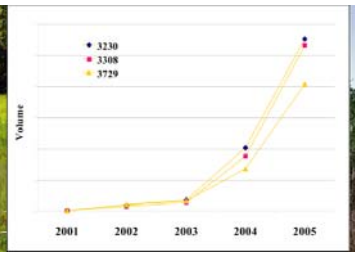
Institut de recherche en biologie végétale IRBV

JARDIN BOTANIQUE DE MONTRÉAL

Université de Montréal

Écologie comparée et bilan nutritif de peupliers hybrides en double rotation avec des feuillus nobles



Rapport final préparé par

Loïc d'Orangeville, André Bouchard, Stéphane Daigle et Alain Cogliastro

Présenté au
Réseau Ligniculture Québec

Juillet 2006

Bilan 2006

ÉCOLOGIE COMPARÉE ET BILAN NUTRITIF DE PEUPLIERS HYBRIDES EN DOUBLE ROTATION AVEC DES FEUILLUS NOBLES

Présenté au

Réseau Ligniculture Québec

PAR LOÏC D'ORANGEVILLE, ANDRÉ BOUCHARD, STÉPHANE DAIGLE ET ALAIN COGLIASTRO

Institut de recherche en biologie végétale
Université de Montréal &
Jardin botanique de Montréal
4101 rue Sherbrooke est, Montréal H1X 2B2

Institut de recherche en biologie végétale
L'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV) est un centre de formation supérieure dont la mission porte sur la biologie des plantes dans tous ses aspects : fonctionnement, développement, évolution, écologie, etc. Issu d'un partenariat entre l'Université de Montréal et la Ville de Montréal, l'IRBV occupe des locaux modernes sur le site du Jardin botanique de Montréal. Il regroupe une quinzaine de chercheurs autonomes (chercheurs à la Division de la recherche et du développement scientifique du Jardin botanique de Montréal ou professeurs au Département de sciences biologiques de l'Université de Montréal) sans compter les nombreux assistants et chargées de recherche, étudiants à la maîtrise et au doctorat et chercheurs post-doctoraux. Les recherches sont de nature fondamentale et appliquée. Les chercheurs ont à leur disposition des laboratoires et des équipements scientifiques de pointe, en plus de serres expérimentales, de chambres de croissance, d'équipement de microscopie électronique et d'analyse d'image, de l'herbier Marie-Victorin (700 000 spécimens) et de 2 bibliothèques spécialisées en botanique.

Équipe de travail

LOÏC D'ORANGEVILLE (B.Sc. Biologiques, candidat M.Sc. Écologie)	Institut de recherche en biologie végétale (IRBV) Université de Montréal, Département des Sciences biologiques
ANDRÉ BOUCHARD (Ph.D. Écologie)	IRBV, Groupe de recherche en écologie forestière inter universitaire (GREFI) Université de Montréal, Département des Sciences biologiques
STÉPHANE DAIGLE, STATISTICIEN	Institut de recherche en biologie végétale (IRBV)
ALAIN COGLIASTRO (Ph.D. Écologie)	IRBV, Jardin Botanique de Montréal Université de Montréal, Département des Sciences biologiques

Pour fin de citation :

D'Orangeville, L., A. Bouchard, S. Daigle et A. Cogliastro. 2006. **Écologie comparée et bilan nutritif de peupliers hybrides en double rotation avec des feuillus nobles.** Rapport final préparé pour le Réseau Ligniculture Québec. Institut de recherche en biologie végétale, Montréal. 73 pages.

Table des matières

ÉQUIPE DE TRAVAIL 2

TABLE DES MATIÈRES 3

RÉSUMÉ 5

INTRODUCTION 6
Verteneuil 2000 7
Caillé-Latreille 2002 8
Thibodeau 2003 8
Leblanc-McCormick 2003 9

CHAPITRE I – VERTENEUIL 2000-2005 (6 ANS) 10

Méthodologie 10

Résultats 14
Analyses de sols 14
Croissance et survie 15

CHAPITRE II – CAILLÉ LATREILLE 2002-2005 (4 ANS) 20

Méthodologie 20

Résultats 23
Analyses des sols 23
Croissance et survie 24
Nutrition des peupliers 27

CHAPITRE III – THIBODEAU 2003-2005 (3 ANS) 31

Méthodologie 31

Résultats 33
Analyses de sols 33
Croissance et survie 34

CHAPITRE IV –LEBLANC MCCORMICK 2003-2005 (3 ANS) 37

Méthodologie 37

Résultats 40
Analyses des sols 40
Croissance et survie 43
Nutrition des peupliers 46

DISCUSSION **53**

CONCLUSION **58**

BIBLIOGRAPHIE **60**

CHAPITRE V – OPTIMISATION DES DENSITÉS DE PLANTATION EN DOUBLE ROTATION **63**

Méthodologie **63**

Résultats **65**
Paramètres des cultivars et relations allométriques 65
Climat lumineux en fonction des espacements et du cultivar: 67

Remerciements **71**

ANNEXE **72**

Résumé

Nous présentons ici les résultats de croissance de plusieurs plantations expérimentales initiées en 2000 et établies dans la M.R.C. du Haut-Saint-Laurent, en Montérégie, comprenant des peupliers hybrides et des feuillus nobles en combinaison sur un même site (double rotation). Nos dispositifs expérimentaux permettent de comparer une gamme de plusieurs hybrides interaméricains, eurasiens, euraméricains et certaines combinaisons multiples, que nous avons mis à l'essai dans plusieurs conditions de sols qui reflètent les réalités du sud-ouest québécois. Les expérimentations comprennent des comparaisons d'espacement entre les peupliers et les feuillus nobles, de manière à optimiser leur combinaison, et intègrent également l'analyse de la production intercalaire de peupliers et de plantes d'intérêt agronomique. L'ensemble des dispositifs initie l'évaluation de la sylviculture des clones de peupliers disponibles pour le sud du Québec.

Le clone DNxM 915508 s'est montré le mieux adapté aux diverses conditions de sol testées dans nos dispositifs, produisant bien autant sur des loams que sur des sols argileux, mais voit sa productivité réduite sur sol plus acide (pH 5,7). Le TxD 3230 montre d'excellentes productivités sur des textures de sols moyennes à grossières, mais, contrairement au 915508, est plus intolérant aux sols argileux moins bien drainés ainsi qu'aux pH plus alcalins (pH 7,5). Le NxM 3729 a de son côté montré une bonne adaptation aux loams autant acides qu'alcalins (pH= 5,7 à 7,5), ainsi qu'une bonne survie et croissance sur les drainages imparfaits. À l'opposé, le MxB 915311 a mal réagi aux conditions de croissance associées aux loams sableux et il semble être davantage adapté aux sols de texture fine. Le DxN 3308, considéré comme tous les DxN moins bien adapté aux milieux dits hors-vallée que les hybrides interaméricains (Souleres 1992), se montre beaucoup plus productif sur un loam riche et fertile (comme le site Verteneuil de la présente étude) que sur un loam plus pauvre (site Caillé) ou moins bien drainé (site Thibodeau). Un autre DxN, le 3570, présente de bons résultats sur loams francs, en plus de très bien réagir aux sols plus lourds ou aux sols plus sableux.
Les dosages nutritifs ont révélé l'importance d'éléments clés comme le potassium, le magnésium, le calcium et particulièrement la concentration en azote foliaire pour la croissance des peupliers. De plus, nos résultats suggèrent que ces concentrations dans les tissus sont fortement influencées par le génotype du cultivar.
Les essais d'espacements comparés pour optimiser la combinaison peupliers-feuillus nobles sont encore trop jeunes pour discuter des différences obtenues. La culture de soya, une plante fixatrice d'azote, entre les bandes de peupliers, a pour conséquence d'accroître leur croissance radiale en comparaison à l'entretien par hersage. Outre l'effet du soya, cela peut être dû à l'application de fertilisants qui accompagne l'ensemencement du soya, ou à l'effet de l'herbicide appliqué qui limite, davantage que par le hersage, la compétition en bordure des paillis de plastique, soit à proximité des peupliers.

Introduction

Comme le soulignait la Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise dans son rapport remis en décembre 2004, il y a aujourd'hui dans la forêt feuillue québécoise une surabondance de bois de faible qualité et un écrémage des essences nobles – un fait connu depuis plus de 20 ans (Coulombe *et al.* 2004). En 2004, les communautés forestières occupaient 28.11% des superficies de la Montérégie, une région du sud-ouest québécois (Belvisi 2005). Deux phénomènes parallèles peuvent être constatés aujourd'hui. D'un côté, les basses terres très riches et désormais cultivables grâce aux nouvelles techniques de drainage voient leur territoire forestier rétrécir comme peau de chagrin au profit de l'industrie agricole. En effet, la Montérégie perdait globalement, entre 1999 et 2004, près de 3% de sa superficie forestière, soit plus de 9000 hectares de forêts (Belvisi 2005), nous rappelant ainsi l'urgence d'agir afin de protéger les forêts résiduelles, voire en augmenter les territoires. D'un autre côté, les nouvelles réalités agricoles obligent des producteurs à abandonner des surfaces pierreuses ou de taille réduite quoique productives (Pan *et al.* 1999). Ces sites représentent d'excellentes opportunités en regard d'une des principales recommandations de la Commission Coulombe, soit :

> «*Que le Ministère mette en oeuvre une stratégie de sylviculture intensive visant l'accroissement des rendements ligneux, par le biais de projets particuliers sur des sites à fort potentiel, tant en forêts publiques que privées*. » (Coulombe *et al.* 2004)

La Montérégie peut, avec la qualité de son climat, de ses sols ainsi que sa main d'œuvre en place, participer à l'intensification de la production de bois de qualité tout en cherchant à préserver des unités forestières fonctionnelles. Les forêts feuillues résiduelles du sud du Québec sont de plus en plus utilisées de manière polyvalente, notamment en ce qui concerne les aspects fauniques et récréatifs qui gagnent en importance. Une grande attention est actuellement portée sur le potentiel des peupliers hybrides (PEH) pour répondre aux besoins d'accroissement des rendements ligneux et d'approvisionnement des industries de transformation du bois du sud du Québec. Depuis 2001, le Réseau Ligniculture Québec[1] a été mis en place afin de coordonner les activités de recherche sur la culture intensive de PEH. Il existe actuellement pour les producteurs québécois une information de base sur les différents clones (ou cultivars) de PEH, notamment concernant leur résistance aux maladies ou leur rusticité (Périnet *et al.* 2001). Pour exploiter de façon optimale le potentiel des PEH, nous croyons essentiel de poursuivre l'analyse pour préciser leurs caractéristiques écologiques particulières. Les différents cultivars présentent une grande spécificité quant à leurs exigences stationnelles (Dickman *et al.* 2002), et dans certains autres pays, des fiches techniques élaborées pour chaque clone guident les choix des producteurs. Nous proposons ici de faire le point sur un

[1] Issus du Programme Valorisation Recherche Québec (VRQ) – Le réseau a l'objectif de mettre en valeur les résultats de la recherche dans le domaine de la production intensive à des fins de production de biomasse (pâtes et papier), à des fins de production de bois de qualité et selon un objectif de conservation d'une partie des écosystèmes naturels. Une main d'œuvre est financée non pas pour réaliser des activités de recherche mais pour les coordonner et les mettre en valeur.

réseau de plantations expérimentales que nous avons initié au printemps 2000, auquel s'est ajouté des plantations en 2002 et 2003, et comportant deux objectifs généraux: acquérir une meilleure connaissance des PEH tout en cherchant à optimiser en parallèle la culture de feuillus nobles de grande qualité.

Le résultat de différentes occasions d'échanges avec des intervenants forestiers du sud du Québec (dont l'allocution de E. Gagné, directeur RESAM, Acfas2002; les Priorités de la Table régionale de concertation et de recherche de la Montérégie, 2002; colloque Dynamiser sylviculture des feuillus, Cogliastro et Hallé, 2000), est manifestement en faveur d'une sylviculture de PEH qui conduit à un produit de haute valeur ajoutée (déroulage plutôt que pâte). Au cours de ces échanges, on a souligné avec insistance que l'intensification de la production dans le sud du Québec doit aussi inclure le développement de la sylviculture des feuillus nobles. Dans ce contexte, nous croyons qu'un système de plantations intensives comprenant les PEH et les feuillus nobles en combinaison sur un même site (double rotation), représente une avenue sylvicole prometteuse. La vitesse de croissance des PEH permettrait de créer rapidement des conditions de protection favorables au bon développement des feuillus précieux. Une littérature européenne à caractère technique souligne l'importance de l'accompagnement pour la culture de ces feuillus précieux (Becquey 1997; Becquey 1997) et un guide récent de boisement des terres agricoles propose l'alternance de rangs de feuillus nobles et de PEH (Balleux & van Lerberghe 2001). Aussi, la sylviculture des peupliers comporte des interventions similaires à celles des feuillus nobles mais qui sont réalisées selon un cycle plus court. Cette concentration des interventions pour former une bille de peuplier de qualité implique une formation hâtive des intervenants qui sauront par la suite éduquer les feuillus nobles. Enfin, ce système à double rotation comprend une succession végétale qui s'inspire de la dynamique naturelle de l'écosystème forestier.

Les différents dispositifs expérimentaux abordés ici constituent des parcelles de référence de populiculture conduite selon une sylviculture à large espacement pour des fins de production de bois de sciage et de déroulage. Ils partagent l'objectif de préciser les limites et tolérance aux conditions de sol des différents cultivars tout en intégrant le concept de double production de peupliers et de feuillus à bois nobles sur le même site. Chacun des dispositifs comporte cependant des objectifs spécifiques et le nombre de sites compris dans un dispositif peut varier. Ils sont ici présentés plus en détail (la localisation des dispositifs est présentée en Annexe).

Verteneuil 2000 – Un premier dispositif de plantation visant une double production, présenté au chapitre I, a été réalisé au printemps 2000 sur un site à haut potentiel (anciennement utilisé pour le maïs et le soya) pour étudier le développement des trois différents clones de peupliers qui sont actuellement parmi les plus performants pour le sud du Québec (Périnet *et al.* 2001) et tester les conséquences des espacements entre les rangs de peupliers sur la productivité globale du système. Ces clones sont combinés au noyer noir (*Juglans nigra*) et au frêne blanc (*Fraxinus americana*) disposés entre les rangs de peupliers de 12m ou 16m.

En 2004, une nouvelle dimension de recherche a été ajoutée au projet : la culture intercalaire. Bien qu'elles soient encore inexistantes au Québec, les cultures intercalaires pourraient à moyen terme permettre de stimuler la mise en place de plantations de peupliers hybrides autant que des feuillus nobles en maximisant leur rentabilité sur les territoires privés, en particulier les terres à haut rendement agricole. Dans plusieurs régions tempérées du monde, l'intégration d'arbres en territoire agricole a présenté un fort potentiel pour l'adoption de pratiques culturales durables (Thevathasan & Gordon 2004). Les recherches produites par l'Université de Guelph, en Ontario, durant les 15 dernières années ont démontré les bénéfices évidents des cultures intercalaires, entre autres pour la qualité de l'eau, la séquestration du carbone et la biodiversité (Thevathasan & Gordon 2004). Nous avons sélectionné le soya comme culture agricole, son emploi étant largement répandu en Montérégie et totalisant en 2002 une production de 195 000 tonnes, soit plus de 60% de toute la production québécoise (Institut de la statistique du Québec). Présentement, les effets des cultures intercalaires de soya, en comparaison avec des monocultures d'arbres, sont peu connus. Cependant, il a été observé que la combinaison de semis d'arbres avec des légumineuses herbacées augmentait leur vitesse de croissance (Haines *et al.* 1978; Van Sambeek *et al.* 1986; Dupraz *et al.* 1999).

Caillé-Latreille 2002 – Dans le sud du Québec (Montérégie, Estrie, Outaouais, Laurentides, Lanaudière, Mauricie…), en territoire privée, les principales opportunités actuelles pour pratiquer une foresterie intensive demeurent en situations marginales pour l'agriculture: soit sur des dépôts glaciaires ou tardiglaciaires, soit sur des dépôts propices à l'agriculture mais limités dans leur superficie. Les situations glaciaires et tardiglaciaires sont caractérisées par une grande diversité de conditions trophiques. Une bonne connaissance de l'écologie de différents cultivars de PEH est nécessaire pour réaliser l'adéquation entre la diversité des conditions et le choix des cultivars de PEH. Cette connaissance de l'écologie des différents cultivars de PEH couplée à une sylviculture adaptée au produit ligneux visé, forme deux éléments importants du cadre de réussite et d'acceptabilité des plantations intégrant des PEH. Le chapitre II du présent rapport présente les résultats de 4 saisons de croissance sur deux plantations contrastées par la texture de leur sol : bien que les deux sites soient formés de till calcaire d'origine glaciaire, un des deux sites a été remodelé pour constituer aujourd'hui un dépôt littoral tardiglaciaire. Il en résulte un sol plus lourd et limoneux que le premier, bien que tous deux soient caractérisés par une forte pierrosité typique des bourrelets morainiques.

Thibodeau 2003 - Nous croyons également nécessaire de préciser la tolérance des cultivars de peupliers hybrides aux sols lourds argileux et à plus mauvais drainage (situation extrême pour l'agriculture), situation qui peut-être attrayante pour une telle production, mais qui peut présenter des contraintes de croissance que seule une bonne connaissance des cultivars de PEH permettrait de préciser. Nous avons développé un dispositif expérimental sur dépôt marin lourd, encore recouvert d'un horizon organique de 50cm qui témoigne des mauvaises conditions de drainage du passé. Le site est aujourd'hui entouré de fossés et la matière organique est en voie de décomposition. Les conditions associées aux dépôts marins pourraient engendrer selon certains des croissances très dynamiques (Zhang *et al.* 2003).

Leblanc-McCormick 2003 - La Montérégie comprend une mosaïque de dépôts (Bariteau 1988) et de nombreuses situations hors vallée. Ainsi, le territoire comprend des sols à pH élevé (pH 7-8), notamment dans les dépôts glaciaires dérivés d'un substrat de nature dolomitique, et des sols de nature plus acide (pH5,5-6,5) là où le substrat est gréseux. Dans le cadre d'expériences antérieures, des différences significatives de croissance chez plusieurs espèces de feuillus nobles ont été enregistrées sur ces deux types de substrats (Cogliastro *et al.* 1997). Ces connaissances permettent aujourd'hui de mieux guider le choix des feuillus nobles. Au même titre, nous croyons que l'analyse de la réponse des PEH aux tills dérivés de ces deux ensembles géologiques, correspondant à deux groupes de pH contrastés dans la gamme variant entre pH 5.5 à 8, est essentielle pour démarrer une pratique populicole dans le sud du Québec. Certains informent qu'il est risqué de planter des PEH sur des sols dont le pH est plus grand que 6 (Camiré & Brazeau 1998). Pourtant plusieurs clones euraméricains (dont le I45/51 utilisé en Amérique et le I214 en Europe) sont proposés par d'autres sur des sols à pH supérieur à 7 (Paillassa 2002). L'analyse à court terme (3 ans), sous deux conditions de pH distinctes, de la croissance de différents clones est présentée au chapitre IV et permettra à terme de préciser les limites et tolérances des différents clones.

Tout guide sylvicole qui se respecte souligne l'importance d'harmoniser les variétés de peupliers plantées avec les caractères spécifiques des sols, afin de soutenir une meilleure productivité. Dans un récent ouvrage du conseil de recherche du Canada (Dickman *et al.* 2002), on souligne l'importance de considérer la spécificité des clones aux conditions de sol, sans toutefois apporter de précisions à ce sujet. Nous avons également constaté un manque de connaissances concernant la réponse des clones proposés au Québec et les différentes conditions de sol abordées. Dans le présent dispositif, les statuts nutritifs des peupliers seront analysés et mis en relation avec les résultats de productivité des clones sur deux différentes conditions de sol contrastées sur le plan du pH.

Chapitre I – Verteneuil 2000-2005 (6 ans)

Méthodologie

Un dispositif de 3 ha a été établi en 2000 avec un total de 300 noyers noirs, 300 frênes blancs, 1080 boutures de 3 clones d'hybrides de peupliers (365 chacun) (voir Tableau 1). Les rangs alternent entre un rang de peuplier et un rang de feuillus. Le dispositif est scindé de manière à comparer les effets de l'espacement de 6 m et de 8 m entre les rangs. Tous ces plants sont suivis et mesurés.

N° clone*	Type d'hybride	Cultivar et pays d'origine
3230	*P. trichocarpa x deltoides*	*cv. 'Boelare'; Belgique*
3308	*P. deltoides x nigra*	*cv. 'Regenerata Bâtard d'Hauterive'; France*
3729	*P. nigra x maximowiczii*	*cv. 'NM6'; Allemagne*

* liste des clones recommandés de peuplier hybride au Québec, DRF, Forêt Québec

Tableau 1 - Liste des clones utilisés

Le site choisi est situé dans la municipalité de St-Rémi dans une zone où les sols sont exploités par l'agriculture (maïs, soja, maraîcher). Du soja y était cultivé l'année précédent la mise en place du dispositif, et du maïs les années antérieures. Le sol est un loam sablo-argileux au pH neutre. Il est facilement accessible et utilisé régulièrement comme site de démonstration. Ce site n'est pas en situation marginale pour l'agriculture mais sert plutôt à des fins expérimentales, étant d'une qualité qui permet de fournir des données en conditions relativement optimales, nécessaires à la planification des activités ultérieures. Le propriétaire réalise également son choix de procéder à une activité forestière plutôt qu'agricole. Les travaux de mise en place ont débuté au printemps 2000: il a d'abord fallu effectuer quelques petits travaux de drainage de surface pour permettre le drainage des dépressions naturelles ou laissées par le tracteur l'automne précédent. Dès que le sol à pu supporter le passage du tracteur, au début de mai, un léger travail du sol en surface a été effectué à l'aide d'une herse étroite (1,2m) seulement sur les rangs (en évitant donc le brassage du sol et des graines dans les inter-bandes). Un paillis de plastique par bande de 150cm (5 pieds) de largeur a été mis en place par la suite à l'aide d'une dérouleuse posée sur le tracteur (15 mai). Les boutures de peuplier (longueur de 20 cm) et les arbres ont ensuite été plantés (entre le 15 et le 22 mai), et des collerettes ont été posées au pied des plants de feuillus; les boutures quant à elles ont été dégagées en étirant le paillis pour éviter qu'elles ne soient annelées. Le fauchage annuel a été pratiqué de 2000 à 2003.

En 2004, le dispositif a permis d'initier des essais de culture intercalaire; du soya a été ensemencé entre les rangs sur une partie du dispositif alors qu'une autre partie était hersée à deux reprises au cours de l'été. En 2005, les rangs de soya ont été fertilisés au taux de 300 kg/ha de 5-27-24, ce qui représente, par hectare, 15 unités d'azote, 81 unités de phosphore et 72 unités de potassium.

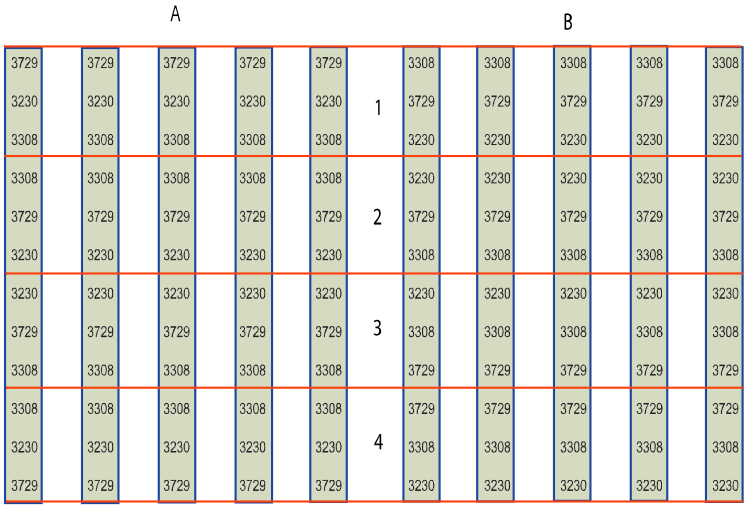


Figure 1- Schéma du dispositif expérimental; les feuillus occupent les bandes blanches entre les peupliers; les numéros identifient les blocs.

Le dispositif est composé de deux pièces, A et B qui diffèrent selon l'espacement entre les rangs de feuillus nobles et de peupliers (figure 1). Mesurant environ 220 mètres de long, ces deux champs parallèles sont séparés par un fossé de drainage. Ils sont aussi bordés sur les deux côtés par d'autres fossés, et un quatrième complète le drainage au bas des pièces (sud); au nord les pièces sont bordées par une érablière mature. Chacune des pièces est divisée en quatre blocs aléatoires complets (figure 1), comprenant cinq rangs de peupliers hybrides et quatre de feuillus nobles, de façon à ce que tous les rangs de feuillus soient accompagnés des deux côtés par un rang de peupliers. Les peupliers sont plantés à tous les deux mètres sur le rang, à raison de 9 plants par clone (l'ordre des clones est tiré au hasard) par rang pour un bloc (rangs de 27 plants). Les feuillus nobles sont disposés entre les rangs de peupliers, par groupes de 6 plants (un groupe de 3 individus par espèce, l'ordre des espèces tiré au hasard) pour chaque clone, et sont donc plantés aux 3 mètres. La densité des peupliers sera réduite avant le début de la saison de croissance 2006. Nous allons viser un espacement de 6m entre les plants de peupliers sur le rang (retrait de 2 arbres sur 3 en 2006), une densité comparable à la populiculture européenne à large espacement à des fins de production de bois de sciage et de déroulage. Les caractéristiques édaphiques des blocs sont présentées au Tableau 2.

Espacement	%Argile	%Limon	%Sable	Type de sol
6 m	17.2	36.8	46.0	loam sablo-argileux
8 m	21.2	32.0	46.8	loam sablo-argileux

Tableau 2 - Granulométrie des sols des deux pièces du site Verteneuil : la première présentant un espacement de 6m entre les rangées et l'autre de 8m. Les valeurs présentées sont des moyennes de valeurs extraites de 120 échantillons de sol pris à 15cm, 60 à 6m et 60 à 8m.

Le seul traitement qui ne soit pas répété à l'intérieur des pièces est l'espacement entre les rangs parce qu'il aurait été techniquement difficile à faire de façon aléatoire sur le terrain. La récolte future aurait également été plus complexe à réaliser. La pièce A (60m x 216m ; 1.3 ha) teste donc un espacement de 6 mètres entre les rangs feuillus et peupliers, et la pièce B (67m x 216m ; 1.73 ha) 8 mètres. Comme nous ne pouvons prétendre à un dispositif aléatoire complet en ce qui concerne les espacements, les deux pièces seront traitées séparément du point de vue statistique. Les trois clones retenus pour ces travaux font partie de la liste des clones recommandés pour les zones 1 et 2 du ministère des

Ressources naturelles du Québec (MRN) (voir tableau 1). Les boutures avaient 20 cm de longueur et ont été plantées légèrement en diagonale de façon à dégager un seul bourgeon bien orienté vers le haut ; elles nous ont été fournies gracieusement par M. Pierre Périnet de la direction de la recherche forestière du MRN. Les feuillus nobles plantés sont le noyer noir (*Juglans nigra*) et le frêne d'Amérique (*Fraxinus americana*). Ils étaient tous des plants de 1 an (1+0) du MRN (pépinière de Berthier), à racines nues dans le cas des noyers, en récipent de 340 mL pour les frênes.

