Supply and Services Canada. Catalogue No. Fo 42-150/1990E, 77 p.
- Von Althen, F.W. & Mitchell, E.G. 1992. Establishing sugar maple plantations in southern Ontario. Forestry Canada, Ontario Region, technical note No. 11. 3 p.
- Wagner, R.G. 1993. Research directions to advance forest vegetation management in north america. *Canadian Journal of Forest Research* 23 : 2317-2327.
- White, M.A. & Mladenoff, D.J. 1994. Old-growth forest landscape transitions from pre-european settlement to present. *Landscape Ecology* 9 : 191-205.

With, K.A. & Crist, T.O. 1995. Critical thresholds in species' responses to landscape structure. *Ecology* 76 : 2446-2459.

Woods, P.V., Nambiar, E.K.S. & Smethurst, P.J. 1992. Effect of annual weeds on water and nitrogen availability to *Pinus radiata* trees in a young plantation. *Forest Ecology and Management* 48 : 145-163.

Chapitre II

Effet des sites et des traitements sylvicoles sur la croissance, l'allocation en biomasse et l'utilisation de l'azote de semis de quatre espèces feuillues en plantations dans le sud du Québec

Ce chapitre a fait l'objet d'une publication :

Cogliastro, A., Gagnon, D. & Bouchard, A. 1993. Effet des sites et des traitements sylvicoles sur la croissance, l'allocation en biomasse et l'utilisation de l'azote de semis de quatre espèces feuillues en plantations dans le sud-ouest du Québec. *Revue canadienne de recherche forestière* 23 : 199-209.

II.1 Introduction

Les rares recherches menées au Canada en régénération artificielle des feuillus abordent l'établissement des semis sur terres cultivables abandonnées et recommandent la réduction de la végétation herbacée concurrente (von Althen, 1985; Ponder, 1986; von Althen, 1987; Cogliastro *et al.*, 1990). Dans ces études, les dépôts marginaux pour l'agriculture, à forte pierrosité, ne sont généralement pas représentés. Quant aux méthodes de réduction de la végétation compétitrice en plantation, elles doivent maintenant considérer les impacts environnementaux impliqués. L'utilisation d'herbicides de faible rémanence ou de paillis doit être mise à l'essai.

Les caractéristiques climatiques du sud-ouest du Québec (Thibault, 1985) sont les meilleures de la province pour la croissance des essences feuillues. De plus, une grande partie du territoire supporte des dépôts glaciaires dolomitiques (Bariteau, 1988) riches en calcium et en magnésium. La pierrosité de ces moraines présente une contrainte pour l'agriculture et, ainsi, leur confère une grande aptitude à la sylviculture. Ces dépôts ont été fréquemment déboisés pour permettre le pâturage qui ne se pratique plus que rarement aujourd'hui. Il serait urgent de procéder à la plantation d'arbres feuillus de haute valeur commerciale sur ces sites. Après une intense exploitation des espèces ligneuses au siècle dernier (Bouchard *et al.*, 1989), le potentiel forestier du sud-ouest du Québec est actuellement négligé : en 1987, les usines de la région s'approvisionnaient à 87% en feuillus provenant des États-Unis (SPBRM, 1987).

L'étude présente pour quatre situations géomorphologiques, représentatives du sud-ouest du Québec, et sous deux traitements de réduction des mauvaises herbes, un examen des conditions de disponibilité des ressources édaphiques ainsi qu'une analyse des paramètres de croissance, d'allocation en biomasse et de nutrition azotée des semis de quatre espèces feuillues en plantation.

Ces travaux reflètent une préoccupation qui vise à relier les résultats de croissance des

arbres aux conditions environnementales qui sont les plus déterminantes, tel que préconisé par Brand (1991). Une approche écophysiological pour comprendre l'établissement des plantations est en développement au Canada (Margolis & Brand, 1990). Toutefois, cette approche évolue principalement à partir de l'étude des essences résineuses. Le suivi de plantations expérimentales impliquant une diversité d'espèces feuillues, des conditions de sites distinctes et différents traitements sylvicoles permettra d'améliorer la qualité des interventions de reforestation par une meilleure connaissance des besoins et tolérances des semis d'essences feuillues.

II.2 Description des sites

Quatre sites de plantation situés au sud-ouest du Québec, dans la Municipalité Régionale de Comté (MRC) du Haut-Saint-Laurent, ont été choisis pour cette étude. La zone d'étude fait partie de la région écologique 1a de Montréal Haut Richelieu (Thibault, 1985) et de la région des Grands Lacs et du Saint-Laurent, section forestière du Haut-Saint-Laurent décrite par (Rowe, 1972).

Les sites ont été choisis avec l'objectif de maximiser la variation des caractéristiques édaphiques sous des conditions climatiques semblables. Le territoire de la MRC du Haut-Saint-Laurent fait l'objet d'études par une équipe multidisciplinaire et une grande connaissance du milieu biophysique a été acquise. L'étude de la géomorphologie d'un secteur de la MRC du Haut-St-Laurent par Bariteau (1988) et une analyse de la tenure des terres par Domon *et al.* (1987) ont servi de guides à la localisation des sites.

Les quatre plantations sont situées dans un rayon approximatif de 5 km (45° 05' N, 74° 20' O), dans un secteur où apparaissent une suite de bourrelets morainiques entrecoupés de zones de décrépitudes glaciaires et de remaniements marins plus ou moins intenses (Delage *et al.*, 1985). Le socle rocheux est constitué de dolomie de Beekmantown et ces roches sédimentaires constituent les éléments dominants des dépôts morainiques du secteur des plantations (Globensky, 1987).

Un site appelé "marin" se retrouve dans la plaine argileuse de remblaiement marin qui a estompé le modelé glaciaire (altitude = 48m). Un second site, appelé "bourrelet", est localisé sur un bourrelet morainique isolé dans la plaine marine et s'élevant à moins de 10 mètres (altitude = 58m). Deux autres plantations sont situées sur des dépôts qui sont sous tendus par une élévation de la roche en place. L'une, appelée "chenail", occupe un chenail de fusion glaciaire (altitude = 61m), l'autre, appelée "littoral", est située sur des dépôts littoraux sableux érigés par la mer de Champlain à partir des bourrelets morainiques (altitude = 74m).

Avant l'établissement de plantations, des cultures d'espèces fouragères occupaient les sites marin et littoral alors que le pâturage avait déjà eu cours sur les sites chenail et bourrelet.

Selon les données de la station météorologique de St-Anicet du ministère de l'Environnement du Québec (1991) (45° 08' N, 74° 21' O), la région est caractérisée par une période sans gel de 182 jours et un nombre de degrés-jours (au dessus de 5°C) de 2106. La température moyenne annuelle est de 6,4°C . Les moyennes de juillet et janvier sont de 20,9°C et -9,7 C respectivement. À la première saison de croissance (1988), les précipitations de mai, juillet et septembre représentaient 46%, 51% et 53% de la normale. Durant la deuxième année (1989), il y eut également des conditions plus sèches pour les mois de juillet à septembre avec pour chacun de ces trois mois, 71%, 70% et 80% de la normale des précipitations. Au cours des mois de mai à octobre de la troisième saison (1990), les précipitations ont été généralement plus abondantes avec, en moyenne pour l'ensemble de ces mois, 137% de la normale des précipitations.

II.3 Méthodes

II.3.1 Espèces utilisées

Les plantations ont été établies du 3 au 7 mai 1988. Des semis à racines nues de frêne blanc (1+0) (*Fraxinus americana* L.), de noyer cendré (3+0) (*Juglans cinerea* L.), de chêne à gros fruits (2+0) (*Quercus macrocarpa* Michx.) et de chêne rouge (2+0) (*Quercus rubra* L.) ont été plantés manuellement sur chacun des sites. Les semences utilisées

pour la production des plants provenaient de la région écologique 1a de Montréal Haut Richelieu (Thibault, 1985). Des gaines spiralées furent installées sur chaque semis en guise de protection contre les rongeurs.

II.3.2 Traitements et dispositif expérimental.

Chaque site de plantation fut labouré et hersé superficiellement au printemps de 1988. Sur les parcelles témoin, aucune autre intervention ne fut appliquée pour réduire la présence des plantes herbacées en croissance. Un traitement utilisant un paillis organique issu des résidus d'émondage des arbres (bois raméal) de rue de la ville de Montréal, en majorité d'espèces feuillues, fut appliqué. Le bois raméal fut disposé au périmètre des semis à raison d'une épaisseur approximative de 5cm et d'une superficie de 1m², du 20 au 22 mai 1988. Un autre traitement consistait en l'application bisannuelle de l'herbicide glyphosate (Vision®) au taux de 6 l/ha.

Le dispositif expérimental correspond à un plan hiérarchisé (Blocs(site)), doublement croisé (espèces et traitement). Chacun des quatre sites est constitué de quatre blocs expérimentaux. Chacun des blocs est partagé en quatre espèces, elles-mêmes partagées en trois traitements produisant un plan factoriel à 4 sites x 4 blocs (site) x 4 espèces x 3 traitements.

Certains paramètres, dont la description détaillée apparaît à la prochaine section, ont été mesurés pour tous les traitements et sites (texture et pH du sol, teneur en eau, nitrate, ammonium, phosphore, potassium, calcium et magnésium du sol, température du sol ainsi que mortalité, hauteur et diamètre des semis). Dans ces cas, le modèle d'analyse suit le plan d'expérience précédemment mentionné. Pour les autres paramètres, (potentiel hydrique, biomasse des plants, superficie foliaire, concentration en azote foliaire) l'effet des traitements fut évalué à partir de mesures effectuées sur un seul site, le site chenail, alors que l'effet des sites fut évalué à partir de mesures effectuées sur le seul traitement "herbicide" de tous les sites. Pour cette deuxième série de paramètres, l'échantillonnage avait lieu dans trois des

quatre blocs. Cette procédure fut appliquée de façon à concentrer les efforts d'échantillonnage en fonction de la perception des effets traitement d'une part et des effets sites d'autre part, négligeant l'interaction entre sites et traitements. Il est présumé que l'interaction site-traitement ne représenterait qu'une variation d'intensité relative, qui ne changerait pas les tendances générales. Cette approche réduit les coûts d'échantillonnage et d'analyses en laboratoire. Dans ces cas, l'analyse statistique fut réalisée en deux procédures distinctes. L'évaluation de l'effet "traitement" procédait par l'analyse d'un plan à parcelles partagées selon un plan factoriel à 1 site("chenail") x 3 blocs x 4 espèces x 3 traitements. L'évaluation de l'effet "site" procédait par l'analyse d'un plan hiérarchisé croisé selon un plan factoriel à 4 sites x 3 blocs(site) x 4 espèces x 1 traitement (herbicide).

Une parcelle-traitement était constituée de deux rangées de cinq semis avec un espacement de 2m entre les rangs et de 2m sur le rang quand aucune récolte de plants n'était prévue. Dans les parcelles où des récoltes étaient planifiées, il y eut une mise en terre d'un plus grand effectif de plants, soit huit plants par rangée plutôt que cinq. Les ajouts ont été insérés entre les 5 semis, réduisant dans ces cas l'espacement sur la rangée de 2m à 1m. C'est parmi ces ajouts que les récoltes furent réalisées dans trois des quatre blocs de chaque plantation, dans toutes les parcelles-traitements du site "chenail" et dans le traitement herbicide des quatre sites . Chaque plantation occupe 0,22 ha et aura reçu entre 552 et 696 plants d'arbres, soit entre 138 et 174 par espèce.

L'ANOVA et la comparaison multiple des moyennes ont été utilisées selon les modèles d'analyses conformes aux plans d'expériences. Les interactions impliquant le bloc ont été ignorées. Lorsque la validation du modèle n'était pas rencontrée (normalité et homogénéité de la variance), la transformation non-paramétrique (rang) fut utilisée. Le test de comparaison multiple des moyennes de Tukey fut appliqué dans le cas des plans balancés et celui de Bonferroni pour les plans non-balancés. Lorsque l'interaction entre deux facteurs était significative ($p < 0,05$), les moyennes ont été décomposées par facteur.

II.3.3 Paramètres échantillonnés

Avant la mise en terre des plants, 16 échantillons de sol ont été prélevés systématiquement sur chacun des sites pour effectuer une analyse de la texture des sols (Bouyoucos, 1962). A la fin du mois de mai de la seconde saison de croissance (1989), deux échantillons de sol par parcelle furent prélevés à une profondeur située entre 10 et 20 cm (correspondant à la zone du système racinaire du jeune plant) et homogénéisés en un seul échantillon qui fut séché à l'air et passé au tamis de 2mm. Ces 48 échantillons par site ont servi pour toutes les analyses chimiques. La mesure du pH fut réalisée dans une solution 2 :1 d'eau et de sol à l'aide d'un pH-mètre à électrode de verre. Les cations potassium, calcium et magnésium extraits à l'acétate d'ammonium (Chapman, 1965) ont été dosés avec un spectrophotomètre à absorption atomique. Une portion de chaque échantillon de sol fut broyée et tamisée à 150- μ m pour la détermination du nitrate, de l'ammonium et du phosphore par colorimétrie à partir d'un spectrophotomètre à injection (Analyseur Tecator Fiastar®). Nitrate et ammonium furent extraits par une solution de KCl 2M (Keeney & Nelson, 1982) et le phosphore par la méthode décrite par Truog (1930).

La température du sol à 5cm de profondeur et la teneur en eau du sol à 15 cm de profondeur ont été mesurées à quatre reprises au cours de la seconde saison de croissance. La densité apparente des sols à 15 cm de profondeur a été évaluée (Vomocil, 1965) sur des échantillons intacts de sol, prélevés à l'aide d'une carotteuse à doubles cylindres.

La survie, la hauteur et le diamètre au collet de chaque semis ont été mesurés au début d'octobre des trois premières années de croissance des plants. Les récoltes ont été effectuées à chacune des deux premières saisons de croissance; un maximum de 6 arbres/espèce/site des traitements herbicides et de 6 arbres/espèce/traitement du site chenail ont été récoltés. Deux semis par bloc (3 blocs) furent choisis au hasard parmi ceux insérés, à raison de 1 par rangée. La récolte de l'été 1988 s'est effectuée du 15 au 24 août, celle de 1989, du 26 juillet au 1^{er} août. Les arbres récoltés ont été séparés en racines, tiges (incluant les pétioles) et feuilles. Le poids sec de chaque composante a été déterminé.

Aux fins d'analyses des paramètres foliaires, le sous-échantillonnage a été pratiqué. De 3 à 4 feuilles ont été sélectionnées parmi les premières déployées du bourgeon et sans symptômes de dommages ou de maladie. Chez les chênes, les feuilles de chaque fascicule furent échantillonnées; en général il y avait deux fascicules dans le traitement herbicide et un seul dans les autres traitements. La surface au planimètre et le poids sec de chaque groupe de feuilles ont été déterminés. La connaissance de la surface foliaire spécifique (SF_s =surface/masse) et de la biomasse foliaire totale de chaque plant ont permis d'estimer la surface foliaire totale de chacun. Les échantillons de feuilles étaient broyés à 0,5 mm et 0,5 g était digéré à l'acide sulphurique pour évaluer la concentration en azote par spectrophotométrie à flux continu (Analyseur Tecator Fiastar®).

Deux jours avant la période de récolte des semis de 1989, la mesure du potentiel hydrique à l'aide d'une chambre à pression fut effectuée à titre indicatif au cours de la journée (entre 10hres et 15 hres) sur 4 arbres/espèce/site des traitements herbicides (effet site) et 4 arbres/espèce/traitement du site chenail (effet traitement). Deux plants ont été choisis aléatoirement parmi ceux désignés pour la récolte. Deux feuilles par semis étaient prélevées à cette fin et conservées pour être incluses dans l'évaluation subséquente de la biomasse foliaire totale du plant.

Différents indices de croissance ont été mesurés (Margolis & Brand, 1990)

(i) le taux relatif de croissance, en pourcentage annuel :

$$TRC = (\ln M_2 - \ln M_1) / t_2 - t_1$$

où M est la masse sèche totale des plantes (en grammes) pour la période d'étude $t_{1,2}$, (année 1988-1989);

(ii) l'efficacité d'utilisation de l'azote, exprimée en accroissement en grammes par gramme d'azote par année :

$$EUN = \{(M_2 - M_1)/t_2 - t_1\} \times \{(\ln N_2 - \ln N_1)/(N_2 - N_1)\}$$

où N est l'azote foliaire total (en grammes);

(iii) le taux d'assimilation net, exprimé en accroissement en grammes par centimètre carré de feuilles par année :

$$TAN = \{(M_2 - M_1)/t_2 - t_1\} \times \{(\ln SF_2 - \ln SF_1)/(SF_2 - SF_1)\}$$

où SF est la superficie foliaire (en centimètre carrés);

(iv) la surface foliaire spécifique :

$$SF_s = SF/F$$

où F est la masse foliaire (en grammes);

(v) la proportion de feuilles, F/M ;

(vi) la proportion de racines, R/M , où R est la masse racinaire (en grammes);

(vii) la disponibilité de l'azote, N/R .

La biomasse aérienne de la végétation compétitrice a été estimée à partir de l'échantillonnage des parcelles de frêne blanc, dans trois des quatre blocs expérimentaux de chaque site. Dans un quadrat par parcelle d'une superficie de 1m^2 en 1988 et de $0,25\text{m}^2$ en 1989, avec un semis d'arbre en son centre, toutes les mauvaises herbes étaient fauchées, séchées et pesées.

II.4 Résultats

II.4.1 Caractéristiques édaphiques et compétition herbacée

Les quatre sites de plantation se distinguent par la nature du dépôt, la pierrosité, la texture et la densité apparente des sols (Figure 1). Ces différences sont accompagnées d'une variation de tous les indices de richesse des sols présentés aux figures 2A et 2B.

Le site littoral, à dépôt plus sableux, présente les concentrations en éléments nutritifs les plus faibles, à l'exception de l'ion ammonium. Les sites marin et bourrelet obtiennent des valeurs de calcium, magnésium, et phosphore qui sont supérieures (Figure 2A). Il y a une différence des valeurs de pH entre les sites (Figure 2A) qui suit celle obtenue des valeurs de potassium (Figure 2B). Les quantités de nitrates mesurées diffèrent également, surtout lorsque les sites marins et littoral sont comparés (Figure 2B).

Certains indices de richesse sont modifiés par le traitement appliqué (Figure 2B). Ainsi, le paillis de bois raméal aura élevé les valeurs de pH et de potassium. Fraedrich et Ham (1982) ont également mesuré des quantités supérieures de potassium sous ce type de paillis. De plus, les teneurs en nitrates sur chacun des quatre sites sont supérieures pour le traitement "herbicide" (Figure 2B). Les teneurs en nitrates des sols du traitement paillis sont comparables à celles mesurées sous le témoin, à l'exception du site marin où la quantité de nitrates du sol sous le paillis est réduite (Figure 2B).

Comme il fut précédemment mentionné, la densité apparente du sol du site marin est la plus élevée (Figure 1). Ainsi, si les teneurs en éléments nutritifs étaient exprimées par unité de volume de sol, la différenciation entre le site marin et les autres serait accentuée de 12% et 13% par rapport aux sites chenail et bourrelet et de 25% en comparaison avec le site littoral. Si le pourcentage de pierrosité était également incorporé à l'analyse, l'écart serait également accentué à l'avantage des sites marin et littoral, non-pierreux. Toutefois, si une unité de volume de sol du site marin contient davantage d'éléments nutritifs que sur les autres sites, la contrainte à la pénétration du système racinaire y est supérieure et la rétention de l'eau par les particules d'argile y est également plus grande.

L'analyse de la température du sol (Figure 3) révéla un effet traitement marqué à toutes les dates ($p=0,0001$) et une interaction entre le site et le traitement aux moments d'échantillonnage du 27 juin (sxt, $p=0,0001$) et du 25 juillet 1989 (sxt, $p=0,01$). La température du sol, mesurée à 5cm de profondeur était supérieure sous le traitement "herbicide" et inférieure sous le traitement "paillis" (Figure 3).

La quantité d'eau mesurée des sols ordonne les sites de la même façon qu'ils l'ont été par l'analyse de la texture des sols : le site à texture fine contenant plus d'eau que les sites à texture plus grossière (Figure 4A). La quantité d'eau présente dans le sol varie également selon les traitements. A la première évaluation des teneurs en eau des sols (25 mai 1989), elles étaient supérieures sous les traitements paillis et herbicide (Figure 4B). Cet effet du paillis ne s'est pas manifesté par la suite aux autres moments d'échantillonnage, tandis que la quantité d'eau au sol était encore supérieure sous le traitement "herbicide" le 25 juillet sur tous les sites, et le 31 août sur le site marin (Figure 4B).

La biomasse des herbacées présentes au mois d'août de chacune des deux premières saisons de croissance, dans les parcelles témoin de chacun des sites, ainsi que sur les différents traitements de l'ensemble des sites, apparait à la figure 5(A, B). A la première saison, en 1988, la biomasse d'herbacées était supérieure sur le site marin et inférieure sur le site littoral alors qu'en 1989 il y eut un fort accroissement des plantes compétitrices sur le site chenail (Figure 5A). Sur ce site, le chardon vulgaire (*Cirsium vulgare* (Savi) Tenore), plante bisannuelle, fut favorisée par la préparation de terrain (labour et hersage). En effet, à la première saison (1988) on notait la présence de la plante sous forme de rosette : le développement d'une portion caulinare et la floraison à la seconde saison (1989) explique l'élévation de la biomasse des herbacées sur ce site.

Sur l'ensemble des plantations, et au moment de l'estimé, la biomasse de plantes herbacées présentes dans les traitements "herbicide" était réduite de 93% en 1988 et de 82% en 1989 en comparaison avec les parcelles témoin (Figure 5B). Le paillis de bois raméal a réduit de 30% les herbacées à chacune des deux premières années de croissance des plants.

II.4.2 Mortalité, croissance, allocation en biomasse et nutrition azotée des semis d'arbres

La comparaison des taux de mortalité obtenus des traitements appliqués sur chaque site (Figure 6A) ainsi que ceux obtenus des espèces sur chaque site, expriment le maximum de variation (Figure 6B).

La mortalité des plants s'est produite principalement au cours des deux premières années de croissance en plantation. Sous les traitements herbicide et paillis, la mortalité fut réduite de façon importante comparativement au témoin (Figure 6A). Alors qu'il y eut 20% de mortalité dans le traitement témoin en 1988 (tous sites confondus) et qu'à la seconde saison 18% des arbres restant sont également morts sous ce traitement, le paillis de bois raméal et l'herbicide ont limité la mortalité à une proportion inférieure à 10% à chacune des deux premières années.

L'examen des taux de mortalité des espèces sur chacun des sites de plantation (Figure 6B) révèle une forte mortalité du frêne et du chêne à gros fruits sur les sites bourrelet et littoral. Le chêne rouge accuse une forte mortalité partout sauf sur le site littoral. La mortalité du noyer cendré fut plus importante sur le site bourrelet alors que cette espèce a les meilleurs taux de survie de la présente étude sur les autres sites.

La mesure du potentiel hydrique des arbres, effectuée à titre indicatif après 14 jours sans précipitations (ministère de l'Environnement du Québec 1991), n'aura pas fait ressortir d'effet des traitements ou des sites (résultats non-présentés) mais plutôt une importante distinction entre les espèces ($p=0,0001$). Ainsi, le noyer cendré, avec une valeur de potentiel hydrique de -14 bar, fut le moins affecté par la réduction de la disponibilité de l'eau en cette période. Le frêne, le chêne à gros fruits et le chêne rouge montraient respectivement des valeurs de -25, -28 et -22 bar.

L'analyse du diamètre et de la hauteur des arbres après trois saisons de croissance démontrait, pour ces deux mesures, un fort effet des traitements en interaction avec les sites

et les espèces (Tableau I). Les hauteurs, présentées à la figure 7, sont toujours supérieures pour le traitement "herbicide" alors que pour le paillis de bois raméal, seul le chêne à gros fruits du site littoral voit sa croissance en hauteur favorisée par ce traitement.