Les frênes sont issus de la première génération à être produite à partir du verger à graines du MRN. Tous les arbres sont numérotés individuellement. Les noyers noirs ayant connus quelques difficultés dès le premier été, nous avons procédé à un regarni au printemps 2001 pour s'assurer de la présence d'au moins un noyer par groupe de trois. À l'occasion, des noyers morts ont été remplacés par des chênes à gros fruits (tout en respectant la règle précédente) dans les secteurs jugés plus difficiles pour les noyers (drainage moins bon) ; tous ces remplaçants, noyers ou chênes, sont exclus des présentes analyses (ne sont inclus que les arbres présents depuis l'origine). En 2000 et en 2001, tous les plants ont été traités à l'aide d'un répulsif (Deer Away ®), au début de l'été et à l'automne pour prévenir le broutage par les chevreuils. Des spirales antirongeurs ont été posées sur tous les arbres (feuillus et peupliers) en septembre 2000. Dès septembre 2000 les plants de peuplier ont été taillés une première fois pour i) dégager le bas pour permettre la pose de l'anti-rongeur et ii) corriger les défauts de forme dus à un mauvais départ à la base (plus d'un axe). Les 27 et 28 juin 2001, la moitié des plants de peuplier ont été taillés ; d'abord élagués sur 1/3 de la hauteur du plant (en préservant 2/3 de cime), suivi au besoin d'une taille de formation (seulement sur les individus élagués) codée selon l'intensité de la taille. Tous les plants ont été mesurés à l'automne 2000 et 2001. Au printemps 2000 un sous-échantillon de boutures a servi à caractériser les différences de diamètre initial entre les clones (avant de les planter).

Des travaux d'entretien de la plantation ont été effectués à la 3ème année (2002) afin de maintenir le site en bonne condition. À la fin juin un désherbage manuel a été fait sur les rangs à la base des plants feuillus. L'entretien mécanique et manuel (débroussailleuse) des inter-bandes a été effectué au début août afin de i) limiter la compétition herbacées, ii) limiter la prédation des petits rongeurs, et iii) faciliter les travaux de mesure à l'automne. Cet entretien n'est pas à négliger; de nombreuses études ont démontré l'importance de la maîtrise de la compétition par les herbacées pour maintenir la productivité en plantation. Nous avons connu une importante prédation par les chevreuils très tôt au printemps 2002, avant qu'il ne soit possible d'intervenir pour appliquer un répulsif. Seulement les frênes ont été touchés (aucun des noyers noirs), mais de façon très importante (pratiquement 100%). Le répulsif a quand même été appliqué en cette 3ème année pour limiter les dégâts (début juin), de nouveau à la fin juillet, puis à l'automne (début octobre) pour les protéger pour l'hiver. Aucun broutage n'a été observé sur les PEH, aujourd'hui trop grands pour les chevreuils. Aucun répulsif n'a été appliqué sur ces derniers.
Nous avons de nouveau fait une taille de formation (fin juillet) sur les feuillus nobles de cette plantation, entre autre pour récupérer les frênes broutés au printemps (aucune mortalité, mais reculs parfois importants entraînant des problèmes de forme qu'il fallait

corriger). Les PEH déjà désignés et élagués l'année dernière ont été élagués à nouveau en 2002 (début août), simplement pour maintenir la proportion de cime à 2/3. Les problèmes de forme avaient déjà été corrigés dès l'été 2000 et aucune nouvelle taille de formation n'a été nécessaire depuis. Grâce à ces entretiens réguliers, les PEH ont terminé avec succès la phase d'établissement et entre désormais en phase d'accumulation; leur avenir nous semble assuré. L'application de répulsif sur les frênes et noyers s'est poursuivie en 2003 et en 2004 (printemps et automne). Le nombre de plants de feuillus qui atteint une hauteur supérieure à ce qui peut être atteint par le chevreuil est maintenant adéquat et l'application de répulsif n'est plus pratiquée. L'élagage a été pratiqué sur près de la moitié des arbres en 2003 (juillet) et seulement sur les arbres désignés en 2005 (novembre).

Résultats

Analyses de sols

Nous avons procédé à une analyse des éléments nutritifs du sol afin de d'établir un portrait détaillé de la qualité du site de plantation et de la disponibilité des nutriments. Les caractéristiques chimiques du site de Verteneuil, présentées au tableau 3, sont très similaires entre les pièces A (espacement de 6m entre les rangées, soit 12m entre les PEH) et B (espacement de 8m entre les rangées, soit 16m entre les PEH). Le pH su sol su site Verteneuil est neutre, oscillant entre 6.9 et 7.1, ce qui offre des conditions idéales de disponibilité des nutriments.

	Pièce A (6m)	**Pièce B** (8m)	**Référence (Doucet 1992)**
pH solution	7.1	6.9	
pH tampon	7.4	7.2	
Phosphore (P) (kg/ha)	**<9**	**10**	288 – 720
Potassium (K) (kg/ha)	**107.0**	**124.3**	360 – 720
Magnésium (Mg) (kg/ha)	810.0	857.7	> 125
Calcium (Ca) (kg/ha)	6750.0	5930.0	> 2500
Aluminium (Al) (ppm)	645.7	800.1	
Sat. P (% P/AI)	<1.0	<1.0	
Sat. K (% mEq/CEC)	**0.6**	**0.7**	2.5 – 3.5
Sat. Mg (%mEq/CEC)	**15.3**	**16.6**	10 – 12
Sat. Ca (%mEq/CEC)	**76.0**	66.4	60 – 70
Sat. K-Ca-Mg (% mEq/CEC)	91.9	83.7	
C.E.C. (mEq/100g)	19.9	20.5	Fertilité moyenne: 15-20
Azote (N) total (%)	<0.3	<0.2	
Rapport $\frac{Ca}{Mg}$	5.00	4.15	Optimal: 2 – 9
Rapport $\frac{K}{Mg}$	**0.041**	**0.045**	Insuffisant: < 0.05
Rapport $\frac{Ca+Mg}{K}$	**147.62**	**115.42**	Trop fort : > 40

Tableau 3 - Concentration en éléments nutritifs des sols de Verteneuil (6m et 8m); Sat. = taux de saturation; CEC = capacité d'échange cationique. Les concentrations dépassant le cadre des valeurs de référence sont présentées en caractère gras. Les valeurs présentées sont des moyennes établies à partir de l'analyse de 6 échantillons extraits en juillet 2004, 3 dans la partie du site où l'espacement est de 6m et 3 autres à 8m.

Cependant, plusieurs éléments sont à des niveaux inférieurs, ce qui pourrait éventuellement limiter la croissance des arbres. Premièrement, le phosphore (P) atteint le niveau très faible d'environ 3.5% des concentrations minimales requises pour des cultures agricoles selon Doucet (1992), ce qui risque d'engendrer des carences en azote. On sait que les cultures agricoles demandent des concentrations élevées de phosphore qu'il faut renouveler régulièrement par la fertilisation. Les amendements en N, P et K appliqués en 2005 (dans le traitement incluant une culture intercalaire de soya), soit après la complétion des analyses chimiques des sols, ont dû avoir un effet bénéfique sur les concentrations de phosphore et de potassium, en particulier pour la croissance des arbres.

Les analyses présentées n'en tiennent pas compte, ayant été conduites avant la fertilisation. Il est probable que l'historique agricole des sites ait ainsi ponctionné de grandes quantités de phosphore. De plus, il est reconnu qu'à des pH>4.5, l'abondance d'aluminium (variant ici entre 645 et 800 ppm) déclenche la précipitation du P_20_5, réduisant sa disponibilité (Doucet 1992).

Le magnésium (Mg) et le Calcium (Ca), deux cations essentiels, sont en quantité très suffisante (Mg ≈ 830 kg/ha et Ca ≈ 6300 kg/ha). On peut supposer que le caractère en partie dolomitique de la roche-mère peut expliquer ces concentrations élevées en Mg et Ca. Par contre, les teneurs en potassium (K) sont trop faibles, représentant 30 à 35% des concentrations minimales toujours selon Doucet (1992). Les rapports entre ces éléments nutritifs, présentés au tableau 3, se révèlent extrêmement révélateurs pour évaluer la fertilité des sols. En général, il se produit un échange entre ces éléments lors de l'assimilation par les plantes : un niveau de K_2O faible se traduit par une assimilation plus forte du MgO et du CaO par compensation. De plus, dans un sol dont la solution contient beaucoup de Mg et de Ca, l'assimilation du K est entravée.
Le rapport Ca/Mg ne révèle pas de déséquilibre entre ces deux éléments. Par contre, l'introduction du K dans les rapports K/Mg et (Ca+Mg)/K vient déstabiliser les relations entre ces éléments. Le rapport K/Mg insuffisant serait dû à la très forte concentration de Mg conjuguée aux faibles niveaux de K. Finalement, le rapport (Ca+Mg)/K est beaucoup trop fort, encore une fois à cause du déséquilibre entre la faiblesse du K d'un côté et la force du Mg et du Ca de l'autre, illustré par leurs taux de saturation très élevés.

La capacité d'échange cationique est un autre indice de la fertilité des sols. Plus intégrateur que les taux de saturation des éléments, il exprime la capacité maximale de cations qu'un sol est capable de retenir. Verteneuil se révèle un site de fertilité moyenne à élevée, ce qui réduit la pertinence de se pencher sur les taux de saturation des éléments du sol pris individuellement.

Une analyse des sols amendés est projetée afin d'établir les concentrations réelles en potassium et phosphore. Cependant, les carences en P et K des sols, retrouvées également sur plusieurs plantations correspondant à d'anciens sites agricoles et décrits dans ce rapport (Caillé, Latreille, Leblanc, McCormick), peuvent représenter des caractères spécifiques qui exige de pouvoir combiner la sélection de cultivars de peupliers les mieux adaptés à ces conditions de carence et d'explorer différents modes d'amendement des sols.

Croissance et survie

La survie des peupliers a été quasi-parfaite, variant de 97.8% à 100%, après 6 années de croissance (voir Tableau 4).

Pièce A : Espacement 6 m entre les rangs de PEH et de feuillus

	Cultivar			Espèces de feuillus	
	3230	**3308**	**3729**	**Noyer noir**	**Frêne d'Amérique**
survie	98.9 %	99.4 %	99.4 %	78.7 %	99.3 %
effectif	180	180	180	122	144

Pièce B : Espacement 8 m entre les rangs de PEH et de feuillus

	Cultivar			Espèces de feuillus	
	3230	**3308**	**3729**	**Noyer noir**	**Frêne d'Amérique**
survie	97.8 %	100 %	98.3 %	81.5 %	79.3 %
effectif	180	180	180	130	140

Tableau 4 - Succès d'établissement des arbres à la fin de la saison de croissance 2005, selon l'espacement (6 ou 8 mètres) entre les rangées et l'espèce ou le cultivar à l'étude.

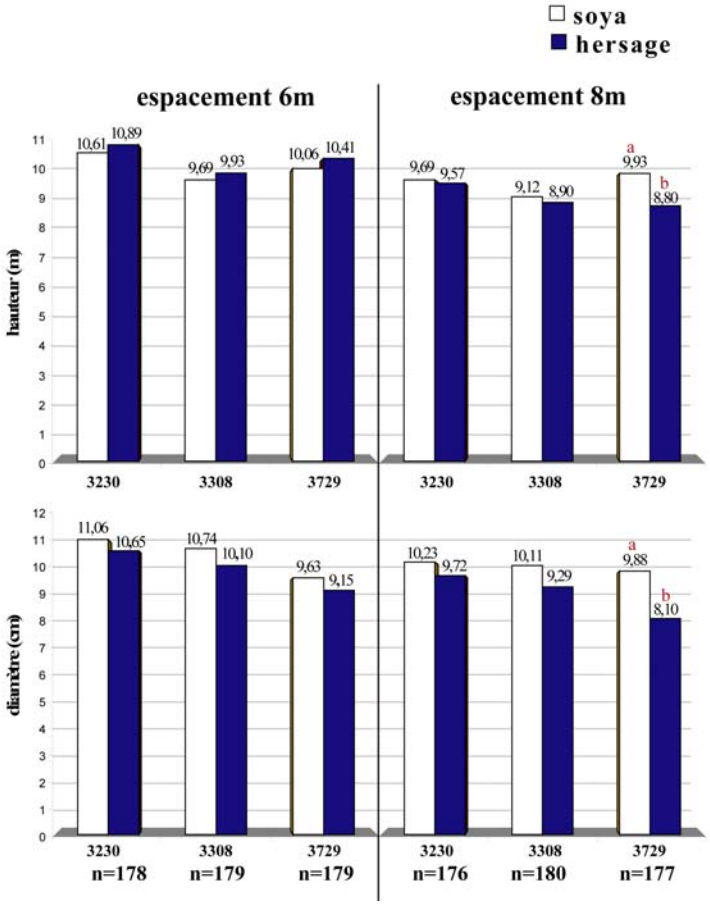


Figure 2– Hauteurs et diamètres des cultivars de peupliers 3230, 3308 et 3729 selon l'espacement entre les rangées de culture (6m et 8m) et le type de traitement au sol associé : culture de soya ou hersage, en 2005 après 6 saisons de croissance. Les traitements ont un effet sur la croissance des peupliers (hauteur et diamètre) lorsque l'espacement est de 8m ($p<0.05$). Les lettres (a et b) indiquent des différences significatives à $p<0.05$ Les plants morts ou dont la croissance était sérieusement compromise n'ont pas été inclus dans les calculs.

La croissance en hauteur comme en diamètre des peupliers, pour tous les clones mesurés, s'est révélée systématiquement supérieure à l'intérieur du dispositif espacé de 6 m (voir Figure 2 et Tableau 5). Quel que soit l'espacement, les clones ne présentent pas de différence de hauteur significative entre eux, bien qu'on puisse détecter une tendance ($p= 0.082$) à densité plus élevée (6m). D'un autre côté, le rapport hauteur/diamètre entre les clones s'est révélé très instructif pour comprendre les nuances de stratégie de croissance entre les clones. Bien que l'interaméricain 3230 présente la meilleure productivité, le clone 3729 présente un rapport hauteur/diamètre supérieur, marquant une élongation verticale. Il découle de cette caractéristique un volume du tronc moins important que pour les 3308 et 3230 (Figure 3).

Pièce A : Espacement 6 m entre les rangs de PEH et de feuillus

clone	Hauteur(m) F=3.01 p=0.082	Diamètre(cm) F=6.35 p=0.0109	Haut/diam. F=39.67 p<0.0001	Vol. (m³)* F=4.09 p=0.0399	Vol./ha (m³)**
3230	10.72	10.9 a	99.9 a	0.048 a	6.67
3308	9.79	10.5 a	95.4 b	0.042 a b	5.84
3729	10.20	9.4 b	109.6 c	0.035 b	4.87

Pièce B : Espacement 8 m entre les rangs de PEH et de feuillus

N°clone	Hauteur (m) F=1.30 p=0.3034	Diamètre (cm) F=2.31 p=0.1361	Haut/diam. F=27.99 p<0.0001	Vol. (m³)* F=1.31 p=0.2997	Vol./ha (m³)**
3230	9.64	10.0	97.2 a	0.038	3.95
3308	9.03	9.8	94.1 a	0.035	3.64
3729	9.48	9.2	105.1 b	0.033	3.43

Tableau 5 - Valeurs moyennes des paramètres de croissance des différents cultivars plantés au printemps 2000 selon un espacement de 6 ou 8m entre les rangées en date de septembre 2005, soit après 6 années de croissance. Les volumes présentés n'incluent pas les branches des individus. Les valeurs suivies des différentes lettres (a, b ou c) sont significativement différentes à p<0.05 (les résultats d'Anova pour chaque variable selon le facteur « cultivar » sont précisés en haut de chaque colonne). Les plants morts ou dont la croissance était sérieusement compromise n'ont pas été inclus dans les calculs.
* Selon la formule du cône tronqué.
**Volume à l'hectare calculé selon une stratégie de 138/ha PEH dans pièce A et de 104/ha PEH dans la pièce B (puisque les PEH sont combinés à des feuillus).

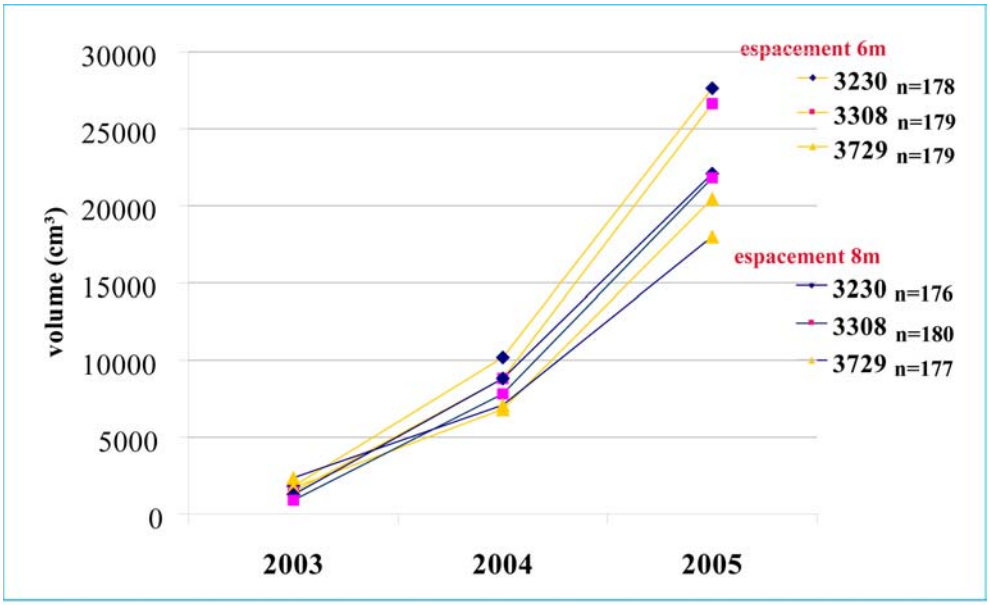


Figure 3 - Accroissement de volume annuel moyen d'un arbre selon chaque cultivar et selon l'espacement de 6m ou 8m. Seules les années 2003 à 2005 sont présentées Les plants morts ou dont la croissance était sérieusement compromise n'ont pas été inclus dans les calculs.

Alors qu'en 2001 il n'y avait pas de différence entre les arbres élagués et non élagués (ils ont été choisis systématiquement à raison d'un arbre sur deux environ), quelques différences significatives commencent à apparaître en 2002. En 2005, après 6 années de

croissance, les arbres élagués présentent un diamètre moins important (différence significative pour l'espacement de 8m seulement et tendance similaire à 6m, à p=0.0573; voir Figure 4). L'élagage a ralenti quelque peu la croissance en diamètre de ces arbres (au profit de la qualité de la bille de pied). Il est intéressant de noter que l'effet de l'élagage se poursuit plusieurs années après le traitement (élagage en 2002 ou 2003). Par contre, pour la hauteur, aucune différence significative n'est apparue pour ces deux clones.

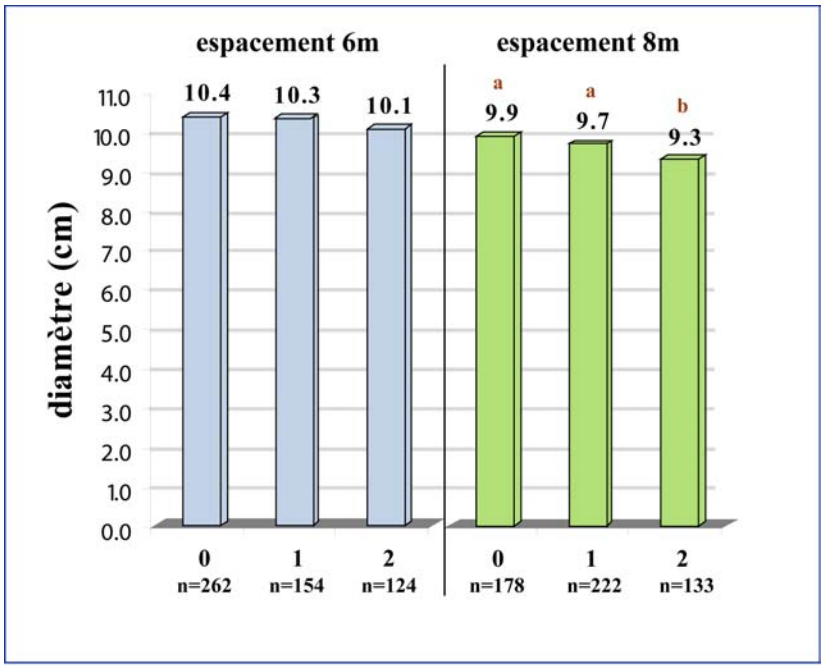


Figure 4– Influence des traitements d'élagage sur le diamètre des cultivars de peupliers hybrides selon l'espacement entre les rangées de culture (6m et 8m); en abscisse, 0 comprend les individus qui n'ont jamais été élagués, 1 ceux qui ont été élagués une fois et 2 ceux élagués deux fois, à un an d'intervalle. Anova à 6m pour l'effet élagage : F=3.53 et p=0.0573; Anova à 8m pour l'effet d'élagage : F=6.78 et p=0.0087. Les lettres (a et b) indiquent des différences significatives à p<0.05. Les plants morts ou dont la croissance était sérieusement compromise n'ont pas été inclus dans les calculs.

À partir de 2004, un nouvel objectif de recherche a été ajouté au projet : mesurer l'effet de la culture intercalaire. Présentées à la Figure 2, les croissances des peupliers hybrides différent dans la pièce B selon que les inter-bandes soient hersées ou soient en culture de soya, avec application de fertilisants et d'herbicides (hauteur: p<0,05; diamètre : p<0,01). Seuls la hauteur et le diamètre du 3729, à un espacement de 8m, sont significativement plus grands en présence de soya (hauteur : +113 cm; diamètre : +1,78cm). Le diamètre de tous les clones, à 6m comme à 8m, montre une même tendance, soit un accroissement en présence de soya, de fertilisant et d'herbicide. Il nous est impossible de décortiquer l'effet du soya, du fertilisant et de l'herbicide séparément. Nous pouvons cependant affirmer que le clone 3729 est plus sensible que le 3230 et que le 3308 à l'ensemble des interventions culturales.

Le taux de mortalité des frênes et des noyers a été en moyenne de 20% (voir Tableau 4). Plus petits que les noyers à la plantation, les frênes ont rapidement rattrapé (dès l'automne), puis dépassé (dès 2001) ces derniers (Figure 5). Ils ont connu un accroissement constant, tout comme les noyers (figure 5). À l'intérieur de l'espacement 6m, les frênes présentent une hauteur moyenne de plus de 350 cm, alors que les noyers s'élèvent à 230 cm. Les hauteurs sont inférieurs d'environ 40cm dans la pièce B (8m), avec un ratio hauteur/diamètre inférieur qui révèle que la hauteur est davantage limitée que le diamètre (Tableau 6). Il est possible que l'impact du chevreuil ait été plus

important dans cette pièce. Malgré deux premières années difficiles, les noyers noirs ont bien performé à partir de 2002. L'essentiel de l'effectif résiduel (après regarnis en 2001) a survécu. Il semble qu'ils soient désormais bien établis. N'étant pas appréciés des chevreuils, il ne reste qu'à surveiller leur forme dans l'avenir.

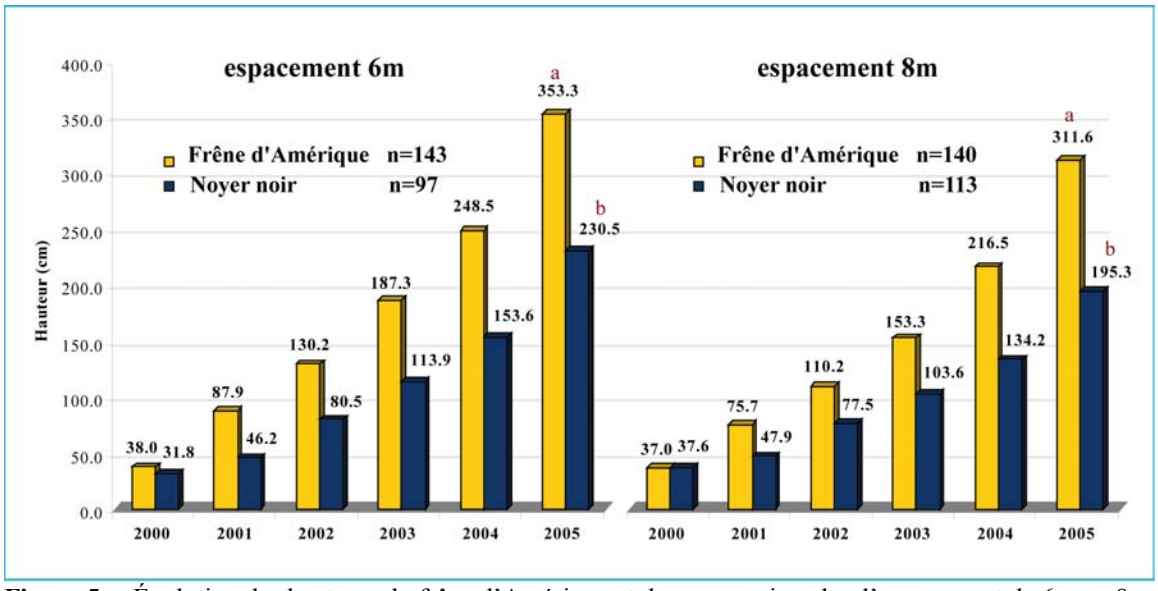


Figure 5 – Évolution des hauteurs du frêne d'Amérique et du noyer noir, selon l'espacement de 6m ou 8m. Les valeurs accompagnées de lettres (a ou b) sont significativement différentes à p<0.05. Les plants morts ou dont la croissance était sérieusement compromise n'ont pas été inclus dans les calculs.

Pièce A : Espacement 6 m entre les rangs de PEH et de feuillus

	Hauteur (cm) F=112.69 p<.0001	**diamètre (mm)** F=20.52 p=0.0027	**Haut./diam.** F=87.46 p=<.0001
Frêne d'Amérique	353.3 a	57.6 a	614 a
Noyer noir	230.5 b	48.4 b	475 b

Pièce B : Espacement 8 m entre les rangs de PEH et de feuillus

	Hauteur (cm) F=33.53 p=0.0007	**diamètre (mm)** F=2.17 p=0.1838	**Haut./diam.** F=497.38 p=<.0001
Frêne d'Amérique	311.6 a	53.2	583.4 a
Noyer noir	195.3 b	48.1	403.8 b

Tableau 6- Valeurs moyennes des paramètres de croissance des feuillus plantés au printemps 2000 selon un espacement de 6 et 8 m entre les rangées en date de septembre 2005, soit après 6 années de croissance; le diamètre est pris à la souche. Les valeurs suivies des différentes lettres (a, b ou c) sont significativement différentes à p<0.05 (les résultats d'Anova pour chaque variable selon le facteur « cultivar » sont précisés en haut de chaque colonne).

Chapitre II – Caillé Latreille 2002-2005 (4 ans)

Méthodologie

Un dispositif comprenant deux sites et intégrant une double production de PEH et de feuillus nobles ont été mis en place au printemps 2002 (Figure 6 et Figure 7) afin de représenter des conditions de sols marginales pour la grande agriculture contemporaine. Les deux sites sont situés sur des dépôts pierreux. Le site Caillé, d'origine glaciaire et situé dans la municipalité de Godmanchester, est moyennement pierreux, alors que le site Latreille, d'origine littorale et situé à Saint-Anicet, est très pierreux. Leurs deux sols sont situés sur des roches alcalines dolomitiques. Le site glaciaire (Caillé) présente une légère pente nord-sud débutant par une crête affleurante. Quelques dépressions de mauvais drainage sont aussi présentes. Le site littoral (Latreille) est un littoral tardi-glaciaire (pierrosité importante, arrêtes arrondies) au drainage modéré. Il présente une pente sud-nord assez importante (4%) et sur laquelle est collée l'organisation des blocs expérimentaux (bas, milieu et haut de pente). Une caractérisation granulométrique des sols est présentée au Tableau 7. Le glaciaire présente en surface un loam contenant une proportion élevée de sable alors que le littoral est constitué d'un loam limoneux plus lourd (mais à plus forte proportion de pierres).

Site	dépôt	%Argile	%Limon	%Sable	Type de sol
Caillé 1 ha	Glaciaire	23.5 a	31.4 a	45.1 a	Loam
Latreille 1.7 ha	Littoral	28.4 b	52.3 b	19.3 b	loam limoneux

Tableau 7 - Granulométrie des sols des deux sites. Les valeurs accompagnées des lettres a ou b sont significativement différentes à $p<0.05$. Un échantillon par sol par bloc et par rang de PEH a été prélevé à 15cm de profondeur pour un total de 54 au site glaciaire et 35 sur le littoral.

Les deux sites (1 et 1,7ha) situés dans la MRC du Haut-Saint-Laurent (St-Anicet et Godmanchester) ont été préparés à l'automne 2001 (labour). Au printemps les bandes (espacées de 7 mètres, 14 mètres entre les rangs de PEH intercalés de feuillus nobles) ont été épierrées et hersées. Le paillis de plastique a été posé mécaniquement sur les rangs, suivi de la plantation d'hybrides de peupliers disposés en alternance avec des feuillus nobles. Les travaux de préparation du sol, pose du paillis et plantation étaient complétés le 23 mai 2002. Les hybrides de peupliers choisis sont présentés au Tableau 8. À noter qu'un de ces clones (4118) n'est pas à proprement parler un hybride, puisqu'il s'agit d'un clone issu de croisements dirigés de populations locales de peuplier deltoïde. De même le 4679 est issus d'un parent particulièrement performant et identifié dans la nature. Il est de descendance deltoïde mais probablement croisé avec des sujets de *P. nigra* ou *deltoides x nigra* présents depuis longtemps en Amérique du Nord (source, Pierre Périnet, MRN). Nous avons intégré ces derniers dans le but de tester aussi des clones de provenance locale à faible niveau d'hybridation.

Afin d'établir un bilan nutritif des différents clones de peupliers, nous avons procédé à l'échantillonnages des feuilles des arbres. Seuls les cultivars 3230, 3570 et 915508 ont été échantillonnés parce qu'ils se retrouvaient sur les deux sites. Les feuilles ont été prélevées durant la pleine feuillaison des arbres, soit à la fin de juillet 2005 Sur chacun

des sites Caillé et Latreille, 1 homogénat par bloc (6 blocs par site) pour les cultivars 3230, 3570 et 915508 a été composé (18 au total).Les homogénats sont formés de trois feuilles complètes (limbe et pétiole) du deuxième verticille supérieur de chacun des trois arbres du milieu des parcelles. Ces feuilles devaient être complètes, sans zone morte, piqûre d'insectes ou champignons apparents. Les feuilles faisant partie d'un même homogénat ont ensuite été séchées à 30ºC avant d'être broyées puis analysées pour le contenu en N, P, K, Ca, Mg, Mn, B, Fe, Cu et Zn (laboratoire Agridirect).

Des mesures de biomasse ligneuse ont été effectuées durant l'hiver 2005 afin de préciser la productivité (biomasse moyenne produite) après 4 années de croissance. L'effectif d'échantillonnage était composé d'un arbre par clone par bloc (6 blocs par site), choisis pour leur similitude avec les moyennes de hauteur par clone (18 au total). Chaque arbre a été abattu au niveau du sol, puis ébranché. L'ensemble des branches a été pesé sur place. Pour chaque individu, une branche sur quatre parmi toutes les branches disposées en ordre croissant de taille a été sélectionnée pour en extraire un sous-échantillon de 14cm de longueur du milieu de la branche que nous avons pesé et séché (pour l'estimation de la biomasse sèche des branches). Le tronc de l'arbre a été divisé en trois parts égales. Chaque tiers a été pesé individuellement, puis les 14 cm du centre de chaque partie ont été prélevés, pesés et séchés (pour l'estimation de la biomasse sèche des troncs).

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide d'analyses de variance (ANOVA), avec un seuil significatif fixé à $p<0,05$, ainsi qu'en utilisant le test de comparaison multiple des moyennes de Tukey. Les valeurs ont été transformées en rang afin d'obtenir la normalité.

N° clone*	**Site de plantation**	**Type d'hybride**	**Cultivar et pays d'origine**
3230	*Caillé & Latreille*	*P. trichocarpa x deltoides*	*cv. 'Boelare'; Belgique*
3308	*Caillé*	*P. deltoides x nigra*	*cv. 'Regenerata Bâtard d'Hauterive'; France*
3570	*Caillé & Latreille*	*P. deltoides x nigra*	*Belgique*
4118	*Latreille*	*P. deltoides*	*MRN, Québec*
4679	*Caillé*	*P. deltoides x ?*	*MRN, Québec*
915508	*Caillé & Latreille*	*P. (deltoides x nigra) x maximowiczii*	*MRN, Québec*

Tableau 8 - Liste des clones utilisés
** liste des clones recommandés de peuplier hybride au Québec, DRF, Forêt Québec*

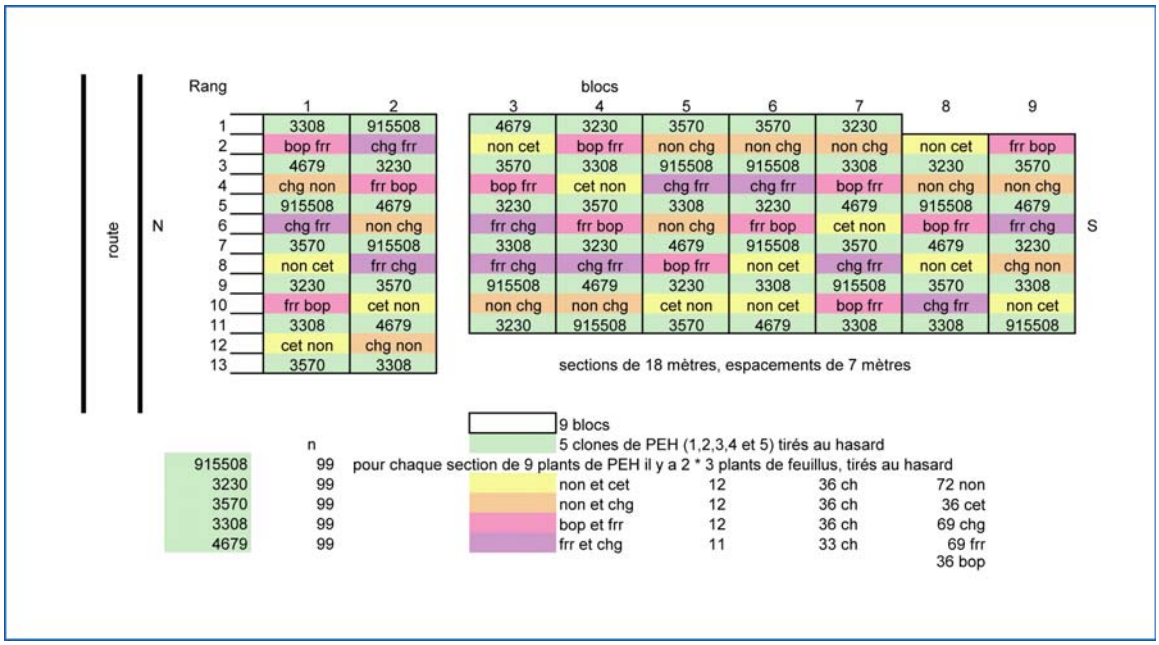


Figure 6 - Plan du site sur dépôt glaciaire (Site Caillé, 1.7 ha)

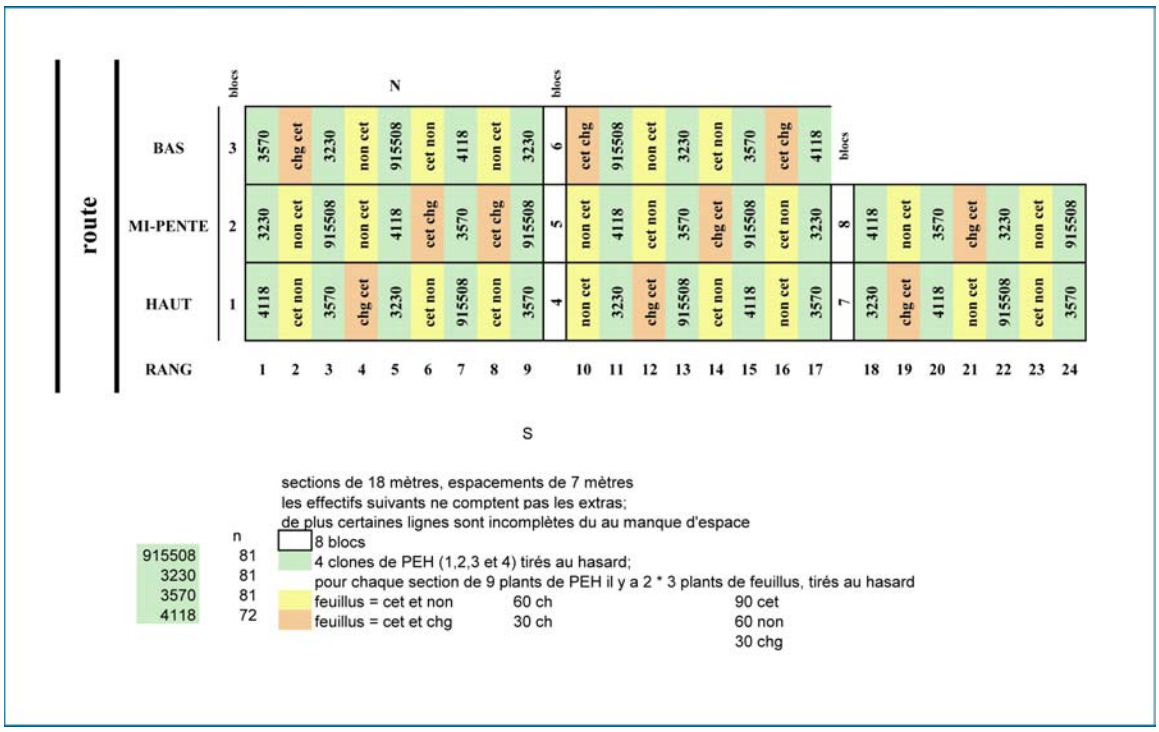


Figure 7 - Plan du site sur dépôt littoral (Site Latreille, 1.0 ha)

Résultats

Analyses des sols

L'analyse des sols des deux sites, présentée au Tableau 9, brosse un portrait très similaire au site précédent « Verteneuil ». L'analyse du pH tampon du sol, soit l'acidité potentielle du sol, par opposition aux fluctuations de pH en solution, confirme le caractère modérément alcalin du site littoral Latreille, sans conséquence pour la croissance des arbres sauf peut-être une légère réduction dans la disponibilité des oligo-éléments du sol, par opposition à la neutralité du site glaciaire. Le phosphore (P) atteint des niveaux très faibles dans les deux sites, environ 5% des concentrations minimales requises selon Doucet (1992), tout comme pour le site de Verteneuil (voir chapitre I). On peut ici aussi supposer que l'historique agricole du site, combiné aux concentrations en aluminium, ait réduit la disponibilité du P des deux sites.

	Caillé	**Latreille**	**Référence (Doucet 1992)**
pH tampon	6.87	7.75	
Phosphore (P) (kg/ha)	**17.0**	**13.1**	288 – 720
Potassium (K) (kg/ha)	**172.1**	**169.1**	360 – 720
Magnésium (Mg) (kg/ha)	868.3	1580.0	> 125
Calcium (Ca) (kg/ha)	4135.0	4812.5	> 2500
Aluminium (Al) (ppm)	893.7	489.5	
Sat. P (% P/AI)	0.90	2.76	
Sat. K (% mEq/CEC)	**1.08**	**1.15**	2.5 – 3.5
Sat. Mg (%mEq/CEC)	**18.32**	**35.01**	10 – 12
Sat. Ca (%mEq/CEC)	**51.09**	63.85	60 – 70
Sat. K-Ca-Mg (% mEq/CEC)	70.49	100	
C.E.C. (mEq/100g)	18.5	16.8	Fertilité moyenne: 15 – 20
Rapport $\frac{Ca}{Mg}$	2.86	1.83	Acceptable: 1 – 2 Optimal: 2 – 9
Rapport $\frac{K}{Mg}$	0.061	**0.033**	Acceptable: 0.05 – 0.10 Insuffisant: < 0.05
Rapport $\frac{Ca+Mg}{K}$	**63.41**	**86.08**	Optimal : 15 – 30 Trop fort : > 40

Tableau 9 - Concentration en éléments nutritifs des sols des deux sites (Caillé et Latreille); Sat. = taux de saturation; CEC = capacité d'échange cationique. 1 échantillon de sol par bloc et par rang de PEH prélevés à 15 cm de profondeur ont été analysés pour un total de 54 au site glaciaire (Caillé) et 35 sur le littoral (Latreille). Les concentrations dépassant le cadre des valeurs de référence sont présentées en caractère gras.

Le magnésium (Mg) et le Calcium (Ca) sont très abondants, quoique la concentration de Mg double sur le site littoral, passant de 868 kg/ha (Caillé) à 1580 kg/ha (Latreille). On peut avancer, tel que supposé pour justifier des concentrations similaires chez Verteneuil, que le caractère en partie dolomitique de la roche-mère peut expliquer ces concentrations élevées en Mg et Ca. Par contre, les teneurs en potassium (K) sont trop faibles, représentant moins de 50% des concentrations minimales toujours selon Doucet (1992).

Les rapports entre ces éléments nutritifs, présentés au bas du tableau 8, vont dans le même sens que chez Verteneuil (se référer au chapitre I pour des explications plus élaborées).
Premièrement, le rapport Ca/Mg ne révèle pas de déséquilibre entre ces deux éléments. Les deux sites présentent d'ailleurs des niveaux à peu près similaires. Par contre, l'introduction du K dans les rapports K/Mg et (Ca+Mg)/K vient déstabiliser les relations entre ces éléments. Le rapport K/Mg est faible mais acceptable chez Caillé et insuffisant chez Latreille. Finalement, le rapport (Ca+Mg)/K est beaucoup trop fort chez les deux sites, encore une fois à cause du déséquilibre entre la faiblesse du K d'un côté et la force du Mg et du Ca de l'autre, illustré par leurs taux de saturation extrêmes. Il est à noter que malgré les concentrations élevées de Ca, le taux de saturation de cet élément dans le sol du site glaciaire (Caillé) est trop faible : la concentration élevée de Al sur ce même site (894 ppm) entrave certainement sa disponibilité (Doucet 1992). Cependant, la capacité d'échange cationique sur nos deux sites révèle une fertilité générale satisfaisante.

Les conclusions à tirer de ces résultats d'analyse de sol sont les mêmes que chez Verteneuil : on pourrait envisager de compenser des concentrations insuffisantes en nutriments, notamment le phosphore et le potassium, et travailler à la sélection de cultivars adaptés à ce patron de disponibilité des éléments qui pourrait conduire à certaines carences nutritionnelles et qui apparaît être typique des surfaces agricoles marginales et aujourd'hui abandonnées de la région du sud du Québec.

Croissance et survie

La survie des peupliers est très satisfaisante dans l'ensemble, un peu moins pour les *P. deltoides* 4679 et 4118, qui présentent davantage de difficultés d'établissement (voir Tableau 10).

Caillé

	3230	**3570**	**3308**	**4679**	**915508**	**Non**	**Bop**	**Cet**	**Chg**	**Frr**
%survie	97.0	98.0	95.0	82.2	93.9	81.2	88.9	94.4	97.1	98.6
effectif	99	99	99	99	99	72	36	36	69	69

Latreille

	3230	**3570**	**3308**	**4118**	**915508**	**Non**	**Bop**	**Cet**	**Chg**	**Frr**
%survie	93.8	86.4	-	75.0	92.6	86.7	-	73.0	96.7	-
effectif	81	81	-	72	81	60	-	90	30	-

Tableau 10 - Succès d'établissement des arbres à la fin de la saison de croissance 2005, selon le site et l'espèce ou le cultivar à l'étude; Non : Noyer noir; Bop : Bouleau à papier; Cet : Cerisier tardif; Chg : Chêne à gros fruits; Frr : Frêne rouge.

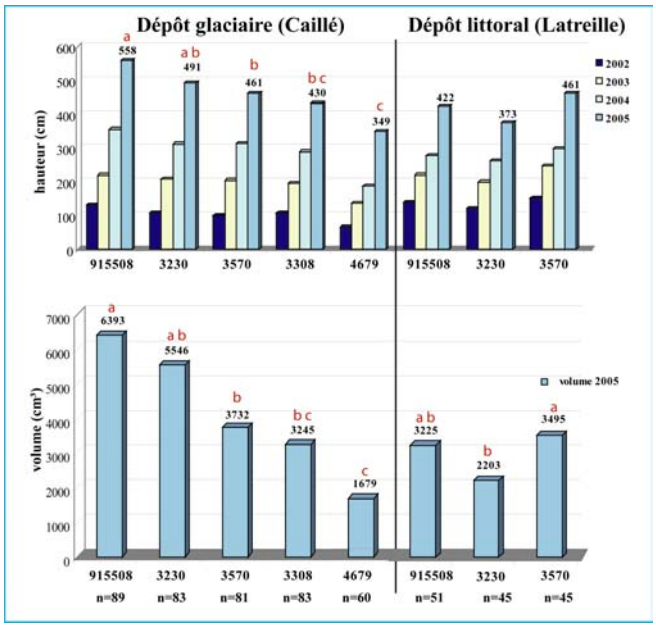


Figure 8 – Valeurs moyennes des hauteurs et volumes des cultivars de peupliers 915508, 3230, 3570, 3308 et 4679 sur les dépôts glaciaires (Caillé) et littoraux (Latreille). Les lettres au-dessus des valeurs de hauteur et de volume indiquent des différences significatives à $p<0.05$, sauf pour les volume sur dépôt littoral, dont les différences sont significatives à $p=0,07$. Les plants morts ou dont la croissance était sérieusement compromise n'ont pas été inclus dans les calculs (dommages ponctuels non généralisés). De plus, le cultivar 4118 (site Latreille) présentait trop de croissances négatives pour être inclus dans les résultats.

Les croissances, tout comme les survies d'ailleurs, se sont révélées supérieures sur sol loameux (Caillé) pour l'ensemble des cultivars de peupliers (voir Figure 8). Le cultivar 4118 (site Latreille) présentait trop de croissances négatives pour être inclus dans les résultats.

Le 915508 s'est démarqué des autres par ses performances, présentant chez Caillé un accroissement en 2005 de plus de 2m (2,03 m). Le 915508 présente les hauteurs ainsi que les diamètres les plus élevés sur les deux sites, suivi par le 3230 (5,58 m et 4,91 m respectivement). À noter que statistiquement, les 3230 et 915508 ne se distinguent pas en termes de hauteur ou de diamètre, mais des analyses de variance qui comparent uniquement les 3 espèces communes aux deux sites (3230, 915508 et 3570, résultats non présentés ici) ont montré que la croissance en hauteur du 915508 était statistiquement plus élevée que celle du 3230. Le 3570 semble aussi bien adapté au loam limoneux (Caillé) qu'au loam franc (Latreille) (Figure 8). Ce cultivar présente les mêmes performances sur les deux types de sols (4,61m sur loam et sur loam limoneux) et tolère mieux le loam limoneux alors que les 915508 et 3230 ont réduit leur croissance de plus d'1 m sur le sol plus limoneux de Latreille (4,22m et 3,73m respectivement, contre 5,57m et 4,91m chez Caillé). Notons que la mortalité est légèrement supérieure sur dépôt littoral pour le 3570, en comparaison avec les autres cultivars. Le 3230 est davantage affecté par les caractéristiques physiques et chimiques du site Latreille que les autres hybrides alors qu'il est significativement moins performant en volume que le 3570 sur ce dépôt littoral (Figure 8). Le cultivar *P. deltoides x ?* 4679 à faible niveau d'hybridation, uniquement représenté sur ce dispositif, présente les plus faibles hauteurs et diamètres cumulatifs. Cependant, il sera à surveiller dans les années suivantes car sa croissance moyenne durant la saison 2005 a dépassé celle des 3308 et 3570. Dans un contexte agricole où la prédation des plants par le chevreuil est importante, cette croissance initiale lente pourrait se révéler un sérieux désavantage.

Les biomasses sèches présentées à la Figure 9 se distinguent quelque peu des volumes présentés à la Figure 8. En effet, sur dépôt littoral (Latreille), le DNxM 915508 a les plus faibles biomasses alors qu'elles sont similaires en volume au 3570. Le faible effectif (6 arbres utilisés pour mesurer la biomasse du 915508) pourrait expliquer cet écart important.

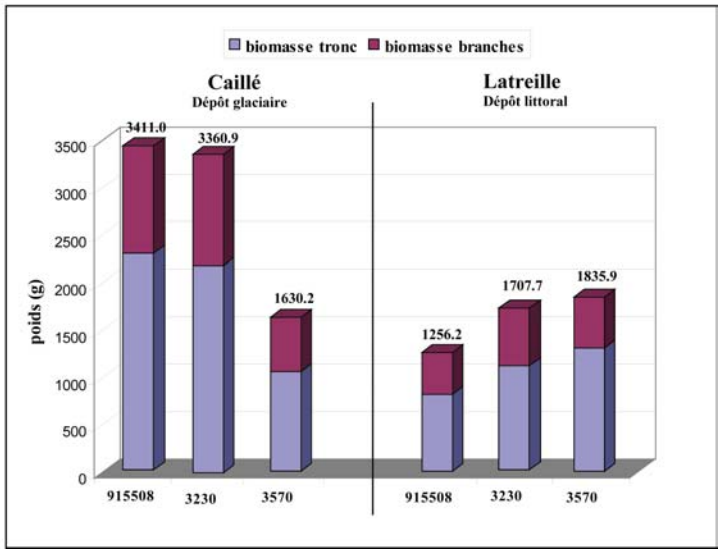


Figure 9 - Biomasse sèche moyenne estimée du tronc et des branches pour des arbres correspondant aux dimensions moyennes de chaque cultivar de PEH sur les sites Caillé et Latreille; les valeurs affichées au-dessus de chacune des barres d'histogramme correspondent à la biomasse sèche totale (branches + tronc en grammes).

Sur dépôt glaciaire (Caillé), le bouleau à papier (*Betula papyrifera*) et le frêne rouge (*Fraxinus pennsylvanica*) ont montré après 4 années les meilleures croissances verticales (279 et 255 cm respectivement) et radiales (43 et 44 mm respectivement, voir Figure 10). Le cerisier tardif (*Prunus serotina*), une espèce pionnière à croissance rapide, a montré une croissance en hauteur satisfaisante quoique inférieure au frêne rouge et au bouleau blanc (194 cm après 4 années de croissance) mais présente une croissance radiale importante, le diamètre étant statistiquement semblable à celui du frêne rouge et du bouleau blanc (40 mm). Cette caractéristique nous apparaît associée à une faible dominance apicale, pouvant être le résultat de sa réaction aux dommages sur la pousse terminale, parfois occasionnée par l'herbivorie attribuable au chevreuil : des pousses multiples prennent le relais à ces occasions. Autant chez Caillé que chez Latreille, le chêne à gros fruits a présenté une croissance verticale faible (120 cm et 105 cm respectivement), ce qui correspond à son profil d'espèce à croissance plus lente (Burns & Honkala 1990). Finalement, le noyer noir (*Juglans nigra*), avec un lent démarrage, n'exprime pas pleinement son potentiel d'essence à croissance rapide (hauteur de 109cm

sur dépôt glaciaire et 101 cm sur dépôt littoral), autant sur un sol franc comme Caillé que sur un loam pierreux comme Latreille.

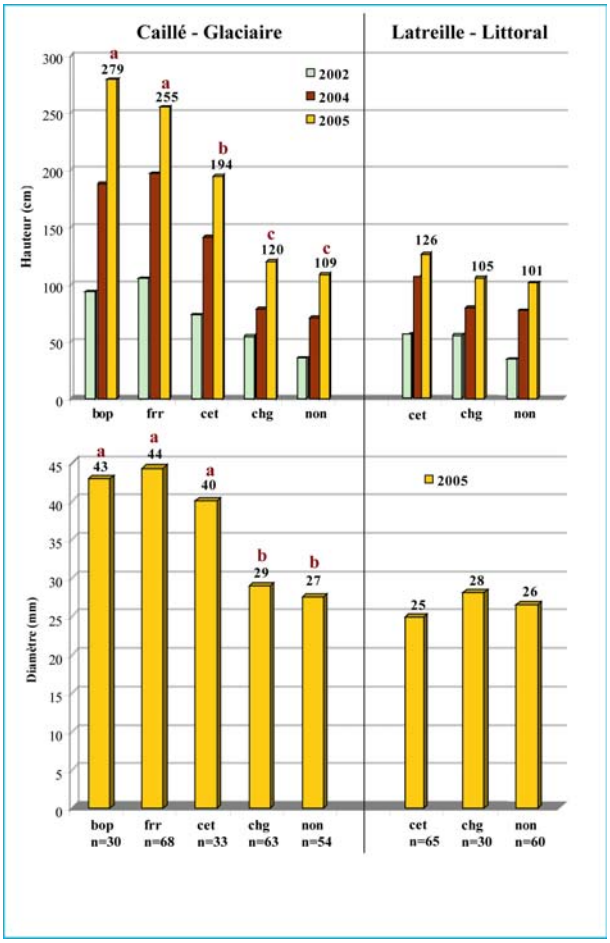


Figure 10 - Hauteurs et diamètres à la souche des plants de bouleau à papier (bop), frêne rouge (frr), cerisier tardif (cet), chêne à gros fruits (chg) et de noyer noir (non) sur un sol d'origine glaciaire (Caillé) vs littoral (Latreille), de 2002 à 2005 (les informations pour l'année 2003 ne sont pas disponibles). Les lettres au-dessus des valeurs de hauteur et de diamètre indiquent des différences significatives à $p<0.05$. Les plants morts ou dont la croissance était sérieusement compromise n'ont pas été inclus dans les calculs.