Dans l'ensemble, l'effet de l'herbicide sur le site marin est moins marqué, et ceci particulièrement pour le chêne rouge dont la hauteur n'est pas modifiée par ce traitement (Figure 7). Les frênes du traitement herbicide montrent peu de variation de hauteur entre les sites (Figure I.7).

L'analyse de la concentration et de la quantité totale en azote foliaire a montré que le traitement (Tableau II) et l'espèce (Tableau III) agissent comme source de variation sur ces variables.

Les arbres sous le traitement "herbicide" présentent des valeurs de concentration en azote foliaire, d'azote foliaire total et de superficie foliaire supérieures aux autres traitements (Tableau II). La disponibilité de l'azote était trois fois plus importante pour le traitement "herbicide" que pour les autres traitements (Tableau II).

Le rapport de masse, racine/tige et la proportion de racines produites, sont bien inférieurs chez les semis ayant eu le moins de compétition herbacée, soit pour le traitement "herbicide" (Tableau II). La masse racinaire des semis du traitement "herbicide" représentait 35% de la masse totale des plants comparativement à près de 50% en situation où la compétition herbacée était plus importante (traitements témoin et paillis). La proportion de feuilles du traitement herbicide représentait 25% de la masse totale des plants, comparativement à 12% et 14% sous les traitements témoin et paillis (Tableau II). La proportion de biomasse de racines ou de feuilles sous le traitement herbicide, ne différait pas entre les différents sites de plantation (résultats non-présentés).

Le noyer cendré a produit du tissu foliaire ayant une plus grande concentration en azote, mais il présente, avec le frêne, une moins grande quantité d'azote par unité de surface comparativement aux chênes (Tableau III). La surface foliaire spécifique montre que les

feuilles de chênes sont plus épaisses (Tableau III). Ces résultats indiquent que l'unité d'azote foliaire des noyers et des frênes est répartie sur une plus grande superficie (feuilles minces) comparativement aux chênes (feuilles plus épaisses).

L'analyse des indices de productivité et de nutrition (Tableau IV) montre que le site et l'espèce agissent comme sources de variation sur ces indices. Les taux relatifs de croissance sont inférieurs sur le site marin. Les taux d'assimilation net et d'efficacité d'utilisation de l'azote ont tendance à être inférieurs sur le site marin et supérieurs sur le site littoral. Le noyer cendré présente des valeurs d'indices de croissance dont la tendance est d'être inférieure aux autres espèces (Tableau IV). L'évaluation de l'effet de l'espèce se heurte à un fort écart de taille entre les différentes espèces et ce, davantage qu'entre les sites. Les divers indices peuvent être inversement corrélés à la taille de départ et faiblement à la vigueur (Margolis & Brand, 1990; Britt *et al.*, 1991).

II.5 Discussion

II.5.1 Ressources disponibles et croissance

Une importante augmentation de la croissance des semis fut obtenue suite à l'application de l'herbicide glyphosate, le traitement le plus efficace pour réduire la présence de la végétation compétitrice. Cette réduction de la compétition pour les semis d'arbres et l'élévation de température du sol qui l'accompagnait, ont permis une augmentation de la disponibilité des nitrates et de l'eau pour les semis. Avec le réchauffement du sol, l'initiation quotidienne et saisonnière de la photosynthèse serait plus précoce et, en réponse aux produits de la photosynthèse, la croissance des racines serait favorisée (Brand, 1991). Ainsi, les semis du traitement "herbicide" auraient pu utiliser plus efficacement les ressources.

Bien que l'utilisation d'un paillis de bois raméal ait produit une élévation de la teneur en potassium du sol et une montée du pH, cela ne s'est pas traduit en un accroissement de la taille des semis. La diminution des températures du sol sous le paillis et la faible réduction des plantes herbacées sous ce traitement auront plutôt été défavorables à la productivité des

plants d'arbres. Les plantes compétitrices qui se trouvaient à la marge du paillis peuvent également avoir eu accès aux ressources sous le paillis par le développement de leurs racines vers cette zone, tel que déduit par Davies (1988) qui utilisa le paillis de plastique.

Le processus de décomposition du paillis, s'il est apparenté à celui de la litière d'un sol forestier, pourrait comporter une période où l'azote serait accaparé par le paillis. Selon une hypothèse mentionnée par Hendrickson *et al.* (1985), les hyphes mycéliens apporteraient l'azote à partir de la couche de sol où il y a minéralisation, vers la couche de paillis déficiente en cet élément et nécessaire aux saprophytes qui y croissent. Selon ce procédé, il pourrait y avoir une déficience en azote du sol si la zone de minéralisation de l'azote est moins important que celui de l'immobilisation.

Dans la présente étude, la possibilité d'élever la disponibilité de l'azote pour les semis d'arbres, suite à une réduction de 30% de la strate herbacée par l'utilisation de paillis, pourrait être diminuée par les besoins en azote qu'impliquerait le processus de décomposition du paillis. Le site marin présente une importante diminution des nitrates sous le paillis. La quantité d'eau supérieure sur ce site a pu maintenir des conditions d'humidité favorables aux hyphes mycéliens et aux saprophytes ce qui aurait accéléré la décomposition du paillis au détriment de la disponibilité de l'azote du sol pour les plants d'arbres.

L'interception de la lumière était évidemment plus importante dans les parcelles occupées par la végétation compétitrice. Toutefois, sur le site littoral cette végétation avait une plus faible biomasse et n'atteignait pas la hauteur de celle des autres sites (observation personnelle). Comparativement aux parcelles témoins des autres sites, celles du site littoral représentaient certainement les meilleures conditions lumineuses tandis que le taux de mortalité des arbres y était le second plus élevé. Les parcelles témoin du site littoral représentent particulièrement bien la compétition pour les ressources édaphiques en eau et en éléments nutritifs qu'exerce la végétation compétitrice sur les jeunes plants d'arbres, phénomène parfois négligé par rapport à celui de l'interception de la lumière.

Suite à la préparation du sol par labour et hersage, la biomasse de plantes herbacées s'est accrue à la seconde saison de croissance sur le site chenail, dans les parcelles témoin. Ceci souligne l'insuffisance d'une seule préparation de sol, sans méthodes de réduction de la présence des herbacées appliquées subséquentement. Ces résultats permettent également de croire en l'efficacité d'une méthode de culture des feuillus sans préparation de sol (labour-hersage), mais qui comprendrait un traitement qui réprime les plantes compétitrices. Une telle méthode serait particulièrement appropriée sur les sites pierreux ou inaccessibles à la machinerie et où le sol est plus léger : l'effet de la préparation de sol sur l'allègement de la structure du sol y étant moins prononcé que sur les sols lourds.

La richesse élevée en éléments nutritifs et les plus grandes quantités d'eau au sol mesurées sur le site marin ne sont pas reflétées par les différents indices d'efficacité d'utilisation des ressources (TRC, EUN, TAN) dont les valeurs sont les plus faibles sur ce site. La texture du sol et la densité apparente du sol du site marin ont des conséquences sur l'aération, le drainage, la rétention de l'eau et la pénétration racinaire. De plus, le site marin, situé dans la plaine agricole, était exposé aux vents desséchants. Ces caractéristiques ont limité la disponibilité des ressources. C'est sur le sol pauvre et de faible densité apparente du site littoral que les espèces présentaient les meilleures valeurs des indices d'efficacité d'utilisation des ressources (TRC, EUN, TAN), suivi de près par les deux sites de dépôts d'origine glaciaire.

La comparaison des taux relatifs de croissance obtenus des espèces de la présente étude avec ceux de Margolis et Brand (1990) obtenus des semis de pin blanc, montre une supériorité importante des valeurs obtenues des semis d'essences feuillues croissant dans le sud-ouest du Québec. La comparaison doit tenir compte des conditions de croissance qui diffèrent entre les deux études néanmoins, les taux relatifs de croissance obtenus de l'étude citée sont de 50% inférieurs à ceux qui sont présentés ici. La réputation de croissance lente attribuée aux feuillus devra être nuancée : le stade juvénile des essences feuillues de haute valeur peut montrer un haut taux de croissance.

II.5.2 Mortalité

Les taux de mortalité obtenus des traitements "herbicide" et "paillis" sont identiques et nettement inférieurs au témoin. La principale cause de mortalité des semis transplantés est la dessiccation suite à un excès de transpiration en fonction de la capacité d'absorption réduite du système racinaire (Davies *et al.*, 1973) et des sécheresses anormales des années suivant la plantation. Le paillis de bois raméal aurait contribué à élever le taux de survie par une amélioration des conditions d'humidité sous le paillis, tel que Fraedrich et Ham (1982) l'ont également constaté. Quant au traitement "herbicide", il aura pratiquement annulé la perte d'eau par la transpiration des plantes compétitrices. En conservant plus efficacement l'eau du sol, ces traitements ont limité l'effet négatif sur la survie de la faiblesse des précipitations, notamment des mois de mai et juillet de la première saison de croissance (1988).

Les sites bourrelet et littoral présentent des taux de mortalité importants, surtout dans le traitement témoin. Le site littoral, de texture de sol plus sableuse, était susceptible de présenter une disponibilité en eau du sol réduite. Sur le site bourrelet, les quantités d'eau mesurées étaient relativement élevées mais la texture du sol plus argileuse pourrait en avoir diminué la disponibilité, particulièrement lorsque le pourcentage d'eau d'un sol argileux est inférieur à 20 % (Salisbury & Ross, 1992). Aussi, la situation topographique de la plantation, sur un bourrelet morainique isolé dans la plaine, conduit à une accélération du drainage et à une exposition aux vents desséchants. L'image de la disponibilité de l'eau de ce site, obtenue à partir de l'évaluation de la quantité d'eau du sol à quatre moments au cours de la seconde saison de croissance, est incomplète et devrait incorporer ces autres facteurs.

Il est paradoxal de constater que le chêne rouge était très productif sur le site chenail mais que 24% des semis y sont morts durant la première saison. La capacité de l'espèce à développer un système racinaire après plantation aurait été particulièrement variable dans la population de chêne rouge utilisée pour la présente étude. Il se dégage toutefois que l'espèce présentait les meilleurs résultats de croissance et de survie sur les sites chenail et littoral, où les sols sont de texture plus sableuse. Ceci est en accord avec ce que décrivent

Gauthier et Gagnon (1990) au sujet de l'écologie du chêne rouge présent sur les contreforts des Laurentides, qui y occupe les sites élevés, où les sols sont minces, bien drainés, comportant 60% de sable et pauvres en éléments nutritifs.

Au moment où le frêne et les chênes présentaient des signes de stress hydrique, les tissus foliaires du noyer cendré étaient en meilleure condition d'hydratation. Aussi, les taux de mortalité du noyer sur les différents sites sont généralement les plus faibles. Les semis de noyer utilisés lors de la plantation étaient de plus grande taille (3+0) que ceux des autres espèces. Une biomasse supérieure du semis, particulièrement de son système racinaire au moment de la plantation, pourrait être à l'origine d'un bon taux de survie lors d'une période sèche. Lopushinsky et Beebe (1976) rapportent que la survie de deux espèces conifériennes plantées dans une région où les étés sont secs, était supérieure chez les semis qui possédaient les plus gros systèmes racinaires. Il serait important de connaître non seulement l'impact de la dimension du semis sur la survie, mais également sur sa productivité relativement à sa taille. La capacité du système racinaire à développer, après plantation, une superficie absorbante efficace pour maintenir l'ensemble de ses tissus hérités de la croissance en pépinière, devrait être évaluée en fonction de la dimension des racines (biomasse, volume). Également, les coûts et avantages associés à la production de semis de fortes dimensions devront être confrontés à ceux impliqués dans la réduction des herbacées.

II.5.3 Azote foliaire

Pour exprimer le prélèvement en azote par les semis, la mesure de la quantité totale d'azote foliaire accaparée par un plant s'est montrée plus discriminante que celle de la concentration en azote du tissu foliaire. Kraske et Fernandez (1990) concluent que la quantité d'azote foliaire totale de semis de conifères est la meilleure caractéristique pour évaluer la disponibilité de l'azote. Les auteurs mentionnent que cette mesure n'est pas autant affectée par le statut des autres éléments que ne le sont la quantité de matière sèche ou la concentration foliaire en azote.

Face à la réduction de la disponibilité des ressources, la diminution de la concentration en azote foliaire conduit à une moins grande capacité photosynthétique de chaque feuille (Field, 1986). En combinant la diminution de la concentration en azote foliaire et la réduction de la superficie foliaire constatées dans les traitements "paillis" et "témoin", il y aurait donc, à l'échelle du plant entier, une forte diminution du potentiel photosynthétique en situation de compétition herbacée, qui est bien représentée ici par la mesure de la quantité totale d'azote foliaire, dix fois plus élevée dans le traitement "herbicide".

Malgré la variation des conditions physico-chimiques entre les quatre plantations, la concentration et le contenu total en azote foliaire des semis ne diffèrent pas entre les sites. À mesure que la biomasse des plants s'élèvera, et par le fait même leurs besoins en éléments nutritifs, il est probable que les limites de la disponibilité des ressources de chaque site se manifesteront sur la croissance des plants.

La distribution d'une unité d'azote sur une plus faible superficie foliaire chez les chênes, comparativement aux noyers et frênes, nécessiterait l'étude approfondie de la capacité photosynthétique de chacune des espèces pour être interprétée. On dit des espèces à feuilles plus épaisses, telles les espèces sclérophylles, qu'une partie importante de l'azote foliaire pourrait ne pas être associée à l'activité photosynthétique, mais plutôt à la constitution de composés de défense (Field, 1986). La répartition des composantes azotées du noyer et du frêne sur une plus grande superficie foliaire pourraient présenter un avantage du point de vue de la réception de la lumière.

II.5.4 Allocation en biomasse

Avec l'accroissement de la disponibilité des ressources par l'application d'herbicide, le semis d'arbre présentait une répartition de la biomasse à la faveur de ses portions aériennes. Les espèces en situation de disponibilité réduite des éléments nutritifs auraient un rapport racine/tige élevé (Chapin, 1980; Bloom *et al.*, 1985). Les résultats présentés ici appuient cet énoncé. Toutefois, les résultats présentés par Ingestad et Ågren (1991) n'indiquent pas

d'augmentation du rapport racine/tige quand les apports en azote, phosphore et soufre sont réduits.

L'écart substantiel de taille entre les semis des traitements "herbicide" et "témoin" pourrait être à l'origine d'un artéfact. En effet, la distribution de la biomasse entre les différentes composantes varie avec la taille des arbres (Kramer & Kozlowski, 1979). Le rapport masse des feuilles/masse totale serait inversement proportionnel à la taille d'un plant d'arbre, et ce par l'accumulation de tissus pérennes qui excèderait la production annuelle de feuilles (Brand, 1991). Les résultats présentés ici sont contraires à cette hypothèse; les arbres de forte dimension du traitement "herbicide" possèdent une proportion de feuilles supérieure aux arbres plus petits des autres traitements. Ceci souligne la modification draconienne des conditions environnementales qu'apporte la réduction de la compétition herbacée. Bailian *et al.* (1991) ont constaté le même phénomène d'élévation de la proportion de feuilles lorsque l'apport en azote était accru chez des semis de conifères.

Les semis utilisés pour la présente étude possédaient une distribution de biomasse entre les composantes qui résultait des conditions de croissance de la pépinière. En plantation, la faible quantité de ressources disponibles des traitements "témoin" et "paillis" diminuerait la capacité des tissus en place à en produire de nouveaux. De plus, dans ces traitements, la mesure de la masse des tissus pérennes, en partie héritée de conditions plus favorables, pourrait surévaluer l'importance de leur fonction de transport. L'image de l'allocation des ressources, obtenues de la mesure de la distribution de la biomasse, pourrait alors être faussée. Avec la suppression des herbacées, la distribution de la biomasse serait plus représentative de l'allocation des ressources exercée par le semis depuis qu'il est en plantation. La réduction des plantes herbacées en plantation permettrait de profiter pleinement des capacités d'un semis issu d'une culture soignée en pépinière.

II.6 Conclusion

Dans cette étude, les espèces ont été davantage affectées par la compétition herbacée que par la variation des conditions édaphiques entre les sites. La réduction de la compétition a produit une augmentation marquée de la disponibilité des ressources pour les plants d'arbres qui fut mise en lumière à travers divers paramètres. La distinction la plus marquée entre les sites concerne les taux de mortalité obtenus au cours des deux premières saisons de croissance dans le traitement "témoin". La mortalité de ce traitement est la plus importante sur les sites bourrelet et littoral. Les caractéristiques de ces sites conduisent à une plus faible disponibilité de l'eau, ce qui accentue l'effet néfaste de la présence des plantes compétitrices.

Les succès obtenus par l'herbicide démontrent que l'évaporation de l'eau du sol, suite à son exposition par l'élimination de la strate herbacée causant l'élévation des températures du sol, n'a pas causé de déficit en eau pour les arbres. Par contre, l'évapotranspiration qui a cours dans le traitement témoin y conduirait. Ces résultats, obtenus à partir d'un plus grand spectre de conditions édaphiques, corroborent ceux décrits précédemment par Cogliastro *et al.* (1990) pour deux autres sites du sud du Québec.

Avec la répression des herbacées, les sites chenails et littoral ont présenté les conditions les plus favorables à l'établissement et à la croissance des espèces feuillues. Ceci fut obtenu malgré des valeurs d'indices de richesse des sols inférieures aux autres sites. La disponibilité de l'eau et des éléments nutritifs sur les sites littoral et chenail (de textures de sol plus grossières) était bien assurée par la réduction très efficace de la végétation herbacée.

L'effet de la variation des conditions de richesse des sites sur la croissance des espèces, pourrait être plus marqué à mesure que s'élèveront les besoins des plants et que les limites des sites seront atteintes. On s'attend à ce que cette limite soit plus rapidement atteinte sur le site littoral, où les quantités d'éléments nutritifs mesurées étaient les plus faibles. Des résultats présentés ici, il se dégage que la production de feuillus sur les sols constitués de dépôts glaciaires, à forte pierrosité, du sud-ouest du Québec devrait être encouragée, pour

peu qu'on procède à une évaluation de la disponibilité de l'eau à partir du contexte environnemental global. On s'attendra donc à obtenir plus de succès sur les sites de dépôts glaciaire qui sont abrités des vents et qui, par leur position topographique, peuvent bénéficier de la convergence des eaux d'écoulement ou d'un drainage oblique.

Avec une réduction de la compétition herbacée par herbicide, le frêne blanc obtint des croissances en hauteur équivalentes sur tous les sites, signe d'une grande amplitude écologique. Le chêne à gros fruits, le noyer cendré et particulièrement le chêne rouge, ont atteint des hauteurs supérieures sur les sites non-exposés et de texture de sol légère. La forte dimension des plants de noyer cendré utilisés dans la présente étude pourrait expliquer le haut taux de survie et la forte valeur du potentiel hydrique de l'espèce.

La concentration et la fréquence d'application d'herbicide qui furent utilisées dans la présente étude ne représentent pas nécessairement une règle à appliquer. En outre, il y aurait lieu d'être prudents face à l'importance de la mise en disponibilité des nitrates du sol par l'usage d'herbicides. Les nitrates, facilement lessivables, pourraient être perdus pour la plantation. Il y aurait lieu d'envisager une minimisation de l'usage d'herbicide à un niveau suffisant pour que la survie des plants soit assurée et qu'il y ait une croissance positive et substantielle des arbres à chaque année. Les faibles taux de croissance des semis de feuillus au cours des premières saisons conduisent fréquemment à une mauvaise forme des plants.

L'utilisation d'un paillis de bois raméal tel qu'appliqué ici, bien qu'elle ait assuré un bon taux de survie des semis, s'est avérée inefficace à garantir l'accroissement de la taille des plants en plus de représenter une mise en place coûteuse. En plantation de feuillus, l'effort à engager face à la compétition herbacée devrait l'être dès les premières années de croissance des semis et l'intensité de l'effort devrait être proportionnelle à l'ampleur de la compétition herbacée de chaque site.

II.7 Remerciements

Nous remercions Renée Langevin, Kim Marineau, Nathalie Boyer et Francine Leblanc pour leur contribution sur le terrain et en laboratoire ainsi que Stéphane Daigle pour sa contribution aux analyses statistiques. Nous sommes reconnaissant des subventions de recherche du Centre Multirégional de Recherche en Foresterie de l'Université du Québec et du Ministère des Forêts du Québec à Daniel Gagnon, du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada à André Bouchard et d'une bourse d'études supérieures du CRSNG à Alain Cogliastro. La pépinière du Jardin botanique de la Ville de Montréal a produit les semis et la Ville de Montréal nous a approvisionné en bois raméal. Nous remercions sincèrement messieurs Caza, Higgins, Mauffette et Quenneville, propriétaires des terrains où les plantations ont été établies.

Tableau I. ANOVA du diamètre et de la hauteur des espèces après trois saisons de croissance en plantations.

Source	dl	Diamètre		Hauteur	
		F	p	F	p
SITE	3	4	0,0259	3	0,0136
BLOC(SITE)	12	6	0,0001	6	0,0001
ESPÈCE	3	894	0,0000	370	0,0001
TRAITEMENT	2	1085	0,0000	695	0,0001
SITE x ESPÈCE	9	14	0,0001	16	0,0001
SITE x TRAITEMENT	6	14	0,0001	20	0,0001
ESPÈCE x TRAITEMENT	6	11	0,0001	6	0,0001
SITE x ESPÈCE x TRAITEMENT	18	5	0,0001	4	0,0001
ERREUR	1674				

* significatif à $p < 0,05$

Tableau II. Comparaison des indices de nutrition, de morphologie et d'allocation en biomasse entre les traitements.

Traitement	Indices de croissance						
	[N] (%)	N (g)	SF (cm ²)	N/R	R/T	R/M	F/M
Témoïn	1,70 a	0,20 a	1353 a	0,0042 a	1,03 a	0,48 a	0,12 a
Paillis	1,81 a	0,26 a	2016 a	0,0055 a	1,00 a	0,49 a	0,14 a
Herbicide	2,44 b	2,30 b	13569 b	0,0187 b	0,56 b	0,35 b	0,25 b
<i>p</i>	0,029	0,001	0,029	0,0004	0,006	0,0006	0,002

Nota (n=24). Les paramètres ont été mesurés à la seconde saison de croissance en plantation (1989). Les indices, définis à la section Paramètres échantillonnées, sont exprimés sous forme de moyennes. [N], concentration en azote foliaire; N, azote foliaire total; SF, Surface foliaire; N/R, azote foliaire total / masse racinaire; R/T, masse racinaire / masse de la tige; R/M, masse racinaire / masse totale; F/M, masse foliaire / masse totale.

Tableau III. Comparaison de l'azote foliaire et de la surface foliaire spécifique entre les espèces feuillues.

Espèce	Caractéristiques foliaires		
	[N] (%)	N/SF (g/cm ² /1000)	SFS (cm ² /g)
Frêne blanc	2,46 a	0,189 a	130 a
Noyer cendré	2,71 b	0,178 a	152 b
Chêne à gros fruits	2,35 a	0,228 b	103 c
Chêne rouge	2,40 a	0,212 b	113 c
<i>p</i>	0,0003	0,0003	0,0001

Nota: (n=24). Les paramètres ont été mesurés à la seconde saison de croissance en plantation (1989). Les indices, définis à la section Paramètres échantillonnées, sont exprimés sous forme de moyennes, [N], concentration d'azote foliaire; N/SF, azote foliaire total / surface foliaire; SFS, surface foliaire / masse foliaire. Les moyennes des colonnes qui ne sont pas affectées d'une même lettre sont différentes à $p < 0,05$ (test de Bonferroni).