Nutrition des peupliers

La détermination du statut nutritif des plants constitue une technique de diagnostic local très efficace pour l'évaluation de la capacité d'assimilation des nutriments par les cultivars. Elle permet de mettre en relief les possibles perturbations dans la fertilité du sol et les carences conséquentes sur la croissance des peupliers (Camiré & Brazeau 1998). Cette analyse est un complément essentiel aux analyses de sol : alors que les

concentrations d'éléments dans le sol fluctuent dans le temps et dans l'espace, les contenus nutritifs dans les tissus des plants sont beaucoup plus stables et reflètent adéquatement le statut nutritionnel à long terme de l'arbre (Marschner 1995).

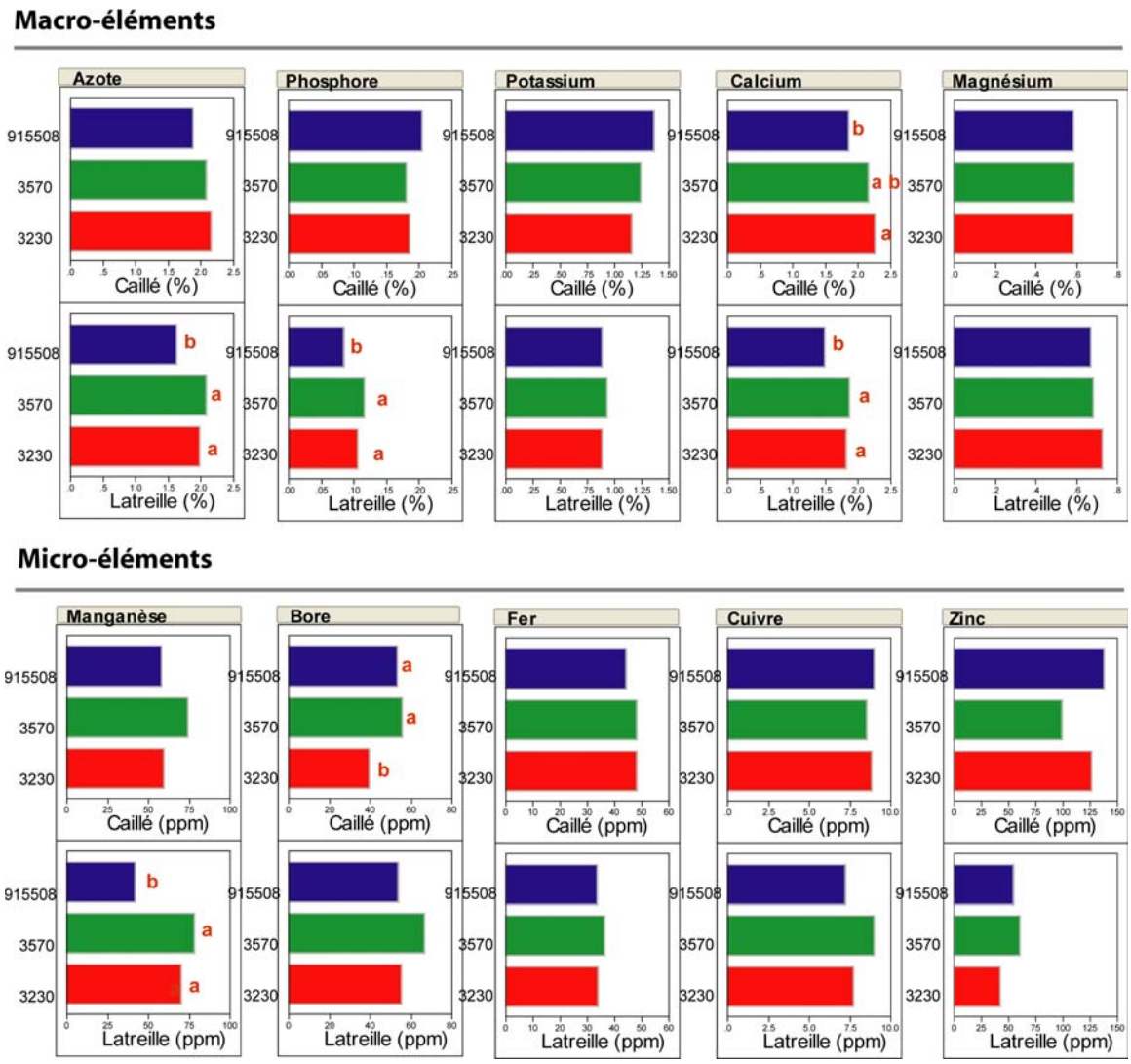


Figure 11 - Bilan nutritif comparé des principaux macro- et micro-éléments extraits du système foliaire de 3 clones de peupliers sur un site à dépôt d'origine glaciaire (Caillé) et un autre d'origine littorale (Latreille); les barres d'histogramme accompagnées de lettres (a ou b) sont différentes à p<0,05; récolte des feuilles en juillet 2005 : n= 6 homogénats x 3 clone x 2 sites; 1 homogénat par bloc, chaque homogénat regroupant 3 arbres, 3 feuilles par arbre (18 échantillons par site).

Contrairement aux résultats de nutrition foliaire présentés au chapitre IV suivant concernant les sites Leblanc et McCormick, les contenus nutritifs des peupliers présentés à la Figure 11 se distinguent un peu moins nettement entre les clones. Chez les plantes, l'azote et le phosphore sont les deux éléments le plus souvent limitants pour la croissance (Marschner 1995). Des différences significatives de contenu en azote et en phosphore entre les clones (p<0,01) ont été observées sur le site littoral, mais aucune sur le site glaciaire (Caillé). Le DNxM 915508, qui obtient les meilleures performances de croissance en moyenne, présente sur dépôt littoral des concentrations foliaire en azote et

en phosphore significativement inférieures aux autres cultivars que sont les DxT 3230 et DxN 3570. Nos analyses de sol n'indiquent pas les teneurs en azote de nos deux sites, mais elles précisent néanmoins leur faible concentration en phosphore. On peut avancer que les concentrations en azote du sol doivent être relativement basses sur ces anciennes terres agricoles.

Le calcium, un élément dont les concentrations varient significativement entre les clones ($p<0,05$ pour chacun des sites) se retrouve dans les sols en quantités très largement supérieures aux valeurs de références proposées par Doucet (1992), autant sur dépôt glaciaire que littoral. Des concentrations trop importantes en calcium pourraient avoir un effet négatif sur la croissance des peupliers (Salisbury & Ross 1992). Comme pour les taux d'azote et de phosphore, le DNxM 915508 (le plus productif) présente des concentrations inférieures aux autres cultivars. En même temps, il marque une tendance à puiser plus de K même si ce n'est pas significatif, ce qui souligne l'antagonisme K-Ca, amoindri chez le 915508; d'ailleurs une carence en potassium retarde la croissance (Marschner 1995). Cela pourrait signifier que le calcium en excès est un élément potentiellement limitant pour la croissance des peupliers, bien que le DxT 3230 présente de bonnes croissances ainsi que des niveaux plus élevés en calcium. En effet, dans un sol riche en calcium, l'assimilation du potassium peut être entravée (Doucet 1992).

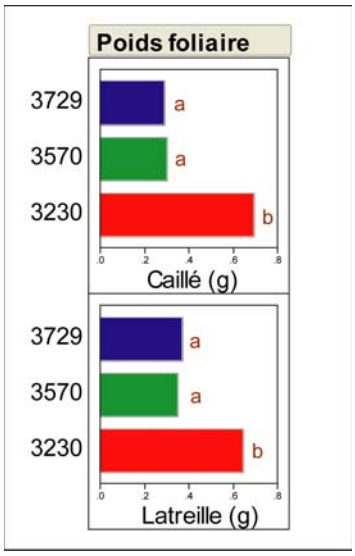


Figure 12- Poids unitaire foliaire pour les cultivars 3729, 3570 et 3230, sur les sites à dépôt glaciaire Caillé et à dépôt littoral Latreille; les barres d'histo-gramme accompagnées des lettres a ou b sont différentes à $p<0,05$

Les concentrations en manganèse varient de manière significative entre les clones chez Latreille ($p<0,001$) mais pas chez Caillé (dépôt glaciaire). Les mêmes schémas s'appliquent aux contenus en manganèse, avec le DNxM 915508 présentant des taux moins élevés que les autres cultivars sur dépôt littoral.

Le zinc se distingue clairement entre les deux sites : il est largement plus abondant sur dépôt glaciaire (Caillé). D'ailleurs, les cultivars se distinguent davantage entre eux chez Caillé ($p=0,083$) quant à leurs concentrations en zinc. Il semble que les deux cultivars présentant les plus fortes croissances (3230 et 915508) révèlent également de plus fortes concentrations en zinc.

Les concentrations en fer sont plus importantes sur le dépôt glaciaire, peut-être parce que la solubilité de cet élément s'accroît avec l'acidité (Pais & Jones 1997). Nos cultivars ne se distinguent pas entre eux pour cet élément.

Le bore est un élément dont les concentrations varient de manière significative entre les clones chez Caillé ($p<0,01$). Le TxD 3230 présente des concentrations en bore relativement plus basses que les autres cultivars, ce qui ressemble davantage à un

caractère phénotypique qu'à un symptôme d'une carence particulière. En effet, les bilans nutritifs présentés sur d'autres sites au chapitre IV présentent le même comportement pour la concentration foliaire en bore du 3230.

Enfin, la comparaison des poids unitaires foliaires nous a permis de constater que le TxD 3230 employait une stratégie de croissance distincte des 3570 et 3729 (Figure 12). En effet, ce cultivar développe une superficie foliaire à partir de plus grandes feuilles que les deux autres clones de PEH.

Pour résumer, nos résultats montrent que les besoins du DNxM 915508 en azote, phosphore, calcium et manganèse seraient moins importants que les DxT 3230 et DxN 3570, de sorte que sa croissance s'en trouverait moins limitée par cet élément que les autres cultivars.

Méthodologie

Un ancien marécage est aujourd'hui restreint à une petite superficie de 4-5 hectares entourée de cultures de maïs établies sur des sols dont on a retiré l'horizon organique (terre noire) Le site de plantation de peupliers occupe 2 ha sur d'anciens champs, ouverts par le passé suite au drainage et qui possèdent toujours un horizon organique d'une épaisseur de 50 cm au maximum et qui recouvre une argile lourde. Le drainage y est d'imparfait à mauvais. Un fossé de drainage borde l'ensemble des parcelles. Quelques arbres (peupliers, ormes) occupaient le site et l'examen des cernes de croissance révélait une forte productivité.

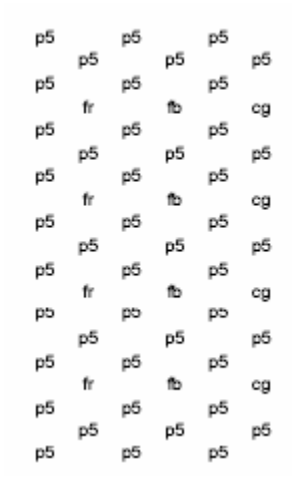


Figure 13 - Parcelle expérimentale comprise dans un bloc. Le cultivar 3570 (p5) est ici représenté, ainsi que le frêne rouge (fr), le frêne d'Amérique (fb) et le chêne à gros fruits (cg). Chaque bloc est composé de 5 de ces parcelles, une par clone. Espacement de 3,5m sur le rang et de 7m entre les rangs

Préparation de sol (abattage de quelques arbres, déchiqueteur rotatif FECON Bullhog® automne 2002, rotoculture superficielle et hersage printanier 2003 sur les rangs), paillage plastique en bande de 2 m de largeur, protection contre les rongeurs et brouteurs, plantation, fauchage, mesures de croissance, ont été appliqués en 2003 (entretien par hersage du sol en 2004 et 2005). Des plants ont reçu une taille de formation lorsque nécessaire en juillet 2004 et 2005 et un premier élagage des peupliers eut cours en 2005. Cinq différents cultivars de PEH sont présents sur chaque site et sont intégrés dans un dispositif expérimental à trois blocs aléatoires complets.

Les cultivars de PEH sont les mêmes que ceux du dispositif de la prochaine section (Leblanc-McCormick) soit, 3230, 3570, 3729, 915311, 915508, mais ici, des plants ont été utilisés (plutôt que des boutures) (voir Tableau 11). Cette fois, les rangs de PEH alternent avec des rangs composés d'une alternance de PEH et de feuillus sur le rang (Figure 13). Il y a 7 m d'espacement entre les rangs et 3,5m sur le rang. L'espacement sur les rangs composés uniquement de PEH sera ramené à 7m par le retrait d'un arbre sur deux au printemps de 2006).

Les feuillus nobles représentés sont les frênes rouge et d'Amérique avec le chêne à gros fruits. Un secteur du site avec les mêmes cultivars, soit 3230, 3570, 3729, 915311, 915508, auxquels nous avons ajouté le 3308 (voir Tableau 11) met à l'essai l'utilisation de plançons. Le dispositif est cependant moins formel, un cultivar occupe chacun des six rangs du dispositif avec 28 à 29 plançons par rang. Les plants de peupliers ont été plantés de façon à ce que le système racinaire touche l'argile (recouvert de 50 cm de tourbe). Une

tarière à essence était utilisée pour faciliter l'enlèvement temporaire de la tourbe qui servait à refermer la fosse de plantation. Les plants de feuillus étaient plantés à une profondeur habituelle (au niveau du collet des racines). Les plançons de peupliers, qui variaient en longueur de 2,3 m à 3 m selon le cultivar, étaient insérés à 80 cm de profondeur dans l'argile après qu'une ouverture eut été pratiquée à l'aide d'une tige métallique d'un diamètre légèrement inférieur aux plançons. Cette technique doit être améliorée dans de prochains essais par le forage d'une ouverture plus importante (pouvant varier de 20cm à 60 cm de diamètre).

N° clone*	**Type d'hybride**	**Cultivar et pays d'origine**
3230	*P. trichocarpa x deltoides*	*cv. 'Boelare'; Belgique*
3570	*P. deltoides x nigra*	*Belgique*
3729	*P. nigra x maximowiczii*	*cv. 'NM6'; Allemagne*
915508	*P. (deltoides x nigra) x maximowiczii*	*MRN, Québec*
915311	*P. maximowiczii x balsamifera*	*MRN, Québec*
Essais de Plançons avec les cultivars ci-haut mentionnés additionnés du suivant		
3308	*P. deltoides x nigra*	*cv. 'Regenerata Bâtard d'Hauterive'; France*

Tableau 11 - Liste des clones utilisés

*liste des clones recommandés de peuplier hybride au Québec, DRF, Forêt Québec

Résultats

Analyses de sols

Ce site, situé sur un dépôt lourd d'origine marine, recèle peut-être le meilleur potentiel de croissance de l'ensemble de nos dispositifs expérimentaux. Avec un pH moyen de 7.0 (voir tableau 11), cet ancien marécage présente une concentration d'ions H+ faible, à l'avantage des peupliers en croissance.

	Sol lourd (Thibodeau)	Référence (Doucet 1992)
pH tampon	7.0	
Phosphore (P) (kg/ha)	**25.6**	288 – 720
Potassium (K) (kg/ha)	**285.0**	360 – 720
Magnésium (Mg) (kg/ha)	924.9	> 125
Calcium (Ca) (kg/ha)	8419.4	> 2500
Aluminium (Al) (ppm)	692.9	
Sat. P (% P/AI)	1.6	
Sat. K (% mEq/CEC)	**1.3**	2.5
Sat. Mg (%mEq/CEC)	**13.2**	10 – 15
Sat. Ca (%mEq/CEC)	**68.8**	80 – 95
Sat. K-Ca-Mg (% mEq/CEC)	83.3	
C.E.C. (mEq/100g)	27.5	Fertilité faible: 25 – 30
Rapport $\frac{Ca}{Mg}$	5.5	Acceptable: 1 – 2 Optimal: 2 – 9
Rapport $\frac{K}{Mg}$	0.09	Acceptable: 0.05 – 0.10 Insuffisant: < 0.05
Rapport $\frac{Ca+Mg}{K}$	**68.2**	Optimal : 15 – 30 Trop fort : > 40

Tableau 12- Concentration en éléments nutritifs du sol chez Thibodeau; Sat. = taux de saturation; CEC = capacité d'échange cationique. 18 échantillons, pris à 3 profondeurs différentes, répartis sur les 3 blocs. Les concentrations dépassant le cadre des valeurs de référence sont présentées en caractère gras.

Comme il arrive souvent avec les anciennes cultures agricoles, la quantité de phosphore présent est très faible, soit près de 9% du taux minimum conseillé par Doucet (1992). Le potassium est légèrement en deçà des moyennes conseillées, et le magnésium est présent en grande quantité. La quantité de calcium est très importante, ce qui crée un déséquilibre dans les relations entre cations basiques tel qu'exprimé par le rapport Ca+Mg/K, qui atteint une valeur de 68.2, ce qui dépasse les limites conseillées par Doucet (1992). En général, bien que ce site présente un coefficient d'échange cationique (C.E.C.) faible d'après les standards associés aux sols lourds (Doucet 1992), son sol présente un excellent potentiel pour la production de peuplier hybride grâce à une bonne alimentation en eau et en éléments nutritifs.

	Plants		Plançons		Feuillus nobles	
	Survie	*Effectif*	*Survie*	*Effectif*	*Survie*	*Effectif*
3230	88.6 %	79	79.3 %	29	-	-
3308	-	-	17.2 %	29	-	-
3570	90.8 %	79	71.4 %	29	-	-
3729	94.9 %	79	57.1 %	28	-	-
915508	86.1 %	79	86.2 %	29	-	-
915311	88.6 %	79	71.4 %	28	-	-
Frêne rouge	-	-	-	-	100 %	59
Frêne d'Amérique	-	-	-	-	95.2 %	62
Chêne à gros fruits	-	-	-	-	96.6 %	59

Tableau 13 - Succès d'établissement des arbres à la fin de la saison de croissance 2005.

Croissance et survie

Après trois années de croissance (2003 à 2005), la survie des clones était supérieure à 86% (voir Tableau 13). Bien que les taux inférieurs à 90% aient été rares dans les diverses expérimentations que nous avons conduites par le passé en utilisant des boutures, les résultats sont satisfaisants et similaires pour tous les clones. Un peuplier sur deux devrait être éliminé dans un proche avenir afin de produire des espacements définitifs de 7 m sur les rangs de peupliers.

La croissance annuelle en hauteur des plants durant la troisième année en plantation (2005) a varié d'un minimum de 191 cm (3230) à un maximum de 250 cm (915508) (Figure 14). Le patron de croissance de la troisième année est assez fidèle à celui obtenu en 2004 pour l'ensemble des cultivars. La croissance du clone 3230 répond moins bien à ce jour aux caractéristiques du site. Avec un volume et une hauteur moyens de 7570 cm³ et de 500cm respectivement, ce clone est significativement moins performant sur ce type de sol lourd jusqu'à maintenant. Les autres cultivars ne présentent pas de différences significatives de croissance, malgré que le 915508 présente les moyennes les plus élevées avec notamment un volume du tronc de 16693 cm³, supérieur de plus de 3000 cm³ au clone 3729 qui s'en approche le plus.

L'essai avec des plançons a produit des taux de survie variables et inférieurs à la plantation traditionnelle (Tableau 13). Le succès d'établissement du 3308 en plançons est un échec, avec un taux de survie de 17.2%. Le 3729 présente certaines difficultés également, avec un taux de survie de 57.1%. Tous les autres cultivars ont survécu à plus de 70%, et la survie des cultivars est corrélée à leur croissance verticale (voir le 915508 et le 3230). Notons que l'effectif original des plançons est très faible (28 ou 29 individus par clone), ce qui limite la portée de nos résultats mais l'initiative permet d'explorer cette avenue de propagation.

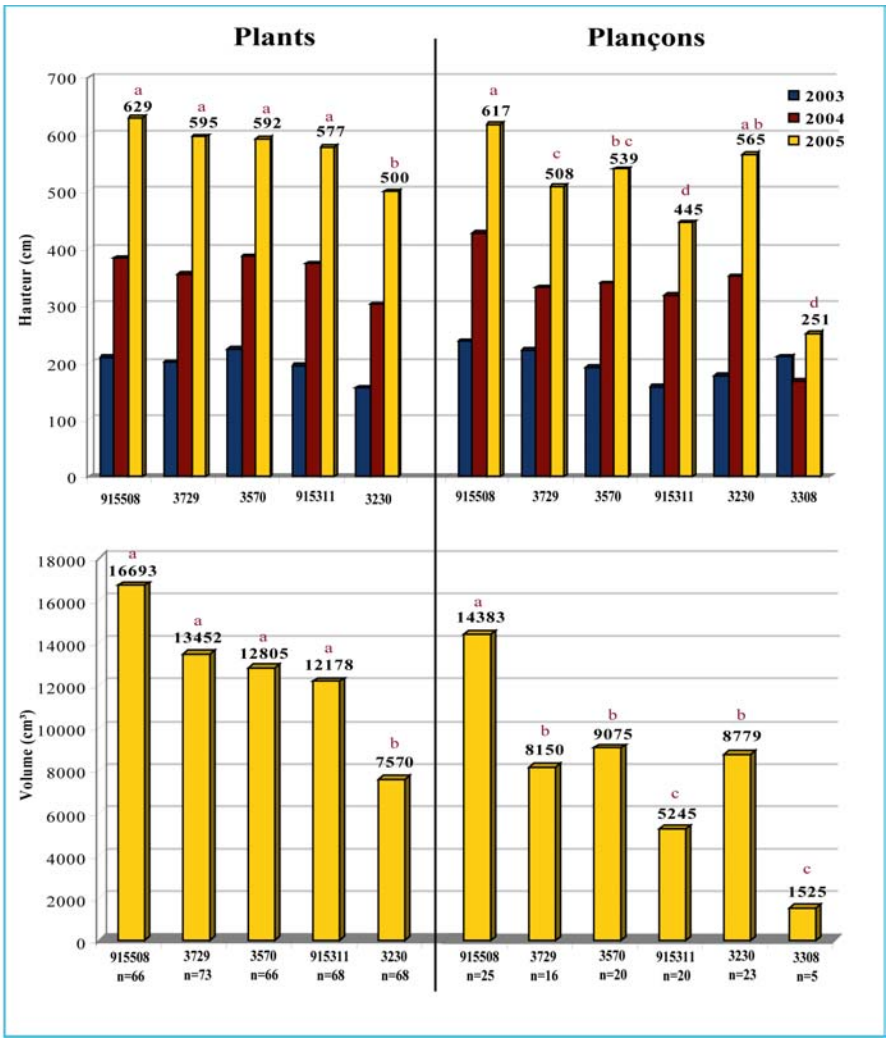


Figure 14 – Hauteurs et volumes des plants et plançons de peupliers 3230, 3308, 3570, 3729, 915508 et 915311 sur sol lourd, en 2005. Les lettres au-dessus des valeurs de hauteur et de volume indiquent des différences significatives à $p<0.05$. Les plants morts ou dont la croissance était sérieusement compromise n'ont pas été inclus dans les calculs.

La croissance des plançons a été beaucoup plus variable entre les cultivars que ce qui fut mesuré pour les plants (Figure 14). La pratique du plançon est généralisée actuellement en France où la production de plançons est cependant conduite avec beaucoup d'efficacité. La taille des plançons produits en une année est notamment supérieure à celle utilisée dans le présent essai (4-5 m). Les sols sont également profondément travaillés en France, alors que nous n'avons pas ici modifié la structure de l'argile par le travail mécanique, essentiel selon nous. Un des principaux intérêts d'utiliser le plançon réside dans leur taille initiale élevée, principalement dans le but de produire une cime qui, dès la première saison, pourrait être inaccessible aux brouteurs. Pour bénéficier de cet avantage, les plançons devront présenter des tailles supérieures à ceux utilisés ici. Le plançon peut également assurer une plus grande rectitude d'une portion de tronc au démarrage.

Les résultats présentent l'intérêt de souligner des cultivars qui ont présenté des facilités particulières à s'établir par le plançon malgré des conditions de sol de haute densité. Arrive en tête le 915508, qui, sous forme de plançon, dépasse tous les autres clones d'au moins 50cm (voir figure 12). Développant un diamètre élevé, le 915508 voit son volume moyen (14383 cm³) significativement supérieur d'un tiers à celui des autres plançons ($p<0.05$). À 617 cm en hauteur après 3 années de croissance, il dépasse de plus de 50cm en moyenne le 3230, qui semble également très performant sur sol lourd, malgré un démarrage plus difficile. Les cultivars 3729, 3570 et 3230 présentent un volume semblable, alors que les plançons les moins performants sont les 915311 et 3308.

Feuillus- La survie des feuillus est quasi-parfaite (voir Tableau 13). Le contexte de plantation dans un horizon organique inquiétait au départ à cause des fluctuations du taux d'humidité saisonnier dans un tel horizon, pouvant être particulièrement sec en surface l'été. Le frêne rouge s'est démarqué du frêne d'Amérique et du chêne à gros fruits autant en hauteur qu'en diamètre ($p<0.05$). Avec une hauteur de 178 cm et un diamètre de 28 mm, il semble le mieux adapté aux conditions de sol organique sur argile (Figure 15). La disposition des feuillus nobles par rapport aux peupliers hybrides, intercalés sur des rangs de peupliers et bordés de rangs de peupliers, est différente de ce qui a été proposé dans les autres dispositifs et offrira de nouvelles informations concernant l'agencement idéal.

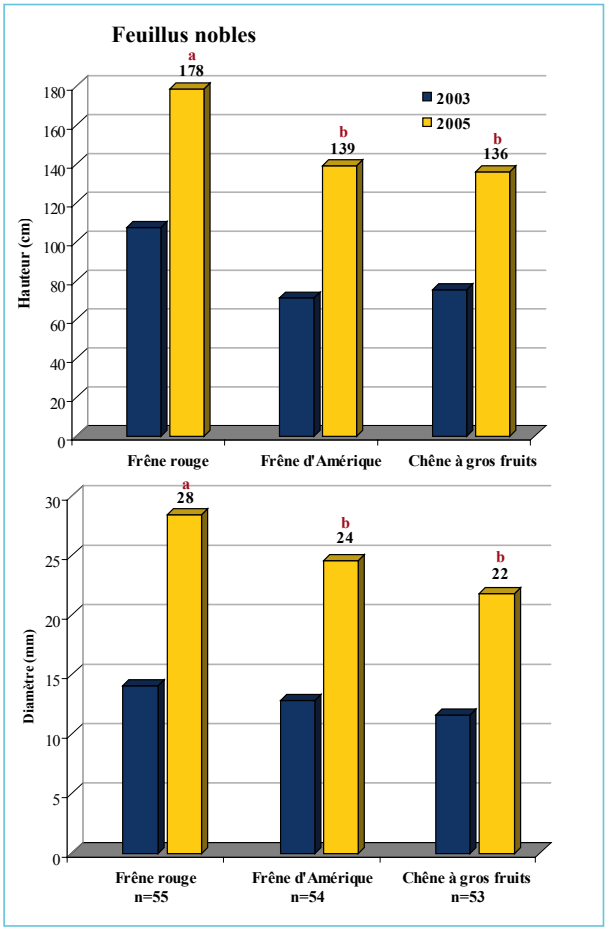


Figure 15- Hauteurs et diamètres à la souche des plants de frêne rouge, frêne d'Amérique et de chêne à gros fruits sur sol lourd au mauvais drainage, en 2005. Les lettres au-dessus des valeurs de hauteur et de diamètre indiquent des différences significatives à $p<0,05$. Les plants morts ou dont la croissance était sérieusement compromise n'ont pas été inclus dans les calculs.

Chapitre IV –Leblanc McCormick 2003-2005 (3 ans)

Méthodologie

Ce dispositif permet d'analyser les capacités de prélèvement des éléments nutritifs du sol de cinq cultivars de peupliers hybrides, en associant les caractéristiques chimiques des sols avec la croissance et la nutrition des peupliers. Deux sites ont été choisis dans le territoire pilote de la MRC du Haut-Saint-Laurent: un sur dépôt gréseux (pH =5.7) et un sur dépôt dolomitique pH = 7.5). La sélection des deux sites a été minutieusement réalisée de façon à retenir ceux présentant des dépôts d'origine glaciaire, un historique d'utilisation du sol semblable ainsi qu'un climat (précipitations de 1102 mm dont 877 mm en pluie) et une topographie (en position mi-versant, pente de 2 % sur chaque site, 50 m du sommet, orientation nord) identiques. Le drainage des deux sites varie de modéré à imparfait. Ainsi, nous cherchons à restreindre les différences entre les sites aux seules composantes minéralogiques et chimiques du sol. Les conditions édaphiques initiales qui distinguent les deux sites sont illustrées au Tableau 14. Alors que les caractères granulométriques sont quasi-identiques, le pH dans l'eau et la saturation en bases permettent, entre autres, de distinguer nettement les deux sites.

Site		Argile %	Limon %	Sable %	Type de sol	pH	SB %	C.E.C. mEq/100g
Leblanc	2.0 ha	14.6	26.4	59.0	loam sableux	7.5	16.5	19
McCormick	0.9 ha	13.3	32.7	54.0	loam sableux	5.7	67.5	17

Tableau 14 - Propriétés chimiques et granulométriques moyennes des horizons Ap (10-30cm) des deux sites expérimentaux (n=30).

Préparation de sol (labour superficiel et hersage printanier sur les rangs), paillage plastique en bande de 2 m de largeur, collerette, protection contre les rongeurs (spirales) et brouteurs (Deer Away©), plantation, fauchage, mesures de croissance, ont été appliqués en 2003 (hersage en 2004). Les différents cultivars sont présents sur chaque site, intégrés dans un dispositif expérimental à trois blocs aléatoires complets. Chaque bloc comprend cinq rangs de peupliers, chacun occupé par un des cultivars à l'essai (Tableau 15).

N° clone*	Type d'hybride	Cultivar et pays d'origine
3230	*P. trichocarpa x deltoides*	*cv. 'Boelare'; Belgique*
3729	*P. nigra x maximowiczii*	*cv. 'NM6'; Allemagne*
3570	*P. deltoides x nigra*	*Belgique*
915508	*P. (deltoides x nigra) x maximowiczii*	*MRN, Québec*
915311	*P. maximowiczii x balsamifera*	*MRN, Québec*

Tableau 15 - Liste des clones utilisés; Selon les recommandations du MRN, les cultivars 3230 et 3570 ne devraient être plantés que dans les sous-régions écologiques 1 et 2. La sous-région écologique 3d est la limite de plantation pour les cultivars 3729 et 915508. Le cultivar 915311 a une rusticité élevée et peut être utilisé jusqu'à la sous-région écologique 4h.
** liste des clones recommandés de peuplier hybride au Québec, DRF, Forêt Québec*

La plantation par boutures a été choisie. Ainsi, toute la biomasse produite au cours des premières années du projet sera principalement liée à la qualité nutritive des sites. Les arbres de chaque rang sont au nombre de 30 et sont espacés de 1,5 m sur le rang de manière à élever l'effectif de départ (Figure 16). Les rangs de PEH alternent avec des rangs de feuillus nobles. Ceux ci sont représentés par le frêne d'Amérique, le chêne rouge, le noyer noir et le noyer hybride (Mj209). Ils sont distribués selon une séquence de trois plants de la même espèce alternant avec une prochaine séquence de plants, l'ordre des espèces étant attribué au hasard sur le rang. L'espacement est de six mètres entre les rangs. Il y a donc douze mètres entre deux rangs de peupliers, ce qui exclut l'interaction entre deux cultivars. La croissance plus lente des feuillus permet également d'exclure les interactions possibles entre les feuillus et les peupliers, tous deux espacés de six mètres. Le dispositif représente une grande valeur pour de futures études concernant les possibilités de cultures intercalaires avec d'autres feuillus, une approche qui suscite beaucoup d'intérêt actuellement chez plusieurs intervenants.

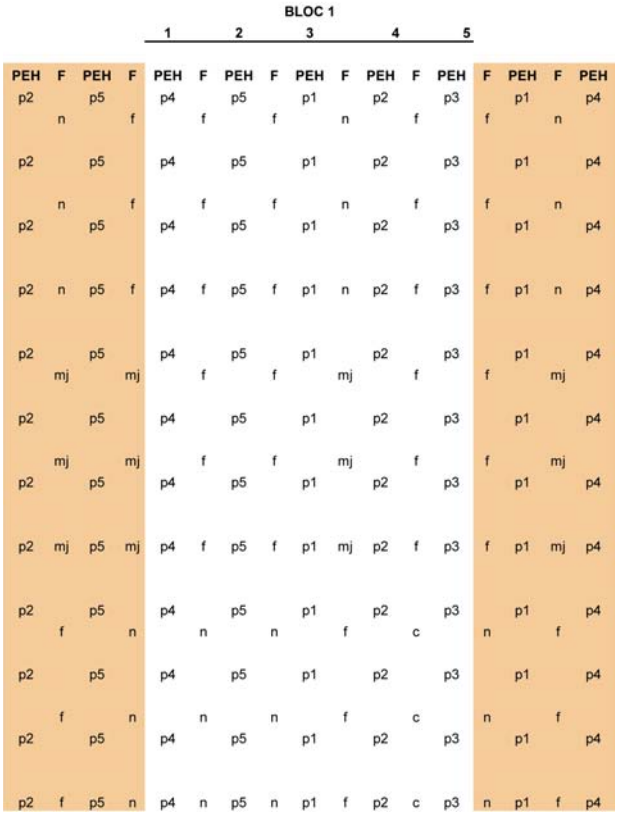


Figure 16- Parcelle expérimentale comprise dans le bloc 1. Les rangées marginales ne sont pas mesurées mais servent à border les rangées expérimentales 1 à 5. Les cultivars 915508 (p1), 915311 (p2), 3729 (p3), 3230 (p4) et 3570 (p5) sont ici représentés, ainsi que le frêne d'Amérique (f), le chêne rouge (c), le noyer noir (n) et le noyer hybride (mj). Trois blocs par dispositif (Leblanc et McCormick. 5 rangs étudiés par bloc (3)=15. Espacement de 1,5 m sur le rang et de 6 m entre les rangs.

Au champ, des échantillons de sols ont été prélevés au début de l'expérimentation au cours de l'été 2003 (août). L'horizon Ap (perturbé par le passé agricole) et l'horizon B sous-jacent (Ap=10-30 cm et B=30-60 m) sont analysés à partir d'échantillons prélevés dans des profils de sols creusés dans chaque bloc (n=3) de chaque site (n=2) et pour deux positions topographiques (n=2) de haut (entre les arbres 5-6) et de bas (entre les arbres 25-26) de versant et ce, pour chacun des cinq (5) cultivars. Les analyses suivantes ont été réalisées : pH, NO_3, NH_4, P assimilable, Al, Ca, K, Na, Mg, et Mn échangeables.
Le pH des échantillons a été déterminé dans une solution 2 : 1 d'eau et de sol avec une électrode en verre d'un pH-mètre. Les cations ont été mesurés en utilisant l'acétate d'ammonium (Carter 1993) et les concentrations ont été déterminées avec le spectrophotomètre à absorption atomique. La capacité d'échange cationique (CEC) fut mesurée avec la méthode de Mehlich III (Carter 1993). Les concentrations de NO3, NH4 et PO4 ont été déterminées selon la méthode de Mehlich par colorimétrie (Carter 1993). La saturation en base (SB) fut calculée à partir de la somme des concentrations de Ca, Mg, K et Na sur la capacité d'échange cationique et multiplié par 100 (Lafond *et al.* 1992).

Afin d'établir un bilan nutritif des différents clones de peupliers, nous avons procédé à l'échantillonnages des différentes parties aériennes des arbres, soit les feuilles, les branches et le tronc. Les feuilles ont été prélevées durant la pleine feuillaison des arbres, soit à la fin de juillet 2005. Les feuilles des arbres d'un même rang (par conséquent d'un même clone) ont été regroupées en 6 homogénats constitués chacun des feuilles de 5 arbres consécutifs (6 homogénats par rang de PEH par bloc). Sur une branche du 2e verticille supérieur de chaque individu, 3 feuilles complètes (limbe et pétiole) ont été prélevées. Ces feuilles devaient être complètes, sans zones mortes, piqûres d'insectes ou champignons apparents. Les homogénats de feuilles ont ensuite été séchés à 30ºC avant d'être broyés puis analysés pour le contenu en N, P, K, Ca, Mg, Mn, B, Fe, Cu et Zn (laboratoire Agridirect).

L'échantillonnage des branches et du tronc s'est déroulé au mois de décembre, après la chute des feuilles, pour s'assurer que la translocation des nutriments des feuilles dans d'autres organes des plants ait été complétée. L'effectif d'échantillonnage était composé de deux arbres de haut de pente et deux arbres de bas de la pente, choisis pour leur similitude avec les moyennes de hauteur par clone. Chaque arbre a été abattu au niveau du sol, puis ébranché. L'ensemble des branches a été pesé sur place. Pour chaque individu, une branche sur quatre parmi toutes les branches disposées en ordre croissant de taille a été sélectionnée pour en extraire un sous-échantillon de 14cm de longueur du milieu de la branche que nous avons pesé et séché (pour l'estimation de la biomasse sèche des branches). Le tronc de l'arbre a été divisé en trois parts égales. Chaque tiers a été pesé individuellement, puis les 14 cm du centre de chaque partie ont été prélevés, pesés et séchés (pour l'estimation de la biomasse sèche des troncs). Ces échantillons de quatre arbres par cultivar (5) par bloc (3) par site (2) (total 120), permettront des notamment de préciser la biomasse moyenne produite par cultivar en 3 ans.

Pour permettre l'analyse du contenu nutritif des tissus ligneux, deux des quatre arbres prélevés par cultivar (un en haut et un en bas de pente) ont été retenus et de minces

tranches (3mm) ont été prélevées au centre de chacune des trois sections de troncs. Les trois échantillons de chaque arbre ont été regroupés avant d'être broyées et analysées pour le contenu en N, P, K, Ca, Mg, Mn, B, Fe, Cu et Zn (laboratoire Agridirect).

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide d'analyses de variance (ANOVA), avec un seuil significatif fixé à $p<0,05$, suivies du test de comparaison multiple des moyennes de Tukey ainsi que d'analyses de corrélations de Pearson. Les valeurs ont été transformées en rang afin de garantir la normalité.

Résultats

Analyses des sols

Chez McCormick, le matériel parental qui a façonné le sol est principalement constitué de grès. Le grès est une roche sédimentaire dure et lisse composée de petits grains, en majorité du quartz et du feldzpath, cimentés les uns aux autres en grande partie par du matériel siliceux. La réaction de l'altération chimique du grès fait en sorte de libérer une quantité relativement grande d'ions H^+ dans le sol (Bohn *et al.* 1979) et ceci explique pourquoi le pH du sol chez McCormick est plus acide (tableau15). Par conséquent, l'Al échangeable est en plus grande concentration, car celui-ci devient plus mobile avec une baisse du pH (1201.4 ppm) (Bohn *et al.* 1979; Timmer 1985). Comme on le voit chez McCormick, le pH faible ainsi que le fait que l'Al soit l'élément avec la plus forte concentration explique pourquoi la SB est plus faible que chez Leblanc (16.5% et 67.5% respectivement). L'Al^{3+} et les ions H^+ font en sorte de diminuer la concentration des cations basiques échangeables provoqué par le lessivage comme c'est le cas avec le calcium (940.8 kg/ha, alors qu'il en faudrait au moins 2500, d'après Doucet 1992) (Sumner 2000). C'est parce que la force d'échange, qui est surtout en fonction de la valence, est supérieure pour Al^{3+} provoquant le déplacement de Ca^{2+} et Mg^{2+} (Duchaufour 1991). Étant donné que le taux de saturation des bases échangeables inclut tous les cations sauf H+, et que la concentration en H+ de McCormick est élevée (pH = 5.7 vs Leblanc pH=7.5), il est probable que les H+ accaparent une grande partie du complexe d'adsorption du sol chez McCormick au détriment de la disponibilité des autres cations essentiels. En effet, une fois les ions H+ inclus dans le calcul de la capacité d'échange cationique, on voit la fertilité du sol chez McCormick retrouver un niveau raisonnable (17.5 mEq/100g) similaire quoique inférieur à Leblanc (19.0 mEq/100g). Les concentrations de Ca et Mg dans le sol contribuent fortement à cette meilleure capacité d'échange cationique (CEC) chez Leblanc.

Le site alcalin Leblanc (pH = 7.5) présente une très forte concentration en Mg (1189.6 kg/ha) ainsi qu'une forte concentration en Ca (3822.9 kg/ha). Comme c'est le cas pour les sites de Verteneuil (chapitre I), Caillé et Latreille (chapitre II), on peut supposer que le caractère en partie dolomitique de la roche-mère explique ces concentrations. En effet, plusieurs signalent que les sols sur des dépôts dolomitiques [$Ca\ Mg\ (CO_3)_2$] ont des taux plus élevés de carbonates de calcium et magnésium, ainsi qu'un pH plus élevés dû à la

présence de $CaCO_3$ dans le sol, qui joue un rôle « tampon » et a pour effet de maintenir le pH entre des valeurs de 7.5-8.5 unités pH (Donohue *et al.* 1983).

	Leblanc	**McCormick**	Référence (Doucet 1992)
pH eau	7.5	5.7	
Sodium (Na) (mEq/100g)	12.4	21.9	
Potassium (K) (kg/ha)	**115.7**	**172.1**	360 - 720
Magnésium (Mg) (kg/ha)	1189.6	163.3	> 125
Manganèse (Mn) (mEq/100g)	0.68	0.23	
Calcium (Ca) (kg/ha)	3822.9	**940.8**	> 2500
Aluminium (Al) (ppm)	437.4	1201.4	
Matière organique (%)	6.17	4.77	
C organique (%)	3.58	2.77	
$CaCO_3$ (%)	12.90	1.10	
C inorganique (%)	1.55	0.13	
Sat. Bases (%)	67.5	**16.5**	Fertilité faible : 15 – 40 Fertilité élevée : 60 - 85
C.E.C. (mEq/100g)	19.0	17.5	Fertilité moyenne: 15 - 20
Rapport $\frac{Ca}{Mg}$	1.93	3.44	Acceptable: 1 – 2 Optimal: 2 – 9
Rapport $\frac{K}{Mg}$	**0.029**	0.33	Optimal: 0.1 – 0.5 Insuffisant: < 0.05
Rapport $\frac{Ca+Mg}{K}$	**99.69**	13.55	Acceptable : 12 - 15 Trop fort : > 40
PO_4 (P kg/ha)	**5.38**	**34.52**	360 - 500
NO_3(N kg/ha)	74.21	36.98	
NH_4 (N kg/ha)	5.00	26.88	

Tableau 16 - Concentration en éléments nutritifs des sols des deux sites (Leblanc et McCormick); Sat. = taux de saturation; CEC = capacité d'échange cationique. N=30 échantillons par site, pris à 2 profondeurs (Ap et B) à 2 positions topographiques (haut et bas de pente) sur 3 blocs/site. Les concentrations dépassant le cadre des valeurs de référence sont présentées en caractère gras.

Les rapports entre les éléments nutritifs K, Mg et Ca, présentés au tableau 15, se révèlent extrêmement pertinents pour évaluer la fertilité des sols. En général, il se produit un échange entre ces éléments lors de l'assimilation par les plantes : un niveau de K_2O faible, comme c'est le cas autant chez Leblanc que chez McCormick, se traduit par une assimilation plus forte du MgO et du CaO par compensation. De plus, dans un sol dont la solution contient beaucoup de Mg et de Ca, l'assimilation du K est entravée. Doucet (1992) précise qu'un sol agricole riche doit viser un rapport de 2 K pour 1 Mg, ce qui n'est pas le cas autant chez Leblanc que chez McCormick. Premièrement, examinons le rapport Ca/Mg. Chez Leblanc, une concentration très élevée de Mg conjuguée au calcium ne révèle pas de déséquilibre entre ces deux éléments. Par contre, l'introduction

du K dans les rapports K/Mg et (Ca+Mg)/K vient déstabiliser les relations entre ces éléments. Les deux sites ont une concentration de K qui est faible, néanmoins le site McCormick est celui avec la plus élevée. Ce peut-être associé à l'altération des feldspaths-K, contenus dans la fraction sableuse du grès. La concentration faible de K chez Leblanc, même si le site possède une plus grande CEC, vient du fait que les sols dont le pH est supérieur à 6, ont un lessivage accru de K (Camiré & Brazeau 1998). Puisque le K est un élément essentiel majeur et étant donné que la concentration du K est faible sur les deux sites, il sera important de vérifier s'il devient un facteur limitant pour la croissance des espèces. La surabondance du Mg conjuguée à un trop faible taux de K rendent insuffisant le rapport K/Mg chez Leblanc (ces résultats sont typiques aux sites dolomitiques comme Verteneuil, Caillé ou Latreille). L'ajout du Ca, très élevé chez Leblanc, vient accentuer ce déséquilibre dans le rapport Ca+Mg/K. Chez McCormick par contre, un sol gréseux, les taux de K sont plus élevés que chez Leblanc, quoique encore trop faibles, alors que les concentrations de Mg sont normales, ce qui produit un rapport K/Mg optimal. Bien que les concentrations en Ca soient faibles, le rapport Ca+Mg/K demeure acceptable.

L'azote, le phosphore et le potassium sont des éléments essentiels majeurs, qui ont des fonctions importantes dans les plantes, autant sur le plan constitutif que physiologique (Lafond et al., 1992). L'azote organique ne peut être assimilé directement par les plantes, il doit être minéralisé en NO_3 ou en NH_4 échangeable, par les microorganismes (Sumner, 2000). La concentration de NO_3 ne varie pas significativement entre les deux sites, mais montre une tendance à être supérieure chez Leblanc, tandis que c'est NH_4 qui domine chez McCormick. Lafond et al. (1992) évoquent que la décomposition de la matière organique par les microorganismes libère de l'ammoniaque (NH_3) comme sous-produit et cet ammoniaque peut demeurer dans le sol sous forme de NH_4 si le milieu est acide ou être transformé en NO_3 si le milieu est bien aéré et riche en ion Ca^{2+}. Ils mentionnent également que la nitrification, assurée par des bactéries autotrophes et aérobies, est optimale lorsque le pH se situe entre 7.5 et 8.0. Pais et Jones (2000) ont remarqué que NH_4 est généralement la forme dominante de N dans les sols acides, tandis que c'est NO_3 qui prédomine dans les sols alcalins. De plus, certains rappellent que la minéralisation de N et le pH sont positivement corrélés (Boxman *et al.* 1994). Donc, tout ceci porte à croire que la tendance à une plus grande concentration de NO_3 chez Leblanc est conforme aux conditions de richesse en ion Ca^{2+} et aux niveaux de pH élevés de 7,54. Le pH relativement acide chez McCormick cause une accumulation de NH_4, car l'activité des microorganismes est ralentie, atténuant la nitrification.

Les concentrations de P disponible sont extrêmement basses autant chez Leblanc que chez McCormick, ce qui est typique des anciens champs de culture non fertilisés (van den Driessche 2000). Le PO_4, la forme la plus assimilable du phosphore, est en plus grande concentration chez McCormick. La concentration plus faible de PO_4 chez Leblanc s'explique en partie par le pH supérieur à 6 qui provoque une rétroversion du P (Camiré & Brazeau 1998). De plus, Marschner (1986) mentionne que des déficiences en P sont

fréquemment associées aux sols alcalins et en plus qu'une disponibilité réduite en P peut également être reliée à la présence de carbonates de calcium (Berthelot *et al.* 2000).

Croissance et survie

Les cultivars montrent tous un taux de mortalité très faible (moins de 10%, voir Tableau 17). La mortalité est systématiquement inférieure chez Leblanc, un site au pH nettement alcalin (7,5). Sur ce site, trois cultivars présentent une excellente croissance verticale : il s'agit des 3729, 915508 et 3570 (Figure 17). Les 3 années de croissance cumulées tendent à démontrer que le 3729 favorise une croissance verticale supérieure, tandis que le 3570, légèrement moins performant en hauteur, obtient un diamètre plus important que son voisin. De son côté, le 915508 applique une stratégie intermédiaire. Au final, ces trois clones ont produit un volume de tige équivalent sur le site Leblanc. À l'opposé, le 3230 ainsi que le 915311 ont été jusqu'à maintenant significativement moins performants sur ce site (hauteurs moyennes après 3 ans de 424 cm et 450 cm respectivement, alors que le cultivar 3729 présente une hauteur moyenne de 526 cm).

Leblanc					
	3230	**3570**	**3729**	**915508**	**915311**
%survie	97.7	95.3	100	97.7	97.7
effectif	86	86	86	86	86
McCormick					
	3230	**3570**	**3729**	**915508**	**915311**
%survie	94.3	93.2	98.9	92.1	95.4
effectif	88	88	88	87	88

Tableau 17 - Succès d'établissement des arbres à la fin de la saison de croissance 2005, selon le site et l'espèce ou le cultivar à l'étude.

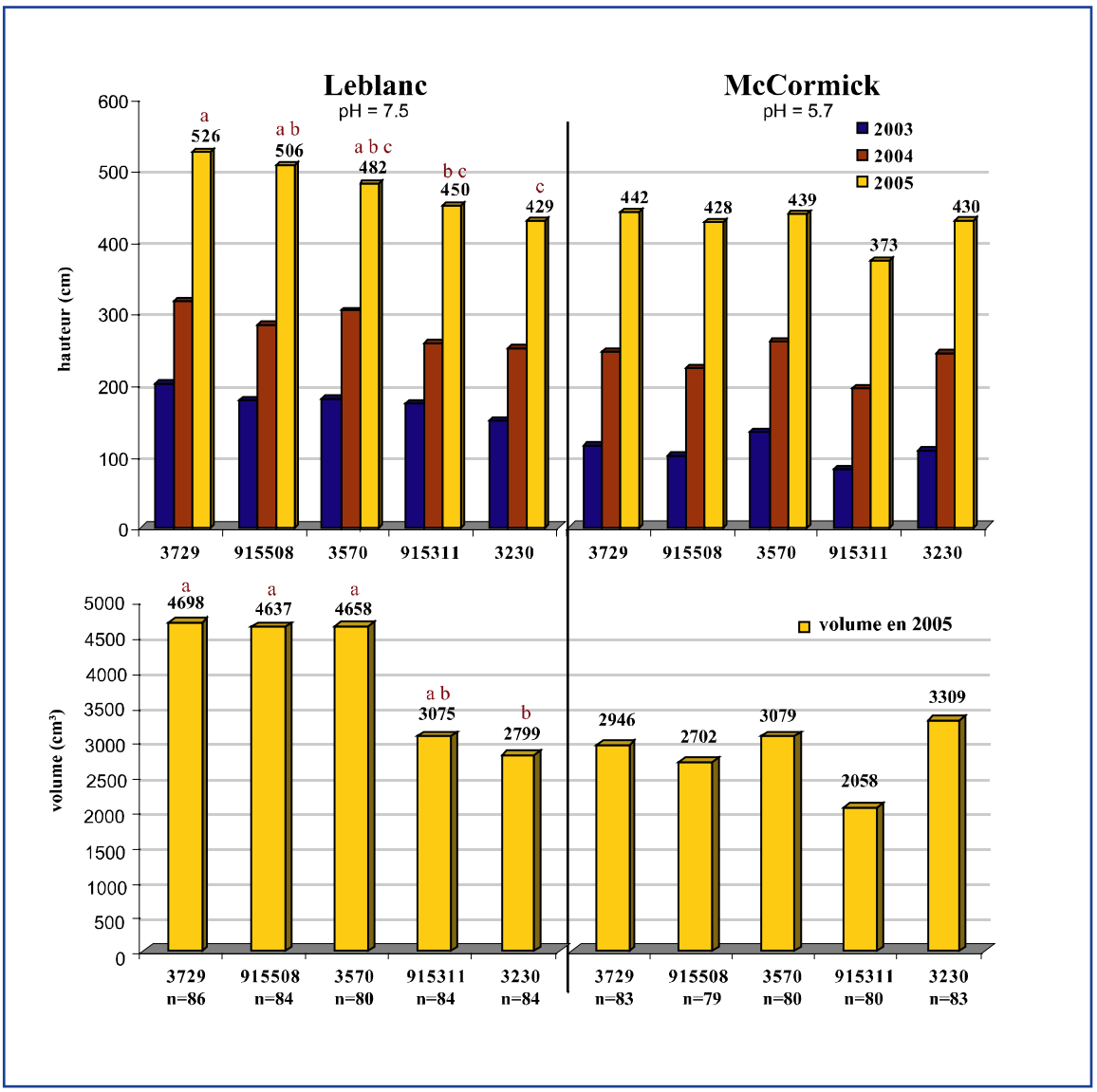


Figure 17 – Hauteurs et volumes des cultivars de peupliers 3230, 3570, 3729, 915508 et 915311 sur les sites acide (McCormick) et alcalin (Leblanc) en 2005. Les lettres au-dessus des valeurs de hauteur et de volume indiquent des différences significatives à $p<0.05$; il est à noter que les hauteurs chez McCormick se sont révélées différentes ($p<0.05$) mais le test de Tuckey n'a pas décelé de distinction entre les clones. Cela s'explique par une forte interaction bloc*clone ($p<0.0001$); enfin, les volumes chez McCormick ne sont pas différents ($p=0.14$). Les plants morts ou dont la croissance était sérieusement compromise n'ont pas été inclus dans les calculs; n = nombre de plants retenus pour l'ANOVA

Chez McCormick (pH = 5,7), le site plus acide, la productivité des peupliers y est moindre. Nous n'avons pas décelé de différence significative entre les cultivars, bien que le 915311 montre une moyenne en hauteur comme en volume inférieure à la productivité des autres cultivars. Le 3230, bon dernier sur pH alcalin, tend à dominer ces mêmes cultivars sur pH acide en termes de volume. La variabilité des résultats de croissance est nettement supérieure sur ce site, limitant la détection des différences interclonales. Ces