Tableau IV. Comparaison des indices de productivité et de nutrition entre les sites et les espèces.

	Indices		
	TRC (%)	EUN (/an)	TAN (g/cm ² /an)
Site			
Marin	87 a	196 a	0,035 a
Bourrelet	129 b	263 ab	0,052 ab
Chenail	121 b	239 ab	0,047 ab
Littoral	147 b	271 b	0,055 b
<i>p</i>	0,0022	0,0238	0,0264
Espèce			
Frêne blanc	157 a	285 a	0,053 ab
Noyer cendré	86 b	177 a	0,034 b
Chêne à gros fruits	125 ab	288 a	0,060 a
Chêne rouge	114 ab	217 a	0,043 ab
<i>p</i>	0,0084	0,0411	0,0194

Nota:(n=24). Les indices, définis à la section Paramètres échantillonnées, sont exprimés sous forme de moyennes. TRC, taux relatifs de croissance; EUN, efficacité d'utilisation de l'azote; TAN, taux d'assimilation net. Les moyennes des colonnes qui ne sont pas affectées d'une même lettre sont différentes à $p < 0,05$ (test de Bonferroni).

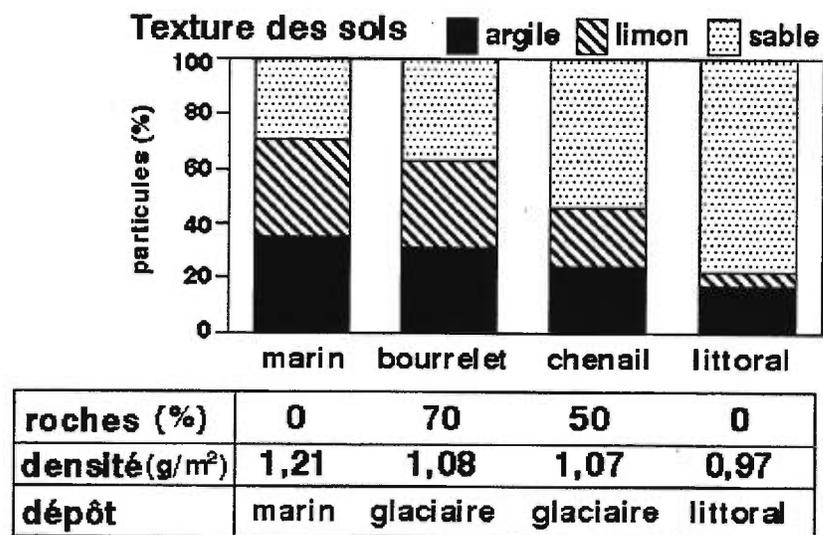


Figure 1. Caractéristiques édaphiques des quatres sites de plantation de feuillus.

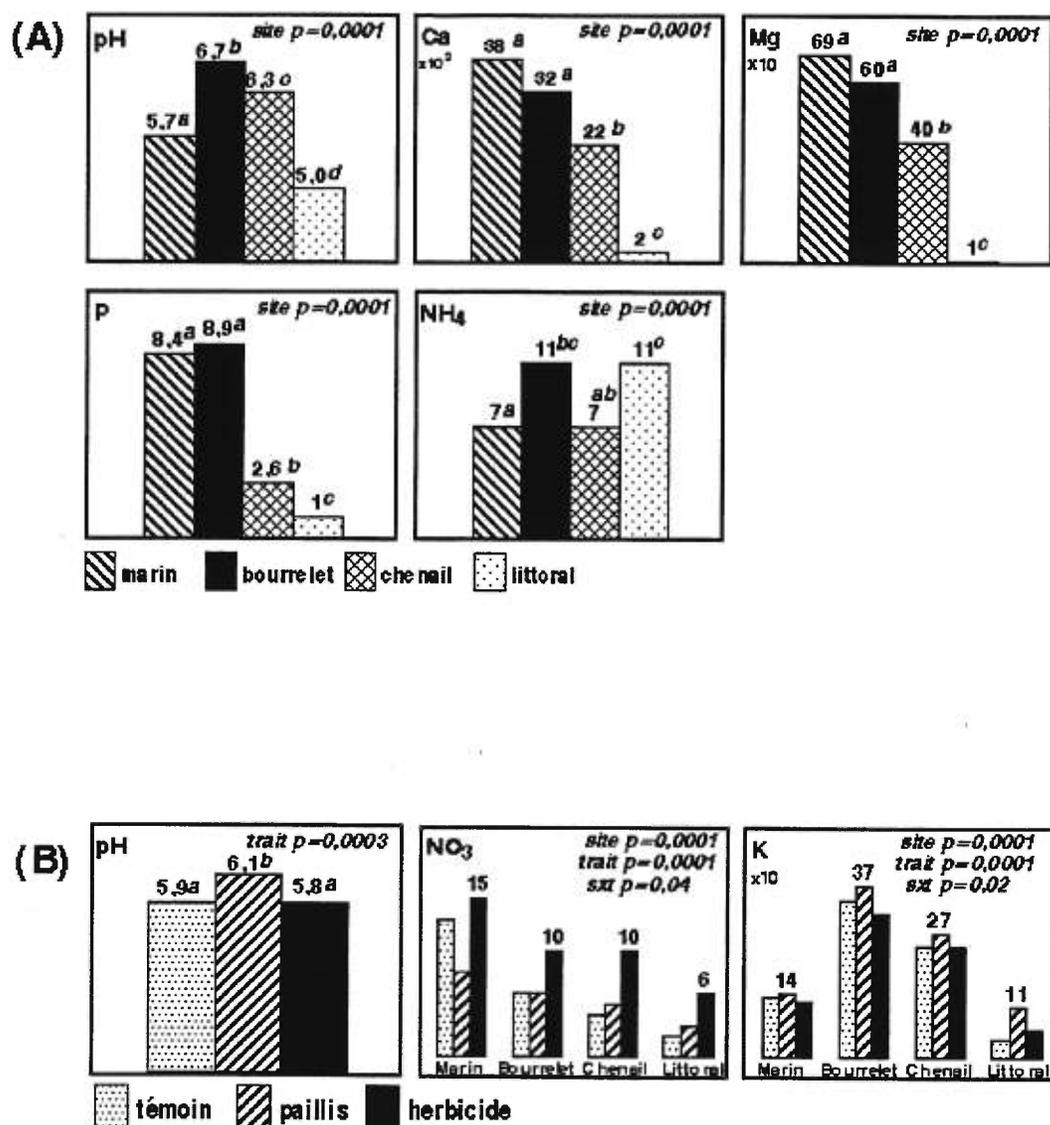


Figure 2. Comparaison de la richesse des sols (A) des quatre sites de plantation de feuillus et (B) des traitements de répression de la végétation compétitrice. Les teneurs en éléments nutritifs sont exprimées en parties par million. Les valeurs de probabilité (p) de l'ANOVA apparaissent au coin supérieur droit de chaque graphique. Les moyennes qui ne sont pas affectées de la même lettre sont différentes à $p \leq 0,05$ (test de Tukey).

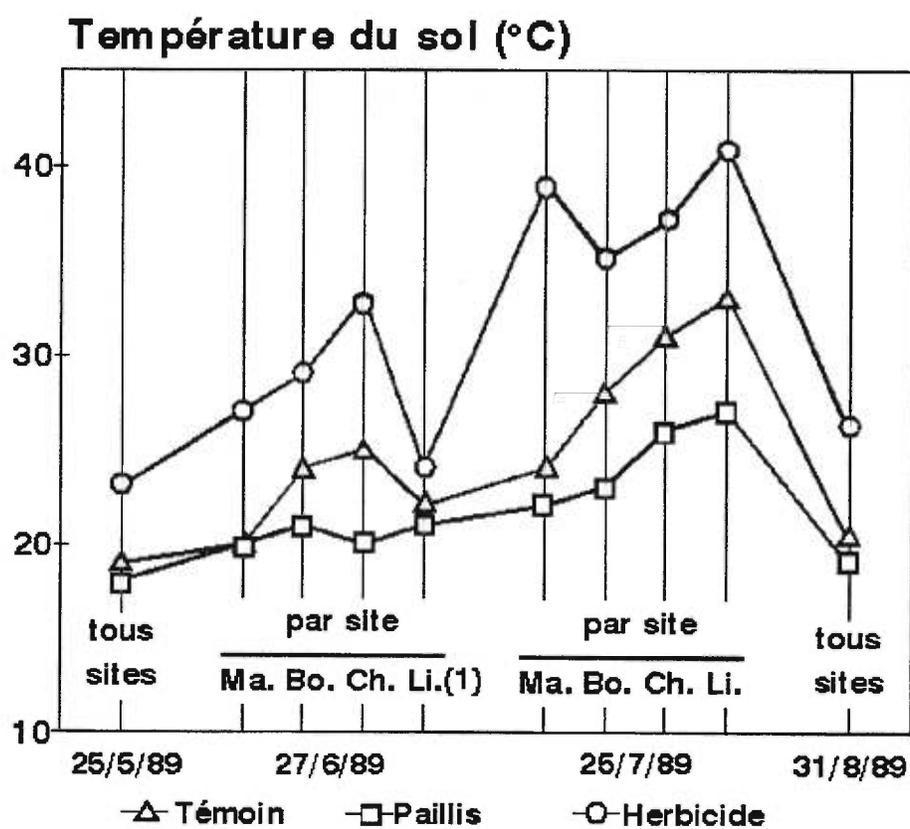


Figure 3. Température du sol à 5 cm de profondeur en fonction des traitements et des sites de plantation. Ma., marin; Bo., bourrelet; Ch., chenail; Li., littoral.

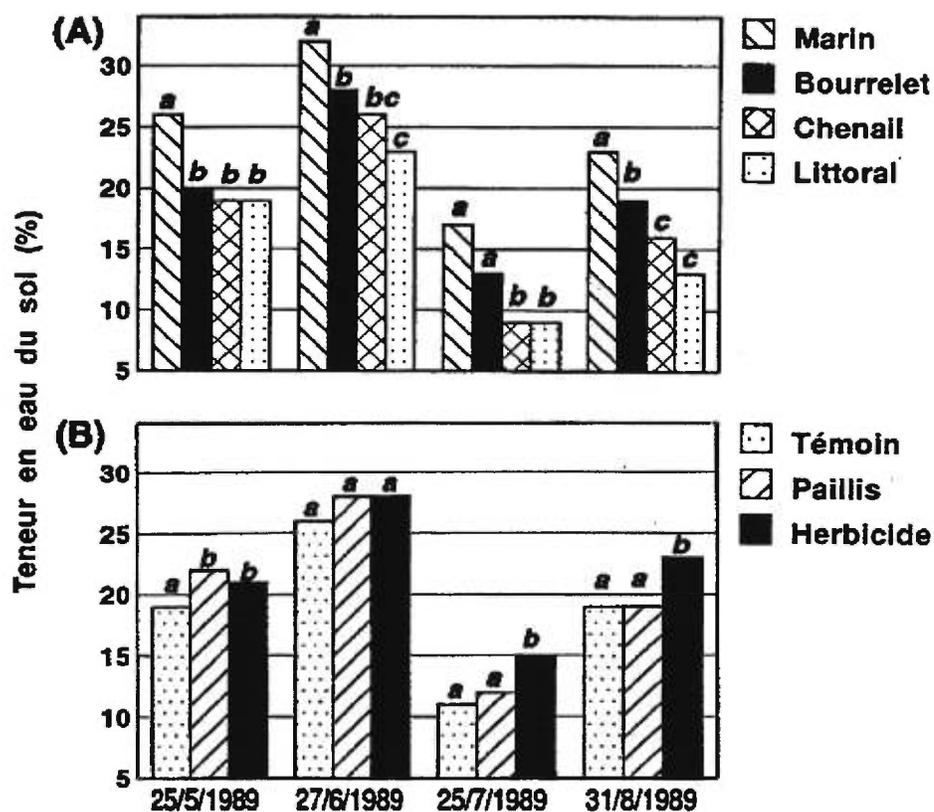


Figure 4. Teneur en eau des sols à 15 cm de profondeur en fonction des sites (A) et des traitements (B). Les moyennes qui ne sont pas affectées de la même lettre sont différentes à $p \leq 0,05$ (test de Tukey). L'effet site a été évalué sur le traitement herbicide seulement et l'effet traitement sur le site chenail seulement.

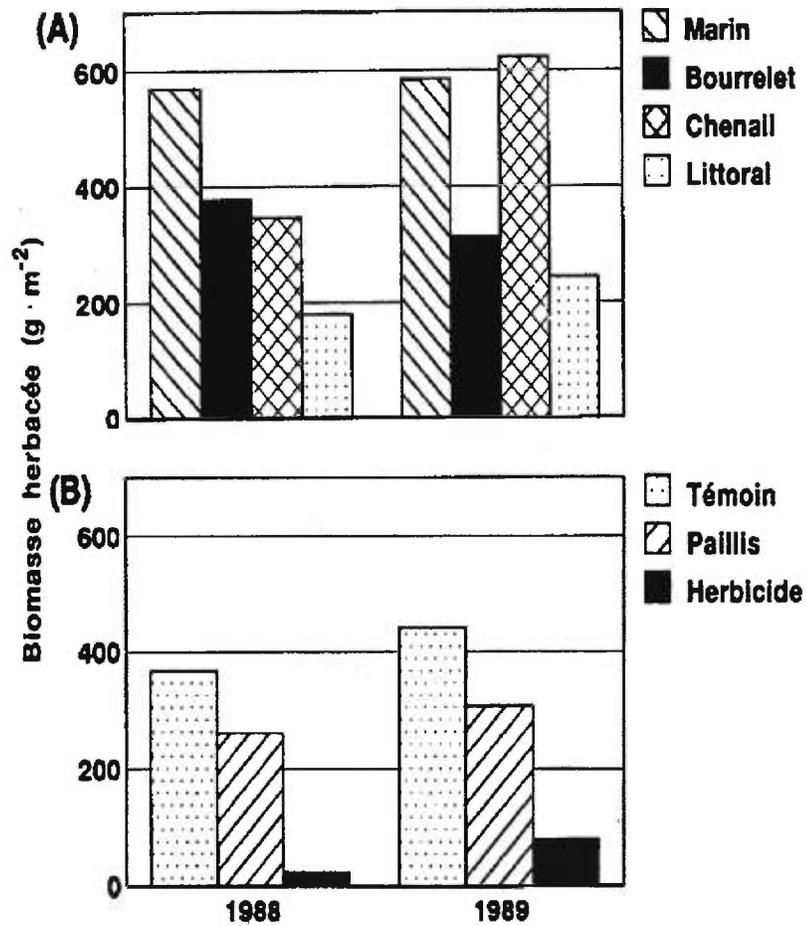


Figure 5. Biomasse herbacée estimée dans les parcelles témoin de chaque site (A) et dans chaque traitement de tous les sites confondus (B).

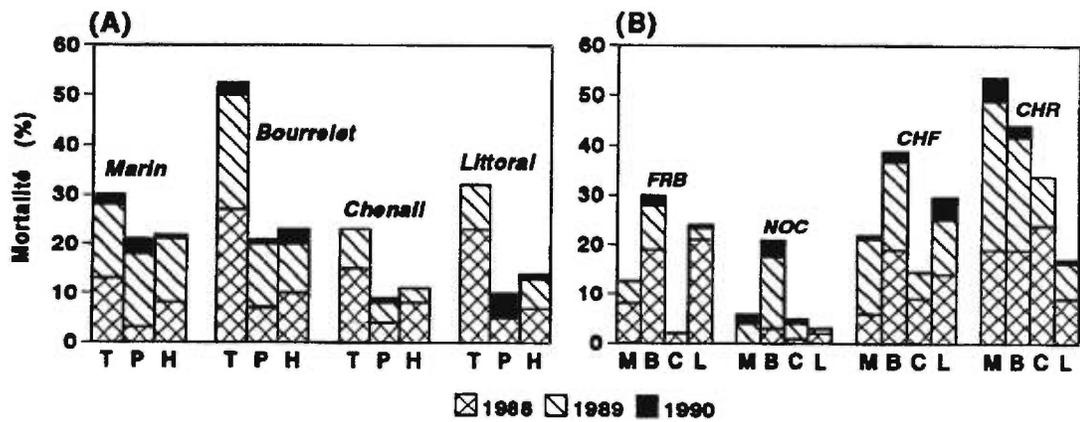


Figure 6. Taux de mortalité des semis de feuillus selon le traitement (A) et selon le site (B). T, témoin; P, paillis; H, herbicide; FRB, frêne blanc; NOC, noyer cendré; CHF, chêne à gros fruits; CHR, chêne rouge; M, marin; B, bourrelet; C, chenail; L, littoral.

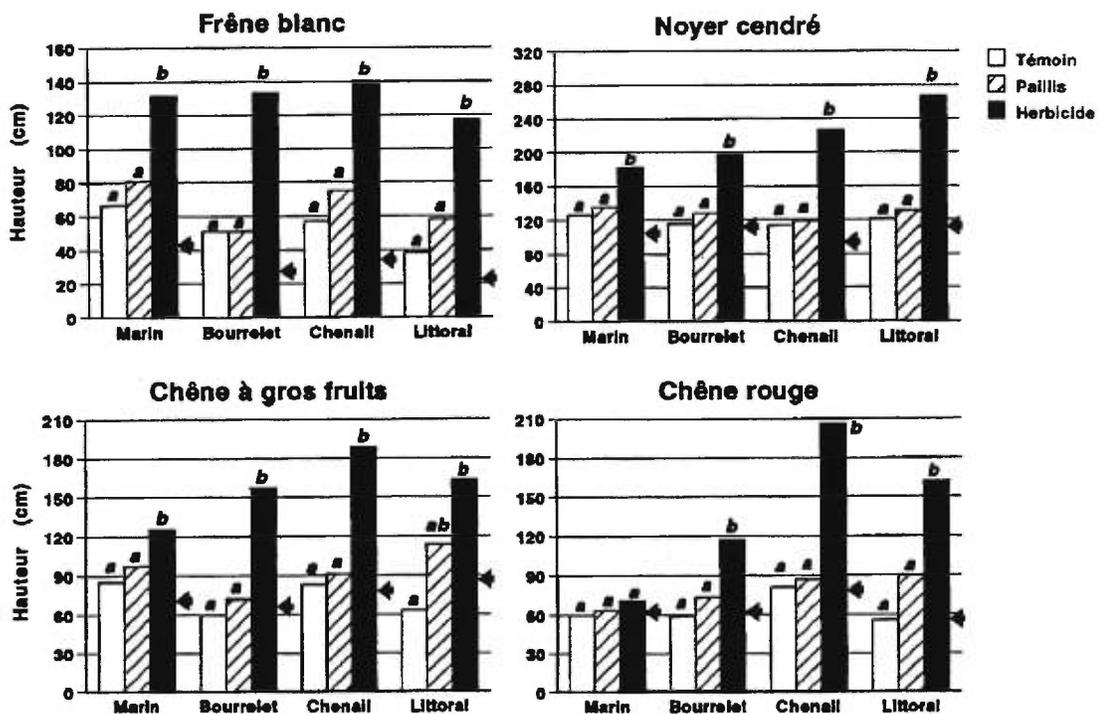


Figure 7. Hauteur moyenne, après trois saisons de croissance, de quatre espèces feuillues sur quatre sites de plantations, en fonction des traitements. Les flèches indiquent la taille moyenne des semis au moment de la plantation. Les moyennes qui ne sont pas affectées de la même lettre sont différentes à $p \leq 0,05$ (test de Bonferroni).

II.8 Bibliographie

- Bailian, L., Allen, H.L. & McKeand, S.E. 1991. Nitrogen and family effects on biomass allocation of loblolly pine seedlings. *Forest Science* 37 : 271-283.
- Bariteau, L. 1988. La carte géomorphologique au 1 :20 000 de modelés polygéniques : un exemple des basses terres du Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal, 185 p.
- Bloom, A.J., Chapin, F. S.III, Mooney, H.A. 1985. Resource limitation in plants - an economic analogy. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 16 : 363-392.
- Bouchard, A., Dyrda, S., Bergeron, Y. & Meilleur, A. 1989. The use of notary deeds to estimate the change in the composition of 19th century forest, in Haut-Saint-Laurent, Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 19 : 1146-1150.
- Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 54 : 464-465.
- Brand, D.G. 1991. The establishment of boreal and sub-boreal conifer plantations : An integrated analysis of environmental conditions and seedling growth. *Forest Science* 37 : 68-100.
- Britt, J.R., Mitchell, R.J., Zutter, B.R., South, D.B., Gjerstad, D.H. & Dickson, J.F. 1991. The influence of herbaceous weed control and seedling diameter on six years of loblolly pine growth-A classical growth analysis approach. *Forest Science* 37 : 655-668.
- Chapin, F.S. 1980. The mineral nutrition of wild plants. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 11 : 233-260.
- Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. *In* : C. A. Black (Ed.), *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy, Madison, WI. pp. 902-904.

- Cogliastro, A., Gagnon, D., Coderre, D. & Bhereur, P. 1990. Responses of seven hardwood tree species to herbicide, rototilling, and legume cover at two southern Quebec plantation sites. *Canadian Journal of Forest Research* 20 : 1172-1182.
- Davies, R.J. 1988. Sheet mulching as an aid to broadleaved tree establishment II. Comparison of various sizes of black polythene mulch and herbicide treated spot. *Forestry (Oxf.)* 61 : 107-124.
- Davies, W.J., Kozlowski, T.T., Chaney, W.R. & Lee, K.L. 1973. Effects of transplanting on physiological responses and growth of shade trees. *Proc. Int. Shade Tree Conf. Vol. 48* : pp. 22-30.
- Delage, M., Gangloff, P., Larouche, A. & Richard, P.J.H. 1985. Note sur un site à macrorestes végétaux tardiglaciaires au sud-ouest de Montréal, Québec. *Géographie physique et Quaternaire* 39 : 85-90.
- Domon, G., Meilleur, A., Bouchard, A. & Gariépy, M. 1987. Le rôle des indicateurs et de la cartographie écologique en aménagement et en gestion du territoire agricole et forestier. 1. Présentation et objectifs de l'étude, méthodologie, description du territoire pilote et dossier cartographique. Centre de recherches écologiques de Montréal, Université de Montréal, p.
- Field, C., Mooney, H. A. 1986. The photosynthesis - nitrogen relationship in wild plants. *In* : T. J. Givnish (Ed.), *On the economy of plant form and function*. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 25-55.
- Fraedrich, S.W. & Ham, D.L. 1982. Wood chip mulching around maples : effects on tree growth and soil characteristics. *Journal of Arboriculture* 8 : 85-89.

- Gauthier, S. & Gagnon, D. 1990. La végétation des contreforts des Laurentides : une analyse des gradients écologiques et du niveau successional des communautés. *Canadian Journal of Botany* 68 : 391-401.
- Globensky, Y. 1987. Géologie des basses terres du Saint-Laurent. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Québec, MM. 85-02. 53 p.
- Hendrickson, O.Q., Robinson, J.B. & Chatarpaul, L. 1985. La microbiologie des sols forestiers : revue bibliographique. Serv. Can. For. Inst. For. Natl., Rap. inf. PI-X-19F. 102 p.
- Ingestad, T. & Agren, G.I. 1991. The influence of plant nutrition on biomass allocation. *Ecological Applications* 1 : 168-174.
- Keeney, D.R. & Nelson, D.W. 1982. Nitrogen-inorganic forms. *In* : A. L. Page, R. H. Miller & D. R. Keeny (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2 Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Madison, WI. pp. 643-698.
- Kramer, P.J. & Kozlowski, T.T. 1979. *Physiology of woody plants*. Academic Press, London.
- Kraske, C.R. & Fernandez, I.J. 1990. Conifer seedling growth response to soil type and selected nitrogen availability indices. *Soil Science Society of America Journal* 54 : 246-251.
- Lopushinsky, W. & Beebe, T. 1976. Relationship of shoot-root ratio to survival and growth of outplanted Douglas fir and ponderosa pine seedlings. U.S. For. Serv. Res. Note PNW 274.
- Margolis, H.A. & Brand, D.G. 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. *Canadian Journal of Forest Research* 20 : 375-390.