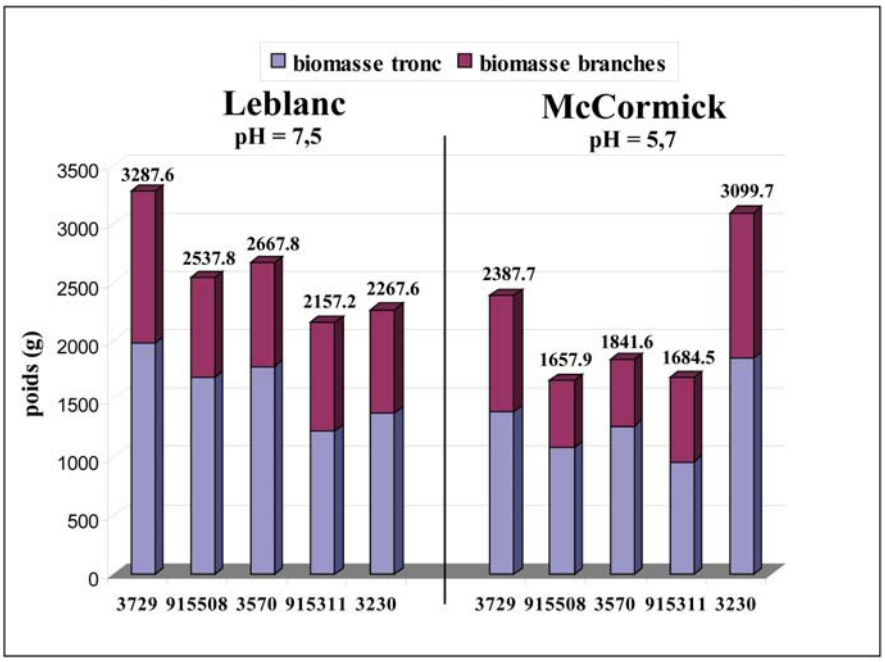


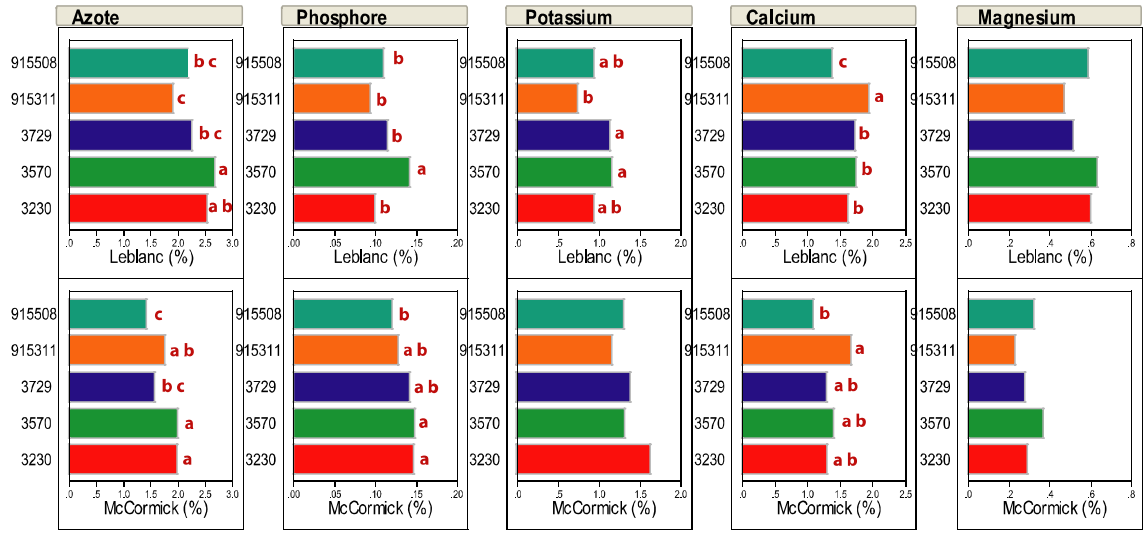
Figure 18- Biomasse sèche moyenne estimée du tronc et des branches pour chaque cultivar de PEH sur les sites Leblanc et McCormick; les valeurs affichées au-dessus de chacune des barres d'histogramme correspondent à la biomasse sèche totale (branches + tronc en grammes).

résultats démontrent que la productivité de tous les cultivars sauf le 3230 a été supérieure chez Leblanc, le site où le sol contient une plus grande quantité d'éléments minéraux essentiels pour la croissance. La figure des biomasses sèches (Figure 18) va dans le même sens : les clones montrent à peu près les mêmes tendances sur pH acide ou alcalin, sauf pour le TxD 3230 qui se démarque des autres sur sol acide. En général, les autres clones montrent une productivité beau-coup moindre chez McCormick.

Nutrition des peupliers

Analyse du tissu foliaire

Macro-éléments



Micro-éléments

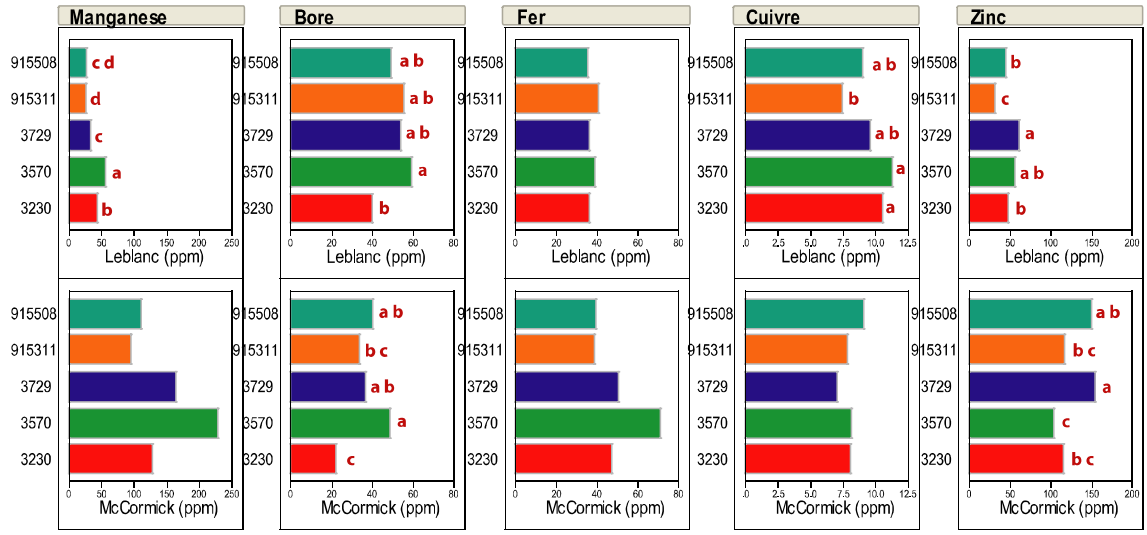


Figure 19 - Bilan nutritif comparé des principaux macro- et micro-éléments extraits du système foliaire de 5 clones de peupliers sur un site à pH alcalin (Leblanc) et l'autre sur pH acide (McCormick); les barres d'histogramme accompagnées de lettres (a, b, c ou d) sont différentes à $p<0,05$; récolte des feuilles en juillet 2005 : n= 18/clone/site; 3 x 6 homogénats par rang par bloc, chaque homogénat regroupant 5 arbres, 3 feuilles par arbre.

La détermination du statut nutritif des plants constitue une technique de diagnostic local très efficace pour l'évaluation de la capacité d'assimilation des nutriments par les cultivars. Elle permet de mettre en relief les possibles perturbations dans la fertilité du sol et les carences conséquentes sur la croissance des peupliers (Camiré & Brazeau 1998). Cette analyse est un complément essentiel aux analyses de sol : alors que les concentrations d'éléments dans le sol fluctuent dans le temps et dans l'espace, les contenus nutritifs dans les tissus des plants sont beaucoup plus stables et reflètent adéquatement le statut nutritionnel à long terme de l'arbre (Marschner 1995).

Afin d'établir un pont entre les bilans nutritifs des peupliers et leurs croissances respectives par cultivar, les corrélations entre ces variables sont précisées au Tableau 18. Ces résultats de nutrition doivent être analysés avec circonspection, étant donné le jeune âge des peuplements. Certains contrastes pourront s'accentuer avec le temps, et plusieurs résultats expriment davantage une tendance qu'un écart significatif. De plus, l'interprétation du Tableau 18 de corrélations doit tenir compte du fait que deux sites aux caractères chimiques contrastés sont intégrés dans la même analyse.

		Macro-éléments					Micro-éléments				
		N	**P**	**K**	**Ca**	**Mg**	**Mn**	**B**	**Fe**	**Cu**	**Zn**
DNxM 915508	Diam.	0.62***			0.49***	0.54***	-0.63***	0.28*		0.54***	-0.56***
	Haut.	0.58***			0.51***	0.54***	-0.57***			0.46***	-0.58***
	Vol.	0.65***	0.28*		0.49***	0.54***	-0.65***			0.55***	-0.57***
MxB 915311	Diam.	0.33*		-0.52***	0.31*	0.58***	-0.66***	0.65***		0.57***	-0.41**
	Haut.	0.42**		-0.42***		0.63***	-0.64***	0.62***		0.49***	-0.52***
	Vol.			-0.49***	0.28*	0.53***	-0.59***	0.61***		0.52***	-0.38**
NxM 3729	Diam.	0.72***		0.34**		0.32*	-0.63***	0.39**	-0.40**	0.66***	-0.47***
	Haut.	0.74***		0.30*		0.40**	-0.69***	0.44***	-0.40**	0.69***	-0.52***
	Vol.	0.70***		0.34**			-0.58***	0.38**	-0.35**	0.64***	-0.46***
DxN 3570	Diam.	0.38**					-0.35**			0.46***	-0.28*
	Haut.									0.37**	
	Vol.	0.44***					-0.38**		-0.28*	0.51***	-0.35**
TxD 3230	Diam.										
	Haut.				0.33**						
	Vol.										

Tableau 18 - Coefficients de corrélation de Pearson entre les concentrations foliaires en éléments nutritifs et les croissances des cultivars de peupliers hybrides (Diam=diamètre; Haut=hauteur; Vol=volume); *** : Prob > |r| sous H0 < 0,001; ** : Prob > |r| sous H0 < 0,05; * : Prob > |r| sous H0 < 0,1; N=36 par cultivar, deux sites confondus (Leblanc et McCormick).

Azote - Chez les plantes, l'azote est l'élément requis en plus grandes quantités et se retrouve souvent à limiter la croissance. Les analyses de sols nous ont révélées que les

teneurs en NO_3 et NH_4 étaient similaires entre les sites, bien que le site à sol acide McCormick contienne davantage d'azote sous forme ammoniacale (NH_4) (Tableau 16). Au niveau des concentrations foliaires par contre, les taux des formes azotées sont plus faibles chez McCormick (pH acide). En effet, à pH<6, l'azote nitrique est moins disponible (Doucet 1992). Les réserves d'azote dans les sols sont très dynamiques – l'azote peut être immobilisé ou relâché par les microbes – et les concentrations de cet élément doivent être surveillées de près étant donné que les peupliers assimilent de grandes quantités d'azote (Dickman *et al.* 2002). En se référant à des concentrations de référence (Marschner 1995), on peut avancer que les concentrations d'azote dans les plants sont suffisantes (Figure 19). Bien que les taux d'azote diffèrent ($p<0,001$) entre les clones, ils se démarquent faiblement, le DxN 3570 présentant les plus fortes concentrations, suivi du TxD 3230. Notre tableau des corrélations (Tableau 18) nous montre d'ailleurs que la productivité de tous les cultivars sauf le TxD 3230 (parce qu'il a des croissances comparables entre les sites) est significativement corrélée à l'azote. De plus, il semble que les niveaux relatifs d'azote entre cultivars suivent la même tendance d'un site à l'autre, ce qui nous fait croire que ces niveaux sont fortement influencés par le génotype du cultivar.

Phosphore - Les concentrations de phosphore du sol sont un peu plus fortes chez McCormick car les phosphates y sont mieux solubilisés que dans les sols alcalins comme chez Leblanc (Doucet 1992). Après l'azote, le phosphore est souvent l'élément le plus limitant dans les sols (Marschner 1995). Le phosphore semble être un élément déterminant dans la productivité des cultivars et, sur sol alcalin comme sur sol acide, les cultivars se distinguent significativement entre eux pour leurs taux en phosphore foliaire ($p<0,01$). Les taux de phosphore faibles tendent à correspondre avec de faibles productivités de cultivars, bien que les tests de Tuckey effectués ne permettent pas de distinction aussi franche (Figure 19). Les corrélations possibles entre la productivité des cultivars et le phosphore foliaire sont seulement significatives pour le DNxM 915508 ($r=0,28$, $p<0,05$). Il reste que le phosphore risque de devenir un élément limitant sur nos plantations – d'ailleurs, nos concentrations foliaires générales, sur les deux sites, sont déjà plus faibles que les gammes suggérées par Marschner (0,15 à 0,30 %; 1995), mais la dynamique du phosphore est complexe à saisir par des analyses chimiques ponctuelles, et les contrastes entre cultivars devraient s'accentuer avec les années. Soulignons tout-de-même la capacité du DxN 3570 à puiser le P sur sol alcalin où il est plus rare.

Potassium – Tout comme les concentrations de potassium dans les sols, les concentrations foliaires sont plus rares chez Leblanc (pH alcalin), à cause de l'antagonisme entre le K d'un côté et le Mg et Ca de l'autre. Certains cultivars s'en trouvent plus affectés que d'autres : le cultivar MxB 915311, entre autres, contient moins de potassium que d'autres cultivars plus performants comme les 3729 ou 3570 chez Leblanc. L'antagonisme entre les cations de magnésium et de calcium d'un côté et le potassium de l'autre pourrait expliquer que les niveaux de calcium soient élevés chez Leblanc en même temps que les niveaux de potassium soient plus faibles. Bien que les corrélations entre le K et la productivité du TxD 3230 ne soient pas significatives, il faut noter que son potassium foliaire est beaucoup plus élevé sur sol acide (McCormick), et il se trouve à performer mieux que tous les autres sur ce site.

Calcium – La concentration en calcium foliaire varie significativement entre les clones, et ce, davantage chez Leblanc ($p<0,0001$ contre $p<0,05$ chez McCormick). Le calcium foliaire est en concentration plus faible chez McCormick à cause de la nature du dépôt et au pH plus bas qui le rend moins disponible (Doucet 1992). Il apparaît des distinctions intrinsèques entre les clones : le 915508 montre sur les deux sites les taux les plus faibles de calcium, alors que le 915311 montre les taux les plus élevés en calcium. Les niveaux de calcium foliaires dépassent largement les standards établis par Marschner (1995), alors que les analyses de sol suggéraient une carence potentielle sur sol acide (McCormick). Bien que la disponibilité en calcium diffèrent entre les sites, on obtient néanmoins de bons taux foliaires, voire élevés. Le tableau des corrélations nous indique que ces taux élevés foliaires ne viennent pas nuire aux peupliers mais correspondent au contraire à de bonnes conditions de croissance.

Magnésium – L'antagonisme K vs Ca-Mg est encore présent, car on voit chez Leblanc, site alcalin où le K se fait plus rare, que le magnésium foliaire y est plus abondant (idem dans les sols). Les clones ne se distinguent pas au niveau du magnésium foliaire, quel que soit le site, mais les cultivars 915508, 915311 et 3729 montrent de bonnes corrélations entre leur productivité et leurs concentrations foliaires de magnésium.

Manganèse - Le manganèse est retrouvé en beaucoup plus grande concentration dans l'appareil foliaire des arbres chez McCormick car sa disponibilité augmente à pH faible (Doucet 1992), bien que sa concentration dans le sol se soit révélée inférieure sur ce site en comparaison à Leblanc (voir Tableau 16). L'analyse des concentrations de manganèse foliaire révèle des distinctions significatives entre les clones chez Leblanc (là où l'élément est moins disponible) alors que ces distinctions disparaissent sur pH acide. Les concentrations foliaires chez Leblanc sont plus basses que les niveaux avancés par Marschner (1995), ce qui pourrait suggérer une carence en manganèse, généralement associée à des $pH>7,5$ et à des concentrations de matière organique élevées (Pais & Jones 1997). Les corrélations négatives de croissance-manganèse, toutes significatives sauf pour le DxT 3230, supportent le contraire, ce qui s'explique facilement. Étant donné le large contraste dans la disponibilité de manganèse entre les deux sites, ces corrélations expriment le fait que les croissances ont été supérieures chez Leblanc, où les concentrations de manganèse sont moindres soulignant qu'à ce jour, elles ne sont nullement limitantes. Le statut du manganèse chez une plante est influencé surtout par le fer (mais aussi à moindre échelle le phosphore, le calcium, le magnésium et la silice), et la Figure 19 nous montre des similitudes frappantes entre les concentrations de manganèse et de fer chez les peupliers. (Pais & Jones 1997). D'ailleurs, le 3570 semble être le mieux adapté à l'assimilation du manganèse (comme pour le fer). Cela peut être expliqué par sa grande capacité à assimiler le phosphore.

Zinc – Le zinc foliaire distingue les deux sites : rendu davantage disponible par des pH bas, les peupliers plantés sur sol acide (McCormick) en assimilent davantage. Aussi, les cultivars se distinguent entre eux ($p<0,01$ pour les deux sites) dans leurs concentrations en zinc. Des concentrations élevées de phosphore peuvent bloquer l'assimilation ou le métabolisme du zinc, ce qui n'est pas le cas ni chez Leblanc, ni chez McCormick

(Salisbury & Ross 1992). Notons que les corrélations négatives du tableau des corrélations (Tableau 18), qui pourraient suggérer des excès de zinc, s'expliquent par des contrastes très marqués entre les sites, tout comme pour le manganèse. Les peupliers montrent une bonne productivité avec peu de zinc, comme pour le manganèse, ce qui confirme qu'il n'est aucunement limitant à ce jour. De plus, il est reconnu qu'un excès de zinc entraîne une carence en fer, ce qui n'est pas le cas ici [Pais, 1997 #73].

Fer - Plus soluble dans les pH acides [Pais, 1997 #73], il y est légèrement plus abondant. Des carences peuvent arriver en sol alcalin, causées par la présence de beaucoup de zinc ou de bicarbonates (HCO3) dans le sol (Pais & Jones 1997). Nous n'avons pas les concentrations de zinc en solution dans le sol, mais nos analyses de sol ont effectivement révélé des concentrations en bicarbonates plus de 10 fois supérieures chez Leblanc (Tableau 16) qui justifieraient ces contrastes entre les sites. Les niveaux de fer sont un peu faibles par rapport aux valeurs critiques acceptées (environ 50 ppm selon Pais & Jones 1997), mais ne se distinguent pas entre les clones. Notons cependant que les clones 3230, 3570 et 3729 semblent les mieux adaptés à assimiler le fer à pH bas, et ce sont d'ailleurs les trois clones qui tendent à montrer les meilleures productivités, sans toutefois que les deux soient corrélés. On peut dégager des résultats de corrélation que le fer n'est pas un élément limitant sur aucun des deux sites, car les corrélations y sont négatives.

Cuivre - Les concentrations foliaires en cuivre sont à l'intérieur des gammes normales (Marschner 1995), et les carences sont d'ailleurs rares (Pais & Jones 1997).

Bore – Quel que soit le site, le 3230 assimile moins de bore, sans que ce soit lié à ses performances, bien que les minima requis en bore tournent autour de 20 ppm (Salisbury & Ross 1992), ce qui pourrait éventuellement suffire à limiter la croissance du 3230 chez McCormick. À l'inverse, le 3570 présente les concentrations foliaires les plus élevées.

Enfin, la comparaison des poids unitaires foliaires nous a permis de constater la même tendance qu'au chapitre II, soit que le TxD 3230 employait une stratégie de croissance distincte des 3570 et 3729 (Figure 20). En effet, ce cultivar produit de plus lourdes feuilles que les autres PEH (effet significatif chez Leblanc). La masse unitaire foliaire de MxB 915311 varie un peu plus que les autres entre les deux sites.

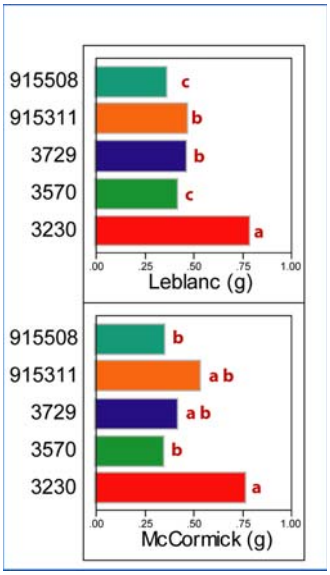


Figure 20 - Poids unitaire foliaire pour 5 cultivars de PEH, sur les sites à pH alcalin Leblanc et pH acide McCormick; les barres d'histogramme accompagnées des lettres a ou b sont différentes à $p<0,05$

Analyse du tissu ligneux

En termes de distinction clonale pour les concentrations en nutriments, les résultats d'analyse du tissu ligneux sont généralement très proches de ceux retrouvés dans les tissus foliaires sauf pour le magnésium (Tableau 19). Alors que les clones ne se distinguent pas au niveau foliaire dans les concentrations en magnésium, des distinctions très significatives apparaissent au niveau ligneux. Cela peut signifier que la majorité du magnésium assimilé va principalement vers le système foliaire, étant donnée l'importance du magnésium foliaire pour la croissance soulignée par le tableau des corrélations (Tableau 18).

Les clones se distinguent entre eux pour l'assimilation ligneuse du N, P, K, Mg, et Zn autant sur sol acide qu'alcalin, alors que pour le calcium, le bore et le cuivre, les distinctions ne se font que sur sol alcalin. Enfin, les clones ne montrent pas d'assimilation différentielle pour le manganèse et le fer. Ces résultats, quoique similaires aux résultats d'analyse foliaire, soulignent les distinctions génotypiques entre les clones plus marquées lors de l'assimilation des macro-éléments (N, P, K, Ca et Mg) et rappellent leur importance dans la croissance des peupliers. De plus, on voit que ces distinctions inter-clonales se font plus marquées dans un sol alcalin (pH 7,5).

	Leblanc	McCormick
CONCENTRATIONS	**Effet Clone : Prob > |r| sous H0**	
N (%)	**0.0002**	**0.0133**
P (%)	**0.0022**	**0.0115**
K (%)	**<.0001**	**<.0001**
Ca (%)	**0.0010**	0.2388
Mg (%)	**0.0008**	**0.0016**
Mn (ppm)	0.3475	0.1590
B (ppm)	**0.0076**	0.0711
Fe (ppm)	0.2477	0.8306
Cu (ppm)	**0.0023**	0.4260
Zn (ppm)	**<.0001**	**<.0001**

Tableau 19- Probabilités, résultant d'analyses de variance, d'un effet « clone » sur la concentration moyenne par peuplier de chaque élément nutritif ainsi que le contenu total moyen par peuplier pour chaque élément nutritif (concentration x biomasse sèche totale) du matériel ligneux. Les différents clones analysés sont les DNxM 915508, MxB 915311, NxM 3729, DxN 3570 et TxD 3230, sur deux sites à pH contrasté Leblanc (pH=7,5) et McCormick (pH=5,7).

En général, la productivité des peupliers s'est reflétée sur les quantités de nutriments immobilisées dans le tissu ligneux des arbres (Tableau 20). La majorité des clones ont mieux performé sur sol alcalin Leblanc, et ont également stocké davantage de nutriments sur ce site, sauf le TxD 3230, qui a été plus productif sur sol acide. Cependant, il semble

que les besoins en phosphore varient moins avec la productivité car les quantités extraites des deux sites sont semblables.

Le NxM 3729, qui a été le plus productif sur sol alcalin Leblanc, a été le clone à en retirer le plus d'éléments. Alors que le 3230 lui a été supérieur sur sol acide, le 3729 a demandé plus d'azote et de phosphore. Ce constat vient corroborer ce que Souleres affirme sur l'avantage que possèdent les hybrides interaméricains en situation hors-vallée (Souleres 1992). Enfin, le MxB 915311 montre des besoins en nutriments sur sol alcalin (Leblanc) relativement élevés en azote, phosphore et calcium par rapport à ses performances, et semble davantage adapté aux sols acides (McCormick).

		Leblanc	McCormick
MACRO-ÉLÉMENT	**CULTIVAR**	**Kg/ha**	
N	3230	4.79	4.99
	3570	5.41	3.89
	3729	6.79	5.45
	915311	5.97	4.18
	915508	5.63	3.52
P	3230	0.32	0.46
	3570	0.32	0.30
	3729	0.42	0.48
	915311	0.38	0.33
	915508	0.35	0.35
Mg	3230	0.73	0.58
	3570	0.60	0.36
	3729	0.64	0.37
	915311	0.56	0.29
	915508	0.64	0.30
Ca	3230	3.58	3.90
	3570	3.70	2.70
	3729	5.08	3.24
	915311	4.38	3.06
	915508	3.06	2.03
K	3230	1.33	1.75
	3570	1.61	1.34
	3729	2.10	1.83
	915311	1.30	1.01
	915508	1.77	1.26

Tableau 20- Contenus à l'hectare des macro-éléments (N, P, Mg, Ca, K) retrouvés dans le tissu ligneux des peupliers hybrides (branches + tronc) selon les clones (3230, 3570, 3729, 915311 et 915508), d'après un espacement de 1,5m entre les PEH sur un même rang et 12m entre les rangs (555/ha), densité à réduire prochainement.

Discussion

La productivité d'un écosystème ou d'une plantation d'arbres est le résultat d'interactions complexes entre le génotype des individus et leur environnement biotique et abiotique. La maximisation de cette productivité, objectif avoué de la populiculture, peut être atteinte soit par la sélection de cultivars performants, l'optimisation des méthodes de production, ou la combinaison de ces deux méthodes (Ceulemans & Deraedt 1999). Nos dispositifs expérimentaux combinent à la fois une gamme de plusieurs hybrides interaméricains, eurasiens, euraméricains et certaines combinaisons multiples, que nous confrontons à une vaste palette de sols reflétant les réalités du sud-ouest québécois et à différentes méthodes de culture, que ce soit par l'espacement entre les rangées d'arbres ou la production intercalaire. De plus, le choix de nos sites et de nos cultivars a été guidé par la nécessité de permettre les comparaisons strictes entre ces sites. Cela permettra d'enrichir de manière déterminante le bassin de connaissances lié aux aspects sylvicoles en populiculture au Québec.

Âge des sites

Avant d'aller plus avant dans l'analyse de nos résultats, il faut se rappeler que les dispositifs de plantation analysés dans ce rapport sont encore jeunes. Bien que certains clones se démarquent par leur vigueur et leurs qualités d'adaptation, plusieurs autres cultivars restent difficiles à distinguer pour le moment. Il est connu que les différences de productivité entre cultivars sont nettement plus évidentes lorsque les arbres deviennent plus matures (Heilman & Stettler 1985). En effet, nos plantations débutent un stade de croissance accéléré, soit la première partie de la courbe sigmoïde classique utilisée pour exprimer la croissance des plantations de peuplier (Camiré & Brazeau 1998), et les contrastes adaptatifs entre les clones étudiés devraient s'accentuer avec chaque nouvelle année de croissance et nous révéleront certainement davantage d'informations sur les clones de peupliers disponibles dans les années à venir.

Classe texturale des sols

Une grande variété de types de sols peut être utilisée pour les plantations de peupliers (Ceulemans & Deraedt 1999). Cependant, il est essentiel que le choix des espèces plantées tienne compte des conditions édaphiques qui dominent sur les sites de plantation (Cogliastro 1997, 2003). En effet, plusieurs échecs en plantations par le passé ont été causés par un mauvais choix de cultivars (Balandier & Dupraz 1999). Notre dispositif de plantations est constitué de six sites aux textures de sol variables afin de discriminer les cultivars selon leurs adaptations. À une extrémité du spectre granulométrique se trouve le site Thibodeau, constitué d'un sol plus lourd, argileux, le plus favorable à une populiculture d'après plusieurs (Chauret *et al.* 1999). Vient ensuite le site Verteneuil (une ancienne terre de culture à fort potentiel). Ces deux sites peuvent être considérés comme très performants.

Notre volonté d'explorer des situations édaphiques plus marginales a justifié la création des dispositifs Caillé, Latreille, Leblanc et McCormick. Les sites Caillé et Latreille sont tous deux définis comme des loams dont la proportion de sable ne dépasse jamais 50%, quoique le site Latreille contienne une forte proportion de gravier dans son sol et donc un

volume de sol prospectable réduit. Ces sites ont un passé agricole qui a affecté la disponibilité des ressources du sol. Les sites Leblanc et McCormick, d'origine glaciaire caractérisés par un loam sableux, contiennent environ 5% de matière organique, ce qui permet d'accroître la rétention d'eau et d'éléments nutritifs (Camiré & Brazeau 1998). Ces deux sites présentent d'ailleurs une plus grande disponibilité en eau que les sites Caillé et Latreille, et globalement un meilleur potentiel sylvicole quand on compare les résultats de croissance des deux groupes de sites ensemble (à âge égal). D'ailleurs, ces résultats confirment que le site littoral Latreille (plus graveleux) offre les moins bonnes conditions de croissance de l'ensemble de nos dispositifs.

Espacement

L'espacement entre les plants influence non seulement la productivité des individus mais aussi leur forme. Alors que de l'espacement souvent conseillé au Québec est de 3 m x 3 m (Camiré & Brazeau 1998), notre dispositif de double production peupliers et de feuillus nobles s'en distingue en proposant des espacements entre les rangs qui sont définitifs et qui permettent l'accès à la pleine lumière pour les feuillus et peupliers. Nos dispositifs d'espacement rappellent davantage ceux des systèmes de culture intercalaire, comme ceux incluant la production de noyers noirs où les espacements entre les rangées se situent autour de 12,5 m (Garret *et al.* 1991). Nos dispositifs sont conçus pour une production de bois de qualité sciage et déroulage et ne se conçoivent pas selon une planification qui comprendrait un stade de récolte d'une partie de la biomasse pour du bois à pâte (ou tout autre usage commun à une biomasse ligneuse de faible qualité). Nous croyons que la populiculture pratiquée sur de petites superficies en territoire privé ne pourrait rentabiliser une phase de récolte d'un faible volume de bois de faible qualité. Nous croyons également que cet objectif intermédiaire pourrait compromettre l'objectif final de production de bois de qualité sciage et déroulage (hétérogénéité des espacements, soins d'élagage mal répartis, reprise incertaine à l'éclaircie et irrégularité de croissance, etc.).

À ce stade de développement de nos arbres, l'espacement de 6 m entre les rangs induit une productivité supérieure à celui de 8m (site Verteneuil) autant pour les peupliers que pour les feuillus. Nos résultats montrent un accroissement du diamètre et de la hauteur avec une diminution de l'espacement entre les rangées de peupliers, ce qui va à l'encontre des résultats présentés dans la littérature scientifique. Les arbres feuillus plantés à large espacement ont tendance à développer un plus grand diamètre ainsi qu'un plus large houppier mais manifestent moins de dominance apicale (Cabanettes *et al.* 1999), ce qui n'est pas un problème dans le cas de peupliers qui ont intrinsèquement une très forte dominance apicale. Le système de comparaison des effets de l'espacement est toutefois encore jeune.

Il est intéressant de noter que non seulement les hauteurs et diamètres de nos arbres, mais également les ratios hauteur/diamètre, sont plus faibles à 8 m (16m entre les peupliers) qu'à 6 m (12 m entre les peupliers). Cela semble confirmer qu'à des espacements plus importants, la croissance radiale est favorisée. C'est aussi ce qu'a trouvé Bonduelle (1990) en étudiant plusieurs cultivars interaméricains P.trichocarpa x P.deltoides dont le

3230. Il est également possible que les conditions de drainage entre les pièces A (espacement 6m) et B (espacement 8m) diffèrent. En effet, le frêne d'Amérique présente une mortalité de 20% plus importante dans la pièce B (8m) que dans la pièce A (6m), alors que la survie du noyer noir, toujours plus faible que celle du frêne, ne se distingue pas entre les deux pièces. Cela pourrait suggérer que certaines caractéristiques édaphiques non mesurées varient entre les deux pièces.

Cultures intercalaires

La production de peuplier en culture intercalaire de feuillus n'est pas chose fréquente et les études manquent afin de mettre nos premiers résultats en perspective. Néanmoins, une étude produite en France comparant des feuillus plantés en culture intercalaire (densités de 400 tiges/ha) et en plantation classique (1100 tiges/ha) a démontré que certaines espèces d'arbres étaient significativement plus productifs (hauteur et diamètre) en culture intercalaire qu'en plantation classique, alors que d'autres ne montraient pas de différence significative (Balandier & Dupraz 1999). Mais cette variation de productivité peut autant être due à l'effet de la culture interbandes qu'à l'espacement.

Sur le site Verteneuil de la présente étude, la culture de soya entre les bandes a pour conséquence d'accroître la croissance radiale des peupliers. L'effet pourrait être d'origines multiples. Tout d'abord, il est démontré que le soya, comme plusieurs autres légumineuses fixatrices d'azote, a un effet bénéfique sur la croissance d'arbres (Van Sambeek *et al.* 1986), et l'analyse chimique des sols a montré que les niveaux d'azote total étaient bas et donc pourraient être considérés comme limitants. De plus, l'application de fertilisants qui accompagne l'ensemencement du soya a enrichi le sol. D'après une revue de littérature produite par Ceulemans & Deraedt (1999), l'application de fertilisants a pour conséquence d'augmenter la productivité des peupliers, mais il n'y a pas de différence dans la réponse aux fertilisants entre les cultivars de peupliers. Enfin, l'effet de l'herbicide appliqué afin de favoriser le soya a pu être bénéfique aux arbres en plantation en limitant la compétition en bordure des paillis de plastique, comme cela a été constaté récemment avec des plantations de noyer hybrides en France testant l'effet de l'application d'herbicides sur leur croissance (Chifflot *et al.* 2006).

Génétique et productivité des cultivars

La majorité des études de productivité en populiculture ont intégré à leurs dispositifs différents hybrides interaméricains *Populus trichocarpa* x *P. deltoides* (TxD) réputés être très productifs (Ceulemans & Deraedt 1999). Ces hybrides ont souvent montré une supériorité évidente vis-à-vis du P. trichocarpa pur (Heilman et al.1994) ou des hybrides euraméricains comme *P. deltoides x P. nigra* (DxN) (Hervé et Carlemesn 1996, Barigah et al., 1994). Ces peupliers interaméricains semblent davantage adaptés à des milieux variés, autant les milieux alluviaux que les situations hors-vallée, contrairement aux euraméricains comme le DxN (Souleres 1992).

Pour simplifier, nous avons hiérarchisé nos clones selon leur productivité moyenne, sans se limiter aux distinctions statistiquement significatives, selon le pH, la texture et l'origine du dépôt. Ces classements des cultivars par rangs, présentés aux Tableau 21, Tableau 22 et Tableau 23, permettent une meilleure comparaison entre eux mais ne

doivent pas être pris isolément des résultats plus détaillés présentés dans les chapitres I à IV.

Le site de Verteneuil, un loam sablo-argileux présentant une bonne fertilité (C.E.C. > 20 en moyenne), permet au 3230 (TxD) de se démarquer des 3308 (DxN) et 3729 (NxM). C'est sur ce site aux caractères optimaux pour la croissance des peupliers que le cultivar 3230 montre les plus fortes croissances verticales et radiales : après 6 saisons de croissance, il atteint 10,72 m de hauteur et 10,9 cm de diamètre, pour un espacement de 6m entre les rangées. Le 3230 performe d'ailleurs aussi bien chez Caillé et Latreille, deux loams majoritairement argileux et limoneux également propices à la croissance des peupliers, ainsi que chez McCormick, un loam plus sableux au pH acide (5,7), alors qu'il présente de nettes difficultés de croissance sur un loam sableux alcalin (7,5) comme Leblanc. Cela suggère que ce cultivar serait intolérant à des pH basiques. Enfin, on pourrait expliquer la mauvaise performance du 3230 chez Thibodeau (Tableau 21) un site argileux lourd mais riche, par une intolérance aux conditions de drainage mauvais ou imparfait, bien que les interaméricains TxD soient traditionnellement considérés comme mieux adaptés que les euraméricains aux sols argileux (Souleres 1992). D'autres facteurs pourraient cependant être en jeu puisque une autre étude québécoise a montré que le 3230 poussait très bien dans un site lourd (40% d'argile), produisant après 3 ans des hauteurs significativement supérieures aux 915508, 3570, 915311 et 3308 (Zhang *et al.* 2003).

	3230	3729	3570	915508	915311
Dépôt marin (sol argileux)	3	2	2	1	2

Tableau 21- Mise en rang des cultivars de PEH selon leur productivité dans un sol argileux; Les résultats de productivité proviennent du site Thibodeau traité au chapitre III.

Le 915508, un hybride *P.deltoides x nigra* x *P. maximowiczii* (DNxM) montre également d'excellentes performances. D'après Périnet et al. (2001), le 915508 convient sur des sols fertiles (loams) à moyennement fertiles (sables loameux). Il semble effectivement très bien adapté aux sols francs comme les loams et loams limoneux chez Caillé et Latreille ainsi que les loams sableux comme chez Leblanc et McCormick. Il présente également une très bonne productivité sur sol lourd argileux comme chez Thibodeau, contrairement au TxD 3230. Ce cultivar semble un des mieux adaptés aux diverses conditions de sol testées dans nos dispositifs de croissance, malgré qu'un pH de sol acide semble limiter sa croissance (Tableau 22).

		3230	3729	3570	915508	915311
pH	Acide (5,7)	1	2	2	3	4
	Alcalin (7,5)	4	1	2	2	3

Tableau 22- Mise en rang des cultivars de PEH selon leur productivité en fonction de l'acidité du sol; Les résultats de productivité proviennent des sites Leblanc (alcalin) et McCormick (acide) traités au chapitre IV.

Le MxB 915311 réagit très mal aux conditions de croissance de loams sableux, autant acides (McCormick) qu'alcalins (Leblanc), et performe mieux sur des sols aux textures fines.

De son côté, le DxN 3308, considéré moins bien adapté aux milieux hors-vallée comme tous les DxN (Souleres 1992), se montre beaucoup plus compétitif sur un loam riche et fertile comme Verteneuil que sur un loam plus pauvre comme Caillé ou plus mal drainé comme Thibodeau. Bien que son élongation terminale soit inférieure à d'autres cultivars comme le TxD 3230 ou le NxM 3729 (voir chapitre I), le 3308 présente de bons volumes étant donnée sa forte croissance radiale. Un autre DxN, le 3570, semble être plus versatile que le 3308. Tout comme celui-ci, le 3570 présente de bons résultats sur loams francs, en plus de très bien réagir aux sols plus lourd comme un loam limoneux (Latreille), aux sols argileux (Thibodeau) ou aux sols plus sableux (Leblanc et McCormick). Ce croisement d'origine belge est un généraliste très compétitif sur des sols appauvris, notamment en phosphore et potassium (voir Tableau 23).

		3230	3570	915508	3308
dépôt	glaciaire	2	3	1	4
	Littoral (graveleux)	3	1	2	-

Tableau 23- Mise en rang des cultivars de PEH selon leur productivité en fonction de l'origine du dépôt (glaciaire ou littoral); Les résultats de productivité proviennent des sites Caillé (loam d'origine glaciaire) et Latreille (loam limoneux graveleux d'origine littorale) traités au chapitre II.

Le NxM 3729 favorise un ratio hauteur/diamètre plus élevé que les autres cultivars étudiés, ce qui engendrera une production en volume inférieure aux attentes en regard de sa croissance verticale, si cette tendance se maintient dans les années qui viennent. Cependant, cette stratégie lui permet de se mettre plus rapidement à l'abri des brouteurs comme le chevreuil. Ce cultivar semble également bien tolérer les drainages imparfaits : il a présenté une bonne survie chez Thibodeau ainsi qu'une bonne croissance.

Conclusion

La comparaison de différentes méthodes de culture déployées sur nos dispositifs de plantation présente plusieurs résultats intéressants. À ce stade de développement de nos arbres, l'espacement de 12 m entre les rangs de peupliers induit une productivité supérieure à celui de 16m. Pour ce qui est des feuillus intercalés entre les rangées de peupliers, ils présentent également un accroissement du diamètre et de la hauteur avec une diminution de l'espacement entre les rangées de peupliers. Cependant, des conditions de drainage particulières pourraient varier entre les pièces expérimentales servant à comparer les espacements. Ces conditions et leurs effets seront examinés ultérieurement.

Nous avons également mesuré que la culture de soya entre les bandes a pour conséquence d'accroître la croissance radiale des peupliers. Plusieurs raisons peuvent expliquer ça : d'abord l'effet bénéfique sur un sol pauvre en azote qu'aurait le soya, plante fixatrice d'azote; ensuite l'application de fertilisants qui accompagne l'ensemencement du soya, qui a enrichi le sol; enfin, l'effet de l'herbicide appliqué afin de favoriser le soya a pu être bénéfique aux arbres en plantation en limitant la compétition en bordure des paillis de plastique, comme cela a été constaté récemment avec des plantations de noyer hybrides en France (Chifflot *et al.* 2006).

Bien que nos plantations soient encore jeunes, plusieurs cultivars se démarquent déjà des autres. Le TxD 3230 montre d'excellentes productivités sur des textures de sols moyennes à grossières, mais est intolérant aux sols argileux mal drainés ainsi qu'aux pH alcalins. Le DNxM 915508 s'est montré le mieux adapté aux diverses conditions de sol testées dans nos dispositifs de croissance, autant sur des loams que sur des sols argileux, contrairement au 3230, mais semble moins bien performer sur sol acide. Le NxM 3729 favorise un ratio hauteur/diamètre plus élevé que les autres cultivars étudiés, et cela diminue sa production de volume de tige. Cependant, cette stratégie lui permet de se mettre plus rapidement à l'abri des brouteurs comme le chevreuil. Ce cultivar semble également bien tolérer les drainages imparfaits, autant en survie qu'en croissance. De son côté, le MxB 915311 a mal réagi aux conditions de croissance associées aux loams sableux, autant acides qu'alcalins. Le DxN 3308, considéré moins bien adapté aux milieux dits hors-vallée comme tous les DxN (Souleres 1992), se montre beaucoup plus compétitif sur un loam riche et fertile comme Verteneuil que sur un loam plus pauvre comme Caillé ou moins bien drainé comme Thibodeau. Sa croissance est caractérisée par une forte allocation de la biomasse aérienne à la croissance radiale, au détriment de sa croissance verticale. Un autre DxN, le 3570, semble être plus versatile que le 3308. Tout comme celui-ci, le 3570 présente de bons résultats sur loams francs, en plus de très bien réagir aux sols plus lourd ou aux sols pauvres sableux. On peut considérer ce croisement d'origine belge comme un généraliste très compétitif sur des sols appauvris, notamment en phosphore et potassium.

Les analyses de nutrition foliaire et ligneuse ont permis d'ouvrir un nouveau chapitre dans notre compréhension de la productivité des peupliers. Nous avons pu noter plusieurs caractéristiques nutritionnelles intrinsèques à certains cultivars, ainsi que l'influence de certains éléments clés comme le potassium, le magnésium, le calcium et l'azote sur leur productivité. Le rôle de ce dernier apparaît particulièrement déterminant pour la croissance des clones. De plus, nos résultats montrent que les niveaux relatifs d'azote foliaire entre cultivars suivent la même tendance d'un site à l'autre, ce qui nous fait croire que ces niveaux sont fortement influencés par le génotype du cultivar.

Sachant que la culture intensive de peupliers à des fins de production de bois de qualité est possible sur un horizon de 15 à 20 ans, nous croyons essentiel de poursuivre la mise en place d'un véritable réseau d'expérimentations associé à un programme de suivi à moyen terme. Un tel programme aurait pour mission de conclure sur la qualité des produits obtenus, après un cycle complet de production, d'une gamme étendue de clones de peupliers, installés dans de bonnes conditions de sol et répartis dans plusieurs régions à fort potentiel du Québec. Le présent document initie cet objectif par la comparaison d'une diversité de clones et de conditions de croissance et par la synthèse des résultats obtenus jusqu'ici. Il faudra suivre nos plantations jusqu'à la complétion de leur cycle de croissance et de récolte afin d'obtenir un bilan final de production.

Bibliographie

Balandier, P. et C. Dupraz (1999). "Growth of widely spaced trees. A case study from young agroforestry plantations in France." Agrofor. Syst. **43**: 151-167.

Balleux, P. et P. van Lerberghe (2001). Le boisement des terres agricoles. Paris, Institut du développement forestier.128

Bariteau, L. (1988). La carte géomorphologique au 1:20 000 de modelés polygéniques: un exemple des basses terres du Saint-Laurent. Montréal, Université de Montréal**:** 185.

Becquey, J. (1997). Les noyers à bois. Paris, 3rd edition, Les Guides du Sylviculteur, Institut pour le développement forestier.144

Becquey, J. (1997). "Plantations de noyers avec accompagnement ligneux: quelques recommandations." Forêt entreprise **118**: 16-20.

Belvisi, J. (2005). Portrait des pertes de superficies forestières en Montérégie entre 1999 et 2004. Géomont, Agence forestière de la Montérégie, Ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec, 29 pages.

Berthelot, A., J. Ranger et D. Gelhaye (2000). "Nutrient uptake and immobilization in a short-rotation coppice stand of hybrid poplars in north-west France." Forest Ecology and Management **128**: 167-179.

Bohn, H. L., B. L. McNeal et G. A. O'Connor (1979). Soil chemistry. New York, John Wiley & Sons.329

Boxman, A. W., P. L. W. Cobben et J. G. M. Roelofs (1994). "Does (K+Mg+Ca+P) Fertilization Lead to Recovery of Tree Health in a Nitrogen Stressed Quercus rubra L Stand." Environmental Pollution **85**(3): 297-303.

Burns, R. M. et B. H. Honkala (1990). Silvics of North America: 2. Hardwoods. Washington, DC, U.S. Department of Agriculture, Forest Service.877

Cabanettes, A., D. Auclair et W. Imam (1999). "Diameter and height growth curves for widely-spaced trees in European agroforestry." Agrofor. Syst. **43**: 169-182.

Camiré, C. et M. Brazeau (1998). Culture des genres *populus* et *Larix* au Québec: sols, exigences nutritionnelles et productivité. Québec, Déposé au MRN, CRBF, Université Laval**:** 132.

Carter, M. R., Editor, Ed. (1993). Soil sampling and methods of analysis. Boca Raton, Florida, Lewis Publishers.

Ceulemans, R. et W. Deraedt (1999). "Production physiology and growth potential of poplars under short-rotation forestry culture." Forest Ecology and Management **121**(1): 9-23.

Chauret, G., A. Koubaa et T. Zhang (1999). Caractéristiques et utilisation du bois des clones de peuplier hybrides. Forintek Canada Corp.**:** 53

Chifflot, V., G. Bertoni, A. Cabanettes et A. Gavaland (2006). "Beneficial Effects of Intercropping on the Growth and Nitrogen Status of Young Wild Cherry and Hybrid Walnut Trees." Agrofor. Syst. **66**(1): 13-21.

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

Coulombe, G., J. Huot, J. Arsenault, E. Bauce, J.-T. Bernard, A. Bouchard, M. A. Liboiron et G. Szaraz (2004). Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise. G. d. Québec. Québec.

Dickman, D. I., J. G. Isebrands, J. E. Eckenwalder et J. Richadson (2002). Poplar culture in north america, NRC.397

Donohue, R. L., R. W. Miller et J. C. Shickluna (1983). Soils; an introduction to soils and plant growth, 5ed. Englewood clifs, New-Jersey, Prentice-Hall, inc.667

Doucet, R. (1992). La science agricole: climats, sols et productions végétales du Québec. Eastman, Éditions Berger.699

Duchaufour, P. (1991). Pédologie: sol, végétation, environnement. Paris, Masson.289

Dupraz, C., V. Simorte, M. Dauzat, G. Bertoni, A. Bernadac et P. Masson (1999). "Growth and nitrogen status of young walnuts as affected by intercropped legumes in a Mediterranean climate." Agrofor Syst **43**: 71-80.

Garret, H. E., J. E. Jones, W. B. Kurtz et J. P. Slusher (1991). "Black Walnut (*Juglans nigra* L.) agroforestry - its design and potential as a land-use alternative." Forestry Chronicle **67**: 213-218.

Haines, S. G., L. W. Haines et G. White (1978). "Leguminous plants increase sycamore growth in Northern Alabama." Soil Sci Soc Am **42**: 130-132.

Heilman, P. E. et R. F. Stettler (1985). "Genetic variation and productivity of *Populus trichocarpa* and its hybrids. II. Biomass production in a 4-year plantation." Canadian Journal of Forest Research **15**: 384-388.

Lafond, R., C. Cauchon et J.-P. Ducruc (1992). Pédologie forestière. Mont-Royal, Canada, Modulo.146

Marschner, H. (1995). Mineral nutrition of higher plants. Toronto, Academic Press.889

Paillassa, E. (2002). Fiches techniques des principaux cultivars de peupliers. Paris, Réseau expérimentation peuplier de la forêt privée française, IDF

Pais, I. et J. B. Jones (1997). The handbook of trace elements, St. Lucie Press, Boca Raton, Florida.223

Pan, D., G. Domon, S. de Blois et A. Bouchard (1999). "Temporal (1958-1993) and spatial patterns of land use changes in Haut-Saint-Laurent (Quebec, Canada) and their relation to landscape physical attributes." Landscape Ecology **14**: 35-52.

Périnet, P., H. Gagnon et S. Morin (2001). Liste des clones recommandés de peuplier hybride par sous-région écologique au Québec. (MRN) MRNFP, Québec.

Salisbury, F. B. et C. W. Ross (1992). Plant physiology. Belmont, CA, Wadsworth Publishing Company, Inc.682

Souleres, G. (1992). Les milieux de la populiculture. Paris, Institut pour le développement forestier.309

Sumner, M. E. (2000). Handbook of soil science. Boca Raton, Florida, CRC Press.2048

Thevathasan, N. V. et A. M. Gordon (2004). "Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: experiences from southern Ontario, Canada." Agrofor Syst **61**: 257-268.

Timmer, V. R. (1985). "Response of hybrid poplar clone to soil acidification and liming." Canadian Journal of Soil Science **65**: 727-735.

van den Driessche, R. (2000). "Phosphorus, copper and zinc supply levels influence growth and nutrition of a young *Populus tricocharpa* (Torr. & Gray) x *P. deltoides* (Bartr. ex Marsh) hybrid." New Forests **19**: 143-157.

Van Sambeek, J. W., F. Ponder, Jr. et W. J. Rietveld (1986). "Legumes increase growth and alter foliar nutrient levels of black walnut saplings." Forest Ecology and Management **17**: 159-167.

Zhang, S. Y., Q. Yu, G. Chauret et A. Koubaa (2003). "Selection for both growth and wood properties in hybrid poplar clones." Forest Science **49**(6): 901-908.

Chapitre V – Optimisation des densités de plantation en double rotation

Modélisation des conditions lumineuses en fonction des clones, des espacements, et du temps

Par Alain Paquette, André Ménard, Christian Messier et Alain Cogliastro

Un dispositif de 2,6 ha a été établi en 2000 à Saint-Rémi dans le but d'y tester trois cultivars recommandés par le MRN (3230, 3308 et 3729) en combinaison à deux feuillus nobles (noyer noir et frêne blanc) (voir Méthodologie du Chapitre I – Verteneuil 2000-2005 (6 ans)). Les rangs de peuplier alternent avec les rangs de feuillus. Le dispositif est scindé de manière à comparer des espacements de 12 m (pièce A) et de 16 m (pièce B) entre les rangs de PEH.

Le modèle sylvicole de double rotation de PEH et de feuillus durs doit pouvoir optimiser les conditions de lumière pour une production intensive. La lumière parvenant aux feuillus nobles variera au cours du temps, et ce, en fonction des espacements et possiblement des cultivars utilisés selon leur croissance et la morphologie de la cime.

Dans un premier temps, nous avons mesuré la lumière disponible sur le site pour préciser des différences entre les cultivars et les espacements. Nous avons aussi cherché à anticiper la quantité de lumière résiduelle disponible sous une canopée de PEH par la simulation. Le modèle de simulation SORTIE-ND (Canham et Murphy 2005), centré sur l'arbre et spatialement explicite, a été utilisé. Cette technique nous permet d'accélérer l'acquisition de connaissance en passant rapidement de la simulation au terrain, et vice-versa, de façon à identifier rapidement les combinaisons les plus performantes.

Méthodologie

SORTIE-ND requiert un ensemble de paramètres pour effectuer les calculs de lumière disponible :

- Une carte du site avec la position exacte de chacun des arbres, l'espèce (cultivar), et son DHP.
- Pour chacune des espèces, des relations allométriques prédictives en fonction du DHP de la hauteur de l'arbre, de la hauteur de cime, et du rayon de cime.
- Pour chacune des espèces, un coefficient de transmission de la lumière dans la cime.
- Un ensemble de paramètres décrivant le site, la saison de croissance, etc.

À l'été 2005 (juillet), des photos hémisphériques ont été prises de chaque côté du rang central de PEH (3) du bloc 2 (sur 4) dans chacune des pièces du site, de façon à être centré sur les dispositifs pour éviter les effets de bordure. Deux transects (est et ouest)

ont été tracés de façon perpendiculaire au rang, à partir du plant central de chacun des trois cultivars. Les rangs sont orientés à 310°, et les transects sont donc respectivement à 40° et à 220°. Les photos ont été prises à 1 et 2 m du sol, à 1, 2, 3, et 4 m du rang, lorsque le soleil était masqué par un nuage ou par le rang de PEH pour limiter les éclats de lumière. Ces images ont été traitées pour la correction des éclats de lumière et binéarisées, puis les indices GLI (Global Light Index) calculés à l'aide du logiciel Gap Light Analyzer (GLA) (Frazer et al. 2000).