- Ministère de l'Environnement du Québec. 1991. Sommaire climatologique du Québec, Station St-Anicet. Direction des réseaux atmosphériques, ministère de l'Environnement du Québec, Québec, sommaires 1988,1989,1990.
- Ponder, F. 1986. Effect of three weeds on the growth and mycorrhizal infection of black walnut *Juglans nigra* seedlings. *Canadian Journal of Botany* 64 : 1888-1892.
- Rowe, J.S. 1972. Les régions forestières du Canada. Ministère de l'Environnement, Service canadien des forêts, Ottawa, ON, Publication no 1300F. 172 p.
- Salisbury, F.B. & Ross, C.W. 1992. Plant physiology. Wadsworth Publishing Company, Inc., Belmont, CA, 682 p.
- SPBRM. 1987. Plan de mise en valeur de la forêt privée. Syndicat des producteurs de bois de la région de Montréal, Montréal.
- Thibault, M. 1985. Les régions écologiques du Québec méridional, (1 : 1 250 000). Service de la cartographie, Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Québec.
- Truog, E. 1930. Determination of the readily available phosphorus of soils. *Journal of American Society of Agronomy* 22 : 874-882.
- Vomocil, J.A. 1965. Porosity. *In* : C. A. Black (Ed.), *Methods of soil analysis*. Partie 1. American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI. pp. 299-314.
- von Althen, F.W. 1985. Revitalizing a black walnut plantation through weed control and fertilization. *Forestry Chronicle* 61 : 71-74.
- von Althen, F.W. 1987. Site preparation and weed control in hardwood afforestation in Ontario. *Proceedings of the 6th Central Hardwood Forest Conference*, Knoxville, 24-26 février 1987. University of Tennessee, Knoxville.

Chapitre III

Is site preparation necessary for bur oak receiving post-planting weed control?

Ce chapitre a fait l'objet d'une publication :

Cogliastro, A., Gagnon, D. & Bouchard, A. 1997. Is site preparation necessary for bur oak receiving post-planting weed control ? *Annales des Sciences Forestières* 54 : 107-116.

III.1 Introduction

A high percentage of the terrain in parts of Southern Québec is recently abandoned agricultural land. Reforestation of these lands with valuable hardwoods is an attractive option. However, in order to establish successful plantations in varied edaphic conditions and vegetation types, the producer must be able to depend on diverse and efficient methods of plantation establishment. These methods must also allow for the individual capabilities and desires of the producer, such as the refusal to use herbicides.

Weed control can produce significant beneficial effects during the growth of crop trees (Nambiar & Sands, 1993). On abandoned farmland, many studies have linked the establishment success and productivity of hardwood plantations with the degree of weed control (von Althen, 1987; Cogliastro *et al.*, 1990; Cogliastro *et al.*, 1993; Truax & Gagnon, 1993). Both mechanical site preparation of abandoned fields, and subsequent post-planting mechanical, chemical or manual weed control treatments are required for landowners to qualify for governmental hardwood reforestation aid programs in Québec (MRN, 1992). The question we are exploring, which has not been sufficiently studied, is the possibility that post-planting weed control could reduce the need for site preparation, or eliminate it altogether. This would be particularly useful on plantation sites where mechanical site preparation may be undesirable or impractical because the soil is too stony, topography that limits machinery accessibility, or presence of other valuable trees on the site.

Glyphosate herbicide and black plastic mulches are post-planting weed control treatments that have produced excellent growth results in hardwood plantations (Fronchot & Lévy, 1980; Davies, 1987; Marineau, 1992; Cogliastro *et al.*, 1993; Truax & Gagnon, 1993). Some of these studies also demonstrate that mechanical site preparation alone is insufficient, and that it is necessary to apply a post-planting weed control treatment. Mechanical or chemical site preparation methods or a combination of both, without subsequent weed control treatments, cannot prevent recolonization by

weeds for more than 1 year (von Althen, 1987).

Although weed control in plantations remains an important forestry problem, the environmental concerns caused by herbicides also need to be addressed. An effort must be made to improve the efficiency of their use in order to reduce the quantities needed. This can be achieved by using post-emergence herbicides, which are rapidly biodegraded, and applying them only on narrow strips near the planted trees, instead of on the entire plantation area (MacRae *et al.*, 1990). Glyphosate (Vision®, Monsanto Canada Inc.) is a non-selective post-emergence herbicide. This herbicide has a demonstrated short persistence in the environment, its average half-life in soils being about two months (Ghassemi *et al.*, 1982).

The purpose of this study is to determine whether either of two recommended site preparation methods are necessary for the survival and growth of bur oak (*Quercus macrocarpa* Michx) seedlings when post-planting weed control is carried out on narrow strips, either by a black plastic mulch treatment or by a glyphosate herbicide treatment. Weed biomass and soil moisture conditions in the various treatments are also presented.

III.2 Methods

III.2.1 Site description

The plantation site is located in the Great Lakes St. Lawrence forest region, St. Lawrence section (Rowe, 1972). The site is within the regional county municipality ("municipalité régionale de comté") of Haut-Saint-Laurent (45° 05'N, 74° 17'W), southwest of Montréal, Québec. A multidisciplinary study of the area (Bouchard *et al.*, 1985), including geomorphology and land use patterns, guided the selection of an experimental site which is typical of the zones with underused forestry potential. At an elevation of 90 m, the site is located on a morainal ridge overlying Beekmantown dolomite bedrock. This sedimentary rock type is the major element in the morainal surficial material of the region (Globensky, 1987).

The soil is a melanic brunisol (cultivated), developed on a sandy loam, of which the particles larger than 2 mm represent 25 to 30 % of soil volume (Canadian Soil Classification Committee, 1978). Soil drainage is good to moderately good. Soil characteristics, measured in 1990 from 30 samples (composite sample of two per experimental unit) taken in the center of each plot between 10 to 20 cm depth, are presented in Table V. The standard soil analysis methods used are described in Cogliastro *et al.* (1990). Soil pH, and Ca and Mg levels are particularly high, reflecting the influence of the dolomitic bedrock in the till. The principal herbaceous weed species are, in decreasing order of abundance : Gramineae, *Vicia cracca* L, *Ambrosia artemisiifolia* L, *Cirsium arvense* (L) Scop., *Achillea millefolium* L, *Trifolium hybridum* L and other minor species.

The region is characterized by an average frost-free period of 182 days. Mean annual temperature is 6.4 °C, and mean monthly temperatures of July and January are 21 °C and -10 °C, respectively. From May to October 1990, the year of plantation establishment, precipitation was generally more abundant than average, with 137 % of normal received. Usually, the mean monthly precipitation is 83 mm from May to October (Ministère de l'Environnement du Québec, 1991).

III.2.2 Experimental design and treatments

The split plot experimental design of the plantation had five replicates (blocks). Within each replicate, three types of site preparation were randomly allocated (plowing-harrowing; plowing-harrowing+simazine herbicide; control). These plots were then separated in two, each half receiving either one of two post-planting weed control treatments (glyphosate; black plastic mulching). No control treatment was included for the sub-plot factor, since the purpose of the study was to evaluate the importance of site preparation, when post-planting weed control treatments are applied. The two site preparation methods used are recommended in the two Canadian hardwood reforestation manuals (von Althen, 1987; MRN, 1992). Plowing and harrowing were

done (two passes) on April 24, 1990 in two blocks, and three days later in the three remaining blocks in the plots of the two types of site preparation (not in the control). One series of plowing and harrowing plots also received a chemical site preparation by an application of pre-emergent simazine herbicide on April 30, 1990. The application was done with a manual backpack sprayer at an application rate of $3.2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Post-planting weed control treatments by the use of glyphosate or black plastic mulch were applied in 120 cm strips over the seedlings rows. Glyphosate was applied once a year (mid-June for 5 years) in plots that had received a site preparation (plowing-harrowing and plowing-harrowing+simazine). In plots without site preparation (control), glyphosate was applied twice in the first year (May & July) and once a year in each of the subsequent four years (mid-June). The black plastic mulching was installed in continuous strips covering the seedling rows, during the two weeks following planting. The strips were pre-cut to allow the stems of the planted seedlings to pass through the plastic.

The application of the glyphosate herbicide (Vision®) was done using a wheeled applicator bearing a wick (60 cm long, 2 cm diameter), inserted at 8 places in a 4.7 liter tubular container. This container was filled with a 50% Vision - 50% water solution. The saturated wick was horizontally positioned on the wheeled applicator at 5-10 cm from the soil surface to moisten weeds with the herbicide solution by passing back and forth once on each side of the seedling rows. This herbicide application method eliminates the drift associated with spraying, which can be deleterious to planted trees, and restricts herbicide application to targeted weeds. A smaller wick, at the end of a hollow plastic stick, was used during the first and second growing seasons to treat weeds in close proximity to the seedlings in order to avoid touching them with the herbicide.

An experimental unit consisted of 48 seedlings of bur oak distributed in 6 rows of 8 seedlings. Spacing was 3 m between rows and 1.5 m between seedlings within a row.

The bare root seedlings were produced at the Berthier nursery of the Québec Ministry of Natural Resources (2 + 0 age; provenance 87-K-73, zone 06). In total, 1440 seedlings (46 cm mean height, 8.5 mm mean basal diameter) were planted by hand on May 1-4, 1990, on the 0.67 ha plantation.

III.2.3 Measurements and statistical analysis

In 1992, an index of soil water content was measured at three dates (July, August, September) and at two depths (20 cm, 40 cm) by measuring *in situ* the relative dielectric constant of the soil (frequency-domain reflectometry; Sentry® 200-AP, Troxler Elec. Lab. Inc., U.S.A.), which is directly influenced by its water content (Rundel & Jarrell, 1989). These measurements were taken within seedling rows in two randomly selected experimental blocks, and in two site preparation types (control and mechanical site preparation). Water content was expressed as a percentage of soil volume.

For each of the site preparation types, in three randomly selected experimental blocks, weed biomass was measured from harvests done at two sampling positions in the experimental design : between tree rows (no post-planting weed control at that position) of i) glyphosate herbicide experimental units and ii) plastic mulch experimental units, as well as within tree rows (post-planting weed control) of herbicide experimental units. Because the plastic mulching prevents all growth of weeds within the tree rows, weed biomass sampling was omitted at that position. All samples were collected at the end of August 1991 and 1993. Aerial parts of weeds were clipped in 0.25 m² plots located in the middle of the experimental units. Samples were dried at 70 °C for 72 hours and then weighed.

The basal diameter and the height of all oak seedlings were measured between August 25 and September 10 after each growing season (except the fourth). A repeated measures ANOVA was used to perform the analysis of the repeated diameter and height data means per row (1990, 1991, 1992, 1994). ANOVAs were also run for soil water

content and weed biomass. For the soil water content data, sampling date factor and all interactions with the other factors were added to the model and a MANOVA was done on the two sampling depths. Tukey's multiple comparison test was used. The normal distribution criterium was not met in the 1990 weed biomass data, and non-parametric rank transformation was used. All statistical analyses were performed on SAS (SAS Institute Inc., 1989).

III.3 Results

No statistically significant differences in soil water content were detected in relation to the type of site preparation used ($F = 1.00$; $P = 0.50$). Mean soil water content was higher under black plastic mulching ($F = 39$; $P = 0.10$). Although this result is not statistically significant, but only by a narrow margin, it indicates an effect of the plastic mulch (Figure 8).

No significant effect of site preparation on weed biomass was detected in 1990 ($F=0.25$; $P=0.79$) and 1992 ($F=0.63$; $P=0.58$). Weed biomass within the glyphosate treated rows was reduced, by 63 % in 1990 and by 50 % in 1992, when compared to the biomass measured between rows (Figure 9). Weed biomass between plastic mulch treated rows was 1.9 times that of weed biomass between glyphosate treated rows in 1992 (Figure 9).

III.3.1 Growth and survival of bur oak

Survival of bur oak seedlings after five growing seasons was high, varying from 93% to 96% (all site preparation types or post-planting weed control treatments pooled). The repeated measures ANOVA of bur oak size shows a highly significant difference in the trends of the diameter and height curves obtained with the different site preparation methods (year x site preparation interaction), as well as with the two post-planting weed control treatments (year x treatment interaction) (Table VI; Figure 10). The bur oak seedlings attained the greatest sizes, in diameter and height, when simazine herbicide

was used in conjunction with the mechanical soil preparation (Figure 10). This advantage generally appeared after two growing seasons (Figure 10). Without simazine application, the growth of the seedlings was similar whether or not soil mechanical preparation was done (Figure 10). Post-planting weed control achieved by black plastic mulching produced the greatest seedling growth in comparison to glyphosate application (Figure 10).

III.4 Discussion

After five years of post-planting weed control treatments, tree growth was not improved by mechanical site preparation alone, but only when combined with chemical (simazine) site preparation. The strong effect of simazine use on bur oak size confirms the well known positive relationship between the productivity of planted hardwoods and the degree of weed control efforts. The advantage of mechanical site preparation has often been described in studies of hardwood plantations (von Althen, 1977; von Althen, 1984; von Althen, 1987; Cogliastro *et al.*, 1990). Such reports come from studies of abandoned farmland, where soils are usually derived from lacustrine or marine surficial materials, and have a high percentage of clay and silt particles. Plowing and disking (or harrowing) may have a greater beneficial effect when they are performed on a heavy textured soil, resulting in improved soil aeration before plantation establishment. Brais *et al.* (1989) detected an increase in the macroporosity of a clay soil following mechanical site preparation. The beneficial effects of soil mechanical preparation on soil structure may be of lesser value on sandy loam soils of stony morainal surficial materials (as is the case of the plantation discussed here), which are relatively resistant to compaction by agricultural machinery. Clay soils, which are also usually poorly drained, are the most sensitive to compaction (Doucet, 1992).

No reduction of weed biomass by site preparation types was detected as a possible causal factor for the strong positive effect on tree growth demonstrated by the addition of simazine to mechanical site preparation. The degree of competitive pressure by

weeds on planted trees is a function of several characteristics such as weed species composition, height, density, distribution patterns, and weed longevity. These factors were not included in the variables we sampled and may have been affected by simazine use.

Weed biomass between plastic mulch treated rows was higher than in between rows of glyphosate treated plots in 1992. Increases in weed biomass at the margin of black plastic mulch was also noted by others (Davies, 1988; Truax & Gagnon, 1993). This appears to be linked to the fact that weeds benefit from increased water and nutrient resources, which they tap from under the mulch with their root systems, although their aerial structures are restricted to the edges of the mulch. In spite of this probable underground competition, the 120 cm wide strips of black plastic mulching produced significantly larger tree sizes than the wick application of glyphosate after 5 years of growth. Mulching has also been shown by Lambert *et al.* (1994) to have a positive effect on bur oak seedlings growth. Black plastic mulching is well known for producing a soil temperature increase (Brand & Janas, 1988; Marineau, 1992; Truax & Gagnon, 1993). Several studies have shown the effects of this increased soil temperature in improving the growth of tree seedlings, possibly by reducing the viscosity of soil water, thus increasing its availability along with nutrients in the soil solution (Brand & Janas, 1988; Cogliastro *et al.*, 1993). Also, as shown in this study, the mean soil water content was higher under plastic mulch.

The use in this study of a wick applicator for glyphosate herbicide has allowed a reduction of weed biomass, in the first growing season, comparable to the 70% reduction obtained in a nursery by Chandler and Filer (1980) using similar equipment. However, the efficiency of this method was reduced in the third growing season (1992). This may be attributed in part to an increase in weed species that are more resistant to glyphosate. We have observed an increase in the abundance of *Cirsium arvense* (L.) Scop., known to be very resistant to glyphosate (Carlson and Donald, 1988), and of *Cirsium vulgare* (Savi) Tenore on herbicide treated strips (A. Cogliastro, personal

observation).

Davies (1988) has shown a better efficiency of polyethylene mats over herbicide spot spraying, when the area treated was larger than 1 m². A 3 year comparative analysis of the costs of using 1 m² of black plastic mulching or glyphosate herbicide (by spraying at the periphery of planted hardwoods), both methods having produced the same growth results after 3 years, showed that the use of the herbicide was 20% cheaper (Marineau, 1992). However, this cost analysis did not include the future disposal of the plastic, which should not be left to degrade in the environment. Also, 5 years of treatment, as in the present study, include extra herbicide costs for each additional year of application, whereas the plastic costs are covered once at the onset and the effect lasts many years (> 5 years).

III.5 Conclusion

Site preparation by plowing and harrowing could be eliminated for young bur oak plantations on a stony sandy loam soil, when 120 cm strips of black plastic mulching or wick application of glyphosate are used as post-planting weed control treatments during the first 5 years of growth. However, the combination of simazine herbicide application with the mechanical soil preparation allows an increase in the beneficial effects of post-planting weed control treatments on bur oak growth. The single application of a persistent pre-emergence herbicide like simazine, once in an hundred year rotation hardwood plantation system, resulted in a significantly divergent young tree growth curve, which forecasts a permanent effect on productivity. Post planting weed control treatment by the plastic mulch produced larger oak seedling diameter and height when compared to those obtained with the wick application of glyphosate. However, the high survival rate and the year to year size increment of trees treated by wick application of glyphosate were sufficient to declare this treatment successful as well.

III.6 Acknowledgements

We are very thankful to Andrée Hallé for her help in preparing the manuscript. We also thank Sophie Grignon and Kim Marineau for their help in the field and in the lab, as well as Stéphane Daigle for his contribution to the statistical analyses. We gratefully acknowledge funding received from the Québec Ministry of Natural Resources through a research grant. We sincerely thank Daniel Leblanc, proprietor of the plantation site, for his involvement in this project. Dr. Guy Paquette, from Monsanto Canada Inc., kindly provided us with Vision herbicide. The manuscript was improved through the suggestions and comments of two anonymous reviewers.

Table V. Soil characteristics of the experimental site, measured in 1990.

	Extractable cations							pH		
	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	NH ₄	NO ₃	P ^a	Ca		K	Mg
Mean (n=30)	66	19	15	1.4	13	39	6.9	0.21	4.0	7.8
Coefficient of variation (%)	3	9	8	52	39	33	34	17	15	2

^a Available phosphorus

Table VI. Repeated measures ANOVA of the diameter and the height of seedlings (1990, 1991, 1992, 1994).

Source	df	Diameter			Height		
		MS	F	P	MS	F	P
Year (Y)	3	43.47	2213.8	0.0001	124462	1394	0.0001
Y x block (B)	12	0.16	8.2	0.0001	1274	14.3	0.0001
Y x site preparation (P)	6	1.18	21.7	0.0001	3751	24.3	0.0001
Y x B x P	24	0.05	2.8	0.0001	154	1.7	0.0184
Y x post-planting weed control treatment (T)	3	1.40	20.1	0.0001	6676	25.3	0.0001
Y x B x T	12	0.07	3.5	0.0001	264	2.9	0.0006
Y x P x T	6	0.05	2.4	0.0630	129	2.2	0.0772
Y x B x P x T	24	0.02	1.2	0.2730	59	0.6	0.8929
Error	450	0.02			89		

df : degrees of freedom; MS : mean square.

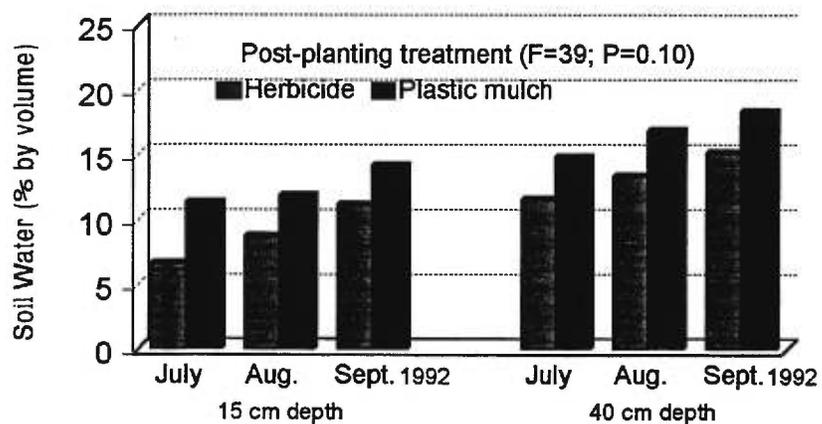


Figure 8. Soil water content in 1992 at two depths in the glyphosate herbicide and black plastic mulching post-planting treatments. Measurements were obtained by in situ frequency-domain reflectometry.

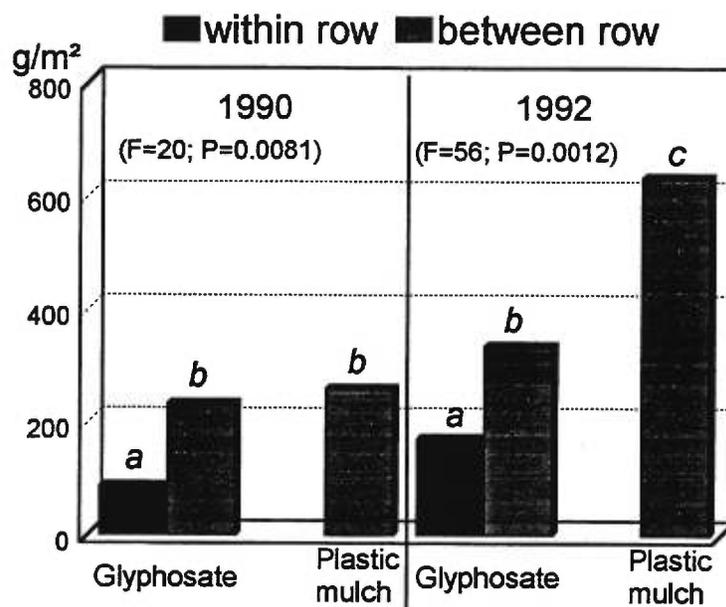


Figure 9. Weed biomass in experimental units with glyphosate herbicide and black plastic mulching post-planting treatments (1990 and 1992). Means within each year followed by different letters are significantly different at $P \leq 0.05$.

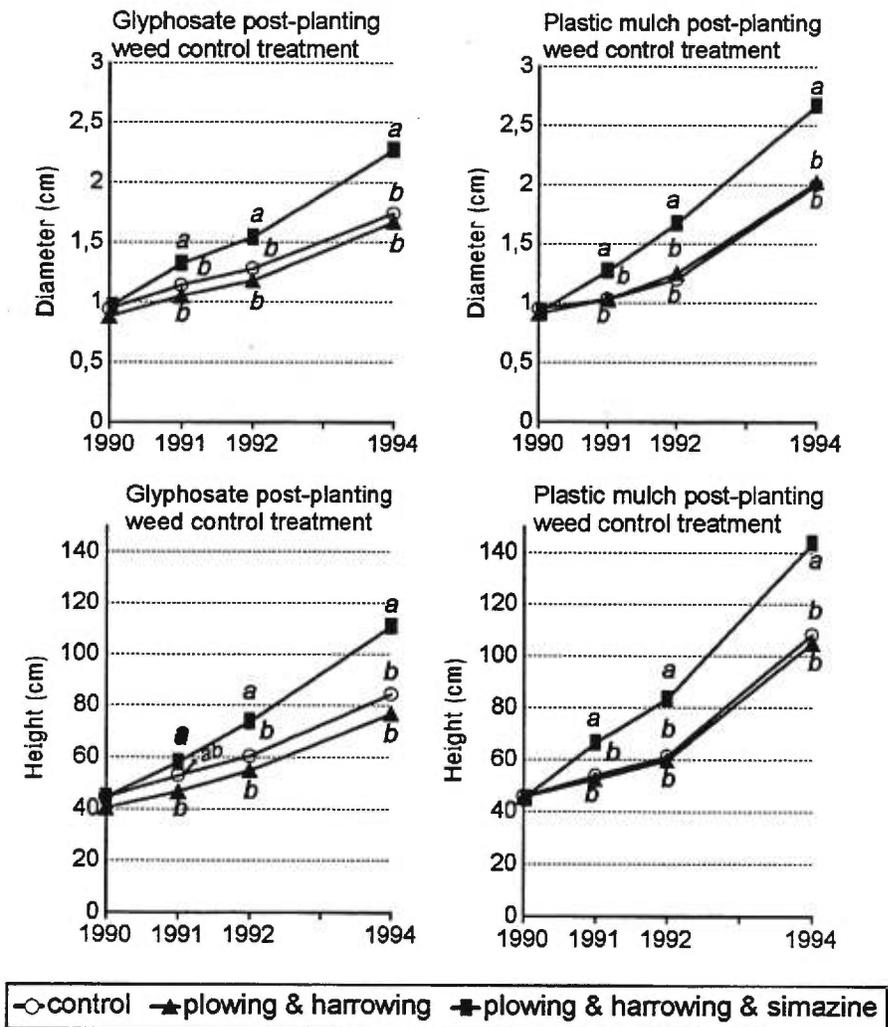


Figure 10. Diameter and height growth curves of bur oak seedlings in site preparation types for each post-planting weed control treatments. Means within each year followed by different letters are significantly different at $P \leq 0.05$.

III.7 References

- Bouchard, A., Bergeron, Y., Camiré, C., Gangloff, P. & Gariépy, M. 1985. Proposition d'une méthodologie d'inventaire et de cartographie écologique : le cas de la MRC du Haut-Saint-Laurent. Cahiers de géographie du Québec 29 : 79-95.
- Brais, S., Bhéreur, D., Gagnon, D. & Coderre, D. 1989. Effets de différentes pratiques sylvicoles et de l'introduction de vers de terre sur la structure du sol en plantations de feuillus. Canadian Journal of Soil Science 69 : 705-709.
- Brand, D.G. & Janas, P.S. 1988. Growth and acclimation of planted white pine and white spruce seedlings in response to environmental conditions. Canadian Journal of Forest Research 18 : 320-329.
- Canadian Soil Classification Committee. 1978. Canadian soil classification system. Ministry of Agriculture Canada, Publication no 1646. p.
- Carlson, S.J., Donald, W.W. 1988. Glyphosate effects on Canada thistle (*Cirsium arvense*) roots, root buds, and shoots. Weeds Research 28 : 37-45.
- Chandler, J.M. & Filer, T.H. 1980. New Applicators for Weed Control in Forest Nurseries and Plantations. Southern Nursery Conference. USDA Forest Service. Atlanta, GA. pp.
- Cogliastro, A., Gagnon, D. & Bouchard, A. 1993. Effet des sites et des traitements sylvicoles sur la croissance, l'allocation en biomasse et l'utilisation de l'azote de semis de quatre espèces feuillues en plantations dans le sud-ouest du Québec. Canadian Journal of Forest Research 23 : 199-209.
- Cogliastro, A., Gagnon, D., Coderre, D. & Bhéreur, P. 1990. Responses of seven hardwood tree species to herbicide, rortotilling, and legume cover at two southern Quebec plantation sites. Canadian Journal of Forest Research 20 : 1172-1182.

- Davies, R.J. 1987. Trees and weeds. Forestry Communication. Handbook 2. H.M.S.O., London, p.
- Davies, R.J. 1988. Sheet mulching as an aid to broadleaved tree establishment II. Comparison of various sizes of black polythene mulch and herbicide treated spot. Forestry (Oxf.) 61 : 107-124.
- Doucet, R. 1992. La science agricole : climat, sols et productions végétales du Québec. Éditions Berger, Eastman (Québec), 699 p.
- Fronchot, H. & Lévy, G. 1980. Facteurs limitants de la croissance initiale d'une plantation de merisier sur rendzine brunifiée. Ann. Sci. For. 37 : 239-248.
- Ghassemi, M., Quinlivan, S. & Dellarco, M. 1982. Environmental effects of new herbicides for vegetation control in forestry. Environ. Int. 7 : 389-401.
- Globensky, Y. 1987. Géologie des basses terres du Saint-Laurent. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Québec, MM. 85-02. 53 p.
- Lambert, F., Truax, B., Gagnon, D. & Chevrier, N. 1994. Growth and nutrition, monitored by enzyme assays, in a hardwood plantation; effects of mulching materials and glyphosate application. Forest Ecology and Management 70 : 231-244.
- MacRae, R.J., Hill, S.B., Henning, J. & Bently, A.J. 1990. Policies, programs and regulations to support the transition to sustainable agriculture in Canada. Am. J. Alt. Agr. 5 : 76-92.
- Marineau, K. 1992. Effet de la répression des herbacées à l'aide d'herbicide et de paillis de plastique sur la croissance du chêne rouge et du frêne rouge. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal, p.

- Ministère de l'Environnement du Québec. 1991. Sommaire climatologique du Québec, Station St-Anicet. Direction des réseaux atmosphériques, ministère de l'Environnement du Québec, Québec, sommaires 1988,1989,1990. p.
- MRN. 1992. Programme d'aide à la mise en valeur des forêts privées. Cahier d'instructions (normes techniques). Service de mise en valeur des forêts privées. Ministère des forêts du Québec, 201 p.
- Nambiar, E.K.S. & Sands, R. 1993. Competition for water and nutrients in forests. *Canadian Journal of Forest Research* 23 : 1955-1968.
- Rowe, J.S. 1972. Les régions forestières du Canada. Ministère de l'Environnement, Service canadien des forêts, Ottawa, ON, Publication no 1300F. 172 p.
- Rundel, P.W. & Jarrell, W.M. 1989. Water in the environment. *In* : J. E. Ehrlinger, R. W. Pearcy, H.A. Mooney & P.W. Rundel (Eds.), *Plant physiological ecology*. Chapman and Hall, London, UK. pp. 29-56.
- SAS Institute Inc. 1989. SAS/STAT™ User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Volume 1. SAS Institute Inc., Cary NC, 943 p.
- Truax, B. & Gagnon, D. 1993. Effects of straw and black plastic mulching on the initial growth and nutrition of butternut, white ash and bur oak. *Forest Ecology and Management* 57 : 17-27.
- von Althen, F.W. 1977. Site preparation prevents reopening of planting slits in heavy-textured soils. *Forestry Chronicle* 53 : 166-167.
- von Althen, F.W. 1984. Mowing versus mechanical or chemical weed control in Sugar Maple afforestation. *Tree Planters' Notes* 35 : 28-31.

von Althen, F.W. 1987. Site preparation and weed control in hardwood afforestation in Ontario. Proceedings of the 6th Central Hardwood Forest Conference, Knoxville, 24-26 février 1987. University of Tennessee, Knoxville. pp.

Chapitre IV

Experimental determination of soil characteristics optimal for the growth of ten hardwoods planted on abandoned farmland

Ce chapitre a fait l'objet d'une publication :

Cogliastro, A., Gagnon, D. & Bouchard, A. 1997. Experimental determination of soil characteristics optimal for the growth of ten hardwoods planted on abandoned farmland. *Forest Ecology and Management* 96: 49-63.

IV.1 Introduction

Reforestation with valuable hardwood species should be considered as one of the best solutions to increasing the value of former farmland. Research carried out on the establishment of hardwood plantations on abandoned fields (Davies, 1988; Cogliastro *et al.*, 1990; von Althen, 1990; Cogliastro *et al.*, 1993; Truax & Gagnon, 1993; Dumont, 1995; Cogliastro *et al.*, 1997) provides useful guidelines for silvicultural treatments. However, principles guiding the selection of species for particular site conditions are lacking. Valuable hardwoods are now planted over a wide range of abandoned agricultural soils, without prior knowledge of which species will insure an optimal productivity on each site (Klinka & Feller, 1984).

The biophysical characteristics of the natural hardwood forests of southern Québec are abundantly described in the literature (Bouchard, 1979; Gagnon & Bouchard, 1981; Domon *et al.*, 1986; Bergeron *et al.*, 1988; St-Jacques & Gagnon, 1988; Gauthier & Gagnon, 1990; Meilleur *et al.*, 1994). These studies supply useful information on the ecology of tree species. Forest site ecological classification systems, which have been developed extensively in Canada in recent years, are also available (Jones *et al.*, 1983; Bergeron *et al.*, 1992; Bowling & Zelazny, 1992; Sims & Uhlig, 1992). However, all of these studies and systems, as well as some reviews on trees (Fowells, 1965; Hightshoe, 1988; Burns & Honkala, 1990), are based on the observation and analysis of naturally regenerated forest communities. These references are probably not entirely adequate in providing information pertinent to the artificial hardwood reforestation of abandoned farmland, where ecological conditions are very different from those found in forests.

Ecological conditions of former agricultural land are characterized by their unprotected exposure to occasional adverse climatic conditions, as well as by particular soil conditions which are linked to their past agricultural history. Furthermore, weed control measures will also influence site carrying capacity, as will fertilizer applications.

In this context, the selection of hardwood species should be based on the probability of their successful establishment and growth on abandoned farmland sites, verified in field trials on different edaphic conditions. This would also allow an objective calibration of ecological classification systems (Munson & Timmer, 1989).

The objectives of this study are to (1) compare the growth of the seedlings of 10 hardwood species planted on abandoned farmland differing in edaphic characteristics, and (2) examine relationships between soil moisture and nutrient variables and tree growth. The experimental design used allows an objective analysis of the edaphic requirements and tolerances of 10 hardwood species. Guidelines for selecting optimal tree species for individual abandoned farmland reforestation sites will also be produced.

The study was carried out in the Upper St. Lawrence region of south-western Québec, where intensive forest exploitation and land-use transformation during the last century have depleted stocks of most valuable hardwood species (Bouchard *et al.*, 1989; Simard & Bouchard, 1996). This region has been studied since 1982 (Bouchard *et al.*, 1985), and the data on biophysical characteristics acquired by a multidisciplinary team (Bariteau, 1988; Brisson, 1992; Domon *et al.*, 1993; Meilleur *et al.*, 1994), in conjunction with data from experimental hardwood plantations (this study, ; Cogliastro *et al.*, 1993; Cogliastro *et al.*, 1997), should allow the development of a sound reference system on which to base forest management options for the region.

IV.2 Methods

IV.2.1 Experimental design

The 8 plantation sites were selected to represent different edaphic conditions using the existing data on the geomorphology of the study area (Bariteau, 1988; Meilleur *et al.*, 1994). The sites are distributed along a 40 km east-west axis (north-south maximal displacement from this axis is 10 km), thus insuring common climatic conditions to all sites. The sites are also distributed over the two major geological units of the region :

dolomitic bedrock (Beekmantown group) in the western section and sandstone (Potsdam group) in the eastern section (Fig. 11). The surficial material overlaying the sandstone sites (B & I) is shore and nearshore deposits (Eluviated Sombric Brunisol (Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey, 1987); Umbric Dystrochrept (Soil Survey Staff, 1992)). Surficial materials of the dolomitic sites are more varied. Two sites (M1 & M2) are on deep late-glacial beach deposits (Orthic Humo-Ferric Podzol; Typic Haplothord); two others (L1 & L2) are heterometric till on bedrock (Orthic Melanic Brunisol; Typic Eutrochrept); one (P) is on a morainic ridge (Gleyed Eutric Brunisol; Aquic Eutrochrept); and a last one (D) is on a marine deposit (Orthic Humic Gleysol; Typic Humaquept) (Mailloux & Godbout, 1954; Bariteau, 1988; Delage & Gangloff, 1993; Lamontagne & Nolin, 1997).

Ten species of valuable hardwoods were included in the experimental design : sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.), silver maple (*Acer saccharinum* L.), yellow birch (*Betula alleghaniensis* Britton), bitternut hickory (*Carya cordiformis* (Wang.) K. Koch.), white ash (*Fraxinus americana* L.), red ash (*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.), butternut (*Juglans cinerea* L.), black walnut (*Juglans nigra* L.), bur oak (*Quercus macrocarpa* Michx.) and red oak (*Quercus rubra* L.).

The experimental design has 23 blocks (replicates) of 1000 m², of 250 seedlings, for a total of 5750 planted seedlings. Each block has the 10 hardwood species, distributed randomly in groups of 25 individuals per species (5 rows of 5 seedlings). Throughout, the spacing is 2 m between seedlings within rows and 2 m between rows. Seven of the plantation sites have 3 blocks, while the eighth had only two blocks (due to a lack of room for a third). On two of the sites, silver maple was planted in only two blocks, as were also black walnut and sugar maple on one other site. Butternut was planted in only one block on one of the sites. However, to maintain the general layout of the plantation, the empty spaces created were filled with seedlings of other species available in abundance.

The seedlings were all planted manually during the first week of May, 1991. The high stone content of some of the sites made mechanical site preparation arduous, and it was therefore omitted for all sites. We have already shown elsewhere that initial mechanical site preparation could be avoided when post-plantation weed control is applied (Cogliastro *et al.*, 1997). The planted seedlings varied in mean height from 15 to 35 cm, and were all of bareroot stock, except for yellow birch which was supplied in containers. All seedlings came from the Berthierville provincial government nursery. Seedlings of relatively small size were chosen in order to reduce the effect of initial size differences. The entire area of each block was sprayed with glyphosate after planting, during the last week of May and the first week of June, 1991. The application rate varied from 4 to 8 l/ha, depending on weed densities. During the same period of the second year (1992), glyphosate was applied in a 60 cm strip on each side of tree rows. In the third year (1993), spiral plastic protectors were installed to protect the seedlings from rodent damage. During that same year, a 0.81 m² (0.9m x 0.9 m) cardboard-type mulch (CellufibTM manufactured by Cascades Etcán Inc.) was installed at the base of each live seedling and glyphosate was applied at the margins with a wick applicator (8-16 June, 1993). The wick application of glyphosate was repeated in 1994.

IV.2.2 Soil characteristics

During the first growing season (1991), 5 soil samples per block were systematically collected between 10 to 20 cm depth. The pH of the samples was determined in a 2 :1 water and soil solution with a glass electrode pH-meter. Cations were extracted with ammonium acetate (Chapman, 1965) and concentrations were determined on an atomic absorption spectrophotometer. The results were used to calculate cation exchange capacity (C.E.C.). Part of each sample was ground and passed through a 150 µm sieve to determine available phosphorous. Solutions were extracted from these samples using Truog's (1930) procedure. Nitrate and NH₄ were determined from extractions of fresh soil samples with a 2M KCl solution (Keeney & Nelson, 1982). NO₃, NH₄ and available P concentrations were colorimetrically determined with a flow injection

spectrophotometer (Tecator Fiastar™ Analyzer).

Field capacity was evaluated gravimetrically in 1992 using a wetting-drying cycle of 48 hours on a water saturated soil sample placed on a bed of silica (from an intact soil sample taken in each block with a double cylinder soil corer). Stoniness was measured in each block by digging out a 1 m² by 50 cm deep soil pit, and weighing the different stone size-class fractions. During the third growing season (1993), five soil samples were again taken in each block, and made into a composite sample. This is justified by our 1991 results which had revealed low coefficients of variation in concentrations of NO₃ (cv=30%) and NH₄ (cv=34%) within a block. These variations are lower than those commonly found forest soils (Binkley & Vitousek, 1989). Part of this composite sample was used to determine percent organic matter content by loss on ignition. Measurements of NO₃ and NH₄ were again made on a fresh sub-sample of the composite sample. The mean of the 1991 and 1993 NO₃ and NH₄ concentrations was used in the statistical analyses.

Measurements of soil water content were made per unit of soil volume on 8 dates (7, 23, 25 June; 8, 28 July; 9, 27 August; 11 September) in 1993, in each block at two depths (20 cm and 40 cm). This was done by measuring the dielectric constant of the soil using a Time Domain Reflectometry sensor (Sentry Inc.). The mean of 16 measurements (8 dates x 2 depths) for each block was used in the statistical analyses. As an indicator of soil water drainage capacity, a soil water content measurement was obtained from the June 25 data, which was collected 48 hours following a heavy continuous three day rainfall (21-23 June, 1993), which totaled 51 mm, or 45% of the average total monthly precipitation (Ministère de l'Environnement du Québec, 1993). Drainage class was determined from a soil profile dug in each block, using field determination keys (Bates *et al.*, 1985) and the Munsell soil colour charts.

IV.2.3 Statistical analysis

In order to be able to interpret tree growth results in relation to soil factors, a complete linkage cluster analysis (SAS Institute Inc., 1989) was used to examine how all 23 blocks could be segregated into a number of groups representing distinct edaphic conditions. The following soil variables were selected for this analysis : percent sand, percent clay, stoniness, C.E.C., mean water content per unit of soil volume, 48 hr soil water drainage capacity, pH, percent organic matter, NO₃ and NH₄ concentrations, available P and field capacity.

A frequency analysis of live trees, using a log-linear model (PROC. CATMOD) (SAS Institute Inc., 1989) was done to analyze survival. For a multiple comparison of frequencies, the data were centered and reduced, and transferred on a normal distribution in order to verify if they were significantly higher or lower than expected, assuming an independence of factors hypothesis. ANOVA and Tukey's multiple comparison test were applied to the height and basal diameter data after four growing seasons. With the height data, normality was not obtained for bur oak and sugar maple in spite of a non-parametric rank transformation. Normality was obtained for yellow birch with a rank transformation of height data. Height data for the other species respected the normality condition. In the case of basal diameter data, four species did not meet the normality condition in spite of a non-parametric rank transformation. However, in all cases where normality was not obtained, the P values associated with the soil condition effect were always highly significant ($p=0.0001$), indicating a very low likelihood of error of rejecting the main hypothesis.

In order to analyze the relationship between tree growth and edaphic variables, a principal factor analysis (PROC FACTOR) (SAS Institute Inc., 1989), sometimes called an exploratory or reconnaissance analysis (Kaiser, 1970), was used. The measure of sampling adequacy (MSA) developed for factorial analyses (Kaiser & Cerny, 1974; Cerny & Kaiser, 1977) was also used. The MSA allows a measurement of the degree

to which a variable belongs to a family of variables (Kaiser, 1970). The fit of a variable into a group is adequate when the MSA value reaches 0.8, acceptable at 0.7, poor at 0.5, and unacceptable below 0.5. Variables with a MSA value lower than 0.5 must be withdrawn from the analysis.

Multicollinearity between the edaphic variables was first examined with Pearson correlation coefficients. This allowed us to reduce the number of variables used in the factorial analysis. For example, cation exchange capacity (CEC) was removed because it was highly correlated to pH (0.88; $p=0.0001$), and field capacity was also removed because it was highly correlated to the 48 hours soil water drainage capacity indicator (0.76; $p=0.0001$). The pH, percent clay content and nitrate concentration were retained even though they were correlated. This choice was made because of the interest in examining the importance of the two inorganic forms of N in relation to tree growth, and because managers can easily measure pH and estimate clay content. Phosphorus was removed because it was not correlated to height or basal diameter in the tree species. Preliminary factorial analyses allowed for the removal of stoniness and percent organic matter, which had MSA values below 0.5.

The final group of variables selected for the factorial analyses is composed of seven variables describing soil water and nutrient availability for the 23 experimental blocks, and one variable representing either the mean height or the mean basal diameter attained by each species after four years of growth. Ten factorial analyses were run, one per species, for both size variables. In order to synthesize the presentation of the results, all analyses were overlaid on a single figure for height and a single figure for basal diameter. The position of the axes for each edaphic variable varied minimally between species, since the same edaphic data were used for each of the 10 species in each experimental block. For butternut, the NH_4 variable was removed from the height factorial analysis, as were NH_4 and the 48 hr drainage capacity indicator from the basal diameter factorial analysis; the MSA value of these variables was inferior to 0.5.

IV.3 Results

IV.3.1 Soil conditions

The groups of soil conditions produced by cluster analysis are shown in Figure 12. The analysis first segregated experimental blocks belonging to the different plantation sites (except for site-block I-3) at a maximum normalized distance of 0.56. A selection threshold of ≤ 0.81 normalized distance allows the recognition of 6 groups. Four of these groups correspond exactly to four different plantation sites (L1, L2, P, D), and are thus made up of the three experimental blocks of each site respectively. The other two groups are each made up of blocks from more than one plantation site. However, for subsequent analyses, we assigned block I-3 to the first group already containing blocks I-1 and I-2. It is possible that some abiotic variables which were not measured might have augmented the similarity of the three blocks of site I, evidently in close spatial proximity.

Table VII contains means of the soil variables measured for each group of blocks. The 6 different groups are named after the type of surficial material (and in some cases, the soil moisture regime) they represent : group 1, stony littoral; group 2, sandy beach; group 3, dry-mesic moraine; group 4, mesic moraine; group 5, morainic ridge; group 6, wet marine.

IV.3.2 Survival and growth

White ash, red ash and silver maple had survival rates above 70% in all soil conditions (Fig. 13). The survival of yellow birch and bitternut hickory was overall low (Fig. 13). Generally, the survival of the majority of species was poor on the morainic ridge. On the wet marine clay (the wettest soil), survival was poor for red oak and butternut, but especially poor for sugar maple and black walnut.

After four growing seasons, the height and basal diameter of the trees planted on

different soil conditions vary significantly (Table VIII). Height of red ash, red oak and bur oak are the most markedly different in relation to soil conditions (Fig. 14). The height of silver maple is significantly different on the wettest soil type (wet marine). For yellow birch, bitternut hickory, white ash and black walnut, there is considerable overlap in the height distribution data and a moderate degree of differentiation of height growth between soil conditions (Fig. 14). The height growth of sugar maple and butternut are not statistically differentiated between soil types (Fig. 14).

IV.3.3 Soil conditions and tree growth

The results of the Principal Factor Analyses can be interpreted in terms of soil richness (pH, texture and nitrate content) and soil moisture gradients (Figures 15a and 15b). The interpretation of each species' position in the figure must take into account the MSA values of the "height" or "diameter" variable for each species (Kaiser & Cerny, 1974). Combined with the amount of variation explained by the first two axes (78-87%) (Table IX), the MSA value allows an interpretation of the influence of edaphic conditions on each species' growth.

Many species have height and diameter results which are strongly influenced by soil conditions ($MSA > 0.8$). The best growth in red ash was obtained on the most nutrient-rich humid soils, as opposed to red oak, which obtained its best growth at the nutrient-poorest and driest ends of the gradients (Figs 15a and 15b). Bur oak differs from red oak in having a median position along the soil moisture gradient, indicating good growth in a wide range of soil moisture conditions, as also demonstrated by the height ANOVA results (Table VIII, Fig. 14). The growth of sugar maple was best on well drained and relatively nutrient-rich soils. Yellow birch attained its best growth in the most nutrient-poor, as well as above average soil moisture conditions.

In the case of bitternut hickory and black walnut, the optimal edaphic conditions are weakly defined ($0.58 < MSA < 0.67$) and interpretations must be made with caution.

Bitternut hickory tended to attain its largest size in below average soil nutrient conditions, whereas black walnut attained its largest size in better than average soil nutrient conditions and well drained soils. The weak MSA values (<0.5) for butternut, silver maple and white ash do not allow, for these species, the definition of a set of edaphic conditions, among those analyzed, which would provide superior, or inferior, growth in height or basal diameter.

IV.4 Discussion

We have chosen an extensive *in situ* experimental approach in order to measure the response of hardwood seedlings to the different soil conditions of abandoned farmland in south-western Québec. This approach allows the integration of several ecological factors, while controlling a few. For management purposes, this compromise between fully controlled experimental conditions and the natural environment offers a useful and realistic complement to the study of natural forest communities, and to greenhouse or growth chamber studies.