Deux photos des cimes des trois cultivars ont aussi été prises de chaque côté des rangs (au total quatre photos par cultivar). Une cime complète a été isolée par image, binéarisée, puis son coefficient de transmission de la lumière calculé comme le ratio de pixel blancs sur le total.

Au même moment (juillet 2005), les DHP et la hauteur des arbres ont été mesurés, de même que la hauteur des cimes et leur largeur (dans l'axe du rang et perpendiculairement au rang). Chacun des arbres était catégorisé selon qu'il avait été élagué (au moins une fois) ou pas dans le passé. Les paramètres suivants ont ainsi pu être calculés pour chacun des cultivars :

- Hauteur totale en fonction du DHP.
- Rayon de cime en fonction du DHP.
- Longueur de cime en fonction de la hauteur totale.

La hauteur totale en fonction du DHP a été calculée à l'aide des données de diamètre et de hauteur de 2002 à 2005. Ces paramètres ont été intégrés dans SORTIE et des valeurs de GLI ont ainsi pu être calculées pour les mêmes points où les photos ont été prises.

Résultats

Paramètres des cultivars et relations allométriques

La porosité des cimes (coefficient de transmission de la lumière) varie significativement avec le cultivar (Tableau 24). La cime la plus poreuse étant celle du cultivar 3729, et la plus dense celle du 3308. Les diamètres de cime sur le rang de tous les cultivars (2.5 à 2.7 m) sont plus grands que l'espace disponible entre les arbres (2 m), indiquant que les cimes se chevauchent sur les rangs. Cette compétition amène les arbres à former des cimes asymétriques avec des diamètres plus importants d'environ 1m dans l'axe perpendiculaire au rang pour tous les cultivars (Tableau 24).

Cultivar	Porosité (%)	D. rang (m)	D. perp. (m)	DHP (cm)	H. tot. (cm)	H. cime (m)
3230	11.7 (5.2) AB	2.7 (0.4) A	3.9 (0.7) A	10.3 (1.7) A	8.4 (1.8) A	7.0 (1.7) A
3308	10.8 (3.5) B	2.5 (0.3) A	3.2 (0.4) B	9.4 (1.5) AB	7.9 (0.4) A	6.3 (0.6) A
3729	16.8 (3.2) A	2.7 (0.4) A	3.5 (0.7) AB	9.0 (1.6) B	8.2 (0.9) A	6.2 (0.9) A
n	23	54	54	54	54	39 *

Tableau 24- Moyennes (écart-type) des paramètres des cultivars des sections cibles et tests de comparaison multiples.
Note : * Pour les arbres élagués seulement. La hauteur de cime des arbres non élagués est égale à la hauteur totale.

Les arbres des trois cultivars dans les zones cibles avaient des hauteurs totales comparables, mais les DHP variaient significativement entre eux, de 10.3 cm pour le 3230 à 9.0 cm pour le 3729 (Tableau 24). La longueur des cimes des arbres jamais élagués est égale à leur hauteur totale; celle des arbres élagués est plus petite mais ne varie pas en fonction du cultivar.

Ces données ont été utilisées pour construire les équations allométriques requises par le modèle pour l'estimation des GLI (Tableau 25, Tableau 26 et Tableau 27). Nous avons retenu le modèle linéaire pour la relation hauteur – DHP puisque nous ne considérons ici que la période la plus productive des PEH, qui seront probablement coupés alors qu'ils seront encore en accroissement constant en hauteur. Le modèle classique, une équation asymptotique de type Michaelis-Menten, n'a pas donné de meilleur rendement (en terme de réduction de la somme des carrés des erreurs) et présentait une forme linéaire avec des hauteurs maximales irréalistes. Ces équations (Tableau 25) ont été construites à l'aide des mesures de hauteur et de DHP de la plantation depuis 2002 et couvrent donc très bien cette période (de 2 à 14 m de hauteur environ). Leur robustesse et linéarité (aucun changement de pente n'est perceptible pour chacun des cultivars) permet une extrapolation conservatrice jusqu'à au moins 20 m de hauteur (Figure 21).

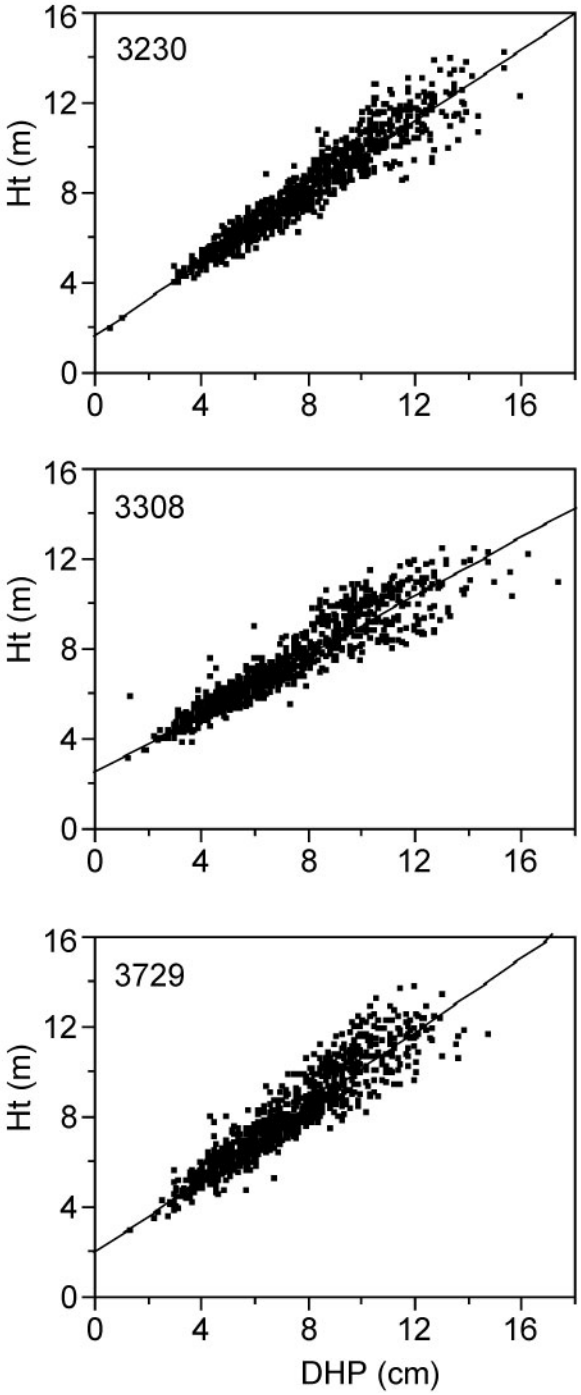


Figure 21- Relations hauteur totale (Ht) – diamètre à hauteur de poitrine (DHP) pour chacun des cultivars. Note : les équations sont données au Tableau 25.

Trois équations de la largeur de cime en fonction du DHP ont été produites, soit dans le sens du rang, soit perpendiculairement au rang, et enfin un rayon moyen (Tableau 26; seul le rayon moyen est présenté). La hauteur de la cime était toujours en 2005 égale à la

hauteur totale pour les arbres n'ayant jamais été élagués (aucun élagage naturel). Nous avons donc produit deux équations de prédiction de la hauteur de cime en fonction de la hauteur totale selon que les arbres étaient élagués ou pas (Tableau 27).

Cultivar	a	b	SCE	R^2	n
3230	1.68	0.796	399	0.91	962
3308	2.53	0.653	449	0.87	966
3729	1.91	0.826	548	0.86	957

Tableau 25- Équation prédictive de la hauteur totale (m) en fonction du DHP (cm).
Note : Équation de la forme « hauteur = a + b*DHP ». SCE : somme des carrés des erreurs. Calculé à l'aide des mesures des arbres de la plantation de 2002 à 2005.

Cultivar	C_1	a	SCE	n
3230	0.264	0.784	0.37	18
3308	0.633	0.364	0.27	18
3729	0.526	0.492	0.7	18

Tableau 26- Équation prédictive du rayon moyen de cime (m) en fonction du DHP (cm).
Note : Équation de type « rayon = C_1 * DHP^a »

Cultivar	C_2	b	SCE	n
3230	0.879	0.988	10.3	15
3308	0.294	1.48	0.58	13
3729	0.366	1.36	0.28	11

Tableau 27- Équation prédictive de la hauteur de cime (m) en fonction de la hauteur totale (m) pour les arbres élagués.
Note : Équation de type « hauteur de cime = C_2 * DHP^b ». Les deux coefficients sont simplement portés à 1 pour les arbres non élagués.

Climat lumineux en fonction des espacements et du cultivar:

a) Mesures directes

Plusieurs facteurs doivent être considérés dans l'élaboration d'un modèle de lumière disponible dans un dispositif de double rotation avec alternance des bandes. Ultimement, nous sommes intéressés par la quantité de lumière disponible au niveau de la cime des plants de feuillus nobles, à mi-chemin entre les rangs de PEH. Pour le moment, cette ressource est abondante, puis elle diminuera à mesure que les PEH prendront de l'espace. C'est cette diminution de la lumière dans le temps, selon les cultivars et les espacements, que nous tentons de prévoir à l'aide de modèles (voir section suivante). Mais déjà il est possible de noter des différences significatives plus près des rangs de PEH, et une augmentation de la lumière avec la distance. La lumière disponible peut varier en fonction du cultivar, des espacements entre les rangs (12 m et 16 m), et sur le rang (fixe à 2 m), de la distance au rang, de la hauteur à partir du sol, et du côté du rang (« est » 040°, et « ouest » 220°).

En moyenne pour les deux côtés et pour tous les clones, à 2 m des rangs, les indices GLI étaient de 47 et 50 à 1 m et 2 m du sol, respectivement, avec un espacement de 12 m, et de 59 et 62, respectivement, avec 16 m d'espacement entre les rangs. Ces différences, soit environ 3% de plus de lumière à 2 m qu'à 1m, se maintiennent avec la distance et les clones pour les deux espacements. Les résultats présentés à la suite ne concernent donc que les valeurs mesurées à 1 m pour alléger le texte (les résultats des tests sont les mêmes aux deux hauteurs).

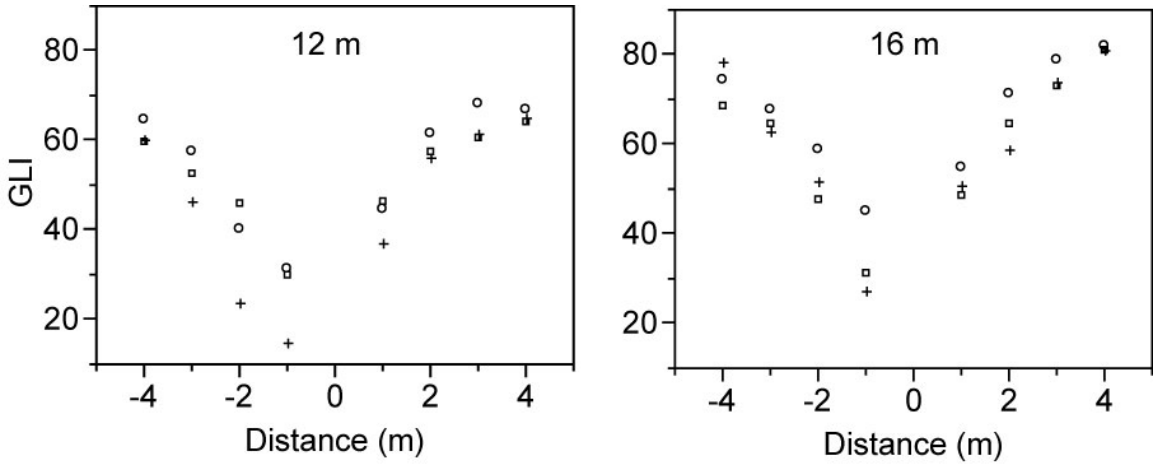


Figure 22- Indice GLI observé à 1 m du sol en fonction de la distance au rang de PEH, du cultivar, et de l'espacement des rangs.
Note : (+) 3230 ; (o) 3308 ; (□) 3729. Distance entre les rangs de PEH = 12 m sur le graph de gauche, et 16 m sur celui de droite. La distance au rang est positive vers l'est (040°) et négative vers l'ouest (220°).

La lumière disponible (GLI) varie significativement ($p<0.05$) avec l'espacement entre les rangs, le cultivar, le côté du rang, et bien-sûr avec la distance au rang (Tableau 28). De plus, l'effet des cultivars et du côté varient avec la distance. La Figure 22 présente ces relations en fonction de la distance. Sauf exceptions, l'ordre des cultivars est préservé à toutes les distances, dans les deux espacements testés, des deux côtés des rangs, et aux deux hauteurs de mesure (non présenté). Le cultivar 3308 laisse passer significativement plus de lumière que les deux autres (test de Tukey, non présenté). Il s'agit pourtant du cultivar le plus opaque du groupe (Tableau 24), signifiant que les paramètres de cime (hauteur et surtout largeur) et la hauteur de l'arbre sont des paramètres plus importants pour la lumière.

Effect	d.l.	p>F
Espacement	1	**<0.0001**
Cultivar	2	**<0.0001**
Côté	1	**<0.0001**
Distance	1	**<0.0001**
Espacement*Cultivar	2	0.0761
Espacement*Côté	1	0.4716
Espacement*Distance	1	0.1431
Cultivar*Côté	2	0.4214
Cultivar*Distance	2	**0.0234**
Côté*Distance	1	**0.0009**
Espacement*Cultivar*Côté	2	0.2061
Espacement*Cultivar*Distance	2	0.2586
Espacement*Côté*Distance	1	0.3483
Cultivar*Côté*Distance	2	0.2976
Espacement*Cultivar*Côté*Distance	2	0.8872
Modèle (R^2 = 0.97)	23	<0.0001

Tableau 28- Indices GLI à 1 m en fonction de l'espacement (12 m et 16 m), de la distance au rang, du côté du rang (« est » et « ouest ») et du cultivar.

b) Validation du modèle et de scénarios sylvicoles dans le temps

Nous avons tenté quelques simulations sur le modèle SORTIE-ND dans lequel nous avons introduit les trois cultivars à l'étude et des cartes des dispositifs (12 m et 16 m d'espacement). Pour chaque cultivar, deux « espèces » ont été créées dans SORTIE selon qu'ils étaient élagués ou pas; seules les équations de hauteur de cime (Tableau 27) étaient ainsi modifiées. Les simulations de valeurs de GLI pour les mêmes points donnent pour le moment des résultats très intéressants et largement conformes aux valeurs observées (Figure 23 et Figure 24).

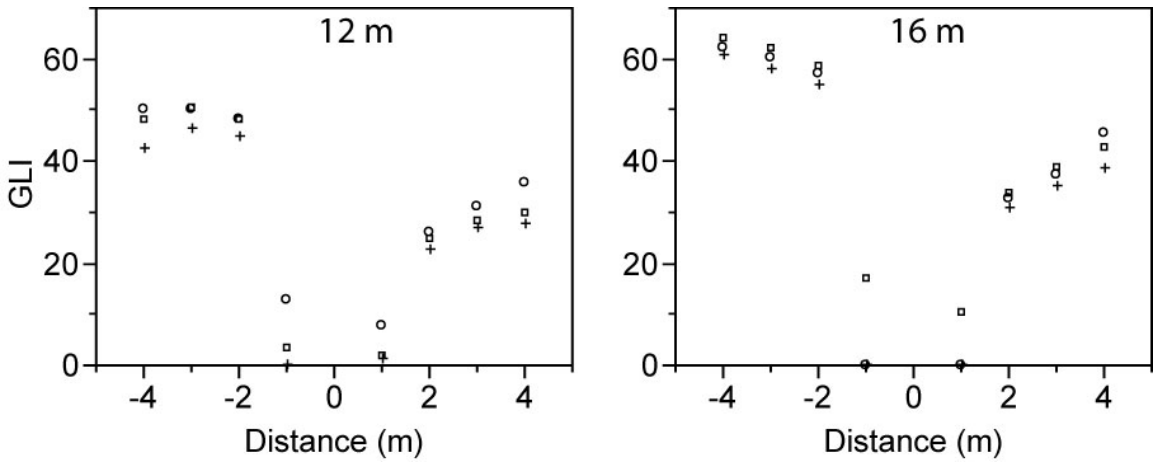


Figure 23- Indice GLI simulé à 1 m du sol en fonction de la distance au rang de PEH, du cultivar, et de l'espacement des rangs, pour un diamètre de cime moyen ; Fraction directe (*Beam Fraction*) = 0.5 (la même que celle utilisée pour l'analyses des photos hémisphériques).

Note : (+) 3230 ; (o) 3308 ; (□) 3729. Distance entre les rangs de PEH = 12 m sur le graph de gauche, et 16 m sur celui de droite. La distance au rang est positive vers l'est (040°) et négative vers l'ouest (220°).

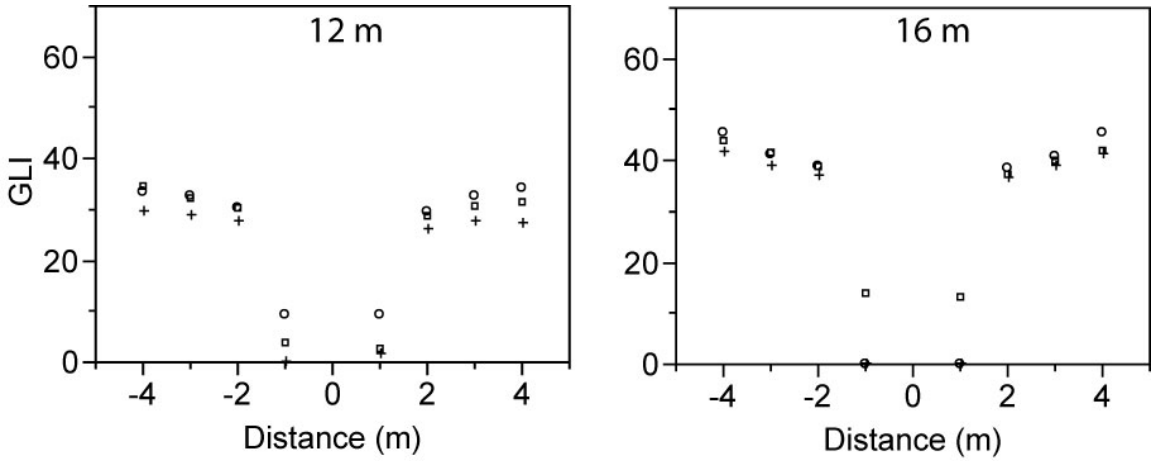


Figure 24- Indice GLI simulé à 1 m du sol en fonction de la distance au rang de PEH, du cultivar, et de l'espacement des rangs, pour un diamètre de cime moyen ; Fraction directe (*Beam Fraction*) = 0 (pas de lumière directe).
Note : (+) 3230 ; (o) 3308 ; (□) 3729. Distance entre les rangs de PEH = 12 m sur le graph de gauche, et 16 m sur celui de droite. La distance au rang est positive vers l'est (040°) et négative vers l'ouest (220°).

Quelques problèmes restent cependant à résoudre pour lesquels les pistes de solution suivantes seront investiguées dans les mois à venir :

- Les valeurs prédites par le modèle sont systématiquement plus faibles (environ 30%) que les valeurs observées :
  - Le modèle double probablement les coefficients d'atténuation de la lumière dans l'espace où deux cimes adjacentes se confondent. Cependant, nos analyses démontrent plutôt que pour ces espèces les deux cimes contribuent chacune pour environ la moitié de la surface foliaire.
  - Les valeurs moyennes prédites sont encore plus faibles avec l'utilisation des diamètres de cime perpendiculaires au rang; les valeurs moyennes (donnant sensiblement le même résultat que les valeurs prises sur le rang), ont donc été utilisées.
- Les valeurs prédites du côté « ouest » (220°) ne suivent pas la même relation avec la distance qu'à l'est (040°) (Figure 23), alors que les valeurs observées présentent un profil semblable des deux côtés (Figure 22).
  - Nous avons refait des simulations sans apport en lumière directe (Beam Fraction = 0) (Figure 24), selon l'hypothèse, confirmée, que cela est relié à la dynamique de la fraction directe de la lumière incidente, plus élevée de ce côté qui est orienté en partie au sud.
  - Les photos hémisphériques ont été analysées (GLA) avec la même configuration de site et de fractionnement de la lumière, et auraient donc dû présenter les mêmes relations avec la distance, ce qui n'est pas le cas.

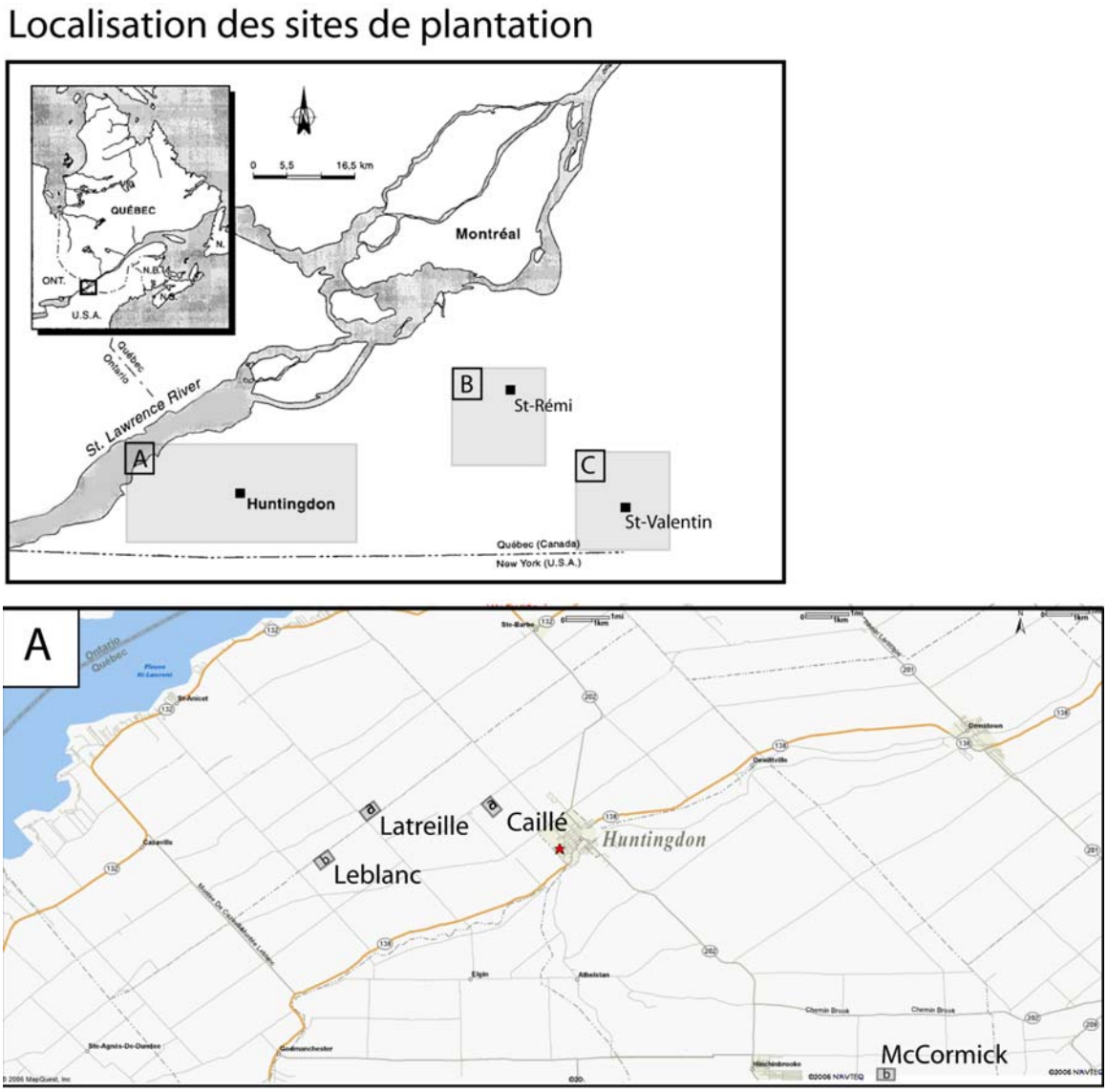
- Nous avions configuré GLA avec un indice d'ennuagement de 0.5 approprié pour la forêt tempérée, or ce paramètre n'existe pas dans SORTIE, expliquant peut-être la différence

Remerciements

Nos remerciements à Daniel Lesieur et Pascal Rochon pour le traitement des images hémisphériques et de cimes, de même que les premiers essais de simulation sur SORTIE. Merci à André-Jean Lalanne et à Loïc d'Orangeville pour la prise des mesures sur le terrain et l'organisation des données. Merci aussi à M. Dany Verteneuil, propriétaire du site.

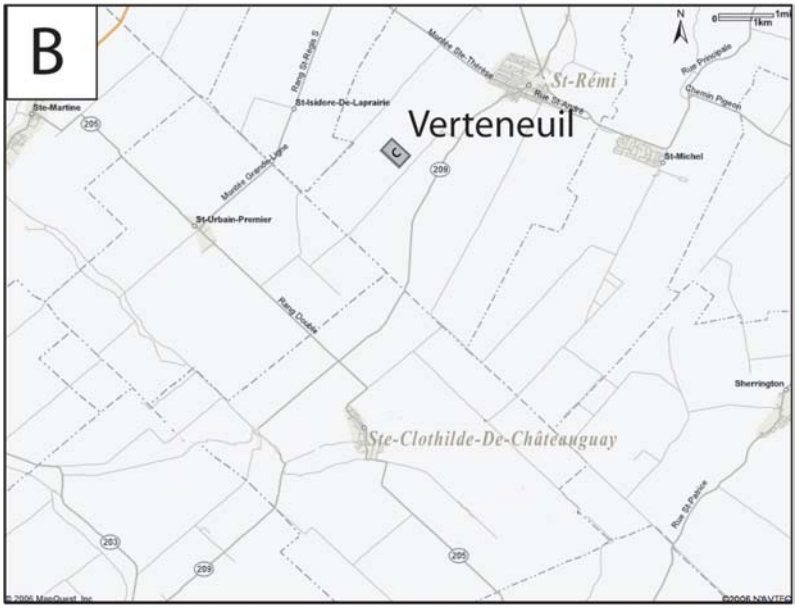
Canham, C. D., et Murphy, L. E. 2005. SORTIE-ND. Institute of Ecosystem Studies, Millbrook (NY). http://www.sortie-nd.org.

Frazer, G. W., Canham, C. D., et Lerstzan, K. P. 2000. Gap light analyzer version 2.0. Bulletin of the Ecological Society of America **81**:191-197.



Annexe 1a- Localisation des dispositifs expérimentaux de plantation.

A (Caillé-Latreille) – plantations de peh combinés à des feuillus initiées en 2002 (voir chapitre II du présent rapport).
B (Leblanc-McCormick) – plantations de peh combinés à des feuillus initiées en 2003 (voir chapitre IV du présent rapport).



Annexe 25b- Localisation des dispositifs expérimentaux de plantation (suite).

C (Verteneuil) – plantations de peh combinés à des feuillus initiées en 2000 (voir chapitre I du présent rapport).
D (Thibodeau) – plantation de peh combinés à des feuillus initiée en 2003 (voir chapitre III du présent rapport).