IV.4.1 Soil conditions

The results of the cluster analysis reflect the nature of the underlying geomorphology and soils. The first group of blocks (sites B and I) are on shore and nearshore deposits on till over Potsdam sandstone and on the same soil subgroup (Eluviated Sombric Brunisol). These sites share some common characteristics with those of the second group of blocks (sites M1 and M2) on old beaches (Orthic Humo-Ferric Podzol). Three other groups of blocks (sites L1, L2 and P) are located on dolomitic moraine materials, on soils belonging to two Brunisol subgroups. These are also linked (at a greater Euclidian distance) to a group of blocks on a marine deposit (site D), on a soil identified as an Orthic Humic Gleysol (Fig. 12).

IV.4.2 Survival

During the first growing season (1991), precipitations from May to August were respectively, 160%, 29%, 80% and 75% of the usual total monthly precipitation for these months, based on climatological means (Ministère de l'Environnement du Québec, 1991). Also, the mean temperature of June 1991 was higher than the climatological mean. In spite of the water deficit which occurred after the plantation of the seedlings, silver maple, white ash and red ash demonstrated an exceptional initial establishment capacity, as reflected in their high survival rate. On the other hand, low precipitation can certainly explain part of the high mortality observed throughout all sites in seedlings of yellow birch, bitternut hickory and black walnut. The high overall mortality rates observed on the morainic ridge site may be linked to some particularities of this site, such as an absence of protection from dominant winds (on a hill 10 m above the surrounding plain). The poor drainage conditions encountered in the wet marine site has affected the survival of sugar maple, butternut, black walnut and red oak, which are all known to grow best on well drained soils (Gagnon & Bouchard, 1981; Domon *et al.*, 1986; Meilleur *et al.*, 1994).

IV.4.3 Soil-site factors and growth

The growth of the 10 hardwood species studied can be interpreted according to gradients of soil moisture and nutrients occurring on abandoned farm soils. These two major gradients are also generally identified as the most important in studies of the distribution of northern hardwood species in natural forests (Gagnon & Bouchard, 1981; Gauthier & Gagnon, 1990; Meilleur *et al.*, 1994; Smith, 1995). In addition, most Canadian forest site classification systems are based on the soil moisture regime and soil fertility (Klinka *et al.*, 1984; Klinka & Carter, 1990; Bowling & Zelazny, 1992; Sims & Uhlig, 1992). Among the different sites of our experimental design, the soil moisture gradient and the soil nutrient gradient did not include extreme conditions, such as an excessively rapid or a very poor drainage, or a nutrient-poor soil (pH<5). The nutrient-

rich surficial materials generally characteristic of our study area provided very limited opportunities to include these situations, and therefore restricted the length of the soil nutrient gradient. However, all silvicultural prescriptions for valuable hardwoods recommend planting on nutrient-rich soils, and avoiding extremes of drainage (Cauboue, 1988; von Althen, 1990; Dumont, 1995). Thus, the soil moisture and nutrient gradients typified by our sites appropriately covered the range of soil conditions deemed optimal for valuable hardwood plantations. Some species, nevertheless, showed markedly different growth results among the soil conditions represented in our study.

IV.4.4 Species' ecological requirements and tolerances

The measurement of the degree of fit of a variable to a group of variables (MSA) allows an interpretation of the relationship between the growth of the tree seedlings and variation of the soil variables, and thus species' autecology. The MSA value we obtained for either the height or basal diameter variable of each species, after four years of growth in plantation, is used as an indicator of the degree of specificity of the growth response of each species towards the edaphic variables measured. The analysis can then identify the soil conditions likely to provide the optimal growth for each species.

The low MSA values of height and diameter for butternut, silver maple and white ash indicate a lack of a significant relationship between the size of these species and the variations in edaphic conditions (Table IX). It could be argued that these species, once established, are generalists with respect to soil requirements, each one showing little difference in growth over the various soil conditions present in our experimental plantations.

Black walnut and bitternut hickory obtained MSA values (height and diameter) indicating an intermediate degree of specificity to the measured edaphic variables. However, the high MSA values (>0.8) of the other species (yellow birch, sugar maple, bur oak, red oak and red ash) indicate that a close relationship exists between the

growth of these species and the variation in edaphic conditions. These species exhibit a greater degree of specificity in terms of soil requirements or tolerances. This degree of specialization, during the establishment and early growth stages, must be taken into consideration when selecting these species for plantations on abandoned farmland.

IV.4.5 Specialist species

Red ash

The positive relationship obtained between height growth of red ash seedlings and nutrient-rich and moist abandoned farm soils is in agreement with the results of the analysis of natural plant communities. In southern Québec, red ash does occur on soils with imperfect or poor drainage (Bergeron *et al.*, 1988; Meilleur *et al.*, 1994). However, our ANOVA results for height show good growth for red ash on a well drained but fine-textured soil (dry-mesic moraine) (Fig. 14). Red ash's characteristics as an opportunistic and invasive species in natural situations (Meilleur *et al.*, 1994) provide this species with excellent growth and survival potential in plantations on abandoned fields.

Red oak

Red oak has a relationship to soil moisture and soil nutrient gradients that is the opposite of red ash. The soil conditions associated with the best growth of red oak in plantations are similar to those associated with its occurrence on a topographical gradient. In the northern hardwood forests, red oak occupies the dry end of the topographic gradient (Gagnon & Bouchard, 1981; Smith, 1995) and regenerates well on dry and nutrient-poor soils (Gauthier & Gagnon, 1990). The adaptation traits of the species to drought are well known (Abrams, 1990). However, American foresters associate the best growth of red oak with deep, well drained soils with textures varying from a loam to a clay loam (Burns & Honkala, 1990). The productivity of mature red oak trees was also found to be highest on mesic and richer soils of the Precambrian

Shield foothills of Québec (Hallé, 1987).

Our data do not allow an adequate analysis of the growth response of red oak in moderately well drained soils. This drainage class is represented on only one of our sites with a high soil pH (7.2). The very different height growth results obtained on well drained soils, but of differing pH (sandy beaches, pH=5.9; dry-mesic moraine, pH=7.4), illustrate the negative effect of high soil pH on red oak growth (Fig. 14). In natural vegetation, red oak is not found on soils with a high limestone content or a pH higher than 7 (Timbal & Dewilder, 1994). Mortality was higher and tree height lower in a calcareous section than in a non-calcareous section of an experimental plot designed to examine the effects of fine scale soil patterns on red oak growth (Meredieu *et al.*, 1996). On alkaline soils, phosphorus availability is normally low (Marshner, 1995). Optimal phosphate uptake is apparently between pH 6.25 and 7.00 (Doucet, 1992). Phosphorus might be limiting for red oak under high soil pH conditions. In addition, since pH and N mineralization are positively correlated (Haynes, 1986; Boxman *et al.*, 1994) (this study,), we observed the best red oak growth where the NO₃ concentrations were lowest, and where, as a result, the NO₃ :NH₄ ratio was low (Figs 15a and 15b). Red oak can assimilate soil NO₃ and NH₄ at very low concentrations, whereas red ash requires high soil concentrations of preferably NO₃ (Truax *et al.*, 1994). The rarity of red oak in present day forests of the study area (Bergeron *et al.*, 1988; Meilleur *et al.*, 1994), as well as in precolonial forests (Bouchard *et al.*, 1989; Simard & Bouchard, 1996), may reflect the regional dominance of soils with high pH, especially on dolomitic bedrock.

Bur oak

Bur oak's best growth occurred in both the dry end and in the wet end of the soil moisture gradient. In the St. Lawrence Valley, the species is present on a wide range of soil drainage conditions, occurring in natural communities on clay deposits as well as on glacial tills (St-Jacques & Gagnon, 1988). Bur oak can maintain cell membrane

integrity when under water stress (Kuhns *et al.*, 1993). As with red oak, high soil pH values (7.2-7.6) appear to have had negative effects on bur oak growth.

Sugar maple

Results for sugar maple must be interpreted with appropriate caution. The variance of the growth results is such that the comparison of height means does not yield an indication of significant differences between varying soil conditions (Fig. 14). The factorial analyses, based on the mean height or diameter of sugar maple trees from each experimental block, do not take into account the variance in size data as the ANOVA does.

Although the results of the factorial analyses seem to indicate that sugar maple performed better on soils with rapid drainage (Figs 15a and 15b), this trend may have been reinforced by the poor growth obtained on one of the two sites with a moderately well drained soil (morainic ridge). Exposure to drying winds on this site, which is situated on a rise without windbreaks, accentuates the risks of desiccation for sugar maple, which is particularly sensitive to this stress (Lechowicz & Ives, 1989). This characteristic of sugar maple may prove to be a limitation to its use in open field plantations.

In natural forests of the study area, sugar maple is most abundant on soils that are well or moderately well drained (Bergeron *et al.*, 1988), as well as on nutrient-rich glacial surficial materials (Meilleur *et al.*, 1994). This distribution pattern has been observed elsewhere in southern Québec (St-Jacques & Gagnon, 1988). The results of these natural vegetation analyses are corroborated by our results for sugar maple (Figs 15a and 15b).

Yellow birch

The ecological profile of yellow birch obtained from the results of this study corresponds to what is known of the autecology of the species. Yellow birch occurs on nutrient-poor and acid soils, mesic or wet, of the Precambrian Shield (Gauthier & Gagnon, 1990) and of other areas of southern Québec (Bergeron *et al.*, 1988; Meilleur *et al.*, 1994).

IV.4.6 Intermediate species

Black walnut growth varied very little in relation to soil conditions, with the exception of poor growth on the imperfectly drained soil (Fig. 14; Figs 15a and 15b). These results correspond to silvicultural information which describes optimal conditions for black walnut growth as being on moderately well drained nutrient-rich soils (Burns & Honkala, 1990; von Althen, 1990). Other plantation research has also indicated high nitrogen requirements in black walnut (Cogliastro *et al.*, 1990).

The very poor growth of bitternut hickory points to a need to further investigate the possible causes of the establishment difficulties of this species. Von Althen (1990) has also reported poor success with this species in southern Ontario.

IV.4.7 Generalist species

Butternut, white ash and silver maple obtained low MSA values in the factorial analyses, which indicates a generalist or wide ecological amplitude on the range of soil conditions represented in this study. Butternut, for example, appears to be more tolerant to dry and stony calcareous soils than black walnut (Burns & Honkala, 1990), as illustrated in Figure 15. Silver maple, typical of the river floodplains of Eastern North America, is associated in our study with the wet endpoint of the soil moisture gradient (Figs 15a and 15b). Its growth on one site, our wettest (wet marine), was exceptional (Fig. 14). However, our results show that silver maple can also grow quite well in

plantations on rapidly to moderately well drained soils, but that it simply excels on imperfectly drained soils (Fig. 14). After four years, white ash growth is similar among all soil conditions (Fig. 14), supporting the proposition that it is a generalist species, tolerant of a wider range of soil conditions than red ash (Bergeron *et al.*, 1988).

IV.4.8 Hardwood plantation decisional chart

A synthesis of our experimental results is presented as a decisional chart (Fig. 16) for silviculturalists. In this chart, soil texture, moisture and pH, encountered in our experimental design, are ordered according to their potential for the optimal growth of 9 hardwood species. The order for each species depends on differences of height growth achieved on each soil type, based on Tukey test ranking (Fig. 14). For sugar maple, yellow birch, black walnut and butternut, some edaphic conditions have been classified as “not recommended”, because of survival rates below 50% after 4 years. Potential for success is low for these species in these conditions. In addition, bitternut hickory is not included in the chart because of overall unsatisfactory growth. The four soil moisture classes used in the chart were determined from means of soil water content measurements (Table VII, see description in Methods). This variable was selected for its superior capacity to accurately represent the soil moisture regime of each site. However, in field applications this variable could be substituted by soil drainage classes, which can be determined in the field by the silviculturist with the use of an identification key (i.e. Bates *et al.*, 1985). Soil texture can easily be determined in the field, as can pH with small inexpensive kits. Soil survey data and maps can also be used to obtain soil characteristics, although fine spatial resolution is often poor and field confirmation is preferable. Thus, a particular site’s position along the two major gradients of soil moisture (soil water content, or drainage indicator) and soil richness (pH, % clay) can be assessed readily, in order to recommend the appropriate hardwood species for reforestation. Species thus selected should produce the best growth results possible on the site.

The decisional chart could be a very useful tool for forest managers in southern Québec, as well as in Ontario and the north-eastern United States, wherever geomorphologic features and climate are similar to the study area. The chart also illustrates the somewhat specialist nature of red oak, red ash, bur oak and yellow birch, which obtained their best growth and survival rate on particular edaphic conditions. For example, red oak should be planted preferentially on soils with a light texture, from sandy loam to loamy sand, where mean soil water content is 5-10% of soil volume (alternatively : rapid drainage class), and where the pH is inferior to 6.5 (Fig. 16). Red oak should become a less desirable choice, as soil moisture conditions get wetter and soil pH exceeds 7. Conversely, red ash should be planted preferentially on soils where soil water content exceeds 30% and attains up to 50% of soil volume (Fig. 16). The next most optimal choice for red ash plantations would be sites with intermediate drainage (well to moderately well drained), but with soils with a loam (or heavier) texture and a high pH. However, soils with less than 20% soil water content by volume (or rapidly to well drained soils) are the least recommended for red ash (Fig. 16).

Other species, somewhat more generalist, can be grown successfully in most conditions represented on the chart (white ash, butternut and silver maple). The choice of these generalist species becomes increasingly relevant in sites that are not characterized by extremes of soil moisture and/or soil richness. Purely edaphic selection criteria must also be coupled with other considerations, such as the economic value of the wood of each species, pruning requirements, susceptibility to insect pests, or rodent damage, degree of tolerance of weed competition, etc.

The measure of sampling adequacy (MSA) was used in this study in a novel way in order to assess the degree of specificity, or fit, of hardwood species growth to a group of edaphic variables. In the case of most species, plantation growth results confirm the interpretation of species' ecological characteristics obtained from the study of their distribution and abundance in the natural forests of southern Québec. The poor growth of oaks and yellow birch on soils with a pH above 7 is noteworthy. This result is likely

to have a great impact on reforestation decisions in the Upper St. Lawrence region. Reforestation sites situated on sandy materials and Potsdam sandstone moraines, with generally more acidic soils, should be more appropriate for these species.

Finally, our results clearly demonstrate the high potential value of some species for reconstructing a valuable hardwood cover on abandoned farmland in south-western Québec. However, identified geological, geomorphologic and pedological site constraints on species growth must become an integral part of the species selection process.

IV.5 Acknowledgments

This research was supported by grants from the Québec Ministry of Natural Resources and by a scholarship from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada. We are grateful to S. Grignon and K. Marineau for their help with field work, and to S. Daigle for his advice on statistical analyses. We also thank the land owners who collaborated with us, as well as Dr. G. Paquette of Monsanto Canada Inc. who supplied the herbicide.

Table VII. Characteristics of the different soils types of the experimental design.

	Soil type					
	Stony littoral	Sandy beach	Dry-mesic moraine	Mesic moraine	Morainic ridge	Wet marine
Mean soil water content (%volume)	7	15	17	21	28	49
48hr soil water drainage capacity (%volume)	9	15	16	19	28	75
Field capacity (%dry mass)	19	27	32	37	38	41
Drainage class	Fast	Fast	Good	Moderate	Moderate	Imperfect
Stoniness (%volume)	65	0	42	30	28	0
Sand %	72	86	31	54	36	57
Clay %	9	7	26	15	23	15
pH	6,4	5,9	7,4	7,4	7,6	6,3
C.E.C. (mEq/100g)	10	3	16	15	17	11
Organic matter (%)	5	5	8	7	11	7
NO3 (ppm)	6	6	13	11	12	6
NH4 (ppm)	5	2	3	5	2	1
P (ppm)	69	104	31	106	24	41

Table VIII. ANOVA of hardwood species height and diameter after 4 growing seasons.

		Source	Y. birch	Hickory	Bur oak	Red oak	Sil. maple
Height	Soil type		0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
	Block (soil type)		0,0001	0,18	0,017	0,001	0,0001
Diameter	Soil type		0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
	Block (soil type)		0,0001	0,10	0,0018	0,0001	0,0006

		Source	Sug. maple	W. ash	Red ash	Butternut	Walnut
Height	Soil type		0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0051
	Block (soil type)		0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0279
Diameter	Soil type		0,0001	0,0001	0,0001	0,0004	0,0003
	Block (soil type)		0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0665

Table IX. Measure of sampling adequacy (MSA) of the variables and percent variance explained by the axes of the factorial analysis of the height and diameter of the hardwood species.

Species	Height			Diam.		
	MSA	% Var. explained		MSA	% Var. explained	
		AXIS 1	AXIS 2		AXIS 1	AXIS 2
Red ash	91	58	27	84	56	28
Red oak	88	61	26	89	60	26
Bur oak	85	53	27	82	53	26
ug. maple	84	51	28	86	51	31
Y. birch	80	51	30	84	51	29
Hickory	65	52	29	58	50	29
Walnut	63	51	30	67	53	28
Butternut	56	54	30	20	60	21
Sil. maple	44	51	29	44	52	28
W. ash	38	52	26	51	52	26

Table X. Decisional chart for hardwood species selection

Soil textur	Loam		Sandy loam - Loamy sand			
	good	moderate	fast	good	moderate	imperfect
Red ash	2	2	4	4	3	1
Red oak	4	4	1	2	4	3
Bur oak	3	3	2	2	3	1
Sug. maple	1	1	2	1	2	NR
Y. birch	NR	NR	2	2	NR	1
Walnut	1	2	NR	2	NR	NR
Butternut	1	1	1	1	1	NR
W. ash	1	2	2	2	2	2
Sil. maple	2	2	2	2	2	1

Optimal edaphic combinations for planting are ranked from best (1) to poorest (4), and NR indicates a non-recommended combination.

 pH 5.9-6.4

 pH 7.4-7.6

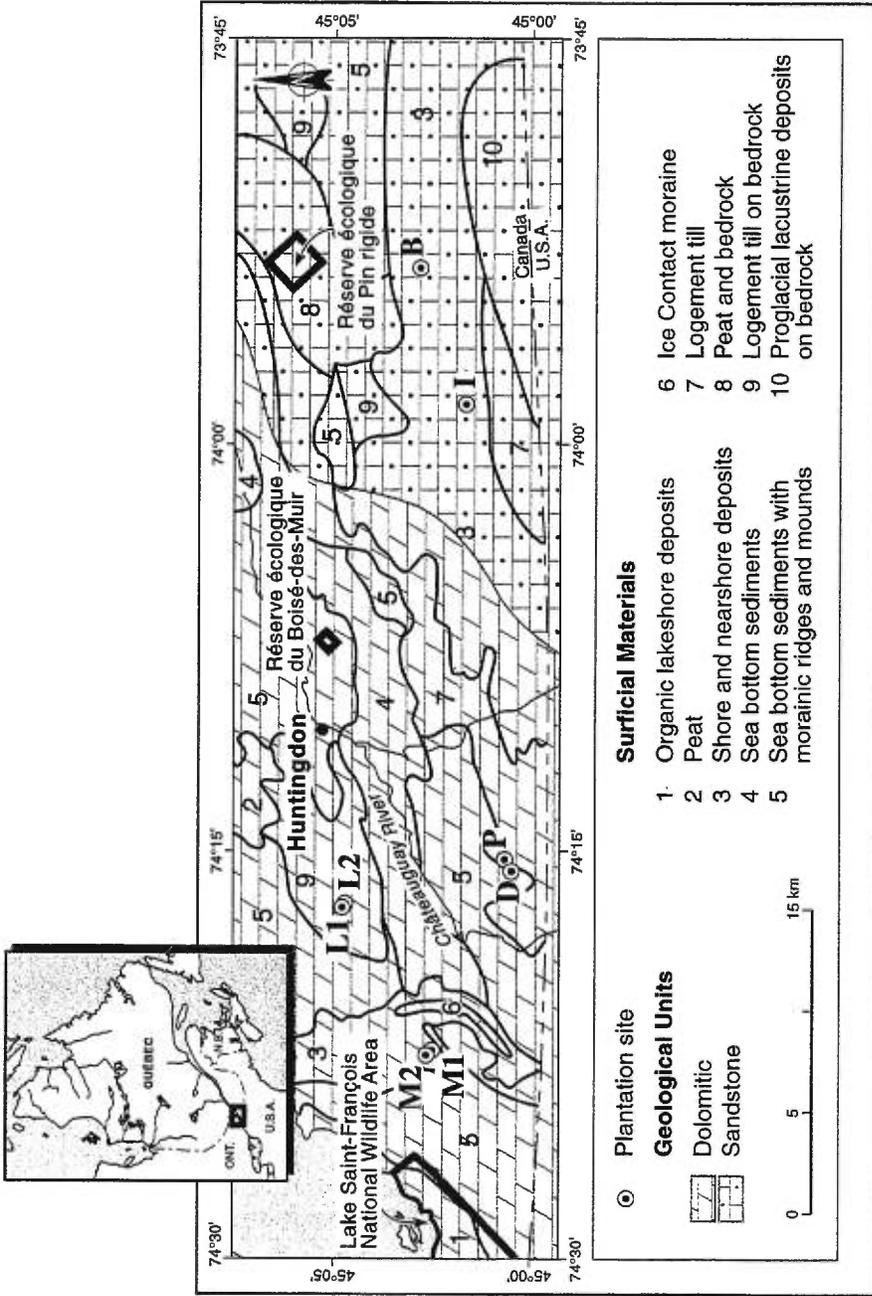


Figure 11. Location map of the study area, in south-western Quebec, Canada, within the limits of the Upper St-Lawrence County Regional Municipality. Surficial materials nomenclature is from Delage (1993).

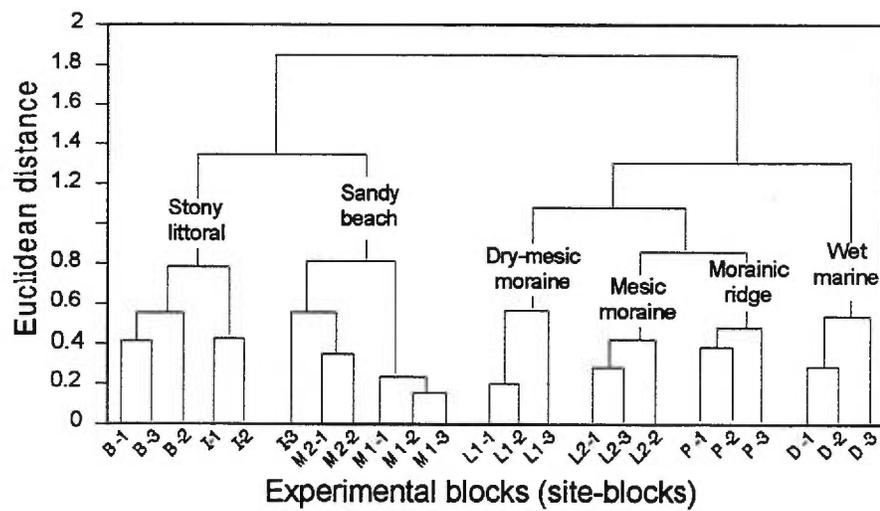


Figure 12. Cluster analysis diagram of the 23 experimental blocks based on 12 edaphic variables.

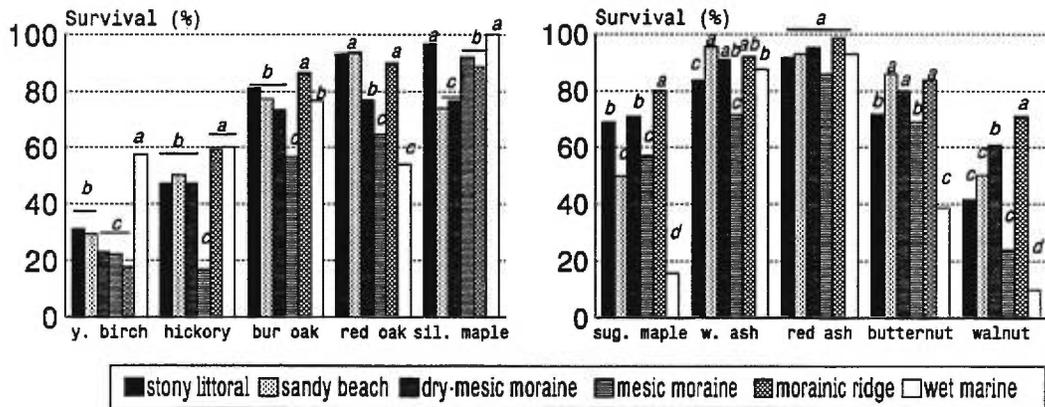


Figure 13. Survival of hardwood species after 4 years in plantation in relation to soil conditions. Means within species followed by different letters are different at $p \leq 0.05$.

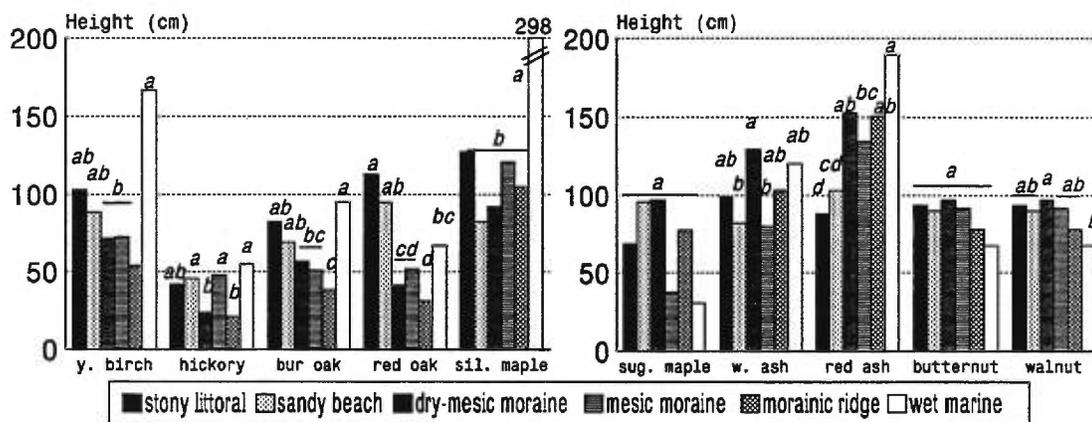


Figure 14. Height means of hardwood species after 4 years in plantation in relation to soil conditions. Means within species followed by different letters are different at $p \leq 0.05$.

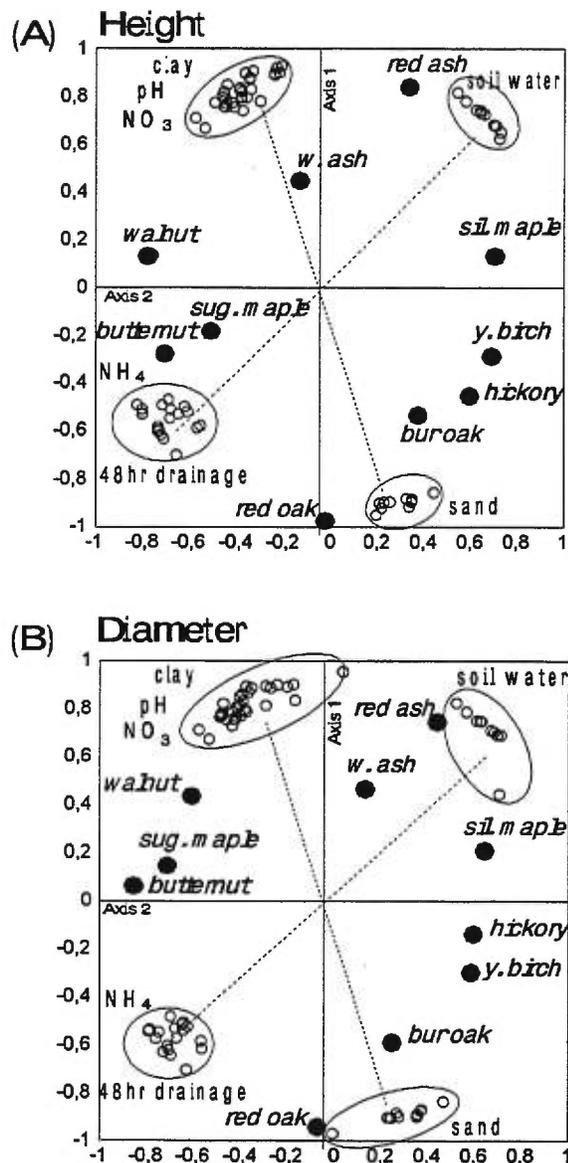


Figure 15. Species height (A) and diameter (B) in relation to soil conditions. Open circles indicate edaphic variables : clusters of edaphic variables result from overlay of 10 analyses, one for each species. Closed circles indicate size variables of each species. Proximity of species size coordinates to edaphic coordinates indicates high correlation between species growth and soil variable. Coordinates of circles were obtained by Principal Factor Analysis.

IV.6 References

- Abrams, M.D. 1990. Adaptations and responses to drought in *Quercus* species of north America. *Tree Physiology* 7 : 227-238.
- Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey. 1987. The Canadian System of soil Classification (CSSC). 2nd ed. Agric. Can. Ottawa, On. Publ 1646, 164 p.
- Bariteau, L. 1988. La carte géomorphologique au 1 :20 000 de modelés polygéniques : un exemple des basses terres du Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal, 185 p.
- Bates, D.M., Belisle, J.M., Cameron, B.H., Evans, L.J., Jones, R.K., Pierpoint, G. & Broek, B.V.D. 1985. Field manual for describing soils. Ontario Institute of Pedology, University of Guelph, 3rd edition, 38 p.
- Bergeron, J.F., Saucier, J.P., Robitaille, A. & Robert, D. 1992. Québec forest ecological classification program. *Forestry Chronicle* 68 : 53-63.
- Bergeron, Y., Bouchard, A. & Leduc, A. 1988. Les successions secondaires dans les forêts du haut Saint-Laurent, Québec. *Naturaliste Canadien* 115 : 19-38.
- Binkley, D. & Vitousek, P. 1989. Soil nutrient availability. *In* : R. W. Percy, J. R. Ehleringer, H. A. Mooney & P. W. Rundel (Eds.), *Plant physiological ecology*. Chapman and Hall, New York. pp. 75-93.
- Bouchard, A. 1979. La végétation forestière du Cap Saint-Jacques, île de Montréal, Québec. *Canadian Journal of Botany* 57 : 1191-1202.
- Bouchard, A., Bergeron, Y., Camiré, C., Gangloff, P. & Gariépy, M. 1985. Proposition d'une méthodologie d'inventaire et de cartographie écologique : le cas de la MRC du Haut-Saint-Laurent. *Cahiers de géographie du Québec* 29 : 79-95.

- Bouchard, A., Dyrda, S., Bergeron, Y. & Meilleur, A. 1989. The use of notary deeds to estimate the change in the composition of 19th century forest, in Haut-Saint-Laurent, Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 19 : 1146-1150.
- Bowling, C. & Zelazny, V. 1992. Forest site classification in New Brunswick. *Forestry Chronicle* 68 : 34-41.
- Boxman, A.W., Cobben, P.L.W. & Roelofs, J.G.M. 1994. Does (K+Mg+Ca+P) fertilization lead to recovery of tree health in a nitrogen stressed *Quercus rubra* L. stand. *Environmental Pollution* 85 : 297-303.
- Brisson, J. 1992. The history and tree stratum of an old-growth forest of Haut-Saint-Laurent region, Québec. *Natural Areas Journal* 12 : 3-9.
- Burns, R.M. & Honkala, B.H. 1990. *Silvics of North America : 2. Hardwoods*. Agriculture Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC, 877 p.
- Cauboue, M. 1988. *Le reboisement au Québec. Guide-terrain pour le choix des essences résineuses*. Ministère de l'Énergie et des Ressources, 32 p.
- Cerny, B.A. & Kaiser, H.F. 1977. A study of a measure of sampling adequacy for factor-analytic correlation matrices. *Multivariate Behavioral Research* 12 : 43-47.
- Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. *In* : C. A. Black (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, WI. pp. 902-904.
- Cogliastro, A., Gagnon, D. & Bouchard, A. 1993. Effet des sites et des traitements sylvicoles sur la croissance, l'allocation en biomasse et l'utilisation de l'azote de semis de quatre espèces feuillues en plantations dans le sud-ouest du Québec. *Canadian Journal of Forest Research* 23 : 199-209.

- Cogliastro, A., Gagnon, D. & Bouchard, A. 1997. Is site preparation necessary for bur oak receiving post-planting weed control ? *Annales des Sciences Forestières* 54 : 107-116.
- Cogliastro, A., Gagnon, D., Coderre, D. & Bhereur, P. 1990. Responses of seven hardwood tree species to herbicide, rortotilling, and legume cover at two southern Quebec plantation sites. *Canadian Journal of Forest Research* 20 : 1172-1182.
- Davies, R.J. 1988. Sheet mulching as an aid to broadleaved tree establishment II. Comparison of various sizes of black polythene mulch and herbicide treated spot. *Forestry (Oxf.)* 61 : 107-124.
- Delage, M. & Gangloff, P. 1993. Marques d'icebergs reliques dans la région de Montréal, Québec. *Géographie Physique et Quaternaire* 47 : 69-80.
- Domon, G., Bouchard, A., Bergeron, Y. & Gauvin, C. 1986. La répartition et la dynamique des principales espèces arborescentes du Bois-de-Saraguay, Montréal (Québec). *Canadian Journal of Botany* 64 : 1027-1038.
- Domon, G., Bouchard, A. & Gariépy, M. 1993. The dynamics of the forest landscape of Haut-Saint-Laurent (Quebec, Canada) : interactions between biophysical factors, perceptions and policy. *Landscape and Urban Planning* 25 : 53-74.
- Doucet, R. 1992. *La science agricole : climat, sols et productions végétales du Québec*. Éditions Berger, Eastman (Québec), 699 p.
- Dumont, M. 1995. *Plantation des feuillus nobles*. Direction de l'assistance technique, Ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec, Pub. No RN95-3022, 126 p.
- Fowells, H.A. 1965. *Silvics of forest trees of the United States*. Agriculture Handbook 271. U. S. Departement of Agriculture, Forest Service, Washington, DC., 762 p.

- Gagnon, D. & Bouchard, A. 1981. La végétation de l'escarpement d'Eardley, parc de la Gatineau, Québec. *Canadian Journal of Botany* 59 : 2667-2691.
- Gauthier, S. & Gagnon, D. 1990. La végétation des contreforts des Laurentides : une analyse des gradients écologiques et du niveau successional des communautés. *Canadian Journal of Botany* 68 : 391-401.
- Hallé, A. 1987. La productivité des communautés forestières dans le sud du Québec. M.Sc. Thesis, Université du Québec à Montréal, Montréal, 68 p.
- Haynes, R.J. 1986. Mineral nitrogen in the plant-soil system. Academic Press, Toronto, 483 p.
- Hightshoe, G.L. 1988. Native trees, shrubs, and vines for urban and rural America : A planting design manual for environmental designers. Van Nostrand Reinhold, New-York, 819 p.
- Jones, R.K., Pierpoint, G., Wickware, G.M., Jeglum, J.K., Arnup, R.W. & Bowles, J.M. 1983. Field guide to forest ecosystem classification for the Clay Belt, site region 3e. Ont. Min. Nat. Resour., Toronto, Ontario, 123 p.
- Kaiser, H.F. 1970. A second generation little jiffy. *Psychometrika* 35 : 401-415.
- Kaiser, H.F. & Cerny, B.A. 1974. Little jiffy, mark IV. *Educational and Psychological Measurement* 34 : 111-117.
- Keeney, D.R. & Nelson, D.W. 1982. Nitrogen-inorganic forms. *In* : A. L. Page, R. H. Miller & D. R. Keeny (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2 Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Madison, WI. pp. 643-698.

- Klinka, K. & Carter, R.E. 1990. Relationships between site index and synoptic environmental factors in immature coastal Douglas-fir stands. *Forest Science* 36 : 815-830.
- Klinka, K. & Feller, M.C. 1984. Principles used in selecting tree species for regeneration of forest sites in south-western British Columbia. *The Forestry Chronicle* 60 : 77-85.
- Klinka, K., Green, R.N., Courtin, P.J. & Nuzsdorfer, F.C. 1984. Site diagnosis, tree species selection, and slashburning guidelines for the Vancouver forest region. Land Management Report No. 25, Ministry of Forest, Victoria, B.C., 180 p.
- Kuhns, M.R., Stroup, W.W. & Gebre, G.M. 1993. Dehydration tolerance of 5 bur oak (*Quercus macrocarpa*) seed sources from Texas, Nebraska, Minnesota, and New York. *Canadian Journal of Forest Research* 23 : 387-393.
- Lamontagne, L. & Nolin, M.C. 1997. Dossier des noms de sols du Québec. Système d'information des sols du Canada (SISCan). Centre de recherches sur les sols et les grandes cultures, Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Équipe pédologique du Québec, Sainte-Foy, Qc, (in press) 60 p.
- Lechowicz, M.J. & Ives, N.E. 1989. Comparative ecology of drought response in hardwood trees : *Acer saccharum* versus *Fraxinus americana*. In : K. H. Kreeb, H. Richter & T. M. Hinckley (Eds.), Structural and functional responses to environmental stresses. SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands. pp. 283-292.
- Mailloux, A. & Godbout, G. 1954. Étude pédologique des sols des comtés de Huntingdon et Beauharnois. Ministère de l'Agriculture du Québec, Division des sols, Ste-Anne-de-la-Pocatière, Québec. Bulletin technique No 4, 221 p.
- Marshner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, Toronto, 889 p.

- Meilleur, A., Bouchard, A. & Bergeron, Y. 1994. The relation between geomorphology and forest community types of the Haut-St-Laurent, Québec. *Vegetatio* 111 : 173-192.
- Meredieu, C., Arrouays, D., Goulard, M. & Auclair, D. 1996. Short range soil variability and its effect on red oak growth (*Quercus rubra* L). *Soil Science* 161 : 29-38.
- Ministère de l'Environnement du Québec. 1991. Sommaire climatologique du Québec, Station St-Anicet. Direction des réseaux atmosphériques, ministère de l'Environnement du Québec, Québec, sommaires 1988,1989,1990. p.
- Munson, A.D. & Timmer, V.R. 1989. Site-specific growth and nutrition of planted *Picea mariana* in the Ontario Clay Belt. I. Early performance. *Canadian Journal of Forest Research* 19 : 162-170.
- SAS Institute Inc. 1989. SAS/STAT™ User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Volume 1. SAS Institute Inc., Cary NC, 943 p.
- Simard, H. & Bouchard, A. 1996. The precolonial 19th century forest of the Upper St-Lawrence region of Québec : a record of its exploitation and transformation through notary deeds of wood sales. *Canadian Journal of Forest Research* 26 : 1670-1676.
- Sims, R.A. & Uhlig, P. 1992. The current status of forest site classification in Ontario. *Forestry Chronicle* 68 : 64-77.
- Smith, M.L. 1995. Community and edaphic analysis of Upland Northern Hardwood communities, Central Vermont, USA. *Forest Ecology and Management* 72 : 235-249.
- Soil Survey Staff. 1992. Keys to soil Taxonomy. SMSS Technical Monograph No. 19. Fifth Edition. Pocahontas Press Inc. Blacksburg, VG, 541 p.
- St-Jacques, C. & Gagnon, D. 1988. La végétation forestière du secteur nord-ouest de la vallée du Saint-Laurent, Québec. *Canadian Journal of Botany* 66 : 793-804.

- Timbal, J. & Dewilder, R. 1994. Sensibilité au calcaire. *In* : J. Timbal, A. Kremer, N. L. Goff & G. Nepveu (Eds.), *Le chêne rouge d'Amérique*. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris. pp. 98-100.
- Truax, B., Gagnon, D. & Chevrier, N. 1994. Nitrate reductase activity in relation to growth and soil N forms in red oak and red ash planted in three different environments : forest, clear-cut and field. *Forest Ecology and Management* 64 : 71-82.
- Truax, B. & Gagnon, D. 1993. Effects of straw and black plastic mulching on the initial growth and nutrition of butternut, white ash and bur oak. *Forest Ecology and Management* 57 : 17-27.
- Truog, E. 1930. Determination of the readily available phosphorus of soils. *Journal of American Society of Agronomy* 22 : 874-882.
- von Althen, F.W. 1990. Hardwood planting on abandoned farmland in southern Ontario : revised guide. Minister of Supply and Services Canada. Catalogue No. Fo 42-150/1990E, 77 p.
- Von Althen, F.W. 1990. Sowing and planting shagbark and bitternut hickories on former farmland in Southern Ontario. Forestry Canada, Ontario Region, Great Lakes Forestry Centre, RN-O-X-403. 11 p.

Chapitre V

Discussion générale

La croissance des espèces feuillues en plantation dans les champs agricoles abandonnés bénéficie, au cours des premières années de leur établissement, de la répression des herbacées. Cette contrainte à la disponibilité des ressources a été plus importante pour la croissance des espèces que celle induite par les conditions de sol des différents sites. Ces dernières sont par ailleurs déterminantes pour la survie des plants nouvellement mis en terre, et dans ce cas, c'est la disponibilité de l'eau qui peut être mise en cause. La nutrition azotée des jeunes plants d'arbres est nettement favorisée par la réduction de la pression de la compétition herbacée. Ceci conduit à préconiser des pratiques conservatrices de l'azote du sol (et autres éléments nutritifs), qui sera en demande pour plusieurs décennies encore. Avec une plus grande disponibilité des ressources, l'accroissement des plants s'accompagne d'une distribution de la biomasse entre les différentes composantes à la faveur de la proportion de feuilles produites. Cette constatation, combinée à celle de plus fortes concentrations en azote foliaire en situation de réduction de la compétition, indique une augmentation de la capacité photosynthétique des plants libres de compétiteurs herbacés. Ainsi, les soins qui sont apportés à la production des plants en pépinière visent à maximiser un potentiel en plantation qui peut le mieux s'exprimer en situation de compétition réduite.

L'utilisation de l'herbicide systémique glyphosate s'est avéré plus efficace que l'installation de paillis organique constitué de bois raméal, et ce, peu importe les conditions édaphiques considérées. Le paillage a causé un faible niveau de maîtrise de la végétation compétitrice (30%), un abaissement de la température du sol qui, avec l'immobilisation de l'azote induite par la décomposition du paillis, ont réduit la disponibilité des ressources. Ces effets négatifs sont cependant atténués par une amélioration des conditions d'humidité sous le paillis, permettant le maintien de bons

taux de survie. Cependant, l'utilisation d'herbicide a également permis de conserver efficacement l'eau du sol en limitant la transpiration par les plantes compétitrices et ce, malgré une augmentation de la température du sol, favorable à la croissance. La répression des herbacées au cours des premières années de croissance des plants d'espèces feuillues en champs agricoles abandonnés est donc nécessaire. Alors que l'augmentation de la richesse des sites accroît l'intensité de la compétition herbacée (Berkowitz *et al.*, 1995), la maîtrise de celle-ci doit être planifiée en conséquence.

Au chapitre II, des sites composés d'une forte proportion de pierres ont démontré un bon potentiel à la sylviculture des feuillus. Aussi, selon les résultats du chapitre III, le reboisement de ces sites est possible sans procéder par une préparation mécanique du sol lorsque des traitements de répression des herbacées sont appliqués après la plantation. Ces résultats offrent un appui supplémentaire aux possibilités de reboisement de sites où des espèces ligneuses sont déjà établies. Nous évoquons ici plus particulièrement les lieux où une strate d'espèces ligneuses est établie (Truax *et al.*, 1994). La composition en espèces de ces lieux pourrait être enrichie par des essences de haute valeur, sans préparation mécanique du sol. Nos travaux ont également fait ressortir les avantages d'un herbicide de pré-émergence, la simazine, qui appliquée une fois en six à huit décennies permettrait d'accélérer la croissance des espèces plantées. Des herbicides de cette famille sont appliqués annuellement sur la plupart des superficies cultivées en maïs au Québec sans qu'il y ait pour cela l'ombre de restrictions en vue! À ce jour, seules celles visant le domaine de la foresterie sont annoncées.

Les résultats à l'égard de l'écologie des espèces feuillues en plantation, utiles à la réalisation de bons choix d'espèces en fonction des conditions édaphiques, sont cohérents entre les différents plans d'expérience. C'est particulièrement le cas du chêne à gros fruits, du chêne rouge et du frêne blanc, espèces étudiées aux chapitres II et IV dans différentes conditions édaphiques. Dans les deux plans d'expérience, le frêne blanc a démontré une grande amplitude écologique, et le chêne rouge s'est montré plus particulièrement favorisé par les conditions de sol à texture grossière et à drainage

rapide, par rapport au chêne à gros fruits. Les conclusions relatives au noyer cendré sont plus difficiles à confirmer étant donné les fortes mortalités obtenues pour cette espèce dans l'un des dispositifs (chapitre IV).

Les conditions édaphiques optimales des espèces feuillues plantées en champ, où s'exerce une répression des herbacées, ont été précisées. La croissance des espèces a été mise en relation avec les variables abiotiques le plus souvent identifiées pour expliquer la distribution des espèces feuillues des forêts naturelles. En outre, l'amplitude écologique des espèces en plantation peut être appréciée à partir du degré de spécificité de l'espèce. Celle-ci a été déterminée par la mesure de pertinence des variables de hauteur et diamètre (Kaiser & Cerny, 1974) obtenues à l'égard des variables du sol considérées. Ainsi, les résultats statistiques de nos travaux ont été utilisés pour obtenir une hiérarchisation des espèces selon leur degré de spécialisation à l'égard des conditions édaphiques, ainsi que pour ordonner les conditions de sol en fonction de leur potentiel à recevoir différentes espèces. Ces outils, développés à partir de résultats obtenus dans les conditions des sites de plantation des champs agricoles abandonnés, représentent une initiative majeure pour guider les intervenants dans le choix des espèces feuillues en plantation dans le sud du Québec. Les résultats font ressortir la nécessité de considérer les caractéristiques géologiques, géomorphologiques et pédologiques dans le processus de sélection des espèces pour la plantation. Enfin, nos résultats démontrent le grand potentiel de plusieurs espèces pour la reconstruction des forêts feuillues du sud-ouest du Québec par la plantation.

Conclusion générale

La reconstruction des stocks et des paysages forestiers de la partie méridionale du Québec est timidement amorcée, compte tenu du faible succès d'établissement des espèces feuillues généralement obtenu par des pratiques de régénération artificielle imprécises. Le marché économique des bois nord-américains est pourtant appelé à croître. Le développement des régions s'oriente maintenant vers l'activation de créneaux spécifiques et la production de bois d'espèces feuillues de haute qualité pourrait être un de ceux-là. Par ailleurs, le capital forestier étant considérablement réduit, le support de la collectivité toute entière apparaît inévitable. L'État doit financer la reconstitution d'un niveau de capital ligneux suffisant pour que le profit de la récolte supporte un développement durable. À ce titre, la présente étude accroît la connaissance de la phase d'établissement de la régénération artificielle des espèces de sorte que les investissements peuvent être consentis pour des procédés éprouvés scientifiquement.

Le temps nécessaire à la croissance des arbres affecte la motivation des individus à participer à l'effort de reconstitution des écosystèmes forestiers. Le résultat des interventions de reboisement en espèces feuillues doit compter sur deux générations d'intervenants. Ceci explique une partie de l'engouement pour les espèces à croissance rapide qui peuvent permettre à l'individu d'apprécier le résultat financier et visuel de ses efforts. C'est aussi une bonne raison pour motiver des travaux de recherche (comme cette thèse) qui visent à assurer le succès des interventions et à accélérer la productivité des espèces feuillues de haute valeur commerciale.

L'accélération de la productivité des feuillus en plantation en champs agricoles abandonnés impliquerait vraisemblablement des méthodes intensives d'intervention. On peut rechercher parmi celles-là celles qui garantissent la protection des conditions environnementales. La stratégie de protection des forêts fixe à l'année 2001 l'abolition de l'utilisation de tous les phytocides. Alors que le glyphosate a déjà démontré sa très faible toxicité, autant par sa nature que sa persistance, la réglementation pourrait être

concue avec discernement. Les produits les moins nocifs pourraient être utilisés, tout comme on pourrait en limiter le taux et la récurrence des applications, de même que l'usage en zone sensible. Gardons à l'esprit que les plus grands volumes de phytocides utilisés sont associés aux usages agricoles et domestiques et surtout, que le nombre d'applications nécessaires à l'établissement des feuillus au cours d'un cycle de production est très faible en comparaison des grandes cultures. Ces dernières ne sont pas visées par la réglementation du prochain millénaire. Comme nous l'avons démontré, l'usage de phytocides peut permettre d'accroître le succès des plantations. Le développement régional a besoin de reconstituer rapidement son capital forestier et il pourrait être privé d'un outil efficace si l'abolition de l'usage de tous les herbicides en foresterie est appliqué sans discernement.

L'établissement des plantations en champ a encore besoin de connaissances et d'analyses des résultats de différents essais. En outre, la recherche de mesures d'atténuation des effets de la grande exposition aux vents en milieu ouvert doit être faite à partir de projets qui s'attarderont davantage aux effets de protection de la localisation spatiale et du développement de la structure de la plantation. Nous avons également besoin de mesures de protection contre les rongeurs et les brouteurs. Il nous faudra également évaluer certains paramètres qui s'expriment à plus long terme. Plusieurs interventions vont ponctuer le développement de la plantation pendant plusieurs décennies. L'architecture de l'arbre et la qualité de son bois vont dépendre de la disponibilité des ressources. Celle-ci sera influencée par la nature du sol et par l'historique de son occupation, mais aussi, par le développement de la structure de la communauté plantée. Ainsi, la compétition (ou la facilitation) intraspécifique et interspécifique devra être examinée à différents stades de développement. De même, la réaction des espèces aux diverses interventions de taille des arbres, d'éclaircie et de fertilisation, devra être évaluée rigoureusement. Même la persistance des effets positifs de la répression des herbacées, constatée au cours des premières années, aura besoin d'être examinée dans le but de calibrer l'intensité optimale de la répression appliquée initialement. Afin de porter toute l'attention nécessaire à l'ensemble des éléments ci-

haut mentionnés, il convient de maintenir l'intérêt chez le producteur privé. C'est lui qui va oeuvrer sur la plantation, appliquer les nouvelles approches et utiliser les nouveaux outils. Son intérêt sera à la mesure de l'appui de la collectivité.

La décentralisation des décisions en matière de mise en valeur de la forêt privée qui est en cours, et qui se concrétise par la création d'agences régionales possédant une autonomie budgétaire, augure bien pour les espèces feuillues. Les plans d'aménagement forestier qui seront adoptés devraient répondre davantage aux besoins des régions. Le choix des outils de répression des herbacées pourrait être discuté localement et différer d'une région à l'autre. Une structure décisionnelle plus accessible peut accroître la portée des travaux de recherche, dont les fruits peuvent être livrés plus directement aux utilisateurs. Cette décentralisation pourrait permettre de consacrer, localement, plus d'attention à l'encadrement des activités de reboisement afin d'améliorer la compréhension des facteurs de succès chez les producteurs de la région. Les chercheurs devront s'activer à faire valoir l'utilité de leur contribution pour la planification et l'évaluation des essais.

Le paysage forestier de nos régions du sud de la province est le résultat d'un ensemble de facteurs dont les principaux sont le déboisement, le morcellement de la forêt résiduelle et l'absence d'activité d'aménagement. Le potentiel forestier est en général réduit par les perturbations et par l'inactivité actuelle. La reconstruction du paysage forestier peut profiter de la grande motivation que les citoyens affichent présentement à propos de la plantation des arbres. Si cette motivation est surtout une affaire de coeur, la réussite de la plantation est également une affaire de raison. Ce savoir-faire en développement devrait donc être extrêmement bénéfique pour accroître la ressource ligneuse en espèces feuillues et la richesse paysagère de nos régions méridionales.

Bibliographie générale

- Abrams, M.D. 1990. Adaptations and responses to drought in *Quercus* species of North America. *Tree Physiology* 7 : 227.
- Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey. 1987. The Canadian System of soil Classification (CSSC). 2nd ed. Agric. Can. Ottawa, On. Publ 1646, 164 p.
- Bailian, L., Allen, H.L. & McKeand, S.E. 1991. Nitrogen and family effects on biomass allocation of loblolly pine seedings. *Forest Science* 37 : 271-283.
- Bariteau, L. 1988. La carte géomorphologique au 1 :20 000 de modelés polygéniques : un exemple des basses terres du Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal, 185 p.
- Bates, D.M., Belisle, J.M., Cameron, B.H., Evans, L.J., Jones, R.K., Pierpoint, G. & Broek, B.V.D. 1985. Field manual for describing soils. Ontario Institute of Pedology, University of Guelph, 3rd edition, 38 p.
- Bergeron, J.F., Saucier, J.P., Robitaille, A. & Robert, D. 1992. Québec forest ecological classification program. *Forestry Chronicle* 68 : 53-63.
- Bergeron, Y., Bouchard, A. & Leduc, A. 1988. Les successions secondaires dans les forêts du haut Saint-Laurent, Québec. *Naturaliste Canadien* 115 : 19-38.
- Binkley, D. & Vitousek, P. 1989. Soil nutrient availability. *In* : R. W. Percy, J. R. Ehleringer, H. A. Mooney & P. W. Rundel (Eds.), *Plant physiological ecology*. Chapman and Hall, New York. pp. 75-93.
- Bloom, A.J., Chapin, F. S.III, Mooney, H.A. 1985. Resource limitation in plants - an economic analogy. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 16 : 363-392.

- Bouchard, A. 1979. La végétation forestière du Cap Saint-Jacques, île de Montréal, Québec. *Canadian Journal of Botany* 57 : 1191-1202.
- Bouchard, A., Bergeron, Y., Camiré, C., Gangloff, P. & Gariépy, M. 1985. Proposition d'une méthodologie d'inventaire et de cartographie écologique : le cas de la MRC du Haut-Saint-Laurent. *Cahiers de géographie du Québec* 29 : 79-95.
- Bouchard, A., Dyrda, S., Bergeron, Y. & Meilleur, A. 1989. The use of notary deeds to estimate the change in the composition of 19th century forest, in Haut-Saint-Laurent, Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 19 : 1146-1150.
- Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 54 : 464-465.
- Bowling, C. & Zelazny, V. 1992. Forest site classification in New Brunswick. *Forestry Chronicle* 68 : 34-41.
- Boxman, A.W., Cobben, P.L.W. & Roelofs, J.G.M. 1994. Does (K+Mg+Ca+P) fertilization lead to recovery of tree health in a nitrogen stressed *Quercus rubra* L. stand. *Environmental Pollution* 85 : 297-303.
- Brais, S., Bhéreur, D., Gagnon, D. & Coderre, D. 1989. Effets de différentes pratiques sylvicoles et de l'introduction de vers de terre sur la structure du sol en plantations de feuillus. *Canadian Journal of Soil Science* 69 : 705-709.
- Brand, D.G. 1991. The establishment of boreal and sub-boreal conifer plantations : An integrated analysis of environmental conditions and seedling growth. *Forest Science* 37 : 68-100.
- Brand, D.G. & Janas, P.S. 1988. Growth and acclimation of planted white pine and white spruce seedlings in response to environmental conditions. *Canadian Journal of Forest Research* 18 : 320-329.

- Brisson, J. 1992. The history and tree stratum of an old-growth forest of Haut-Saint-Laurent region, Québec. *Natural Areas Journal* 12 : 3-9.
- Britt, J.R., Mitchell, R.J., Zutter, B.R., South, D.B., Gjerstad, D.H. & Dickson, J.F. 1991. The influence of herbaceous weed control and seedling diameter on six years of loblolly pine growth-A classical growth analysis approach. *Forest Science* 37 : 655-668.
- Burns, R.M. & Honkala, B.H. 1990. *Silvics of North America : 2. Hardwoods. Agriculture Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC, 877 p.*
- Canadian Soil Classification Committee. 1978. *Canadian soil classification system. Ministry of Agriculture Canada, Publication no 1646.*
- Carlson, S.J., Donald, W.W. 1988. Glyphosate effects on Canada thistle (*Cirsium arvense*) roots, root buds, and shoots. *Weeds Research* 28 : 37-45.
- Cauboue, M. 1988. *Le reboisement au Québec. Guide-terrain pour le choix des essences résineuses. Ministère de l'Énergie et des Ressources, 32 p.*
- Cerny, B.A. & Kaiser, H.F. 1977. A study of a measure of sampling adequacy for factor-analytic correlation matrices. *Multivariate Behavioral Research* 12 : 43-47.
- Chandler, J.M. & Filer, T.H. 1980. *New Applicators for Weed Control in Forest Nurseries and Plantations. Southern Nursery Conference. USDA Forest Service. Atlanta, GA. pp.*
- Chapin, F.S. 1980. The mineral nutrition of wild plants. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 11 : 233-260.
- Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. *In* : C. A. Black (Ed.), *Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy, Madison, WI. pp. 902-904.*

- Cogliastro, A., Gagnon, D. & Bouchard, A. 1993. Effet des sites et des traitements sylvicoles sur la croissance, l'allocation en biomasse et l'utilisation de l'azote de semis de quatre espèces feuillues en plantations dans le sud-ouest du Québec. *Canadian Journal of Forest Research* 23 : 199-209.
- Cogliastro, A., Gagnon, D. & Bouchard, A. 1997. Is site preparation necessary for bur oak receiving post-planting weed control ? *Annales des Sciences Forestières* 54 : 107-116.
- Cogliastro, A., Gagnon, D., Coderre, D. & Bhereur, P. 1990. Responses of seven hardwood tree species to herbicide, rototilling, and legume cover at two southern Quebec plantation sites. *Canadian Journal of Forest Research* 20 : 1172-1182.
- Davies, R.J. 1987. Trees and weeds. *Forestry Communication Handbook* 2. H.M.S.O., London.
- Davies, R.J. 1988. Sheet mulching as an aid to broadleaved tree establishment II. Comparison of various sizes of black polythene mulch and herbicide treated spot. *Forestry (Oxf.)* 61 : 107-124.
- Davies, W.J., Kozlowski, T.T., Chaney, W.R. & Lee, K.L. 1973. Effects of transplanting on physiological responses and growth of shade trees. *Proc. Int. Shade Tree Conf. Vol. 48* : pp. 22-30.
- Delage, M. & Gangloff, P. 1993. Marques d'icebergs reliques dans la région de Montréal, Québec. *Géographie physique et Quaternaire* 47 : 69-80.
- Delage, M., Gangloff, P., Larouche, A. & Richard, P.J.H. 1985. Note sur un site à macrorestes végétaux tardiglaciaires au sud-ouest de Montréal, Québec. *Géographie physique et Quaternaire* 39 : 85-90.

- Domon, G., Bouchard, A., Bergeron, Y. & Gauvin, C. 1986. La répartition et la dynamique des principales espèces arborescentes du Bois-de-Saraguay, Montréal (Québec). *Canadian Journal of Botany* 64 : 1027-1038.
- Domon, G., Bouchard, A. & Gariépy, M. 1993. The dynamics of the forest landscape of Haut-Saint-Laurent (Quebec, Canada) : interactions between biophysical factors, perceptions and policy. *Landscape and Urban Planning* 25 : 53-74.
- Domon, G., Meilleur, A., Bouchard, A. & Gariépy, M. 1987. Le rôle des indicateurs et de la cartographie écologique en aménagement et en gestion du territoire agricole et forestier. 1. Présentation et objectifs de l'étude, méthodologie, description du territoire pilote et dossier cartographique. Centre de recherches écologiques de Montréal, Université de Montréal.
- Doucet, R. 1992. La science agricole : climat, sols et productions végétales du Québec. Éditions Berger, Eastman (Québec), 699 p.
- Dumont, M. 1995. Plantation des feuillus nobles. Direction de l'assistance technique, Ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec, Pub. No RN95-3022, 126 p.
- Field, C., Mooney, H. A. 1986. The photosynthesis - nitrogen relationship in wild plants. *In* : T. J. Givnish (Ed.), *On the economy of plant form and function*. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 25-55.
- Fowells, H.A. 1965. *Silvics of forest trees of the United States*. Agriculture Handbook 271. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC., 762 p.
- Fraedrich, S.W. & Ham, D.L. 1982. Wood chip mulching around maples : effects on tree growth and soil characteristics. *Journal of Arboriculture* 8 : 85-89.

- Fronchot, H. & Lévy, G. 1980. Facteurs limitants de la croissance initiale d'une plantation de merisier sur rendzine brunifiée. *Ann. Sci. For.* 37 : 239-248.
- Gagnon, D. & Bouchard, A. 1981. La végétation de l'escarpement d'Eardley, parc de la Gatineau, Québec. *Canadian Journal of Botany* 59 : 2667-2691.
- Gauthier, S. & Gagnon, D. 1990. La végétation des contreforts des Laurentides : une analyse des gradients écologiques et du niveau successional des communautés. *Canadian Journal of Botany* 68 : 391-401.
- Ghassemi, M., Quinlivan, S. & Dellarco, M. 1982. Environmental effects of new herbicides for vegetation control in forestry. *Environmental. Int.* 7 : 389-401.
- Globensky, Y. 1987. Géologie des basses terres du Saint-Laurent. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Québec, MM. 85-02. 53 p.
- Hallé, A. 1987. La productivité des communautés forestières dans le sud du Québec. M.Sc. Thesis, Université du Québec à Montréal, Montréal, 68 p.
- Haynes, R.J. 1986. Mineral nitrogen in the plant-soil system. Academic Press, Toronto, 483 p.
- Hendrickson, O.Q., Robinson, J.B. & Chatarpaul, L. 1985. La microbiologie des sols forestiers : revue bibliographique. *Serv. Can. For. Inst. For. Natl., Rap. inf. PI-X-19F.* 102 p.
- Hightshoe, G.L. 1988. Native trees, shrubs, and vines for urban and rural America : A planting design manual for environmental designers. Van Nostrand Reinhold, New-York, 819 p.
- Ingestad, T. & Agren, G.I. 1991. The influence of plant nutrition on biomass allocation. *Ecological Applications* 1 : 168-174.

- Jones, R.K., Pierpoint, G., Wickware, G.M., Jeglum, J.K., Arnup, R.W. & Bowles, J.M. 1983. Field guide to forest ecosystem classification for the Clay Belt, site region 3e. Ont. Min. Nat. Resour., Toronto, Ontario, 123 p.
- Kaiser, H.F. 1970. A second generation little jiffy. *Psychometrika* 35 : 401-415.
- Kaiser, H.F. & Cerny, B.A. 1974. Little jiffy, mark IV. *Educational and Psychological Measurement* 34 : 111-117.
- Keeney, D.R. & Nelson, D.W. 1982. Nitrogen-inorganic forms. *In* : A. L. Page, R. H. Miller & D. R. Keeny (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2 Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Madison, WI. pp. 643-698.
- Klinka, K. & Carter, R.E. 1990. Relationships between site index and synoptic environmental factors in immature coastal Douglas-fir stands. *Forest Science* 36 : 815-830.
- Klinka, K. & Feller, M.C. 1984. Principles used in selecting tree species for regeneration of forest sites in south-western British Columbia. *Forestry Chronicle* 60 : 77-85.
- Klinka, K., Green, R.N., Courtin, P.J. & Nuszdorfer, F.C. 1984. Site diagnosis, tree species selection, and slashburning guidelines for the Vancouver forest region. *Land Management Report No. 25*, Ministry of Forest, Victoria, B.C., 180 p.
- Kramer, P.J. & Kozlowski, T.T. 1979. *Physiology of woody plants*. Academic Press, London, 811 p.
- Kraske, C.R. & Fernandez, I.J. 1990. Conifer seedling growth response to soil type and selected nitrogen availability indices. *Soil Science Society of America Journal* 54 : 246-251.

- Kuhns, M.R., Stroup, W.W. & Gebre, G.M. 1993. Dehydration tolerance of 5 Bur Oak (*Quercus macrocarpa*) seed sources from Texas, Nebraska, Minnesota, and New York. *Canadian Journal of Forest Research* 23 : 387-393.
- Lambert, F., Truax, B., Gagnon, D. & Chevrier, N. 1994. Growth and nutrition, monitored by enzyme assays, in a hardwood plantation; effects of mulching materials and glyphosate application. *Forest Ecology and Management* 70 : 231-244.
- Lamontagne, L. & Nolin, M.C. 1997. Dossier des noms de sols du Québec. Système d'information des sols du Canada (SISCan). Centre de recherches sur les sols et les grandes cultures, Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Équipe pédologique du Québec, Sainte-Foy, Qc, (in press) 60 p.
- Lechowicz, M.J. & Ives, N.E. 1989. Comparative ecology of drought response in hardwood trees : *Acer saccharum* versus *Fraxinus americana*. In : K. H. Kreeb, H. Richter & T. M. Hinckley (Eds.), *Structural and functional responses to environmental stresses*. SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands. pp. 283-292.
- Lopushinsky, W. & Beebe, T. 1976. Relationship of shoot-root ratio to survival and growth of outplanted Douglas fir and ponderosa pine seedlings. U.S. For. Serv. Res. Note PNW 274.
- MacRae, R.J., Hill, S.B., Henning, J. & Bently, A.J. 1990. Policies, programs and regulations to support the transition to sustainable agriculture in Canada. *Am. J. Alt. Agr.* 5 : 76-92.
- Mailloux, A. & Godbout, G. 1954. Étude pédologique des sols des comtés de Huntingdon et Beauharnois. Ministère de l'Agriculture du Québec, Division des sols, Ste-Anne-de-la-Pocatière, Québec. *Bulletin technique* No 4, 221 p.

- Margolis, H.A. & Brand, D.G. 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. *Canadian Journal of Forest Research* 20 : 375-390.
- Marineau, K. 1992. Effet de la répression des herbacées à l'aide d'herbicide et de paillis de plastique sur la croissance du chêne rouge et du frêne rouge. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal.
- Marshner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, Toronto, 889 p.
- Meilleur, A., Bouchard, A. & Bergeron, Y. 1994. The relation between geomorphology and forest community types of the Haut-St-Laurent, Québec. *Vegetatio* 111 : 173-192.
- Meredieu, C., Arrouays, D., Goulard, M. & Auclair, D. 1996. Short range soil variability and its effect on red oak growth (*Quercus rubra* L.). *Soil Science* 161 : 29-38.
- Ministère de l'Environnement du Québec. 1991. Sommaire climatologique du Québec, Station St-Anicet. Direction des réseaux atmosphériques, ministère de l'Environnement du Québec, Québec, sommaires 1988, 1989, 1990.
- MRN. 1992. Programme d'aide à la mise en valeur des forêts privées. Cahier d'instructions (Normes techniques). Service de mise en valeur des forêts privées. Ministère des forêts du Québec, 201 p.
- Munson, A.D. & Timmer, V.R. 1989. Site-specific growth and nutrition of planted *Picea mariana* in the Ontario Clay Belt. I. Early performance. *Canadian Journal of Forest Research* 19 : 162-170.
- Nambiar, E.K.S. & Sands, R. 1993. Competition for water and nutrients in forests. *Canadian Journal of Forest Research* 23 : 1955-1968.
- Ponder, F. 1986. Effect of three weeds on the growth and mycorrhizal infection of black walnut *Juglans nigra* seedlings. *Canadian Journal of Botany* 64 : 1888-1892.

- Rowe, J.S. 1972. Les régions forestières du Canada. Ministère de l'Environnement, Service canadien des forêts, Ottawa, ON, Publication no 1300F. 172 p.
- Rundel, P.W. & Jarrell, W.M. 1989. Water in the environment. *In* : J. E. Ehrlinger, R.W. Pearcy, H.A. Mooney & P.W. Rundel (Eds.), Plant physiological ecology. Chapman and Hall, London, UK. pp. 29-56.
- Salisbury, F.B. & Ross, C.W. 1992. Plant physiology. Wadsworth Publishing Company, Inc., Belmont, CA, 682 p.
- SAS Institute Inc. 1989. SAS/STAT™ User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Volume 1. SAS Institute Inc., Cary NC, 943 p.
- Simard, H. & Bouchard, A. 1996. The precolonial 19th century forest of the Upper St-Lawrence region of Québec : a record of its exploitation and transformation through notary deeds of wood sales. *Canadian Journal of Forest Research* 26 : 1670-1676.
- Sims, R.A. & Uhlig, P. 1992. The current status of forest site classification in Ontario. *Forestry Chronicle* 68 : 64-77.
- Smith, M.L. 1995. Community and edaphic analysis of Upland Northern Hardwood communities, Central Vermont, USA. *Forest Ecology and Management* 72 : 235-249.
- Soil Survey Staff. 1992. Keys to soil Taxonomy. SMSS Technical Monograph No. 19. Fifth Edition. Pocahontas Press Inc. Blacksburg, VG, 541 p.
- SPBRM. 1987. Plan de mise en valeur de la forêt privée. Syndicat des producteurs de bois de la région de Montréal, Montréal.
- St-Jacques, C. & Gagnon, D. 1988. La végétation forestière du secteur nord-ouest de la vallée du Saint-Laurent, Québec. *Canadian Journal of Botany* 66 : 793-804.

- Thibault, M. 1985. Les régions écologiques du Québec méridional, (1 : 1 250 000). Service de la cartographie, Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Québec.
- Timbal, J. & Dewilder, R. 1994. Sensibilité au calcaire. *In* : J. Timbal, A. Kremer, N. L. Goff & G. Nepveu (Eds.), *Le chêne rouge d'Amérique*. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris. pp. 98-100.
- Truax, B., Gagnon, D. & Chevrier, N. 1994. Nitrate reductase activity in relation to growth and soil N forms in red oak and red ash planted in three different environments : forest, clear-cut and field. *Forest Ecology and Management* 64 : 71-82.
- Truax, B. & Gagnon, D. 1993. Effects of straw and black plastic mulching on the initial growth and nutrition of butternut, white ash and bur oak. *Forest Ecology and Management* 57 : 17-27.
- Truog, E. 1930. Determination of the readily available phosphorus of soils. *Journal of American Society of Agronomy* 22 : 874-882.
- Vomocil, J.A. 1965. Porosity. *In* : C. A. Black (Ed.), *Methods of soil analysis*. Partie 1. American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI. pp. 299-314.
- von Althen, F.W. 1977. Site preparation prevents reopening of planting slits in heavy-textured soils. *Forestry Chronicle* 53 : 166-167.
- von Althen, F.W. 1984. Mowing versus mechanical or chemical weed control in Sugar Maple afforestation. *Tree Planters' Notes* 35 : 28-31.
- von Althen, F.W. 1985. Revitalizing a black walnut plantation through weed control and fertilization. *Forestry Chronicle* 61 : 71-74.

- von Althen, F.W. 1987. Site preparation and weed control in hardwood afforestation in Ontario. Proceedings of the 6th Central Hardwood Forest Conference, Knoxville, 24-26 février 1987. University of Tennessee, Knoxville.
- von Althen, F.W. 1990. Hardwood planting on abandoned farmland in southern Ontario : revised guide. Minister of Supply and Services Canada. Catalogue No. Fo 42-150/1990E, 77 p.
- Von Althen, F.W. 1990. Sowing and planting shagbark and bitternut hickories on former farmland in Southern Ontario. Forestry Canada, Ontario Region, Great Lakes Forestry Centre, RN-O-X-403. 11 p.